

32  
08

# > Confortement parasismique de constructions

*Stratégie et recueil d'exemples en Suisse*



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV



32  
—  
08

# > Confortement parasismique de constructions

*Stratégie et recueil d'exemples en Suisse*

## **Impressum**

### **Editeur**

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

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

### **Auteur**

Thomas Wenk, Wenk Erdbeningenieurwesen  
und Baudynamik GmbH, Zurich

### **Suivi OFEV**

Blaise Duvernay, chef de la Centrale de coordination de la  
Confédération pour la mitigation des séismes

### **Référence bibliographique**

Wenk T., 2008: Confortement parasismique de constructions.  
Stratégie et recueil d'exemples en Suisse. Connaissance de l'environnement n 0832. Office fédéral de l'environnement, Berne. 84 p.

### **Crédit photographique**

p. 27: P. Truffer, Viège  
p. 28 b. g.: A. Zachmann, Bâle  
p. 32 b., S. 33: R. Garcia-Vogel, Sion  
p. 35, p. 36 b., p. 37, p. 38 b., p. 39: R. Peruzzi, Monthey VS  
p. 40: T. Berset, Effretikon ZH  
p. 42 b.: O. Lateltin, Berne  
p. 43: E. Lateltin, Fribourg  
p. 44 b., S. 45: M. Karli, Berne  
p. 46 h.: Office des constructions et des bâtiments du canton de  
Berne  
p. 47 h. d.: A. Fabris, Lugano  
p. 48 b. d.: R. Schaub, Berne  
p. 52 b., p. 56 b., p. 57: P. Zwicky, Zurich  
p. 54 b., p. 55: T. Ulaga, Bâle  
p. 58 b., p. 59: F. Wolf, Zurich  
p. 60 b.g., p. 61: Ph. Irniger, Winterthour  
p. 62 b. g., S. 63: W. Borgogno, Balgach SG  
p. 64 b. d., S. 65: J. Gasser, Crans-Montana VS  
p. 67 b. g.: E. Molleyeres, Lausanne  
p. 69 h. d.: W. Clausen, Naters VS  
p. 74 b.: R. Zeller, Zurich  
p. 76: M. Weidmann, Coire  
toutes les autres photographies: T. Wenk, Zurich

### **Traduction**

Christian Marro, 1997 Nendaz

### **Téléchargement du fichier PDF**

[www.environnement-suisse.ch/uw-0832-f](http://www.environnement-suisse.ch/uw-0832-f)

(Il n'existe pas de version imprimée)

Code: UW-0832-F

Cette publication existe aussi en allemand: UW-0832-D.

## > Table des matières

|              |                                                                             |  |    |                                                                            |                                              |    |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------|--|----|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----|
| Abstracts    |                                                                             |  | 5  | 3.18                                                                       | Bâtiment administratif EMPA à Dübendorf (ZH) | 58 |
| Avant-propos |                                                                             |  | 7  | 3.19                                                                       | Immeuble avec centre commercial à Winterthur | 60 |
| Introduction |                                                                             |  | 9  | 3.20                                                                       | Gymnasium Friedberg à Gossau (SG)            | 62 |
|              |                                                                             |  |    | 3.21                                                                       | Immeuble résidentiel à Crans-Montana (VS)    | 64 |
|              |                                                                             |  |    | 3.22                                                                       | Hôtel à Bussigny (VD)                        | 66 |
| 1            | Problématique des ouvrages existants                                        |  | 10 | 3.23                                                                       | Pont de la route du Simplon A9 (VS)          | 68 |
| 1.1          | Sécurité parasismique des bâtiments existants en Suisse                     |  | 10 | 3.24                                                                       | Réservoir de gaz liquide à Viège (VS)        | 70 |
| 1.2          | Motifs d'une vérification de la sécurité parasismique                       |  | 12 | 3.25                                                                       | Petit immeuble à Kriessern (SG)              | 72 |
| 1.2.1        | Affectation des bâtiments et classes d'ouvrages                             |  | 12 | 3.26                                                                       | Bâtiment HPP de l'EPF Zurich                 | 73 |
| 1.2.2        | Echelonnement des priorités                                                 |  | 12 | 3.27                                                                       | Immeuble SIA à Zurich                        | 74 |
| 1.2.3        | Synergies exploitables lors des transformations et des assainissements      |  | 13 |                                                                            |                                              |    |
| 1.3          | Vérification de la sécurité parasismique selon le cahier technique SIA 2018 |  | 13 | Annexes                                                                    |                                              |    |
| 1.4          | Critères de décision pour un confortement parasismique                      |  | 14 | A1 Evolution des prescriptions parasismiques dans les normes               |                                              |    |
|              |                                                                             |  |    | A2 Coût des confortements parasismiques décrits dans le recueil d'exemples |                                              |    |
|              |                                                                             |  |    |                                                                            |                                              |    |
|              |                                                                             |  |    | Index                                                                      |                                              |    |
| 2            | Stratégies de confortement parasismique                                     |  | 17 | Abréviations                                                               |                                              |    |
| 2.1          | Stratégies recommandées                                                     |  | 17 | Glossaire                                                                  |                                              |    |
|              |                                                                             |  |    | Figures                                                                    |                                              |    |
|              |                                                                             |  |    | Tableaux                                                                   |                                              |    |
|              |                                                                             |  |    | Liste bibliographique                                                      |                                              |    |
| 3            | Recueil d'exemples en Suisse                                                |  | 22 |                                                                            |                                              |    |
| 3.1          | Bâtiment de la police cantonale à Sion (VS)                                 |  | 24 |                                                                            |                                              |    |
| 3.2          | Bâtiment du service du feu à Viège (VS)                                     |  | 26 |                                                                            |                                              |    |
| 3.3          | Caserne de pompiers à Bâle (BS)                                             |  | 28 |                                                                            |                                              |    |
| 3.4          | Sous-station à Bâle                                                         |  | 30 |                                                                            |                                              |    |
| 3.5          | Immeuble résidentiel et commercial à Sion (VS)                              |  | 32 |                                                                            |                                              |    |
| 3.6          | Bâtiment du CO à Monthey (VS)                                               |  | 34 |                                                                            |                                              |    |
| 3.7          | Bâtiment de l'ESC à Monthey (VS)                                            |  | 36 |                                                                            |                                              |    |
| 3.8          | Bâtiment administratif à St-Maurice (VS)                                    |  | 38 |                                                                            |                                              |    |
| 3.9          | Halle polyvalente à Oberdorf (NW)                                           |  | 40 |                                                                            |                                              |    |
| 3.10         | Immeuble avec centre commercial à Fribourg                                  |  | 42 |                                                                            |                                              |    |
| 3.11         | Bâtiment administratif à Berne                                              |  | 44 |                                                                            |                                              |    |
| 3.12         | Lycée Neufeld à Berne                                                       |  | 46 |                                                                            |                                              |    |
| 3.13         | Ecole à Ostermundigen (BE)                                                  |  | 48 |                                                                            |                                              |    |
| 3.14         | Clinique pédiatrique à Aarau                                                |  | 50 |                                                                            |                                              |    |
| 3.15         | Bâtiment HPH de l'EPF Zurich                                                |  | 52 |                                                                            |                                              |    |
| 3.16         | Ecole à Zurich                                                              |  | 54 |                                                                            |                                              |    |
| 3.17         | Studio de la radio à Zurich                                                 |  | 56 |                                                                            |                                              |    |



## > Abstracts

This publication provides a detailed insight in the problematic of the seismic upgrading of existing structures. The presentation of 24 examples of seismic upgrading projects in Switzerland illustrates the different possible strategies and gives suggestions and decision criteria on how to handle the complex problem of the seismic safety of existing structures. The publication is primarily aimed at structural engineers, but architects, building owners and homeowners will also find valuable information on the management of earthquake risk for existing structures.

Diese Publikation bietet einen vertieften Einblick in die Problematik der Erdbebenertüchtigung bestehender Bauwerke. Anhand von 24 Musterbeispielen ausgeführter Erdbebenertüchtigungsprojekte in der Schweiz werden mögliche Strategien anschaulich dargestellt sowie Anregungen und Entscheidungshilfen aufgezeigt, die zu einer optimalen Lösung dieser sehr anspruchsvollen Aufgabe führen sollen. Die Publikation richtet sich primär an in der Praxis tätige Bauingenieurinnen und -ingenieure, bietet aber auch für Architektinnen und Architekten, Bauherrinnen und -herren sowie Hauseigentümerinnen und -eigentümer wertvolle Informationen, wie mit dem Erdbebenrisiko bei bestehenden Bauwerken umgegangen werden kann.

Cette publication présente un aperçu détaillé de la problématique du confortement parasismique d'ouvrages existants. Les différentes stratégies possibles sont illustrées à l'aide de 24 exemples de projets réalisés en Suisse et des suggestions et des aides à la décision sont fournies pour savoir comment cette problématique très complexe peut être résolue de manière optimale. La publication s'adresse en premier lieu aux ingénieurs de la pratique, mais les architectes, les maîtres d'ouvrages et les propriétaires y trouvent également des informations utiles sur la gestion du risque sismique pour les ouvrages existants.

Questa pubblicazione offre un quadro dettagliato della problematica relativa al rafforzamento antisismico delle costruzioni esistenti. Con i suoi 24 esempi di progetti di rafforzamento antisismico realizzati in Svizzera, essa illustra le possibili strategie e fornisce consigli e supporti decisionali per la soluzione ottimale di questo problema complesso. La pubblicazione si rivolge in primo luogo agli ingegneri civili, ma anche gli architetti, i committenti e i proprietari di immobili possono trovarvi preziose informazioni su come gestire il rischio sismico delle costruzioni già esistenti.

### Keywords:

Earthquakes, mitigation, existing structures, seismic upgrading, collection of examples, strategy, Switzerland

### Stichwörter:

Erdbeben, Vorsorge, bestehende Bauwerke, Erdbebenertüchtigung, Beispielsammlung, Strategie, Schweiz

### Mots-clés:

tremblements de terre, mitigation, ouvrages existants, confortement parasismique, recueil d'exemples, stratégie, Suisse

### Parole chiave:

Terremoti, mitigazione, costruzioni esistenti, progetti di risanamento, raccolta di esempi, strategia, Svizzera



---

## > Avant-propos

Jusqu'en 2004, la Suisse ne disposait pas de critères applicables dans la pratique pour appréhender la sécurité parasismique des ouvrages existants, ni de définition de la proportionnalité des coûts de mesures de confortement parasismique. Cette lacune a été comblée avec l'introduction du nouveau cahier technique SIA 2018 «Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants», élaboré avec le soutien de la «Centrale de coordination de la Confédération pour la mitigation des séismes» de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Depuis la parution de ce document, la prise en compte de la problématique de la sécurité et du confortement parasismique des ouvrages existants s'est notamment améliorée.

Depuis décembre 2000, soit depuis l'entrée en vigueur du programme de mesures fédérales pour la mitigation des séismes, la Confédération vérifie la sécurité parasismique des ouvrages existants relevant de sa compétence. Ceux dont la tenue au séisme est insuffisante font systématiquement l'objet de mesures en tenant compte du principe de la proportionnalité des coûts. Dans la plupart des cantons, la vérification des ouvrages publics existants a été institutionnalisée et est réalisée. La Confédération et près de la moitié des cantons ont déjà procédé à des confortements parasismiques de leur propres constructions, souvent dans le cadre de transformations ou d'assainissements.

A l'heure actuelle, seuls quelques cantons possèdent des lois ou ordonnances qui exigent explicitement une construction parasismique pour les ouvrages privés. Dans la plupart des cas, la décision de vérifier un bâtiment existant et de procéder éventuellement à un confortement parasismique relève de l'unique responsabilité du maître d'ouvrage et du concepteur du projet. En comparaison avec les bâtiments publics, un confortement parasismique est à l'heure actuelle encore rarement réalisé sur des constructions privées.

Avec son programme de mesures, la Confédération entend jouer un rôle de modèle et de promoteur dans le domaine de la mitigation des séismes. Elle soutient les cantons, les spécialistes de la construction, les assurances et les particuliers à l'aide de documents de base méthodologiques et de son expertise. Par la publication de ce document, l'OFEV souhaite transmettre les expériences et les enseignements acquis dans le confortement parasismique d'ouvrages existants en Suisse. Le public cible est en premier lieu les spécialistes de la construction dans le domaine de la conception et de la réalisation, ainsi que les maîtres d'ouvrages et les propriétaires d'immeubles.

Andreas Götz  
Sous-directeur  
Office fédéral de l'environnement (OFEV)



---

## > Introduction

Cette publication s'adresse en premier lieu aux ingénieurs civils exerçant une activité pratique. Elle présente les stratégies à disposition pour réaliser un confortement parasismique à l'aide d'exemples de projets réalisés en Suisse. Des suggestions et des aides à la décision indiquent en outre la meilleure manière d'aborder cette problématique très complexe. Les architectes, maîtres d'ouvrages et propriétaires d'immeubles y trouvent également des informations utiles concernant la gestion du risque sismique pour les ouvrages existants.

Le premier chapitre est consacré à la manière d'approcher les ouvrages existants. Il introduit la problématique de la sécurité parasismique de ces ouvrages et les motifs de leur vérification. Sont également présentés les critères de décision pour des mesures de confortement basés sur l'appréciation des risques d'après le cahier technique SIA 2018 «Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants».

Le deuxième chapitre aborde les différentes stratégies pour le confortement parasismique de constructions existantes. Le choix d'une stratégie appropriée en fonction de diverses contraintes y est présenté.

Le troisième et principal chapitre de cette publication comprend un recueil de 24 exemples d'ouvrages en Suisse dont la sécurité parasismique a été récemment améliorée par des mesures de confortement. Chacun d'entre eux est décrit brièvement sur une double page à l'aide de photos et de croquis présentant les principaux aspects liés à la conception et la construction des mesures de confortement. *Les points faibles concernant la tenue au séisme dans l'état initial, le concept du confortement parasismique réalisé, certaines particularités de l'intervention* et son contexte sont également décrits. Chaque exemple est conclu par un tableau regroupant quelques caractéristiques, telles que l'année de construction, l'affectation et la valeur du bâtiment, la classe d'ouvrage, la zone d'aléa sismique, la classe de sol de fondation, le facteur de confort et le coût de l'intervention.

Les exemples sélectionnés portent sur des bâtiments très divers, afin de traiter un éventail aussi large que possible d'affectations, de modes de construction, de sols de fondation, de zones d'aléa sismique et de types de confortement parasismique. Outre les bâtiments, un exemple traite d'un pont routier et un autre d'un réservoir de gaz liquide, afin de fournir un aperçu des aspects particuliers liés à d'autres types d'ouvrages. Le recueil d'exemples est complété par trois bâtiments qui ne nécessitent pas de confortement parasismique – un résultat fréquent lors de la vérification de la sécurité parasismique d'ouvrages existants en Suisse.

Des informations complémentaires sur l'évolution historique des dispositions parasismiques figurant dans les normes et sur le coût des mesures de confortement décrites dans le recueil d'exemples sont fournies en annexe.

# 1 > Problématique des ouvrages existants

*Ces dernières décennies, les exigences des dispositions parasismiques des normes de construction ont été considérablement renforcées. Comme elles sont généralement peu respectées, la question de la sécurité parasismique se pose non seulement pour les anciennes constructions, mais aussi pour les bâtiments récents, qu'ils soient privés ou publics. Pour établir clairement si un confortement parasismique est nécessaire, il y a donc lieu de vérifier la tenue au séisme des bâtiments existants de manière systématique.*

## 1.1 Sécurité parasismique des bâtiments existants en Suisse

Les premières dispositions parasismiques ont été introduites en 1970 dans les normes sur les structures porteuses de la Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA (norme SIA 160). Les exigences ont été accrues dans les générations de normes suivantes, de 1989 et 2003, pour tenir compte des nouvelles connaissances en génie parasismique et en sismologie. La figure 1 illustre ainsi l'évolution depuis 1970 de la valeur des forces de dimensionnement horizontales dues au séisme et au vent pour un immeuble de quatre étages en maçonnerie. Une description détaillée de l'évolution historique des dispositions parasismiques des normes est présentée à l'annexe A1.

**Figure 1 > Evolution des forces de dimensionnement horizontales agissant sur un immeuble typique**

*Grandeur relative des forces de dimensionnement horizontales agissant dans le sens longitudinal d'un immeuble de quatre étages en maçonnerie bâti sur le Plateau (zone sismique Z1). Les forces horizontales de dimensionnement déterminantes sont celles dues au vent avant 1970 et celles dues au séisme après 1970.*

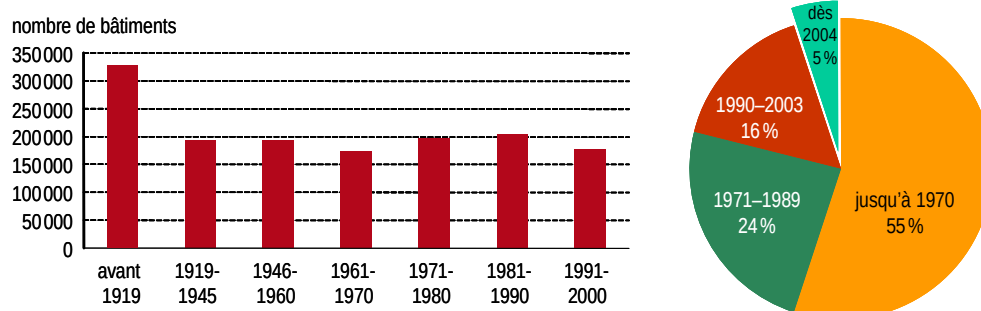


Le parc immobilier suisse a été très peu renouvelé depuis 1970. La figure 2 présente sa distribution en fonction des générations de normes parasismiques sur la base des données du recensement fédéral de la population de 2000 (OFS, 2004). 55 % des bâtiments ont été construits avant l'entrée en vigueur des premières dispositions parasismiques de la norme SIA 160 (1970); 24 % datent de 1971 à 1989; 21 % seulement ont été bâtis depuis 1990, selon des normes parasismiques modernes du point de vue actuel, et à peine 5 % d'entre eux ont été conçus conformément à la génération de normes de 2003 en vigueur à ce jour. Il faut cependant admettre que même pour les

bâtiments récents, les prescriptions parasismiques n'ont souvent pas été respectées, en raison principalement d'une sous-estimation du risque sismique et d'une obligation légale insuffisante.

**Figure 2 > Parc immobilier de Suisse**

*Distribution du parc immobilier en fonction de la période de construction (à gauche) et de la génération de normes SIA (à droite).*



Les anciens bâtiments non conçus pour résister aux séismes offrent cependant un certain niveau de protection contre les tremblements de terre, grâce à certaines caractéristiques liées à leur mode de construction et au fait qu'ils ont été dimensionnés en tenant compte du vent. Mais il faut partir du principe que de nombreux ouvrages – notamment ceux qui présentent des points faibles typiques vis-à-vis des séismes – ne satisfont pas aux exigences des normes actuelles. Les **points faibles** pénalisant le plus le comportement d'un bâtiment soumis à un séisme et les plus fréquemment observés en Suisse sont les suivants (figure 3):

> **Etage flexible dans le plan horizontal ou «soft storey»**

Des contreventements massifs, tels que parois, présents dans les étages supérieurs sont souvent absents au rez-de-chaussée. Les colonnes présentent au rez-de chaussée sont insuffisantes pour reprendre les sollicitations sismiques.

> **Contreventement asymétrique**

En cas de séisme, si le système de contreventement est asymétrique dans le plan horizontal, le bâtiment subit une torsion importante, ce qui peut entraîner prématurément sa ruine.

> **Construction en maçonnerie sans parois de contreventement en béton armé**

La maçonnerie, simple à mettre en œuvre et possédant des caractéristiques physiques intéressantes pour la construction, est très répandue dans la construction des habitations. La maçonnerie non armée résiste cependant mal aux sollicitations sismiques en raison de sa faible résistance à la traction et de son mode de rupture fragile.

**Figure 3 > Points faibles typiques vis-à-vis du comportement sismique**

*Bâtiment présentant un rez-de-chaussée flexible dans le plan horizontal (exemple 5: immeuble résidentiel et commercial à Sion).*



*Bâtiment avec un contreventement asymétrique (exemple 15: bâtiment HPH de l'EPF Zurich).*



*Bâtiment avec une structure porteuse en maçonnerie non armée (exemple 7: école à Monthey).*



## 1.2

**Motifs d'une vérification de la sécurité parasismique**

Les exigences parasismiques des normes SIA sur les structures porteuses ayant été accrues à plusieurs reprises ces dernières décennies, les bâtiments existants devraient être vérifiés indépendamment des assainissements et des transformations planifiés. Pour les grands parcs immobiliers, il est recommandé d'échelonner les priorités en tenant compte des risques.

## 1.2.1

**Affectation des bâtiments et classes d'ouvrages**

D'après la norme SIA 261 «Actions sur les structures porteuses» (SIA 261, 2003), les bâtiments doivent être assignés à l'une des trois **classes d'ouvrages (CO)** définies. Le niveau de protection parasismique requis est fixé par cette attribution, qui tient compte de l'occupation moyenne, du potentiel de dommages, du risque d'atteinte à l'environnement et de l'importance de l'ouvrage pour la maîtrise d'une catastrophe sismique. Les habitations et les bâtiments commerciaux normaux sont assignés à la CO I. Les bâtiments fréquentés par un grand nombre de personnes sont classés dans la CO II. Les bâtiments faisant partie des infrastructures ayant une fonction vitale («lifeline»), tels que bâtiments du service du feu, garages d'ambulances ou hôpitaux accueillant des urgences, sont rangés dans la CO III, la classe la plus élevée. La figure 4 présente des bâtiments caractéristiques des trois classes d'ouvrages.

## 1.2.2

**Echelonnement des priorités**

Les bâtiments les plus importants, appartenant à la CO II et surtout à la CO III, devraient être systématiquement vérifiés quant à leur sécurité parasismique et renforcés si nécessaire et ceci indépendamment du plan d'entretien général à long terme. Ainsi, les ouvrages avec les risques potentiels les plus élevés seraient recensés et traités méthodi-

quement. Il est recommandé d'appliquer à cet effet une procédure par étapes, avec des coûts et un degré d'approfondissement croissants à chaque étape (OFEG, 2005; OFEG, 2006). Ceci permet à la fois d'identifier les bâtiments critiques en utilisant des filtres appropriés et d'inventorier systématiquement la sécurité parasismique du parc immobilier considéré. L'urgence et l'ampleur des vérifications et des confortements peuvent ainsi être planifiées en tenant compte du niveau de risque. Il est recommandé de commencer les contrôles systématiques avec les bâtiments qui se trouvent dans les zones les plus menacées (zones sismiques Z2, Z3a et Z3b selon la norme SIA 261; voir annexe A1).

### 1.2.3 Synergies exploitables lors des transformations et des assainissements

Il faut s'efforcer de réaliser les confortements parasismiques en même temps que des transformations et des assainissements, afin d'exploiter les synergies possibles. Ceci permet normalement d'abaisser considérablement le coût des mesures de confortement parasismiques. Lorsqu'un bâtiment doit faire l'objet de travaux, tels que réfections ou transformations, la vérification devrait inclure l'aspect sismique, afin de pouvoir intégrer suffisamment à l'avance les mesures nécessaires dans la planification du projet.

**Figure 4** > Illustration des trois classes d'ouvrages selon la norme SIA 261

Classe d'ouvrages I (exemple 25: petit immeuble à Kriessern SG).

Classe d'ouvrage II (exemple 13: école à Ostermundigen BE).

Classe d'ouvrages III (exemple 3: caserne de pompiers à Bâle).



## 1.3

### Vérification de la sécurité parasismique selon le cahier technique SIA 2018

Pour juger si un bâtiment existant est conforme aux dispositions parasismiques actuelles des normes SIA sur les structures porteuses, il faut l'évaluer suivant le cahier technique SIA 2018 «Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants» (2004). Si cet ouvrage ne répond pas complètement aux normes actuelles, un confortement parasismique n'est pas forcément obligatoire. Il faut déterminer de cas en cas si le coût des interventions nécessaires est *proportionné* ou *exigible* en regard de la diminution du risque attendue. Le cahier technique SIA 2018 (2004) fournit à cet effet

les règles nécessaires pour apprécier la sécurité parasismique et le besoin de mesures en fonction des risques encourus.

La principale information obtenue au terme de la première étape de la vérification, dite relevé de l'état, est le facteur de conformité  $\alpha_{eff}$ . Il indique numériquement dans quelle mesure le bâtiment considéré satisfait aux exigences parasismiques imposées aux nouvelles constructions selon les normes SIA sur les structures porteuses en vigueur. Pour le calculer, on compare la résistance ou la capacité de déformation selon les normes  $R_d$ , avec les effets des actions sismiques selon les normes  $E_d$ .

$$\alpha_{eff} = R_d / E_d$$

Si le facteur de conformité  $\alpha_{eff}$  d'un bâtiment existant a une valeur supérieure ou égale à un ( $\alpha_{eff} \geq 1,0$  ou 100 %), cette construction satisfait entièrement aux exigences posées aux nouveaux bâtiments. Ce cas ne pose dès lors plus de problème, l'état actuel étant jugé suffisamment sûr vis-à-vis des séismes.

Le facteur de conformité  $\alpha_{eff}$  est cependant généralement inférieur à un pour les bâtiments existants, ce qui signifie qu'ils ne satisfont pas entièrement aux exigences imposées aux nouveaux bâtiments. Il faut dès lors établir si un confortement parasismique est nécessaire, en appliquant des critères de décision basés sur le risque, comme expliqué au chapitre 1.4. La valeur déterminante pour l'appréciation globale de la tenue au séisme d'un bâtiment est le plus petit facteur de conformité  $\alpha_{eff}$  obtenu pour tous les éléments structuraux vérifiés.

1.4

## Critères de décision pour un confortement parasismique

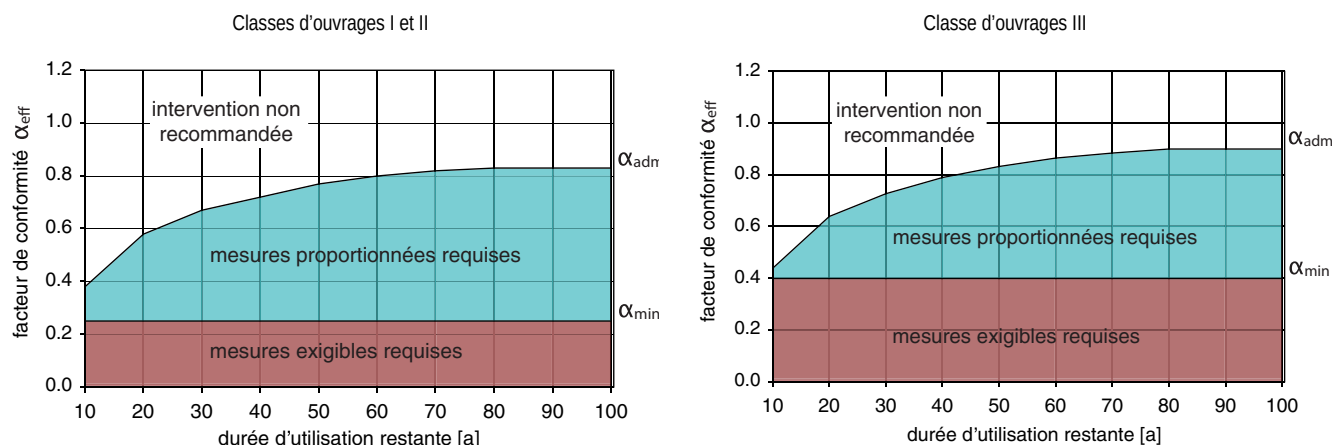
Le principe appliqué aux bâtiments existants consiste à atteindre le même objectif de protection que celui qui est imposé aux nouveaux bâtiments selon les normes, c'est-à-dire à obtenir un facteur de conformité  $\alpha_{eff}$  supérieur ou égal à un. Si les interventions nécessaires pour atteindre cet état ont un coût disproportionné, le cahier technique SIA 2018 (2004) préconise de se limiter à des mesures qui restent *proportionnelles* ou *exigibles*.

Lors de la vérification d'un ouvrage existant, une *durée d'utilisation restante* est fixée sur la base de considérations économiques et d'exploitation. Elle correspond à la période durant laquelle la sécurité structurale et l'aptitude au service de la construction doivent être garanties. La durée d'utilisation restante est typiquement de 20 à 50 ans pour les bâtiments. Une nouvelle vérification doit être effectuée à son terme.

En ce qui concerne la nécessité de procéder à un confortement parasismique, trois cas sont distingués selon la valeur du facteur de conformité  $\alpha_{eff}$ , la classe d'ouvrages à laquelle appartient le bâtiment et la durée d'utilisation restante fixée (figure 5):

**Figure 5 > Recommandation d'intervention parasismique selon le cahier technique SIA 2018**

Nécessité de conforter un ouvrage de la classe CO I ou CO II (à gauche) et CO III (à droite), en fonction du facteur de conformité  $\alpha_{eff}$  et de la durée d'utilisation restante, selon le cahier technique SIA 2018.



1. Lorsque le facteur de conformité  $\alpha_{eff}$  d'un ouvrage de la CO I ou II est inférieur à la valeur limite inférieure  $\alpha_{min} = 0,25$ , le risque individuel est jugé inacceptable et des mesures de confortement parasismique sont nécessaires si leur coût est *exigible*.  
Les coûts de sauvetage qui ne dépassent pas 100 millions de francs par vie humaine sauvée sont jugés *exigibles*. S'il n'est pas possible d'atteindre un risque individuel acceptable sans dépasser le coût exigible, le risque sera limité en intervenant sur l'exploitation.  
Pour les ouvrages de la CO III, la valeur limite inférieure est placée plus haut, avec  $\alpha_{min} = 0,40$ , afin de garantir un fonctionnement minimal du bâtiment dans le cadre de la gestion des catastrophes.
2. Si le facteur de conformité  $\alpha_{eff}$  tombe entre les valeurs limites  $\alpha_{min}$  et  $\alpha_{adm}$ , le risque pour les personnes sera réduit par des mesures de confortement parasismique si leur coût est *proportionné*.  
Les coûts de sauvetage qui ne dépassent pas 10 millions de francs par vie humaine sauvée sont jugés *proportionnés*.
3. Si le facteur de conformité  $\alpha_{eff}$  dépasse la valeur limite supérieure  $\alpha_{adm}$ , l'état actuel du bâtiment est jugé acceptable.

La proportionnalité et l'exigibilité d'un confortement parasismique sont appréciées, selon le cahier technique SIA 2018 (2004), en comparant le coût et l'efficacité du confortement en regard de la sécurité des personnes. Concernant le coût, le montant des interventions est exprimé en termes de *coûts de sauvetage*. Concernant l'efficacité, la diminution du risque pour les personnes est exprimée par le nombre de vies sauvées. Sont considérées comme *proportionnées* les interventions pour lesquelles les coûts de sauvetage ne dépassent pas 10 millions de francs et comme *exigibles* celles pour lesquelles les coûts de sauvetage ne dépassent pas 100 millions de francs par vie humaine sauvée.

La délimitation entre la proportionnalité et l'exigibilité d'une intervention se fonde sur le risque individuel, c'est-à-dire sur la probabilité qu'une personne séjournant en

---

permanence dans un bâtiment donné perde la vie lors d'un tremblement de terre. Le risque individuel est acceptable si la probabilité de décès ne dépasse pas  $10^{-5}$  par an. C'est le cas lorsque le facteur de conformité  $\alpha_{eff}$  est supérieur à 0,25.

La diminution du risque est calculée en tenant compte de l'augmentation du facteur de conformité obtenue grâce à l'intervention considérée et à l'occupation du bâtiment. L'occupation correspond au nombre de personnes séjournant en moyenne dans le bâtiment pendant une année. Il arrive fréquemment que plusieurs variantes de confortement parasismique aient un coût proportionné ou exigible. Dans ce cas, on mettra en œuvre celle qui permet d'atteindre le facteur de conformité le plus élevé.

La documentation SIA D 0211 (2005) et les directives de l'OFEG (2005) expliquent en détail l'appréciation de la sécurité parasismique en fonction des risques, telle qu'elle est formalisée dans le cahier technique SIA 2018 (2004). Pour les services de la construction et des immeubles de la Confédération, l'application du cahier technique SIA 2018 et des autres prescriptions parasismiques des normes de construction de la SIA est réglée par des directives du Département fédéral des finances (DFF 2008). Il est recommandé aux autres acteurs de la construction de prendre en compte ces directives.

## 2 > Stratégies de confortement parasismique

*Le confortement parasismique d'un ouvrage a pour but d'améliorer sa tenue au séisme. Différentes stratégies sont applicables à cet effet. Le choix des mesures de confortement optimales implique de bien comprendre le comportement dynamique de l'ouvrage et de coordonner le confortement avec son affectation future.*

Le confortement d'un bâtiment face aux actions dynamiques des tremblements de terre présente certaines particularités par rapport aux méthodes appliquées lors des travaux usuels de renforcement pour des charges statiques. Toute intervention parasismique devrait tenir compte le mieux possible de l'interdépendance entre les trois propriétés des structures porteuses que sont la *rigidité*, la *résistance ultime* et la *capacité de déformation*. Il faut éviter de trop axer les mesures de confortement sur une seule propriété sans tenir compte des répercussions négatives sur les autres.

Le but principal d'un confortement parasismique est d'éliminer le point faible qui pénalise le plus le comportement sismique. 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 mesures de confortement parasismique doivent également tenir compte de l'affectation future du bâtiment. Dans certains cas, les nouveaux éléments structuraux nécessaires peuvent même améliorer l'utilisation de celui-ci.

### 2.1 Stratégies recommandées

A l'exception de la première, qui consiste à améliorer la régularité du système porteur pour les charges horizontales, les différentes stratégies de confortement parasismique exposés dans ce chapitre se limitent pour des raisons de simplicité à la modification d'une seule propriété de la structure porteuse (résistance ultime, ductilité, rigidité, amortissement et masse). En pratique, il n'est cependant généralement pas possible de modifier une seule propriété structurale et la solution retenue combine souvent plusieurs stratégies.

Le comportement de la structure porteuse avant et après confortement est illustré à l'aide de courbes de capacité. Ces courbes décrivent de façon simplifiée l'évolution de la force de remplacement horizontale en fonction du déplacement horizontal du bâtiment, ce qui permet de comparer la capacité de déformation du bâtiment avec la demande en déformation due à l'action sismique. La documentation SIA D 0211 (2005) fournit des explications détaillées à ce sujet.

### Stratégie 1: améliorer la régularité

Tout confortement parasismique 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 structuraux seront conçus de manière à améliorer la régularité de la structure porteuse.

Un exemple simple consiste à re fermer le joint de dilatation entre les deux ailes d'un bâtiment, initialement séparées et pourvues chacune d'un système de contreventement fortement asymétrique. Ceci permet de former un système porteur global contreventé symétriquement, comme on l'a fait au lycée Neufeld à Berne (figure 6; exemple 12). Cette stratégie a également été choisie pour le bâtiment HPH de l'EPF Zurich (exemple 15), où l'insertion d'un nouveau treillis en acier au rez-de-chaussée a permis d'améliorer considérablement la régularité en plan et en élévation.

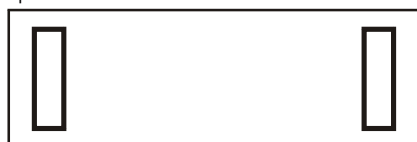
**Figure 6 > Améliorer la régularité**

*La fermeture du joint de dilatation a permis d'obtenir, à partir de deux ailes contreventées asymétriquement (avant), un bâtiment contreventé symétriquement par deux noyaux en béton armé en façade, comme le montre le schéma en plan de gauche.*

avant



après



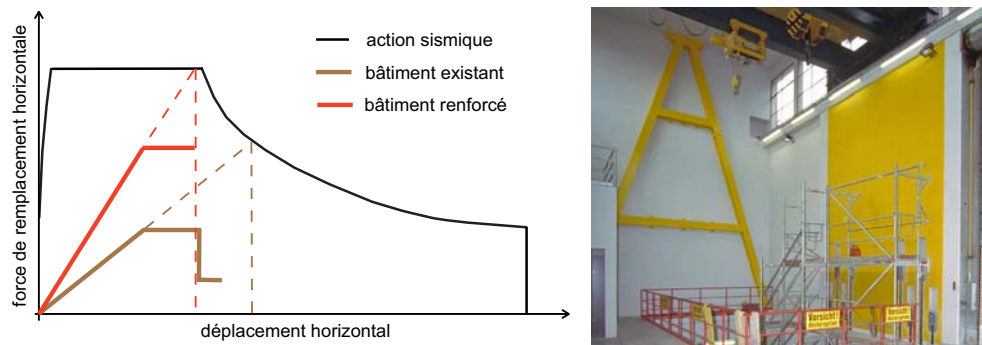
### Stratégie 2: renforcer

La stratégie la plus classique consiste à renforcer la structure porteuse en doublant des éléments structuraux existants ou en y ajoutant de nouveaux, tels que parois en béton armé ou treillis en acier. Cela permet d'augmenter la résistance ultime et la rigidité pratiquement sans modifier la capacité de déformation. L'accroissement de la rigidité permet de ramener la demande en déformation due à l'action sismique à la capacité de déformation existante.

Le comportement force-déplacement de la stratégie «renforcer» est représenté schématiquement à la figure 7, au moyen des courbes de capacité du bâtiment à l'état initial et du bâtiment renforcé. Cette stratégie a été la plus appliquée dans les cas décrits dans le recueil du chapitre 3. Un exemple en est la sous-station des services industriels de Bâle (IWB), renforcée par le contreventement jaune et par la paroi jaune en béton armé (figure 7).

**Figure 7 > Courbes de capacité pour la stratégie «renforcer»**

*Courbes de capacité du bâtiment existant et du bâtiment renforcé (force de remplacement horizontale en fonction du déplacement horizontal), comparées aux exigences dues à l'action sismique (demande en déplacement).*

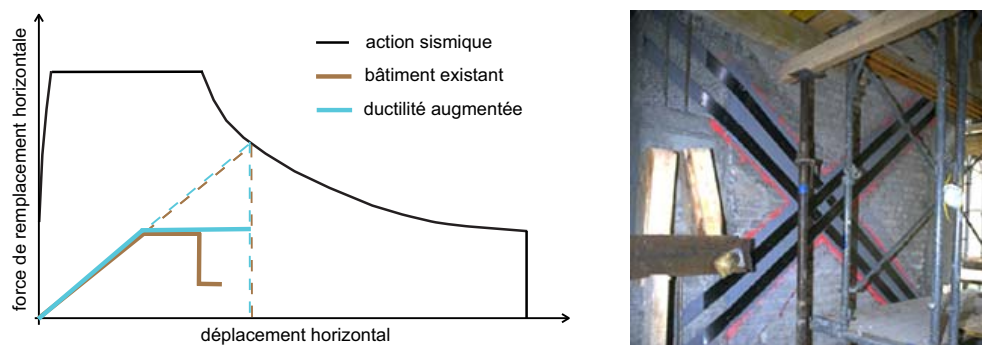


### Stratégie 3: augmenter la ductilité

La ductilité est la capacité de déformation plastique au-delà de la limite d'écoulement, ou limite de capacité de déformation élastique. Les éléments structuraux avec un comportement fragile, comme les parois en maçonnerie, peuvent être rendus beaucoup plus ductiles en y collant des lamelles. Ce procédé accroît la capacité de déformation globale (élastique et plastique), tandis que la résistance ultime et la rigidité n'augmentent que très peu (figure 8).

**Figure 8 > Courbes de capacité pour la stratégie «augmenter la ductilité»**

*L'augmentation de la ductilité accroît la capacité de déformation plastique, rallongeant ainsi la partie horizontale de la courbe de capacité, afin d'accommoder la demande en déplacement due à l'action sismique.*



Cette stratégie n'a pas été mise en œuvre en tant que stratégie principale dans les cas décrits dans le recueil du chapitre 3. La figure 8 présente à titre d'exemple une paroi en maçonnerie d'un centre commercial zurichois qui a été confortée par l'application de lamelles en fibres de carbone.

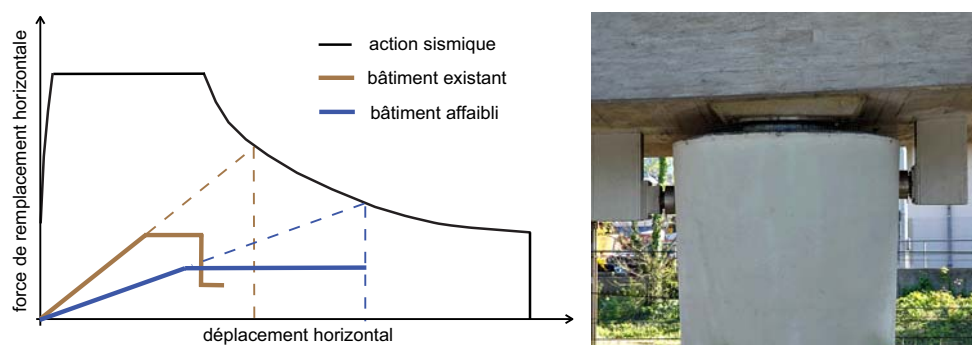
### Stratégie 4: affaiblir

L'affaiblissement de la structure porteuse par diminution de la rigidité induit simultanément une réduction des forces et une augmentation des déplacements dus aux séismes. Une application pratique de cette stratégie a consisté à remplacer l'appui rigide par un appui glissant sur un pilier soutenant un pont à poutre continue (figure 9).

L'isolation sismique par insertion d'appuis en caoutchouc armé stratifié, très souples horizontalement et à haut pouvoir d'amortissement est une mesure typique de cette stratégie de confortement. Grâce aux propriétés amortissantes de ces appuis spéciaux, les actions sismiques sont également réduites selon les principes de la stratégie 5. Un autre mode d'affaiblissement consiste à retirer des contreventements ou des équipements très rigides afin que la structure porteuse puisse mieux se déformer horizontalement.

**Figure 9 > Courbes de capacité pour la stratégie «affaiblir»**

*L'affaiblissement d'un ouvrage diminue sa rigidité et ainsi l'inclinaison du début de la courbe de capacité. Ce type de confortement réduit les forces, mais augmente les déplacements. La photo de droite présente à titre d'exemple des butons assurant l'assise longitudinale glissante sur un pilier de pont d'autoroute bâlois qui comportait à l'origine un appui fixe sur une culée.*



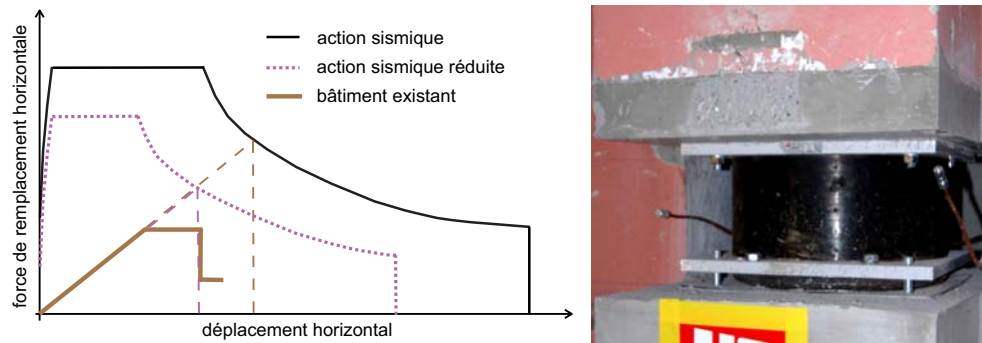
Exemples pour la stratégie «affaiblir»: la caserne des pompiers de Bâle (exemple 3), le Brunnenbrücke de l'A9 (exemple 23) et le réservoir de gaz liquide à Viège (exemple 24).

### Stratégie 5: réduire les actions sismiques par amortissement

L'augmentation de l'amortissement génère une réduction de l'action sismique (figure 10). Ce résultat peut être obtenu en ajoutant des éléments amortisseurs. Lorsque l'isolation sismique est assurée par des appuis sismiques souples horizontalement et à haut pouvoir amortisseur, la diminution de la rigidité (stratégie 4) s'accompagne d'une augmentation de l'amortissement, comme ce fut le cas dans les trois exemples précités (caserne des pompiers de Bâle, Brunnenbrücke et réservoir de gaz liquide).

**Figure 10 > Courbes de capacité pour la stratégie «réduire les actions sismiques par amortissement»**

En augmentant l'amortissement, on peut réduire les actions sismiques jusqu'à ce que la capacité de déformation du bâtiment existant soit suffisante. A droite, un appui en caoutchouc à haut pouvoir amortisseur contribuant à l'isolation sismique de la caserne des pompiers de Bâle.



### Stratégie 6: diminuer la masse

La diminution de la masse d'un bâtiment réduit les forces d'inertie et, ainsi, les sollicitations sismiques. Techniquement, ce résultat peut être obtenu en ôtant des combles ou des étages. Les restrictions en matière d'utilisation que cela implique sont cependant généralement inacceptables.

De manière générale, on préférera des constructions légères aux constructions lourdes, notamment lorsqu'on remplace des éléments non porteurs.

### Stratégie 7: changer d'affectation

Le facteur de conformité souhaité peut également être atteint autrement que par des mesures constructives, par exemple en déclassant un bâtiment dans une classe d'ouvrages inférieure. Un hôpital accueillant des urgences de la CO III sera par exemple reconverti en bâtiment de lits (CO II) ou en bâtiment d'habitation (CO I). La réduction du facteur d'importance lié à la classe d'ouvrage permet ainsi une réduction des forces sismiques à prendre en compte pour la vérification de l'ouvrage et contribue ainsi à augmenter le facteur de conformité.

## 3 > Recueil d'exemples en Suisse

*Ce recueil comprend des exemples de confortement parasismique impliquant des ouvrages très variés situés dans toute la Suisse. Les projets décrits ont été choisis en fonction de leur représentativité et de leur caractère exemplaire. La plupart d'entre eux concernent des bâtiments publics ce qui est représentatif des activités actuelles en matière de prévention parasismique en Suisse.*

L'emplacement des exemples décrits dans les pages suivantes est indiqué sur la carte des zones d'aléa sismique de la figure 11. Les ouvrages sont classés selon leur affectation et la zone d'aléa sismique, en commençant par les bâtiments de la CO III situés dans la zone d'aléa élevé Z3b, pour finir par ceux de la CO I qui se trouvent en zone Z1. Les derniers exemples concernent deux ouvrages spéciaux – un pont routier et un réservoir de gaz liquide – ainsi que trois bâtiments dont l'état peut être accepté sans besoin de confortement parasismique.

Chaque exemple comprend une description du bâtiment avant l'intervention, de ses points faibles en matière de comportement sismique et de la stratégie de confortement parasismique retenue. Un tableau de synthèse présente également les caractéristiques principales de l'ouvrage et de son confortement.

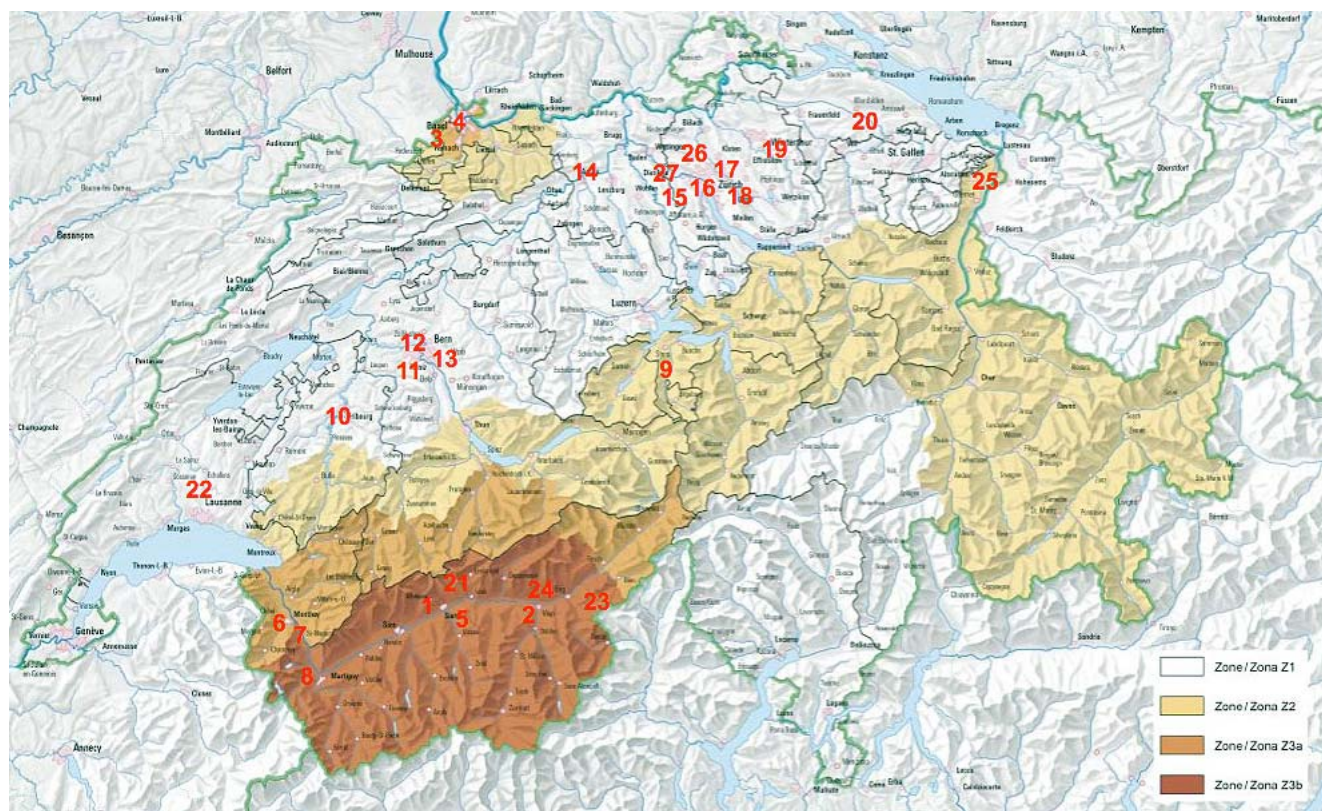
Les chapitres suivants fournissent des explications sur les notions techniques figurant dans les tableaux de synthèse:

- > Classe de sol de fondation: annexe A1
- > Classe d'ouvrage: chapitre 1.2
- > Zone d'aléa sismique: annexe A1
- > Facteur de conformité (état initial)  $\alpha_{eff}$ : chapitre 1.3
- > Facteur de conformité (nouveau)  $\alpha_{int}$ : chapitre 1.3
- > Occupation (PB): chapitre 1.4
- > Valeur du bâtiment: valeur d'assurance au terme du confortement

**Figure 11 > Emplacement des exemples**

*Emplacement des exemples sur la carte des zones d'aléa sismique de la norme SIA 261.*

*Projets de confortement parasismique: cas 1 à 24; vérifications non suivies d'intervention: cas 25 à 27.*



- |                                                  |                                                 |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1 Bâtiment de la police cantonale à Sion (VS)    | 2 Bâtiment du service du feu à Viège (VS)       |
| 3 Caserne de pompiers à Bâle                     | 4 Sous-station à Bâle                           |
| 5 Immeuble résidentiel et commercial à Sion (VS) | 6 Bâtiment du CO à Monthey (VS)                 |
| 7 Bâtiment de l'ESC à Monthey (VS)               | 8 Bâtiment administratif à St-Maurice (VS)      |
| 9 Halle polyvalente à Oberdorf (NW)              | 10 Immeuble avec centre commercial à Fribourg   |
| 11 Bâtiment administratif à Berne                | 12 Lycée Neufeld à Berne                        |
| 13 Ecole à Ostermundigen (BE)                    | 14 Clinique pédiatrique à Aarau                 |
| 15 Bâtiment HPH de l'EPF Zurich                  | 16 Ecole à Zurich                               |
| 17 Studio de la radio à Zurich                   | 18 Bâtiment administratif EMPA à Dübendorf (ZH) |
| 19 Immeuble avec centre commercial à Winterthur  | 20 Gymnasium Friedberg à Gossau (SG)            |
| 21 Immeuble résidentiel à Crans-Montana (VS)     | 22 Hôtel à Bussigny (VD)                        |
| 23 Pont de la route du Simplon A9 (VS)           | 24 Réservoir de gaz liquide à Viège (VS)        |
| 25 Petit immeuble à Kriessern (SG)               | 26 Bâtiment HPP de l'EPF Zurich                 |
| 27 Immeuble SIA à Zurich                         |                                                 |

### 3.1 Bâtiment de la police cantonale à Sion (VS)

#### Etat initial

Le bâtiment de la police cantonale à Sion est une construction à ossature en béton armé de dix étages qui date de 1962. Le deuxième étage abrite la centrale de commandement des services cantonaux d'urgence. Le sous-sol est aménagé en installation de la protection civile.

#### Points faibles

Le bâtiment a été construit sans tenir compte de l'action sismique. Son contreventement est surtout insuffisant dans la direction longitudinale, stabilisée par deux noyaux d'ascenseurs et d'escalier en béton armé en position asymétrique. Dans la direction transversale, des parois en béton armé supplémentaires sont présentes en façade. Les éléments non porteurs, notamment les parois en maçonnerie et les plafonds suspendus, ne répondent pas aux exigences de sécurité parasismique dans le secteur de la centrale de commandement (classe d'ouvrage III) (Koller, 2000).

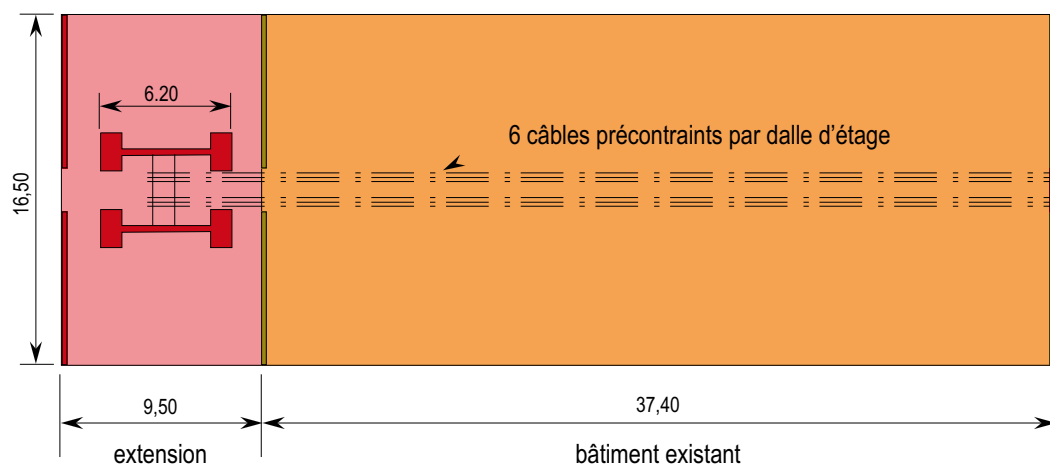
#### Confortement parasismique

Le bâtiment existant est stabilisé horizontalement par une nouvelle extension afin de résister aux sollicitations sismiques. Le choix de parois en béton armé en forme de «I» dans cette nouvelle extension permet de diminuer la sollicitation en torsion affectant l'ensemble du système. Avec cette forme particulière, la rigidité transversale des nouvelles parois est largement inférieure à la rigidité longitudinale. L'ancien bâtiment est relié longitudinalement à la nouvelle extension par des câbles précontraints au niveau de chaque dalle d'étage.



Vue de la façade longitudinale: les quatre premiers rangs de fenêtres correspondent à la nouvelle extension.

Dans le secteur de la centrale de commandement, les parois en maçonnerie non armée sont recouvertes de feuilles de polyester, fixées pour éviter tout déversement hors plan et séparées du système porteur par des joints. Elles sont ainsi à même de suivre les déformations du bâtiment pendant un tremble-



Vue en plan du bâtiment originel (à droite) et de la nouvelle extension (à gauche), qui est contreventée par deux parois porteuses en béton armé en forme de «I».

ment de terre sans subir de dommages. Les plafonds suspendus et d’autres équipements sont également sécurisés.

Particularités

La stratégie de confortement parasismique retenue n’entrave presque pas l’exploitation du bâtiment pendant la durée des travaux. La mise en œuvre des mesures parasismiques dans la nouvelle extension est moins onéreuse qu’un confortement portant exclusivement sur l’ancien bâtiment.

Contexte

La sécurité parasismique du bâtiment a été vérifiée à l’occasion d’une analyse des risques pour les bâtiments du réseau vital valaisan («lifeline»).



Façade latérale du bâtiment existant, avec les ancrages des câbles précontraints visibles de l’extérieur à la hauteur de chaque dalle d’étage.



Vue de l’ancrage des six câbles précontraints à une poutre transversale reliant les deux nouvelles parois en béton armé en forme de «I» situées dans la nouvelle aile.

Caractéristiques

|                                      |                                                         |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1962                                                    |
| Affectation du bâtiment              | Centrale de commandement de services d'urgence          |
| Occupation                           | PB = 40                                                 |
| Valeur du bâtiment                   | 11 millions de francs                                   |
| Classe d'ouvrage                     | CO III                                                  |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z3b                                                |
| Classe de sol de fondation           | Etude dynamique du sol du site                          |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,2$ (selon SIA 160)                    |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$ (selon SIA 160)                    |
| Stratégie de confortement            | Renforcer, améliorer la ductilité                       |
| Exécution du confortement            | 1998                                                    |
| Coût du confortement                 | 3 millions de francs, soit 29% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | Résonance SA, CERT SA, P. Tissières                     |
| Architectes                          | A. Bornet Fournier, P. Cagna                            |

### 3.2 Bâtiment du service du feu à Viège (VS)



#### Etat initial

Le bâtiment du service du feu de Viège a été construit en 1974. Il héberge des locaux de la protection civile au sous-sol. La structure porteuse du bâtiment principal est formée de cadres en béton armé remplis de maçonnerie. Une extension du bâtiment comprenant des parois porteuses en béton armé prolonge celui-ci vers le nord.

#### Points faibles

La tenue au séisme du bâtiment est principalement affectée par la paroi élancée en maçonnerie non armée située sur la

façade côté sud. Le point critique réside dans les sollicitations parallèles et perpendiculaires au plan de cette paroi. Le contreventement du bâtiment dans la direction longitudinale est assuré par la nouvelle extension au nord.

#### Confortement parasismique

La paroi pignon critique située au sud est renforcée sur sa face interne par huit lamelles précontraintes en fibres de carbone collées verticalement et ancrées dans les dalles en béton armé du rez-de-chaussée et du toit. Grâce à la précontrainte appliquée, cette paroi est à même de reprendre les sollicitations



*Façade longitudinale arrière du bâtiment du service du feu avec les parois stabilisatrices en béton armé à l'extrémité gauche.*



*Paroi en maçonnerie non armée située au sud du bâtiment qui a été renforcée avec des lamelles verticales en fibres de carbone.*

sismiques en ne subissant que très peu de déformations horizontales, ce qui est également favorable pour la garantie de l'état de service de ce local du feu de la classe d'ouvrage CO III. De plus, les lamelles précontraintes en fibres de carbone empêchent la paroi de se déverser hors de son plan.

Particularités

Les lamelles précontraintes en fibres de carbone peuvent être appliquées sans entraver l'exploitation du bâtiment.

Contexte

Le confortement parasismique du bâtiment a été réalisé dans le cadre de son entretien général.



Deux lamelles précontraintes en fibres de carbone appliquées sur la face interne de la paroi pignon (Truffer et al., 2004).



Les lamelles en fibres de carbone sont précontraintes à partir du toit (Truffer et al., 2004).

Caractéristiques

|                                      |                                                               |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1974                                                          |
| Affectation du bâtiment              | Service du feu                                                |
| Occupation                           | PB = 2                                                        |
| Valeur du bâtiment                   | 2 millions de francs                                          |
| Classe d'ouvrage                     | CO III                                                        |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z3b                                                      |
| Classe de sol de fondation           | Semi-compact (SIA 160)                                        |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,4$ (selon SIA 160)                          |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$ (selon SIA 160)                          |
| Stratégie de confortement            | Renforcer                                                     |
| Exécution du confortement            | 2002                                                          |
| Coût du confortement                 | 35000 francs, soit 1,8% de la valeur du bâtiment              |
| Ingénieurs                           | BIAG Beratende Ingenieure AG, Viège<br>Stresshead AG, Lucerne |

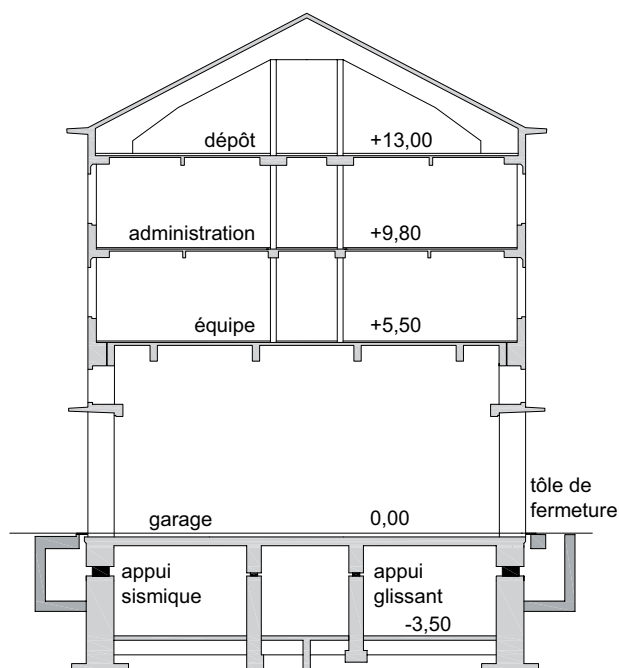
### 3.3 Caserne de pompiers à Bâle (BS)



#### Etat initial

Le bâtiment principal des pompiers professionnels de Bâle-Ville, le Lützelhof, est une construction en béton armé datant de la Deuxième Guerre mondiale. Tout le rez-de-chaussée de

44 m x 15 m est occupé par un garage comprenant onze portes de chaque côté. Il est surmonté par trois étages hébergeant des salles de séjour et des chambres pour les pompiers, ainsi que des locaux administratifs et de stockage.



Coupe en travers du bâtiment avec les nouveaux appuis sismiques au sous-sol (Bachmann, Zachmann 2008).



Application d'un joint de dilatation tout autour du bâtiment, afin qu'il puisse osciller librement dans le plan horizontal sur ses nouveaux appuis sismiques.

### Points faibles

Le garage du rez-de-chaussée, avec ses colonnes relativement élancées entre les portes, est un cas typique d'étage flexible («soft storey»). Les colonnes céderaient déjà sous l'effet d'un tremblement de terre modeste. Les parois et les dalles des étages supérieurs ne sont pas non plus à même de reprendre les sollicitations sismiques selon les normes (Bachmann, 2007a).

### Confortement parasismique

Le confortement parasismique du bâtiment consiste en une isolation sismique. Les étages sont séparés du sous-sol par une coupe horizontale dans les éléments porteurs sous la dalle du rez-de-chaussée et posés sur des appuis sismiques. Un espace libre est créé tout autour du bâtiment pour qu'il puisse se déplacer librement dans le plan horizontal. A cet effet, les bâtiments voisins sont raccourcis de 15 à 18 cm du côté des murs d'extrémité.

### Particularités

Le choix de l'isolation sismique ne restreint pas l'usage du garage et limite au maximum l'interruption d'exploitation lors de l'intervention. Si l'on avait opté pour un renforcement traditionnel du rez-de-chaussée au moyen de parois en béton armé, il aurait fallu supprimer deux portes de chaque côté au



*Insertion d'appuis glissants sous l'espace intérieur dépourvu de colonnes.*

rez-de-chaussée et renforcer les étages supérieurs à grand frais.

### Contexte

Le confortement parasismique de la caserne de pompiers a été réalisé à la suite d'une analyse des risques pour les bâtiments du réseau vital bâlois («lifeline»).

### Caractéristiques

|                                      |                                                         |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1942                                                    |
| Affectation du bâtiment              | Caserne de pompiers                                     |
| Occupation                           | PB = 60                                                 |
| Valeur du bâtiment                   | 13 millions de francs                                   |
| Classe d'ouvrage                     | CO III                                                  |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z3a                                                |
| Classe de sol de fondation           | Etude dynamique du sol du site                          |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,2$                                    |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$                                    |
| Stratégie de confortement            | Affaiblir, réduire les actions sismiques                |
| Exécution du confortement            | 2007                                                    |
| Coût du confortement                 | 3 millions de francs, soit 23% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | ZPF Ingenieure AG                                       |
| Expert                               | Prof. dr h.c. Hugo Bachmann                             |



*Insertion d'un appui sismique en caoutchouc sous une colonne au niveau de la paroi extérieure du sous-sol.*

### 3.4 Sous-station à Bâle

#### Etat initial

La sous-station de Wasgenring des Services industriels de Bâle (IWB) comprend une halle de montage et des locaux souterrains hauts de trois à quatre étages abritant des installations électriques. Le bâtiment est classé parmi les ouvrages vitaux pour l'approvisionnement en électricité («lifeline», CO III) en cas de catastrophe.

#### Points faibles

Si les niveaux souterrains massifs, comprenant des parois et des dalles en béton armé, présentent une tenue au séisme suffisante, la halle de montage ne satisfait pas aux exigences. Sa structure porteuse se compose de cadres en béton faiblement armés remplis de maçonnerie. Ceux-ci ne seraient pas à même de reprendre les sollicitations sismiques provenant de la toiture massive, tout particulièrement au niveau des ouvertures pour les fenêtres.

#### Confortement parasismique

Les quatre façades sont renforcées par un contreventement en acier sur le côté ouest et par des parois en béton armé sur les trois autres côtés pour reprendre les forces sismiques induites par la masse de la toiture de la halle. Les nouvelles parois sont



*Vue extérieure de la halle de montage.*

ancrées dans les murs en béton armé des niveaux souterrains par des lamelles précontraintes en fibres de carbone. L'aspect déterminant du dimensionnement est l'inclinaison relative entre niveaux subie par les parois en maçonnerie non armée, qui ne doit pas dépasser 5‰.



*Nouveau contreventement dans la façade ouest et nouvelle paroi porteuse en béton armé dans la façade nord de la halle de montage.*



*Nouvelle paroi porteuse en béton armé sur la face interne de la façade est de la halle de montage.*

Particularités

Sous la façade ouest, le sous-sol doit être laissé libre sur presque toute la largeur pour permettre de monter et de démonter de grands transformateurs. Cette façade est donc renforcée par un contreventement en acier en forme de «A». Les forces de réaction verticales au niveau du rez-de-chaussée sont transmises dans les niveaux souterrains par des lamelles en acier, tandis que les efforts tranchants sont repris par la dalle.

Contexte

Le confortement parasismique de la sous-station a été réalisé lors d’une rénovation de l’installation. Il fait partie du pro-



Nouveau treillis métallique en forme de A au rez-de chaussée de la façade ouest et nouvelles lamelles en acier au sous-sol.



Insertion des lamelles en fibres de carbone pour ancrer les nouvelles parois en béton armé.

gramme de confortements parasismiques des IWB visant à garantir l’approvisionnement à l’issue d’un séisme (Koller 2008).

Caractéristiques

|                                      |                                                          |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1964                                                     |
| Affectation du bâtiment              | Sous-station électrique                                  |
| Occupation                           | PB = 0                                                   |
| Valeur du bâtiment                   | 12 millions de francs                                    |
| Classe d'ouvrage                     | CO III                                                   |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z3a                                                 |
| Classe de sol de fondation           | C                                                        |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,3$                                     |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{nt} = 1,0$                                      |
| Stratégie de confortement            | Renforcer, augmenter la ductilité                        |
| Exécution du confortement            | 2006                                                     |
| Coût du confortement                 | 0,65 million de francs, soit 5% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | Résonance SA, Colenco AG, Stresshead AG                  |

### 3.5 Immeuble résidentiel et commercial à Sion (VS)

#### Etat initial

Cet immeuble résidentiel et commercial est une construction mixte en acier-béton de quatre étages bâtie à Sion en 1965. Le rez-de-chaussée héberge un centre commercial et le premier étage un service médical ambulatoire. En plan, les étages ont une forme en «L». Le système porteur se compose de colonnes en acier reliées par des dalles mixtes et de quelques parois en béton armé. Les deux niveaux souterrains sont en béton armé.

#### Points faibles

Le système porteur est très irrégulier, tant en plan qu'en élévation. Le rez-de-chaussée comprend très peu d'éléments de contreventement afin de laisser place à une grande surface de vente. Sous l'effet de sollicitations sismiques, il se comporte manifestement comme un étage flexible («soft storey»). Il est également sujet à une torsion importante.

#### Confortement parasismique

Le bâtiment est renforcé par un noyau en béton armé et par une nouvelle paroi en béton armé, continus sur tous les étages. Le rez-de-chaussée est en plus contreventé par des cadres massifs en béton armé. Les nouveaux éléments sont ancrés dans le sous-sol.

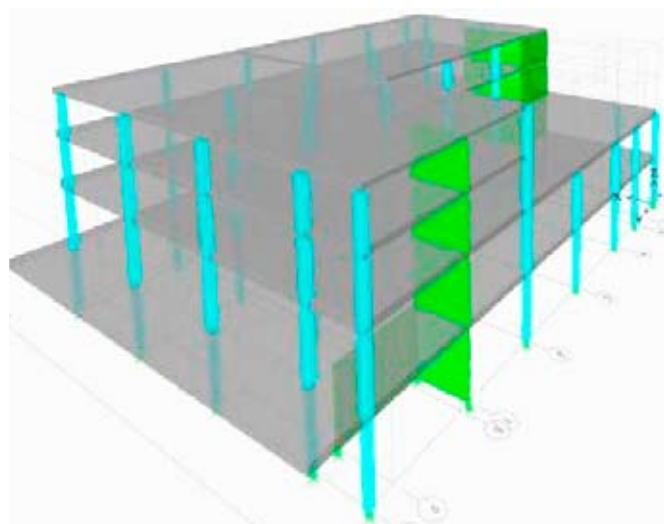


#### Particularités

Pour entraver au minimum la liberté d'exploitation du centre commercial situé au rez-de-chaussée, ce niveau est renforcé



Nouveau cadre en béton armé au rez-de-chaussée.



Modèle par éléments finis du bâtiment, avec les nouvelles parois en béton armé en vert (Garcia-Vogel, 2005).

par de nouveaux cadres en béton armé plutôt que par des parois. Les nouveaux éléments sont en béton autocompactant, ce qui permet de l'introduire plus aisément dans les éléments délimités par des dalles existantes.

Contexte

Le confortement parasismique a été réalisé en même temps que l'assainissement général de l'immeuble en raison de l'installation d'un service médical ambulatoire à un des étages.



Mise en place de l'armature des nouvelles parois en béton armé au rez-de chaussée.



Armature de liaison entre les nouvelles parois en béton armé et les dalles existantes (Garcia-Vogel, 2005).

Caractéristiques

|                                      |                                                            |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1965                                                       |
| Affectation du bâtiment              | Habitation, centre commercial, service médical ambulatoire |
| Occupation                           | PB = 85                                                    |
| Valeur du bâtiment                   | 4,5 millions de francs                                     |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                                      |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z3b                                                   |
| Classe de sol de fondation           | C                                                          |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,2$                                       |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$                                       |
| Stratégie de confortement            | Renforcer, améliorer la régularité                         |
| Exécution du confortement            | 2005                                                       |
| Coût du confortement                 | 0,13 million de francs, soit 3% de la valeur du bâtiment   |
| Ingénieurs                           | SD Ingénierie Dénériaz et Pralong Sion SA                  |
| Architecte                           | Grégoire Comina, Sion                                      |

### 3.6 Bâtiment du CO à Monthey (VS)

#### Etat initial

Le bâtiment du Cycle d'orientation (CO) de Monthey est une construction en acier datant de 1971. Le système porteur se compose de cadres en acier dans les deux directions. Les planchers, constitués de dalles préfabriquées en béton armé, reposent sur des poutres secondaires en acier. Le bâtiment initialement de quatre étages a une longueur de 39 m et une largeur de 34 m. Le sous-sol est en béton armé.

#### Points faibles

La construction en acier correspond au système CROCS, élaboré en Suisse romande dans les années 1960 par le «Centre de rationalisation et d'organisation des constructions scolaires». Les nœuds des cadres en acier sont simplement boulonnés, le talon des poutres étant relié aux colonnes par deux boulons en acier. Ainsi, les nœuds ne peuvent reprendre qu'une petite partie des sollicitations sismiques. L'effet de diaphragme des dalles préfabriquées est insuffisant.

#### Confortement parasismique

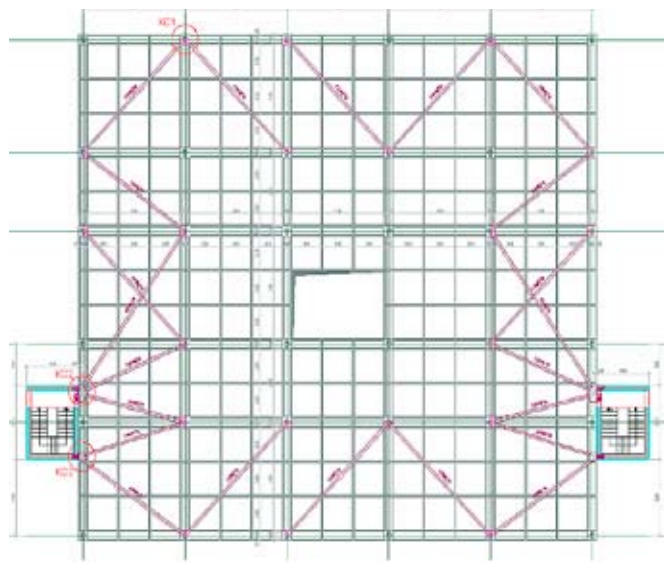
Le bâtiment est pourvu d'un nouveau système de contreventement horizontal, comprenant deux cages d'escalier extérieures en béton armé continues sur tous les étages. Les planchers sont renforcés par de nouveaux treillis en acier qui assurent la transmission des efforts horizontaux dans les cages d'escalier.



Vue de la nouvelle cage d'escalier côté sud.



Vue de la nouvelle cage d'escalier côté nord.



Vue en plan du bâtiment avec les deux nouvelles cages d'escalier extérieures en béton armé (en vert) et le nouveau treillis horizontal en acier inséré dans les planchers (en rouge).

### Particularités

Les nouvelles prescriptions de protection incendie auraient de toute façon nécessité la construction de deux nouvelles cages d'escalier. La combinaison des interventions parasismiques et anti-incendie au niveau de ces deux cages en béton armé permet de profiter des synergies.

### Contexte

Le confortement parasismique du bâtiment a été réalisé conjointement avec un assainissement général et le rehaussement d'un étage.



*Construction d'une cage d'escalier et rehaussement du bâtiment (côté sud).*



*Armature au sous-sol et fondation d'une nouvelle cage d'escalier.*

### Caractéristiques

|                                      |                                                            |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1971                                                       |
| Affectation du bâtiment              | Ecole                                                      |
| Occupation                           | PB = 76                                                    |
| Valeur du bâtiment                   | 24 millions de francs                                      |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                                      |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z3a                                                   |
| Classe de sol de fondation           | Microzonage de Monthey, zone «bord de la plaine»           |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,16$                                      |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$                                       |
| Stratégie de confortement            | Renforcer, améliorer la ductilité                          |
| Exécution du confortement            | 2007                                                       |
| Coût du confortement                 | 1,85 million de francs, soit 7,7% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | A. Schmid + R. Peruzzi, Kurmann & Cretton SA               |
| Architectes                          | PAI Planification, Lausanne                                |

### 3.7 Bâtiment de l'ESC à Monthey (VS)

#### Etat initial

L'ancienne aile du bâtiment abritant actuellement l'Ecole supérieure de commerce (ESC) de Monthey a été construite en 1908. Le bâtiment a été rallongé en 1950, ce qui a plus que doublé son volume. Cette construction massive en maçonnerie de quatre étages comprend un niveau de sous-sol. Les planchers sont en bois dans l'ancienne aile et en béton armé dans la nouvelle.

#### Points faibles

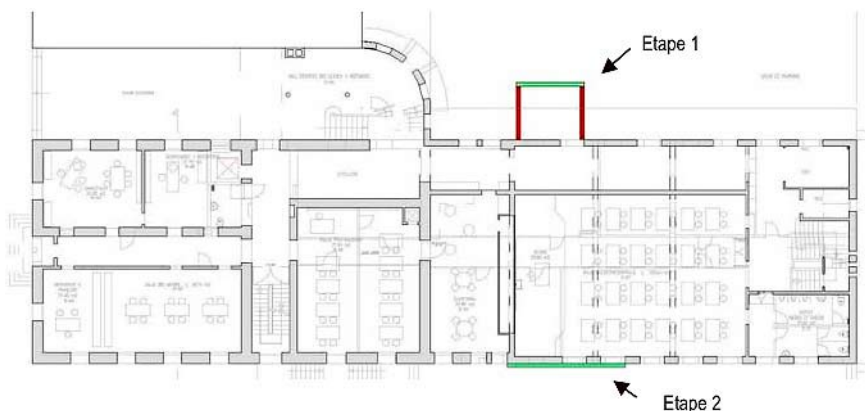
Les parois en maçonnerie à une peau de la nouvelle aile sont relativement minces et constituent le point faible principal concernant le comportement sismique. Le contreventement dans la direction transversale est particulièrement insuffisant en raison de l'absence de parois intermédiaires. L'ancienne aile comprend en revanche de nombreuses parois épaisses en maçonnerie, mais les ancrages entre les façades et les planchers en bois y constituent un point faible.



*Vue de la façade longitudinale arrière avec nouveau noyau d'ascenseur en béton armé.*



*Schéma de la façade longitudinale arrière, avec le nouveau noyau d'ascenseur en béton armé au milieu de la nouvelle aile (étape 1).*



*Vue en plan de l'ancienne aile (à gauche) et de la nouvelle (à droite), avec le nouveau noyau d'ascenseur en béton armé (étape 1) et les nouvelles parois en béton armé (étape 2) (Peruzzi & Schmid, 2007).*

### Confortement parasismique

La nouvelle aile est renforcée sur les deux façades longitudinales par des parois en béton armé continues sur toute la hauteur du bâtiment. Dans une première étape, un noyau d'ascenseur est construit à l'arrière de la bâtisse, principalement pour assurer son contreventement en direction transversale. La fondation de ce noyau est assurée par douze micropieux pour qu'il soit à même d'absorber le moment renversant. Dans une deuxième étape, la façade avant est complétée par une paroi en béton armé rectangulaire qui rigidifie le bâtiment en direction longitudinale en combinaison avec le noyau d'ascenseur. En outre, des éléments de liaison sont appliqués entre les façades et les planchers en bois de l'ancienne aile.

### Particularités

Les interventions doivent se cantonner à l'extérieur du bâtiment pour ne pas interrompre l'activité scolaire. Le nouveau noyau en béton armé peut accueillir des locaux de nettoyage en plus de l'ascenseur.



Réalisation de la fondation du nouveau noyau d'ascenseur en béton armé avec des micropieux.



Ancrage du noyau d'ascenseur dans les dalles en béton armé existantes au moyen de barres Swiss-Gewi et d'une armature de répartition collée.

### Contexte

Le confortement parasismique a été réalisé à l'occasion de transformations dues à la nouvelle affectation du bâtiment comme école cantonale.

### Caractéristiques

|                                      |                                                                              |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1903, 1908 et 1950                                                           |
| Affectation du bâtiment              | Ecole                                                                        |
| Occupation                           | PB = 32                                                                      |
| Valeur du bâtiment                   | 4,9 millions de francs                                                       |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                                                        |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z3a                                                                     |
| Classe de sol de fondation           | Microzonage de Monthey, zone «bord de la plaine»                             |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,15$                                                        |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$ (nouvelle aile) et $\alpha_{int} = 0,8$ (ancienne aile) |
| Stratégie de confortement            | Renforcer                                                                    |
| Exécution du confortement            | 2004 à 2007                                                                  |
| Coût du confortement                 | 0,54 million de francs, soit 11 % de la valeur du bâtiment                   |
| Ingénieurs                           | R. Peruzzi, Kurmann & Cretton SA                                             |
| Architecte                           | J.-M. Zimmermann                                                             |

### 3.8 Bâtiment administratif à St-Maurice (VS)

#### Etat initial

Ce bâtiment à deux niveaux a été construit à St-Maurice dans les années 1950. Sa structure porteuse est formée de parois en maçonnerie dans la direction transversale et de cadres en béton armé partiellement remplis de maçonnerie dans la direction longitudinale. Les planchers et les parois extérieures du sous-sol sont en béton armé. Le bâtiment est long de 20,5 m et large de 10,0 m.

#### Points faibles

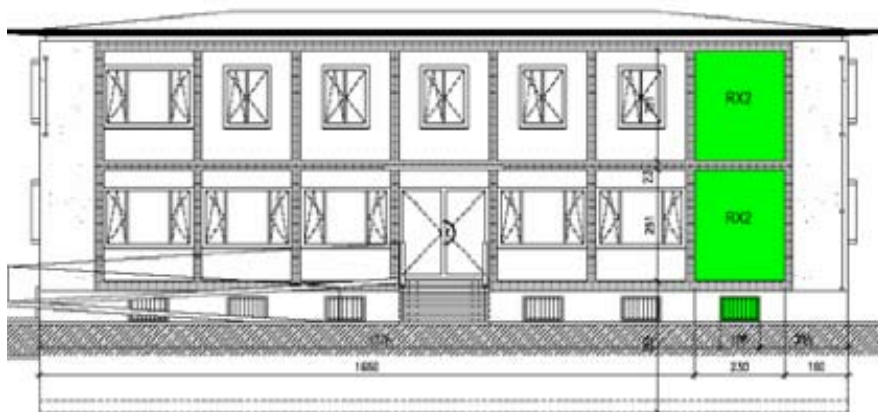
Ce sont principalement les façades longitudinales qui posent problème. Au rez-de-chaussée, les remplissages de maçonnerie raccourcissent la hauteur d'oscillation libre des colonnes de béton armé pour la limiter à moins d'une demi-hauteur d'étage. Il en résulte un danger de rupture fragile par cisaillement même lors de séismes de faible intensité.



*Vue des façade avant avec la nouvelle paroi en béton armé au niveau du cadre à l'extrême droite.*



*Vue de la façade arrière avec la nouvelle paroi en béton armé au niveau du cadre intermédiaire à droite.*



*Vue en élévation avec une des deux nouvelles parois en béton armé (en vert) intégrée dans la façade longitudinale avant.*

### Confortement parasismique

Dans chacune des deux façades longitudinales, un segment de cadre est fermé par une paroi élancée en béton armé. Les deux nouvelles parois, continues sur les deux niveaux, sont ancrées aux parois extérieures du rez-de-chaussée. Il en résulte un nouveau système de contreventement symétrique dans la direction longitudinale.

### Particularités

En direction transversale, le bâtiment présentait avant les travaux déjà un facteur de conformité de 0,7 grâce à ses grandes parois extérieures en maçonnerie. Compte tenu du critère de proportionnalité selon le cahier technique SIA 2018, aucun confortement parasismique n'est réalisé en direction transversale en raison de la faible occupation du bâtiment ( $PB = 2,2$ ).



Armature d'une nouvelle paroi en béton armé.



Vue en plan avec les deux nouvelles parois en béton armé (en vert) intégrées dans les façades longitudinales.

### Contexte

Le confortement parasismique du bâtiment a été réalisé dans le cadre d'un assainissement général en raison de sa nouvelle affectation comme centre de formation.

### Caractéristiques

|                                      |                                                  |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1955                                             |
| Affectation du bâtiment              | Centre de formation                              |
| Occupation                           | $PB = 2,2$                                       |
| Valeur du bâtiment                   | 1,4 millions de francs                           |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                            |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z3a                                         |
| Classe de sol de fondation           | C                                                |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,17$                            |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{nt} = 0,7$                              |
| Stratégie de confortement            | Renforcer, améliorer la ductilité                |
| Exécution du confortement            | 2005                                             |
| Coût du confortement                 | 50000 francs, soit 3,5% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | R. Peruzzi, Kurmann & Cretton SA                 |
| Architecte                           | P.-P. Bourban                                    |

### 3.9 Halle polyvalente à Oberdorf (NW)

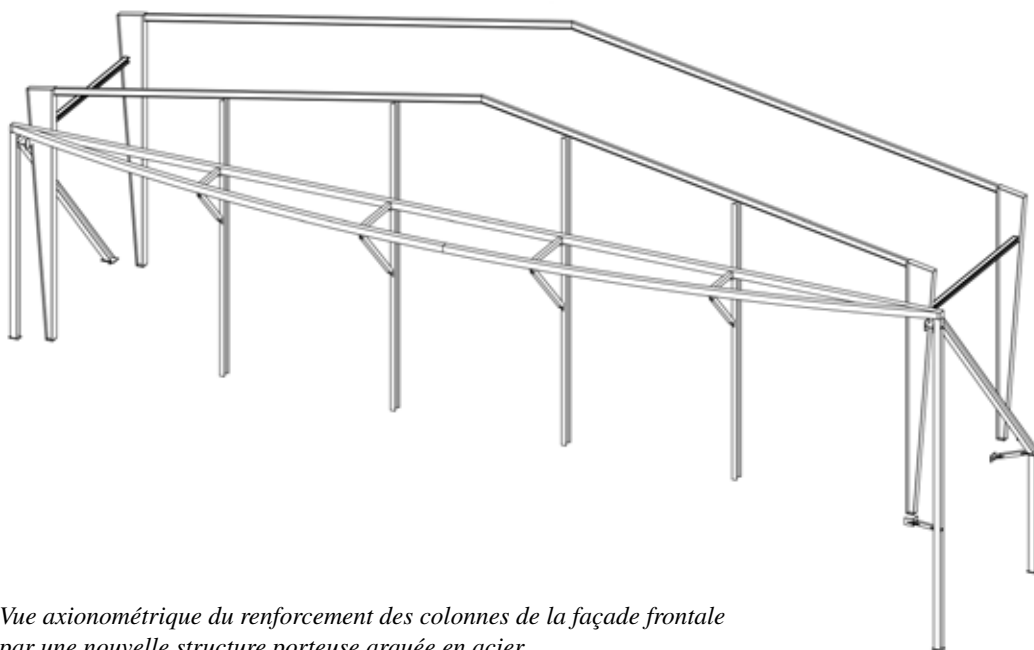


#### Etat initial

La halle polyvalente d'armasuisse Immobilier de la place d'armes d'Oberdorf est un ouvrage standard construit au début des années 1970. L'étage occupé par la halle, long de 50 m et large de 27 m, ouvert sur un seul côté, est fondé sur un sous-sol en béton armé aménagé dans un talus. Le système porteur se compose de cadres biarticulés en profilés IPE, continus sur toute la longueur de l'ouvrage et rigidifiés dans la direction longitudinale par des remplissages de maçonnerie.

#### Points faibles

Le problème principal est posé par les sollicitations dues au vent et aux séismes dans la direction longitudinale. Le contreventement de toiture de la halle présente des points faibles imputables à la conception de ses nœuds et le contreventement horizontal des cadres biarticulés est insuffisant dans la direction longitudinale de la halle. Dans la direction transversale, la résistance ultime des solides cadres en acier de 10 m de hauteur est suffisante en cas de vent et de séisme. Ces cadres restent dans le domaine élastique lorsqu'ils sont sou-



*Vue axonométrique du renforcement des colonnes de la façade frontale par une nouvelle structure porteuse arquée en acier.*

mis aux sollicitations sismiques correspondant à la zone sismique Z2.

Confortement parasismique

Le confortement mis en place est surtout lié aux sollicitations dues au vent dans la direction longitudinale. Les colonnes et les cadres biarticulés des façades latérales sont étayés horizontalement par l'entremise d'un nouveau treillis arqué en acier fixé dans leur partie supérieure. La force longitudinale en résultant dans le plan horizontal est transmise des extrémités de la poutre au sous-sol par une solide diagonale.

Particularités

Ce type de confortement modulaire a été développé pour traiter une trentaine de halles polyvalentes du même type. Le module «vent» comprend une structure porteuse en acier destinée à renforcer les deux façades d'extrémité. Le module «séisme» est également monté dans les zones les plus sismiques, comme à Oberdorf (NW), qui se trouve en zone d'aléa Z2. Dans ce cas, les deux treillis d'extrémité en acier sont reliés par des barres longitudinales longeant le bord du toit sur les deux côtés. Le surcoût occasionné par le module «séisme» se monte à 15% du coût du module «vent».

Contexte

Le confortement parasismique de la halle a été réalisé à la suite d'une vérification systématique de la sécurité structurale des halles standard par armasuisse Immobilier.



Colonne de bord du treillis arqué au niveau du sous-sol.



Renforcement sous forme de treillis arqué des façades d'extrémité.

Caractéristiques

|                                      |                                                  |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1973                                             |
| Affectation du bâtiment              | Halle de sport                                   |
| Occupation                           | PB = 5                                           |
| Valeur du bâtiment                   | 5 millions de francs                             |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                            |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z2                                          |
| Classe de sol de fondation           | C                                                |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,1$                             |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$                             |
| Stratégie de confortement            | Renforcer                                        |
| Exécution du confortement            | 2007                                             |
| Coût du confortement                 | 25000 francs, soit 0,5% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | Ernst Winkler + Partner AG, Emch + Berger AG     |

### 3.10 Immeuble avec centre commercial à Fribourg

#### Etat initial

Le complexe Bearegard-Centre à Fribourg comprend trois immeubles résidentiels de huit étages datant de 1970. Le rez-de-chaussée est occupé par un centre commercial. Les deux niveaux de sous-sol abritent des places de parc et des caves. Le système porteur se compose de parois en maçonnerie non armée dans les étages et de colonnes en béton armé au rez-de-chaussée. Les dalles des étages sont en béton armé.

#### Points faibles

Dans son état initial, le complexe présente un cas typique d'étage flexible dans le plan horizontal («soft storey») dû à la transition entre les parois en maçonnerie des étages résidentiels et les colonnes en béton armé des locaux commerciaux du rez-de-chaussée. Le point faible réside dans les colonnes du rez-de-chaussée et en particulier dans l'armature insuffisante des nœuds des cadres. Par ailleurs, la sécurité structurale de certaines parois en maçonnerie est insuffisante.



Nouvelle paroi porteuse en béton armé bétonnée contre la façade existante (Lateltin, 2003).



Vue de la nouvelle paroi en béton armé.

#### Confortement parasismique

Chaque immeuble est doté d'un nouveau système porteur à même de reprendre les actions horizontales. Ce système comprend deux parois élancées en béton armé, continues sur toute la hauteur des bâtiments, dans chacune des directions principales. Ces nouvelles parois sont fondées dans le terrain à l'aide de micropieux.

### Particularités

Les nouvelles parois en béton armé sont reliées à la face latérale des dalles par une armature de liaison scellée.

### Contexte

Le confortement parasismique du complexe a été réalisé dans le cadre de travaux d'entretien de grande ampleur mis en œuvre après 30 ans d'utilisation.



Vue en plan du rez-de-chaussée, avec les nouvelles parois en béton armé (Lateltin, 2003).



Détail d'armature d'une nouvelle paroi en béton armé avec les armatures de liaison scellées dans les dalles existantes.

### Caractéristiques

|                                      |                                                           |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1970                                                      |
| Affectation du bâtiment              | Immeuble sur un centre commercial                         |
| Occupation                           | PB = 135                                                  |
| Valeur du bâtiment                   | 23 millions de francs                                     |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                                     |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z1                                                   |
| Classe de sol de fondation           | Semi-compact (selon SIA 160)                              |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,5$ (selon SIA 160)                      |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$ (selon SIA 160)                      |
| Stratégie de confortement            | Renforcer, améliorer la régularité                        |
| Exécution du confortement            | 2002                                                      |
| Coût du confortement                 | 1,7 million de francs, soit 7,4% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | Centec SA Ingénieurs Conseils                             |
| Architectes                          | Lateltin & Monnerat architectes SIA SA                    |
| Expert                               | Prof. Peter Marti                                         |

### 3.11 Bâtiment administratif à Berne



#### Etat initial

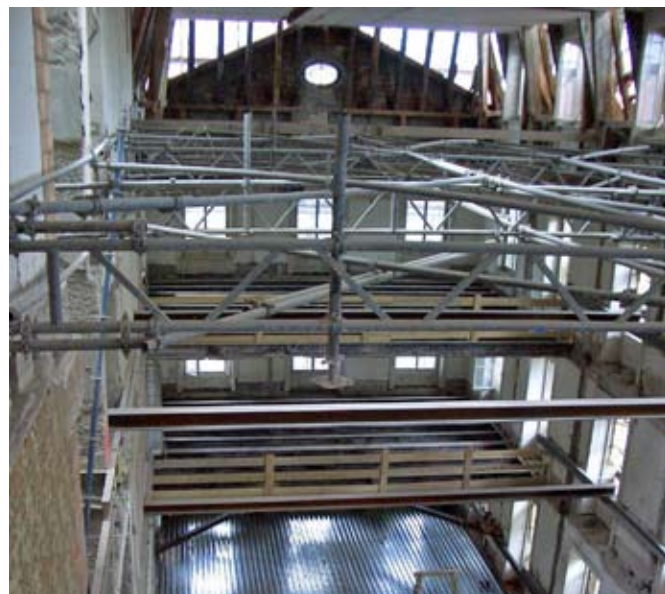
Le Bernerhof, qui héberge actuellement le siège du Département fédéral des finances, a été construit entre 1855 et 1857 selon les plans de Friedrich Studer. Ce bâtiment imposant de 6 étages se caractérise par ses parois en maçonnerie de pierre naturelle et par ses planchers avec des poutres en bois. Il est placé sous la protection des monuments historiques.

#### Points faibles

Les planchers avec des poutres en bois et les parois en maçonnerie de pierre naturelle pénalisent la tenue au séisme de l'édifice. La transmission des efforts horizontaux des planchers aux parois est insuffisante. Certaines parois sont interrompues au rez-de-chaussée. De plus, quelques parois offrent une sécurité critique au renversement perpendiculaire à leur plan.



*Vue de la façade ouest en pierre naturelle.*



*Remplacement des anciens planchers avec des poutres en bois par des planchers en béton dans l'aile est.*

Confortement parasismique

Le confortement doit se conformer aux impératifs de la protection des monuments historiques. Les planchers avec des poutres en bois de l’aile est sont remplacés par des planchers en béton. Les autres planchers sont renforcés par des planchers mixtes bois-béton dans les secteurs critiques. Les nouvelles cages d’escalier sont construites en béton armé sur toute la hauteur du bâtiment.

Particularités

A l’exception des parois frontales nord, le facteur de conformité peut généralement être haussé à 1,0. Au terme d’une pesée des intérêts incluant les impératifs de la protection des monuments historiques, ces parois sont laissées en l’état, sachant que les conséquences de leur effondrement seraient limitées.

Contexte

Le confortement parasismique a été réalisé dans le cadre de l’assainissement général du bâtiment.



Plancher en béton dans la zone d’un nouveau noyau technique.



Armature d’ancrage des nouveaux planchers dans les parois en maçonnerie.

Caractéristiques

|                                      |                                                                        |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1857                                                                   |
| Affectation du bâtiment              | Administration publique                                                |
| Occupation                           | PB = 105                                                               |
| Valeur du bâtiment                   | 45 millions de francs                                                  |
| Classe d'ouvrage                     | C0 II                                                                  |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z1                                                                |
| Classe de sol de fondation           | E                                                                      |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,1$                                                   |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$<br>(parois frontales nord: $\alpha_{int} = 0,1$ ) |
| Stratégie de confortement            | Renforcer                                                              |
| Exécution du confortement            | 2004                                                                   |
| Coût du confortement                 | 0,2 million de francs, soit 0,4% de la valeur du bâtiment              |
| Ingénieurs                           | WAM Partner AG                                                         |

### 3.12 Lycée Neufeld à Berne

#### Etat initial

Le lycée Neufeld à Berne est une construction à ossature en béton armé datant de 1965. Il comprend un sous-sol, un rez-de-chaussée et quatre étages. Ses dimensions extérieures en plan sont de 69 m x 37 m. Le système porteur se compose de colonnes en béton armé et de deux noyaux d'ascenseurs en béton armé. Les dalles des étages sont elles aussi en béton armé.

#### Points faibles

Dans son état initial, le bâtiment est subdivisé en deux moitiés par un joint de dilatation continu sur toute sa hauteur. Chaque moitié est contreventée par un noyau d'ascenseur excentré. Du fait des oscillations en flexion et en torsion qui affecteraient ses deux parties en cas de séisme, l'ouvrage est déjà menacé d'effondrement à la hauteur du joint de dilatation sous l'effet de faibles sollicitations sismiques. Considéré de l'extérieur, son rez-de-chaussée transparent semble présenter un cas typique de rez-de-chaussée flexible. Cependant, grâce aux deux noyaux d'ascenseurs massifs passant par tous les étages, son système porteur peut être considéré comme régulier en élévation.



#### Confortement parasismique

Les joints de dilatation traversant la dalle de tous les étages au milieu du bâtiment sont clavés. On obtient ainsi, en exploitant les deux noyaux d'ascenseurs élancés en béton armé, un sys-



Vue de la façade latérale du bâtiment.

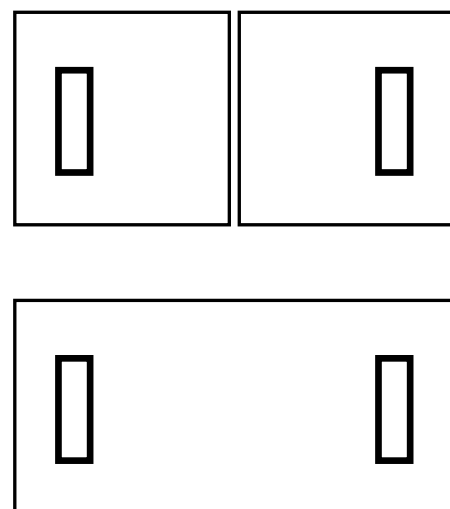


Schéma en plan de l'état initial avec deux moitiés de bâtiment contreventées par des noyaux excentrés (haut) et schéma en plan de l'état après confortement avec un bâtiment contreventé de manière symétrique.

tème global contreventé symétriquement pour la reprise des efforts sismiques. Un confortement visant un niveau de sécurité plus élevé aurait généré des coûts disproportionnés.

Particularités

La transformation des ascenseurs requiert certaines adaptations des noyaux. Les renforcements locaux qu’elles nécessitent sont réalisés au moyen de lamelles en fibres de carbone collées.

Contexte

Le confortement parasismique du bâtiment a été réalisé dans le cadre de travaux d’entretien de grande ampleur mis en œuvre après 40 ans d’utilisation.



Clavage du joint dans les dalles d’étage par des plaques en acier disposées sur les deux faces des dalles.



Renforcement des noyaux d’ascenseurs avec des lamelles en fibre de carbone.

Caractéristiques

|                                      |                                                           |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1965                                                      |
| Affectation du bâtiment              | Ecole                                                     |
| Occupation                           | PB = 200                                                  |
| Valeur du bâtiment                   | 43 millions de francs                                     |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                                     |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z1                                                   |
| Classe de sol de fondation           | E                                                         |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,1$                                      |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{nt} = 0,5$                                       |
| Stratégie de confortement            | Améliorer la régularité                                   |
| Exécution du confortement            | 2006                                                      |
| Coût du confortement                 | 0,3 million de francs, soit 0,7% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | Marchand + Partner AG                                     |

### 3.13 Ecole à Ostermundigen (BE)

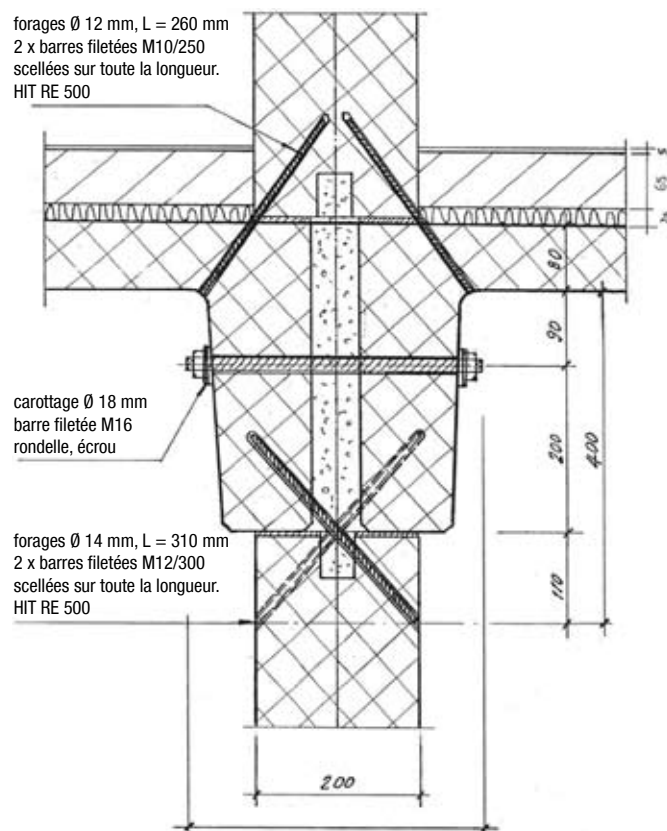


#### Etat initial

Le complexe scolaire Rüti à Ostermundigen est une construction modulaire datant de la fin des années 1960. Elle comprend une aile de cinq niveaux et une aile de deux niveaux abritant des classes, ainsi qu'une salle de gymnastique. Les colonnes, les poutres et les parois sont des éléments préfabriqués en béton armé. Les planchers sont constitués de caissons juxtaposés.



*Galerie de liaison confortée longitudinalement par des parois en béton armé.*



*Coupe à travers l'assise des planchers en caissons, avec les nouveaux éléments de liaison assurant le confortement parasismique.*

### Points faibles

Les éléments préfabriqués sont empilés sans éléments de liaison, si bien qu'aucun véritable système porteur reprenant les actions horizontales ne peut être identifié. L'effet de diaphragme des planchers en caissons est insuffisant. Sous l'effet d'un tremblement de terre, le complexe risque de s'écrouler comme un château de cartes.

### Confortement parasismique

La stratégie retenue consiste à relier les éléments préfabriqués par des barres, attaches et plaques en acier. En outre, certains éléments de parois sont renforcés par des lamelles en fibres de carbone appliquées verticalement et ancrées dans le sous-sol en béton coulé sur place.

### Particularités

En tenant compte du critère de proportionnalité, le confortement parasismique peut être limité à la liaison des éléments préfabriqués entre eux. Selon ce principe, il serait disproportionné de construire un nouveau système de contreventement contre les efforts horizontaux. Les caractéristiques figurant dans le tableau ci-dessous se réfèrent à l'aile «I» de cinq niveaux.



*Attaches appliquées a posteriori pour relier le plancher en caissons aux parois.*



*Plaques en acier destinées à relier des éléments de toiture.*

### Contexte

Le confortement parasismique a été réalisé dans le cadre de l'assainissement général du complexe scolaire.

### Caractéristiques

|                                      |                                                    |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1968                                               |
| Affectation du bâtiment              | Ecole                                              |
| Occupation                           | PB = 38                                            |
| Valeur du bâtiment                   | 8 millions de francs                               |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                              |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z1                                            |
| Classe de sol de fondation           | E                                                  |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,24$                              |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{nt} = 0,6$                                |
| Stratégie de confortement            | Renforcer                                          |
| Exécution du confortement            | 2008                                               |
| Coût du confortement                 | 140 000 francs, soit 1,8% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | Marchand + Partner AG                              |

### 3.14 Clinique pédiatrique à Aarau

#### Etat initial

La clinique pédiatrique de l'hôpital cantonal à Aarau date de 1954. Ce bâtiment long de 55 m et large de 16 m comprend quatre étages et deux niveaux de sous-sols. Le système porteur se compose de parois en maçonnerie non armée et de colonnes en béton armé reliées par des dalles en béton armé relativement minces.

#### Points faibles

Dans la direction longitudinale, le bâtiment est dépourvu de véritable système de contreventement. Une rangée de colonnes en béton armé longeant le couloir est liée par un sommier d'un mètre de hauteur, qui forme avec elles des cadres longitudinaux à colonnes courtes qui sont critiques au niveau du cisaillement (Koller, 2000). Dans la direction transversale, le bâtiment est contreventé par les façades d'extrémité en maçonnerie non armée. Comme les planchers sont conçus pour être porteurs dans la direction transversale, les façades d'extrémité subissent peu d'efforts normaux, si bien qu'elles ne peuvent reprendre que de faibles efforts horizontaux en cas de tremblement de terre. Un autre point faible réside dans les fondations isolées et les semelles filantes en lieu et place d'un sous-sol rigide.

#### Confortement parasismique

Dans la direction longitudinale, deux nouvelles parois en béton armé sont construites en continu sur toute la hauteur du



bâtiment. L'une d'entre elles est une paroi couplée construite de manière à être particulièrement ductile. Afin d'assurer le contreventement dans la direction transversale, une paroi de 5,20 m de longueur et d'une épaisseur de 28 cm est bétonnée contre chacune des deux parois d'extrémité existantes en ma-



*Vue de la façade longitudinale côté jardin.*

çonnerie. Une troisième paroi en béton armé est placée au milieu du bâtiment pour décharger les longs diaphragmes constitués par les dalles d'étage.

### Particularités

Le dimensionnement de la paroi porteuse antisismique couplée en béton armé et la conception de ses détails constructifs se réfèrent à l'ouvrage de Paulay & Priestley (1992). L'acier d'armature distribué en Suisse satisfait certes aux exigences de la norme SIA 162 en vigueur au moment de l'intervention, mais sa ductilité sous des sollicitations sismiques est insuffisante, si bien qu'un acier à béton particulièrement ductile doit être importé pour équiper les zones plastiques (Koller, 2000).

### Contexte

Le bâtiment devait subir d'importants travaux pour remédier à une sécurité insuffisante contre les incendies. Sa tenue au séisme a été vérifiée par la même occasion. Le confortement parasismique a coûté 6% du montant total de l'assainissement.



*Nouvelle paroi couplée en béton armé au sous-sol.*



*Armature d'une nouvelle paroi couplée en béton armé au rez-de-chaussée, avec des barres diagonales dans les poutres de liaison.*

### Caractéristiques

|                                      |                                                         |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1954                                                    |
| Affectation du bâtiment              | Bâtiment de lits                                        |
| Occupation                           | PB = 350                                                |
| Valeur du bâtiment                   | 24 millions de francs                                   |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                                   |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z1                                                 |
| Classe de sol de fondation           | Etude dynamique du sol du site                          |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,1$ (selon SIA 160)                    |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$ (selon SIA 160)                    |
| Stratégie de confortement            | Renforcer, améliorer la ductilité                       |
| Exécution du confortement            | 1999                                                    |
| Coût du confortement                 | 0,9 million de francs, soit 4% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | Peter Zumbach, Aarau, Résonance SA                      |

### 3.15 Bâtiment HPH de l'EPF Zurich



#### Etat initial

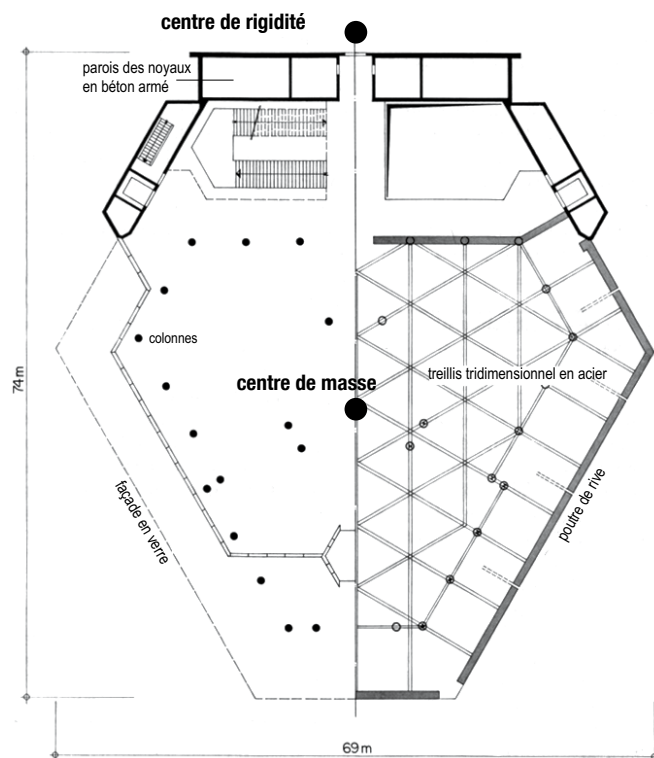
Le grand bâtiment HPH de l'EPF Zurich, au Hönggerberg, a été bâti entre 1970 et 1971 sans tenir compte de l'action sismique. Il abrite trois amphithéâtres, d'un total de plus de 1200 places assises, sur un grand hall d'entrée donnant accès à la cafétéria.

#### Points faibles

Le hall d'entrée ouvert, situé sous le plateau supportant les amphithéâtres, forme un rez-de-chaussée flexible typique («soft storey»). De plus, il y a un décalage de plus de 40 m entre le centre de rigidité des parois de contreventement en béton armé situées à l'arrière du rez-de-chaussée et le centre de masse des étages supérieurs. Le bâtiment est donc soumis à d'importantes sollicitations en torsion sous l'action d'un séisme.

#### Confortement parasismique

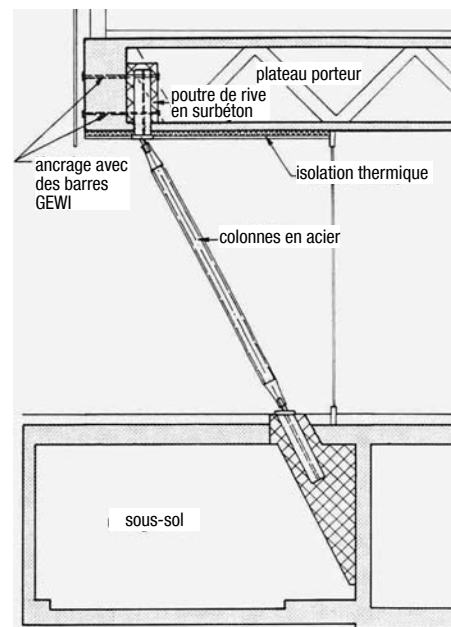
Le rez-de-chaussée flexible est conforté par un nouveau treillis oblique formé de tubes d'acier. Cette solution permet d'augmenter la rigidité et la résistance ultime, tout en éliminant le problème d'excentricité affectant le système de contreventement au rez-de-chaussée.



Vues en plan du rez-de-chaussée (à gauche) et de l'espace vide sous le plateau porteur (à droite), avec la position des centres de masse et de rigidité avant le confortement parasismique, selon Schefer, Zwicky & Santschi (1995).



Nouveau treillis oblique formé de tubes en acier au rez-de-chaussée.



Coupe à travers le nouveau treillis oblique en tubes d'acier installé au rez-de-chaussée (Schefer, Zwicky & Santschi 1995).

### Particularités

Le nouveau treillis en tubes d'acier sert aussi à soutenir la partie en porte-à-faux du plateau porteur reprenant les charges verticales, dont la sécurité structurale était insuffisante. En évitant de poser de nouvelles fondations et en restreignant les interventions à un seul étage, on limite le coût à 0,7% de la valeur du bâtiment.

### Contexte

Le confortement parasismique a été réalisé dans le cadre d'un assainissement du plateau porteur qui surplombe le rez-de-chaussée. Il s'agit du premier bâtiment en Suisse dont la sécurité parasismique a été améliorée par des mesures de confortement.

### Caractéristiques

|                                      |                                                           |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1970-71                                                   |
| Affectation du bâtiment              | Amphithéâtres                                             |
| Occupation                           | PB = 200                                                  |
| Valeur du bâtiment                   | 70 millions de francs                                     |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                                     |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z1                                                   |
| Classe de sol de fondation           | Semi-compact (selon SIA 160)                              |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,25$ (selon SIA 160)                     |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$ (selon SIA 160)                      |
| Stratégie de confortement            | Améliorer la régularité, renforcer                        |
| Exécution du confortement            | 1994                                                      |
| Coût du confortement                 | 0,5 million de francs, soit 0,7% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG                |
| Architectes                          | Broggi & Santschi Architekten AG                          |
| Expert                               | Prof. dr h.c. Hugo Bachmann                               |

### 3.16 Ecole à Zurich



#### Etat initial

Le complexe scolaire Riedenhalden de cinq étages à Zurich-Affoltern date de la fin des années 1950. Une cage d'escalier centrale carrée est entourée de quatre ailes abritant des salles de classe. Les planchers et les parois de la cage d'escalier sont en béton armé, les autres parois en maçonnerie.

#### Points faibles

Dans les parois en béton armé de la cage d'escalier, le taux d'armature est insuffisant dans la direction horizontale et verticale. L'étage de toiture surmontant la cage d'escalier est dépourvu d'éléments de contreventement. La dalle de toiture en béton armé repose sur des colonnes bi-articulées. Les parois en maçonnerie des ailes, interrompues par des rangées de fenêtres, ne peuvent reprendre quasiment aucune force horizontale.



*Renforcement d'une paroi en béton armé existante en y accolant une nouvelle paroi de 15 cm d'épaisseur.*



*Contreventement de l'étage de toiture par un nouveau cadre en acier.*

### Confortement parasismique

Les quatre parois de la cage d'escalier sont renforcées en les doublant de parois fortement armées. Les quatre parois doublées sont symétriques en plan et continues du sous-sol jusqu'au niveau sous les combles. Les combles sont contreventés par quatre nouveaux cadres en acier adaptés aux cadres des fenêtres et positionnés à l'aplomb des parois doublées.

### Particularités

Le complexe scolaire étant placé sous la protection des monuments historiques, la stratégie choisie est celle qui affecte le moins son aspect d'origine.

### Contexte

Le confortement parasismique a été réalisé dans le cadre de travaux de réfection et de rénovation après 50 ans d'utilisation.



Détail des liaisons d'armature verticale des parois accolées.



Armature d'une paroi accolée avec les liaisons de l'armature verticale.

### Caractéristiques

|                                      |                                                          |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1958                                                     |
| Affectation du bâtiment              | Ecole                                                    |
| Occupation                           | PB = 48                                                  |
| Valeur du bâtiment                   | 4 millions de francs                                     |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                                    |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z1                                                  |
| Classe de sol de fondation           | E                                                        |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,2$                                     |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,1$                                     |
| Stratégie de confortement            | Renforcer, améliorer la régularité                       |
| Exécution du confortement            | 2006                                                     |
| Coût du confortement                 | 0,13 million de francs, soit 3% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | Walt + Galmarini AG                                      |
| Architectes                          | Pfister Schiess Tropeano & Partner Architekten AG        |

### 3.17 Studio de la radio à Zurich

#### Etat initial

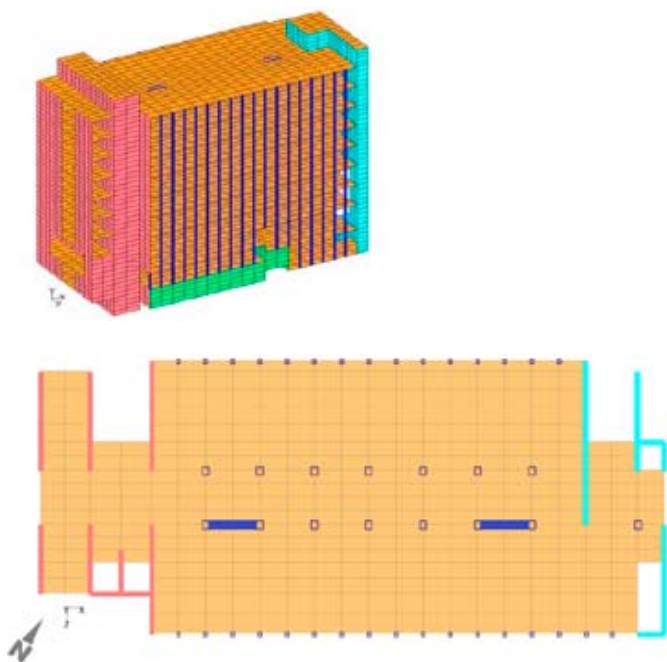
L'immeuble de la radio suisse alémanique DRS à Zurich a été construit entre 1969 et 1970 sans tenir compte de l'action sismique. Il abrite des bureaux et des studios sur huit étages. Cette construction à ossature en béton coulé sur place est stabilisée par des noyaux en béton armé dans le secteur des ascenseurs et des escaliers à proximité des deux façades d'extrémité.

#### Points faibles

L'immeuble est suffisamment contreventé dans la direction transversale par plusieurs parois en béton armé continues sur toute sa hauteur. Il manque cependant de contreventement dans le sens longitudinal, le secteur des noyaux ne comptant que quelques courtes parois dans cette direction.

#### Confortement parasismique

Deux nouveaux treillis en acier de type excentré sont installés pour remédier au manque de contreventement longitudinal (en bleu foncé dans la figure). Vus en plan, ils sont insérés



*Modèle d'éléments finis utilisé pour vérifier la sécurité parasismique de l'immeuble (en haut); Vue en plan avec les parois porteuses existantes en béton armé et les nouveaux treillis en acier (bleu foncé, en bas).*

entre deux colonnes existantes en béton armé, le long des cloisons bordant initialement des couloirs. Au sous-sol, les treillis sont ancrés aux parois et aux fondations existantes.

Les treillis en acier sont livrés sur le chantier en tronçons soudés de hauteur égale à deux étages. Ils sont boulonnés l'un à l'autre une fois en place. Pour les relier aux planchers en béton armé, une armature de liaison est mise en place à chaque étage, dans des évidements pratiqués au préalable, puis noyée dans du béton.



Nouveau cadre en acier de type excentré, placé entre deux colonnes en béton armé existantes.

Particularités

Les nouveaux treillis de type excentré s’insèrent harmonieusement dans le nouveau concept architectural, qui recherche une meilleure transparence en supprimant les cloisons bordant les couloirs.



Nouveau cadre en acier avec habillage des colonnes.

Contexte

Le confortement parasismique a été réalisé en même temps que d’autres travaux de réfection.

Caractéristiques

|                                      |                                                                                   |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1970                                                                              |
| Affectation du bâtiment              | Studio de la radio                                                                |
| Occupation                           | PB = 150                                                                          |
| Valeur du bâtiment                   | 15 millions de francs                                                             |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                                                             |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z1                                                                           |
| Classe de sol de fondation           | Semi-compact                                                                      |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,3$                                                              |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$                                                              |
| Stratégie de confortement            | Renforcer, améliorer la ductilité                                                 |
| Exécution du confortement            | 2004                                                                              |
| Coût du confortement                 | 0,34 million de francs, soit 2,3% de la valeur du bâtiment                        |
| Ingénieurs                           | Federer & Partner, Bauingenieure AG<br>Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG |
| Architectes                          | Di Gallo Architekten                                                              |

### 3.18 Bâtiment administratif EMPA à Dübendorf (ZH)

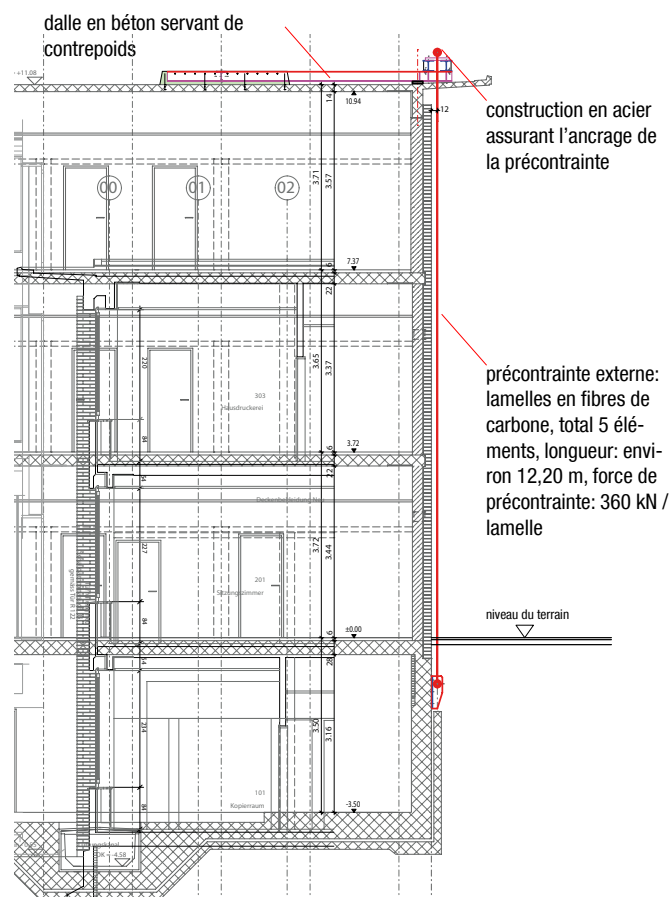


#### Etat initial

Le bâtiment administratif à deux étages sur rez de l'EMPA, à Dübendorf, date de 1960. Cette construction mixte longue de 50 m et large de 18 m comprend des cadres en béton armé, des parois en béton armé et de la maçonnerie. Les planchers eux aussi sont en béton armé.



Façade d'extrémité nord, renforcée par des éléments externes verticaux précontraints en fibres de carbone.



Coupe longitudinale à travers la façade d'extrémité nord, avec les éléments externes précontraints en fibres de carbone.

### Points faibles

Dans la direction longitudinale, les sollicitations sismiques peuvent être reprises par les cadres et parois en béton armé de la cage d'escalier et d'ascenseur. Dans la direction transversale, le système de contreventement horizontal comprend les deux façades d'extrémité en maçonnerie combinées avec la cage d'escalier. Celle-ci est placée de manière excentrée en plan à proximité de la façade d'extrémité sud. De ce fait, l'état actuel la paroi de la façade sud est satisfaisant, mais par contre, la façade nord, plus éloignée du noyau, est excessivement sollicitée en cas de séisme par effet de torsion.

### Confortement parasismique

La façade d'extrémité nord, en maçonnerie épaisse de 22 cm, est renforcée par cinq éléments précontraints en plastique renforcé de fibres de carbone de 13 m de long appliqués à l'extérieur. C'est la première fois que de tels éléments sont utilisés pour le confortement parasismique d'un bâtiment (Bachmann, 2007b). La force de précontrainte s'exerçant verticalement de manière excentrée est transmise à la façade d'extrémité de manière centrée par l'intermédiaire d'une construction en acier installée sur le toit.



*Ancrage inférieur des éléments précontraints en fibres de carbone contre la paroi de la cave.*



*Ancrage supérieur des éléments en fibres de carbone sur le toit, d'où ils sont précontraints.*

### Particularités

Les éléments précontraints verticaux en fibres de carbone, bien visibles devant la façade, sont utilisés comme éléments architecturaux.

### Contexte

Le confortement parasismique du bâtiment a été réalisé en même temps que l'assainissement global des façades.

### Caractéristiques

|                                     |                                                            |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Année de construction               | 1960                                                       |
| Affectation du bâtiment             | Bâtiment de bureaux                                        |
| Occupation                          | PB = 80                                                    |
| Valeur du bâtiment                  | 9 millions de francs                                       |
| Classe d'ouvrage                    | CO II                                                      |
| Zone d'aléa sismique                | Zone Z1                                                    |
| Classe de sol de fondation          | E                                                          |
| Facteur de conformité état initial) | $\alpha_{eff} = 0,25$                                      |
| Facteur de conformité (nouveau)     | $\alpha_{int} = 1,0$                                       |
| Stratégie de confortement           | Renforcer                                                  |
| Exécution du confortement           | 2007                                                       |
| Coût du confortement                | 0,15 million de francs, soit 1,5% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                          | Synaxis AG Zürich                                          |
| Architectes                         | Raumfachwerk Architekten AG                                |
| Expert                              | Prof. dr h.c. Hugo Bachmann                                |

### 3.19 Immeuble avec centre commercial à Winterthour



#### Etat initial

Cet immeuble de quatre étages a été bâti dans les années 1960 selon un mode de construction mixte maçonnerie-béton armé. Les étages abritent des appartements, et le rez-de-chaussée un centre commercial d'une superficie qui fait presque le triple de celle des étages supérieurs. Les

dalles des étages, du rez-de-chaussée et du sous-sol sont en béton armé.

#### Points faibles

Le bâtiment présente un rez-de-chaussée flexible («soft storey»), et est de plus soumis à de fortes sollicitations en torsion sous



Nouveau treillis d'acier en «V» dans un bureau du rez-de-chaussée.



Nouveau treillis d'acier en «V» caché derrière un rayon de vente du rez-de-chaussée.

l'action d'un séisme. S'y ajoute l'effet défavorable du joint de dilatation situé approximativement à mi-longueur du bâtiment. Plusieurs parois ont été supprimées au rez-de-chaussée lors de transformations antérieures, si bien qu'il n'y a plus de véritable système de contreventement.

### Confortement parasismique

Quatre nouveaux treillis en acier en «V» sont installés au rez-de-chaussée, soit deux par direction principale du bâtiment. Leurs réactions verticales sont transmises au sous-sol par de nouvelles colonnes en acier ancrées au moyen de micropieux. Leurs réactions horizontales sont reprises par la dalle existante du rez-de-chaussée.

### Particularités

L'avantage principal des treillis en acier par rapport à d'autres types de mesures de confortement parasismique réside dans la rapidité de l'intervention. Les transformations touchant le magasin ne doivent pas durer plus de deux mois.



*Insertion de nouveaux treillis d'acier en «V» au rez-de-chaussée.*



*Ancrage d'un nouveau treillis d'acier en «V» dans la dalle du premier étage.*

### Contexte

Le confortement parasismique de l'immeuble a été réalisé en même temps que la rénovation générale du centre commercial.

### Caractéristiques

|                                      |                                                            |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1966                                                       |
| Affectation du bâtiment              | Immeuble d'habitation sur un centre commercial             |
| Occupation                           | PB = 71                                                    |
| Valeur du bâtiment                   | 5,5 millions de francs                                     |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                                      |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z1                                                    |
| Classe de sol de fondation           | C                                                          |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,2$                                       |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$                                       |
| Stratégie de confortement            | Renforcer, améliorer la régularité                         |
| Exécution du confortement            | 2005                                                       |
| Coût du confortement                 | 0,12 million de francs, soit 2,2% de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | Dr Deuring + Oehninger AG, Winterthur                      |

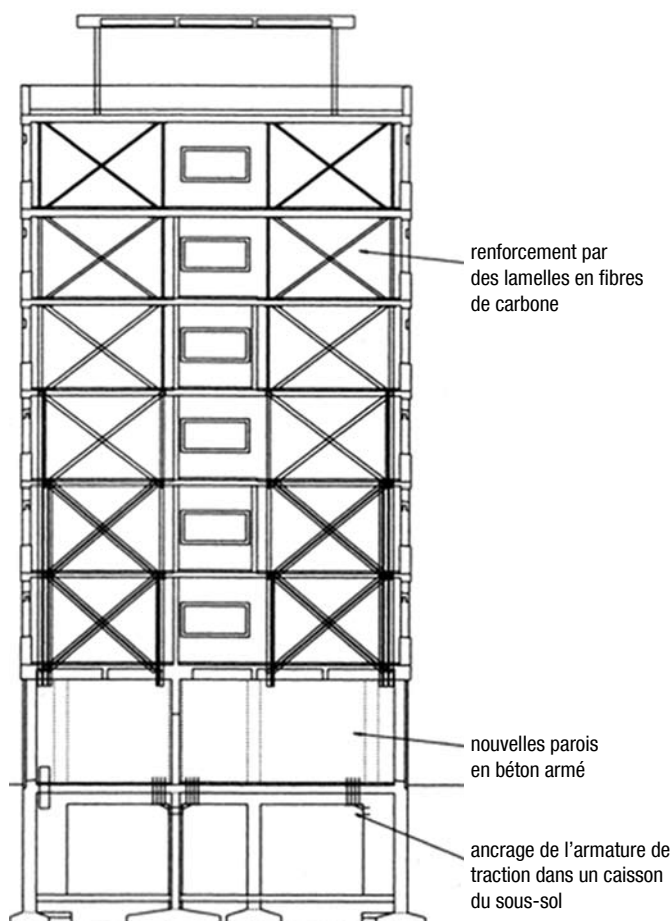
### 3.20 Gymnasium Friedberg à Gossau (SG)

#### Etat initial

L'immeuble de l'internat du Gymnasium Friedberg à Gossau (SG) date de 1961. Ses sept étages abritent les chambres des étudiants et les bureaux de l'école. Il est long de 24 m, large de 12 m et haut de 22 m. Son système porteur se compose principalement d'une paroi porteuse en béton armé dans la direction longitudinale, de parois en maçonnerie dans la direction transversale et de colonnes en béton armé dans les façades. Les planchers sont en béton armé.

#### Points faibles

La tenue au séisme de l'immeuble est pénalisée par les parois transversales en maçonnerie non armée. Comme elles s'interrompent au rez-de-chaussée, celui-ci constitue un étage flexible défavorable, soumis en plus à de fortes sollicitations en torsion en cas de séisme.



#### Confortement parasismique

Dans la direction transversale, les parois en maçonnerie de la façade sud sont renforcées du premier au sixième étage par des lamelles entrecroisées en fibres de carbone. Du côté de la cage d'escalier, ce renforcement est limité aux étages quatre à six. Une nouvelle paroi en béton armé est appliquée contre des murs préexistants du premier au troisième étage. Des parois en béton armé, ancrées dans le sous-sol rigide, sont rajoutées au rez-de-chaussée. Aucun renforcement n'est nécessaire dans la direction longitudinale.

*Vue de la paroi transversale sud en maçonnerie, avec les mesures de confortement parasismique mises en œuvre: nouvelles parois porteuses en béton armé au rez-de-chaussée et renforcement par des lamelles en fibres de carbone dans les étages (Borgogno, 2001)*

Particularités

Les lamelles diagonales en fibres de carbone sont ancrées dans les planchers en béton, dans des trous forés préalablement, au moyen de cornières ad hoc développées récemment. Elles sont fixées par des contreplaques et des barres de traction (figure de droite). Quant aux lamelles verticales en fibres de carbone, la longueur de collage est suffisante pour assurer leur ancrage.

Contexte

Le confortement parasismique de l'immeuble a été réalisé en même temps que d'autres travaux d'entretien.



Renforcement des parois en maçonnerie avec des lamelles en fibres de carbone.



Ancrage des lamelles en fibre de carbone dans les dalles en béton armé à l'aide de cornières résistant au cisaillement.

Caractéristiques

|                                      |                                                            |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1961                                                       |
| Affectation du bâtiment              | Immeuble administratif et résidentiel (internat)           |
| Occupation                           | PB = 25                                                    |
| Valeur du bâtiment                   | 3,7 millions de francs                                     |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                                      |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z1                                                    |
| Classe de sol de fondation           | Semi-compact (selon SIA 160)                               |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,3$ (selon SIA 160)                       |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$ (selon SIA 160)                       |
| Stratégie de confortement            | Renforcer, améliorer la régularité                         |
| Exécution du confortement            | 2001                                                       |
| Coût du confortement                 | 0,37 million de francs, soit 10 % de la valeur du bâtiment |
| Ingénieur                            | Walter Borgogno                                            |

### 3.21 Immeuble résidentiel à Crans-Montana (VS)

#### Etat initial

Ce bâtiment de quatre étages situé à Crans-Montana a été construit dans les années 1950 pour servir d'hôtel. Il a été transformé en immeuble de propriétés par étage en 2004. Les planchers et le sous-sol sont en béton armé et les parois en maçonnerie.

#### Points faibles

Les parois existantes en maçonnerie sont largement insuffisantes pour reprendre les forces sismiques en zone Z3b, la zone où l'aléa est le plus élevé en Suisse.

#### Confortement parasismique

La nouvelle répartition des locaux pour une utilisation en tant que PPE implique la suppression de nombreuses parois. Un nouveau système de contreventement comprenant quatre parois élancées en béton armé est construit. Conformément aux règles de la conception parasismique, elles sont continues du sous-sol jusqu'à l'étage de toiture. En plan, elles sont réparties le plus symétriquement possible sur les quatre façades.



*Vue de la façade est avec les nouvelles parois en béton armé.*



*Vue de la façade nord avec les nouvelles parois en béton armé.*



*Transformation de l'angle sud-est.*

Particularités

On a essayé d'intégrer le mieux possible les nouvelles parois en béton armé dans l'architecture des façades.

Contexte

Le confortement parasismique a été réalisé à l'occasion de la transformation de l'ancien hôtel en immeuble de propriétés par étage.



Fondation d'une des nouvelles parois en béton armé.



Armature d'une nouvelle paroi en béton armé au sous-sol.

Caractéristiques

|                                      |                                                           |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1958                                                      |
| Affectation du bâtiment              | Habitation                                                |
| Occupation                           | PB = 6                                                    |
| Valeur du bâtiment                   | 3,6 millions de francs                                    |
| Classe d'ouvrage                     | C0 I                                                      |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z3b                                                  |
| Classe de sol de fondation           | A                                                         |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,2$                                      |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$                                      |
| Stratégie de confortement            | Renforcer, améliorer la ductilité                         |
| Exécution du confortement            | 2004                                                      |
| Coût du confortement                 | 0,15 million de francs, soit 4 % de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | Gasser & Masserey SA, Crans-Montana                       |

### 3.22 Hôtel à Bussigny (VD)



#### Etat initial

L'hôtel Novotel à Bussigny-près-Lausanne est un bâtiment de trois étages construit en 1972. Il est long de 75 m, large de 16 m et haut de 8 m. Au lieu d'un sous-sol, un vide sanitaire d'environ un mètre de hauteur comprenant les installations du bâtiment est aménagé sous le rez-de-chaussée.

#### Points faibles

Dans son état initial, le bâtiment ne comprend aucun système de contreventement dans la direction longitudinale, ni contre le vent, ni contre les séismes. Sa subdivision en quatre parties séparées par des joints de dilatation continus sur toute sa hauteur est également défavorable en cas de séisme. De plus, l'accrochage des lourds éléments de façade en béton armé préfabriqué est insuffisant. Transversalement, le bâtiment comprend suffisamment de parois reposant sur des semelles filantes.



*Façade d'extrémité nord, avec la nouvelle cage d'escalier en béton armé.*



*Façade d'extrémité sud, avec les deux nouvelles parois triangulaires en béton armé.*

### Confortement parasismique

Le bâtiment est stabilisé dans son axe longitudinal par des appuis horizontaux extérieurs liés aux façades d'extrémité, soit deux nouvelles parois triangulaires en béton armé du côté sud et une nouvelle cage d'escalier en béton armé du côté nord. Ces nouveaux appuis extérieurs sont fondés sur des pieux. Les trois joints de dilatation séparant les planchers en béton armé sont clavés au moyen d'un mortier expansif. En outre, l'accrochage des éléments de façade est renforcé.

### Particularités

L'appui aménagé du côté nord, servant en même temps d'escalier de secours, permet d'améliorer la sécurité de l'hôtel en cas d'incendie. Les joints dans les planchers sont clavés par temps froid, dans le but de générer une précontrainte par compression entre les éléments d'appui lorsque le bâtiment a une température normale.

### Contexte

Le confortement parasismique a été réalisé en même temps que l'assainissement général de l'hôtel et son rehaussement de trois à quatre étages.



*Les deux nouvelles parois triangulaires en béton armé en construction du côté sud.*



*Élément d'acier en «T» servant à ancrer les nouvelles parois en béton armé dans les planchers existants.*

### Caractéristiques

|                                      |                                                      |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1972                                                 |
| Affectation du bâtiment              | Hôtel                                                |
| Occupation                           | PB = 60                                              |
| Valeur du bâtiment                   | 25 millions de francs                                |
| Classe d'ouvrage                     | CO I                                                 |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z1                                              |
| Classe de sol de fondation           | B                                                    |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,12$                                |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{nt} = 1,0$                                  |
| Stratégie de confortement            | Renforcer, améliorer la régularité                   |
| Exécution du confortement            | 2008                                                 |
| Coût du confortement                 | 180 000 francs, soit 0,72 % de la valeur du bâtiment |
| Ingénieurs                           | E. Molleyres, FM Frank Meylan SA                     |
| Architectes                          | Acrobat SA                                           |

### 3.23 Pont de la route du Simplon A9 (VS)



#### Etat initial

Le Brunnenbrücke se compose de deux poutres continues de cinq et dix travées séparées par un joint de dilatation positionné sur un pilier intermédiaire. Dans la direction longitudinale, les deux poutres sont fixées rigidement à leurs culées respectives. Dans la direction transversale, elles prennent appui sur tous les piliers. Le pont a une longueur totale de 270 m. Les portées sont de 16 m au-dessus des piliers courts et de 26 m au-dessus des piliers longs.

#### Points faibles

Les appuis rigides sur les culées respectives des deux moitiés du pont ne sont de loin pas à même de reprendre les efforts sismiques. Les grandes différences de hauteur des piliers induisent une répartition inhomogène de la rigidité transversale, avec pour conséquence une sollicitation excessive des piliers très courts dans la direction transversale. Par ailleurs, les poutres risquent de tomber de leurs appuis longitudinaux à la hauteur du joint de dilatation se trouvant sur le pilier médian.



*Vue d'une partie du pont avec des piliers hauts et élancés.*



*Confortement parasismique par insertion d'appuis sismiques en caoutchouc stratifié à haut pouvoir amortisseur aux culées.*

Confortement parasismique

L'assise longitudinale passe de rigide à flottante grâce à l'insertion d'appuis sismiques souples horizontalement sur les culées et sur les colonnes courtes critiques. Le joint de dilatation du milieu du pont est clavé.

Particularités

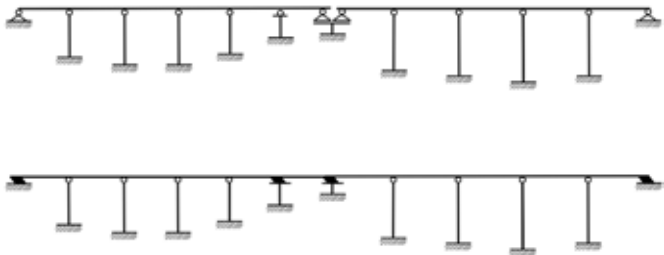
Le fait que le pont soit posé sur seize appuis sismiques souples à haut pouvoir amortisseur diminue les sollicitations dues au séisme dans les directions longitudinale et transversale, en augmentant la période de vibration fondamentale et en amortissant les sollicitations.

Contexte

Le confortement parasismique du pont a été réalisé conjointement avec d'autres travaux d'entretien de ce tronçon de la route nationale A9.



Solidarisation des deux moitiés du pont à la hauteur du joint de dilatation se trouvant initialement au milieu de l'ouvrage.



Assise longitudinale: fixe à l'état initial (en haut) et flottante après le confortement parasismique (en bas).

Caractéristiques

|                                      |                                                            |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1978                                                       |
| Affectation de l'ouvrage             | Trafic routier                                             |
| Occupation                           | –                                                          |
| Valeur de l'ouvrage                  | 7 millions de francs                                       |
| Classe d'ouvrage                     | CO II                                                      |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z3b                                                   |
| Classe de sol de fondation           | A                                                          |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,1$                                       |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$                                       |
| Stratégie de confortement            | Affaiblir, réduire l'action sismique                       |
| Exécution du confortement            | 2005                                                       |
| Coût du confortement                 | 0,15 million de francs, soit 2 % de la valeur de l'ouvrage |
| Ingénieurs                           | VWI Ingenieure AG, Truffer Ingenieurbau-ratung AG          |
| Expert                               | Dr Thomas Wenk                                             |

### 3.24 Réservoir de gaz liquide à Viège (VS)

#### Etat initial

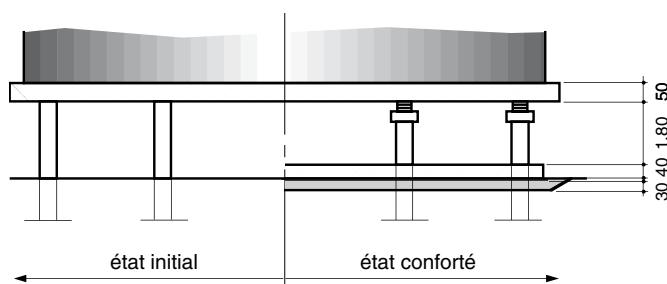
Un réservoir cylindrique en acier destiné au stockage de 1000 t de gaz liquide repose sur une dalle en béton armé surélevée. Il a un diamètre de 15 m et une hauteur de 16 m. La dalle est posée sur 26 colonnes élancées en béton armé d'une hauteur de 2,20 m et d'un diamètre de 50 cm. Chacune d'entre elles est fondée sur un pieu foré de même diamètre.

#### Points faibles

Le réservoir est en position surélevée pour être hors de portée des crues. Les colonnes et les pieux situés sous l'ouvrage sont sursollicités en flexion et en cisaillement sous sollicitation sismique. La structure en acier du réservoir est également sursollicitée.

#### Confortement parasismique

Au lieu d'être renforcée, l'assise horizontale est affaiblie par l'insertion de 26 appuis spéciaux en caoutchouc à haut pouvoir amortisseur. L'assise flottante ainsi obtenue (isolation sismique) a pour effet de déplacer la fréquence fondamentale déterminante de 2,2 Hz à 0,5 Hz. Grâce à ce décalage et à



*Etat initial (à gauche) et état au terme du confortement parasismique (à droite), obtenu par l'insertion d'appuis en caoutchouc et l'ajout d'une dalle en béton inférieure (Bachmann, 2000).*



l'augmentation de l'amortissement, l'accélération spectrale et, par conséquent, les sollicitations sismiques, sont réduites de deux tiers.

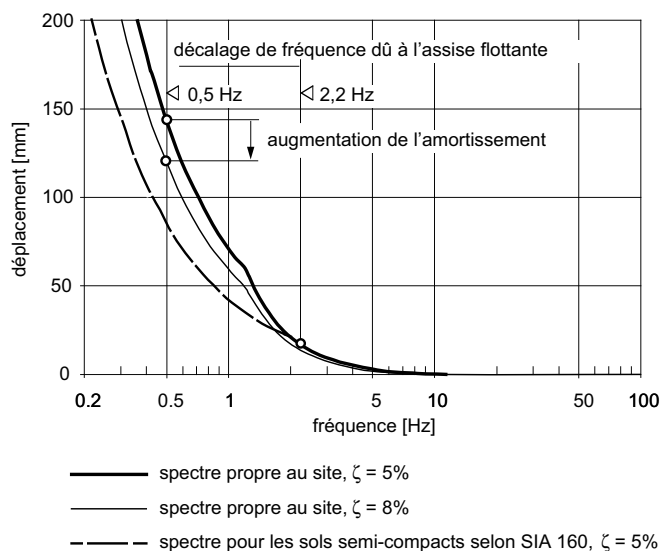
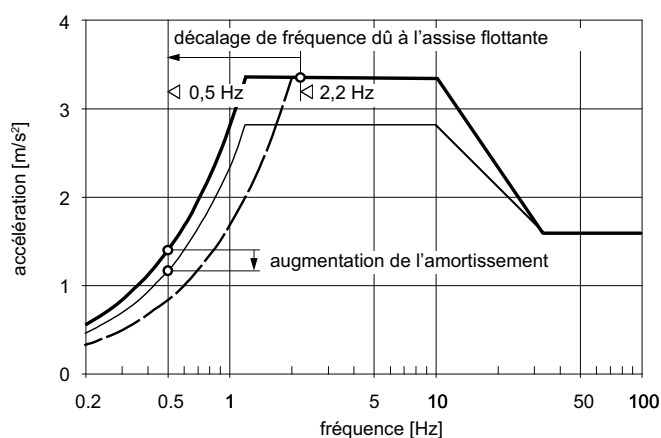
#### Particularités

La méthode de l'isolation sismique permet de diminuer les efforts exercés sur le réservoir en cas de tremblement de terre à tel point que l'on peut se passer d'un renforcement onéreux de sa structure en acier. Il faut vérifier le comportement des escaliers et du bâti supportant les conduites, car l'isolation

sismique génère une augmentation des déplacements horizontaux auxquelles le réservoir est soumis en cas de séisme.

### Contexte

Le confortement parasismique du réservoir a été réalisé suite à une analyse des risques conforme aux dispositions de l'ordonnance sur les accidents majeurs.



*Spectres de réponse élastiques de dimensionnement en accélération (haut) et en déplacement (bas) avec les fréquences déterminantes avant et après le confortement.*



*Appui en caoutchouc spécial intégré sous le réservoir de gaz liquide.*

### Caractéristiques

|                                      |                                                                  |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Année de construction                | 1980                                                             |
| Affectation de l'installation        | Stockage de gaz liquide                                          |
| Valeur de l'installation             | 3 millions de francs                                             |
| Classe d'ouvrage                     | CO III                                                           |
| Zone d'aléa sismique                 | Zone Z3b                                                         |
| Classe de sol de fondation           | Etude dynamique du sol du site                                   |
| Facteur de conformité (état initial) | $\alpha_{eff} = 0,2$ (selon SIA 160)                             |
| Facteur de conformité (nouveau)      | $\alpha_{int} = 1,0$ (selon SIA 160)                             |
| Stratégie de confortement            | Affaiblir, réduire les actions sismiques                         |
| Exécution du confortement            | 2002                                                             |
| Coût du confortement                 | 0,35 million de francs, soit 12 % de la valeur de l'installation |
| Ingénieurs                           | KBM Bureau d'ingénieurs civils SA                                |
| Expert                               | Prof. dr h.c. Hugo Bachmann                                      |

### 3.25 Petit immeuble à Kriessern (SG)



#### Etat initial

Le bâtiment comprend deux étages habitables, une cave et des combles. Les parois sont en maçonnerie non armée et les planchers en béton armé. Les dimensions en plan sont de 9 m x 23 m. Le système porteur reprenant les actions horizontales est régulier en plan et en élévation.

#### Proportionnalité et exigibilité

Une vérification de la sécurité parasismique ayant indiqué que le facteur de conformité  $\alpha_{eff}$  atteint tout juste 1,0, aucun confortement parasismique n'est nécessaire, quelle que soit la

valeur des paramètres de proportionnalité et d'exigibilité selon le cahier technique SIA 2018.

#### Recommandation d'intervention

La tenue au séisme de l'habitation telle qu'elle se présente actuellement est jugée suffisante.

#### Contexte

La sécurité parasismique de la maison a été vérifiée lors de la planification de travaux de réfection.

#### Caractéristiques

|                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| Année de construction      | 1960                 |
| Affectation du bâtiment    | Habitation           |
| Occupation                 | PB = 10              |
| Classe d'ouvrage           | CO I                 |
| Zone d'aléa sismique       | Zone Z2              |
| Classe de sol de fondation | D                    |
| Facteur de conformité      | $\alpha_{eff} = 1,0$ |
| Année de vérification      | 2005                 |
| Ingénieurs                 | Holinger AG          |

### 3.26 Bâtiment HPP de l'EPF Zurich

#### Etat initial

Le bâtiment HPP utilisé pour des travaux pratiques a été bâti entre 1969 et 1971, lors de la première étape de construction de l'EPF Zurich au Hönggerberg. Haut de 45 m, il comprend onze étages et deux niveaux de sous-sols. Sa forme en plan est celle d'un carré de 34 m de côté. Le système porteur reprenant les forces horizontales se compose d'un noyau en béton armé continu sur toute la hauteur du bâtiment, qui comprend les ascenseurs et les escaliers, ainsi que d'autres parois en béton armé. Globalement, il est régulier en plan et en élévation. Les planchers, en béton armé, reposent pour la plupart sur des sommiers. Les parois non porteuses sont en maçonnerie.

#### Proportionnalité et exigibilité

Pour la durée d'utilisation restante admise de 40 ans, la valeur du facteur de conformité  $\alpha_{eff}$  calculée selon les critères du cahier technique SIA 2018 atteint tout juste celle du facteur de conformité admissible  $\alpha_{adm} = 0,7$ , si bien qu'aucun confortement parasismique n'est nécessaire.

#### Recommandation d'intervention

La tenue au séisme du bâtiment est jugée suffisante.

#### Contexte

La sécurité parasismique du bâtiment a été vérifiée lors de la planification de travaux de réfection.



#### Caractéristiques

|                            |                                            |
|----------------------------|--------------------------------------------|
| Année de construction      | 1971                                       |
| Affectation du bâtiment    | Recherche et enseignement                  |
| Occupation                 | PB = 300                                   |
| Classe d'ouvrage           | C0 I                                       |
| Zone d'aléa sismique       | Zone Z1                                    |
| Classe de sol de fondation | C                                          |
| Facteur de conformité      | $\alpha_{eff} = 0,7$                       |
| Année de vérification      | 2005                                       |
| Ingénieurs                 | Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG |

### 3.27 Immeuble SIA à Zurich

#### Etat initial

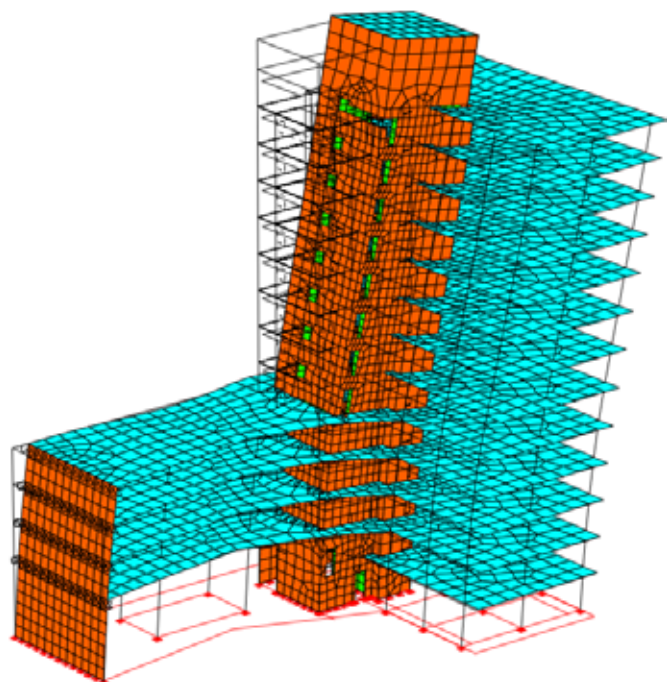
L'immeuble de la SIA à Zurich, haut de 40 m, est une construction à ossature datant de 1971. Le contreventement reprenant les forces horizontales dues au vent et aux séismes est assuré par un noyau en béton armé de 8 m x 8 m en position excentrée (Favre, 1971). Lors de l'assainissement général entre 2006 et 2007, l'aile de quatre niveaux initialement séparée a été reliée rigidement à l'immeuble pour augmenter les surfaces de bureaux d'un seul tenant. L'excentricité du système de contreventement dans les étages inférieurs s'en trouve ainsi réduit.

#### Proportionnalité et exigibilité

La sécurité parasismique a été vérifiée à l'aide d'un modèle tridimensionnel, en appliquant la méthode du spectre de réponse. Avec un facteur de conformité  $\alpha_{eff} > 1,0$ , la question de la proportionnalité d'un confortement parasismique ne se pose pas.

#### Recommandation d'intervention

L'immeuble transformé présente une tenue au séisme suffisante, si bien qu'aucun confortement parasismique n'est nécessaire.



Modèle tridimensionnel d'éléments finis pour l'application de la méthode du spectre de réponse



#### Contexte

La sécurité parasismique de l'immeuble a été vérifiée lors de la planification de transformations dues à un changement de locataire.

#### Caractéristiques

|                            |                                         |
|----------------------------|-----------------------------------------|
| Année de construction      | 1971                                    |
| Affectation du bâtiment    | Bureaux                                 |
| Occupation                 | PB = 70                                 |
| Classe d'ouvrage           | C0 I                                    |
| Zone d'aléa sismique       | Zone Z1                                 |
| Classe de sol de fondation | C                                       |
| Facteur de conformité      | $\alpha_{eff} > 1,0$                    |
| Année de vérification      | 2005                                    |
| Ingénieurs                 | Dr. Lüchinger + Meyer, Bauingenieure AG |

## > Annexes

### A1 Evolution des prescriptions parasismiques dans les normes

Les premières dispositions parasismiques ont été introduites en Suisse en 1970, dans les normes SIA sur les structures porteuses (SIA 160, 1970). Les exigences ont été accrues dans les générations de normes suivantes (en 1989 et 2003) pour tenir compte des nouvelles connaissances en génie parasismique et en sismologie.

L'action sismique qu'il y a lieu de prendre en compte selon les normes actuelles (SIA 260 et suivantes, 2003) varie fortement en fonction de plusieurs paramètres. Les cinq principaux sont:

- > la classe d'ouvrage
- > la zone d'aléa sismique
- > la classe de sol de fondation
- > le mode de construction
- > le comportement dynamique de l'ouvrage

La grandeur de l'action sismique à considérer pour dimensionner un ouvrage résulte de la combinaison de ces paramètres. Le tableau 1 retrace leur évolution d'une génération de normes à l'autre.

**Tableau 1 > Evolution des paramètres utilisés dans les normes SIA pour déterminer l' action sismique**

| Génération de normes                   | SIA 160       | SIA 160   | SIA 260 et suivantes |
|----------------------------------------|---------------|-----------|----------------------|
| Entrée en vigueur                      | 1970          | 1989      | 2003                 |
| Nombre de classes d'ouvrages           | 2             | 3         | 3                    |
| Nombre de zones d'aléa sismique        | 1             | 4         | 4                    |
| Nombre de classes de sols de fondation | 0             | 3         | 6                    |
| Nombre de types de construction        | 1             | 5         | 27                   |
| Comportement dynamique                 | non considéré | considéré | considéré            |

L'attribution d'une construction à l'une ou l'autre des trois **classes d'ouvrages actuelles (CO)** tient compte de l'occupation moyenne par des personnes, du potentiel de dommages, du risque d'atteinte à l'environnement et de l'importance de l'ouvrage pour la maîtrise d'une catastrophe. Les habitations et les bâtiments commerciaux normaux sont assignés à la CO I. Les bâtiments fréquentés par un grand nombre de personnes (centres d'achat, stades, cinémas, théâtres, écoles et églises) ainsi que les bâtiments de l'administration publique sont classés dans la CO II. Les bâtiments qui abritent des infrastructures à fonction vitale («lifeline»), tels que bâtiments du service du feu, garages d'ambulances ou hôpitaux accueillant des urgences, sont rangés dans la CO III. Le séisme de dimensionnement est majoré en fonction de la classe d'ouvrage, en

appliquant un facteur d'importance  $\gamma_f = 1,0$  pour la CO I,  $\gamma_f = 1,2$  pour la CO II et  $\gamma_f = 1,4$  pour la CO III. Selon ce principe, la période de retour du séisme de dimensionnement est de 475 ans pour la CO I, 800 ans pour la CO II et 1200 ans pour la CO III.

La norme SIA 160 de 1970 distinguait deux classes d'ouvrages et majorait d'un facteur 1,4 les forces sismiques affectant la classe supérieure, à savoir les bâtiments fréquentés par un grand nombre de personnes (théâtres, églises, hôpitaux et écoles).

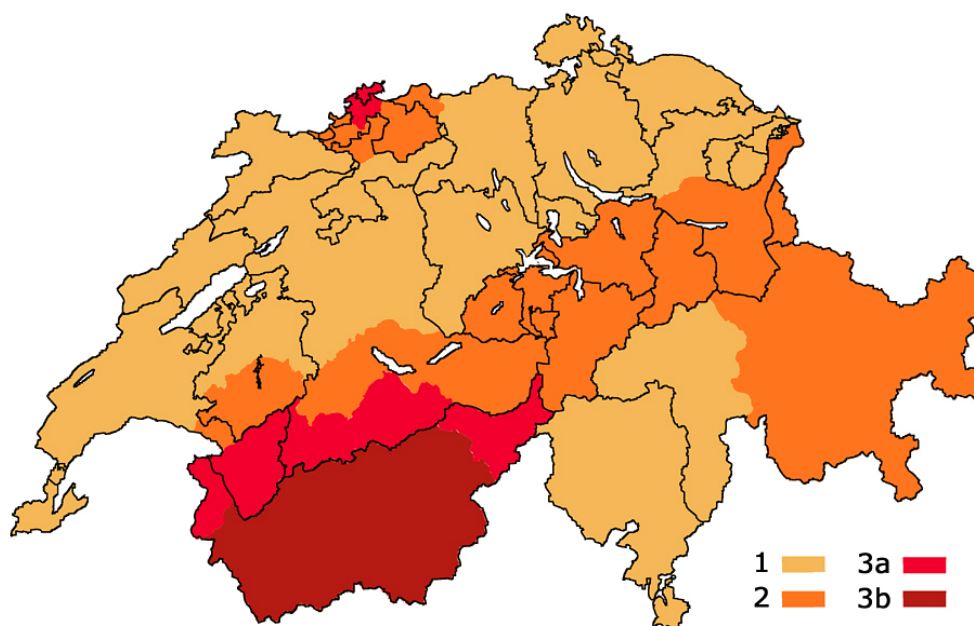
La norme SIA 160 de 1989, qui distinguait déjà trois classes d'ouvrages, majorait les forces sismiques d'une manière similaire à celle de la norme actuelle SIA 261 (2003).

La Suisse est actuellement subdivisée en quatre **zones d'aléa sismique** (figure 12). Les Alpes et la région bâloise ont un aléa plus élevé que le Jura, le Plateau et le Tessin. A l'échelle mondiale, l'aléa sismique en Suisse est faible à moyen. L'accélération horizontale maximale sur rocher (classe de sol de fondation A) vaut  $0,6 \text{ m/s}^2$  dans la zone Z1, la moins sismique. Elle est égale à  $1,0 \text{ m/s}^2$  dans la zone Z2,  $1,3 \text{ m/s}^2$  dans la zone Z3a et  $1,6 \text{ m/s}^2$  dans la zone Z3b, la plus active.

La norme SIA 160 de 1970 considérait un seul niveau d'aléa avec une accélération horizontale de  $0,2 \text{ m/s}^2$  pour toute la Suisse. C'est uniquement dans le canton de Bâle-Ville que les autorités locales ont porté cette valeur à  $0,5 \text{ m/s}^2$ . La norme SIA 160 de 1989 distinguait également quatre zones d'aléa sismique, caractérisées par des accélérations identiques, mais les périmètres des zones les plus sismiques étaient moins étendus que dans la norme actuelle SIA 261.

**Figure 12** > Carte des zones d'aléa sismique de Suisse

*La norme SIA 261 (2003) subdivise la Suisse en quatre zones d'aléa sismique.*



A l'intérieur d'une zone d'aléa sismique, l'aléa sismique local varie en fonction de la nature du sol de fondation sur le site de l'ouvrage. D'une manière générale, plus le sol est mou, plus l'aléa sismique local est élevé, notamment dans les basses fréquences. La norme SIA 261 distingue cinq **classes de sol de fondation** A à E, correspondant à des actions sismiques différentes, ainsi qu'une sixième classe F, comprenant les dépôts organiques et à structure sensible, qui nécessitent une étude dynamique du sol du site (tableau 2).

La norme SIA 160 de 1970 ne classait pas les sols de fondation. La norme SIA 160 de 1989 assignait des spectres de réponse différents à deux classes de sols de fondation (sols compacts et semi-compacts). Sur les sols lâches formés de dépôts postglaciaires faiblement consolidés, une investigation particulière était demandée pour déterminer les valeurs spectrales.

**Tableau 2 > Classes de sols de fondation dans les normes SIA**

*Classes de sols de fondation selon les normes SIA 160 (1989) et SIA 261 (2003), utilisées pour déterminer l'action sismique.*

| Classes de sol de fondation selon SIA 160 (1989) |                                                                                                                                                                                                                               | Classes de sol de fondation selon SIA 261 (2003) |                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sols compacts                                    | Massifs rocheux, éboulis et moraines compacts, graviers et sables compacts caractérisés par des ondes de cisaillement de vitesse supérieure à 800 m/s, sous une couverture de terrain meuble d'une épaisseur maximale de 10 m | A                                                | Roche dure (p. ex. granite, gneiss, quartzite, calcaire siliceux, calcaire) ou roche tendre (p. ex. grès, Nagelfluh, marne jurassique, argile à opalinus), sous une couverture de terrain meuble d'une épaisseur maximale de 5 m |
|                                                  |                                                                                                                                                                                                                               | B                                                | Dépôts étendus de sable et de gravier cimentés et/ou sol préconsolidé d'une épaisseur supérieure à 30 m                                                                                                                          |
| Sols semi-compacts                               | Limons, sables et graviers lâches à moyennement compacts, et argiles moyennement compactes à compactes, d'une épaisseur supérieure 10 m                                                                                       | C                                                | Dépôts de sable et gravier normalement consolidés et/ou matériau morainique d'une épaisseur supérieure à 30 m                                                                                                                    |
|                                                  |                                                                                                                                                                                                                               | D                                                | Dépôts de sable fin non consolidé, de limon et d'argile d'une épaisseur supérieure à 30 m                                                                                                                                        |
|                                                  |                                                                                                                                                                                                                               | E                                                | Couche alluviale superficielle des classes de sols de fondation C ou D, d'une épaisseur de 5 à 30 m, reposant sur une couche plus compacte des classes de sols de fondation A ou B                                               |
| Sols lâches                                      | Sols lâches formés de dépôts postglaciaires faiblement consolidés, tels que craies lacustres ou argiles d'une épaisseur supérieure à 10 m                                                                                     | F                                                | Dépôts à structure sensible et organiques (p. ex. tourbe, craie lacustre, masses glissées) d'une épaisseur supérieure à 10 m                                                                                                     |

D'après la norme SIA 261 (2003) actuellement en vigueur, l'action sismique peut, pour le domaine des basses fréquences, différer autant entre les classes de sol de fondation dans une même zone d'aléa sismique qu'entre les quatre zones d'aléa de Suisse. Ainsi, l'action sismique subie par un ouvrage bâti sur un terrain meuble en zone faiblement sismique Z1 peut être aussi grande que sur un site rocheux de la zone la plus sismique Z3b.

Pour déterminer la classe d'un sol de fondation selon la norme SIA 261, on peut consulter la carte interactive sur le site web de l'Office fédéral de l'environnement, à

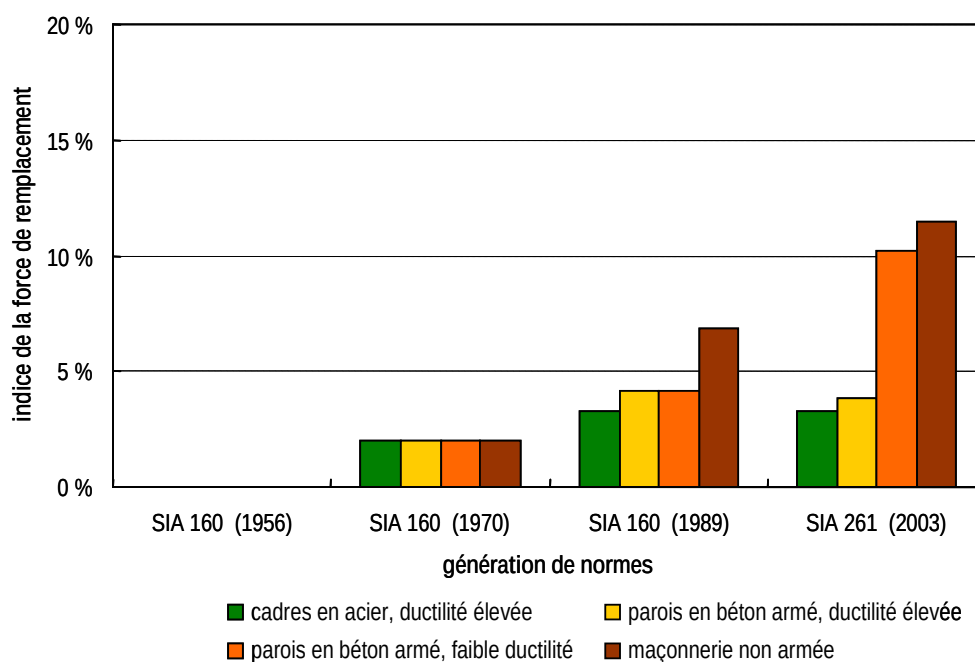
l'adresse [www.environnement-suisse/seismes](http://www.environnement-suisse/seismes) > L'aléa sismique en Suisse > Effets de la géologie du site.

Les facteurs influençant le plus l'action sismique à prendre en considération sont le **mode de construction** et le **comportement dynamique de l'ouvrage**. Ce sont eux qui ont subi le plus de modifications d'une génération de normes à l'autre, pour tenir compte des développements en génie parasismique.

Si la première génération de normes parasismiques de 1970 préconisait d'appliquer les mêmes forces sismiques à tous les modes de construction, les nouvelles connaissances sur le comportement ductile des structures porteuses ont permis de mieux différencier cet aspect dans les générations de normes suivantes (figure 13). A titre de comparaison, la figure 13 expose l'indice de la force de remplacement – c'est-à-dire le rapport entre la force sismique horizontale à prendre en considération et le poids déterminant du bâtiment – selon les quatre dernières générations de normes, pour divers modes de construction. Le graphique porte sur un bâtiment rigide horizontalement, situé dans la zone d'aléa sismique Z1, fondé sur un sol de la classe C, dont la période de vibration fondamentale se trouve dans le domaine d'accélération maximale (valeur de plateau) du spectre de dimensionnement.

**Figure 13 > Action sismique agissant sur les bâtiments selon les générations de normes SIA**

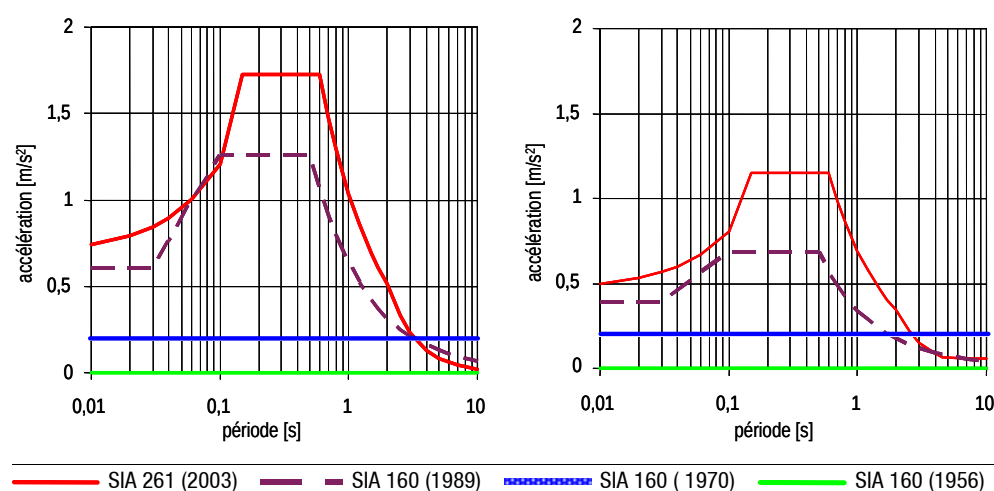
*Evolution de l'action sismique à prendre en considération selon les quatre dernières générations de normes, pour différents modes de construction, illustrée par la force de remplacement horizontale exprimée en pour-cent du poids du bâtiment (indice de la force de remplacement). Le graphique porte sur un bâtiment rigide horizontalement, situé dans la zone d'aléa sismique Z1 et fondé sur un sol de la classe C.*



Comme autre base de comparaison, la figure 14 expose les spectres de réponse en accélération pour un bâtiment en maçonnerie non armée, situé dans la zone d'aléa sismique Z1 et fondé sur un sol de la classe C, pour les différentes générations de normes. L'illustration présente à gauche les spectres de réponse pour un comportement élastique et à droite les spectres de dimensionnement pour la maçonnerie non armée. Les spectres de dimensionnement sont inférieurs aux spectres de réponse élastique, car on peut admettre une réserve de portance au-delà de la résistance nominale due à la surrésistance et à une certaine ductilité des matériaux.

**Figure 14 > Evolution des spectres de réponse selon les générations de normes SIA**

*Comparaison entre les spectres de réponse en accélération pour un comportement élastique (à gauche) et les spectres de dimensionnement pour la maçonnerie non armée (à droite), dans la zone d'aléa sismique faible Z1 et sur un sol de la classe C (semi-compact), pour les quatre dernières générations de normes.*



L'augmentation notable de l'action sismique dans les nouvelles normes est surtout marquée pour les périodes de vibration de 0,1 à 2,0 s, qui correspondent principalement aux bâtiments de un à six étages rigides horizontalement. Pour les bâtiments plus élevés, dont la période de vibration est supérieure à 3 s, l'action sismique a plutôt diminué. Il est à noter également une augmentation particulièrement marquée de l'action sismique affectant la maçonnerie non armée, tandis que cette augmentation est relativement faible pour les modes de construction parasismiques ductiles, par exemple en acier ou en béton armé ductiles.

## A2 Coût des confortements parasismiques décrits dans le recueil d'exemples

Le coût du confortement parasismique varie considérablement d'un cas à l'autre. Pour permettre une comparaison, les caractéristiques des 24 projets de confortement présentés sont reportées dans le tableau 3, par ordre décroissant selon le coût relatif des mesures de confortement, exprimé en pour-cent de la valeur de l'ouvrage.

**Tableau 3 > Coût du confortement parasismique**

*Caractéristiques des exemples de confortement parasismique, classées par ordre décroissant selon le coût relatif des mesures de confortement, exprimé en pour-cent de la valeur de l'ouvrage.*

| Ouvrage                                        | CO  | Zone | $\alpha_{eff}$ | $\alpha_{int}$ | Coût en % de la valeur de l'ouvrage |
|------------------------------------------------|-----|------|----------------|----------------|-------------------------------------|
| Bâtiment de police à Sion (VS)                 | III | Z3b  | 0,2            | 1,0            | 29 %                                |
| Caserne de pompiers à Bâle                     | III | Z3a  | 0,2            | 1,0            | 23 %                                |
| Réservoir de gaz liquide à Viège (VS)          | III | Z3b  | 0,2            | 1,0            | 12 %                                |
| Bâtiment de l'ESC à Monthey (VS)               | II  | Z3a  | 0,15           | 0,8            | 11 %                                |
| Gymnase Friedberg à Gossau (SG)                | II  | Z1   | 0,3            | 1,0            | 10 %                                |
| Bâtiment du CO à Monthey (VS)                  | II  | Z3a  | 0,16           | 1,0            | 7,7 %                               |
| Immeuble avec centre commercial à Fribourg     | II  | Z1   | 0,5            | 1,0            | 7,4 %                               |
| Sous-station à Bâle                            | III | Z3a  | 0,3            | 1,0            | 5 %                                 |
| Clinique pédiatrique à Aarau                   | II  | Z1   | 0,1            | 1,0            | 4 %                                 |
| Immeuble résidentiel à Crans-Montana (VS)      | I   | Z3b  | 0,2            | 1,0            | 4 %                                 |
| Bâtiment administratif à St-Maurice (VS)       | II  | Z3a  | 0,17           | 0,7            | 3,5 %                               |
| Immeuble résidentiel et commercial à Sion (VS) | II  | Z3b  | 0,2            | 1,0            | 3 %                                 |
| Ecole à Zurich                                 | II  | Z1   | 0,2            | 1,1            | 3 %                                 |
| Studio de radio à Zurich                       | II  | Z1   | 0,3            | 1,0            | 2,3 %                               |
| Immeuble avec centre commercial à Winterthur   | II  | Z1   | 0,2            | 1,0            | 2,2 %                               |
| Pont de la route du Simplon A9 (VS)            | II  | Z3b  | 0,1            | 1,0            | 2 %                                 |
| Bâtiment du service du feu à Viège (VS)        | III | Z3b  | 0,4            | 1,0            | 1,8 %                               |
| Bâtiment administratif EMPA à Dübendorf (ZH)   | II  | Z1   | 0,25           | 1,0            | 1,5 %                               |
| Hôtel à Bussigny (VD)                          | I   | Z1   | 0,12           | 1,0            | 0,7 %                               |
| Ecole à Ostermundigen (BE)                     | II  | Z1   | 0,24           | 0,5            | 0,7 %                               |
| Lycée Neufeld à Berne                          | II  | Z1   | 0,1            | 0,6            | 0,7 %                               |
| Bâtiment HPH de l'EPF Zurich                   | II  | Z1   | 0,25           | 1,0            | 0,7 %                               |
| Halle polyvalente à Oberdorf (NW)              | II  | Z2   | 0,1            | 1,0            | 0,5 %                               |
| Bâtiment administratif à Berne                 | II  | Z1   | 0,1            | (1,0)          | 0,4 %                               |

---

La fourchette des coûts varie entre 4 % et 29 %. Le tableau commence par trois ouvrages de la CO III situés dans les deux zones sismiques les plus élevées, qui doivent donc répondre aux exigences parasismiques les plus élevées en Suisse. Si l'on regroupe les ouvrages par classe et par zone, la fourchette des coûts relatifs des confortements parasismiques est ramenée aux valeurs suivantes:

- > CO III en zone Z3b: 2 - 29 %
- > CO III en zone Z3a: 5 - 23 %
- > CO II en zone Z3b: 2 - 3 %
- > CO II en zone Z3a: 3,5 - 11 %
- > CO II en zone Z2: 0,4 %
- > CO II en zone Z1: 0,4 - 10 %
- > CO I en zone Z3b: 4 %
- > CO I en zone Z1: 0,7 %

Cette grande variabilité indique manifestement que les coûts dépendent beaucoup plus des contraintes techniques posées aux divers types de confortements parasismiques que de l'ampleur de l'action sismique considérée. Les objets avec les coûts les plus faibles ont subi des interventions locales et limitées, consistant par exemple à refermer un seul joint de dilatation ou à contreventer un seul étage. Si des nouveaux éléments porteurs sont nécessaires sur toute la hauteur d'un bâtiment, les coûts augmentent considérablement, même dans la zone la moins sismique Z1. Une nette augmentation des coûts est aussi observée lorsque les fondations doivent également être renforcées.

# > Index

## Abréviations

### SIA

Société suisse des ingénieurs et des architectes.

## Glossaire

### Capacité de déformation

Déformation susceptible d'être supportée par un élément de construction ou par une structure porteuse avant que cet élément de construction ou cette structure porteuse n'ait atteint son état limite ultime nominal.

### Classe d'ouvrage (CO)

Caractérisation schématique des bâtiments selon la norme SIA 261, qui prend en compte un danger similaire pour les personnes, l'importance de l'ouvrage pour la collectivité et le risque d'atteinte à l'environnement lorsque l'ouvrage est endommagé.

### Courbe de capacité

Force de rappel d'un oscillateur simple équivalent en fonction de son déplacement relatif.

### Coûts de sauvetage

Rapport entre les coûts de sécurité imputables à une intervention et la diminution du risque, exprimé en francs par vie sauvée.

### Ductilité

Mesure de la dissipation d'énergie par un élément de construction et de sa capacité de déformation plastique, exprimée, lorsqu'elle se réfère à une valeur en déplacement ou en déformation, par le rapport entre la valeur maximale et la valeur au début de la plastification.

### Exigibilité

Garantie d'utilisation efficace des moyens à disposition sous condition d'une obligation de réduction du risque individuel.

### Facteur de conformité ( $\alpha_{eff}$ )

Valeur numérique indiquant dans quelle mesure une structure porteuse existante satisfait aux vérifications numériques auxquelles les nouvelles constructions sont soumises.

### Occupation

Nombre de personnes séjournant dans un ouvrage ou dans la zone susceptible d'être atteinte par les décombres de celui-ci.

## Proportionnalité

Garantie d'utilisation efficace des montants investis pour réduire le risque global en limitant le risque individuel.

## Risque individuel

Mesure du risque encouru par une personne, exprimé par la probabilité annuelle de décès.

## Figures

### Figure 1

Evolution des forces de dimensionnement horizontales agissant sur un immeuble typique 10

### Figure 2

Parc immobilier de Suisse 11

### Figure 3

Points faibles typiques vis-à-vis du comportement sismique 12

### Figure 4

Illustration des trois classes d'ouvrages selon la norme SIA 261 13

### Figure 5

Recommandation d'intervention parasismique selon le cahier technique SIA 2018 15

### Figure 6

Améliorer la régularité 18

### Figure 7

Courbes de capacité pour la stratégie «Renforcer» 19

### Figure 8

Courbes de capacité pour la stratégie «augmenter la ductilité» 19

### Figure 9

Courbes de capacité pour la stratégie «affaiblir» 20

### Figure 10

Courbes de capacité pour la stratégie «réduire les actions sismiques par amortissement» 21

### Figure 11

Emplacement des exemples 23

### Figure 12

Carte des zones d'aléa sismique de Suisse 76

**Figure 13**

Action sismique agissant sur les bâtiments selon les générations de normes SIA 78

**Figure 14**

Evolution des spectres de réponse selon les générations de normes SIA 79

**Tableaux****Tableau 1**

Evolution des paramètres appliqués dans les normes SIA pour déterminer les actions sismiques 75

**Tableau 2**

Classes de sols de fondation dans les normes SIA 77

**Tableau 3**

Coût du confortement parasismique 80

**Liste bibliographique**

Bachmann H., Wenk T. (2000):  
Schwächen statt Verstärken bei der Erdbebensanierung, Schweizer Ingenieur und Architekt (SI+A), Nr. 3, Zürich.

Bachmann H. (2007a):  
Erdbeben mit speziellen Lagern sanft bändigen, Neue Zürcher Zeitung, Forschung und Technik, Nr. 295, 19. Dezember 2007.

Bachmann H. (2007b):  
Erdbeben im Glattalgraben? Heimatbuch Dübendorf 2007, 83-94.

Bachmann H. (2007c):  
Notre maison est-elle parasismique? Dépliant de la Fondation pour la dynamique des structures et le génie parasismique, Dübendorf, et de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.

Bachmann H., Zachmann A. (2008):  
Schwimmende Lagerung. Tec 21, Heft. 35/2008 26-28, Zürich

Borgogno W. (2001):  
Erdbebenertüchtigung eines Hochhauses. Tec21, Schweizer Ingenieur und Architekt (SI+A), Nr. 36, Zürich.

DFF (2008):  
Directives sur la mitigation des séismes, à l'intention des membres de la Coordination des services fédéraux de la construction et de l'immobilier (KBOB) du 18 janvier 2008. Département fédéral des finances, Berne.

Eurocode 8 (2005):

Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 3: Evaluation et modernisation des bâtiments. Norme européenne EN 1998-3, Bruxelles.

Favre R. (1971):

Baubeschreibung des SIA-Hauses – Bauingenieurprobleme. Schweizerische Bauzeitung, Vol. 89, Heft 25, Zürich.

Garcia-Vogel R. (2005):

Bâtiments en béton armé des années 60. UNIP – Sion. Journée d'étude «Sécurité parasismique des bâtiments: Aspects techniques, juridiques et bancaires», Sion.

Koller M.G. (2000):

Beispiele zur Anwendung der Kapazitätsbemessung für die Erdbebenertüchtigung von Gebäuden. SIA-Dokumentation D 0162, Erdbebenvorsorge in der Schweiz, Massnahmen bei neuen und bestehenden Bauwerken, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.

Koller M.G., Vögtli H., Schwegler G. (2008):

Verstärktes Unterwerk. Tec 21, Heft 35/2008 29-31, Zürich.

Lateltin E. (2003):

Assainissement du complexe de Beauregard-Centre à Fribourg. Documentation du colloque fribourgeois sur le génie parasismique du 5 novembre 2003. ECAB, Fribourg.

OFEG (2005a):

Evaluation de la sécurité parasismique des bâtiments existants – Concept et directives pour l'étape 1 (2<sup>e</sup> édition). Directives de l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Bienne, [www.bafu.admin.ch/erdbeben](http://www.bafu.admin.ch/erdbeben).

OFEG (2005b):

Evaluation de la sécurité parasismique des bâtiments existants – Concept et directives pour l'étape 3. Directives de l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Bienne, [www.bafu.admin.ch/erdbeben](http://www.bafu.admin.ch/erdbeben).

OFEG (2006):

Evaluation de la sécurité parasismique des bâtiments existants – Concept et directives pour l'étape 2 (2<sup>e</sup> édition). Directives de l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Bienne, [www.bafu.admin.ch/erdbeben](http://www.bafu.admin.ch/erdbeben).

OFS (2004):

Recensement fédéral de la population 2000: Bâtiments, logements et conditions d'habitation. Office fédéral de la statistique, Neuchâtel.

Paulay T., Priestley M.J.N. (1992):

Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. John Wiley & Sons, Chichester.

Peruzzi R., Schmid A. (2007):

Renforcer en transformant, Tracés, Bulletin technique de la Suisse romande n° 2/2007, Ecublens VD.

Schefer R., Zwicky P., Santschi R. (1995):

Verstärkung eines grossen Hörsaalgebäudes, Schweizer Ingenieur und Architekt (SI+A), Nr. 43, Zürich.

SIA 160 (1970):

Norme SIA 160: Normes concernant les charges, la mise en service et la surveillance des constructions. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich.

SIA 160 (1989):

Norme SIA 160: Actions sur les structures porteuses. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich.

SIA 260 (2003):

Norme SIA 260: Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich.

SIA 261 (2003):

Norme SIA 261: Actions sur les structures porteuses. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich.

SIA 2018 (2004):

Cahier technique SIA 2018: Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich.

SIA D 0211 (2005):

Documentation SIA D 0211: Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants. Introduction au cahier technique SIA 2018. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich.

Truffer Ph., Fischli F., Rosati F., Berset Th., Schwegler G. (2004):

Sicherung mit vorgespannten CFK-Lamellen. Baublatt Nr. 29, Rüslikon ZH.