

Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants Concept et directive pour l'étape 3

Richtlinien des BWG – Directives de l'OFEG – Dirretive dell'UFAEG
Berne, 2005

Première édition



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

Avant propos

Selon la décision du Conseil fédéral du 11 décembre 2000, tous les projets de transformation et d'assainissement de la Confédération ou subventionnés par elle, ainsi que tous les bâtiments existants de classe d'ouvrage II et III propriété de la Confédération doivent être vérifiés concernant leur sécurité parasismique. En présence de lacunes essentielles, ces ouvrages doivent être renforcés en tenant compte de la proportionnalité des coûts.

Les coûts de protection parasismique pouvant s'élever, selon l'objet, entre 2% et 10% (voire 20%) de la valeur de l'ouvrage, il est nécessaire de disposer d'une procédure définissant des priorités pour répartir les interventions de protection parasismique sur plusieurs décennies.

Sur l'initiative et avec la concertation de l'OFEG, la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes (SIA) a publié en novembre 2004 le cahier technique SIA 2018 « Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants », qui définit la sécurité parasismique acceptable pour les bâtiments existants en considérant leur durée d'utilisation restante. Cette publication contient entre autres des calculs d'exigibilité et de proportionnalité des coûts d'intervention en fonction de coûts de sauvetage de la vie humaine. Le cahier technique SIA 2018 sert de référence pour le contrôle de la sécurité parasismique des projets de transformation et d'assainissement de la Confédération, ainsi que pour la troisième étape de l'inventaire de la sécurité parasismique des bâtiments existants de classe d'ouvrage II et III de la Confédération.

L'Office fédéral des eaux et de la géologie remercie la SIA pour son accord quant à la reproduction, en tant que partie de ce document, du cahier technique SIA 2018 ainsi que d'extraits de la documentation SIA D0211 „Introduction au cahier technique SIA 2018“.

Bienne, mars 2005

Blaise Duvernay

Centrale de coordination de la Confédération pour la mitigation des séismes.

Impressum

Editeur : Office fédéral des eaux et de la géologie, OFEG

Tirage: Format PDF, à disposition sur le site Internet de l'OFEG
<http://www.bwg.admin.ch/themen/natur/f/index.htm>

Source: Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants
à mentionner : Concept et directive pour l'étape 3 (1^{ère} édition),
Directives de l'OFEG (2005)

Copyright: Directives OFEG: © OFEG, Bienne, 2005
Cahier technique SIA 2018: © SIA Zürich, 2004
Extraits de la documentation SIA D 0211: © SIA Zürich, 2005

Table des matières

1. Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants de la Confédération	1
2. Le cahier technique SIA 2018 en bref	3
3. Limite des investissements pour la sécurité selon le cahier technique SIA 2018	9
4. Liste bibliographique	15

Annexes

Cahier technique SIA 2018, Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants	A1-A40
Extrait de la documentation SIA D 0211 : Proportionnalité et exigibilité	B1-B10

1. Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants de la Confédération

Selon la décision du Conseil fédéral du 11 décembre 2000, les postes responsables de l'administration fédérale sont chargés de vérifier la sécurité parasismique de tous les bâtiments de classe d'ouvrage II et III de la Confédération, ainsi que de tous les projets d'assainissement ou de transformation d'ouvrages ou d'installations de la Confédération. En présence de lacunes essentielles, ces ouvrages doivent être renforcés en tenant compte de la proportionnalité des coûts. L'Office fédéral des eaux et de la géologie a pour ce faire développé et appliqué un concept de procédure en trois étapes.

Pour l'inventaire de la sécurité parasismique des bâtiments existants de classe d'ouvrage II et III, les trois étapes sont à appliquer successivement. Pour la vérification de projets de transformation et d'assainissement, l'étape 3 doit être appliquée directement.

- Lors de l'**étape 1**, les caractéristiques importantes du bâtiment sont relevées à l'aide de plans d'architecte et d'une éventuelle visite. Le risque sismique est ensuite établi de manière grossière sur la base d'une check-list (**env. 4 heures par bâtiment**).

L'estimation du risque ne nécessite pas de calculs détaillés, mais ne délivre également pas une appréciation absolue. Les priorités pour une analyse plus détaillée sont définies sur la base d'un indice de risque et d'un indice de probabilité d'effondrement.

- Lors de l'**étape 2**, les défauts des ouvrages avec un potentiel de risque élevé doivent être analysés de manière plus détaillée à l'aide de questionnaires et de calculs d'ingénieur simples (**env. 3 à 5 jours par bâtiment**).

Des questionnaires sont à disposition pour la plupart des types structuraux présents en Suisse. La procédure étant relativement simple, elle est fondamentalement conservatrice en comparaison avec l'étape 3. Pour l'évaluation numérique de la sécurité structurale, le principe du facteur de conformité selon le cahier technique SIA 2018 doit être (si possible) suivi. Les priorités pour une étude détaillée de la sécurité parasismique et du projet de renforcement éventuel sont définies sur la base de l'importance des défauts et du niveau du facteur de conformité.

- Lors de l'**étape 3**, une réponse définitive concernant la sécurité parasismique doit être fournie sur la base de méthodes avancées. Si nécessaire, des propositions de mesures doivent être développées (**une semaine ou plus par bâtiment**).

Le cahier technique SIA 2018 (2004) „Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants » sert de base pour l'étape 3. Il donne des indications, sur la base d'un facteur de conformité α_{eff} (rapport entre la résistance et les actions selon les normes) et de critères d'efficacité des mesures, pour savoir si un bâtiment doit être renforcé ou si son état actuel peut être accepté.

Pour l'appréciation de la sécurité des bâtiments, deux domaines principaux sont distingués. Un domaine où le niveau de sécurité des personnes est jugé inacceptable (déficit de sécurité) et un domaine où le niveau de sécurité des personnes est jugé acceptable.

Pour le domaine où la **sécurité des personnes** est jugée **inacceptable**, des mesures d'intervention doivent être mises en place. Le coût des mesures est toutefois limité par le **critère de l'exigibilité** (coût de sauvetage inférieur à 100 mio de francs par vie humaine sauvée). Si aucune mesure exigible n'est possible, le risque doit être réduit par des mesures organisationnelles (limitation de l'occupation). Si celles-ci sont impossibles, l'état actuel peut être accepté.

Pour le domaine où la **sécurité des personnes** est jugée **acceptable**, des mesures d'intervention ne doivent être mises en place que si elles respectent le critère de proportionnalité (coût de sauvetage inférieur à 10 mio de francs par vie humaine sauvée). Si aucune mesure proportionnée n'est possible, l'état actuel peut être accepté.

Les directives des 3 étapes de la procédure sont téléchargeables gratuitement sur le site Internet de l'OFEG (<http://www.bwg.admin.ch/themen/natur/f/index.htm>).

La figure 1 présente la procédure pour la vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants de classe d'ouvrage II ou III de la Confédération. Les ouvrages de classe d'ouvrage III doivent dans tous les cas être analysés jusqu'à l'étape 3.

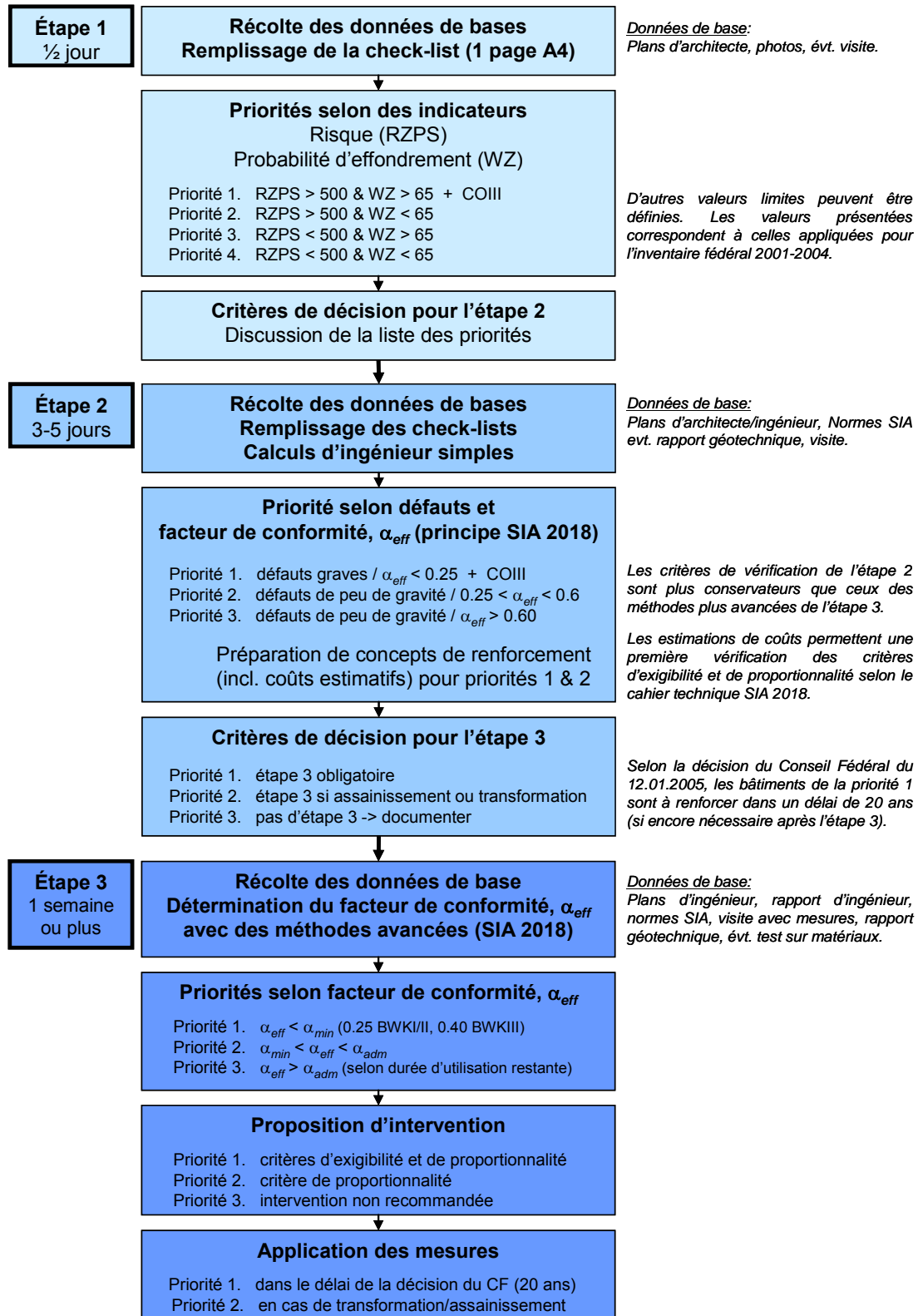


Figure 1 : Explication schématique de la procédure en trois étapes pour la vérification de la sécurité parasismique des bâtiments de la Confédération de classe d'ouvrage II et III.

2. Le cahier technique SIA 2018 en bref

Remarque préliminaire: le contenu des chapitres 2.1 à 2.5 et la figure 2 sont repris de l'article „Introduction, principes de base et recommandations d'intervention“ (auteur Prof. Thomas Vogel) de la documentation SIA D 0211 « Introduction au cahier technique SIA 2018 ».

La figure 2 présente la procédure générale pour une vérification de la sécurité parasismique selon le cahier technique SIA 2018.

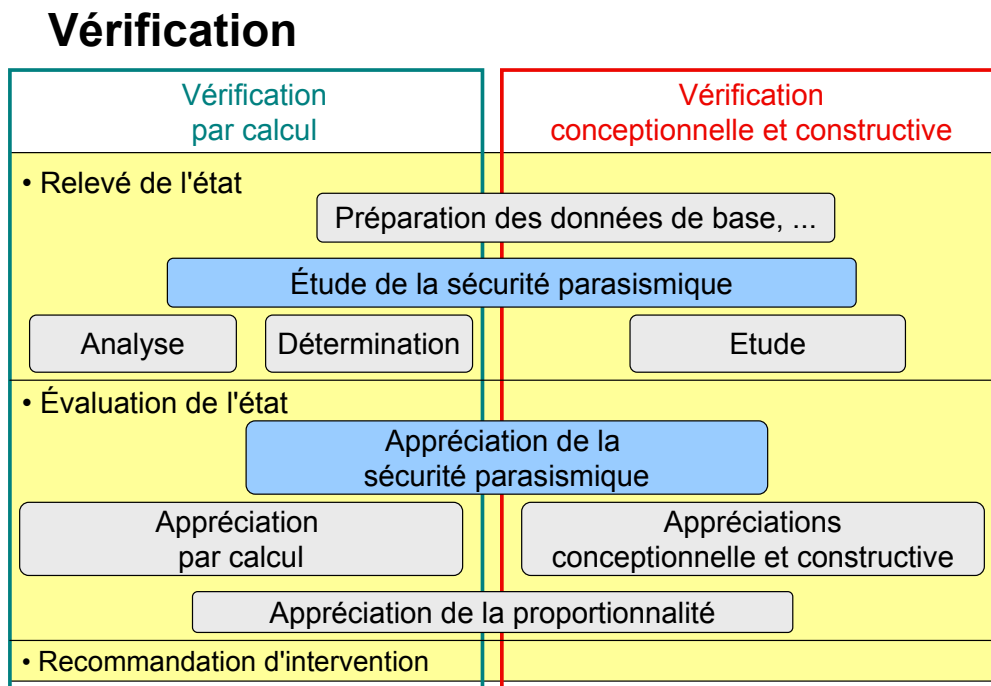


Figure 2: Concept de la vérification de la sécurité parasismique selon le cahier technique SIA 2018.

2.1 Appréciation de l'état

Pour l'appréciation de l'état, les principes et les procédures, ainsi que les actions et les résistances sont les mêmes que dans le cadre de projets de nouveaux ouvrages.

Les expressions de *dimensionnement* et de *vérification* sont volontairement évitées. Les activités correspondantes seront nommées *détermination* des actions, de la capacité portante, du comportement au service, etc., lorsqu'il s'agit d'aspects de calcul, et respectivement d'*analyse* lorsqu'il s'agit d'aspects qualitatifs.

2.2 Méthodes basées sur les forces et sur les déformations

Les normes de structures SIA 260 à 267 comportent la méthode basée sur les forces, qui consiste en une opposition des effets des actions aux efforts intérieurs et aux résistances. Le cahier technique approfondi, précise et modifie cette méthode partout où une divergence entre les activités de contrôle par rapport aux activités de projet le justifie.

La capacité de déformation d'une structure porteuse y est classée en deux catégories: comportement *ductile* et *non ductile*. Pour chaque catégorie, des exigences constructives dépendant du matériau de construction sont définies et conduisent à des coefficients de comportement η différenciés. Cette classification, qui se fait au moyen de critères simples, est par conséquent grossière et comporte des réserves cachées.

Pour les ouvrages existants, il peut s'avérer profitable de mobiliser ces réserves, moyennant des procédures de calcul plus longues. C'est la raison pour laquelle le cahier technique comporte la méthode basée sur les déformations. Dans ce cadre, les déplacements engendrés par un séisme (déplacements cibles) sont opposés à la capacité de déformation à disposition.

Pour les ouvrages en béton, la méthode basée sur les déformations est suffisamment développée de sorte à ce qu'elle puisse être une alternative pour les personnes ayant les connaissances suffisantes. Pour les autres matériaux de construction, des informations complémentaires sont nécessaires, telles que celles contenues dans les projets de l'Eurocode 8.

2.3 Facteur de conformité

Un terme central du cahier technique est le facteur de conformité α_{eff} . Il décrit dans quelle mesure une structure porteuse existante remplit les exigences par le calcul imposées aux nouveaux bâtiments selon la norme en vigueur.

Pour l'appréciation numérique de la sécurité structurale, en utilisant la méthode basée sur les forces, le rapport entre la valeur de calcul de la résistance ultime R_d et l'effet des actions correspondant E_d est établi (1). Dans le cas de la méthode basée sur les déformations, la capacité de déplacement $w_{R,d}$ est divisée par le déplacement cible w_d selon (2).

$$\alpha_{eff} = \frac{R_d}{E_d} \quad (1)$$

$$\alpha_{eff} = \frac{w_{R,d}}{w_d} \quad (2)$$

Pour les ouvrages de classe d'ouvrages III, pour lesquels l'aptitude au service doit aussi être vérifiée, le facteur de conformité est déterminé selon (3). Dans ce cadre, C_d représente la valeur de calcul de dimensionnement d'une limite de service (par ex. un déplacement horizontal), et la détermination du déplacement w_d se fait en prenant la moitié de la valeur de calcul de dimensionnement de l'effet du séisme A_d , comme fixé dans la norme SIA 260 (2003) au chiffre 4.4.4.5.

De même, pour de simples vérifications de dispositions conceptionnelles ou constructives, le facteur de conformité peut être défini au moyen de (4), où A_R correspond à l'action sismique provoquant la défaillance de l'élément de construction considéré, suite au défaut constaté.

$$\alpha_{eff} = \frac{C_d}{w_d(0,5 \cdot A_d)} \quad (3)$$

$$\alpha_{eff} = \frac{A_R}{A_d} \quad (4)$$

2.4 La vérification de la sécurité parasismique par le calcul

Afin que le risque individuel soit suffisamment faible, $\alpha_{eff} \geq \alpha_{min}$ doit être rempli. Dans le cas contraire, des mesures s'imposent. Le facteur de réduction minimal vaut $\alpha_{min} = 0,25$ pour les bâtiments des classes d'ouvrages I et II et $\alpha_{min} = 0,40$ pour les bâtiments de classe d'ouvrage III, de sorte à ce qu'implicitement des exigences minimales quant à la disponibilité des ouvrages et installations vitales soient garanties.

Pour $\alpha_{min} < \alpha_{eff} < 1,0$, la proportionnalité des mesures envisagées doit être justifiée. Pour de courtes durées d'utilisation restante et un facteur de conformité proche de 1,0, le critère de proportionnalité ne peut pratiquement jamais être rempli. C'est la raison pour laquelle le facteur de réduction admissible α_{adm} a été défini comme deuxième seuil, limitant le domaine pour lequel la proportionnalité ne peut en règle général pas être atteinte et où la vérification n'est donc pas demandée (voir figure 3).

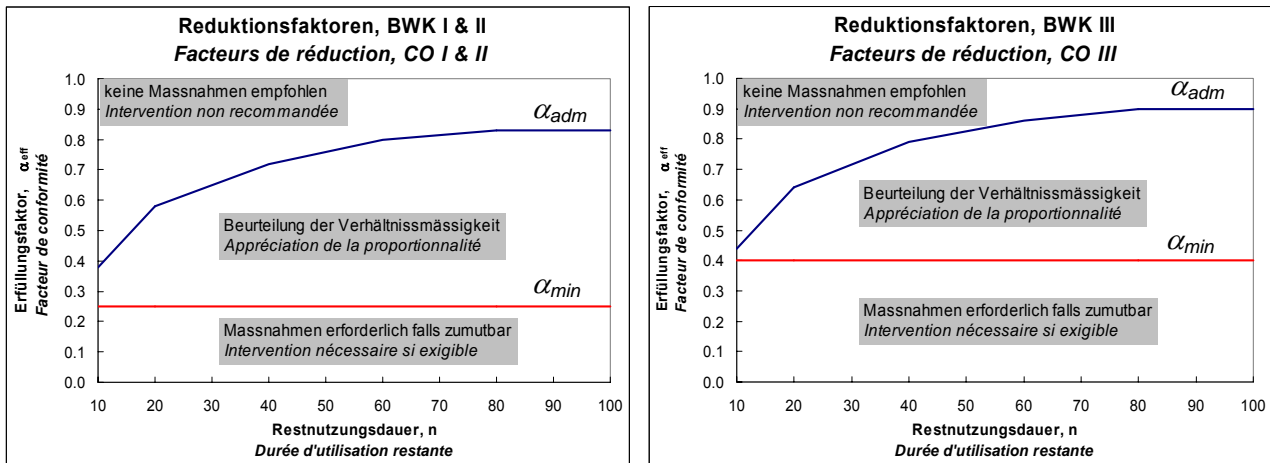


Figure 3: Domaines pour α_{eff} en fonction des valeurs limites α_{min} et α_{adm} en fonction de la durée d'utilisation restante n .

2.5 Efficacité des mesures d'intervention

L'efficacité d'une mesure de protection parasismique est exprimée par ses coûts de sauvetage RK_M . Ceux-ci correspondent au montant statistiquement dépensé pour sauver une vie humaine des conséquences d'un séisme (chapitre 10 du cahier technique SIA 2018).

Des coûts de sauvetage bas signifient que la mesure d'intervention est efficace et qu'elle doit par conséquent être prise. Des coûts élevés signifient par contre que la mesure n'est pas proportionnelle et que l'argent devrait être investi différemment ou ailleurs pour d'autres mesures de sécurité plus efficaces.

Les coûts de sauvetage sont élevés,

- si les mesures d'intervention envisagées sont chères et si elles sont imputables entièrement à la sécurité parasismique,
- si le gain en sécurité est faible,
- si la mesure d'intervention ne profite qu'à peu de personnes,
- si les montants investis pour l'intervention doivent être amortis dans un laps de temps court.

Par contre, les coûts de sauvetage sont bas,

- si certains montants associés aux mesures d'intervention peuvent être imputés à d'autres postes tel que par exemple dans le cadre d'un assainissement ou d'une transformation,
- si l'occupation en personnes du bâtiment est grande,
- si la durée d'utilisation restante fixée est longue.

Une mesure de protection parasismique est définie comme **proportionnée** lorsque les coûts de sauvetage RK_M sont inférieurs à **10 mio de francs par vie humaine sauvée**.

Une mesure de protection parasismique est définie comme **exigible** lorsque les coûts de sauvetage RK_M sont inférieurs à **100 mio de francs par vie humaine sauvée**.

2.6 Recommandations d'intervention

La base pour la recommandation d'intervention est donnée par la figure 3. Le facteur de conformité atteint après une intervention visant à améliorer la sécurité parasismique α_{int} est tout d'abord introduit. Les recommandations d'intervention sont ensuite discutées en détail pour les deux cas suivants :

2.6.1 $\alpha_{min} \leq \alpha_{eff} < \alpha_{adm}$ (intervention nécessaire si proportionnée)

L'atteinte d'un état répondant aux exigences des normes implique $\alpha_{int} \geq 1,0$, et pour un état qui s'approche des exigences des normes $\alpha_{int} < 1,0$.

En principe, l'état répondant aux exigences des normes de structures pour les nouveaux bâtiments SIA 260 à 266 doit être fixé comme objectif. Lorsque la proportionnalité des mesures visant à atteindre ce niveau est vérifiée, celles-ci doivent être implémentées.

Si $\alpha_{int} = 1,0$ n'est pas atteint, on parle de mesures partielles. Celles-ci visent en priorité à éliminer les défauts de conception et les défauts constructifs ainsi qu'au réhaussement du facteur de conformité le plus faible α_{eff} .

Si, en tenant compte de la proportionnalité, l'atteinte d'un état répondant aux exigences des normes n'est pas faisable, les mesures partielles qui sont encore proportionnelles doivent être implémentées (voir aussi figure 4).

2.6.2 $\alpha_{eff} < \alpha_{min}$ (intervention nécessaire si exigible)

Le critère d'exigibilité n'est valable que pour le domaine $\alpha_{int} \leq \alpha_{min}$. Si $\alpha_{int} = \alpha_{min}$ peut être atteint avec des mesures d'intervention exigibles, les mesures supplémentaires pour le domaine $\alpha_{int} > \alpha_{min}$ doivent être étudiées en respectant le critère de proportionnalité (voir aussi figure 5).

Si un niveau de risque individuel acceptable ne peut pas être atteint à l'aide de mesures exigibles, le risque aux personnes doit être réduit à l'aide de mesures organisationnelles qui réduisent le nombre de personnes exposées et/ou leur temps d'exposition au risque. Cela peut aussi signifier, par exemple, qu'une occupation de courte durée ne doit pas dépasser un certain nombre de personnes.

2.6.3 Exemples fictifs

Les figures 4 et 5 contiennent des valeurs pour des situations fictives d'amélioration de la sécurité parasismique. Avec le facteur de conformité α_{eff} , la durée d'utilisation restante n , l'occupation moyenne en personnes PB ainsi que les coûts des variantes d'intervention, le problème est suffisamment défini.

Chaque mesure pour l'amélioration de la sécurité parasismique contient une part importante de coûts fixes. En comparaison, les coûts variables, qui sont dépendants des actions et donc du niveau de facteur de conformité à atteindre α_{int} , sont faibles. À un certain niveau, le potentiel d'amélioration d'une mesure arrive à sa fin, en règle générale lorsqu'un élément de construction qui n'était jusqu'alors pas touché devient déterminant. Comme le montrent les figures 4 et 5, les montants investis pour l'amélioration de la sécurité ne progressent pas de manière continue mais par paliers.

Dans la figure 4, α_{eff} a une valeur fixée supérieure à α_{min} (voir chapitre 2.6.1). La courbe en trait fin représente les coûts limites d'intervention pour le critère de proportionnalité. La courbe en trait gras représente le profil d'investissement pour les variantes d'intervention. Dans ce cas, l'intervention pour $\alpha_{int} = 1,0$ n'est pas proportionnée (investissements au-dessus de la limite de proportionnalité). La limite de proportionnalité est atteinte pour $\alpha_{int} = 0,85$. L'investissement optimal pour ce cas est donc la variante d'intervention 2 jusqu'à $\alpha_{int} = 0,85$.

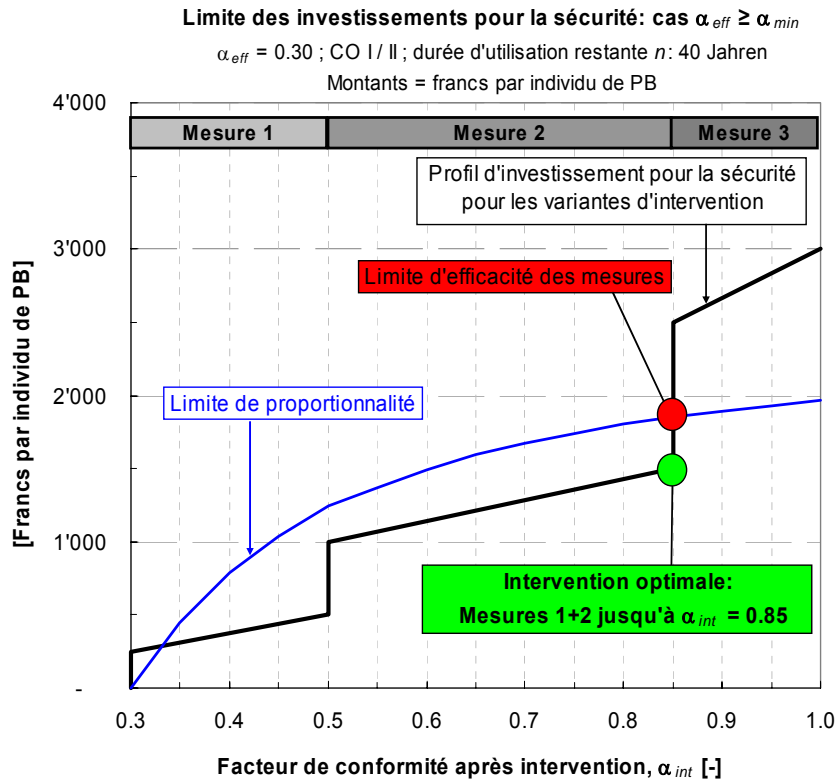


Figure 4: Exemple fictif pour la détermination de l'intervention optimale avec $\alpha_{eff} \geq \alpha_{min}$. Tous les coûts de protection sont normés par rapport à l'occupation moyenne.

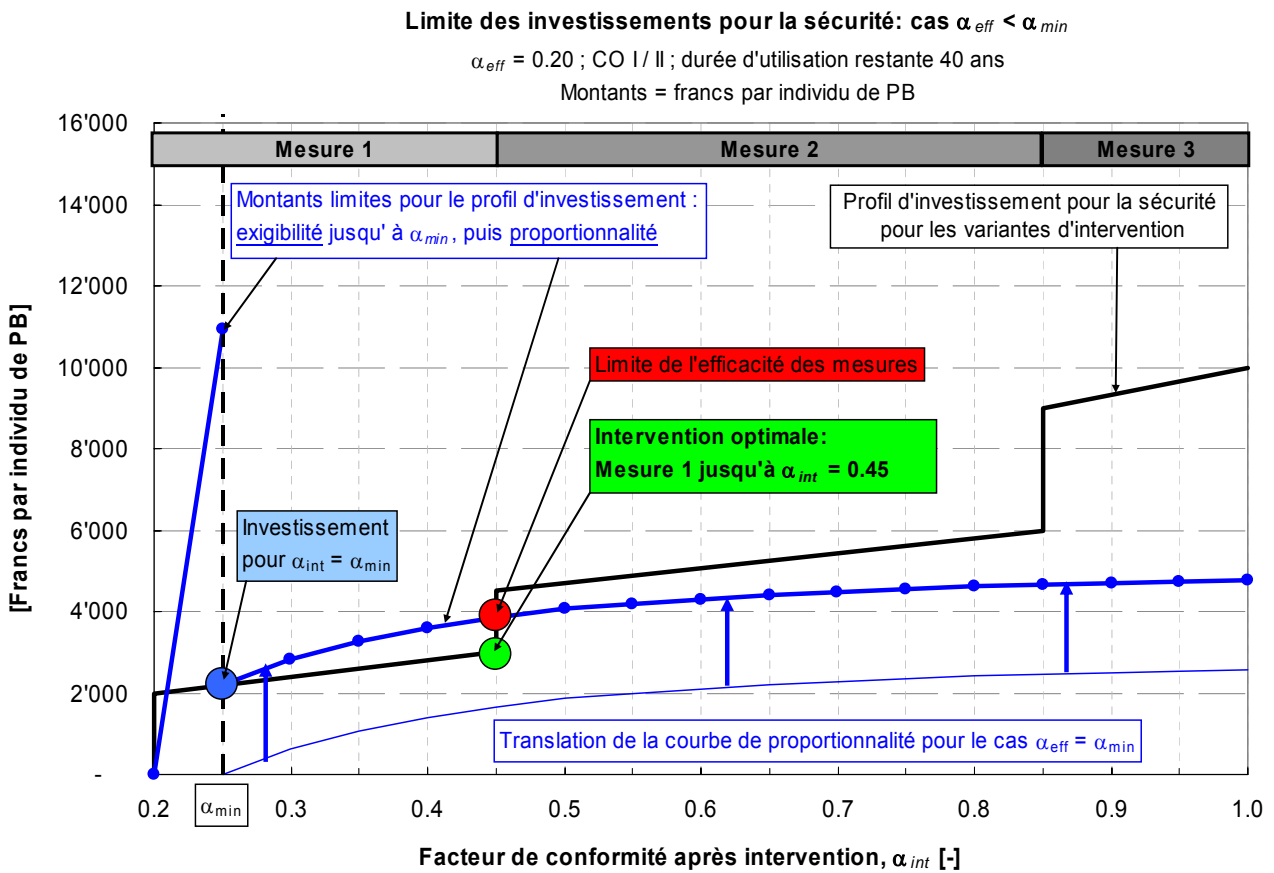


Figure 5: Exemple fictif pour la détermination de l'intervention optimale avec $\alpha_{eff} < \alpha_{min}$. Tous les coûts de protection sont normés par rapport à l'occupation moyenne.

Dans la figure 5, α_{eff} a une valeur inférieure à α_{min} (voir chapitre 2.6.2). La courbe en trait gras en forme d'escalier représente le profil d'investissement pour les variantes d'intervention. La courbe en trait gras avec des ronds représente les coûts limites d'intervention pour le critère de l'exigibilité de α_{eff} à α_{min} et pour le critère de proportionnalité entre α_{min} et 1,0. Pour déterminer la courbe de coûts limites de α_{min} à 1,0, il faut transposer la courbe de proportionnalité pour le cas $\alpha_{eff} = \alpha_{min}$ (courbe en trait fin) jusqu'à ce qu'elle intersecte le profil d'investissement pour $\alpha_{int} = \alpha_{min}$.

Dans le cas présenté, les mesures d'intervention jusqu'à $\alpha_{int} = \alpha_{min}$ (0,25) sont exigibles (investissement pour atteindre $\alpha_{int} = \alpha_{min}$ inférieur à la limite d'exigibilité). Les mesures supplémentaires pour atteindre $\alpha_{int} = 1,0$ ne sont pas proportionnées (investissements au-dessus de la limite de proportionnalité pour $\alpha_{int} = 1,0$). La limite d'efficacité des mesures est atteinte pour $\alpha_{int} = 0,45$. L'intervention optimale pour ce cas est donc l'implémentation de la mesure 1 pour atteindre $\alpha_{int} = 0,45$.

3. Limite des investissements pour la sécurité selon le cahier technique SIA 2018

Les critères d'exigibilité et de proportionnalité permettent un calcul de la limite des investissements pour la sécurité. Celle-ci est calculée selon les formules du chapitre 10 du cahier technique SIA 2018 à l'aide des paramètres suivants :

- PB : occupation moyenne
- n : durée d'utilisation restante
- α_{eff} : facteur de conformité
- CO: classe d'ouvrage

Les investissements maximaux requis pour la sécurité sont une base importante pour l'estimation des variantes d'intervention possibles, dans le sens où ils représentent les montants limites à investir pour des mesures exigibles et proportionnées (voir aussi chapitre 2.6).

Ci-après, les investissements limites sont toujours normés par rapport à PB . Pour un cas concret, ces chiffres doivent être multipliés par la valeur de PB du projet considéré. Les chiffres sont donnés pour des durées d'utilisation restante de 10, 20, 30, 40, 50 et 80 ans.

3.1 Classes d'ouvrage I et II

Dans la figure 6, les chiffres sont donnés pour le domaine de l'exigibilité ($\alpha_{eff} < \alpha_{min}$). Il est à rappeler que dans ce cas, les investissements limites selon l'exigibilité sont valables jusqu'à ce que α_{min} soit atteint et dès α_{min} , les investissements supplémentaires sont limités par le critère de proportionnalité (voir aussi chapitre 2.6). Dans la figure 7, les chiffres sont donnés pour le domaine de la proportionnalité ($\alpha_{min} \leq \alpha_{eff} < \alpha_{adm}$).

CO I / II		n : 10 ans			
		α_{eff}			
α_{int}		0.05	0.10	0.15	0.20
0.10		305'400			
0.15		338'600	33'200		
0.20		346'700	41'300	8'100	
0.25		350'300	44'900	11'700	3'600

CO I / II		n : 20 ans			
		α_{eff}			
α_{int}		0.05	0.10	0.15	0.20
0.10		555'900			
0.15		616'400	60'500		
0.20		631'200	75'200	14'700	
0.25		637'700	81'800	21'300	6'500

CO I / II		n : 30 ans			
		α_{eff}			
α_{int}		0.05	0.10	0.15	0.20
0.10		761'500			
0.15		844'300	82'900		
0.20		864'500	103'000	20'200	
0.25		873'500	112'000	29'100	9'000

CO I / II		n : 40 ans			
		α_{eff}			
α_{int}		0.05	0.10	0.15	0.20
0.10		930'100			
0.15		1'031'300	101'200		
0.20		1'055'900	125'800	24'600	
0.25		1'066'900	136'800	35'600	10'900

CO I / II		n : 50 ans			
		α_{eff}			
α_{int}		0.05	0.10	0.15	0.20
0.10		1'068'400			
0.15		1'184'700	116'300		
0.20		1'213'000	144'500	28'300	
0.25		1'225'500	157'100	40'900	12'600

CO I / II		n : 80 ans			
		α_{eff}			
α_{int}		0.05	0.10	0.15	0.20
0.10		1'351'300			
0.15		1'498'400	147'100		
0.20		1'534'100	182'800	35'800	
0.25		1'550'000	198'700	51'700	15'900

Figure 6 : Limite des investissements pour la sécurité en francs par individu de PB selon le critère de l'exigibilité du cahier technique SIA 2018 (Classe d'ouvrage I / II; domaine $\alpha_{eff} \leq \alpha_{min}$).

CO I / II

n: 10 ans

α_{int}	α_{eff}											
	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
0.30	200											
0.35	350	150										
0.40	460	260	110									
0.45	540	340	190									
0.50	610	410	260									
0.55	650	450	300									
0.60	690	490	340									
0.65	720	520	370									
0.70	750	550	400									
0.75	770	570	420									
0.80	790	590	440									
0.85	810	610	460									
0.90	820	620	470									
0.95	840	630	490									
1.00	850	650	500									

CO I / II

n: 20 ans

α_{int}	α_{eff}											
	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
0.30	370											
0.35	630	270										
0.40	830	470	200									
0.45	980	620	350	150								
0.50	1'110	740	470	270	120							
0.55	1'190	820	550	350	200	80						
0.60	1'260	890	620	420	270	150	70					
0.65	1'320	950	680	480	330	210	130					
0.70	1'360	1'000	730	530	380	250	180					
0.75	1'410	1'040	770	570	420	300	220					
0.80	1'440	1'080	810	610	460	330	260					
0.85	1'470	1'110	840	640	490	370	290					
0.90	1'500	1'130	860	660	510	390	310					
0.95	1'520	1'160	890	690	540	410	340					
1.00	1'540	1'180	910	710	560	430	360					

CO I / II

n: 30 ans

α_{int}	α_{eff}											
	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
0.30	500											
0.35	870	370										
0.40	1'140	640	270									
0.45	1'350	850	480	210								
0.50	1'520	1'020	650	380	170							
0.55	1'620	1'120	750	480	280	110						
0.60	1'720	1'220	850	580	370	200	100					
0.65	1'800	1'300	930	660	460	290	180	80				
0.70	1'870	1'370	1'000	720	520	350	240	140	60			
0.75	1'930	1'430	1'060	790	580	410	300	210	120			
0.80	1'970	1'470	1'110	830	630	460	350	250	170			
0.85	2'020	1'520	1'150	880	670	500	400	300	220			
0.90	2'050	1'550	1'180	910	700	530	430	330	250			
0.95	2'080	1'580	1'210	940	730	560	460	360	280			
1.00	2'110	1'610	1'240	970	760	590	490	390	310			

CO I / II

n: 40 ans

α_{int}	α_{eff}											
	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
0.30	610											
0.35	1'060	450										
0.40	1'400	780	330									
0.45	1'650	1'040	590	250								
0.50	1'860	1'240	790	460	210							
0.55	1'980	1'370	920	590	340	130						
0.60	2'100	1'490	1'040	710	460	250	120					
0.65	2'200	1'590	1'140	810	560	350	220	100				
0.70	2'280	1'670	1'220	880	630	430	300	180	80			
0.75	2'350	1'740	1'290	960	710	500	370	250	150	70		
0.80	2'410	1'800	1'350	1'020	760	560	430	310	210	130		
0.85	2'470	1'860	1'410	1'070	820	610	480	360	260	190		
0.90	2'510	1'890	1'440	1'110	860	650	520	400	300	230		
0.95	2'540	1'930	1'480	1'150	900	690	560	440	340	260		
1.00	2'580	1'970	1'520	1'180	930	720	600	480	380	300		

CO I / II

n: 50 ans

α_{int}	α_{eff}											
	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
0.30	700											
0.35	1'220	520										
0.40	1'600	900	380									
0.45	1'890	1'190	670	290								
0.50	2'130	1'430	910	530	240							
0.55	2'280	1'580	1'060	680	390	150						
0.60	2'420	1'710	1'200	810	520	290	140					
0.65	2'530	1'830	1'310	930	640	400	250	110				
0.70	2'620	1'920	1'400	1'020	730	490	340	200	90			
0.75	2'700	2'000	1'490	1'100	810	570	430	290	170	90		
0.80	2'770	2'070	1'550	1'170	880	640	490	350	240	150	70	
0.85	2'830	2'130	1'610	1'230	940	700	560	420	300	210	130	
0.90	2'880	2'180	1'660	1'280	990	750	600	460	350	260	170	
0.95	2'920	2'220	1'700	1'320	1'030	790	640	510	390	300	220	
1.00	2'960	2'260	1'740	1'360	1'070	830	680	550	430	340	260	

CO I / II

n: 80 ans

α_{int}	α_{eff}											
	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
0.30	890											
0.35	1'540	650										
0.40	2'030	1'140	480									
0.45	2'390	1'510	850	370								
0.50	2'700	1'810	1'150	670	300							
0.55	2'880	1'990	1'340	850	490	190						
0.60	3'060	2'170	1'510	1'030	660	360	170					
0.65	3'200	2'310	1'660	1'170	810	510	320	140				
0.70	3'310	2'430	1'770	1'290	920	620	430	260	110			
0.75	3'420	2'530	1'880	1'390	1'030	730	540	360	220	110		
0.80	3'500	2'620	1'960	1'480	1'110	810	620	450	300	190	80	
0.85	3'580	2'700	2'040	1'560	1'190	890	700	530	380	270	160	80
0.90	3'640	2'750	2'100	1'610	1'250	950	760	580	440	330	220	140
0.95	3'700	2'810	2'150	1'670	1'300	1'000	810	640	490	380	280	190
1.00	3'750	2'860	2'210	1'720	1'350	1'050	870	690	550	430	330	240

Figure 7 : Limite des investissements pour la sécurité en francs par individu de PB selon le critère de la proportionnalité du cahier technique SIA 2018 (Classe d'ouvrage I / II; domaine $\alpha_{eff} \geq \alpha_{min}$ jusqu'à α_{adm}). Les cellules blanches vides font partie du domaine ou les interventions sont non recommandées ($\alpha_{eff} \geq \alpha_{adm}$).

3.2 Classe d'ouvrage III

Dans la figure 8, les chiffres sont donnés pour le domaine de l'exigibilité ($\alpha_{eff} < \alpha_{min}$). Dans la figure 9, les chiffres sont donnés pour le domaine de la proportionnalité ($\alpha_{min} \leq \alpha_{eff} < \alpha_{adm}$).

CO III *n*: 10 ans

α_{int}	α_{eff}						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
0.10	305'400						
0.15	338'600	33'200					
0.20	346'700	41'300	8'100				
0.25	350'300	44'900	11'700	3'600			
0.30	352'300	46'900	13'700	5'600	2'000		
0.35	353'800	48'400	15'200	7'100	3'500	1'500	
0.40	354'900	49'500	16'300	8'200	4'600	2'600	1'100

CO III *n*: 20 ans

α_{int}	α_{eff}						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
0.10	555'900						
0.15	616'400	60'500					
0.20	631'200	75'200	14'700				
0.25	637'700	81'800	21'300	6'500			
0.30	641'400	85'400	24'900	10'200	3'700		
0.35	644'100	88'100	27'600	12'900	6'300	2'700	
0.40	646'000	90'100	29'600	14'900	8'300	4'700	2'000

CO III *n*: 30 ans

α_{int}	α_{eff}						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
0.10	761'500						
0.15	844'300	82'900					
0.20	864'500	103'000	20'200				
0.25	873'500	112'000	29'100	9'000			
0.30	878'500	117'000	34'100	14'000	5'000		
0.35	882'200	120'700	37'800	17'700	8'700	3'700	
0.40	884'900	123'400	40'500	20'400	11'400	6'400	2'700

CO III *n*: 40 ans

α_{int}	α_{eff}						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
0.10	930'100						
0.15	1'031'300	101'200					
0.20	1'055'900	125'800	24'600				
0.25	1'066'900	136'800	35'600	10'900			
0.30	1'073'000	142'900	41'700	17'100	6'100		
0.35	1'077'500	147'400	46'200	21'600	10'600	4'500	
0.40	1'080'800	150'700	49'500	24'900	14'000	7'800	3'300

CO III *n*: 50 ans

α_{int}	α_{eff}						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
0.10	1'068'400						
0.15	1'184'700	116'300					
0.20	1'213'000	144'500	28'300				
0.25	1'225'500	157'100	40'900	12'600			
0.30	1'232'500	164'100	47'900	19'600	7'000		
0.35	1'237'700	169'300	53'000	24'800	12'200	5'200	
0.40	1'241'600	173'100	56'900	28'600	16'000	9'000	3'800

CO III *n*: 80 ans

α_{int}	α_{eff}						
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
0.10	1'351'300						
0.15	1'498'400	147'100					
0.20	1'534'100	182'800	35'800				
0.25	1'550'000	198'700	51'700	15'900			
0.30	1'558'900	207'600	60'500	24'800	8'900		
0.35	1'565'500	214'100	67'100	31'300	15'400	6'500	
0.40	1'570'300	219'000	71'900	36'200	20'300	11'400	4'800

Figure 8 : Limite des investissements pour la sécurité en francs par individu de PB selon le critère de l'exigibilité du cahier technique SIA 2018 (Classe d'ouvrage III; domaine $\alpha_{eff} \leq \alpha_{min}$).

CO III *n*: 10 ans

α_{int}	α_{eff}									
	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
0.45	80									
0.50	150									
0.55	190									
0.60	230									
0.65	270									
0.70	290									
0.75	310									
0.80	330									
0.85	350									
0.90	360									
0.95	380									
1.00	390									

CO III *n*: 20 ans

α_{int}	α_{eff}									
	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
0.45	150									
0.50	270	120								
0.55	350	200	80							
0.60	420	270	150	70						
0.65	480	330	210	130	60					
0.70	530	380	250	180	110					
0.75	570	420	300	220	150					
0.80	610	460	330	260	180					
0.85	640	490	370	290	220					
0.90	660	510	390	310	240					
0.95	690	540	410	340	260					
1.00	710	560	430	360	280					

CO III *n*: 30 ans

α_{int}	α_{eff}									
	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
0.45	210									
0.50	380	170								
0.55	480	280	110							
0.60	580	370	200	100						
0.65	660	460	290	180	80					
0.70	720	520	350	240	140	60				
0.75	790	580	410	300	210	120	60			
0.80	830	630	460	350	250	170	110			
0.85	880	670	500	400	300	220	150			
0.90	910	700	530	430	330	250	180			
0.95	940	730	560	460	360	280	220			
1.00	970	760	590	490	390	310	240			

CO III

n: 40 ans

α_{int}	α_{eff}									
	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
0.45	250									
0.50	460	210								
0.55	590	340	130							
0.60	710	460	250	120						
0.65	810	560	350	220	100					
0.70	880	630	430	300	180	80				
0.75	960	710	500	370	250	150	70			
0.80	1'020	760	560	430	310	210	130	60		
0.85	1'070	820	610	480	360	260	190	110		
0.90	1'110	860	650	520	400	300	230	150		
0.95	1'150	900	690	560	440	340	260	190		
1.00	1'180	930	720	600	480	380	300	230		

CO III

n: 50 ans

α_{int}	α_{eff}									
	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
0.45	290									
0.50	530	240								
0.55	680	390	150							
0.60	810	520	290	140						
0.65	930	640	400	250	110					
0.70	1'020	730	490	340	200	90				
0.75	1'100	810	570	430	290	170	90			
0.80	1'170	880	640	490	350	240	150	70		
0.85	1'230	940	700	560	420	300	210	130	60	
0.90	1'280	990	750	600	460	350	260	170	110	
0.95	1'320	1'030	790	640	510	390	300	220	150	
1.00	1'360	1'070	830	680	550	430	340	260	190	

CO III

n: 80 ans

α_{int}	α_{eff}									
	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
0.45	370									
0.50	670	300								
0.55	850	490	190							
0.60	1'030	660	360	170						
0.65	1'170	810	510	320	140					
0.70	1'290	920	620	430	260	110				
0.75	1'390	1'030	730	540	360	220	110			
0.80	1'480	1'110	810	620	450	300	190	80		
0.85	1'560	1'190	890	700	530	380	270	160	80	
0.90	1'610	1'250	950	760	580	440	330	220	140	60
0.95	1'670	1'300	1'000	810	640	490	380	280	190	110
1.00	1'720	1'350	1'050	870	690	550	430	330	240	160

Figure 9 : Limite des investissements pour la sécurité en francs par individu de PB selon le critère de la proportionnalité du cahier technique SIA 2018 (Classe d'ouvrage III; domaine $\alpha_{eff} \geq \alpha_{min}$ jusqu'à α_{adm}). Les cellules blanches vides font partie du domaine ou les interventions sont non recommandées ($\alpha_{eff} \geq \alpha_{adm}$).

4. Liste bibliographique

OFEG (2005), Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants, Principes et directives pour l'étape 1 (2^{ème} édition), Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, Bienne.
<http://www.bwg.admin.ch/themen/natur/f/index.htm>.

OFEG (2005), Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants, Principes et directives pour l'étape 2 (2^{ème} édition), Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, Bienne (en préparation).
<http://www.bwg.admin.ch/themen/natur/f/index.htm>.

SIA 2018 (2004), Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants, Cahier technique, Société suisse des Ingénieurs et Architectes, Zurich.

SIA D 0211 (2005), Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants, Introduction au cahier technique SIA 2018, Documentation, SIA 2018 (2004), Société suisse des Ingénieurs et des Architectes, Zurich.

Cahier technique
2018

s i a

Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants

schweizerischer
ingenieur- und
architektenverein

société suisse
des ingénieurs
et des architectes

società svizzera
degli ingegneri
e degli architetti

swiss society
of engineers
and architects

selnaustrasse 16
postfach
ch-8039 zürich
www.sia.ch

Cahiers techniques SIA

Les cahiers techniques sont publiés par la SIA en tant que règlements complémentaires et commentaires dans des domaines spécifiques.

Les cahiers techniques font partie intégrante des normes SIA.

Les cahiers techniques sont valables trois ans à partir de leur parution. Leur validité peut être prolongée à plusieurs reprises de trois ans.

Les institutions suivantes ont contribué à l'élaboration du présent cahier technique:

Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), Selnaustrasse 16, 8039 Zurich

Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Rue du Débarcadère 20, 2501 Bienne

Communauté d'intérêts des maîtres d'ouvrage professionnels privés (CIMP), Pelikanplatz 5, 8001 Zurich

Association suisse d'assurances (ASA), C.F. Meyer-Strasse 14, 8022 Zurich

Association suisse de l'industrie de la terre cuite (ASITEC), Elfenstrasse 19, 3000 Berne 16

Société suisse du génie parasismique et de la dynamique des structures (SGEB), c/o Institut für Baustatik und Konstruktion, EPF Zurich, 8093 Zurich

Groupe spécialisé pour la conservation des ouvrages (GCO) de la SIA, Selnaustrasse 16, 8039 Zurich

TABLE DES MATIÈRES

	Page		Page
Avant-propos.....	4	7	Capacité portante des constructions en maçonnerie..... 24
0	Champ d'application..... 5	7.1	Principes..... 24
0.1	Délimitation..... 5	7.2	Méthode basée sur les forces..... 24
0.2	Références normatives..... 5	7.3	Méthode basée sur les déformations..... 24
0.3	Exceptions..... 6	7.4	Résistance ultime perpendiculairement au plan de la paroi porteuse..... 25
1	Terminologie..... 7	7.5	Maçonnerie portant uniquement dans le sens vertical..... 25
1.1	Termes techniques..... 7	7.6	Maçonnerie non porteuse..... 25
1.2	Notations..... 10	8	Capacité portante des constructions en acier et des constructions mixtes acier-béton..... 26
2	Principes..... 13	8.1	Méthode basée sur les forces..... 26
2.1	Concept 13	8.2	Méthode basée sur les déformations..... 26
2.2	Comportement en déformation des structures porteuses..... 13	9	Appréciation de la sécurité parasismique et recommandations d'intervention..... 27
2.3	Méthodes de calcul..... 13	9.1	Appréciation par le calcul..... 27
2.4	Procédure..... 14	9.2	Appréciation de la conception et des mesures constructives..... 28
3	Matériaux de construction..... 15	9.3	Recommandations d'intervention..... 29
3.1	Généralités..... 15	10	Proportionnalité et exigibilité..... 30
3.2	Propriétés selon le dossier de construction... 15	10.1	Principes..... 30
3.3	Propriétés déterminées par sondages..... 15	10.2	Risque pour les personnes..... 30
4	Analyse structurale..... 16	10.3	Acceptabilité du risque individuel..... 30
4.1	Généralités..... 16	10.4	Efficacité des mesures de protection parasismique..... 30
4.2	Analyse structurale basée sur les forces..... 16	10.5	Critères d'appréciation..... 32
4.3	Analyse structurale basée sur les déformations..... 16	10.6	Extension de l'appréciation du risque pour les personnes..... 32
5	Actions..... 18	Annexe A	Construction en béton (normatif).... 33
5.1	Généralités..... 18	Annexe B	Maçonnerie (normatif)..... 35
5.2	Actions sismiques pour la méthode basée sur les forces..... 18	Annexe C	Construction en acier (normatif)..... 37
5.3	Actions sismiques pour la méthode basée sur les déformations..... 18	Annexe D	Etablissement de priorités (informatif)..... 38
5.4	Actions sismiques pour la détermination du comportement en service..... 19		Adoption et entrée en vigueur..... 40
6	Capacité portante des constructions en béton..... 20		
6.1	Méthode basée sur les forces..... 20		
6.2	Méthode basée sur les déformations..... 20		

AVANT-PROPOS

Assurer une sécurité suffisante vis-à-vis des séismes en Suisse est une tâche exigeante, qui va au-delà de la simple considération du contrôle de la sécurité parasismique des ouvrages. Des conséquences importantes, qui dépassent le cadre de l'ouvrage individuel, peuvent survenir du fait d'interdépendances multiples et complexes. Lorsqu'il s'agit d'ouvrages d'importance nationale ou suprarégionale, les conséquences socio-économiques peuvent être très lourdes. Les séismes doivent être pris en compte car ils sont susceptibles d'occasionner des dommages de grande ampleur dont les effets sont difficiles à surmonter. Il est aussi possible que des ouvrages individuels subissent des dommages dont les conséquences économiques s'avèrent catastrophiques. De tels risques sont de moins en moins acceptés par la société.

En règle générale, le surcoût à consentir pour que les nouvelles constructions présentent une sécurité parasismique conforme aux exigences des normes est négligeable si l'on tient déjà compte de l'action sismique lors de la conception de l'ouvrage. En revanche, l'amélioration ultérieure de la sécurité parasismique d'un ouvrage n'est possible qu'au prix de travaux conséquents et d'incidences non négligeables sur les coûts d'exploitation. Les normes de structures SIA 260 à 267, axées sur la conception et le dimensionnement de nouveaux ouvrages, comprennent des dispositions parasismiques notablement plus exigeantes que les générations de normes précédentes. Les ouvrages conçus et dimensionnés en respectant ces prescriptions présentent un bon comportement vis-à-vis des séismes et une sécurité élevée face aux sollicitations sismiques attendues en Suisse.

Les ouvrages plus anciens, dimensionnés en fonction de normes antérieures, présentent généralement une sécurité parasismique nettement moindre. Lors d'une vérification selon les normes SIA 260 à 267, ils doivent généralement être classés dans la catégorie défavorable des ouvrages avec une structure porteuse à comportement non ductile sous l'effet de séismes, et les critères de sécurité parasismique requis ne peuvent généralement pas être remplis.

Le présent cahier technique montre comment la sécurité parasismique des constructions existantes peut être évaluée d'après les principes régissant les nouvelles normes sur les structures porteuses tout en prenant en compte les spécificités par rapport aux nouvelles constructions. Il est axé sur les ouvrages individuels et permet, grâce à l'alternative de la méthode basée sur les déformations, une appréciation différenciée sur la base de la capacité de déformation et ainsi une meilleure évaluation du comportement sismique. La méthode basée sur les déformations n'est pour l'instant normalisée que pour les constructions en béton, car la plupart des expériences acquises au plan mondial concernent ce type de construction. Son application n'en exige pas moins une connaissance approfondie de principes fondamentaux, qui dépassent le cadre de ce cahier technique.

Le cahier technique fournit aussi des critères pour décider si un bâtiment doit subir un assainissement parasismique ou si son état actuel est admissible. En vertu de considérations portant sur les coûts et les risques, il n'est pas indiqué d'assainir toutes les constructions existantes pour leur conférer le niveau de sécurité prescrit par les nouvelles normes. A titre informatif, quelques propositions sur l'établissement de priorités sont formulées dans l'annexe D.

Les constructions existantes – contrairement aux nouvelles – ne doivent pas impérativement respecter le niveau de sécurité parasismique prescrit par les normes SIA 260 à 267 sur les structures porteuses; la proportionnalité et l'exigibilité du coût des interventions peut aussi intervenir dans la décision relative aux assainissements parasismiques.

Les commentaires encadrés et en italique sont uniquement explicatifs. Ils comprennent des informations qui complètent le texte normatif du cahier technique.

0 CHAMP D'APPLICATION

0.1 Délimitation

- 0.1.1 Le présent cahier technique sert de document de base pour l'appréciation de la sécurité parasismique des bâtiments existants qui ont été conçus avant l'entrée en vigueur des normes SIA 260 à 267.

Ce cahier technique pourrait aussi être appliqué par analogie aux ponts et à d'autres ouvrages d'art. Dans ce cas, les considérations relatives à la proportionnalité devraient être adaptées.

- 0.1.2 Ce cahier technique ne peut pas être utilisé pour dimensionner de nouvelles structures porteuses.
- 0.1.3 Ce cahier technique se concentre sur les constructions en béton, en maçonnerie et en acier, ainsi qu'à leurs combinaisons, tels les ouvrages mixtes en acier-béton. Il peut être appliqué par analogie aux constructions en bois.
- 0.1.4 Ce cahier technique est orienté sur la vérification des ouvrages individuels; il ne traite des méthodes visant à établir un ordre de priorité au sein de grands parcs de bâtiments que de manière informative dans l'annexe D.

Pour l'établissement de priorités au sein de parcs de bâtiments, on se référera par exemple à la Directive pour l'appréciation de la sécurité parasismique de bâtiments existants, étape 1, de l'Office fédéral des eaux et de la géologie.

- 0.1.5 Les ouvrages de la classe d'ouvrage III dont la défaillance peut avoir de graves répercussions doivent faire l'objet de réflexions plus approfondies que le contenu de ce cahier technique.
- 0.1.6 Ce cahier technique n'est pas valable pour les ouvrages soumis à des règlements spécifiques. Dans ce cas, les réglementations pertinentes doivent être appliquées. Sont notamment concernés:
- les ouvrages soumis à l'ordonnance sur les accidents majeurs
 - les barrages
 - les installations nucléaires.
- 0.1.7 Les biens culturels et autres valeurs irremplaçables doivent faire l'objet de réflexions qui dépassent le cadre de ce cahier technique.

0.2 Références normatives

- 0.2.1 Ce cahier technique doit être appliqué en relation avec les normes SIA 260 à 267.
- 0.2.2 Les aspects prépondérants de la conservation des structures porteuses sont réglés dans les documents suivants:
- | | |
|-----------------------------------|--|
| – Norme SIA 469 (1997) | Conservation des ouvrages |
| – Directive SIA 465 (1998) | Sécurité des ouvrages et des installations |
| – Directive SIA 462 (1994) | Evaluation de la sécurité structurale des ouvrages existants |
| – Recommandation SIA 162/5 (1997) | Conservation des structures en béton. |
- 0.2.3 Les documents suivants comprennent également des principes applicables pour l'appréciation de la sécurité parasismique des ouvrages existants:
- Normes EN 1998 (Eurocode 8)
en particulier la norme prEN 1998-3 Assessment and retrofitting of buildings.
 - Office fédéral des eaux et de la géologie: Directive pour l'appréciation de la sécurité parasismique de bâtiments existants, étapes 1 et 2. www.bwg.admin.ch
 - Office fédéral des eaux et de la géologie: Directive sur les principes pour l'établissement et l'utilisation des études de microzonage en Suisse. www.bwg.admin.ch
 - FEMA 310: Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings – A Prestandard (Federal Emergency Management Agency, USA)
 - Paulay T., Priestley M.J.N.: Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. ISBN 0-471-54915-0. John Wiley & Sons, New York, 1992.

0.3 Exceptions

- 0.3.1 Des dérogations au présent cahier technique sont admissibles, si elles sont suffisamment justifiées par des théories ou par des essais, ou si de nouveaux développements ou de nouvelles connaissances dans le domaine en question permettent une telle démarche.
- 0.3.2 Les dérogations au cahier technique doivent être clairement mentionnées et dûment justifiées dans le dossier de construction.

1 TERMINOLOGIE

1.1 Termes techniques

Les termes techniques définis ci-après sont utilisés dans le présent cahier technique. Les termes techniques généraux sont définis dans les normes SIA 260 et 261, et les termes spécifiques aux différents matériaux de construction dans les normes SIA 262 à 267.

capacité de déformation <i>Verformungsvermögen</i> <i>capacità di spostamento</i> <i>displacement capacity</i>	Déformation susceptible d'être supportée par un élément de construction ou par une structure porteuse, avant que cet élément de construction ou cette structure porteuse n'ait atteint son état limite ultime nominal.
classe d'ouvrage <i>Bauwerksklasse</i> <i>classe d'opera</i> <i>structural class</i>	Caractérisation schématique des bâtiments selon la norme SIA 261, qui prend en compte un danger similaire pour les personnes, l'importance de l'ouvrage pour la collectivité et le risque d'atteinte à l'environnement lorsque l'ouvrage est endommagé.
courbe de capacité <i>Kapazitätskurve</i> <i>curva di capacità</i> <i>capacity curve</i>	Force de rappel d'un oscillateur simple équivalent en fonction de son déplacement relatif.
courbure <i>Krümmung</i> <i>curvatura</i> <i>curvature</i>	Mesure de la répartition des déformations spécifiques à travers une section soumise à la flexion.
courbure de plastification <i>Fliesskrümmung</i> <i>curvatura di snervamento</i> <i>yield curvature</i>	Courbure de l'élément de construction pour laquelle l'armature longitudinale atteint pour la première fois l'allongement de plastification.
courbure nominale de plastification <i>Nominelle Fliesskrümmung</i> <i>curvatura di snervamento nominale</i> <i>nominal yield curvature</i>	Courbure de plastification extrapolée en fonction de la résistance nominale à la flexion (voir chiffre 6.2.8).
courbure ultime <i>Bruchkrümmung</i> <i>curvatura a rottura</i> <i>ultimate curvature</i>	Courbure de l'élément de construction pour laquelle soit la déformation spécifique de rupture du béton, soit l'allongement spécifique de rupture de l'acier d'armature passive est atteint.
coûts de la sécurité <i>Sicherheitskosten</i> <i>costi di sicurezza</i> <i>safety cost</i>	Amortissement annuel du montant investi pour une intervention visant à améliorer la sécurité, calculé en fonction de la durée d'utilisation restante de la construction.
coûts de sauvetage <i>Rettungskosten</i> <i>costi di soccorso</i> <i>life saving costs</i>	Rapport entre les coûts de la sécurité imputables à une intervention et la diminution du risque exprimé en francs par vie épargnée.
déplacement cible <i>Zielverschiebung</i> <i>spostamento target</i> <i>target displacement</i>	Demande en déplacement selon le spectre de dimensionnement du déplacement.
ductilité <i>Duktilität</i> <i>ductilità</i> <i>ductility</i>	Mesure de la dissipation d'énergie par un élément de construction et de sa capacité de déformation plastique, exprimée, lorsqu'elle se réfère à une valeur en déplacement ou en déformation, par le rapport entre la valeur maximale et la valeur au début de la plastification.

durée d'utilisation restante <i>Restnutzungsdauer</i> <i>durata d'utilizzo rimanente</i> <i>planning horizon</i>	Période durant laquelle on prévoit que la construction sera encore utilisée.
élaboration de projet <i>Projektierung</i> <i>progettazione</i> <i>design</i>	Conception, analyse structurale et dimensionnement.
élément de structure à déformabilité limitée <i>beschränkt verformungsfähiges Bauteil</i> <i>elemento strutturale a deformabilità limitata</i> <i>limited-deformable structural element</i>	Élément de structure qui ne répond pas aux exigences d'un élément de structure déformable
élément de structure déformable <i>verformungsfähiges Bauteil</i> <i>elemento strutturale deformabile</i> <i>deformable structural element</i>	Élément de structure qui présente un comportement plastique-cyclique stable lorsqu'il se déforme et pour lequel on peut exclure toute rupture fragile, si bien que la méthode basée sur les déformations peut être appliquée.
état limite ultime nominal <i>Nomineller Versagenszustand</i> <i>stato limite di collasso nominale</i> <i>nominal ultimate limit state</i>	Etat idéalisé pour lequel on admet que l'élément de construction ou la structure porteuse ne peut plus remplir sa fonction, soit parce que sa résistance ultime a trop diminué, soit parce que des déformations du béton ou des allongements de l'acier inadmissibles se sont produits localement.
exigibilité <i>Zumutbarkeit</i> <i>esigibilità</i> <i>reasonableness</i>	Garantie d'une utilisation efficace des moyens à disposition sous condition d'une obligation de réduction du risque individuel.
facteur de conformité <i>Erfüllungsfaktor</i> <i>fattore di conformità</i> <i>compliance factor</i>	Valeur numérique indiquant dans quelle mesure une structure porteuse existante satisfait aux vérifications numériques des normes auxquelles les nouvelles constructions sont soumises.
facteur de risque <i>Risikofaktor</i> <i>fattore di rischio</i> <i>risk factor</i>	Grandeur dépendant du facteur de conformité, qui sert à calculer le risque encouru par les personnes.
inclinaison <i>Schiefstellung</i> <i>deformazione interpiano</i> <i>drift</i>	Rapport entre le déplacement horizontal sous l'effet d'un séisme d'un élément de construction et une hauteur donnée (en général la hauteur d'un étage).
méthode basée sur les déformations <i>Verformungsbasiertes Verfahren</i> <i>progettazione in deformazione</i> <i>displacement-based design</i>	Vérification sismique par comparaison des déformations occasionnées par le séisme et de la capacité de déformation de l'élément de structure considéré.
méthode basée sur les forces <i>Kraftbasiertes Verfahren</i> <i>progettazione in forza</i> <i>force-based design</i>	Vérification sismique par comparaison des efforts intérieurs occasionnés par le séisme et de la résistance en section.
mode de rupture <i>Versagensart</i> <i>modalità di collasso</i> <i>failure mode</i>	Classification du mécanisme de rupture en fonction de critères cinématiques et de caractéristiques inhérentes aux matériaux de construction utilisés.

moment de plastification <i>Fliessmoment</i> <i>momento di snervamento</i> <i>yield moment</i>	Moment de flexion d'un élément de construction pour lequel l'armature longitudinale atteint pour la première fois l'allongement de plastification.
niveau d'encastrement <i>Einbindungshorizont</i> <i>livello d'incastro</i> <i>level of embedment</i>	Niveau à partir duquel le modèle de la structure porteuse, peut être considéré comme encasté en vue de déterminer l'action d'un séisme.
occupation <i>Personenbelegung</i> <i>occupazione</i> <i>occupancy</i>	Nombre de personnes séjournant dans un ouvrage ou dans la zone susceptible d'être atteinte par les décombres de celui-ci.
oscillateur simple équivalent <i>Äquivalenter Einmassenschwinger</i> <i>oscillatore equivalente a un grado di libertà</i> <i>equivalent SDOF system</i>	Oscillateur simple possédant les propriétés dynamiques correspondant au mode de vibration fondamental de la structure porteuse.
portée de cisaillement <i>Schubspannweite</i> <i>luce di taglio</i> <i>shear span</i>	Distance entre le point de moment nul et le point de moment maximal.
proportionnalité <i>Verhältnismässigkeit</i> <i>proporzionalità</i> <i>commensurability</i>	Garantie d'utilisation efficace des montants investis pour réduire le risque global, en limitant le risque individuel.
réduction du risque <i>Risikoreduktion</i> <i>riduzione del rischio</i> <i>risk reduction</i>	Efficacité d'une intervention pour une période de référence d'une année, exprimée en nombre de vies épargnées (décès évités).
résistance nominale à la flexion <i>Nomineller Biegegewiderstand</i> <i>resistenza flessionale nominale</i> <i>nominal bending strength</i>	Résistance à la flexion de l'élément de construction pour laquelle soit la déformation du béton, soit l'allongement de l'acier atteint une valeur nominale (voir chiffre 6.2.8).
risque individuel <i>Individualrisiko</i> <i>rischio individuale</i> <i>individual risk</i>	Mesure du risque encouru par une personne, exprimé par la probabilité annuelle de décès.
risque <i>Risiko</i> <i>rischio</i> <i>risk</i>	Produit de la probabilité d'occurrence d'un événement au cours d'une période de référence et de ses conséquences quantifiées. Dans ce cahier technique, les conséquences de l'événement sont généralement quantifiées en considérant le nombre de décès imputables à un séisme.
rotation de la corde <i>Sehnenverdrehung</i> <i>rotazione della corda</i> <i>chord rotation</i>	Angle formé par la tangente à l'axe de l'élément de construction au niveau de la rotule plastique et la corde reliant celle-ci à l'extrémité de la portée de cisaillement (voir figure 3 au chiffre 6.2.1).
rotule plastique <i>Plastisches Gelenk</i> <i>cerniera plastica</i> <i>plastic hinge</i>	Zone idéalisée d'un élément de construction où l'on admet une concentration de déformations plastiques équivalentes afin d'estimer la capacité de déformation de cet élément de construction.
rupture fragile <i>Sprödes Versagen</i> <i>rottura fragile</i> <i>brittle failure</i>	Rupture survenant sans déformation plastique ni dissipation notable d'énergie.

système mixte <i>Mischsystem</i> <i>sistema misto</i> <i>hybrid structure</i>	Structure porteuse comprenant, outre la maçonnerie, des éléments porteurs verticaux en béton, en acier ou en bois pour reprendre les efforts horizontaux.
--	---

1.2 Notations

1.2.1 Majuscules latines

A_d	valeur de calcul d'une action accidentelle
A_R	action sismique provoquant la défaillance d'éléments de construction porteurs
B_i	nombre de personnes correspondant à une occupation i
C_d	valeur de calcul d'une limite de service
D	diamètre de la colonne
DF	facteur d'escompte
E_{cm}	valeur moyenne du module d'élasticité du béton
E_d	valeur de calcul des effets d'une action
F_d	force horizontale de remplacement due à l'action sismique
L_{pl}	longueur de la rotule plastique
L_v	portée de cisaillement
M	moment de flexion
M_l	moment de flexion à l'extrémité gauche de la poutre
M_n	résistance nominale à la flexion
M_r	moment de flexion à l'extrémité droite de la poutre
M'_y	moment de plastification
PB	valeur estimée de l'occupation par des personnes, rapportée à une année
R_d	valeur de calcul de la résistance ultime
RF	facteur de risque
RK_M	coûts de sauvetage de l'intervention
S	paramètre dans la détermination du spectre de réponse élastique
S_{ad}	valeur spectrale de l'accélération du spectre de dimensionnement élastique
SIK_M	montant investi pour la sécurité
SK_M	coûts imputables à la sécurité pour une intervention
S_{ud}	valeur spectrale du déplacement du spectre de dimensionnement élastique
T	période de vibration
T_B	paramètre dans la détermination du spectre de réponse élastique
T_C	paramètre dans la détermination du spectre de réponse élastique
T_D	paramètre dans la détermination du spectre de réponse élastique
V	effort tranchant
V_d	valeur de calcul de l'effort tranchant
V_d^+	effort tranchant majoré

V_l	effort tranchant à l'extrémité gauche de la poutre
V_r	effort tranchant à l'extrémité droite de la poutre

1.2.2 Minuscules latines

a_{gd}	valeur de calcul de l'accélération du sol
a_{st}	coefficient de nuance d'acier
b	largeur du bâtiment
d_{bl}	diamètre de l'armature longitudinale
d_i	nombre de jours par semaine pour l'occupation i
e	excentricité
$e_{d,inf}$	valeur inférieure de l'excentricité de la force de remplacement résultante
$e_{d,sup}$	valeur supérieure de l'excentricité de la force de remplacement résultante
f_{bk}	valeur caractéristique de la résistance à la compression d'un parpaing
f_{bm}	valeur moyenne de la résistance à la compression d'un parpaing
f_{cd}	valeur de calcul de la résistance à la compression du béton
f_{ck}	valeur caractéristique de la résistance à la compression sur cylindre du béton (fractile 5%)
f_s	limite d'écoulement de l'acier d'armature passive
f_{sd}	valeur de calcul de la limite d'écoulement de l'acier d'armature passive
f_{sk}	valeur caractéristique de la limite d'écoulement de l'acier d'armature passive
f_{sm}	valeur moyenne de la limite d'écoulement
f_t	résistance à la traction de l'acier d'armature passive
f_{tk}	valeur caractéristique de la résistance à la traction de l'acier d'armature passive
f_{tm}	valeur moyenne de la résistance à la traction de l'acier d'armature passive
$(f_t / f_s)_k$	valeur caractéristique du rapport d'écroûissage (f_t / f_s)
f_{xd}	valeur de calcul de la résistance à la compression de la maçonnerie perpendiculairement aux joints d'assise
h	hauteur libre d'une paroi porteuse
h_b	hauteur d'une poutre de section rectangulaire
h_i	nombre d'heures par jour pour l'occupation i
i	taux d'escompte
l_s	longueur de la colonne dans la direction des sollicitations
l_w	longueur de la paroi porteuse
m^*	masse modale
n	durée d'utilisation restante
q	coefficient de comportement
r	coefficient
t	épaisseur de la paroi porteuse
w	déplacement induit par le séisme
w_d	déplacement cible
w_i	nombre de semaines par an pour l'occupation i

$w_{R,d}$	capacité de déplacement
w_u	déplacement lorsque la capacité de déformation est atteinte
w_y	déplacement de plastification

1.2.3 Majuscules grecques

Γ	facteur de participation modal
ΔRF	différence entre les facteurs de risque déterminants
ΔR_{GE}	risque dû aux dommages induits pouvant être exprimés en unités monétaires
ΔR_M	réduction du risque

1.2.4 Minuscules grecques

α_{adm}	facteur de réduction admissible
α_{eff}	facteur de conformité établi lors de la vérification
α_{int}	facteur de conformité après une intervention visant à améliorer la sécurité parasismique
α_{min}	facteur de réduction minimal
γ_D	facteur partiel pour la capacité de déformation
γ_f	facteur d'importance
γ_m	facteur partiel pour une propriété du matériau de construction ou du sol de fondation (tient compte d'écart défavorables par rapport à la valeur caractéristique)
γ_M	facteur de résistance (= $\gamma_R \gamma_m$)
γ_R	facteur partiel pour la résistance ultime (tient compte des incertitudes du modèle de résistance)
ε_c	déformation spécifique du béton
ε_{cd}	valeur de calcul de la déformation spécifique du béton lorsque f_{cd} est atteint
ε_{cu}	déformation spécifique de rupture du béton
ε_s	allongement spécifique de l'armature
ε_{sk}	valeur caractéristique de l'allongement spécifique de plastification de l'armature
ε_{ud}	valeur de calcul de l'allongement spécifique de rupture de l'armature (allongement avant striction)
ε_{uk}	valeur caractéristique de l'allongement spécifique de rupture de l'acier d'armature passive (allongement avant striction)
ζ	rapport des déformations spécifiques du béton
θ_{max}	rotation maximale de la corde pour un élément de construction (capacité de déformation)
θ_u	rotation de la corde à la rupture
θ_y	rotation de plastification de la corde
κ	facteur de majoration pour prendre en compte les modes propres d'ordre supérieur
σ_c	contrainte dans le béton
τ_{cd}	valeur de calcul de la contrainte limite de cisaillement
ϕ_u	courbure ultime
ϕ_y	courbure nominale de plastification
ϕ_y'	courbure de plastification

2 PRINCIPES

2.1 Concept

- 2.1.1 Les raisons de procéder à un contrôle figurent dans les normes de niveau supérieur:
- Norme SIA 469 (1997) chiffre 3 21 3
 - Directive SIA 462 (1994) chiffre 2 1
 - Recommandation SIA 162/5 (1997) chiffre 2 21.
- 2.1.2 La vérification de la sécurité parasismique d'un ouvrage existant comprend trois étapes.
- Dans le cadre du relevé de son état, on analysera le comportement de l'ouvrage soumis à l'action sismique.
 - Dans le cadre de l'appréciation de son état, on vérifiera – en tenant compte, le cas échéant, de critères de proportionnalité et d'exigibilité – si l'ouvrage présente une sécurité acceptable.
 - Des mesures d'intervention, basées sur les résultats de l'appréciation de l'état de l'ouvrage, seront finalement proposées.

2.2 Comportement en déformation des structures porteuses

- 2.2.1 Pour les structures porteuses de même, que pour des éléments de construction ou les assemblages, les comportements déformables et à déformabilité limitée doivent être distingués.
- 2.2.2 Dans une direction principale, une structure porteuse n'est déformable que si tous les éléments porteurs et toutes les liaisons la composant sont déformables.
- 2.2.3 Un élément de construction est déformable s'il présente un comportement plastique-cyclique stable lorsqu'il se déforme et si l'on peut exclure toute rupture fragile. Les mécanismes de rupture fragile qui peuvent se produire sont énumérés par mode de construction aux chapitres correspondants.
- 2.2.4 Les structures porteuses qui satisfont aux dispositions des normes SIA 262 à 266 pour un comportement ductile sont considérées comme déformables.

2.3 Méthodes de calcul

- 2.3.1 On distinguera la méthode basée sur les forces et la méthode basée sur les déformations. La méthode basée sur les forces correspond à la méthode décrite au chiffre 16.5 de la norme SIA 261. La méthode basée sur les déformations est introduite dans ce cahier technique pour la vérification sismique des constructions existantes.
- 2.3.2 La sécurité structurale et, lorsque cela s'avère nécessaire, l'aptitude au service des structures porteuses déformables peuvent être étudiées en appliquant aussi bien la méthode basée sur les forces que la méthode basée sur les déformations.
- 2.3.3 La sécurité structurale et, lorsque cela s'avère nécessaire, l'aptitude au service des structures porteuses à déformabilité limitée doivent être étudiées en appliquant la méthode basée sur les forces.
- 2.3.4 L'aptitude au service doit être étudiée selon le chiffre 4.4.4 de la norme SIA 260. Dans ce cadre, la diminution de rigidité due à des dommages subis par la structure porteuse, tels que la fissuration, doit être prise en compte.
- 2.3.5 Les défauts relatifs à la conception et à la construction doivent être identifiés en examinant l'ouvrage sur la base des conditions énumérées au tableau 27 de la norme SIA 261.

2.4 Procédure

2.4.1 L'appréciation de la sécurité parasismique fait l'objet ou fait partie d'une vérification selon la norme SIA 260, figure 1, ou selon la norme SIA 469. Les démarches de niveau supérieur sont réglementées dans ces documents.

2.4.2 Le contrôle de la sécurité parasismique comprend les trois étapes présentées ci-après.

2.4.2.1 Relevé de l'état

- Préparation des données de base à l'aide du dossier de construction et de relevés sur l'objet
- Attribution de l'ouvrage à l'une des classes d'ouvrages selon la norme SIA 261, chiffre 16.3
- Etude de la conception et des détails constructifs de l'ouvrage selon le chiffre 2.3.5
- Détermination des valeurs mécaniques pertinentes des matériaux présents selon le chiffre 3
- Etude de la sécurité parasismique
 - Analyse de la structure porteuse (avec la méthode basée sur les forces ou avec celle basée sur les déformations) selon le chiffre 4
 - Détermination de l'action sismique selon le chiffre 5, ainsi que des actions concomitantes à considérer pour la situation de risque Séisme
 - Détermination de la capacité portante selon le chiffre 6 pour les constructions en béton, le chiffre 7 pour la maçonnerie et le chiffre 8 pour les constructions en acier et les constructions mixtes en acier-béton
 - Pour la CO III: détermination du comportement en service
 - Etude du comportement des éléments de construction non porteurs selon le chiffre 7.6
 - Calcul du facteur de conformité α_{eff} pour tous les éléments de construction selon le chiffre 9.1.

2.4.2.2 Appréciation de la sécurité parasismique

- Appréciation par le calcul selon le chiffre 9.1, par comparaison entre le facteur de conformité α_{eff} et les facteurs de réduction α_{adm} et α_{min}
- Appréciation de la sécurité parasismique des éléments de construction non porteurs
- Le cas échéant, évaluation de la proportionnalité et de l'exigibilité selon le chiffre 10.

2.4.2.3 Recommandations d'intervention

- Propositions pour la décision de démarches ultérieures selon le chiffre 9.3.

3 MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

3.1 Généralités

- 3.1.1 La qualité des matériaux de construction utilisés peut généralement être extraite du dossier de construction.
- 3.1.2 Les modifications éventuelles des dimensions géométriques et/ou des propriétés des matériaux depuis la construction (transformations, phénomènes de dégradation, etc.) doivent être prises en compte.

3.2 Propriétés selon le dossier de construction

3.2.1 Béton

- 3.2.1.1 Si le dossier de construction comprend des données relatives au béton utilisé et qu'aucun indice ne permet de supposer que les exigences n'ont pas été respectées, les valeurs caractéristiques et les valeurs de calcul de la résistance à la compression et de la contrainte limite de cisaillement pour un béton âgé de 28 jours selon le tableau 5 de l'annexe A peuvent être appliquées.
- 3.2.1.2 Si des résultats de contrôles de production documentés montrent que le béton utilisé répond aux exigences formulées pour un béton plus performant que le béton exigé, ceci peut être pris en compte.
- 3.2.1.3 L'augmentation avec l'âge de la résistance à la compression du béton sera prise en compte. S'il n'existe aucune donnée spécifique, la figure 1 de la norme SIA 262 peut être utilisée.

3.2.2 Acier d'armature passive et acier de précontrainte

- 3.2.2.1 Si l'acier d'armature passive peut être identifié sans ambiguïté, la classe de ductilité ainsi que les valeurs caractéristiques et les valeurs de calcul des propriétés mécaniques données dans le tableau 6 de l'annexe A peuvent être appliquées.
- 3.2.2.2 Pour l'acier de précontrainte, les valeurs caractéristiques et les valeurs de calcul des propriétés mécaniques seront déterminées à partir des spécifications de produits de l'époque.

3.2.3 Maçonnerie

Si le dossier de construction comprend des données relatives à la maçonnerie utilisée, les valeurs de calcul de la résistance des briques et agglomérés et de la résistance à la compression de la maçonnerie selon le tableau 7 et le tableau 8 de l'annexe B peuvent être appliquées.

3.2.4 Acier de construction

Si le dossier de construction comprend des données relatives à l'acier utilisé, les propriétés mécaniques de l'acier correspondant dans la norme SIA 263, selon le tableau 9 de l'annexe C peuvent être appliquées.

3.3 Propriétés déterminées par sondages

- 3.3.1 La procédure décrite au chiffre 3.4 de la recommandation SIA 162/5 doit être suivie lorsque les caractéristiques mécaniques du béton, de l'acier d'armature passive et de l'acier de précontrainte sont déterminées par sondages.
- 3.3.2 Les valeurs caractéristiques et les valeurs de calcul actualisées pour le béton, l'acier d'armature passive et l'acier de précontrainte, conformément au sens des chiffres 2.3.2 et 4.2 de la norme SIA 262, doivent être déterminées à partir des valeurs de résistance mesurées.

4 ANALYSE STRUCTURALE

4.1 Généralités

- 4.1.1 La rigidité des éléments de construction à utiliser pour les calculs correspond à une valeur moyenne jusqu'au début du domaine plastique. Des indications relatives à la rigidité se trouvent au chiffre 6 pour les constructions en béton et au chiffre 7 pour les constructions en maçonnerie.
- 4.1.2 Outre la résistance à la flexion des éléments de construction, leur rigidité au cisaillement ainsi que la flexibilité du sol de fondation peuvent également être prises en compte.
- 4.1.3 Si les fréquences propres sont déterminées par des mesures de vibrations, la rigidité déterminante pour l'action sismique selon le chiffre 4.1.1 doit être estimée en tenant compte de la diminution de rigidité jusqu'au début du domaine plastique.
- 4.1.4 Pour les systèmes porteurs mixtes, une rigidité réaliste tenant compte des différents éléments de construction utilisés doit être appliquée.
- 4.1.5 Pour les bâtiments rigidifiés par des parois porteuses, l'effet de cadre dû aux planchers peut être pris en compte.
- 4.1.6 Pour les bâtiments comprenant un sous-sol rigide, on peut admettre le niveau d'encastrement au rez-de-chaussée pour déterminer l'action sismique. Il faut vérifier le cheminement des efforts correspondants jusque dans le sol de fondation.

4.2 Analyse structurale basée sur les forces

- 4.2.1 L'analyse structurale basée sur les forces est effectuée de manière analogue à la procédure de la norme SIA 261, chiffre 16.5. Le coefficient de comportement q doit être fixé selon le chiffre 6 pour les constructions en béton et selon les normes SIA 263 à 266 pour tous les autres matériaux de construction. En cas de système porteur mixte, le coefficient de comportement de l'élément ayant le coefficient le plus bas doit être sélectionné.
- 4.2.2 Même si les conditions à remplir pour utiliser la méthode des forces de remplacement selon la norme SIA 261, chiffre 16.5.2.1, sont satisfaites, il est recommandé d'appliquer la méthode du spectre de réponse, les modes de vibration propre d'ordres supérieurs pouvant alors être généralement négligés.
- 4.2.3 L'étude de la sécurité structurale basée sur les forces est effectuée au niveau de dimensionnement, conformément à la norme SIA 260.
- 4.2.4 Les valeurs de calcul des propriétés des matériaux doivent être choisies selon le chiffre 3.2 ou déterminées selon le chiffre 3.3.
- 4.2.5 La résistance ultime des éléments de construction et des sections doit être déterminée selon les normes applicables SIA 262 à 266.

4.3 Analyse structurale basée sur les déformations

- 4.3.1 Lorsque l'analyse structurale est basée sur les déformations, les effets des actions sont calculés au moyen d'un modèle structural statique non linéaire.
- 4.3.2 Si le système structural peut être considéré comme régulier en plan conformément à la norme SIA 261, chiffre 16.5.1.3, un modèle structural plan pour chacune des deux directions principales peut être appliqué. Dans les autres cas, un modèle tridimensionnel est nécessaire.
- 4.3.3 Lorsque les conditions à remplir pour l'application de modèles structuraux plans dans chacune des deux directions principales sont satisfaites, les effets de torsion peuvent être négligés.

- 4.3.4 Lorsqu'un modèle structural tridimensionnel est utilisé, la position du centre de masse des différents étages selon les deux directions principales est fixée comme suit pour tenir compte des effets de torsion dus à une excentricité accidentelle:

$$e_{d,sup} = e + 0,05 b \quad (1)$$

$$e_{d,inf} = e - 0,05 b \quad (2)$$

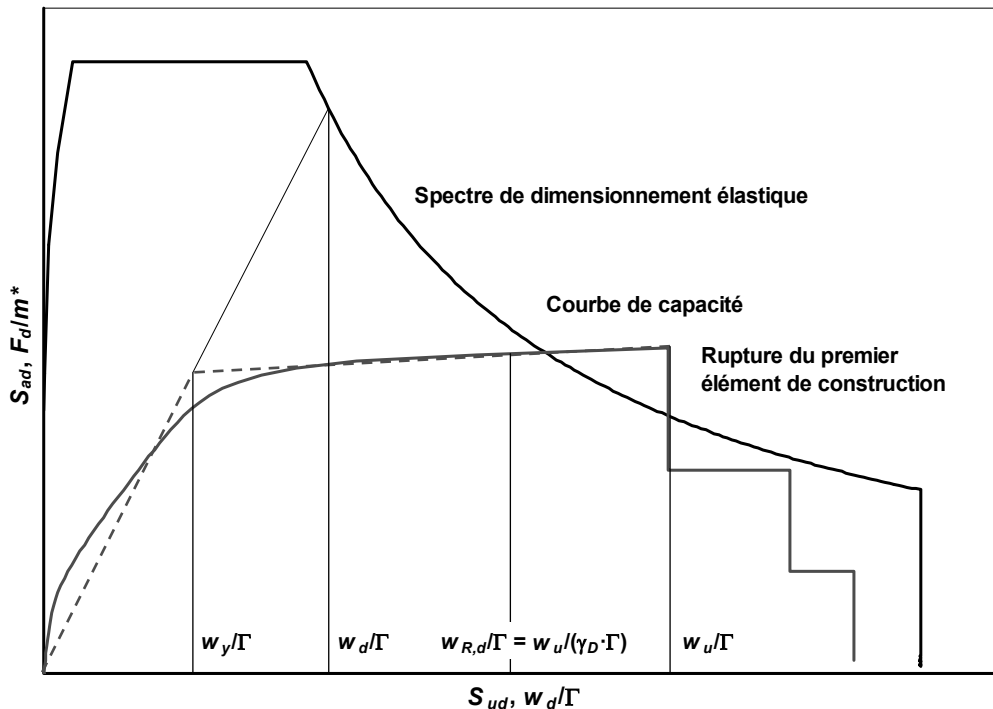
où e désigne l'excentricité effective du centre de masse par rapport au centre de rigidité de l'étage considéré et b la largeur du bâtiment mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique.

- 4.3.5 Les effets dus à la torsion peuvent être calculés au moyen d'un modèle structural linéaire, en tenant compte du moment d'inertie de rotation.

La documentation D 0171 Erdbebengerechter Entwurf und Kapazitätsbemessung eines Gebäudes mit Stahlbetontragwänden comprend des indications et des aides de calcul pour la prise en compte de la torsion.

- 4.3.6 Pour les propriétés mécaniques des matériaux de construction, un comportement élasto-plastique idéalisé peut être employé. Pour la rigidité dans le domaine élastique linéaire les chiffres 4.1.1 et 4.1.2 doivent être respectés. La résistance à employer dans le domaine plastique idéalisé doit être la résistance ultime selon le chiffre 6 pour les constructions en béton et le chiffre 7 pour les constructions en maçonnerie.
- 4.3.7 L'étude de la résistance basée sur les déformations est effectuée en utilisant les valeurs caractéristiques des propriétés des matériaux afin d'appréhender plus précisément le comportement réel en déformation des éléments de construction. Cette hypothèse favorable est compensée en réduisant la capacité de déformation de l'élément considéré par un facteur partiel γ_D .
- 4.3.8 Le calcul de la courbe de capacité est effectué à l'aide d'un oscillateur simple équivalent correspondant au mode de vibration fondamental.
- 4.3.9 La courbe de capacité s'obtient en augmentant progressivement la force de remplacement horizontale F_d sous l'action constante due aux poids propres jusqu'à ce que la valeur spectrale correspondante du déplacement horizontal atteigne la valeur extraite du spectre de dimensionnement élastique en déplacement (déplacement cible w_d/Γ).

Figure 1 Spectre de dimensionnement élastique et courbe de capacité normalisée selon les grandeurs modales m^* et Γ , afin de déterminer le déplacement cible w_d . La procédure de détermination de w_d illustrée ici concerne uniquement les périodes $T > 0,7$ s, pour lesquelles le principe des déplacements égaux est applicable.



- 4.3.10 Le déplacement cible w_d est calculé, pour le point déterminant, à partir des déformations des différents éléments porteurs.

Le chapitre 4 et l'annexe B de la norme prEN1998-1 fournissent des informations supplémentaires à ce sujet.

5 ACTIONS

5.1 Généralités

- 5.1.1 Le degré de protection d'un ouvrage existant est fixé, comme pour les nouveaux ouvrages, en l'assignant à une classe d'ouvrage avec le facteur d'importance γ_f correspondant, selon le chiffre 16.3 de la norme SIA 261.
- 5.1.2 En règle générale, la valeur de calcul de l'accélération horizontale du sol a_{gd} , la classe de sol de fondation et les valeurs des paramètres des spectres de réponse doivent être déterminés selon le chiffre 16.2 de la norme SIA 261.
- 5.1.3 De manière alternative, un spectre de réponse propre au site peut être déterminé en procédant à une étude dynamique du sol de fondation.

Les valeurs spectrales de l'action sismique déterminées par une étude dynamique du sol de fondation propre au site sont fréquemment inférieures dans le domaine de périodes de vibration déterminant pour l'ouvrage considéré. Les spectres de réponse de la norme SIA 261 tiennent compte d'une certaine variation des caractéristiques locales du sol de fondation à l'intérieur d'une classe de fondation.

L'Office fédéral des eaux et de la géologie promeut la cartographie de la répartition locale des classes de sols de fondation sur la base de la carte nationale au 1:25'000 (ordre de priorité: zones 3a et 3b, zone 2, zone 1) et met les cartes à disposition sur Internet.

5.2 Actions sismiques pour la méthode basée sur les forces

- 5.2.1 Pour la méthode basée sur les forces, s'il n'existe pas de spectre de réponse propre au site selon le chiffre 5.1.3, le spectre de réponse élastique en accélération est donné selon le chiffre 16.2.3 de la norme SIA 261.
- 5.2.2 Les spectres de dimensionnement en accélération horizontale et verticale doivent être déterminés selon le chiffre 16.2.4 de la norme SIA 261. Le coefficient de comportement q des bâtiments en béton armé existants sera déterminé selon le chiffre 6.1. Pour d'autres matériaux de construction, le coefficient de comportement q doit être choisi selon les indications des normes SIA 263 à 266.

5.3 Actions sismiques pour la méthode basée sur les déformations

- 5.3.1 Pour la méthode basée sur les déformations, l'action sismique est représentée par les spectres de dimensionnement élastiques en déplacement et en accélération.
- 5.3.2 S'il n'existe pas de spectre de réponse propre au site selon le chiffre 5.1.3, le spectre de dimensionnement élastique en déplacement horizontal pour un amortissement visqueux de 5% est déterminé comme suit, en tenant compte du facteur d'importance γ_f .

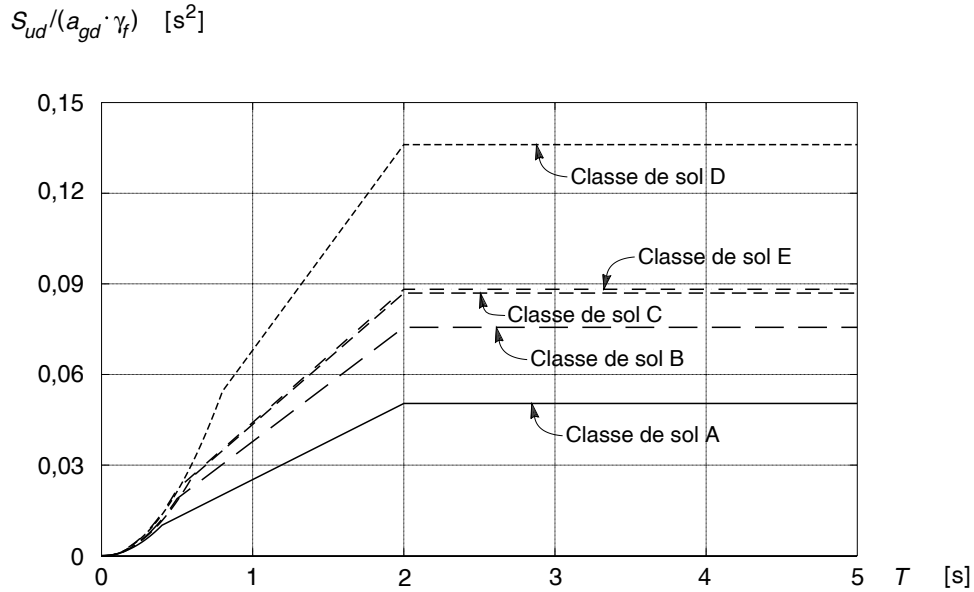
$$S_{ud} = 0,025 \cdot \gamma_f \cdot a_{gd} \cdot S \left(1 + \frac{1,5 \cdot T}{T_B} \right) T^2 \quad (0 \leq T \leq T_B) \quad (3)$$

$$S_{ud} = 0,063 \cdot \gamma_f \cdot a_{gd} \cdot S \cdot T^2 \quad (T_B \leq T \leq T_C) \quad (4)$$

$$S_{ud} = 0,063 \cdot \gamma_f \cdot a_{gd} \cdot S \cdot T_C \cdot T \quad (T_C \leq T \leq T_D) \quad (5)$$

$$S_{ud} = 0,063 \cdot \gamma_f \cdot a_{gd} \cdot S \cdot T_C \cdot T_D \quad (T \geq T_D) \quad (6)$$

Les paramètres S , T_B , T_C et T_D sont donnés dans le tableau 25 de la norme SIA 261.

Figure 2 Spectres de dimensionnement élastiques en déplacement normalisés par $a_{gd} \cdot \gamma_f$ 

5.3.3 Le spectre de dimensionnement élastique en accélération S_{ad} est déterminé en appliquant l'équation (7).

$$S_{ad} = \frac{4\pi^2}{T^2} S_{ud} \quad (7)$$

5.4 Actions sismiques pour la détermination du comportement en service

Pour déterminer le comportement en service pour la classe d'ouvrage III, une action sismique réduite de 50% par rapport à la détermination de la capacité portante doit être appliquée.

En appliquant un facteur d'importance $\gamma_f = 1,4$ pour l'évaluation de l'aptitude au service pour la classe d'ouvrage III, on obtient globalement une action sismique réduite à 70% de la valeur utilisée pour l'évaluation de la sécurité structurale pour la classe d'ouvrage I.

6 CAPACITÉ PORTANTE DES CONSTRUCTIONS EN BÉTON

6.1 Méthode basée sur les forces

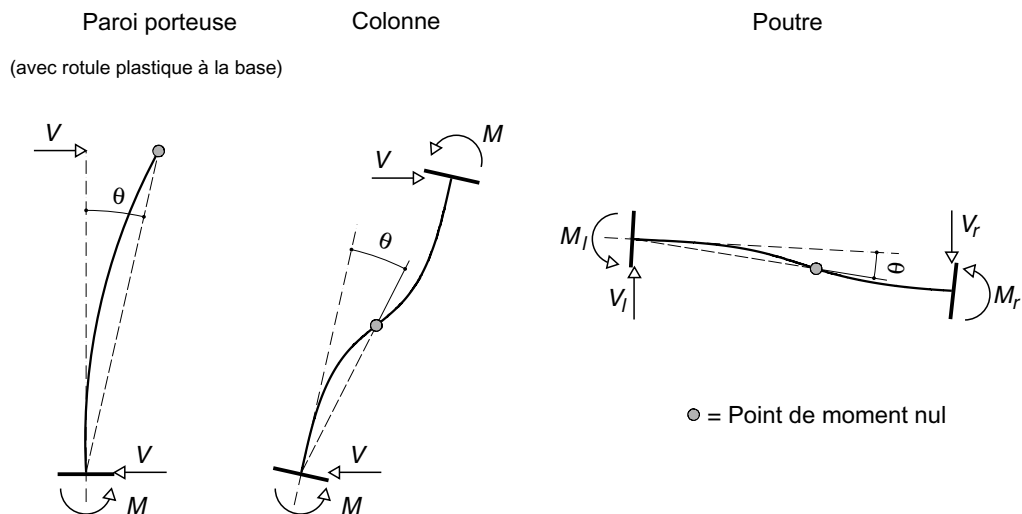
Dans la méthode basée sur les forces, on applique le coefficient de comportement q donné au chiffre 4.3.9.2.2 de la norme SIA 262. Si des mesures favorisant la ductilité ont été prises pour tous les éléments de construction porteurs essentiels, on peut admettre un coefficient de comportement q supérieur, mais toutefois pas plus élevé qu'indiqué au chiffre 4.3.9.3.5 de la norme SIA 262.

6.2 Méthode basée sur les déformations

6.2.1 Dans la méthode basée sur les déformations, l'étude de la sécurité parasismique d'un élément de construction consiste à comparer l'effet (déformation) de l'action sismique selon les normes et la capacité de déformation selon le chiffre 6.2.13.

Pour le béton armé, la rotation de la corde est comparée au niveau de l'élément de construction considéré.

Figure 3 Illustration de la rotation de la corde



6.2.2 Les mécanismes de rupture fragile qui excluent l'application de la méthode basée sur les déformations comprennent notamment:

- la rupture d'effort tranchant
- la rupture par flexion avec rupture du béton avant la plastification de l'acier
- la rupture par flexion par suite de la rupture en traction de l'armature longitudinale avec un faible allongement plastique.

En l'absence d'investigation spécifique, on peut admettre que la rupture de l'armature longitudinale avec un faible allongement plastique se produit toujours pour des aciers d'armature avec $(f_t / f_s)_k < 1,08$.

6.2.3 Les éléments de construction dont la seule fonction est de contribuer à la transmission des charges verticales doivent être à même d'assurer cette fonction même sous les déformations sismiques imposées.

6.2.4 Pour déterminer la capacité de déformation des éléments de construction, les valeurs caractéristiques de la résistance à la compression du béton sur cylindre ainsi que de la limite d'écoulement et de la résistance à la traction de l'acier d'armature passive sont choisies selon le chiffre 3.2 ou déterminées selon le chiffre 3.3.

6.2.5 Pour déterminer la capacité de déformation locale d'un élément de construction, on peut admettre que l'allongement de l'acier d'armature passive est égal à ε_{uk} au maximum. La valeur de calcul de l'allongement spécifique de rupture ε_{uk} est choisie selon le tableau 6 ou déterminée selon le tableau 4 de la norme 262/1.

Pour les sections dont la résistance nominale à la flexion est inférieure au double du moment de fissuration, l'allongement maximal de l'acier d'armature passive sera ramené à $0,5 \varepsilon_{uk}$.

6.2.6 La déformation spécifique de rupture du béton ε_{cu} est fixée en tenant compte de l'armature de frettage effectivement présente. En l'absence d'investigation détaillée, on peut admettre que $\varepsilon_{cu} = 0,004$. Le diagramme contrainte-déformation spécifique correspondant est indiqué à l'équation (8); il est représenté qualitativement à la figure 4.

$$\frac{\sigma_c}{f_{ck}} = \frac{r \cdot \zeta}{r - 1 + \zeta^r} \quad (8)$$

σ_c contrainte dans le béton

f_{ck} valeur caractéristique de la résistance à la compression du béton sur cylindre (fractile 5%)

r coefficient $r = \frac{E_{cm}}{E_{cm} - \left(\frac{f_{ck}}{\varepsilon_{c1d}}\right)}$ pour la détermination

du diagramme contrainte-déformation spécifique du béton

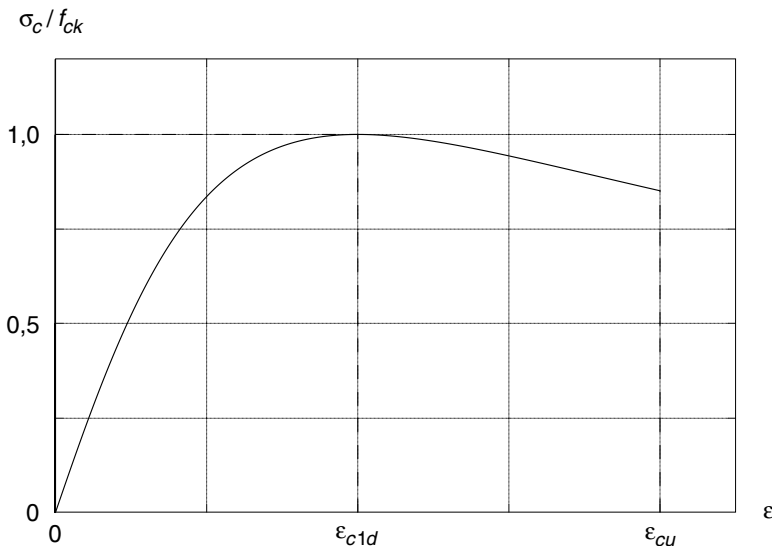
E_{cm} valeur moyenne du module d'élasticité du béton selon la norme SIA 262, chiffre 3.1.2.3.3

ε_{c1d} valeur de calcul de la déformation spécifique du béton lorsque f_{cd} est atteint, selon la norme SIA 262, tableau 8

ζ rapport des déformations spécifiques du béton: $\zeta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1d}}$

ε_c déformation spécifique du béton

Figure 4 Diagramme contrainte-déformation spécifique idéalisé pour l'évaluation des constructions en béton selon la méthode basée sur les déformations



6.2.7 La rotation de la corde θ_y au début de l'allongement plastique vaut:

$$\theta_y = \phi_y \cdot \frac{L_v}{3} \quad (9)$$

ϕ_y courbure nominale de plastification de l'élément de construction

L_v portée de cisaillement ($L_v = M/V$)

6.2.8 Dans le cas général, la courbure nominale de plastification ϕ_y , selon la figure 5 peut être déterminée comme suit:

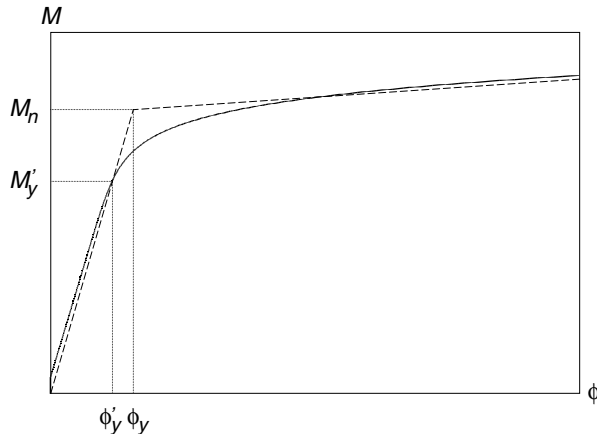
$$\phi_y = \phi'_y \cdot \frac{M_n}{M'_y} \quad (10)$$

ϕ'_y courbure de plastification de l'élément de construction

M_n résistance nominale à la flexion lorsque, soit la déformation spécifique du béton $\varepsilon_c = 0,004$, soit un allongement de l'acier $\varepsilon_s = 0,015$ est atteint

M'_y moment de plastification

Figure 5 Détermination de la courbure nominale de plastification



6.2.9 Pour des éléments de construction courants, la courbure nominale de plastification ϕ_y peut être estimée comme suit:

Colonne ronde:
$$\phi_y = 2,25 \cdot \frac{\varepsilon_{sk}}{D} \quad (11)$$

Colonne ou poutre rectangulaire:
$$\phi_y = 2,1 \cdot \frac{\varepsilon_{sk}}{l_s} \quad \text{resp.} \quad \phi_y = 2,1 \cdot \frac{\varepsilon_{sk}}{h_b} \quad (12)$$

Paroi porteuse rectangulaire:
$$\phi_y = 2,0 \cdot \frac{\varepsilon_{sk}}{l_w} \quad (13)$$

ε_{sk} valeur caractéristique de l'allongement de plastification de l'acier d'armature passive

D diamètre de la colonne

l_s longueur de la colonne dans la direction de sollicitation

h_b hauteur d'une poutre de section rectangulaire

l_w longueur de la paroi porteuse

6.2.10 La rotation de la corde θ_u lors de la rupture de l'élément de construction vaut:

$$\theta_u = \theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_{pl} \left(1 - \frac{0,5 \cdot L_{pl}}{L_v} \right) \quad (14)$$

θ_y rotation de la corde au début de l'allongement plastique

ϕ_u courbure ultime de l'élément de construction

ϕ_y courbure nominale de plastification de l'élément de construction

L_{pl} longueur de la rotule plastique

L_v portée de cisaillement ($L_v = M/V$)

6.2.11 La courbure ultime des éléments de construction ϕ_u est calculée en utilisant la déformation spécifique de rupture du béton ε_{cu} selon le chiffre 6.2.6 et l'allongement spécifique de rupture de l'acier d'armature passive ε_{uk} selon le chiffre 6.2.5.

6.2.12 La longueur de la rotule plastique L_{pl} peut être estimée comme suit:

$$L_{pl} = a_{st} (0,08 \cdot L_v + 0,022 \cdot f_s \cdot d_{bl}) \text{ [mm]} \quad (15)$$

a_{st} coefficient de nuance d'acier. $a_{st} = 0,8$ pour les aciers d'armature avec $(f_t / f_s)_k < 1,15$ et $a_{st} = 1,0$ pour les aciers d'armature avec $(f_t / f_s)_k \geq 1,15$

L_v portée de cisaillement ($L_v = M/V$) en [mm]

f_s limite d'écoulement de l'armature longitudinale, en [N/mm²]

d_{bl} diamètre de l'armature longitudinale, en [mm]

6.2.13 La capacité de déformation maximale θ_{max} d'un élément de construction vaut:

$$\theta_{max} = \frac{\theta_u}{\gamma_D} \quad (16)$$

θ_u rotation de la corde à la rupture selon le chiffre 6.2.10

γ_D facteur partiel pour la capacité de déformation: $\gamma_D = 1,3$ pour le béton armé

6.2.14 Si les dispositions constructives prescrites pour les éléments de construction soumis à l'action sismique, qui figurent au chiffre 5.7 de la norme SIA 262, ne sont pas respectées, la capacité de déformation maximale θ_{max} déterminée selon le chiffre 6.2.13 sera limitée à $3 \cdot \theta_y$.

6.2.15 Vérification de l'effort tranchant dans la méthode basée sur les déformations

6.2.15.1 Dans la méthode basée sur les déformations, les éléments de construction déterminants doivent être vérifiés pour un effort tranchant majoré V_d^+ , afin d'éviter qu'une rupture fragile d'effort tranchant n'apparaisse prématurément. Si ce critère ne peut pas être satisfait, on considérera que l'élément de construction a une déformabilité limitée et la structure porteuse sera étudiée en appliquant la méthode basée sur les forces.

6.2.15.2 Pour les parois porteuses, l'effort tranchant majoré V_d^+ vaut:

$$V_d^+ = \kappa \cdot V_d \quad (17)$$

κ facteur de majoration selon le chiffre 4.3.9.4.4 de la norme SIA 262

V_d valeur de calcul de l'effort tranchant. Il s'agit ici de l'effort tranchant correspondant à la rotation de la corde lors de la rupture.

6.2.15.3 Les colonnes et les poutres des structures porteuses composées de cadres doivent être examinées pour un effort tranchant majoré V_d^+ , selon le chiffre 4.3.9.5.2 de la norme SIA 262.

6.2.15.4 La résistance à l'effort tranchant d'un élément de construction est calculée selon la norme SIA 262, en tenant compte des valeurs de calcul des propriétés des matériaux.

7 CAPACITÉ PORTANTE DES CONSTRUCTIONS EN MAÇONNERIE

7.1 Principes

- 7.1.1 Les éléments de construction en maçonnerie doivent être vérifiés dans leur plan mais également hors de leur plan. La vérification perpendiculairement au plan des parois porteuses tiendra compte des élancements limites donnés au chiffre 7.4.2.
- 7.1.2 Ce cahier technique s'applique aux refends en maçonnerie. Pour les systèmes mixtes, on se référera à la série de normes EN 1998.
- 7.1.3 Ce cahier technique s'applique à la maçonnerie non armée. Pour la maçonnerie armée, on appliquera par analogie les prescriptions figurant au chiffre 6.
- 7.1.4 Les éléments de construction non porteurs en maçonnerie doivent être vérifiés en tenant compte de la valeur limite d'inclinaison donnée au chiffre 7.5.

7.2 Méthode basée sur les forces

La vérification par le calcul des éléments en maçonnerie est généralement effectuée en appliquant la méthode basée sur les forces.

7.3 Méthode basée sur les déformations

- 7.3.1 Dans la méthode basée sur les déformations, l'appréciation de la sécurité parasismique d'un élément de construction consiste à comparer l'effet (déformation) de l'action sismique selon les normes et la capacité de déformation.
Pour la maçonnerie, la comparaison s'effectue au niveau des inclinaisons d'étage.
- 7.3.2 Les hypothèses au sujet du comportement en déformation et de la capacité de déformation doivent provenir de normes reconnues ou justifiées par des essais restituant les conditions effectives.
Sont considérées comme normes reconnues:
- la norme SIA 266
 - le projet d'Eurocode 8, partie 3 (prEN 1998-3, en particulier l'annexe C)
- 7.3.3 Les mécanismes de rupture fragile excluant l'application de la méthode basée sur les déformations comprennent notamment:
- la rupture en flexion hors du plan par dépassement de la résistance ou par instabilité.

7.4 Résistance ultime perpendiculairement au plan de la paroi porteuse

- 7.4.1 En règle générale, la résistance ultime dans la direction perpendiculaire au plan de la paroi porteuse n'est pas exprimée de manière formelle, mais est donnée par comparaison de l'élançement de la paroi porteuse avec des valeurs limites.
- 7.4.2 Pour exclure toute rupture hors plan, l'élançement d'une paroi porteuse en maçonnerie non armée, donné par le rapport entre sa hauteur libre h et son épaisseur t , doit être inférieur aux valeurs figurant dans le tableau 1:

Tableau 1 Exigences concernant l'élançement h/t des parois pour α_{min}

	Zone sismique / classe d'ouvrage		
	Z 1 / CO I Z 1 / CO II	Z 2 / CO I Z 2 / CO II	Z 3 / CO I Z 3 / CO II CO III
Etage supérieur d'un bâtiment à plusieurs étages	≤ 18	≤ 17	≤ 17
Etage inférieur d'un bâtiment à plusieurs étages	≤ 20	≤ 19	≤ 18
Tous les autres cas	≤ 19	≤ 18	≤ 17

Si cette condition n'est pas satisfaite ou si un facteur de conformité α_{eff} plus élevé est requis, la sécurité structurale de la paroi porteuse perpendiculairement à son plan sera évaluée en appliquant la norme SIA 266.

Une autre manière de procéder consiste à appliquer la méthode du «rocking model» de la paroi fissurée selon le chapitre 7.8.2 de Paulay/Priestley 1992.

- 7.4.3 Les parois extérieures sur lesquelles ne repose aucun plancher doivent être assurées à chaque étage (plancher) contre les sollicitations hors plan.

7.5 Maçonnerie portant uniquement dans le sens vertical

- 7.5.1 Les éléments de maçonnerie considérés seulement pour leur contribution à la reprise des charges verticales doivent être à même de supporter les déformations imposées par les séismes dans leur plan sans perte d'intégrité.
- 7.5.2 Pour exclure toute rupture dans le plan des cloisons en maçonnerie non armée qui ne comportent pas de joints latéraux, l'inclinaison de la cloison dans son plan ne doit pas dépasser 0,5%.

7.6 Maçonnerie non porteuse

- 7.6.1 Si la défaillance des éléments de construction non porteurs peut mettre en danger des personnes, endommager la structure porteuse ou porter préjudice à l'exploitation d'installations importantes, il est nécessaire de contrôler l'élément non porteur lui-même, ainsi que ses liaisons, ses fixations ou ses ancrages.
- 7.6.2 Les éléments de construction non porteurs doivent être vérifiés par rapport aux actions sismiques hors de leur plan selon le chiffre 16.7 de la norme SIA 261. Pour ce faire, l'action sismique doit être déterminée au moyen de l'équation (48) et la résistance des éléments de construction et de leurs liaisons à la structure porteuse doit être déterminée en appliquant les valeurs de calcul des propriétés des matériaux. Le facteur de conformité α_{eff} sera déterminé par analogie avec le cas des éléments de construction porteurs (chiffre 9).

8 CAPACITÉ PORTANTE DES CONSTRUCTIONS EN ACIER ET DES CONSTRUCTIONS MIXTES ACIER-BÉTON

8.1 Méthode basée sur les forces

La vérification des constructions en acier et des constructions mixtes acier-béton est généralement effectuée en appliquant la méthode basée sur les forces.

8.2 Méthode basée sur les déformations

8.2.1 Dans la méthode basée sur les déformations, l'appréciation de la sécurité parasismique d'un élément de construction consiste à comparer l'effet (déformation) de l'action sismique selon les normes et la capacité de déformation selon l'Eurocode 8, partie 3 (prEN 1998-3, annexe B).

8.2.2 Les mécanismes de rupture excluant l'application de la méthode basée sur les déformations comprennent notamment:

- la rupture locale par instabilité
- la rupture en traction de boulons non précontraints
- la rupture en traction de boulons de classe de résistance 4.6 à 6.8

9 APPRÉCIATION DE LA SÉCURITÉ PARASISMIQUE ET RECOMMANDATIONS D'INTERVENTION

9.1 Appréciation par le calcul

9.1.1 La sécurité parasismique des constructions existantes est appréciée numériquement pour la situation de risque Séisme, en comparant le facteur de conformité α_{eff} avec les valeurs limites α_{min} et α_{adm} . Ces dernières prennent des valeurs inférieures à 1, car elles considèrent les aspects suivants:

- acceptation de dommages de plus grande ampleur pour les constructions existantes que pour les nouvelles constructions, en raison du coût supérieur des mesures d'intervention
- durée d'utilisation restante réduite.

9.1.2 Le facteur de conformité α_{eff} est déterminé par le rapport entre les actions et la résistance, ou la capacité de déformation selon les normes (capacité portante, respectivement comportement en service).

Appréciation de la sécurité structurale

$$\text{méthode basée sur les forces:} \quad \alpha_{eff} = \frac{R_d}{E_d} \quad (18)$$

$$\text{méthode basée sur les déformations:} \quad \alpha_{eff} = \frac{W_{R,d}}{W_d} \quad (19)$$

$$\text{Appréciation de l'aptitude au service:} \quad \alpha_{eff} = \frac{C_d}{W_d(0,5 \cdot A_d)} \quad (20)$$

Pour apprécier la résistance sismique à disposition, le facteur de conformité α_{eff} calculé est comparé avec les facteurs de réduction α_{adm} et α_{min} selon le tableau 2, ou la figure 6.

α_{min} représente une limitation du risque individuel et est donc indépendant de la durée d'utilisation restante.
 α_{adm} délimite les domaines où la proportionnalité est/n'est pas toujours déterminante.

9.1.3 L'appréciation numérique de la sécurité structurale est requise pour toutes les classes d'ouvrages.

$\alpha_{eff} < \alpha_{min}$ Intervention nécessaire.

$\alpha_{min} \leq \alpha_{eff} < \alpha_{adm}$ Appréciation de la proportionnalité selon le chapitre 10.
Intervention nécessaire si proportionnée.

$\alpha_{adm} \leq \alpha_{eff}$ Pas d'intervention recommandée, car en règle générale disproportionnée.

9.1.4 L'appréciation de l'aptitude au service par le calcul n'est exigée que pour la classe d'ouvrage III.

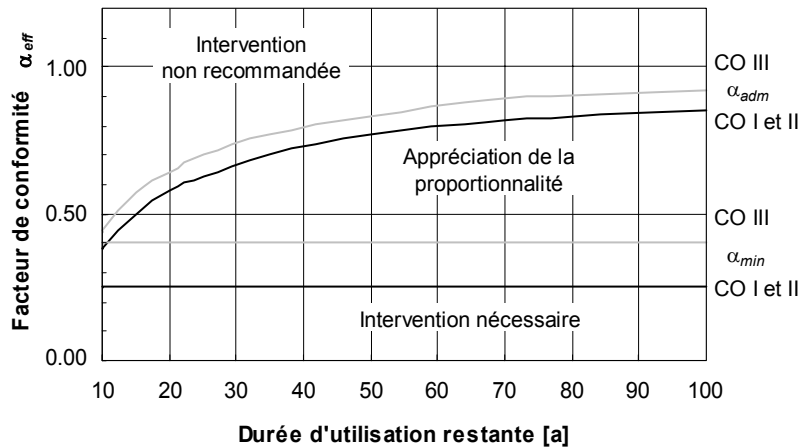
$\alpha_{eff} < \alpha_{min}$ Intervention nécessaire.

$\alpha_{min} \leq \alpha_{eff}$ Si une intervention pour garantir la sécurité structurale est proportionnée, des mesures simultanées pour garantir l'aptitude au service sont à considérer, en tenant compte de considérations dépassant le seul objet concerné.

9.1.4.1 L'étude de la proportionnalité d'un éventuel assainissement de la maçonnerie non porteuse doit être effectué indépendamment de celle relative à la structure porteuse.

Tableau 2 Valeurs limites α_{min} et α_{adm}

Durée d'utilisation restante	Classes d'ouvrages I et II		Classe d'ouvrage III	
	α_{adm}	α_{min}	α_{adm}	α_{min}
≥ 80 ans	0,83	0,25	0,90	0,40
60 ans	0,80	0,25	0,86	0,40
40 ans	0,72	0,25	0,79	0,40
20 ans	0,58	0,25	0,64	0,40
10 ans	0,38	0,25	0,44	0,40

Figure 6 Valeurs limites α_{min} et α_{adm} 

9.2 Appréciation de la conception et des mesures constructives

- 9.2.1 Une appréciation de la conception et des mesures constructives est nécessaire si des conditions obligatoires figurant dans le tableau 27 de la norme SIA 261 ne sont pas satisfaites.
- 9.2.2 Si certaines conditions obligatoires ne sont pas satisfaites, un modèle de calcul plus détaillé, qui prend en compte avec une précision suffisante le comportement dynamique de l'ouvrage et les conséquences du non-respect des conditions relatives à la conception et aux mesures constructives qui figurent dans le tableau 27 de la norme SIA 261 doit être choisi (selon les conditions, p. ex. modèle de structure porteuse tridimensionnel, interaction sol-structure, modes de vibration d'ordres supérieurs, flexibilité des planchers, etc.).
- 9.2.3 Dans les cas simples, il est possible de déterminer un facteur de conformité α_{eff} par le rapport entre l'action sismique A_R qui provoque la défaillance d'éléments de construction porteurs en raison du défaut considéré et l'action sismique A_d établie selon le chiffre 5:

$$\text{Appréciation de la conception et des mesures constructives : } \alpha_{eff} = \frac{A_R}{A_d} \quad (21)$$

Dans les cas plus complexes, l'appréciation doit être effectuée de manière qualitative.

9.3 Recommandations d'intervention

9.3.1 Généralités

9.3.1.1 Les recommandations d'intervention se basent sur les principes énoncés dans la recommandation SIA 162/5.

Le chapitre 5 «Recommandations d'intervention» de la recommandation SIA 162/5 est formulé indépendamment du matériau de construction, si bien qu'il peut être appliqué à tous les modes de construction.

9.3.1.2 Les interventions liées à la construction ont la priorité. Elles visent à élever la sécurité structurale et l'aptitude au service à un niveau adéquat.

9.3.1.3 Les interventions liées à l'exploitation permettent de réduire le risque encouru par les personnes, ce qui a notamment pour effet de modifier la proportionnalité des interventions liées à la construction.

9.3.1.4 La proportionnalité des mesures d'intervention peut être considérablement améliorée si leur coût ne doit pas être imputé totalement en tant que montant investi pour la sécurité SIK_M .

9.3.2 Interventions visant à atteindre les conditions fixées par les normes

9.3.2.1 En principe, les conditions fixées pour les nouveaux bâtiments par les normes sur les structures porteuses SIA 260 à 266 ($\alpha_{int} \geq 1,0$) doivent être fixées comme objectif.

9.3.2.2 Lorsque des interventions permettant d'atteindre les conditions fixées par les normes sont proportionnées, elles doivent être réalisées.

9.3.3 Interventions visant à approcher les conditions fixées par les normes

9.3.3.1 Des interventions partielles, sont celles qui améliorent le facteur de conformité α_{int} sans atteindre la valeur $\alpha_{int} = 1,0$.

9.3.3.2 Une intervention partielle consiste principalement à remédier aux défauts principaux de conception et de construction, et à augmenter les facteurs de conformité α_{eff} les plus faibles.

9.3.3.3 S'il s'avère, pour des raisons de proportionnalité, que les conditions fixées par les normes ne peuvent pas être atteintes de manière efficace, les interventions partielles qui apportent la plus grande amélioration tout en restant proportionnées ($\alpha_{int} < 1,0$) doivent être réalisées.

9.3.3.4 Si le risque individuel n'est pas acceptable ($\alpha_{eff} < \alpha_{min}$), des interventions partielles raisonnablement exigibles afin d'atteindre au moins le niveau $\alpha_{int} = \alpha_{min}$ doivent être réalisées.

9.3.3.5 S'il n'est pas possible d'atteindre un risque individuel acceptable sans sortir des limites du raisonnablement exigible, ce risque sera limité en réalisant des interventions liées à l'exploitation.

10 PROPORTIONNALITÉ ET EXIGIBILITÉ

10.1 Principes

- 10.1.1 La proportionnalité doit être appréciée en comparant le coût et l'efficacité des mesures de protection parasismique, en tenant compte des exigences de sécurité individuelle. Celles-ci sont déterminées par l'acceptabilité du risque individuel.
- 10.1.2 Pour la classe d'ouvrage III, les exigences relatives à la disponibilité des constructions et des installations interviennent également dans l'appréciation.
- 10.1.3 Le coût se réfère uniquement aux montants investis pour la protection. L'efficacité se réfère uniquement à la réduction du risque pour les personnes, exprimée sous la forme de vies sauvées. L'appréciation est effectuée en comparant le coût et l'efficacité de l'intervention exprimée sous la forme des coûts de sauvetage.

10.2 Risque pour les personnes

- 10.2.1 Le risque pour les personnes est déterminé en se basant sur les scénarios sismiques déterminants en Suisse. Pour chaque scénario, le risque est calculé en multipliant sa probabilité d'occurrence par le nombre de victimes attendues en cas de défaillance de l'ouvrage considéré. Le risque collectif pour les personnes est finalement obtenu en additionnant tous les scénarios.
- 10.2.2 Le risque individuel doit être distingué du risque collectif pour les personnes. Le risque individuel correspond à la probabilité de trouver la mort dans un ouvrage donné suite à un séisme.

10.3 Acceptabilité du risque individuel

Le risque individuel est acceptable si la probabilité de décès ne dépasse pas la valeur de 10^{-5} par an. C'est le cas lorsqu'on peut apporter la preuve que la sécurité structurale est suffisante pour une action multipliée par le facteur α_{min} . Ce facteur est indépendant de la durée d'utilisation restante.

10.4 Efficacité des mesures de protection parasismique

- 10.4.1 L'efficacité d'une mesure de protection parasismique est appréciée en fonction des coûts de sauvetage RK_M correspondants:

$$RK_M = \frac{SK_M}{\Delta R_M} \quad [\text{francs/vie sauvée}] \quad (22)$$

SK_M Coûts imputables à la sécurité pour une intervention en [francs/an] (voir chiffre 10.4.2)

ΔR_M Réduction du risque [vies sauvées/an] (voir chiffre 10.4.5).

- 10.4.2 Les coûts imputables à la sécurité SK_M se calculent comme suit:

$$SK_M = DF \cdot SIK_M \quad [\text{francs/an}] \quad (23)$$

DF Facteur d'escompte [1/an]

SIK_M Montant investi pour la sécurité [francs] (voir chiffre 10.4.4).

10.4.3 Le facteur d'escompte DF se calcule comme suit, à partir de la durée d'utilisation restante prévue n et du taux d'escompte i :

$$DF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad [1/\text{an}] \quad (24)$$

i Taux d'escompte [-]

n Durée d'utilisation restante [nombre d'années]

Un taux d'escompte i de 2% par an doit être appliqué.

Le tableau 3 présente des valeurs correspondantes.

Tableau 3 Facteurs d'escompte DF pour $i = 2\%$ par an

Durée d'utilisation restante n [ans]	5	10	20	30	40	50	60	80	100
Facteur d'escompte DF	0,212	0,111	0,061	0,045	0,037	0,032	0,029	0,025	0,023

10.4.4 Le montant investi pour la sécurité SIK_M comprend tous les montants imputables à la protection parasismique proprement dite qui ne peuvent pas être attribués à d'autres impératifs (remise en état et modifications de toute façon nécessaires).

10.4.5 La réduction du risque ΔR_M se calcule comme la différence du risque collectif aux personnes entre la situation initiale et la situation après réalisation des mesures de protection parasismique. Elle peut être évaluée comme suit :

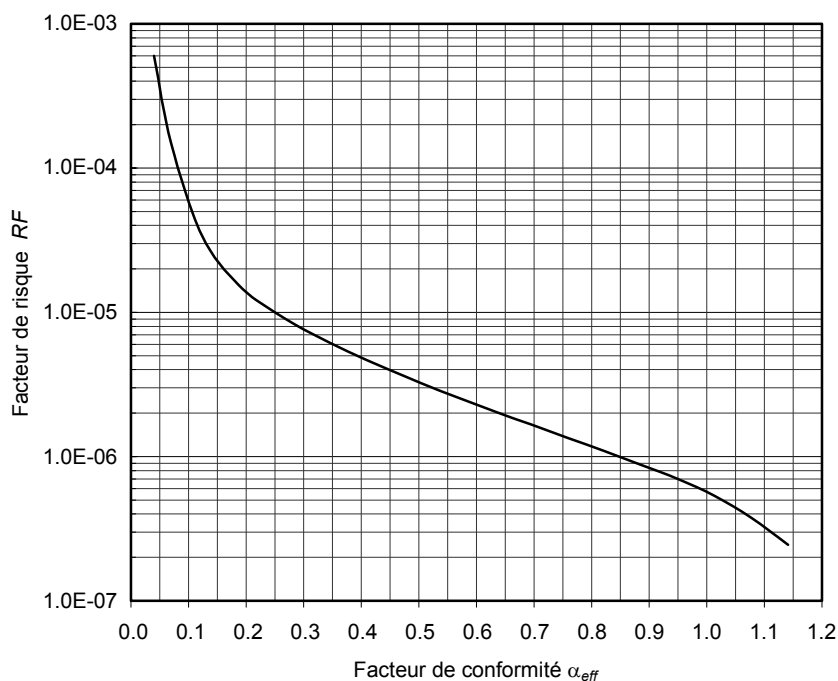
$$\Delta R_M = \Delta RF \cdot PB \quad [\text{vies sauvées/an}] \quad (25)$$

ΔRF Différence entre les facteurs de risque déterminants [-] (voir chiffre 10.4.6)

PB Valeur attendue de l'occupation (personnes) moyennée sur une année (voir chiffre 10.4.7).

10.4.6 La figure 7 donne les facteurs de risque RF en fonction du facteur de conformité déterminant α_{eff} . ΔRF correspond à la différence entre les facteurs de risque correspondants au facteur de conformité actuel et à celui qui peut être atteint par la réalisation de la mesure de protection parasismique.

Figure 7 Facteurs de risque RF pour le calcul de la réduction du risque



10.4.7 La valeur attendue de l'occupation PB (moyenne annuelle) peut être déterminée selon l'équation (26). Les personnes au voisinage de l'ouvrage qui sont mises en danger en cas de d'effondrement de celui-ci sont à prendre en compte.

$$PB = \frac{1}{8736} \sum_i B_i \cdot h_i \cdot d_i \cdot w_i \quad [\text{personnes/an}] \quad (26)$$

B_i Nombre de personnes correspondant à une occupation i [personnes]

h_i Nombre d'heures par jour pour l'occupation i [heures/jour]

d_i Nombre de jours par semaine pour l'occupation i [jours/semaine]

w_i Nombre de semaines par an pour l'occupation i [semaines/an].

10.4.8 Le tableau 4 fournit, pour des cas fréquents, des valeurs indicatives pour des occupations moyennes spécifiques qui sont à multiplier par l'indicateur correspondant au type de bâtiment considéré. L'occupation pour des bâtiments à affectation mixte peut résulter du cumul des différents usages.

Tableau 4 Valeurs indicatives d'occupations moyennes spécifiques

Type de bâtiment	Occupation moyenne spécifique [personnes/an·unité]	Indicateur propre au type de bâtiment [unité]
Immeuble d'habitation	0,2 – 0,6	Nombre de chambres selon déf. droit du bail
Bâtiment d'école	1 – 5	Nombre de salles de classe
Immeuble de bureaux	0,5 – 3	100 m ² de surface nette
Salle de réunion	0,003 – 0,3	Nombre de places assises
Hôpital	1,5 – 2,5	Nombre de lits
Centre commercial	7 – 18	100 m ² de surface de vente brute

10.5 Critères d'appréciation

10.5.1 Une mesure de protection parasismique est considérée comme proportionnée si les coûts de sauvetage se montent à moins de 10 millions de francs par vie sauvée.

10.5.2 Une mesure de protection parasismique est considérée comme raisonnablement exigible si les coûts de sauvetage se montent à moins de 100 millions de francs par vie sauvée.

10.6 Extension de l'appréciation du risque pour les personnes

10.6.1 Les dommages corporels résultant d'événements induits peuvent être estimés et pris en compte dans le calcul de la réduction du risque ΔR .

10.6.2 Dans les cas où, en sus des dommages corporels, des dommages pouvant être exprimés en unités monétaires atteignent une ampleur non négligeable, la formule étendue des coûts de sauvetage (27) peut être appliquée:

$$RK_M = \frac{SK_M - \Delta R_{GE}}{\Delta R_M} \quad [\text{francs/vie sauvée}] \quad (27)$$

ΔR_{GE} Risque dû aux dommages induits pouvant être exprimé en unité monétaire [Francs/an].

ANNEXE A CONSTRUCTION EN BÉTON (normatif)

Tableau 5 Résistance du béton à la compression et contrainte limite de cisaillement selon la norme utilisée

Norme, directive SIA	Sorte de béton	Armé / non armé	Dosage en ciment	Valeurs caractéristiques (fractile 5%)	Valeurs de calcul		
			[kg/m ³]	f_{ck} [N/mm ²]	f_{cd} [N/mm ²]	τ_{cd} [N/mm ²]	
262 ¹⁾ (2003)	
	C30/37			30,0	20,0	1,10	
	
162 (1989)	B20/10			9,6	6,4	0,63	
	B25/15			13,6	9,1	0,74	
	B30/20			17,6	11,7	0,84	
	B35/25			21,6	14,4	0,93	
	B40/30			25,6	17,1	1,01	
	B45/35			29,6	19,7	1,09	
	B50/40			33,6	21,6	1,16	
162/34 (1976) et 162 (1968)	BN	non armé	150	6,4	4,3	0,51	
			200	9,6	6,4	0,62	
			≥250	12,8	8,5	0,72	
	BH			≥250	19,2	12,8	0,88
	BN	armé	300	12,8	8,5	0,72	
	BH		≥300	19,2	12,8	0,88	
	BS		≥300	24,0	16,0	0,98	
162 (1956) et 115 (1935)	Béton normal (BN)		150	3,4	2,2	0,37	
			200	5,3	3,5	0,46	
			250	7,7	5,1	0,55	
			300	10,6	7,0	0,65	
	Béton à haute résistance (BH)		250 ²⁾	12,0	8,0	0,69	
			300	16,3	10,9	0,81	
			350	20,7	13,8	0,91	

¹⁾ fourni uniquement à titre comparatif
²⁾ seulement dans la norme SIA 115 (1935)

Tableau 6 Propriétés mécaniques de l'acier d'armature passive selon la norme utilisée

Norme SIA	Nuance d'acier	Classe de ductilité	Valeurs moyennes		Valeurs caractéristiques (fractile 5%)			Valeurs de calcul	
	Produit		f_{sm} [N/mm ²]	f_{tm} [N/mm ²]	f_{sk} [N/mm ²]	f_{tk} [N/mm ²]	ϵ_{uk} [‰]	f_{sd} [N/mm ²]	ϵ_{ud} [‰]
262 ¹⁾ (2003)	B500A	A	545	600	500	525	25	435	20
	B500B	B	550	710	500	540	50	435	45
	B450C	C			450 - 550	520 - 610 635 - 745	75	≥ 390	65
	Topar-S 500C	C	535	640	500	675	75	435	656
162 (1989)	S 235	B			235	360		205	
	S 500 a	B	550	710	500	600	50	435	45
	S 500 b	A	550		500	550		435	
	S 500 c	B	550	630	500	580	50	435	45
	S 500 d	A	545	600	500	550	25	435	20
	S 550	A	610	640	550	580		480	
162 (1968)	I	B	330		235	360		205	
	III a	B	550	580	450	550	50	390	
	Box-Ultra	C		730					
	Topar	C		630					
	III b	A	550	580-630	450	470		390	
IV	A			530	560		460		
162 (1956)	I	B			235	355		205	
	II a	B	440 - 530	530	345	410		300	
	Acier Caron	C	530	680					
	II b	B	440	610	345	510		300	
112 (1935)	Acier doux ordinaire	B	300 - 330		240	360 - 450			
	Acier spécial	B	400 - 480	500	350	520 - 620			
	Acier 52	B		590					

¹⁾ fourni uniquement à titre comparatif

ANNEXE B MAÇONNERIE (normatif)

Tableau 7 Résistance à la compression de la maçonnerie selon la norme utilisée SIA 113 (1965) à SIA 266 (2003)

Norme, recommandation SIA	Maçonnerie	Résistance des parpaings		Valeurs de calcul	
				Maçonnerie de parpaings	Maçonnerie de boutisses et panneresses
		f_{bk} [N/mm ²]	f_{bm} [N/mm ²]	f_{xd} [N/mm ²]	f_{xd} [N/mm ²]
266 ¹⁾ (2003)
	MB	28,0		3,5	2,98

V177 (1995)	MB	28,0		4,00	3,40
	MBL	14,0		2,00	1,70
	MC	14,0		4,00	3,40
	MCL	5,0		1,00	0,85
	MK	22,0		3,50	2,98
	MP	5,0		1,60	1,36
	MPL	2,5		0,90	0,77
177/2 (1992)	MBNV		≥ 20,0	2,50	2,00
	MBNC		≥ 20,0	3,50	2,50
	MBHC		≥ 25,0...35,0	4,00	3,00
	MBSC		≥ 40,0	5,50	4,00
	MKNV		≥ 15,0	2,50	2,00
	MKNC		≥ 15,0	3,50	3,00
	MKHC		≥ 25,0	4,50	4,00
	MCNC		≥ 12,0	3,50	2,50
	MGNK		≥ 3,0	0,70	-
MGHK		≥ 5,0	1,20	-	
177 (1980)	MBNV		≥ 20,0	2,29	2,08
	MBNC		≥ 20,0	3,75	2,92
	MBHC		≥ 25,0...35,0	5,42	3,54
	MBSC		≥ 40,0	8,75	6,46
	MKNV		≥ 15,0	2,92	2,50
	MKHV		≥ 25,0	4,17	3,75
	MKHC		≥ 25,0	5,42	4,58
	MKSC		≥ 35,0	6,67	5,63
	MCNC		≥ 12,0	3,75	-
	MGLK		≥ 2,0	0,58	-
	MGNK		≥ 3,0	0,83	-
	MGHK		≥ 5,0	1,33	-
113 (1965)	MBNV		≥ 15,0	2,29	2,08
	MBHV		≥ 25,0...35,0	3,54	2,92
	MBHC		≥ 25,0...35,0	5,21	3,54
	MBSC		≥ 40,0	8,75	6,46
	MKNV		≥ 15,0	2,29	1,92
	MKHV		≥ 25,0	2,71	2,29
	MKHC		≥ 25,0	5,00	4,17
	MKTC		≥ 35,0	6,67	5,63
	MZV		-	1,58	-
	MZC		-	3,33	-
	MZLV		-	0,83	-
	MGV		-	0,83	-

¹⁾ fourni uniquement à titre comparatif

Tableau 8 Résistance à la compression de la maçonnerie selon la norme SIA 113 (1943)

Norme SIA	Maçonnerie	Type de mortier	Résistance des parpaings		Valeurs de calcul Maçonnerie de parpaings	
			f_{bm} [N/mm ²]		f_{xd} [N/mm ²]	
			Normal	A haute résistance	Normal	A haute résistance
113 (1943)	Briques cuites: creuses, format normal	Ciment portland	22,0	35,0	3,50	5,50
		Ciment bâtard			2,25	3,25
		Chaux hydraulique			1,50	2,00
	Briques silico-calcaires: pleines	Ciment portland	16,0	25,0	3,50	5,50
		Ciment bâtard			2,25	3,25
		Chaux hydraulique			1,50	2,00
	Briques-cuites: grand format	Ciment portland	-		1,50	
		Ciment bâtard			1,00	
		Chaux hydraulique			0,50	
	Plots de ciment: creux	Ciment portland	22,0		4,00	
		Ciment bâtard			2,50	
		Chaux hydraulique			1,75	
	Plots de ciment: pleins	Ciment portland	25,0		5,00	
		Ciment bâtard			3,00	
		Chaux hydraulique			2,00	
	Briques de tunnel	Ciment portland	35,0		7,50	
		Ciment bâtard			5,00	
		Chaux hydraulique			-	

ANNEXE C CONSTRUCTION EN ACIER (normatif)

Tableau 9 Désignation des aciers de construction selon la norme utilisée

Norme SIA 263 (2003)	Norme SIA 161/1 (1994)	Normes SIA 161 SIA 161/1 (1990)	Norme SIA 161 (1979)	Norme SIA 161 (1974)	Norme SIA 161 (1956)	Norme SIA 112 (1935)
S 235	S235	Fe E 235	Fe 360	St 24/37	Acier doux ordinaire, acier moulé	Acier doux ordinaire, acier moulé
S 275	S275	Fe E 275	Fe 430	-		
S 355	S355	Fe E 355	Fe 510	St 36/52		
S 460	S460	Fe E 460	Fe E 460	-		

ANNEXE D ETABLISSEMENT DE PRIORITÉS (informatif)

Principes

La grande majorité des bâtiments en Suisse ont été construits sous le régime d'anciennes générations de normes, pour la plupart sans prescriptions parasismiques spécifiques. Les dépenses pour la vérification d'un bâtiment selon le présent cahier technique ne sont pas négligeables, et ceci déjà sans compter les dépenses liées pour la planification et la réalisation de mesures de renforcement.

Contrôle

Au vu de son importance, un contrôle du parc immobilier existant s'étendra sur une longue période de temps. Une amélioration de la situation du risque ne se fait cependant seulement lorsque les bâtiments insuffisants sont assainis. Du point de vue économique, les moyens à disposition doivent être engagés en première priorité pour des mesures d'assainissement de bâtiments menacés et en deuxième priorité seulement pour le contrôle de l'ensemble du parc immobilier.

Il est donc sensé et – dans le sens d'un établissement de priorités- indispensable, d'extraire les bâtiments les plus critiques de la masse. Différents critères, déjà appliqués à plusieurs reprises, servent à cet effet :

- Mise en priorité des bâtiments qui appartiennent aux classes d'ouvrage II et III et qui se trouvent dans les zones de risque sismique 2 et 3.
- Mise en priorité des bâtiments qui doivent être assainis pour d'autres raisons.
- Application de méthodes plus grossières qui permettent un premier contrôle en quelques heures (voir chiffre 0.2.3)
- Identification à l'aide de catalogues de types, des constructions significativement plus mauvaises que la moyenne. Les expériences tirées de l'application du présent cahier technique peuvent être rassemblées de manière ciblée et réunies dans un catalogue de types de bâtiments menacés.

Renforcement

Afin d'engager les moyens à disposition de manière rentable du point de vue économique, il faut faire des réflexions sur l'établissement de priorités pour la réalisation des mesures de renforcement. Il est pertinent de lier les mesures de renforcement avec des travaux de transformation et /ou d'assainissement général planifiés. Les coûts d'exploitation induits, considérables lors d'une modification de la structure porteuse, ne doivent ainsi pas être uniquement imputés au renforcement parasismique.

Groupe de travail SIA 261-1 Séismes et ouvrages existants

Président	Prof. Thomas Vogel, ing. dipl. EPF, Zürich	EPF Zurich
Membres	Thierry Berset, ing. dipl. EPF, Fribourg	Etablissement Cantonal d'Assurance des Bâtiments
	Prof. Dr. Alessandro Dazio, ing. dipl. EPF, Zurich	EPF Zurich
	Blaise Duvernay, ing. dipl. EPF, Bienne	Office Fédéral des Eaux et de la Géologie
	Ehrfried Kölz, ing. dipl. EPF, Gipf-Oberfrick	Bureau d'études
	Dr. Pierino Lestuzzi, ing. dipl. EPF, Lausanne	EPF Lausanne
	Dr. Rudolf Vogt, ing. dipl. EPF, Zurich	Bureau d'études
	Dr. Thomas Wenk, ing. dipl. EPF, Zurich	Bureau d'études
Protocole	Reto Bargähr, ing. dipl. EPF, Zurich	EPF Zurich

Adoption et entrée en vigueur

La Commission centrale des normes et règlements (CNR) de la SIA a adopté le présent cahier technique SIA 2018, *Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants*, le 26 août 2004.

Il entre en vigueur le 1^{er} novembre 2004.

Il remplace, en ce qui concerne les séismes, les chiffres 4 3, 5 31 et 5 32 de la Directive SIA 462 *Évaluation de la sécurité structurale des ouvrages existants*, édition de 1994.

SIA 2018, Copyright © 2004 by SIA Zurich

Tous les droits de reproduction, même partielle, de copie intégrale ou partielle (photocopie, microcopie, CD-ROM, etc.), de mise en programmes d'ordinateurs et de traduction sont réservés.

Proportionnalité et exigibilité

Ehrfried Kölz, Risk&Safety AG, Gipf-Oberfrick
Blaise Duvernay, Office Fédéral des Eaux et de la Géologie OFEG, Bienne

1 INTRODUCTION

Dans le cahier technique SIA 2018, la vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants s'effectue sur la base d'une méthode orientée sur le risque. La proportionnalité et l'exigibilité dans le contexte de la réduction du risque et du coût des interventions sont des notions centrales de cette méthode. La reconnaissance que les ouvrages existants doivent être traités sur une échelle différente de celle pour les nouveaux ouvrages en est le prérequis.

Dans la présente contribution, les bases pour la compréhension de la méthode orientée sur le risque sont données. Son application à l'aide du cahier technique est également illustrée par des exemples.

2 RISQUE SISMIQUE

2.1 Risque

Selon Kaplan et Garrick (1981), la notion de risque est liée à trois questions fondamentales:

- Que peut-il se passer ?
- Quelle en est la probabilité ?
- Quelles en sont les conséquences ?

La première question conduit à penser en situation d'aléa. La deuxième touche à la probabilité ou la fréquence avec laquelle cette situation d'aléa se produit. La troisième se concentre sur les conséquences indésirables dues à la situation d'aléa.

En tant que quantité, le risque R est décrit en général comme le produit de la probabilité d'occurrence W ou de la fréquence d'occurrence H par les dommages induits A déterminés avec une certaine unité :

$$R = W \cdot A \text{ resp. } R = H \cdot A \quad (1)$$

Afin de pouvoir déduire des priorités pour la réduction du risque pour les ouvrages existants, trois questions supplémentaires doivent être introduites :

- Que peut-on faire ?
- Que doit-on faire ?
- Peut-on se le permettre ?

La première question est centrée sur la palette des interventions constructives, techniques et organisationnelles à disposition. La deuxième concerne les exigences de sécurité de la société et plus généralement l'acceptation des risques ou l'acceptation d'un risque bien particulier. La troisième traite de la mise à disposition des moyens nécessaires pour pouvoir implémenter les mesures d'intervention.

Schneider (2000) résume ainsi la problématique ci-dessus; « Safety – A Matter of Risk, Cost and Consensus ».

2.2 Facteurs liés au risque

Le risque sismique est dominé par la défaillance possible des ouvrages et des conséquences indésirables qui en découlent. Les facteurs suivants y jouent un rôle important :

- l'aléa sismique régional et l'aléa local (effet de site)
- la vulnérabilité des ouvrages
- les valeurs et les conséquences des dommages

La figure 1 donne un aperçu global de ce contexte.

2.3 Aléa sismique

L'aléa sismique est en général caractérisé par des grandeurs qui décrivent l'effet des séismes. Parmi ces grandeurs, les intensités macrosismiques, qui englobent directement les dégâts et les effets observés lors de tremblements de terre, sont d'une grande importance historique. En Europe centrale, l'échelle dénommée European Macroseismic Scale (EMS98) est couramment utilisée. Pour des applications d'ingénierie, les valeurs spectrales de l'accélération, de la vitesse et du déplacement sont importantes.

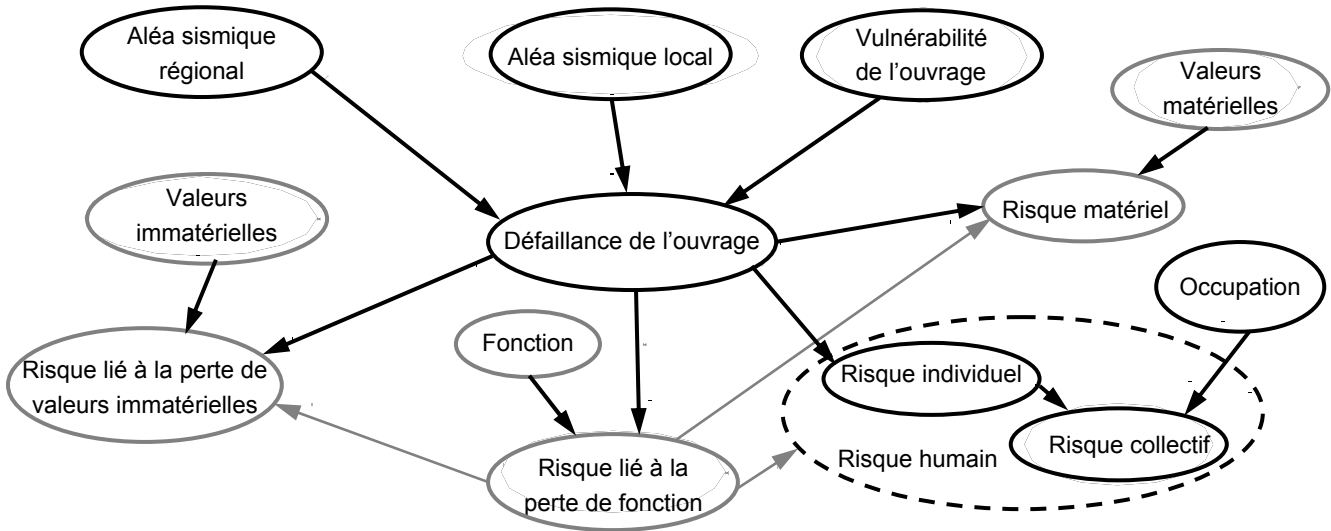


Fig. 1 : Le risque lié aux séismes en rapport avec l'endommagement possible des ouvrages

Pour caractériser l'aléa, ces grandeurs sont associées à des probabilités. Un rôle important est joué par la probabilité de dépassement. Elle donne la probabilité pour qu'une grandeur, par exemple une accélération, soit dépassée. La probabilité de dépassement annuelle est l'inverse de la période de retour, qui définit l'intervalle de temps moyen entre l'occurrence de deux tremblements de terre avec, par exemple, une certaine intensité ou une certaine accélération du sol.

L'estimation des périodes de retour de tremblements de terre s'appuie principalement sur l'interprétation et le classement d'un inventaire le plus complet possible d'évènements sismiques. Les évènements historiques ne sont le plus souvent décrits que de manière vague et au mieux caractérisés à l'aide d'intensités macrosismiques. Afin de pouvoir faire des prédictions sur des probabilités de dépassement, de l'accélération du sol par exemple, la connaissance historique des tremblements de terre doit être couplée aux connaissances sismologiques et géotectoniques, ainsi qu'aux connaissances liées aux enregistrements du réseau de mesure suisse. Il faut cependant garder à l'esprit que la période d'observation des tremblements de terre en Suisse correspond à l'ordre de grandeur des périodes de retour attendues pour des séismes importants.

2.4 Effets de site

Les effets d'un séisme sont en grande partie fonction des caractéristiques hydrogéologiques, géologiques, géotechniques et topographiques locales. Dans ce contexte, on parle d'aléa local ou de microzonage. Pour des ouvrages, l'effet d'augmentation des dommages résulte principalement d'une augmentation de l'accélération du sol ainsi que d'un décalage de la période des mouvements du sol dans un domaine critique pour la structure considérée. Un exemple est

présenté à la figure 2 (extrait de la carte provisoire de microzonage sismique spectral de la région de Brigue avec les spectres de réponse élastiques ; CREALP/Résonance/Tissières 2001, non publié).

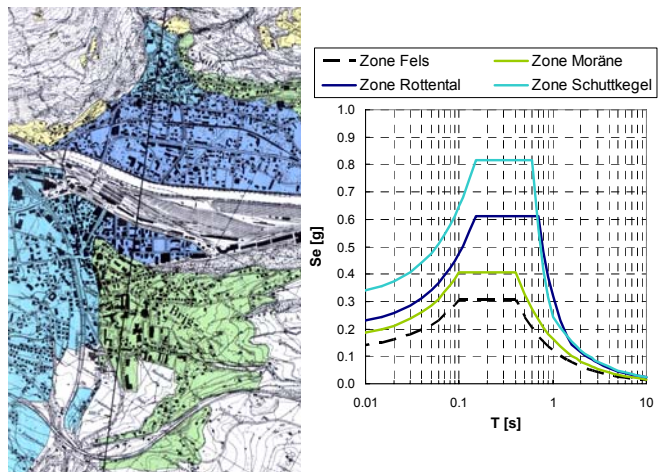


Fig. 2: Aléa local, exemple de Brigue

2.5 Vulnérabilité des ouvrages

La vulnérabilité décrit la relation entre l'importance d'un séisme et la probabilité qu'une structure subisse un dégât dû à un séisme de cette importance. Cette probabilité dépend :

- du concept structural
- du concept de dimensionnement
- des détails constructifs

Pour la description de la vulnérabilité, les grandeurs de l'action sismique sont mises en relation avec des grandeurs d'endommagement de l'ouvrage. Ainsi, l'EMS présente une relation entre l'intensité sismique et le degré de dommage qui est subi par un ouvrage appartenant à une classe de vulnérabilité donnée. Dans l'EMS, six classes de vulnérabilité allant de A à

F sont définies. La classe A représente la vulnérabilité la plus élevée. Un type structural est finalement caractérisé par ses probabilités d'appartenance aux classes de vulnérabilité. Le tableau 1 montre ce classement pour différents types structuraux où la plage possible de l'appartenance ainsi que l'appartenance la plus probable (en gras) sont représentées.

Type structural	Classe de vulnérabilité EMS		
Maçonnerie			
avec planchers en bois	A	B	C
avec planchers en béton	B	C	D
Structures avec cadres en b.a.			
sans dimensionnement parasismique	A	C	D
dim. pour action sismique modérée	B	D	E
dim. pour action sismique forte	C	E	F
Structures avec murs en b.a.			
sans dimensionnement parasismique	B	C	D
dim. pour action sismique modérée	C	D	E
dim. pour action sismique forte	D	E	F
Constructions en acier	D	E	F
Constructions en bois	C	D	E

Tableau 1: Attribution aux classes de vulnérabilité EMS

L'EMS distingue cinq degrés de dommage. Les degrés de dommage s'étendent du dommage léger (degré de dommage 1) jusqu'à l'effondrement partiel ou total (degré de dommage 5). Des courbes de vulnérabilité donnent la relation entre la vulnérabilité, l'intensité et les degrés de dommage. Un exemple est donné à la figure 3.

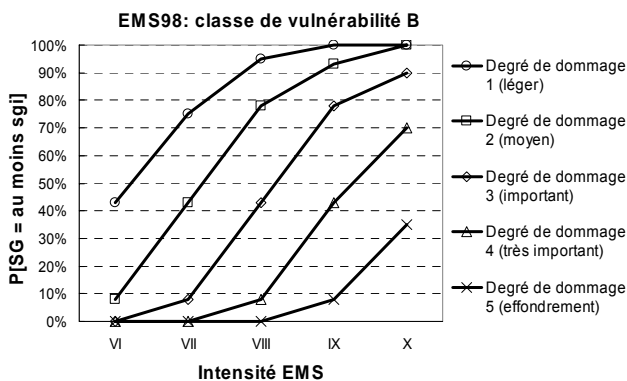


Fig. 3: Exemple de courbes de vulnérabilité EMS (Pellissier, 2003)

De telles courbes de vulnérabilité peuvent également être développées en relation avec l'accélération du sol ou le déplacement du sol en lieu et place de l'intensité (voir figure 4).

HAZUS / Maçonnerie, planchers rigides
> 3 étages, pré-normes

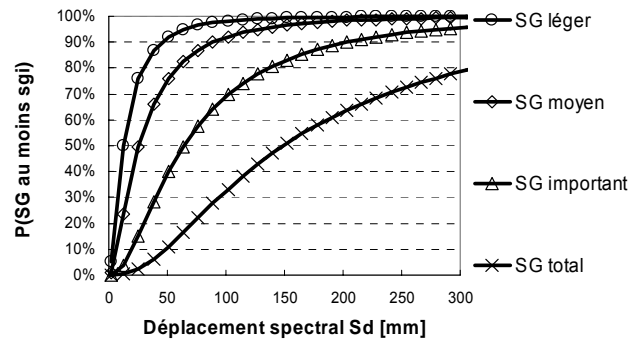


Fig. 4: Exemple de courbes de vulnérabilité HAZUS

La description de la vulnérabilité en fonction de l'intensité se base sur un savoir empirique tiré de l'observation du comportement d'ouvrages lors de séismes passés. Ce savoir est robuste mais très grossier s'il est appliqué à des cas particuliers. De ce fait, il est conseillé, en fonction de l'objectif poursuivi, de compléter ce savoir à l'aide de méthodes modernes et plus complètes de l'ingénierie des tremblements de terre qui permettent d'appréhender le comportement sismique des structures plus précisément.

2.6 Conséquences des dommages

Les conséquences principales liées à la défaillance d'ouvrages sont les suivantes :

- dommages humains
- dommages matériels
- perte de fonction
- dommages à des valeurs immatérielles

Lors d'un séisme, les dommages humains sont engendrés directement par l'écroulement de parties de l'ouvrage, par la chute d'installations et de conduites et indirectement par des incendies ainsi que d'autres phénomènes induits, par le retard ou l'absence de secours des personnes ensevelies ainsi que par la prise en charge insuffisante des survivants. En sus, des dommages financiers causés par la mort, l'invalidité ou les blessures sont engendrés.

Les dommages matériels sont engendrés également par les actions mécaniques ainsi que par les événements induits. Les dégâts matériels se mesurent en fonction de la valeur de l'objet concerné. Du point de vue de l'assurance, la valeur d'un bâtiment est une valeur actuelle. Le risque lié aux dommages immobiliers en Suisse est, selon l'estimation d'assurances, de l'ordre de quelques dizaines de centimes pour 1'000 francs de valeur immobilière.

Des dommages à un ouvrage peuvent en limiter l'aptitude au service et mener jusqu'à la perte de sa fonction. Une perte de fonction engendre des dommages induits. Les dommages induits en relation avec l'endommagement d'ouvrages faisant partie de la classe d'ouvrage III selon la SIA 261 ont une portée particulièrement importante. Ces dommages sont problématiques à quantifier car difficiles à recenser, tant dans l'espace que dans le temps.

Pour les dommages aux valeurs immatérielles, les dommages aux biens culturels et à l'environnement sont à considérer en plus des dommages humains. Un autre exemple de dommage immatériel est le dommage touchant à l'image. De tels dommages immatériels sont particulièrement difficiles à quantifier.

2.7 Limitations

Dans le cahier technique, la proportionnalité est considérée en relation avec les bâtiments. De ce fait, le risque aux personnes est au premier plan dans la vérification du critère de proportionnalité. On doit aussi garder à l'esprit que les tremblements de terre ont des conséquences multiples, dont la portée dans le temps et l'espace est très grande.

En rapport à la signification particulière des bâtiments de la classe d'ouvrage III et de celle sensiblement moindre des bâtiments de la classe d'ouvrage II, les facteurs d'importance sont à observer comme pour les bâtiments neufs.

3 RISQUE HUMAIN

3.1 Risque individuel et collectif

Dans le risque humain, le risque individuel est dissocié du risque collectif.

Dans le cahier technique SIA 2018, le niveau de sécurité minimal exigé est défini en relation avec l'acceptation du risque individuel. Le risque individuel donne la probabilité moyenne qu'un individu dans un bâtiment trouve la mort suite à un séisme (probabilité de décès). Comme relevé dans Vogel (2005), l'estimation du risque individuel se fait sur la base d'une personne qui se trouve en permanence dans le bâtiment évalué. Ainsi, le risque individuel est couplé directement à la sécurité structurale du bâtiment.

Dans le cahier technique, la probabilité de décès est déterminée, comme usuellement pratiqué, sur la base d'une période d'un an. Le tableau 2 donne quelques exemples de valeurs moyennes.

Pour le risque collectif, le nombre de personnes qui se trouvent dans le bâtiment ainsi que leur temps de présence sont pris en compte. Le risque collectif

est nécessaire pour pouvoir vérifier le critère de proportionnalité à l'aide des coûts de sauvetage.

Probabilité de décès moyenne par année et pour 100'000 personnes	
Mortalité par classe d'âge	
110	Individu de 25 ans
100	Individu de 35 ans
300	Individu de 45 ans
800	Individu de 55 ans
2'000	Individu de 65 ans
5'000	Individu de 75 ans
Mortalité additionnelle par activité professionnelle	
100	Abattage de bois
90	Travaux forestiers
50	Construction
15	Industrie chimique
10	Industrie des machines
5	Travail de bureau
Mortalité additionnelle par style de vie	
400	Fumer, 20 cig./jour
300	Boire, 1 bouteille/jour
150	Rouler en moto
20	Rouler en voiture (20-24 ans)
10	Piéton
10	Travaux ménagers
10	Voiture 10,000 km/an
5	Randonnée en montagne
3	Autoroute 10,000 km/an
1	Accident d'avion (par vol)
1	Train 10,000 km/an
0,5	Incendie de bâtiment
0,1	Foudroiement

Tableau 2 : Exemples de probabilités de décès (Schneider, 1996)

3.2 Facteurs de risque

Dans la figure 7 du cahier technique, le facteur de risque est représenté en fonction du facteur de conformité. Le facteur de risque est nécessaire pour estimer le risque aux personnes. Le facteur de risque représente pratiquement le risque individuel pour une personne qui se trouve dans un bâtiment durant un an. De manière à ce qu'une relation entre les facteurs de risque et les facteurs de conformité puisse être établie, ceux-ci doivent être estimés ou calculés.

Sur la base de l'EMS, le facteur de risque peut être estimé comme suit :

$$RF = \sum_{I_{EMS}=VI}^X P(I_{EMS}) \cdot \left(\sum_{SG=4}^5 P_{SG}(VK, I_{EMS}) \cdot P^*(I_{EMS}, SG) \right) \quad (2)$$

$P(I_{EMS})$ est la probabilité annuelle d'occurrence d'un séisme d'une intensité EMS déterminée pour un lieu

donné. Dans le contexte des normes SIA, de telles probabilités ont été définies pour les quatre zones sismiques 1, 2, 3a et 3b. Les périodes de retour des différentes intensités EMS sont contenues dans le tableau 3. Les probabilités d'occurrence sont calculées à l'aide des périodes de retour comme la différence entre la probabilité de dépassement du degré d'intensité considéré et la probabilité de dépassement du degré d'intensité immédiatement supérieur.

Intensité	EGA [m/s ²]	Période de retour [ans]			
		Zone 1	Zone 2	Zone 3a	Zone 3b
VI	0,4	260	110	70	50
VII	0,8	1'100	400	240	160
VIII	1,5	4'700	1'300	700	420
IX	2,6	20'000	6'000	2'400	1'000
X	4,0	60'000	28'000	10'000	4'600

Tableau 3 : Périodes de retour de séismes

P_{SG} est la probabilité qu'un bâtiment appartenant à une classe de vulnérabilité déterminée subisse un endommagement d'un certain degré pour un séisme d'intensité I_{EMS} . Dans ce cadre, seuls les degrés de dommage 4 (dommages très élevés) et 5 (écroulement ou quasi-écroulement) sont considérés, car ce sont principalement pour ces degrés de dommage que le risque aux personnes dû à la défaillance de la structure porteuse existe. P^* est la probabilité conditionnelle moyenne de trouver la mort dans un bâtiment ayant subi un degré de dommage SG lors d'un tremblement de terre d'intensité I_{EMS} . Pour le degré de dommage 4, des valeurs de P^* entre 1% et 6% pour l'intensité VI, jusqu'à des valeurs de 2% à 12% pour une intensité X, ont été prises. Pour le degré de dommage 5, des valeurs entre 10% et 30% (VI) jusqu'à des valeurs entre 20% et 60% (X) ont été prises.

VK	Zone 1		Zone 2		Zone 3a		Zone 3b	
A	2,00	6,00	4,00	20,00	8,00	30,00	10,00	50,00
B	0,40	2,00	1,00	5,00	3,00	10,00	5,00	20,00
C	0,10	0,50	0,30	2,00	0,70	3,00	1,00	6,00
D	0,02	0,10	0,07	0,40	0,20	0,90	0,30	2,00
E	0,01	0,03	0,01	0,08	0,04	0,20	0,07	0,40
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01

Tableau 4 : Plages de risque individuel (1/100'000 et par année) par classe de vulnérabilité VK.

Le tableau 4 montre les plages de variation de l'estimation du risque individuel en fonction de la

α_{eff}	0,04	0,07	0,12	0,19	0,25	0,31	0,38	0,44	0,5	0,57	0,63	0,7	0,76	0,82	0,89	0,95	1,01	1,08	1,14
RF	60,00	14,71	3,44	1,56	1,00	0,72	0,53	0,41	0,32	0,26	0,21	0,17	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05	0,04	0,02

Tableau 5 : Valeur de référence pour la figure 7 du cahier technique

classe de vulnérabilité et de la zone sismique.

Une fois les risques estimés et les facteurs de risque pour différentes classes de vulnérabilité fixés, les classes de vulnérabilité doivent être associées à des facteurs de conformité. Cette association est liée à une très grande incertitude, ceci d'autant plus qu'il n'existe pas encore d'expérience globale avec la nouvelle génération de normes SIA 260 et suivantes. De plus, le cahier technique met à disposition une méthode basée sur les déformations qui ouvrent de nouveaux horizons et permet fondamentalement d'obtenir des facteurs de conformité supérieurs à ceux obtenus avec des méthodes conventionnelles.

A l'aide de quelques applications pilotes, des explications concluantes ont pu être trouvées. Cependant, les applications pilotes ont également démontré qu'il faut attendre une grande dispersion dans l'établissement des facteurs de conformité dans la pratique. En complément, une relation entre l'accélération admissible, et ainsi le coefficient de conformité, et les classes de vulnérabilité EMS a été établie à l'aide de la notion de « base shear coefficient ». Finalement, la relation facteur de risque - facteur de conformité a été confortée à l'aide de réflexions sur le risque intégré sur l'ensemble du bâti et du besoin en investissements engendré.

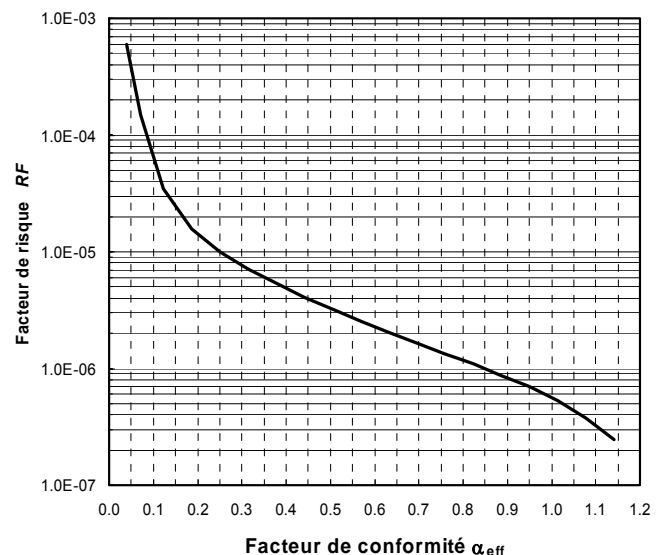


Fig. 5: Relation facteur de risque - facteur de conformité

Le groupe de travail SIA 261-1 a finalement adopté la courbe de la figure 5 pour le cahier technique. Ses valeurs de référence sont données ci-après.

4 COÛTS DE SAUVETAGE

Le critère central dans la vérification de la proportionnalité est constitué par les coûts de sauvetage. Les coûts de sauvetage RK_M permettent de vérifier l'efficacité des interventions et se calculent avec le quotient entre les coûts imputables à la sécurité SK_M et la réduction du risque ΔR_M engendrée par une intervention (ΔR_M est la différence entre le risque collectif avant et après la réalisation de la mesure de sécurité) :

$$RK_M = \frac{SK_M}{\Delta R_M} \quad (3)$$

L'unité des coûts de sauvetage est en [francs par vie sauvée]. Chaque décès évité signifie une vie sauvée. Quelques valeurs de coûts de sauvetage sont représentées dans le tableau 6.

Coûts de sauvetage	
Millions de francs par vie humaine sauvée	
0,1	Ceintures de sécurité pour voitures
0,5	Structures
1,0	
2,0	
5,0	S-Bahn Zürich
10,0	Norme parasismique SIA, 1989
100,0	Assainissement de l'amiante dans les
à	écoles
1'000,0	

Tableau 6 : Coûts de sauvetage (Schneider, 1996)

Afin de pouvoir calculer les coûts de sauvetage, il faut :

- recenser les interventions possibles
- estimer les coûts associés aux interventions
- estimer la réduction du risque associée aux interventions

4.1 Interventions

Les mesures d'intervention suivantes sont à disposition pour la mitigation du risque sismique :

- protection parasismique
- modification de l'utilisation
- acceptation du risque

La protection parasismique par des interventions constructives sur la structure porteuse et les éléments non porteurs, jusqu'à la sécurisation de conduites et d'installations, sont à l'avant plan. De telles interventions sont nécessaires de manière à atteindre au minimum α_{min} , aussi longtemps qu'elles restent exige-

bles. En deçà, des interventions sont à réaliser lorsqu'elles sont proportionnées. Les mesures d'intervention constructives doivent être robustes. Elles doivent améliorer la sécurité de manière fiable et importante afin d'être justifiées en regard des montants investis.

Lorsque des mesures d'intervention constructives proportionnées ne sont pas possibles, le risque peut être réduit par un changement d'utilisation. Par exemple, l'occupation du bâtiment peut être réduite pour diminuer le risque collectif.

Lorsque qu'il n'existe pas de possibilités d'intervention raisonnablement exigibles pour atteindre α_{min} , le risque doit être consciemment accepté.

4.2 Coûts imputables à la sécurité

Les coûts imputables à la sécurité SK_M , qui se trouvent au numérateur dans l'équation 3, se déterminent par le produit du facteur d'indexation DF avec le montant investi pour la sécurité S_{IKM} .

$$SK_M = DF \cdot S_{IKM} \quad (4)$$

Le montant investi pour la sécurité S_{IKM} englobe tous les montants qui sont engagés pour l'amélioration de la sécurité d'un ouvrage. Ainsi, il englobe le montant des travaux de construction de la mesure de protection, le montant des travaux de remise en état (remise en place de revêtement, crépisage des murs, rhabillage, travaux de peinture, etc.) et les honoraires. Théoriquement, les coûts induits par l'utilisation réduite et l'implication du maître d'ouvrage devraient être pris en compte. Avec cela, il est facile d'identifier dans quelles circonstances la proportionnalité de mesures de protection peut être grandement améliorée, soit dans le cadre de la transformation ou de l'assainissement d'un bâtiment. A ce titre, Il est donc absolument nécessaire d'intégrer des ingénieurs de manière précoce dans le processus de planification de tels travaux.

Comme la réduction du risque est estimée sur une base annuelle, le coût des mesures de protection doit l'être également. Pour cette raison, le montant investi doit être multiplié par le facteur d'escompte. Dans le facteur d'escompte DF, sont intégrés la durée d'utilisation restante n et un taux d'escompte i (formule (5)).

$$DF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5)$$

Le taux d'escompte n'est pas en soi une grandeur financière pure, mais est davantage l'expression de la pondération de l'utilisation actuelle d'un investissement par rapport à son utilisation future. Sous le point

de vue nommé « social time preference », on arrive à des taux d'escompte de l'ordre de 8%. Avec de tels calculs, 100 personnes qui seront sauvées dans 50 ans ne sont équivalentes qu'à seulement 2 personnes qui seraient sauvées aujourd'hui (voir par exemple Paté-Cornell (1984)). Rackwitz (2003), par contre, calcule avec une approche d'optimisation socio-économique un « time preference rate » de 1%.

D'autres méthodes fixent le taux d'escompte sur la base des coûts d'opportunité sociaux, qui se rapportent aux bénéfices liés à un emploi alternatif des ressources. Faber et Rackwitz calculent une valeur de 2% comme optimale pour des investissements socio-économiques pour la sécurité. Une autre approche s'oriente à l'inverse exclusivement sur le coût des crédits sur les marchés financiers. FEMA 256 (1994) établit que le taux d'escompte doit être choisi dans une fourchette allant de 2% à 7%. Dans le cahier technique, le taux d'escompte a finalement été fixé à 2%.

4.3 Réduction du risque

La réduction du risque se calcule comme la différence du risque collectif dans la situation initiale et celui dans la situation après mise en place hypothétique de mesures de protection parasismique. Le risque collectif en situation initiale est déterminé en multipliant le facteur de risque, correspondant à α_{eff} et évalué à l'aide de la figure 5, par la valeur attendue de l'occupation. Le risque après intervention est déterminé de manière analogue sur la base du facteur de conformité α_{int} qui serait obtenu après intervention. Si la valeur attendue de l'occupation n'évolue pas, alors la différence de risque est donnée par la formule (6).

$$\Delta R_M = (RF(\alpha_{eff}) - RF(\alpha_{int})) \cdot PB = \Delta RF \cdot PB \quad (6)$$

Si l'occupation devait changer, il faudrait alors multiplier l'occupation en situation initiale par le facteur de risque en situation initiale et soustraire le produit de l'occupation et du facteur de risque après intervention.

La valeur attendue de l'occupation se calcule selon une ou plusieurs occupations différentes et leur part de temps sur une année complète avec l'aide de

$$PB = \frac{1}{8736} \sum_i B_i \cdot h_i \cdot d_i \cdot w_i \quad (7)$$

B_i est le nombre de personnes d'une occupation spécifique du bâtiment. H_i , d_i et w_i sont le nombre d'heures par jour, le nombre de jours par semaine et le nombre de semaines par année, pour lesquels cette occupation se produit. Le tableau 7 montre comment PB se détermine pour l'exemple d'un hôpital.

Occupation	B_i	h_i	d_i	w_i	PB
Patients internes	180	24	7	52	180
Patients ambulatoires	30	2	5	52	2
Personnel de jour	80	14	7	52	47
Personnel de nuit	20	10	7	52	8
Visiteurs	320	1	7	52	13
Somme					250

Tableau 7 : Exemple de l'occupation en personnes d'un hôpital

4.4 Extension

La possibilité de tenir compte de bénéfices supplémentaires dus aux mesures de protection parasismique dans l'équation des coûts de sauvetage est proposée dans le cahier technique. Ces bénéfices supplémentaires doivent être monétarisés. De tels bénéfices supplémentaires en unité monétaire peuvent être par exemple :

- des dommages matériels évités
- des pertes évitées liées à des interruptions de service
- des pertes de loyer évitées

Ces coûts évités se calculent comme la différence de l'estimation des risques monétaires annualisés R_{GE} en situation initiale et ceux restant après intervention. Cette réduction de risque diminue les coûts au dénominateur de la formule des coûts de sauvetage comme présenté dans la formule (8).

$$RK_M = \frac{SK_M - \Delta R_{GE}}{\Delta R_M} \quad (8)$$

5 CRITERES DE VERIFICATION

5.1 Risque individuel acceptable

Le facteur de conformité minimal α_{min} doit assurer que le risque individuel est acceptable et que les droits à la sécurité de l'individu sont garantis. Dans la littérature sur le risque, différentes valeurs cibles pour le risque individuel annualisé sont données (voir par exemple CIB 2001, Seiler 2000). Les valeurs atteignent en règle générale de 10^{-3} à 10^{-6} par année et reflètent la marge entre des risques consentis et influençables avec un grand bénéfice pour l'individu (par exemple activité de loisir dangereuse) jusqu'aux risques non consentis, peu influençables et sans bénéfice pour l'individu (par exemple industrie chimique du point de vue des riverains). CIB (2001) donne la valeur de 10^{-4} par année comme acceptable pour les dangers naturels. Dans Seiler (2000), une valeur de

10^{-5} par année pour la Suisse est estimée comme convenable.

Dans le cahier technique il a été fixé que le risque individuel est vérifié comme acceptable lorsque la probabilité annuelle de décès ne dépasse pas la valeur de $1/100'000$ par an. Cette condition est considérée comme remplie lorsque le facteur de conformité est plus grand ou égal à 0.25.

$$\alpha_{eff} \geq 0,25 \quad (9)$$

5.2 Coûts de sauvetage proportionnés

Lorsque le critère d'acceptabilité du risque individuel est rempli, l'appréciation de la proportionnalité peut être effectuée sur la base des coûts de sauvetage associés aux mesures de protection parasismique.

À nouveau en s'appuyant sur Seiler (2000), les coûts de sauvetage sont vérifiés comme proportionnés dans le cahier technique lorsqu'ils sont inférieurs à 10 millions de francs par vie humaine sauvée.

$$RK_M \leq 10 \text{ millions de francs / vie sauvée} \quad (10)$$

5.3 Coûts de sauvetage exigibles

Lorsque le facteur de conformité α_{eff} est < 0.25 , les interventions visant à atteindre α_{min} seront jugées raisonnablement exigibles lorsque les coûts de sauvetage associés sont inférieurs à 100 mio. de francs par vie humaine sauvée.

L'exigibilité dépend dans le fond aussi de la grandeur relative des montants à dépenser pour l'amélioration de la sécurité parasismique. Par exemple, les coûts de la mesure de protection parasismique peuvent être comparés aux coûts d'une transformation ou d'un assainissement. Dans ce cadre, les rapports se situent parfois dans le même domaine que pour les bâtiments neufs. Le principe, très général, que des interventions qui ne coûtent « pratiquement rien » doivent être réalisées s'applique alors. Le fait que des interventions ne coûtent « pratiquement rien » ne peut être observé que sur la base de comparaisons. Dans certaines circonstances, une intervention de 100'000.- francs entre dans ce critère, lorsqu'elle est réalisée par exemple dans le cadre d'une transformation de 10 mio. de francs. Dans la première édition du cahier technique, aucune indication à ce sujet n'a été faite.

Pour des facteurs de conformité bas, il faut conserver à l'esprit les dommages matériels et particulièrement les conséquences de la perte de disponibilité.

$$\alpha_{eff} < 0,25 \quad (11)$$

$$RK_M \leq 100 \text{ millions de francs / vie sauvée}$$

5.4 Classe d'ouvrage III

Le cas des bâtiments appartenant à la classe d'ouvrage III est à traiter à part. Dans le cas d'hôpitaux d'urgence, de centres d'opérations de la police, des pompiers et d'autres installations de la chaîne de sauvetage, le risque n'est pas limité au bâtiment lui-même, mais va au-delà de celui-ci.

Avec la protection parasismique de ces bâtiments, les risques induits seront également réduits. Pour cette raison, le facteur de réduction nécessaire minimal pour les bâtiments de la classe d'ouvrage III est relevé à 0,4.

$$\alpha_{min} = 0,40 \quad (12)$$

En sus, l'aptitude au service doit être prouvée pour ce niveau. Dans les contrôles de la sécurité structurale et de l'aptitude au service, le facteur d'importance de 1,4 doit être pris en compte.

Des mesures pour l'aptitude au service allant au-delà du niveau de la formule 12 sont à vérifier sous l'angle de la proportionnalité avec les interventions visant à augmenter la sécurité structurale. En référence à la classe d'ouvrage III, les interventions visant à garantir la fonctionnalité doivent également englober les installations et les conduites.

Un autre groupe de constructions de la classe d'ouvrage III sont celles dont la défaillance engendre des dégâts très importants, par exemple à la population ou à l'environnement. Les ouvrages soumis à l'ordonnance sur les accidents majeurs seront vérifiés selon les prescriptions de cette ordonnance.

Finalement, les biens culturels d'importance nationale entrent aussi dans la classe d'ouvrage III, ce thème étant traité par la protection des biens culturels.

6 APPLICATION

6.1 Vérification et recommandation d'intervention

Pour les conditions cadres et la procédure de vérification, le lecteur se référera à Vogel (2005). En résumé, il se produit les trois cas importants suivants :

Cas 1 : $\alpha_{eff} < \alpha_{min}$

- Une intervention est fondamentalement nécessaire.
- Des interventions qui conduisent à $\alpha_{int} = \alpha_{min}$ sont à réaliser si elle sont exigibles et donc si $RK_M \leq 100$ millions de francs/vie humaine sauvée est vérifié.
- Des interventions qui mènent à $\alpha_{int} \geq \alpha_{min}$ sont à réaliser si elle sont proportionnées et donc si $RK_M \leq 10$ millions de francs/vie humaine sauvée est vérifié.
- Si aucune intervention exigible ne peut être trouvée, il faut considérer une modification de l'utilisation.

- Si aucune intervention exigible ne peut être trouvée et qu'aucune modification de l'utilisation n'est possible, alors le risque doit être accepté.

Cas 2 : $\alpha_{min} \leq \alpha_{eff} < \alpha_{adm}$

- Les interventions proportionnées sont à réaliser, c'est-à-dire si $RK_M \leq 10$ millions de francs/vie humaine sauvée est vérifié.

Cas 3 : $\alpha_{eff} \geq \alpha_{adm}$

- Intervention non recommandée.

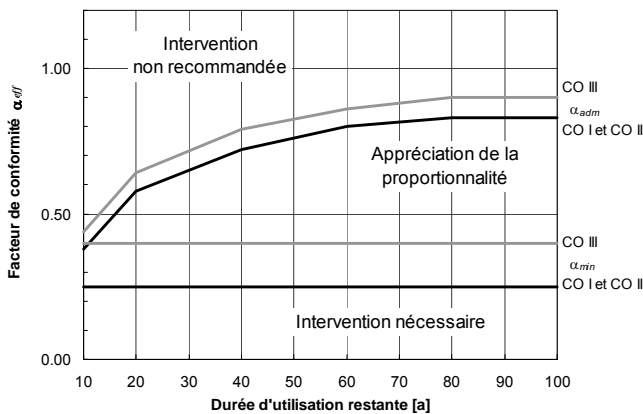


Fig. 6: Base pour la recommandation d'interventions

La figure 6 montre graphiquement les différents domaines et en particulier leur relation avec la durée d'utilisation restante.

6.2 Exemples CO I, II et III

A titre d'exemple, un représentant typique des classes d'ouvrage I, II et III est considéré. Il s'agit ici des bâtiments listés ci-après.

	Habitation CO I	Ecole CO II	Hôpital CO III
Valeur [moi fr.]	2	10	80
Utilisation	10 habitants	120 étudiants/prof.	200 lits
Occupation PB	4 P./an	40 P./an	250 P./an
Durée d'utilisation restante	40 ans	40 ans	40 ans
Investissements exigibles SIK_M pour $\alpha_{eff} = 0,15$, $\alpha_{int} = \alpha_{min}$	0,1 mio fr.	1,4 mio fr.	12,5 mio fr.
Investissements proportionnés SIK_M pour $\alpha_{eff} = \alpha_{min}$, $\alpha_{int} = 1,0$	0,0 mio fr.	0,1 mio fr.	0,3 mio fr.

Les valeurs limites des investissements pour la sécurité sont tirées des figures 7 et 8. Dans les figures, les investissements exigibles (courbes du haut) et proportionnés (courbes du bas) par unité d'occupation

sont représentés pour les classes d'ouvrage I, II et III en fonction de α_{eff} et α_{int} et ceci pour une durée d'utilisation restante de 40 ans.

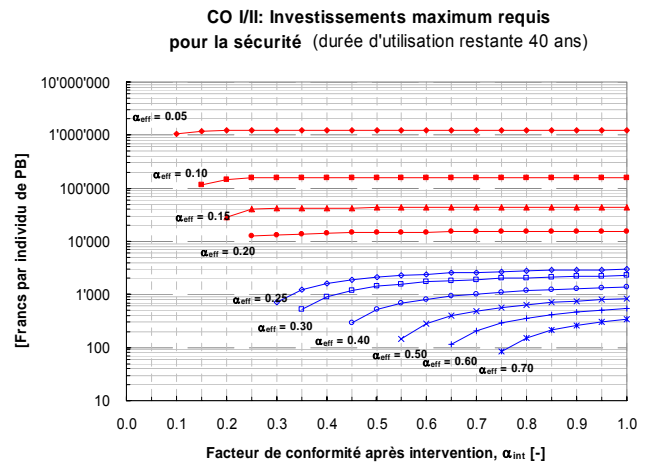


Fig. 7: Investissements maximum requis pour la sécurité SIK_M , CO I et II

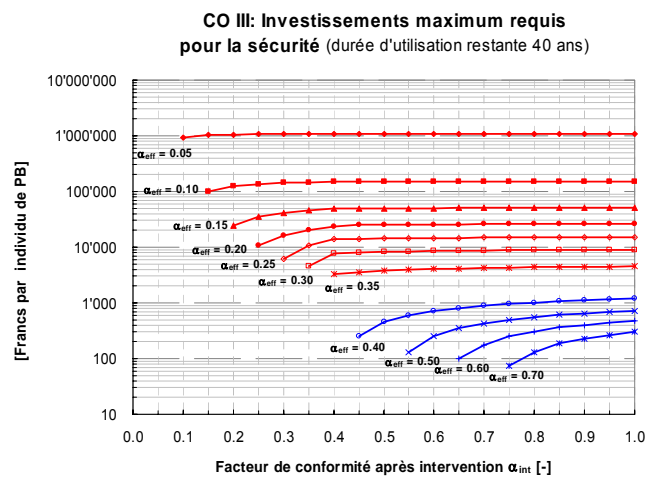


Fig. 8: Investissements maximum requis pour la sécurité SIK_M , CO III

6.3 Discussion

Cas 1 : $\alpha_{eff} < \alpha_{min}$

Dans ce cas, il faut compter sur le fait que la protection parasismique d'un hôpital de soins intensifs jusqu'à α_{min} devrait être dans la plupart des cas exigible. Pour des écoles, ce devrait être également vrai pour bien des cas si le facteur de conformité est relativement bas. Pour des habitations une intervention n'est en général exigible que si le facteur de conformité est très bas.

Cas 2 : $\alpha_{min} \leq \alpha_{eff} < \alpha_{adm}$

Des interventions proportionnées ne sont possibles que lorsque l'occupation moyenne est très élevée,

comme pour un hôpital, par exemple, et que le coût des interventions est faible.

Cas 3 : $\alpha_{eff} \geq \alpha_{adm}$

Comme le démontre le cas 2, il est très improbable que des interventions proportionnées puissent être trouvées lorsque $\alpha_{eff} \geq \alpha_{adm}$. Pour les exemples, seuls 1'200 fr. pour l'habitation, 12'000 fr. pour l'école et 50'000 fr. pour l'hôpital ont à disposition.

Les exemples se basent sur une durée d'utilisation restante de 40 ans. Une prolongation de la durée d'utilisation restante mène à une augmentation des coûts exigibles et proportionnés d'un facteur de 3,7%/2% au maximum. Au contraire, pour une durée d'utilisation restante de 5 ans, les coûts exigibles et proportionnés seraient diminués par un facteur de 21,2%/3,7%.

Les exemples démontrent que tant dans le domaine des interventions exigibles que dans celui des interventions proportionnées, le facteur principal est le niveau de risque en situation initiale et moins le niveau après intervention. Diminuer de moitié un risque initial élevé est plus efficace que de diviser par 10 un risque initial faible. Cela vaut donc la peine d'investir du temps et d'appliquer des méthodes modernes de l'ingénierie des tremblements de terre, qui sont en partie mises à disposition dans le cahier technique. Le mandant d'une vérification de la sécurité parasismique d'un bâtiment existant devrait avoir connaissance de cet état de fait.

Dans les exemples, l'influence des facteurs d'importance n'est pas mise en avant. De fait, ceux-ci ont tout de même un poids important. Le facteur de conformité d'un bâtiment de classe d'ouvrage II est de 20% inférieur à celui d'un même bâtiment qui ferait partie de la classe d'ouvrage I. Pour la classe d'ouvrage III, la différence serait de 40%. Pour ce bâtiment, cela a pour conséquence que d'une part l'acceptation du risque individuel est diminuée, et d'autre part que la limite de l'exigibilité et celle de la proportionnalité sont rehaussées. Ces deux aspects sont justifiables par :

- la protection d'autres fonctions par le biais du risque individuel qui est lié à la sécurité structurale et par conséquent également à l'aptitude au service.
- la plus grande pondération du bien à protéger, par exemple les étudiants dans une école.

7 CONCLUSIONS

Le cahier technique doit permettre, sur la base de la proportionnalité et de l'exigibilité, un investissement efficace des moyens à disposition pour l'amélioration de la sécurité parasismique des bâtiments existants

en Suisse. Il est jugé acceptable que des bâtiments existants ne soient pas conformes aux normes pour les nouvelles constructions et que les exigences pour les bâtiments existants puissent être en général bien moindres que pour les bâtiments neufs. Les bâtiments de la classe d'ouvrage III sont à ce titre une exception et des exigences plus élevées sont demandées pour ceux-ci.

Les résultats et les enseignements tirés de l'application du cahier technique seront rassemblés et pris en compte lors d'une éventuelle révision.

8 LITTÉRATURE

CIB (2001), Risk assessment and risk communication in civil engineering, CIB Report: Publication 259/2001.

EMS (1998), European Macroseismic Scale, Conseil de l'Europe, Editor G. Grünthal (Geoforschungszentrum Potsdam), Luxembourg.

Faber, M.H. & Rackwitz, R. (2004), Sustainable Decision Making in Civil Engineering, Structural Engineering International, Vol. 14, No 3: 237-242.

FEMA 256 (1994), Seismic Rehabilitation of Federal Buildings: A Benefit/Cost Model, Volume 2 Supporting Documentation.

Kaplan St. and Garrick J (1981), On the quantitative definition of risk, Journal of the Society for Risk Analysis, Vol. 1, No. 1, Plenum Press, New York/London.

Kölz, E. (2000), Prioritäten in der Erdbebensicherung bestehender Bauwerke, Dokumentation SIA D0162, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.

Lang, K. (2002), Seismic vulnerability of existing buildings, Dissertation ETH No. 14446, Zürich.

Paté-Cornell, M.E. (1985), Costs and benefits of seismic upgrading of some buildings in the Boston area, Earthquake Spectra, 1:4, 721-40.

Pellissier, V., Badoux, M. (2003), Vulnérabilité et risque sismique de la ville d'aigle, 2 ème partie: inventaire sismique et vulnérabilité du bâti traditionnel, Institut des structures, Laboratoire de construction en béton, EPF Lausanne.

Schneider, J. (2000), Safety - A matter of Risk, Cost and Consensus, Structural Engineering International SEI, Vol. 10, Nr. 4, November 2000, 266-269.

Rackwitz, R. (2003), Discounting for optimal and acceptable technical facilities involving risks, TU München.

Schneider, J. (1996), Sicherheit im Bauwesen, Verlag der Fachvereine vdf, 2. Auflage, Zürich.

Seiler, HJ. (2000), Risikobasiertes Recht: Wieviel Sicherheit wollen wir? Abschlussbericht, Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung.

Stiefel, U. und Schneider, J. (1985), Was kostet Sicherheit?, Schweizer Ingenieur und Architekt, 47.

Vogel, T. (2005), Einführung, Grundsätze und Massnahmenempfehlung, Einführung in das Merkblatt SIA 2018, Dokumentation SIA D 0211, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.