



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,  
de l'énergie et de la communication DETEC

**Office fédéral des transports OFT**

## Directive

# Sécurité sismique des installations ferroviaires

---

Référence du dossier : BAV-511.5-26/36/3/10/3

Date : 01.12.2020

Version : V 1.1\_f



## Mentions légales

Éditeur :	Office fédéral des transports, 3003 Berne, Division Sécurité, en collaboration avec l'Office fédéral de l'environnement, 3003 Berne, Centrale de coordination pour la mitigation des séismes
Direction :	Sven Heunert (BAFU, Direction générale) Luigi d'Egidio (BAV)
Goupe d'accompagnement :	Kazim Altintac (SBB) Karl Baumann (RhB) Daniel Blaser (SBB) Herbert Friedl (SBB) Tiziano Furegati (SBB) Martin Isler (BLS) Christian Kaufmann (SBB) Daniel Trachsel (BLS) Nick Wenger (BABS)
Collaborateurs mandatés :	Yves Mondet (Basler & Hofmann AG) Ehrfried Kölz (Risk&Safety AG)
Distribution :	Publié sur Internet de l'OFT
Versions linguistiques :	Allemand (original) Français (Italien)

## Gestion interne de la documentation OFT

Stade de planification Q :	directive, public
Accolage QM-SI :	<a href="#">QM-Doku_List01.2_Field bt_Examination PGV et BBw.xls</a>
Domaine d'application Processus OFT :	OFT 411

La présente directive entre en vigueur le 1<sup>er</sup> décembre 2020.

Office fédéral des transports

Office fédéral des transports

Rudolf Sperlich  
Sous-directeur, Division Sécurité

Fritz Ruchti  
Chef de section Technique de construction

## Editions / histoire des modifications

Version	Date	Auteur	Modifications	État
1.0_f	24.06.2020	Luigi d'Egidio	projet de consultation	
1.1_f	01.12.2020	Sven Heunert	selon consultation	en vigueur

\* les états suivants sont prévus : en travail, en revue, en vigueur/avec visa, remplacé

## Table des matières

<b>Préambule .....</b>	<b>4</b>
<b>1 Introduction .....</b>	<b>5</b>
1.1 But et objectif.....	5
1.2 Champ d'application.....	5
1.3 Structure.....	6
1.4 Liste des abréviations.....	6
<b>2 Documents concernant la sécurité sismique.....</b>	<b>7</b>
2.1 Convention d'utilisation .....	7
2.2 Base du projet.....	8
2.3 Rapport géotechnique.....	8
2.4 Calculs statiques et dynamiques.....	8
2.5 Rapport d'examen de l'expert .....	8
<b>3 Dispositions spécifiques aux séismes .....</b>	<b>9</b>
3.1 Niveau de sécurité pour nouveaux ouvrages.....	9
3.2 Recommandation d'intervention et évaluation de la proportionnalité pour ouvrages existants.....	9
3.3 Détermination de la classe d'ouvrage (CO) pour ouvrages nouveaux et existants .....	10
3.4 Éléments non structuraux, installations et équipements ENIE .....	14
<b>4 Informations pour la détermination de la proportionnalité pour ouvrages existants.....</b>	<b>16</b>
4.1 Durée d'utilisation restante $d_r$ .....	16
4.2 Occupation par des personnes PB .....	16
4.3 Valeur de l'ouvrage BW .....	17
4.4 Facteur de risque pour l'ouvrage BRF .....	17
4.5 Valeur des objets SW .....	18
4.6 Facteur de risque pour les objets SRF.....	18
4.7 Coûts d'interruption UK.....	19
4.8 Facteur de risque lié à l'interruption URF.....	19
4.9 Valeur de l'ouvrage et des objets directement touchés BSW .....	19
4.10 Montant investi pour la sécurité $SIC_M$ .....	19
<b>Annexe A.....</b>	<b>20</b>
Exemple d'application : Viaduc .....	20
<b>Annexe B .....</b>	<b>27</b>
Exemple d'application : Bâtiment avec centre de commande .....	27
<b>Répertoire.....</b>	<b>34</b>

## **Préambule**

Les installations ferroviaires doivent être protégées des dommages occasionnés par les séismes. Les normes de l'Association suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), en tant que règles reconnues de la technique en Suisse, constituent la base pour la conception appropriée de ces installations et des vérifications structurales correspondantes. La thématique des séismes est traitée dans la série de normes SIA 260 ss pour les nouvelles constructions, dans la série de normes SIA 269 ss pour la maintenance des constructions existantes.

Les contrôles relatifs à la sécurité sismique des projets de construction ferroviaires réalisés à ce jour dans le cadre des procédures d'approbation des plans en vertu du droit ferroviaire (PAP) ont montré que les normes mentionnées ne permettent pas de répondre à toutes les questions, notamment en ce qui concerne les constructions existantes et l'évaluation de la nécessité et de la proportionnalité des mesures d'intervention y relative.

La présente directive "Sécurité sismique des installations ferroviaires" précise les normes en tant que base uniforme et aide à la mise en œuvre pour les gestionnaires d'infrastructure, les auteurs de projet et l'Office fédéral des transports (OFT) comme autorité de surveillance et d'autorisation. L'accent y est mis sur les éléments déterminants pour la sécurité de l'exploitation ferroviaire du point de vue de la technique de construction. La directive présente entre autres les indications relatives aux séismes requises dans le dossier d'ouvrage, les dispositions spécifiques à respecter, des instructions pour évaluer la proportionnalité des mesures d'intervention pour les constructions existantes et enfin deux exemples d'application pour concrétiser sa mise en œuvre.

La directive a été établie par un groupe de travail composé de représentants des autorités concernées (OFEV, OFPP, OFT), des chemins de fer (BLS, RhB, CFF) et des bureaux d'ingénieurs mandatés par l'OFEV (Basler & Hofmann AG, Risk&Safety AG) sous la direction générale de l'OFEV. Nous profitons de cette occasion pour remercier les membres du groupe de travail et tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de cette directive.

## 1 Introduction

Une application ciblée des dispositions légales et normatives relatives à la sécurité sismique des installations ferroviaires est d'une grande importance afin de garantir que ces dernières soient conçues pour résister aux séismes. Il incombe au gestionnaire d'infrastructure (GI) et aux tiers mandatés par celui-ci d'observer et de respecter les prescriptions en matière de sécurité sismique des installations ferroviaires mentionnées dans les lois, les ordonnances, les directives et les normes.

### 1.1 But et objectif

La présente directive relative à la sécurité sismique des installations ferroviaires standardise et simplifie l'interprétation et l'application de ces prescriptions. Elle constitue la base de la mise en œuvre des dispositions légales et normatives relatives à la sécurité sismique de l'infrastructure ferroviaire qui y sont mentionnées. Les prescriptions et les exigences normatives correspondantes concernant la documentation du projet, les objectifs de protection et le degré de protection (détermination de la classe d'ouvrage) ainsi que l'évaluation de la proportionnalité des mesures de sécurité sismique sont précisées et expliquées spécifiquement pour le domaine ferroviaire. Dans le cas des projets ferroviaires, la directive offre une plus grande sécurité de planification pour le GI et pour les tiers mandatés par celui-ci.

### 1.2 Champ d'application

En premier lieu, les principes et les règles énumérés à l'art. 2 de l'ordonnance sur la construction et l'exploitation des chemins de fers du 23 novembre 1983 (OCF) [2], qui doivent être pris en compte dans la planification et la construction des ouvrages et des installations en tant que condition préalable à une exploitation sûre et à une maintenance appropriée, sont applicables. Les exigences normatives en matière de sécurité sismique pour les ouvrages d'infrastructure ferroviaire garantissent un certain degré de protection non seulement pour les personnes, mais aussi pour la fonction de l'infrastructure.

Cette directive s'applique à toutes les installations ferroviaires, que leur construction ou leur modification soit soumise à autorisation (art. 18ff LCdF [1]) ou non (art. 1a OPAPIF [3]). Elle s'applique autant aux nouveaux ouvrages<sup>1</sup> qu'à la maintenance d'ouvrages existants<sup>1</sup>, mais ne couvre pas leur exploitation. Elle couvre les éléments suivants de l'infrastructure ferroviaire qui sont pertinents en matière de sécurité sismique :

- Ouvrages d'art et autres ouvrages
  - Ponts, ouvrages de protection, ponceaux,
  - Ouvrages en terre (par exemple remblais, talus, tranchées ou talus antibruit)
  - Ouvrages de soutènement
  - Accès aux quais (par exemple passages inférieurs et supérieurs, escaliers ou rampes)
  - Marquises, halle de quais et abris de quais
  - Tunnels et galeries
- Bâtiments
  - Gares et gares souterraines, y compris points de vente
  - Bâtiments de technique ferroviaire (postes de commande, postes d'enclenchement)
  - Installations de service / Ateliers / Immeubles de bureaux

L'accent est mis sur les éléments présentant un potentiel de dommage en cas d'événement. Cela pré-suppose une vulnérabilité face au séisme de ces éléments ainsi qu'un impact potentiel sur des biens à protéger. Les biens à protéger à considérer (personnes, exploitation ferroviaire sûre, ...) dépendent de l'importance ou de l'emplacement de l'élément dans le réseau. Pour les autres éléments de l'infrastructure ferroviaire, l'effort requis pour assurer la sécurité sismique est jugé à priori disproportionné (p. ex. pour la voie, les structures porteuses des caténaires et les lignes de transport du courant de traction) ou d'autres bases sont applicables (par ex. directive ESTI n° 248 [6] ou ordonnance sur les accidents majeurs, OPAM, RS 814.012) desquelles peuvent être tirées les exigences en matière de sécurité sismique.

---

<sup>1</sup> Pour la signification de ces termes, il est fait référence au ch. 1 de la norme SIA 469 [11] et au ch. 1 de la norme SIA 269 [10]

### 1.3 Structure

La directive traite au chapitre 2 les documents techniques pertinents pour la documentation de la sécurité sismique et des exigences spécifiques quant à leur contenu. Le chapitre 3 contient les dispositions quant à la sécurité sismique pour les nouveaux ouvrages et les ouvrages existants. Il traite en premier lieu de l'évaluation de la proportionnalité de mesures de sécurité sismique et de la recommandation d'intervention pour les ouvrages existants ainsi que de l'attribution d'un ouvrage à une classe d'ouvrage. Le chapitre 4 traite de différents paramètres de la norme SIA 269/8 qui jouent un rôle important dans la détermination de la proportionnalité des mesures de sécurité sismique. L'annexe illustre l'application de la directive pour deux éléments caractéristiques de l'infrastructure ferroviaire.

### 1.4 Liste des abréviations

La connaissance des bases normatives est présumée. Les termes techniques et les notations tirés des normes ne sont donc pas décrits. Seule la signification des abréviations est donnée ci-après.

OFT	Office fédéral des transports
BRF	Facteur de risque pour l'ouvrage
BSW	Valeur de l'ouvrage et des objets directement touchés (BW + SW)
BW	Valeur de l'ouvrage
CO	Classe d'ouvrage
OCF	Ordonnance sur les chemins de fer
CST	Classe sismique de tronçon
DE-OCF	Dispositions d'exécution de l'ordonnance sur les chemins de fer
ENIE	Eléments non structuraux, installations et équipements
ESTI	Inspection fédérale des installations à courant fort
GI	Gestionnaire d'infrastructure
OCI-CF	Organismes de contrôle indépendants Chemins de fer
OPAPIF	Ordonnance sur la procédure d'approbation des plans pour les installations ferroviaires
PAP	Procédure d'approbation des plans
PB	Occupation par des personnes
PB <sub>max</sub>	Occupation maximale par des personnes (autorisé selon les prescriptions anti-incendie)
PM	Paquet de mesures
SIA	Société suisse des ingénieurs et des architectes
SIC <sub>M</sub>	Montant investi pour la sécurité
SRF	Facteur de risque pour les objets
SW	Valeur des objets
UK	Coûts d'interruption
URF	Facteur de risque lié à l'interruption

## 2 Documents concernant la sécurité sismique

La sécurité sismique d'une structure porteuse doit être traitée et documentée dans le cadre de la vérification de la sécurité structurale lors de l'élaboration des données de base du projet correspondantes, tant pour les projets de nouveaux ouvrages que pour les projets de maintenance d'ouvrages existants de l'infrastructure ferroviaire. Ceci est valable autant pour un projet qui nécessite une autorisation (procédure selon le droit ferroviaire ou le droit cantonal selon l'art. 18ff LCdF [1]) que pour un projet non soumis à approbation (art. 1a OPAPIF [3]). En général, les documents à établir et qui appartiennent au final au dossier de l'ouvrage sont les suivants :

- Convention d'utilisation
- Base du projet
- Rapport géotechnique
- Calculs statiques et dynamiques avec les principales preuves

Dans le cadre d'une procédure d'approbation des plans en droit ferroviaire (PAP), ces documents doivent être élaborés et soumis à l'autorité d'approbation. Dans certains cas, ils doivent être accompagnés du rapport d'examen de l'expert conformément aux dispositions de la directive OCI-CF [5] (art. 3 al. 2 OPAPIF [3]).

La convention d'utilisation doit être rédigée puis approuvée par le maître d'ouvrage sur la base de ses prescriptions et en collaboration avec toutes les parties concernées (architecture, ingénierie civile et planification spécialisée) dès le début du projet dans la phase partielle 31 « Avant-projet » (art. 3.2 du règlement SIA 103 [7]). Elle définit entre autres les exigences en matière de sécurité sismique et assure une prise en compte de la thématique suffisamment tôt, de manière efficace et ciblée dans le projet. En se fondant sur la convention d'utilisation, l'ingénierie civile ou l'ingénieur civil prépare la base du projet lors de la phase partielle « Avant-projet ». La convention d'utilisation et la base du projet doivent être mises à jour au cours des phases de planification, de réalisation et d'exploitation du projet et constituent des pièces essentielles du dossier de l'ouvrage (p. ex. art. 4.3.53 du règlement SIA 103).

Les documents à soumettre lors de la PAP en droit ferroviaire selon l'article 18 LCdF doivent correspondre selon ch. 22.2 de la directive OPAPIF [4] au moins à l'état d'avancement après l'achèvement du projet de construction (voir description à l'art. 4.3.32 du règlement SIA 103 [7]).

Les exigences spécifiques aux séismes relatives au contenu des documents susmentionnés sont présentées ci-après.

### 2.1 Convention d'utilisation

Les exigences spécifiques aux séismes pour la convention d'utilisation sont les suivantes :

- Détermination de la classe d'ouvrage (CO) avec justification (voir ch. 3.3), de la zone sismique (Z) et de la nature du terrain de fondation;
- Description ou représentation du concept parasismique de la structure (concept du contreventement) ;
- Définition des éléments non-structuraux pertinents, des installations et des équipements (ENIE) pertinents, y compris la définition des responsabilités dans le processus de planification et de construction ;
- Dans le cadre d'une éventuelle attribution à la classe d'ouvrage III, les spécifications des exigences concrètes en matière d'aptitude au service pour assurer la fonction après un séisme (pour la structure porteuse et les ENIE pertinents).

**Pour les ouvrages existants**, il est nécessaire de procéder à des réflexions plus approfondies afin de définir les exigences et les bases pertinentes selon la série de normes SIA 269 ss [10] (respectivement la norme SIA 269/8). Par conséquent, la convention d'utilisation doit de plus indiquer les résultats principaux de la vérification de la sécurité sismique (structure porteuse et ENIE) conformément à la norme SIA 269/8, à savoir :

- Facteur de conformité établi lors de l'examen  $\alpha_{\text{eff}}$  (structure porteuse et ENIE) ;
- Facteur de conformité minimal  $\alpha_{\text{min}}$  ;
- Facteur de conformité après intervention  $\alpha_{\text{int}}$  (structure porteuse et ENIE) avec les mesures prévues (selon ch. 9.4, norme SIA 269/8, un facteur de conformité  $\alpha_{\text{int}} = 1,0$  doit être visé) ;
- Biens à protéger pris en compte dans l'évaluation de la nécessité de mesures de sécurité sismique ;
- Décision motivée sur les mesures (proportionnalité) ;
- Description des mesures de sécurité sismique, y compris représentation simple sur les plans de construction (visualisation du concept d'intervention en plan et en élévation).

Si le facteur de conformité est  $\alpha_{\text{eff}} < 1.0$ , il faut déclarer en outre dans la convention d'utilisation que le projet de construction ne doit pas réduire cette sécurité.

## 2.2 Base du projet

Les exigences spécifiques aux séismes pour la base du projet sont les suivantes :

- Détermination des paramètres d'ingénierie pour le dimensionnement sismique ou la vérification sismique, tels que le spectre de dimensionnement (y compris le facteur d'importance et le coefficient de comportement), les propriétés dynamiques de la structure porteuse (périodes de vibration) et les propriétés des matériaux des éléments stabilisateurs ;
- Détermination de la méthode de calcul utilisée et des hypothèses-clés pour la modélisation et le calcul de la situation de dimensionnement séisme ;
- Détermination des dispositions constructives liées au matériau afin d'assurer le comportement de la structure admis (ductilité et coefficient de comportement).

## 2.3 Rapport géotechnique

Le rapport géotechnique doit traiter et identifier l'aléa sismique du site (classe de sol de fondation, étude de site ou microzonage sismique spectral), les instabilités de pentes induites ainsi que le potentiel de liquéfaction du sol.

## 2.4 Calculs statiques et dynamiques

Les calculs statiques et dynamiques doivent inclure les calculs et les preuves de la sécurité sismique. Il est indispensable d'indiquer les informations sur les masses, l'amortissement et la rigidité (structure porteuses et fondation). Selon la complexité, l'importance et la vulnérabilité de la structure porteuse ou des ENIE considérés, des considérations prudentes et des calculs simplifiés (à la main) peuvent suffire. Dans l'étude de projet, l'accent est mis sur le développement d'une conception parasismique pour la structure porteuse et les ENIE.

**Pour les ouvrages existants**, s'il y a lieu de procéder à l'examen de la sécurité sismique conformément au ch. 6.1.2 de la norme SIA 269 [10], ou si celui-ci a été effectué pour toute autre raison, le rapport d'examen de la sécurité sismique conformément à la norme SIA 269/8 [10] doit être joint aux calculs statiques et dynamiques. L'examen de la sécurité sismique doit être effectué tant pour la structure porteuse que pour les ENIE pertinents (cf. ch. 3.4) et le résultat doit contenir le concept d'intervention et la recommandation au maître de l'ouvrage. Dans les cas simples ou insignifiants, ainsi que pour les structures et ENIE peu ou pas vulnérables aux séismes, l'examen peut être effectué à l'aide de considérations qualitatives ou de simples calculs d'estimation.

## 2.5 Rapport d'examen de l'expert

Les dispositions de la directive OCI-CF [5] déterminent si, dans le cadre d'une PAP en droit ferroviaire, un rapport d'examen de l'expert est nécessaire pour une structure. Si un tel rapport est requis, l'experte ou l'expert y évalue également la sécurité sismique dans le cas où des éléments de l'infrastructure ferroviaire selon le chapitre 1.2 sont concernés.

### 3 Dispositions spécifiques aux séismes

Ce chapitre contient les dispositions concernant la sécurité sismique pour les nouveaux ouvrages et les ouvrages existants.

#### 3.1 Niveau de sécurité pour nouveaux ouvrages

Pour les nouveaux ouvrages, les dispositions des normes SIA en vigueur [9] doivent être respectées. Cela garantit un niveau de sécurité approprié (structure porteuse et ENIE) en fonction de la classe d'ouvrage. La détermination de la classe d'ouvrage doit être effectuée selon le chapitre 3.3. Le traitement des aspects parasismiques liés aux ENIE est présenté au chapitre 3.4.

#### 3.2 Recommandation d'intervention et évaluation de la proportionnalité pour ouvrages existants

**Pour les ouvrages existants**, les dispositions des normes de maintenance SIA [10] doivent être respectées en plus des dispositions pour les nouveaux ouvrages. Cela garantit un niveau de sécurité approprié (structure porteuse et ENIE) en fonction de la classe d'ouvrage. La détermination de la classe d'ouvrage doit être effectuée selon le chapitre 3.3. Le traitement des aspects parasismiques liés aux ENIE est présenté au chapitre 3.4.

La recommandation d'intervention selon la norme SIA 269/8 [10] doit être basée sur un examen de la sécurité sismique. Le cas échéant, des investigations détaillées peuvent être nécessaires après un premier examen général basé sur la méthode basée sur les forces (ch. 6.1 de la norme SIA 269 et ch. 2.1.2 de la norme SIA 269/8).

La recommandation d'intervention dépend du facteur de conformité  $\alpha_{eff}$  pour l'examen de l'état actuel et du facteur de conformité minimal  $\alpha_{min}$ , qui dépend de la classe d'ouvrage. La procédure décrite au ch. 9.4 de la norme SIA 269/8 [10] pour déterminer les mesures respectivement les paquets de mesures (PM) nécessaires est illustrée à la figure 1.

L'évaluation de la proportionnalité de l'intervention respectivement des PM doit être effectuée conformément au ch. 10 de la norme SIA 269/8 [10] :

- dans le cas des CO I et II : conformément aux ch. 10.2.1 à 10.2.4, l'annexe E doit obligatoirement être prise en compte. En d'autres termes, outre les personnes, les autres biens à protéger, à savoir les ouvrages, les objets et l'exploitation, doivent également être pris en compte pour évaluer la proportionnalité (voir informations au chapitre 4) ;
- dans le cas des CO II-i et III : conformément aux ch. 10.2.1 et 10.2.5, le chapitre 10.4 doit également être pris en compte. En d'autres termes, outre les personnes, la fonction d'infrastructure doit également être prise en compte pour évaluer la proportionnalité.

Afin d'évaluer la proportionnalité des PM, il faut tenir compte du critère au ch. 10.2.1 de la norme SIA 269/8 [10] (efficacité des mesures  $EF_M \geq 1$  ou coûts des mesures  $\leq$  coûts d'investissement proportionnés maximaux liés à la sécurité), mais également du rapport entre les coûts des mesures de sécurité sismique et le total des investissements réalisés sur l'ouvrage. Ce rapport peut être décisif pour la décision de mettre en œuvre des mesures de sécurité sismique, même si celles-ci ne sont pas proportionnées selon les dispositions de la norme. Le chapitre 4 donne des spécifications supplémentaires pour les paramètres les plus importants à prendre en compte dans le calcul de la proportionnalité. De plus, les exemples des annexes A et B montrent comment déterminer et évaluer concrètement la proportionnalité.

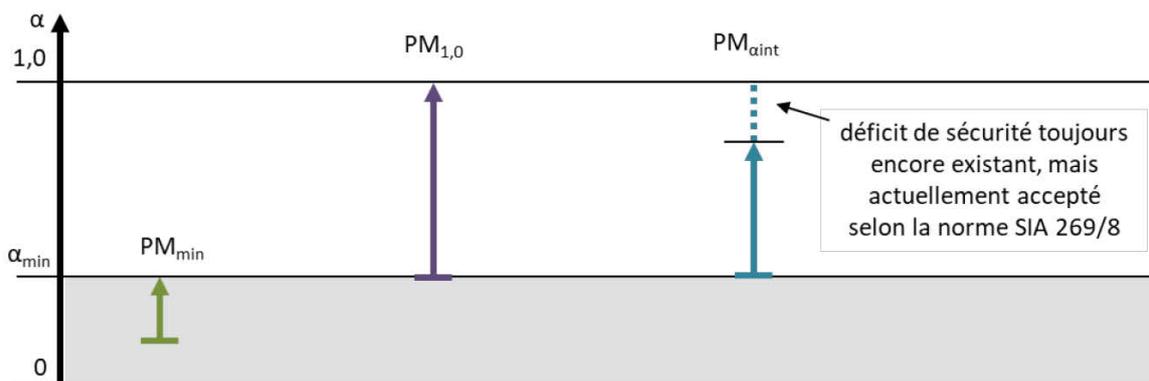
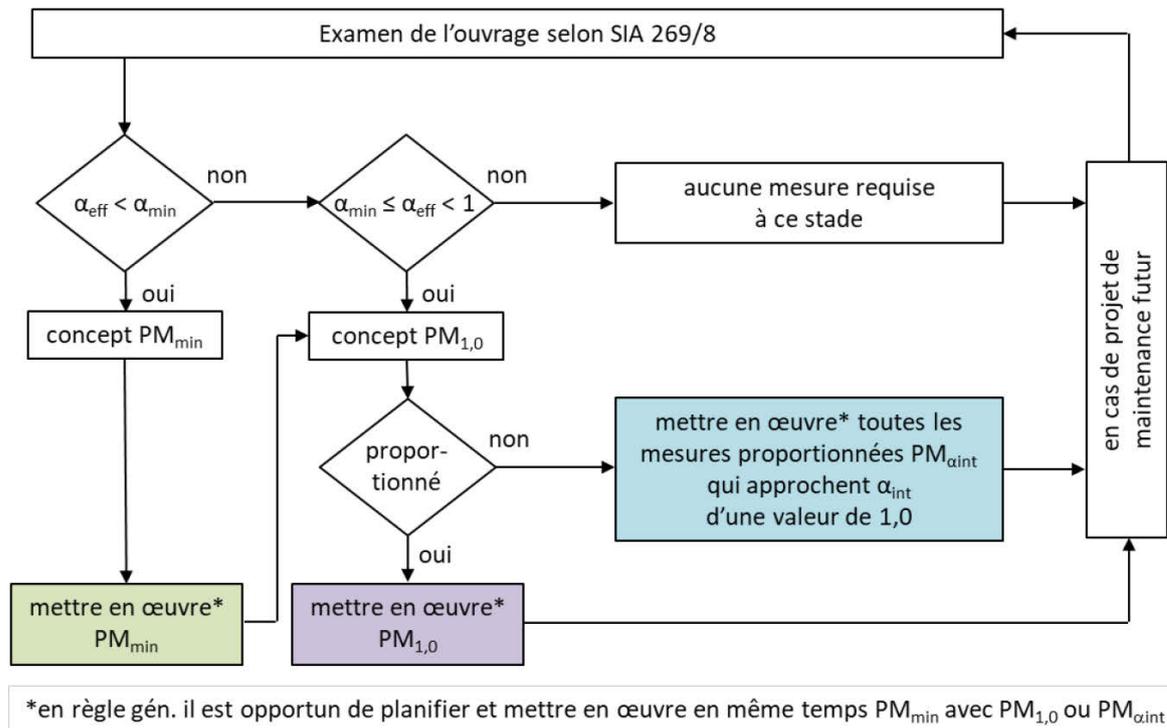


Fig. 1 Détermination de l'intervention respectivement du PM à mettre en œuvre conformément à la norme SIA 269/8 [10]

### 3.3 Détermination de la classe d'ouvrage (CO) pour ouvrages nouveaux et existants

La classe d'ouvrage (CO) d'un ouvrage d'infrastructure ferroviaire spécifique dépend :

- de l'importance de l'ouvrage lui-même, spécifiée par les exigences minimales pour la classe d'ouvrage ( $CO_{min}$ ) conformément à la section I ci-après,
- de l'influence de l'ouvrage sur la disponibilité des tronçons après un séisme,
- de l'importance du (des) tronçon(s) influencé(s), définie par la classe sismique de tronçon (CST), voir section II ci-après et
- des dépendances par rapport à d'autres modes de transport (par ex. route importante) ou d'autres ouvrages (par ex. ouvrage vital).

Le schéma décisionnel (figure 2) de la section III ci-après permet d'attribuer l'ouvrage à une classe d'ouvrage en tenant compte des éléments énumérés ci-dessus.

### I. Exigences minimales pour la classe d'ouvrage

L'exigence minimale pour la classe d'ouvrage CO<sub>min</sub> des éléments d'infrastructure ferroviaire (voir ch. 2.1) est spécifiée dans le tableau 1 pour les « ouvrages d'art et autres ouvrages » et dans le tableau 2 pour les « bâtiments ». L'accent est mis ici sur les éléments qui sont pertinents pour la sécurité de l'exploitation ferroviaire. Pour les bâtiments, l'exigence minimale pour la classe d'ouvrage CO<sub>min</sub> est la classe la plus élevée applicable au bâtiment considérant les caractéristiques occupation par des personnes, valeur des objets, environnement et fonction d'infrastructure. Sur la base d'intérêts spécifiques, le GI peut spécifier des exigences plus élevées que celles définies dans les tableaux 1 et 2.

En principe, aucun élément de l'infrastructure ferroviaire n'est attribué à la classe d'ouvrage III, puisque le chemin de fer n'assume aucune fonction d'infrastructure vitale (dit « Lifeline »). Pour un GI, il peut toutefois être judicieux, sur la base d'intérêts spécifiques propres, d'attribuer un élément d'une très grande importance pour l'exploitation ou pour la maîtrise des événements à la classe d'ouvrage III. Des exigences appropriées quant à la structure porteuse ainsi qu'aux ENIE pertinents sont par conséquent à définir dans la convention d'utilisation et à mettre en place. Il peut s'agir par exemple de centres d'intervention, de centres d'exploitation, de bâtiments techniques ferroviaires de grande importance ou d'abris/d'entrepôts dotés d'équipements de sauvetage ou de matériel auxiliaire (trains d'extinction et de sauvetage, ponts provisoires etc.).

Exigences minimales pour la classe d'ouvrage CO <sub>min</sub> des ouvrages d'art et autres ouvrages		
Élément	Caractéristique	CO <sub>min</sub>
Pont, ouvrage de protection		CO II <sup>1)</sup>
Ponceau		CO I
Ouvrage en terre <sup>2)</sup>	remblai, talus	CO II <sup>1)</sup>
	tranchée, talus antibruit	CO I
Ouvrage de soutènement <sup>2)</sup>		CO II <sup>1)</sup>
Accès aux quais, marquise, halle de quais et abris de quais	moyenne et grande gare <sup>3)</sup>	CO II
	petite gare / halte <sup>3)</sup>	CO I
Tunnel ferroviaire, galerie, tunnel spécial (galerie de fuite etc.)		CO II <sup>1)</sup>

**Tab. 1 Exigences minimales pour la classe d'ouvrage CO<sub>min</sub> des ouvrages d'art et autres ouvrages**

<sup>1)</sup> CO I, si d'importance faible après un séisme (voir exemples du tableau 25 de la norme SIA 261 [9])

<sup>2)</sup> voir également la documentation OFROU [13] et [14]

<sup>3)</sup> voir également tableau 2

Exigences minimales pour la classe d'ouvrage CO <sub>min</sub> de bâtiments		
	CO I	CO II
Personnes	<input type="checkbox"/> Occupation par des personnes PB ≤ 50 pour les bâtiments résidentiels : jusqu'à 100 pièces pour les bâtiments administratifs : jusqu'à 2000 m <sup>2</sup> de surface nette au sol jusqu'à 200 postes de travail pour les bâtiments commerciaux : jusqu'à 500 m <sup>2</sup> de surface de vente brute pour les ateliers : jusqu'à 200 postes de travail (fonctionnement en horaire 1x8) <input type="checkbox"/> petite gare / arrêt occupation maximale par des personnes PB <sub>max</sub> ≤ 500 personnes (autorisé selon les prescriptions anti-incendie)	<input type="checkbox"/> Occupation par des personnes PB > 50 pour les bâtiments résidentiels : plus de 100 pièces pour les bâtiments administratifs : plus de 2000 m <sup>2</sup> de surface nette au sol plus de 200 postes de travail pour les bâtiments commerciaux : plus de 500 m <sup>2</sup> de surface de vente brute pour les ateliers : plus de 200 postes de travail (fonctionnement en horaire 1x8) <input type="checkbox"/> moyenne et grande gare occupation maximale par des personnes PB <sub>max</sub> > 500 personnes (autorisé selon les prescriptions anti-incendie) (par ex. événements, manifestations, etc.)
Valeur des objets	<input type="checkbox"/> Pas de marchandises ou installations d'une valeur particulièrement élevée	<input type="checkbox"/> Contient des marchandises ou installations d'une valeur particulièrement élevée
Environnement	<input type="checkbox"/> Dégâts à l'environnement exclus	<input type="checkbox"/> Dégâts à l'environnement possibles
	CO I	Neuf : CO II Existant : CO II-i
Fonction d'infrastructure	<input type="checkbox"/> Une défaillance de l'ouvrage n'a que peu ou pas d'influence à court terme sur l'exploitation ferroviaire, car l'ouvrage est d'importance secondaire ou sa fonction peut être assumée par un autre ouvrage (p. ex. par contournement) après un séisme.	<input type="checkbox"/> La défaillance de l'ouvrage a une influence considérable ou à moyen ou long terme sur l'exploitation ferroviaire.

Tab. 2 Exigences minimales pour la classe d'ouvrage CO<sub>min</sub> des bâtiments

## II. Classe sismique de tronçon CST

Pour attribuer un ouvrage à une classe d'ouvrage, il est important de tenir compte du ou des tronçons concernés, sur lequel ou à côté duquel se trouve l'ouvrage. L'importance d'un tronçon peut être déterminée par son attribution à une classe sismique de tronçon (CST). Chaque tronçon peut être attribué par le GI à l'une des quatre classes sismiques de tronçon CST 0 à CST III en fonction de son importance pour le trafic ferroviaire, comme indiqué au tableau 3. Le GI décide de la détermination des classes sismique de tronçon.

Lorsqu'on attribue un tronçon à une CST, il faut tenir compte des impacts d'une défaillance sur la société, sur l'économie et sur l'État. À cet égard, les intérêts au niveau régional (cantons en tant que parties/membres de l'État) prime clairement sur ceux au niveau national (état fédéral). Les conséquences d'une défaillance de l'exploitation ferroviaire quotidienne doivent être prises en compte. « Quelles seraient les conséquences d'une défaillance du tronçon desservant telle commune ou telle région pour ces dernières ? »

Classe sismique de tronçon	Fonction d'infrastructure de la ligne de chemin de fer
CST 0	Faible Les interruptions de tronçon n'entraînent que des effets insignifiants.
CST I	Normale Les interruptions de tronçon ont des impacts faibles et locaux sur la société, l'économie et l'État. Les possibilités de redondances et de compensations sont suffisantes.
CST II	Importante Après un séisme, le tronçon a une fonction importante mais non vitale. Toute déficience aurait un impact significatif sur la société, l'économie et l'État. La redondance est insuffisante et il n'est pas facile d'organiser une compensation.
CST III	Vitale Après un séisme, le tronçon a une fonction vitale dans les phases de sauvetage et de maîtrise de l'évènement (très importante pour l'accessibilité d'ouvrages sélectionnés ou d'une zone). Il n'y a pas de redondances ni de possibilités de compensation. Toute déficience entraîne des conséquences graves pour la société, l'économie et l'État.

Tab. 3 Classes sismiques de tronçon CST en fonction de l'importance du tronçon

### III. Attribution de la classe d'ouvrage à l'aide d'un schéma décisionnel

Les dépendances et les prescriptions conduisent à la détermination de la classe d'ouvrage d'un ouvrage spécifique de l'infrastructure ferroviaire selon le schéma décisionnel suivant (fig. 2).

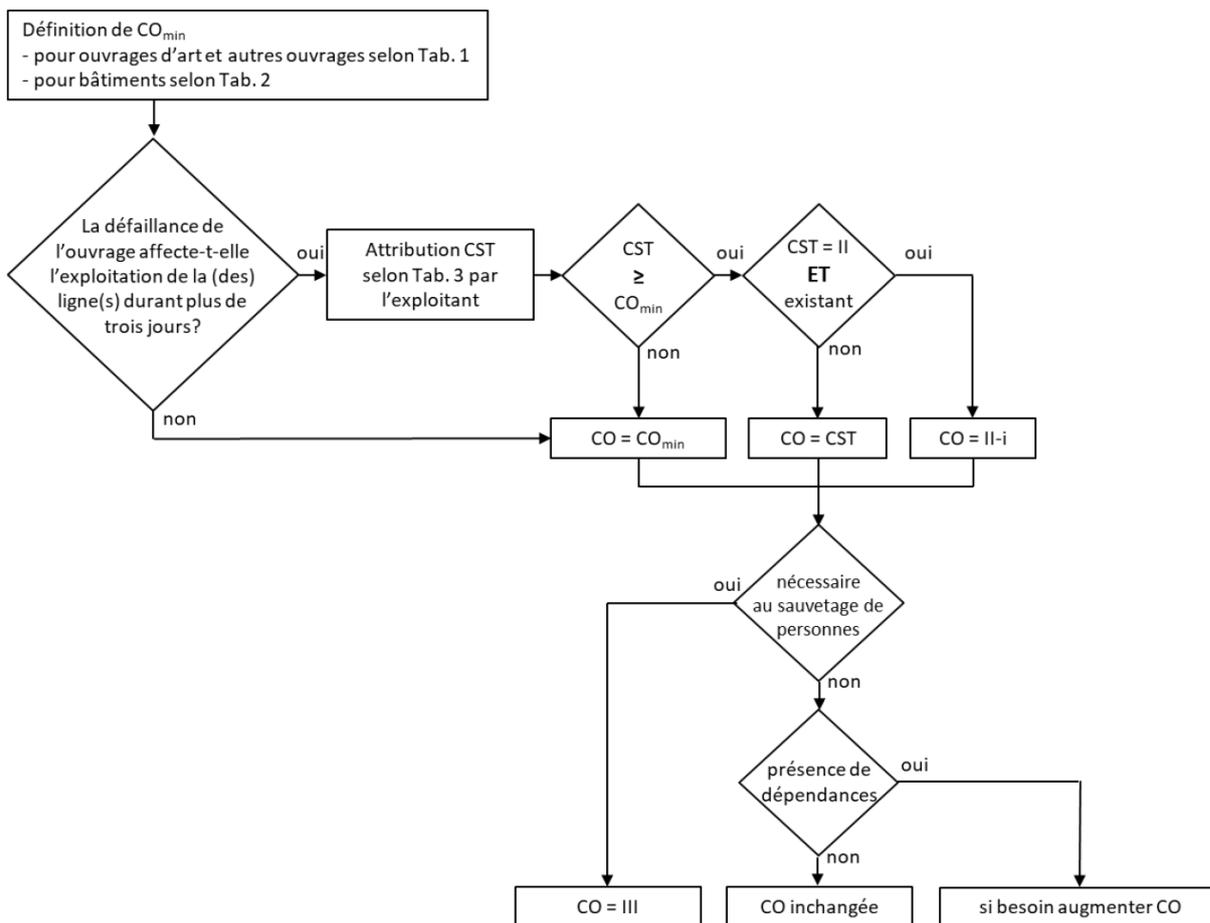


Fig. 2 Schéma décisionnel pour déterminer la classe d'ouvrage CO

Concernant les installations nécessaires au sauvetage et à l'évacuation des personnes, il peut s'agir par exemple, des centres d'intervention avec trains d'extinction et de sauvetage qui y sont habituellement hébergés.

Les dépendances doivent être clarifiées avec les comités de crise cantonaux et peuvent conduire à une classification plus élevée d'un ouvrage, comme par exemple dans le cas de :

- un pont ferroviaire enjambant une route d'une classe sismique de tronçon supérieure (par exemple au-dessus d'un axe de sauvetage d'une CST III),
- un mur de soutènement dont la défaillance mettrait également en danger un ouvrage tiers d'une classe d'ouvrage supérieure (par exemple, un bâtiment des pompiers ou une route d'une CST supérieure).

Le GI peut s'écarter du résultat pour la classe d'ouvrage résultant du schéma décisionnel de la figure 2 à condition que les dépendances des classes d'ouvrage énumérées dans l'introduction au chapitre 3.3 soient prises en compte de manière appropriée et que l'attribution à une classe d'ouvrage différente soit justifiée de manière compréhensible. Dans ce cas également (cf. 1<sup>er</sup> paragraphe du ch. I au ch. 3.3), le GI peut sur la base d'intérêts spécifiques définir des exigences plus élevées, c'est-à-dire une classe d'ouvrage plus élevée que celle résultant du schéma décisionnel.

### **3.4 Éléments non structuraux, installations et équipements ENIE**

Un ouvrage est généralement constitué d'une structure porteuse et d'éléments non structuraux, d'installations et d'équipements :

- éléments non structuraux : généralement des éléments architecturaux, tels que les escaliers et les cloisons, les marquises, les parapets ;
- installations : par ex. technique ferroviaire, installations du bâtiment, ascenseurs ;
- équipements fixes : autres contenus du bâtiment, par ex. installations/éléments informatiques, armoires et étagères.

Le traitement des aspects parasismiques liés aux ENIE aussi bien pour les nouveaux ouvrages que pour les ouvrages existants est résumé à la figure 3. Des informations détaillées sont disponibles dans la publication de l'OFEV sur la sécurité sismique des ENIE [12].

Pour les installations de distribution du courant de traction, le GI doit confirmer dans le cadre de la PAP en droit ferroviaire que les dispositions de sécurité sismique selon la directive ESTI n° 248 [6] sont respectées (ch. 46.3.3 de la Dir. OPAPIF [4]). Le traitement des ENIE dans les installations de production d'énergie (centrales électriques et groupes convertisseurs de fréquence) est spécifié au ch. 4.5 de la directive ESTI n° 248.

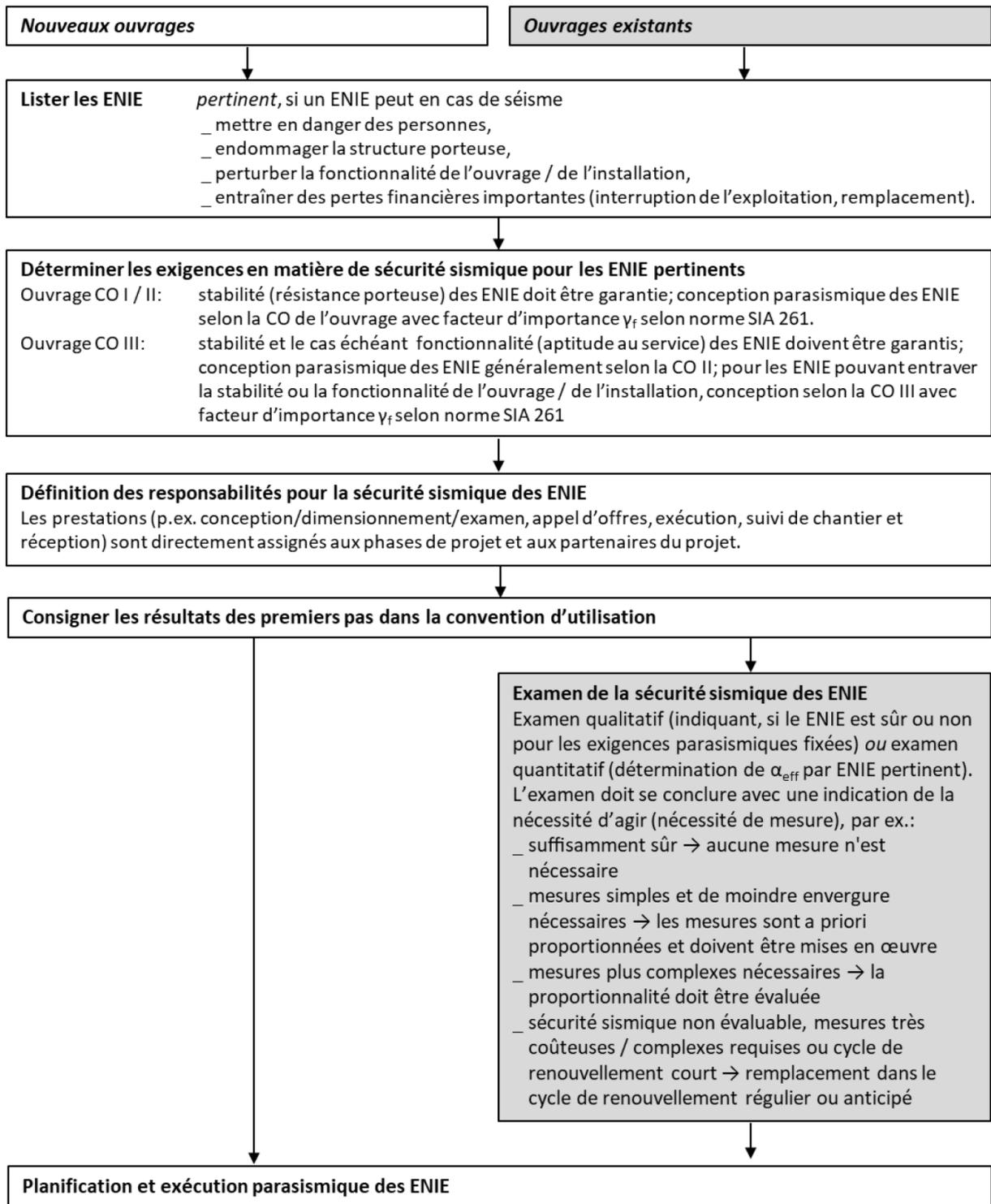


Fig. 3 Traitement parasismique des ENIE

#### 4 Informations pour la détermination de la proportionnalité pour ouvrages existants

Différents paramètres de la norme SIA 269/8 [10] jouent un rôle important dans la détermination de la proportionnalité. Pour certains de ces paramètres, l'utilisation de la marge de manœuvre délibérément accordée par la norme est à régler. Pour d'autres paramètres, l'interprétation est à préciser. Ci-après, ces paramètres sont discutés et les valeurs à utiliser pour les installations ferroviaires sont définies.

##### 4.1 Durée d'utilisation restante $d_r$

Selon la norme SIA 269/8 [10], il faut en règle générale prendre une durée d'utilisation restante d'au moins 30 ans. Les valeurs indicatives suivantes sont fixées pour les installations ferroviaires:

Éléments de l'infrastructure ferroviaire	Valeur indicative de la durée d'utilisation restante
Bâtiments	50 ans
Ouvrages d'art	80 ans
Autres ouvrages <sup>1)</sup>	50 ou 80 ans

**Tab. 4 Valeurs indicatives pour la durée d'utilisation restante  $d_r$ .**

<sup>1)</sup> Selon que leurs caractéristiques sont plutôt semblables à celles des bâtiments ou à celles des ouvrages d'art.

Pour les ouvrages exploités pour une durée pratiquement indéterminée dû à leur entretien régulier, l'hypothèse d'une durée d'utilisation restante encore plus longue est justifiée. Toute durée d'utilisation restante inférieure à celles indiquées ci-dessus doit être justifiée. En particulier, une justification doit être fournie pour une durée d'utilisation restante inférieure à 30 ans.

##### 4.2 Occupation par des personnes PB

Les principes pour déterminer l'occupation par des personnes des bâtiments se trouvent au ch. 10.3 de la norme SIA 269/8 [10]. Les informations relatives à la détermination ou à l'estimation de l'occupation par des personnes pour certains éléments de l'infrastructure ferroviaire sont compilées dans le tableau 5. Pour des éléments du tronçons (par ex. pont, mur de soutènement, galerie, etc.), le tableau 6 contient des valeurs indicatives pour la probabilité qu'une personne soit affectée par la défaillance d'un élément.

Utilisation / Catégorie	Détermination ou estimation de l'occupation par des personnes
Usage mixte	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Détermination de l'occupation par des personnes pour les différents usages, tels que bureaux, locaux techniques, séjours et chambres, cantine, etc.</li> <li>_ Somme des occupations déterminées</li> </ul>
Éléments du tronçon <sup>1)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Détermination du nombre de trains de voyageurs circulant quotidiennement sur le tronçon ou sur les voies affectées par la défaillance de l'ouvrage (<math>N_z</math>)<sup>2)</sup></li> <li>_ Détermination du taux d'occupation moyen des trains de voyageurs (B)</li> <li>_ Détermination du nombre de personnes menacées (<math>N_P = N_z \times B</math>)</li> <li>_ Détermination de la probabilité P qu'une personne soit affectée par la défaillance de l'élément (des valeurs indicatives pour la probabilité P sont données au tableau 6).</li> <li>_ Détermination de l'occupation (<math>PB = P \times N_P</math>)</li> </ul>
Quais	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Détermination du nombre de passagers par jour qui embarquent, débarquent ou changent de train<sup>2)</sup></li> <li>_ Hypothèse d'une durée moyenne du séjour de 10 minutes pour l'embarquement et de 3 minutes pour le débarquement des passagers (valeurs à adapter à la situation réelle du quai / de la gare, selon la conception du quai, un danger dans le train est concevable ; une gare terminus est différente d'une gare de passage)</li> <li>_ Détermination de l'occupation en multipliant le nombre de passagers en correspondance par la durée moyenne du séjour et en divisant par 1440 (24 h x 60 min/h)</li> </ul>
Passage inférieur ou supérieur pour piétons	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Détermination du nombre total de personnes par jour qui utilisent le passage inférieur ou supérieur<sup>2)</sup></li> <li>_ Détermination du temps moyen de passage d'une personne en tenant compte de la longueur du passage souterrain, de congestions potentielles et de la durée possible du séjour</li> <li>_ Détermination de l'occupation en multipliant le nombre total de personnes par le temps moyen de passage et en divisant par 1440 (24 h x 60 min/h)</li> </ul>

**Tab. 5 Informations relatives à la détermination ou à l'estimation de l'occupation par des personnes PB**

<sup>1)</sup> par ex. ponts, murs de soutènement et galeries <sup>2)</sup> Tenir compte de l'horizon de prévision connu

Vitesse des trains	Longueur de l'ouvrage <sup>1)</sup>				
	20 m	50 m	100 m	200 m	500 m
20 km/h	1E-4	2 E-4	3 E-4	5E-4	10E-4
50 km/h	2E-4	2E-4	3E-4	3E-4	6E-4
100 km/h	3E-4	3E-4	3E-4	4E-4	5E-4
150 km/h	4E-4	5E-4	5E-4	5E-4	6E-4
200 km/h	6E-4	6E-4	6E-4	6E-4	7E-4

**Tab. 6 Valeurs indicatives de la probabilité (P) qu'une personne soit affectée par la défaillance d'un élément de tronçon**

<sup>1)</sup> Longueur de l'ouvrage : correspond par exemple à la longueur du pont, du mur de soutènement, de la galerie etc.

Le tableau 6 présente, en fonction de la vitesse du train et de la longueur de l'ouvrage, des valeurs indicatives de la probabilité (P) qu'une personne soit affectée par la défaillance d'un élément du tronçon. La vitesse du train a deux effets inverses. Une vitesse plus faible augmente la probabilité qu'un train se trouve dans la zone menacée (par ex. un pont qui s'effondre). Une vitesse plus élevée augmente en raison de la distance de freinage plus longue la probabilité qu'un train se trouvant devant la zone dangereuse ne s'arrête pas à temps. La probabilité d'une présence dans la zone menacée augmente également avec la longueur de l'élément d'une ligne affectée par la rupture.

### 4.3 Valeur de l'ouvrage BW

La valeur de l'ouvrage (BW) comprend la valeur de la structure porteuse et (notamment pour les bâtiments) les valeurs des éléments architecturaux (par ex. revêtements de plafond, murs, insertions, systèmes de façade, parapets et balustrades, escaliers, portes, fenêtres, toitures) et des éléments techniques du bâtiment (par ex. éclairage, ascenseurs, conduites, éléments de climatisation) selon [12]. Ces éléments se caractérisent par le fait qu'ils sont directement endommagés par le dégât de la structure porteuse ou qu'ils perdent toute valeur du fait des dommages considérables à la structure porteuse.

La valeur de l'ouvrage (BW) correspond à la valeur de remplacement qui est définie par le prix à payer pour reconstruire le même ouvrage avec les mêmes caractéristiques (par ex. concernant les matériaux de construction). Le cas échéant, une estimation peut être basée sur les coûts encourus pour remplacer un ouvrage détruit par un ouvrage équivalent qui, par exemple, remplirait la même fonction mais dont la conception différerait de l'ouvrage existant.

### 4.4 Facteur de risque pour l'ouvrage BRF

Pour déterminer le facteur de risque pour l'ouvrage (BRF), la courbe supérieure (ligne pleine) de la figure 16 de la norme SIA 269/8 [10] doit être utilisée pour les bâtiments ayant une proportion normale d'éléments architecturaux et techniques. Pour tous les autres ouvrages, en règle générale, il y a lieu de suivre la courbe inférieure (ligne pointillée). Le tableau 7 fournit des renseignements sur la détermination du facteur de risque pour l'ouvrage.

Facteur de risque pour l'ouvrage	Caractérisation	Exemples
Courbe supérieure (ligne continue)	_ Forte proportion d'éléments architecturaux et techniques tels que cloisons, escaliers, marquises, planchers surélevés, conduites, etc.	_ Poste de commande, gares, bâtiments administratifs, etc.
Courbe inférieure (ligne pointillée)	_ Pratiquement seulement la structure porteuse	_ Ponts, murs de soutènement, tunnels simples, etc.

**Tab. 7 Détermination du facteur de risque pour l'ouvrage BRF basé sur la figure 16 de la norme SIA 269/8 [10]**

#### 4.5 Valeur des objets SW

La norme SIA 269/8 [10] couvre le risque de dégâts aux objets suite à un comportement défavorable de la structure porteuse. Il s'agit principalement de l'effondrement de la structure porteuse, de déformations importantes ou d'accélération importantes, qui peuvent endommager les objets. Des objets sont endommagés, par exemple, par des parties de la structure porteuse ou des ENIE qui s'écroulent sur eux, par basculement suite à de grandes déformations ou déplacements, mais aussi par dégagement considérable de poussière si les objets y sont sensibles. Le tableau 8 donne des indications des objets de valeur qui devraient être pris en compte pour déterminer la valeur des objets (SW).

Éléments de l'infrastructure ferroviaire	Objets de valeurs à prendre en compte
Bâtiments	Mobilier, technique d'enclenchement, infrastructure informatique, matériel roulant, machines, outillage, installations de technique ferroviaire et autres équipements d'exploitation
Ouvrages d'art	Installations de technique ferroviaire, matériel roulant, etc.
Autres ouvrages <sup>1)</sup>	Voir bâtiments et ouvrages d'art

**Tab. 8 Objets dans des éléments de l'infrastructure ferroviaire**

<sup>1)</sup> Selon que leurs caractéristiques sont plutôt semblables à celles des bâtiments ou à celles des ouvrages d'art

La valeur des objets correspond à la valeur de remplacement et est à considérer si leur valeur atteint le même ordre de grandeur que celle de l'ouvrage, sauf exception selon chapitre 4.9.

#### 4.6 Facteur de risque pour les objets SRF

Le tableau 9 donne des indications pour la détermination du facteur de risque pour les objets. Il est recommandé de ne pas choisir des valeurs intermédiaires.

Facteur de risque pour les objets	Indications
0,05	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Les objets ne sont endommagés que lorsque la structure porteuse ou les éléments non structuraux s'effondrent complètement.</li> <li>_ Les objets se trouvent principalement dans des zones qui ne sont probablement pas affectées par un effondrement (par exemple au sous-sol).</li> </ul>
0,2	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Les objets sont déjà endommagés si la structure porteuse se déforme considérablement.</li> <li>_ Les objets sont principalement situés dans des zones qui peuvent être affectées par un effondrement de la structure porteuse ou des éléments non structuraux.</li> <li>_ Les objets sont endommagés en cas de défaillance localisée (par exemple, défaillance d'un appui ou déraillement d'un train).</li> <li>_ Les objets sont endommagés en cas de dégagement de poussière.</li> </ul>

**Tab. 9 Indications pour la détermination du facteur de risque pour les objets SRF**

#### **4.7 Coûts d'interruption UK**

Les coûts d'interruption (UK) doivent être pris en compte s'ils dépassent 20 % de la valeur de l'ouvrage.

Si la défaillance d'un ouvrage à la suite d'un dommage entraîne l'interruption de l'exploitation ferroviaire, les coûts d'interruption (UK) correspondent aux coûts nécessaires au maintien de l'exploitation (transports de remplacement, pont de secours, etc.). Si la défaillance d'un ouvrage s'accompagne d'une perte de revenus, les bénéfices dits menacés doivent être pris en compte comme coûts d'interruption. Les bénéfices menacés correspondent au chiffre d'affaires moins les coûts variables qui ne sont pas encourus à court ou moyen terme en raison de la défaillance. Étant donné que les coûts variables sont généralement d'importance secondaire, le chiffre d'affaires non réalisé à cause d'une interruption de l'activité peut être utilisé comme une approximation de la hauteur des coûts d'interruption.

Par souci de simplicité, le montant des coûts d'interruption est déterminé comme suit :

- Estimation du temps (par exemple en nombre de mois) jusqu'à ce que la fonction soit rétablie dans une large mesure (> 90 %),
- Détermination des coûts d'interruption en cas de dégât total (effondrement ou dommages entraînant la démolition) du bâtiment considéré par unité de temps (ex. : francs/mois),
- Détermination des coûts d'interruption comme le produit du temps d'interruption et des coûts par unité de temps.

#### **4.8 Facteur de risque lié à l'interruption URF**

Le facteur de risque lié à l'interruption (URF) spécifié au ch. E 4.6 de la norme SIA 269/8 [10] est de 0,5 ; ce facteur doit être utilisé tel quel si les coûts d'interruption sont calculés comme décrit ci-dessus. Un ajustement du facteur de risque lié à l'interruption en fonction de la durée de l'interruption (comme mentionné au ch. E 4.6 de la norme SIA 269/8) n'est nécessaire que si les coûts d'interruption sont calculés sur une base standardisée pour une année.

#### **4.9 Valeur de l'ouvrage et des objets directement touchés BSW**

Pour les ouvrages ayant une fonction d'infrastructure vitale ou importante (CO III ou CO II-i), il faut, conformément aux ch.10.2.5 et 10.4 de la norme SIA 269/8 [10], tenir compte outre de la réduction du risque pour les personnes, également de la disposition à investir dans la protection d'une fonction d'infrastructure. La valeur de l'ouvrage et des objets directement touchés BSW à utiliser à cet effet est toujours constituée des deux valeurs BW et SW. En d'autres termes, la valeur des objets directement touchés SW doit être prise en compte dans ce cas même si elle n'est pas du même ordre de grandeur que la valeur de l'ouvrage.

#### **4.10 Montant investi pour la sécurité SIC<sub>M</sub>**

Le montant investi pour la sécurité (SIC<sub>M</sub>) comprend au moins les coûts de construction des mesures ainsi que les coûts de planification. Selon que les mesures de sécurité sismique sont prises dans le cadre d'un projet de maintenance couvrant jusqu'à la structure porteuse ou indépendamment d'un autre projet, des coûts supplémentaires peuvent être encourus pour la déconstruction, la remise en état et leur planification. Si ces coûts supplémentaires ne sont pas calculés séparément, le total des coûts d'investissement liés à la sécurité peut être estimé à 1 à 3 fois les coûts de construction.

## Annexe A

### Exemple d'application : Viaduc

#### A.1 Résumé

Le viaduc est attribué à la classe d'ouvrage CO II avec un facteur de conformité minimal  $\alpha_{\min} = 0,25$ . Suite à l'examen de la sécurité sismique, le viaduc présente un facteur de conformité  $\alpha_{\text{eff}} = 0,15$  ; le facteur de conformité minimal n'est par conséquent pas respecté.

Selon la norme SIA 269/8, il faut au moins prendre des mesures pour atteindre  $\alpha_{\min}$ . A cette fin, le paquet de mesures  $PM_{\min}$ , qui comprend l'augmentation de la résistance du sol de fondation, est élaboré. Les coûts pour le  $PM_{\min}$  sont estimés à CHF 250 000.–.

La proportionnalité d'autres paquets de mesures conduisant à des facteurs de conformité de 1,0 ( $PM_{1,0}$ ) et 0,7 ( $PM_{0,7}$ ) est vérifiée. Numériquement, le  $PM_{0,7}$  s'avère proportionné, tandis que le  $PM_{1,0}$  juste pas. Le  $PM_{1,0}$  qui comprend le renforcement des têtes de piliers, des fondations ainsi que des culées et des appuis du pont est toutefois mis en œuvre en raison du gain de sécurité élevé et de l'efficacité des interventions  $EF_M$  très proche de 1,0. Les coûts pour le  $PM_{1,0}$  sont estimés à CHF 260 000.–.

L'objectif visé, soit  $\alpha_{\text{int}} \geq 1,0$  (ch. 9.4.1, norme SIA 269/8), est donc atteint. Cela signifie qu'après la mise en œuvre des paquets de mesures  $PM_{\min}$  et  $PM_{1,0}$  aucun déficit de sécurité subsiste.

**A.2 Ouvrage, utilisation, occupation par des personnes et valeurs**

Aspect	Description	Explication
Structure porteuse	Long viaduc avec pont court en construction mixte. Le pont court enjambant la rivière repose sur les piliers du viaduc.	
Dimension L x B	330 m x 12,5 m / 70 m x 12,5 m	
Conception de la structure porteuse	plusieurs travées / poutre simple	Viaduc en pierre de taille et maçonnerie. Pont avec dalle en béton et structure en acier
Contreventement	Longitudinalement : culées fixes et mobiles. Transversalement : porte-à-faux, sous forme de piliers encastrés dans le sol.	
Utilisation	Transport ferroviaire de voyageurs et de marchandises	
Trafic	86 trains par jour	- 2 trains de voyageurs par direction et par heure (76 = 4 x 19 h) avec une occupation moyenne de 100 personnes. - 5 trains de marchandises par jour et direction en moyenne hebdomadaire Vitesse dans la section correspondante : 150 km/h.
Occupation par des personnes (val. moy. des pers. potentiellement menacées sur la durée d'utilisation)	PB = 4	Chaque jour, environ 7600 personnes (76 trains de 100 personnes en moyenne par train) traversent le pont. Probabilité qu'une personne soit affectée par la défaillance du viaduc : $P = 5E-4$ (Tab. 6). $PB = 7600 \times 5E-4 = 3,8$ personnes.
Valeur de l'ouvrage	BW = 40 millions CHF	Valeur de rempl. de 8000 <sup>1)</sup> francs/m <sup>2</sup> (8000 x 400 m x 12,5 m). Faible proportion d'ENIE.
Valeur des objets	SW = 1,3 millions CHF	Chaque jour, 86 rames d'une valeur de 30 millions de francs traversent le pont. Probabilité déterminée par analogie au taux d'occupation. Valeur des objets = $5E-4 \times 86 \times 30 = 1,3$ million de francs.
Coûts d'interruption	UK = 6 millions CHF	Les coûts d'interruption sont estimés à 100 000 francs par jour pendant 2 mois. Toutefois, selon la norme SIA 269/8, E.4.1, les coûts d'interruption ne doivent pas être pris en compte, car ils sont inférieurs à 20 % de la valeur de l'ouvrage.
Durée d'utilisation restante	$d_r = 100$ ans	Selon le chapitre 4.1 de la directive, la durée d'utilisation restante minimale est de 80 ans. Le GI a fixé cette durée à 100 ans.

**Tab. A.1 Informations pertinentes sur la structure porteuse et sur son utilisation**

<sup>1)</sup> Ces coûts de remplacement sont spécifiés par l'exploitant et peuvent varier considérablement. Il y a aussi des GI qui estiment pour la valeur de remplacement par exemple 11 000 francs/m<sup>2</sup>.

### A.3 Classe d'ouvrage

La classe d'ouvrage du viaduc est déterminée conformément au ch. 3.3 de la directive. L'exigence minimale pour la classe d'ouvrage  $CO_{min}$  pour les ponts est CO II selon le tableau 1. Le tronçon sur lequel se situe le pont est d'importance normale et est ainsi attribué à la classe sismique de tronçon CST I. L'ouvrage est donc attribué à la classe d'ouvrage CO II, voir la séquence de la figure A.1.

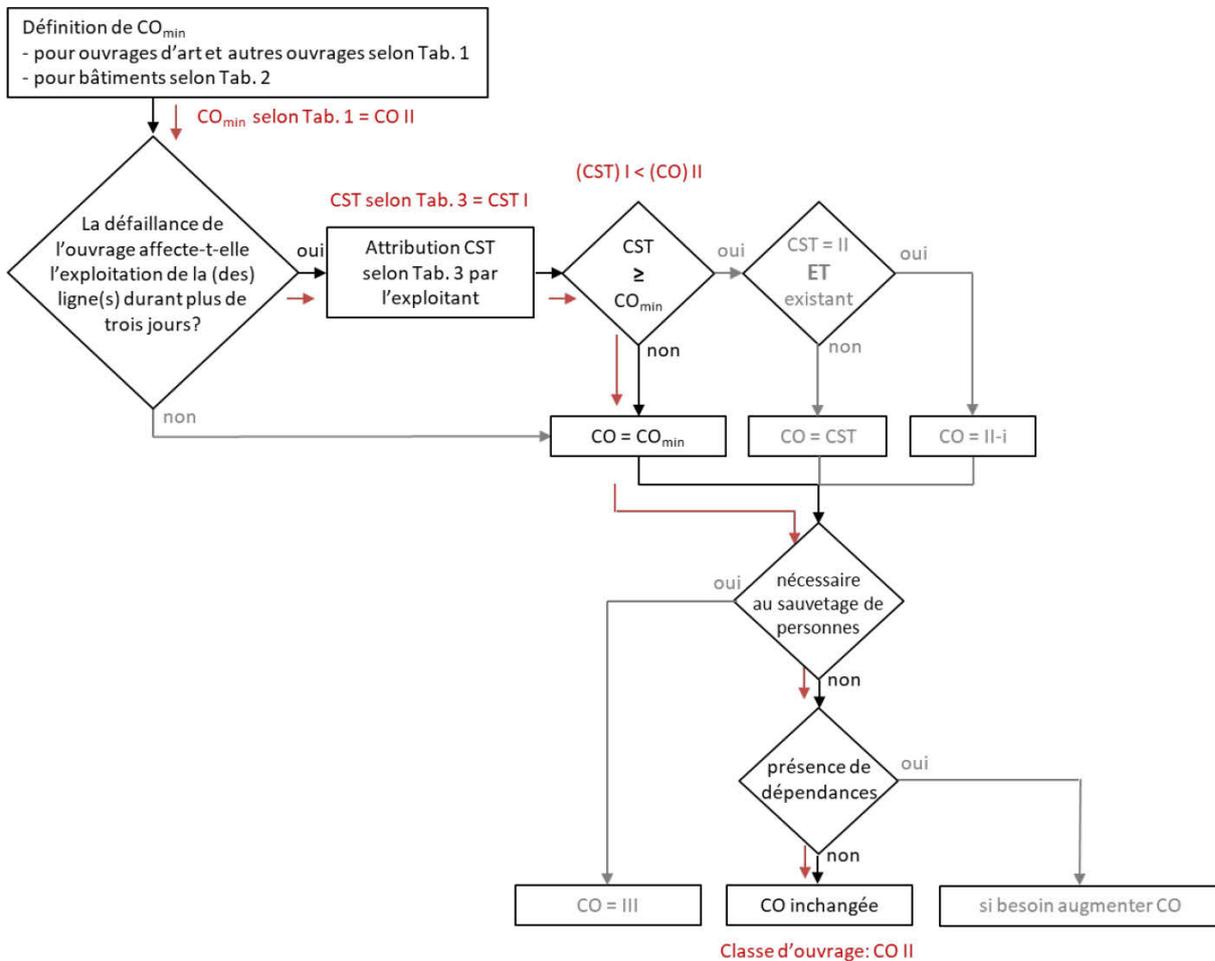


Fig. A.1 Séquence de détermination de la classe d'ouvrage conformément à la directive

## A.4 Évaluation de la sécurité sismique

L'évaluation de la sécurité sismique donne un facteur de conformité  $\alpha_{eff} = 0,15$  pour le viaduc. Ce facteur se base sur les points faibles identifiés suivants.

Point faible	Fact. de conformité $\alpha_{eff}$	Évaluation de la sécurité sismique
1) Fondations du viaduc, introduction effort dans sol de fondation au droit des piliers de rive C et D	0,15	Mesures nécessaires, vu que $\alpha_{eff}$ plus petit que $\alpha_{min} = 0,25$
2) Structure porteuse du viaduc, résistance en direction transversale: têtes de pilier A et B	0,25	Mesures nécessaires, dans la mesure où elles sont proportionnées
3) Fondations du viaduc, introduction des forces dans le sol, piliers A, B et E	0,7	Mesures nécessaires, dans la mesure où elles sont proportionnées
4) Appuis de pont, piliers C et D, direction transversale	0,4	Mesures nécessaires, dans la mesure où elles sont proportionnées
Facteur de conformité déterminant	0,15	

Tab. A.2 Résumé des facteurs de conformité  $\alpha_{eff}$

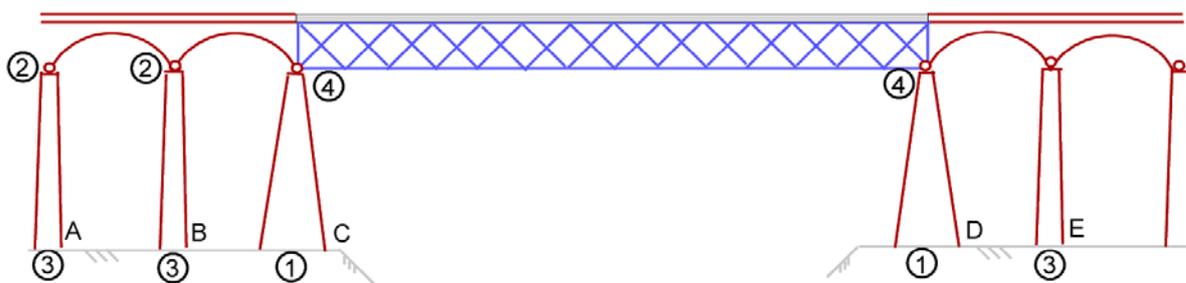


Fig. A.2 Visualisation des points faibles

Le viaduc compte au total près de 30 arches. Dans cet exemple, on suppose que les points faibles de la figure A.2 ne s'appliquent qu'à la section représentée (pilier A à E) proche de la rivière et que les autres arches ne présentent pas les points faibles 2 à 4.

## A.5 Recommandation d'intervention

### A.5.1 Mesures visant à remédier aux points faibles

Mesure	Description	Coût total	Facteur de conformité local
a)	Augmentation de la résistance du sol de fondation au droit des piliers de rive C et D (point faible 1)	CHF 250 000.–	localement $\alpha_{eff} = 0,15 \rightarrow \alpha_{int} = 1,0$
b)	Renforcement des têtes de pilier A et B (point faible 2)	CHF 120 000.–	localement $\alpha_{eff} = 0,25 \rightarrow \alpha_{int} = 1,0$
c)	Renforcement des fondations des piliers A, B et E (point faible 3)	CHF 60 000.–	localement $\alpha_{eff} = 0,7 \rightarrow \alpha_{int} = 1,0$
d)	Renforcement des appuis de pont pour les piliers C et D (point faible 4)	CHF 80 000.–	localement $\alpha_{eff} = 0,4 \rightarrow \alpha_{int} = 1,0$

Tab. A.3 Mesures visant à remédier aux points faibles

Afin d'améliorer la sécurité sismique de la structure, les mesures individuelles sont regroupées en paquets de mesures. Le tableau A.4 présente les paquets de mesures et leurs coûts.

1.  $PM_{min}$  (pour atteindre  $\alpha_{min}$ )
2.  $PM_{1,0}$  (pour atteindre la sécurité normative de nouveaux ouvrages, c'est-à-dire  $\alpha_{int} = 1,0$ )
3.  $PM_{0,7}$  (pour la mesure partielle  $\alpha_{int} = 0,7$ )

La figure A.3 illustre la variation de la sécurité sismique par paquet de mesures.

*Explications :*

Les paquets de mesures doivent être créés de telle sorte que les mesures qui doivent absolument être mises en œuvre pour atteindre l'objectif  $\alpha_{min}$  soient d'abord regroupées dans un paquet de mesures  $PM_{min}$ . L'étape suivante consiste à élaborer un paquet de mesures  $PM_{1,0}$ , qui comprend les mesures supplémentaires nécessaires pour atteindre un facteur de conformité  $\alpha_{int} = 1,0$  et à vérifier sa proportionnalité. Si celle-ci n'est pas donnée, il convient d'évaluer des paquets de mesures visant à réduire progressivement les facteurs de conformité après intervention (par exemple,  $PM_{0,5}$ ,  $PM_{0,4}$  etc.) jusqu'à ce que la proportionnalité soit donnée. Cette procédure est illustrée dans la figure 1 de la directive.

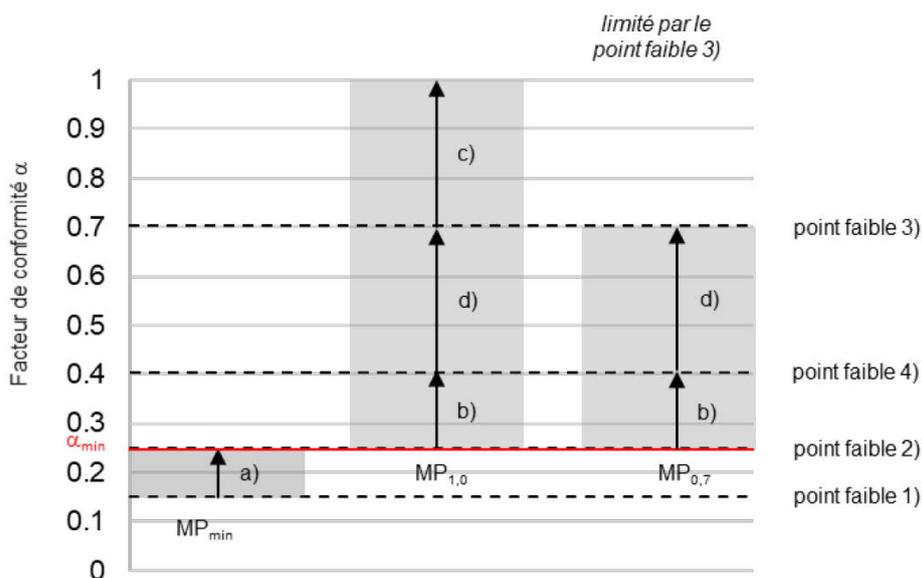
Paquet	Mesures	Coûts du paquet <sup>1)</sup>	Facteur de conformité global
$PM_{min}^{2)}$	a)	CHF 250 000.–	$\alpha_{eff} = 0,15 \rightarrow \alpha_{int,EMmin} = 0,25$
$PM_{1,0}$	b) + c) + d)	CHF 260 000.–	$\alpha_{int,EMmin} = 0,25 \rightarrow \alpha_{int,EM1,0} = 1,0$
$PM_{0,7}$	b) + d)	CHF 200 000.–	$\alpha_{int,EMmin} = 0,25 \rightarrow \alpha_{int,EM0,5} = 0,7$

**Tab. A.4 Paquets de mesures possibles pour augmenter le facteur de conformité global**

<sup>1)</sup> Les coûts correspondent aux coûts d'investissement liés à la sécurité  $SIC_M$  selon ch. 10.7.4, norme SIA 269/8

<sup>2)</sup>  $PM_{min}$  est nécessaire et doit être exécuté indépendamment de son coût. Il est supposé à ce stade qu'il n'existe pas de mesure plus favorable pour atteindre le facteur de conformité minimal.

Étant donné que la mesure a) visant à supprimer le point faible 1 garantit le facteur de conformité minimal, ce paquet de mesures est appelé  $PM_{min}$ . La mesure a) de  $PM_{min}$  conduit à une augmentation locale du facteur de conformité à 1,0, le facteur de conformité global restant à 0,25 en raison du point faible 2).



**Fig. A.3 Visualisation des points faibles, des mesures et des paquets de mesures**

## A.5.2 Évaluation de la proportionnalité

Les bases pour l'évaluation de la proportionnalité des paquets de mesures sont énumérées au tableau A.5. Le tableau contient également des références à des chapitres de la norme SIA 269/8 ou à des chapitres du présent exemple ou de la directive.

Désignation	Formule et valeur	Référence
Durée d'utilisation restante	$d_r = 100 \text{ an}$	Tab. A.1
Facteur d'escompte	$DF = \frac{i_d \cdot (1 + i_d)^{d_r}}{(1 + i_d)^{d_r} - 1} = \frac{0,02 \cdot (1 + 0,02)^{100}}{(1 + 0,02)^{100} - 1} \cong 2,3\%$	ch. 10.7.2, SIA 269/8 avec $i_d = 2\%$
Occupation par des personnes	$PB = 4$	Tab. A.1
Coût limite	$GK = 10 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	ch. 10.3.9, SIA 269/8
Valeur de l'ouvrage	$BW = 40 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	Tab. A.1
Valeur des objets <sup>1)</sup>	$SW = 1,3 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	Tab. A.1
Facteur de risque pour les objets	$SRF = 0,2$	ch. E.3.4, SIA 269/8
Coûts d'interruption <sup>2)</sup>	$UK = 6 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	Tab. A.1
Facteur de risque lié à l'interruption	$URF = 0,5 \cdot 1 \text{ J} = 0,5$	ch. E.4.6, SIA 269/8

**Tab. A.5 Paramètres de calcul de la proportionnalité**

<sup>1)</sup> négligé selon ch. E.3.1 de la norme SIA 269/8, car pas du même ordre de grandeur que la valeur de l'ouvrage.

<sup>2)</sup> négligés selon ch. E.4.1 de la norme SIA 269/8, car inférieurs à 20% de la valeur de l'ouvrage.

Le calcul de la proportionnalité ou de l'efficacité des mesures est résumé ci-dessous pour les paquets de mesures possibles.

Désignation	Formule	PM <sub>1,0</sub>	PM <sub>0,7</sub>	Référence
Facteur de conformité avant intervention	$\alpha_{\text{eff}}$	0,25	0,25	Tab. A.4
Facteur de conformité après intervention	$\alpha_{\text{int}}$	1,0	0,7	Tab. A.4
Différence de fact. de risque pour les pers.	$\Delta PRF_M(\Delta\alpha)$	$9 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	Fig. 7, SIA 269/8
Réduction du risque pour les pers. [CHF/an]	$\Delta RP_M = \Delta PRF_M \cdot PB \cdot GK$	340	307	ch. 10.3.1, SIA 269/8
Différence du fact. de risque pour l'ouvrage	$\Delta BRF_M(\Delta\alpha)$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	Fig. 16, SIA 269/8
Réduction du risque pour l'ouvrage [CHF/J]	$\Delta RB_M = \Delta BRF_M \cdot BW$	5 475	4 991	ch. E.2.2, SIA 269/8
Réduction du risque pour les objets <sup>1)</sup> [CHF/J]	$\Delta RS_M = SRF \cdot \Delta BRF_M \cdot SW$	0	0	ch. E.3.2, SIA 269/8
Réduction du risque pour l'exploitation <sup>1)</sup> [CHF/J]	$\Delta RU_M = URF \cdot \Delta BRF_M \cdot UK$	0	0	ch. E.4.5, SIA 269/8
Réduction du risque [CHF]	$\Delta R_M = \Delta RP_M + \Delta RB_M + \Delta RS_M + \Delta RU_M$	5 815	5 297	ch. E.1.2, SIA 269/8
Montant investi pour la sécurité [CHF]	$SIC_M$	260 000	200 000	Tab. A.4
Coût imputable à la sécurité [CHF/an]	$SC_M = DF \cdot SIC_M$	6 033	4 641	ch. 10.7.1, SIA 269/8
Efficacité des mesures	$EF_M = \frac{\Delta R_M}{SC_M}$	0,96	1,14	ch. 10.2.2, SIA 269/8
Montant maximal proportionné pour la sécurité [CHF]	$SIC_{EF=1} = \frac{\Delta R_M}{DF}$	$\cong 251\ 000$ $< 260\ 000$ pour PM <sub>1,0</sub>	$\cong 228\ 000$ $> 200\ 000$ pour PM <sub>0,5</sub>	

**Tab. A.6 Calcul de l'efficacité des paquets de mesures PM**

<sup>1)</sup> La représentation de  $\Delta RS_M$  et de  $\Delta RU_M$  sert uniquement à titre informatif.

Paquets de mesures	Décision	Explication
PM <sub>min</sub>	requis	Dans tous les cas, la mesure doit être exécutée.
PM <sub>1,0</sub>	proportionné	Numériquement, le paquet de mesures n'est juste pas proportionné. En raison du gain de sécurité élevé et de l'efficacité des interventions EF <sub>M</sub> proche de 1,0, les mesure sont toutefois mises en œuvre.
PM <sub>0,7</sub>	proportionné	Le PM <sub>1,0</sub> atteint une sécurité plus élevée et est mis en œuvre.

Tab. A.7 Évaluation de la proportionnalité

Pour le viaduc considéré, le paquet de mesures PM<sub>1,0</sub>, qui garantit l'état de  $\alpha_{int} \geq 1,0$ , n'est numériquement juste pas proportionné. Le paquet de mesures PM<sub>1,0</sub> est cependant mis en œuvre en raison du gain de sécurité élevé et de l'efficacité des interventions EF<sub>M</sub> proche de 1,0. Avec ces mesures, l'objectif visé, soit  $\alpha_{int} \geq 1,0$  (ch. 9.4.1 de la norme SIA 269/8) est atteint.

*Explications :*

*Outre l'identification des points faibles et la définition de mesures pour y remédier, il est décisif de connaître le montant disponible pour atteindre un  $\alpha_{int}$  donné. Dans cet exemple, il est proportionné selon le tableau A6 d'investir environ 0,25 million de francs pour atteindre un  $\alpha_{int} = 1,0$ , peu importe comment les paquets de mesures sont finalement composés. Si l'objectif de  $\alpha_{int} > 1,0$  ne peut être atteint avec les coûts d'investissement proportionnés maximaux, il faut retirer les mesures dont l'utilité est plus faible des paquets de mesures.*

*Si un projet de construction important est réalisé pour l'ouvrage, par exemple une remise en état complète, la proportionnalité doit également être mise en regard avec les objectifs et les coûts du projet.*

## Annexe B

### Exemple d'application : Bâtiment avec centre de commande

#### B.1 Résumé

Le centre de commande est attribué à la classe d'ouvrage CO II-i avec un facteur de conformité minimal  $\alpha_{\min} = 0,4$ . Suite à l'examen de la sécurité sismique, le poste de commande présente un facteur de conformité  $\alpha_{\text{eff}} = 0,25$  ; le facteur de conformité minimal n'est par conséquent pas respecté.

Selon la norme SIA 269/8, il faut au moins prendre des mesures pour atteindre  $\alpha_{\min}$ . À cette fin, le paquet de mesures  $PM_{\min}$ , qui comprend le remplacement des murs intérieurs par des cloisons légères appropriées, est élaboré. Les coûts pour le  $PM_{\min}$  sont estimés à CHF 100 000.–.

La proportionnalité d'autres paquets de mesures conduisant à des facteurs de conformité de 1,0 ( $PM_{1,0}$ ) et 0,75 ( $PM_{0,75}$ ) est vérifiée. Seul le  $PM_{0,75}$ , qui consiste à améliorer l'introduction des efforts dans le radier, à renforcer des éléments de contreventement existants et à ériger de nouveaux murs, s'avère proportionné, c'est pourquoi les mesures correspondantes doivent être mises en œuvre. Les coûts pour le  $PM_{0,75}$  sont estimés à CHF 600 000.–.

L'objectif de base visé, soit  $\alpha_{\text{int}} \geq 1,0$  (ch. 9.4.1 de la norme SIA 269/8) n'est donc pas atteint. Cela signifie qu'après la mise en œuvre des paquets de mesures  $PM_{\min}$  et  $PM_{0,75}$  un déficit de sécurité accepté selon la norme SIA 269/8 subsiste.

**B.2 Ouvrage, utilisation, occupation par des personnes et valeurs**

Aspect	Description	Explication
Bâtiment	2 sous-sols, 1 rez-de-chaussée et 5 étages supérieurs. Hauteur env. 23,5 m au-dessus du sol (sans superstructure de toit).	
Dimensions L x l x H	34 m x 12,5 m x 23,5 m	
Conception de la structure porteuse	Sous-sols principalement en béton armé. Transfert vertical des charges par piliers préfabriqués en béton armé et murs en béton armé.	
Contreventement	Les éléments de contreventement à partir du rez-de-chaussée sont principalement constitués de maçonnerie et de béton armé. Les noyaux sont principalement en béton armé et disposés asymétriquement dans le plan horizontal. Différents éléments de contreventement sont discontinus en élévation.	
Utilisation	Poste de commande avec bureaux et séjours supplémentaires (pour le personnel de manœuvre et les conducteurs de locomotives) ainsi qu'un atelier et une cantine pour 50 personnes supplémentaires venant de l'extérieur à l'étage supérieur.	
Occupation par des personnes (nombre moyen de personnes potentiellement menacées sur la durée d'utilisation)	PB = 13	voir Tab. B.2
Valeur de l'ouvrage	BW = 6 millions CHF	forte proportion <sup>1)</sup> d'ENIE
Valeurs des objets	SW = 20 millions CHF	
Coûts d'interruption <sup>1)</sup>	UK = 300 millions CHF	à considérer selon ch. E.4.1 de la norme SIA 269/8, puisque dépassant 20 % de la valeur de l'ouvrage
Durée d'util. restante	d <sub>r</sub> = 50 ans	conformément à la directive, ch. 4.1

**Tab. B.1 Informations pertinentes sur la structure porteuse et sur son utilisation**<sup>1)</sup> Pertinent uniquement pour l'utilisation de l'annexe E, norme SIA 269/8.

Occupation	Nombre	Heures/jour	Jours/semaine	Semaines/An	Occupation
Techniciens	15	8	5	52	$PB_1 = 3,5 \cong \frac{15 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 52}{8736}$
Conducteurs de locomotive / agents de la manœuvre	25	8	5	52	$PB_2 = 6 \cong \frac{25 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 52}{8736}$
Cantine	50 <sup>1)</sup>	2	5	52	$PB_3 = 3 \cong \frac{50 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 52}{8736}$
					$PB = \sum PB_i = 12,5$

**Tab. B.2 Calcul du taux d'occupation PB**<sup>1)</sup> Les techniciens et les conducteurs de train se trouvant à la cantine ne sont pas à prendre en compte, vu qu'ils sont déjà inclus dans l'occupation de 8 heures. 50 personnes supplémentaires viennent de l'extérieur.

### B.3 Classe d'ouvrage

La classe d'ouvrage du poste de commande est déterminée conformément au chapitre 3.3 de la directive. L'exigence minimale pour la classe d'ouvrage  $CO_{min}$  est définie conformément aux informations du tableau 2. En raison de son utilisation et de son importance, le poste de commande est attribué à la classe d'ouvrage CO II-i. De plus, il fait partie de l'infrastructure d'un tronçon de la classe sismique de tronçon CST II et a une influence majeure sur la disponibilité de la ligne. L'ouvrage est donc attribué à la classe d'ouvrage CO II-i (voir Fig. B.1).

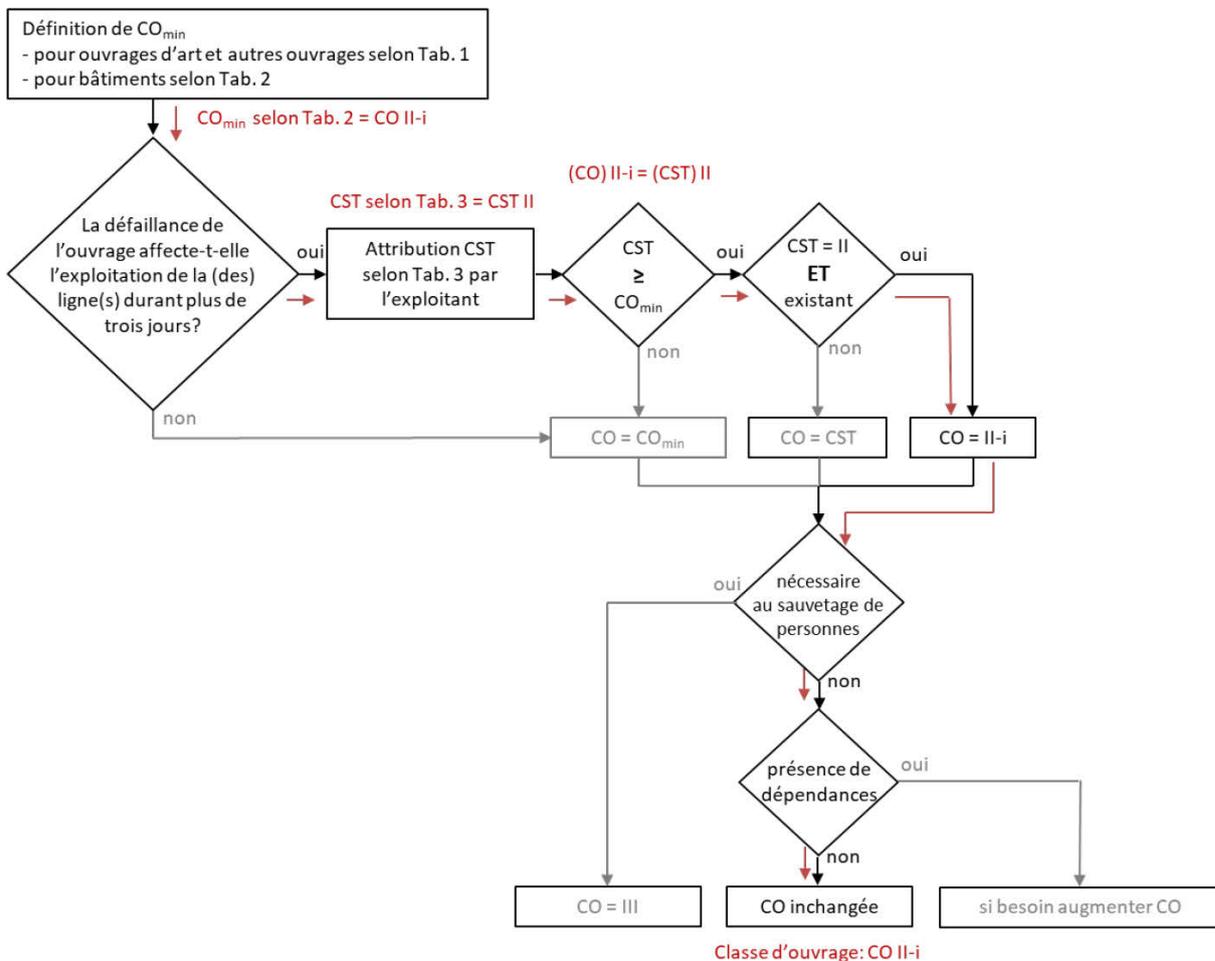


Fig. B.1 Séquence de détermination de la classe d'ouvrage conformément à la directive

## B.4 Évaluation de la sécurité sismique

L'évaluation de la sécurité sismique donne un facteur de conformité  $\alpha_{\text{eff}} = 0,25$  pour le poste de commande. Ce facteur se base sur les points faibles identifiés suivants.

Point faible	Fact. de conformité $\alpha_{\text{eff}}$	Évaluation de la sécurité sismique
1) Structure porteuse, sens longitudinal, introduction des efforts au niveau des fondations et résistance du rez-de-chaussée et des étages supérieurs.	0,45	Mesures nécessaires, dans la mesure où elles sont proportionnées
2) Structure porteuse, sens transversal, introduction des efforts aux étages supérieurs	0,75	Mesures nécessaires, dans la mesure où elles sont proportionnées
3) Structure porteuse, sens transversal, noyau au sous-sol et au rez-de-chaussée	0,5	Mesures nécessaires, dans la mesure où elles sont proportionnées
4) ENIE, divers murs intérieurs hors plan	0,25	Mesures nécessaires, car $\alpha_{\text{eff}}$ inférieur à $\alpha_{\text{min}} = 0,4$
Facteur de conformité déterminant structure porteuse	0,45	
Facteur de conformité déterminant des ENIE	0,25	

Tab. B.3 Résumé des facteurs de conformité  $\alpha_{\text{eff}}$

## B.5 Recommandation d'intervention

### B.5.1 Mesures visant à remédier aux points faibles

Mesure	Description	Coût total	Facteur de conformité local
a)	Amélioration de l'introduction des efforts dans le radier et renforcement de parois existantes dans le sens longitudinal ou remplacement par de nouvelles parois (point faible 1)	CHF 400 000.–	localement $\alpha_{\text{eff}} = 0,45 \rightarrow \alpha_{\text{int}} = 1,0$
b)	Renforcement de l'introduction des efforts dans les parois dans les étages supérieurs dans le sens transversal (point faible 2)	CHF 300 000. –	localement $\alpha_{\text{eff}} = 0,75 \rightarrow \alpha_{\text{int}} = 1,0$
c)	Amélioration de la résistance à l'effort tranchant du noyau au sous-sol et au rez-de-chaussée dans le sens transversal (point faible 3)	CHF 200 000. –	localement $\alpha_{\text{eff}} = 0,5 \rightarrow \alpha_{\text{int}} = 1,0$
d)	ENIE Murs intérieurs hors plan : remplacement des murs par des cloisons légères appropriées (point faible 4)	CHF 100 000. –	localement $\alpha_{\text{eff}} = 0,25 \rightarrow \alpha_{\text{int}} = 1,0$

Tab. B.4 Mesures visant à remédier aux points faibles

Afin d'améliorer la sécurité sismique de la structure, les mesures individuelles sont regroupées en paquets de mesures. Le tableau B.5 présente les paquets de mesures et leurs coûts.

1.  $PM_{\text{min}}$  (pour atteindre  $\alpha_{\text{min}}$ )
2.  $PM_{1,0}$  (pour atteindre la sécurité normative de bâtiments neufs, c'est-à-dire  $\alpha_{\text{int}} = 1,0$ )
3.  $PM_{0,75}$  (pour la mesure partielle  $\alpha_{\text{int}} = 0,75$ )

La figure B.2 illustre la variation de la sécurité sismique par paquet de mesures.

**Explications :**

Les paquets de mesures doivent être créés, de telle sorte que les mesures qui doivent absolument être mises en œuvre pour atteindre l'objectif  $\alpha_{min}$  soient d'abord regroupées dans un paquet de mesures  $PM_{min}$ . L'étape suivante consiste à élaborer un paquet de mesures  $PM_{1,0}$ , qui comprend les mesures supplémentaires nécessaires pour atteindre un facteur de conformité de  $\alpha_{int} = 1,0$  et à vérifier sa proportionnalité. Si celle-ci n'est pas donnée, il convient d'évaluer des paquets de mesures visant à réduire progressivement les facteurs de conformité après intervention (par exemple,  $PM_{0,7}$ ,  $PM_{0,5}$  etc.) jusqu'à ce que la proportionnalité soit atteinte. Cette procédure est illustrée dans la figure 1 de la directive.

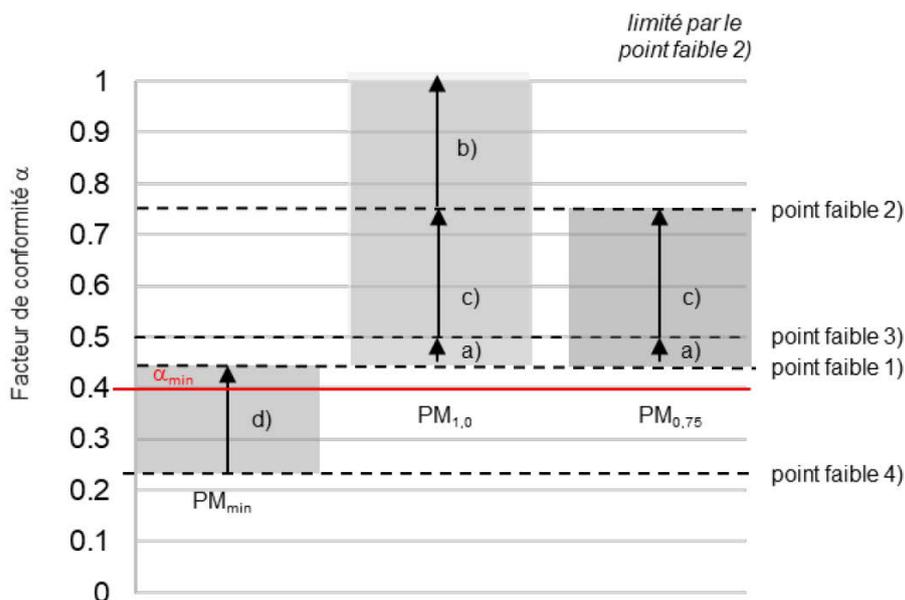
Paquet	Mesures	Coût du paquet <sup>1)</sup>	Facteur de conformité global
$PM_{min}$ <sup>2)</sup>	d)	CHF 100 000.–	$\alpha_{eff} = 0,25 \rightarrow \alpha_{int,PM_{min}} = 0,45$
$PM_{1,0}$	a) + b) + c)	CHF 900 000. –	$\alpha_{int,PM_{min}} = 0,45 \rightarrow \alpha_{int,PM_{1,0}} = 1,0$
$PM_{0,75}$	a) + c)	CHF 600 000. –	$\alpha_{int,PM_{min}} = 0,45 \rightarrow \alpha_{int,PM_{0,75}} = 0,75$

**Tab. B.5 Paquets de mesures possibles pour augmenter le facteur de conformité global**

<sup>1)</sup> Les coûts correspondent aux coûts d'investissement liés à la sécurité  $SIC_M$  selon ch. 10.7.4, norme SIA 269/8

<sup>2)</sup>  $PM_{min}$  est nécessaire et doit être exécuté indépendamment du coût. Il est supposé à ce stade qu'il n'existe pas de mesure plus favorable pour atteindre le facteur de conformité minimal.

Étant donné que la mesure d) visant à supprimer le point faible 4 garantit le facteur de conformité minimal, ce paquet de mesures est appelé  $PM_{min}$ . La mesure d) de  $PM_{min}$  conduit à une augmentation locale du facteur de conformité à 1,0, le facteur de conformité global restant à 0,45 en raison du point faible 1).



**Fig. B.2 Visualisation des points faibles, des mesures et des paquets de mesures**

## B.5.2 Évaluation de la proportionnalité

Les bases pour l'évaluation de la proportionnalité des paquets de mesures sont énumérées au tableau B.6. Le tableau contient également des références à des chapitres de la norme SIA 269/8 ou à des chapitres du présent exemple ou de la directive.

Désignation	Formule et valeur	Référence
Durée d'utilisation restante	$d_r = 50 \text{ ans}$	Tab. B.1
Facteur d'escompte	$DF = \frac{i_d \cdot (1 + i_d)^{d_r}}{(1 + i_d)^{d_r} - 1} = \frac{0,02 \cdot (1 + 0,02)^{50}}{(1 + 0,02)^{50} - 1} \cong 3,2\%$	ch. 10.7.2, SIA 269/8 avec $i_d = 2\%$
Occupation par des personnes	$PB = 13$	Tab. B.1
Coût limite	$GK = 10 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	ch. 10.3.9, SIA 269/8
Valeur de l'ouvrage	$BW = 6 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	Tab. B.1
Valeur des objets	$SW = 20 \cdot 10^6 \text{ CHF}$	Tab. B.1

Tab. B.6 Paramètres de calcul de la proportionnalité

Le calcul de la proportionnalité ou de l'efficacité des mesures est résumé ci-dessous pour les paquets de mesures possibles.

Désignation	Formule	PM <sub>1,0</sub>	PM <sub>0,75</sub>	Référence
Facteur de conformité avant intervention	$\alpha_{eff}$	0,45	0,45	Tab. B.5
Facteur de conformité après intervention	$\alpha_{int}$	1,0	0,75	Tab. B.5
Différence de facteur de risque personnel	$\Delta PRF_M(\Delta\alpha)$	$3 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	Fig. 7, SIA 269/8
Réduction du risque pour pers. [CHF/an]	$\Delta RP_M = \Delta PRF_M \cdot PB \cdot GK$	372	290	ch. 10.3.1, SIA 269/8
Différence de taux d'infrastructure	$\Delta IS(\Delta\alpha)$	0,09%	0,09%	ch. 10.4.7, SIA 269/8
Disposition à investir pour la fonction d'infrastructure [CHF/an]	$\Delta ZI_M = \Delta IS \cdot \frac{(BW + SW)}{BSW}$	22 533	22 533	ch. 10.4.6, SIA 269/8
Réduction du risque [CHF]	$\Delta R_M = \Delta RP_M + \Delta ZI_M$	22 905	22 823	ch. 10.2.5, SIA 269/8
Montant investi pour la sécurité [CHF]	$SIC_M$	900 000	600 000	Tab. B.5
Coûts imputable à la sécurité [CHF/an]	$SC_M = DF \cdot SIC_M$	28 641	19 094	ch. 10.7.1, SIA 269/8
Efficacité des mesures	$EF_M = \frac{\Delta RP_M + \Delta ZI_M}{SC_M}$	0,80	1,20	ch. 10.2.5, SIA 269/8
Montant maximal proportionné pour la sécurité [CHF].	$SIC_{EF=1} = \frac{\Delta RP_M + \Delta ZI_M}{DF}$	$\cong 720\,000$ $< 900\,000$ pour PM <sub>1,0</sub>	$\cong 717\,000$ $> 600\,000$ pour PM <sub>0,75</sub>	

Tab. B.7 Calcul de l'efficacité des paquets de mesures PM

Paquet de mesures	Décision	Explication
PM <sub>min</sub>	requis	Dans tous les cas, la mesure doit être exécutée.
PM <sub>1,0</sub>	disproportionné	Le paquet de mesures n'est pas proportionné, puisque la mesure b) entraîne des coûts élevés par rapport à l'utilité qu'elle procure
PM <sub>0,75</sub>	proportionné	Le facteur de conformité global de 0,75 ne peut pas être augmenté d'avantage sans la mesure b).

Tab. B.8 Évaluation de la proportionnalité

Pour le poste de commande considéré, le paquet de mesures PM<sub>1,0</sub>, qui garantit l'état  $\alpha_{int} \geq 1,0$  n'est pas proportionné et n'est pas à mettre en œuvre à l'heure actuelle. Le paquet de mesures PM<sub>0,75</sub> est proportionné et un facteur de conformité global de  $\alpha_{int} = 0,75$  est ainsi atteint. Cette « mesure partielle » n'atteint pas l'objectif de base visé  $\alpha_{int} \geq 1,0$  (ch. 9.4.1, norme SIA 269/8).

*Explications :*

*Outre l'identification des points faibles et la définition de mesures pour y remédier, il est décisif de connaître le montant disponible pour atteindre un  $\alpha_{int}$  prescrit. Dans cet exemple, il est proportionné selon le tableau B.9 d'investir environ 0,72 million de francs pour atteindre un  $\alpha_{int} = 1,0$ , peu importe comment les paquets de mesures sont finalement composés. Si l'objectif  $\alpha_{int} \geq 1,0$  ne peut pas être atteint avec les coûts d'investissement proportionnés maximaux, il faut retirer les mesures dont l'utilité est faible des paquets de mesures.*

*Si un projet de construction important est réalisé pour l'ouvrage, par exemple une remise en état complète, la proportionnalité doit également être mise en regard avec les objectifs et les coûts du projet.*

## Répertoire

La directive renvoie aux lois, ordonnances, directives, normes et publications suivantes, qui s'appliquent totalement ou partiellement au sens des références. La dernière édition respective (incluant toutes les modifications) fait foi.

- [1] Loi fédérale sur les chemins de fer du 20 décembre 1957 (LCdF), RS 742.101
- [2] Ordonnance sur la construction et l'exploitation des chemins de fer du 23 novembre 1983 (Ordonnance sur les chemins de fer, OCF), RS 742.141.1
- [3] Ordonnance sur la procédure d'approbation des plans des installations ferroviaires du 2 février 2000 (OPAPIF), RS 742.142.1
- [4] Directive OFT ad art. 3 de l'OPAPIF, Exigences relatives aux demandes d'approbation des plans (Dir. OPAPIF), Office fédéral des transports (OFT), Infrastructure et sécurité.
- [5] Directive OFT Organismes de contrôle indépendants Chemins de fer (Dir. OCI-CF), Engagement d'organismes de contrôle indépendants pour les évaluations de la conformité et de la sécurité lors des procédures d'autorisation ferroviaires, Office fédéral des transports (OFT), Infrastructure et Sécurité.
- [6] Directive ESTI n° 248, Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse, Inspection fédérale des installations à courant fort (ESTI), Office fédéral des transports (OFT).
- [7] Règlement SIA 103 concernant les prestations et honoraires des ingénieurs civils
- [8] Norme de compréhension SIA 112, Modèle – Étude et conduite de projet
- [9] Normes SIA 260 à 267, Normes sur les structures porteuses (nouveaux ouvrages)
- [10] Normes SIA 269 ss. (en particulier SIA 269/8), Maintenance des structures porteuses (ouvrages existants)
- [11] Norme SIA 469, Conservation des ouvrages
- [12] Sécurité sismique des éléments non structuraux et autres installations et équipements. Recommandations et précisions pour la pratique, Office fédéral de l'environnement (OFEV), Connaissance de l'environnement N° 1643, 2016.
- [13] Documentation OFROU 82017, Sécurité sismique d'ouvrages en terre et de soutènement : dimensionnement et vérification, Office fédéral des routes (OFROU), 2019 (en allemand).
- [14] Documentation OFROU 82018, Sécurité sismique d'ouvrages en terre et de soutènement : exemples de cas, Office fédéral des routes (OFROU), 2019 (en allemand)