

# Sécurité sismique des monuments historiques

Processus interdisciplinaire idéal : guide pratique pour les projets de construction



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

Office fédéral de la culture OFC

Office fédéral de la protection de la population OFPP

# Sécurité sismique des monuments historiques

Processus interdisciplinaire idéal : guide pratique pour les projets de construction

# Impressum

## Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

## Auteurs

Friederike Braune, Centrale de coordination pour la mitigation des séismes (OFEV)

Karin Zaugg Zogg, Service spécialisé des monuments historiques de la ville de Bienne, historienne de l'art indépendante

## Accompagnement à l'OFEV

Blaise Duvernay, Centrale de coordination pour la mitigation des séismes (OFEV)

## Services fédéraux spécialisés

Patrik Birrer, service des monuments historiques de la Principauté du Liechtenstein, expert auprès de l'Office fédéral de la protection de la population (OFPP)

Prof. Dr Eugen Brühwiler, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), expert auprès de l'Office fédéral de la culture (OFC)

Rino Büchel, section Protection des biens culturels de l'OFPP  
Brigitte Müller, section Culture du bâti de l'OFC

## Relecture de la version allemande

Prof. em. Hugo Bachmann, École polytechnique fédérale de Zurich

Bernhard Gysin, Dietziker Partner Baumanagement AG, Bâle  
Dr Isabel Haupt, conservatrice suppléante des monuments historiques du canton d'Argovie, membre de la Commission fédérale des monuments historiques

Yves Mondet, Basler & Hofmann SA, Zurich

## Relecture de la version française

Isabelle Claden, claden andermatt architectes, Bienne

## Groupe interdisciplinaire

Prof. Dr Katrin Beyer, EPFL

François Chapuis, département Immobilien und Betrieb, Université de Zurich

Benedikt Graf, Graf Stampfli Jenni Architekten AG, Soleure  
Ueli Krauss, Althaus Architekten AG, Berne

Dr Kerstin Lang, office des ponts et chaussées du canton de Zurich

Dr Pierino Lestuzzi, EPFL

Dr Thomas Lutz, service des monuments historiques du canton de Bâle-Ville

Christian Mehlisch, service de gestion immobilière du canton de Bâle-Ville

Michael Neuenschwander, alb Architektengemeinschaft AG, Berne

Dr Thomas Wenk, Wenk Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik GmbH, Zurich

## Référence bibliographique

OFEV et al. 2021 : Sécurité sismique des monuments historiques. Processus interdisciplinaire idéal : guide pratique pour les projets de construction. Connaissance de l'environnement n° 2106 : 91 p.

## Traduction

Service linguistique de l'OFEV

## Photo de couverture

Vue depuis la Schwartztorstrasse en direction de la Monbijoustrasse à Berne. Ancien bâtiment de la Direction générale des douanes érigé en 1950/1951 et immeubles locatifs construits en 1904.

© F. Braune, K. Zaugg Zogg

## Mise en page

Cavelti AG, Marken. Digital und gedruckt, Gossau

## Crédit photographique

Voir la table des illustrations en annexe

## Téléchargement au format PDF

[www.bafu.admin.ch/uw-2106-f](http://www.bafu.admin.ch/uw-2106-f)

Il n'est pas possible de commander une version imprimée.

Cette publication est également disponible en allemand.

La langue originale est l'allemand.

© OFEV/OFC/OFPP

# Table des matières

<b>Abstracts</b>	<b>5</b>	<b>Annexes</b>	<b>56</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>6</b>	<b>Annexe A Projets réalisés</b>	<b>57</b>
<b>Explications et consignes de lecture</b>	<b>7</b>	<b>Annexe B Schéma du processus interdisciplinaire idéal</b>	<b>76</b>
<b>Introduction</b>	<b>8</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>77</b>
<b>1 Bases et conditions-cadres</b>	<b>10</b>	<b>Glossaire</b>	<b>83</b>
1.1 Sécurité sismique	10	<b>Table des illustrations</b>	<b>91</b>
1.1.1 Tremblements de terre en Suisse	10		
1.1.2 Risque sismique	13		
1.1.3 Le tremblement de terre comme « facteur d'influence » sur une construction	13		
1.1.4 Les tremblements de terre dans le calcul et le dimensionnement des constructions	15		
1.1.5 Droit de diligence, responsabilité et bases légales	18		
1.2 Conservation des monuments historiques	22		
1.2.1 Terminologie et délimitation	22		
1.2.2 Mandat et répartition des compétences	22		
1.2.3 Bases techniques	23		
1.2.4 Monuments historiques : définition technique et légale	24		
1.2.5 Désignation matérielle et formelle, effet juridique	24		
1.3 Proportionnalité des mesures de sécurité sismique	26		
1.3.1 Intérêts publics	27		
1.3.2 Valeur culturelle	27		
<b>2 Processus interdisciplinaire idéal</b>	<b>30</b>		
2.1 Description de la situation initiale	33		
2.2 Relevé de l'état	34		
2.2.1 Investigation de l'ouvrage du point de vue de la conservation des monuments historiques et préparation des données de base	34		
2.2.2 Relevé de l'état du point de vue du génie civil	35		
2.3 Définition des objectifs de protection	39		
2.4 Étude numérique et évaluation de la sécurité sismique	40		
2.5 Élaboration et évaluation d'ébauches de solutions	42		
2.6 Concepts d'intervention et évaluation différenciée déterminant la proportionnalité	48		
2.7 Recommandation d'intervention et décision d'intervention	55		
2.8 Projet d'intervention et réalisation des mesures	55		

---

# Abstracts

This publication contains interdisciplinary guidelines addressed to all players involved in the examination of the seismic safety, as well as the planning and realization of seismic safety interventions on historical monuments. An ideal interdisciplinary process that addresses this problematic in the framework of building projects is presented to Swiss practitioners. In this process, the common discussion of the technical issues in the project team should enable a differentiated approach for the historical monument. Furthermore, synergies between restoration or transformation interventions and seismic safety interventions can be exploited and thus positively influence the proportionality of the seismic measures while respecting preservation principles.

La présente publication constitue un guide interdisciplinaire qui s'adresse à tous les acteurs impliqués dans l'examen de la sécurité sismique, ainsi que dans la planification et la réalisation de mesures de sécurité sismique concernant des monuments historiques. Un processus interdisciplinaire idéal est présenté à l'intention des praticiens de Suisse afin de traiter de cette thématique dans le cadre de projets de construction. Ce processus doit permettre la discussion conjointe des questions techniques au sein de l'équipe de projet et rendre ainsi possible une approche différenciée pour le monument historique. De plus, des synergies entre des mesures de remise en état ou de modification et des mesures de sécurité sismique peuvent ainsi être exploitées et influencer positivement l'évaluation de la proportionnalité des mesures de sécurité sismique tout en respectant les principes de la conservation.

Diese Publikation stellt eine interdisziplinäre Wegleitung dar, die sich an alle Akteurinnen und Akteure wendet, die bei der Überprüfung der Erdbebensicherheit, sowie bei der Planung und Umsetzung von Erdbebensicherheitsmassnahmen an Baudenkmalern involviert sind. Der Schweizer Praxis wird ein idealtypischer, interdisziplinärer Prozess zur Behandlung dieser Problematik bei Bauvorhaben vorgestellt. Dabei soll die gemeinsame Diskussion der fachlichen Fragestellungen im Projektteam den differenzierten Umgang mit dem Baudenkmal ermöglichen. Weiter können damit Synergien zwischen Instandsetzungs- oder Veränderungsmassnahmen und Erdbebensicherheitsmassnahmen genutzt und die denkmalpflegerisch abgestimmte Beurteilung der Verhältnismässigkeit der Erdbebensicherheitsmassnahmen positiv beeinflusst werden.

La presente pubblicazione è una guida interdisciplinare destinata a tutti gli operatori coinvolti nella verifica della sicurezza sismica come pure nella pianificazione e nell'attuazione delle misure di sicurezza sismica dei monumenti storici. Alla prassi svizzera viene presentato un processo interdisciplinare ideale per affrontare questa problematica nell'ambito dei progetti di costruzione. Tale processo deve consentire una discussione congiunta delle questioni tecniche nel gruppo di progetto e garantire pertanto un approccio differenziato per i monumenti storici. Sarà inoltre possibile sfruttare le sinergie tra le misure di ripristino o di riattamento e le misure di sicurezza sismica e influenzare positivamente la valutazione della proporzionalità delle misure di sicurezza sismica nel rispetto dei principi di conservazione dei monumenti storici.

**Keywords:**

*historical monuments,  
seismic safety,  
preservation of monuments,  
interdisciplinarity*

**Mots-clés :**

*monuments historiques,  
sécurité sismique,  
conservation des monuments,  
interdisciplinarité*

**Stichwörter:**

*Baudenkmäler, Erdbebensicherheit, Denkmalpflege, Interdisziplinarität*

**Parole chiave:**

*monumenti storici,  
sicurezza sismica,  
conservazione dei monumenti storici, interdisciplinarietà*

---

# Avant-propos

La Confédération en qualité de propriétaire a pour responsabilité de protéger ses propres constructions et installations contre les séismes, donc également les monuments historiques fédéraux. Les projets de remise en état ou de modification touchant à des monuments historiques de la Confédération soulèvent systématiquement des questions dans les trois disciplines que sont la conservation des monuments, l'architecture et le génie civil. L'Office fédéral de l'environnement (OFEV), en tant que centre de compétence en matière de mitigation des séismes, a donc élaboré le présent guide interdisciplinaire sur la sécurité sismique des monuments historiques, en collaboration avec l'Office fédéral de la culture (OFC) et l'Office fédéral de la protection de la population (OFPP).

En proposant dans ce guide une démarche interdisciplinaire pour le traitement de la sécurité sismique dans les projets de construction concernant des monuments historiques, la Confédération souhaite sensibiliser et responsabiliser davantage toutes les parties prenantes. Nous sommes convaincus que l'approche présentée dans ce guide favorise l'élaboration de mesures de sécurité sismique adaptées sur les plans technique, économique et de la conservation des monuments, qu'elle constitue une recommandation applicable pour toutes les parties impliquées et qu'elle peut servir de base décisionnelle pour les propriétaires.

Paul Steffen  
Sous-directeur  
Office fédéral de  
l'environnement (OFEV)

Oliver Martin  
Chef de la section Culture du bâti  
Office fédéral de la culture (OFC)

Christoph Flury  
Sous-directeur  
Office fédéral de la protection  
de la population (OFPP)

---

# Explications et consignes de lecture

Le présent guide sur la sécurité sismique des monuments historiques est publié par l'OFEV dans sa série « Connaissance de l'environnement ». Les publications de cette série visent à créer une base de connaissances fondée sur des méthodes scientifiques reconnues. S'adressant à un public de spécialistes, elles fournissent des contenus dont la portée technique et la valeur de nouveauté sont d'un niveau élevé. Axées sur l'obtention de résultats concrets, ces publications rédigées de manière claire et compréhensible servent en premier lieu à transmettre des connaissances, des bases de travail, des méthodes et des concepts.

Le guide « Sécurité sismique des monuments » s'entend comme une prestation de l'OFEV à destination des autorités, des spécialistes et des maîtres d'ouvrage. Il formule des recommandations techniques, mais n'a pas de valeur contraignante sur le plan juridique.

Ce guide est exclusivement consacré aux monuments. Si ses différents contenus s'appliquent en principe à tous les bâtiments existants, ils doivent toutefois être cités et expliqués comme se rapportant spécifiquement aux monuments. Pour cette raison, le guide utilise les termes « ouvrage », « bâtiment », « bâtiment existant » et « construction » pour ce qui concerne l'introduction générale au sujet, mais le terme « monument historique » pour les explications concrètes.

Les termes importants sont écrits en caractères **gras**. Ceux qui sont expliqués dans le glossaire à la fin du guide sont écrits en caractères *italiques* à leur première occurrence.

---

# Introduction

En Suisse, les principes normatifs qui régissent la sécurité sismique des bâtiments existants ont été établis en 2004 lors de l'introduction des dispositions du cahier technique SIA 2018 «Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants». Depuis cette date, il est donc possible de s'appuyer sur une base standardisée pour examiner la sécurité sismique des bâtiments existants et mettre en œuvre des mesures de sécurité sismique. Dans ce domaine, les monuments historiques – c'est-à-dire les ouvrages dignes de protection en ce qu'ils témoignent d'époques révolues – occupent une place de plus en plus importante. En 2017, le cahier technique SIA 2018 a été repris dans la norme SIA 269/8. Dans le cas particulier des monuments historiques, les divergences d'opinion sur la façon d'aborder la sécurité sismique dans le cadre d'un projet de remise en état ou de modification, ainsi que les divergences d'interprétation concernant l'objectif de protection et l'évaluation de la proportionnalité des interventions, rendent particulièrement complexe le processus de recherche d'une solution commune.

S'il ne fait aucun doute que la protection des personnes contre les conséquences d'un séisme doit être garantie également dans les monuments historiques, il est toutefois impératif de procéder à un examen différencié et d'évaluer la proportionnalité des mesures de sécurité sismique en tenant compte des intérêts de la conservation de ces monuments.

Le présent guide s'adresse aux acteurs principaux qui interviennent dans l'examen, la planification et la mise en œuvre de mesures de sécurité sismique dans le cadre de projets de construction concernant des monuments. Il s'agit en particulier des propriétaires (en qualité de maîtres d'ouvrage), des architectes, des ingénieurs civils et des conservateurs des monuments historiques.

Le guide se concentre sur des monuments profanes et sacrés de toutes les époques historiques qui, en raison de leur utilisation, présentent un risque pour les personnes en cas de tremblement de terre. Ce sont en principe des immeubles, notamment des écoles, des bâtiments de l'administration publique, des théâtres, des musées, des équipements sportifs et des édifices religieux. Les ponts

ne sont pas traités, car la priorité pour ce type d'ouvrages est moins la protection des personnes que le maintien de leur aptitude au service.

La question de la sécurité sismique des monuments historiques doit être traitée en premier lieu par les propriétaires qui, en qualité de maîtres d'ouvrage, sont responsables de la sécurité dans et aux abords de leur monument, au moins en ce qui concerne la protection des personnes. C'est à eux qu'incombe l'examen de la sécurité sismique de l'ouvrage. En cas de nécessité, il leur revient de faire élaborer et appliquer des mesures de sécurité sismique compatibles avec la protection des monuments historiques et efficaces sur les plans technique et économique, en mandatant et en collaborant avec des spécialistes de plusieurs disciplines.

L'évaluation différenciée et individualisée de la sécurité sismique d'un monument historique suppose obligatoirement de mandater un ingénieur civil spécialisé en génie parasismique et disposant de bonnes connaissances dans le domaine des structures porteuses historiques. L'investissement que représente cette prestation d'expert a une influence déterminante sur la recommandation d'intervention et il est sans commune mesure avec les coûts de construction qu'engendreraient des mesures de sécurité sismique peu pertinentes voire inutiles. Dans les deux autres disciplines que sont l'architecture et la conservation des monuments historiques, il est tout aussi indispensable de recourir à des personnes expertes en sécurité sismique pouvant porter un dialogue interdisciplinaire.

Toutes les personnes impliquées ne partagent pas les mêmes connaissances. Les ingénieurs civils, par exemple, possèdent un savoir restreint concernant les monuments historiques, la valeur culturelle de leur substance bâtie et les principes qui régissent leur conservation et leur entretien. De leur côté, les conservateurs des monuments sont peu familiarisés avec la matière et les exigences de la sécurité sismique. Enfin, les architectes, qui œuvrent en particulier à la coordination des souhaits des usagers, n'ont généralement pas conscience de leur responsabilité en matière de sécurité sismique en qualité de représentants des propriétaires. Cette problématique est la raison

d'être du présent guide : celui-ci introduit le sujet, formule les principes fondamentaux des différentes disciplines et donne des indications et des consignes concrètes sur la façon de procéder lorsque des mesures sont nécessaires pour améliorer la sécurité sismique d'un monument historique concerné par un projet de construction. Ce faisant, il entend aider les acteurs de la pratique à procéder à des planifications efficaces et à œuvrer pour la protection des monuments historiques avec tout le soin requis – et ceci pour toutes les facettes de la notion de protection.

Le processus interdisciplinaire présenté dans cette publication, se voulant idéal du point de vue de toutes les disciplines, ne peut se mettre en place que si les questions techniques sont discutées conjointement au sein de l'équipe de projet, rendant ainsi possible une approche différenciée pour le monument considéré. Ce guide doit montrer que, du point de vue de la conservation des monuments historiques et pour des raisons d'ordre technique et économique, la perspective d'un projet de remise en état ou de modification d'un monument est le meilleur moment pour planifier les mesures de sécurité sismique éventuellement requises. Le projet de construction est en effet l'occasion d'exploiter les synergies qui peuvent exister entre les mesures de remise en état ou de modification (nécessaires quoi qu'il en soit) et les mesures de sécurité sismique compatibles avec la protection des monuments.

Le guide est divisé en trois parties. La première partie, consacrée aux **bases et conditions-cadres** des différentes disciplines, doit aider l'ensemble des parties prenantes à comprendre les schémas de pensée, les principes et les marges de manœuvre des autres acteurs. Ce chapitre introduit les principaux termes, processus et cadres relatifs à la gestion de la sécurité sismique et à la conservation des monuments historiques en Suisse. La deuxième partie s'emploie à définir un **processus interdisciplinaire idéal** pouvant servir de fil conducteur pour les projets de construction. Ce chapitre constitue le cœur du guide. Reprenant les différentes phases d'un projet de construction, il décrit les prestations et les responsabilités des deux disciplines que sont le génie civil et la conservation des monuments historiques, ainsi que les décisions qui doivent être prises durant chaque phase par le propriétaire. Ce processus idéal est basé sur les explications du chapitre précédent. La troisième partie du guide est l'an-

nexe. Elle contient un **recueil d'exemples** émanant de trois projets concrets au cours desquels des examens de la sécurité sismique ont été réalisés et des mesures de sécurité sismique ont été mises en œuvre ; dans chaque cas, la démarche qui a été suivie est comparée avec le processus idéal proposé ici. L'annexe contient également le **schéma de déroulement** du processus interdisciplinaire idéal. Le guide sera complété ultérieurement par la présentation d'un **projet actuel de remise en état**, pour lequel le processus interdisciplinaire idéal sera appliqué et documenté en détail. Tous ces exemples montrent que le traitement de la sécurité sismique des monuments historiques est toujours spécifique à l'objet considéré : chaque monument est unique et doit donc être considéré individuellement.

Ce guide interdisciplinaire a été rédigé par Friederike Braune, spécialiste de la protection contre les séismes (Centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'Office fédéral de l'environnement [OFEV]), et Karin Zaugg Zogg, historienne de l'art indépendante (conservatrice des monuments historiques de la ville de Bienne). Il a été élaboré en collaboration avec Brigitte Müller (section Culture du bâti de l'Office fédéral de la culture [OFC]), Rino Büchel (section Protection des biens culturels de l'Office fédéral de la protection de la population [OFPP]) et Blaise Duvernay (responsable de la Centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'OFEV). De plus, Patrik Birrer (spécialiste de la conservation des monuments historiques dans la Principauté du Liechtenstein et expert auprès de l'OFPP) et Eugen Brühwiler (professeur à l'École polytechnique fédérale de Lausanne [EPFL] et expert auprès de l'OFC) ont accompagné l'élaboration de ce guide.

En vue de garantir son acceptation dans toutes les disciplines concernées, le guide a été validé par un groupe interdisciplinaire composé de représentants de la Confédération, des cantons et du secteur de la recherche, ainsi que de spécialistes du génie parasismique, de l'architecture, de la conservation des monuments historiques et de la protection des biens culturels.

# 1 Bases et conditions-cadres

*Une bonne coopération entre les différentes disciplines appelle un certain degré de connaissance et de compréhension de leurs bases et de leurs conditions-cadres, ainsi que de leurs marges de manœuvre.*

## 1.1 Sécurité sismique

Le présent point introduit les principales bases et conditions-cadres dans le domaine de la sécurité sismique en Suisse. Les termes essentiels et leurs corrélations y sont expliqués. La préparation des bases constitue une étape décisive pour permettre le dialogue et le processus interdisciplinaire idéal visé au deuxième chapitre.

### 1.1.1 Tremblements de terre en Suisse

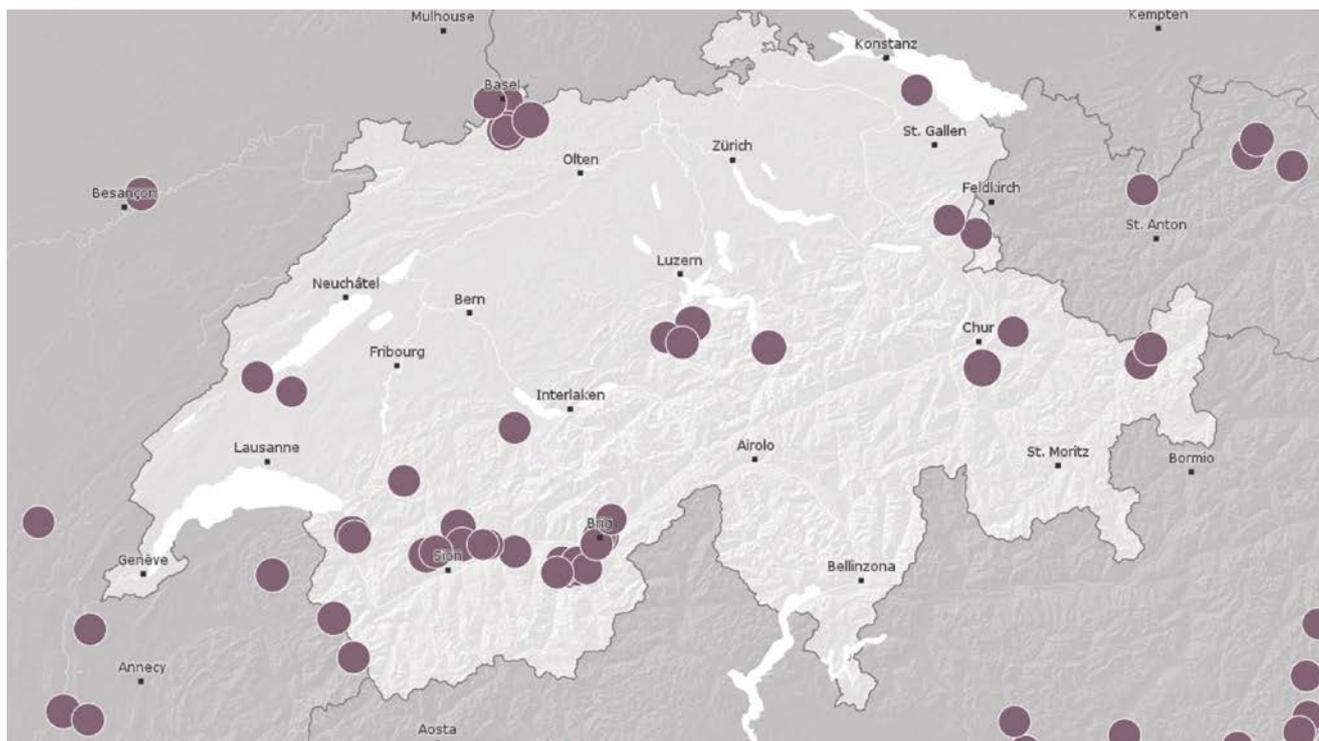
Les tremblements de terre résultent du brusque relâchement de tensions le long de failles dans la croûte terrestre. Les plaques tectoniques étant constamment en mouve-

ment, la tension s'accumule dans les couches rocheuses des deux côtés d'une faille. Lorsque cette tension devient trop grande, elle est libérée subitement, sous la forme de mouvements relatifs des masses rocheuses des deux côtés de la faille. L'énergie sismique ainsi libérée se propage sous forme d'ondes dans le sous-sol jusqu'à la surface de la terre, ce qui provoque les secousses ressenties comme tremblement de terre.

Des séismes de forte intensité sont relativement rares en Suisse, mais peuvent survenir partout (voir fig. 1). Leur *intensité* et leur fréquence, et par conséquent l'aléa, varient toutefois d'une région à l'autre (voir fig. 2).

**Fig. 1 : Carte des séismes historiques d'une magnitude égale ou supérieure à 5**

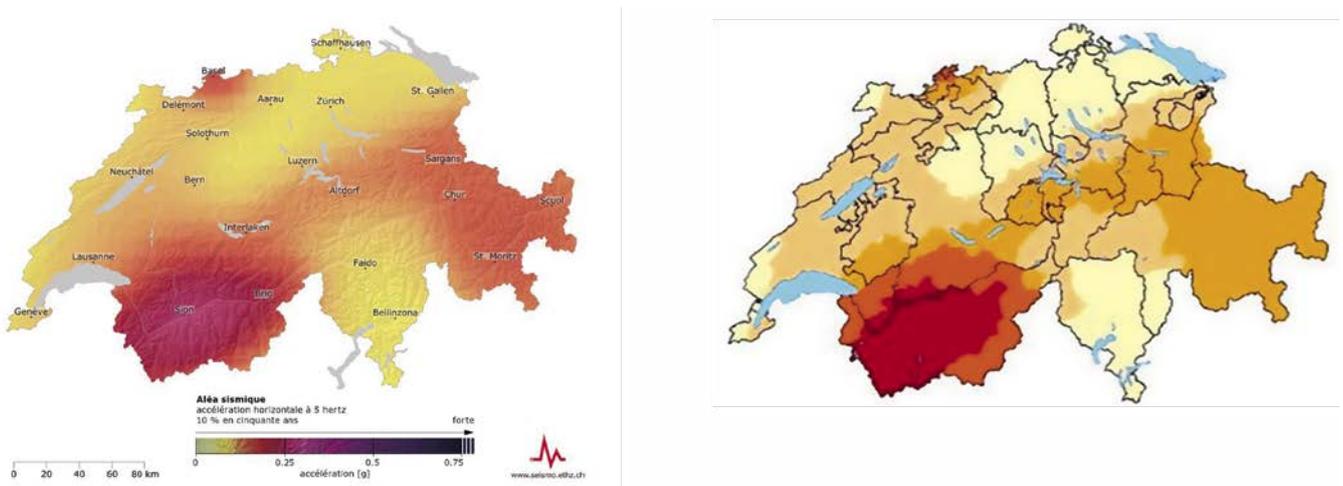
*À partir d'une magnitude de 5 environ, il faut s'attendre localement à des dégâts faibles à moyens aux bâtiments, et éventuellement à des dommages matériels plus importants.*



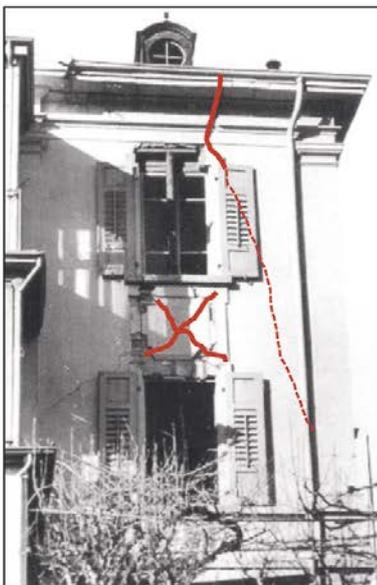
Source : Service sismologique suisse [SED], Catalogue des tremblements de terre en Suisse 2009 [ECOS-09]. Ce catalogue est une compilation des informations macrosismiques historiques relatives à la Suisse et aux régions limitrophes depuis l'an 250 après J.-C. ; il met également à disposition les paramètres sismiques dérivés des enregistrements instrumentaux depuis 1975.

**Fig. 2 : Aléa sismique et zones sismiques**

[À gauche] La carte de l'aléa sismique pour une accélération spectrale horizontale à 5 Hz et une période de retour de 475 ans, selon le modèle de l'aléa sismique pour la Suisse de 2015 [1] et, à droite, la carte révisée des zones sismiques qui en est tirée et qui figure dans la norme SIA 261 [3] « Actions sur les structures porteuses » (2020). Les cinq zones sismiques sont Z1a (jaune clair), Z1b (orange clair), Z2 (orange), Z3a (rouge clair) et Z3b (rouge foncé). En allant dans l'ordre décroissant de l'aléa, les régions les plus exposées sont le Valais en zones 3b et 3a, la région bâloise en zones 3a et 2, la Suisse centrale, la vallée du Rhin st-galloise et les Grisons en zone 2. Le reste de la Suisse se trouve en zones 1a et 1b.

**Fig. 3 : Dégâts dus à des tremblements de terre**

À gauche, 1946 à Sierre (VS), une maison d'habitation et, à droite, 1964 à Sarnen (OW), le Frauenkloster de Sarnen (monument historique classé).



Aucun séisme majeur engendrant des *dommages* importants ne s'est produit en Suisse ces dernières décennies. Il n'en reste pas moins qu'il faut s'attendre, bien que peu fréquemment, à des tremblements de terre causant des dommages en Suisse (à l'instar de celui de 1946 à Sierre, dans le canton du Valais, avec une *magnitude* de 5,8 et une intensité de VIII, ou celui de 1964 à Sarnen, dans le canton d'Obwald, avec une magnitude de 5,7 et une intensité de VII, voir fig. 3).

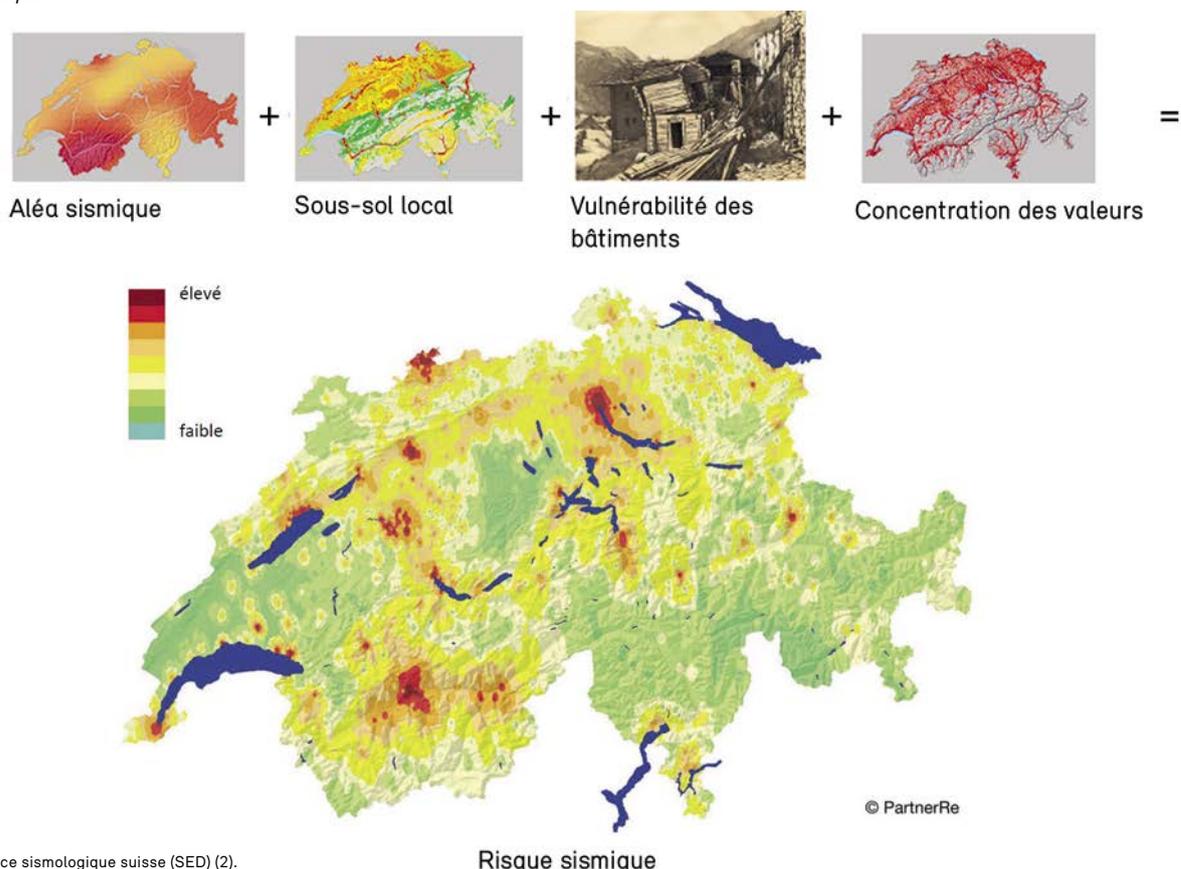
Pour qu'une comparaison avec des séismes qui se sont produits à l'étranger soit pertinente, il faut que la magnitude de l'événement et/ou le *mode de construction* soient similaires à ce que l'on peut rencontrer en Suisse. Différents tremblements de terre – 2009 à L'Aquila, Italie (magnitude 6,3), 2010/2011 à Christchurch, Nouvelle-Zélande (magnitude 7,1/6,3), 2012 en Émilie-Romagne, Italie (magnitude 5,9) ou 2016 à Amatrice, Italie (magnitude

6,0) – fournissent de précieuses informations concernant les dégâts aux bâtiments qui pourraient se produire en Suisse, pas seulement en raison de la magnitude, mais surtout d'un mode de construction similaire.

Les données enregistrées depuis les années 1970 et la révision régulière des estimations se fondant sur les sources historiques concernant l'*aléa sismique* [1] permettent de mieux savoir où il faut escompter des tremblements de terre en Suisse et ceci avec quelle fréquence et quelle intensité. Cependant, comme les mesures ne portent que sur une période relativement courte, soit une cinquantaine d'années, il reste de grandes incertitudes au sujet de la fréquence (*période de retour*) et de la magnitude des séismes possibles en Suisse. À ce titre, le nouveau modèle de l'aléa sismique du Service sismologique suisse de 2015 [1] a augmenté le niveau d'aléa pour une grande partie des cantons de Vaud, de Neuchâtel, de

Fig. 4: Risque sismique

La combinaison des facteurs Aléa sismique, Sous-sol local, Vulnérabilité des bâtiments et Concentration des valeurs permet de déterminer le risque sismique.



Source: Service sismologique suisse (SED) (2).

Fribourg, du Jura et de Berne par rapport au précédent modèle de 2004. Le type de dommages que les séismes pourraient causer aux bâtiments et aux *infrastructures* est en revanche clair.

### 1.1.2 Risque sismique

Le risque sismique est déterminé par la combinaison de différents facteurs: l'aléa sismique, le sous-sol local, la *vulnérabilité* des bâtiments et la concentration des *valeurs* (fig. 4; voir encadré 1).

Le premier facteur décrit l'**aléa sismique**. Celui-ci est modéré en comparaison avec d'autres pays européens. On note toutefois des différences régionales: le Valais est la région avec le niveau d'aléa le plus élevé, suivi de Bâle, des Grisons, de la vallée du Rhin saint-galloise, de la Suisse centrale, puis du reste de la Suisse. La carte de l'aléa sismique (voir fig. 2) illustre la répartition géographique de l'accélération horizontale à laquelle il faut s'attendre pour un certain temps de retour.

Le deuxième facteur décrit le **sous-sol local**. Le terrain sur lequel un bâtiment est construit a une influence considérable sur les mouvements du sol. La *nature du sous-sol* local est responsable de modifications parfois très importantes, sur de courtes distances, de la force (amplitude), de la fréquence et de la durée des secousses lors d'un tremblement de terre.

Le troisième facteur décrit la **fragilité** ou, en d'autres termes, la vulnérabilité des bâtiments, à savoir leur aptitude à résister aux effets d'un séisme. Elle indique les dommages qu'il faut escompter pour un bâtiment en cas de tremblement de terre, en fonction de caractéristiques concernant sa conception, son mode de construction, et ses *matériaux de construction*, etc.

Le quatrième facteur décrit la concentration de **valeurs**. Il s'agit notamment des personnes (le nombre d'habitants ou d'usagers), mais aussi d'autres valeurs comme les valeurs matérielles (bâtiments, infrastructures, biens culturels, etc.).

### 1.1.3 Le tremblement de terre comme « facteur d'influence » sur une construction

Une construction est composée d'une *structure porteuse* et d'*éléments non-structuraux*. La structure porteuse est un ensemble d'*éléments* verticaux et horizontaux (éléments porteurs). Normalement, une construction ou sa structure porteuse est « au repos ». Elle est conçue pour résister aux *charges* verticales relativement constantes telles que son propre poids, la neige ou les charges utiles. Dans le génie civil, le dimensionnement pour ces actions fait partie de la spécialité appelée *statique des structures*, soit la discipline étudiant le comportement de systèmes immobiles (au repos). Un événement sismique représente une action dynamique horizontale et verticale, variable dans le temps, sur la construction et sa structure porteuse. Dans le génie civil, le dimensionnement pour cette action fait partie de la spécialité appelée *dynamique des structures*, soit la discipline étudiant la stabilité de systèmes oscillants (en mouvement). La statique et la dynamique des structures requièrent des connaissances et des méthodes de calcul différentes. Une construction doit posséder une structure porteuse qui résiste aux actions horizontales et verticales, aussi bien statiques que dynamiques. Les bâtiments anciens, érigés selon les règles de l'art en vigueur à l'époque de leur construction, présentent une certaine protection contre les actions horizontales dues aux séismes, grâce à différents aspects de leur mode de construction et au dimensionnement effectué pour assurer une résistance horizontale au vent. Il faut néanmoins partir du principe que les constructions

#### Encadré 1 : Dommages potentiels

Bien que l'aléa sismique en Suisse soit modéré en comparaison internationale, le risque sismique est spécialement élevé dans les agglomérations urbaines. Selon le rapport « Bericht zur nationalen Risikoanalyse. Katastrophen und Notlagen Schweiz 2020 » [88] de l'Office fédéral de la protection de la population (OFPP), les tremblements de terre représentent en Suisse le cinquième risque après les pénuries d'électricité, les pandémies, les pannes de réseau mobile et la canicule. Même si les tremblements de terre sont un danger naturel dont la survenue est plus rare que d'autres événements, ils sont la catastrophe naturelle qui peut entraîner les plus graves dommages, supérieurs par exemple à ceux d'inondations, de tempêtes, d'avalanches ou de glissements de terrain. Les compagnies de réassurance estiment qu'un séisme tel que celui de Bâle en 1356 engendrerait aujourd'hui des dégâts directs aux bâtiments et à leur contenu atteignant entre 50 et 100 milliards de francs; le coût d'un événement comme celui de Viège en 1855 se monterait à 2 à 5 milliards de francs. Pour de nombreux propriétaires, cela signifierait une perte financière catastrophique.

## Encadré 2 : Dégâts typiques associés à des points faibles du point de vue sismique et à des types de structures porteuses vulnérables

Les exemples ci-dessous illustrent les principaux points faibles des bâtiments que l'on rencontre en Suisse, ainsi que les types de structures porteuses vulnérables. Les images de dégâts présentent des comportements typiques de tels bâtiments en cas de séisme.

Un étage « faible » ou « mou » (« soft storey » en anglais) constitue un point faible dans la disposition verticale des éléments porteurs du bâtiment ; les contreventements massifs aux étages supérieurs tels que des murs font défaut au rez-de-chaussée, où des colonnes remplacent des murs massifs. Il en résulte un rez-de-chaussée flexible dans le plan horizontal.

**Fig. E2.1 : Étage « faible » ou « mou » (« soft-storey+ » en anglais)**

[À gauche] l'auditorium HPH de l'École polytechnique fédérale de Zurich (EPFZ) sur le Höggerberg datant de 1970/71 (ZH, monument historique classé), avec rez-de-chaussée « mou » renforcé ultérieurement ; (au milieu) dégâts typiques : immeuble victorien avec rez-de-chaussée « mou » à San Francisco (États-Unis), quasi-effondrement lors du tremblement de terre de 1989 ; (à droite) schéma du mécanisme de rupture.



Les **contreventements asymétriques**, à savoir des éléments porteurs disposés de manière non symétrique, génèrent un point faible dans le plan horizontal. Il en résulte une *torsion* du bâtiment dans ce plan.

**Fig. E2.2 : Contreventements asymétriques**

[À gauche] lycée Neufeld à Berne construit en 1965 (BE, monument historique classé), avec contreventements asymétriques à l'origine ; (au milieu) dégâts typiques : cet immeuble de bureaux comportant des contreventements excentriques a subi une forte torsion lors du séisme de 1995 à Kobe (Japon) ; (à droite) plan d'étage avec cage d'ascenseur excentrée et montrant la torsion du bâtiment qui en résulte.



Les **constructions en maçonnerie avec planchers flexibles** sont un autre exemple de bâtiments présentant un comportement défavorable en cas de tremblement de terre. D'une part, les parois en maçonnerie non armées sont relativement rigides, si bien qu'elles subissent d'importants efforts en cas de séisme. D'autre part, elles sont assez fragiles et présentent une faible capacité de déformation. Les inconvénients résident dans le fait que les planchers flexibles n'assument pas un rôle de diaphragme et que leur liaison avec les parois est faible. La transmission horizontale des efforts des planchers flexibles vers les parois est souvent insuffisante. En outre, la stabilité eu égard au déversement hors plan des parois peut être critique en raison de la liaison insuffisante avec les planchers ou avec les parois verticales orientées perpendiculairement, ce qui peut favoriser une rupture hors du plan (« out of plane »).

**Fig. E2.3 : Constructions en maçonnerie avec planchers flexibles**

[À gauche] bâtiment administratif Bernerhof à Berne construit en 1856-1858 (BE, monument historique classé) et présentant à l'origine une transmission des forces horizontale « plancher-paroi » insuffisante ; dégâts typiques : (au milieu) bâtiment endommagé lors du tremblement de terre de 2012 en Émilie-Romagne (Italie, statut de protection du bâtiment inconnu) ; schéma du mécanisme de déversement.



anciennes, notamment lorsqu'elles présentent certains types de structures porteuses ou des points faibles typiques, peuvent être problématiques au regard des exigences actuelles concernant les séismes dans les normes sur les structures porteuses (encadré 2).

#### 1.1.4 Les tremblements de terre dans le calcul et le dimensionnement des constructions

Les normes suisses concernant les structures porteuses, publiées par la Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), ont été révisées quatre fois au cours des cinquante dernières années quant à la sécurité sismique. Dans les normes successives de 1970, 1989, 2003 et 2020, l'action sismique a trouvé une place de plus en plus importante et les nouvelles connaissances en génie parasismique et en sismologie y ont été intégrées. Avant 2003, la situation de dimensionnement en cas d'événement « séisme » n'était généralement pas prise en compte dans le projet architectural, ni dans les calculs et le dimensionnement des structures porteuses. Les nouvelles constructions réalisées strictement selon les exigences définies dans les normes les plus récentes (norme SIA 261 « Actions sur les structures porteuses », première version de 2003, révisions 2014/2020 [3]) garantissent une grande sécurité pour les personnes et un degré de vulnérabilité des bâtiments qui est acceptable pour la société (voir encadré 3).

L'action sismique pour un *bâtiment existant*, et donc pour un *monument historique*, est influencée par trois paramètres :

- L'aléa sismique, donc la **zone sismique Z**, à l'endroit où se situe le bâtiment. L'aléa sismique est pris en compte pour la vérification de la sécurité sismique à travers la valeur de vérification de l'*accélération horizontale du sol* (voir fig. 1).
- Les caractéristiques du sous-sol local, à savoir du terrain de fondation sur lequel a été construit le monument historique. Cet aspect est couvert dans la vérification par la détermination de la **classe de terrain de fondation**.
- L'utilisation ou la fonction du monument historique qui définit les valeurs à protéger. Cet aspect est intégré dans la vérification par le biais de la **classe d'ouvrages (CO)** à laquelle la construction doit être attribuée (voir encadré 4).

La conception et les aspects constructifs influent sur la vulnérabilité d'une construction. Les points faibles au niveau sismique d'un monument historique sont reflétés numériquement dans le résultat de l'examen de la sécurité sismique, sous la forme d'un **facteur de conformité** (voir encadré 5).

### Encadré 3 : Situation d'examen et états-limites

Le terme **situation d'examen** est introduit pour les structures porteuses existantes, par analogie à la « situation de dimensionnement » utilisée pour les structures porteuses de nouvelles constructions. Cette distinction met en évidence le fait que les structures porteuses existantes, avec leurs caractéristiques données, sont examinées pour une situation de danger ou un état d'utilisation spécifique. Une étude numérique de la sécurité sismique doit être effectuée dans le cadre de cet examen ; c'est-à-dire que l'analyse structurale et les vérifications pour les monuments historiques se font par analogie aux principes pour les constructions neuves dans la norme SIA 260 « Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses » [6].

Cette dernière distingue les actions sur une construction en trois catégories dites **permanente, variable et accidentelle**, sur la base de leur variation dans le temps. Au nombre des actions permanentes, il y a le poids propre (p. ex. la masse de la structure porteuse) et les surcharges (p. ex. des remblais de terre ou installations fixes). Les actions variables comprennent notamment les charges utiles, les charges de vent ou de la neige. Outre les actions liées à des chocs ou à des incendies, les tremblements de terre font partie des actions dites accidentelles. Ces dernières présentent une probabilité d'occurrence faible ; elles sont en règle générale de courte durée, mais leur effet est considérable. La norme SIA 260 distingue en conséquence entre les **situations de dimensionnement durables, transitoires et accidentelles**. Une situation de dimensionnement accidentelle prend donc en compte les actions accidentelles agissant sur la structure porteuse.

Ces mêmes bases s'appliquent à l'examen de bâtiments existants, ce qui signifie que les actions sismiques représentent une situation d'examen accidentelle pour ces constructions (et donc aussi pour les monuments historiques). Un état déficient ressortant d'une situation d'examen accidentelle n'est acceptable que si les exigences minimales en matière de sécurité des personnes sont satisfaites et que des interventions se révélaient disproportionnées (voir encadré 5).

En règle générale, l'étude numérique de la sécurité sismique est effectuée pour des états-limites. Il convient de prouver que les états-limites pertinents pour la structure porteuse ne sont pas dépassés, c'est-à-dire que la construction ou ses éléments sont conçus de manière à être fonctionnels pour l'utilisation et la durée d'utilisation prévues. On distingue entre l'**état-limite de la sécurité structurale** et l'**état-limite de l'aptitude au service**.

L'état-limite de la sécurité structurale sous action sismique concerne la sécurité de la structure porteuse et la sécurité des personnes. Il faut évaluer des critères concernant aussi bien la stabilité globale de la structure porteuse que la résistance ultime d'éléments porteurs individuels (y compris les appuis et les fondations). L'état-limite de l'aptitude au service sous action sismique concerne l'aptitude au fonctionnement de la construction. L'examen numérique consiste par conséquent à vérifier si les dimensions, les matériaux de construction et leurs propriétés, ainsi que la disposition constructive de la structure porteuse répondent aux exigences posées pour ces états-limites. La vérification de la sécurité structurale sous action sismique doit toujours être effectuée. La vérification de l'aptitude au service n'est nécessaire que pour les monuments historiques qui ont une fonction d'infrastructure vitale (voir encadré 4).

Quelques chiffres : 52 % des bâtiments en Suisse ont été construits avant 1970 ; 22 % l'ont été entre 1971 et 1989 ; seulement 26 % datent d'après 1990, dont 12 % ont été construits selon les normes de 2003 en vigueur actuellement [4]. En d'autres termes, quelque 88 % du parc immobilier suisse date d'avant 2003. Ces bâtiments ont été conçus sans tenir compte de la situation de danger séisme selon les normes actuellement en vigueur. Leur sécurité sismique est par conséquent inconnue jusqu'à ce qu'une vérification explicite ait été réalisée.

Le cahier technique SIA 2018 « Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants » [6], publié en 2004, a apporté une réponse à la question de savoir comment traiter de la sécurité sismique des constructions pour lesquelles cet aspect n'a pas été considéré lors de la conception. Par analogie aux normes de la SIA (260 ss) sur les nouvelles structures, une nouvelle série de normes (SIA 269 ss) a vu le jour à partir de 2011 pour la maintenance des structures porteuses. La norme mère, SIA 269

« Bases pour la maintenance des structures porteuses » [5], fixe les grands principes. Elle décrit la démarche à suivre pour traiter les *ouvrages* existants de tous types en tenant compte de leur *valeur de maintenance*. En règle générale, la vérification doit se faire selon la procédure *déterministe*, à savoir selon les principes inscrits dans la norme SIA 260 « Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses » [6]. La norme SIA 269 autorise toutefois, sous certaines conditions, la *vérification probabiliste*. Cette dernière peut ainsi être indiquée notamment si les connaissances concernant les structures porteuses et leur état sont particulièrement bonnes ou lacunaires, ou si une défaillance de ces structures aurait d'importantes conséquences. En 2017, à la suite d'une révision totale, le cahier technique SIA 2018 a été refondu dans la norme SIA 269/8 « Maintenance des structures porteuses – Séismes » [7], qui est venue s'ajouter à la série des normes de maintenance (voir encadré 6).

#### Encadré 4 : Classes d'ouvrages selon les normes SIA 261 [3] et SIA 269/8 [72]

L'attribution d'un monument historique à une classe d'ouvrages (CO) détermine l'*objectif de protection*. La classe d'ouvrages est fixée selon les normes SIA 261 (ch. 16.3) et SIA 269/8 (ch. 9.1.6). Les critères sur lesquels se fonde cette attribution sont l'occupation moyenne par des personnes PB (nombre moyen de personnes se trouvant dans un ouvrage ou aux alentours de celui-ci, qui sont menacées en cas de défaillance de l'ouvrage, considéré pendant sa durée d'utilisation), l'occupation maximale par des personnes  $PB_{max}$  (nombre de personnes autorisé dans l'ouvrage selon les prescriptions anti-incendie), les *dommages potentiels* et la menace pour l'environnement en cas de défaillance, ainsi que l'importance de l'ouvrage immédiatement après le séisme pour les opérations de secours, de prise en charge des victimes, de maintien de l'ordre et de lutte contre les dommages secondaires (p. ex. incendies). Chaque monument historique est attribué à l'une des trois classes d'ouvrages selon les critères susmentionnés.

**Classe d'ouvrages CO III** Sont classés dans cette catégorie les monuments historiques qui ont une fonction d'infrastructure vitale, à l'instar d'hôpitaux accueillant des urgences (y compris les installations et équipements) ainsi que les ouvrages, installations et équipements servant à la protection de la population et revêtant une importance vitale pour la maîtrise d'un événement (p. ex. centre d'intervention des sapeurs-pompiers, garages d'ambulances). Les ouvrages vitaux pour l'approvisionnement, l'évacuation et les télécommunications font également partie de la CO III.

**Classe d'ouvrages CO II** Occupation par des personnes (PB) > 50 ou  $PB_{max}$  > 500; pour les écoles et les jardins d'enfants,  $PB_{max}$  > 10; pour les bâtiments de l'administration publique,  $PB_{max}$  > 10. Le monument historique contient ou comprend des biens et des équipements de grande valeur, il a une fonction d'infrastructure importante ou sa défaillance menace des constructions voisines qui ont une fonction d'infrastructure vitale. La CO II englobe par exemple les bâtiments de l'administration publique, les théâtres, les écoles, les églises, les centres commerciaux, les stades et les cinémas.

**Classe d'ouvrages CO I** Tous les autres monuments historiques sont attribués à la CO I, dans la mesure où tout dégât environnemental est exclu.

Les hôpitaux, avec leurs installations et leurs équipements, ainsi que les installations et équipements servant à l'approvisionnement, à l'évacuation et aux télécommunications sont attribués à la CO II, à moins qu'ils ne doivent être classés dans la CO III. Pour évaluer la proportionnalité des mesures, la norme SIA 269/8 fait une distinction entre CO II-s (écoles et jardins d'enfants), CO II-i (ouvrages ayant une fonction d'infrastructure importante) et CO II (sans CO II-s et CO II-i).

#### Encadré 5 : Facteur de conformité et risque individuel

Le facteur de conformité  $\alpha$  a été introduit en 2004, dans le cahier technique SIA 2018 [7]. Il s'agit d'une valeur numérique indiquant dans quelle mesure un monument historique satisfait aux exigences définies dans les normes auxquelles les nouvelles constructions sont soumises. En accord avec la norme SIA 269, il est aujourd'hui défini dans la norme SIA 269/8 [72] comme étant le « rapport entre l'action sismique qui provoque la défaillance nominale d'un élément de construction et la valeur d'examen de l'action sismique ».

Il convient de distinguer entre les facteurs de conformité ci-dessous lors de la vérification de la sécurité sismique :

- facteur de conformité minimal  $\alpha_{min}$
- facteur de conformité établi lors de l'examen (état actuel)  $\alpha_{eff}$
- facteur de conformité après la mise en œuvre d'une mesure visant à améliorer la sécurité sismique (intervention)  $\alpha_{int}$

Le facteur de conformité minimal  $\alpha_{min}$  garantit que le risque pour les personnes (droit de l'individu à la sécurité = *risque individuel*) est acceptable et définit le niveau de sécurité minimal requis pour le monument historique. Le cahier technique SIA 2018, puis la norme SIA 269/8, qualifient le risque individuel d'acceptable si la probabilité annuelle de décès ne dépasse pas la valeur de  $1 \times 10^{-5}$ . Ce niveau de risque a été défini en comparaison avec d'autres risques, par exemple le risque d'incendie dans un bâtiment. Des études ont montré qu'en partant d'environ un quart des actions de dimensionnement pour les nouvelles constructions, on aboutit à un risque individuel de  $1 \times 10^{-5}$  par année [89]. Le critère d'acceptabilité du risque pour les personnes est considéré comme rempli lorsque la vérification indique que le facteur de conformité est plus grand ou égal au facteur de conformité minimal  $\alpha_{min}$ .

Pour les monuments historiques de la classe d'ouvrages I et II (exception faite des CO II-s et CO II-i), le facteur de conformité minimal  $\alpha_{min}$  est égal à 0,25. Autrement dit, les exigences minimales en matière de protection des personnes auxquelles doit satisfaire un monument historique dans un tel cas sont respectées lorsque la vérification de la sécurité structurale est remplie pour une action sismique avec une période de retour de respectivement 50 et 70 ans (correspondant à 25 % de l'action sismique de dimensionnement pour les constructions neuves). Pour les monuments historiques affectés à la CO II-s (écoles et jardins d'enfants), la CO II-i (infrastructures importantes) ou la CO III, la norme requiert un facteur de conformité minimal  $\alpha_{min} = 0,4$ . Les exigences minimales en matière de protection des personnes auxquelles doit satisfaire un monument historique des CO II-s, CO II-i ou CO III sont respectées lorsque la vérification de la sécurité structurale est remplie pour une action sismique avec une période de retour d'environ 200 ans (correspondant à 40 % de l'action sismique utilisée pour le dimensionnement des constructions neuves). Ces conditions minimales doivent être remplies indépendamment de la durée d'utilisation du monument historique dans son affectation actuelle (la « durée d'utilisation restante » selon les normes SIA 269 [5] et SIA 269/8).

Le facteur de conformité pour l'état actuel  $\alpha_{eff}$  découle de l'examen numérique de la sécurité structurale du monument historique. Le facteur de conformité après la mise en œuvre de mesures visant à améliorer la sécurité sismique (intervention)  $\alpha_{int}$  découle des calculs effectués, en incluant les *mesures de sécurité sismique* prévues ou réalisées.

### Encadré 6 : Norme SIA 269/8 « Maintenance des structures porteuses – Séismes » [72]

L'examen de la sécurité sismique de bâtiments existants, donc également des monuments historiques, est réglé dans la norme SIA 269/8, qui fournit les informations nécessaires et définit la marche à suivre. La norme SIA 269/8 indique aux ingénieurs en génie civil comment contrôler et évaluer les monuments historiques quant à leur sécurité sismique. La norme se concentre sur des bâtiments individuels. Elle permet d'utiliser des méthodes de calcul alternatives et de considérer ainsi le bâtiment de façon plus nuancée que pour les constructions neuves, pour lesquelles on applique des méthodes de calcul largement connues et souvent simplifiées. Il est ainsi possible de déterminer, en particulier pour les monuments historiques, le comportement effectif sous action sismique de manière plus réaliste. L'application de ces méthodes de calcul suppose des connaissances approfondies en génie parasismique.

L'examen de la sécurité sismique des monuments historiques suit le principe énoncé dans les normes SIA 269 et SIA 269/8 ; elle est subdivisée en cinq étapes :

- Relevé d'état
- Étude de la conception et des dispositions constructives de l'ouvrage existant
- Étude numérique de la sécurité sismique (analyse structurale et vérifications)
- Évaluation de la sécurité sismique
- Recommandations d'intervention avec appréciation de la proportionnalité

Ces étapes doivent être suivies lors d'une première vérification générale, puis si nécessaire répétées, entièrement ou partiellement, dans le cadre d'une ou de plusieurs analyses détaillées. Le degré d'approfondissement d'une étude détaillée dépend en grande partie de la qualité des informations disponibles sur l'ouvrage, de l'importance culturelle de ce dernier et des résultats de l'étude générale.

L'étude générale porte sur l'ensemble de la construction. Lorsque l'étude générale ne permet pas d'apporter la preuve que les exigences en matière de sécurité sismique sont satisfaites, il convient d'évaluer les simplifications (notamment l'idéalisation du *modèle de la structure porteuse*) et la précision (p. ex. les hypothèses posées pour les propriétés des matériaux de construction).

L'étude détaillée de la sécurité sismique peut se limiter à des éléments choisis de l'ouvrage ; elle se révèle souvent utile pour les monuments historiques, car elle peut fournir des résultats plus précis et proches de la réalité et donc parfois moins conservateurs concernant le niveau de la sécurité sismique. Elle peut reposer sur des modèles de la structure porteuse plus précis et des méthodes de calcul plus sophistiquées, réduisant ainsi, par des hypothèses plus proches de la réalité, le conservatisme des hypothèses (= hypothèses « sûres » pour les incertitudes ou les connaissances lacunaires, notamment en ce qui concerne les propriétés des matériaux de construction, la structure porteuse, la capacité portante de certains éléments ou les types de liaisons entre les éléments) de l'étude générale.

En principe, une étude générale qui ne permet pas d'établir que les exigences en matière de sécurité sismique sont remplies est suivie d'un examen détaillé. C'est uniquement lorsque ce dernier confirme un résultat insuffisant pour la sécurité sismique qu'il faut envisager des solutions pour remédier à cette situation et élaborer des concepts d'intervention.

#### 1.1.5 Droit de diligence, responsabilité et bases légales

D'un point de vue juridique, la question de la sécurité sismique des monuments historiques revêt de l'importance pour le propriétaire d'une part, mais aussi pour les architectes et les ingénieurs qui sont chargés d'élaborer et de réaliser les interventions sur les monuments historiques. Les propriétaires portent la responsabilité pour l'ouvrage selon l'art. 58 (vices de construction, défaut d'entretien) du Droit des obligations CO [8] ; ils répondent des dommages subis par un tiers en raison des vices de l'ouvrage [9] (voir encadré 7).

Dans le domaine de la construction, la sécurité sismique est réglée dans les lois sur la construction et différentes normes. Les premières s'inscrivent dans la législation publique en matière de construction, tandis que les secondes sont élaborées dans le cadre d'un ensemble de

normes de la Société suisse des ingénieurs et des architectes. En leur qualité de bases techniques, ces normes sont directement reliées au droit public. La législation sur les constructions en général, ainsi que la compétence en matière de construction parasismique relèvent des attributions des cantons et sont par conséquent traitées de manière très diverse. Le principe que les bâtiments ne doivent mettre en danger ni des personnes ni des choses est inscrit dans toutes les législations cantonales. Cette sécurité ainsi que l'aptitude au service, la durabilité et l'économicité des bâtiments et des installations sont garanties par le respect des normes de la SIA.

Les architectes et les ingénieurs qui sont en charge de projets sur des monuments historiques doivent veiller à une exécution soignée des travaux pour leurs commanditaires (clients, *maîtres d'ouvrages*). En vertu du devoir de diligence généralement applicable, ils sont tenus (au

### Encadré 7 : Responsabilité du propriétaire d'ouvrage et défauts de l'ouvrage [9]

La responsabilité du propriétaire d'ouvrage est une responsabilité causale simple, c'est-à-dire qu'il répond également des dommages si le défaut de l'ouvrage résulte d'un hasard ou de la faute d'un tiers. Le propriétaire d'un ouvrage ou d'une maison doit veiller à ce que son bien, en cas d'utilisation conforme à sa destination, ne mette en danger ni les personnes ni les choses.

Selon la norme SIA 260 « Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses » [6], un défaut de l'ouvrage est l'absence d'une caractéristique que celui-ci devrait présenter selon les règles de l'art actuellement reconnues ou selon un accord. Il convient de répondre à la question de savoir si un ouvrage présente des défauts au sens de l'art. 58 CO [8] en tenant compte de son affectation et de ce que l'on sait d'expérience au sujet de ce qui s'est passé à cet endroit.

Les tremblements de terre d'une intensité pouvant causer de légers dommages aux monuments historiques (à partir de l'intensité VI selon l'échelle macrosismique européenne, EMS-98 [90]) font tout à fait partie de l'expérience de vie en Suisse. Cette expérience de vie repose sur la durée statistique d'une vie humaine (actuellement 82 ans [91]) et sert à délimiter la responsabilité du propriétaire de l'ouvrage par rapport aux cas de force majeure. Cela signifie concrètement qu'un monument historique qui ne résiste pas à l'action sismique ayant une période de retour allant jusqu'à 80 ans est considéré comme présentant un défaut au sens de l'art. 58 CO. Cela correspond, pour la période de retour, à un facteur de conformité minimal  $\alpha_{\min}$  d'environ 0,25 pour les ouvrages des CO I et II (voir encadré 4 au point 1.1.4) selon la norme SIA 269/8. Cette dernière stipule qu'un bâtiment existant doit présenter au moins 25 % de la sécurité sismique qui est exigée pour un nouvel ouvrage. Pour les ouvrages ayant une « affection d'ordre supérieur » et qui sont attribuées aux CO II-s (écoles et jardins d'enfants), CO II-i (ouvrages ayant fonction d'infrastructure importante) et CO III (ouvrages ayant fonction d'infrastructure vitale), un niveau de sécurité minimal supérieur (facteur de conformité minimal  $\alpha_{\min}$  de 0,40) est exigé avec une période de retour de l'action sismique à considérer plus importante (env. 200 ans).

même titre que les entreprises de construction) de respecter les règles reconnues de la technique (art de la construction) lorsqu'ils érigent un bâtiment (art. 398 et art. 364 CO ainsi que art. 1.2.1 SIA 102 [10] et art. 1.2.1 SIA 103 [11]). Si ces règles ne sont pas respectées intentionnellement dans le cadre de la direction du projet et/ou de la réalisation d'un ouvrage, et que des personnes sont de ce fait mises en danger, les architectes et les ingénieurs se rendent punissables [12]. Les règles techniques « reconnues » sont celles qui ont été admises comme étant correctes par la science ou en théorie, qui sont établies et dont la majorité des utilisateurs spécialisés estiment qu'elles ont été éprouvées dans la pratique. La *présomption légale* que les normes SIA sont les règles reconnues de la technique est valable dans le secteur de la construction. L'exécution soignée englobe l'obligation de tenir compte des aspects de la sécurité sismique dans le cadre d'un examen du monument historique et d'attirer l'attention des mandants sur d'éventuelles carences en la matière. La Confédération, plus précisément les services de la construction et des immeubles (SCI), en leur qualité de représentants du propriétaire, entretiennent leurs bâtiments existants, monuments historiques compris, en appliquant les normes de la SIA selon les directives internes de l'administration fédérale, et veillent à garantir la qualité de la construction parasismique pour les constructions et les installations de la Confédération, en Suisse et à l'étranger. La Centrale de coordination pour

la mitigation des séismes de l'OFEV élabore, en collaboration avec le SCI, des aides à l'exécution afin de garantir cette qualité.

Certains cantons (p. ex. Bâle-Ville et le Valais) disposent de leurs propres bases légales pour les bâtiments existants, y compris les monuments historiques, dans lesquelles ils définissent des exigences précises en matière de construction parasismique ; ils vérifient que ces dernières sont bien respectées avant d'octroyer un permis de construire. D'autres cantons exigent une sécurité sismique suffisante pour les bâtiments existants (p. ex. Argovie et Fribourg), alors que d'autres demandent d'une manière générale que les normes en vigueur soient respectées (p. ex. Nidwald et Zurich). D'autres encore requièrent au moins que les règles de l'art soient respectées lors de l'entretien de bâtiments existants (p. ex. Glaris et Appenzell Rhodes-Intérieures).

#### 1.1.6 Vérification obligatoire, motif de l'examen et mise en œuvre des mesures

Il y a trois éléments à mettre en évidence en rapport avec la sécurité sismique d'un bâtiment existant, donc aussi d'un monument historique : l'obligation générale d'examen incombant aux propriétaires, le motif ou le moment de l'examen de la sécurité sismique et la réalisation des mesures de sécurité sismique qui s'avèreraient nécessaires.

En vertu de la norme SIA 469 « Conservation des ouvrages » [13] (ch. 3.2.1.3), un examen de la sécurité sismique des monuments historiques «... est indispensable si [...] une opération de *remise en état*, de rénovation ou de transformation, est envisagée. Il est également nécessaire lorsqu'un important changement d'utilisation doit avoir lieu.» En conséquence, la norme SIA 269 «Bases pour la maintenance des structures porteuses» (ch. 6.1.2.2) exige l'examen des monuments historiques en raison des nouvelles connaissances en matière de construction parasismique et de sismologie, ainsi que du renforcement des prescriptions relatives à la sécurité sismique dans les normes SIA sur les structures porteuses (voir encadré 8).

En d'autres termes, il existe, en principe, une **obligation d'examen** pour les propriétaires de monuments historiques, ce depuis 1970 (puis à nouveau depuis 1989, 2003 et 2011), à savoir depuis l'introduction de changements en matière de prescriptions de sécurité sismique dans les normes de structures porteuses. Un **examen de la sécurité sismique** est donc incontournable ; seul le moment idéal pour y procéder est sujet à discussion.

L'**examen de la sécurité sismique** peut avoir lieu dans le cadre d'un **examen préliminaire**. Dans le cas d'un grand parc de monuments historiques, il est recommandé de dresser un inventaire général et de réaliser un relevé sélectif [14] des objets eu égard à leur sécurité sismique.

Sur cette base, il est possible de fixer des priorités dans la gestion du parc immobilier en se fondant sur le risque afin d'examiner en priorité les bâtiments critiques, dont le taux d'occupation est élevé et/ou dont la valeur culturelle et/ou la fonction sont importantes. D'autres aspects doivent être pris en compte dans la planification des examens, à savoir les capacités financières des propriétaires et l'orientation stratégique de la gestion du parc immobilier. Le canton de Bâle-Ville a ainsi débuté en 2019 par l'examen d'un groupe de monuments historiques choisis dans son parc immobilier. Ces examens préliminaires ont été effectués par un groupe d'experts et le canton a ensuite élaboré un plan d'action stratégique sur la base des résultats.

Selon le ch. 3.2.1.3 de la norme SIA 469 (remise en état, rénovation, transformation, changement d'utilisation), un examen de la sécurité sismique est obligatoire au plus tard lorsqu'un **projet de construction** est prévu pour un monument historique. Les interventions concrètes destinées à améliorer la sécurité sismique d'un bâtiment sont en effet plus efficaces et plus économiques lorsqu'elles sont conçues et réalisées dans le cadre d'un projet de construction global, telles qu'une remise en état ou une modification (transformation ou changement d'utilisation).

La norme de base SIA 269 ne traite que de la mise en œuvre de mesures urgentes de sécurité, qui ne s'appliquent généralement pas à la sécurité sismique. La norme SIA 269/8 évite sciemment de définir un cadre temporel pour

#### Encadré 8 : Critères pour la mise en œuvre de mesures de sécurité sismique pour les monuments historiques de la Confédération

Les monuments historiques fédéraux sont examinés quant à leur conformité en matière de sécurité sismique au plus tard lorsque des travaux sont projetés. Ceci se produit généralement dans le cadre d'un examen préliminaire.

Les mesures de sécurité sismique éventuellement nécessaires sont alors élaborées et leur proportionnalité évaluée, si des **interventions substantielles** sont prévues dans le cadre du projet de construction planifié. Cette démarche offre un important potentiel de synergies avec les mesures de sécurité sismique nécessaires. Des interventions substantielles sont par exemple des travaux importants sur un étage ou localement sur l'ensemble des étages (p. ex. ajout d'un ascenseur), la réparation ou le renouvellement des façades ou encore un assainissement énergétique.

Les mesures de sécurité sismique éventuellement nécessaires sont dans tous les cas élaborées et évaluées quant à leur proportionnalité, si le volume d'investissement total du projet de construction **dépasse 10 millions de francs suisses** ou si le monument historique remplit une **fonction d'infrastructure importante** au sens de la norme SIA 269/8 (CO II-i), ou s'il s'agit d'une école ou d'un jardin d'enfants (CO II-s).

Les mesures de sécurité sismique éventuellement nécessaires ne sont généralement pas élaborées si le volume d'investissement total du projet de construction est **inférieur à 1 million de francs suisses et à 10 % de la valeur du bâtiment**, que le monument historique ne remplit aucune fonction importante au sens de la norme SIA 269/8 (CO II-i) et qu'il ne s'agit ni d'une école ni d'un jardin d'enfants (CO II-s). Dans ce cas, la réalisation des mesures de sécurité sismique éventuellement nécessaires serait généralement disproportionnée.

la réalisation des mesures de sécurité sismique, puisqu'il s'agit en premier lieu d'une question juridique, qui doit être réglée par la législation sur les constructions et la jurisprudence. Le cahier technique SIA 2018 de 2004 soulignait dans son annexe informative que « afin d'engager les moyens à disposition de manière rentable du point de vue économique, il faut faire des réflexions sur l'établissement de priorités pour la réalisation des mesures de renforcement. Il est pertinent de lier les mesures de renforcement avec des travaux de transformation et/ou d'assainissement général planifiés ». Des cours d'introduction relatifs à la norme SIA 269/8, ont été tenus à l'EPFZ en juin 2019 et à l'EPFL en novembre 2019. À cette occasion, il a été recommandé d'utiliser le facteur de conformité de l'état actuel  $\alpha_{\text{eff}}$  comme critère d'appréciation pour le cadre temporel de la mise en œuvre. Plus ce facteur est bas, plus une intervention rapide est conseillée. Dans la mesure du possible, le confortement parasismique devrait être coordonné avec une remise en état générale afin de mettre à profit les synergies. Cette stratégie permet notamment d'éviter que les conséquences financières pour l'exploitation découlant de l'adaptation de la structure porteuse ne soient imputées qu'aux mesures de sécurité sismique. Car il est indiscutable que la réalisation des mesures parasismiques qui se révéleraient nécessaires sera plus raisonnable et plus efficace, et donc plus proportionnelle en termes économiques, si elle a lieu dans le cadre d'un projet de remise en état ou de modification du bâtiment. [15].

Si des interventions sur la structure porteuse sont prévues lors d'un projet de construction relatif à un monument historique, un examen s'impose dans tous les cas. Les interventions sur des éléments porteurs (p. ex. parois, cadres, contreventements) ou à des endroits qui sont importants pour la transmission des efforts (p. ex. ouvertures dans les dalles) sont des exemples typiques. D'autres interventions possibles sont la suppression ou l'adjonction d'éléments porteurs. En cas d'intervention sur la structure porteuse, le canton d'Argovie demande par exemple une « déclaration relative à l'examen de la sécurité sismique » dans le cadre du permis de construire. Celle-ci doit être signée par le propriétaire, l'architecte et l'ingénieur. Outre les résultats de l'examen, il faut également y indiquer les mesures de sécurité sismique éventuellement nécessaires et renseigner quant à la décision de les mettre en œuvre [16].

C'est uniquement si une vérification approfondie (voir encadré 6) a montré qu'un monument historique ne remplit pas les exigences en matière de sécurité sismique qu'un projet d'intervention doit être élaboré. Le propriétaire est obligé de mettre en œuvre les **mesures de sécurité sismique** nécessaires pour que les exigences minimales relatives au risque individuel (encadré 5) soient respectées. En d'autres termes, il faut, dans le cadre du projet de construction planifié, prendre au moins les mesures qui sont nécessaires pour que la sécurité sismique du monument historique atteigne les valeurs requises par la norme SIA 269/8, soit un facteur de conformité minimal  $\alpha_{\text{min}} = 0,25$  (CO I et II) ou 0,40 (CO II-s, II-i et III) (encadré 5). Selon l'interprétation actuelle du droit, les propriétaires sont en revanche libres de décider à quel moment ils souhaitent réaliser des mesures de renforcement proportionnelles additionnelles afin de parvenir à une sécurité sismique allant au-delà du facteur de conformité minimal  $\alpha_{\text{min}}$ . Les experts en droit recommandent toutefois de dresser un plan des mesures et de définir les priorités sur la base de critères concrets. Tant que les mesures n'ont pas été réalisées, le propriétaire répond des éventuels dommages que subirait des personnes dans le bâtiment. La règle qui veut que plus le risque est élevé (grande vulnérabilité, forte occupation), plus les mesures de sécurité sismique doivent être mises en œuvre rapidement est donc également valable pour les monuments historiques.

En résumé, lorsque des travaux sont prévus sur un monument historique, le propriétaire devrait mandater un examen afin d'être renseigné sur la sécurité sismique du bâtiment. Dans bien des cas, cet examen révèle que cette sécurité est suffisante et le propriétaire a ainsi honoré ses obligations. Si les exigences en matière de sécurité sismique ne sont pas remplies, il convient de suivre la procédure type décrite dans ce document. Une décision sur les modalités de la mise en œuvre sera prise après une évaluation nuancée de la proportionnalité.

## 1.2 Conservation des monuments historiques

Le présent point introduit les principales bases et conditions-cadres dans le domaine de la conservation des monuments historiques en Suisse. Les termes essentiels et leurs corrélations y sont expliqués. La préparation des bases constitue une étape décisive pour permettre le dialogue et le processus interdisciplinaire idéal visé au deuxième chapitre.

### 1.2.1 Terminologie et délimitation

En Suisse, plusieurs termes similaires, dont la signification est toutefois différente, sont utilisés dans le domaine de la conservation des monuments historiques. La «conservation des monuments historiques» est une discipline. Il s'agit également d'un secteur d'activité d'unités spécialisées appelées ainsi au sein de l'administration publique. Leur travail englobe des mesures administratives, tout comme des études théoriques et techniques visant la protection et la remise en état de biens culturels immobiliers. Les «biens culturels» sont des objets et des sites qui sont importants pour le public, à titre de témoins de l'activité intellectuelle, de la création artistique ou de la vie communautaire. Les biens culturels reliés à un lieu ou immobiliers sont généralement appelés «monuments historiques» dans le domaine spécialisé de la conservation des monuments.

Par contraste avec la conservation des monuments historiques, on utilise en Suisse le terme de «protection des monuments historiques» pour la définition de mesures juridiquement contraignantes visant à conserver des biens culturels ou des monuments historiques.

Le terme «protection du patrimoine» ou «protection du paysage» est un terme générique, qui est utilisé dans différentes réglementations juridiques en Suisse. La Confédération utilise le terme «Heimatschutz» dans les versions allemandes des législations pertinentes (Cst. [18], LPN [19], OPN [20]); en français, on trouve le terme «protection du patrimoine» dans la Constitution, tandis que Heimatschutz a été rendu par «protection du paysage» dans la LPN et l'OPN. Ces deux termes couvrent par conséquent la conservation et l'entretien du paysage et des localités ainsi que des sites archéologiques et des «monuments culturels». En Suisse, la

notion de «Heimatschutz» est utilisée dans le langage courant, par exemple dans la dénomination de l'association «Schweizer Heimatschutz / Patrimoine suisse» et de ses sections [21].

Dans notre pays, les mesures visant à conserver les biens culturels, mobiliers et immobiliers, meubles et immeubles, et à les protéger contre les dégâts, le vol et la perte sont rassemblées aussi sous le terme générique de «*protection des biens culturels*».

La section Protection des biens culturels de l'Office fédéral de protection de la population (OFPP) [22] est le service spécialisé au niveau fédéral. La Confédération est chargée de la mise en œuvre des mesures prévues à l'art. 5 du Deuxième protocole de 1999 relatif à la Convention de La Haye de 1954 sur la **protection des biens culturels** en cas de conflit armé. Il s'agit notamment, en cas de conflit armé, de catastrophe ou de situation d'urgence, de protéger les biens culturels mobiliers et immobiliers qui appartiennent à la Confédération ou qui lui ont été confiés. Les cantons, quant à eux, désignent les biens culturels situés sur leur territoire et sont tenus de planifier et d'exécuter les mesures de protection. La Confédération soutient et conseille les cantons en rapport avec leurs tâches dans ce domaine.

L'Office fédéral de la culture (OFC), section Culture du bâti, s'occupe principalement de la préservation et de l'entretien du patrimoine culturel immobiliers. Le service spécialisé Transfert international des biens culturels, rattaché à l'OFC, est chargé de protéger les biens culturels mobiliers contre le commerce illicite et de soutenir la préservation de ce patrimoine.

### 1.2.2 Mandat et répartition des compétences

Le principe du mandat public en matière de conservation des monuments historiques est inscrit à l'art. 78 de la Constitution fédérale (Cst.) pour la Protection de la nature et du patrimoine. Cet article arrête le principe de la responsabilité aux différents niveaux étatiques, notamment les attributions des cantons en matière de protection de la nature et du patrimoine. Cette dernière comprend la protection des paysages, des localités, des sites historiques, ainsi que de la nature et des monuments culturels, ce qui

inclut les tâches dans les domaines de l'archéologie et de la conservation des monuments historiques.

La loi fédérale du 1<sup>er</sup> juillet 1966 sur la protection de la nature et du paysage (LPN) concrétise les domaines de compétence de la Confédération dans ce contexte. La Confédération soutient les cantons. Elle intervient partout où se pose un problème que le canton ne peut pas régler lui-même, pour des raisons politiques, techniques et/ou financières. Elle soutient la protection du patrimoine et la conservation des monuments historiques par l'octroi de contributions financières destinées à la conservation, à l'achat, à l'entretien, à la recherche et à la documentation concernant des localités dignes de protection, des sites historiques ou des monuments culturels. À cet effet, elle peut soutenir des organisations nationales ainsi que la recherche, la formation et les activités de communication.

La section Culture du bâti de l'OFC est le service spécialisé de la Confédération pour la conservation des monuments historiques, l'archéologie et la protection des sites construits. Elle veille à ce que les aspects de la conservation des monuments, de l'archéologie et de la protection des sites construits soient respectés en vertu des bases légales lors de l'exécution des tâches de la Confédération. La Commission fédérale des monuments historiques (CFMH) [24] et la Commission fédérale pour la protection de la nature et du paysage (CFNP) [25] sont des *commissions extraparlimentaires*. Elles sont les organes de conseil de la Confédération en matière de conservation des monuments historiques, d'archéologie et de protection des sites construits et pour toutes les questions fondamentales liées à la protection de la nature et du paysage.

Les cantons travaillent en collaboration avec l'OFC pour les objets auxquels la Confédération accorde des aides financières ou qui sont placés sous *protection fédérale*, ainsi que pour des questions techniques particulières. Ils peuvent instituer des commissions spécialisées ou déléguer certaines responsabilités à des services compétents au niveau communal. La section Protection des biens culturels à l'OFPP a le statut d'«organisation partenaire» pour la mise en œuvre de la conservation des biens culturels au sens de l'art. 78 Cst.

Les dispositions légales varient d'un canton à l'autre, mais elles ne sont pas en contradiction avec le droit fédéral auquel elles sont subordonnées. Selon le système fédéraliste, il y a des différences entre les cantons en ce qui concerne l'intégration politique, l'organisation, ainsi que la dotation en personnel et en ressources financières de la conservation des monuments historiques et de la protection des biens culturels. Les cantons désignent les services de conservation des monuments historiques qui sont chargés de veiller à une exécution efficace et conforme des dispositions constitutionnelles et légales. Outre les 26 services spécialisés cantonaux, les villes de Berne, Bienne, Genève, La Chaux-de-Fonds, Lausanne, Lucerne, Saint-Gall, Winterthour et Zurich disposent de leurs propres unités communales de conservation des monuments historiques. Ces services cantonaux et communaux s'occupent des mesures administratives et pratiques en rapport avec la protection et la remise en état des monuments historiques; ils dressent des inventaires, font des recherches, conseillent et accompagnent les *restaurations*, archivent, gèrent les subventions et les activités de communication.

Les propriétaires ou leurs représentants doivent se renseigner au sujet des bases légales en vigueur, à savoir la législation locale sur les constructions et les dispositions relatives à la conservation des monuments historiques.

### 1.2.3 Bases techniques

La CFMH a publié les Principes pour la conservation du patrimoine culturel bâti en Suisse [26], à titre de document de base pour les travaux effectués sur les monuments historiques (voir encadré 9). Ces principes publiés en 2007 établissent une base commune claire pour toutes les personnes et entités qui œuvrent pour la conservation du patrimoine; ils reflètent l'état actuel des connaissances dans cette discipline. À l'origine, ils ont été conçus sous forme de manuel pour les experts. «Mais [le document] est également destiné aux maîtres d'ouvrages, architectes, responsables politiques et toute autre personne intéressée, dans le but de les aider à mieux comprendre la problématique et les mesures nécessaires à une conservation à long terme du patrimoine culturel bâti.»; leur but est en outre d'assurer l'intelligibilité, la transparence et la sécurité du droit en rapport avec les travaux de conservation. Les «principes» régissant ces activités en Suisse

s'appuient sur des chartes et des conventions internationales en la matière, notamment :

- Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites, Vienne 1964 [27]
- Convention du 3 octobre 1985 pour la sauvegarde du patrimoine architectural de l'Europe, Grenade 1985 [28]
- Charte internationale pour la sauvegarde des villes historiques, Washington 1987 [29]
- Document de Nara sur l'authenticité, Nara 1994 [30]
- Principes pour l'analyse, la conservation et la restauration des structures du patrimoine architectural, Zimbabwe 2003 [31]

Les tâches de la CFMH comprennent également l'étude approfondie de différentes thématiques dans le domaine de la conservation des monuments historiques. Le traitement de questions spécifiques, dont la sécurité sismique des monuments historiques [32], se traduit par la publication de documents énonçant des principes.

Étant donné que chaque génération se pose de nouvelles questions sur la méthodologie et se voit confrontée à des conditions-cadres différentes, les normes reconnues de la discipline Conservation des monuments sont revues périodiquement et, au besoin, adaptées.

#### 1.2.4 Monuments historiques : définition technique et légale

La définition du terme « monument historique » peut être faite d'un point de vue technique et/ou juridique.

Dans les Principes pour la conservation du patrimoine culturel bâti en Suisse de la CFMH, les monuments historiques sont des « objets qui présentent de l'importance comme *témoins du passé*. Ces objets [monuments] peuvent témoigner de l'activité humaine sous différentes formes, d'événements ou d'évolutions historiques, de créations artistiques, d'institutions sociales ou de conquêtes techniques ». Une ou plusieurs de ces caractéristiques confèrent à l'objet sa valeur culturelle.

« Le patrimoine culturel est caractérisé par la *matière* des objets qui le composent ; celle-ci constitue son authenticité. Pour que notre génération et les suivantes puissent comprendre et interpréter le patrimoine dans toute sa complexité, il est nécessaire de conserver l'authenticité

des objets qui le composent, c'est-à-dire l'intégralité de leur substance et toutes les empreintes du temps. La conservation de l'authenticité des objets est la condition d'une compréhension sans cesse approfondie et renouvelée du patrimoine. L'interprétation du patrimoine comme expression de circonstances historiques particulières et la vérification de cette interprétation ne sont possibles que dans la mesure où les objets n'ont pas été altérés dans leur *substance historiquement significative*. Lorsqu'un objet est privé de sa *matérialité*, il perd sa valeur patrimoniale » [26].

Au niveau législatif, le « monument historique » est défini en termes de notion juridique (*définition légale*). Le législateur arrête, dans une disposition légale, dans quel sens il faut comprendre une *notion juridique (indéterminée)*. L'envergure et le contenu du terme sont précisés pour les besoins de la loi contenant cette définition légale [33]. Dans le canton de Saint-Gall, une définition légale du terme « Baudenkmal / monument historique » se trouve dans la loi sur la planification et la construction [34], dans une partie consacrée à la protection de la nature et du paysage (section C). L'art. 115, al. 1, let. g, désigne les monuments historiques comme étant des objets dignes de protection. Ceux-ci englobent des constructions et des ensembles présentant une valeur particulière à titre de témoins culturels, tels que des sites bâtis, des groupes de constructions, des bâtiments ou des parties de bâtiments, des installations ainsi que leur environnement, leurs équipements fixes et leurs accessoires.

#### 1.2.5 Désignation matérielle et formelle, effet juridique

« Un objet acquiert une valeur patrimoniale par la reconnaissance de sa qualité de témoin et de son authenticité matérielle (désignation matérielle). La valeur patrimoniale d'un objet est indépendante de mesures administratives telles qu'une mesure de protection ou l'inscription dans un inventaire » [26].

Les objets construits qui, par la définition matérielle, acquièrent la qualité de monument historique peuvent être désignés comme tels à l'attention des propriétaires et du public (désignation formelle) ; pour ce faire, le législateur s'appuie sur la définition légale du monument historique [26] [33]. La désignation formelle des monuments

### Encadré 9 : Règles d'action et définitions en matière de conservation des monuments historiques selon les Principes pour la conservation du patrimoine culturel bâti en Suisse [26]

La définition d'une **utilisation** appropriée des monuments historiques, qui s'appuie sur l'état matériel et fonctionnel, est essentielle, car elle favorise une conservation à long terme. La palette des utilisations peut être très vaste ; elle peut revêtir une fonction symbolique, présenter une signification urbanistique, paysagère ou muséale.

Les interventions sur le patrimoine culturel bâti doivent en assurer la **pérennité**. Au sens de la conservation des monuments historiques, des mesures sont pérennes lorsqu'elles préservent pour les générations futures le plus vaste choix possible de traitements et d'interprétations du patrimoine. L'exigence de conservation de la substance originale d'un objet, en tant que ressource importante et non renouvelable, doit être considérée comme prioritaire par rapport aux exigences d'un développement durable envisagé sous l'angle économique ou écologique. Les modifications de la substance matérielle ne sont admissibles que s'il est démontré qu'elles sont indispensables à la conservation à long terme de l'objet et qu'elles ne ruinent pas sa valeur patrimoniale.

**Conservation / restauration du monument historique.** Au nombre des principes fondamentaux de l'intervention sur des monuments historiques, il y a la **conservation** (maintenir le monument historique dans son état actuel [substance] et retarder sa dégradation) et la **restauration** (rétablir l'état antérieur de la substance, en enlevant des éléments ajoutés ou en rassemblant à nouveau des composantes, sans adjonction de nouveau matériel). Il s'agit de remettre en état les éléments historiques et non de les remplacer. Cette règle s'applique aussi bien à tous les *éléments de construction* qu'aux matériaux utilisés. La nécessité de remplacer certains éléments non réparables (ou ne pouvant plus remplir correctement leur fonction) ne doit pas aboutir à la substitution automatique de tous les éléments semblables. Pour conserver / restaurer un monument historique, il faut recourir à des matériaux et à des techniques éprouvés. Les méthodes artisanales traditionnelles répondent souvent aux exigences à respecter.

**Intervention minimale.** L'étendue et la portée de l'intervention doivent être réduites le plus possible. Les interventions qui touchent l'objet en étendue et en profondeur entraînent en général des altérations importantes de la substance historique. Si elles restent modestes, la substance historique est conservée pour les générations futures. Toute intervention de conservation et de restauration doit être la plus réversible possible. Une mesure est réversible, lorsqu'elle peut être annulée, sans que la substance matérielle de l'objet conserve une trace de l'intervention. Il faut préférer les mesures additives aux interventions dans la substance matérielle.

**Compléments.** Le complément est une mesure visant à réduire une lacune due à une dégradation ou à des interventions antérieures. Il doit respecter la substance et le caractère de l'objet. Il est justifié du point de vue de la lisibilité et de l'esthétique. La partie complétée doit s'intégrer à l'ensemble. Le complément doit pouvoir être perçu et compris comme tel. Les règles de l'art veulent que des lacunes dans une fresque historique ne soient pas « reconstituées », mais, par exemple, intégrées dans l'ensemble par des mesures neutres. Les reconstitutions (rétablissement d'un objet détruit, totalement ou en partie, dans un état antérieur connu, en ajoutant des matériaux nouveaux ou anciens dans la substance historique) sont d'une manière générale contestables.

**Ajouts.** L'ajout est une mesure considérée comme indispensable du point de vue notamment de l'utilisation, de la lisibilité ou de l'aspect général d'un bien culturel. Il ne doit porter atteinte ni à la substance ni au caractère de l'objet. L'ajout sur un objet ou dans ses abords est justifié sur la base d'une analyse de l'état existant. Il peut avoir pour objectif de réduire les sollicitations techniques ou fonctionnelles de l'objet ou de certaines de ses parties. Il peut également avoir un objectif didactique. L'ajout, tout en étant lié à l'objet fonctionnellement et esthétiquement, doit en être matériellement indépendant. Il doit être conçu en fonction de sa signification. Il doit s'intégrer de manière évidente à l'objet tout en demeurant reconnaissable en tant qu'élément contemporain répondant à des exigences de qualité accrues. Il peut s'agir de l'ajout d'une salle de bains dans un monument historique qui en était dépourvu jusque-là ou de l'équipement d'un chauffage central.

**Extensions (Weiterbauen).** L'extension d'un objet ne doit porter aucune atteinte aux parties présentant un intérêt historique (objectif de protection). Les éléments qui constituent la valeur patrimoniale de l'objet ne doivent être ni remplacés ni modifiés. Les parties anciennes et nouvelles doivent composer un nouvel ensemble. Les parties nouvelles doivent être conçues sur la base d'une analyse précise de l'état existant (examen de l'ouvrage du point de vue de la conservation). Elles doivent être adaptées au contexte et répondre à des exigences de qualité accrues.

La distinction entre les ajouts et les extensions n'est pas nette ; elle dépend de l'ampleur de l'intervention.

historiques est un acte administratif. Elle constitue un instrument de prise de décision dans le processus politique et une condition pour l'exécution du mandat légal de la conservation des monuments historiques. Elle prend notamment la forme de listes, de recensements, de cartes, de plans, d'inventaires ou de mesures de protection.

Dans le cas des listes, des recensements et des inventaires, une procédure ordinaire de mise sous protection a

été menée à bien au préalable, dans le cadre de laquelle les propriétaires ont pu faire valoir leurs droits. Les mises sous protection sont décidées dans le cadre de mesures de planification (zones de protection, objets protégés), dans des ordonnances, des décrets ou des contrats de droit administratif ; il en découle généralement des restrictions à la propriété clairement définies. Dans le cas d'autres types d'inventaires ou de registres, l'inscription constitue simplement une décision technique préliminaire,

### Encadré 10 : Désignation et évaluation d'un monument historique

**Confédération.** Dans le cadre de leur activité, différents services fédéraux élaborent des inventaires et des listes de bâtiments et d'installations dignes de protection et revêtant une importance nationale, régionale ou locale. L'OFC a dressé une liste des objets classés d'importance nationale [92]. Cette liste comprend les sites suisses inscrits au Patrimoine mondial de l'UNESCO ainsi que les constructions et installations dignes d'être protégées et les sites archéologiques d'importance nationale qui ont été classés par des services de la Confédération sur la base de la LPN [19] ou de l'ordonnance sur la protection des biens culturels en cas de conflit armé, de catastrophe ou de situation d'urgence (OPBC) [93].

Les inventaires et listes établis par les différents services de la Confédération présentent des buts et une portée juridique différents. En général, ils contiennent aussi des objets d'importance régionale et locale. Cette liste sert de base pour le calcul des aides financières allouées par la Confédération au titre de l'article 13 LPN et aide à identifier les biens culturels d'importance nationale au sens de l'article 18a de la loi fédérale révisée sur l'aménagement du territoire [93] [94].

**Cantons et communes.** Les cantons désignent eux-mêmes les monuments historiques situés sur leur territoire – sur la base de la législation fédérale et des lois cantonales sur la protection du paysage, du patrimoine, des biens culturels ainsi que des lois sur la planification et la construction –, mais ils peuvent déléguer cette tâche aux communes en tout ou en partie. La plupart des cantons et de nombreuses communes disposent d'inventaires des monuments historiques. Selon la situation juridique, les inventaires et/ou les listes des monuments historiques sont tenus à jour dans le canton ou la commune concernés, sous la forme d'un inventaire indicatif, d'inventaires contraignants pour les autorités ou d'inventaires de protection ; ils constituent donc selon le cas une base légale matérielle ou formelle [95] [96].

Comme le veut le principe fédéraliste, ces listes et inventaires varient d'un canton à l'autre quant à leur conception et à leur ampleur, à leur degré de détail et à leur système d'évaluation. Pour ce qui est de la représentation de la valeur patrimoniale individuelle des monuments, les listes / inventaires ont en commun une caractérisation simple et concise, car la valeur culturelle effective ou la « valeur d'un objet au titre de la protection du patrimoine peut être présentée de divers points de vue, être mise en évidence et développée selon divers critères. L'évaluation ne peut être réduite à une simple échelle de valeurs » [26].

Les monuments historiques du canton de Berne sont par exemple contenus dans un recensement architectural géoréférencé, avec une photo, un texte et leur « valeur de situation » ; ils sont répartis en deux catégories « digne de conservation » et « digne de protection ». Une annexe recense en outre des exemplaires marquants de l'architecture récente, mais elle n'a aucune portée juridique. Le canton de Thurgovie gère une base de données bien structurée sur le Web et utilise les catégories « forme générale digne de conservation », « particulièrement digne de protection » et « remarquable après 1959 ». Le canton de Vaud, lui, attribue des notes (1 à 7) aux objets de son « recensement architectural », les monuments de la classe 1 bénéficiant de la meilleure protection et ayant la valeur culturelle la plus élevée ; il propose un accès public en ligne sur une carte géoréférencée, avec des fiches d'objet détaillées.

une présomption de protection. Cette dernière sera réexaminée ultérieurement, par exemple à l'occasion d'une procédure de planification ou de permis de construire, en tenant compte des avis exprimés par le propriétaire. Les dispositions légales définissent les modalités nécessaires à l'exécution, au besoin aussi pour imposer les mesures (effet juridique) (voir encadré 10).

### 1.3 Proportionnalité des mesures de sécurité sismique

Conformément à la norme de maintenance SIA 269/8 en vigueur, la proportionnalité des mesures de sécurité sismique est en principe appréciée en confrontant leur coût avec la réduction du risque qu'elles génèrent (point 10.1.2), tout en tenant compte des exigences de l'individu en matière de sécurité (point 10.2.1, efficacité des interventions). Elle se rapporte à l'exigence sociétale de sécurité et, plus généralement, à l'acceptation des risques ou d'un risque défini (*intérêt public*). Elle tient également compte de la disponibilité des moyens nécessaires à la mise en œuvre des mesures. Lors de l'appréciation de la proportionnalité des mesures de sécurité sismique pour un ouvrage conformément à la norme SIA 269/8, il convient de tenir compte des biens à protéger comme les personnes, les prestations d'infrastructures, l'environnement et les biens culturels. La valeur de l'ouvrage et des biens matériels, ainsi que les pertes d'exploitation

peuvent également être intégrées dans l'évaluation. Quoi qu'il en soit, la réduction du risque pour les personnes doit toujours être prise en compte. En ce qui concerne les monuments historiques, la norme exige explicitement la prise en compte des dispositions concernant la protection des biens culturels (point 10.2.6, valeur culturelle, intérêt public) ainsi qu'une évaluation différenciée jugeant la proportionnalité de mesures (point 10.6.2). L'évaluation de la proportionnalité doit être appliquée aux mesures de sécurité sismiques qui vont au-delà des exigences minimales (facteur de conformité minimal  $\alpha_{\min}$ ) en matière de risque pour les personnes, et doit être faite dans le cadre d'un dialogue entre le propriétaire de l'ouvrage, le concepteur et les entités en charge de la conservation des monuments historiques. Si la proportionnalité est démontrée après une évaluation différenciée, les mesures doivent être mises en œuvre.

La notion de « valeur culturelle » mentionnée dans la norme SIA 269/8 n'est pas clairement définie et fait l'objet d'interprétations divergentes. En génie civil, l'interprétation qui prévaut est que l'exigence normative de « prise en compte de la valeur culturelle » a pour but de protéger l'ouvrage au-delà des exigences pour la protection des personnes. Du point de vue des ingénieurs civils, la protection des bâtiments ayant une valeur historique doit être assurée par des mesures de construction visant à réduire autant que possible les dommages éventuels au bâtiment [35]. Pour les entités en charge de la conservation des monuments historiques, en revanche, la « prise en compte de la valeur culturelle » vise à minimiser les mesures de sécurité sismique qui affectent la substance du monument et réduisent sa valeur. Les dommages causés aux monuments historiques par les tremblements de terre sont acceptés si cela permet d'éviter des mesures invasives visant à renforcer la résistance aux séismes au-delà de ce qui est strictement nécessaire pour la protection des personnes [24].

Le présent guide vise à aider les deux disciplines à faire en sorte que la prise en compte de la valeur culturelle soit effectivement mise en pratique au moyen d'une évaluation différenciée de la proportionnalité. Dans cette optique, les critères d'évaluation quantitatifs du génie civil sont mis en relation avec les critères d'évaluation qualitatifs de la conservation des monuments historiques. Les pro-

priétaires doivent être en mesure de prendre une décision en ce qui concerne la sécurité sismique, sur la base des recommandations des experts des deux disciplines. L'objectif de l'évaluation différenciée de la proportionnalité des mesures de sécurité sismique doit donc prendre la forme d'une recommandation quant aux mesures à prendre pour les propriétaires qui soit soutenue par les deux disciplines.

### 1.3.1 Intérêts publics

La conservation des monuments historiques et la sécurité sismique constituent des *intérêts publics*. Ces derniers désignent les domaines (sujets, objets, dossiers) que le public (au sens du grand public) considère comme dignes de protection et de réalisation. L'État doit protéger et promouvoir le bien commun et prendre en compte les préoccupations de la communauté nationale [36]. L'intérêt public est une notion juridique abstraite. Les intérêts publics se trouvent principalement dans les articles définissant les buts de la loi. La prise en compte de certains intérêts publics peut, dans des cas isolés, s'opposer à d'autres intérêts publics (ou privés). Dans le cas d'un conflit d'intérêts, les différents intérêts publics doivent être soumis à une comparaison de valeur, et une pesée des intérêts doit avoir lieu. Cette dernière s'inscrit généralement dans le cadre de l'application du principe de proportionnalité (proportionnalité entre l'objectif visé et l'effet de l'intervention). La spécificité de chaque cas doit être prise en compte. La pesée des différents intérêts qui conduisent à la décision doit être présentée de façon transparente.

En ce qui concerne les monuments historiques, une pesée des intérêts publics globale prenant en compte d'un côté la protection des monuments et de l'autre côté la protection contre les séismes est nécessaire. Cette évaluation doit à la fois prendre en compte l'importance culturelle, historique, artistique, structurelle et locale du monument, ainsi que les exigences en matière de sécurité sismique, tout du moins celles concernant la protection des personnes.

### 1.3.2 Valeur culturelle

En accordant une attention particulière aux biens culturels ou aux monuments historiques, l'évaluation différenciée avec pondération de la proportionnalité nécessite

une qualification objective et compréhensible de la valeur culturelle.

En matière de collecte des informations, saisie des données et qualification de la valeur culturelle, le présent guide adopte l'approche de la liste de critères et la méthode d'évaluation basée sur la matrice du cahier technique SIA 2017 « Valeur de conservation des ouvrages » [37] pour déterminer la valeur de conservation (ou valeur de maintenance). Le cahier technique SIA 2017 est un outil qui vise à déterminer le potentiel actuel et futur d'un ouvrage dans le cadre de l'étude de la conservation de manière aussi objective que possible. Il souligne la complexité de la détermination de la valeur de conservation d'un ouvrage et définit les critères d'évaluation à prendre en compte pour déterminer cette valeur. Ce cahier technique va au-delà d'une approche purement technico-économique et montre quels autres critères matériels et immatériels doivent être pris en compte.

La liste non exhaustive des valeurs immatérielles du cahier technique SIA 2017 correspond dans une large mesure aux critères et caractéristiques utilisés pour la désignation

des monuments historiques. La liste des valeurs matérielles comprend également des critères pouvant s'avérer pertinents pour les monuments historiques comme le critère « Emplacement », qui illustre des aspects tels que l'exposition ou l'emplacement dans la structure architectonique, ou les critères « Construction » et « Environnement » qui permettent notamment d'exprimer la longévité et la préservation des ressources en termes de développement durable (voir encadré 11).

Basée sur un consensus qualitatif des différents concepts de valeur des acteurs impliqués, la méthode des valeurs immatérielles et matérielles définies selon le cahier technique SIA 2017 permet une représentation et une vérification holistique de la valeur culturelle du monument historique.

Comme expliqué au point 1.2, la notion de « valeur culturelle » est très proche des notions de « valeur de monument historique », « valeur de monument » et « valeur historique » utilisées dans le domaine de la conservation des monuments.

### Encadré 11 : Valeur culturelle – Critères d'évaluation selon le cahier technique SIA 2017 [37]

La **valeur immatérielle** se compose notamment des éléments suivants :

- la valeur de situation (interaction spatiale du monument historique avec son environnement),
- la valeur historico-culturelle (position du monument historique dans le cadre du développement économique, politique ou social d'une époque),
- la valeur socioculturelle (disposition du monument historique à être utilisé par des groupes de personnes liées par leur profession, leur société, leur âge, leur origine ou pour des fins publiques spécifiques ; identité),
- la valeur émotionnelle (valeur affective du monument historique, respect de la tradition, augmentation du prestige, accord avec les principes personnels du constructeur, des utilisateurs ou leur position sociale),
- la valeur esthétique (somme des qualités architecturales et artistiques, de la composition et de la modénature, des particularités de style ou de l'utilisation esthétique des matériaux du monument historique),
- la valeur technique (techniques de construction particulières manifestes dans les matériaux utilisés pour le monument historique).

La **valeur matérielle** résulte notamment des éléments suivants :

- la construction (la nature et l'état de l'ouvrage et de son infrastructure, la constitution de la structure porteuse ou l'état de l'enveloppe et des surfaces),
- l'utilisation (aptitude au service, possibilité d'adapter l'ouvrage ou d'en changer la fonction ou la sécurité d'exploitation) et l'emplacement (possibilités d'utilisation de la parcelle et de son environnement proche et lointain).

En outre, les aspects socio-économiques influencés par la société et l'environnement ainsi que la valeur économique (valeurs vénale, fiscale, locative, productive ou assurée) sont également pris en compte. Enfin, la valeur matérielle comprend aussi les aspects environnementaux comme la durabilité, les possibilités d'évacuation ou de recyclage de l'ouvrage et des matériaux lors de la démolition ainsi que la consommation d'énergie en service. L'évaluation des aspects environnementaux nécessite une évaluation globale de la compatibilité écologique dans l'état actuel et futur du monument historique en ce qui concerne le principe de durabilité. Il convient de noter que les bâtiments historiques, et en particulier les monuments historiques, sont généralement conformes au postulat de préservation des ressources en raison de leur longue durée d'utilisation et de l'utilisation de matériaux naturels et réparables. Par rapport à la démolition et au remplacement, leur capacité de réparation présente l'avantage d'éviter les gravats, de ne pas nécessiter d'énergie supplémentaire pour l'évacuation et la nouvelle construction, de ne produire aucune nouvelle émission et, par conséquent, d'avoir un bilan global équilibré prenant en compte l'ensemble du cycle de vie.



## 2 Processus interdisciplinaire idéal

Dans le cas d'un projet de construction concernant un monument historique, le fait d'instaurer un dialogue interdisciplinaire à un stade précoce et de maintenir une collaboration constante durant toutes les phases du projet permet non seulement de garantir la nécessaire prise en considération de la valeur historique de la substance bâtie, mais aussi de procéder à une évaluation différenciée de la proportionnalité des mesures éventuellement requises pour améliorer la sécurité sismique du monument en tenant compte de sa valeur culturelle.

Les monuments historiques sont des bâtiments existants dont le traitement doit ménager la substance bâtie avec

un soin particulier. Le processus itératif et interdisciplinaire qui consiste à examiner la sécurité sismique d'un monument, puis à élaborer, si nécessaire, des mesures de sécurité sismique compatibles avec la protection des monuments historiques et efficaces sur les plans technique et économique doit se mettre en place au plus tard quand un projet de construction devient concret. Dans le présent contexte, un projet de construction devient concret lorsqu'une opération de remise en état, de rénovation ou de transformation est envisagée sur un monument historique, conformément au point 3.2.1.3 de la norme SIA 469. Il s'agit là d'interventions sur le monument qui dépassent le cadre du simple entretien.

Fig. 5 : Déroulement concret selon la norme SIA 112

Phase	Phase partielle	Étape du processus	Section
1 Définition des objectifs	> 11 Énoncé des besoins, approche méthodologique	Situation initiale	2.1
		Relevé de l'état	2.2
		Définition des objectifs de protection	2.3
2 Études préliminaires	> 21 Définition du projet de construction, étude de faisabilité	Étude numérique et évaluation de la sécurité sismique	2.4
		Élaboration et évaluation d'ébauches de solutions	2.5
3 Étude du projet	> 31 Avant-projet	Concepts d'intervention et évaluation différenciée de la proportionnalité	2.6
	> 32 Projet de construction	Recommandation d'intervention et décision d'intervention	2.7
	33 Procédure de demande d'autorisation / dossier de mise à l'enquête		
4 Appel d'offres	41 Appels d'offres, comparaison des offres, propositions d'adjudication		
5 Réalisation	> 51 Projet d'exécution	Projet d'intervention et réalisation des mesures	2.8
	52 Exécution de l'ouvrage		
	53 Mise en service, achèvement		
6 Exploitation	61 Fonctionnement		
	62 Surveillance / contrôle / entretien		
	63 Maintenance		

Le processus interdisciplinaire se déroule selon les étapes suivantes :

- description de la situation initiale (2.1);
- relevé de l'état (2.2);
- définition des objectifs de protection (2.3);
- étude numérique et évaluation de la sécurité sismique (2.4);
- élaboration et évaluation d'ébauches de solutions (2.5);
- concepts d'intervention et évaluation différenciée de la proportionnalité (2.6);
- recommandation d'intervention et décision d'intervention (2.7);
- projet d'intervention et réalisation des mesures (2.8).

Ces étapes sont regroupées en six phases conformément à la norme de compréhension SIA 112 « Modèle : Étude et conduite de projet » [38] (voir fig. 5 et encadré 12).

Depuis le 1<sup>er</sup> août 2020, la norme de compréhension SIA 101 « Règlement concernant les prestations des maîtres d'ouvrage » [39] règle les obligations et les activités du maître d'ouvrage et décrit les prestations et les décisions qui incombent au mandant durant chaque phase de projet. Le règlement SIA 101 est basé sur le modèle de phases de la norme de compréhension SIA 112. Les règlements concernant les prestations et les honoraires des professionnels spécialisés en architecture (SIA 102) et en génie civil (SIA 103) ont été élaborés pour les nouvelles constructions. Pour les projets concernant des bâtiments existants, et en particulier des monuments historiques, certaines prestations d'ingénierie doivent être fournies plus tôt que pour un projet de nouvelle construction, en l'occurrence dès les deux premières phases de projet. C'est ainsi par exemple que l'ingénieur civil doit être mandaté dès la phase 1 « Définition des objectifs », afin que le relevé de l'état existant et

la définition des objectifs de protection puissent avoir lieu dans le cadre d'une démarche interdisciplinaire. De même, l'étude numérique de la sécurité sismique doit être réalisée dès la phase 2 « Études préliminaires », pour qu'il soit possible d'élaborer des ébauches de solutions avec l'architecte, puis de les évaluer avec le conservateur des monuments historiques selon une approche interdisciplinaire. Enfin, il doit exister un consensus sur les ébauches de solutions dès le lancement de la phase 3 « Étude du projet », de sorte que les concepts d'intervention possibles puissent être élaborés durant la phase partielle 31 « Avant-projet » en collaboration avec l'architecte et le conservateur des monuments historiques. Ce décalage au niveau des phases de projet a pour effet que l'architecte doit lui aussi fournir certaines prestations plus tôt qu'il ne le fait normalement pour les nouvelles constructions. Le processus interdisciplinaire idéal suppose de décrire et de calculer avec clarté et transparence les prestations spécifiques que les mandataires du maître d'ouvrage doivent fournir à chacune des phases du projet.

Lors de l'étape consistant à décrire la **situation initiale**, le projet envisagé pour le monument doit être formulé par le propriétaire ou le maître d'ouvrage et le travail interdisciplinaire, établi en collaboration avec l'architecte. Afin de procéder aux clarifications administratives concernant le statut de monument historique attribué au bâtiment, le service chargé de la conservation des monuments historiques doit être contacté au plus tôt et mis au courant du projet de construction (voir encadré 13).

Un ingénieur civil qualifié, spécialisé en génie parasismique ou ayant l'expérience des ouvrages historiques, doit être mandaté dès le stade de la demande préalable (voir encadré 14).

### Encadré 12 : « Modèle : Étude et conduite de projet » – les phases d'un projet de construction

La norme de compréhension SIA 112 « Modèle : Étude et conduite de projet » [38] détaille la structure logique du processus d'étude par phases qui s'applique à tous les types de projets de construction. Il décrit ainsi tout le cycle de vie de l'ouvrage, depuis l'énoncé des besoins jusqu'à l'exploitation. L'enchaînement des prestations des mandataires et du mandant définies par le plan des phases, ainsi que celui des décisions du mandant, présente les caractéristiques d'un modèle et doit être régulièrement adapté lors de l'application. Les phases et les phases partielles peuvent se chevaucher dans le temps, être échelonnées différemment si le projet de construction compte plusieurs ouvrages ou s'effectuer dans un autre ordre. Le « Modèle : Étude et conduite de projet » comprend toutes les prestations de mandataires relatives à un ouvrage, de la première idée jusqu'au fonctionnement et à la conservation, en passant par l'étude du projet et la réalisation. Il est conçu pour les nouvelles constructions, les transformations, la conservation et les changements d'affectation dans le domaine du bâtiment, du génie civil, des aménagements et des équipements extérieurs. Il peut s'appliquer à tous les types de prestations de conception dans le secteur de la construction et à tous les types d'ouvrages, y compris les monuments historiques.

### **Encadré 13 : Rôle du service de conservation des monuments historiques dans le cadre d'un projet de construction**

En raison de son système fédéraliste, la Suisse n'a pas de réglementation uniforme concernant la prise en compte de la conservation des monuments historiques dans les projets de construction. En cas de travaux sur un monument historique, il existe des marches à suivre ou des procédures d'autorisation différentes en fonction du statut de protection du monument, de la nature du projet et des dispositions légales qui s'appliquent. Un consensus national se dessine toutefois quant à la nécessité d'impliquer précocement les services de conservation des monuments historiques dans l'étude des projets de construction concernant de tels monuments.

Les services communaux en charge des constructions sont compétents pour renseigner les propriétaires, les architectes et les ingénieurs civils sur les modalités d'autorisation et les règles de procédure. Les services de conservation des monuments historiques sont amenés à prendre une position officielle au plus tard lors de la notification d'une demande d'autorisation de construire ; pour cela, ils se fondent sur les lois pertinentes et sur le programme de procédure de l'autorité qui délivre l'autorisation. Il est toutefois préférable que la prise de contact ait lieu dès le commencement de l'étude de projet.

À l'exemple des mesures de sécurité sismique, les interventions qui touchent à la substance d'un monument historique ou à son aspect extérieur nécessitent généralement une autorisation de construire. Le processus interdisciplinaire idéal exige du propriétaire qu'il prenne contact le plus tôt possible avec le service de conservation des monuments historiques, dans le sens d'une demande préalable. Ce service peut faciliter le relevé de l'état existant en mettant à disposition, sous forme de conseils, son expertise technique dans le domaine des bâtiments ayant une valeur historique ainsi que son expérience de l'histoire de l'art, de l'histoire de l'architecture et des techniques de construction historiques. Il peut également soutenir phase par phase le développement de solutions taillées sur mesure pour le monument considéré. L'architecte et l'ingénieur civil doivent s'adresser au service de conservation des monuments historiques pour s'informer sur les principales conditions-cadres et obtenir une première appréciation du projet envisagé avant que celui-ci n'ait été élaboré.

Les conditions-cadres et les objectifs de protection qui ont été définis dans la demande préalable en collaboration avec le service de conservation des monuments historiques sont intégrés dans les plans de la demande d'autorisation de construire.

L'autorité de décision délivre l'autorisation de construire sur la base des rapports officiels et/ou des rapports d'expertise déterminants. Les travaux d'exécution peuvent alors commencer. Le service de conservation des monuments historiques suit également de près le déroulement des travaux et les différentes étapes de travail.

### **Encadré 14 : Recours à un ingénieur spécialisé en génie parasismique ayant l'expérience des structures porteuses historiques**

Le génie parasismique est un domaine du génie civil qui constitue une spécialisation très exigeante et facultative du cursus des ingénieurs en génie civil. Dans le cadre d'une formation de base ou d'une formation professionnelle continue, l'ingénieur civil acquiert un savoir spécialisé sur la dynamique des structures, ainsi que des connaissances sur des méthodes spécifiques de calcul et de modélisation.

La vérification de la sécurité sismique des bâtiments existants en général et des monuments historiques en particulier exige des connaissances approfondies sur les matériaux et les techniques de construction historiques. Le relevé de l'état, de même que l'étude numérique et l'évaluation de la sécurité sismique d'un monument historique, requièrent en outre une bonne expérience des structures porteuses historiques. Une compréhension approfondie du comportement du monument en cas de séisme est également nécessaire pour pouvoir élaborer des mesures d'amélioration de la sécurité sismique qui soient compatibles avec la conservation des monuments historiques, efficaces sur le plan technique et efficaces du point de vue économique.

Dans le cas d'un projet de remise en état ou de modification d'un monument historique, l'attribution d'un mandat de prestations à un ingénieur civil spécialisé en génie parasismique requiert un appel d'offres différencié et formulé avec précision (exigeant que les connaissances spéciales demandées soient attestées) et une procédure d'adjudication minutieuse. Les offres reçues doivent faire l'objet d'un examen critique basé prioritairement sur la qualité des attestations, l'expérience et les références. L'expérience montre que le surcoût éventuel d'un ingénieur civil spécialisé est généralement rentable : plus l'ingénieur civil est compétent, moins les mesures constructives améliorant la sécurité sismique sont coûteuses.

S'agissant d'un monument historique, il faut absolument éviter de raisonner par analogie avec une nouvelle construction, c'est-à-dire de procéder à un examen général superficiel de la sécurité sismique, car cela aboutit le plus souvent à la recommandation de mesures constructives impliquant des interventions importantes et des coûts élevés.

Lors de l'étape consistant à relever l'**état existant**, le responsable en matière de conservation des monuments historiques effectue des analyses et des recherches concernant l'histoire de la construction de l'ouvrage (investigation de l'ouvrage du point de vue de la conservation des monuments historiques ; voir encadré 12), tandis que l'architecte et l'ingénieur civil procèdent à des relevés complets, ainsi qu'à des investigations de l'ouvrage. Conjointement, le relevé de l'état existant (du point de vue de la conservation des monuments historiques) et les exigences définies dans les normes (du point de vue du génie civil) constituent la base et la condition préalable à la **définition des objectifs de protection**. À l'étape suivante, **l'étude numérique et l'évaluation de la sécurité sismique** sont réalisées par l'ingénieur civil. Si nécessaire, des **ébauches de solutions** pour des mesures de sécurité sismique sont élaborées, puis évaluées sur la base des objectifs de protection déjà concrétisés du point de vue de la conservation des monuments historiques, de ceux définis selon les normes actuellement applicables aux structures porteuses et des résultats livrés par l'analyse sismique de l'ouvrage. La sélection de différentes ébauches de solutions compatibles avec la conservation du monument considéré permet ensuite d'élaborer plusieurs **concepts d'intervention**, avec un degré de détail adapté à chaque phase. En intégrant la valeur culturelle dans l'évaluation de la proportionnalité, il est alors possible de formuler une **recommandation d'intervention** compatible avec la conservation des monuments historiques et consolidée du point de vue de toutes les disciplines. S'ensuit une **décision d'intervention** de la part du propriétaire, qui ouvre la voie à la **réalisation des mesures**.

## 2.1 Description de la situation initiale

Le processus interdisciplinaire visant à traiter la question de la sécurité sismique d'un monument historique se met en place dès la phase de **définition des objectifs** et commence par la description de la **situation initiale**. Sur la base de la problématique formulée et de l'utilisation envisagée de l'ouvrage, le propriétaire mandate un architecte afin qu'il analyse les besoins et étudie les objectifs visés, ainsi que les conditions-cadres. C'est à ce stade qu'il faut statuer sur la nécessité d'examiner la sécurité sismique de l'ouvrage (voir point 1.1.6 et encadré 8).

Dès le début du processus, il est fondamental de clarifier le statut du monument. Les autorités communales en charge des constructions et/ou les services de conservation des monuments sont compétents pour indiquer si l'ouvrage possède le statut de monument historique et, si tel est le cas, à quelle catégorie de protection il appartient et de quel accompagnement il bénéficie de la part du service chargé de sa conservation. Pour le projet envisagé, l'architecte établit alors plusieurs démarches et approches stratégiques possibles et les évalue en concertation avec l'ingénieur civil et le conservateur des monuments historiques. Il incombe ensuite au propriétaire d'évaluer la nécessité, l'urgence et l'acceptabilité des résultats qui lui sont présentés et de choisir une approche méthodologique générale pour le projet envisagé.

Pour la détermination de l'approche stratégique à suivre, il est essentiel d'évaluer l'adéquation de l'utilisation prévue, puis de s'interroger sur ce point. L'utilisation, du fait qu'elle associe une occupation et une fonction données (attribution de l'ouvrage à une classe d'ouvrages), influe de manière décisive sur le niveau de sécurité sismique requis (objectif de protection normé).

Cette première étape a pour autre objectif important de constituer une équipe de spécialistes compétents et d'instaurer une coopération étroite entre tous les acteurs impliqués dans le processus.

Par rapport aux autres types de bâtiments existants, les monuments historiques requièrent une approche de la substance bâtie qui soit davantage différenciée [40]. Pour cette raison, le relevé pluridisciplinaire de l'état existant, l'étude numérique et l'évaluation de la sécurité sismique, la définition interdisciplinaire des objectifs de protection et l'élaboration conjointe de mesures de sécurité sismique compatibles avec la protection des monuments historiques doivent être confiés à une équipe de mandataires composée de professionnels spécialisés reconnus, placée sous la direction d'un représentant du maître d'ouvrage et disposant de compétences confirmées dans le suivi d'objets du patrimoine. Durant la suite du projet, cette équipe de spécialistes devra régulièrement mettre en regard les résultats des investigations préalables et les progrès du processus de planification et de construction ainsi que procéder si nécessaire à des actualisations ; elle devra par

ailleurs préparer les décisions importantes après consultation de l'ensemble des spécialistes impliqués, ces derniers assumant la responsabilité des interventions dans leur domaine spécifique.

## 2.2 Relevé de l'état

Le **relevé de l'état** doit avoir lieu dès la phase de **définition des objectifs** puisqu'il doit ensuite servir de base à la définition des objectifs de protection, ainsi qu'à l'étude numérique et à l'évaluation de la sécurité sismique. La phase de l'étude de projet ne peut pas être menée sans une connaissance complète de l'objet (monument) et des incidences de l'utilisation prévue. Le relevé de l'état est réalisé à la fois par le service de conservation des monuments historiques compétent et par l'ingénieur civil mandaté, les deux opérations étant idéalement menées en parallèle, harmonisées entre elles et coordonnées par la direction du projet (architecte). Le relevé de l'existant dans son intégralité, avec ses références historiques dans son environnement actuel, est absolument indispensable à la compréhension globale de l'objet. La structure porteuse du monument – avec ses principes et ses défauts de conception et de construction – et la configuration de l'objet du point de vue de la technologie des matériaux revêtent une importance particulière tant pour l'ingénieur civil que pour le conservateur des monuments historiques. Le relevé de l'état par les deux spécialistes donne lieu à l'établissement de deux rapports, qui serviront de base pour l'étude du projet. Pendant la phase de relevé, les enseignements tirés des investigations de l'état existant sont synthétisés par l'architecte sous la forme d'un plan ou d'un document qui servira lui aussi de base pour la suite de l'étude. Il est souhaitable d'organiser au moins une visite commune du monument, avec la participation de tous les acteurs concernés, afin d'acquérir une connaissance plus approfondie de l'objet et de sensibiliser chacun aux préoccupations inhérentes au génie civil et à la conservation des monuments historiques.

### 2.2.1 Investigation de l'ouvrage du point de vue de la conservation des monuments historiques et préparation des données de base

La nature et l'ampleur de l'investigation de l'ouvrage du point de vue de la conservation des monuments historiques

sont à définir de façon pragmatique, en tenant compte de la nature de l'existant, de son état et des mesures prévues. Toute intervention, qu'il s'agisse de conservation ou de transformation, doit être précédée d'une telle investigation. Celle-ci comprend la reconstitution de l'histoire de la construction, des indications sur la méthode de travail et des informations sur l'état. L'un des objectifs essentiels de cette investigation est l'identification et l'interprétation de *constats* interdépendants, sachant que la description d'un constat doit être fondamentalement dissociée de son interprétation. L'analyse des constats permet de les situer dans l'historique de la construction et d'établir la chronologie (relative) des différentes phases de construction, de configuration et de rénovation.

L'historique de la construction comprend une analyse des documents d'archives pertinents ou des documentations de sécurité PBC déjà établies (voir encadré 12). La description de la méthode de travail employée permet non seulement de rendre compte de la démarche adoptée, mais également de garantir la compréhension des résultats. Pour le relevé de l'existant, il convient de procéder par strates, ce qui signifie que le support et la couche de surface doivent être considérés et évalués de façon différenciée. Les informations concernant toutes les modifications vérifiables de la construction (phases de construction et de rénovation), de la matérialité et de la configuration doivent être relevées. Une attention particulière doit être accordée aux caractéristiques relevant de la technique de fabrication (p. ex. détails artistiques, techniques et architecturaux, innovations). Il faut également documenter les dommages et les modifications qui altèrent et menacent durablement la substance et l'aspect extérieur du monument, ainsi que leurs causes [41]. L'investigation de l'ouvrage du point de vue de la conservation des monuments historiques sert de base à la définition des objectifs de protection du point de vue de la conservation de ces monuments. En complément de cette investigation préparatoire, il peut être indiqué de réaliser d'autres investigations durant le processus de construction ; après la phase de réalisation, les résultats de ces investigations liées au projet de construction seront intégrés dans le document principal consignant l'investigation de l'ouvrage du point de vue de la conservation des monuments historiques, conformément à la norme SIA 112 (voir encadré 15).

### Encadré 15 : Investigation de l'ouvrage du point de vue de la conservation des monuments historiques et documentation de sécurité PBC [97]

Les investigations de l'ouvrage du point de vue de la conservation des monuments historiques sont réalisées par des spécialistes confirmés des services de conservation des monuments historiques, des services archéologiques ou de bureaux et d'instituts indépendants. Elles doivent ménager l'existant dans toute la mesure du possible et n'occasionner aucune destruction, autrement dit être non invasives. Elles comprennent des études de documents d'archives, des *prospections*, des observations du bâtiment, des investigations archéologiques de l'ouvrage, des sondages, la collecte de constats, des analyses de la situation et des dégradations, des investigations sur les matériaux, etc. [41]. Afin de garantir la qualité, la comparabilité, la reproductibilité et la rentabilité de ces investigations, des directives et des normes sont indispensables. En Suisse, les spécialistes chargés des investigations peuvent se référer à la publication de la section Protection des biens culturels (PBC) de l'OFPP concernant l'établissement des documentations de sécurité (« Guidelines 2/2006 » [97]), ainsi qu'aux directives et aux manuels émanant des cantons. Ils peuvent aussi trouver de l'aide dans les guides pratiques et les fiches de travail publiés par les offices de conservation des monuments historiques des Länder allemands [41] ou par l'office fédéral autrichien chargé de la conservation des monuments historiques [102]. Si les guides pratiques et les aides au travail utilisés dans les pays voisins ne présentent pas la même forme ni la même portée, ils ont au moins en commun la structure de base, qui correspond à celle retenue pour les documentations de sécurité établies en Suisse.

La documentation de sécurité dans le domaine de la protection des biens culturels (documentation de sécurité PBC) est un instrument de travail important pour les conservateurs des monuments historiques, les architectes, les ingénieurs civils, les artisans et les spécialistes de l'histoire de l'art. La base (légale) de la documentation de sécurité PBC est, d'une part, l'ordonnance du DDPS du 5 avril 2016 sur l'établissement de documentations de sécurité et de reproductions photographiques de sécurité (ODCS, RS 520.311) et, d'autre part, la publication « Guidelines 2/2006 » de la section PBC de l'OFPP concernant l'établissement des documentations de sécurité.

En cas de destruction d'un monument historique, la documentation de sécurité PBC sert de fiche signalétique ou – dans les cas spéciaux et après consultation des responsables de la conservation des monuments historiques – de référence pour une reconstitution au plus proche de l'état originel. Elle documente de manière précise et complète des aspects tels que la construction, la forme, la dimension et les matériaux de construction du monument considéré et elle se compose idéalement des éléments suivants :

- documentation sur plans (mesures, plans généraux, plans pour la reconstruction, plans de détail, relevés photogrammétriques, documents historiques) ;
- documentation photographique (état actuel, documents historiques) ;
- textes documentaires (publications scientifiques et matériel de base, littérature secondaire, indications techniques de construction, rapports et documents de restauration, sources) ;
- documentation archéologique (fouilles et sondages) ;
- documentation sur les biens culturels meubles (inventaires de meubles, équipements, trésors d'églises, archives ou collections) ;
- microfilmage de l'ensemble du matériel documentaire pour sa sécurisation à long terme (procédés analogiques, numériques et hybrides).

#### 2.2.2 Relevé de l'état du point de vue du génie civil

Le relevé de l'état du point de vue du génie civil est réglementé par la norme SIA 269 (ch. 6.2). Dans le contexte particulier de la sécurité sismique, il se déroule selon les étapes suivantes, conformément à la norme SIA 269/8 :

- préparation des données de base ;
- attribution de l'ouvrage à l'une des classes d'ouvrages ;
- détermination des valeurs mécaniques pertinentes des matériaux présents.

Ce relevé est complété par l'investigation (du point de vue du génie civil) de la conception et des dispositions constructives (aspects constructifs) du monument, qui doit être réalisée elle aussi durant la phase de **définition des objectifs**.

Pour la préparation des données de base, l'ingénieur civil travaille en étroite collaboration avec le bureau d'architectes et le service de conservation des monuments his-

toriques à des fins de synergie et d'efficacité, et tire parti de leurs connaissances et de leur documentation. La préparation des données de base comprend la collecte de plans, ainsi que la réalisation des investigations de l'ouvrage éventuellement utiles pour procéder à des clarifications. Dans le domaine des monuments historiques, les plans de base spécifiques permettant d'évaluer les dispositions constructives et les détails constructifs du point de vue du génie civil sont le plus souvent insuffisants, voire inexistantes. Les plans d'armature, par exemple, ne sont pas archivés par les propriétaires de manière systématique. À cela s'ajoute le fait que les dispositions constructives de la structure porteuse des monuments historiques et leurs détails constructifs peuvent être très hétérogènes et qu'ils ne correspondent pas toujours totalement aux plans historiques (p. ex. moins d'armatures dans l'objet que sur le plan). En fonction de la quantité et de la qualité des documents disponibles, il est donc nécessaire de procéder à des investigations physiques supplémentaires,

autrement dit à des **investigations invasives**. En raison de l'enjeu particulier que représentent la conservation et la protection de la substance bâtie ayant une valeur historique, il est essentiel que le relevé de l'état du point de vue du génie civil soit effectué de manière ciblée et mûrement réfléchi, de sorte que les investigations invasives requises se limitent au strict minimum et ménagent la substance dans toute la mesure du possible. L'élaboration d'un concept d'investigation, qu'il faut discuter, harmoniser et ajuster, et la prise d'une décision commune par l'ingénieur civil et le conservateur des monuments quant à la marche à suivre ont fait leurs preuves dans la pratique [42].

L'analyse des données de base doit présenter sous forme de synthèse l'état actuel des connaissances sur le monument historique, ainsi que les incertitudes restantes, et établir dans quelle mesure il est nécessaire de réaliser des vérifications du point de vue du génie civil. Afin de limiter les investigations requises au strict minimum, l'intérêt qu'elles représentent pour l'évaluation de la sécurité sismique doit être examiné de façon critique [42].

Pour la documentation et la présentation du concept d'investigation, il est recommandé d'utiliser des plans d'étages afin d'y noter les endroits à examiner et la méthode d'investigation à employer (fenêtre d'observation, prélèvement d'échantillons, etc.) et de joindre des photos à titre d'exemples. Toute investigation invasive à pratiquer sur l'ouvrage doit être précédée d'une pesée des intérêts, qu'il convient de consigner. Afin d'assurer le bon déroulement des investigations, il est recommandé à l'ensemble des personnes concernées de s'accorder sur la façon d'ajuster le concept en cours de réalisation si cela s'avère nécessaire et de définir les responsabilités et les compétences de chacun. Des exemples issus de la pratique montrent qu'il est parfaitement possible d'effectuer des investigations invasives essentielles, bien argumentées et bien expliquées, sur des substances bâties protégées.

L'identification des matériaux de construction (et du sol de fondation) résulte de l'étude des documents concernant le monument. Si certains matériaux déterminants demeurent inconnus, il faut les identifier dans toute la mesure du possible pendant les investigations de l'ouvrage. Les valeurs mécaniques pertinentes des matériaux

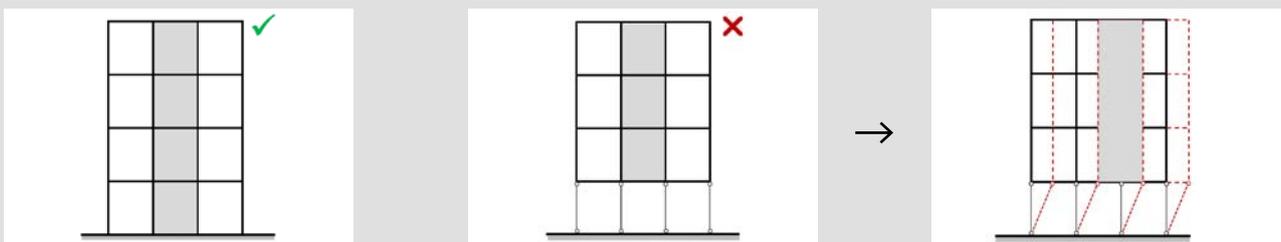
présents doivent ensuite être déterminées et actualisées sur la base des chiffres spécifiques de chaque matériau qui figurent dans les normes de maintenance SIA 269/2 ss [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49]. L'expérience montre que les éléments de construction de la structure porteuse, de même que les matériaux utilisés, peuvent fortement varier dans un même monument historique : dans le but de faire des économies sur les matériaux, plus ou moins chers selon la période de construction, il n'est pas rare en effet que les éléments de construction et leurs détails constructifs aient été adaptés aux nécessités et aux fonctions spécifiques de l'objet. Ainsi, on peut trouver dans un même monument historique plusieurs *systèmes structuraux* de dalles composés de matériaux différents et/ou diverses structures murales composées de matériaux différents.

L'investigation de la conception et des dispositions constructives du monument est une autre composante essentielle du relevé de l'état effectué par l'ingénieur civil. Elle a pour but de vérifier si et dans quelle mesure l'ouvrage présente des caractéristiques de conception et de construction propices à un bon comportement sismique. Les problématiques qu'elle met au jour peuvent considérablement influencer le choix des méthodes d'investigation. Dans le cas des monuments historiques, les dispositions constructives de la structure porteuse sont souvent au cœur de la question, car la sécurité sismique dépend bien plus de cet aspect que des propriétés des matériaux de construction, calculées à la virgule près. Il s'agit là d'un point positif, puisque l'expérience montre que la détermination quantitative des valeurs mécaniques peut être difficile et empreinte de grandes incertitudes [42] (voir encadré 16).

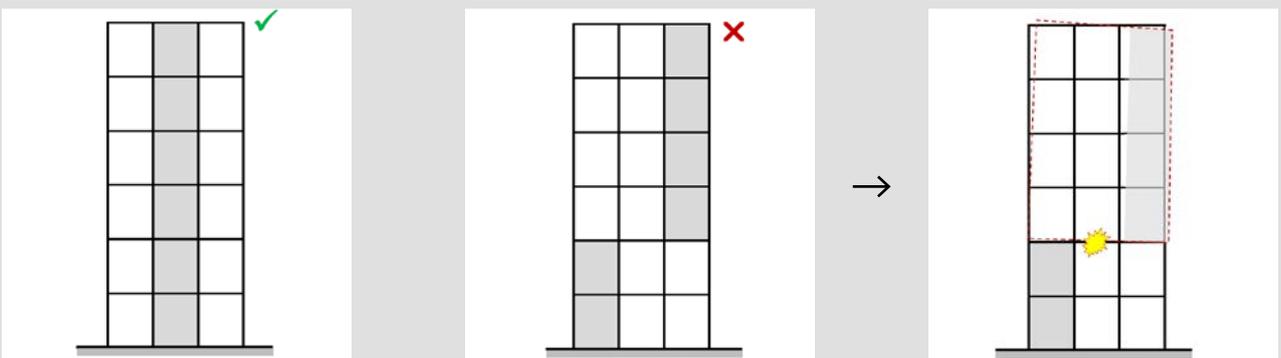
### Encadré 16 : Principes régissant la conception et la construction parasismiques [98]

L'investigation de la conception et des dispositions constructives du monument historique doit permettre d'évaluer dans quelle mesure les principes de construction parasismique sont respectés. Si certaines conditions ne sont pas remplies, ou seulement en partie, le relevé de l'état doit fournir un premier aperçu des possibles points faibles pénalisant le comportement de l'ouvrage en cas de séisme. Ces points faibles peuvent exister au niveau de la disposition horizontale, de la disposition verticale, des dispositions constructives, de la construction et/ou des fondations de l'ouvrage. Le tableau 27 de la norme SIA 261 fournit des indications normatives concernant la conception et la construction parasismiques. Des principes parasismiques concrets sont énoncés par ailleurs dans la directive « Conception parasismique des bâtiments – Principes de base à l'attention des ingénieurs, architectes, maîtres d'ouvrages et autorités » (2002) [98], élaborée par Hugo Bachmann sur mandat de l'ancien Office fédéral des eaux et de la géologie (aujourd'hui OFEV).

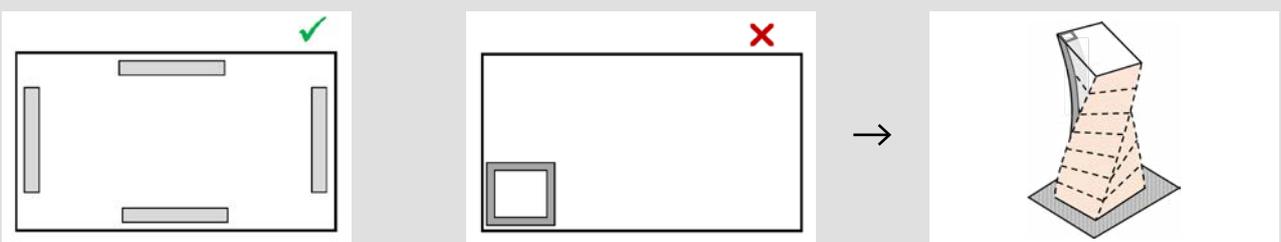
**Régularité :** Un étage « faible » ou « mou » (« soft story » en anglais) est un point faible dans la disposition verticale des éléments porteurs du bâtiment ; les contreventements massifs aux étages supérieurs (p. ex. murs) font défaut au rez-de-chaussée, où des colonnes remplacent des murs massifs. Il en résulte un rez-de-chaussée flexible dans le plan horizontal. En cas de séisme, les colonnes ne sont pas en mesure de résister sans dommages aux *déplacements relatifs* entre le sol qui oscille et la partie supérieure de l'ouvrage. Les déformations plastiques qui se concentrent aux extrémités des colonnes produisent alors un *mécanisme de colonnes*, qui provoque le plus souvent des dégâts irréparables, voire l'effondrement de l'ouvrage.



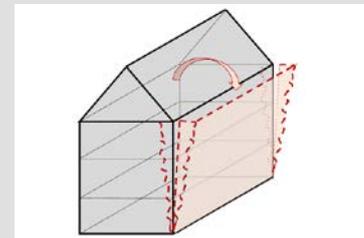
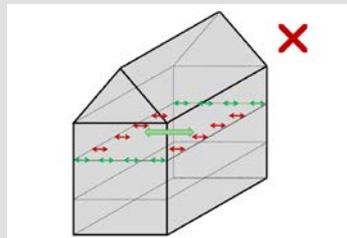
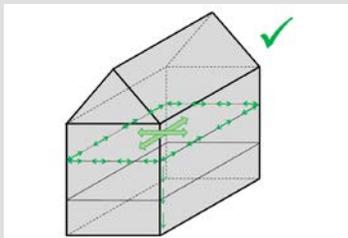
Un décalage des éléments de contreventement dans le plan vertical est également problématique et va mener à un mauvais comportement en cas de séisme, avec des ruptures prématurées au niveau de la zone de décalage.



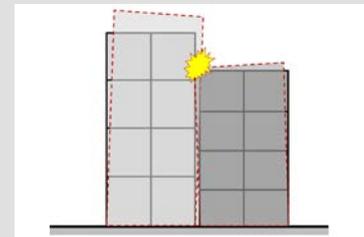
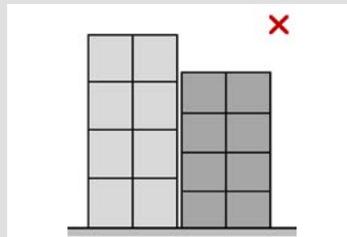
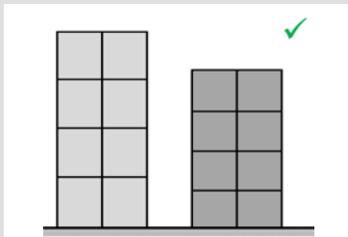
**Symétrie :** Les contreventements asymétriques, à savoir des éléments porteurs disposés de manière non symétrique, créent un point faible dans le plan horizontal et y causent une torsion du bâtiment en cas de séisme. Cette torsion génère principalement d'importants déplacements relatifs entre le pied et la tête des colonnes les plus éloignées du centre de rigidité. Ces dernières cèdent alors fréquemment.



**Comportement solidarisé des éléments de construction :** Dans les bâtiments à plusieurs étages, les dalles doivent pouvoir se comporter comme des diaphragmes quasiment rigides et elles doivent être reliées solidement à tous les éléments porteurs verticaux. En cas de séisme, elles assurent ainsi la solidarisation des éléments dans le plan horizontal et elles répartissent les forces et les déplacements entre les différents éléments porteurs verticaux, en fonction de leur rigidité. Les dalles formées d'éléments préfabriqués sont généralement insuffisantes pour assurer cette fonction de diaphragme, à moins que les éléments soient solidarisés par une chape de béton armé suffisamment épaisse coulée sur place. Les dalles monolithiques en béton armé sont bien plus efficaces. Les constructions en maçonnerie avec planchers flexibles sont un autre exemple de bâtiments présentant un comportement défavorable en cas de tremblement de terre. Les inconvénients résident dans le fait que les planchers flexibles n'assument pas un rôle de diaphragme et que leur liaison avec les parois est faible. La transmission horizontale des efforts des planchers flexibles vers les parois est souvent insuffisante. En outre, la stabilité au déversement hors plan des parois (« *out-of-plane* ») peut être critique en raison de leur liaison insuffisante avec les planchers ou avec les parois verticales orientées perpendiculairement.



**Séparation :** Une collision entre des parties de bâtiments voisins sous l'effet d'un séisme peut provoquer des dommages considérables, voire des effondrements. Le risque d'effondrement existe surtout lorsque les dalles des étages des bâtiments voisins sont situées à des hauteurs différentes et viennent heurter des colonnes.



## 2.3 Définition des objectifs de protection

Les ingénieurs civils et les conservateurs des monuments historiques ne partagent pas la même définition ni la même compréhension des objectifs de protection. Durant la phase 1 du processus interdisciplinaire, les objectifs de protection doivent d'abord être définis séparément pour les deux disciplines, avant d'être mis en regard les uns des autres. Comprendre mutuellement les exigences maximales visées de chacun en matière de protection est une condition sine qua non pour avancer progressivement vers des objectifs de protection communs, acceptables par toutes les parties concernées.

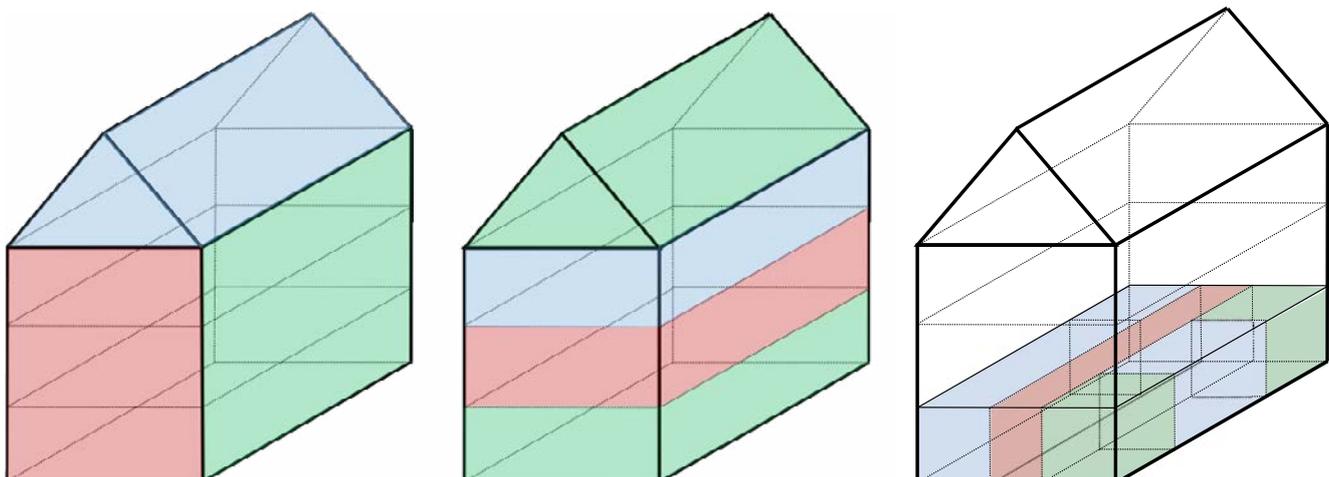
Pour les responsables de la conservation des monuments historiques, l'objectif de protection général consiste à préserver la substance historique dans toute la mesure du possible – en s'appuyant essentiellement sur les Principes pour la conservation du patrimoine culturel bâti en Suisse [26]. La définition des objectifs de protection doit toujours être spécifique au monument historique considéré et elle doit désigner les zones et les parties de l'ouvrage qui sont indispensables à la préservation de sa valeur patrimoniale (fig. 6).

L'investigation de l'ouvrage du point de vue de la conservation des monuments historiques aboutit (en complément

du rapport sur les constats) à l'interprétation, à l'évaluation et à l'appréciation de la matière transmise, en l'occurrence de son état de conservation, de sa qualité et de son importance en termes de valeur patrimoniale. C'est sur cette base que les objectifs de protection pertinents pour la conservation du monument sont concrétisés et définis de manière contraignante. Ils se concentrent sur les composantes du caractère de l'objet, c'est-à-dire sur les zones et les parties de l'ouvrage qui doivent impérativement être conservées et/ou ménagées. L'ampleur des objectifs de protection du point de vue de la conservation dépend de l'importance attribuée à l'objet et peut donc varier considérablement d'un monument historique à l'autre. Typiquement, les objectifs de protection peuvent viser à préserver intact l'aspect extérieur du monument, à conserver intégralement les éléments porteurs qui sont pertinents dans l'historique de sa construction et/ou à préserver entièrement l'aspect et l'état matériel global des agencements de pièces qui sont essentiels à sa compréhension et à sa valeur patrimoniale. Les zones et les parties de l'ouvrage qui ne sont pas désignées comme étant explicitement dignes de protection sont susceptibles de servir de périmètres d'intervention pour des mesures de sécurité sismique (fig. 6).

Dans le domaine du génie civil, la définition des objectifs de protection est réglementée par des normes: les

**Fig. 6 (exemple de référence):** Représentation fictive d'objectifs de protection définis du point de vue de la conservation des monuments historiques pour les façades (à gauche), les étages (au centre) et les différentes zones d'un étage (à droite). Légende: rouge = à protéger / très grande importance (intervention à éviter), bleu = à préserver / grande importance (intervention possible à titre exceptionnel), vert = digne d'être préservé / faible importance (intervention possible).



objectifs sont définis qualitativement et quantitativement sur la base des exigences figurant dans les normes en vigueur. En matière de sécurité sismique, les *biens dignes de protection* doivent en principe satisfaire aux exigences définies dans les normes auxquelles sont soumises les nouvelles constructions. Sont des biens dignes de protection au sens de la norme SIA 261 les personnes, les biens matériels d'une valeur notable (bâtiments, infrastructures, objets d'une grande importance ou présentant une incidence économique, ressources naturelles vitales pour les personnes, biens culturels) et l'environnement [50]. Pour ces biens, le risque sismique doit être limité à un niveau acceptable. Conformément aux normes applicables aux structures porteuses, les objectifs de protection visés pour la sécurité sismique d'un monument historique comprennent la protection des personnes (sauver des vies), la limitation des dommages (directs, indirects et/ou causés aux valeurs immatérielles) et la garantie de l'aptitude au fonctionnement d'ouvrages importants (limitation des pertes de fonction). Les objectifs de protection sont déterminés par l'attribution du monument à une classe d'ouvrages, qui est elle-même déterminée par la fonction (utilisation) et l'occupation du monument (voir encadré 4). Par occupation, on entend le nombre de personnes séjournant dans un monument ou dans la zone susceptible d'être atteinte par les décombres de ce dernier; l'occupation correspond à la valeur moyenne sur une année du nombre de personnes qui, se trouvant dans le monument et à ses alentours, sont menacées par sa défaillance.

La **définition des objectifs** de protection marque la fin de la phase 1 et le début des **études préliminaires** (phase 2).

## 2.4 Étude numérique et évaluation de la sécurité sismique

L'étude numérique et l'évaluation de l'état actuel de la sécurité sismique des monuments historiques doivent être réalisées dans le cadre des **études préliminaires**. L'étude numérique se fonde sur les actions sismiques utilisées pour l'examen. Ces actions sont dépendantes de trois facteurs d'influence, décrits dans la norme SIA 261 : l'emplacement du monument (zone sismique), les particularités du sol de fondation à l'emplacement du monument (*classe de sol de fondation*) et la fonction du monument (classe d'ouvrages).

Une fois déterminées, les actions sismiques du *séisme de vérification* sont utilisées pour analyser la structure porteuse du monument et vérifier sa sécurité structurale (et éventuellement son aptitude au service). Conformément aux normes SIA 261 (ch. 16.7) et SIA 269/8 (ch. 2.1.1.3), il y a lieu d'étudier également le comportement des éléments non-structuraux (liaisons et fixations comprises) qui, en cas de défaillance, peuvent mettre des personnes en danger, endommager la structure porteuse ou porter préjudice à l'exploitation d'installations importantes.

L'analyse de la sécurité sismique du monument se termine par le calcul du facteur de conformité découlant de l'examen de l'état actuel ( $\alpha_{\text{eff}}$ ). Ce facteur de conformité est établi en comparant l'action sismique que peut supporter sans rupture la structure porteuse ou l'élément de construction considéré, et la valeur d'examen de cette action sismique (séisme de vérification). Le plus petit facteur de conformité établi lors de l'examen – qui correspond à l'élément de construction le plus faible / critique – doit être considéré comme le facteur de conformité  $\alpha_{\text{eff}}$  déterminant. Si le facteur de conformité déterminant est  $\alpha_{\text{eff}} = 0,3$  par exemple, cela signifie que la sécurité sismique du monument correspond à 30 % de celle que les normes sur les structures porteuses exigent pour les nouvelles constructions.

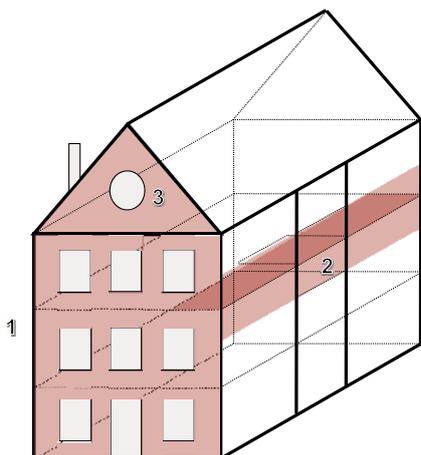
L'évaluation de la sécurité sismique de la structure porteuse et des éléments non-structuraux pertinents consiste, d'une part, à comparer le facteur de conformité  $\alpha_{\text{eff}}$  déterminant (établi lors de l'examen de l'état actuel) et le facteur de conformité minimal  $\alpha_{\text{min}}$  et, d'autre part, à évaluer la conception parasismique ainsi que la conception et les dispositions constructives de l'ouvrage (voir encadré 16).

L'étude numérique et l'évaluation de la sécurité sismique des monuments historiques sont réalisées en principe dans le cadre d'une vérification générale au sens de la norme SIA 269/8. Cette vérification générale s'effectue habituellement en recourant à des *méthodes de calcul basées sur les forces* (*méthode des forces de remplacement, méthode du spectre de réponse*). Si le facteur de conformité  $\alpha_{\text{eff}}$  qui résulte de la vérification générale est inférieur au facteur de conformité minimal  $\alpha_{\text{min}}$  et impose par conséquent des mesures visant à améliorer la sécurité sismique, il faut dans tous les cas peser l'intérêt d'une vérification plus détaillée. Compte tenu des simplifications

opérées et de la précision des calculs effectués lors de la vérification générale, il convient d'établir si une vérification détaillée (étude numérique et évaluation de la sécurité sismique avec modèles de la structure porteuse plus raffinés, méthodes de calcul basées sur les déformations, calculs non linéaires, vérification probabiliste, etc.) est susceptible de donner des résultats plus précis, plus proches de la réalité et éventuellement moins prudents quant à l'état actuel de la sécurité sismique du monument, ou si la vérification générale fournit déjà des indications suffisamment claires et précises.

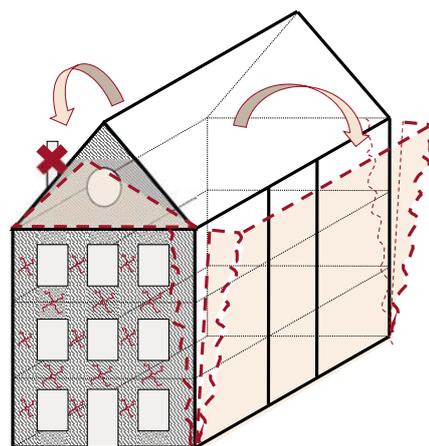
Lors de la vérification générale, les actions sismiques peuvent être utilisées conformément à la norme SIA 269/8 (ch. 3.1.2). Les actions sismiques sont déterminées sur la base de la zone sismique (localisation géographique du monument), de la classe de sol de fondation (particularités du sous-sol local) et de la classe d'ouvrages à laquelle est attribué le monument. Si une vérification détaillée s'impose, il faut non seulement affiner la modélisation et le calcul, mais, en fonction des cas, éventuellement déterminer en outre l'action sismique par le biais d'une investigation propre au site (étude de site sismique). Cette démarche permet une évaluation des actions sismiques plus proche de la réalité et parfois plus favorable.

**Fig. 7 (exemple de référence) : Représentation fictive de points faibles pénalisant le comportement de l'ouvrage en cas de séisme : 1. résistance ultime insuffisante au niveau de certains éléments porteurs verticaux (linteaux de façade), 2. liaison plancher-paroi insuffisante, 3. résistance ultime insuffisante en cas de sollicitation des éléments porteurs verticaux perpendiculairement à leur plan (mur pignon).**



L'examen de la sécurité sismique du monument et ses résultats doivent être consignés dans un rapport et communiqués à l'équipe de projet interdisciplinaire sous une forme facilement compréhensible. Le rapport doit en particulier attirer l'attention sur les points faibles pénalisant le comportement de l'ouvrage en cas de séisme et sur les facteurs de conformité  $\alpha_{eff}$  qui en résultent, car ces éléments serviront de base à l'élaboration et l'évaluation d'ébauches de solutions. Les différents éléments doivent être représentés schématiquement sur les plans de base du monument, en plan, en élévation, en vues et en coupes (fig. 7). Chaque fois que cela est possible, les points faibles de la sécurité sismique et les facteurs de conformité  $\alpha_{eff}$  établis lors de l'examen de l'état actuel doivent être présentés avec des illustrations montrant clairement les dommages attendus en cas de séisme (fig. 8).

**Fig. 8 (exemple de référence) : Représentation fictive de dommages hypothétiques au niveau des points faibles dans l'état limite de la sécurité structurale. Légende : croix rouge = défaillance d'un élément de l'ouvrage (renversement de la cheminée ou fissuration de linteaux par la sollicitation du mur de façade dans son plan) ; zone orange avec lignes rouges en pointillés = défaillance d'un élément de construction (basculement du mur pignon ou du mur de façade).**



## 2.5 Élaboration et évaluation d'ébauches de solutions

Sur la base des objectifs de protection définis du point de vue de la conservation des monuments historiques (2.3), de l'étude numérique et de l'évaluation de la sécurité sismique (2.4) ainsi que du relevé de l'état existant (2.2), la prochaine étape consiste à élaborer plusieurs ébauches de solutions (sommaires) pour des mesures de sécurité sismique (voir encadré 17).

Conformément à la norme SIA 269, les bases nécessaires à l'élaboration d'ébauches de solutions sont les résultats de l'examen, les objectifs de l'exploitation de l'ouvrage, l'utilisation présente et future, la nouvelle durée d'utilisation (ou la « durée d'utilisation restante », d'après les normes SIA 269 et SIA 269/8), la valeur de maintenance, ainsi que la réglementation en vigueur. Idéalement, les ébauches de solutions doivent être élaborées et évaluées durant la phase des **études préliminaires**.

Pour l'élaboration des ébauches de solutions, il est essentiel d'adopter une vision d'ensemble de l'ouvrage et des risques. Aussi, les réflexions doivent intégrer, outre la sécurité sismique, d'autres situations de risque avec leurs exigences en matière de construction (protection contre les incendies, les crues et/ou la chute d'éléments, accessibilité, etc.), car il peut en résulter des synergies techniques et économiques profitables au projet de construction. Sur la base de cette vision globale et en tenant compte des objectifs de protection définis du point de vue de la conservation des monuments historiques, l'ingénieur civil élabore avec l'architecte différentes ébauches de solutions (sommaires) pour les mesures de sécurité sismique éventuellement requises. Ce faisant, il différencie les mesures indispensables au respect des exigences minimales concernant la protection des personnes et les mesures additionnelles permettant d'atteindre la conformité de l'état de l'ouvrage avec les normes en vigueur.

Les mesures de sécurité sismique concernant les monuments historiques peuvent toucher à l'organisation de l'exploitation, à la construction ou aux deux aspects en même temps. Pour ce qui est de l'organisation de l'exploitation, une restriction d'utilisation n'est pas la seule mesure pos-

sible : changer l'affectation du monument en tout ou en partie permet par exemple de réduire son occupation et donc de l'attribuer à une classe d'ouvrages inférieure. Les ébauches de solutions élaborées doivent présenter différentes combinaisons de mesures de construction et de mesures d'organisation de l'exploitation, ainsi que différentes combinaisons de mesures de construction (fig. 9).

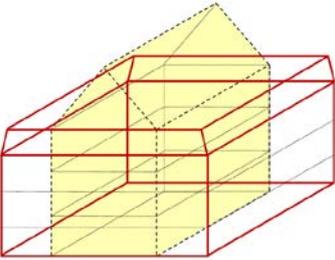
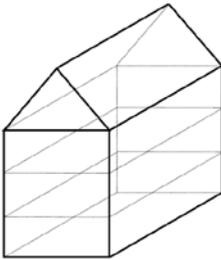
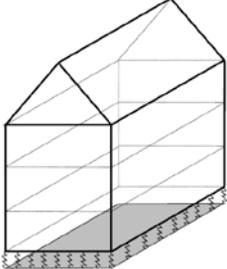
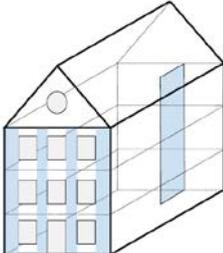
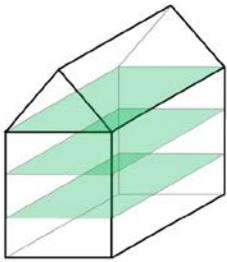
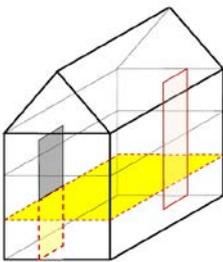
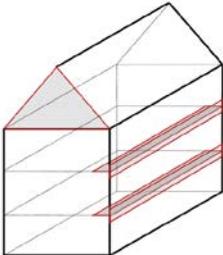
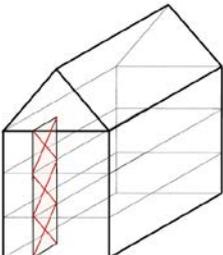
Les ébauches de solutions sont ensuite comparées entre elles et évaluées sur la base (a) de leur incidence sur le monument historique (voir encadré 9) et sur les objectifs de protection définis selon les normes applicables aux structures porteuses, (b) de leur capacité à améliorer la sécurité sismique du monument et à éliminer les points faibles identifiés, (c) des exigences d'utilisation liées au monument et (d) des ressources dont disposent les responsables. Cette première évaluation suffit parfois à écarter immédiatement certaines ébauches de solutions pour lesquelles il n'est même pas utile de procéder à une analyse plus poussée. Dans l'exemple de référence illustré à la figure 9, les ébauches de solutions refusées sont notamment la démolition avec remplacement par une nouvelle construction (en jaune et rouge) et l'isolation sismique (en gris).

Les ébauches de solutions restantes sont comparées entre elles et évaluées de façon plus approfondie. Idéalement, ce processus est documenté sous la forme d'une matrice. Les critères d'évaluation quantitatifs du génie civil et les critères d'évaluation qualitatifs de la conservation des monuments historiques y sont mis en regard pour la première fois dans le processus.

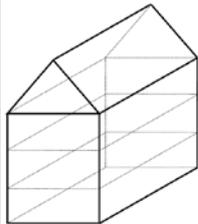
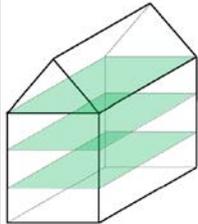
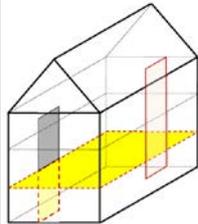
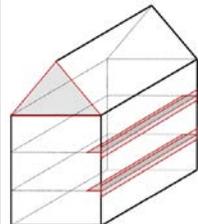
La structure et le contenu de la matrice d'évaluation présentée dans le tableau 1 ont valeur d'exemple uniquement. Les textes ne sont que des appréciations possibles pour les critères proposés ici. En fonction du monument considéré et des ébauches de solutions élaborées, les appréciations peuvent être totalement différentes. Le tableau 1 sert uniquement à illustrer l'idée d'une telle matrice.

Pour l'équipe interdisciplinaire, l'évaluation des ébauches de solutions (qui marque la fin des **études préliminaires**) consiste à sélectionner les quelques propositions adéquates qui serviront de base à l'élaboration de concepts d'intervention concrets durant la phase d'**étude du projet**.

Fig. 9 (exemple de référence): Représentation fictive d'ébauches de solutions et décisions hypothétiques après comparaison et première évaluation (sélection des ébauches de solutions hypothétiques adéquates sur la base de l'étude numérique de la sécurité sismique et des objectifs de protection définis du point de vue de la conservation des monuments historiques).

Représentation fictive d'ébauches de solutions	Décision	Représentation fictive d'ébauches de solutions	Décision
	Solution refusée		Solution 1 à évaluer
Démolir le monument (jaune) et bâtir une nouvelle construction (rouge)		Changer ou adapter l'utilisation du monument (blanc) avec diminution de l'occupation	
	Solution refusée		Solution refusée
Mettre en place une isolation sismique (gris)		Améliorer la résistance ultime d'éléments porteurs verticaux existants (bleu), en général murs ou colonnes	
	Solution 2 à évaluer		Solution 3 à évaluer
Améliorer la résistance ultime d'éléments porteurs horizontaux existants (vert), en général effet de diaphragme des planchers		Remplacer des éléments porteurs verticaux/horizontaux existants (jaune/rouge) et/ou intégrer des éléments porteurs supplémentaires (rouge)	
	Solution 4 à évaluer		Solution refusée
Améliorer ou garantir le comportement solide d'éléments porteurs verticaux/horizontaux existants (gris/rouge)		Améliorer la ductilité d'éléments porteurs verticaux/horizontaux existants (rouge)	

Tab. 1 pour l'exemple de référence (fig. 6, 7, 8 et 9) : Exemple de matrice interdisciplinaire pour l'évaluation d'ébauches de solutions ; degrés d'appréciation proposés : aucun, faible, moyen, considérable.

Incidences de l'ébauche de solution sur :		Utilisation	Amélioration de la sécurité sismique	Caractère invasif de la mesure
<p><b>Solution 1 :</b> Changer ou adapter l'utilisation du monument (blanc) avec diminution de l'occupation</p>		<p>Influence considérable <i>Explication : diminue généralement le potentiel d'utilisation</i></p>	<p>Aucune amélioration <i>Explication : n'apporte aucune amélioration effective de la sécurité sismique du monument</i></p>	<p>Non invasif <i>Explication : ne nécessite aucune intervention au niveau de la substance</i></p>
<p><b>Solution 2 :</b> Améliorer la résistance ultime d'éléments porteurs horizontaux existants (vert), en général effet de diaphragme des planchers</p>		<p>Aucune influence <i>Explication : maintient l'utilisation existante</i></p>	<p>Amélioration moyenne <i>Explication : augmente la résistance ultime d'éléments porteurs horizontaux existants</i></p>	<p>Moyennement invasif <i>Explication : nécessite le renforcement de toute la surface d'éléments porteurs horizontaux (intervention sous forme d'adjonction)</i></p>
<p><b>Solution 3 :</b> Remplacer des éléments porteurs verticaux/horizontaux existants (jaune/rouge) et/ou intégration d'éléments porteurs supplémentaires (rouge)</p>		<p>Faible influence <i>Explication : les nouveaux éléments porteurs peuvent restreindre localement l'utilisation prévue</i></p>	<p>Amélioration considérable <i>Explication : intégration de nouveaux éléments porteurs verticaux et/ou horizontaux qui répondent aux exigences de capacité portante</i></p>	<p>Faiblement invasif <i>Explication : montage d'éléments porteurs verticaux et/ou horizontaux supplémentaires</i></p>
<p><b>Solution 4 :</b> Améliorer ou garantir le comportement solidaire d'éléments porteurs verticaux/horizontaux existants (gris/rouge)</p>		<p>Aucune influence <i>Explication : maintient l'utilisation existante</i></p>	<p>Amélioration considérable <i>Explication : améliore le comportement solidaire d'éléments porteurs verticaux et horizontaux existants</i></p>	<p>Faiblement invasif <i>Explication : intervention locale sous forme d'adjonction pour lier des éléments porteurs existants</i></p>

Perte de substance	Préjudice porté à la valeur culturelle	Coût de la mesure de sécurité sismique	Appréciation hypothétique globale de la mesure
<p>Aucune perte de substance</p> <p><i>Explication : ne nécessite aucune intervention au niveau de la substance</i></p>	<p>Préjudice moyen</p> <p><i>Explication : changement d'affectation d'école à habitation p. ex.</i></p>	<p>Aucun coût</p> <p><i>Explication : ne nécessite pas de travaux</i></p>	<p>+</p> <p><b><i>Explication : changement d'utilisation considéré comme possible ; élaborer un concept d'utilisation</i></b></p>
<p>Perte de substance moyenne</p> <p><i>Explication : nécessite le renforcement de toute la surface d'éléments porteurs horizontaux (intervention sous forme d'adjonction)</i></p>	<p>Préjudice moyen</p> <p><i>Explication : nécessite un renforcement de toute la surface (sous forme d'adjonction) avec une perte de substance moyennement importante et p. ex. une autre nature de surface des planchers</i></p>	<p>Coût moyen</p> <p><i>Explication : dépend p. ex. de l'accessibilité des bords et des faces inférieures et supérieures des planchers</i></p>	<p>-</p> <p><i>Explication : cette ébauche de solution est abandonnée</i></p>
<p>Aucune perte de substance</p> <p><i>Explication : montage de nouveaux éléments porteurs, p. ex. de noyaux d'ascenseurs qui étaient prévus de toute façon</i></p> <p>Perte de substance moyenne</p> <p><i>Explication : substance existante complétée par de nouveaux éléments porteurs, p. ex. des murs supplémentaires</i></p> <p>Perte de substance considérable</p> <p><i>Explication : remplacement d'éléments porteurs existants, p. ex. par un nouveau plancher en béton armé</i></p>	<p>Faible préjudice</p> <p><i>Explication : l'intégration de nouveaux éléments porteurs sans perte de substance (p. ex. noyaux d'ascenseurs qui étaient prévus de toute façon) porte à peine préjudice à la valeur culturelle</i></p>	<p>Faible coût*</p> <p><i>Explication : le montage de nouveaux éléments porteurs (ensemble avec p. ex. un nouveau noyau d'ascenseur)</i></p> <p><i>* = grâce à la synergie du noyau d'ascenseur</i></p>	<p>+</p> <p><b><i>Explication : élaborer un concept d'intervention dans le cadre du projet de construction</i></b></p>
<p>Faible perte de substance</p> <p><i>Explication : intervention locale sous forme d'adjonction pour lier des éléments porteurs existants</i></p>	<p>Faible préjudice</p> <p><i>Explication : intervention locale sous forme d'adjonction avec faible perte de substance, potentiellement très peu visible</i></p>	<p>Coût moyen</p> <p><i>Explication : le coût dépend p. ex. de l'ampleur et des détails de la mesure de renforcement</i></p>	<p>+</p> <p><b><i>Explication : élaborer un concept d'intervention dans le cadre du projet de construction</i></b></p>

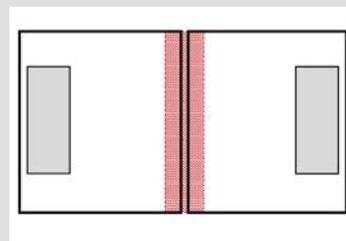
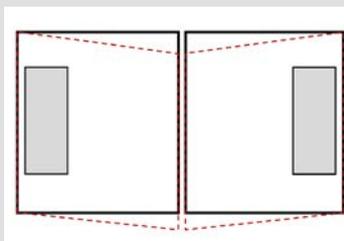
### Encadré 17 : Stratégies d'amélioration du point de vue du génie civil et ébauches de solutions pour des mesures constructives de sécurité sismique [99]

Le but principal des mesures constructives de sécurité sismique est d'éliminer les points faibles qui pénalisent le comportement sismique du monument historique. La liaison entre les nouveaux et les anciens éléments de construction, ainsi que la transmission des efforts dans le sous-sol via les fondations sont également des aspects importants à considérer. Les ébauches de solutions classiques pour des mesures constructives de sécurité sismique sont les suivantes :

**Améliorer la régularité** = en principe, toute mesure constructive doit viser à mieux répartir la rigidité, la résistance ultime et la masse de la structure porteuse, en plan comme en élévation. Les nouveaux éléments de construction intégrés au monument doivent être conçus de manière à améliorer la régularité de sa structure porteuse.

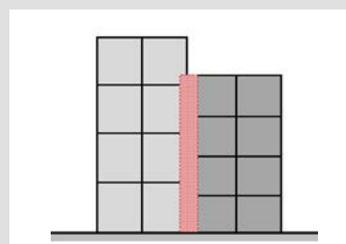
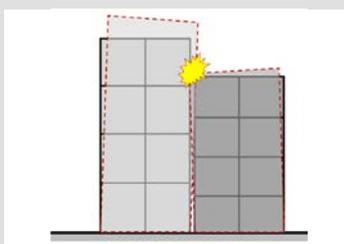
#### Fig. E17.1 : Créer une symétrie

(à gauche) Lycée Neufeld à Berne [99] construit en 1965 (BE, monument historique classé), (au centre) schéma du point faible et du mécanisme de défaillance, (à droite) schéma de la mesure de sécurité sismique : en 2006, les joints de dilatation traversant la dalle de tous les étages au milieu du bâtiment ont été clavés. En exploitant les deux noyaux d'ascenseurs élancés en béton armé, on a ainsi obtenu un système global contreventé symétriquement pour la reprise des efforts sismiques.



#### Fig. E17.2 : Fermer les joints

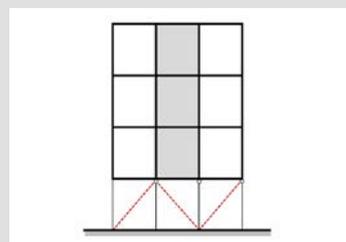
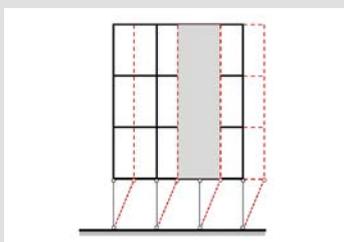
(à gauche) Musée du design de Zurich [100] construit en 1933 (ZH, monument historique classé), (au centre) schéma du point faible et du mécanisme de défaillance, (à droite) schéma de la mesure de sécurité sismique : en 2018, les joints ont été fermés solidement au moyen de tiges filetées.



**Renforcer** = l'ébauche de solution la plus classique consiste à renforcer la structure porteuse existante en y ajoutant de nouveaux éléments de construction (p. ex. des parois en béton armé ou des treillis en acier) ou en doublant des éléments de construction existants. Cette mesure permet d'augmenter la résistance ultime et la rigidité pratiquement sans modifier la capacité de déformation.

#### Fig. E17.3 : Ajouter un contreventement

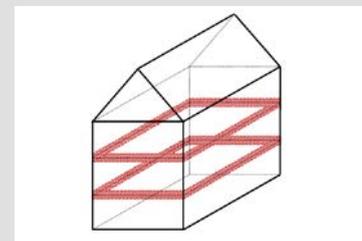
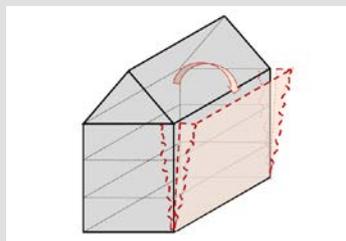
(à gauche) Bâtiment HPH de l'EPFZ [99], au Höggerberg, construit entre 1970 et 1971 (ZH, monument historique classé), (au centre) schéma des points faibles et des mécanismes de défaillance, (à droite) schéma de la mesure de sécurité sismique : en 1994, le rez-de-chaussée flexible a été conforté par un nouveau treillis oblique formé de tubes d'acier. Cette solution a permis d'augmenter la rigidité et la résistance ultime, tout en éliminant le problème d'excentricité affectant le système de contreventement au rez-de-chaussée.



**Améliorer le comportement par solidarisation** = une autre ébauche de solution consiste à améliorer la solidarisation des différents éléments porteurs, autrement dit à améliorer le comportement global du bâtiment sous l'action d'un séisme. Il s'agit par exemple de créer des liaisons solides entre des parois et des planchers et/ou de lier entre elles des zones de plancher. Cette mesure permet d'améliorer la transmission des efforts dans les parois via les planchers (effet de diaphragme) et d'éviter des mécanismes de rupture locaux.

**Fig. E17.4: Améliorer les liaisons paroi-plancher**

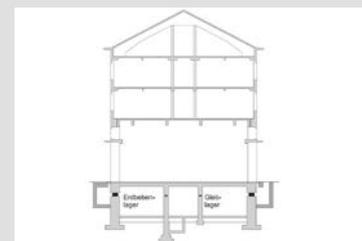
(à gauche) Aile des arts appliqués du Musée national suisse à Zurich [101] construite en 1898 (ZH, monument historique classé), (au centre) schéma du point faible et du mécanisme de défaillance, (à droite) schéma de la mesure de sécurité sismique: en 2014, il a été possible d'améliorer les liaisons paroi-plancher le long des façades en assurant l'ancrage des parois au moyen d'éléments de traction ou d'une construction en acier avec des jambes de force. Le comportement du bâtiment a été amélioré également par l'utilisation de barres de liaison pour l'assemblage de diaphragmes.



**Isolation sismique (amortissement)** = l'augmentation de l'amortissement génère une réduction de l'action sismique. Ce résultat peut être obtenu p. ex. en ajoutant des éléments amortisseurs spéciaux. Une isolation sismique par des appuis horizontalement souples et à haut pouvoir amortissant induit à la fois une diminution de la rigidité et une augmentation de l'amortissement.

**Fig. E17.5: Insérer des appuis sismiques**

(à gauche) Bâtiment principal des pompiers professionnels de Bâle-Ville [99] (BS, non classé), (à droite) schéma de la mesure de sécurité sismique: en 2007, toutes les parois extérieures et intérieures de la cave du bâtiment ont été séparées de la dalle du rez-de-chaussée par une césure horizontale et le bâtiment d'environ 4000 tonnes a été posé sur des appuis sismiques et des appuis glissants. L'insertion d'appuis sismiques horizontalement souples et à haut pouvoir amortissant est une mise en œuvre classique de la stratégie «Isolation sismique» [103].

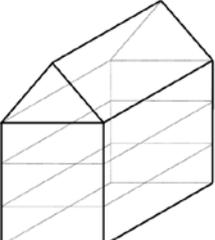
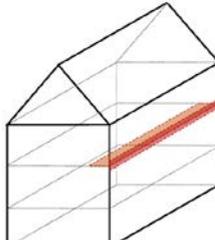
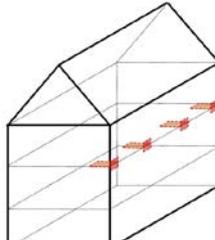
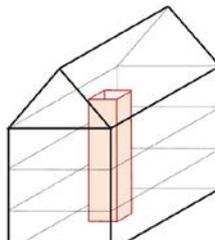
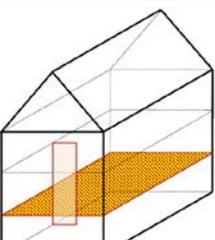


## 2.6 Concepts d'intervention et évaluation différenciée déterminant la proportionnalité

Idéalement, c'est au début de la phase partielle **Avant-projet** que l'ingénieur civil, en collaboration avec l'architecte et le conservateur des monuments histo-

riques, approfondit les ébauches de solutions sélectionnées préalablement, en vue d'élaborer des concepts d'intervention concrets. Pour les solutions retenues, il y a lieu si possible d'élaborer plusieurs concepts possibles de mesures touchant à la conception et à la construction (fig. 10).

Fig. 10 (exemple de référence) : Représentation fictive de concepts d'intervention hypothétiques

	<p>Concept 1 : changement d'utilisation (blanc) avec diminution de l'occupation</p>
	<p>Concept 3.1 : liaison continue (rouge) pour améliorer le comportement solidaire des parois et des planchers existants</p>
	<p>Concept 3.2 : liaison ponctuelle/locale (rouge) pour améliorer le comportement solidaire des parois et des planchers existants</p>
	<p>Concept 4.1 : intégration d'éléments porteurs verticaux supplémentaires (rouge) p. ex. en parallèle avec un nouveau noyau d'ascenseurs</p>
	<p>Concept 4.2 : remplacement ou renforcement du plancher existant (jaune/rouge) et intégration d'une paroi supplémentaire (rouge)</p>

Le degré de détail des concepts d'intervention doit être suffisamment élevé pour permettre une évaluation différenciée de leur proportionnalité. Conformément au ch. 7.2.2.1 de la norme SIA 269, l'ampleur et le contenu des concepts d'intervention correspondent à l'étape de l'avant-projet dans l'étude d'un projet de construction. Les concepts d'intervention doivent être consignés dans un rapport documenté. Pour une meilleure compréhension, il est important de confronter les dégâts attendus en cas de non-application du concept et ceux attendus en cas d'application du concept, au moins pour l'état limite de la sécurité structurale (fig. 11).

Une mesure visant à améliorer la sécurité sismique d'un bâtiment existant est proportionnée si elle est efficiente et/ou efficace au sens de la norme SIA 269/8, c'est-à-dire si son coût est faible et son bénéfice (réduction du risque) élevé. En matière de protection des personnes, l'un des critères essentiels pour évaluer la proportionnalité conformément à la norme SIA 269/8 est la nouvelle durée d'utilisation de l'ouvrage. Dans le cas particulier d'un monument

historique, une mesure est proportionnée si, en sus, elle ne porte aucune atteinte grave à la valeur culturelle du monument et si elle garantit le plus grand ménagement possible (voir encadré 18).

Les monuments historiques doivent répondre aux mêmes exigences minimales que les bâtiments existants ordinaires en ce qui concerne la protection des personnes (facteur de conformité établi lors de l'examen  $\alpha_{\text{eff}} \geq$  facteur de conformité minimal  $\alpha_{\text{min}}$ ). Pour les mesures de sécurité sismique visant à améliorer la protection des personnes au-delà des exigences minimales, il y a lieu de procéder à une évaluation différenciée de la proportionnalité en tenant compte de la valeur culturelle du monument.

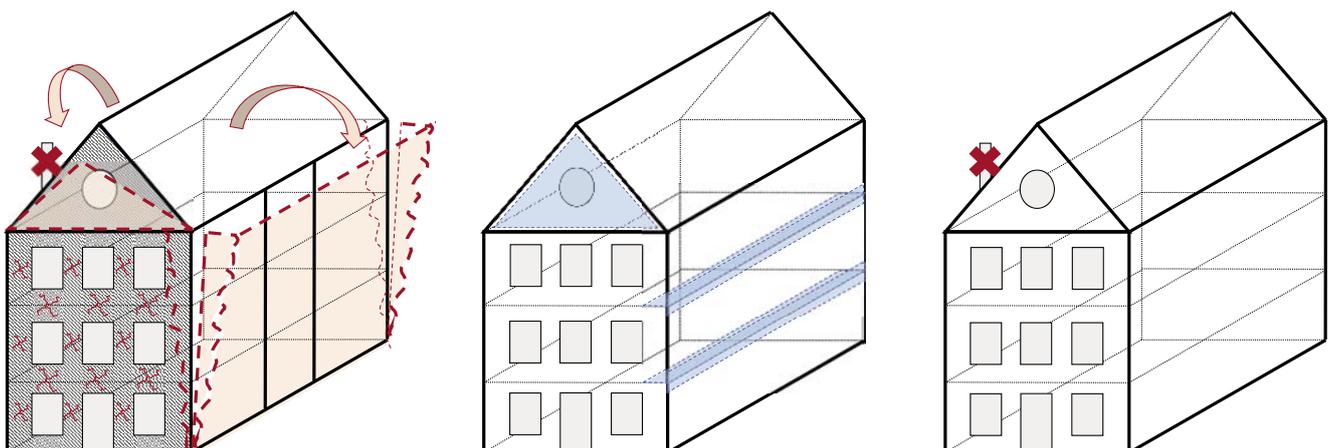
Pour déterminer une proportionnalité conforme aux intérêts de la conservation des monuments historiques, le critère de référence est la valeur culturelle influencée par les mesures envisagées (état actuel et état visé). À l'aide d'une matrice de valeurs pondérant différents critères, l'influence de la mesure sur la valeur culturelle du

**Fig. 11 (exemple de référence) : Représentations fictives de dommages hypothétiques au niveau des points faibles, dans l'état limite de la sécurité structurale, en cas d'application et de non-application du concept d'intervention :**

**(à gauche) non-application du concept d'intervention :** croix rouge = défaillance d'un élément de l'ouvrage (renversement de la cheminée ou fissure des linteaux causées par la sollicitation du mur de façade dans son plan); zone orange avec ligne rouge en pointillés = défaillance d'un élément de construction (basculement du mur pignon ou du mur de façade);

**(au centre) application du concept d'intervention :** zone bleue avec/ou ligne bleue en pointillés = améliorer ou garantir le comportement solide d'éléments porteurs verticaux/horizontaux existants (liaison paroi-plancher et liaison mur pignon-toiture);

**(à droite) après intervention :** croix rouge épaisse = défaillance d'un élément de l'ouvrage (renversement de la cheminée), croix rouges fines = fissures fines (superficielles) témoignant d'une contrainte dans le plan causée par des actions sismiques horizontales.



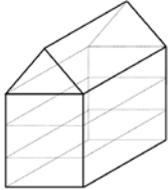
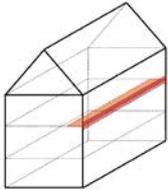
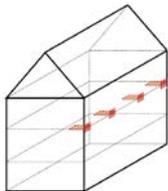
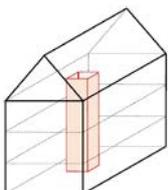
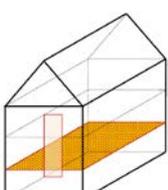
---

monument doit être présentée du point de vue de la sécurité sismique et de la conservation des monuments historiques, pour chaque concept d'intervention (tab. 2). Pour la seconde fois, mais avec un degré de détail plus élevé, les critères d'évaluation qualitatifs de la conservation des monuments historiques sont mis en regard avec les critères d'évaluation quantitatifs du génie civil. Une telle matrice ne repose pas sur une méthode mathématiquement exacte ; elle documente de manière pragmatique, intersubjective et compréhensible la détermination avant/après de la valeur culturelle. Grâce aux comparaisons, les différents concepts d'intervention peuvent ensuite être choisis et priorisés.

La structure et le contenu de la matrice d'évaluation présentée dans le tableau 2 ont uniquement valeur d'exemple. Les textes ne sont rien de plus que des appréciations possibles pour les critères proposés ici. En fonction du monument considéré et des concepts d'intervention élaborés, les appréciations peuvent être totalement différentes. Le tableau 2 sert uniquement à illustrer l'idée d'une telle matrice.



Tab. 2 : Exemple de matrice interdisciplinaire pour l'évaluation des concepts d'intervention, avec priorisation ; degrés d'appréciation proposés : aucun, faible, moyen, considérable – proportionné, non proportionné – acceptable, non acceptable – priorité 1, 2, etc. ; case grise = évaluation en attente.

Influence du concept d'intervention sur :		Valeur culturelle (choix hypothétique de critères, cf. encadré 10)		
Concept d'intervention		Valeur de situation (interaction spatiale du monument avec son environnement)	Valeur historico-culturelle (position du monument dans le cadre du développement économique, politique ou social d'une époque)	Valeur esthétique (somme des qualités architecturales et artistiques du monument, de la composition et de la modénature, des particularités de style et de l'utilisation judicieuse des matériaux)
Concept 1 : changement d'utilisation (vierge) avec diminution de l'occupation		Aucune influence <i>Explication : ne modifie pas la valeur de situation</i>		
Concept 3.1 : liaison continue destinée à améliorer le comportement solide des parois et des planchers existants		Aucune influence <i>Explication : l'intervention constructive sous forme d'adjonction ne modifie pas la valeur de situation</i>	Aucune influence <i>Explication : l'intervention constructive (réversible) sous forme d'adjonction ne modifie pas la valeur historico-culturelle</i>	
Concept 3.2 : liaison ponctuelle/locale pour améliorer le comportement solide des parois et des planchers existants				Influence moyenne <i>Explication : l'intervention constructive (réversible) sous forme d'adjonction influence moyennement la valeur esthétique</i>
Concept 4.1 : intégration d'éléments porteurs verticaux supplémentaires sous la forme d'un nouveau noyau d'ascenseurs		Aucune influence <i>Explication : l'ajout d'éléments porteurs ne modifie pas la valeur de situation</i>	Aucune influence <i>Explication : l'ajout d'éléments porteurs ne modifie pas la valeur historico-culturelle</i>	Faible influence <i>Explication : l'ajout d'éléments porteurs modifie faiblement la valeur esthétique</i>
Concept 4.2 : remplacement ou renforcement du plancher existant (jaune/rouge) et intégration d'une paroi supplémentaire (rouge)		Aucune influence <i>Explication : le remplacement de l'élément existant et l'intégration du nouvel élément ne modifient pas la valeur de situation</i>	Influence considérable <i>Explication : le remplacement de l'élément existant et l'intégration du nouvel élément modifient considérablement la valeur historico-culturelle</i>	

Valeur technique (matériaux utilisés et caractéristiques de la technique de construction)	Sécurité sismique		Évaluation différenciée jugeant la proportionnalité		
	Facteur de conformité après intervention $\alpha_{int}$	Conception et dispositions constructives	Proportionnalité du point de vue du génie civil (voir encadré 18)	Proportionnalité du point de vue de la conservation des monuments historiques (voir encadré 17)	Priorisation interdisciplinaire hypothétique
Aucune influence <i>Explication : ne modifie pas la substance bâtie</i>	Aucune amélioration <i>Explication : aucune mesure de sécurité sismique <math>\alpha_{eff} = \alpha_{int}</math></i>	Aucune amélioration <i>Explication : aucune mesure de sécurité sismique</i>	Proportionné <i>Explication : aucun coût (aucune mesure), réduction du risque grâce à une moindre occupation</i>	Acceptable <i>Explication : statu quo</i>	1
Influence moyenne <i>Explication : l'intervention constructive (réversible) sous forme d'adjonction influence moyennement la valeur technique</i>	0,5	Amélioration moyenne <i>Explication : l'ancrage linéaire des parois empêche un basculement perpendiculaire au plan</i>	Non proportionné <i>Explication : coût élevé pour une réduction modérée du risque</i>	Acceptable <i>Explication : amélioration de l'état moyennant un préjudice à la valeur culturelle (tout au plus) modéré</i>	2
Influence considérable <i>Explication : l'intervention constructive (réversible) sous forme d'adjonction influence considérablement la valeur technique</i>	0,3	Faible amélioration <i>Explication : l'ancrage local des parois réduit le risque d'un basculement perpendiculaire au plan</i>	Non proportionné <i>Explication : coût élevé pour une faible réduction du risque</i>	Non acceptable <i>Explication : amélioration de l'état moyennant un préjudice considérable à la valeur culturelle</i>	3
	0,7	Amélioration considérable <i>Explication : le nouveau noyau d'ascenseurs rigidifie la structure et accroît la résistance ultime</i>	Proportionné <i>Explication : faible coût pour une réduction du risque importante</i>	Acceptable <i>Explication : amélioration de l'état moyennant un faible préjudice à la valeur culturelle</i>	1
	0,7	Amélioration considérable <i>Explication : le remplacement du plancher et la nouvelle paroi accroissent la résistance ultime</i>	Non proportionné <i>Explication : coût très élevé pour une réduction du risque importante</i>	Non acceptable <i>Explication : amélioration de l'état moyennant un préjudice considérable à la valeur culturelle</i>	3

### Encadré 18 : Proportionnalité d'une mesure d'après les normes de maintenance en vigueur

La norme SIA 269/8 [72] constitue la base permettant de décider si la sécurité sismique d'un monument historique doit être améliorée ou si son niveau actuel demeure acceptable. En fonction du rapport coût-bénéfice, tous les monuments historiques ne doivent pas nécessairement présenter le même niveau de sécurité sismique que celui imposé aux nouvelles constructions par les normes sur les structures portantes. Selon les normes en vigueur, le coût de l'amélioration correspond à l'ensemble des dépenses directes et indirectes engendrées par la mesure de sécurité sismique, tandis que le bénéfice correspond à la réduction du risque sismique obtenue par l'augmentation du niveau de sécurité sismique. Dans le cas particulier d'un monument historique, la décision d'une intervention doit également tenir compte de l'influence de la mesure de sécurité sismique sur la valeur culturelle de l'objet, ce dont il faut juger par une évaluation de la proportionnalité.

L'évaluation de la sécurité sismique s'effectue en comparant le facteur de conformité déterminé lors de l'examen détaillé de la sécurité sismique  $\alpha_{\text{eff}}$  et le facteur de conformité minimal  $\alpha_{\text{min}}$ .

Si l'essai de l'examen détaillé que  $\alpha_{\text{eff}} < \alpha_{\text{min}}$ , cela implique systématiquement que **des mesures de sécurité sismique sont requises** au niveau du monument pour limiter le risque individuel au sens du ch. 9.4.4 de la norme SIA 269/8, c'est-à-dire pour atteindre au moins l'égalité  $\alpha_{\text{eff}} = \alpha_{\text{min}}$ .

Dans des cas exceptionnels, une intervention visant à respecter les exigences minimales relatives à la protection des personnes ( $\alpha_{\text{min}}$ ) n'est pas obligatoire si toutes les conditions suivantes sont satisfaites :

- le bâtiment n'est presque jamais occupé par des personnes, autrement dit la valeur estimée de l'occupation est inférieure à 0,2 ;
- le secteur de l'ouvrage menacé par une défaillance ne peut pas être occupé par plus de dix personnes ;

des mesures d'organisation garantissent le respect des conditions ci-dessus et aucun autre bien à protéger n'est menacé. Si l'essai de l'examen détaillé que  $\alpha_{\text{eff}} > \alpha_{\text{min}}$ , cela implique en principe que **des mesures de sécurité sismique complémentaires proportionnées sont requises** au niveau du monument pour améliorer la protection des personnes, c'est-à-dire pour se rapprocher des exigences applicables aux nouvelles constructions. Selon le ch. 9.4.1 de la norme SIA 269/8, « il faut en principe viser un facteur de conformité  $\alpha_{\text{int}}$  au moins égal à 1,0 une fois l'intervention réalisée » ; toutefois, ce principe vaut uniquement si les mesures de sécurité sismique sont proportionnées.

La **proportionnalité d'une mesure de sécurité sismique du point de vue du génie civil sur les plans technique et économique** est quantifiable selon la norme SIA 269/8. Elle doit être déterminée en comparant le coût (dépenses nécessaires) et le bénéfice (réduction du risque obtenue), autrement dit en appréciant l'efficacité de l'intervention (facteur  $EF_M$  dans la norme SIA 269). L'efficacité de l'intervention  $EF_M$  se calcule en divisant la réduction du risque générée annuellement par la mesure de sécurité sismique réalisée  $\Delta R_M$  (exprimée pécuniairement en francs par année) par le coût annuel de la mesure en francs par année  $SC_M$  (coûts de la sécurité).

$$EF_M = \frac{(\Delta R_M)}{(SC_M)}$$

Les **coûts de la sécurité  $SC_M$**  (coût) englobent toutes les dépenses directes et indirectes qui sont liées à la réalisation de la mesure de sécurité sismique et qui ne peuvent pas être imputées à d'autres exigences (remises en état et/ou modifications nécessaires quoi qu'il en soit).

La **réduction du risque  $\Delta R_M$**  (bénéfice) correspond à la différence entre le risque avant et après la réalisation de la mesure de sécurité sismique. Elle inclut au moins la réduction du risque pour les personnes\*, calculée sur la base de la réduction du risque individuel (qui serait obtenue avec la mesure), de l'occupation et du coût limite par vie sauvée. L'occupation correspond au nombre moyen de personnes menacées en cas de défaillance de l'ouvrage. Le coût limite, fixé à 10 millions de francs par personne, exprime la disposition de la société à investir dans des mesures visant réduire des risques subis involontairement.

Formulé plus simplement, cela signifie que les moyens financiers disponibles pour des mesures de sécurité sismique sont d'autant plus importants que le nombre de personnes séjournant dans le monument est élevé et que le niveau de sécurité sismique de ce monument est faible.

Si l'efficacité de l'intervention  $EF_M > 1$ , cela signifie que le bénéfice du point de vue du génie civil sur les plans technique et économique est supérieur au coût : des mesures de sécurité sismique complémentaires sont donc proportionnées et elles doivent être réalisées dans tous les cas. Il convient alors d'approfondir et d'optimiser le concept d'intervention.

Si l'efficacité de l'intervention  $EF_M < 1$ , cela signifie que des mesures de sécurité sismique complémentaires ne sont pas proportionnées du point de vue du génie civil sur les plans technique et économique. On peut dans ce cas renoncer à des mesures.

La réalisation de mesures complémentaires ( $\alpha_{\text{int}} > \alpha_{\text{min}}$ ) doit être décidée sur la base d'une **évaluation différenciée de la proportionnalité tenant compte des intérêts de la conservation des monuments historiques**. Cette évaluation permet de compléter les aspects purement techniques (considérés du point de vue du génie civil sur les plans technique et économique) par des aspects touchant à la protection des biens culturels selon la norme SIA 269/8 (ch. 10 « Proportionnalité des mesures de sécurité sismique »).

\* L'évaluation peut tenir compte par ailleurs de la valeur de l'ouvrage, des biens matériels et des interruptions d'exploitation.

## 2.7 Recommandation d'intervention et décision d'intervention

À l'issue de l'étape précédente, le propriétaire, le responsable de la conservation des monuments historiques, l'architecte et l'ingénieur civil s'entendent sur la formulation d'une recommandation d'intervention, qui sera accompagnée de propositions sur la manière de procéder et qui servira de base à la décision d'intervention. Ce dialogue entre tous les acteurs concernés intervient idéalement durant la phase partielle **Avant-projet**.

La décision d'intervention est prise par le propriétaire sur la base d'une évaluation interdisciplinaire différenciée jugeant la proportionnalité et d'une appréciation globale du risque et du projet. Les conséquences à long terme de la réalisation ou de la non-réalisation d'une mesure de sécurité sismique doivent être mises en balance.

Les intérêts publics sont a priori d'égale importance. Dans la décision d'intervention, la pesée des intérêts entre la conservation du monument et d'autres intérêts publics (protection contre les séismes) et privés doit tenir compte des particularités du cas en cause. La pesée des différents intérêts en jeu doit être présentée de manière transparente.

Une fois la décision d'intervention soutenue par tous les acteurs, l'ingénieur civil prépare les documents techniques nécessaires à la demande d'autorisation de construire et au dossier de mise à l'enquête (phase partielle **Procédure de demande d'autorisation / dossier de mise à l'enquête**). Si cela s'avère nécessaire pour l'appel d'offres, il y a lieu de joindre la décision d'intervention aux plans techniques de construction (phase partielle « Appels d'offres, comparaison des offres, propositions d'adjudication »).

Durant la phase **Réalisation** du processus interdisciplinaire, le concept d'intervention retenu doit être concrétisé sous la forme d'un projet d'exécution.

Si le propriétaire décide de ne pas réaliser certaines mesures de sécurité sismique éventuellement requises, sa décision doit être motivée dans la convention d'utilisation, qui fait partie du volet « génie civil » du cahier des charges du projet. Selon le règlement SIA 112, le proprié-

taire doit approuver la convention d'utilisation phase par phase. Jusqu'à la réalisation des mesures de sécurité sismique, le propriétaire est responsable des dommages aux personnes que pourrait causer un tremblement de terre affectant son monument.

## 2.8 Projet d'intervention et réalisation des mesures

Au cours des travaux, la pertinence du projet d'exécution doit être vérifiée en continu par des investigations de l'objet. En fonction des résultats ou si l'objectif à atteindre le justifie, le projet doit être adapté. Il est fortement recommandé aux mandataires (responsable de la conservation des monuments historiques, ingénieur civil et architecte) de suivre de très près l'exécution des travaux sur le chantier. Les documents relatifs aux décisions interdisciplinaires les plus importantes et aux mesures de sécurité sismique réalisées doivent être remis au propriétaire afin d'en conserver la trace pour de futures interventions.

Pour tous les intervenants, la collaboration interdisciplinaire doit se caractériser par une grande souplesse d'action durant les différentes phases du projet de construction. Pour cette raison, mandater une entreprise générale ou totale n'est pas recommandé et n'est pas adapté aux exigences de qualité d'une réalisation conforme aux intérêts de la conservation des monuments historiques.

---

# Annexes

L'annexe A présente trois exemples de projets de remise en état ou de transformation de monuments historiques réalisés ces dernières années. Pour chacun de ces exemples, le cadre dans lequel des examens de la sécurité sismique ont été réalisés et les mesures de sécurité sismique qui ont été mises en œuvre sont présentés de manière synthétique. Les différentes procédures adoptées sont également comparées au processus idéal proposé dans le présent guide. Ces trois exemples n'ont pas vocation à faire figure de modèles en ce qui concerne les processus et les mesures appliqués. Ils témoignent de situations réelles dans la pratique et de leurs bons et moins bons aspects. L'annexe B récapitule dans un schéma les principales tâches et décisions pour les différentes phases d'un projet de construction portant sur un monument historique.

Ce recueil d'exemples vise à sensibiliser les acteurs impliqués aux problématiques et au déroulement des opérations dans la planification des mesures de sécurité sismique. La plupart des exemples portent sur des monuments historiques appartenant aux pouvoirs publics, ce qui est représentatif du profil des propriétaires plus fréquemment amenés à se pencher sur la sécurité sismique de tels monuments.

# Annexe A Projets réalisés

## A1 Lycée Quader de Coire (Grisons)

### A1.1 Contexte

La réforme de la loi sur les écoles dans le canton des Grisons (2000) et la révision partielle de la loi sur les écoles dans la ville de Coire (2004) ont rendu nécessaires des interventions sur le bâtiment du lycée Quader. Un concours de projets a ainsi été lancé en 2006/2007 pour la remise en état (et l'extension) du bâtiment. La remise en état comprenait les éléments-clés suivants : la rénovation de la façade, une amélioration énergétique de l'enveloppe, certaines modifications structurelles à l'intérieur, ainsi que le remplacement de la totalité des installations techniques. Un concept d'assainissement du point de vue de la sécurité sismique n'a pas été explicitement exigé. Au début du projet, l'examen de la sécurité sismique conformément au cahier technique SIA 2018 alors en vigueur a été confié à un bureau d'études de Coire.

### A1.2 Historique de la construction et statut de protection

Le bâtiment du lycée Quader a été construit en 1913/1914 par les architectes Schäfer & Risch en vue d'accueillir une école secondaire et commerciale. Composé de trois ailes, l'édifice constitue en soi, mais aussi avec l'espace

vert du Quaderwiese et le porche central qui donne sur la Masanserstrasse, l'un des sites publics municipaux les plus notables du point de vue urbanistique. Le complexe scolaire sis Loestrasse 1 a été classé objet patrimonial en juillet 1991 par un arrêté de protection pris par le conseil municipal de Coire : le bâtiment scolaire, les parapets de 1914 (avec ornements décoratifs : groupe de trois oiseaux, deux bouquetins, polyèdres), deux portes en fer forgé donnant sur la grande terrasse ouest, fontaines donnant sur la Loestrasse sont désignés comme dignes de protection ; les escaliers Quaderplatz/Loestrasse, les abords, la Quaderplatz avec porterie comme dignes de conservation. Cet arrêté de protection municipal a entraîné une inscription au registre foncier (le 13 janvier 1992). Au moment où le projet a débuté, en 2006, la ville de Coire a adopté un plan d'aménagement général (approuvé par le gouvernement le 3 juillet 2007 ; état fin 2012), dans lequel elle a ancré le statut de bâtiments dignes de protection ou de conservation des installations et des bâtiments du lycée Quader. Des moyens financiers considérables ont été accordés aux fins de l'assainissement eu égard aux contraintes liées à la conservation des monuments historiques. Par la suite, le complexe a été officiellement placé sous protection cantonale le 26 novembre 2013.

Fig. A1.1 : Bâtiment du lycée Quader à Coire, façade ouest. Propriétaire : ville de Coire (GR), photo : 2014



Fig. A1.2: Couloir avec salle de pause, photo: 2014



Au niveau de la Confédération, le bâtiment du lycée Quader est répertorié dans l'Inventaire suisse des biens culturels d'importance nationale et régionale (Inventaire PBC) en tant qu'objet B, à savoir un bien culturel d'importance régionale (liste B provisoire pour le canton des Grisons, état au 1<sup>er</sup> janvier 2017). Dans l'Inventaire fédéral des sites construits d'importance nationale à protéger en Suisse (ISOS) (admission provisoire de mars 1997), le bâtiment du lycée Quader apparaît même en tant qu'élément individuel digne de protection (EI 0.0.1 au sein du périmètre environnant PE XXIII «Quaderplatz»).

### A1.3 Détermination de l'objectif de protection

Le bâtiment scolaire doit accueillir 18 classes comptant quelque 260 élèves, pour une quarantaine d'enseignants. L'occupation par des personnes selon le cahier technique SIA 2018 [7] a été estimée à PB = 50 environ. Sur la base de l'utilisation en tant qu'établissement d'enseignement secondaire comprenant des classes générales et des classes pratiques, l'objectif de protection pour la construction selon la norme SIA 261 (2003) alors en vigueur a été défini par son attribution à la classe

d'ouvrages CO II. La norme SIA 261 (2003) imposait à la classe d'ouvrages CO II un facteur de conformité minimal  $\alpha_{\min} = 0,25$ .

Dès les préparatifs du concours, le service cantonal des monuments historiques a formulé dans un avis préliminaire, à la rubrique «Difficultés», des conditions-cadres concernant l'approche à adopter correspondant aux objectifs de protection en matière de conservation des monuments historiques. En particulier, il s'est prononcé contre une utilisation des combles à des fins scolaires et contre des aménagements dans les zones élargies des couloirs. L'ascenseur installé ultérieurement a entretemps été considéré comme une dégradation et la mise au point d'une solution plus discrète et transparente a été demandée. Le service cantonal des monuments historiques a désigné comme éléments particulièrement dignes de protection les fenêtres à double vitrage originales.

Lors de l'élaboration du projet, les architectes ont défini pour l'intérieur du bâtiment, en concertation avec le service cantonal des monuments historiques, deux « zones de pro-

Fig. A1.3: Aula, photo : 2014



tection des monuments » avec des sensibilités différentes : la « zone 1 » comprenait les couloirs pratiquement restés dans leur état original, les cages d'escalier et la grande salle de l'aula. Dans cette zone, il était impératif de limiter les interventions et de préserver l'existant autant que possible. Les salles de classe rénovées dans les années 1970 et les locaux annexes ont été catégorisés en « zone 2 ». Une marge de manœuvre plus importante était laissée dans cette zone pour les mesures constructives.

Du côté de l'ingénieur civil, les dalles en béton armé ont été déclarées de grande valeur du point de vue de l'histoire de la construction en raison de leur relative minceur.

#### A1.4 Sécurité sismique : état existant

La structure porteuse était constituée de dalles en béton armé nervurées dans les salles de classe et à sommiers dans les couloirs.

Les cloisons transversales entre les différentes salles de classe étaient réalisées en béton damé, et le reste des murs – sauf celui de la façade ouest, partiellement en

béton armé – en maçonnerie de briques. L'épaisseur de ces parois en maçonnerie allait jusqu'à 60 cm. Le corps principal présentait un agencement régulier des refends.

Le site du bâtiment du lycée Quader se trouve, selon la norme SIA 261 (2003), dans la zone sismique Z2, sur un terrain de fondation de classe C (sol moyennement compact à compact). L'action sismique a été établie sur la base du *spectre de réponse élastique* déterminant (*coefficient de comportement*  $q = 1,5$  pour la maçonnerie non ductile conformément à la norme SIA 266 [2003]) et de la classe d'ouvrages CO II selon la norme SIA 261 (2003).

#### A1.5 Points faibles en matière de comportement sismique

L'examen de la sécurité sismique a mis en évidence que les cloisons de séparation d'origine entre les salles de classe, en béton damé, présentaient une résistance trop faible. L'examen numérique général a donné un facteur de conformité global  $\alpha_{\text{eff}} \sim 0,2$ , un résultat essentiellement imputable à la faible capacité portante de ces cloisons transversales. Les facteurs de conformité locaux établis

Fig. A1.4: Vue des dalles d'étages existantes dans les classes (à gauche) et le couloir (à droite), photos prises entre 2012 et 2014, pendant la phase de réalisation



lors de l'examen des refends en maçonnerie longitudinaux étaient compris dans une plage  $\alpha_{eff} = 0,7 \div 0,9$ .

### A1.6 Élaboration et évaluation d'ébauches de solutions

Un large éventail d'ébauches de solutions a été passé en revue : construction de remplacement, dénoyautage du bâtiment avec mise en place d'une nouvelle structure porteuse ou remplacement intégral des dalles dans l'ensemble du bâtiment, ou encore mise en place de nouveaux refends visant à reprendre les forces sismiques. La poursuite des deux premières approches a été écartée d'emblée, car elles entraient fondamentalement en contradiction avec la valeur architecturale et culturelle du bâtiment et la nécessité de le protéger au titre de la conservation des monuments historiques. Finalement, c'est la solution consistant à mettre en place de nouveaux refends qui a été retenue. L'ingénieur civil et l'architecte l'ont donc étudiée de manière plus approfondie et ont élaboré sur cette base trois variantes.

#### Concept 1 « De nouveaux murs à l'avant »

Le concept 1 (murs en bleu à la fig. A1.5) prévoyait de remplacer, dans la zone des salles de classe, les cloisons transversales d'origine en béton damé par deux nouveaux murs en béton coulé sur place. S'il impliquait des interventions minimales au niveau de la structure porteuse existante, de par le nombre limité de nouvelles cloisons dans

la zone concernée, il soumettait les dalles d'étages nécessaires pour la répartition des forces à une sollicitation d'autant plus forte. Des mesures locales visant à renforcer les dalles d'étages se sont donc révélées indispensables dans la zone d'introduction des efforts refend – dalle.

La réalisation des mesures de sécurité sismique conformément au concept 1 permettait d'obtenir un facteur de conformité  $\alpha_{int} = 0,5 \div 0,6$ .

#### Concept 2 « De nouveaux murs à l'arrière »

Le concept 2 (murs en rose à la fig. A1.6) prévoyait une nouvelle cloison transversale dans la zone des salles de classe et deux nouvelles cloisons transversales en béton coulé sur place dans le couloir. La première remplaçait la cloison d'origine en béton damé. Cette cloison était davantage sollicitée que celles dans le couloir, si bien que des mesures locales visant à renforcer les dalles d'étages s'avéraient également indispensables dans la zone d'introduction des efforts refend – dalle.

La réalisation des mesures de sécurité sismique conformément au concept 2 permettait d'obtenir un facteur de conformité  $\alpha_{int} = 0,3 \div 0,4$ .

En raison de la longueur inférieure des nouvelles cloisons transversales (en comparaison avec la somme des longueurs des cloisons dans le concept 1), le facteur de

Fig. A1.5: Concept 1 (en bleu), vue en plan du rez-de-chaussée

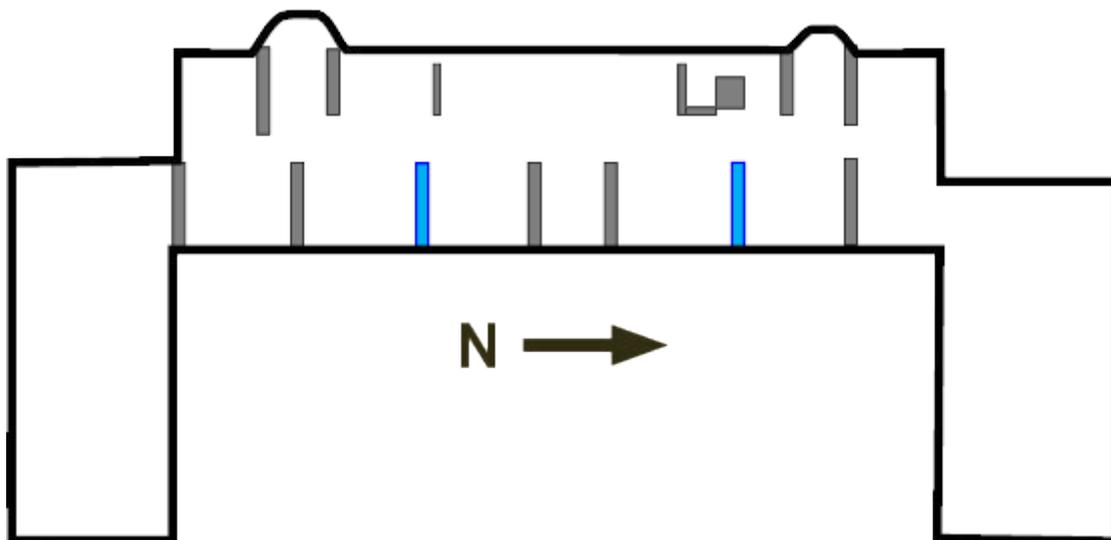
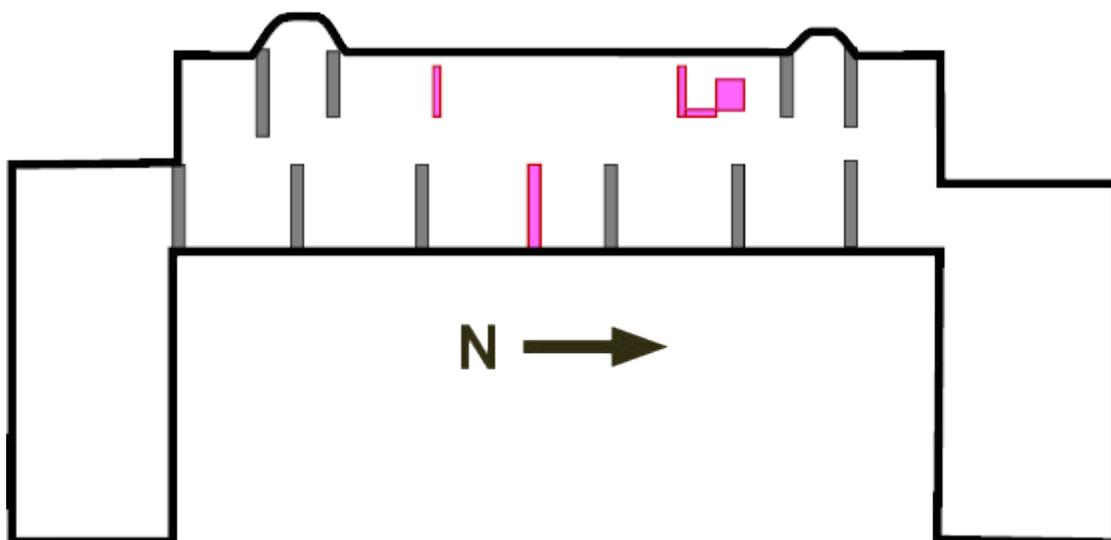


Fig. A1.6: Concept 2 (en rose), vue en plan du rez-de-chaussée



conformité obtenu avec le concept 2 était ainsi inférieur à celui du concept 1.

### Concept 3 « Combinaison des concepts 1 et 2 »

Le concept 3 (murs en vert à la fig. A1.7) prévoyait dans la zone des salles de classe au total trois nouvelles cloisons transversales et dans le couloir deux nouvelles cloisons transversales en béton coulé sur place. Dans les salles de classe, les cloisons transversales remplaçaient les cloisons d'origine en béton damé. En comparaison avec les concepts 1 et 2, la répartition régulière des cloisons transversales aboutissait à une sollicitation uniforme des dalles d'étages. Les contraintes subies par les dalles minces en béton armé, qui jouent le rôle de diaphragmes horizontaux solidarissant les différents éléments porteurs du bâtiment en cas de tremblement de terre, ont été limitées en répartissant les nouvelles parois d'une manière symétrique en plan.

La réalisation des mesures de sécurité sismique conformément au concept 3 permettait d'obtenir un facteur de conformité  $\alpha_{int} = 0,60 \div 0,70$ .

#### A1.7 Concept d'intervention tenant compte de la proportionnalité des mesures

La proportionnalité des mesures du point de vue de l'ingénierie civile a été appréciée pour les trois concepts sur la

base du cahier technique SIA 2018, en vigueur jusqu'à la fin 2017. Une nouvelle durée d'utilisation (ou « durée d'utilisation restante » selon les normes SIA 269 et SIA 269/8) du bâtiment de 50 ans a été retenue et l'occupation par des personnes a été estimée à PB = 50 environ. Selon le cahier technique SIA 2018 alors en vigueur, le montant investi raisonnablement exigible pour atteindre le facteur de conformité minimal  $\alpha_{min} = 0,25$  s'élevait à 1 million de francs environ. Le concept 3 permettait de réduire le risque sismique et d'obtenir une sécurité sismique de 60 à 70 %. Les frais de l'ouvrage proprement dit pour le concept 3, c'est-à-dire la réalisation de nouveaux refends, y compris leurs fondations et leurs liaisons avec les dalles ainsi que les étayages temporaires, les travaux de démolition et l'évacuation se montaient à quelque 700 000 francs.

En ce qui concerne la proportionnalité du point de vue de la conservation des monuments historiques, la valeur culturelle du bâtiment, qui se manifestait essentiellement dans les couloirs et les cages d'escalier pratiquement restés dans leur état d'origine, ainsi que dans une partie de la structure porteuse dans la zone des salles de classe a été prise en compte : le concept 3 n'occasionnait qu'une diminution partielle de la valeur culturelle en raison du remplacement des cloisons de séparation en béton damé entre les classes par des murs en béton armé. Un ren-

Fig. A1.7 : Concept 3 (en vert), vue en plan du rez-de-chaussée

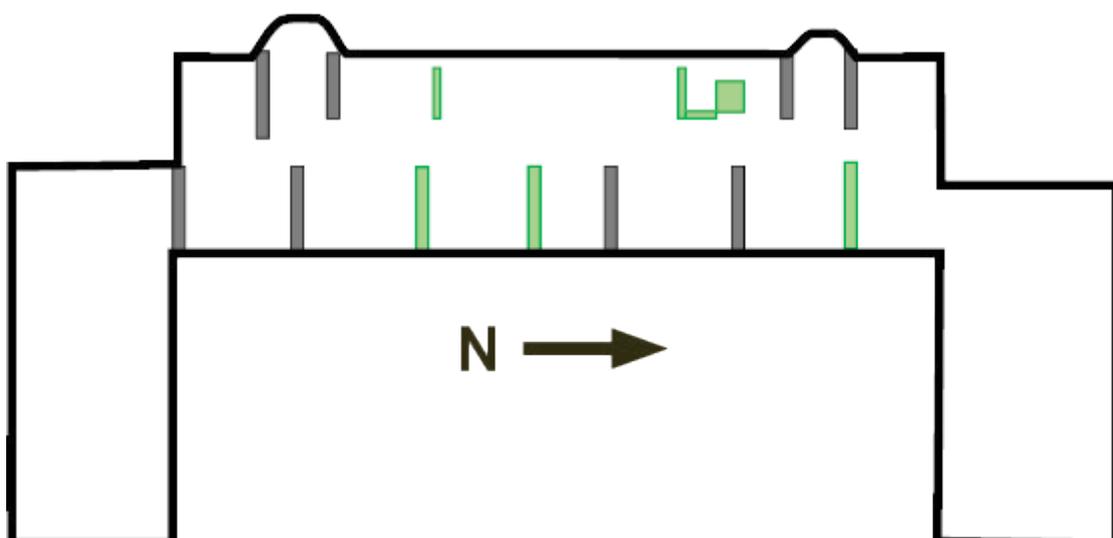
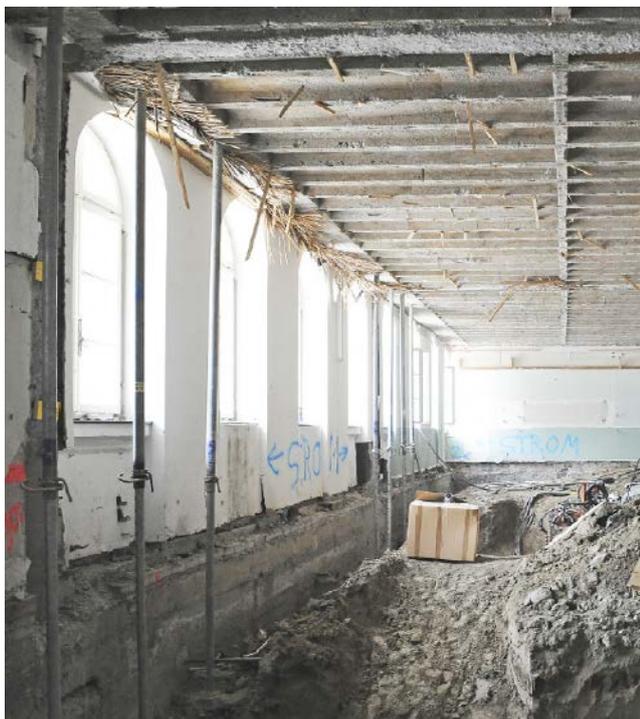


Fig. A1.8 : Excavation pour les parois parasismiques dans la zone des salles de classe (à gauche) et salle de classe avec nouvelle paroi parasismique (à droite), photos : 2012-2014



forcement local des dalles d'étages d'époque n'était pas nécessaire. Dans les corridors, deux refends en béton armé ont été bétonnés contre deux murs existants. Le renforcement des cloisons transversales des couloirs permettait d'enlever l'ascenseur de la salle de pause et de le placer dans une pièce annexe, ce qui aurait pour effet de revaloriser cet espace impressionnant et de rétablir sa valeur culturelle.

#### A1.8 Projet d'intervention

Les concepts d'intervention ont été présentés par l'ingénieur civil à la commission des travaux du projet. Il a été expliqué que les trois concepts proposés permettaient d'obtenir une amélioration de la sécurité sismique supérieure au facteur de conformité minimal  $\alpha_{\min} = 0,25$ , le concept 3 offrant avec 65 % la meilleure sécurité sismique. Il s'en est suivi une recommandation d'intervention à l'intention du maître d'ouvrage en faveur du concept 3, justifiée par l'efficacité des interventions et la prise en compte de la valeur culturelle. Le maître d'ouvrage a choisi de réaliser le concept 3 [51] [52] [53] [54].

Une fois renforcé, le bâtiment a reçu en 2015 le SEISMIC AWARD – Prix d'architecture et d'ingénierie parasismiques de la Fondation pour la dynamique des structures et le génie parasismique [55].

#### A1.9 Synthèse

Le propriétaire et le maître d'ouvrage, conscients de leurs responsabilités, ont assuré une collaboration précoce de tous les acteurs concernés. Leur approche dans le cadre de ce projet est particulièrement remarquable. Une étude de base approfondie de toutes les disciplines impliquées ont permis d'obtenir des connaissances suffisantes sur l'existant et de limiter les investigations sur l'ouvrage. Dans le cadre du mandat d'examen de la sécurité sismique confié à un ingénieur civil spécialisé dans le génie parasismique, différents concepts d'intervention ont été étudiés pour arriver à la solution retenue. Les concepts d'intervention ont été approfondis lors d'un processus interdisciplinaire, en concertation avec le service des monuments historiques et l'architecte, puis présentés au maître d'ouvrage pour décision. Les nouvelles parois sont continuées jusqu'aux fondations et sont disposées

régulièrement en plan. Malgré une certaine perte de substance, le monument a bénéficié des mesures visant à améliorer la sécurité sismique : l'ascenseur a disparu de la salle de pause pour se retrouver dans le noyau de la pièce adjacente et les nouvelles parois en béton armé ont conservé les proportions d'origine des salles de classe.

<b>Caractéristiques du projet</b>	
Propriétaire	Ville de Coire
Architecte (rénovation de 2012 à 2014)	Schwander & Sutter Architekten, Coire
Ingénieur civil	Bänziger Partner AG, Coire
Année de construction	1913-1914
Statut de protection	Monument historique classé, sous protection
Utilisation du bâtiment	Établissement d'enseignement secondaire
Occupation par des personnes PB	Env. 50
Classe d'ouvrages	CO II
Zone sismique	Z2
Classe de terrain de fondation	C
Facteur de conformité dans l'état existant	$\alpha_{int} \sim 0,2$
Facteur de conformité après la mise en œuvre de mesures visant à améliorer la sécurité sismique (intervention)	$\alpha_{int} = 0,6 \text{ à } 0,7$
Stratégie d'amélioration	Renforcer (remplacement d'éléments porteurs existants)
Réalisation des mesures de sécurité sismique	2009-2014

## A2 Ancien Hôpital de Sion (Valais)

### A2.1 Contexte

En 2006, le propriétaire de l'Ancien Hôpital, la ville de Sion, a mandaté un examen de la sécurité sismique du bâtiment. Ce mandat devait être réalisé en vue d'une remise en état décidée suite à l'apparition de fissures et de tassements importants dus à des infiltrations d'eau dans l'aile nord. De plus, les planchers en bois existants présentaient dans certaines zones une portance insuffisante pour l'utilisation prévue à l'époque, à savoir une pouponnière et un conservatoire de musique.

### A2.2 Historique de la construction et statut de protection

L'Ancien Hôpital, situé rue de la Dixence, est un ouvrage représentatif de la ville de Sion. Les premières traces de son existence remontent à une lettre du Pape Alexandre III datée de 1163. Sion comptait à l'époque trois hôpitaux. L'Hôpital de St-Jean, qui se trouvait à l'emplacement

du bâtiment de l'Ancien Hôpital, était situé à l'extérieur des murs de la ville. En 1569, son administration a été reprise par la bourgeoisie. Des vues des 16<sup>e</sup> et 17<sup>e</sup> siècles donnent une idée de l'apparence du complexe de l'Hôpital de St-Jean (fig. A2.2, à gauche) (*Cosmographia*, 1544, de Sebastian Münster et *Topographia Helvetiae, Rhaetiae et Valesiae*, 1642, Matthäus Merian). Sous la direction du Jésuite Ignace Schüller (1725-1782), un nouvel édifice à trois ailes intégrant les bâtiments existants a été construit en deux parties entre 1763 et 1781. Un dessin à la plume de 1785 montre la construction avec une nouvelle section transversale d'un étage reliant les deux ailes latérales (fig. A2.2, à droite). D'autres modifications constructives ont suivi au cours de la seconde moitié du 19<sup>e</sup> siècle et au 20<sup>e</sup> siècle. De 1880 à 1890, le bâtiment a été agrandi côté ouest (fig. A2.3, à gauche). En 1908, le bâtiment a été restauré par l'architecte Alphonse de Kalbermatten. L'Ancien Hôpital, qui fonctionnait alors comme hôpital de district, est devenu un hôpital régional en 1937. Peu de temps après, l'hôpital régional a quitté

Fig. A2.1 : Ancien Hôpital de Sion. Propriétaire : ville de Sion (VS), photo non datée



les bâtiments. Pendant la Seconde Guerre mondiale, le complexe a connu un changement d'affectation, à l'origine de nouvelles modifications et de compléments (fig. A2.3, à droite). À partir de 1946, l'Ancien Hôpital a accueilli une pouponnière, à laquelle s'est ajouté un conservatoire de musique dès 1953, ce qui a de nouveau donné lieu à des adaptations constructives. La dernière remise en état d'envergure, portant sur les façades et la toiture, a eu lieu en 1984.

Dans le canton du Valais, l'organisation, les compétences et les tâches en matière de conservation des monuments historiques sont régies par la loi cantonale sur la protection de la nature, du paysage et des sites (LcPN; entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> octobre 2000). Cette loi définit en outre la nature des objets sous protection, ainsi que les mesures correspondantes à mettre en œuvre. Sa modification entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2012 a nécessité des compléments substantiels concernant l'inventaire et le classement des objets de protection. S'agissant des objets dont la protection n'est pas réglementée, les autorités compétentes ont la possibilité de formuler les conditions et les mesures correspondantes lors de la procédure d'autorisation de construire. Le canton du Valais suit, jusqu'à l'établissement d'inventaires des monuments historiques, l'Inventaire des biens culturels de la Confédération (Inventaire PBC), qui recense dans deux catégories les objets d'importance nationale (objets A) et les objets d'importance régionale (objets B).

L'Ancien Hôpital est répertorié dans l'Inventaire PBC en tant qu'objet d'importance régionale (liste B provisoire pour le canton du Valais, état au 1<sup>er</sup> janvier 2018). Dans l'ISOS (inventaire de mars 1997), il apparaît en tant qu'élément individuel digne de protection (EI 0.0.44 au sein du périmètre environnant PE XV « Esplanade largement arborée, occupée par des bâtiments publics »).

Des moyens financiers de la Confédération ont été accordés aux fins des vastes travaux de remise en état en 1984, ce qui a donné lieu en 1987 à une mise sous protection de l'ensemble du bâtiment et à l'inscription correspondante au registre foncier (servitude). Cette protection fédérale impose aux propriétaires de conserver l'objet dans un état conforme au but de la subvention et d'obtenir l'approbation de l'OFC avant de procéder à des modifications constructives.

### A2.3 Détermination de l'objectif de protection

Au moment de l'évaluation, en 2006, le bâtiment accueillait une pouponnière et un conservatoire de musique. Sur la base de cette utilisation, l'objectif de protection en matière de sécurité sismique a tout d'abord été défini selon la norme SIA 261 (2003) alors en vigueur par son attribution à la classe d'ouvrages CO II. À l'heure actuelle, l'Ancien Hôpital est partiellement utilisé; il accueille des PME et des start-ups. Compte tenu de l'occupation par des personnes nettement plus basse (PB < 50) et de l'utilisation habituelle en tant qu'im-

Fig. A2.2: Gravure sur cuivre du 17<sup>e</sup> siècle (à gauche) avec marquage en couleurs des phases de construction depuis le Moyen Âge central (en bleu: première phase, probablement au 12<sup>e</sup> siècle; en vert: premier agrandissement, non daté; en rouge: deuxième agrandissement, non daté), vue en plan correspondante (au centre) et vaste agrandissement du complexe au 16<sup>e</sup> siècle (à droite)

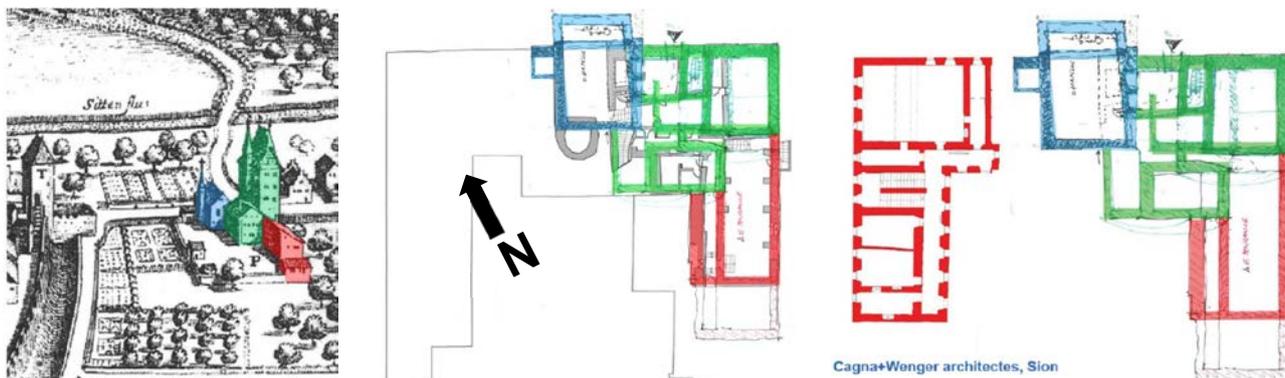
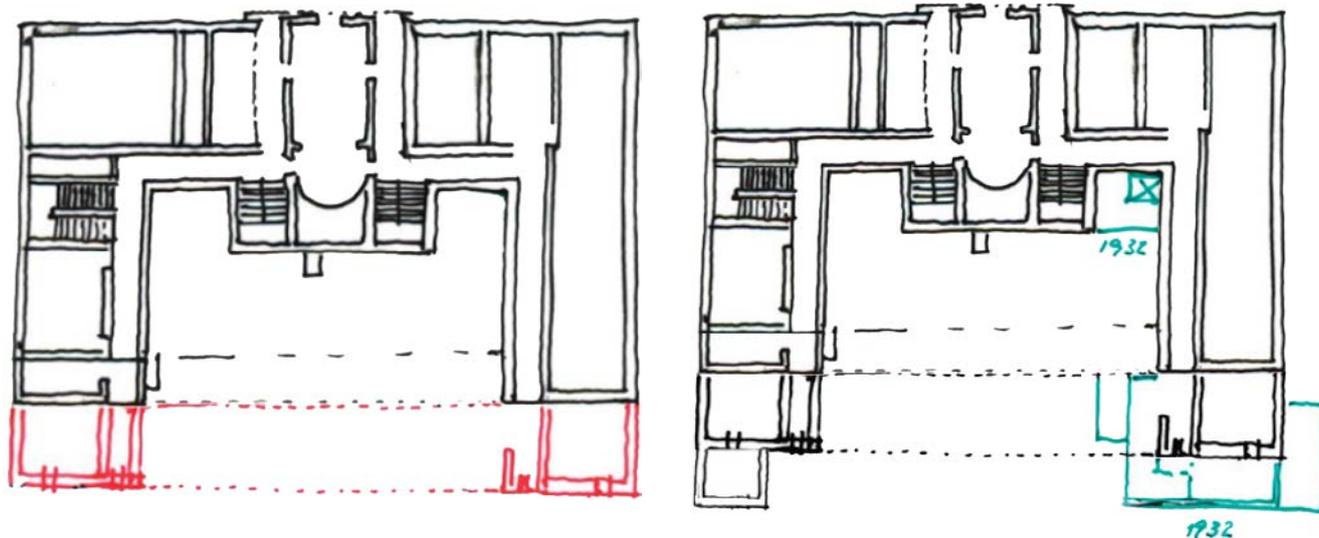


Fig. A2.3 : Agrandissement de l'ensemble au 18<sup>e</sup> siècle (à gauche), extension et rénovation vers 1900 et changement d'affectation pendant la Seconde Guerre mondiale (à droite)



meuble de bureaux, l'Ancien Hôpital a pu être classé en CO I.

Des représentations culturelles et historiques et des évaluations du point de vue de la conservation des monuments historiques soulignent la valeur culturelle et historico-architecturale élevée, ainsi que l'importance urbanistique de l'Ancien Hôpital. Pour conserver la valeur historique et l'authenticité de ce dernier, il est impératif de préserver la substance originale du bâtiment, pertinente du point de vue de la conservation de tels monuments. Une grande valeur patrimoniale a notamment été attribuée à la structure porteuse avec la charpente, à la structure porteuse intérieure (planchers en bois), ainsi qu'aux surfaces historiques conservées (lambris, dalles, etc.).

#### A2.4 Sécurité sismique : état existant

L'Ancien Hôpital est un bâtiment en maçonnerie crépie à trois étages, surmonté d'un toit en croupe mansardé. La partie de l'édifice qui donne du côté de la rue présente en son centre une tour qui abrite une chapelle. Le bâtiment est en forme de «U». Les parties transversale et nord-est comportent un sous-sol partiel. C'est dans cette zone que se trouve la substance la plus ancienne. Deux cages d'escalier flanquent la chapelle côté cour et un troisième escalier se trouve dans l'aile ouest. Les corridors courent le long de la façade qui donne sur la cour et desservent

les salles agencées le long de la façade côté rue. La charpente du toit en croupe mansardé est en bois. La toiture est couverte d'ardoises. Les éléments porteurs verticaux du bâtiment consistent en murs en maçonnerie de pierres naturelles et les éléments porteurs horizontaux en planchers en bois.

Le site de l'Ancien Hôpital se trouve, selon la norme SIA 261 (2003), dans la zone sismique Z3b. Le bâtiment est construit en partie sur un terrain de fondation de classe C (sol moyennement compact à compact) et en partie sur un terrain de fondation de classe D (sol tendre à moyennement compact), selon la norme SIA 261 (2003) en vigueur au moment de l'examen. Une étude de la dynamique des sols (microzonage sismique) a été réalisée pour la ville de Sion. Le bâtiment de l'Ancien Hôpital se situe en bordure de deux zones d'aléa locales. Les deux spectres de réponse locaux déterminants correspondent approximativement aux spectres de réponse élastique pour les classes de terrain de fondation C et D selon la norme SIA 261. Une étude de site détaillée a permis de déterminer un spectre de réponse spécifique pour l'Ancien Hôpital. L'action sismique a été établie sur la base de l'ancienne utilisation, à savoir en tant que pouponnière et conservatoire de musique, et de la classe d'ouvrages CO II selon la norme SIA 261 (2003). La classe d'ouvrages CO II requiert un facteur de conformité minimal  $\alpha_{\min} = 0,25$ .

## A2.5 Points faibles en matière de comportement sismique

### 1<sup>re</sup> phase de planification

Pour des questions d'isolation acoustique, l'intervention de base prescrite pour l'affectation du bâtiment en tant que conservatoire dans le cadre du projet de remise en état consistait en un remplacement intégral des planchers en bois par des dalles en béton armé. L'ingénieur civil mandaté a examiné le comportement sismique non dans l'état existant, mais en prenant en compte les nouveaux planchers en béton armé prévus, considérablement plus lourds, au lieu des planchers en bois légers existants. L'étude, basée sur ces hypothèses, a donné un facteur de conformité  $\alpha_{\text{eff}} < 0,25$ .

Des points faibles ont été identifiés sur différents murs en maçonnerie, au niveau desquels la transmission des forces sismiques n'était plus assurée avec les nouveaux planchers en béton armé prévus. Un autre point faible du point de vue sismique a été constaté dans une zone où le service des monuments historiques tenait à conserver les planchers en bois d'origine. Le clocher de la chapelle n'a pas été examiné en détail.

Ce premier projet d'assainissement nécessitait un volume d'investissement total de 24 millions de francs, un montant qui ne faisait pas apparaître séparément les coûts pour les mesures constructives liées à des aspects statiques et ceux liés à l'amélioration de la sécurité sismique. En raison de l'importance des coûts attendus, le projet a été rejeté en 2009 par le conseil municipal de la ville de Sion.

Suite à cette décision, de nouveaux locaux plus adaptés ont été trouvés pour la pouponnière et le conservatoire de musique, si bien que l'Ancien Hôpital a été entièrement désaffecté la même année. L'ampleur de la remise en état et l'affectation ultérieure n'étaient alors pas définies. L'état du bâtiment désaffecté s'est rapidement détérioré.

### 2<sup>e</sup> phase de planification

Les coûteuses mesures de sécurité sismique ont conduit le propriétaire à charger un autre expert, spécialisé dans le domaine du génie parasismique, de réaliser un deuxième examen de la sécurité sismique.

Cet expert a étudié le bâtiment dans l'état existant (planchers en bois et murs en maçonnerie). L'action sismique a de nouveau été déterminée sur la base de l'ancienne utilisation en tant que pouponnière et conservatoire de musique et de la classe d'ouvrages CO II selon la norme SIA 261 (2003). L'accent a été mis sur la capacité statique des murs en maçonnerie, l'examen portant sur la résistance ultime aussi bien dans le plan que perpendiculairement au plan des parois (rupture hors du plan). Des calculs approximatifs ont permis d'obtenir pour la résistance ultime dans le plan un facteur de conformité  $\alpha_{\text{eff}} \sim 0,8$ . La résistance ultime perpendiculairement au plan était inférieure, tandis que, dans les étages supérieurs, le facteur de conformité était  $\alpha_{\text{eff}} \sim 0,4$ . Le clocher de la chapelle n'a pas non plus été étudié en détail.

Suite à cette deuxième phase de planification, le volume d'investissement total pour le projet se montait à 15 millions de francs, un chiffre jugé acceptable par le propriétaire. Les discussions quant à l'utilisation du bâtiment n'ont débuté qu'à l'issue de la deuxième phase. Trois variantes, ainsi que leur influence sur les exigences en matière de sécurité sismique, ont été étudiées : pouponnière et conservatoire de musique, administration communale ou bureaux pour des tiers.

## A2.6 Projet d'intervention

Afin de pallier la dégradation progressive qui menaçait le bâtiment inutilisé, la ville de Sion a décidé en 2012 de soumettre l'Ancien Hôpital à une rénovation partielle douce en vue d'une utilisation intermédiaire, pour un montant d'environ 1,2 million de francs. Cette utilisation intermédiaire à très faible occupation a été réduite à une aile, de sorte que le bâtiment a pu être affecté à la classe d'ouvrages CO I. Ce déclassement a permis de renoncer à des mesures constructives de sécurité sismique sur la structure porteuse, étant donné que le facteur de conformité établi lors de l'examen était supérieur au facteur de conformité minimal  $\alpha_{\text{min}} = 0,25$  et que des mesures complémentaires s'avéraient dès lors disproportionnées. Des PME et des start-ups se sont installées dès 2013 dans la partie concernée de l'édifice.

Conscient de la possibilité que des murs se renversent perpendiculairement à leur plan, le propriétaire a toutefois entrepris des mesures locales de sécurité sismique au deuxième étage du bâtiment. Des barres en traction

visant à assurer l'ancrage des murs en maçonnerie et les tenir en cas de séisme ont été mises en place (fig. A2.4).

### A2.7 Examen détaillé de la sécurité sismique

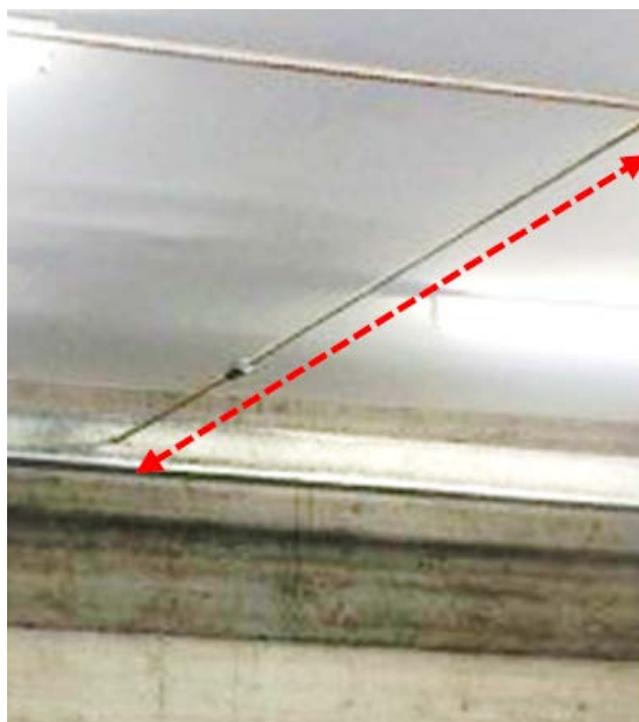
Sur mandat de la Centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'OFEV et de la section Protection des biens culturels de l'OFPP, un expert chevronné dans le domaine du génie parasismique a été chargé de réaliser un examen détaillé de la sécurité sismique dans le cadre de l'élaboration du présent guide [56].

Le bâtiment a été analysé en détail dans l'état existant, avec les planchers en bois et les murs en maçonnerie, au moyen d'un calcul non linéaire plus complexe. En ce qui concerne la structure porteuse du bâtiment, le facteur de conformité établi lors de l'examen  $\alpha_{\text{eff}} > 1,0$  a permis de constater que la sécurité sismique satisfaisait largement aux exigences normatives. Aucune mesure de sécurité sismique ne s'imposait par conséquent s'agissant de la protection des personnes.

Seule la sécurité sismique du clocher de la chapelle n'a pu être déterminée de manière définitive par manque de

connaissances concernant la structure de la tour. Pour l'heure, elle est jugée insuffisante. Des hypothèses correspondant à l'état actuel des connaissances sur la structure porteuse du clocher ont permis d'obtenir, avec un classement en CO I, un facteur de conformité établi lors de l'examen  $\alpha_{\text{eff}} < 1,0$ . Des investigations approfondies sont recommandées en vue de développer des ébauches de solutions pour le clocher, car il est impossible à l'heure actuelle de comprendre la fonction des tirants verticaux dans la tour. Étant donné que le clocher est situé au-dessus de l'entrée du bâtiment, un effondrement de la tour pourrait représenter un danger considérable pour les personnes. Cette situation de danger concerne non seulement les personnes qui quitteraient le bâtiment après un événement, mais aussi celles qui se trouveraient dans la rue devant l'édifice au moment de l'événement. Le propriétaire n'a pas encore rendu sa décision quant aux mesures de sécurité sismique à mettre en œuvre au niveau de la chapelle [57] [58] [59] [60] [61].

Fig. A2.4 Barres en traction au deuxième étage



## A2.8 Synthèse

Dans le canton du Valais, la vérification de la sécurité sismique d'une construction existante est prescrite dans la loi sur les constructions (LC) pour les projets d'assainissement ou de transformation et doit être présentée dans le cadre de la procédure de permis de construire. En sa qualité de maître d'ouvrage public, la ville de Sion a fait réaliser cet examen très tôt dans le projet. L'examen général de la sécurité sismique a donné des résultats lacunaires et par conséquent abouti à des recommandations allant dans le sens d'une intervention invasive et coûteuse, soit le remplacement intégral des planchers existants et la construction de nouveaux murs supplémentaires. Un examen détaillé par un expert en génie sismique a conclu à

une pleine sécurité sismique (facteur de conformité établi lors de l'examen  $\alpha_{\text{eff}} > 1,0$ ), ce qui a permis de renoncer à des mesures de sécurité sismique. Seul le clocher de la chapelle a été jugé potentiellement défectueux et doit faire l'objet d'investigations supplémentaires. Une collaboration précoce de toutes les parties impliquées dans le projet n'a pas eu lieu, raison pour laquelle le concept d'intervention d'origine n'a pas pu être élaboré dans le cadre d'un processus interdisciplinaire. Un aspect positif à souligner est la réalisation, dans une deuxième phase, d'un relevé complet de l'état dans toutes les disciplines, qui a permis d'obtenir des connaissances suffisantes sur l'existant.

Caractéristiques du projet	
Propriétaire	Ville de Sion
Architecte (rénovation de 2012 à 2013)	Cagna + Wenger Architectes SA, Sion
Experts (sur mandat de l'OFEV)	Dr Pierino Lestuzzi, EPFL
Année de construction	18 <sup>e</sup> siècle pour une grande partie du bâtiment (1763-1781), avec des éléments plus anciens datant du Moyen Âge (?) et des extensions plus récentes (19 <sup>e</sup> et 20 <sup>e</sup> siècles)
Statut de protection	Monument historique classé, sous protection
Utilisation du bâtiment	Anciennement : pouponnière/conservatoire ; à l'heure actuelle : bureaux
Occupation par des personnes PB	< 50
Classe d'ouvrages	CO I
Zone sismique	Z3b
Classe de terrain de fondation	Étude de la dynamique des sols (microzonage sismique)
Facteur de conformité établi lors de l'examen (état actuel)	$\alpha_{\text{eff}} > 1,0$ (sauf clocher)
Facteur de conformité après la mise en œuvre de mesures visant à améliorer la sécurité sismique (intervention)	$\alpha_{\text{int}} > 1,0$ (sauf clocher)
Stratégie d'amélioration	Ancrage des façades
Réalisation des mesures de sécurité sismique	2012/2013

### A3 Markgräflerhof à Bâle (Bâle-Ville)

#### A3.1 Contexte

Dans le cadre de sa planification à moyen terme, le département cantonal des travaux publics et des transports de Bâle-Ville a élaboré en 2011 le « Plan directeur Campus Santé » pour le quartier de l'hôpital universitaire. Ce plan préconisait d'accorder un égard particulier aux monuments historiques protégés de la Clinique 1, du Markgräflerhof, du Holsteinerhof et de l'Église des Prêcheurs. Étant donné qu'une remise en état de l'enveloppe (toitures et façades) était prévue pour le Markgräflerhof, l'office cantonal des bâtiments a fait réaliser en 2011 une évaluation de la sécurité sismique.

#### A3.2 Historique de la construction et statut de protection

Le Markgräflerhof est considéré comme le plus ancien palais baroque de Suisse. Il a été construit entre 1698

et 1705 sur l'emplacement d'un bâtiment plus ancien. L'édifice est remarquable pour l'époque : « Le Markgräflerhof sur la Hebelstrasse, achevé en 1705, fait sensation auprès des contemporains bâlois : dans un tissu urbain à la structure morcelée, cet édifice de trois étages non seulement présentait avec sa longueur de 60 m et une hauteur faîtière de 24 m des dimensions avoisinant celles de l'église paroissiale de Bâle, mais implantait des formes architecturales largement étrangères dans un environnement s'inscrivant totalement dans la tradition du style gothique flamboyant. Un ovni venu de Paris avait atterri. Les modèles français les plus modernes ont été invoqués lorsque le margrave Frédéric VII Magnus de Bade-Durlach a fait ériger en ces temps de guerre une résidence d'exil pour sa cour. Si l'on doit la conservation du bâtiment à sa conversion à des fins hospitalières à partir de 1838, la splendeur princière des espaces intérieurs en a toutefois été perdue... » [62]. Les plans du palais urbain ont été dessinés selon le modèle français de l'« hôtel entre cour

Fig. A3.1 : Markgräflerhof à Bâle, façade ouest. Propriétaire : Hôpital universitaire de Bâle-Ville, photo non datée



et jardin» moderne, tel que décrit par Augustin-Charles d'Aviler dans ses travaux.

Entre 1736 et 1739, le Markgräflerhof a été agrandi des deux côtés (bâtiment d'archives et princier). La ville de Bâle a racheté le palais en 1808 dans le cadre de la construction du nouvel Hôpital des Bourgeois. Des modifications supplémentaires ont été réalisées de 1838 à 1842. Le grand escalier a été supprimé pour la nouvelle utilisation en tant que prébende. C'est à cette époque qu'une section a été ajoutée au palais côté sud. Des extensions supplémentaires ont été réalisées de 1882 à 1885, ainsi qu'en 1902/1903. Depuis 2004, il sert d'immeuble de bureaux pour l'hôpital universitaire.

Une remise en état complète a eu lieu en 1960. Avant la remise en état prévue en 2011, le bâtiment avait subi, du fait du vieillissement, d'importantes déformations de la toiture et des infiltrations d'eau répétées, et la façade était en mauvais état. Le toit n'était isolé que de manière minimale, voire pas du tout, ce qui affectait très fortement le climat ambiant dans les bureaux.

L'ensemble est placé sous protection fédérale depuis 1960. Le Markgräflerhof est répertorié dans le registre cantonal (Denkmalverzeichnis) visé à l'art. 14 de la loi cantonale sur la protection du patrimoine (*Gesetz über den Denkmalschutz*) (état au 26 janvier 2014). Au niveau fédéral, l'édifice est inscrit à l'ISOS (année de publication 2012) en tant qu'élément individuel digne de protection EI 8.0.4, où il est classé dans la catégorie la plus élevée avec objectif de sauvegarde «A» (sauvegarde intégrale de la substance). Selon l'Inventaire des biens culturels de la Confédération (Inventaire PBC), le Markgräflerhof est un monument historique d'importance régionale (objet B).

### A3.3 Détermination de l'objectif de protection

Au rez-de-chaussée du bâtiment se trouve notamment le service de transfusion sanguine de la Croix-Rouge suisse. Le hall d'entrée du Markgräflerhof sert de lieu de restauration pour les donateurs de sang, et l'ancienne chapelle, avec ses stucs remarquables, de salle pour la collecte de sang. Sur la base de l'utilisation hospitalière en tant que centre de transfusion, l'objectif de protection pour la construction selon la norme SIA 261 (2003) alors en

vigueur a été défini par son attribution à la classe d'ouvrages II. La classe d'ouvrages CO II requiert un facteur de conformité minimal  $\alpha_{\min} = 0,25$ .

Le Markgräflerhof est un monument historique d'une importance exceptionnelle. La conservation intégrale de l'aspect extérieur et la préservation, dans toute la mesure du possible, de la substance d'époque ont été définies comme objectifs de protection essentiels. À partir de là, les mesures planifiées de remise en état du toit et des façades ont suivi une approche de conservation-restauration comprenant des réparations, des compléments et des consolidations, ainsi que des assainissements ponctuels (travaux sur la pierre naturelle, enduits, fenêtres, couverture, ferblanterie, charpente).

### A3.4 Sécurité sismique : état existant

Le Markgräflerhof est un bâtiment en maçonnerie de pierres naturelles (grès des Vosges). Les dalles aux étages sont constituées de planchers à poutres en bois. L'édifice de plusieurs étages se compose d'un sous-sol, d'un rez-de-chaussée, de deux étages supérieurs et d'un toit en croupe mansardé avec une charpente en bois. Les extensions latérales sont constituées d'une maçonnerie en pierres naturelles et en briques.

Le site du Markgräflerhof se trouve, selon la norme SIA 261 (2003), dans la zone sismique Z3a. Une étude de la dynamique des sols (microzonage sismique) a été réalisée pour le canton de Bâle-Ville. D'après ce relevé, le site relève de la microzone sismique «Bâle Nord, pléistocène».

### A3.5 Points faibles en matière de comportement sismique

#### 1<sup>re</sup> phase de planification

Un relevé général de l'état du point de vue de l'ingénierie civile a été effectué. Pour ce faire, les plans de base ont été obtenus et des carottages ont été réalisés dans différentes parties du bâtiment afin de déterminer les propriétés mécaniques des matériaux de construction (pierre naturelle). Le bureau d'études mandaté a ensuite procédé à un examen général au moyen d'une analyse non linéaire statique du bâtiment, en utilisant un modèle tridimensionnel de la structure porteuse du Markgräflerhof et un programme de calcul. Cette première analyse a

permis d'obtenir pour le facteur de conformité une valeur  $\alpha_{\text{eff}} < 0,25$ , qui ne satisfaisait pas aux exigences minimales en matière de sécurité des personnes. Les propositions visant à améliorer la sécurité sismique reposant sur cette analyse comprenaient par conséquent des interventions considérables et coûteuses : renforcement de certains murs du sous-sol et du rez-de-chaussée ainsi que de l'entresol et mesures de renforcement sur toutes les dalles d'étages (amélioration du rôle de diaphragme et liaisons paroi – dalle). Le coût estimé des mesures de sécurité sismique atteignait environ 4 millions de francs.

### 2<sup>e</sup> phase de planification

Le canton de Bâle-Ville a alors fait appel à un expert chevronné dans le domaine du génie parasismique pour assurer le suivi du projet. Une révision de l'examen général a été préconisée. Il s'agissait d'effectuer un premier calcul avec des hypothèses simplifiées (contrôle de plausibilité) et de remanier les bases de modélisation du modèle informatique concernant les valeurs mécaniques des matériaux (prélèvement et évaluation des échantillons des murs en maçonnerie conformément aux normes) et du modèle de la structure porteuse (prise en compte de la rupture perpendiculairement au plan des parois).

La révision de l'étude numérique de l'examen général par le bureau mandaté, soutenu par l'expert, a finalement abouti à un facteur de conformité établi lors de l'examen  $\alpha_{\text{eff}} = 0,4$ . Aucune mesure de sécurité sismique correspondant à cet état n'a été élaborée.

### 3<sup>e</sup> phase de planification

Le canton de Bâle-Ville a alors confié le mandat de l'examen de la sécurité sismique à l'expert. Ce dernier a signalé, outre la problématique générale du comportement sismique des constructions en maçonnerie, des points faibles typiques en cas de séismes, tels que des murs pignons isolés susceptibles de basculer (rupture hors du plan) et des parapets et des arcades (voir fig. A3.2) risquant d'être endommagés et de tomber. Les planchers en bois n'étaient généralement que faiblement reliés aux murs, ce qui est préjudiciable pour le comportement global du bâtiment. Un autre point faible a été repéré au niveau des parois de séparation minces et hautes (voir fig. A3.3). Celles-ci n'avaient probablement été mises en place qu'au cours du 20<sup>e</sup> siècle et risquaient d'être endommagées, voire de s'effondrer en cas de tremblement de terre (éléments non-structuraux). Un examen définitif de la sécurité sismique n'a finalement pas été réalisé, car la

Fig. A3.2 : Markgräflerhof

Points faibles potentiels typiques dans le Markgräflerhof : mur pignon isolé côté jardin (à gauche) et salle des arcades (à droite), photos : Wenk 2012



Fig. A3.3: Points faibles potentiels typiques dans le Markgräflerhof : cloisons intérieures minces (à gauche) et planchers en bois flexibles (à droite), photos : Wenk 2012



mise en œuvre des mesures de remise en état était déjà trop avancée à ce stade.

### A3.6 Projet d'intervention

Malgré l'avancement de la remise en état du Markgräflerhof, l'office des bâtiments de Bâle-Ville a effectué une visite conjointe du toit avec le service des monuments historiques et ordonné, sur la base de l'évaluation visuelle de la situation, des mesures constructives de renforcement au niveau des murs pignons.

Des mesures de sécurité sismique minimales peu coûteuses ont été réalisées en 2012 : les deux murs pignons des façades côté rue et jardin ont été ancrés afin de prévenir un basculement, et un contreventement a été ajouté à la dalle supérieure au moyen de barres de traction [63] [64] [65] [66].

### A3.7 Synthèse

En sa qualité de maître d'ouvrage, l'office des bâtiments de Bâle-Ville a fait réaliser l'examen de la sécu-

rité sismique très tôt dans le projet. L'examen général a révélé une sécurité sismique trop faible et des résultats lacunaires, donnant lieu à des recommandations allant dans le sens d'une intervention invasive et coûteuse, qui comprenait différentes variantes de renforcements de murs et de nouvelles parois supplémentaires. Une révision de l'examen général avec l'accompagnement d'un expert chevronné en génie parasismique a permis d'obtenir des résultats plus proches de la réalité. Un examen détaillé n'a pas été réalisé faute de temps, car les travaux étaient quasiment achevés à ce stade. Des mesures constructives visant à remédier aux points faibles manifestes ont tout de même été mises en œuvre.

<b>Caractéristiques du projet</b>	
Propriétaire	Hôpital universitaire de Bâle-Ville
Architecte (rénovation de 2011 à 2013)	Kury Stähelin architectes, Bâle
Expert (sur mandat du canton de Bâle-Ville)	Dr Thomas Wenk, Wenk Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik GmbH, Zurich
Année de construction	1698-1705, 1736-1739, 1838-1842, 1882-1885, 1902/1903
Statut de protection	Monument historique classé, sous protection
Utilisation du bâtiment	Centre de transfusion sanguine de l'Hôpital universitaire de Bâle-Ville
Occupation par des personnes PB	3
Classe d'ouvrages	CO II (hôpital)
Zone sismique	Z3a
Classe de terrain de fondation	Étude de la dynamique des sols (microzonage sismique)
Facteur de conformité établi lors de l'examen (état actuel)	$\alpha_{\text{eff}} > 0,4$
Facteur de conformité après la mise en œuvre de mesures visant à améliorer la sécurité sismique (intervention)	Inconnu
Stratégie d'amélioration	Soutien/fixation/ancrage
Réalisation des mesures de sécurité sismique	2012-2013

# Annexe B Schéma du processus interdisciplinaire idéal

Phase	Phase partielle	Tâches et objectifs essentiels	Compétence, contribution	
1 Définition des objectifs	> 11 Énoncé des besoins, approche méthodologique	MO contacte CM MO mandate IC	MO (représentant du maître d'ouvrage)	
		L'examen de l'ouvrage (CM) et le relevé de l'état (IC) sont effectués de manière interdisciplinaire Le concept d'examen (IC) est présenté à CM	CM et IC	
		CM attribue aux parties du bâtiment des objectifs de protection en matière de conservation des monuments IC détermine la classe de l'ouvrage en fonction de sa fonction/son utilisation et de l'occupation par des personnes	CM et IC	
2 Études préliminaires	> 21 Définition du projet de construction, étude de faisabilité	IC détermine les facteurs de conformité par le calcul (examen général et détaillé) IC décrit les points faibles sismiques et les dégâts possibles	IC	
		IC élabore en collaboration avec A différentes solutions Les solutions sont comparées, évaluées et délimitées avec CM (matrice)	IC, A et CM	
3 Étude du projet	> 31 Avant-projet	IC élabore avec A des concepts d'intervention Évaluation différenciée de la proportionnalité des concepts d'intervention (matrice) Délimitation et priorisation des concepts d'intervention	IC, A et CM	
		> 32 Projet de l'ouvrage	Recommandation interdisciplinaire d'intervention à l'int. MO MO rend sa décision sur le concept d'intervention La décision concernant les mesures est documentée dans le cahier des charges du projet/la convention d'utilisation	IC, A et CM MO
	> 33 Procédure de demande d'autorisation/ dossier de mise à l'enquête			
4 Appel d'offres	> 41 Appels d'offres, - comparaison des offres, propositions			
5 Réalisation	> 51 Projet d'exécution	IC élabore le projet d'intervention Fixation des détails avec CM	IC et CM	
		52 Exécution de l'ouvrage	Les mesures sont réalisées	EC/DT (accompagnement par IC, A et CM)
		53 Mise en service, achèvement	Les mesures sont consignées dans la documentation de projet et transmises au MO	IC
6 Exploitation	61 Fonctionnement			
	62 Surveillance, contrôle, entretien			
	63 Maintenance			

A architecte  
MO maître d'ouvrage  
IC ingénieur civil

DT direction des travaux  
EC entreprise de construction  
CM service spécialisé pour la conservation des monuments

---

# Bibliographie

- [1] Service sismologique suisse (SED), Seismic Hazard Model 2015 for Switzerland (SUIhaz2015), EPFZ, [www.seismo.ethz.ch/fr/knowledge/seismic-hazard-switzerland](http://www.seismo.ethz.ch/fr/knowledge/seismic-hazard-switzerland), Zurich 2016.
- [2] Service sismologique suisse (SED), [www.seismo.ethz.ch](http://www.seismo.ethz.ch), EPFZ, [www.seismo.ethz.ch/fr/knowledge/seismic-risk-switzerland](http://www.seismo.ethz.ch/fr/knowledge/seismic-risk-switzerland), EPFZ.
- [3] Norme SIA 261 «Actions sur les structures porteuses», Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2020.
- [4] Office fédéral de la statistique (OFS), statistique issue du Registre des bâtiments et logements de l'Office fédéral de la statistique pour les 1,73 million de bâtiments des catégories Bâtiments exclusivement à usage d'habitation, Bâtiments d'habitation à usage annexe et Bâtiments partiellement à usage d'habitation, état fin 2017, [www.bfs.admin.ch](http://www.bfs.admin.ch), Neuchâtel, 2017.
- [5] Norme SIA 269 «Bases pour la maintenance des structures porteuses», Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2011.
- [6] Norme SIA 260 «Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses», Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2013.
- [7] Cahier technique SIA 2018 «Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants», Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2004.
- [8] Loi fédérale du 30 mars 1911 complétant le Code civil suisse (Livre cinquième : Droit des obligations), RS 220, (état le 1<sup>er</sup> avril 2020).
- [9] Hugo Bachmann, «Sécurité parasismique des bâtiments – Questions juridiques et responsabilités», dépliant, Fondation pour la dynamique des structures et le génie parasismique, Société suisse du génie parasismique et de la dynamique des structures (SGEB), Institut pour le droit suisse et international de la construction, [https://www.baudyn.ch/application/files/2614/4673/6370/baudyn\\_faltblatt\\_3\\_f.pdf](https://www.baudyn.ch/application/files/2614/4673/6370/baudyn_faltblatt_3_f.pdf), Université de Fribourg, 2010.
- [10] Règlement SIA 102 «Règlement concernant les prestations et honoraires des architectes», Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2014.
- [11] Règlement SIA 103 «Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs civils», Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2014.
- [12] Code pénal suisse du 21 décembre 1937 (Titre septième : Crimes ou délits créant un danger collectif), RS 311.0 (état le 3 mars 2020).
- [13] Norme SIA 469 «Conservation des ouvrages», Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 1997.
- [14] Office fédéral de l'environnement (OFEV), «Risque sismique pour les grands parcs immobiliers – Méthode de priorisation par étapes pour l'identification de bâtiments critiques», [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/erdbeben/uw-umwelt-wissen/erdbebenrisiko-grosser-gebaeudebestaende.pdf.download.pdf/UW-2014-F\\_ErdbebenGebaueudebestaende.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/erdbeben/uw-umwelt-wissen/erdbebenrisiko-grosser-gebaeudebestaende.pdf.download.pdf/UW-2014-F_ErdbebenGebaueudebestaende.pdf), Berne, 2020.
- [15] SGEB – Cours d'introduction – Norme SIA 269/8, Volume des contributions du cours d'introduction de la SGEB du 8 novembre 2019 à l'EPFL, Volume n° 2 des documentations de la SGEB, SGEB, 2019.

- 
- [16] Formulaire «Deklaration zur Überprüfung der Erdbebensicherheit – Bestehende Gebäude: Instandsetzungen und Veränderungen wie Umbauten oder Nutzungsänderungen», canton d'Argovie, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Formulare erdbebengerechtes Bauen (par. 51, al. 1, BauV), [https://www.ag.ch/media/kanton\\_aargau/bvu/dokumente\\_2/bauen/baurecht\\_1/B\\_11\\_2a\\_Formular\\_Erdbebensicherheit\\_Umbauten\\_Stand\\_2021.pdf](https://www.ag.ch/media/kanton_aargau/bvu/dokumente_2/bauen/baurecht_1/B_11_2a_Formular_Erdbebensicherheit_Umbauten_Stand_2021.pdf).
- [17] Conférence suisse des conservatrices et conservateurs des monuments (CSCM), [www.denkmalpflege.ch](http://www.denkmalpflege.ch).
- [18] Constitution du 18 avril 1999 fédérale de la Confédération suisse (Cst.), RS 101 (état le 1<sup>er</sup> janvier 2020).
- [19] Loi fédérale du 1<sup>er</sup> juillet 1966 sur la protection de la nature et du paysage (LPN), RS 451 (état le 1<sup>er</sup> avril 2020).
- [20] Ordonnance du 16 janvier 1991 sur la protection de la nature et du paysage (OPN), RS 451.1 (état le 1<sup>er</sup> juin 2017).
- [21] Patrimoine suisse, [www.patrimoinesuisse.ch](http://www.patrimoinesuisse.ch).
- [22] Office fédéral de la protection de la population (OFPP), [www.babs.admin.ch](http://www.babs.admin.ch).
- [23] Office fédéral de la culture (OFC), [www.bak.admin.ch](http://www.bak.admin.ch).
- [24] Commission fédérale des monuments historiques (CFMH), <https://www.bak.admin.ch/bak/fr/home/baukultur/ekd.html>.
- [25] Commission fédérale pour la protection de la nature et du paysage (CFNP), [www.enhk.admin.ch](http://www.enhk.admin.ch).
- [26] Commission fédérale des monuments historiques (CFMH), Principes pour la protection du patrimoine culturel bâti en Suisse, vdf Hochschulverlag AG à l'EPFZ, <http://vdf.ch/leitsatze-zur-denkmalpflege-in-der-schweiz.html>, 2007.
- [27] Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites, Vienne, 1964.
- [28] Convention du 3 octobre 1985 pour la sauvegarde du patrimoine architectural de l'Europe, Grenade, 1985.
- [29] Charte internationale pour la sauvegarde des villes historiques, Washington, 1987.
- [30] Document de Nara sur l'authenticité, Nara, 1994.
- [31] Principes pour l'analyse, la conservation et la restauration des structures du patrimoine architectural, Zimbabwe, 2003.
- [32] Commission fédérale des monuments historiques (CFMH), «Sécurité sismique des monuments historiques», Document de base du 22 juin 2018, [https://www.bak.admin.ch/dam/bak/fr/dokumente/kulturpflege/publikationen/erdbebensicherheitbeibaudenkmaelern.pdf.download.pdf/securite\\_sismiquedesmonumentshistoriques.pdf](https://www.bak.admin.ch/dam/bak/fr/dokumente/kulturpflege/publikationen/erdbebensicherheitbeibaudenkmaelern.pdf.download.pdf/securite_sismiquedesmonumentshistoriques.pdf), Berne, 2018.
- [33] Bernhard Waldmann, «Bauen und Denkmalschutz», dans : Institut pour le droit suisse et international de la construction (éd.), Journées suisses du droit de la construction 2003, Fribourg, 2003 (en allemand).
- [34] Planungs- und Baugesetz (PBG), Recueil des lois du canton de St-Gall (sGS 731.1), 5 juillet 2016 (état au 1<sup>er</sup> janvier 2018).
- [35] Thomas Wenk/Katrin Beyer, «Seismic conservation strategies for cultural heritage buildings in Switzerland», 2<sup>e</sup> Conférence européenne de génie parasismique et de sismologie, Istanbul, 2014.
- [36] Ulrich Häfelin/Georg Müller/Felix Uhlmann, «Allgemeines Verwaltungsrecht», 7<sup>e</sup> éd., Dike Verlag, Zurich/St-Gall, 2016.

- 
- [37] Cahier technique SIA 2017 « Valeur de conservation des ouvrages », Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2000.
- [38] Norme SIA 112 « Modèle : Étude et conduite de projet », Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2014.
- [39] Norme SIA 101 « Règlement concernant les présentations des maîtres d'ouvrage », Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2020.
- [40] Hugo Bachmann, « Damit Baudenkmäler nicht zu Mahnmälern werden », TEC 21 14-15/2017.
- [41] Landesdenkmalamt Berlin, « Leitfaden zur Erstellung von restauratorischen Dokumentationen in der Baudenkmalpflege », Berlin, 2016.
- [42] Basler & Hofmann AG, rapport sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), « Grundlagenvorbereitung & Zustandserfassung bei der Überprüfung der Erdbebensicherheit von kulturhistorisch bedeutenden Mauerwerksbauten – Studienprojekt am Bundeshaus Ost », Berne, 2015 (en allemand).
- [43] Norme SIA 269/2 « Maintenance des structures porteuses – Structures en béton », Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2011.
- [44] Norme SIA 269/3 « Maintenance des structures porteuses – Structures en acier », Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2011.
- [45] Norme SIA 269/4 « Maintenance des structures porteuses – Structures mixtes acier-béton », Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2011.
- [46] Norme SIA 269/5 « Maintenance des structures porteuses – Structures en bois », Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2011.
- [47] Norme SIA 269/6-1 « Maintenance des structures porteuses – Structures en maçonnerie, partie 1 : pierres naturelles », Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2011.
- [48] Norme SIA 269/6-2 « Maintenance des structures porteuses – Structures en maçonnerie, partie 2 : briques et parpaings », Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2014.
- [49] Norme SIA 269/7 « Maintenance des structures porteuses – Géotechnique », Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2011.
- [50] Office fédéral de la protection de la population (OFPP), Glossaire des risques, 2013. <https://www.babs.admin.ch/fr/aufgabenbabs/gefaehrdrisiken.html>.
- [51] Dossier de candidature pour le Prix d'architecture et d'ingénierie parasismiques 2015, « Renovation Oberstufenschulhaus Quader Chur », Schwander & Sutter Dipl. Architekten, Coire, Bänziger Partner AG, Coire (en allemand).
- [52] Fondation pour la dynamique des structures et le génie parasismique, Prix d'architecture et d'ingénierie parasismiques 2015, rapport du jury « Bericht des Preisgerichts, Sitzung vom 22. April 2015 », Berne (en allemand).
- [53] Fondation pour la dynamique des structures et le génie parasismique, brochure « Prix d'architecture et d'ingénierie parasismiques 2015 », <https://www.baudyn.ch/application/files/9414/4650/2839/preis-2015-brochure-hochwertig.pdf>.
- [54] Thomas Ekwall, « Denkmal gesichert trotz Verstärkung », TEC21 45/2015, 8-10.
- [55] <https://www.baudyn.ch/fr/preise/seismic-award/2015>.

- 
- [56] Pierino Lestuzzi/Angelo Garofano/Lorenzo Diana, « Seismic safety of masonry heritage buildings », Applied Computing and Mechanics Laboratory (IMAC), EPFL, rapport sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Lausanne, 2016.
- [57] Conseil municipal de la ville de Sion, « Réponse du conseil municipal au conseil général concernant le postulat pour une nouvelle réflexion sur la transformation de l'Ancien Hôpital de Sion », Sion, 24 février 2012.
- [58] Paul de Rivaz, « Les hôpitaux de Sion », Annales valaisannes, bulletin trimestriel de la Société d'histoire du Valais romand, 1940, vol. 4, n° 2, 42-48.
- [59] Sulpice Crettaz, « L'Hôpital de Sion », Annales valaisannes, bulletin trimestriel de la Société d'histoire du Valais romand, 1949, vol. 7, n° 4, 145-180.
- [60] Albert de Wolff, « Plans visuels inédits de Sion (XVI<sup>e</sup> - XIX<sup>e</sup> siècle) », Vallesia : bulletin annuel de la Bibliothèque et des Archives cantonales du Valais, des Musées de Valère et de la Majorie, 1969, 133-152.
- [61] Pierino Lestuzzi, « Ancien Hôpital de SION » (présentation), séances de coordination de projet 2012/13, Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.
- [62] Kantonale Denkmalpflege Basel-Stadt, « Basler Barock Formenpracht und Stadtumbau im 18. Jahrhundert », visites du soir organisées par le service cantonal des monuments d'avril à septembre 2016.
- [63] Bau- und Verkehrsdepartement Basel-Stadt, Städtebau & Architektur, Hochbauamt, « Markgräflerhof Sanierung Dach und Fassade », Bâle, 2015.
- [64] Stähelin Partner Architekten AG, « Renovation Markgräflerhof, Basel (BS) », <https://www.staehelinpartner.com/fr/projects/downloadpdf/157/renovation-markgraeflerhof-basel-bs>.
- [65] Thomas Wenk, « Der Markgräflerhof in Basel – das erste Barockpalais in der Schweiz » (présentation), séances de coordination de projet 2012/13, Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.
- [66] Thomas Lutz, « Ein fürstlicher Paukenschlag : Der Markgräflerhof », visites du soir « Basler Barock », Bau- und Verkehrsdepartement Basel-Stadt, Städtebau & Architektur, Kantonale Denkmalpflege, Bâle 2016.
- [67] Bundesdenkmalamt (BDA), « Richtlinien für bauhistorische Untersuchungen », Vienne, 2018, 20.
- [68] Norme SIA 462 « Évaluation de la sécurité structurale des ouvrages existants », Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 1994.
- [69] Norme SIA 118 « Conditions générales pour l'exécution des travaux de construction », Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2013.
- [70] « Optimierung von Lebenszykluskosten durch strategische Investitionen – Eine Untersuchung auf Ebene Bauelement », mémoire de Master, Université de Zurich, 2013.
- [71] Eurocode 8 « Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 3 : évaluation et renforcement des bâtiments », Comité européen de normalisation, Bruxelles, 2004.
- [72] Norme SIA 269/8 « Maintenance des structures porteuses – Séismes », Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2017.
- [73] Larousse en ligne, [www.larousse.fr](http://www.larousse.fr).
- [74] Office fédéral de l'environnement (OFEV), rapport « Erdbebenvorsorge bei Infrastrukturen, Standbericht und Planung für den Zeitraum 2013-2016 », Berne, 2013 (en allemand).

- 
- [75] Loi fédérale du 6 octobre 1966 sur la protection des biens culturels en cas de conflit armé, RS 520.3.
- [76] Loi fédérale du 20 juin 2014 sur la protection des biens culturels en cas de conflit armé, de catastrophe ou de situation d'urgence (LPBC), RS 520.3.
- [77] Handbuch Soziales des Kantons Aargau, [https://www.ag.ch/de/dgs/gesellschaft/soziales/handbuch\\_soziales/handbuch\\_soziales\\_1.jsp](https://www.ag.ch/de/dgs/gesellschaft/soziales/handbuch_soziales/handbuch_soziales_1.jsp) (consulté en ligne le 18 mai 2020).
- [78] Ulrich Häfelin/Georg Müller, «Grundriss des Allgemeinen Verwaltungsrechts», 4<sup>e</sup> éd., Zurich 2002, 113-118.
- [79] Georg Mörsch, «Aufgeklärter Widerstand. Das Denkmal als Frage und Aufgabe», Bâle : Birkhäuser Verlag, Bâle, 1989.
- [80] PLANAT, «Niveau de sécurité face aux dangers naturels», Berne, 2013.
- [81] Norme SIA 262 «Construction en béton», Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2013.
- [82] Norme SIA 263 «Construction en acier», Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2013.
- [83] Norme SIA 264 «Construction mixte acier-béton», Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2013.
- [84] Norme SIA 265 «Construction en bois», Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2012.
- [85] Norme SIA 266 «Construction en maçonnerie», Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2015.
- [86] Norme SIA 267 «Géotechnique», Société suisse des ingénieurs et architectes, SIA Zurich, 2013.
- [87] PLANAT, «Terminologie relative aux dangers naturels» à l'intention des autorités communales, des personnes concernées et intéressées. Base : Glossaire inhérent à la stratégie «Dangers naturels en Suisse», plan d'action PLANAT, janvier 2009.
- [88] Office fédéral de la protection de la population (OFPP), «Rapport sur l'analyse nationale des risques. Catastrophes et situations d'urgence en Suisse 2020», <https://www.babs.admin.ch/fr/aufgabenbabs/gefaehrd Risiken/natgefaehrd-analyse.html>, Berne, 2020.
- [89] T. Vogel et E. Kölz, «Evaluation of existing buildings with respect to earthquake risks», Proceedings of the 9th International Conference on Structural Safety and Reliability ICOSSAR'05, Rome, du 19 au 23 juin 2005.
- [90] G. Grünthal, «European Macroseismic Scale 1998, EMS-98», Centre européen de géodynamique et de séismologie, [http://media.gfz-potsdam.de/gfz/sec26/resources/documents/PDF/EMS-98\\_Original\\_englisch.pdf](http://media.gfz-potsdam.de/gfz/sec26/resources/documents/PDF/EMS-98_Original_englisch.pdf), Luxembourg, 1998.
- [91] Office fédéral de la statistique (OFS), Tables de mortalité pour la Suisse 2008/2013, [www.bfs.admin.ch](http://www.bfs.admin.ch), Neuchâtel, 2017.
- [92] Liste des monuments, ensembles et sites archéologiques d'importance nationale, Office fédéral de la culture (OFC), <https://www.bak.admin.ch/bak/fr/home/baukultur/service/publikationen.html>.
- [93] Ordonnance du 29 octobre 2014 sur la protection des biens culturels en cas de conflit armé, de catastrophe ou de situation d'urgence (OPBC), RS 520.31 (état le 1<sup>er</sup> janvier 2016).
- [94] Loi fédérale du 22 juin 1979 sur l'aménagement du territoire (loi sur l'aménagement du territoire, LAT), RS 700 (état le 1<sup>er</sup> janvier 2019).

- 
- [95] À titre d'exemple : Direction de l'instruction publique et de la culture du canton de Berne, Office de la culture, Monuments historiques, Recensement architectural en ligne, [https://www.erz.be.ch/erz/fr/index/kultur/denkmalpflege/bauinventar/bauinventar\\_online.html](https://www.erz.be.ch/erz/fr/index/kultur/denkmalpflege/bauinventar/bauinventar_online.html).
- [96] À titre d'exemple : Chancellerie de la ville de Berne, Service des monuments historiques, Recensement architectural de la ville de Berne, <https://bauinventar.bern.ch>.
- [97] Office fédéral de la protection de la population (OFPP), PBC 2006 : Guidelines 2/2006 : Documentation de sécurité (Auteur : Daniel Stadlin, Zoug), Berne.
- [98] Hugo Bachmann, « Conception parasismique des bâtiments – Principes de base à l'attention des ingénieurs, architectes, maîtres d'ouvrages et autorités », directives de l'ancien Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEV), actuellement : Office fédéral de l'environnement (OFEV), Bienne, 2002. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dangers-naturels/publications-etudes/publications/conception-parasismique-des-batiments.html>.
- [99] Thomas Wenk, « Confortement parasismique de constructions. Stratégie et recueil d'exemples en Suisse », Connaissance de l'environnement n° 0832, Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne, 2008. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dangers-naturels/publications-etudes/publications/confortement-parasismique-de-constructions.html>.
- [100] Clementine Hegner-van Rooden, « Das Minimum ist das Maximum », Musée du design de Zurich, TEC21 n° 35/2018, [www.espazium.ch](http://www.espazium.ch), Zurich.
- [101] Sécurité parasismique des constructions de la Confédération – Formulaire n° 5 Transformations et réfections : Rapport sur la vérification de la sécurité parasismique selon le cahier technique SIA 2018, Musée national suisse, aile des arts décoratifs, Office fédéral des constructions et de la logistique (OFCL), 2013 (en allemand).
- [102] Guidelines, ABC Standards der Baudenkmalpflege Österreich, Leitsätze, Arbeitsblätter Vereinigung Landesdenkmalpfleger <https://bda.gv.at/publikationen/standards-leitfaeden-richtlinien/standards-der-baudenkmalpflege>.
- [103] Hugo Bachmann et Andreas Zachmann, « Schwimmende Lagerung », TEC21 n° 35/2008, 26-28.
- [104] Farbbefunde am Baudenkmal : Bedeutung – Methodik – Auswirkung, Dokumentation zum 26. Kölner Gespräch zu Architektur und Denkmalpflege in Köln, 7. Mai 2018, Mitteilungen aus dem LVR-Amt für Denkmalpflege im Rheinland Heft 32, Köln 2018. [https://denkmalpflege.lvr.de/media/denkmalpflege/publikationen/online\\_publicationen/18\\_3065\\_Heft32\\_Farbbefunde\\_im\\_Baudenkmal.pdf](https://denkmalpflege.lvr.de/media/denkmalpflege/publikationen/online_publicationen/18_3065_Heft32_Farbbefunde_im_Baudenkmal.pdf).

# Glossaire

## accélération du sol

Accélération de la surface du terrain due aux mouvements du sol. L'accélération horizontale du sol est un paramètre d'aléa important en génie parasismique.

## aléa sismique

1) Selon le SED, l'aléa sismique indique à un endroit donné la fréquence d'occurrence de différentes valeurs de paramètres de secousses sismiques (comme l'accélération horizontale du sol) pour un intervalle de temps donné. L'évaluation se fonde sur les connaissances de la tectonique et de la géologie, sur les informations tirées de l'histoire sismique, sur les descriptions des dommages, ainsi que sur les modèles de propagation des ondes.

2) Dans la norme SIA 261 [3], l'aléa sismique est représenté sous forme de l'accélération horizontale maximale du sol pour un sol de référence et pour une probabilité de dépassement de 10 % en 50 ans. La carte en vigueur des zones sismiques et des valeurs d'accélération horizontale du sol correspondantes figure dans la norme SIA 261.

## bâtiment existant

1) Terme employé dans le domaine de la conservation des monuments historiques en Suisse.

2) Selon la norme SIA 462 [68], ouvrage construit et abordé au sens de l'art. 157 de la norme SIA 118 [69] ou d'une manière analogue. Le terme « ouvrage » désigne aussi bien un ouvrage complet qu'une partie d'ouvrage.

## bien digne de protection

Selon le Glossaire des risques de l'OFPP [50], il s'agit d'un bien qui doit être préservé contre les dommages du fait de sa valeur intrinsèque ou matérielle; font notamment partie des biens dignes de protection la population et ses bases d'existence. Selon la plate-forme nationale « Dangers naturels » (PLANAT) [80], un bien à protéger est une valeur pour laquelle le risque doit être limité à un niveau acceptable. Les personnes, les biens matériels d'une valeur notable, l'environnement, les fonctions d'infrastructure et les valeurs culturelles sont des biens essentiels à protéger.

## capacité de dissipation d'énergie

Selon l'Eurocode EC8 [71], Partie 1, capacité d'une structure porteuse à dissiper l'énergie par un comportement hystérétique ductile et/ou par d'autres mécanismes.

## charges verticales

Font notamment partie des charges verticales le poids propre de la structure porteuse, les surcharges, les charges utiles et les charges de neige.

## coefficient de comportement

Selon la norme SIA 261 [3], coefficient prenant en compte la capacité de déformation d'une structure porteuse soumise à une action sismique. Le coefficient de comportement dépend de la capacité de déformation plastique, de l'écroûissage et de la *capacité de dissipation d'énergie* de la structure porteuse. Il est pris en compte selon les indications des normes SIA 262 à 267 [81] [82] [83] [84] [85] [86]. Selon la grandeur du coefficient de comportement  $q$ , une distinction est faite entre le comportement non ductile et le comportement ductile de la structure porteuse. Si le dimensionnement est basé sur le comportement ductile de la structure, on respectera les dispositions correspondantes pour la conception et les dispositions constructives données dans les normes SIA 262 à 267.

## commission extraparlamentaire

Extrait du droit fédéral ([www.admin.ch](http://www.admin.ch)): « Les commissions extraparlamentaires remplissent essentiellement deux fonctions. Premièrement, à titre d'organes de milice, elles complètent l'administration fédérale dans certains domaines où cette dernière ne dispose pas des savoirs nécessaires. L'administration y gagne des connaissances spécifiques qu'elle devrait sans cela acquérir par un accroissement de l'appareil administratif ou par de coûteux mandats d'experts. Les connaissances des spécialistes peuvent ainsi être mises au service de la société. [...] »

## constat

Selon l'encyclopédie Brockhaus, terme qui désigne après un examen précis/détaillé un état constaté d'un objet, par exemple un monument historique, qui a subi des altérations au cours des siècles. Ces altérations, engendrées

par des transformations, des couches de peinture etc. sont documentées. Un constat est alors le résultat d'un examen des surfaces et éléments visibles de la construction et du décor/contenu du monument historique avec comme objectif principal de décrire l'apparence du monument au cours de son histoire. Dans ce cadre, le constat formule tous les témoignages trouvés sur le monument historique – soit visibles, soit invisibles – qui justifient et établissent la valeur patrimoniale du monument historique, y compris parfois en vue de la relativiser [104]. Un constat représente dès lors le résultat d'études relatives à une propriété de l'objet considéré. Ce résultat découle de méthodes d'analyse les plus variées et peut porter sur un détail ou sur un ensemble complet d'interdépendances (résultat global). En histoire de la construction, un constat décrit le contexte de phénomènes observables ou mesurables et, en particulier, les interdépendances entre ces phénomènes. S'agissant de son contenu, le constat est intersubjectif ; d'un point de vue systémique, il fait partie de la description de l'objet. En conséquence, le constat doit être intégré dans la description générale et doit toujours être signalé comme tel. [67]

**classe de sol de fondation** (ou classe de terrain de fondation)

Selon la norme SIA 261 [3], l'influence de la nature du terrain de fondation sur l'action sismique doit être prise en compte par l'attribution de l'emplacement de l'ouvrage à l'une des classes de terrain de fondation définies dans le tableau 24 de la norme SIA 261.

**déplacement relatif**

Déplacement relatif des extrémités d'un élément de construction (p. ex. la tête et le pied d'une colonne) en cas de mouvements absolus différents des deux extrémités.

Dans le cas d'un ouvrage complet, il s'agit généralement du déplacement de l'étage supérieur (arête de toit) par rapport aux fondations.

**dommage**

Selon le Glossaire des risques de l'OFPP [50], conséquence négative d'un séisme.

Les séismes ayant des répercussions négatives sont souvent caractérisés par une série de dommages divers se

traduisant par des morts, des blessés, des personnes évacuées, des dommages matériels directs ou indirects, des dommages environnementaux ou autres. Les dommages peuvent être répartis en dommages directs et indirects. Les dommages directs sont les dommages immédiats causés par le séisme (biens matériels, morts, etc.). Les dommages indirects sont des dommages consécutifs au séisme pouvant être différés dans le temps et délocalisés géographiquement. Les conséquences économiques telles que les pertes de production et de recettes, mais aussi la perte de confiance dans les institutions, sont des exemples typiques de dommages indirects.

**dommage potentiel**

Selon le Glossaire des risques de l'OFPP [50], dommage qui pourrait survenir en cas de séisme.

Le dommage potentiel dépend du bien digne de protection qui serait potentiellement affecté en cas d'événement.

**ductilité**

Selon la norme SIA 260 [6], capacité de déformation plastique généralement rapportée à la limite du comportement élastique et caractérisée par des déformations irréversibles et une dissipation d'énergie.

**durée d'utilisation restante**

Selon la norme SIA 269 [5], durée prévue pendant laquelle un ouvrage existant sera encore utilisé selon la convention d'utilisation.

**dynamique des structures**

Science et pratique des oscillations de l'ouvrage et de leur évitement.

**échelle de Richter**

Selon le SED, la première échelle de magnitude a été mise au point en 1935 par le physicien et sismologue américain Charles Richter. Aujourd'hui encore, la taille d'un séisme est communément donnée en « échelle de Richter » (magnitude locale). Avec le temps, il a toutefois été constaté que l'échelle de Richter n'était adaptée qu'à des tremblements de terre compris dans une certaine plage de magnitude et de distance. Pour les séismes très importants ou très éloignés, elle ne peut traduire correctement l'énergie libérée. Pour cette raison, d'autres échelles de

magnitude ont été élaborées, notamment l'échelle de magnitude de moment. (voir « magnitude »)

### **élément de construction**

Selon la norme SIA 260 [6], partie physiquement identifiable d'un ouvrage. Un élément de construction peut se subdiviser en plusieurs sous-éléments. Ce terme est employé en particulier dans le code des coûts de construction (CCC) publié par le Centre suisse d'études pour la rationalisation de la construction (CRB), qui décompose un ouvrage en plusieurs éléments fonctionnels auxquels les coûts sont attribués en conséquence. En vue d'obtenir une évaluation du coût total, avec une répartition sommaire des coûts de l'ouvrage, les éléments sont rassemblés en groupes d'éléments. Ainsi, le groupe d'éléments « Gros œuvre (bâtiment) » peut contenir par exemple les éléments de construction « Dalles, escaliers, balcons » ou « Piliers ». [70]

### **éléments non-structuraux**

Selon la norme SIA 260 [6], éléments de construction ne faisant pas partie de la structure porteuse (p. ex. éléments de façade, cloisons et parois intermédiaires, couvertures, revêtements et chapes, balustrades, parapets, plafonds suspendus, isolations et étanchéités) et équipements fixes (p. ex. ascenseurs et escaliers roulants, installations électriques, installations techniques sanitaires, de chauffage, de ventilation et de climatisation).

### **infrastructure**

1) Selon le rapport de l'OFEV sur la mitigation des séismes dans le domaine des infrastructures [74], équipement ou organisation qui, isolément ou au sein d'un réseau, fournit des services et des produits à la société, à l'économie et à l'État et permet ainsi le fonctionnement de la société.  
2) Selon Larousse [73], ensemble des ouvrages constituant la fondation et l'implantation sur le sol d'une construction ou d'un ensemble d'installations (p. ex. routes, voies ferrées, aéroports).

### **intensité**

Selon le SED, force d'un tremblement de terre dont la description est basée sur l'ampleur des dégâts (bâti, paysage) et sur la perception subjective des observateurs. L'intensité d'un séisme est dépendante du lieu et varie avec la magnitude du séisme, la distance à l'épicentre et

la géologie locale (sous-sol). Conformément à l'échelle macrosismique européenne adoptée en 1998 (EMS-98), il est d'usage d'employer des chiffres romains pour désigner subjectivement les différents degrés d'intensité d'un séisme entre I (séisme non ressenti) et XII (destruction totale). Aujourd'hui, il existe également une intensité instrumentale calculée à partir des valeurs maximales d'accélération et de vitesse du sol mesurées par les stations sismiques. Cette méthode donne une idée de la répartition de l'ampleur des secousses bien plus rapidement qu'une carte d'intensité « classique » établie à partir d'une enquête auprès de la population concernée et d'une évaluation des dommages. Les valeurs obtenues peuvent être représentées par des points sur une carte et/ou, après interpolation, par des zones concentriques de même intensité (*ShakeMaps*).

### **intérêt public**

1) L'intérêt public est la condition générale de toute activité de l'État. L'État doit protéger et promouvoir le bien-être de la collectivité et défendre les intérêts de la communauté nationale. En ce sens, il n'est pas possible d'employer une formulation générale pour décrire succinctement le contenu et la portée exacte de la notion d'intérêt public. Déterminer si et quand un intérêt est suffisamment important pour représenter un intérêt public nécessite l'application de directives claires, qui font actuellement défaut. [78]  
2) D'après le « Manuel social » du canton d'Argovie [77] par exemple, toute action de l'État doit relever de l'intérêt public. Les intérêts publics sont les intérêts que le public (au sens de la collectivité) considère comme étant dignes de protection et de réalisation. L'État doit protéger et promouvoir le bien-être de la collectivité et défendre les intérêts de la communauté nationale. L'intérêt public est une notion juridique indéterminée. Elle recouvre pour le moins les articles déterminant les objectifs et les buts de la législation. Pour définir l'intérêt public, l'autorité compétente dispose d'une certaine marge d'appréciation. L'existence d'un intérêt public ne justifie pas à elle seule l'action de l'État ; pour cela, l'intérêt public doit l'emporter sur d'éventuels intérêts contraires, privés ou publics.

### **maître d'ouvrage**

Selon les règlements SIA 112 [38] et SIA 101 [39], le maître d'ouvrage est le décideur suprême dans un projet de construction. Il peut être propriétaire et/ou inves-

tisseur. C'est lui qui est le requérant dans les procédures d'autorisation nécessaires.

### **magnitude**

Selon le SED, la magnitude donne une information sur l'énergie libérée par un séisme, donc sur sa force. Le principe est simple : plus la magnitude d'un séisme est importante, plus les mouvements du sol qu'il provoque sont forts. La magnitude est une valeur logarithmique. Une augmentation d'un degré de magnitude signifie une multiplication de l'énergie par trente environ. La magnitude est déterminée en règle générale à partir des enregistrements (sismogrammes) des appareils de mesure (sismomètres). La première échelle de magnitude a été mise au point en 1935 par le physicien et sismologue américain Charles Richter (1900-1985). En Suisse, aujourd'hui encore, l'importance d'un tremblement de terre est habituellement donnée sur *l'échelle de Richter*. Les séismes sont perceptibles à partir d'une magnitude d'environ 2,5. À partir d'une magnitude de 4,5 à 5,5 environ, on peut s'attendre à des dommages isolés aux bâtiments.

### **matérialité, matière**

Selon les Principes pour la conservation du patrimoine culturel bâti en Suisse [26], le patrimoine culturel est caractérisé par la matière des objets qui le composent ; celle-ci constitue son authenticité. Pour que notre génération et les suivantes puissent comprendre et interpréter le patrimoine dans toute sa complexité, il est nécessaire de conserver l'authenticité des objets qui le composent, c'est-à-dire l'intégralité de leur substance et toutes les empreintes du temps. La conservation de l'authenticité des objets est la condition d'une compréhension sans cesse approfondie et renouvelée du patrimoine.

### **matériau de construction**

Selon la norme SIA 260 [6], matériau utilisé pour la réalisation d'un ouvrage, à savoir matière métallique, matière inorganique non métallique ou matière organique dont les propriétés sont utilisables sur le plan technique.

### **mécanisme de colonnes**

Lorsque des éléments de contreventement présents dans les étages supérieurs sont remplacés au rez-de-chaussée par des colonnes relativement fines, le rez-de-chaussée constitue un niveau « mou » ou « faible » dans la direction

horizontale. En cas de séisme, il en résulte un comportement instable, dit mécanisme de colonnes (ou mécanisme d'étage), susceptible de provoquer l'effondrement d'un ou de plusieurs étages à la manière d'un château de cartes. Une structure porteuse parasismique ne comprend ni rez-de-chaussée ni étage mou.

### **mesure de sécurité sismique**

Selon la norme SIA 269/8 [72], mesure mise en œuvre pour améliorer la protection des personnes, des biens matériels, des valeurs culturelles et de l'environnement contre les conséquences d'un séisme, ainsi que pour éviter les interruptions d'infrastructures ou d'exploitation consécutives à un séisme.

### **méthode des forces de remplacement**

Selon la norme SIA 261 [3], méthode simplifiée de l'analyse structurale pour l'action sismique, applicable à des systèmes structuraux suffisamment rigides et réguliers. La méthode des forces de remplacement est applicable aux systèmes structuraux pouvant être décrits par deux modèles en plan de la structure et dont le comportement n'est pas essentiellement influencé par des modes de vibration d'ordre supérieur. Ces conditions sont généralement remplies si les critères de régularité en plan et en élévation indiqués aux ch. 16.5.1.3 et 16.5.1.4 de la norme SIA 261 sont respectés et si la période de vibration fondamentale ne dépasse pas une valeur spécifiée.

### **méthode du spectre de réponse**

Selon la norme SIA 261 [3], méthode généralisée d'analyse structurale pour l'action sismique, avec laquelle les différents modes de vibration de la structure porteuse ainsi que leur contribution au comportement dynamique global peuvent être étudiés. Cette méthode peut toujours être appliquée. Elle doit l'être pour les ouvrages qui ne satisfont pas aux conditions d'application de la méthode des forces de remplacement. On utilisera en règle générale un modèle de la structure porteuse à trois dimensions. Les systèmes structuraux remplissant certains critères de la norme SIA 261 peuvent être calculés dans chacune des deux directions principales à l'aide d'un modèle à deux dimensions.

**méthodes de calcul basées sur les forces**

Au sens de la norme SIA 269/8 [72], les méthodes de calcul basées sur les forces sont la méthode des forces de remplacement et la méthode du spectre de réponse. Conformément à la démarche décrite dans la norme SIA 261, ces méthodes comparent les effets d'une action (efforts internes) avec les résistances ultimes.

**mode de construction**

Selon la norme SIA 260 [6], genre de construction déterminé par les matériaux de construction principalement utilisés pour l'exécution, par exemple construction en béton, construction en acier, construction mixte acier-béton, construction en bois ou construction en maçonnerie.

**modèle de la structure**

Selon la norme SIA 260 [6], délimitation et idéalisation du système porteur effectuées en vue de l'analyse structurale.

**monument historique**

Selon les Principes pour la conservation du patrimoine culturel bâti en Suisse [26], objet du passé auquel la société reconnaît une *valeur de témoignage*.

**nature du sous-sol**

Nature du sol de fondation à un emplacement géographique donné.

Une vue d'ensemble des classes de terrain de fondation selon la norme SIA 261 est à disposition sous forme de cartes dans certains cantons ([map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch) > Géocatalogue > Nature et environnement > Dangers naturels > Classes de sols de fondation).

**notion juridique indéterminée**

Une notion juridique est indéterminée lorsque la règle de droit décrit les conditions de la conséquence juridique ou la conséquence juridique elle-même de manière ouverte et non spécifiée (p. ex. « mise en danger de la moralité », « aptitude » d'un candidat). Les notions juridiques indéterminées sont ouvertes à l'interprétation des autorités administratives ; cette interprétation peut en principe être examinée par les tribunaux administratifs [78].

**objectif de protection**

Selon le Glossaire des risques de l'OFPP [50], un objectif de protection décrit les conditions de sécurité visées ; il permet ainsi de définir la limite entre les risques acceptables et les risques non acceptables. Selon PLANAT, l'objectif de protection décrit le niveau de sécurité que certaines entités assumant une responsabilité visent dans leur domaine de compétence. Dans la pratique, les objectifs de protection servent aussi de critères pour évaluer la nécessité de prendre des mesures permettant d'atteindre le niveau de sécurité visé.

**out-of-plane**

(hors du plan) Phénomène désignant la défaillance de parois en maçonnerie soumises à des actions sismiques perpendiculaires au plan de la paroi.

**ouvrage**

Selon la norme SIA 260 [6], objet résultant de travaux de construction.

**période de retour (ou périodicité)**

Selon PLANAT [87], nombre moyen d'années séparant deux événements comparables, c'est-à-dire de même intensité et survenant au même endroit (ou dans la même région géographique).

La périodicité est une valeur purement statistique qui ne dit rien sur le nombre effectif d'années séparant deux événements. Même si la périodicité d'un événement est relativement faible, il faut s'attendre à ce qu'il puisse se produire : un événement avec une période de retour de 300 ans a 15 % de probabilité de se produire dans les 50 prochaines années. Cela correspond à la probabilité de faire un 6 en lançant un dé.

**présomption légale**

Notion juridique réglant la répartition de la charge de la preuve. Selon l'art. 1354 du Code civil français, « la présomption que la loi attache à certains actes ou à certains faits en les tenant pour certains dispense celui au profit duquel elle existe d'en rapporter la preuve. »

### prospection

- 1) Selon Larousse [73], exploration méthodique d'un lieu pour trouver quelque chose ou quelqu'un.
- 2) Selon le service de conservation des monuments historiques du Land allemand de Bade-Wurtemberg ([www.denkmalpflege-bw.de](http://www.denkmalpflege-bw.de)), recherche programmée de sites archéologiques encore inconnus à ce jour.

### protection des biens culturels

Selon l'OFPP, la protection des biens culturels sous sa forme actuelle et les bases légales y afférentes trouvent leur origine dans les nombreuses destructions subies durant la Seconde Guerre mondiale. La Convention de La Haye de 1954 pour la protection des biens culturels en cas de conflit armé est une conséquence directe de ces ravages. En ratifiant cette convention en 1962, la Suisse s'est engagée à mettre en œuvre et à respecter la protection des biens culturels sur son territoire et sur le territoire souverain d'autres partenaires contractuels. Les conditions-cadres de cet engagement ont été définies dans la loi fédérale du 6 octobre 1966 sur la protection des biens culturels en cas de conflit armé [75]. Les conflits qui ont éclaté dans les Balkans durant les années 1980 et 1990 ont amené à la conclusion en 1999 du Deuxième protocole relatif à la Convention de La Haye de 1954 pour la protection des biens culturels en cas de conflit armé, que la Suisse a ratifié et mis en vigueur en 2004. Reconnaisant depuis longtemps que les biens culturels ne sont pas menacés uniquement par des activités guerrières, mais également par des catastrophes ou même des événements de moindre ampleur comme des inondations ou des actes de vandalisme, la Suisse a entièrement révisé sa législation au 1<sup>er</sup> janvier 2015 en promulguant la nouvelle loi fédérale du 20 juin 2014 sur la protection des biens culturels en cas de conflit armé, de catastrophe ou de situation d'urgence (LPBC, RS 520.3) [76]. En plus d'étendre la législation aux catastrophes et aux situations d'urgence, la LPBC apporte d'autres nouveautés : elle prévoit désormais une catégorie de protection dite « renforcée », la possibilité pour la Confédération de mettre à disposition un refuge pour des biens culturels menacés à l'étranger, la possibilité d'apposer le signe distinctif des biens culturels déjà en temps de paix et la formation du personnel des institutions culturelles dans le domaine de la protection des biens culturels. Au sein de la Confédération, la réglementation des mesures de pro-

tection des biens culturels est placée sous l'égide de la section Protection des biens culturels de l'OFPP. Celle-ci est conseillée par la Commission fédérale de la protection des biens culturels (CFPBC), dont l'une des tâches principales consiste à gérer l'Inventaire suisse des biens culturels d'importance nationale et régionale (Inventaire PBC ; voir [www.babs.admin.ch](http://www.babs.admin.ch)), en collaboration avec les cantons et avec la section Protection des biens culturels de l'OFPP.

### protection fédérale

Selon l'OFC ([www.bak.admin.ch](http://www.bak.admin.ch)), les objets auxquels il alloue des aides financières sont grevés d'une restriction de droit public à la propriété en faveur de la Confédération. Ce régime de protection fédéral est mentionné dans le registre foncier et oblige notamment les propriétaires à conserver les objets concernés dans un état correspondant au but de l'aide octroyée, ainsi qu'à solliciter l'accord de l'OFC avant de procéder à des transformations. Explication : la Confédération alloue des aides financières depuis 1886 pour la restauration d'édifices historiques et pour les mesures archéologiques, et depuis 1966 pour les mesures de protection des sites construits. Les constructions et installations qui en ont bénéficié sont en général placées sous la protection de la Confédération et ne peuvent plus être transformées sans son accord. Depuis 1989, l'OFC est compétent pour l'allocation des subventions fédérales dans toutes les catégories d'objets. Le montant des aides fédérales se détermine en fonction de l'importance – nationale, régionale ou locale – attribuée aux objets. Le classement est effectué par l'OFC sur la base des propositions des cantons et de l'étude des dossiers.

### remise en état

Selon la norme SIA 269 [5], ch. 7.2.1, la remise en état d'une structure porteuse est constituée par des interventions résultant généralement de la combinaison des objectifs suivants : supprimer les causes de la détérioration, ralentir ou faire cesser les mécanismes de détérioration, réparer les détériorations et éliminer les défauts et/ou protéger la structure porteuse ou certains de ses éléments. Selon la norme SIA 469 [13], ch. 1 12, une remise en état est une intervention propre à rétablir, pour une période déterminée, la sécurité et l'aptitude au service de l'ouvrage. Selon la norme SIA 469 [13], ch. 3 63, la

remise en état a pour objet de rétablir, pour une période déterminée, la sécurité et l'aptitude au service que l'ouvrage doit offrir. Elle comprend généralement des travaux assez importants. Lors des travaux de remise en état et de rénovation, on s'efforcera d'éliminer les causes des dégâts. Selon le contexte, les termes « entretien », « maintenance » ou « réparation » peuvent être utilisés en lieu et place du terme « remise en état ».

### **restauration**

Opération qui, sur la base de l'analyse attentive et conforme de toutes les strates du monument historique qui sont dignes d'être conservées (strates historiques, historico-culturelles et autres), veille à préserver et à présenter ces strates dans une proportion équilibrée, tout en intervenant sur l'état technique de l'ouvrage complet afin de consolider les éléments gravement défectueux ou dangereux. [79]

### **risque individuel**

- 1) Selon la norme SIA 269/8 [72], mesure du risque encouru par une personne, exprimé par la probabilité annuelle de décès.
- 2) Selon le Glossaire des risques de l'OFPP [50], probabilité qu'un individu soit affecté par un événement dommageable dans l'intervalle d'une année. En général, il s'agit d'un événement avec des conséquences létales, en l'occurrence d'un risque de décès individuel.

### **ShakeMap**

Pour chaque tremblement de terre à partir d'une magnitude de 2,5, le SED publie une ShakeMap. La ShakeMap consiste en une évaluation rapide des mouvements du sol résultant du séisme, ainsi que des effets qui y sont liés. Elle contient bien plus d'informations que les cartes de séisme traditionnelles, qui n'indiquent que l'épicentre et la magnitude.

### **séisme de dimensionnement**

Selon la norme SIA 261 [3], séisme considéré pour le dimensionnement d'un ouvrage, dont l'effet est décrit à l'aide du spectre de dimensionnement.

### **séisme de vérification**

Le « séisme de vérification » correspond en général au *séisme de dimensionnement* applicable aux nouvelles

constructions et doit être déterminé conformément à la norme SIA 261 [3]. Il s'agit de la valeur de calcul de l'accélération horizontale du sol, de la classe de sol de fondation et des valeurs des paramètres des spectres de réponse. De manière alternative, un spectre de réponse propre au site peut être déterminé en procédant à une étude dynamique du sol de fondation.

### **spectre de réponse élastique**

Selon la norme SIA 261 [3], réponse maximale d'un oscillateur simple ayant une fréquence propre de vibration et un certain taux d'amortissement pour une excitation donnée.

### **statique des structures**

Discipline qui étudie les forces agissant dans les éléments porteurs d'un ouvrage.

### **structure porteuse**

Selon la norme SIA 260 [6], ensemble formé des éléments de construction et du terrain de fondation, nécessaire pour garantir l'équilibre et la conservation de la forme d'un ouvrage.

### **système structural**

Selon la norme SIA 260 [6], disposition et mode d'interaction des éléments d'une structure porteuse.

### **torsion**

En plan, tout bâtiment possède un centre de masse M (« centre de gravité » de toutes les masses) où les forces d'inertie mises en jeu agissent en cas de séisme et un centre de rigidité S (« centre de gravité » des rigidités de cadre et de flexion de tous les éléments porteurs verticaux résistant aux actions horizontales, dans la direction des deux axes principaux) également appelé centre de torsion. Si le centre de masse ne coïncide pas avec le centre de rigidité, le bâtiment soumis à un tremblement de terre subit une torsion en plan autour du centre de rigidité. Cette torsion génère d'importants déplacements relatifs entre le pied et la tête des colonnes les plus éloignées du centre de rigidité, qui peuvent mener à une rupture rapide de ces colonnes. C'est pourquoi il est impératif que le centre de rigidité se confonde avec le centre de masse, ou du moins lui soit proche, et que la résistance à la torsion soit suffisamment élevée. On remplit simul-

tanément ces deux conditions en prévoyant des contreventements symétriques disposés le long des façades du bâtiment, ou en tout cas avec un éloignement conséquent du centre de masse.

**valeur**

voir « bien digne de protection »

**valeur de maintenance**

Selon la norme SIA 269 [5], valeur matérielle et immatérielle d'un ouvrage selon le cahier technique SIA 2017 [37].

**valeur de témoignage**

Selon les Principes pour la conservation du patrimoine culturel bâti en Suisse [26], la valeur de témoignage d'un objet est la somme de plusieurs qualités, par exemple sa signification culturelle, sa destination historique, son lien avec des individus ou des collectivités, sa qualité constructive ou esthétique, sa position dans un ensemble bâti ou dans un paysage. Des objets d'un passé proche peuvent présenter une valeur patrimoniale équivalente à celle reconnue à des objets anciens. Les parties les plus anciennes d'un objet n'ont pas, a priori, plus de valeur que les parties récentes. Même les résultats de restaurations antérieures peuvent constituer des témoignages historiques importants ; ils doivent être reconnus comme tels et traités en conséquence. Une valeur patrimoniale peut être reconnue même à des objets qui n'ont pas été relevés dans des inventaires ou des travaux scientifiques. L'état de conservation n'est pas un facteur déterminant de la valeur patrimoniale que peut présenter un objet. La valeur de témoignage ne peut être restituée par un objet de remplacement, quelles que soient les qualités qui lui sont attribuées.

**vérification déterministe**

Vérification selon le concept des facteurs partiels.

Selon la norme SIA 269 [5], l'analyse de la structure porteuse et les vérifications doivent être effectuées par analogie avec les principes énoncés dans la norme SIA 260. Les vérifications de la sécurité structurale et de l'aptitude au service sont réalisées sur la base de valeurs de dimensionnement dont le format se fonde sur le concept des facteurs partiels. Les facteurs partiels traitent les incertitudes ou les variables qui entrent dans une situa-

tion de dimensionnement en tant que grandeurs exerçant une influence déterminante. Ils tiennent compte également des incertitudes de la relation entre les actions et leurs effets, c'est-à-dire des incertitudes du modèle de la structure.

**vérification probabiliste**

Selon la norme SIA 269 [5], si l'on dispose de distributions actualisées des paramètres de base, on peut vérifier la sécurité structurale à l'aide des méthodes de la théorie de la fiabilité, c'est-à-dire en tenant compte de manière explicite des distributions de probabilité des paramètres de base. Les conditions relatives sont expliquées dans l'annexe B de la norme.

**vulnérabilité**

Susceptibilité d'un ouvrage donné à subir des dommages en raison de ses caractéristiques en matière de conception, de mode de construction, de matériaux, etc.

**zone sismique**

Selon la norme SIA 261 [3], la Suisse est subdivisée géographiquement en cinq zones sismiques : Z1a, Z1b, Z2, Z3a et Z3b. L'aléa sismique est considéré comme constant à l'intérieur de chaque zone.

---

# Table des illustrations

Fig. 1 : Service sismologique suisse (SED), Earthquake Catalog of Switzerland 2009 (ECOS-09), <http://ecos09.seismo.ethz.ch/index.html> (août 2020).

Fig. 2 : (à gauche) [1], (à droite) <https://map.geo.admin.ch> > OFEV (sélectionner dans « Changer thème ») > Dangers naturels > Séismes > Zones sismiques SIA 261.

Fig. 3 : (les deux photos) Crealp, Sion.

Fig. 4 : [2].

Fig. 5 à 11 : Friederike Braune, OFEV.

Tab. 1 et 2 : Friederike Braune, OFEV.

Encadré 2 : Fig. E2.1 : (à gauche) [99], (au centre) <https://sfpublicpress.org/city-struggles-to-move-beyond-piecemeal-approach-to-earthquake-retrofitting> (août 2020), (à droite) Friederike Braune, OFEV.

Fig. E2.2 : (à gauche) [99], (au centre) [98], (à droite) Friederike Braune, OFEV.

Fig. E2.3 : (à gauche) [99], (au centre) Mission de reconnaissance de la SGEB 2012 (Blaise Duvernay), (à droite) Friederike Braune, OFEV.

Encadré 16 : Friederike Braune, OFEV.

Encadré 17 : Fig. E17.1 : (à gauche) [98], (au centre et à droite) Friederike Braune, OFEV.

Fig. E17.2 : (à gauche) [www.republik.ch/2018/08/28/sinnliche-erfahrung-im-oeffentlichen-raum](http://www.republik.ch/2018/08/28/sinnliche-erfahrung-im-oeffentlichen-raum) (août 2020), (au centre et à droite) Friederike Braune, OFEV.

Fig. E17.3 : (à gauche) [99], (au centre et à droite) Friederike Braune, OFEV.

Fig. E17.4 : (à gauche) [101], (au centre et à droite) Friederike Braune, OFEV.

Fig. E17.5 : [99].

Annexe : Fig. A1.1 à A1.4 : [51].

Fig. A1.5 à A1.7 : Friederike Braune, OFEV.

Fig. A1.8 : [51].

Fig. A2.1 à A2.3 : [62].

Fig. A2.4 : Friederike Braune, OFEV.

Fig. A3.1 à A3.3 : [65].