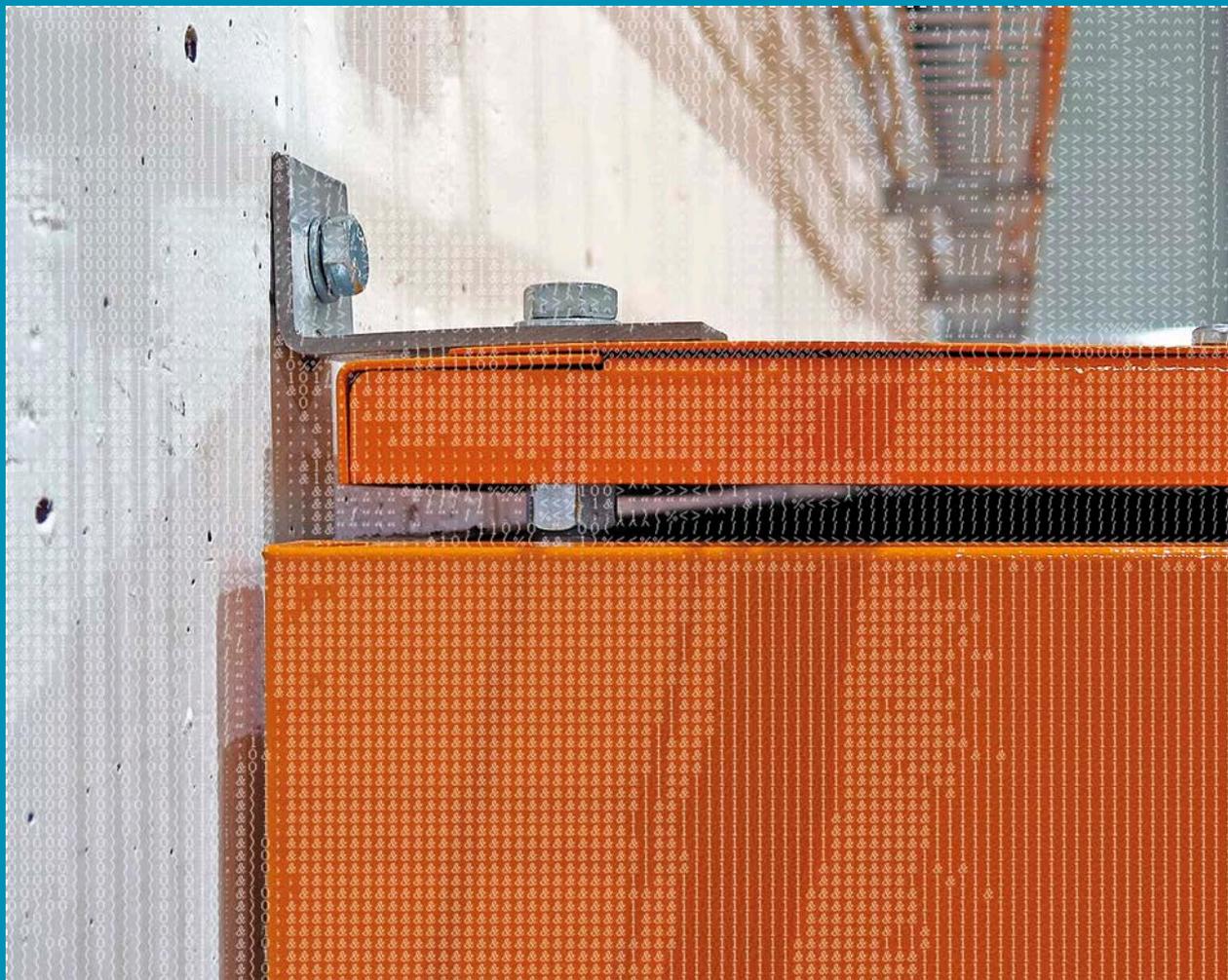


> Sécurité sismique des éléments non structuraux et autres installations et équipements

Recommandations et précisions pour la pratique



> Sécurité sismique des éléments non structuraux et autres installations et équipements

Recommandations et précisions pour la pratique

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 de leur soutien et de leur étroite
collaboration: 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 Metalldecken AG, St. Gallen; Fritz Scheidegger, HILTI AG,
Adliswil/Zürich; Markus Schmid, Ferroplan 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

Braune F. Berweger A., Vogt R., Szczesiak T. 2016: Sécurité sismique
des éléments non structuraux et autres installations et équipements.
Recommandations et précisions pour la pratique. Office fédéral de
l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 1643:
98 p.

Traduction

Pierre Grandjean, Venthône

Graphisme, mise en page

Karin Nöthiger, Niederrohrdorf

Photo de couverture

OFEV

Crédit photographique

Voir annexe «Crédit d'images»

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/uw-1643-f

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

Cette publication est également disponible en allemands.

> Table des matières

Abstracts	5	2.23 Étagères industrielles	58
Avant-propos	7	2.24 Substances dangereuses	60
Introduction	9	2.25 Objets d'art, mobilier, décoration d'intérieur	62
<hr/>			
1 Phénomènes et dommages survenant lors d'un séisme	11	3 Exigences, responsabilités et démarches recommandées en vue de limiter les dommages	64
1.1 Phénomènes sismiques et causes des dommages	11	3.1 Exigences normatives et volontaires	64
1.1.1 Les forces d'inertie (effets de secousses)	12	3.2 Responsabilités et compétences	65
1.1.2 Les déformations de l'ouvrage	13	3.3 Démarches recommandées pour limiter les dommages (réduction du risque)	67
1.1.3 Les mouvements relatifs	14	3.3.1 Situations initiales possibles	67
1.1.4 Les interférences	15	3.3.2 Facteurs d'influence importants	67
1.2 Étendue et conséquences des dommages	15	3.3.3 Instruments pour la pratique	69
1.2.1 Mise en danger de la vie humaine	16		
1.2.2 Dommages matériels	17		
1.2.3 Perturbation de la fonction	18		
<hr/>			
2 Indications et exemples concrets relatifs à la sécurisation parasismique des ENIE	19	Annexes	71
2.1 Intention	19	A1 Formulaire de saisie	71
2.1.1 Structure	20	A2 Matrice des responsabilités	74
2.1.2 Utilisation des exemples de mesures	21	A3 Éléments de texte pour le «Cahier des charges du projet» et la «Convention d'utilisation»	75
2.1.3 Autres principes généraux	21	A4 Procès-verbal de réception	78
2.2 Faux-plafonds suspendus	22	A5 Exemple de calcul et tableaux d'aide	79
2.3 Planchers surélevés (et planchers en gradins)	24		
2.4 Parois, remplissages	26	Bibliographie	93
2.5 Systèmes de façades, doublages	28	Glossaire	95
2.6 Parapets (et balustrades)	30	Répertoire	97
2.7 Escaliers	32		
2.8 Vitrages, portes, fenêtres	34		
2.9 Panneaux, enseignes et avant-toits	36		
2.10 Cheminées et toitures	37		
2.11 Alimentation électrique de secours	38		
2.12 Protection contre l'incendie	39		
2.13 Coffrets et armoires de distribution et de commande	40		
2.14 Transformateurs	42		
2.15 Éclairage	43		
2.16 Installations de climatisation	44		
2.17 Citernes, chaudières et réservoirs	46		
2.18 Conduites, gaines de ventilation, canaux de câbles	48		
2.19 Ascenseurs	50		
2.20 Amortisseurs et isolateurs contre les vibrations	52		
2.21 Éléments IT (informatique et communication)	54		
2.22 Armoires, étagères	56		

> Abstracts

This publication 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.

Keywords:
nonstructural elements,
installations, equipment, seismic
protection

Diese Publikation bietet eine Einführung in das Thema Erdbebensicherheit von sekundären Bauteilen und weiteren Installationen und Einrichtungen. Sie richtet sich primär an Architekten, Ingenieure der Bereiche Gebäudetechnik, Maschinenbau und Elektrotechnik sowie an Gebäudeeigentümer. Ebenso finden 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 Indications 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.

Stichwörter:
sekundäre Bauteile,
Installationen, Einrichtungen,
Erdbebensicherheit

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.

Mots-clés:
éléments non structuraux,
installations, équipements,
sécurité sismique

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

> Avant-propos

En Suisse, la sensibilisation au risque sismique s'est clairement renforcée depuis une dizaine d'années, avec l'entrée en vigueur en 2003 des normes SIA sur les structures porteuses. Des progrès notables ont été réalisés en matière de protection contre les séismes, que ce soit pour les nouvelles constructions ou pour la rénovation de bâtiments existants. S'agissant des projets de construction, l'accent est généralement placé sur la réalisation de structures porteuses parasismiques, en ne considérant encore que trop peu la nécessité de sécuriser les autres éléments et contenus des bâtiments.

Étant donné que les éléments non structuraux et autres installations et équipements (ENIE) constituent en général 60 à 80 % des coûts totaux d'un bâtiment, leur endommagement ou destruction peut avoir de lourdes conséquences financières. Cette proportion est même encore plus élevée dans les ouvrages hautement installés, comme par exemple des bâtiments industriels ou des hôpitaux. Les tremblements de terre passés montrent qu'une grande partie des dommages matériels directs ou indirects sont occasionnés par des ENIE qui ont été endommagés ou détruits. Même de faibles séismes (donc relativement fréquents), qui peuvent causer des dommages minimes à la structure porteuse, peuvent avoir de lourdes conséquences lorsque de tels éléments sont endommagés^[31]. Actuellement en Suisse, les dommages sismiques ne sont pas couverts par les assurances obligatoires contre l'incendie et contre les dommages dus à des événements naturels.

Lors d'un tremblement de terre, les éléments d'un bâtiment qui sont endommagés ou détruits peuvent en outre mettre en danger des personnes et occasionner des dommages indirects très importants. C'est la raison pour laquelle les normes SIA sur les structures porteuses exigent que les «éléments de construction non structuraux [pouvant] mettre en danger des personnes, endommager la structure porteuse ou porter préjudice à l'exploitation d'installations importantes» soient dimensionnés, assemblés, fixés et ancrés conformément à la situation de dimensionnement Séisme (norme SIA 261:2014, chiffre 16.7.1). En Suisse, les normes de construction actuelles ne réglementent pas la façon de sécuriser les autres installations et équipements d'un bâtiment en vue de limiter les dégâts d'un séisme. Les exigences en la matière doivent donc être spécifiquement définies pour chaque projet.

Dans la pratique, on accorde encore trop peu d'attention au problème de la sécurité sismique des ENIE. Il est rare que ces éléments soient conçus pour supporter des forces d'inertie ou les déformations horizontales de la structure porteuse. Le potentiel des dommages est peu connu et sous-estimé, de même que la nécessité de les prévenir. Quels éléments d'un ouvrage doivent être pris en considération et comment évaluer et améliorer leur sécurité sismique sont des questions auxquelles de nombreux responsables de projet cherchent des réponses. Un autre problème réside dans les responsabilités et les compétences parfois mal définies lorsqu'il s'agit de la conception parasismique des ENIE. Enfin, il manque des exemples concrets de mesures de sécurité sismique simples et efficaces.

Pays de haute technologie doté d'un parc immobilier de grande qualité et exposé à un niveau d'aléa sismique moyen, la Suisse doit faire face à ce danger potentiel. Il est important de renforcer la prise de conscience vis-à-vis des dommages potentiels et de mettre en évidence les conséquences de la défaillance ou de la destruction d'éléments de bâtiments. Il est encore plus important de montrer quelles possibilités simples et peu coûteuses existent pour sécuriser les ENIE et réduire efficacement les dommages potentiels.

Avec la présente publication, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) entend soutenir en particulier les architectes et les ingénieurs en technique du bâtiment, en construction de machines et en électrotechnique ainsi que les propriétaires immobiliers et les entreprises qui construisent ou distribuent des ENIE, à identifier et à réduire les risques sismiques auxquels sont exposés les personnes, les biens matériels et l'environnement à cause de ces éléments. Cette publication peut également être d'une grande utilité aux facility managers (responsables des services généraux), aux utilisateurs d'ouvrages et aux responsables de la sécurité. Enfin, elle pourra aussi être utile aux ingénieurs civils peu familiarisés avec la sécurité sismique des ENIE.

Josef Hess
Sous-directeur
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 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 de la norme SIA 261^[24] qui précise que «si, en cas de défaillance, des éléments de construction non structuraux peuvent mettre en danger des personnes, endommager la structure porteuse ou porter préjudice à l'exploitation d'installations importantes, il est nécessaire de prendre en considération la situation de dimensionnement Séisme tant pour dimensionner l'élément de construction lui-même que pour concevoir ses assemblages, ses fixations ou ses ancrages».

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 significatifs 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 et des attributions 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 le cahier des charges du projet et la convention d'utilisation
- > Procès-verbal de réception
- > Exemple de calcul et tableaux d'aide.

1 > Phénomènes et dommages survenant lors d'un séisme

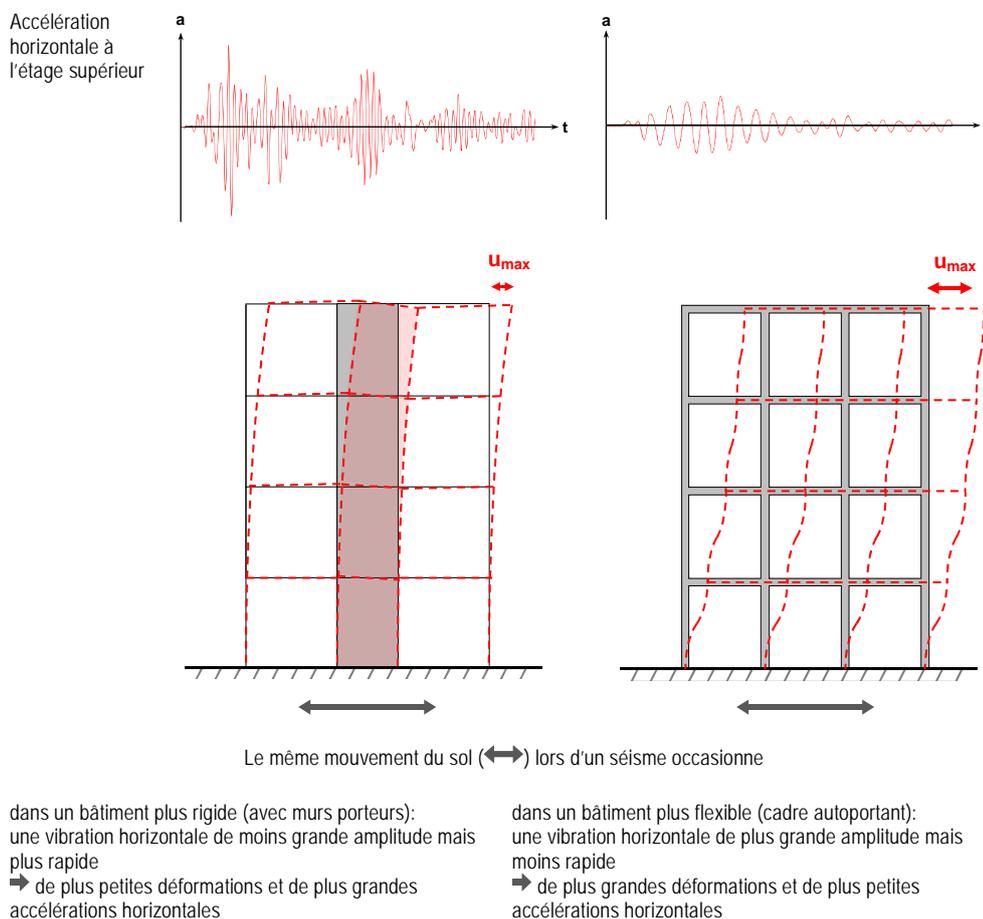
Pour pouvoir réduire efficacement les dommages subis par des ENIE, il faut d'abord comprendre comment ces éléments se comportent pendant un séisme et quelles conséquences entraînent leur endommagement ou leur destruction.

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. 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]).

Des bâtiments sont mis en vibration par les secousses du sol

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



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.

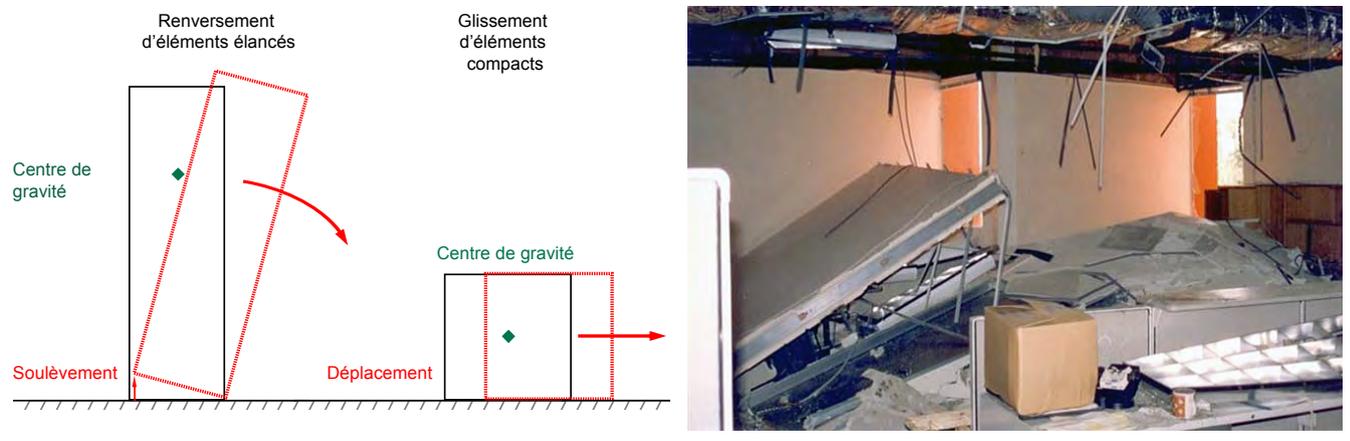
En principe, quatre phénomènes peuvent endommager des **ENIE**.

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.

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. 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. 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

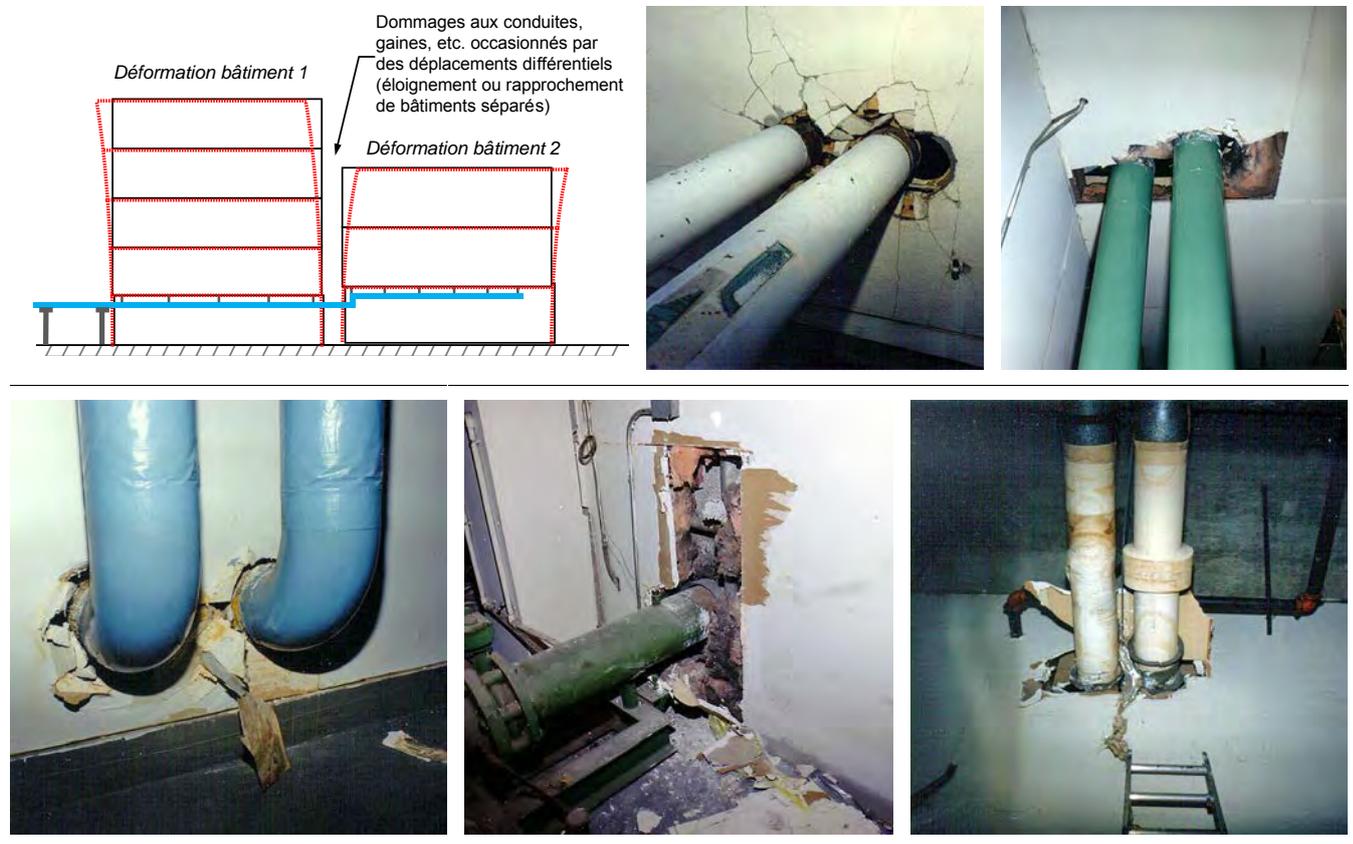


1.1.3 Les mouvements relatifs

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. Il peut s'agir de joints de séparation entre deux 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.

Mise en danger de la vie humaine,
dommages matériels et
perturbation de la fonction

Fig. 1.6 > Gefährdung durch Wasserleitungen*Batteries de secours menacées par les conduites d'eau qui les surplombent**Cuves endommagées et/ou renversées, 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. 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.

Fig. 1.7 > Façade tombée sur la terrasse d'une pizzeria, Emilia-Romagna, 2012

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

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. 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).

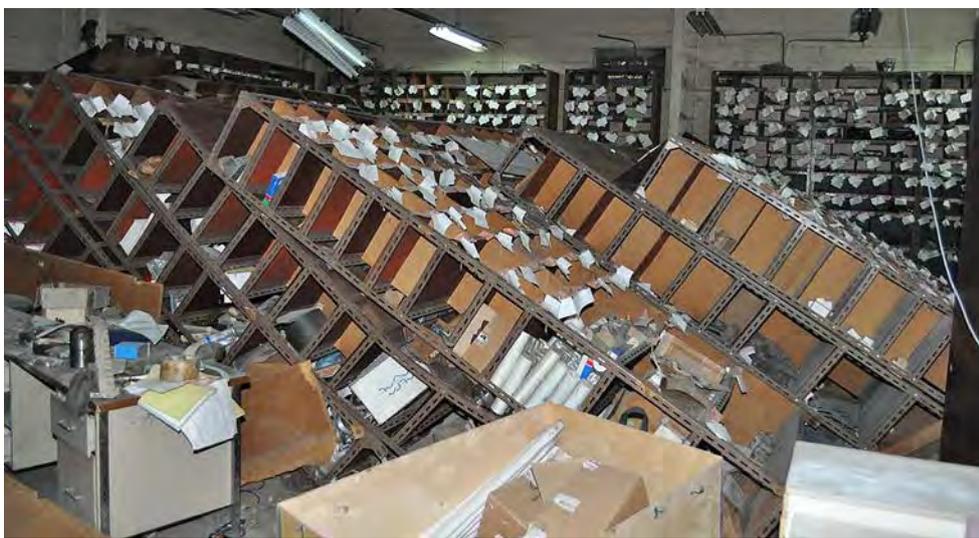
Dommages directs et indirects

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. 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

Renversées dans une fabrique de papier, Izmit, 1999



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

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'utilisateur une fois le bâtiment achevé:

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

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

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

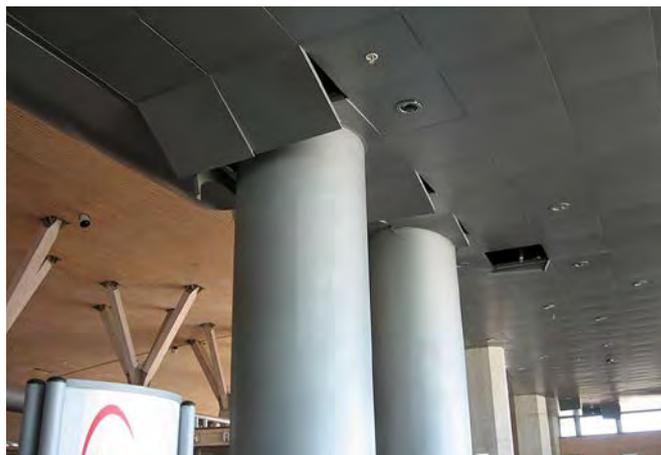


Fig. 2.2.1 bis 2.2.4 > Dégâts subis par des faux-plafonds suspendus

- 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

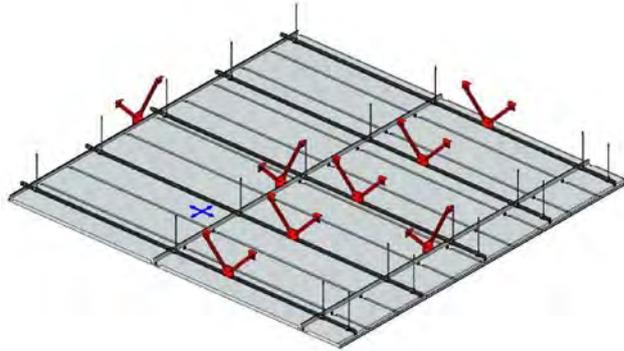


Fig. 2.2.5 > Contreventement horizontal au moyen de barres verticales et diagonales

- 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.

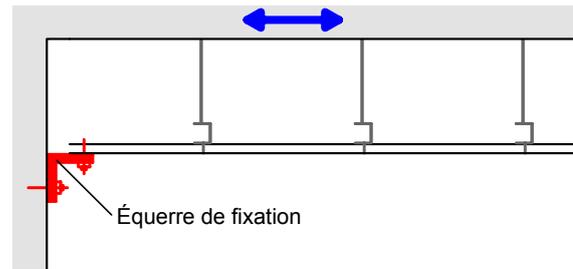


Fig. 2.2.6 > Ancrage horizontal contre la paroi

- 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 sinueux 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^[13].

2.3

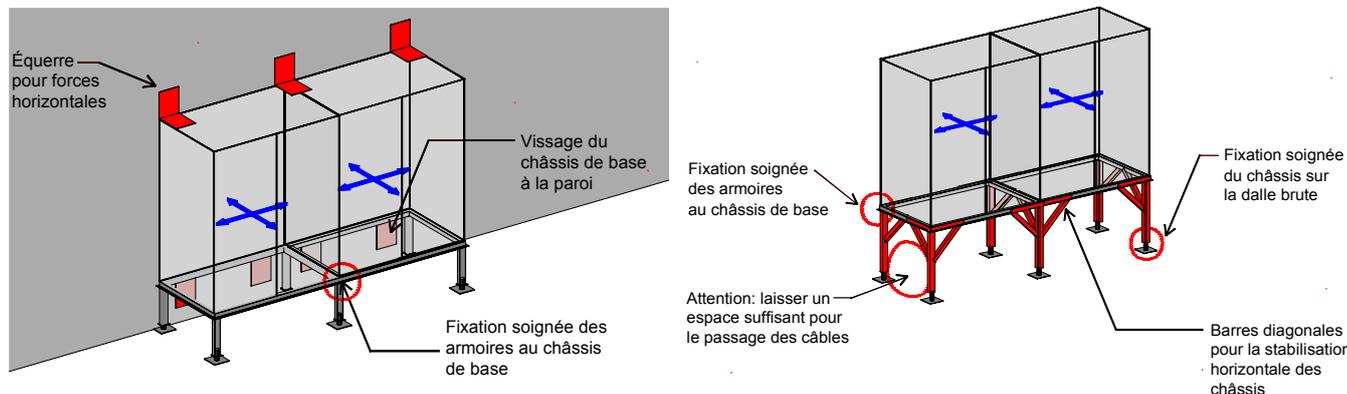
Planchers surélevés (et planchers en gradins)**Caractéristiques et dommages**

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 (≥ 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. auditoriums) 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 un 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

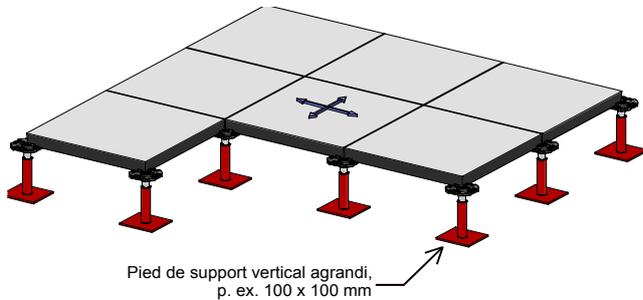


Fig. 2.3.3 > Agrandissement des pieds des supports verticaux

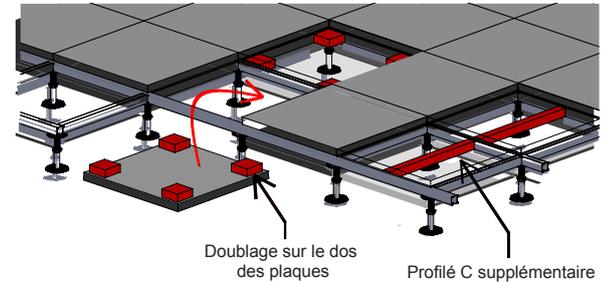


Fig. 2.3.4 > Doublage des panneaux et profilé en C

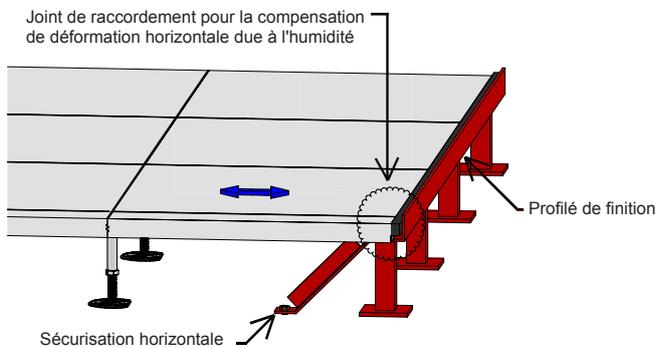


Fig. 2.3.5 > Profilé d'extrémité

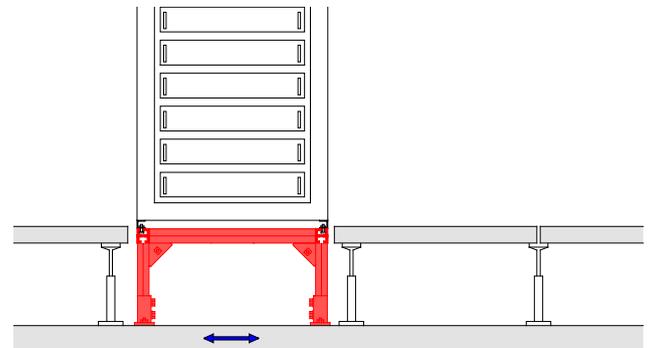


Fig. 2.3.6 > Châssis de base autoportant pour éléments intégrés



Fig. 2.3.7 > Fixation du châssis de base au mur



Fig. 2.3.8 > Stabilisation horizontale par barres diagonales

- 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-constructures 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

des profilés d'extrémité 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

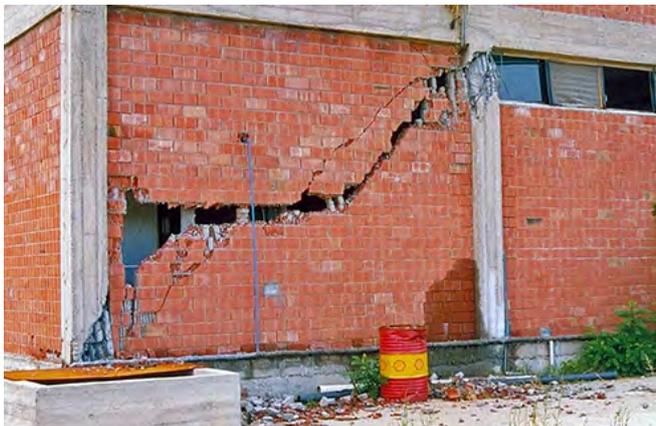


Fig. 2.4.1 > Rupture d'une diagonale sollicitée en compression dans la maçonnerie et endommagement des colonnes en béton armé



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^[2], 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

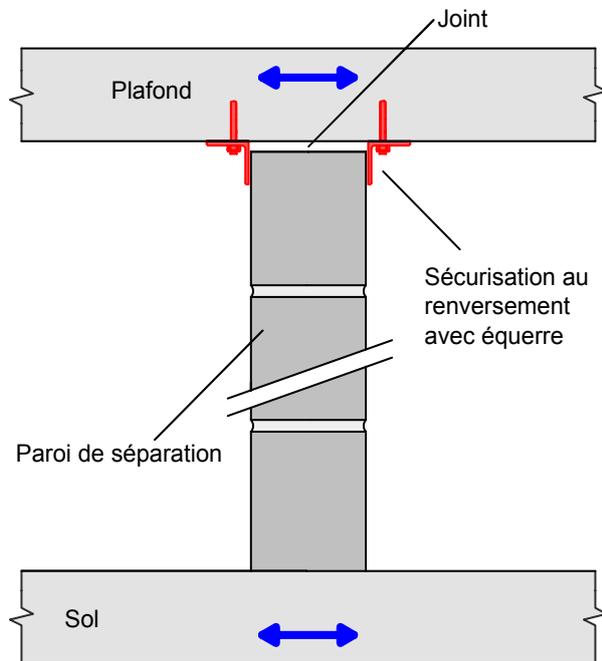


Fig. 2.4.5 > Mesures applicables à des cloisons

- 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.

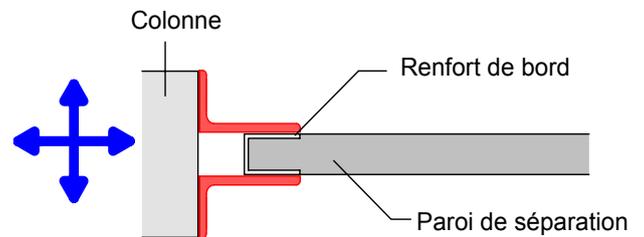


Fig. 2.4.6 > Détails de construction de la fixation latérale d'une cloison

- 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^[3]. 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^[3].
- 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 > Fissures en croix entre fenêtres



Fig. 2.5.2 > Décollement d'éléments



Fig. 2.5.3 > Rupture d'une façade suspendue



Fig. 2.5.4 > 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

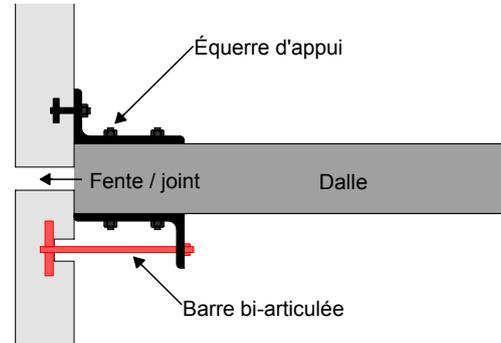


Fig. 2.5.6 > Consolidation d'éléments de façade par des barres pendulaires

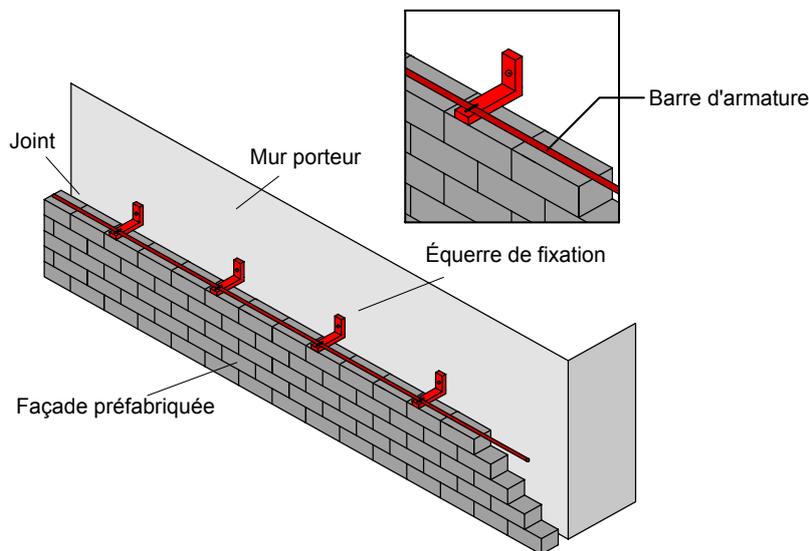


Fig. 2.5.7 > Mesures applicables à des éléments préfabriqués en maçonnerie

- 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

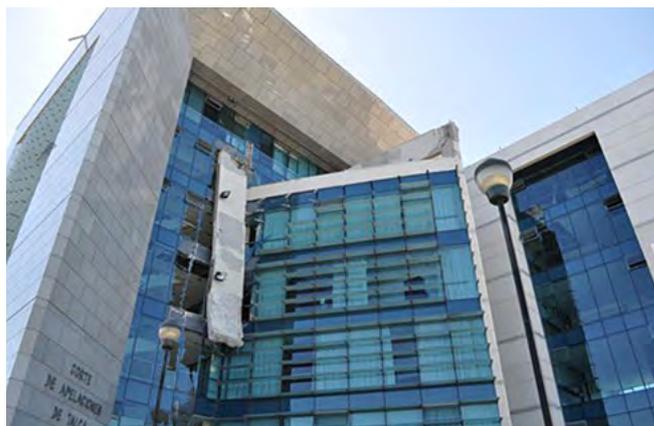


Fig. 2.6.4 > Rupture transversale au plan du parapet, grand risque de chute

- 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

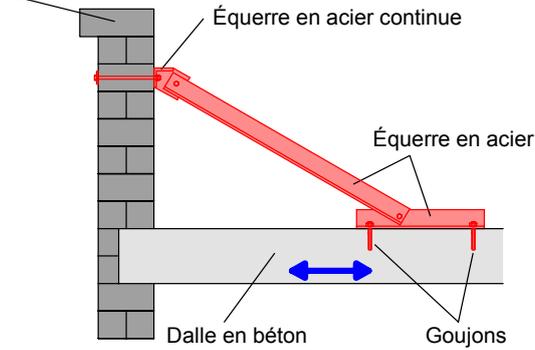


Fig. 2.6.5 > Mesures applicables aux parapets sur toiture



Fig. 2.6.6 > Mesures applicables aux parapets sur toiture

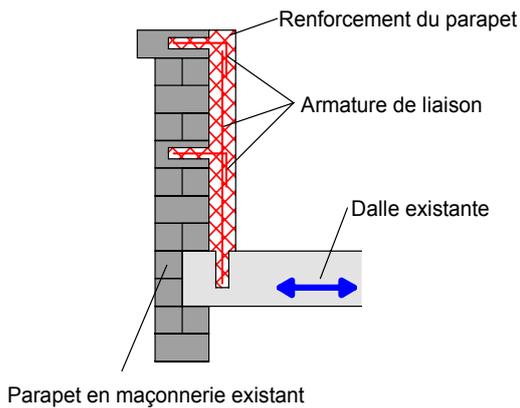


Fig. 2.6.7 > Consolidation postérieure d'un parapet en maçonnerie par du béton armé

- 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 judicieuse. 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).

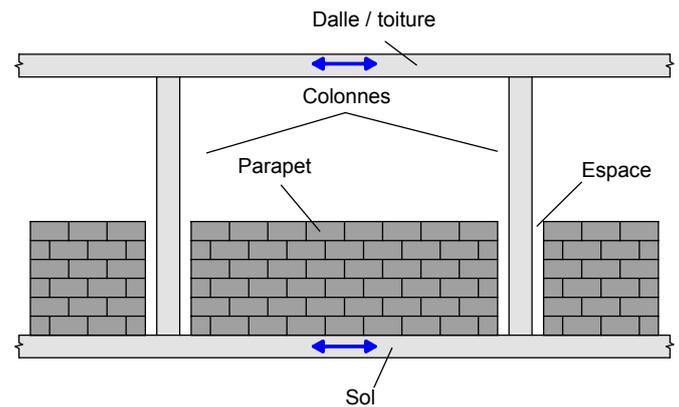


Fig. 2.6.8 > Contreventements entre piliers

- 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

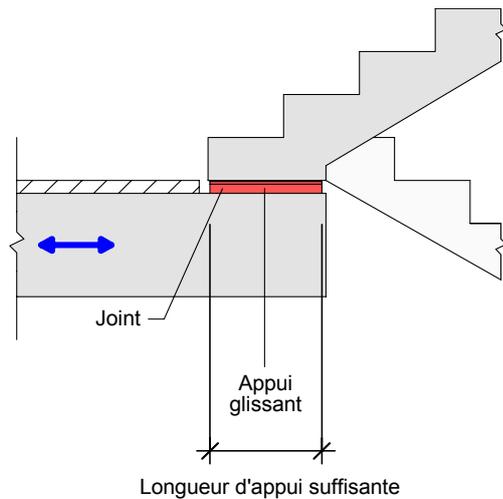


Fig. 2.7.5 > Mesures applicables aux volées d'escaliers

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

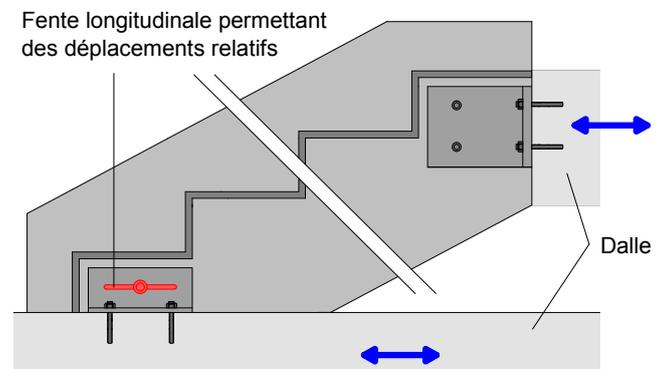


Fig. 2.7.6 > Mesures applicables aux volées d'escaliers

- 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 > Vitres brisées



Fig. 2.8.2 > Cadres de fenêtres cintrés dans un bâtiment flexible



Fig. 2.8.3 > 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 en 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.

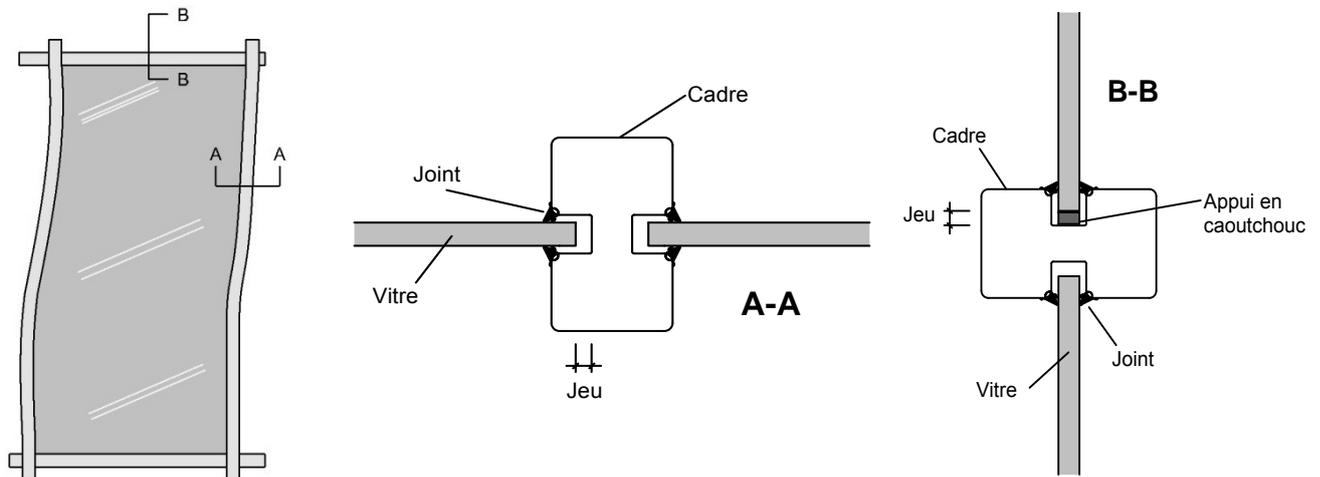


Fig. 2.8.4 > Mesures applicables aux vitres

- Divers types de verre peuvent être utilisés, qui présentent un comportement parasismique 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.
- Le verre de sécurité feuilleté (VSG) présente un bon comportement. Il se compose d'au moins deux vitres et d'une couche intermédiaire (en général un film PVB). Toutes les sortes de verre décrites peuvent être utilisées à cet effet. Lors d'un dommage, la couche intermédiaire tient les fragments ensemble et la vitre offre une résistance résiduelle. Les verres armés sont de moins bonne qualité que les vitres VSG, mais offrent aussi une protection en empêchant les fragments de verre de chuter.

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 relatives 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^[14].
- 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

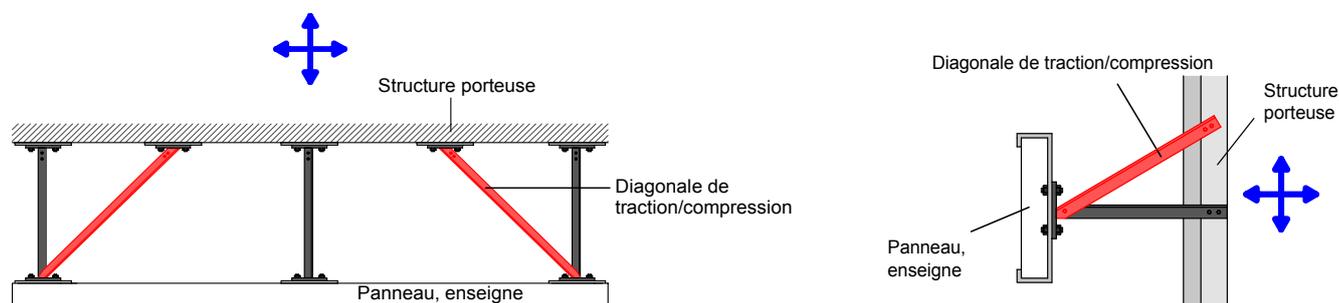


Fig. 2.9.3 > Mesures applicables à des constructions en porte-à-faux (représentation en plan et coupe)

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

Mesures

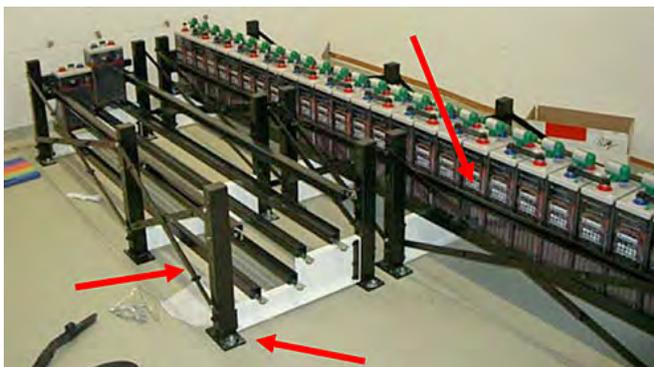


Fig. 2.11.2 > Support à batteries de secours contreventé

- 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'incorporés 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:

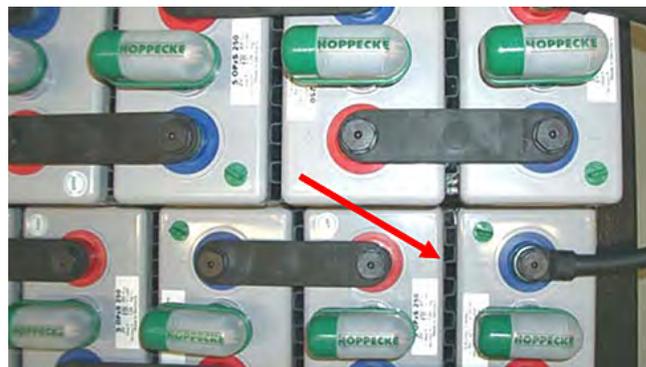


Fig. 2.11.3 > Incorporés insérés entre les batteries

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

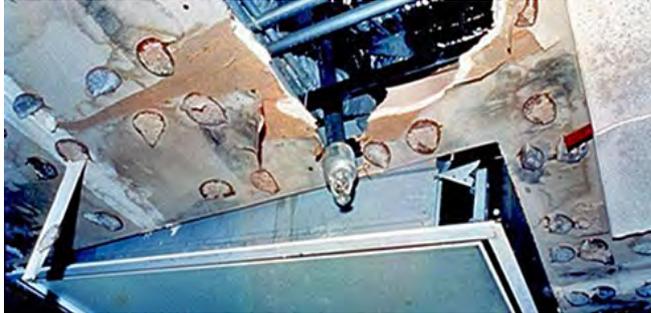


Fig. 2.12.1 et 2.12.2 > Tête de sprinkler endommagée

- 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) 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

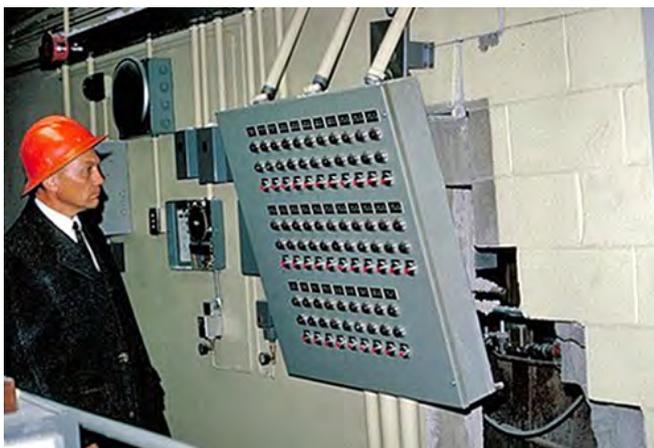


Fig. 2.13.3 > Arrachement de la fixation murale

- 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

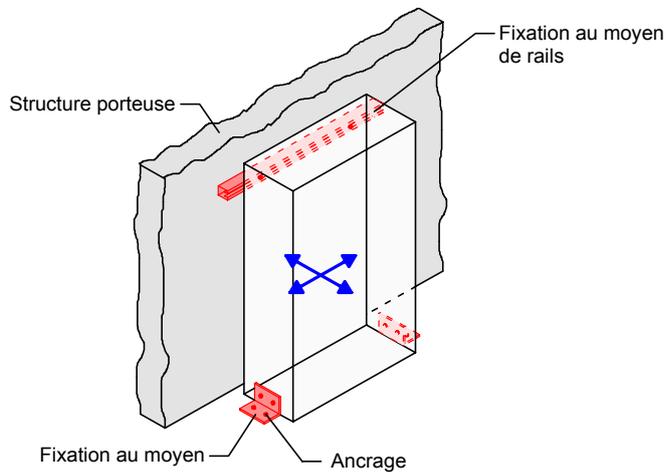


Fig. 2.13.4 > Fixation d'armoires

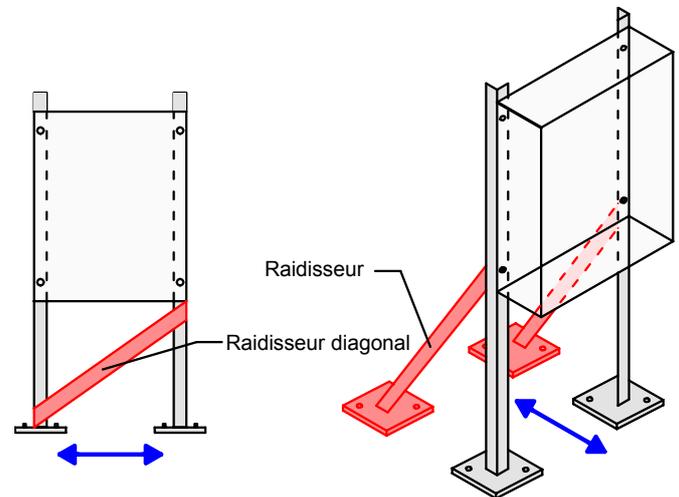


Fig. 2.13.5 > Fixation d'armoires/boîtiers autonomes sur pieds



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^[7].

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'accélération.

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



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

- 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.
- 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^[7].

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

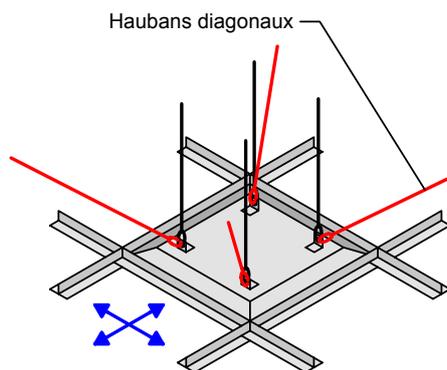


Fig. 2.15.3 > Contreventement de luminaires sur un faux-plafond suspendu

- Les luminaires installés sur des faux-plafonds suspendus nécessitent une fixation verticale indépendante ainsi qu'une liaison horizontale suffisante avec la sous-structure. 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 > Rupture des fixations



Fig. 2.16.2 > Élément insuffisamment contreventé



Fig. 2.16.3 et 2.16.4 > Glissements/instabilités



- Les installations peuvent glisser, tomber ou heurter d'autres objets. De grands déplacements relatifs peuvent aussi endommager des raccords 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

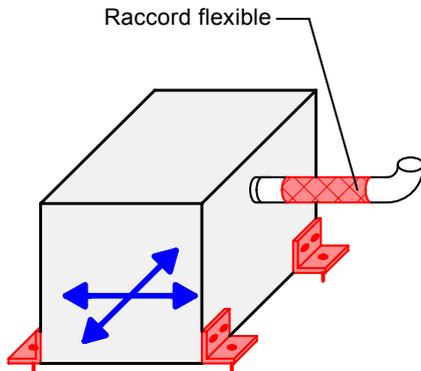


Fig. 2.16.5 > Fixation de l'installation à l'aide d'équerres en acier

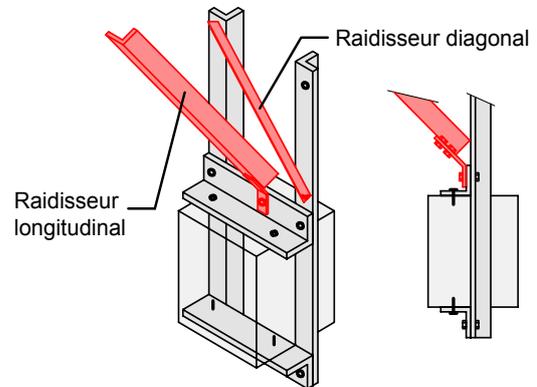


Fig. 2.16.6 > Construction destinée à des objets lourds



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 Citernes, 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



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

- 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.
- 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 citernes surélevées



Fig. 2.17.6 > Raccords flexibles

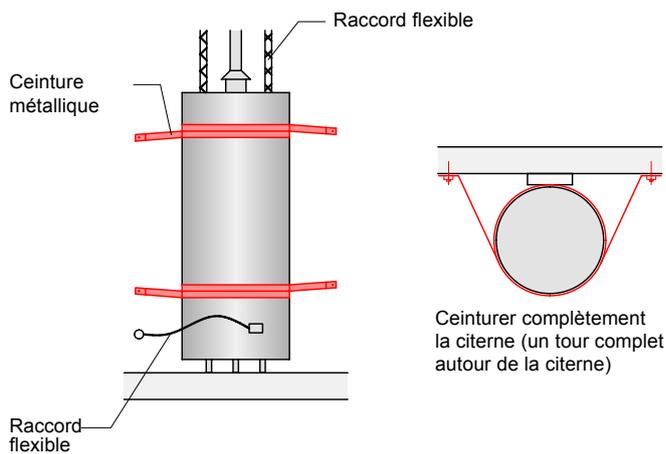


Fig. 2.17.7 > Sécurisation de citernes surélevées



Fig. 2.17.8 > Fixation de bonbonnes

- Les liaisons entre des citernes et les structures qui les supportent doivent être correctement dimensionnées. Les châssis doivent être contreventés et fixés horizontalement (fig. 2.17.5). Les citernes surélevées doivent être ancrées en trois points au moins.
- Lorsqu'une citerne est fixée contre un mur, il faut démontrer la sécurité structurale de celui-ci.
- Les fondations isolées de citernes sur pieds doivent posséder une surface d'appui suffisante afin que les citernes ne puissent se renverser.
- Les parois des citernes doivent être dimensionnées en fonction des forces de compression attendues.
- Les citernes 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)^[35], en particulier l'ordonnance sur les accidents majeurs (OPAM)^[35] et la loi sur la protection des eaux (LEaux)^[37] doivent être respectées.
- Dans la mesure du possible, les citernes 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 citernes, 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 > Dégâts dus à des chocs



Fig. 2.18.2 > Chute d'une conduite



Fig. 2.18.3 > Dégâts à un embranchement

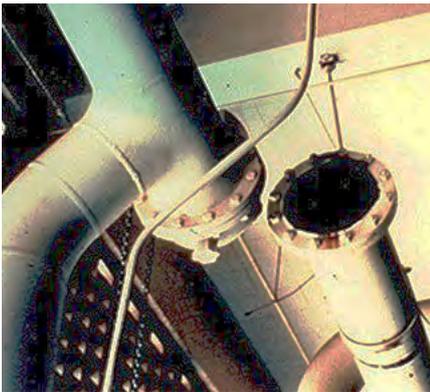


Fig. 2.18.4/2.18.5 > Dégâts sur des raccordements bout à bout



Fig. 2.18.6/2.18.7 > 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

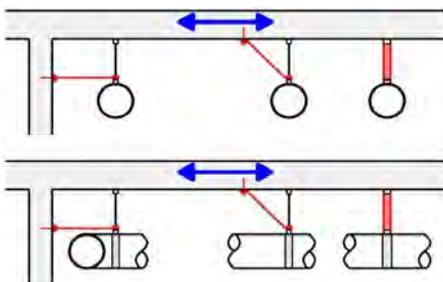


Fig. 2.18.8 > Contreventement longitudinal et transversal de conduites

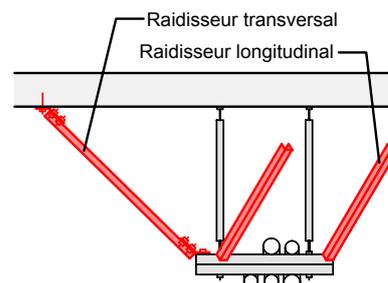


Fig. 2.18.9 > Contreventement longitudinal et transversal de consoles



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



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

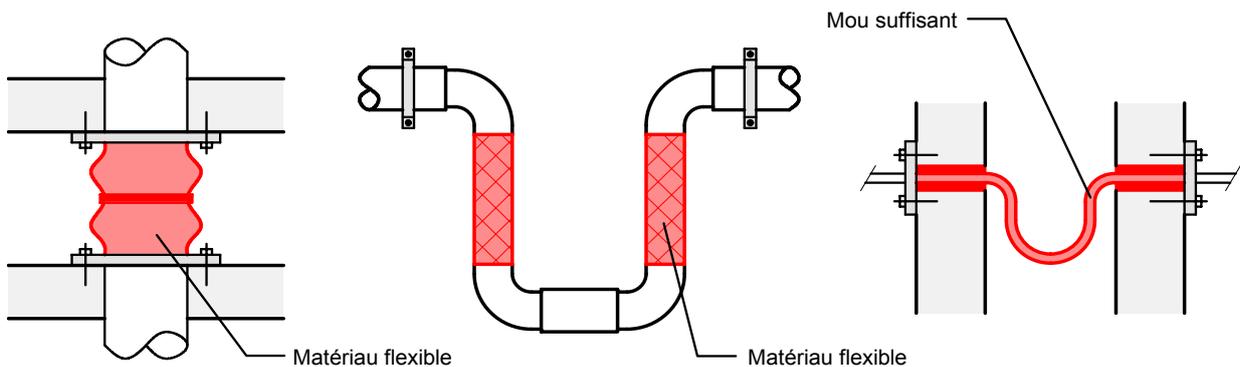


Fig. 2.18.12 > Divers types de raccords flexibles

- 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 prévoise 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 matériau 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^[35], en particulier l'OPAM^[36] et la LEaux^[37] doivent être respectées.
- On doit éviter les conduites faites de matériaux cassants, tels que fonte, verre ou céramique, ou on les isolera contre les secousses. 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^[13].

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

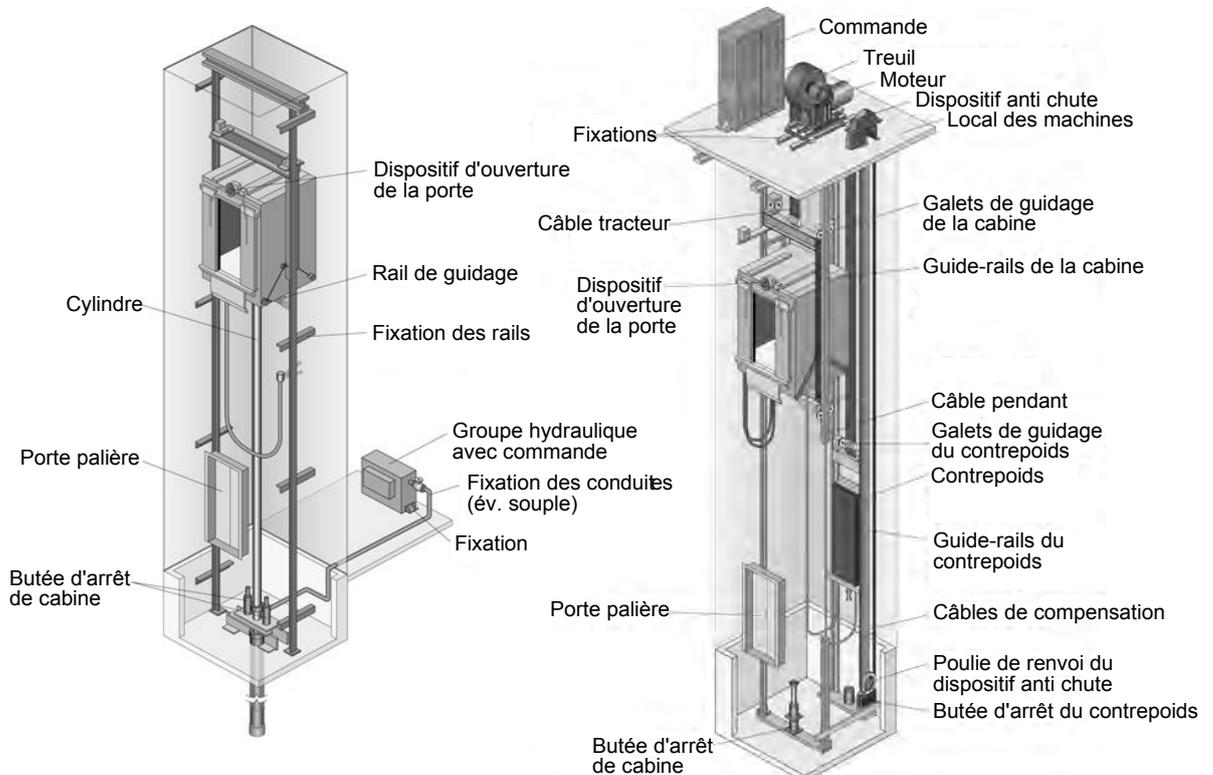


Fig. 2.19.4 > Ascenseur avec entraînement hydraulique

Fig. 2.19.5 > Ascenseur avec entraînement à câble

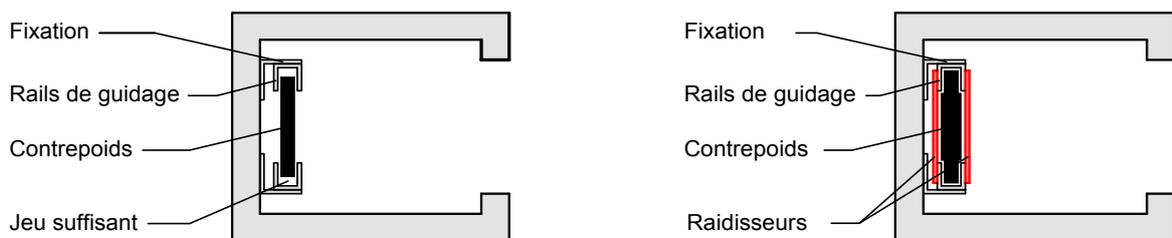


Fig. 2.19.6 > Puits d'ascenseur avec structure de guidage des contrepoids

- 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)^[38], que la Suisse a reprise dans son intégralité et publiée sous la forme de la norme SIA 370.080^[39] au 1^{er} juillet 2004.
- Depuis 2013 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^[41] 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 > Suspensions à ressort

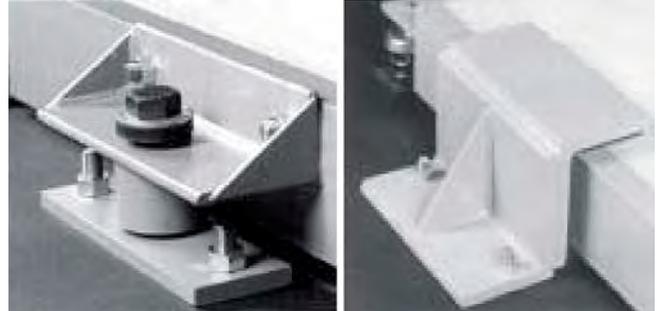


Fig. 2.20.3 > Exemples d'amortisseurs et de tampons

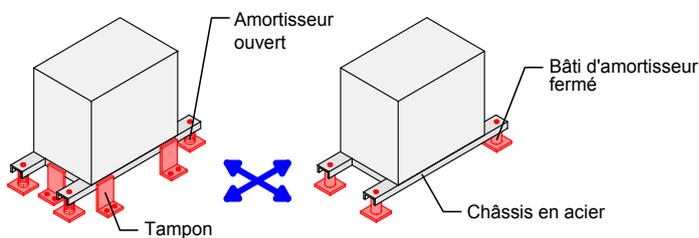


Fig. 2.20.4 > À gauche: suspensions ouvertes avec tampons; à droite: installation montée sur des suspensions à bâti fermé

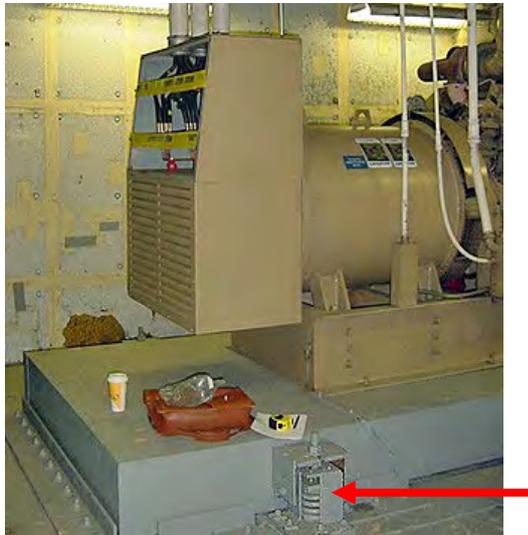


Fig. 2.20.5 > Suspensions avec sécurisation verticale, tampons servant à limiter les déplacements horizontaux

- 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 raccords 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

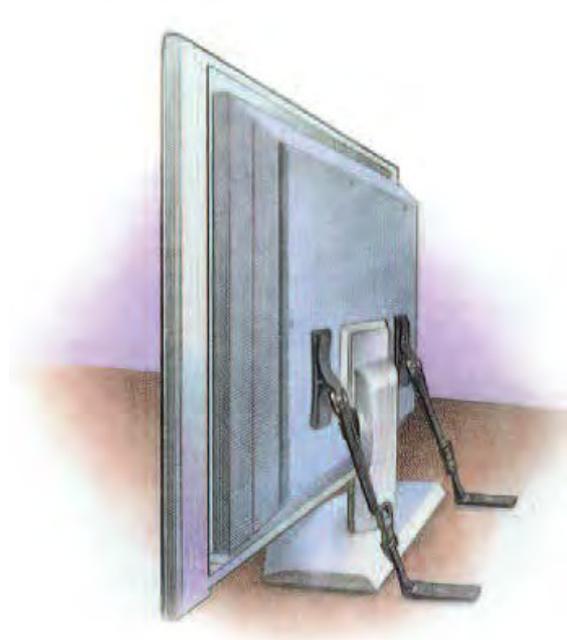


Fig. 2.21.4 > Fixation d'un ordinateur

- 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 sismique 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 > Mécanisme de ruine dans le plan («in plane») pour des étagères



Fig. 2.22.3 > Étagères renversées sur le sol



Fig. 2.22.4 > Modules de rangement renversés et tiroirs ouverts



Fig. 2.22.5 et 2.22.6 > Renversement de plusieurs rangées d'étagères par effet domino



Fig. 2.22.7, 2.21.8 et 2.22.9 > 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

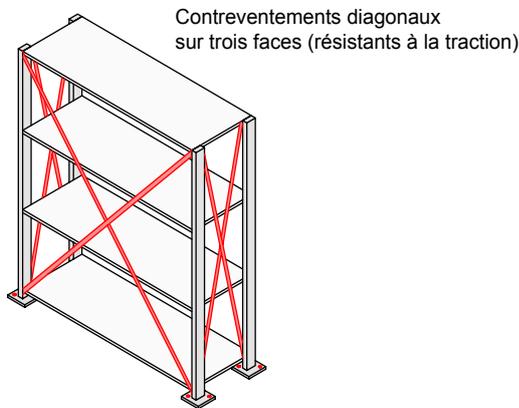


Fig. 2.22.10 > Contreventement et ancrage d'une étagère

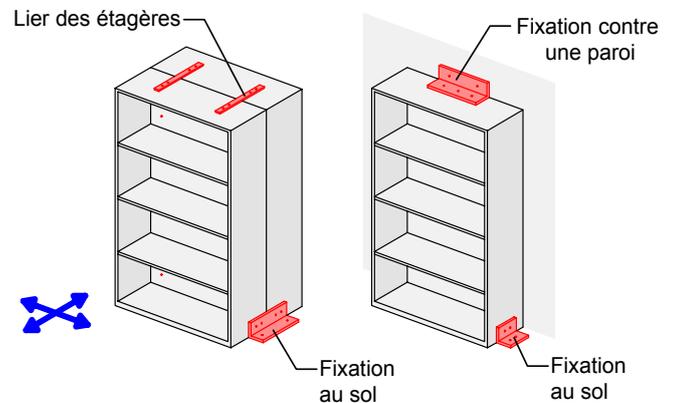


Fig. 2.22.11 > Variantes de sécurisation d'étagères

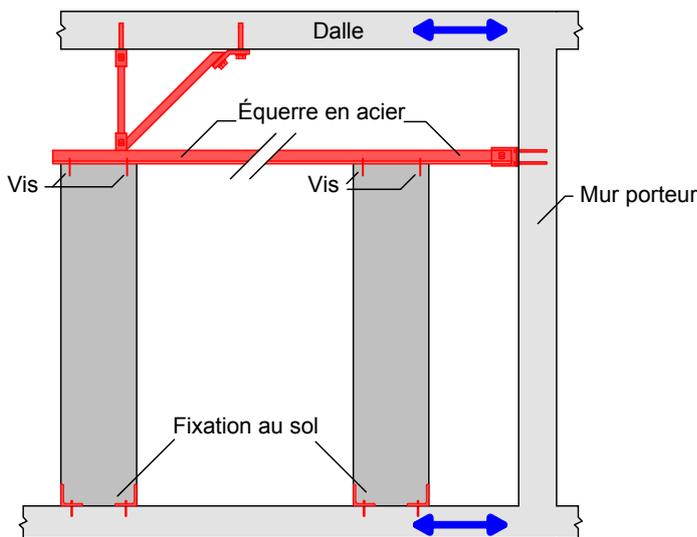


Fig. 2.22.12 > Possibilités de sécuriser des étagères

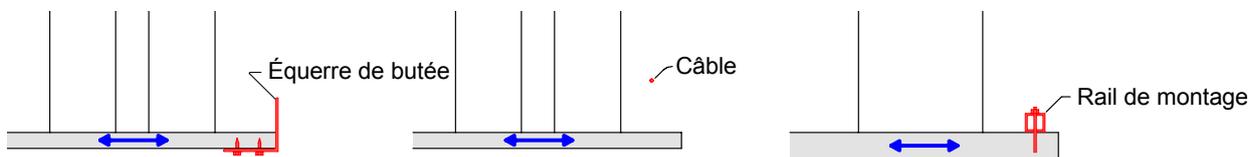


Fig. 2.22.13 > Mesures à mettre en œuvre en vue de protéger des objets posés sur des étagères

- 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 être également 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^[13].

2.23 Étagères industrielles

Caractéristiques et dommages

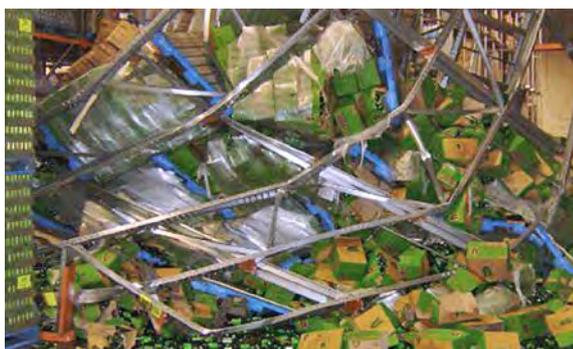


Fig. 2.23.1, 2.23.2 et 2.23.3 > Effondrement d'un entrepôt d'étagères



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

Dangers

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

Contreventements diagonaux sur trois faces (résistants à la traction et à la compression)

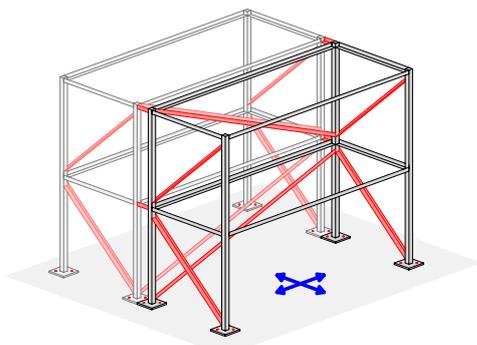


Fig. 2.23.8 > Contreventement et ancrage d'entrepôts de rayonnages en hauteur

- 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-glisser.

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⁽¹¹⁾.

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)^[35], en particulier l'ordonnance sur les accidents majeurs (OPAM)^[36] et la loi sur la protection des eaux (LEaux)^[37] 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

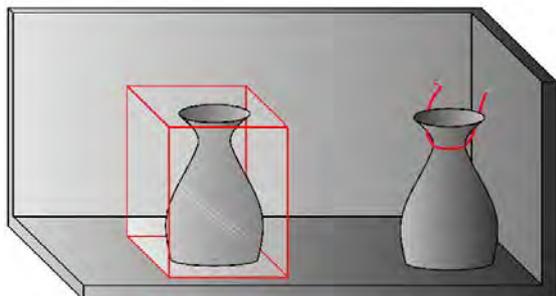


Fig. 2.25.4 > Mesures applicables aux objets d'art et d'exposition

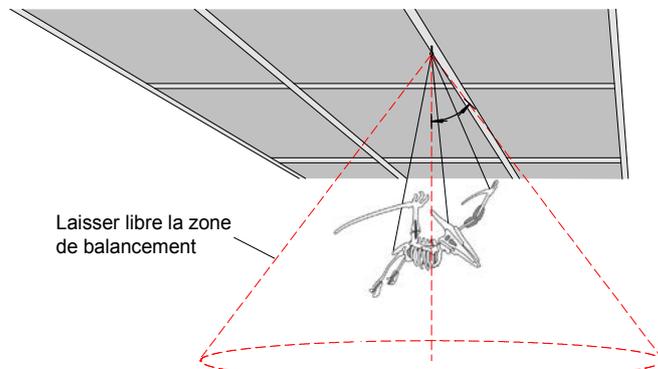


Fig. 2.25.5 > Cône de balancement d'un objet d'exposition suspendu



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 bâtis 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 et les compétences 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 fixés et liés de manière parasismique. Les autres éléments, installations et équipements secondaires d'un bâtiment devraient eux aussi être fixés 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 2014). L'étude et la réalisation parasismiques de nouveaux ouvrages obéissent aux normes SIA 260 à 267. L'analyse et l'éventuel confortement 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). Le but premier de l'étude et de la réalisation parasismiques d'ouvrages est de protéger la vie des personnes (sécurité des personnes). La volonté d'éviter des dommages matériels et des interruptions d'exploitation complètent cet objectif.¹

Fixation et liaison de manière parasismique des éléments non structuraux dangereux et d'autres éléments, installations et équipements secondaires

Tous les ouvrages doivent satisfaire à des exigences normatives relatives à la sécurité sismique d'**éléments non structuraux dangereux**. Quelle que soit la classe d'ouvrage (CO), leur réalisation parasismique conformément à la norme SIA 261 (2014)^[24], chiffre 16.7, doit être étudiée et calculée par un ingénieur civil.

Il existe des exigences plus sévères pour les **ENIE** directement liées à la fonctionnalité d'ouvrages de la classe **CO III**, c'est-à-dire les infrastructures vitales telles que les hôpitaux de soins aigus, les ouvrages servant à la protection contre les catastrophes

¹ Les ouvrages spéciaux tels que les centrales nucléaires (voir www.ensi.ch), les barrages (voir www.admin.bfe.ch) les installations significatives dans le contexte des accidents majeurs (voir 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**.

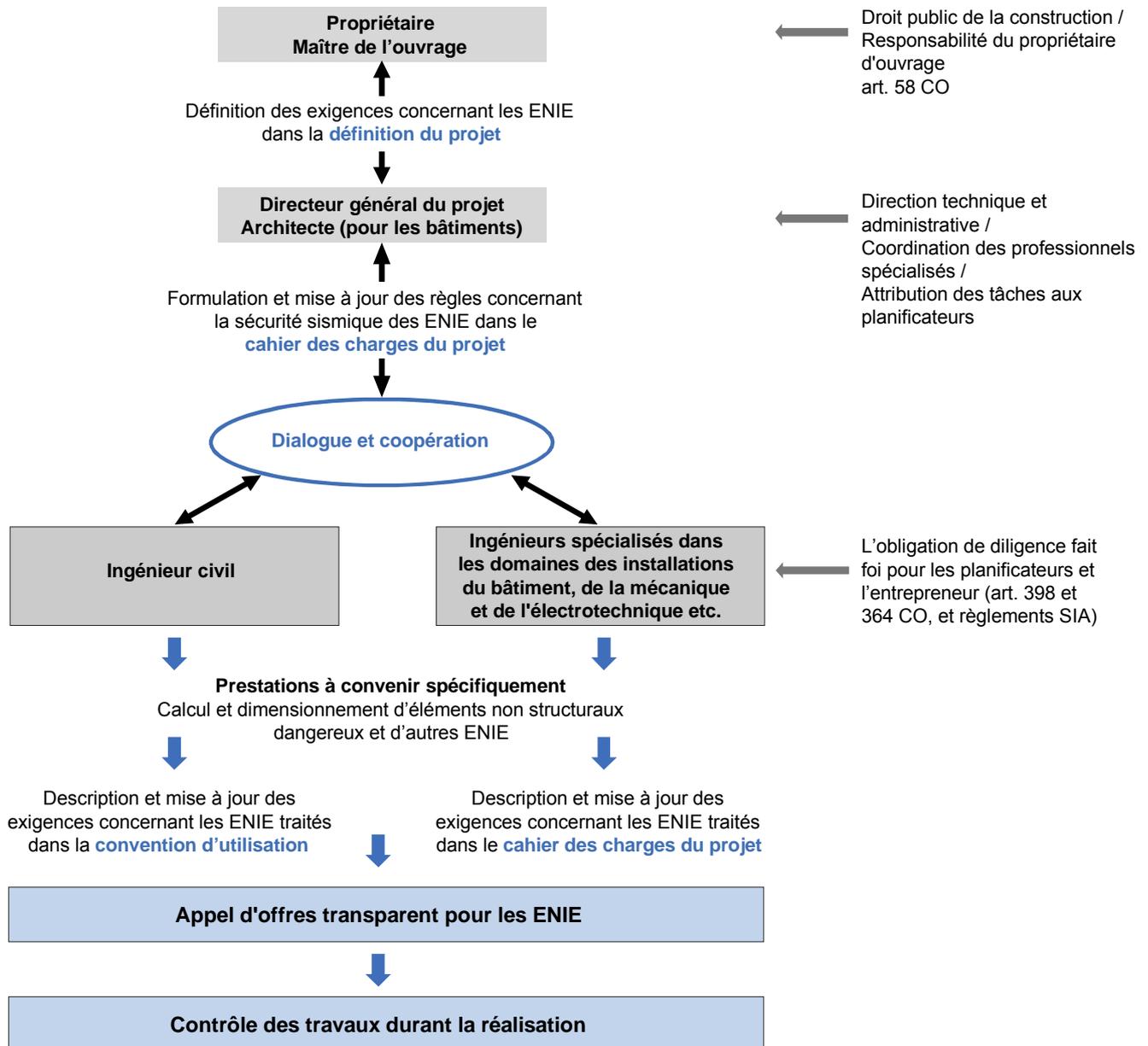
(p. ex. casernes de pompiers ou garages à ambulances) ou les ouvrages ayant une importance vitale pour l’approvisionnement, l’évacuation et les télécommunications. Il est alors requis d’apporter la preuve que tous les **ENIE** nécessaires au bon fonctionnement des ouvrages de cette classe sont en état de marche. S’agissant des ouvrages assujettis à l’ordonnance sur les accidents majeurs (OPAM)^[36], et pour lesquels une évaluation du risque est requise, l’action sismique et les mesures de protection devront être définies dans le cadre de cette évaluation.

Il n’existe pas d’exigences normatives applicables à la réalisation parasismique d’autres **ENIE** dans l’optique de la limitation des dommages et de la préservation de la production et/ou de l’exploitation d’un bâtiment «normal» des classes CO I ou CO II. Dans ces cas, les exigences posées aux **ENIE** doivent être définies dans l’intérêt propre dans chaque projet.

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 responsabilités et les compétences 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

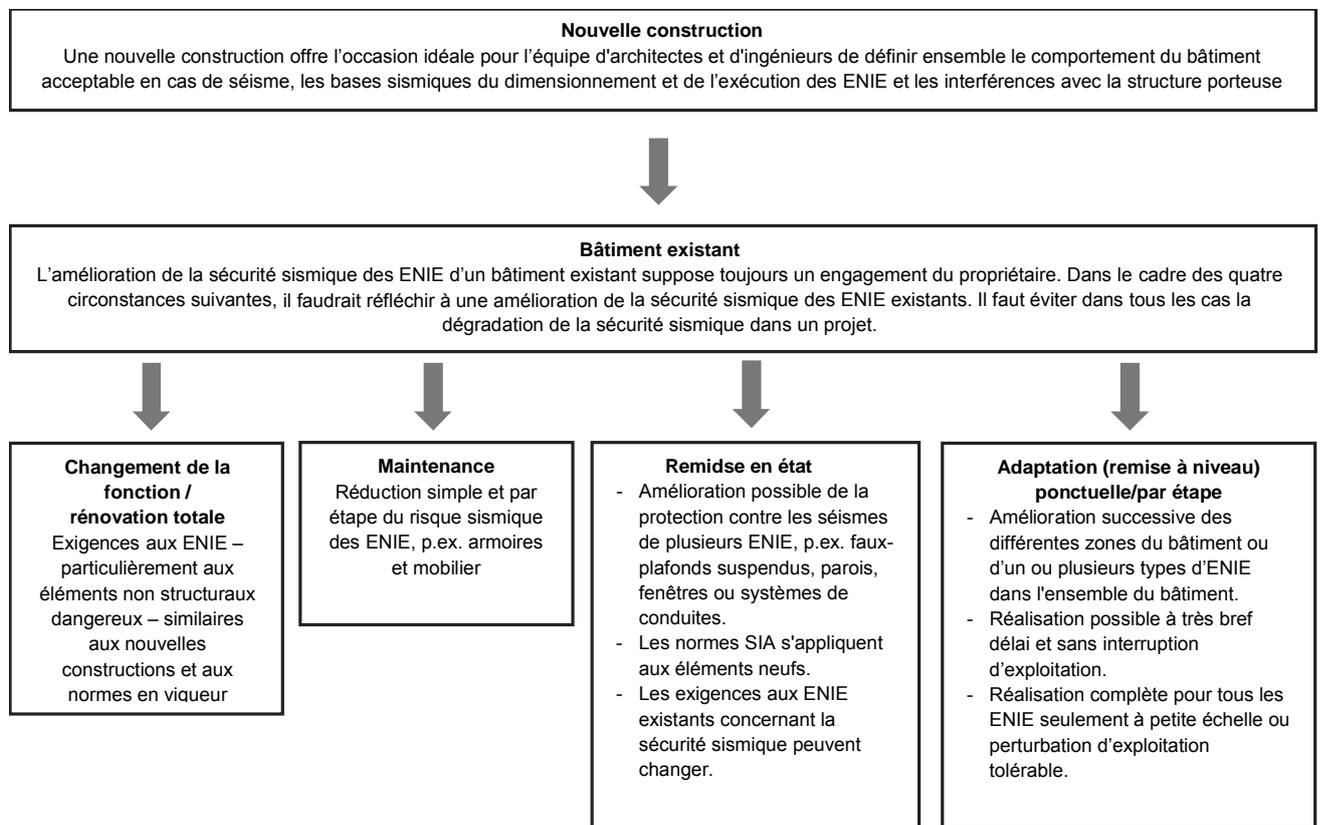


3.3 Démarches recommandées pour limiter les dommages (réduction du risque)

3.3.1 Situations initiales possibles

Étant donné la durée d'utilisation et la longévité sensiblement plus courte des **ENIE**, une amélioration de leur sécurité sismique est réalisable plus rapidement que pour la structure porteuse. Il est toujours plus efficace de réaliser des fixations parasismiques des **ENIE** pendant l'exécution et avant la mise en service d'un ouvrage plutôt que de le faire a posteriori.

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



3.3.2 Facteurs d'influence importants

Certaines liaisons ou fixations parasismiques d'installations et d'équipements CVCSE 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 citernes, 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.

Exigences et responsabilités

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. Lorsqu'un projet est important et, en particulier, dans le cas d'ouvrages de la classe CO III, il est judicieux et dans l'intérêt du propriétaire de requérir l'avis (second avis) d'un ingénieur en génie parasismique pour l'étude et le dimensionnement des éléments non structuraux (et d'autres ENIE). Une combinaison des deux variantes peut être judicieuse dans le cas d'ouvrages présentant un danger potentiel moyen: à titre d'exemple, après une analyse et une estimation du risque par un spécialiste externe, la réalisation concrète peut être faite par le groupe de mandataires, sans autre accompagnement.

Adjudication à des architectes et/ou à des ingénieurs expérimentés

Il est à noter que le traitement des éléments non structuraux dangereux (et éventuellement d'autres ENIE) 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 éléments dangereux (et éventuellement d'autres ENIE) 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, de proposer des honoraires selon le temps effectif consacré à la phase d'étude du projet et une estimation concrète des honoraires des prestations d'ingénieur pour la phase de réalisation. Outre le dimensionnement et le calcul, cette phase comprend le contrôle des travaux et la réception des ENIE. 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.

Rémunération

L'exécution correcte de la sécurisation parasismique des ENIE présuppose un appel d'offres transparent pour les entrepreneurs, les fournisseurs et les fabricants. Hormis les exigences spécifiques concernant la sécurisation parasismique de chaque ENIE, 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.

Appel d'offres

Suivant les exigences, les mesures parasismiques des ENIE 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 donné, il peut s'agir de bases de calcul spécifiques, d'exigences conceptuelles ou de considérations techniques de la part de l'ingénieur civil, de l'architecte ou des ingénieurs en technique du bâtiment, construction de machines et électrotechnique.

Exécution

Dans le cadre du contrôle des travaux, les professionnels spécialisés contrôlent la réalisation correcte de la sécurisation parasismique des ENIE sous leur responsabilité. Avec la réception, les ENIE 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

Le travail des professionnels spécialisés peut être décrit dans chacune des phases du projet sur la base de la «Définition du projet» et à l'aide du «Cahier des charges du projet», ou de la «Convention d'utilisation». À l'aide de ces documents de projet, il est possible de développer, en concertation avec le propriétaire/maître d'ouvrage, une stratégie de sécurité et de limitation des dommages 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:

- > Formulaire de saisie & matrice des compétences
- > Éléments de texte pour le cahier des charges du projet ou la convention d'utilisation
- > 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 éléments 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 et le propriétaire (exploitant/utilisateur). Il est conseillé de faire appel à un ingénieur civil et à d'autres professionnels spécialisés.

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. Une «Matrice des responsabilités» doit être définie comme instrument de coordination dès le stade des études prélimi-

naires, dans la «Définition du projet», puis être établie dans le «Cahier des charges» spécifique du projet. Il est recommandé de faire appel à cet effet à un professionnel spécialisé qui sera chargé de superviser l'étude, le dimensionnement et l'exécution des ENIE, y compris le contrôle et la réception des travaux. 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**?
- > Quels **ENIE** peuvent être fixés ou ancrés sans autres exigences spécifiques de manière parasismique (p. ex. armoires et étagères ou leurs contenus)?
- > Quels **ENIE** 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** 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 le cahier des charges du projet et la convention d'utilisation

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 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. Elle décrit entre autres les exigences de sécurité sismique de l'ouvrage, lesquelles sont de façon prépondérante définies par l'ingénieur civil. La «Convention d'utilisation» rassemble les exigences posées aux ENIE dont le traitement a été confié à l'ingénieur civil. Tous les autres ENIE doivent être traités dans le «Cahier des charges du projet» par les professionnels spécialisés compétents. Les deux documents sont mis à jour à la fin de chaque phase de projet, respectivement la «Convention d'utilisation» est approuvée à nouveau par le maître d'ouvrage. La version finale du «Cahier des charges du projet» avec la «Convention d'utilisation» fait partie intégrante de la documentation du projet et forme la base pour l'entretien correct de la sécurisation parasismique des ENIE. Le «Formulaire de saisie» et la «Matrice des compétences» forment une base déterminante pour l'élaboration et l'actualisation de ces documents. L'annexe A3 contient des éléments de texte utiles pour le «Cahier des charges du projet» et la «Convention d'utilisation».

3.3.3.4 «Procès-verbal de réception»

Pendant la phase de réalisation, les professionnels spécialisés compétents peuvent vérifier, 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?

éléments de façade tombés à terre *façade vitrée détruite*



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

escalier très endommagé

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?

rupture d'une conduite d'eau chaude en cuivre



un tuyau non fixé est rompu à l'endroit du raccord



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?**

dégâts à des oléoducs après leur chute due à la destruction de raccords



sous-sol d'une centrale inondé d'huile et d'eau



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



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

avant-projet (ou projet de l'ouvrage)																		
matrice des responsabilités																		
participants au projet																		
	maître d'ouvrage	directeur général du projet	architecte	ingénieur civil	professionnels spéciali- sés en installations du bâtiment, mécanique et électrotechnique	professionnel spécialisé/ingénieur des façades	fabricant, fournisseur	direction des travaux										
ENIE dangereux																		
parois de cloisonnement en maçonnerie	IC	CO	IC	SV, DC, DA, AO, CT			MO	RE										
éléments de façades	IC	CO	IC	SV, DC, IC		DA, AO, CT	MO	RE										
chaudière	IC	CO	IC	SV, DC, IC	DA, AO, CT		MO	RE										
faux-plafonds suspendus	IC	CO	IC	SV, DC, DA, AO, CT			DA, MO	RE										
étagères	IC	CO	IC, AO, CT	SV, DC, IC			DA, MO	RE										
...																		
autres installations																		
coffrets/armoires de distribution et de commande	DC	CO		SV, AO, IC	DA, AO, CT		MO	RE										
planchers surélevés	DC	CO	AO, CT	SV			DA, MO	RE										
monoblocs	DC	CO		SV	DA, AO, CT		MO	RE										
...																		
autres équipements																		
éléments IT	DC	CO	AO, CT	SV			DA, MO	RE										
...																		
légende: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">SV = surveillance</td> <td style="width: 50%;">DE = dimensionnement & exécution</td> </tr> <tr> <td>DC = décision</td> <td>AO = appel d'offres</td> </tr> <tr> <td>CO = coordination</td> <td>MO = montage</td> </tr> <tr> <td>IC = information & consultation</td> <td>CT = contrôle des travaux</td> </tr> <tr> <td></td> <td>RE = réception</td> </tr> </table>									SV = surveillance	DE = dimensionnement & exécution	DC = décision	AO = appel d'offres	CO = coordination	MO = montage	IC = information & consultation	CT = contrôle des travaux		RE = réception
SV = surveillance	DE = dimensionnement & exécution																	
DC = décision	AO = appel d'offres																	
CO = coordination	MO = montage																	
IC = information & consultation	CT = contrôle des travaux																	
	RE = réception																	

A3 **Éléments de texte pour le «Cahier des charges du projet» et la «Convention d'utilisation»**

Les éléments de texte proposés ci-après peuvent s'intégrer aux deux documents selon les spécificités d'un projet. Le but du cahier des charges du projet est – sur le plan de l'ingénierie par la convention d'utilisation – de déterminer au fil du projet et selon les phases quels ENIE doivent être traités comme éléments dangereux au sens de la norme SIA 261 (2014), chiffre 16.7, et quels autres éléments seront recensés, estimés et évalués dans le contexte du risque sismique. Les exigences qui en résultent sont à fixer. Les deux documents doivent être mis à jour de façon continue et présentés au mandant pour approbation.

Les éléments de texte sont surlignés en gris

A3-1 **Phase des études préliminaires**

A3-1.1 Éléments de texte pour le cahier des charges du projet

L'utilisation des deux instruments – «Formulaire de saisie» et «Matrice des compétences» – constitue la base d'une étude ciblée de tout projet de sécurisation parasismique des ENIE par les professionnels spécialisés mandatés.

Recensement des ENIE et estimation du risque sismique

Intégrer les résultats du formulaire de saisie.

Responsabilités et compétences en matière de traitement parasismique des ENIE

Intégrer la matrice des compétences

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

A3-2.1 Éléments de texte pour le cahier des charges du projet

Chaque professionnel spécialisé mandaté pour le traitement de ENIE attribue les ENIE qu'il doit traiter dans l'un des deux paragraphes suivants et décrit les exigences de sécurité sismique.

Éléments non structuraux dangereux au sens de la norme SIA 261 (2014), chiffre 16.7

Les éléments suivants qui se trouvent dans et sur la structure porteuse sont identifiés comme dangereux pour les personnes (ou la structure porteuse ou l'exploitation des installations importants):

Établir la liste des éléments de construction définis comme dangereux lors d'un relevé précédent du maître de l'ouvrage/directeur général ou en collaboration avec l'ingénieur civil.

Énumérer ci-après tous les éléments de construction pour lesquels il faut déterminer si:

- > ils constituent un des dangers nommés
- > l'ingénieur civil doit en effectuer le dimensionnement et déterminer les dispositions constructives
- > des mesures constructives doivent être mises en œuvre par un autre professionnel spécialisé
- > aucune mesure spécifique n'est nécessaire

Des exigences relatives à la sécurité sismique dépassant le cadre de la norme existent pour les autres installations et équipements suivants:

Les éléments suivants qui se trouvent dans la structure porteuse et dessus ont des exigences supplémentaires:

Établir la liste des éléments qui, p. ex., ont été définis par le maître de l'ouvrage/directeur général dans le cahier des charges du projet ou dans le descriptif des prestations de l'ingénieur civil.

Énumérer ci-après tous les **ENIE** pour lesquels il faut déterminer si:

- > ils doivent faire l'objet d'une sécurisation parasismique en vue de limiter les dommages
- > l'ingénieur civil doit en effectuer le dimensionnement et déterminer les dispositions constructives
- > des mesures constructives doivent être mises en œuvre par un autre professionnel spécialisé
- > aucune mesure spécifique n'est nécessaire

A3-2.2 Éléments de texte pour la convention d'utilisation

*Pour les **ENIE** dont le traitement a été confié à l'ingénieur civil, il faut intégrer ici les principaux descriptifs relatifs à leur étude, à leur dimensionnement, à leur construction, à leur montage et à leur réception, et les concrétiser selon les phases du projet.*

Il faut démontrer, en vertu du chiffre 4.4.4.5 de la norme SIA 260 (2013)^[23], que la structure porteuse et ses autres éléments de construction garantissent l'aptitude au service correspondant aux limites d'utilisation de la situation de projet «séisme». Dans les bâtiments comprenant des éléments incorporés à comportement fragile, les déplacements horizontaux par étage doivent être limités à 1/500, et pour un comportement ductile à 1/200, de la hauteur d'étage.

Dans le cas de la classe d'ouvrages CO III

Énumérer ci-après tous les **ENIE** pour lesquels il faut déterminer si:

- > ils peuvent être endommagés ou détruits par ces déplacements et si cela peut aller à l'encontre des exigences applicables à la classe d'ouvrages CO III
- > l'ingénieur civil doit en effectuer le dimensionnement et déterminer les dispositions constructives
- > des mesures constructives doivent être mises en œuvre par un autre professionnel spécialisé
- > aucune mesure particulière n'est nécessaire

*La mise en danger directe ou indirecte de personnes, l'endommagement de structures porteuses ou la perturbation de l'exploitation d'installations importantes par des **éléments non structuraux** doivent être évités (chiffre 16.7, norme SIA 261). L'architecte/directeur général et l'ingénieur civil définissent ensemble les mesures techniques de construction nécessaires pour satisfaire les prescriptions relatives aux éléments non structuraux dangereux conformément à la norme SIA 261 (chiffre 16.7).*

Pour toutes les classes d'ouvrages

Énumérer ci-après tous les **ENIE** pour lesquels il faut déterminer si:

- > ils constituent un des dangers mentionnés
- > l'ingénieur civil doit en effectuer le dimensionnement et déterminer les dispositions constructives
- > des mesures constructives doivent être mises en œuvre par un autre professionnel spécialisé
- > aucune mesure spécifique n'est nécessaire

D'autres installations et équipements font l'objet d'une sécurisation parasismique. (selon décision du propriétaire, formulaire de saisie XX).

Énumérer ci-après tous les **ENIE** pour lesquels il faut déterminer si:

- > ils doivent faire l'objet d'une sécurisation parasismique en vue de limiter les dommages
- > l'ingénieur civil doit en effectuer le dimensionnement et déterminer les dispositions constructives
- > des mesures constructives doivent être mises en œuvre par un autre professionnel spécialisé
- > aucune mesure spécifique n'est nécessaire

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 œuvre 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**.

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:	En ordre	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. 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 pertinence ou la nécessité d'un calcul détaillé de la sollicitation sismique.

L'**exemple de calcul** décrit le processus de dimensionnement parasismique des **ENIE** conformément à la norme SIA 261. 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 de la norme SIA 261 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 $\frac{\gamma_f a_{gd} S G_a}{g q_a}$ est grand lorsque l'ouvrage a une fonction d'infrastructure vitale (CO III $\rightarrow \gamma_i$), que le site présente un aléa élevé (Z3b $\Rightarrow a_{gd}$) et un terrain de fondation défavorable (BGK E $\rightarrow S$), que l'**ENIE** a une grande masse (G_a est grand) et présente un comportement défavorable en déformation (q_a petit).

Le second terme $\frac{3(1 + \frac{z_a}{h})}{1 + (1 - \frac{T_a}{T_1})^2} - 0.5$ 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 (CO I), que le site présente un aléa

faible (Z1), que le terrain de fondation est favorable (BGK A), que l'ENIE a une petite masse (G_a est petit) et possède un bon comportement en déformation (q_a grand). 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 $T_a = 0$

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

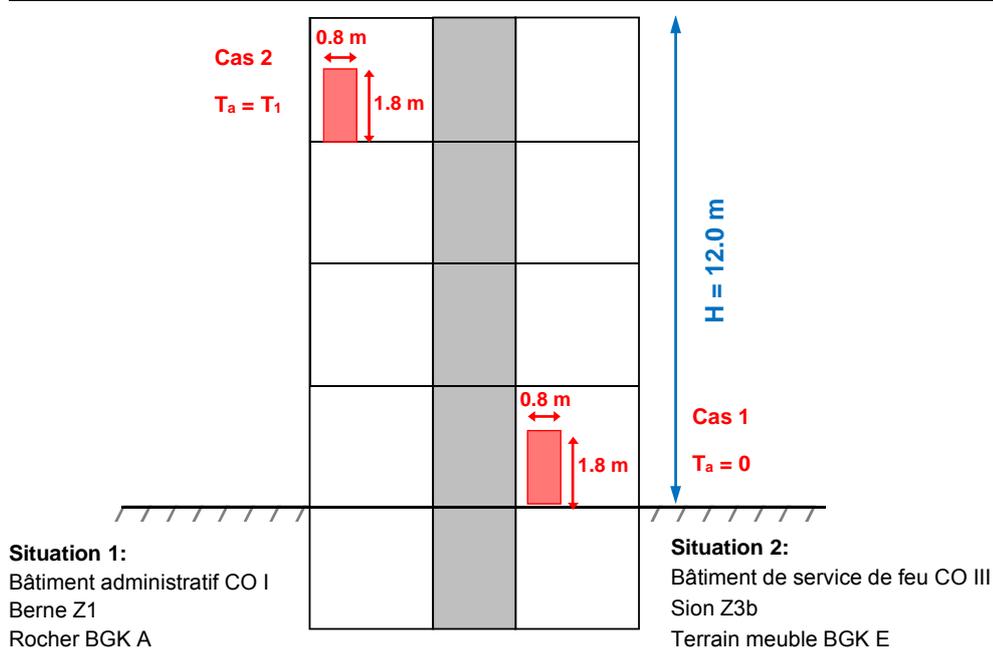
- Cas 2: valeur maximale avec ENIE placé en haut du bâtiment $z_a = h$ et résonance $T_a = T_1$

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

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 Berne sur rocher

$q_a = 1.0$, CO I avec $\gamma_f = 1.0$, Z1 avec $a_{gd} = 0.6$ et classe de terrain de fondation A avec $S = 1.0$

$$\text{Cas 1: } F_a = 1.0 \frac{1.0 \cdot 0.6 \cdot 1.0 G_a}{9.81 \cdot 1.0} = 0.06 G_a \quad \text{Cas 2: } F_a = 5.5 \frac{1.0 \cdot 0.6 \cdot 1.0 G_a}{9.81 \cdot 1.0} = 0.34 G_a$$

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

$q_a = 1.0$, CO III avec $\gamma_f = 1.4$, Z3b avec $a_{gd} = 1.6$ et classe de terrain de fondation E avec $S = 1.4$

$$\text{Cas 1: } F_a = 1.0 \frac{1.4 \cdot 1.6 \cdot 1.4 G_a}{9.81 \cdot 1.0} = 0.32 G_a \quad \text{Cas 2: } F_a = 5.5 \frac{1.4 \cdot 1.6 \cdot 1.4 G_a}{9.81 \cdot 1.0} = 1.76 G_a$$

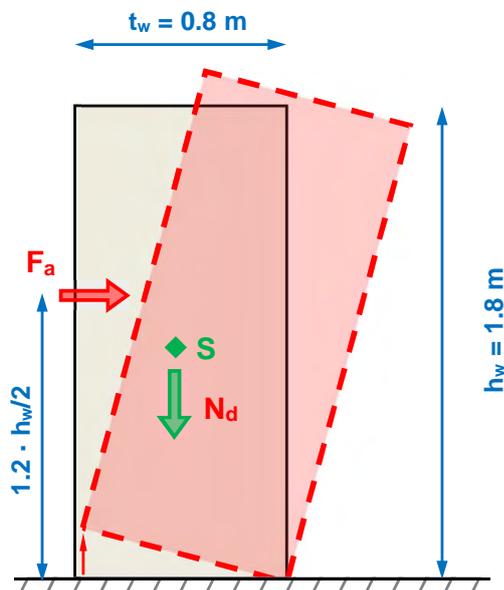
Si on regarde une armoire de commande de dimensions $h_w \times t_w \times l_w = 1,8 \text{ m} \times 0,80 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$ et d'un poids $G_a = 500 \text{ kg} = 5 \text{ kN}$ on obtient les valeurs extrêmes suivantes pour la force horizontale F_a .

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	160 kg → 1.6 kN	880 kg → 8.8 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 comparant 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

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

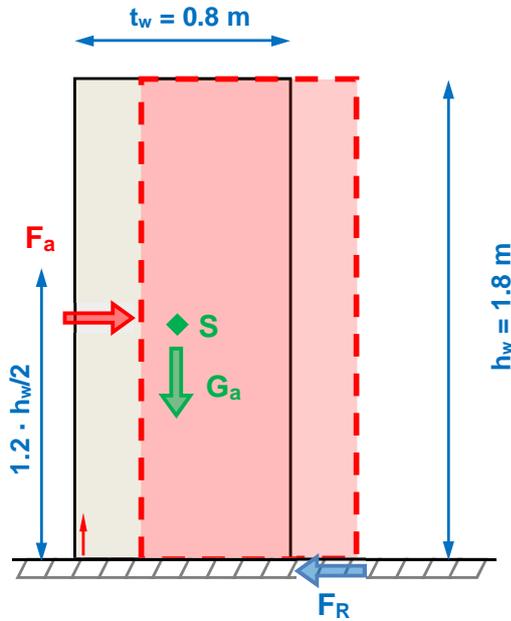
Il est recommandé, pour calculer les forces d'ancrage, d'appliquer la force horizontale légèrement au-dessus de la hauteur du centre de gravité de l'armoire. Le fait est que pendant un séisme, les éléments assimilables à des armoires effectuent un mouvement de basculement, ce qui signifie que les forces 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
	Fixation de l'armoire au renversement PAS nécessaire.	Fixation de l'armoire au renversement PAS nécessaire.
Situation 2	$F_a = 1.6 \text{ kN}$ $M_d = 1.6 \times 1.2 \times 1.8/2 = 1.73 \text{ kNm}$ $M_{Rd} = 5 \times 0.8/2 = 2 \text{ kNm}$	$F_a = 8.8 \text{ kN}$ $M_d = 8.8 \times 1.2 \times 1.8/2 = 9.5 \text{ kNm}$ $M_{Rd} = 5 \times 0.8/2 = 2 \text{ kNm}$
	$M_d/M_{Rd} = 1.73/2 = 0.86 < 1$ → Vérification remplie	$M_d/M_{Rd} = 9.5/2 = 4.75 > 1$ → Vérification non remplie
	Fixation de l'armoire au renversement PAS nécessaire.	Fixation de l'armoire au renversement nécessaire.

A5-1.2 Vérification au glissement

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 $F_R = G_a \cdot \mu$. 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 $= 0.3 \times 500\text{kg} = 150\text{kg} \rightarrow 1.5 \text{ kN}$.

Tab. A5.6 > Résultats de la vérification au glissement

	Vérification de glissement	
	Cas 1	Cas 2
Situation 1	$F_R = 1.5 \text{ kN} > F_a = 0.3 \text{ kN}$ → Vérification remplie	$F_R = 1.5 \text{ kN} < F_a = 12.7 \text{ kN}$ → Vérification non remplie
	Fixation de l'armoire au glissement PAS nécessaire.	Fixation de l'armoire au glissement PAS nécessaire.
Situation 2	$F_R = 1.5 \text{ kN} < F_a = 1.6 \text{ kN}$ → Vérification non remplie	$F_R = 1.5 \text{ kN} < F_a = 8.8 \text{ kN}$ → Vérification non remplie
	Fixation de l'armoire au glissement nécessaire.	Fixation de l'armoire au glissement nécessaire.

Rien que l'armoire de commande en bas du bâtiment administratif à Berne sur rocher ne nécessite pas une 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 peut se faire à l'aide des tables ci-après.

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

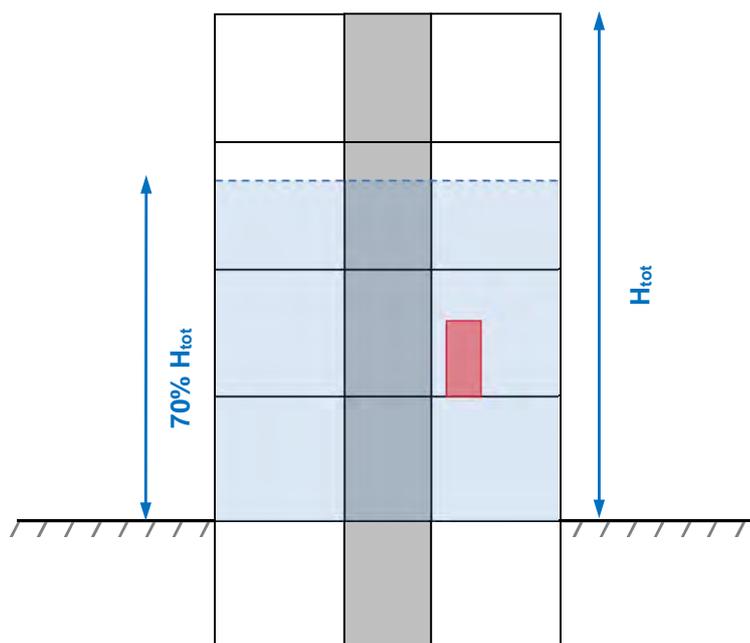
Cette catégorie comprend les éléments reliés de manière rigide à la structure porteuse. Les valeurs indiquées des accélérations peuvent être appliquées au dimensionnement des éléments proprement dits, des éléments de contreventement ou des moyens de fixation. Cela permet, par exemple, de dimensionner 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). Ces valeurs indicatives doivent être majorées d'un facteur 1,5 pour les éléments de construction stabilisés uniquement par des forces de frottement. Les valeurs s'appliquent à la CO I. Elles doivent être multipliées par le coefficient γ_f pour pouvoir être appliquées aux CO II et III.

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 $T_a = T1$ sont appliqués.

Fig. A5.7 > Explications relative aux deux tableaux



Tab. A5.8 > Valeurs indicatives de l'accélération absolue d'un élément de construction

$a_{abs, haut}$ pour $z_i > 0.7 H_{tot}$		Zone sismique			
		Z1	Z2	Z3a	Z3b
Classe de terrain de fondation	A	2.5 m/s ²	4.0 m/s ²	5.0 m/s ²	6.0 m/s ²
	B	3.0 m/s ²	4.5 m/s ²	6.0 m/s ²	7.0 m/s ²
	C	2.5 m/s ²	4.5 m/s ²	5.5 m/s ²	7.0 m/s ²
	D	3.0 m/s ²	5.0 m/s ²	6.5 m/s ²	8.0 m/s ²
	E	3.0 m/s ²	5.5 m/s ²	7.0 m/s ²	8.5 m/s ²

Les valeurs indicatives de 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

$a_{abs, haut}$ pour $z_i < 0.7 H_{tot}$		Zone sismique			
		Z1	Z2	Z3a	Z3b
Classe de terrain de fondation	A	2.0 m/s ²	3.0 m/s ²	4.0 m/s ²	5.0 m/s ²
	B	2.5 m/s ²	4.0 m/s ²	5.0 m/s ²	6.0 m/s ²
	C	2.5 m/s ²	3.5 m/s ²	4.5 m/s ²	6.0 m/s ²
	D	2.5 m/s ²	4.5 m/s ²	5.5 m/s ²	7.0 m/s ²
	E	2.5 m/s ²	4.5 m/s ²	5.5 m/s ²	7.0 m/s ²

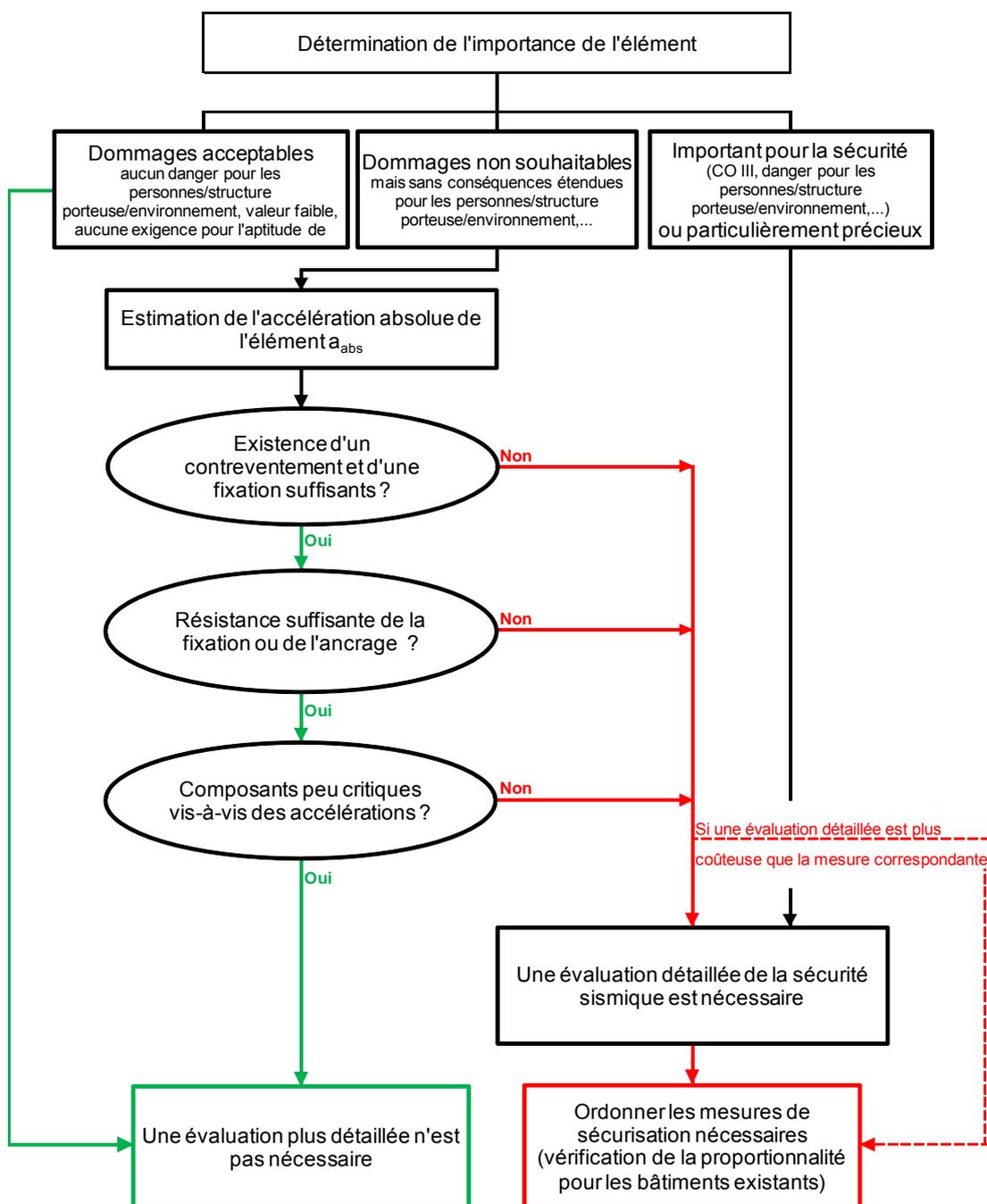
A5-2.2 Exemple armoire de commande:

- > Poids total $G_a = 5 \text{ kN} \rightarrow 500 \text{ kg}$, zone d'aléa sismique Z1, terrain de fondation de la classe A, en haut du bâtiment
- > Selon Fig. A5.7: Dommages non souhaitables
- > Du tableau A5.9: accélération absolue de l'élément $a_{abs, bas} = 2,5 \text{ m/s}^2$
- > Force horizontale à appliquer $F_a = 125 \text{ kg} \rightarrow 1,25 \text{ kN}$
- > 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.

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 δ

Le Tableau A5.12 donne des valeurs indicatives de la déformation maximale entre niveaux δ 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

δ		Zone sismique			
		Z1	Z2	Z3a	Z3b
Classe de terrain de fondation	A	0.4 %	0.6 %	0.8 %	0.9 %
	B	0.5 %	0.9 %	1.1 %	1.4 %
	C	0.6 %	1.0 %	1.3 %	1.6 %
	D	1.0 %	1.6 %	2.1 %	2.5 %
	E	0.6 %	1.0 %	1.3 %	1.6 %

Le déplacement relatif maximal entre étages $\Delta_{rel, \acute{e}tage}$ est le produit de la déformation δ et de la hauteur d'étage H_i .

$$\Delta_{rel, \acute{e}tage} = \delta \cdot H_i$$

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 Δ_{rel} :

Tab. A5.12 > Déplacement relatif entre étages pour une hauteur d'étage $H_i = 3,0$ m

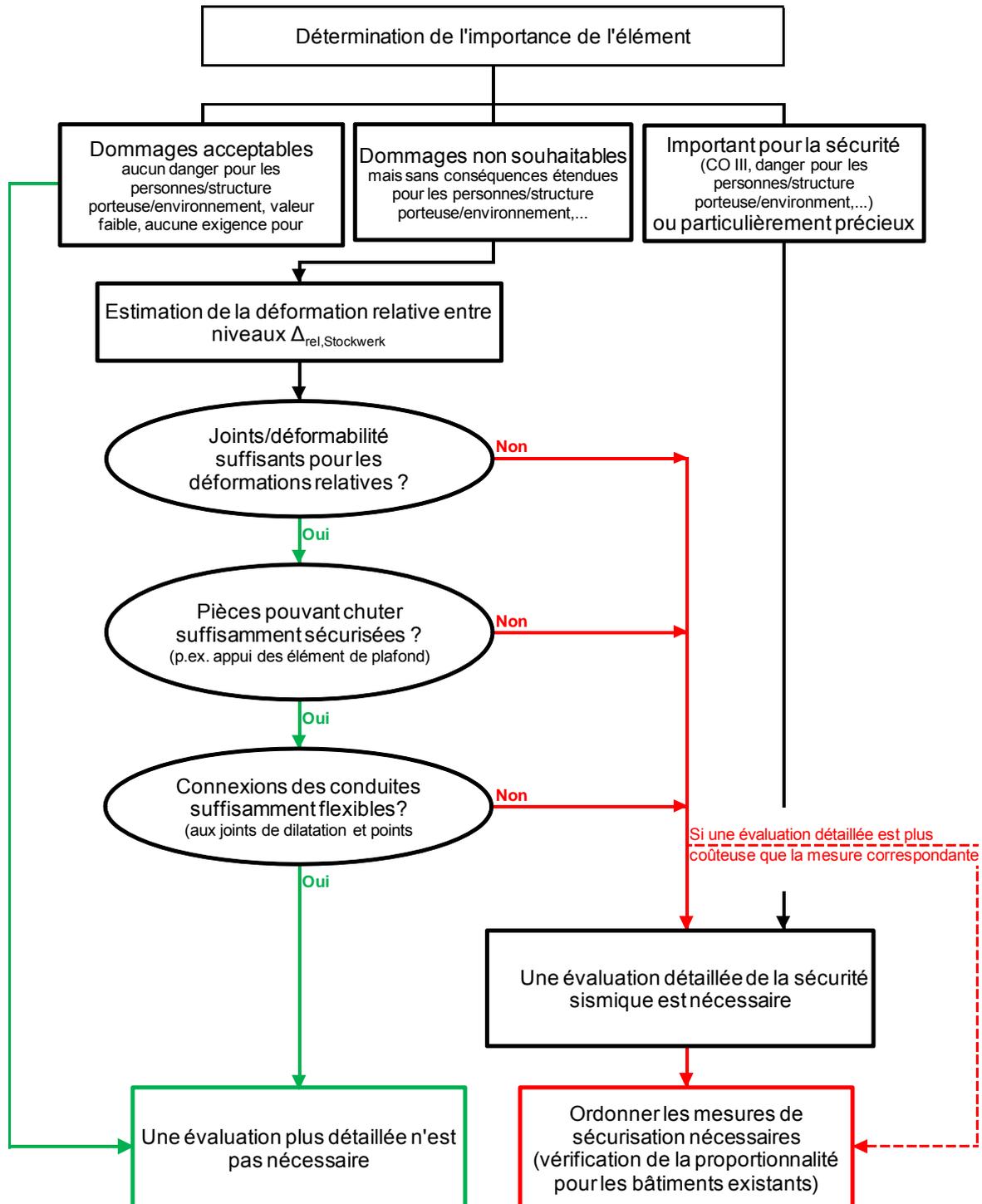
$\Delta_{rel, \text{étage}}$		Zone sismique			
		Z1	Z2	Z3a	Z3b
Classe de terrain de fondation	A	12 mm	18 mm	24 mm	27 mm
	B	15 mm	27 mm	33 mm	42 mm
	C	18 mm	30 mm	39 mm	48 mm
	D	30 mm	48 mm	63 mm	75 mm
	E	18 mm	30 mm	39 mm	48 mm

A5-3.2 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 Fig. A5.11: dommages non souhaitables
- > Du tableau A5.13: déplacement relatif entre niveaux $\Delta_{rel, \text{étage}} = 27$ 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
 2.3 - Planchers surélevés
 2.4 - Parois, remplissages
 2.5 - Systèmes de façades, doublages
 2.6 - Parapets (et balustrades)
 2.7 - Escaliers
 2.8 - Vitrages, portes, fenêtres
 2.18 - Conduites, gaines de ventilation, canaux de câbles
 2.19 - Ascenseurs



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 Estimation du déplacement d'un élément de construction relativement à son point de fixation

$\Delta_{rel,élément}$

Les tableaux ci-après donnent des valeurs indicatives du déplacement d'un élément de construction relativement à son point de fixation $\Delta_{rel,élément}$ 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 CO I. Elles doivent être multipliées par le coefficient γ_f pour pouvoir être appliquées aux CO 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 $\Delta_{rel,élément}$ 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 A5.12.

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

$\Delta_{rel,élément,haut}$		Zone sismique			
		Z1	Z2	Z3a	Z3b
pour $z_i > 0.7 H_{tot}$					
Classe de terrain de fondation	A	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm
	B	15 cm	25 cm	30 cm	40 cm
	C	20 cm	30 cm	35 cm	45 cm
	D	25 cm	45 cm	55 cm	70 cm
	E	20 cm	30 cm	35 cm	45 cm

Les valeurs indicatives $\Delta_{rel,élément}$ 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 A5.1.

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

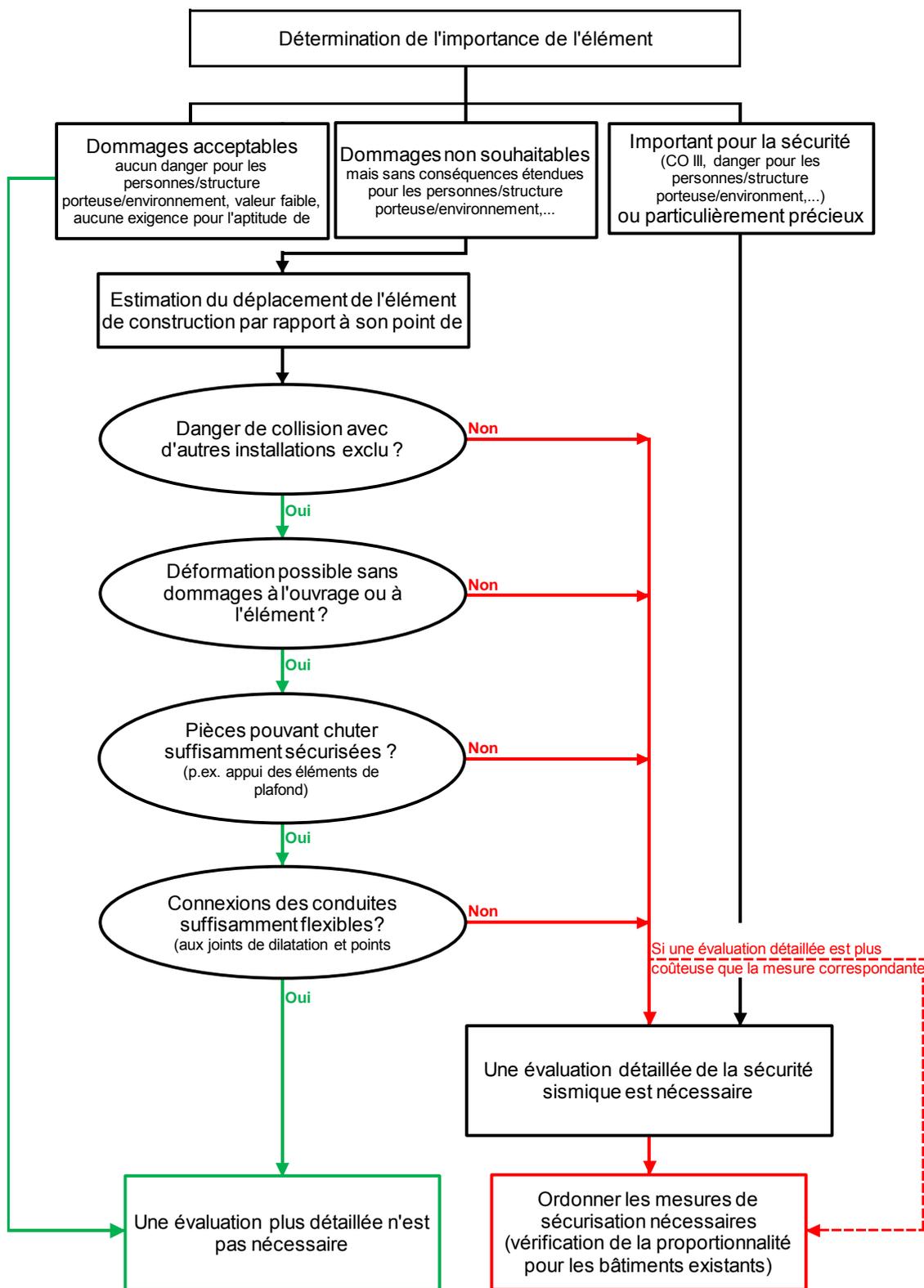
$\Delta_{rel,élément,bas}$ pour $z_i < 0.7 H_{tot}$		Zone sismique			
		Z1	Z2	Z3a	Z3b
Classe de terrain de fondation	A	7 cm	12 cm	15 cm	20 cm
	B	10 cm	20 cm	25 cm	30 cm
	C	15 cm	20 cm	30 cm	35 cm
	D	20 cm	35 cm	45 cm	55 cm
	E	15 cm	20 cm	30 cm	35 cm

A5-4.2 Exemple conduite:

- > Située dans la partie supérieure d'un ouvrage, zone sismique Z3a, terrain de fondation de la classe D
- > Selon Fig. A5.14: dommages non souhaitables
- > Du tableau A5.15: déplacement de l'élément relativement à son point de fixation
 $\Delta_{rel,élément} = 55 \text{ cm}$
- > 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
 2.15 - 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. OFEV (anc. OFEG Office fédérale des eaux et de la géologie). www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00799/index.html?lang=fr
- [3] Bachmann H., Dazio A. 2002: D 0171 Erdbebengerechter Entwurf und Kapazitätsbemessung eines Gebäudes mit Stahlbetontragwänden. SIA/SGEB. www.sqeb.ch/fachpublikationen/D0171/SIA_D0171.pdf
- [4] Baudyn 2010: Sécurité des bâtiments – questions juridiques et responsabilités. Dépliant 3. Fondation pour la dynamique des structures et le génie parasismique. www.baudyn.ch/fr/publikationen/audyn-infomaterial
- [5] California Division of the State Architect (Dept. of General Services) 2003: Safer Schools. Guide and Checklist for Nonstructural Earthquake Hazards in California Schools. [www.caloes.ca.gov/PlanningPreparednessSite/Documents/Nonstructural EQ Hazards For Schools July2011.pdf](http://www.caloes.ca.gov/PlanningPreparednessSite/Documents/Nonstructural_EQ_Hazards_For_Schools_July2011.pdf)
- [6] Dazio A. et al 2009: Erdbeben in L'Aquila, Italien 6. April 2009. Bericht der SGEB-Erkundungsmission. SGEB. www.sqeb.ch/erkundungsmissionen/Aquila.pdf
- [7] ESTI Directive Nr. 248 2015: Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse. Inspection fédérale des installations à courant fort ESTI. www.esti.admin.ch/de/dokumentation/publikationen.htm
- [8] FEMA E74 2012: Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage – A practical Guide. Federal Emergency Management Agency. www.fema.gov/earthquake-publications/fema-e-74-reducing-risks-nonstructural-earthquake-damage
- [9] FEMA 413 2004: Installing Seismic Restraints for Electrical Equipment. Federal Emergency Management Agency. www.fema.gov/media-library/assets/documents/843
- [10] FEMA 414 2004: Installing Seismic Restraints for Duct and Pipe. Federal Emergency Management Agency. www.fema.gov/media-library-data/20130726-1445-20490-3498/fema_p_414_web.pdf
- [11] FEMA 460 2005: Seismic Considerations for Steel Storage Racks Located in Areas Accessible to the Public. Federal Emergency Management Agency. www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=1439
- [12] Filiatrault A. et al. 2002: Guidelines, Specifications and Seismic Performance Characterization of Nonstructural Building Components and Equipment. www.peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2002/O205.pdf
- [13] HILTI 2003: Richtlinie für die erdbebensichere Ausführung von nicht-tragenden Bauteilen und Installationen.
- [14] Holmes W. 2010: Darfield Earthquake of September 4, 2010 – Nonstructural Damage. Earthquake Engineering Research Institute. www.peer.berkeley.edu/events/2010/nz_eq_briefing/Holmes.pdf
- [15] Massey W., Megget L. 2007: Architectural Design for Earthquake. New Zealand Society for Earthquake Engineering. www.nzsee.org.nz/db/PUBS/ADE2007.pdf
- [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. www.eqclearinghouse.org/20100227-chile/wp-content/uploads/2010/04/Miranda-Mosqueda-Pekcan-Nonstructural-Brief-report.pdf
- [17] Paulay T., Priestley M.J.N. 1992: Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. John Wiley & Sons, New York.
- [18] SIA102 2014: Règlement concernant les prestations et honoraires des architectes. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.
- [19] SIA103 2014: Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs et ingénieures civils. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.
- [20] SIA 108 2014: Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs et ingénieures 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 2003: Norme SIA 260: Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich.
- [24] SIA 261 2014: 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 2018 2004: Cahier technique SIA 2018: Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants. 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. www.sgeb.ch/fachpublikationen/SIA_D0227f_IV.pdf
- [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 www.eeri.org/wp-content/uploads/1-2012-%20NEC%20memphis%20asce%20cdrm%20YW%20ECW.pdf
- [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. www.bafu.admin.ch/publi-kationen/publi-kation/01013/index.html?lang=fr
- [33] FEMA 412 2002: Installing Seismic Restraints for Mechanical Equipment. Federal Emergency Management Agency. www.fema.gov/library/viewRecord.do?action=back&id=1557
- [34] Quake Hold Industrial Inc. www.quakeholdindustrial.com/earthquake-preparedness-what-causes-earthquakes-index.html
- [35] LPE 1983: Loi fédérale sur la protection de l'environnement www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19830267/index.html
- [36] OPAM 1991: Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19910033/index.html
- [37] LEaux 1991: Loi fédérale sur la protection des eaux www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19910022/index.html
- [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 www.bafu.admin.ch/natur-gefahren/14806/14964/14969/index.html?lang=fr
- [41] SIA 370.077 2013: Sicherheitsregeln für Konstruktion und Einbau von Aufzügen – Besondere Anwendungen für Personen- und Lastenaufzüge – Teil 77: Aufzüge unter Erdbebenbedingungen

> 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

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, 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

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. (SIA 112_2014).

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.

Instabilité de 2^e 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

Mesure pour améliorer la sécurité sismique et réduire le risque sismique.

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

BGK

Classe de terrain de fondation selon SIA 261

CO

Classe d'ouvrage selon SIA 261

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 semi-trempé

VSG

Verre de sécurité feuilleté

Crédits photographiques

Chapitre 1

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 Duverney)

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

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

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

Fig. 1.9 en haut à droite:
www.slowtrav.com/blog/palma/2012/06/being_in_italy_during_the_art.html

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: 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: Seismic Bracing of Non-Structural Components by Paul W. McMullin, SE, PhD Seismic Bracing of Non-Structural Components November 17, 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: ^[7] Figure 6.3.4.2–2

Fig. 2.11.1: ^[40] 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.quakeholdindustrial.com ou www.sosproducts.com, Fig. 2.21.5: Source Internet www.quakeholdindustrial.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.