

# Sécurité sismique des éléments non-structuraux et autres installations et équipements

Recommandations et précisions pour la pratique. État 2023



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

# **Sécurité sismique des éléments non-structuraux et autres installations et équipements**

Recommandations et précisions pour la pratique. État 2023

# Impressum

La deuxième édition de cette documentation tient compte des contenus révisés de la norme SIA 261 (2020). Le chapitre 3 contient quelques précisions concernant les démarches recommandées, basées sur leur application dans la pratique. Les annexes, tout comme les références bibliographiques, ont été mises à jour.

## Éditeur

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

## Auteurs

Friederike Braune, Office fédéral de l'environnement ;  
Tadeusz Szczesiak, Rudolf Vogt, Angelo Berweger,  
ACS-Partner AG, Zürich

## Accompagnement

La Centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'OFEV remercie particulièrement les personnes suivantes de leur soutien et de leur étroite collaboration pour la première édition :

Andreas Beer, HALFEN AG Deutschland; Markus Christen, Werner Keller Technik AG, Dallenwil; Olivier Galetti, ancien architecte cantonal du Valais, Sion; Martin Jordi, AEAI Association des établissements cantonaux d'assurance incendie, Berne; Peter Lindenberg, AGB Bautechnik Aktiengesellschaft, Strengelbach; Ivan de Marsano, MDI Ingénieurs Conseils Sarl, Carouge; Dirk Pelka, Armstrong Metaldecken AG, St. Gallen; Fritz Scheidegger, HILTI AG, Adliswil/Zürich; Markus Schmid, Feroplan Fassaden, Chur; Heinz Spycher, HALFEN Swiss AG, Winterthur; Staudinger Michael, HILTI AG; Thomas Wenk, Wenk Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik GmbH, Zürich

## Accompagnement à l'OFEV

Blaise Duvernay, Sven Heunert

## Référence bibliographique

OFEV (éd.) 2023 : Sécurité sismique des éléments non-structuraux et autres installations et équipements. Recommandations et précisions pour la pratique. 1<sup>re</sup> édition actualisée 2023. 1<sup>re</sup> parution 2016. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 1643 : 90 p.

## Traduction

Pierre Grandjean, Venthône

## Mise en page

Funke Lettershop AG

## Photo de couverture

Fixation murale parasismique d'une armoire de commande, alimentation électrique © OFEV

## Crédit photographique

Voir annexe « Répertoire »

## Téléchargement au format PDF

[www.bafu.admin.ch/uw-1643-f](http://www.bafu.admin.ch/uw-1643-f)

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

Cette publication est également disponible en allemand.

La langue originale est l'allemand.

1<sup>re</sup> édition actualisée 2023 ; 1<sup>re</sup> parution 2016

© OFEV 2023

# Table des matières

<u>Abstracts</u>	5	<u>Abréviations</u>	101
<u>Préface</u>	7	<u>Crédits photographiques</u>	102
<u>Introduction</u>	8		
<u>1 Phénomènes et dommages survenant lors d'un séisme</u>	10		
1.1 Phénomènes sismiques et causes des dommages	10		
1.2 Étendue et conséquences des dommages	15		
<u>2 Indications et exemples concrets relatifs à la sécurisation parasismique des ENIE</u>	XIX		
<u>3 Exigences, responsabilités et démarches recommandées en vue de limiter les dommages</u>	64		
3.1 Exigences normatives et volontaires	64		
3.2 Responsabilités et compétences	65		
3.3 Démarches recommandées pour limiter les dommages (réduction du risque)	67		
<u>Annexes</u>	71		
<u>A1 Formulaire de saisie</u>	71		
<u>A2 Matrice des responsabilités</u>	74		
<u>A3 Éléments de texte pour la documentation de projet</u>	76		
<u>A4 Procès-verbal de réception</u>	78		
<u>A5 Exemple de calcul et tableaux d'aide</u>	79		
<u>Bibliographie</u>	95		
<u>Glossaire</u>	98		
<u>Répertoire</u>	101		

---

# Abstracts

This publications is an introduction to seismic protection of nonstructural elements and further installations and equipment. It addresses primarily architects, mechanical (HVAC) and electrical engineers as well as building owners. Structural engineers will also find useful information on how the seismic safety of these building components can be achieved. The main part of the publication illustrates and explains security measures for usual components. These explanations are supplemented by typical damage illustrations and tips on how to reduce the potential damage. The overall purpose of the publication is to help building professionals to identify the potential seismic risk related to such components as well as to design and implement sound measures that lead to reduced damage.

La présente publication est une introduction à la thématique de la sécurité sismique des éléments non-structuraux et autres installations et équipements. Elle s'adresse en premier lieu aux architectes, aux ingénieurs spécialisés dans la technique du bâtiment, la construction de machines et l'électrotechnique ainsi qu'aux propriétaires immobiliers. Les ingénieurs civils y trouveront également des informations utiles sur la manière dont la sécurité sismique de ces éléments peut être réalisée. Le corps du présent document passe en revue et commente les mesures de sécurité appropriées aux éléments usuels. Des images de dommages caractéristiques dus à des séismes complètent ces commentaires, de même que des suggestions spécifiques quant à la manière de réduire ces dommages. Dans l'ensemble, cette publication a pour but d'aider les spécialistes à identifier les risques sismiques liés à ces éléments en vue d'étudier et de mettre en œuvre des mesures permettant de réduire judicieusement les dommages.

Diese Publikation bietet eine Einführung in das Thema Erdbebensicherheit von sekundären Bauteilen und weiteren Installationen und Einrichtungen. Sie richtet sich primär an Fachpersonen aus der Architektur, der Gebäudetechnik, des Maschinenbaus und der Elektrotechnik sowie an Gebäudeeigentümern. Ebenso finden Bauingenieurinnen und Bauingenieure wertvolle Informationen, wie die Erdbebensicherheit dieser Gebäudeelemente erreicht werden kann. Im Hauptteil werden Sicherheitsmaßnahmen für gängige Elemente dargestellt und erläutert. Typische Schadensbilder und besondere Hinweise zur Schadensreduktion ergänzen jeweils die Ausführungen. Im Gesamten gibt diese Publikation Fachleuten eine Hilfestellung, die Erdbebenrisiken solcher Gebäudeelemente zu erkennen, um sinnvolle Massnahmen zur Schadensreduktion zu planen und umzusetzen.

**Keywords:**

*nonstructural elements,  
installations, equipment,  
seismic protection*

**Mots-clés :**

*éléments non-structuraux,  
installations, équipements,  
sécurité sismique*

**Stichwörter:**

*sekundäre Bauteile,  
Installationen,  
Einrichtungen,  
Erdbebensicherheit*

---

La presente pubblicazione introduce la protezione sismica dei elementi non strutturali ed altri impianti ed apparecchiature. Si rivolge principalmente ad architetti, ad ingegneri meccanici ed elettrotecnici nonché a proprietari d'edifici. Anche gli ingegneri civili trovano informazioni utili come accedere la sicurezza sismica di questi pezzi e componenti. La parte principale della pubblicazione presenta e spiega misure di sicurezza di componenti comuni. Le spiegazioni sono completate con danni tipici e indicazioni particolari come ridurre il potenziale rischio sismico. In totale. Questa pubblicazione assiste i specialisti ad identificare i rischi sismici di tali elementi ed a pianificare e realizzare misure significative per ridurre danni potenziali.

**Parole chiave:**

*elementi non strutturali,  
impianti, apparecchiature,  
protezione sismica*

---

# Préface

Depuis l'introduction des normes suisses de structures porteuses de la SIA en 2003, la sensibilisation au risque sismique s'est nettement accrue. Toutefois, les projets de construction concernant les bâtiments neufs ou existants se concentrent en premier lieu sur l'aspect parasismique de la structure porteuse. Les exigences normatives en matière de sécurité sismique pour les autres éléments de construction et le contenu des bâtiments ne sont guère prises en compte, bien que ceux-ci représentent généralement entre 60 % et 80 % du coût total d'un bâtiment et qu'ils soient à l'origine d'une grande partie des dommages matériels directs et des dommages indirects suite aux séismes.

Les normes SIA sur les structures porteuses formulent des exigences en matière de sécurité sismique pour les éléments de construction de tous les ouvrages qui peuvent mettre en danger des personnes ou endommager la structure porteuse. Des exigences supplémentaires s'appliquent aux éléments de construction des ouvrages des classes d'ouvrage II et III qui peuvent porter préjudice au fonctionnement d'installations importantes ou vitales, endommager des équipements de grande valeur, ou menacer l'environnement.

Il existe plusieurs raisons pour lesquelles la pratique ne considère que peu le problème de la sécurité sismique des éléments non-structuraux et autres installations et équipements (ENIE). L'ampleur des dommages possibles est peu connue et sous-estimée, de même que la nécessité de s'en prémunir. Les responsabilités en matière de planification d'ENIE parasismiques ne sont pas toujours clairement définies. Pour de nombreux responsables de projet, il n'est pas clair quels ENIE doivent être considérés et comment leur sécurité sismique peut être évaluée et améliorée. Il manque également des exemples parlants de mesures de sécurité sismique simples et efficaces.

Avec la présente publication, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) souhaite favoriser une prise de conscience concernant les dommages potentiels liés aux ENIE et les conséquences de leur défaillance ou de leur destruction. La publication s'adresse à tous les acteurs de la pratique qui planifient et réalisent des ENIE ou leurs supports, allant des maîtres d'ouvrage aux professionnels spécialisés en passant par les entreprises. Elle montre quelles sont les possibilités efficaces de sécuriser les ENIE face aux séismes et de réduire ainsi les dommages potentiels. Enfin, elle aide à planifier et à réaliser la sécurité sismique des ENIE de manière transparente et ciblée en proposant des démarches, des instruments d'aide et des éléments de texte pour les projets de construction.

Paul Steffen, directeur suppléant  
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

---

# Introduction

## Définitions

En général, un ouvrage est constitué d'une structure porteuse et d'éléments de construction, qui ne font pas partie de la structure porteuse, et qui sont réunis sous le terme générique d'éléments non-structuraux et autres installations et équipements (**ENIE**).

Selon la norme technique SIA 260 [23], la structure porteuse proprement dite est « l'ensemble formé des éléments de construction et du terrain de fondation, nécessaire pour garantir l'équilibre et la conservation de la forme d'un ouvrage ». La structure porteuse résiste aux charges de poids propre, au vent, aux séismes et à d'autres actions; elle se compose typiquement des éléments de construction suivants :

- éléments porteurs horizontaux (poutres, treillis, dalles d'étage et toiture)
- éléments porteurs verticaux (colonnes ou piliers, murs porteurs)
- éléments de contreventement verticaux (murs porteurs, treillis, cadres)
- fondation, soit superficielle (radier, fondations isolées et semelles filantes) soit profonde (pieux)

En principe, la structure porteuse est étudiée par un ou une ingénieur civil en conformité avec les normes SIA sur les structures porteuses.

Selon la norme SIA 261 [24], **les éléments non-structuraux** sont définis comme éléments de construction **ne faisant pas partie de la structure porteuse**, par exemple :

- éléments de façade et parois ne servant ni à reprendre les charges verticales ni à renforcer horizontalement la structure porteuse
- couvertures
- revêtements et chapes
- cloisons et doublages
- balustrades
- barrières
- parapets et bordures
- plafonds suspendus
- isolations et étanchéités

et comme **équipements fixes** tels que :

- ascenseurs et escaliers roulants
- installations techniques sanitaires, de chauffage, de ventilation et de climatisation
- installations électriques
- conduites sans leur contenu
- gaines et chemins de câbles

---

Pour les ENIE, il y a lieu de considérer en particulier le chiffre 16.7.1 de la norme SIA 261 [24] qui précise pour tous les ouvrages que si, en cas de défaillance, des éléments de construction non-structuraux peuvent mettre en danger des personnes ou endommager la structure porteuse, il est nécessaire de vérifier la sécurité structurale de la situation de dimensionnement Séisme tant pour l'élément de construction lui-même que pour ses assemblages, ses fixations ou ses ancrages. Les mêmes exigences s'appliquent pour les éléments de construction non-structuraux d'ouvrages des classes d'ouvrage II et III dont la défaillance peut porter préjudice au fonctionnement d'installations importantes ou vitales, endommager des équipements de grande valeur, ou menacer l'environnement.

Dans la présente publication, le groupement des **éléments non-structuraux et autres installations et équipements (ENIE)** permet de traiter la grande majorité des éléments du bâtiment pouvant être pertinents dans le contexte de la sécurité sismique. Outre les éléments mentionnés plus haut, il s'agit notamment des planchers surélevés, des portes et fenêtres, des panneaux, enseignes et avant-toits, des systèmes d'éclairage et, enfin, du mobilier.

## Sommaire

- *Le chapitre 1* décrit le comportement des ENIE lors d'un séisme et les conséquences de leur endommagement ou de leur destruction.
- Le chapitre 2 rassemble des indications et des exemples concrets concernant la sécurisation des ENIE.
- *Le chapitre 3* traite des conditions cadres normatives et juridiques ainsi que des responsabilités qui en découlent. Par ailleurs, ce chapitre expose des considérations de portée générale sur la réduction des risques. Enfin, il présente des instruments à appliquer dans une démarche structurée.

Les annexes réunissent les aides pratiques suivantes :

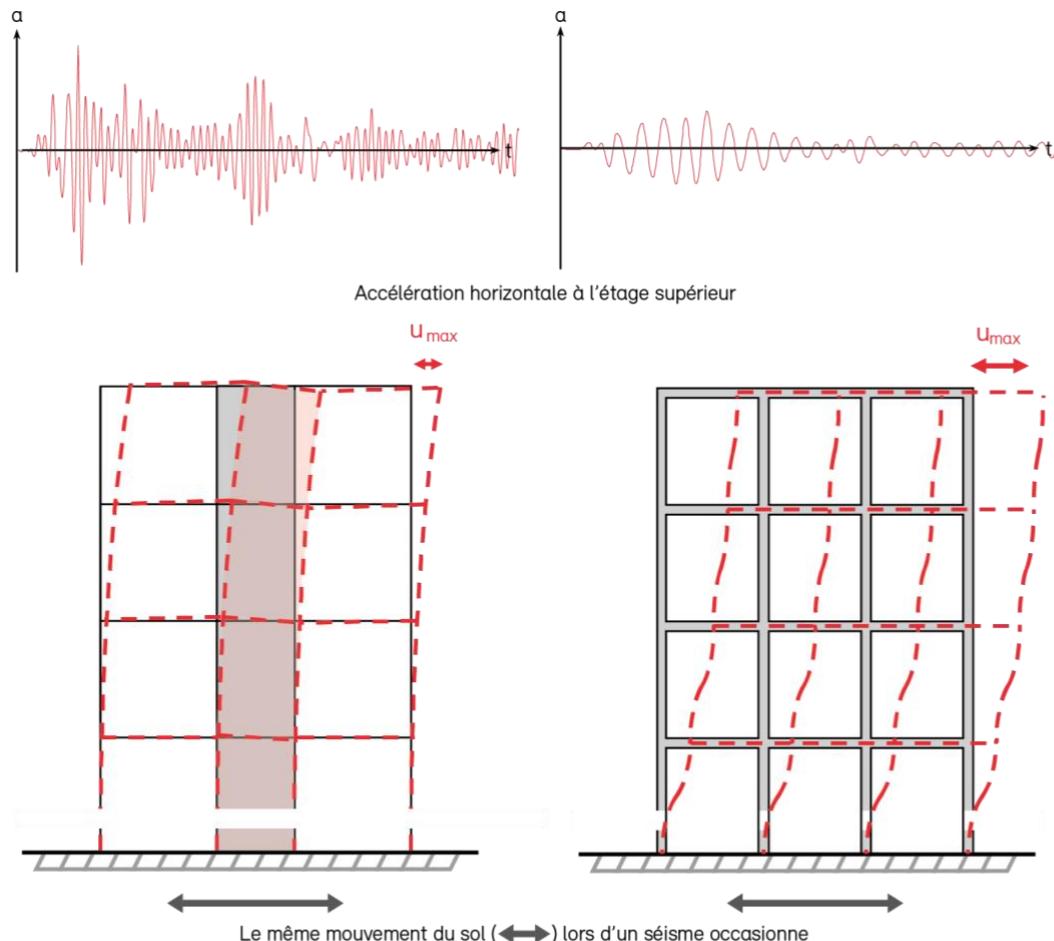
- Formulaire de saisie
- Matrice des responsabilités
- Éléments textuels pour la documentation de projet
- Procès-verbal de réception
- Exemple de calcul et tableaux d'aide.

# 1 Phénomènes et dommages survenant lors d'un séisme

*Pour pouvoir réduire efficacement les dommages subis par des ENIE, il faut d'abord comprendre comment ces éléments se comportent pendant un séisme et quelles conséquences entraînent leur endommagement ou leur destruction.*

## 1.1 Phénomènes sismiques et causes des dommages

Un séisme provoque de rapides mouvements du sol (secousses) dans toutes les directions, avec généralement, une dominance des mouvements horizontaux (fig. 1.1). Le bâtiment, c'est-à-dire la structure porteuse et tous les autres éléments qui le constituent, est mis en vibration par les secousses du sol. Cela engendre un mouvement différent pour chacune des dalles d'étage. En général, ce sont les étages les plus élevés qui subissent les accélérations les plus fortes et les mouvements horizontaux de plus grande amplitude. C'est en revanche dans les étages inférieurs que les déformations différentielles horizontales entre les étages (déformation relative entre niveaux) sont en général les plus grandes. L'amplitude des mouvements de l'ouvrage et des déformations relatives entre les niveaux dépend non seulement des mouvements du sol, mais encore des propriétés de l'ensemble du bâtiment. Les bâtiments rigides dans le plan horizontal subissent des accélérations plus fortes et des déformations relatives entre leurs niveaux plus faibles que des bâtiments flexibles, qui eux, enregistrent de plus faibles accélérations, mais de plus grandes déformations relatives pour des mouvements identiques du terrain (voir aussi [2]).

**Fig. 1.1 : Comportement d'un bâtiment en fonction de la rigidité de sa structure porteuse**

dans un bâtiment plus rigide (avec murs porteurs):  
une vibration horizontale de moins grande amplitude  
mais plus rapide  
→ de plus petites déformations et de  
plus grandes accélérations horizontales

dans un bâtiment plus flexible (cadre autoportant):  
une vibration horizontale de plus grande amplitude  
mais moins rapide  
→ de plus grandes déformations et de plus petites  
accélérations horizontales

L'effet des mouvements d'un ouvrage sur les ENIE dépend fortement de l'ensemble de l'ouvrage. Mais l'emplacement des ENIE dans le bâtiment joue lui aussi un rôle important. Il s'ensuit que des ENIE identiques mais situés à des étages différents peuvent nécessiter des mesures de sécurisation différentes.

En principe, quatre phénomènes peuvent endommager des ENIE.

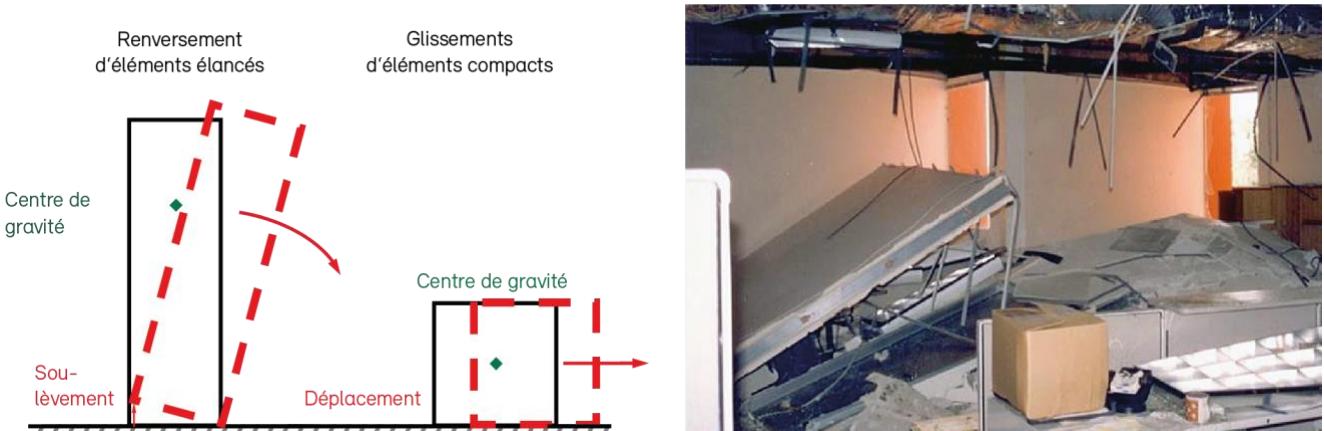
### 1.1.1 Les forces d'inertie (effets de secousses)

Sous l'action d'un séisme, les éléments pas ou insuffisamment fixés peuvent glisser, osciller, se renverser ou impacter d'autres objets (fig. 1.2).

Les éléments sont exposés à des forces d'inertie. Du fait des accélérations de l'ouvrage, même des mouvements relativement faibles peuvent générer des forces d'inertie significatives. Ce phénomène est comparable à l'effet que l'on observe en tant que conducteur ou passager d'un véhicule subissant une forte accélération ou

décélération, lorsqu'on est plaqué contre le siège ou propulsé en avant. Les objets suspendus, les étagères simplement posées et leurs contenus peuvent alors être endommagés.

**Fig. 1.2 Cloisons renversées, éléments de plafond et luminaires tombés à terre, séisme de Northridge, 1994**

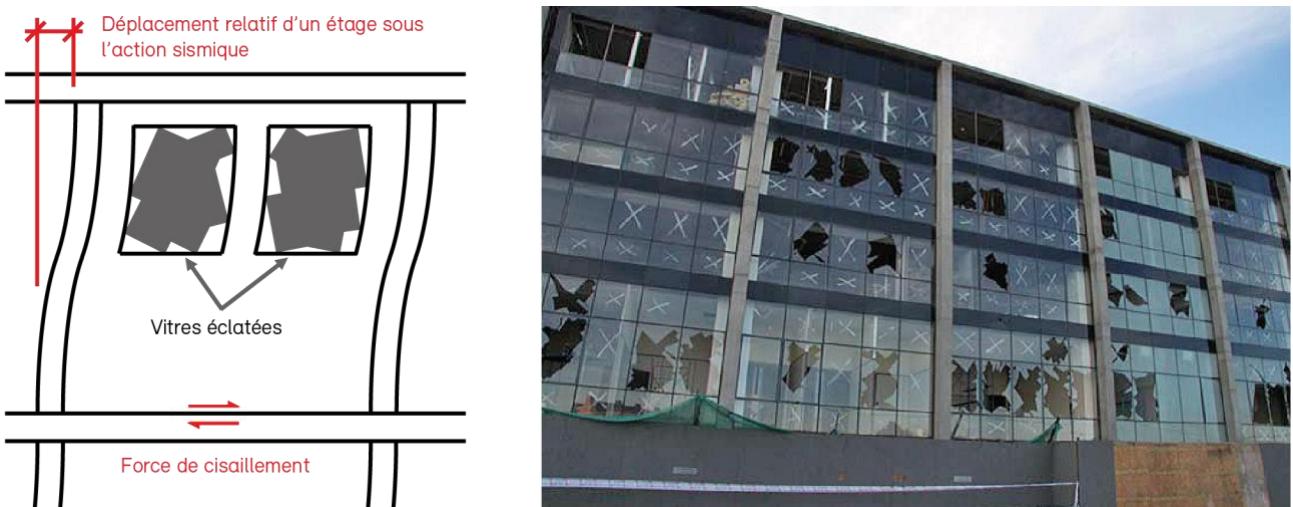


### 1.1.2 Les déformations de l'ouvrage

Les ENIE fixés à des éléments porteurs peuvent être endommagés par des déformations forcées (fig. 1.3). Ce sont les déformations de l'ouvrage causées par les mouvements différentiels entre dalles d'étage qui sont à l'origine de ces dommages. Il s'ensuit que les éléments de la structure porteuse se déforment. Lorsque, par exemple, une colonne s'incline sous l'action sismique, le cadre de fenêtre ou la cloison légère qui y sont fixés suivent ce mouvement.

Les éléments sensibles aux déformations, par exemple les cloisons, les grands éléments de fenêtre ou de façade montés sans joints, peuvent subir des dommages considérables à cause des déformations de l'ouvrage, et cela, même lors d'un séisme relativement faible.

**Fig. 1.3: Dommages subis par une façade vitrée, séisme au Chili, 2010**



---

L'exemple des poteaux de cadres entre lesquels sont montés des parapets ou des remplissages en maçonnerie qui empêchent une déformation des colonnes montre comment une structure porteuse peut être influencée défavorablement par un ENIE et, de ce fait, être endommagée (fig. 1.4). Le comportement différent de la structure porteuse et des ENIE sous action sismique ainsi que l'influence de l'endommagement des ENIE sur la structure porteuse expliquent que les éléments porteurs puissent être endommagés voire détruits.

**Fig. 1.4: Dommages à des colonnes causés par le remplissage en maçonnerie, Turquie, séisme de 1998**

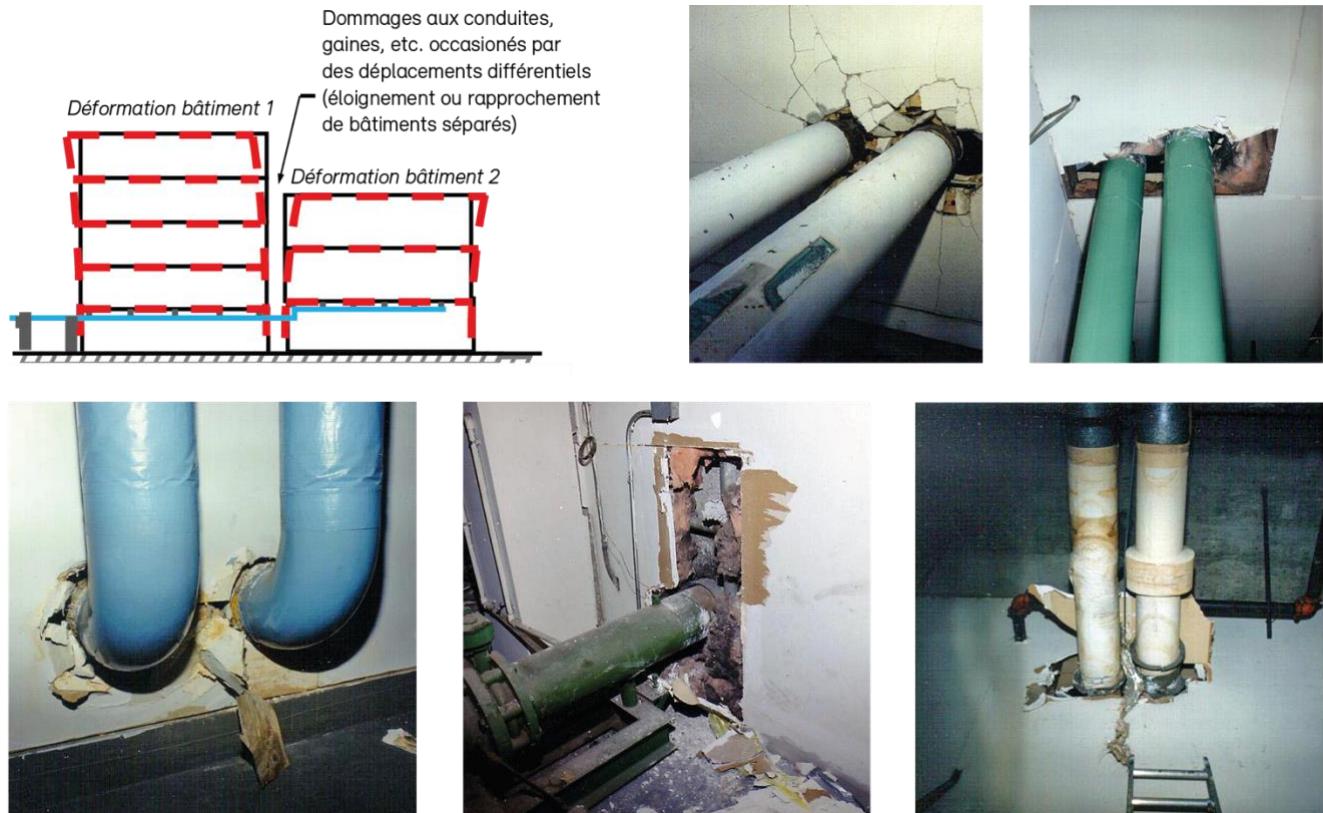


### 1.1.3 Les mouvements relatifs

Des ENIE, comme par exemple des conduites, courent fréquemment entre deux bâtiments (ou parties d'un bâtiment) ou entre un bâtiment et ses alentours (sous-sol), cela généralement au travers de joints (fig. 1.5). Il peut s'agir de joints de séparation entre des ouvrages indépendants, de joints de dilatation entre des parties d'un ouvrage ou de joints de raccordement (entrée/sortie) à l'ouvrage.

Des bâtiments voisins ou des parties d'un bâtiment peuvent présenter des systèmes porteurs différents et, par conséquent, réagir différemment face aux mouvements du sol lors d'un séisme; ils peuvent se rapprocher ou s'éloigner l'un de l'autre ou bouger différemment parallèlement aux joints. Les mouvements différentiels peuvent générer des efforts considérables sur les ENIE. Ceux-ci peuvent subir de gros dommages ou même être détruits.

**Fig. 1.5: Exemples de dommages subis par des conduites, murs et cloisons**



#### 1.1.4 Les interférences

Les interférences entre des ENIE voisins posent un autre problème. Les conduites de distribution d'eau des installations sprinkler, intégrées dans les plafonds suspendus, peuvent être endommagées à cause des mouvements des faux-plafonds et produire ainsi des fuites d'eau. Des conduites adjacentes peuvent se détacher et se heurter. Des installations techniques suspendues peuvent osciller et endommager des fenêtres ou des cloisons. Des plafonds suspendus peuvent chuter et bloquer des issues de secours.

## 1.2 Étendue et conséquences des dommages

Pour améliorer le comportement des ENIE lors de tremblements de terre par des mesures de sécurisation appropriées, il faut préalablement évaluer les conséquences de leur endommagement ou de leur destruction. On distingue à cet effet trois catégories de dommages : mise en danger de la vie humaine (dommages aux personnes), dégâts matériels et perte de fonction. À noter que l'endommagement ou la destruction d'une installation ou d'un équipement donné peut avoir des conséquences de gravité variable dans chacune de ces trois catégories de dommages. (fig. 1.6)

**Fig. 1.6: Étendue et conséquences des dommages**

À gauche: Batteries de secours menacées par les conduites d'eau qui les surplombent

À droite: Ecoulement des cuves endommagées et/ou renversées causant des dégâts matériels, Emilia-Romagna, 2012



### 1.2.1 Mise en danger de la vie humaine

La mise en danger de la vie ou de l'intégrité corporelle du fait de l'endommagement ou de la chute d'éléments est le critère le plus important (fig. 1.7). Nombreux sont les séismes, lors desquels des passants ont été tués par l'effondrement d'éléments de façades. Des éléments renversés ou effondrés menacent aussi la vie lorsqu'ils bloquent des chemins de fuite dans un bâtiment. De même, des objets apparemment inoffensifs de prime abord, comme des luminaires, peuvent également mettre en danger des personnes s'ils sont mal fixés.

Exemples pour des ENIE potentiellement mortels en cas de séisme :

- façades extérieures lourdes
- parois intérieures lourdes
- cheminées en maçonnerie non armée
- systèmes d'éclairage lourds
- faux-plafonds suspendus de grande taille ou lourds
- mobilier de haute taille, étroit et lourd tel que bibliothèques ou armoires d'archivage de dossiers
- vitrages
- récipients et conduites contenant des substances dangereuses

**Fig. 1.7: Mise en danger de la vie humaine**

*Façade tombée sur la terrasse d'une pizzeria, Emilia-Romagna, 2012*



### 1.2.2 Dommages matériels

Les dommages matériels résultent soit de l'endommagement ou de la destruction directs d'un ENIE, soit des dégâts causés par celui-ci (fig. 1.8). Si, par exemple, une conduite d'eau ou une installation sprinkler est endommagée, le dommage matériel résulte des frais de réparation (dommages directs) et des coûts occasionnés par les dégâts d'eau (dommages indirects).

Exemples pour des ENIE pouvant causer d'importants dommages matériels :

- systèmes de conduites suspendues (eau, protection incendie, etc.),
- cloisons,
- faux-plafonds suspendus,
- équipements non fixés ou mal fixés, en particulier éléments de toiture,
- conteneurs, citernes, etc.,
- rangées d'étagères.

**Fig. 1.8: Grands dommages matériels**

*Rangées d'étagères non fixées, renversées dans une entreprise d'électricité, Haïti, 2010*

**1.2.3 Perturbation de la fonction**

En plus de la mise en danger de la vie humaine et des dégâts matériels, la détérioration des ENIE peut massivement compliquer l'exploitation, voire la rendre impossible (fig. 1.9). Si, par exemple, un tremblement de terre détruit entièrement les équipements et les installations de bureaux d'une entreprise, la valeur de remplacement de ces éléments peut être relativement minime, alors que la perte de chiffre d'affaires consécutive à l'arrêt de l'exploitation, elle, peut se révéler considérable.

Exemples typiques de dommages pouvant provoquer une interruption ou une perte de la fonction :

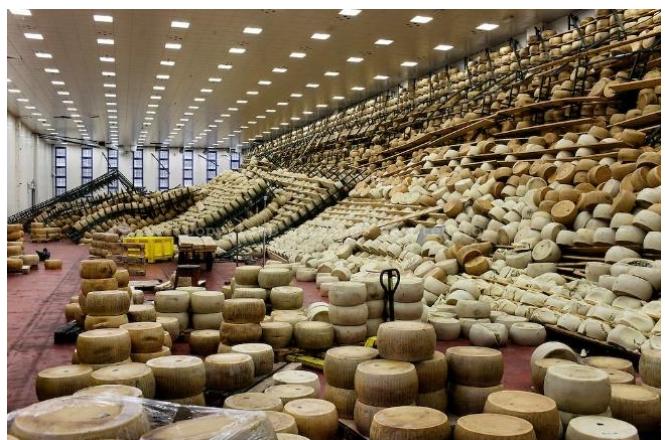
- dégât d'eau massif suite à des ruptures de conduites,
- coupure de courant consécutive à l'endommagement de la génératrice de secours ou de ses composants (batteries, amortisseur, vases d'expansion),
- détérioration d'équipements essentiels tels que centres de calcul, serveurs, commutateurs, systèmes de communication, systèmes d'éclairage ou ascenseurs,
- détérioration d'installations de stockage telles qu'étagères industrielles (en hauteur)

---

**Fig. 1.9: Interruption ou perte de fonction**

À gauche: Renversées dans une fabrique de papier, Izmit, 1999

À droite: Étagères industrielles renversées, Emilia-Romagna, 2012



## 2 > Indications et exemples concrets relatifs à la sécurisation parasismique des ENIE

*Les illustrations et les descriptions qui suivent ont pour but de faciliter la compréhension des points faibles et des dommages potentiels, de manière à permettre aux responsables d'un projet de définir et de mettre en œuvre des mesures de sécurisation appropriées. Elles sont fondées sur les dommages constatés sur des ENIE dans un grand nombre de séismes passés ainsi que sur les solutions de sécurisation (parfois standardisées) de tels éléments réalisées à l'étranger dans des régions exposées à un aléa sismique équivalent ou plus élevé.*

### 2.1 Intention

Comme décrit au chapitre précédent, le comportement des **ENIE** durant un séisme peut être très variable. Étant donné les nombreux paramètres en jeu, il n'est pas possible d'assurer une protection sismique totale des ouvrages et de leurs **ENIE**. Néanmoins, grâce aux mesures de sécurisation présentées ici, il est possible de réaliser des **ENIE** plus robustes et, par conséquent, d'améliorer la sécurité des usagers d'un ouvrage et de réduire sensiblement les dommages potentiels. La densité des **ENIE**, l'importance de leur fonction, et par conséquent, leur potentiel de danger varient fortement selon le type d'ouvrage et son usage. En même temps, des éléments identiques peuvent avoir à répondre à des exigences très différentes de limitation des dommages. Par exemple, une coupure d'eau consécutive à la rupture d'une conduite suite à un séisme aura des conséquences beaucoup plus graves dans un hôpital que dans une maison d'habitation. Suivant la situation, il sera donc possible d'appliquer des mesures techniques standard simples ou, au contraire, il sera nécessaire de recourir à l'expertise d'ingénieurs en génie parasismique.

La présente publication illustre, pour les **ENIE** les plus fréquents, les dangers découlant de dommages typiques ainsi que les méthodes de sécurisation applicables à titre préventif. Même si les auteurs ont cherché à traiter les **ENIE** les plus courants, la liste ci-dessous ne prétend pas être exhaustive. Ce document ne se substitue donc pas à l'étude technique des éléments de sécurisation par les différentes disciplines de la construction.

dommages typiques pour les  
**ENIE** les plus fréquents et  
méthodes de sécurisation  
applicables applicables à titre  
préventif

## 2.1.1 Structure

Les **éléments architecturaux** définissent la morphologie d'un ouvrage. Leur disposition et leur conception relèvent généralement de la compétence de l'architecte. Leur analyse détaillée peut requérir l'intervention de spécialistes:

- > Faux-plafonds suspendus
- > Planchers surélevés
- > Parois, remplissages
- > Systèmes de façades, doublages
- > Parapets (et balustrades)
- > Escaliers
- > Vitrages, portes, fenêtres
- > Panneaux, enseignes et avant-toits
- > Cheminées, toitures

Les **éléments techniques du bâtiment** comprennent les appareils et les installations techniques qui assurent le bon fonctionnement d'un ouvrage. L'étude du projet et la conception de ces éléments relèvent a priori de la compétence des ingénieurs en technique du bâtiment, construction de machines et électrotechnique:

- > Alimentation électrique de secours
- > Protection contre l'incendie
- > Coffrets et armoires de distribution et de commande
- > Transformateurs
- > Installations de climatisation
- > Citernes, chaudières, réservoirs
- > Conduites, gaines de ventilation, canaux de câbles
- > Eclairage
- > Ascenseurs
- > Amortisseurs et isolateurs de vibrations

Eléments architecturaux,  
éléments techniques et autres  
éléments contenus dans un  
bâtiment

Enfin, il y a les **autres éléments contenus dans un bâtiment**, qui ne sont pas planifiés par l'architecte, mais acquis par le propriétaire ou l'usager une fois le bâtiment achevé:

- > Appareils informatiques
- > Armoires, étagères
- > Etagères industrielles
- > Substances dangereuses
- > Objets d'art, décoration d'intérieur

## 2.1.2 Utilisation des exemples de mesures

Pour chacun des **ENIE** traités dans ce chapitre, les exemples ont la structure suivante:

- > caractéristiques & dommages
- > dangers
- > mesures
- > indications

### Caractéristiques et dommages

- Les caractéristiques significatives des ENIE en termes de vulnérabilité sont décrites. Le paragraphe présente les types de défaillances observées lors de séismes passés et les enseignements que l'on peut en tirer.

### Dangers

- Les dangers potentiels liés aux **ENIE** sont listés.

### Mesures

- Les mesures de confortement préventives possibles sont présentées. Diverses stratégies de sécurisation des **ENIE** (basées sur les forces ou les déformations), de même que des solutions appropriées (liaisons rigides ou flexibles avec l'ouvrage) sont proposées et illustrées par des esquisses et des schémas de principe.
- Des mesures provisoires permettant une sécurisation à court terme, immédiatement après le séisme sont également parfois présentées dans ce paragraphe.

### Indications

- Le dernier paragraphe présente des suggestions et des recommandations spécifiques. Celles-ci peuvent être de nature technique, mais aussi d'ordre organisationnel ou conceptuel.

La description des mesures est formulée en général sous forme de recommandations. La nécessité ou la volonté de réaliser les mesures dans le cadre d'un projet de construction dépendent des exigences spécifiques au projet.

## 2.1.3 Autres principes généraux

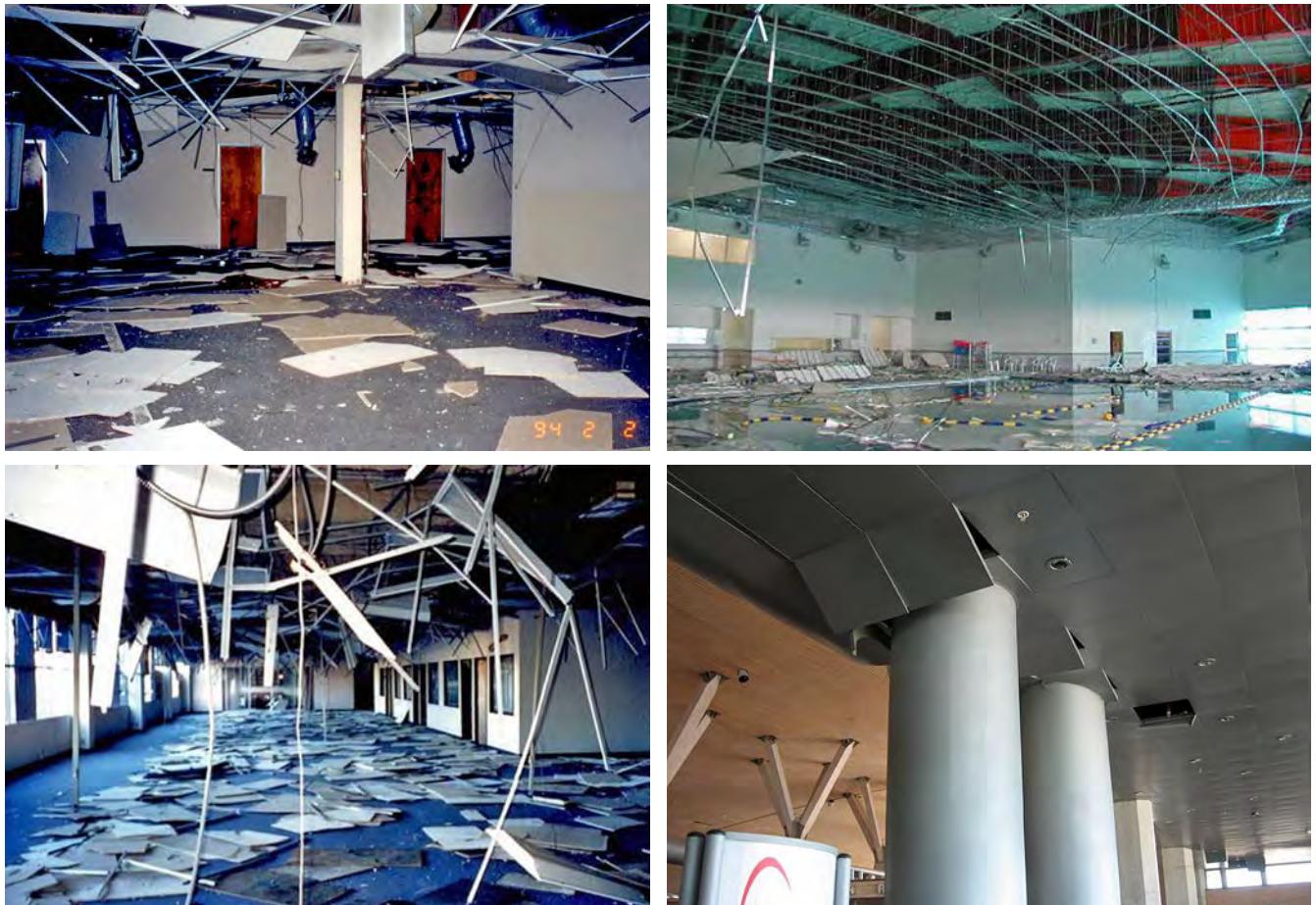
A priori, il y a lieu d'accorder une grande importance aux **ENIE** proches de chemins de fuite ou d'issues de secours même si les normes sur les structures porteuses ne prévoient pas d'exigences particulières pour ces éléments. En particulier dans les bâtiments très fréquentés ou occupés, les chemins de fuite et les issues de secours doivent rester dégagés et utilisables. Ils doivent être libres de tout objet pouvant les bloquer.

Par ailleurs, les éléments lourds doivent être placés le plus bas possible dans un bâtiment. Lorsqu'on ne peut pas faire autrement que de les placer dans les étages supérieurs, on prendra soin de les répartir en différents endroits et non pas de les concentrer sur un même lieu. Les pièces de rechange importantes seront stockées de manière à permettre une réparation rapide. Quant au personnel et aux usagers, ils seront instruits de manière à se comporter correctement en cas de séisme et à prendre les mesures appropriées.

2.2

## Faux-plafonds suspendus

### Caractéristiques et dommages



**Fig. 2.2.1 bis 2.2.4 > Dégâts subis par des faux-plafonds suspendus**

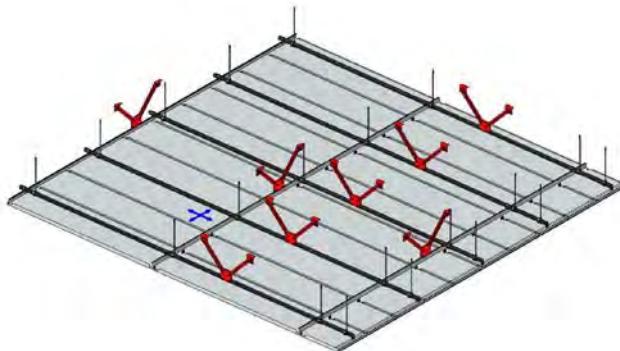
- En conditions normales, les éléments de faux-plafonds ne sont sollicités que par leur propre poids. C'est ce qui explique qu'en général, leurs fixations ne sont pas prévues pour résister à des forces horizontales et que les réserves de portance pour l'action sismique sont souvent trop faibles. Des dommages à des faux-plafonds suspendus peuvent aussi se produire du fait de mouvements différentiels entre eux et la structure porteuse ou des parois non porteuses, p. ex. l'écrasement ou la rupture du dispositif de suspension (profilés de support).
- Les faux-plafonds suspendus non contreventés pour le cas de charge sismique entrent en oscillation, avec pour conséquences possibles leur collision avec d'autres installations, la rupture de leur fixation verticale, la destruction du dispositif de suspension ou la chute d'éléments de faux-plafond non sécurisés (fig. 2.2.1 à 2.2.4).

- Les points critiques sont surtout les bords ainsi que les passages des piliers et des conduites/gaines. Les conduites et les gaines non sécurisées peuvent aussi surcharger et/ou endommager le faux-plafond en tombant.
- Les éléments encastrés séparément dans un faux-plafond suspendu (p. ex. luminaires) peuvent être endommagés par des chocs et des déformations.

### Dangers

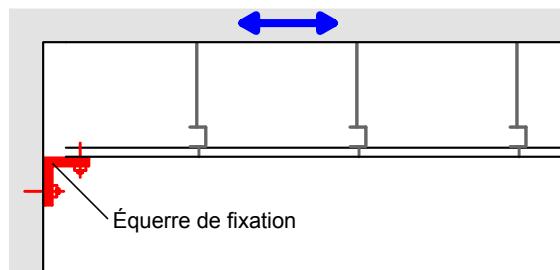
- Danger pour les personnes (chutes d'éléments, surtout dans les bâtiments très fréquentés et/ou dans des locaux très hauts)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

## Mesures



**Fig. 2.2.5 > Contreventement horizontal au moyen de barres verticales et de diagonales**

- Les faux-plafonds suspendus doivent être contreventés horizontalement dans les deux directions (et également verticalement), et liés à la structure porteuse. Des suspensions constituées de tiges filetées, d'éléments de suspension standard ou de câbles de suspension ne sont généralement pas suffisants. Les systèmes dans lesquels le faux-plafond peut bouger librement sont peu recommandables. Dans pareil cas, il faut garantir que les déformations potentielles ne causent pas de dégâts.
- Un contreventement horizontal (et éventuellement vertical) est nécessaire dans les deux directions (x, y et éventuellement z), et est constitué de barres verticales et diagonales (fig. 2.2.5). Les pièces d'ancrage doivent être dimensionnées en conséquence.



**Fig. 2.2.6 > Ancrage horizontal contre la paroi**

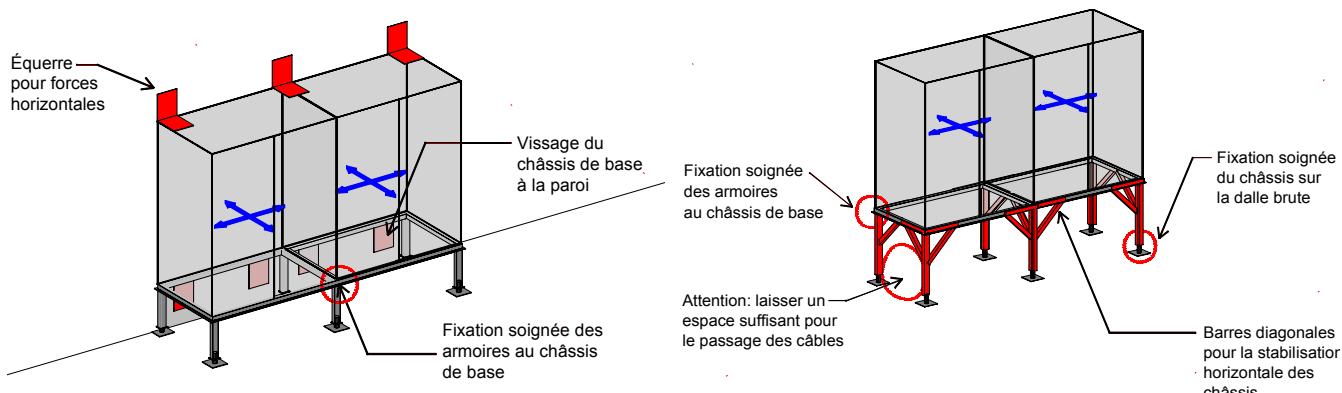
- Dans certains cas, il est possible de prévoir des appuis horizontaux contre les parois (fig. 2.2.6). Les faux-plafonds peuvent par exemple être fixés d'un côté et libres du côté opposé, avec un jeu suffisant. De la sorte, en situation normale, ce dispositif permet la dilatation thermique des éléments.
- Il faut prévoir une surface suffisante pour l'appui des panneaux de faux-plafond sur le dispositif de suspension. Il est approprié de sécuriser avec des ressorts de compression, des agrafes ou des raccords vissés, de telle sorte que les panneaux de faux-plafond ne puissent pas être soulevés ni désolidarisés de la structure.
- Les éléments de plafond incorporés doivent être intégrés dans les éléments du faux-plafond (voir aussi 2.18). Les charges additionnelles dues aux éléments incorporés doivent être prises en compte pour la réalisation du faux-plafond.

## Indications

- Le dispositif de suspension transmet les forces horizontales des panneaux de plafond au contreventement et doit donc être suffisamment rigide dans son plan. Plus ce dispositif est flexible, plus il faut d'éléments de contreventement. Ce peut être le cas, par exemple, si le dispositif de suspension se situe à différentes hauteurs ou s'il est très sinuieux dans son plan.
- Le contreventement doit être coordonné avec celui de l'éclairage, de la ventilation, des conduites, etc. Si l'on utilise des modules de plafond combinés, il faut prévoir un système de contreventement en conséquence. Avec de tels modules, les conduits et l'éclairage, par exemple, sont déjà intégrés dans les panneaux de plafond, ce qui peut augmenter considérablement la masse.

- L'étude des faux-plafonds suspendus doit tenir compte de leur position dans le bâtiment. La sécurisation de panneaux de plafond contre leur chute revêt, par exemple, une plus grande importance s'ils sont situés à proximité de chemins de fuite ou d'issues de secours.
- De plus amples informations se trouvent dans la documentation<sup>[13]</sup>.

## 2.3

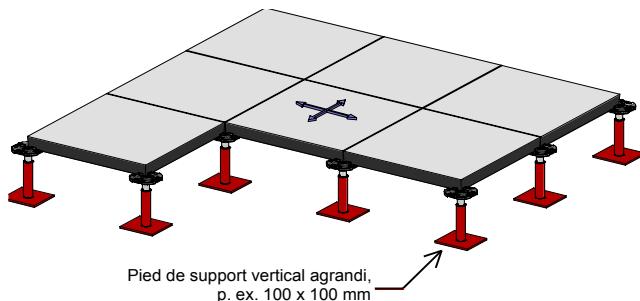
**Planchers surélevés (et planchers en gradins)****Caractéristiques et dommages****Fig. 2.3.1 et 2.3.2 > Principaux emplacements des dommages touchant des**

- Dans les **planchers surélevés**, on distingue les faux-planchers, les faux-planchers non démontables et les planchers creux.
- Généralement, les planchers surélevés présentent un danger potentiel mineur. Le plus grand danger potentiel lié aux planchers surélevés, et de loin, provient des armoires qui y sont installées. Elles peuvent en effet se renverser et blesser des personnes ou causer des dégâts matériels, notamment au plancher lui-même. Si elles servent à l'alimentation électrique ou au trafic de données, il peut en résulter des interruptions de services (problème touchant la production en général et les infrastructures vitales en particulier).
- En Suisse, les armoires (racks, armoires de commutation), les appareils construits en forme d'armoires, les étagères de batteries de secours, etc., sont aujourd'hui le plus souvent posés sur des châssis soudés (standard dans les locaux techniques). Les dégâts les plus importants peuvent résulter du basculement de ces armoires lorsqu'elles sont posées sur ces châssis sans y être fixées (voir aussi le point 2.13), ou de l'affaissement des châssis eux-mêmes dans le cas où ils ne sont pas dimensionnés pour résister aux forces s'exerçant sur eux.
- Dans le cas des faux-planchers comportant des supports verticaux isolés, les plaques de sol peuvent se déplacer horizontalement et tomber ou renverser ou bien faire flamber les supports. De grandes forces horizontales ne peuvent pas être transmises par ce type de construction. Des effondrements locaux ne se propagent donc pas forcément sur toute la surface du plancher.
- Les faux-planchers avec supports et profilés en C sont la règle pour les planchers élevés ( $\geq 80$  cm) ou en cas de grande densité d'installations. Ce type de construction empêche les plaques de sol de tomber, même en cas de grands déplacements des plaques. Les forces horizontales générées par les plaques sont généralement minimales, et la défaillance des profilés en C sous l'action de ces forces est très peu probable. Dans le cas de faux-planchers hauts, les supports verticaux peuvent flamber sous l'effet de la chute d'objets lourds (armoires, etc.).
- Avec les faux-planchers non démontables et les planchers creux (plaques monolithiques horizontales avec joints de raccordement et de dilatation inhérents au système), des dommages peuvent se produire lorsque les forces horizontales transmises par les plaques dépassent la capacité portante des murs qui les entourent (construction légère) ou lorsqu'il n'y a aucun mur. Dans ces configurations, de grands déplacements horizontaux sont possibles, provoquant le renversement de tous les supports verticaux et la chute des plaques sur la dalle.
- Les **planchers en gradins** (p. ex. auditoires) sont constitués d'une sous-construction en acier et d'un revêtement en sulfate de calcium renforcé de fibres de verre (gypse). Les sous-constructions de qualité sont faites de profilés soudés avec supports verticaux encastrés ainsi que de plusieurs éléments de stabilisation horizontale répartis sur toute la surface (en général des diagonales).
- La couche horizontale du revêtement est façonnée de manière à former une surface continue sur chaque gradin; elle permet de transmettre les forces horizontales dans le même plan. La couche verticale du revêtement (marche) n'est pas conçue pour transmettre de grandes forces horizontales d'un niveau à l'autre. Elle peut en outre contenir des bouches d'aération ou d'autres éléments encastrés.
- Les sièges peuvent être directement fixés sur la sous-construction (avec percement du revêtement) ou simplement vissés dans le revêtement.
- Avec les planchers en gradins, des dommages peuvent se produire lorsque la sous-construction n'a pas la solidité nécessaire pour reprendre les forces d'inertie horizontales et lorsque les murs latéraux ne peuvent pas reprendre les forces d'inertie horizontales (construction légère). Si les sièges sont simplement vissés, ils peuvent se désolidariser et glisser vers l'avant. Il y a danger d'effondrement, en particulier lorsque des éléments intégrés ou du mobilier installés sous le plancher tombent contre les supports verticaux et provoquent leur flambage.

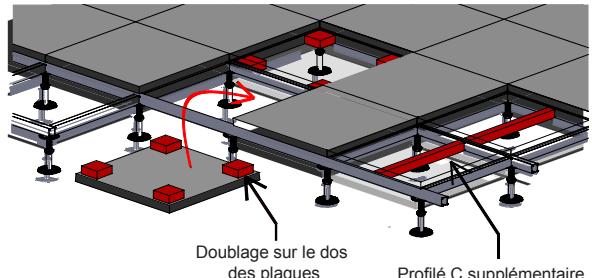
**Dangers**

- Danger pour les personnes
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité (à la suite de la chute de lourds éléments intégrés)
- Blocage des chemins de fuite (en particulier lorsque le plancher est haut)
- Dommages à l'environnement

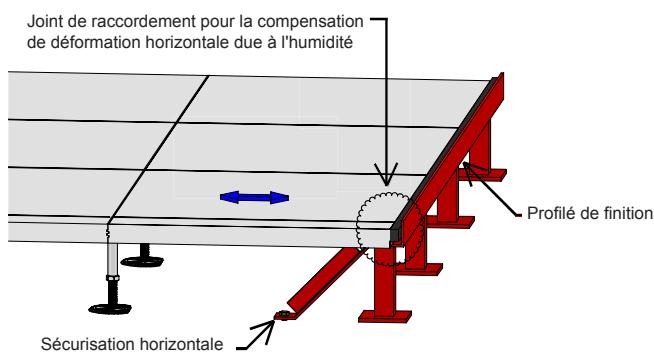
## Mesures



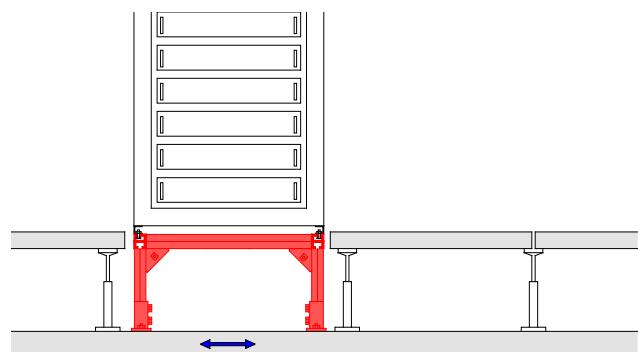
**Fig. 2.3.3 > Agrandissement des pieds des supports verticaux**



**Fig. 2.3.4 > Doublage des panneaux et profilé en C**



**Fig. 2.3.5 > Profilé d'extrême**



**Fig. 2.3.6 > Châssis de base autoportant pour éléments intégrés**



**Fig. 2.3.7 > Fixation du châssis de base au mur**

- Les supports verticaux de planchers creux sont généralement collés sur le sol brut (faux-planchers non démontables collés également en haut). Le degré d'encastrement et la rigidité peuvent encore être augmentés par agrandissement des pieds des supports verticaux (fig. 2.3.3).
- Les sous-constructions faites de profilés en C sont généralement liées aux murs qui les entourent. S'il n'y en a pas, ou si ces murs sont de construction légère, il faut une stabilisation horizontale (en général par des diagonales). On peut mieux assurer les plaques contre la chute par des profilés en C supplémentaires placés au milieu des plaques ou par un doublage au dos des plaques (fig. 2.3.4). En cas de doublage, des contraintes horizontales plus élevées sur les profilés en C doivent être prises en compte.
- En l'absence de murs périphériques, les faux-planchers non démontables ou les planchers creux peuvent être stabilisés par



**Fig. 2.3.8 > Stabilisation horizontale par barres diagonales**

- des profilés d'extrême tenus horizontalement. Le joint de raccordement inhérent au système doit être conservé (fig. 2.3.5).
- Les châssis doivent également être dimensionnés pour reprendre les forces horizontales et, le cas échéant, les forces de traction dirigées vers le haut. Une mesure simple consiste à les visser aux murs extérieurs (fig. 2.3.1). Une alternative consiste à stabiliser les châssis horizontalement au moyen de barres diagonales, ce qui nécessite de laisser un espace libre pour le câblage (fig. 2.3.2 et 2.3.6). Les armoires, les appareils incorporés dans des armoires et les étagères destinées aux batteries doivent être soigneusement fixés aux châssis (voir aussi point 2.13).
- Il est recommandé de confier le dimensionnement parasismique des planchers en gradins à un ingénieur civil spécialisé (mise en danger de personnes).

## Indications

Du fait que ces planchers ne sont généralement pas très hauts, les déformations relatives entre niveaux ne présentent généralement pas de danger.

## 2.4

## Parois, remplissages

### Caractéristiques et dommages



**Fig. 2.4.1 > Rupture d'une diagonale sollicitée en compression dans la maçonnerie et endommagement des colonnes en béton armé**



**Fig. 2.4.2 > Rupture par cisaillement dans un poteau court en présence d'un remplissage en maçonnerie**



**Fig. 2.4.3 et 2.4.4 > Dégâts subis par des parois en construction légère**



- Les cloisons et les parois intermédiaires sont sensibles aussi bien aux accélérations qu'aux déformations.
- Les remplissages qui sont construits contre les éléments porteurs adjacents sans séparation influencent le comportement de l'ouvrage. En raison de leur rigidité, ils attirent au début d'un tremblement de terre une grande part des efforts sismiques avant de céder rapidement à cause de leur faible résistance. Suite aux déformations d'étages, une rupture de diagonale en compression peut se produire dans le remplissage (fig. 2.4.1). La conséquence en est souvent une déformation concentrée le long d'une fissure diagonale. De ce fait, les remplissages en maçonnerie peuvent générer des gradients de moments élevés dans les colonnes adjacentes, ce qui peut mener à leur rupture en cisaillement (fig. 2.4.1 et 2.4.2).

- Une sollicitation perpendiculaire au plan de la paroi (*«out-of-plane»*) peut provoquer la chute de briques ou de la paroi entière (fig. 2.4.3).
- Les autres dégâts peuvent être des fissures à proximité des ouvertures, des cloisons déformées, la défaillance des liaisons et l'éclatement du crépi (fig. 2.4.4).
- Selon<sup>[2]</sup>, la limite des dommages pour des contreventements solidarisés non jointoyés en cas de déformation relative entre niveaux se situe à environ  $h/1500$  pour des murs en brique de terre cuite et entre  $h/1000$  et  $h/500$  pour des parois métalliques ou synthétiques. Cela signifie, p. ex., qu'un contreventement fait de briques de terre cuite sur un étage de 3 m de haut subit des dégâts déjà avec un déplacement différentiel de 2 mm environ.

### Dangers

- Danger pour les personnes (chutes de murs ou de parties de murs)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité (endommagement d'installations)
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

## Mesures

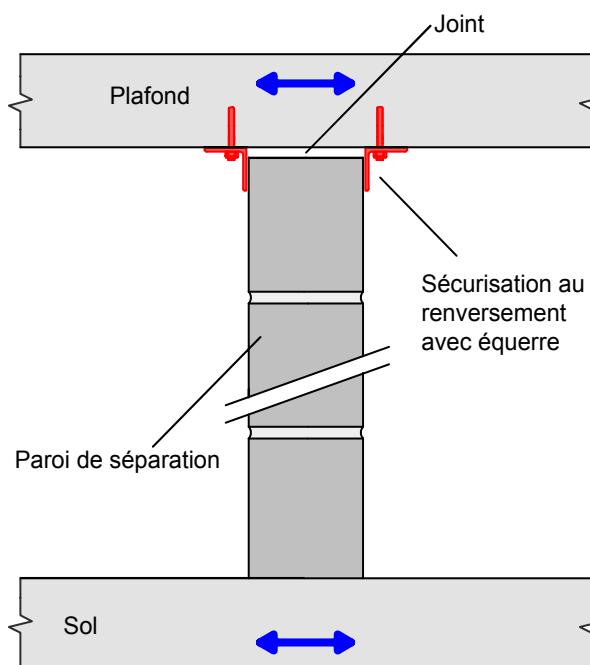


Fig. 2.4.5 > Mesures applicables à des cloisons

- Hormis dans des bâtiments très rigides présentant des déplacements relatifs minimes entre niveaux, les remplissages doivent être isolés ou tout au moins pris en compte dans l'analyse de la structure porteuse dans le sens horizontal. Les systèmes porteurs flexibles (cadres) combinés avec des remplissages rigides sont inappropriés.
- Les remplissages de cadres en béton armé doivent être construits de manière à ce qu'il soit possible d'exclure la formation d'une diagonale de compression dans la maçonnerie de même qu'une rupture par cisaillement dans les colonnes (fig. 2.4.5). Les parois couvrant toute la hauteur de l'espace doivent être isolées de la structure porteuse au plafond par une liaison coulissante dans le sens de la paroi (p. ex. joint en caoutchouc). Il est avantageux d'utiliser une armature de joint horizontale sur toute la hauteur de la paroi de remplissage.
- Transversalement à leur plan, les parois de remplissage doivent être maintenues en haut, en bas et latéralement suivant l'action sismique, p. ex. par des équerres en acier (fig. 2.4.5 et 2.4.6). Une construction en porte-à-faux est certes possible, mais difficile à réaliser. Elle nécessiterait un ancrage dans la dalle, p. ex. au moyen d'une armature de liaison.

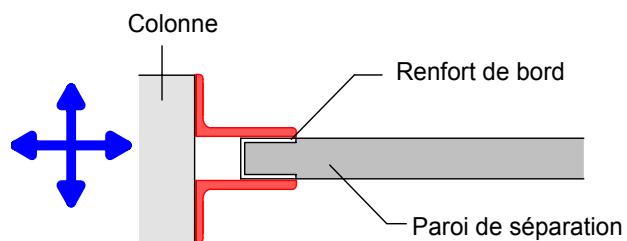


Fig. 2.4.6 > Détails de construction de la fixation latérale d'une cloison

- Des dommages à des parois ou à des contreventements peuvent être tolérés dans certains cas, mais à la seule condition que ces éléments ne soient pas identifiés comme éléments non structuraux dangereux. Dans certaines circonstances, il est possible de renoncer à un joint.
- Pour déterminer la largeur d'un joint, on peut appliquer la formule indiquée dans<sup>[3]</sup>. Le joint vertical contre le contreventement doit avoir une largeur de 10 à 40 mm environ suivant la structure porteuse et l'action sismique; la compressibilité du matériel du joint représentant un paramètre essentiel. La largeur du joint horizontal entre le remplissage et le plafond doit être d'au moins la moitié de la largeur du joint vertical<sup>[3]</sup>.
- On trouve aussi des valeurs indicatives approximatives et conservatrices pour la déformation et le déplacement relatifs entre niveaux à l'annexe A5 (tableaux d'aide).

## Indications

- Les objets et les installations fixés contre des parois de remplissage peuvent augmenter le risque de renversement de ces parois ou subir des dégâts dus à l'effondrement de celles-ci. Si une paroi sert à reprendre les charges horizontales d'autres installations, elle doit être dimensionnée en conséquence. Les parois de remplissage ne doivent pas être appuyées contre des faux-plafonds suspendus.
- Les parois en construction légère destinées à diviser un espace peuvent, si elles sont dotées de pieds d'appui larges et lourds, être reliées les unes aux autres et disposées de manière à former des angles les unes par rapport aux autres afin d'augmenter leur résistance au basculement.

- Le matériau des joints doit être aussi souple que possible. Son choix nécessite aussi de tenir compte des exigences à respecter en situation normale (isolation thermique, protection contre le bruit et l'incendie, etc.).

## 2.5

**Systèmes de façades, doublages****Caractéristiques et dommages**

Fig. 2.5.1 &gt; Fissures en croix entre fenêtres



Fig. 2.5.2 &gt; Décollement d'éléments



Fig. 2.5.3 &gt; Rupture d'une façade suspendue

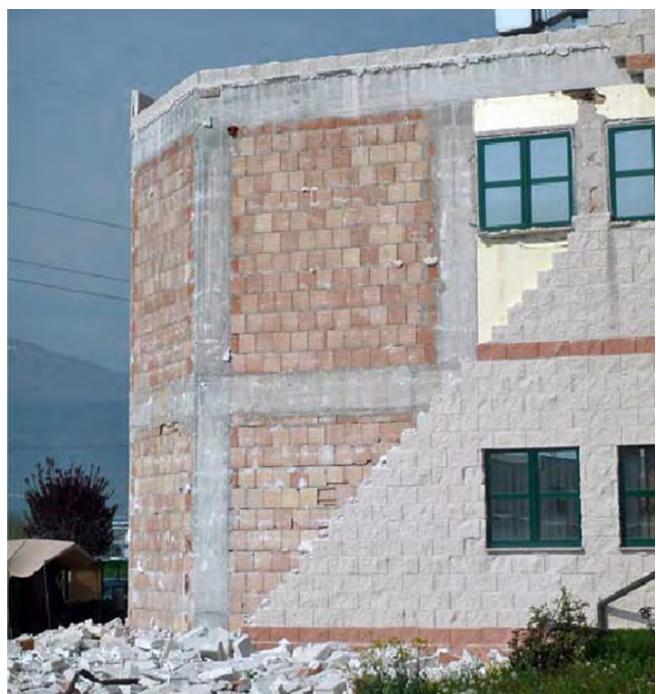


Fig. 2.5.4 &gt; Chute d'une façade en maçonnerie préfabriquée

- Les doublages sont vulnérables aussi bien aux déformations qu'aux accélérations. Les ouvrages dont la structure porteuse présente une faible rigidité aux sollicitations horizontales sont touchés essentiellement par des dommages dus aux déformations. Par contre, l'origine des dommages subis par des éléments de façade ou de doublage lourds réside plutôt dans les forces d'accélération.

- Les dommages les plus fréquents sont les fissures (en croix, fig. 2.5.1) et les décollements sur de grandes surfaces (fig. 2.5.2). Les zones proches des angles et des ouvertures sont particulièrement menacées.
- Lorsqu'une contrainte s'exerce perpendiculairement au plan d'un élément («out-of-plane»), l'élément entier ou la façade entière peuvent s'effondrer (fig. 2.5.3 et 2.5.4).

**Dangers**

- Danger pour les personnes (chutes d'éléments de construction)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite

- Dommages à l'environnement

## Mesures



Fig. 2.5.5 > Consolidation d'éléments de façade par des trous oblongs

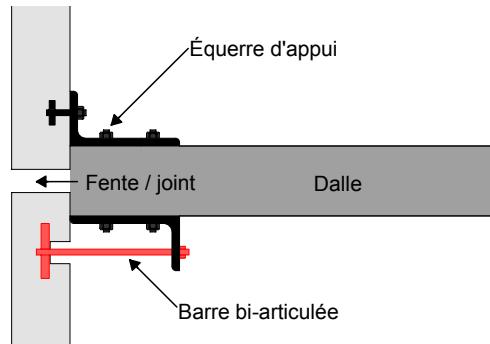


Fig. 2.5.6 > Consolidation d'éléments de façade par des barres pendulaires

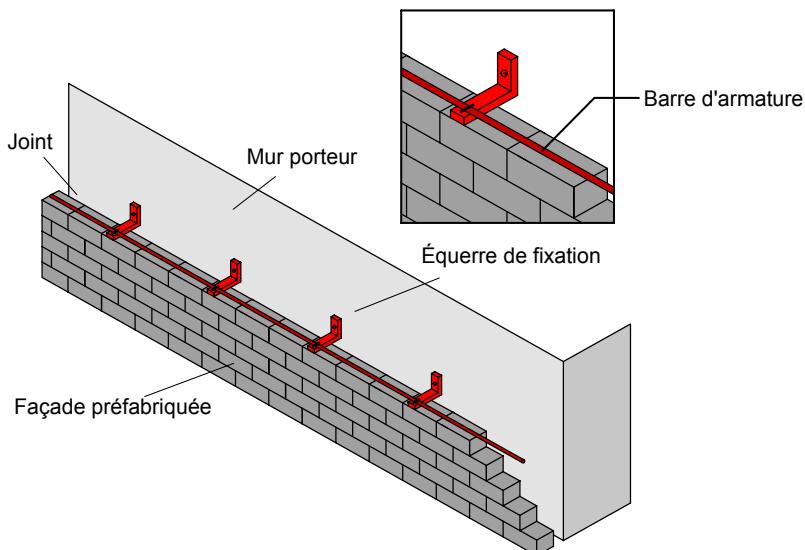


Fig. 2.5.7 > Mesures applicables à des éléments préfabriqués en maçonnerie

- La façade doit être suffisamment flexible ou dilatée pour pouvoir s'accommoder des déplacements relatifs entre niveaux. C'est surtout la configuration des angles qui est importante pour que la façade puisse absorber des mouvements dans les deux directions.
- Pour permettre des déplacements d'éléments de façade dans leur plan ('in-plane'), on peut réaliser des assemblages coulissants présentant des fentes ou des trous oblongs d'une longueur suffisante (fig. 2.5.5). Les éléments sont appuyés verticalement et horizontalement sur un niveau. Sur le niveau adjacent, ils sont appuyés de manière libre dans la direction de la façade. Une autre variante consiste à fixer les éléments au moyen de barres de traction (barres bi-articulées, fig. 2.5.6). Un joint est nécessaire entre les éléments afin qu'ils ne se heurtent pas.
- Une sollicitation perpendiculaire au plan d'un élément ('out-of-plane') doit également être prise en considération. Dans les façades légères, c'est souvent l'action du vent (pression/aspiration) qui est déterminante pour le dimensionnement des moyens d'assemblage. L'action sismique peut toutefois être déterminante en présence d'éléments lourds et d'une sismicité relativement élevée.
- Sur les façades en panneaux de pierres naturelles, une armature peut être intégrée dans le lit de mortier, qui est reliée à la structure porteuse par des équerres (fig. 2.5.7). Il importe alors de veiller à une liaison suffisante (tension d'adhérence entre l'acier et le mortier).

## Indications

- On trouve des indications sur les remplissages en maçonnerie au point 2.4.
- Les exigences concernant les fixations peuvent être différentes selon l'action sismique et leur emplacement. Ces fixations doivent être durables et résister aux intempéries, elles ne doivent pas empêcher les déformations des structures porteuses et rester intactes lorsque les déformations prévues se produisent.
- La largeur des joints obéit à des considérations analogues à celles concernant les cloisons et les parois de séparation (voir point 2.4).

2.6

## Parapets (et balustrades)

### Caractéristiques et dommages



Fig. 2.6.1 et 2.6.2 > Effondrement sous l'effet de forces d'inertie transversales au plan du parapet



Fig. 2.6.3 > Chute du parapet de l'étage supérieur



Fig. 2.6.4 > Rupture transversale au plan du parapet, grand risque de chute

- Lors d'un séisme, les parapets lourds, sans contreventement horizontal, présentent des instabilités caractéristiques hors du plan («out-of-plane») (fig. 2.6.1 à 2.6.4). Ils peuvent tomber soit vers l'extérieur, soit vers l'intérieur, et traverser le toit (vitré).

D'autres dommages typiques aux parapets sont des endommagements de connections, des fissures et des éclatements.

### Dangers

- Danger pour les personnes (chute d'éléments de construction)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

## Mesures

Parapet en maçonnerie non armée

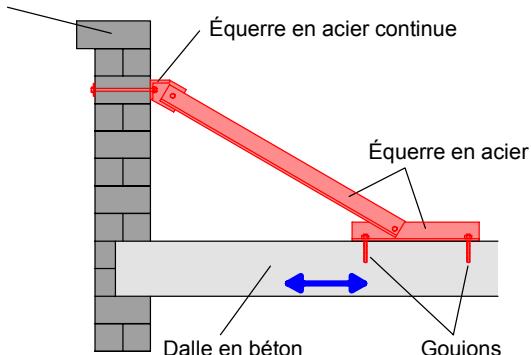
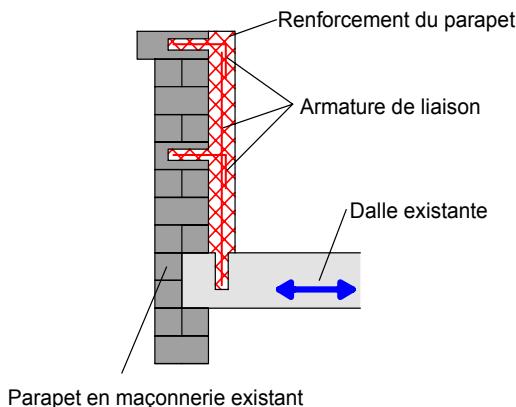


Fig. 2.6.5 > Mesures applicables aux parapets sur toiture



Fig. 2.6.6 > Mesures applicables aux parapets sur toiture



Parapet en maçonnerie existant

Fig. 2.6.7 > Consolidation postérieure d'un parapet en maçonnerie par du béton armé

- Un parapet en béton armé ou en maçonnerie peut être calculé et exécuté sous la forme d'une construction en porte-à-faux. Suivant l'action sismique, une maçonnerie armée peut être judicieuze. Les parapets existants peuvent être consolidés grâce à un ancrage horizontal ou à un renfort en béton armé (éventuellement en béton projeté) (fig. 2.6.5 à 2.6.7).

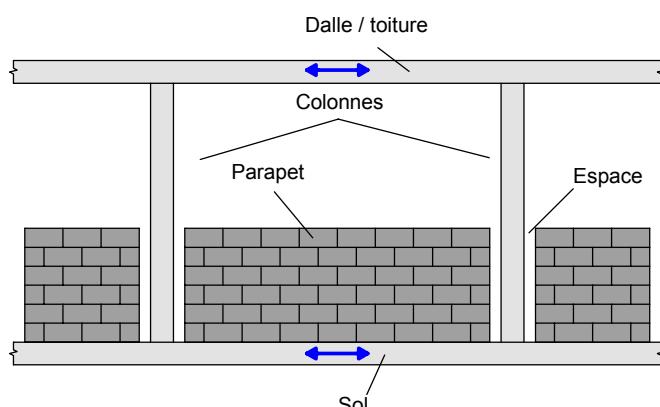
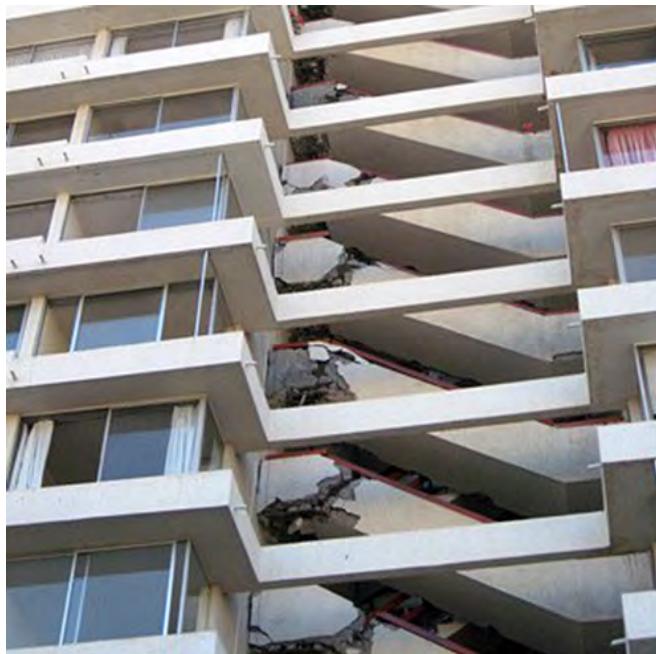


Fig. 2.6.8 > Contreventements entre piliers

- La position de l'ancrage horizontal doit être définie en fonction des forces mobilisables (p. ex. forces de frottement dans le mortier du joint) ainsi que des possibles mécanismes de rupture.
- Les remplissages partiels non jointoyés peuvent endommager considérablement une structure porteuse (effet dit de colonne courte ou «short column») et doivent donc être absolument évités (fig. 2.6.8). Pour cette problématique, des considérations similaires à celles du point 2.4 sont applicables.

## 2.7

**Escaliers****Caractéristiques et dommages**

**Fig. 2.7.1 et 2.7.2 > Diagonales de compression dans une volée d'escaliers**



**Fig. 2.7.3 > Décombres obturant une volée d'escaliers**



**Fig. 2.7.4 > Dislocation de marches d'escalier**

- Les dommages aux escaliers sont dus essentiellement aux déplacements relatifs entre niveaux, qui provoquent des forces de traction et de compression non voulues dans les volées d'escaliers (écrasement ou dislocation de l'escalier) (fig. 2.7.1 et 2.7.2). Ce phénomène se produit donc surtout dans les ouvrages dont les structures porteuses présentent une faible rigidité face aux actions horizontales.

- Les marches d'escalier disloquées ou effondrées peuvent aussi présenter un danger (fig. 2.7.4). Lorsque des cages d'escalier sont endommagées, des décombres peuvent obturer le passage (fig. 2.7.3).

## Dangers

- Danger pour les personnes (chutes d'éléments de construction)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

## Mesures

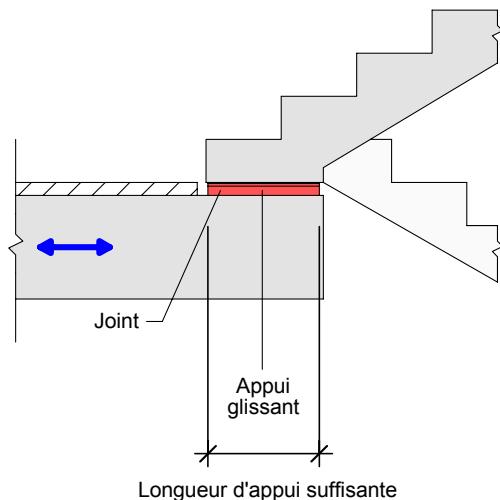


Fig. 2.7.5 > Mesures applicables aux volées d'escaliers

- Pour éviter la chute d'éléments d'escalier, il faut prévoir des appuis de longueur suffisante (fig. 2.7.5 et 2.7.6).

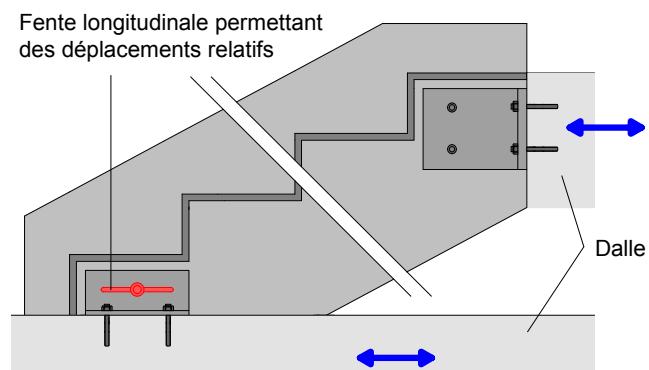


Fig. 2.7.6 > Mesures applicables aux volées d'escaliers

- Pour qu'aucune diagonale de compression ne puisse se former, l'escalier doit être fixé longitudinalement à une dalle et équipé d'un appui mobile sur la dalle voisine. La liberté de mouvement peut être réalisée, p. ex. au moyen de trous oblongs (fig. 2.7.6).

## Indications

- Des matériaux fragiles, p. ex. le verre, doivent être évités dans la zone des cages d'escalier; à défaut, il est nécessaire de prendre les mesures qui s'imposent pour éviter que ces matériaux chutent dans la cage l'escalier.

## 2.8

**Vitrages, portes, fenêtres****Caractéristiques et dommages**

Fig. 2.8.1 &gt; Vitres brisées



Fig. 2.8.2 &gt; Cadres de fenêtres cintrés dans un bâtiment flexible



Fig. 2.8.3 &gt; Dommages subis par un vitrage constitué de briques en verre

- Les vitrages sont vulnérables aussi bien aux accélérations qu'aux déformations dans leurs plans et en dehors («in plane» et «out-of-plane»). Des dégâts se produisent souvent en particulier dans les ouvrages peu rigides présentant de grands déplacements relatifs entre niveaux. Les vitres peuvent tomber entières (fig. 2.8.1) ou se briser en fragments plus ou moins grands (fig. 2.8.3), et représentent alors un danger notable pour les personnes.

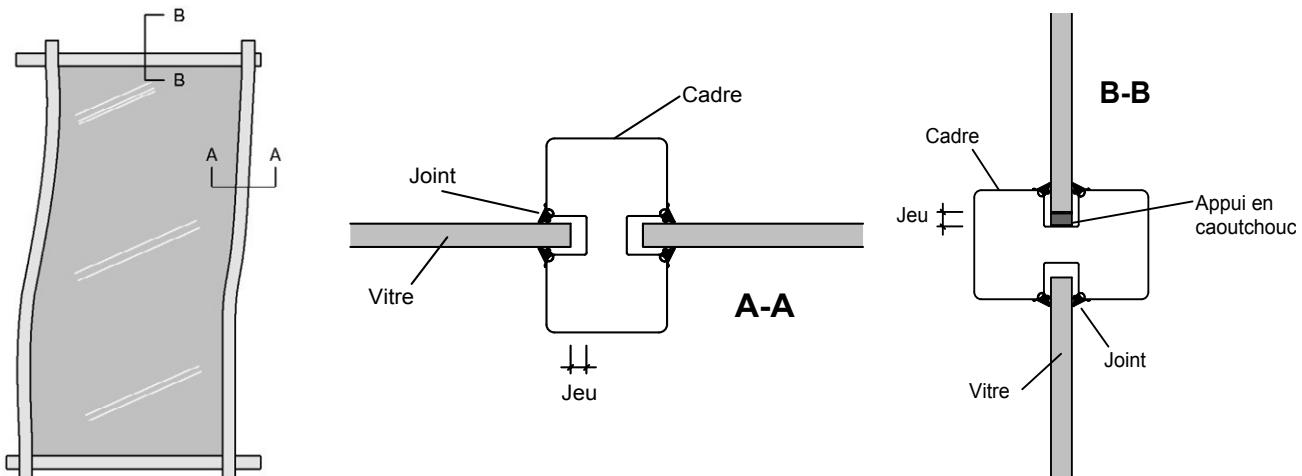
- Les cadres de fenêtre et de porte peuvent se déformer et empêcher l'ouverture (fig. 2.8.2).

**Dangers**

- Danger pour les personnes (chutes de bris de verre)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

**Mesures**

- La construction doit être adaptée aux déplacements relatifs attendus entre niveaux. Pour pouvoir absorber les déformations dans le plan («in plane»), il faut prévoir un jeu dans la fixation aux croisillons (fig. 2.8.4).
- Les largeurs nécessaires des joints obéissent à des considérations similaires à celles exposées pour les cloisons et les parois de séparation (voir point 2.4).
- Les vitrages constitués de briques de verre sont très fragiles (fig. 2.8.3). Ils doivent donc être réalisés de la même façon que les parois de séparation en maçonnerie (voir point 2.4). Ils doivent être séparés de la structure porteuse par un joint déformable.
- Un gauchissement à partir de 0,2 % peut gripper les portes et, par conséquent provoquer un blocage des chemins de fuite. Dès lors, suivant l'importance d'une porte, il est indiqué de ménager un joint entre son cadre et la structure porteuse.



**Fig. 2.8.4 > Mesures applicables aux vitres**

- Divers types de verre peuvent être utilisés, qui présentent un comportement parassismique plus ou moins efficace. Le verre normal (en général du «verre flotté» ou verre plat) explose en gros éclats. Ce comportement défavorable peut être légèrement amélioré par la pose d'un film, mesure de renforcement peu coûteuse. Les films conviennent surtout aux petites fenêtres étant donné que les grandes vitres peuvent sortir de leur cadre en un seul morceau. Un film posé après coup à titre de mesure de renforcement sera si possible pincé dans le cadre.
- Le verre trempé, appelé aussi verre de sécurité (ESG) présente un bon comportement à la fracture. Il est trempé à haute température et peut absorber de grandes forces de traction grâce à son état de tension interne. Il se casse en petits fragments qui présentent un moindre danger de blessure. Le comportement du verre semi-trempé (TVG) à la fracture est aussi mauvais que celui du verre flotté.

### Indications

- Au-dessus des portes, des chemins de fuite, des issues de secours et des lieux de séjour de personnes, il faut utiliser exclusivement des vitrages faits de verre de sécurité (ESG, VSG).
- Avec des matériaux d'étanchéité durs et fragiles tels que le vinyle, des dommages apparaissent déjà pour des déformations relatifs entre étages relativement faibles d'environ 1/1500 à 1/500. Par conséquent, il faut préférer des joints élastiques, p. ex. en silicone, étant donné qu'avec ceux-ci, des dommages ne commencent à apparaître que lorsque les déplacements relatifs atteignent environ 1/100<sup>[14]</sup>.
- Aucune mesure particulière n'est à prendre dans les ouvrages très rigides (déplacements relatifs entre niveaux jusqu'à environ 2 mm).
- Dans l'axe transversal au plan de la paroi, les contraintes dues à l'action du vent sont généralement plus fortes que celles dues à l'action sismique. De ce fait, c'est le cas de charge «vent» qui est déterminant pour le dimensionnement.

2.9

## Panneaux, enseignes et avant-toits

### Caractéristiques et dommages



Fig. 2.9.1 > Panneau publicitaire tombé à terre

- Pour ce type d'élément, surtout la contrainte horizontale, c'est-à-dire le long de la façade ou de la structure porteuse, est d'importance. Il peut s'ensuivre une détérioration ou une rupture de la fixation.



Fig. 2.9.2 > Avant-toit effondré

- Les constructions lourdes en porte-à-faux sans étayage peuvent aussi se mettre à osciller verticalement. Sans un contreventement suffisant, l'élément peut alors céder et tomber sous l'action des forces d'inertie.

### Dangers

- Danger pour les personnes (chutes d'éléments de construction)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

### Mesures

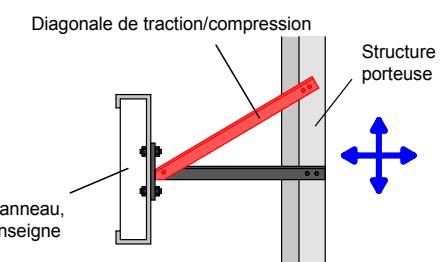
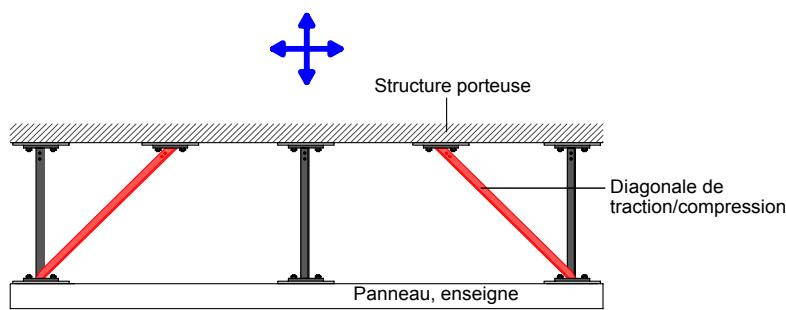


Fig. 2.9.3 > Mesures applicables à des constructions en porte-à-faux (représentation en plan et coupe)

- Un contreventement diagonal réduit les oscillations dans le plan vertical. L'étrésillon doit être ancré dans la structure porteuse.

### Indications

- Dans les constructions légères de grande surface, la contrainte consécutive à l'action du vent est en général nettement plus grande que celle que peut induire un séisme. L'action sismique est plutôt prépondérante à l'intérieur ou pour les éléments très lourds.
- Une simple protection contre la chute au moyen d'une chaîne n'est pas appropriée car elle n'augmente pas la rigidité de la structure et ne peut pas empêcher son balancement.

## 2.10 Cheminées et toitures

### Caractéristiques et dommages



Fig. 2.10.1 > Effondrement d'une cheminée



Fig. 2.10.2 > Tuiles tombées à terre



Fig. 2.10.3 et 2.10.4 > Décrochage de la sous-toiture et éclatements dans le crépi

- Les cheminées en maçonnerie peuvent être très vulnérables. Lors d'une faible action sismique, ce sont des dommages tels que fissures et éclatements qui prédominent. Mais lors d'une action sismique plus forte, une cheminée peut se détacher de la structure porteuse ou s'effondrer (fig. 2.10.1).
- Les tuiles non fixées peuvent tomber du toit durant un séisme. Ce danger existe aussi pour les plaques de plâtre mal fixées (fig. 2.10.2).
- Des fissures et des éclatements apparaissent souvent sur les faces inférieures crépies (fig. 2.10.3 et 2.10.4), en particulier aux ouvertures et dans les angles.

### Dangers

- Danger pour les personnes
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

### Mesures

- Suivant l'action sismique, il peut être nécessaire de fixer ces éléments au bâtiment (analogique au point 2.6).
- Les cheminées en maçonnerie peuvent être remplacées, p. ex. par des cheminées métalliques. Celles-ci sont plus légères et peuvent être fixées d'une manière simple à la façade.
- Les tuiles peuvent être fixées par des clous ou des fils d'acier pour empêcher. Il faut toutefois vérifier si le cas de charge «séisme» est déterminant par rapport au vent.
- La couche d'adhérence sur laquelle est posé l'enduit doit être bien liée à la structure porteuse. Les surfaces doivent être divisées en secteurs séparés les uns des autres par des joints.

2.11

## Alimentation électrique de secours

### Caractéristiques et dommages



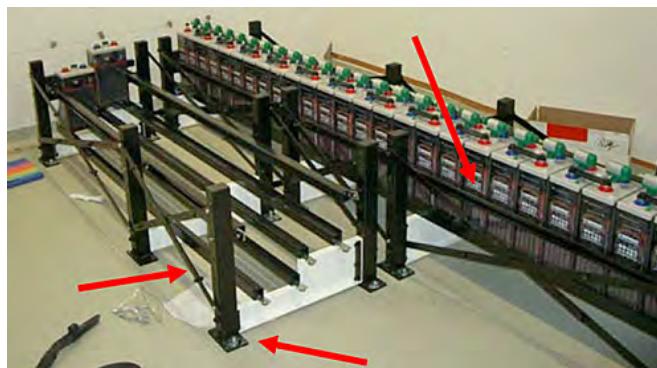
**Fig. 2.11.1 > Dégâts subis par un châssis sur lequel étaient posées des batteries de secours et chute de celles-ci**

- Sans fixation ou avec une fixation déficiente, les générateurs et les châssis de batteries de secours peuvent glisser ou se renverser. Les batteries peuvent tomber des supports (fig. 2.11.1).
- Si les générateurs sont montés sur des isolateurs de vibrations, la défaillance des fixations peut générer des mouvements considérables (voir aussi point 2.20).

### Dangers

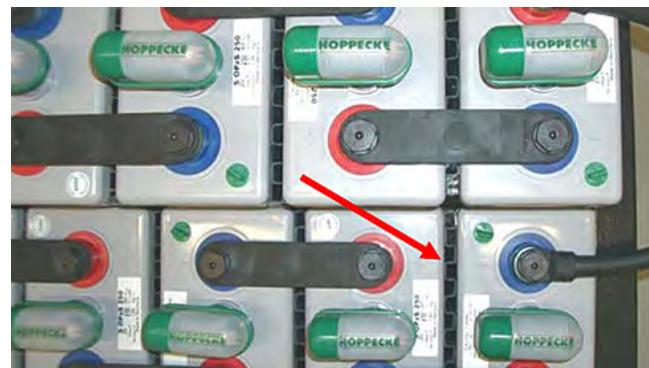
- |   |   |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Danger pour les personnes<br><input checked="" type="checkbox"/> Dégâts matériels<br><input type="checkbox"/> Endommagement de la structure porteuse | <input checked="" type="checkbox"/> Perturbation de la fonctionnalité<br><input type="checkbox"/> Blocage des chemins de fuite<br><input type="checkbox"/> Dommages à l'environnement |
|---|---|

### Mesures



**Fig. 2.11.2 > Support à batteries de secours contreventé**

- Les châssis destinés à recevoir des batteries de secours doivent être suffisamment bien fixés pour éviter qu'ils ne basculent ou ne glissent, et être stabilisés au moyen d'un contreventement suffisant (fig. 2.11.2).
- Les batteries doivent être protégées contre le risque de chute par des profilés ou des barres. Il faut éviter que des batteries voisines ne s'endommagent mutuellement. Cela est possible p. ex. au moyen d'incorpôrés ondulés en plastique ou en élastomère insérés entre les batteries (fig. 2.11.3).
- D'autres composants du circuit électrique de secours doivent être sécurisés conformément aux rubriques correspondantes:



**Fig. 2.11.3 > Incorpôrés insérés entre les batteries**

installations de commutation du courant normal au courant de secours (point 2.13), génératrices (point 2.15), citernes de carburant (point 2.16), conduites (point 2.17). Les systèmes dotés d'isolateurs de vibrations sont traités au point 2.20.

- S'agissant des appareils non fixés, la plaque de fondation doit avoir une surface d'appui suffisamment grande pour éviter qu'ils ne se renversent.
- Pour ce qui est des étagères de batteries de secours placées sur des châssis de faux-planchers, voir aussi le point 2.3.
- Une autre solution efficace consiste en une isolation sismique des appareils.

### Indications

- Ces éléments sont essentiels pour le maintien de l'exploitation (dans la production en général et, en particulier, pour les infra-

structures vitales en cas de catastrophe), raison pour laquelle leur sécurisation revêt une grande importance.

2.12

## Protection contre l'incendie

### Caractéristiques et dommages

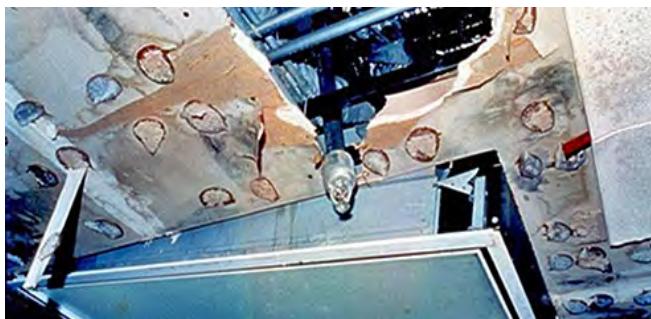


Fig. 2.12.1 et 2.12.2 > Tête de sprinkler endommagée

- Les têtes de sprinklers sont sensibles aux déformations et menacées surtout lorsqu'elles sont montées/intégrées dans des faux-plafonds suspendus. Elles sont souvent endommagées par les contraintes qui s'exercent au niveau des passages, car les

faux-plafonds suspendus et les sprinklers peuvent souvent vibrer de façon différente. Les embranchements aux conduites principales sont également particulièrement vulnérables (fig. 2.12.1 et 2.12.2).

### Dangers

- Danger pour les personnes (les incendies ne peuvent pas être combattus immédiatement)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité (évacuation du bâtiment à cause d'une protection contre l'incendie insuffisante ou due à des dégâts d'eau liés aux sprinklers).
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

### Mesures



Fig. 2.12.3 > Raccord flexible à une conduite principale

- Les faux-plafonds suspendus doivent être parasismiques (voir point 2.2).
- La vulnérabilité des têtes de sprinklers peut être réduite grâce à des raccords flexibles à la conduite principale. À titre d'alternative, un espace suffisamment grand pour le passage dans le plafond ou dans les murs permet d'absorber les déplacements relatifs (fig. 2.12.3 et 2.12.4).



Fig. 2.12.4 > Fixation de la pompe et de l'unité de commande, raccords flexibles et jeu ménagé au passage à travers un mur

- Les détecteurs de fumée et d'incendie ainsi que d'autres systèmes d'alarme et d'extinction doivent être fixés correctement.
- On trouve dans les rubriques correspondantes des informations sur les composants: citernes (point 2.16), conduites ou ventilations (point 2.17), pompes (point 2.18) et unités de commande de sprinklers et de portes antifeu (point 2.13).

### Indications

- Certaines compagnies d'assurance ont élaboré leurs propres exigences et leurs propres lignes directrices en matière de systèmes de protection contre l'incendie. La compagnie américaine FM Global ([www.fmglobal.com](http://www.fmglobal.com)) p.ex exige que tous les bâtiments

qu'elle assure soient conformes à ses propres normes et directives. Il faut donc vérifier au préalable si de telles normes et directives existent et doivent être appliquées.

## 2.13 Armoires et boîtiers de commande

### Caractéristiques et dommages



Fig. 2.13.1 et 2.13.2 > Armoires de commande renversés

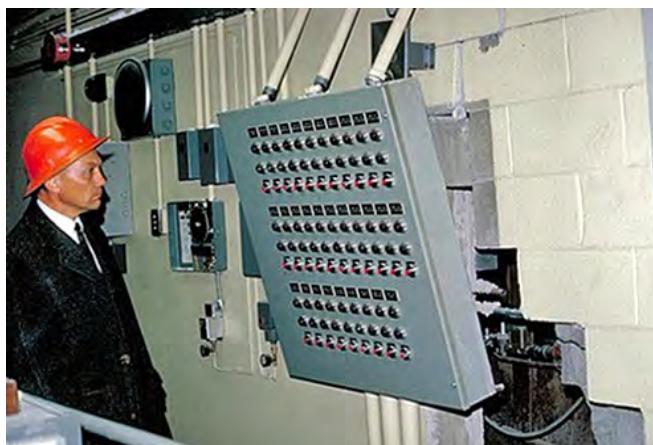


Fig. 2.13.3 > Arrachement de la fixation murale

- Les grandes et étroites armoires peuvent glisser ou se renverser sous l'effet de forces d'inertie (fig. 2.13.1 et 2.13.2). Les appareils électriques de distribution et de commande disposés dans des armoires peuvent être endommagés par les accélérations et causer des pannes.
- En général, les boîtiers fixés contre des murs subissent des dommages générés par une rupture hors de leur plan («out-of-plane», fig. 2.13.3).
- Les appareils rangés dans des armoires sur roulettes peuvent tomber dans les ouvertures de planchers creux. Pour l'éviter, il faut fixer des listes au bord des ouvertures (voir aussi point 2.3).

### Dangers

- Danger pour les personnes
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

## Mesures

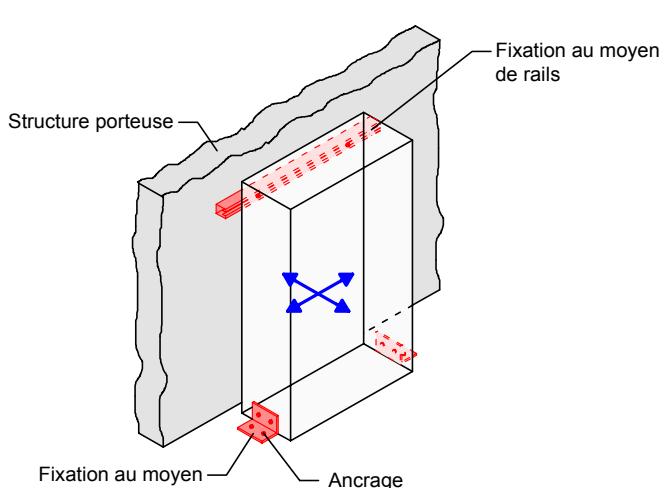


Fig. 2.13.4 > Fixation d'armoires

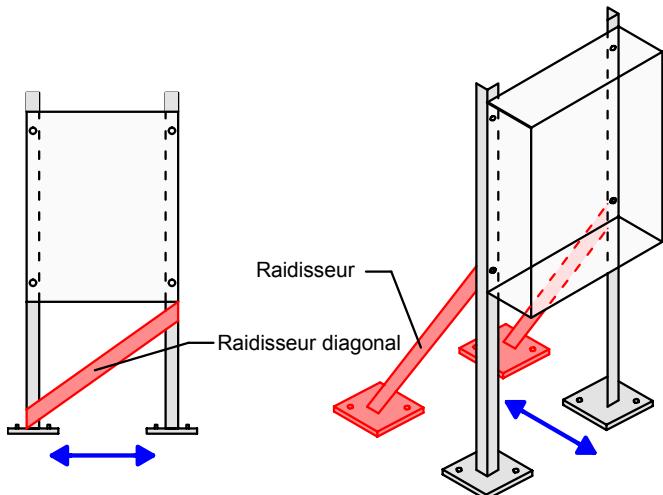


Fig. 2.13.5 > Fixation d'armoires/boîtiers autonomes sur pieds



Fig. 2.13.6 et 2.13.7 > Sécurisation de coffrets ou d'armoires contre une paroi

- Les armoires de commande doivent être fixées de manière à ce qu'elles ne puissent pas basculer ou glisser. Il est possible de les fixer aux murs, au plafond ou au sol (fig. 2.13.4 et 2.13.6). Il faut alors que le mur puisse résister aux charges supplémentaires dues à l'action sismique.
- Les armoires/boîtiers sur pieds nécessitent un contreventement et un ancrage horizontaux suffisants (fig. 2.13.5).
- Les armoires implantées à l'intérieur d'un local peuvent être fixées à l'aide de rails placés au-dessus et fixés aux murs (fig. 2.13.7).
- Le point 2.22 décrit d'autres options de confortement.
- S'agissant des armoires posées sur des châssis de faux-planchers, voir aussi le point 2.3.



## Indications

- On trouve de plus amples informations sous<sup>[7]</sup>.

2.14

## Transformateurs

### Caractéristiques et dommages



**Fig. 2.14.1 > Transformateurs haute tension renversés**

- Sous l'effet de forces d'inertie, des éléments lourds et élancés peuvent glisser ou se renverser (fig. 2.14.1).



**Fig. 2.14.2 > Exemple de transformateur intégré dans une armoire**

- Certains composants internes, p. ex. des bobines de transformateur ou des systèmes de ventilation et de refroidissement peuvent être endommagés sous l'effet d'accélérations.

### Dangers

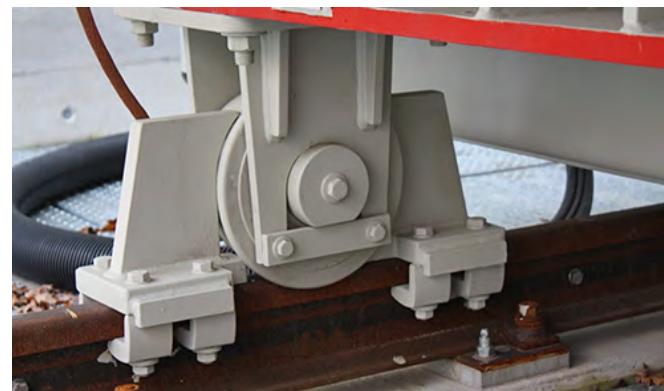
- Danger pour les personnes
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité (black-out)
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

### Mesures



**Fig. 2.14.3 > Fixation d'un transformateur monté sur roues**

- Les transformateurs doivent être assurés afin de ne pas glisser ni se renverser. On peut prévoir un ancrage au sol pour les sécuriser contre le soulèvement. Des ancrages ou des goujons peuvent être intégrés dans la structure porteuse ou dans les fondations (fig. 2.14.3 et 2.14.4).
- Une autre variante applicable à l'intérieur de bâtiments (basse tension) consiste à empêcher qu'un transformateur ne se soulève au moyen de profilés en acier, qui sont fixés aux murs porteurs et maintiennent le transformateur en place par sa partie supérieure.



**Fig. 2.14.4 > Fixation au moyen de deux sabots d'arrêt par roue**

- Il faut s'assurer que les dilatations thermiques du transformateur ne soient pas empêchées par les mesures de sécurisation. Des vibrations ou secousses intempestives dues aux ancrages au sol ne doivent pas être transmises à la structure porteuse.
- Les composants internes doivent être résistants aux secousses.
- En ce qui concerne les installations dotées d'isolateurs de vibrations, voir le point 2.20.

### Indications

- On trouve de plus amples informations sous<sup>[7]</sup>.

2.15

## Éclairage

### Caractéristiques et dommages



Fig. 2.15.1 et 2.15.2 > Chute d'éléments d'éclairage

- Des éléments d'éclairage peuvent être intégrés dans un faux-plafond suspendu ou être fixés directement au plafond porteur.
- Lorsque des luminaires sont posés sur un treillis de faux-plafond suspendu, ils peuvent tomber à cause des oscillations et de la trop courte longueur des appuis (fig. 2.15.1 et 2.15.2).

- Dans les systèmes indépendants les uns des autres, il est possible que la fixation de l'éclairage cède ou que différents éléments entrent en collision les uns avec les autres.

### Dangers

- Danger pour les personnes (chute, collision, électrocution, incendie)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

### Mesures

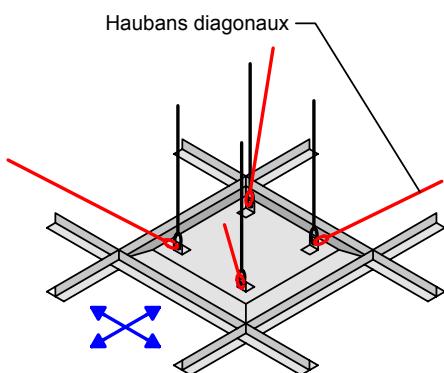


Fig. 2.15.3 > Contreventement de luminaires sur un faux-plafond suspendu

- Les luminaires installés sur des faux-plafonds suspendus nécessitent une fixation verticale indépendante ainsi qu'une liaison horizontale suffisante avec la sous-construction. Le faux-plafond suspendu doit être dimensionné en fonction des charges additionnelles dues à l'éclairage (point 2.2). Il faut également faire attention à protéger les parties vitrées des luminaires contre les chutes.
- Une solution alternative consiste à fixer l'éclairage horizontalement et verticalement à l'aide de dispositifs indépendants (fig. 2.15.3 et 2.15.4), en particulier lorsqu'il s'agit d'éléments lourds. L'éclairage ne doit pas être fixé à des conduites ou à d'autres ENIE.



Fig. 2.15.4 > Contreventement de luminaires lourds

- Les composants fixés directement au plafond peuvent y être liés de manière rigide ou, au contraire, être mobiles. Dans ce dernier cas, il faut garantir que les déformations ne soient pas entravées, p. ex. en utilisant des articulations à rotules. La zone de balancement doit être dégagée de tout autre objet.
- Un câble de sécurité peut être prévu dans les locaux très hauts, en présence d'éléments pesants, ou dans les locaux très fréquentés afin d'éviter la chute d'éléments d'éclairage lorsque leur fixation cède.

2.16

## Installations de climatisation

### Caractéristiques et dommages

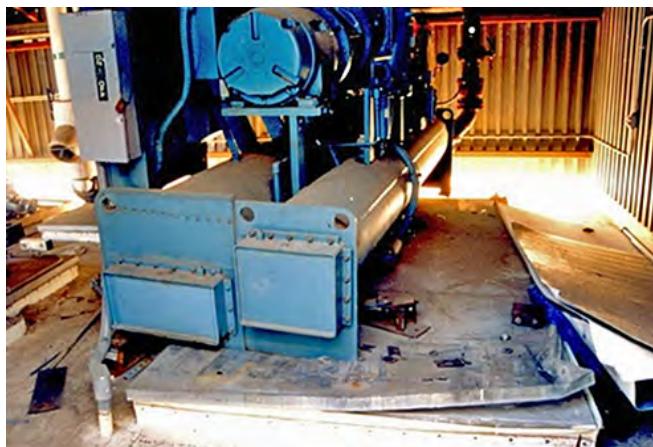


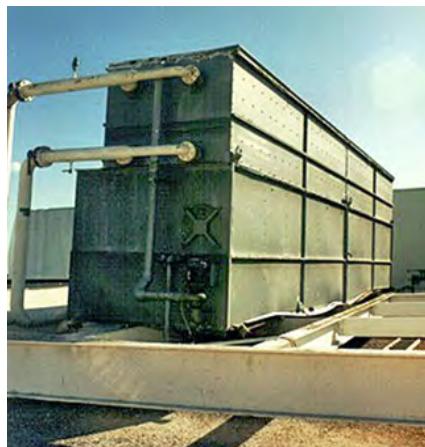
Fig. 2.16.1 &gt; Rupture des fixations



Fig. 2.16.2 &gt; Élément insuffisamment contreventé



Fig. 2.16.3 et 2.16.4 &gt; Glissements/instabilités



- Les installations peuvent glisser, tomber ou heurter d'autres objets. De grands déplacements relatifs peuvent aussi endommager des raccordements à des conduites (fig. 2.16.1 à 2.16.4).

- Détérioration de composants internes tels que pompes, moteurs, etc.

### Dangers

- Danger pour les personnes (liquides dangereux, électrocution, incendie)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

## Mesures

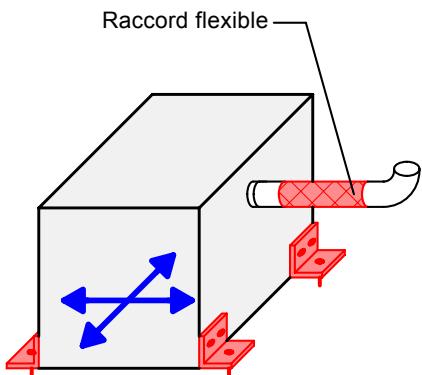


Fig. 2.16.5 > Fixation de l'installation à l'aide d'équerres en acier

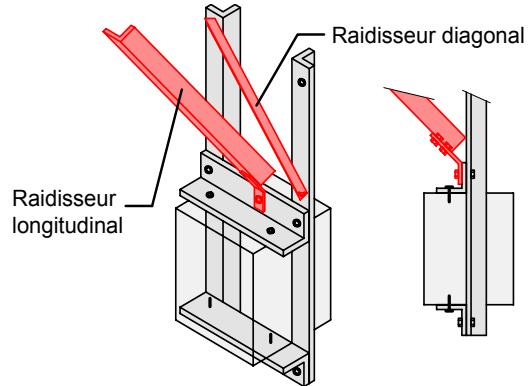


Fig. 2.16.6 > Construction destinée à des objets lourds



Fig. 2.16.7 > Butée horizontale bloquant un générateur

- Les installations doivent être suffisamment bien fixées et contreventées afin d'éviter qu'elles ne glissent, ne se renversent ou ne heurtent d'autres objets (fig. 2.16.5 et 2.16.7).
- Les appareils peuvent être montés sur des châssis, des socles ou des plates-formes spécifiques.
- Suivant la situation, des raccords flexibles doivent être prévus (voir aussi point 2.18).
- Les systèmes nécessitant un positionnement précis des machines requièrent une attention toute particulière.
- Les composants suspendus doivent être sécurisés. Les objets lourds peuvent nécessiter une construction propre (fig. 2.16.6).
- En ce qui concerne les installations dotées d'isolateurs de vibrations, voir le point 2.20.

## Indications

- Les machines présentant un grand danger potentiel doivent être équipées d'un interrupteur automatique ou d'une vanne d'arrêt, réagissant aux secousses excessives.

2.17

## Citerne, chaudières et réservoirs

### Caractéristiques et dommages



Fig. 2.17.1 et 2.17.2 > Effet des forces d'inertie sur des citernes



Fig. 2.17.3 > Fixation endommagée

- Il peut souvent se produire des dommages dus aux forces d'inertie, p. ex. glissements, renversements ou chutes (fig. 2.17.1 et 2.17.2). Il peut s'ensuivre des dégâts aux parois des citernes ou à leur châssis ainsi qu'un arrachement des conduites de raccordement.



Fig. 2.17.4 > Voilement de la paroi d'une citerne ('pied d'éléphant')

- Des ancrages insuffisamment dimensionnés peuvent être endommagés, voire arrachés (fig. 2.17.3).
- Lors d'un séisme, les parois de citernes verticales posées directement sur des appuis encaissent des forces de compression supplémentaires qui peuvent provoquer des voilements (fig. 2.17.4).

### Dangers

- Danger pour les personnes (vannes expulsées, écoulement de matières dangereuses, dégâts d'eau, incendies)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

## Mesures



Fig. 2.17.5 > Contreventement de citerne surélevées



Fig. 2.17.6 > Raccords flexibles

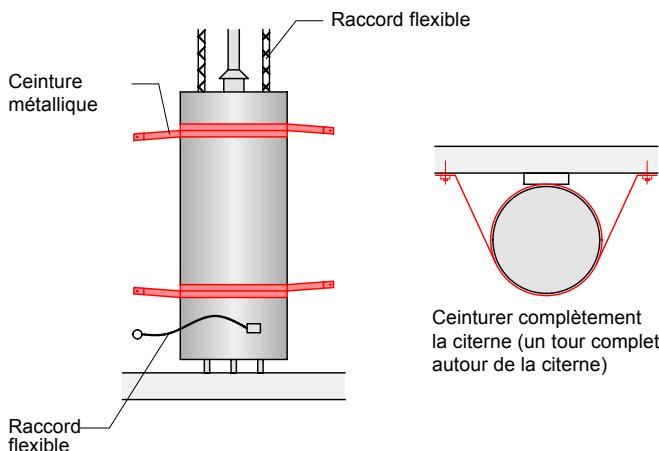


Fig. 2.17.7 > Sécurisation de citerne surélevées

- Les liaisons entre des citerne et les structures qui les supportent doivent être correctement dimensionnées. Les châssis doivent être contreventés et fixés horizontalement (fig. 2.17.5). Les citerne surélevées doivent être ancrées en trois points au moins.
- Lorsqu'une citerne est fixée contre un mur, il faut démontrer la sécurité structurelle de celui-ci.
- Les fondations isolées de citerne doivent posséder une surface d'appui suffisante afin que les citerne ne puissent se renverser.
- Les parois des citerne doivent être dimensionnées en fonction des forces de compression attendues.



Fig. 2.17.8 > Fixation de bonbonnes

- Les citerne peuvent être ceinturées à un mur (fig. 2.17.7). Les chauffe-eau fixés contre un mur doivent être munis d'une cale pour des raisons de protection contre l'incendie.
- Les récipients de petite taille (p. ex. bonbonnes de gaz) doivent également être sécurisés. Les bonbonnes non raccordées peuvent être maintenues en place par des chaînes; celles qui sont raccordées doivent être fixées solidement (fig. 2.17.8).
- Suivant la situation, on prévoira des raccordements flexibles (voir fig. 2.17.6 et point 2.18).

## Indications

- La loi sur la protection de l'environnement (LPE)<sup>[35]</sup>, en particulier l'ordonnance sur les accidents majeurs (OPAM)<sup>[35]</sup> et la loi sur la protection des eaux (LEaux)<sup>[37]</sup> doivent être respectées.
- Dans la mesure du possible, les citerne lourdes doivent être placées dans la partie inférieure du bâtiment. Dans les étages supérieurs, on préférera l'implantation de plusieurs petits réservoirs à une seule citerne dont la masse est concentrée en un seul endroit.
- Les citerne, chaudières et réservoirs peuvent être équipés d'un interrupteur automatique ou d'une vanne de fermeture réagissant aux secousses excessives.

2.18

## Conduites, gaines de ventilation, canaux de câbles

### Caractéristiques et dommages

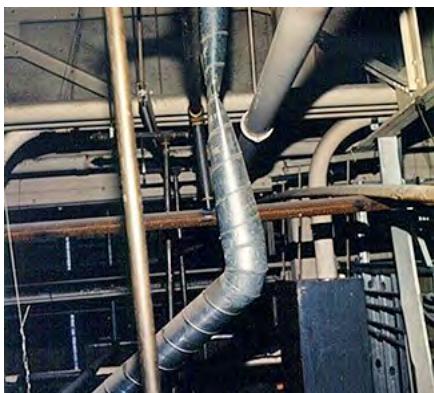


Fig. 2.18.1 &gt; Dégâts dus à des chocs

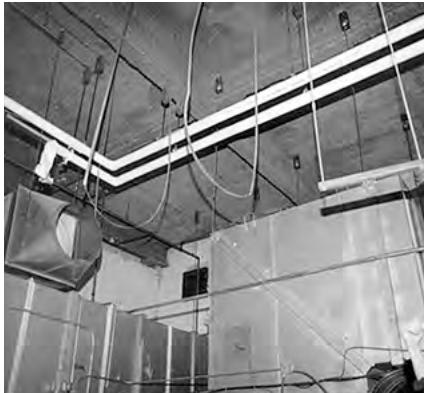


Fig. 2.18.2 &gt; Chute d'une conduite



Fig. 2.18.3 &gt; Dégâts à un embranchement

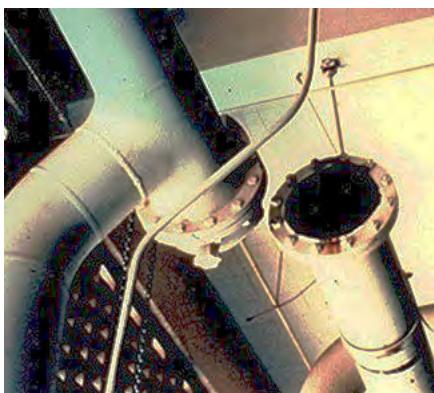


Fig. 2.18.4/2.18.5 &gt; Dégâts sur des raccordements bout à bout



Fig. 2.18.6/2.18.7 &gt; Dommages à des passages à travers des murs

- Les conduites sont sensibles aux déformations et aux accélérations. Des conduites mal fixées peuvent heurter d'autres objets ou tomber (fig. 2.18.1 et 2.18.2).
- Des dégâts se produisent en particulier à cause de déplacements différentiels de grande amplitude entre des points fixes. Sont vulnérables les raccordements, les coudes, les embranchements

de conduites (fig. 2.18.3), les passages (fig. 2.18.6 et 2.18.7) et les raccordements bout à bout (surtout fixes) (fig. 2.18.4 et 2.18.5). Les passerelles de conduites sont également souvent endommagées, p. ex. par rupture des profilés en acier ou rupture de leurs ancrages.

### Dangers

- Danger pour les personnes (brûlures, électrocution, fuite de substances toxiques)
- Dégâts matériels (dégâts d'eau, incendies, explosions)
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

### Mesures

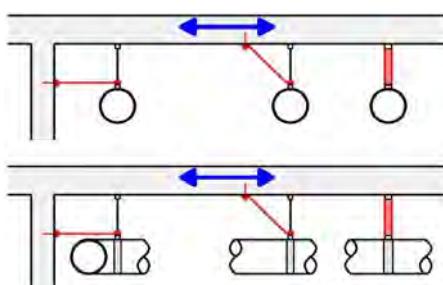


Fig. 2.18.8 &gt; Contreventement longitudinal et transversal de conduites

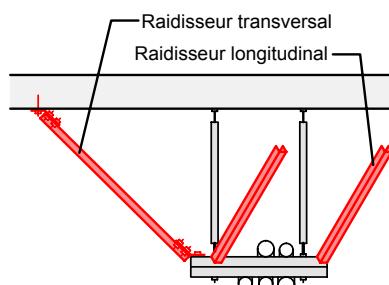


Fig. 2.18.9 &gt; Contreventement longitudinal et transversal de consoles



Fig. 2.18.10 > Raccordements flexibles au droit de traversées murales, contreventement de voies de conduites



Fig. 2.18.11 > Appui de conduites verticales au passage de dalles

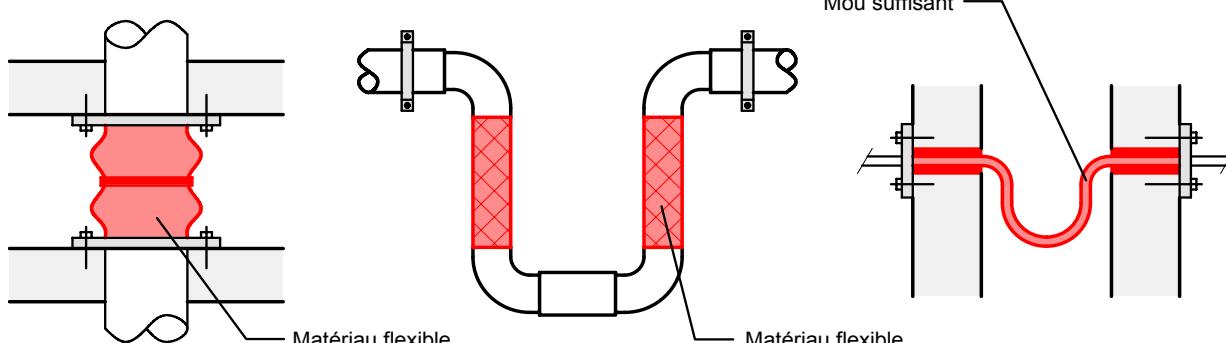


Fig. 2.18.12 > Divers types de raccordements flexibles

- Il peut être nécessaire de contreventer les conduites longitudinalement et transversalement (fig. 2.18.8). Les rails, les consoles ou les passerelles peuvent également devoir être contreventés et ancrés (fig. 2.18.9). Entrent en ligne de compte soit des éléments résistants à la flexion, soit des barres bi-articulées diagonales (inclinaison optimale = 45°).
- Les traversées de murs peuvent aussi être utilisées pour reprendre les forces horizontales, pour autant que l'on ne prévoie pas de déplacements relatifs trop importants. Lorsqu'il n'y a aucun appui, il faut laisser un jeu suffisant entre l'orifice et la conduite.
- Pour chaque segment rectiligne de conduite, il faut disposer au moins un contreventement longitudinal et un contreventement transversal à chaque extrémité du segment. Longitudinalement, il faut être attentif à la transmission des forces de la conduite au contreventement.
- Une possible interaction avec des éléments d'une certaine taille montés à l'intérieur du réseau de conduites doit être prise en compte. En général, il faut disposer un raidisseur de chaque côté de l'élément.
- Les conduites verticales doivent être fixées à intervalles réguliers. Aux passages, les conduites doivent être fixées à la dalle, éventuellement par des amortisseurs si l'on prévoit d'importantes dilatations thermiques (fig. 2.18.11). Il y a lieu de prévoir un jeu suffisant pour tenir compte des déplacements relatifs entre niveaux.
- Des raccords flexibles (fig. 2.18.10), du matériel d'étanchéité ductile et des manchons mobiles peuvent être nécessaires lorsque l'on prévoit d'importants déplacements relatifs, p. ex. entre deux ouvrages ou deux étages, en cas de dilatations, de raccords à des appareils isolés contre les vibrations ou fixés de manière rigide. Le choix dépend du type de conduite et du diamètre ainsi que de l'importance probable des déplacements (fig. 2.18.12).

## Indications

- La LPE<sup>[35]</sup>, en particulier l'OPAM<sup>[36]</sup> et la LEaux<sup>[37]</sup> doivent être respectées.
- On doit éviter les conduites faites de matériaux cassants, tels que fonte, verre ou céramique, ou on les isolera contre les se-cousses. Les fixations rigides combinées à des fixations souples doivent être généralement évitées.
- Des informations relatives à l'implantation et au dimensionnement des appuis longitudinaux et transversaux figurent sous<sup>[13]</sup>.

2.19

## Ascenseurs

### Caractéristiques et dommages



Fig. 2.19.1 > Rails de guidage déformés par des contrepoids



Fig. 2.19.2 > Unité d'entraînement mal fixée



Fig. 2.19.3 > Chute de contrepoids et dégâts aux poutres transversales

- Les ascenseurs fonctionnent par des entraînements à câbles ou hydrauliques. Les composants d'un ascenseur sont présentés à la fig. 2.19.4 et 2.19.5. La sécurisation de composants tels que les portes (2.8), les commandes électroniques (2.13), les pompes et les moteurs (2.15), les réservoirs (2.16) ainsi que les conduits (2.17) est décrite dans les rubriques spécifiques.
- Plusieurs dommages sont possibles: déraillement et chute des contrepoids (fig. 2.19.3), déformation des rails de guidage (fig. 2.19.1) ou du cylindre, déraillement de la cabine, dégâts à la fixation des rails de guidage, endommagement des câbles et/ou câbles porteurs sortis des poulies. Les contrepoids et les rails de guidage sont les composants les plus vulnérables.

### Dangers

- Danger pour les personnes
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

## Mesures

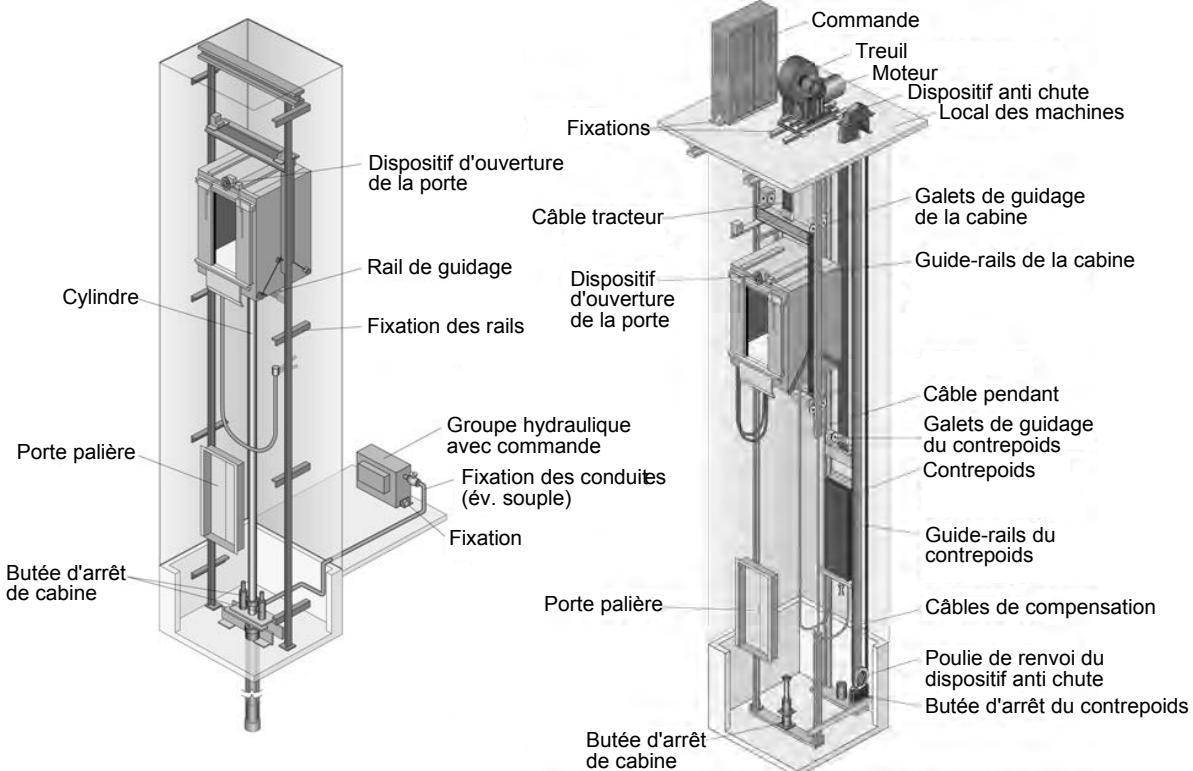


Fig. 2.19.4 &gt; Ascenseur avec entraînement hydraulique

Fig. 2.19.5 &gt; Ascenseur avec entraînement à cable

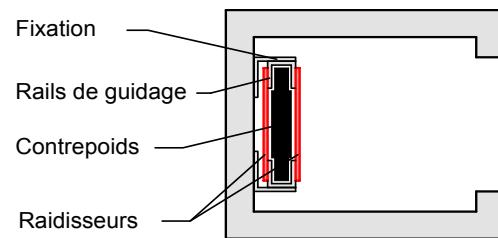
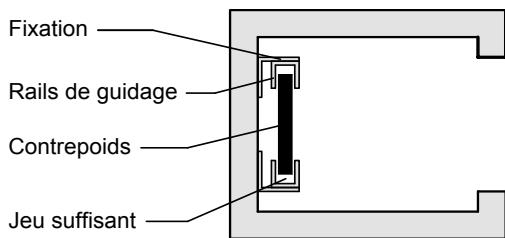


Fig. 2.19.6 &gt; Puits d'ascenseur avec structure de guidage des contrepoids

- La cabine de l'ascenseur et les contrepoids doivent être protégés contre le déraillement et la chute dans les guide-rails. Les guide-rails doivent être correctement ancrés dans l'ouvrage et dimensionnés de manière à résister aux déplacements relatifs attendus entre les différents étages.
- Les câbles porteurs doivent être protégés contre le risque de sortie des poulies de guidage.
- Après un séisme, il faut assurer le fonctionnement du dispositif d'arrêt automatique afin que l'ascenseur s'immobilise en sécurité.

- Le risque que les contrepoids heurtent les rails de guidage peut être réduit grâce à un jeu suffisant ménagé entre les poids et les rails de guidage (fig. 2.19.5 à gauche). Il est aussi possible de rigidifier les rails de guidage par des profilés en acier. Cela permet d'empêcher le balancement des contrepoids (fig. 2.19.5 à droite). On peut aussi intercaler un amortisseur viscoélastique entre les poids et le bâti.

## Indications

- Depuis novembre 2003 s'applique la norme européenne (EN) 81-80 – Safety Norm for Existing Lifts (SNEL)<sup>[38]</sup> (révision en 2020), que la Suisse a reprise dans son intégralité et publiée sous la forme de la norme SIA 370.080<sup>[39]</sup> au 1<sup>er</sup> juillet 2004.
- Depuis 2013 (révision 2019) la norme SIA 370.077 Règles de sécurité pour la construction et l'installation des élévateurs – Applications particulières pour les ascenseurs et les ascenseurs de charge – Partie 77: Ascenseurs soumis à des conditions sismiques<sup>[41]</sup> est en vigueur.

- Dans les ouvrages ayant une fonction importante, les ascenseurs peuvent être équipés de manière à ce qu'ils montent ou descendent à l'étage suivant, s'ouvrent puis se mettent hors-circuit. Le signal est déclenché par un dispositif capable d'enregistrer une mauvaise position du contrepoids ou d'identifier un séisme en mesurant les mouvements du sol. La problématique de ces appareils est cependant qu'ils peuvent aussi se déclencher en présence d'autres vibrations, p. ex. émanant de la circulation ou d'activités de construction

## 2.20 Amortisseurs et isolateurs contre les vibrations

### Caractéristiques et dommages



Fig. 2.20.1 > Ruine de l'appui d'une installation isolée contre les vibrations

- Les installations montées sur un socle isolé afin d'empêcher la propagation de vibrations sont sensibles aux déformations.
- Elles peuvent glisser (fig. 2.20.1), tomber ou heurter d'autres objets. Cela peut aussi endommager des raccords de conduites du fait de déplacements relatifs importants.

### Dangers

- Danger pour les personnes (fuite de liquides dangereux, électrocution, incendie)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

## Mesures



Fig. 2.20.2 &gt; Suspensions à ressort

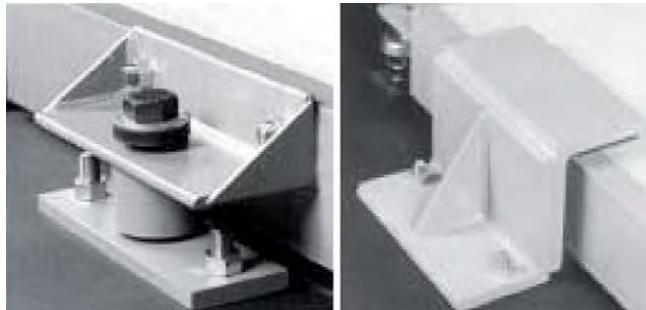


Fig. 2.20.3 &gt; Exemples d'amortisseurs et de tampons

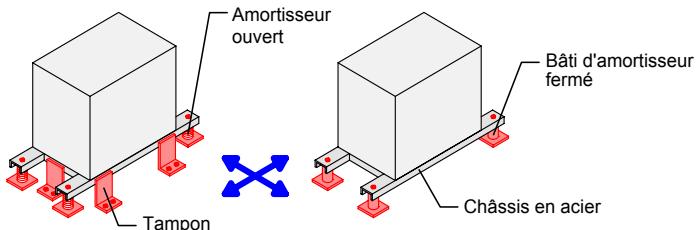


Fig. 2.20.4 &gt; À gauche: suspensions ouvertes avec tampons; à droite: installation montée sur des suspensions à bâti fermé



Fig. 2.20.5 &gt; Suspensions avec sécurisation verticale, tampons servant à limiter les déplacements horizontaux

- Il existe différents systèmes d'amortisseurs à ressorts pour les machines isolées contre les vibrations (fig. 2.20.2).
- Les ressorts dans un bâti fermé permettent des mouvements limités dans toutes les directions (fig. 2.20.4 à droite). Ils doivent être calculés en fonction des forces de cisaillement et de traction attendus.
- Les suspensions à ressorts ouverts, sans résistance au cisaillement et à la traction, doivent être combinées avec des

amortisseurs ou des tampons afin d'empêcher de trop grands déplacements (fig. 2.20.4 à gauche et 2.20.5). Les petits déplacements doivent rester possibles grâce à un certain jeu.

- Les suspensions à ressorts dotées d'un bâti ouvert en haut ne conviennent pas pour empêcher le levage.
- Suivant la situation, il y a lieu de prévoir des raccords flexibles (voir point 2.17).

## Indications

- Dans le domaine des chemins de fer, la mesure de sécurisation parasismique de l'isolation peut interférer avec le dispositif de mise à terre (propagation de potentiel ou courants vagabonds).

2.21

## Éléments IT (informatique et communication)

### Caractéristiques et dommages



Fig. 2.21.1 > Appareils et éléments de bureau tombés à terre



Fig. 2.21.2 > Racks d'ordinateurs renversés



Fig. 2.21.3 > Antenne parabolique tombée à terre

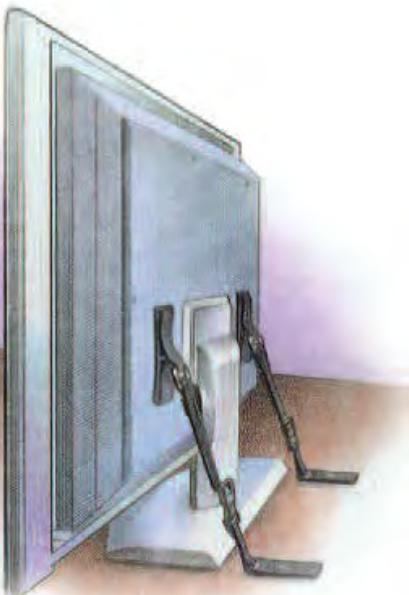
- Les racks d'ordinateurs, d'archivage de données et de média sont généralement très élancés et donc très sensibles aux accélérations. Ils peuvent se renverser ou glisser (fig. 2.21.2). Les raccordements peuvent être coupés.
- Les équipements de petite taille tels qu'ordinateurs, imprimantes, écrans, photocopieuses, etc., peuvent glisser, se renverser, se heurter et/ou tomber à terre (fig. 2.21.1). En l'occurrence, les paramètres importants sont la géométrie des éléments et la qualité des surfaces sur lesquelles ils sont posés.

- Des composants tels que disques durs peuvent être sensibles aux accélérations et endommagés par des forces d'inertie sans même que les appareils dans lesquels ils sont incorporés tombent à terre.
- En général, c'est l'action du vent qui est déterminante pour des éléments légers tels que les antennes et antennes paraboliques. Mal fixés, les récepteurs satellites lourds peuvent cependant aussi tomber à cause de l'action sismique (fig. 2.21.3).

### Dangers

- Danger pour les personnes (électrocution, incendie)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

## Mesures



**Fig. 2.21.4 > Fixation d'un ordinateur**

- Les racks d'ordinateurs doivent être suffisamment fixés au mur ou au sol (voir aussi point 2.13 ou 2.22). Un certain jeu doit être prévu pour les câbles de raccordement (p. ex. câble fléchi). Les équipements implantés sur des systèmes de planchers surélevés sont décrits au point 2.3.
- Les appareils élancés posés sur des tables (p. ex. ordinateurs) peuvent être fixés à l'aide de sangles ou de ceintures, et ceux dont le centre de gravité est bas, posés sur une surface de base assurant une certaine friction.
- Les tables à proximité des issues de secours ou avec des appareils qui sont nécessaires immédiatement après un séisme doivent être fixées.
- Les appareils de grande taille tels que les photocopieuses peuvent être fixés au sol par des équerres.



**Fig. 2.21.5 > Fixation d'un module d'archivage**

- Les ordinateurs comportant des composants sensibles aux accélérations, p. ex. les disques durs, peuvent aussi être montés sur des roulettes. Il faut alors s'assurer qu'il existe une liberté de mouvement suffisante et que les appareils sur roulettes ne puissent pas tomber dans des ouvertures de planchers surélevés (listes fixées le long des orifices ou câbles de sécurité). Des systèmes d'isolation sismiques correctement dimensionnés sur lesquels sont montés les appareils sont recommandés.
- Les câbles de raccordement doivent être suffisamment longs et avoir une certaine liberté de mouvement afin qu'ils ne soient pas arrachés.

## Indications

- Suivant l'usage qui est fait d'un ouvrage, il est capital de préserver les moyens de communication en cas de catastrophe.
- Les données stockées peuvent avoir une grande importance. Celles qui sont très sensibles doivent être stockées au moins à un autre endroit ne pouvant pas être touché par le même séisme.

2.22

## Armoires, étagères

### Caractéristiques et dommages



Fig. 2.22.1 et 2.22.2 &gt; Mécanisme de ruine dans le plan («in plane») pour des étagères



Fig. 2.22.3 &gt; Étagères renversées sur le sol



Fig. 2.22.4 &gt; Modules de rangement renversés et tiroirs ouverts



Fig. 2.22.5 et 2.22.6 &gt; Renversement de plusieurs rangées d'étagères par effet domino



Fig. 2.22.7, 2.22.8 et 2.22.9 &gt; Dégâts malgré des étagères intactes



- Les étagères ou les armoires sont très souvent élancées et lourdement chargées et, par conséquent, sensibles aux forces d'inertie. Souvent, elles s'effondrent parce qu'elles ne sont pas assez solides (fig. 2.22.1 et 2.22.2) ou parce qu'elles se renversent (fig. 2.22.3). En s'ouvrant, les tiroirs accroissent ce danger (fig. 2.22.4). Il peut s'ensuivre un effet domino dans le cas des rangées d'étagères (fig. 2.22.5).
- Souvent, les étagères résistent sans dommages à un séisme, mais des tiroirs et des objets tombent par terre (fig. 2.22.7, 2.22.8 et 2.22.9). Le temps nécessaire au rangement et à la remise en place de leurs contenus peut être considérable.

### Dangers

- Danger pour les personnes
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

## Mesures

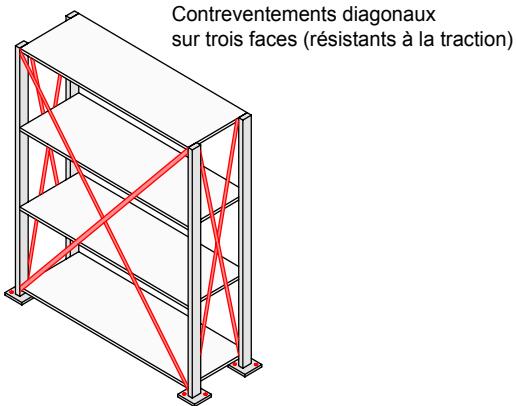


Fig. 2.22.10 &gt; Contreventement et ancrage d'une étagère

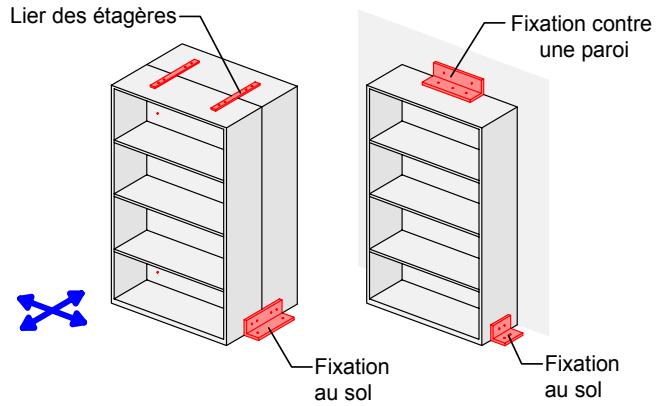


Fig. 2.22.11 &gt; Variantes de sécurisation d'étagères

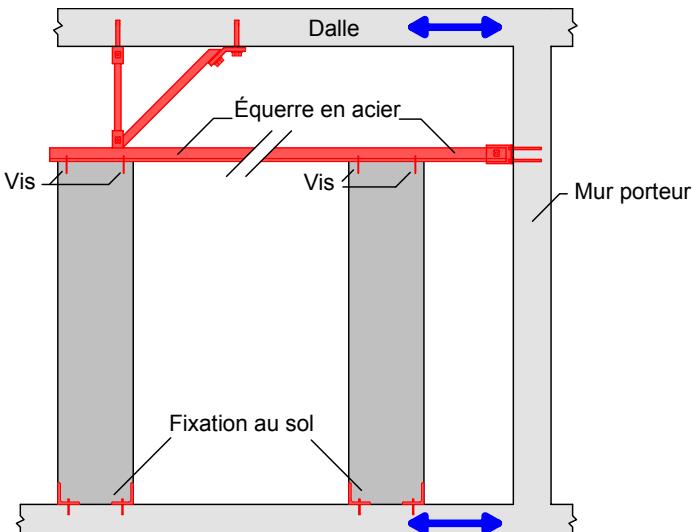


Fig. 2.22.12 &gt; Possibilités de sécuriser des étagères

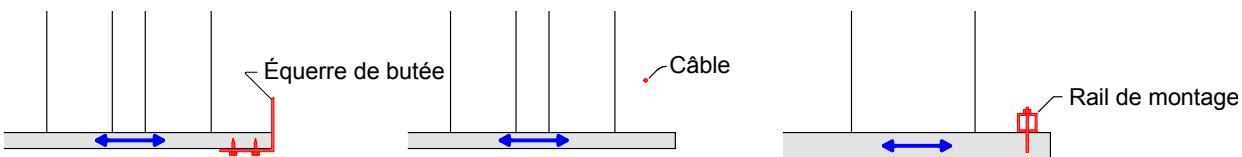


Fig. 2.22.13 &gt; Mesures à mettre en œuvre en vue de protéger des objets posés sur des étagères

- Pour éviter des défaillances dans le plan («in-plane») les étagères doivent être renforcées (p. ex. par des croisillons, fig. 2.22.10). On peut remplacer les étagères ouvertes par des armoires fermées par des portes stables.
- Pour éviter une défaillance hors du plan («out-of-plane»), il peut être nécessaire d'utiliser des fixations au sol, contre un mur suffisamment résistant ou au plafond (fig. 2.22.11). Relier plusieurs unités ou plusieurs rangées d'étagères entre elles permet d'augmenter leur stabilité (fig. 2.22.12).
- Les objets disposés sur des étagères peuvent être protégés contre leur chute par des butées, des tabliers inclinés ou des câbles (fig. 2.22.13). Suivant les circonstances, des butées peuvent également être nécessaires en présence de saillies ou de socles.
- Des mécanismes de blocage ou de verrouillage doivent éviter que les tiroirs et les portes d'armoires s'ouvrent et que les armoires se renversent.

## Indications

- Ces équipements doivent être disposés de manière à ne pas bloquer les chemins de fuite ni les issues de secours, et à ne pas tomber sur des personnes, des objets de valeur ou des vitrages.
- Sur les étagères, les objets lourds doivent être placés de préférence dans leur partie basse.
- D'autres exemples de mesures de sécurité figurent sous<sup>[13]</sup>.

2.23

## Étagères industrielles

### Caractéristiques et dommages



Fig. 2.23.1, 2.23.2 et 2.23.3 > Effondrement d'un entrepôt d'étagères



Fig. 2.23.4 et 2.23.5 > Étagère endommagée et marchandises tombées à terre

## Dangers

- |  |   |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Danger pour les personnes<br><input checked="" type="checkbox"/> Dégâts matériels<br><input type="checkbox"/> Endommagement de la structure porteuse | <input checked="" type="checkbox"/> Perturbation de la fonctionnalité<br><input checked="" type="checkbox"/> Blocage des chemins de fuite<br><input checked="" type="checkbox"/> Dommages à l'environnement |
|--|---|

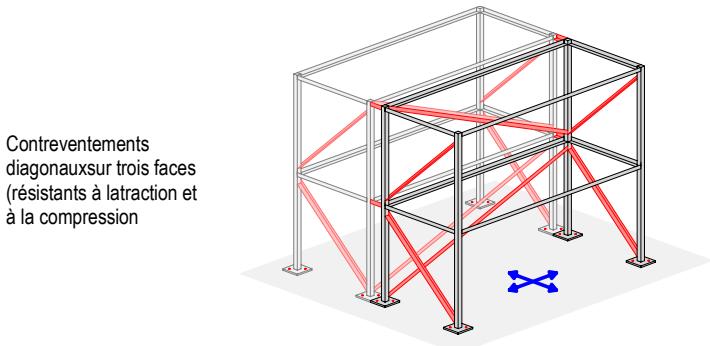
## Situation et dommages



**Fig. 2.23.6 et 2.23.7 > Défaillance dans le plan («in-plane») suite à un assemblage et à un ancrage insuffisants**

- Des marchandises entreposées tombent à terre. Les contenus lourds endommagent les structures légères des étagères (fig. 2.23.1 à 2.23.5).
- Une défaillance de certains composants de la structure (fig. 2.23.6 et 2.23.7) peut déclencher une réaction en chaîne et provoquer la destruction de l'ensemble de l'entrepôt d'étagères industrielles.

## Mesures



**Fig. 2.23.8 > Contreventement et ancrage d'entrepôts de rayonnages en hauteur**

- Le contreventement et l'ancrage des étagères doivent être correctement dimensionnés, et la transmission des charges dans l'ancrage doit être assurée (fig. 2.23.8). Les étagères disposées dos à dos doivent être reliées entre elles.
- Un entrepôt d'étagères industrielles se calcule et se dimensionne comme un ouvrage.
- Si l'entrepôt d'étagères industrielles n'est pas directement fixé sur la chape ou sur ses propres fondations, il faut prendre en considération l'interaction entre l'ouvrage et celui-ci.
- Afin d'éviter la chute des objets entreposés, il faut les assurer à l'aide de barres, de chaînes, de filets ou de contenants avec un dispositif anti-glissoir.

## Indications

- Les marchandises emballées dans des films plastiques et posées sur des palettes ou disposées dans des caisses présentent un moindre danger car elles ont une meilleure stabilité contre le basculement et le glissement. La fig. 2.23.5 montre que des marchandises mises sous film soudé restent en majeure partie intactes même lorsque l'étagère est endommagée.
- D'autres illustrations de dommages, recommandations de mesures et conseils de dimensionnement figurent dans le document<sup>[11]</sup>.

2.24

## Substances dangereuses

### Caractéristiques et dommages



Fig. 2.24.1 et 2.24.2 > Fuite de liquides



Fig. 2.24.3 > Incendie déclenché par des substances dangereuses

- Des récipients peuvent se renverser et glisser des étagères (fig. 2.24.1 et 2.24.2).
- Des liquides et des gaz peuvent s'échapper et générer des vapeurs et des mélanges dangereux ainsi que des incendies. Les récipients en verre sont particulièrement dangereux.
- L'entreposage inapproprié de substances chimiques, médicales et biologiques dangereuses (substances explosives, virus, toxines, etc.) et les accidents qui en résultent aboutissent généralement à l'évacuation et à l'inspection du bâtiment même lorsque la structure porteuse n'est pas endommagée (fig. 2.24.3).

### Dangers

- Danger pour les personnes (échappement de substances dangereuses et danger d'incendie)
- Dégâts matériels
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité (évacuation nécessaire du bâtiment)
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

## Mesures



**Fig. 2.24.4 > Enveloppe de protection sur appui transversal, étiquetage de la substance transportée**

- Le contreventement et l'ancrage d'étagères ainsi que la protection de récipients contre le risque de chute doivent obéir aux considérations exposées au point 2.22. Les matériaux dangereux doivent être placés au bas des étagères.
- Les récipients doivent être fermés par un couvercle afin que les liquides ne puissent pas s'en échapper. Les récipients d'une certaine taille doivent être fixés indépendamment les uns des autres (p. ex. bonbonnes, voir point 2.16).
- Les vannes de fermeture automatiques peuvent empêcher que des substances dangereuses ne s'échappent.
- Les récipients faits de matériaux cassables tels que le verre doivent être protégés par un rembourrage. Les petits objets fragiles doivent être stockés bien emballés. Les substances non compatibles doivent être stockées à distance les unes des autres.
- Les conduites transportant des substances dangereuses doivent être munies de systèmes de sécurité appropriés convenant aussi à l'exploitation normale, p. ex. des tuyaux à double paroi, des vannes automatiques de fermeture ou de trop-plein et des systèmes de détection des fuites. Il faut utiliser des matériaux et des raccords suffisamment ductiles, p. ex. des tuyaux soudés à cœur. Il faut également utiliser des colliers appropriés, qui n'endommagent pas les conduites.

## Indications

- La loi sur la protection de l'environnement (LPE)<sup>[35]</sup>, en particulier l'ordonnance sur les accidents majeurs (OPAM)<sup>[36]</sup> et la loi sur la protection des eaux (LEaux)<sup>[37]</sup> doivent être respectées.
- Le contenu et la direction de l'écoulement doivent être indiqués de manière bien visible sur les conduites afin que les forces d'intervention puissent identifier immédiatement le danger (fig. 2.24.4).
- Les substances chimiques et les produits toxiques doivent être correctement répertoriés et étiquetés.
- Le personnel doit être formé afin qu'il puisse agir correctement avec les substances dangereuses lors d'accidents.

2.25

## Objets d'art, mobilier, décoration d'intérieur

### Caractéristiques et dommages



Fig. 2.25.1 et 2.25.2 > Objets d'art endommagés



Fig. 2.25.3 > Dégâts subis par du mobilier

- Des dégâts se produisent généralement parce que l'entreposage des objets n'est pas adéquat et que ceux-ci peuvent glisser, se renverser ou tomber (fig. 2.25.1 à 2.25.3).
- Les objets compacts ont plutôt tendance à glisser, tandis que ceux qui sont élancés (hauts et étroits) tendent plutôt à se renverser.
- Les objets en porte-à-faux peuvent osciller et leur fixation peut céder

### Dangers

- Danger pour les personnes
- Dégâts matériels (perte de biens culturels)
- Endommagement de la structure porteuse
- Perturbation de la fonctionnalité
- Blocage des chemins de fuite
- Dommages à l'environnement

## Mesures

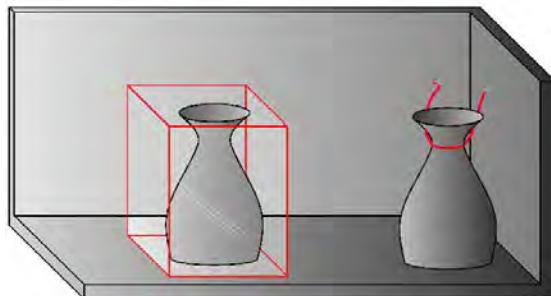


Fig. 2.25.4 > Mesures applicables aux objets d'art et d'exposition

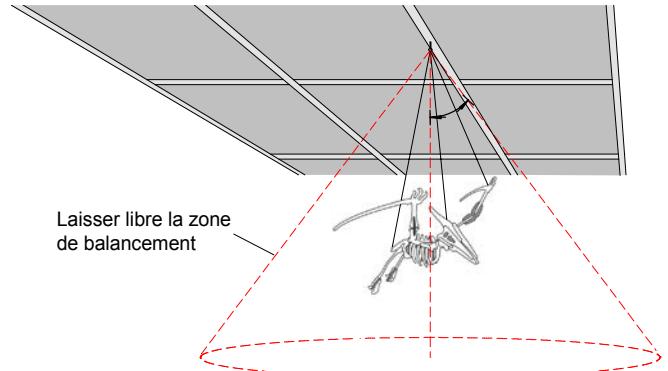


Fig. 2.25.5 > Cône de balancement d'un objet d'exposition suspendu



Fig. 2.25.6 et 2.25.7 > Fondation isolée contre les vibrations destinée à une sculpture



- Les objets posés sur des étagères doivent être protégés par des bâts compacts ou des fils fins (fig. 2.25.4). Pour les vitrines, on doit se servir de verre de sécurité. Les objets particulièrement précieux doivent être conservés de manière à être protégés contre la poussière et l'eau (p. ex. si des installations sprinklers sont endommagées).
- Les objets suspendus nécessitent un espace libre suffisant pour permettre leur balancement sans risque de collision ou de chute (fig. 2.25.5).
- Pour les objets sur roulettes ou sur roues, on doit s'assurer que toute collision avec d'autres objets ou installations soit absolument exclue. Les roues doivent pouvoir être bloquées ou alors, les objets doivent être attachés.

- Les œuvres picturales doivent être fixées de manière à ce qu'elles ne puissent pas se décrocher et tomber (p. ex. clous avec crochets).
- Les objets de grande taille, p. ex. les statues, doivent être fixés. Dans certains cas particuliers, on peut construire une fondation isolée contre les vibrations (fig. 2.25.6 et 2.25.7).
- Les plantes de grande dimension doivent être entreposées dans des endroits non critiques et, éventuellement, assurées par des câbles ou des chaînes.

## Indications

- D'autres variantes de confortement applicables aux objets posés sur des rayonnages sont décrites au point 2.22.
- Dans la mesure du possible, les zones où séjournent des personnes et les chemins de fuite doivent être libres de mobilier lourd ou de grande taille.

---

# 3 Exigences, responsabilités et démarches recommandées en vue de limiter les dommages

*L'étude et la réalisation des mesures nécessaires imposent de définir et de régler les responsabilités des partenaires du projet. Les solutions possibles permettant de limiter les dommages (réduction du risque) touchant les ENIE varient selon que les éléments considérés se trouvent dans un bâtiment existant ou sont prévus dans un nouvel ouvrage, selon qu'il s'agit d'un bâtiment très fréquenté, d'une installation importante ou d'un ouvrage dans lequel sont traitées des substances dangereuses. Il faut alors faire la distinction entre les prescriptions normatives et les exigences relevant de l'initiative du maître de l'ouvrage ou du propriétaire.*

## 3.1 Exigences normatives et volontaires

Les normes SIA sur les structures porteuses exigent que les éléments non-structuraux dangereux soient assemblés, fixés ou ancrés de manière parasismique. Les autres éléments secondaires, installations et équipements d'un bâtiment devraient eux aussi être sécurisés dans l'optique de limiter les dommages consécutifs à des tremblements de terre. Or cela n'est pas réglementé par les normes de construction appliquées en Suisse. Les exigences en la matière doivent donc être définies pour chaque projet spécifiquement et dans l'intérêt propre (responsabilité individuelle).

Les projets de construction doivent respecter les exigences et les réglementations du droit public de la construction. En Suisse, la réalisation parasismique d'ouvrages s'appuie sur les normes SIA sur les structures porteuses, dont la génération actuelle existe depuis 2003 (révision à partir de 2013). L'étude et la réalisation parasismiques de nouveaux ouvrages obéissent aux normes SIA 260 à 267. L'analyse et l'éventuel amélioration d'ouvrages existants sous l'angle de leur sécurité sismique se basent sur la norme SIA 269/8 (cahier technique 2018 [27] avant l'entrée en vigueur de la norme). L'objectif prioritaire visé par l'étude et la réalisation parasismiques d'ouvrages est de protéger la vie humaine (sécurité des personnes). La limitation des dommages matériels et la garantie de l'aptitude au fonctionnement d'ouvrages importants sont d'autres objectifs de protection à remplir.<sup>1</sup>

Tous les ouvrages doivent satisfaire à des exigences normatives relatives à la sécurité sismique de leurs **éléments non-structuraux** si ceux-ci peuvent mettre en danger des personnes ou endommager la structure porteuse. Quelle que soit la classe d'ouvrage, leur réalisation parasismique conformément à la norme SIA 261 [24], chiffre 16.7.1, doit être étudiée et calculée par un ingénieur civil.

<sup>1</sup> Les ouvrages spéciaux tels que les centrales nucléaires (voir [www.ensi.ch](http://www.ensi.ch)), les barrages (voir [www.admin.bfe.ch](http://www.admin.bfe.ch)) les installations significatives dans le contexte des accidents majeurs (voir [www.bafu.admin.ch/stoerfallvorsorge](http://www.bafu.admin.ch/stoerfallvorsorge)) obéissent à d'autres prescriptions pouvant aller au-delà de celles des normes SIA sur les structures porteuses, même s'agissant de la sécurité sismique des ENIE.

---

De plus, des exigences s'appliquent pour les éléments de construction non-structuraux d'ouvrages des **classes d'ouvrage II et III** dont la défaillance peut porter préjudice au fonctionnement d'installations importantes ou vitales, endommager des équipements de grande valeur, ou menacer l'environnement.

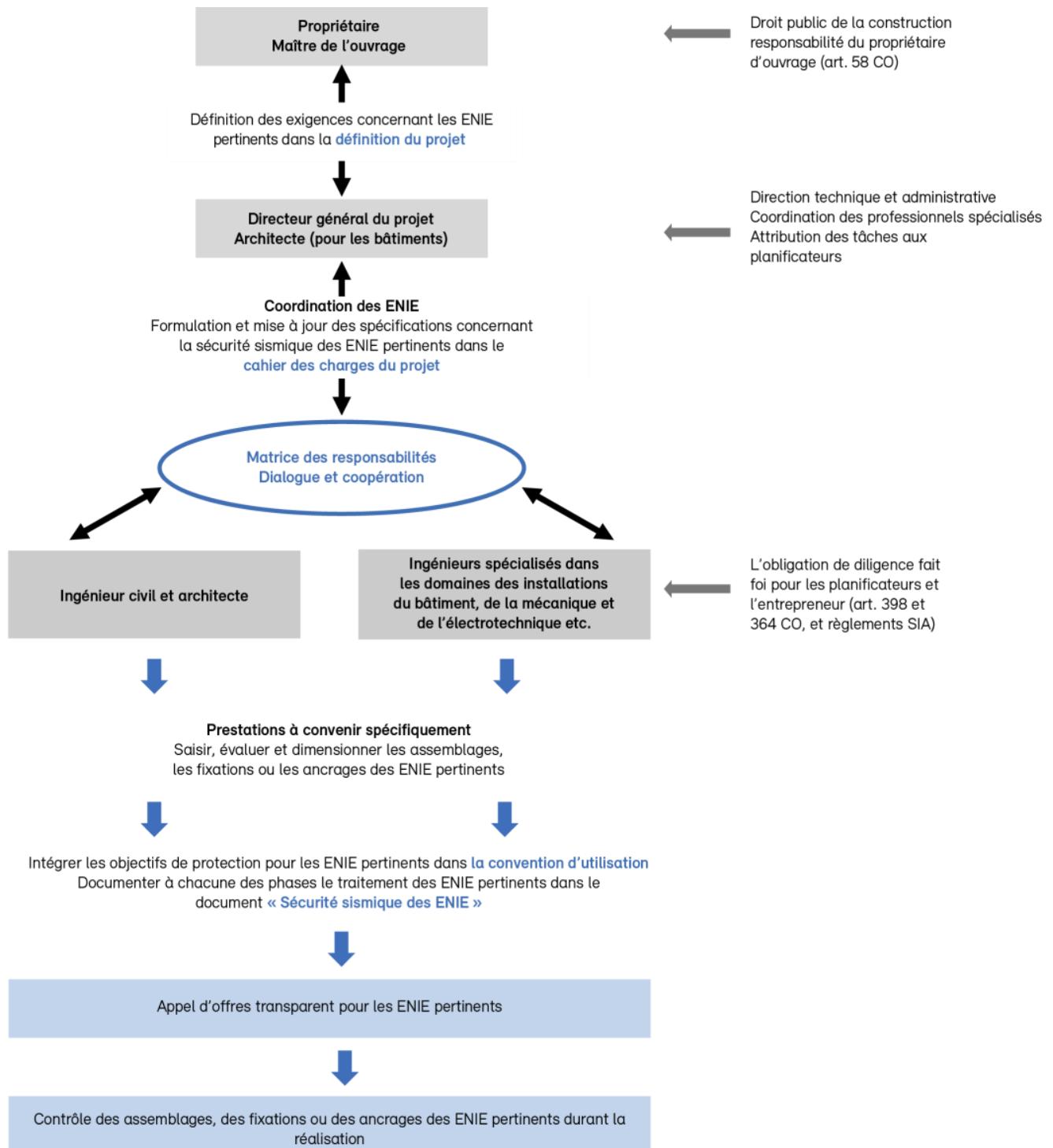
Les exigences les plus sévères concernent les ENIE directement liés à la fonctionnalité d'ouvrages de la **classe d'ouvrage III**, c'est-à-dire des infrastructures vitales telles que les hôpitaux de soins aigus, les ouvrages servant à la protection contre les catastrophes (p. ex. casernes de pompiers ou garages d'ambulances) ou les ouvrages ayant une importance vitale pour l'approvisionnement, l'évacuation et les télécommunications. Pour ceux-ci, il est requis d'apporter, en plus de la preuve de la sécurité structurale, la preuve de l'aptitude au service de tous les ENIE nécessaires à la fonction vitale de l'ouvrage. La publication de l'OFEV « Sécurité sismique en cas de fonction vitale - ouvrages de la classe d'ouvrage III selon la norme SIA 261 » contient des explications spécifiques [42].

Il n'existe pas d'exigences normatives applicables à la réalisation parasismique d'autres ENIE dans l'optique de la préservation de la production et/ou de l'exploitation d'un bâtiment « normal » des classes d'ouvrage I ou II. Dans ces cas, les exigences posées aux ENIE doivent être éfinies spécifiquement dans chaque projet.

Des ENIE considérés comme dangereux selon les prescriptions normatives seront désignés comme ENIE **pertinents** ci-après.

### 3.2 Responsabilités et compétences

Outre les bases légales existantes, ce sont surtout les règlements SIA 102 [18], SIA 103 [19] et SIA 108 [20] qui permettent de délimiter les prestations en matière de confortement parasismique des ENIE. Conformément au règlement SIA 112 [21], trois documents sont à disposition pour clarifier les interactions entre les maîtres d'ouvrage et les mandataires : la « Définition du projet », le « Cahier des charges du projet » et la « Convention d'utilisation ». La figure 3.1 illustre les responsabilités et les compétences des partenaires dans un projet de construction classique. L'architecte endosse habituellement le rôle de directeur général du projet. L'ingénieur civil, – les ingénieurs en technique du bâtiment, construction de machines et électrotechnique ainsi que l'ingénieur en façades – agissent en qualité de professionnels spécialisés. Le professionnel spécialisé a pour mandat d'étudier et de contrôler l'exécution des éléments de construction élaborés par ses soins (voir aussi [4], [28], [29]).

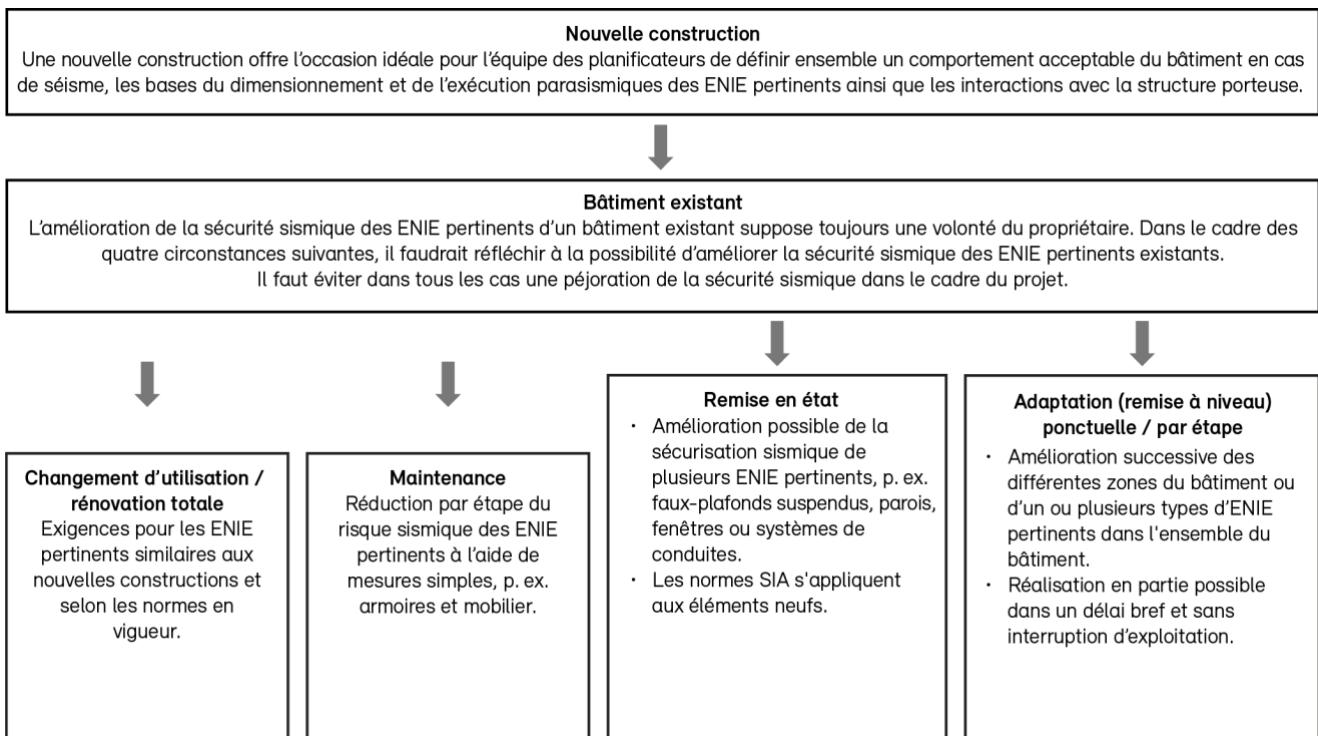
**Fig. 3.1 Responsabilités et compétences**

### 3.3 Démarches recommandées pour limiter les dommages (réduction du risque)

#### 3.3.1 Situations initiales possibles

Il est toujours plus efficace de réaliser des assemblages, fixations ou ancrages parasismiques des ENIE pertinents pendant l'exécution et avant la mise en service d'un ouvrage plutôt que de le faire *a posteriori*. Pour les ouvrages existants, une amélioration de la sécurité sismique des ENIE pertinents est réalisable plus rapidement que pour la structure porteuse, étant donné la durée d'utilisation et la longévité sensiblement plus courte des ENIE pertinents. (fig. 3.2)

**Fig. 3.2 Possibilités d'intervention pour réduire le risque sismique des ENIE**



#### 3.3.2 Facteurs d'influence importants

Certains assemblages, fixations ou ancrages parasismiques d'installations et d'équipements CVCSE (chauffage, ventilation, climatisation, sanitaire, électricité) peuvent être réalisées sans ingénieur civil, d'une façon simple et quasiment sans frais. En revanche, d'autres mesures de sécurité, touchant par exemple des citerne, des chaudières ou des réservoirs, nécessitent les calculs d'un ingénieur civil ainsi que des spécifications précises quant à leur conception et à leur exécution. L'étude, le calcul et l'exécution parasismiques des ENIE nécessitent donc un dialogue entre les professionnels spécialisés.

Si le potentiel de dommages aux personnes et de dégâts matériels causés par des ENIE sous action sismique est faible, des solutions de protection simples et peu coûteuses peuvent être élaborées en commun par les auteurs du projet. Dans le cas d'ouvrages de la classe d'ouvrage III, un mandat de coordination pour les ENIE est à attribuer à un ingénieur spécialisé en génie parasismique. Il peut aussi être judicieux de faire effectuer l'analyse et l'estimation du risque par un spécialiste externe puis de confier la réalisation au groupe de mandataires sans autre accompagnement. Dans tous les cas, les ENIE pertinents et les solutions pour leur

---

sécurisation doivent être consignés dans le document « Sécurité sismique des ENIE » rédigé par le directeur général du projet ou l'ingénieur civil.

Il est à noter que le traitement des ENIE pertinents par les professionnels spécialisés est à convenir comme prestation particulière. Dans les projets de construction, il n'est pas possible d'établir une liste et un descriptif suffisamment détaillés des ENIE pertinents au moment de l'adjudication aux professionnels spécialisés (généralement à la fin de la phase 2 « Études préliminaires »). Il peut donc être plus pertinent, s'agissant des ENIE pertinents, de proposer des honoraires selon le temps effectif consacré à la phase d'étude du projet et une estimation concrète des honoraires des prestations pour la phase de réalisation. Outre le saisie, l'évaluation et le dimensionnement, cette phase comprend le contrôle des travaux et la réception des ENIE pertinents. Dans tous les cas, le propriétaire doit être prêt à rémunérer les prestations spéciales complémentaires que des mandataires fournissent dans le but de limiter les dommages.

L'exécution correcte de la sécurisation parasismique des ENIE pertinents presuppose un appel d'offres transparent pour les entrepreneurs, les fournisseurs et les fabricants. Hormis les exigences spécifiques concernant la sécurisation parasismique de chaque ENIE pertinents, cela signifie aussi de fournir des données concrètes sur l'exécution de chaque élément considéré. Exemple : si une largeur d'appui minimale est requise pour les éléments d'un faux-plafond suspendu, celle-ci doit être décrite. À l'inverse, il est aussi possible que la réalisation parasismique et les détails d'exécution de certains ENIE, p. ex. les systèmes de façade (voir point 2.5), ne puissent être définis que dans la phase de réalisation. Les dossiers d'appel d'offres doivent alors le préciser en toute transparence.

Suivant les exigences, les mesures parasismiques des ENIE pertinents peuvent aller des solutions standard usuelles à des certifications spécifiques de certains produits ou d'éléments complets (p. ex. par des essais sur table vibrante). La décision relative à l'application d'une mesure et à sa réalisation concrète peut s'étaler jusque dans la phase de réalisation. Il est donc essentiel que les responsabilités et les compétences des professionnels spécialisés soient clairement définies aussi pour cette phase. Pour un ENIE pertinents donné, il peut s'agir de bases de calcul spécifiques, d'exigences conceptuelles ou de considérations techniques de la part des professionnels spécialisés.

Dans le cadre du contrôle des travaux, les professionnels spécialisés contrôlent la réalisation correcte de la sécurisation parasismique des ENIE pertinents sous leur responsabilité. Avec la réception, les ENIE pertinents réalisés sont remis au propriétaire/maître d'ouvrage, lequel répond dès ce moment du risque et des dommages.

### 3.3.3 Instruments pour la pratique

Sur la base de la **définition du projet** et du **cahier des charges du projet** les décisions et spécifications concernant les ENIE pertinents peuvent être fixer dans la **convention d'utilisation** à chaque phase. À l'aide du **document « Sécurité sismiques des ENIE »**, il est possible de développer, en concertation avec le propriétaire/maître d'ouvrage, une stratégie de sécurisation des ENIE pertinents sur la base de laquelle les décisions relatives aux mesures proposées pourront être prises au fur et à mesure de l'avancement du projet.

Les instruments suivants aident à l'élaboration de ces documents, car ils simplifient la répartition des responsabilités et des compétences entre les partenaires du projet et facilitent la formulation des exigences posées à la sécurité sismique des ENIE pertinents :

- Formulaire de saisie & matrice des compétences
- Éléments de texte pour la documentation du projet
- Procès-verbal de réception

Ces instruments s'appliquent tant aux nouveaux ouvrages qu'aux ouvrages existants.

#### 3.3.3.1 « Formulaire de saisie » destiné à la saisie et à la priorisation des ENIE

Le formulaire de saisie (annexe A1) permet, d'une part, d'identifier les ENIE pertinents et, d'autre part, d'estimer si et où des solutions simples suffisent ou des investigations plus poussées sont requises. Il est important, dans une première phase, de saisir tous les éléments et d'évaluer les dommages potentiels. Les éléments qui ne présentent pas un potentiel de dommage significatif ou qui ne nécessitent pas de stabilisation seront mis de côté. Suivant les exigences et la priorité, les mesures de sécurisation requises pour les éléments restants seront soit calculées et dimensionnées par un professionnel spécialisé, soit directement ordonnées par le directeur général (ou par d'autres mandataires). Pour pouvoir remplir le formulaire de saisie, il faut que le propriétaire/maître d'ouvrage et les professionnels spécialisés puissent répondre non seulement aux questions relatives à l'affectation et à l'occupation du bâtiment, mais aussi à celles qui touchent son fonctionnement après un séisme. L'ampleur acceptable des dommages non-structurels doit être discutée et fixée. À cet égard, il est aussi possible de relever les conséquences financières de la détérioration ou de la destruction des éléments considérés. La durée des perturbations de l'exploitation ou de l'utilisation d'un ouvrage ainsi que leurs conséquences économiques peuvent également faire partie d'une évaluation complète du risque. Le formulaire de saisie doit être élaboré à un stade précoce du projet et idéalement être rempli par le directeur général, les professionnels spécialisés et le propriétaire (exploitant/utilisateur).

#### 3.3.3.2 « Matrice des responsabilités »

Il est recommandé— sur la base du formulaire de saisie— de procéder à la répartition des tâches à l'aide d'une matrice des responsabilités (annexe A2). Elle permet d'attribuer, aussi bien aux différentes phases (et aux phases partielles) du projet qu'aux différents protagonistes, les responsabilités de l'ensemble des prestations à fournir dans le cadre de la sécurisation parasismique des ENIE pertinents. Une matrice des responsabilités en tant qu'instrument de coordination devrait être définie dès les études préliminaires dans la définition du projet et dans le cahier des charges du projet et finalement être établie spécifiquement pour le projet dans le document « Sécurité sismique des ENIE ». Dans le cas des classes d'ouvrage II et III, il est recommandé d'attribuer la responsabilité de l'élaboration du document « Sécurité sismique des ENIE » au directeur général de projet. Les questions suivantes peuvent être utiles dans l'élaboration de la matrice des responsabilités :

- Dans quelle phase du projet l'ingénieur civil peut-il livrer les données de base résultant de l'analyse de la structure porteuse qui sont nécessaires pour le dimensionnement et l'exécution des ENIE pertinents?

- 
- Quels ENIE pertinents peuvent être fixés ou ancrés sans autres exigences spécifiques de manière parasismique (p. ex. armoires et étagères ou leurs contenus)?
  - Quels ENIE pertinents peuvent être fixés ou ancrés de manière parasismique à l'aide de solutions standard éprouvées ailleurs (p. ex. faux-plafonds suspendus)?
  - Quels sont enfin les ENIE pertinents qui nécessitent un calcul d'ingénieur civil et pour lesquels l'ingénieur civil doit déterminer les exigences spécifiques en termes de fixation ou d'ancrage ainsi que d'exécution d'un élément?

### 3.3.3.3 Éléments de texte pour la documentation de projet

Dans la **définition du projet**, le maître d'ouvrage/propriétaire fixe les objectifs fondamentaux et les exigences en matière de sécurité sismique pour les ENIE. Le **cahier des charges du projet** est élaboré sur cette base et il précise les fonctions et les propriétés des ENIE nécessaires pour atteindre ces objectifs. Constituant le volet ingénierie du cahier des charges du projet, la **convention d'utilisation** instaurée en 2003 avec la norme SIA 260 [23] doit être développée de manière interdisciplinaire par l'ingénieur civil avec le maître de l'ouvrage et les responsables du projet, et être approuvée par le maître de l'ouvrage. La convention d'utilisation décrit les exigences de sécurité sismique pour la structure porteuse. Concernant les exigences pour les ENIE pertinents, elle décrit la procédure pour assurer leur sécurité sismique et fait référence au document « Sécurité sismique des ENIE ». Les expériences de la pratique montrent que l'élaboration d'un document distinct « Sécurité sismique des ENIE » fait du sens. Ce document est élaboré par le directeur général de projet. Il documente les exigences pour les ENIE pertinents (selon la définition du projet et le cahier des charges du projet), les ENIE pertinents (formulaire de saisie), les professionnels spécialisés responsables pour leur sécurisation (matrice des responsabilités), les décisions concernant les besoins de sécurisation (formulaire de saisie) et la description des mesures de sécurisation réalisées. Pour l'élaboration du document « Sécurité sismique des ENIE », le dialogue et la coopération entre tous les professionnels spécialisés est essentielle. Le document doit être mis à jour à la fin de chaque phase de projet et approuvé à nouveau par le maître d'ouvrage. La version finale du document « Sécurité sismique des ENIE » fait partie intégrante de la documentation de projet et forme la base pour l'entretien correct des mesures de sécurisation des ENIE pertinents contre les séismes. Le formulaire de saisie et la matrice des compétences forment une base déterminante pour l'élaboration de ce document. L'annexe A3 contient des éléments de texte utiles.

### 3.3.3.4 « Procès-verbal de réception »

Pendant la phase de réalisation, les professionnels spécialisés compétents vérifient, par des contrôles des travaux, la bonne exécution des mesures de sécurisation parasismique projetées pour les ENIE considérés. Avec la réception, ces ENIE sont finalement remis au propriétaire/maître de l'ouvrage, lequel en répond dès ce moment. Un exemple de procès-verbal de réception figure à l'annexe A4. Le formulaire de saisie peut servir de base au contrôle des travaux et à la réception et être annexé au procès-verbal de réception.

# Annexes

## A1 Formulaire de saisie

Le formulaire de saisie sert à recenser et à estimer les risques inhérents aux ENIE. Les questions ci-dessous aident à recenser les ENIE et à établir les priorités :

**Fig. A1.1.1 : Quels éléments sont directement ou indirectement des éléments non-structuraux dangereux?**

À gauche : éléments de façade tombés à terre

À droite : façade vitrée détruite



**Fig. A1.1.2 : Quels éléments peuvent empêcher des opérations de secours ou bloquer des chemins de fuite?**

À gauche : escalier très endommagé

À droite : éléments de plafond tombés à terre y c. câbles et gaines de ventilation



**Fig. A1.1.3 : Quels éléments peuvent causer une panne d'exploitation ou des perturbations ?**

À gauche : *rupture d'une conduite d'eau chaude en cuivre*

Au centre : *un tuyau non fixé est rompu à l'endroit du raccord*

À droite : *destruction totale de l'ossature du faux-plafond, des éléments de faux-plafond et de l'éclairage dans un hôpital de Los Angeles*

**Fig. A1.1.4 : Quels éléments peuvent menacer l'environnement ?**

À gauche : *dégâts à des oléoducs après leur chute due à la destruction de raccords*

Au centre : *sous-sol d'une centrale inondé d'huile et d'eau*

À droite : « pied d'éléphant » à la base d'une citerne d'essence insuffisamment ancrée



**Fig. A1.2: Exemple de formulaire de saisie pour ENIE**

## A2 Matrice des responsabilités

La matrice des responsabilités permet d'attribuer, pour toutes les prestations à fournir en lien avec la sécurisation parasismique des ENIE, les responsabilités inhérentes aux différentes phases d'un projet (et aux phases partielles) ainsi que celles de chacun des partenaires du projet.

**Fig. A2.1: Exemple de matrice des responsabilités pour ENIE**

## A3 Éléments de texte pour la documentation de projet

Les éléments de texte proposés ci-après peuvent s'intégrer selon les spécificités d'un projet. Le but est de documenter au fil du projet et selon les phases quels ENIE doivent être traités comme éléments pertinent au sens de la norme SIA 261 [24], chiffre 16.7.1. Les exigences qui en résultent sont à fixer. Les décisions et définitions doivent être mis à jour de façon continue et présentés au mandant pour approbation.

### A3-1 Phase des études préliminaires

A3-1.1 Contenus textuels pour la définition de projet et le cahier des charges de projet

Le traitement et par cela la sécurisation parasismique des ENIE pertinents doit être défini comme objectif dans la **définition de projet**. Les objectifs de protection essentiels concernant la sécurité sismique des ENIE pertinents et l'organisation de leur traitement dans les différentes phases de projet doivent être consignés dans le **cahier des charges de projet**. Il s'agit notamment de la détermination des objectifs de protection normatifs, de l'utilisation du formulaire de saisie et de la matrice de responsabilités ainsi que de l'élaboration du document « Sécurité sismique des ENIE » lors du projet. Ces éléments constituent la base indispensable pour une étude de projet ciblée par les professionnels spécialisés mandatés.

### A3-2 Phase allant de l'étude du projet à la réalisation

A3-2.1 Éléments de texte pour la convention d'utilisation

La **convention d'utilisation** est élaborée par l'ingénieur civil. Ce document fixe les objectifs de protection contre les séismes dont découle la pertinence des ENIE. Les objectifs de protection résultent des exigences normatives qui ont été définies dans la définition de projet et dans le cahier des charges de projet.

Selon la norme SIA 261 (2020) l'ouvrage est assigné à la classe d'ouvrage ...

Les objectifs de protection suivants doivent être pris en compte pour l'ouvrage :

(*pour toutes les classes d'ouvrage*)

Protection des personnes

Limitation des dommages

(*en plus pour les classes d'ouvrage II et III*)

Garantie de l'aptitude au service d'ouvrages importants ou vitales

La pertinence d'un ENIE est donnée si sa défaillance peut :

(*pour toutes les classes d'ouvrage*)

Mettre en danger des personnes

Endommager la structure porteuse

(*supplémentaire pour les classes d'ouvrage II et III*)

Porter préjudice au fonctionnement d'installations importantes (ou vitales)

Endommager des équipements de grande valeur où menacer l'environnement

Les mesures de sécurisation nécessaires pour satisfaire les exigences selon la norme SIA 261 (2020), chiffre 16.7, sont définies dans le document « Sécurité sismique des ENIE » par le directeur général de projet / le mandataire général et les professionnels spécialisés.

### A3-2.2 Éléments de texte pour le document « Sécurité sismique des ENIE »

Les exigences quant à l'élaboration de la sécurité sismique des ENIE pertinents sont décrites dans le **document « Sécurité sismique des ENIE »**. Outre les éléments non-structuraux d'autres installations et équipements doivent être listés, qui ont été définis comme pertinents selon les objectifs de protection normatifs lors d'un relevé établi précédemment par le maître de l'ouvrage/directeur général (coordination des ENIE) avec l'ingénieur civil.

#### Recensement des ENIE et estimation du risque sismique

Intégrer les résultats du formulaire de saisie dans le document.

#### Responsabilités et compétences en matière de traitement parasismique des ENIE

Intégrer la matrice des compétences dans le document

Définition des objectifs de protection et des ENIE pertinents qui en découlent :

Selon la norme SIA 261 (2020) l'ouvrage est assigné à la classe d'ouvrage ...

Au sens de la norme SIA 261 (2020), chiffre 16.7.1, les ENIE suivants qui se trouvent dans et sur la structure porteuse sont identifiés comme pertinents :

(pour toutes les classes d'ouvrage)

Mettre en danger des personnes : ...

Endommager la structure porteuse : ...

(supplémentaire pour les classes d'ouvrage II et III)

Porter préjudice au fonctionnement d'installations importantes (ou vitales) : ...

Endommager des équipements de grande valeur : ...

Menacer l'environnement : ...

#### Énumérer ci-après pour tous les ENIE pertinents :

- quel objectif de protection est concerné par une défaillance de l'ENIE
- si aucune mesure spécifique n'est nécessaire car l'ENIE est assemblé, fixé ou ancré de façon suffisamment sûre par défaut.
- si des mesures constructives pour la sécurisation peuvent directement être mises en oeuvre
- si des mesures de sécurisation doivent être définies après de plus amples vérifications par un professionnel spécialisé

La prise en compte de l'objectif de limitation des dommages demande une interprétation spécifique au projet. Le propriétaire/maître d'ouvrage décide dans quelle mesure des dommages sont à limiter.

## A4 Procès-verbal de réception

Le contrôle des travaux réalisés par les professionnels spécialisés durant la phase d'exécution permet de vérifier la bonne mise en oeuvre des mesures projetées pour les ENIE. Ces ENIE sont ensuite remis au propriétaire/maître de l'ouvrage avec la procédure de réception. Les tableaux ci-après peuvent être utiles sur le chantier lors du contrôle des travaux et de la réception des différents ENIE pertinents.

**Tab. A4.1: Exemple de procès-verbal de réception**

Phase d'établissement du protocole <input type="checkbox"/> Contrôle durant les travaux <input type="checkbox"/> Contrôle en fin de travaux <input type="checkbox"/> Contrôle supplémentaire en cas de défauts constatés		
Éléments non-structuraux dangereux		
Élément considéré (p. ex. éléments de façade) Mesure de sécurisation : ...	<input type="checkbox"/> En ordre	<input type="checkbox"/> Défaut : ...
Élément considéré Mesure de sécurisation : ...	<input type="checkbox"/> En ordre	<input type="checkbox"/> Défaut : ...
Élément considéré Mesure de sécurisation : ...	<input type="checkbox"/> En ordre	<input type="checkbox"/> Défaut : ...
...		
Autres éléments non-structuraux, installations et équipements		
Élément considéré (p. ex. étagères) Mesure de sécurisation : ...	<input type="checkbox"/> En ordre	<input type="checkbox"/> Défaut : ...
Élément considéré Mesure de sécurisation : ...	<input type="checkbox"/> En ordre	<input type="checkbox"/> Défaut : ...
Élément considéré Mesure de sécurisation : ...	<input type="checkbox"/> En ordre	<input type="checkbox"/> Défaut : ...
...		
Date : ...	Nom/fonction : ...	Signature : ...
<input type="checkbox"/> Il n'existe pas/plus de défauts, les mesures de sécurisation sont considérées comme réceptionnées. <input type="checkbox"/> Il existe des défauts. Un contrôle supplémentaire est nécessaire. La réception est différée.		

## A5 Exemple de calcul et tableaux d'aide

L'exemple de calcul et les tableaux d'aide ci-après se basent sur la formule (49) de la norme SIA 261 [24]. Dans de nombreux cas, ils livrent des résultats du côté de la sécurité. Une analyse plus précise fournirait des résultats moins prudents. Cependant, étant donné que les coûts des mesures sont en général très faibles, il importe d'estimer dans chaque cas la nécessité et la faisabilité d'un calcul détaillé de la sollicitation sismique (la période de vibration fondamentale de l'ENIE  $T_a$  est souvent inconnue).

L'exemple de calcul décrit le processus de dimensionnement parasismique des ENIE conformément à la norme SIA 261 [24]. Il présuppose la connaissance et la maîtrise de cette norme.

Les schémas décisionnels et les tableaux d'aide servent à évaluer les ENIE sous l'angle de leur sécurité sismique et à les dimensionner en première approximation. Les valeurs indicatives des déplacements et des accélérations donnent une idée de l'ordre de grandeur conservateur de la sollicitation sismique. Les valeurs peuvent être utilisées pour dimensionner la largeur des joints ou des moyens de fixation. Les tableaux d'aide peuvent être appliqués aux éléments existants et nouveaux.

### A5-1 Exemple de calcul

Le chiffre 16.7.2 de la norme SIA 261 [24] propose une méthode de calcul basée sur les forces. La formule (49) de la norme livre en guise de résultat la **force horizontale  $F_a$**  qui doit être appliquée au centre de gravité des masses de l'élément de construction d'un poids propre donné  $G_a$ .

$$F_a = \frac{\gamma_f a_{gd} S G_a}{g q_a} \left( \frac{3(1 + \frac{z_a}{h})}{1 + (1 - \frac{T_a}{T_1})^2} - 0.5 \right) \geq \frac{\gamma_f a_{gd} S G_a}{g q_a}$$

La force horizontale  $F_a$  est grande lorsque les deux termes du produit sont maximaux, c'est-à-dire si les numérateurs sont grands et les dénominateurs petits.

Le premier terme est grand lorsque l'ouvrage a une fonction d'infrastructure vitale (classe d'ouvrage III  $\rightarrow \gamma_f$ ), que le site présente un aléa élevé ( $Z3 b \rightarrow a_{gd}$ ) et un terrain de fondation défavorable (classe de terrain de fondation E  $\rightarrow S$ ), que l'ENIE a une grande masse ( $G_a$  est grand) et présente une danger de soulèvement ou de renversement ( $q_a = 1,0$ ).

Le second terme est grand lorsque l'ENIE est placé tout en haut du bâtiment ( $z_a = h$ ) et qu'il existe une résonance entre l'ENIE et l'ouvrage ( $T_a = T_1$ ).

À l'inverse, il résulte une force horizontale  $F_a$  faible lorsque les deux termes du produit sont petits. C'est le cas lorsque l'ouvrage ne présente pas une occupation élevée de personnes, qu'il n'a pas une fonction importante (classe d'ouvrage I), que le site présente un aléa faible ( $Z1a$ ), que le terrain de fondation est favorable (classe de terrain de fondation A), que l'ENIE a une petite masse ( $G_a$  est petit) et possède aucun danger de soulèvement

ou de renversement ( $q_a = 1,5$ ). Par ailleurs, le second terme est petit si l'ENIE est disposé en bas dans le bâtiment et qu'il est très rigide (faible période de vibration fondamentale  $T_a \sim 0$ ).

### Cas extrêmes :

Pour un ENIE deux cas extrêmes peuvent être considérés.

- Cas 1 : valeur minimale avec ENIE disposé en bas du bâtiment  $z_a = 0$  et aucune période de vibration propre  $T_a = 0$ .

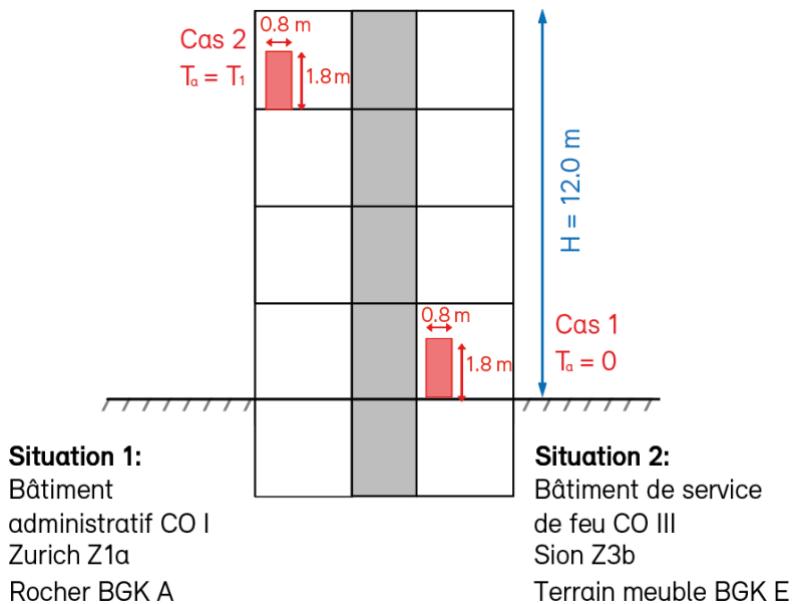
$$\left( \frac{3(1+0)}{1+(1-0)^2} - 0.5 \right) = (1.5 - 0.5) = 1.0 \quad \text{alors} \quad F_a = 1.0 \frac{\gamma_f a_{gd} S G_a}{g q_a}$$

- Cas 2 : valeur maximale avec ENIE placé en haut du bâtiment  $z_a = h$  et résonance  $T_a = T_1$

$$\left( \frac{3(1+1)}{1+(1-1)^2} - 0.5 \right) = (6 - 0.5) = 5.5 \quad \text{alors} \quad F_a = 5.5 \frac{\gamma_f a_{gd} S G_a}{g q_a}$$

### Exemple de calcul :

Une armoire de commande est considérée. La vérification au renversement et au glissement s'effectue avec  $q_a = 1.0$ . Une surrésistance ou un comportement plastique par un coefficient de comportement plus élevé ne sont pas pris en compte pour ces vérifications.

**Fig. A5.1: Exemple de calcul appliqué à une armoire de commande**

Situation 1 : armoire de commande dans un bâtiment administratif à Zurich sur rocher

$q_a = 1.0$ , classe d'ouvrage I avec

$\gamma_f = 1.0$ , Z1 b avec

$a_{gd} = 0.6$  et classe de terrain de fondation A avec  $S = 1.0$

$$\text{Cas 1 : } F_a = 1.0 \frac{1.0 \cdot 0.6 \cdot 1.0 G_a}{9.81 \cdot 1.0} = 0.06 G_a$$

$$\text{Cas 2 : } F_a = 5.5 \frac{1.0 \cdot 0.6 \cdot 1.0 G_a}{9.81 \cdot 1.0} = 0.34 G_a$$

Situation 2 : armoire de commande dans un bâtiment de service de feu à Sion sur terrain meuble

$q_a = 1.0$ , classe d'ouvrage III avec

$\gamma_f = 1.5$ , Z3 b avec

$a_{gd} = 1.6$  et classe de terrain de fondation E avec  $S = 1.7$

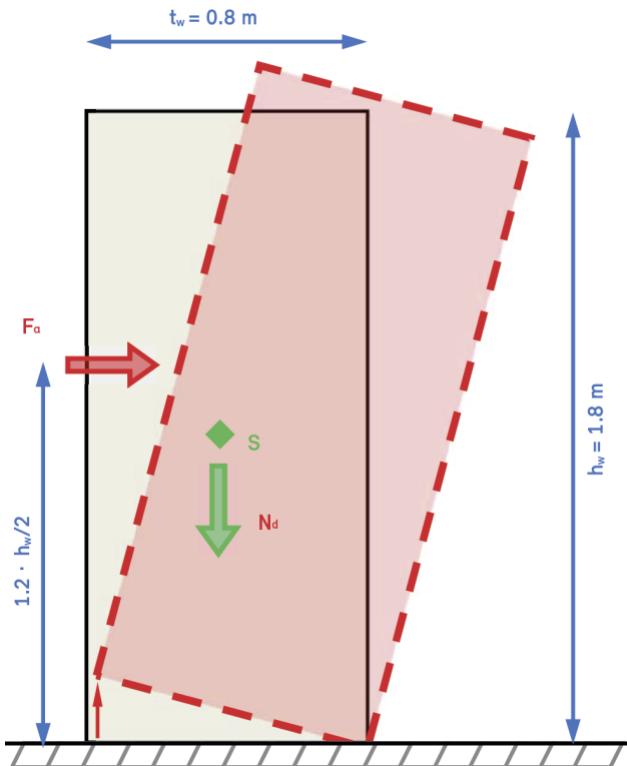
$$\text{Cas 1 : } F_a = 1.0 \frac{1.5 \cdot 1.6 \cdot 1.7 G_a}{9.81 \cdot 1.0} = 0.42 G_a$$

$$\text{Cas 2 : } F_a = 5.5 \frac{1.5 \cdot 1.6 \cdot 1.7 G_a}{9.81 \cdot 1.0} = 2.29 G_a$$

Si on regarde une armoire de commande de dimensions  $h_w \times t_w \times l_w = 1.8 \text{ m} \times 0.80 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$  et d'un poids  $G_a = 500 \text{ kg} = 5 \text{ kN}$  on obtient les valeurs extrêmes suivantes pour la force horizontale  $F_a$ .

**Tab. A5.2: Résultats pour la force horizontale  $F_a$  [kN]**

Force horizontale $F_a$ [kg resp. kN]		
	Cas 1	Cas 2
Situation 1	30 kg → 0.3 kN	170 kg → 1.7 kN
Situation 2	210 kg → 2.1 kN	1145 kg → 11.5 kN

**A5-1.1 Vérification au renversement****Fig. A5.3 : Vérification au renversement pour l'armoire de commande**

La vérification au renversement pour l'armoire de commande s'effectue en comparaison le moment renversant résultant de l'action sismique

$$M_d = F_a \cdot 1.2 \cdot \frac{h_w}{2}$$

avec le moment stabilisant résultant du poids propre de l'armoire de commande

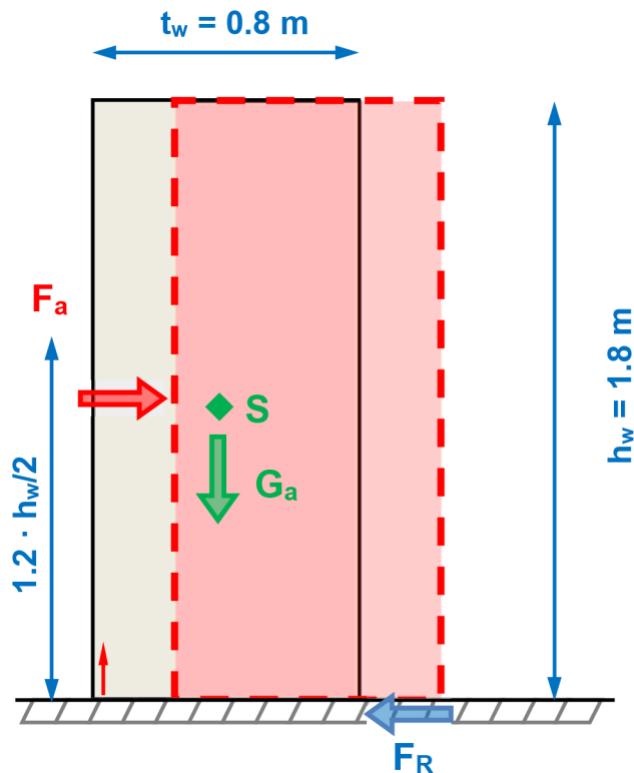
$$M_{Rd} = N_d \cdot \frac{t_w}{2}$$

Il est recommandé, pour calculer les forces d'ancrage, d'appliquer la force horizontale légèrement au-dessus de la hauteur du centre de gravité de l'armoire. Le fait est que pendant un séisme, les éléments assimilables à des armoires effectuent un mouvement de basculement, ce qui signifie que les forces d'inertie – compte tenu d'une répartition homogène des masses – augmentent avec la hauteur. Par approximation, on peut donc appliquer la force horizontale à une hauteur correspondant à 1.2  $h_w$ .

**Tab. A5.4 : Résultats de la vérification au renversement**

Vérification au renversement		
	Cas 1	Cas 2
Situation 1	$F_a = 0.3 \text{ kN}$ $M_d = 0.3 \times 1.2 \times 1.8/2 = 0.32 \text{ kNm}$ $M_{Rd} = 5 \times 0.8/2 = 2 \text{ kNm}$	$F_a = 1.7 \text{ kN}$ $M_d = 1.7 \times 1.2 \times 1.8/2 = 1.84 \text{ kNm}$ $M_{Rd} = 5 \times 0.8/2 = 2 \text{ kNm}$
	$M_d/M_{Rd} = 0.32/2 = 0.16 < 1$ → Vérification remplie	$M_d/M_{Rd} = 1.84/2 = 0.92 > 1$ → Vérification remplie
Situation 2	Fixation de l'armoire au renversement PAS nécessaire.	Fixation de l'armoire au renversement PAS nécessaire.
	$F_a = 2.1 \text{ kN}$ $M_d = 2.1 \times 1.2 \times 1.8/2 = 2.27 \text{ kNm}$ $M_{Rd} = 5 \times 0.8/2 = 2 \text{ kNm}$	$F_a = 11.5 \text{ kN}$ $M_d = 11.5 \times 1.2 \times 1.8/2 = 12.4 \text{ kNm}$ $M_{Rd} = 5 \times 0.8/2 = 2 \text{ kNm}$
	$M_d/M_{Rd} = 2.27/2 = 1.14 > 1$ → Vérification non remplie	$M_d/M_{Rd} = 12.4/2 = 6.2 > 1$ → Vérification non remplie
	Fixation de l'armoire au renversement nécessaire.	Fixation de l'armoire au renversement nécessaire.

#### A5-1.2 Vérification au glissement pour l'armoire de commande

**Fig. A5.5: Vérification au glissement pour l'armoire de commande**

La vérification au glissement s'effectue par comparaison de la force horizontale  $F_a$  et la force de frottement  $F_R = G_a \times \mu$ . La vérification est démontrée si  $F_R > F_a$ . Avec l'hypothèse d'un coefficient de frottement  $\mu = 0.3$  (acier sur béton) la force de frottement vaut  $F_R = 0.3 \times 500 \text{ kg} = 150 \text{ kg} \rightarrow 1.5 \text{ kN}$ .

**Tab. A5.6: Résultats de la vérification au glissement**

Vérification de glissement		
	Cas 1	Cas 2
Situation 1	$F_R = 1.5 \text{ kN} > F_a = 0.4 \text{ kN}$ → Vérification remplie	$F_R = 1.5 \text{ kN} < F_a = 1.7 \text{ kN}$ → Vérification non remplie
Situation 2	Fixation de l'armoire au glissement PAS nécessaire.	Fixation de l'armoire au glissement nécessaire.

Seule l'armoire de commande en bas du bâtiment administratif à Zurich ne nécessite aucune fixation

---

Pour le contrôle de résistance des moyens de fixation et d'ancrage les résistances théoriquement nécessaires du matériel doivent être augmentées du coefficient de comportement  $q = 1.5$  pour tenir compte de la surrésistance.

Une estimation approximative sur la base de la formule (49) de la norme SIA 261 [24] peut se faire à l'aide des tables ci-après.

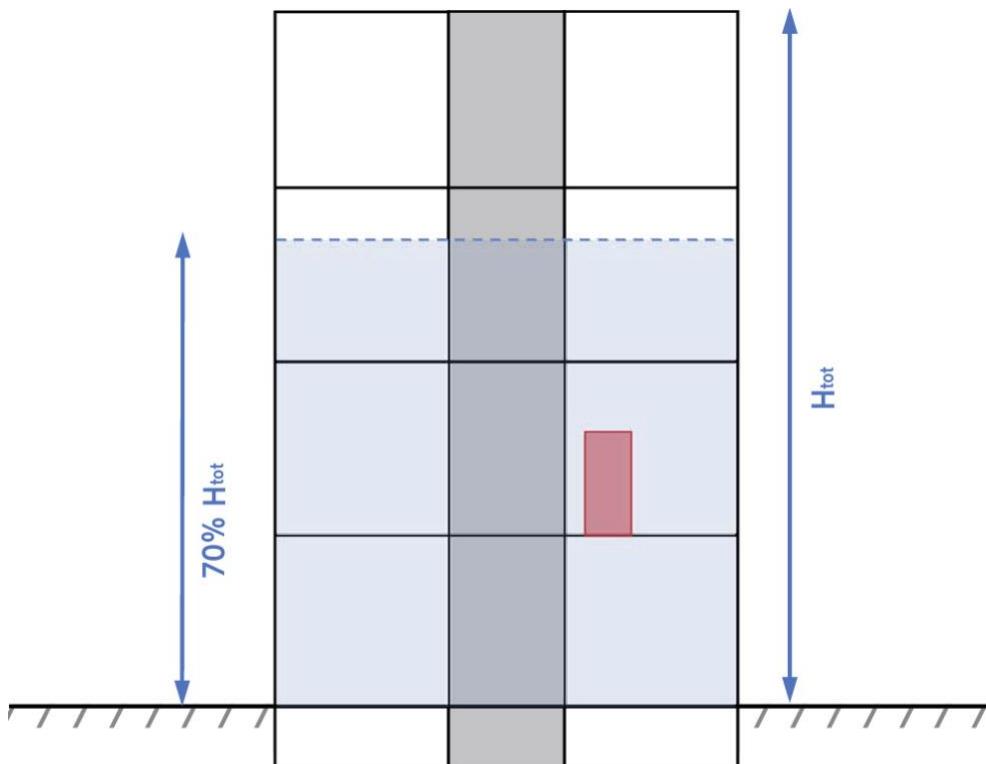
## A5-2 Dimensionnement sommaire de la fixation d'éléments rigides

Cette catégorie comprend les éléments reliés de manière rigide à la structure porteuse. Les valeurs indiquées des accélérations peuvent être appliquées au dimensionnement des éléments proprement dits, des éléments de contreventement ou des moyens de fixation. Cela permet, par exemple, de dimensionner les fixations d'armoires ou les renforts de tuyauteries.

### A5-2.1 Estimation de l'accélération absolue $a_{abs}$ d'un élément de construction

Les tableaux ci-après livrent des valeurs indicatives de l'accélération absolue  $a_{abs}$  d'un élément de construction pour différentes classes de terrain de fondation et différentes zones sismiques. Une investigation plus poussée livre souvent des valeurs (sensiblement) plus faibles. Si la classe de terrain de fondation est inconnue, le calcul doit être basé sur des hypothèses conservatrices (classe de terrain de fondation E). Les valeurs sont valables pour la classe d'ouvrage I. Pour les classes d'ouvrage II et III, les valeurs doivent être multipliées par  $\gamma_f$ .

Les valeurs indicatives  $a_{abs}$  applicables aux éléments de construction situés à une hauteur  $z_i$  supérieure à 70 % de la hauteur totale de l'ouvrage  $H_{tot}$  (à partir du niveau du terrain) sont indiquées dans le Tableau A5.8. Pour les calculs  $q_a = 1.5$  et  $T_a = T_1$  sont appliqués.

**Fig. A5.7: Explications relative aux deux tableaux****Tab. A5.8: Valeurs indicatives de l'accélération absolue d'un élément de construction (étages supérieurs)**

SIA 261 (2020)					
a <sub>abs,haut</sub> [m/s <sup>2</sup> ] pour z <sub>i</sub> > 0.7 H <sub>tot</sub>		Zone sismique			
		Z1a	Z1b	Z2	Z3a
Classe de terrain de fondation	A	2.5	3.0	4.0	5.0
	B	3.0	4.0	4.5	6.0
	C	3.5	4.5	5.5	7.0
	D	4.0	5.0	6.5	8.5
	E	4.0	5.0	6.5	10.5

**A5-2.2 Exemple armoire de commande :**

- Poids total  $G_a = 5 \text{ kN} = 5000 \text{ N} \rightarrow 500 \text{ kg}$ , zone d'aléa sismique Z1a, terrain de fondation de la classe A, en haut du bâtiment
- Selon le schéma d'aide à la décision en fig. A5.10 : Des dommages à l'armoire de commande ne sont pas souhaitables
- Du tableau A5.8 : accélération absolue de l'élément  $a_{abs,haut} = 2.5 \text{ m/s}^2$
- Force horizontale à appliquer  $F_a = 500 \text{ kg} \times 2.5 \text{ m/s}^2 \times \frac{1}{1000} = 1.25 \text{ kN} = 125 \text{ kg}$
- Poursuivre le traitement des questions posées dans le schéma d'aide à la décision

Indication : La différence avec l'exemple de calcul du point A.5.1 résulte des effets de résonance admis et d'une détermination moins précise de la position de l'objet dans le bâtiment.

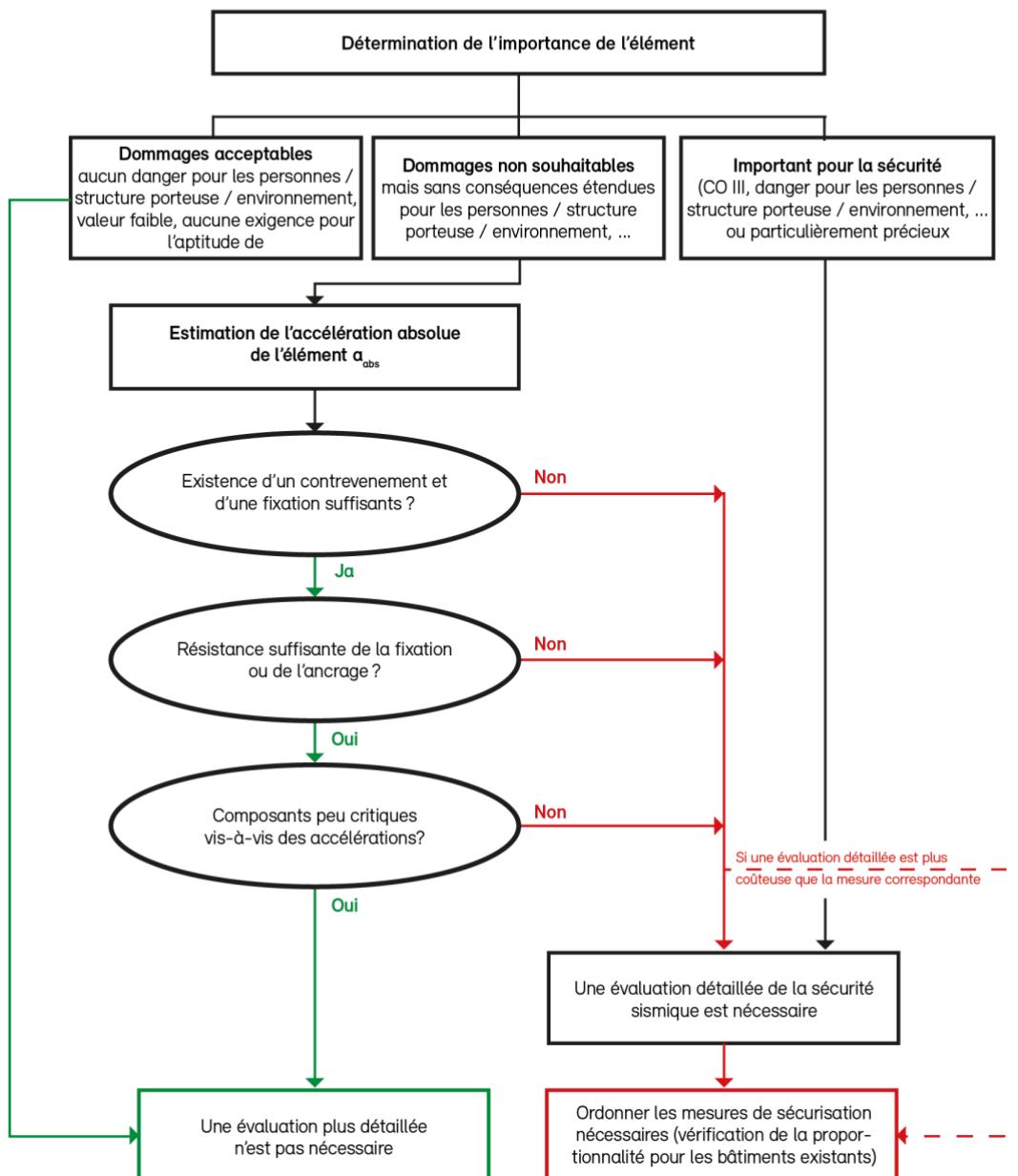
Les valeurs indicatives  $a_{abs}$  applicables aux éléments de construction situés à une hauteur  $z_i$  inférieure à 70 % de la hauteur totale de l'ouvrage  $H_{tot}$  (à partir du niveau du terrain) sont indiquées dans le Tableau A5.9.

**Tab. A5.9 : Valeurs indicatives de l'accélération absolue d'un élément de construction (étages inférieurs)**

		SIA 261 (2020)				
		Zone sismique				
		Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
Classe de terrain de fondation	A	2.0	2.5	3.5	4.5	5.0
	B	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
	C	3.0	4.0	4.5	6.0	7.5
	D	3.5	4.5	5.5	7.0	8.5
	E	3.5	4.5	5.5	7.0	8.5

**Fig. A5.10 : Schéma d'aide à la décision applicable à des points de fixation d'éléments sensibles aux déformations**

- Exemples :
- |  |   |
|--|---|
| 2.2 - Faux-plafonds suspendus                              | 2.14 - Transformateurs                                    |
| 2.3 - Planchers surélevés                                  | 2.15 - Éclairage  |
| 2.4 - Parois, remplissages                                 | 2.16 - Installations de climatisation                     |
| 2.5 - Systèmes de façades, doublages                       | 2.17 - Citernes, chaudières, réservoirs                   |
| 2.6 - Parapets (et balustrades)                            | 2.18 - Conduites, gaines de ventilation, canaux de câbles |
| 2.7 - Escaliers  | 2.19 - Ascenseurs   |
| 2.8 - Vitrages, portes, fenêtres                           | 2.21 - Éléments IT  |
| 2.9 - Panneaux, enseignes et avant-toits                   | 2.22 - Armoires, étagères                                 |
| 2.10 - Cheminées, toitures                                 | 2.23 - Étagères industrielles                             |
| 2.11 - Alimentation électrique de secours                  | 2.24 - Substances dangereuses                             |
| 2.12 - Protection contre l'incendie                        | 2.25 - Objets d'art, mobilier, décoration d'intérieur     |
| 2.13 - Coffrets et armoires de distribution et de commande |   |



## A5-3 Dimensionnement sommaire de la largeur des joints d'éléments sensibles aux déformations

Cette catégorie comprend les éléments de construction ainsi que les éléments que les déplacements relatifs entre deux points fixes peuvent endommager. Il s'agit p. ex. de maçonneries de remplissage ou de parapets. Dans ce cas, les valeurs indicatives servent à déterminer la largeur nécessaire des joints.

### A5-3.1 Estimation de la déformation relative entre niveaux $\delta$

Le tableau A5.11 donne des valeurs indicatives de la déformation maximale entre niveaux  $\delta$  pour différentes classes de terrain de fondation et différentes zones sismiques. Une investigation plus poussée livre souvent des valeurs (sensiblement) plus faibles. Les valeurs s'appliquent à des ouvrages typiques des classes d'ouvrage I et II.

Elles ne sont pas adaptées aux édifices particulièrement flexibles ayant une grande période de vibration propre et une faible hauteur (p. ex. construction métallique d'un étage ayant une grande masse). Si la classe de terrain de fondation est inconnue, le calcul doit être basé sur des hypothèses conservatrices (classe de terrain de fondation D).

**Tab. A5.11: Valeurs indicatives de la déformation relative maximale entre niveaux**

		SIA 261 (2020)				
		Zone sismique				
		Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
Classe de terrain de fondation	A	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6
	B	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0
	C	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4
	D	0.8	1.0	1.3	1.6	2.0
	E	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0

$$\Delta_{\text{rel,Stockwerk}} = \delta \cdot H_i$$

Le déplacement relatif maximal entre étages  $\Delta_{\text{rel,Stockwerk}}$  est le produit de la déformation  $\delta$  et de la hauteur d'étage  $H_i$ .

Pour un ouvrage dont la hauteur d'étage est de  $H_i = 3.0$  m, il résulte donc les valeurs indicatives suivantes du déplacement relatif entre étages  $\Delta_{rel}$  :

**Tab. A5.12 : Déplacement relatif entre étages pour une hauteur d'étage  $H_i = 3.0$  m**

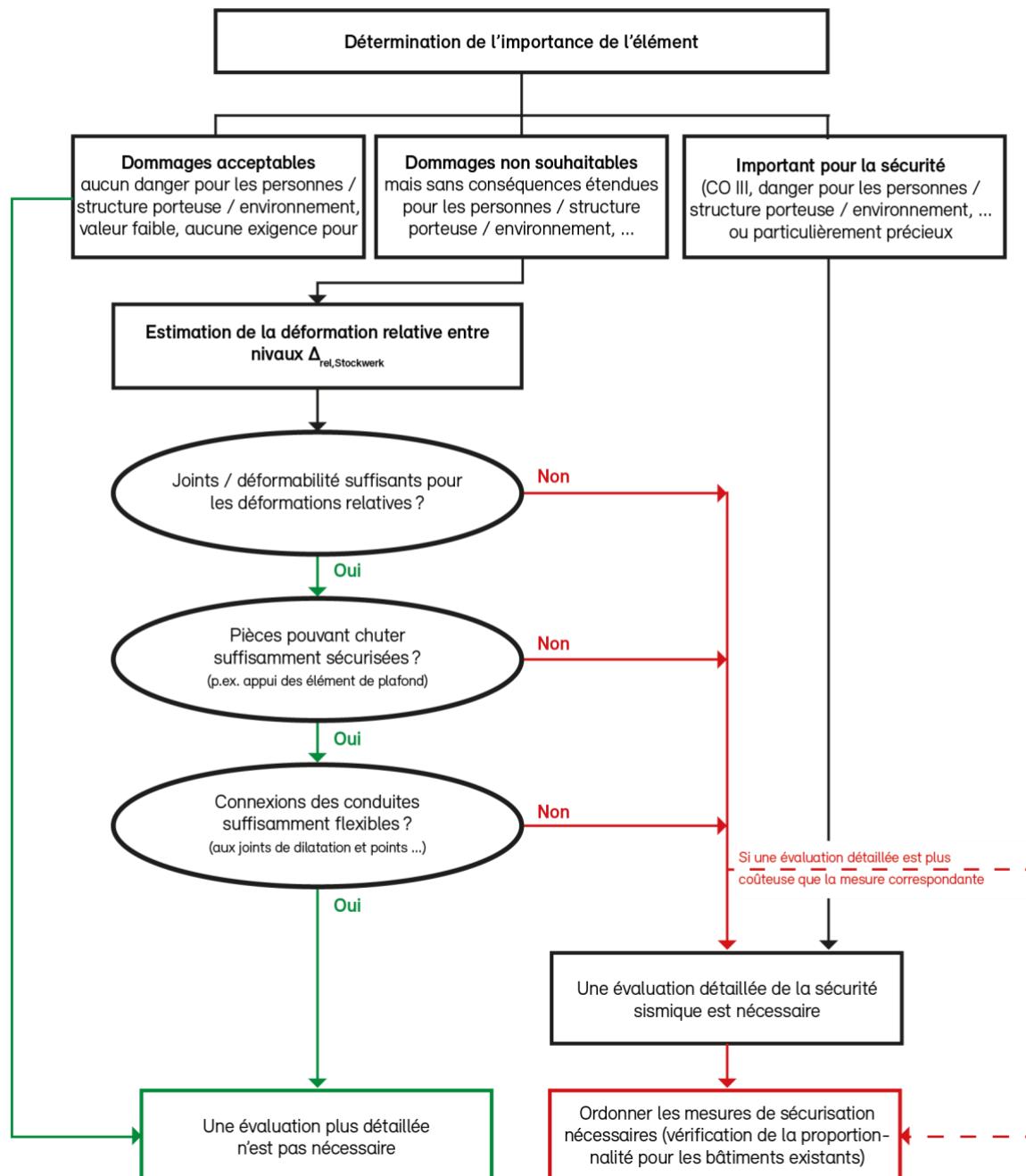
		SIA 261 (2020)				
		Zone sismique				
$\Delta_{rel, étage}$ [mm]		Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
Classe de terrain de fondation	A	9	9	12	15	18
	B	12	15	21	24	30
	C	15	21	27	33	42
	D	24	30	39	48	60
	E	12	15	21	24	30

Exemple élément de façade :

- Ouvrage dont les étages ont une hauteur  $H_i = 3$  m, zone sismique Z2, terrain de fondation de la classe B
- Selon le schéma d'aide à la décision en fig. A5.13 : Des dommages à l'élément de façade ne sont pas souhaitables
- Du tableau A5.12 : déplacement relatif entre niveaux  $\Delta_{rel, étage} = 21$  mm
- Poursuivre le traitement des questions posées dans le schéma d'aide à la décision.

**Fig. A5.13 : Schéma d'aide à la décision applicable à des éléments sensibles aux déformations et fixés de manière flexible**

- Exemples :
- |                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| 2.2 - Faux-plafonds suspendus        | 2.7 - Escaliers   |
| 2.3 - Planchers surélevés            | 2.8 - Vitrages, portes, fenêtres                          |
| 2.4 - Parois, remplissages           | 2.18 - Conduites, gaines de ventilation, canaux de câbles |
| 2.5 - Systèmes de façades, doublages | 2.19 - Ascenseurs   |
| 2.6 - Parapets (et balustrades)      |   |



## A5-4 Dimensionnement sommaire de l'espace libre dans le cas d'éléments fixés de manière flexible

Cette catégorie comprend les éléments qui ne sont pas reliés de manière rigide à la structure porteuse. Cela permet, par exemple, de déterminer l'espace libre (= déplacement de l'élément de construction relativement au point de fixation) dont une lampe ou un objet suspendu a besoin pour pouvoir osciller librement.

**A5-4.1.1 Estimation du déplacement d'un élément de construction relativement à son point de fixation  $\Delta_{\text{rel},\text{élément}}$**   
 Les tableaux ci-après donnent des valeurs indicatives du déplacement d'un élément de construction relativement à son point de fixation  $\Delta_{\text{rel},\text{élément}}$  pour différentes classes de terrain de fondation et différentes zones sismiques. Une investigation plus poussée livre souvent des valeurs (sensiblement) plus faibles. Si la classe de terrain de fondation est inconnue, le calcul devra être fondé sur des hypothèses conservatrices (classe de terrain de fondation D). Les valeurs s'appliquent à la classe d'ouvrage I. Elles doivent être multipliées par le coefficient  $\gamma_f$  pour pouvoir être appliquées aux classes d'ouvrage II et III.

Si l'on ne peut exclure des oscillations antagonistes de différents éléments, il y a lieu de ménager un espace libre équivalent au double du déplacement relatif des éléments afin d'éviter toute possibilité de collision entre eux.

Les valeurs indicatives  $\Delta_{\text{rel},\text{élément}}$  applicables aux éléments de construction situés à une hauteur  $z_i$  supérieure à 70 % de la hauteur totale de l'ouvrage  $H_{\text{tot}}$  (à partir du niveau du terrain) sont indiquées dans le Tableau A5.14.

**Tab. A5.14 : Valeurs indicatives du déplacement d'un élément de construction relativement à son point de fixation (étages supérieurs)**

		SIA 261 (2020)				
		Zone sismique				
$\Delta_{\text{rel},\text{élément,haut}} [\text{cm}]$ pour $z_i > 0.7 H_{\text{tot}}$		Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
Classe de terrain de fondation	A	6	8	10	15	20
	B	10	15	20	25	30
	C	15	20	25	30	40
	D	20	30	35	45	55
	E	10	15	20	25	30

Les valeurs indicatives  $\Delta_{\text{rel},\text{élément}}$  applicables aux éléments de construction situés à une hauteur  $z_i$  inférieure à 70 % de la hauteur totale de l'ouvrage  $H_{\text{tot}}$  (à partir du niveau du terrain) sont indiquées dans le Tableau A5.15.

**Tab. A5.15 : Valeurs indicatives du déplacement d'un élément de construction relativement à son point de fixation (étages inférieurs)**

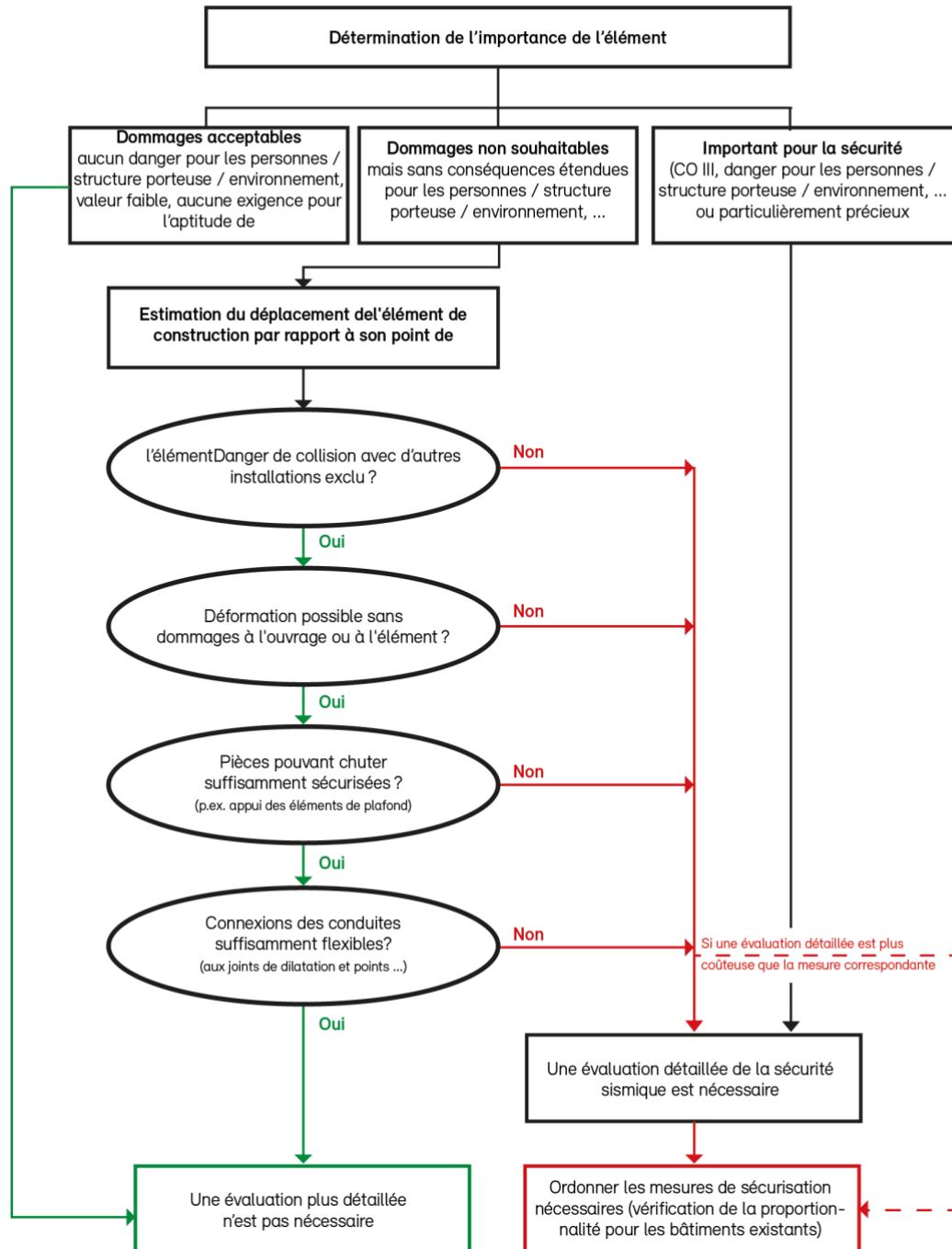
		SIA 261 (2020)				
		Zone sismique				
$\Delta_{\text{rel,élément,bas}} \text{ [cm]}$ pour $z_i < 0.7 H_{\text{tot}}$		Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
Classe de terrain de fondation	A	5	6	8	10	15
	B	8	10	15	20	20
	C	10	15	20	25	30
	D	15	20	25	35	40
	E	8	10	15	20	20

A5-4.2 Exemple conduite :

- Située dans la partie supérieure d'un ouvrage, zone sismique Z3a, terrain de fondation de la classe D
- Selon le schéma d'aide à la décision en fig. A5.16 : Des dommages à la conduite ne sont pas souhaitables
- Du tableau A5.14 : déplacement de l'élément relativement à son point de fixation  $\Delta_{\text{rel,élément}} = 45 \text{ cm}$
- Poursuivre le traitement des questions posées dans le schéma d'aide à la décision.

**Fig. A5.16: Schéma d'aide à la décision applicable aux éléments sensibles aux accélérations et fixés de manière rigide**

- Exemples : 2.2 - Faux-plafonds suspendus  
 2.17 - Éclairage  
 2.18 - Conduites, gaines de ventilation, canaux de câbles  
 2.20 - Amortisseurs et isolateurs de vibrations  
 2.25 - Objets d'art, mobilier, décoration d'intérieur



---

# Bibliographie

- [1] Bachmann H. 2002: Erdbebensicherung von Bauwerken. Birkhäuser-Verlag.
- [2] Bachmann H. 2002 : Conception parasismique des bâtiments – Principes de base à l'attention des ingénieurs, architectes, maîtres d'ouvrages et autorités. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne (anc. OFEG Office fédérale des eaux et de la géologie).
- [3] Bachmann H., Dazio A. 2002 : D 0171 Erdbebengerechter Entwurf und Kapazitätsbemessung eines Gebäudes mit Stahlbetontragwänden. SIA/SGEB.
- [4] Baudyn 2010 : Sécurité des bâtiments – questions juridiques et responsabilités. Dépliant 3. Fondation pour la dynamique des structures et le génie parasismique.
- [5] California Division of the State Architect (Dept. of General Services) 2003 : Safer Schools. Guide and Checklist for Nonstructural Earthquake Hazards in California Schools.
- [6] Dazio A. et al 2009 : Erdbeben in L'Aquila, Italien 6. April 2009. Bericht der SGEB-Erkundungsmission. SGEB.
- [7] Directive ESTI Nr. 248 2020 : Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse. Inspection fédérale des installations à courant fort ESTI.
- [8] FEMA E74 2012 : Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage – A practical Guide. Federal Emergency Management Agency.
- [9] FEMA 413 2004: Installing Seismic Restraints for Electrical Equipment. Federal Emergency Management Agency.
- [10] FEMA 414 2004: Installing Seismic Restraints for Duct and Pipe. Federal Emergency Management Agency.
- [11] FEMA 460 2005 : Seismic Considerations for Steel Storage Racks Located in Areas Accessible to the Public. Federal Emergency Management Agency.
- [12] Filiatrault A. et al. 2002 : Guidelines, Specifications and Seismic Performance Characterization of Nonstructural Building Components and Equipment.
- [13] HILTI 2020 : SEISMIC MANUAL – Earthquake resistant design of MEP supports.
- [14] Holmes W. 2010 : Darfield Earthquake of September 4, 2010 – Nonstructural Damage. Earthquake Engineering Research Institute.
- [15] Massey W., Megget L. 2007: Architectural Design for Earthquake. New Zealand Society for Earthquake Engineering.
- [16] Miranda E. et al. 2010: Brief Report on Earthquake Reconnaissance after the M 8.8 February 27th 2010 Maule, Chile Earthquake. Earthquake Engineering Research Institute.
- [17] Paulay T., Priestley M.J.N. 1992: Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. John Wiley & Sons, New York.
- [18] SIA102 2020 : Règlement concernant les prestations et honoraires des architectes. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.
- [19] SIA103 2020 : Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs et ingénieries civils. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.

- 
- [20] SIA 108 2020 : Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs et ingénieries spécialisés dans les domaines des installations du bâtiment, de la mécanique et de l'électrotechnique. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.
- [21] SIA 112 2014 : Modèle « Etude et conduite de projet ». Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.
- [22] SIA 233 2000: Norme SIA 233: Revêtements de façades – Bardages. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.
- [23] SIA 260 2013 : Norme SIA 260 : Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.
- [24] SIA 261 2020 : Norme SIA 261 : Actions sur les structures porteuses. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.
- [25] SIA 118/329 2008: Conditions générales relatives aux façades rideaux. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.
- [26] SIA 329 2008: Façades préfabriquées. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.
- [27] SIA 269/8 2017 : Maintenance des structures porteuses – Seismes. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.
- [28] Documentation SIA D 0227 2010 : Sécurité parasismique des bâtiments – Questions juridiques et responsabilités. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.
- [29] Siegenthaler T., Scherler S. 2009 : Haftung für mangelhafte Erdbebensicherheit von Gebäuden – Planer, Werkeigentümer und Verkäufer. Baurecht/Droit de la Construction
- [30] ASCE 2010 : Building Safe School Programs, Yumei Wang, PE
- [31] Tiedemann H. 1987 : Kleine Erdbeben – kleine Risiken?. Schweizer Rück.
- [32] Wenk T. 2008: Confortement parasismique de constructions. Stratégie et recueil d'exemples en Suisse. Connaissance de l'environnement Nr. 0832. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- [33] FEMA 412 2002 : Installing Seismic Restraints for Mechanical Equipment. Federal Emergency Management Agency.
- [34] Quake Hold Industrial Inc.
- [35] LPE 1983 : Loi fédérale sur la protection de l'environnement
- [36] OPAM 1991 : Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs
- [37] LEaux 1991 : Loi fédérale sur la protection des eaux
- [38] EN 81–80 2003: SNEL = Safety Norm for Existing Lifts, CEN COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, CEN Brüssel
- [39] SIA 370.080 2004 : Sicherheitsregeln für die Konstruktion und den Einbau von Aufzügen – Bestehende Aufzüge – Teil 80 : Regeln für die Erhöhung der Sicherheit bestehender Personen- und Lastenaufzüge, Zürich.
- [40] Résonance SA 2009 : Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse, Rapport sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement
- [41] SIA 370.077 2018 : Sicherheitsregeln für Konstruktion und Einbau von Aufzügen – Besondere Anwendungen für Personen- und Lastenaufzüge – Teil 77 : Aufzüge unter Erdbebenbedingungen

[42] OFEV et. al. 2023: Sécurité sismique en cas de fonction vitale – Ouvrages de la classe d'ouvrage (CO) III selon la norme SIA 261. Connaissance de l'environnement n° 2310. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne.

---

# Glossaire

**Analyse basée sur les déformations**

Analyse de la sécurité sismique par comparaison de la déformation attendue et de la capacité de déformation réelle d'un élément de construction.

**Analyse basée sur les forces**

Analyse de la sécurité sismique par comparaison de la sollicitation et de la résistance d'un élément de construction.

**Aptitude au service**

Selon la SIA 260 [23] : Capacité d'une structure porteuse et de ses éléments de construction à garantir la fonctionnalité et l'aspect de l'ouvrage ainsi que le confort des personnes. On entend par là l'utilisation illimitée de l'ouvrage après la survenue de l'action sismique de référence, compte tenu de sa fonction prévue.

**Barre bi-articulée**

Barre fixée par des appuis articulés à ses deux extrémités. Elle ne reprend que des forces normales. Les forces de cisaillement et les moments y sont nuls.

**Classe d'ouvrage**

Caractérisation schématique des bâtiments selon la norme SIA 261 [24], qui prend en compte le taux d'occupation par des personnes, l'importance de l'ouvrage pour la collectivité et le risque d'atteinte à l'environnement lorsque l'ouvrage est endommagé.

**Construction en porte-à-faux**

Élément de construction dont une extrémité est encastrée et l'autre est libre.

**Contrainte**

Force ou contrainte résultant de dilatations ou de déformations entravées.

**Convention d'utilisation**

Selon la SIA 112 [21] : Document décrivant les objectifs du maître d'ouvrage en matière d'utilisation et de protection, ainsi que les principales conditions, exigences et prescriptions applicables à l'étude, à l'exécution et à l'utilisation de l'ouvrage. Elle fait partie du cahier des charges du projet.

**dans le plan**

Sollicitation parallèle au plan (p. ex. dans la direction de la paroi).

**Défaillance par inertie**

Rupture provoquée par des forces d'inertie.

**Déformation imposée**

Les déformations imposées ou entravées, induites par exemple par des différences de température, des tassements différentiels ou des variations d'humidité, provoquent l'apparition de contraintes (dans les systèmes hyperstatiques).

**Déformation relative d'étage**

Rapport entre le déplacement relatif entre deux étages et la hauteur d'étage.

**Déplacement d'étage**

Déplacement (horizontal) d'un étage suite à une action, p. ex. du vent ou d'un tremblement de terre.

**Déplacement relatif d'étage**

Différence entre les déplacements de deux dalles d'étage situées l'une au-dessus de l'autre.

**Déplacements relatifs**

Différence entre les déplacements de deux points.

**ductile**

Propriété d'un matériau ou d'un élément de construction de se déformer de manière plastique (c.-à-d. permanente) sous l'action d'une charge, sans se rompre. Le verre, par exemple, se casse sans déformation visible, alors que l'acier peut subir une déformation plastique importante avant de se fissurer.

**Effet de colonne courte**

Rupture d'une colonne soumise à une grande force de cisaillement et ayant une faible longueur libre pour se déformer.

**élancé**

Haut et étroit.

**flexible**

Propriété d'un corps ou d'un matériau de modifier sa forme sous l'action d'une force (de manière réversible).

**Forces d'inertie**

Forces consécutives à l'accélération d'une masse.

**hors du plan**

Sollicitation perpendiculaire au plan (p. ex. de la paroi ou du plafond).

**Infrastructure vitale**

Installation ou élément d'une infrastructure dont le fonctionnement est absolument nécessaire pour maîtriser un fort séisme dans la phase de sauvetage et/ou d'intervention; ces infrastructures sont inscrites dans la classe d'ouvrage III selon la norme SIA 261 [24].

**Instabilité de 2<sup>e</sup> ordre**

Rupture ou défaillance d'un élément de construction du fait d'instabilités structurelles telles que flambage, renversement, voilement.

**Installations techniques du bâtiment**

Les installations techniques englobent les installations des domaines suivants : énergie, électrotechnique, automation du bâtiment, construction de machines, technique de procédés (év. génie chimique).

**isolé contre les vibrations**

Muni d'un dispositif empêchant la transmission de vibrations au moyen de ressorts et d'amortisseurs.

**Joint de dilatation**

Séparation constructive de structures porteuses ou d'éléments de construction en vue de prévenir la formation de fissures dues à des contraintes (souvent en raison de dilatations thermiques ou de transfert d'humidité).

**Mesure de sécurité sismique**

Selon la SIA 269/8 [27] : Mesure mise en œuvre pour améliorer la protection des personnes, des biens matériels, des valeurs culturelles et de l'environnement contre les conséquences d'un séisme ainsi que pour éviter les interruptions d'infrastructures ou d'exploitation consécutives à un séisme.

**non-structural**

Ne faisant pas partie de la structure porteuse.

**Ouvrage flexible**

Ouvrage dans lequel les forces (horizontales) exercées génèrent de grandes déformations.

**Ouvrage rigide**

Ouvrage sur lequel les forces agissantes ne provoquent pas de grandes déformations.

**parasismique**

Caractère d'un ouvrage dont le dimensionnement respecte et applique les exigences en matière de résistance aux séismes prescrites par les normes actuelles sur les structures porteuses édictées par la Société suisse des ingénieurs et architectes.

### **résistant aux accélérations**

Caractère d'un élément de construction réagissant de manière robuste aux forces d'inertie.

### **rigide**

Se dit d'un objet très peu déformable.

### **rigide à la flexion**

Caractère d'un élément de construction qui ne se plie que très peu sous l'action d'une charge.

### **Risque sismique**

Produit de l'aléa sismique, de la valeur et de la vulnérabilité des biens menacés.

### **Sensible à la déformation**

Fragile, peu souple, peu déformable; se dit d'un élément qui réagit de façon sensible aux déformations de la structure porteuse.

### **sensible aux accélérations**

Caractère d'un élément de construction réagissant de manière sensible aux forces d'inertie.

### **Verre flotté ou verre plat**

Verre plat transparent se distinguant par une absence presque totale de distorsion.

### **Vulnérabilité**

Relation entre l'ampleur des dommages subis par un objet et le niveau d'action sismique.

---

# Répertoire

## Abréviations

**EN**

Norme européenne

**ENIE**

Éléments non-structuraux et autres installations et équipements

**ESG**

Verre de sécurité

**ESTI**

Inspection fédérale des installations à courant fort

**LEaux**

Loi sur la protection des eaux

**LPE**

Loi sur la protection de l'environnement

**OPAM**

Ordonnance sur les accidents majeurs

**PVB**

Polyvinylbutyralplastique

**SIA**

Société suisse des ingénieurs et architectes

**TVG**

Verre semitrempé

**VSG**

Verre de sécurité feuilleté

## Crédits photographiques

### Chapitre 1

Fig. 1.1 OFEV

Fig. 1.2 à droite [8] Figure 2.4.1–1

Fig. 1.3 à droite : [8] Figure 6.3.1.4–3

Fig. 1.4 : [2] Image 11/3

Fig. 1.5 en haut à droite : [8] Figure 6.4.3.5–2

Fig. 1.5 en bas tout à gauche : [8] Figure 6.4.3.4–1

Fig. 1.5 en bas à gauche : [8] Figure 6.4.3.8–1

Fig. 1.5 en bas à droite : [8] Figure 6.4.3.8–1

Fig. 1.5 en bas tout à droite : [8] Figure 6.4.3.4–1

Fig. 1.6 : Jost Studer 2010

Fig. 1.7 : SGEB Mission d'investigation 2012  
(Blaise Duvernay)

Fig. 1.8 à gauche : [8] Figure 6.5.1.1–1

Fig. 1.8 à droite : SGEB Mission d'investigation  
2012 (Blaise Duvernay)

Fig. 1.9 en haut à gauche : [8] Figure 6.4.7.1–2

Fig. 1.9 en haut à droite : Source Internet :  
<https://giuseppecarotenuto.photoshelter.com/image/I000033UNUHm1JbU>

Fig. 1.9 en bas : [8] Figure 6.4.7.3–1

### Chapitre 2

Fig. 2.2.1 : [8] Figure 6.3.4.1–2, Fig. 2.2.2 : [8]  
Figure 6.3.4.3–3a, Fig. 2.2.3 : [8] Figure 2.4.2–1,  
Fig. 2.2.4 : [8] Figure 6.3.4.3–2

Fig. 2.3.7 et 2.3.8 : AGB Bautechnik AG

Fig. 2.4.1 : [2] Image 11/3, Fig. 2.4.2 : [8] Figure  
6.3.2.1–3, Fig. 2.4.3 : [8] Figure 6.3.2.2–1,  
Fig. 2.4.4 : [8] Figure 6.3.2.2–2

Fig. 2.5.1 : [2] Image 32/3, Fig. 2.5.2 : [8] Figure  
6.3.1.1–2, Fig. 2.5.3 : Source Internet: *Seismic  
Bracing of Non-Structural Components by Paul W.  
McMullin, SE, PhD Seismic Bracing of Non-  
Structural Components November 17, 2008*,  
Fig. 2.5.4 : SBEG Mission d'investigation 2009,  
Fig. 2.5.5 : Source inconnue

Fig. 2.6.1 : [8] Figure 6.3.5.1–1, Fig. 2.6.2 : [8]  
Figure 6.3.5.1–2, Fig. 2.6.3 : SGEB Mission  
d'investigation 2009, Fig. 2.6.4 : [8] Figure 6.3.6.1–  
2, Fig. 2.6.6 : [8] Figure 6.3.5.1–6

Fig. 2.7.1 : [8] Figure 6.3.8.1–5, Fig. 2.7.2 : [8]  
Figure 6.3.8.1–2, Fig. 2.7.3 : [8] Figure 6.3.8.1–3,  
Fig. 2.7.4 : [8] Figure 6.3.8.1–1

Fig. 2.8.1 : Source Internet: *Seismic Bracing of  
Non-Structural Components by Paul W. McMullin,  
SE, PhD Seismic Bracing of Non-Structural  
Components November 17, 2008*, Fig. 2.8.2 : [8]  
Figure 6.3.1.4–6, Fig. 2.8.3 : [8] Figure 6.3.1.5–1

Fig. 2.9.1 : [8] Figure 6.3.6.1–1, Fig. 2.9.2 : SGEB  
Mission d'investigation 2009

Fig. 2.10.1 : [8] Figure 6.3.7.1–3, Fig. 2.10.2 : SGEB  
Mission d'investigation 2009, Fig. 2.10.3 : [8] Figure  
6.3.4.3–4, Fig. 2.10.4 : [8] Figure 6.3.4.2–2

Fig. 2.11.1 : [39] Image 3.4, Fig. 2.11.2 : [7] Image  
E.1, Fig. 2.11.3 : [7] Image E.2

Fig. 2.12.1 : [8] Figure 6.4.4.1–1, Fig. 2.12.2 : [8]  
Figure 6.4.4.1–7, Fig. 2.12.3 : [8] Figure 6.4.4.1–10,  
Fig. 2.12.4 : [8] Figure 6.4.4.1–8

Fig. 2.13.1 : [8] Figure 6.4.7.1–1, Fig. 2.13.2 : [8]  
Figure 6.4.7.1–2, Fig. 2.13.3 : [8] Figure 6.4.8.2–1,

Fig. 2.13.6 : [7] Image E.3, Fig. 2.13.7 : [7] Image E.6

Fig. 2.14.1 : [8] Figure 6.4.7.3–1, Fig. 2.14.2 : Source Internet, Fig. 2.14.3 : [7] Image B.3, Fig. 2.14.4 : [7] Image B.6

Fig. 2.15.1 : [8] Figure 6.4.9.1–1, Fig. 2.15.2 : [8] Figure 6.4.9.3–2, Fig. 2.15.4 : [8] Figure 6.4.9.4–3

Fig. 2.16.1 : [8] Figure 6.4.1.1–1, Fig. 2.16.2 : [8] Figure 6.4.1.5–3, Fig. 2.16.3 : [8] Figure 6.4.1.3–3, Fig. 2.16.4 : [8] Figure 6.4.1.3–4, Fig. 2.16.7 : [8] Figure 6.4.7.2–2

Fig. 2.17.1 : [8] Figure 6.4.2.1–1, Fig. 2.17.2 : [8] Figure 6.4.2.1–2, Fig. 2.17.3 : [8] Figure 6.4.2.2–1, Fig. 2.17.4 : [8] Figure 6.4.2.2–2, Fig. 2.17.5 : [8] Figure 6.4.2.1–6, Fig. 2.17.6 : [8] Figure 6.4.2.1–5, Fig. 2.17.7 : [8] Figure 6.4.2.2–5, Fig. 2.17.9 : [8] Figure 6.4.2.3–2

Fig. 2.18.1 : [8] Figure 6.4.6.1–2, Fig. 2.18.2 : [8] Figure 6.4.6.1–3, Fig. 2.18.3 : [15], Fig. 2.18.4 : [8] Figure 6.4.3.1–1, Fig. 2.18.5 : [8] Figure 6.4.4.1–6, Fig. 2.18.6 : [8] Figure 6.4.3.5–2, Fig. 2.18.7 : [8] Figure 6.4.3.4–1, Fig. 2.18.10 : [8] Figure 6.4.3.8–4, Fig. 2.18.11 : [8] Figure 6.4.3.4–2

Fig. 2.19.1 et Fig. 2.19.2 : [8] Figure 6.4.10.2–1, Fig. 2.19.3 : [8] Figure 6.4.10.2–4

Fig. 2.20.1 : [8] Figure 6.4.1.3–1, Fig. 2.20.2 : [32] Figure 113 et 114, Fig. 2.20.3 : [32] Figure 116, Fig. 2.20.5 : [8] Figure 6.4.7.2–1

Fig. 2.21.1 : [8] Figure 6.5.3.3–1, Fig. 2.21.2 : [8] Figure 6.5.3.2–1, Fig. 2.21.3 : [8] Figure 6.4.7.6–2, Fig. 2.21.4 : Source Internet [www.sosproducts.com](http://www.sosproducts.com), Fig. 2.21.5 : Source Internet [www.quakehold.com](http://www.quakehold.com)

Fig. 2.22.1 : Source inconnue, Fig. 2.22.2 : [8] Figure 6.5.2.2–3, Fig. 2.22.3 : [8] Figure 6.5.2.1–1, Fig. 2.22.4 : [8] Figure 6.5.5.1–1, Fig. 2.22.5 : [8] Figure 6.5.2.2–1, Fig. 2.22.6 : [8] Figure 6.5.5.1–3,

Fig. 2.22.7 : [8] Figure 6.5.6.1–1, Fig. 2.22.8 : [8] Figure 6.5.2.2–4, Fig. 2.22.9 : [13]

Fig. 2.23.1 : [8] Figure 6.5.1.2–1, Fig. 2.23.2 : [13], Fig. 2.23.3 : [13], Fig. 2.23.4 : [8] Figure 6.5.1.2–2, Fig. 2.23.5 : [8] Figure 6.5.1.2–3, Fig. 2.23.6 : [8] Figure 6.5.1.2–4, Fig. 2.23.7 : [8] Figure 6.5.1.2–4

Fig. 2.24.1 : [8] Figure 6.5.4.1–1, Fig. 2.24.2 : [8] Figure 6.5.4.1–3, Fig. 2.24.3 : [8] Figure 6.5.4.1–4, Fig. 2.24.4 : [8] Figure 6.4.5.1–6

Fig. 2.25.1 : [8] Figure 6.5.6.3–1, Fig. 2.25.2 : [8] Figure 6.5.6.3–2, Fig. 2.25.3 : [8] Figure 6.5.5.3–1, Fig. 2.25.6 : [8] Figure 6.5.6.3–3b, Fig. 2.25.7 : [8] Figure 6.5.6.3–3c

## Annexe

Fig. A.1.1.1 à droite : [8] Figure 6.3.1.4–3, Fig. A.1.1.1 à gauche : [2] Image 32/1

Fig. A.1.1.2 à gauche : [8] Figure 6.3.8.1–1, Fig. A.1.1.2 à droite : [29]

Fig. A.1.1.3 à gauche : [8] Figure 6.4.5.2–2, Fig. A.1.1.3 Au centre : [8] Figure 6.4.3.6–3, Fig. A.1.1.3 à droite : [8] Figure 6.3.4.1–3

Fig. A.1.1.4 à gauche : [8] Figure 6.4.5.1–1, Fig. A.1.1.4 Au centre : [8] Figure 6.4.5.1–2, Fig. A.1.1.4 à droite : [8] Figure 6.4.5.1–3.