



---

## Directive

# Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse

---



valable dès : 01.10.2012  
actualisée : 01.12.2020

## Impressum

Editeur : Inspection fédérale des installations à courant fort ESTI, 8320 Fehraltorf  
Office fédéral des transports, 3003 Bern

Groupe d'auteurs : Martin Koller (Résonance Ingénieurs-Conseils SA)  
Pia Hannewald (Résonance Ingénieurs-Conseils SA)  
Sven Heunert (Office fédéral de l'environnement OFEV)  
Ingo Schulz (AxpO AG)

en collaboration avec : Axpo, OFT, ESTI, ewz, IWB et CFF

Nom du document : ESTI\_248\_1220\_f (publié comme fichier pdf)

Téléchargement sous : [www.esti.admin.ch](http://www.esti.admin.ch) Documentation – Directives ESTI  
[www.bav.admin.ch](http://www.bav.admin.ch) Droit – Directives

Langues : allemand (original)  
français  
italien

Cette directive est entrée en vigueur le 1er octobre 2012 et a été révisée au 1er décembre 2014 pour l'intégration du réseau 16,7 Hz du domaine des chemins de fer. Une nouvelle révision est entrée en vigueur au 1er décembre 2020. Celle-ci prend en compte la révision partielle de la norme SIA 261 (2020) en ce qui concerne l'action sismique et introduit de nouvelles connaissances sur le besoin de mou (ch. 4.3).

Inspection fédérale des installations  
à courant fort



Daniel Otti, Directeur

Office fédéral des transports  
Division Sécurité



Dr. Rudolf Sperlich, Vice-directeur

## Versions / Historique des modifications

Version	Date	Auteur	Modification
V 1.0	01.10.2012	Urs Huber	
V 1.1	15.04.2013	Urs Huber	réductionnel
V 2.1	01.04.2015	Sven Heunert	intégration chemins de fer
V 3.1	01.12.2020	Sven Heunert	Norme SIA 261 (2020), besoin de mou

## Table des matières

<b>1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>5</b>
	1.1 Objectif .....	5
	1.2 Domaine d'application .....	5
	1.3 Procédure d'approbation des plans .....	6
<b>2.</b>	<b>Termes .....</b>	<b>7</b>
<b>3.</b>	<b>Action sismique .....</b>	<b>9</b>
	3.1 Zones sismiques.....	9
	3.2 Classes de terrain de fondation.....	9
	3.3 Classes d'ouvrages.....	10
	3.4 Coefficient de comportement.....	11
<b>4.</b>	<b>Dispositions pour la sécurité sismique de la technique des installations .....</b>	<b>11</b>
	4.1 Sécurité sismique des transformateurs.....	12
	4.2 Sécurité sismique des appareils à haute tension .....	14
	4.3 Connexions parasismiques.....	15
	4.4 Installations de la distribution d'énergie dans des armoires .....	20
	4.5 Sécurité sismique des systèmes secondaires et autres équipements .....	20
<b>5.</b>	<b>Dispositions pour la sécurité sismique des bâtiments .....</b>	<b>21</b>
<b>6.</b>	<b>Dispositions pour la sécurité sismique des lignes .....</b>	<b>21</b>
	6.1 Lignes aériennes.....	21
	6.2 Câbles d'alimentation.....	21
<b>7.</b>	<b>Recommandations pour les sous-stations existantes « importantes » .....</b>	<b>22</b>
<b>8.</b>	<b>Sources .....</b>	<b>23</b>
<b>Annexe A</b>	<b>Zones sismiques selon SIA 261 .....</b>	<b>24</b>
<b>Annexe B</b>	<b>Ancrage de transformateurs .....</b>	<b>25</b>
<b>Annexe C</b>	<b>Complément relatif au besoin de mou.....</b>	<b>28</b>
<b>Annexe D</b>	<b>Feuilles de calcul sismique .....</b>	<b>30</b>
<b>Annexe E</b>	<b>Exemples de sécurisation d'éléments non-structuraux.....</b>	<b>36</b>
<b>Annexe F</b>	<b>Convention d'utilisation.....</b>	<b>38</b>
<b>Annexe G</b>	<b>Plan d'exécution avec informations relatives au besoin de mou.....</b>	<b>39</b>

## Avant-propos

Les expériences à l'étranger montrent que, lors de forts séismes, il faut pratiquement toujours s'attendre à des pannes de courant locales et même souvent régionales durant plusieurs heures à quelques jours.

Les dommages de loin les plus graves provoqués à l'infrastructure de distribution d'énergie électrique sont observés dans les sous-stations (le terme sous-station englobe le terme poste) isolées à l'air, tandis que les sous-stations isolées au SF<sub>6</sub> ne sont généralement pas critiques. Les lignes aériennes également résistent bien aux tremblements de terre la plupart du temps. Plus le niveau de tension est élevé, plus les sous-stations isolées à l'air sont vulnérables. Les dommages récurrents dus aux séismes sont des ruptures d'éléments en porcelaine et des dommages causés à des transformateurs non ancrés ou insuffisamment ancrés. Les éléments en porcelaine se brisent souvent à la suite d'interactions défavorables quand les connexions par câbles entre des appareils voisins ne présentent pas de « mou » suffisant. Des chocs violents provoqués par du jeu dans les ancrages peuvent également provoquer des dégâts. Souvent aussi, des problèmes sont observés dans les systèmes secondaires, comme par exemple la chute de batteries de secours ou le renversement d'armoires de commande.

En Suisse, il faudrait s'attendre à des dégâts similaires en cas de séisme important. C'est pourquoi un groupe d'experts a remis au Conseil fédéral en 2004 un rapport sur la mitigation des séismes, dans lequel la distribution d'énergie électrique est citée comme l'un des secteurs prioritaires nécessitant des mesures concrètes.

De 2008 à 2010, la Centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'Office fédéral de l'environnement a mandaté une étude sur la vulnérabilité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse [1, 2]. Cette étude a été suivie par un groupe d'experts dans le domaine de la distribution d'énergie électrique. La présente directive se base sur les connaissances acquises par cette étude.

Depuis 2000, la Confédération exige que tous les projets de construction pour lesquels une autorisation fédérale est nécessaire soient conçus ou entretenus de façon parasismique selon les normes en vigueur. Pour les ouvrages neufs, la série de norme SIA 260 ss s'applique, en particulier la norme SIA 261 [3]. Pour la maintenance des structures porteuses existantes, la série de normes SIA 269 ss s'applique, en particulier la norme SIA 269/8 [11], selon laquelle la sécurité sismique doit être examinée et, si besoin est, améliorée, dans la mesure où les investissements sont proportionnés.

Dans le domaine de la distribution d'énergie électrique dans la haute tension, il manquait auparavant les bases concrètes nécessaires permettant aux autorités de surveillance compétentes (ESTI resp. OFT) de faire appliquer la réglementation mentionnée. Les normes sur les structures porteuses SIA 260 à 267 contiennent, il est vrai, certaines indications pour les éléments de construction non porteurs et les installations. Mais celles-ci ne sont pas assez spécifiques pour une application concrète dans le domaine de la distribution d'énergie électrique. La présente directive de l'ESTI comble cette lacune ; elle se base sur les normes SIA pour les structures porteuses mentionnées, sur les normes internationales pertinentes de la branche de l'électricité ainsi que sur la publication de l'ASCE [4].

## 1. Introduction

### 1.1 Objectif

Le but de la présente directive est de réduire durablement, à des coûts si possible faibles, le risque d'un blackout étendu et de longue durée en cas de fort séisme, ainsi que de limiter les dommages directs aux éléments d'infrastructure. Pour cela, la vulnérabilité sismique de la distribution d'énergie électrique doit être réduite pas à pas, à chaque occasion possible.

La mise en œuvre de mesures constructives efficaces et économiques, qui augmentent de manière notable la robustesse du système est plus importante que des calculs détaillés.

### 1.2 Domaine d'application

La présente directive est applicable aux constructions et installations de la distribution d'énergie, mais en général pas aux centrales électriques. Les installations électriques de production d'énergie font l'objet d'autres dispositions en rapport avec la sécurité sismique et ne rentrent donc pas dans le cadre de cette directive. Pour le domaine des chemins de fer la directive pour les installations de distribution du courant de traction est applicable selon l'annexe 4, chiffre b de l'ordonnance sur les chemins de fer (OCF).

Les dispositions de cette directive sont applicables partout en Suisse, dans toutes les zones sismiques ; elles sont applicables aux nouvelles installations ainsi qu'aux installations existantes lors de renouvellements. Le remplacement d'un appareil à haute tension avec maintien des fondations est considéré comme un renouvellement d'une installation existante. Le remplacement d'un transformateur par un transformateur neuf avec maintien des fondations est aussi considéré comme un renouvellement d'installation existante.

Ces dispositions sont valables en partie pour tous les niveaux de haute tension, en partie pour les tensions égales ou supérieures à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) seulement ; un aperçu du domaine d'application des dispositions est donné dans le tableau 1. Comme les appareils et connexions par câbles des tensions inférieures à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) résistent généralement bien aux séismes, même sans mesures parasismique lors de la construction, il est possible de renoncer à des prescriptions sismiques spéciales pour les appareils des niveaux de tension inférieurs à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz).

Lorsque les dispositions de la directive sont applicables pour des tensions de 220 kV ou supérieur pour le réseau 50 Hz, elles sont applicables pour le réseau 16,7 Hz déjà à partir d'une tension de 132 kV. Il y a deux raisons à cela : D'abord, le réseau 16,7 Hz est moins redondant que le réseau 50 Hz. De plus, les appareils à haute tension pour 16,7 Hz présentent en règle générale – à même tension – une masse et une taille plus élevée et sont par conséquent plus vulnérables que des appareils analogues 50 Hz.

Les dispositions pour transformateurs sont valables pour tous les transformateurs de la distribution d'énergie. Les transformateurs de groupe ou les transformateurs principaux d'installation de production ne rentrent pas dans le domaine d'application de cette directive dans la mesure où ils ne servent pas à des alimentations de secours particulièrement importantes qui doivent résister en cas de séisme (comme par exemple l'alimentation de secours d'hôpitaux, d'aéroports nationaux, etc.).

Vu que les lignes aériennes résistent généralement bien aux séismes, la directive définit des dispositions particulières uniquement pour les lignes aériennes les plus importantes.

Des dérogations par rapport à cette directive sont admises s'il peut être démontré de façon acceptable, par la théorie (p. ex. des méthodes de calcul approfondies) ou par des essais, qu'un niveau de sécurité équivalent en matière de séismes est atteint. De telles dérogations doivent faire l'objet de justifications et documentations suffisantes.

Le chapitre 7 comprend des recommandations pour les installations importantes existantes. La prise en compte de ces recommandations est facultative.

Tableau 1 Constructions et installations dans le domaine d'application de la directive.

Sécurité sismique de	Niveaux de tension
Transformateurs	Tous les niveaux de tension <sup>1)</sup>
Appareils électriques	Tensions de 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) ou supérieures <sup>1)</sup>
Installations de distribution d'énergie dans des armoires	Tous les niveaux de tension
Connexions par câbles (mou)	Tensions de 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) ou supérieures
Systèmes secondaires et autres installations	Tous les niveaux de tension
Bâtiments de la technique secondaire et des installations	Tous les niveaux de tension
Lignes aériennes	Tensions de 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) ou supérieures
Lignes en câbles	Tous les niveaux de tension

<sup>1)</sup> tenir compte de la dépendance de la zone sismique (voir tab. 5 et tab. 7)

### 1.3 Procédure d'approbation des plans

Dans le cadre de la procédure d'approbation des plans, le requérant doit confirmer à l'autorité de contrôle (ESTI ou OFT) avant le début de la construction dans les formulaires de demande que les prescriptions de la présente directive seront entièrement respectées, sous réserve des dérogations autorisées.

Pour les projets de construction (ouvrages neufs et projets de maintenance) concernant des bâtiments de sous-stations (poste), il faut remettre la convention d'utilisation selon la norme SIA 260 (paragraphe 2.2). L'annexe F montre quels aspects sont pertinents pour la sécurité sismique et doivent être définis dans la convention d'utilisation.

Pour les sous-stations dont la tension la plus haute est égal ou supérieur à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz), les feuilles de calcul (voir annexe D) ainsi que les esquisses de l'ancrage des transformateurs sont toujours à remettre. De plus, les plans et les justificatifs de calcul pour l'ancrage des transformateurs sont à remettre avant le montage. L'utilisation de transformateurs (Tab. 5) ou d'appareils à haute tension (Tab. 7) certifiés doit être démontrée dans la demande et être visible ou vérifiable lors d'inspections ; idéalement au moyen de la plaque signalétique respectivement de la fiche technique ou par un justificatif par le calcul. Le besoin de mou déterminé doit être précisé dans la demande et les plans d'exécution doivent être remis au plus tard avant le début du montage (voir chapitre 4.3 et annexes D et G). D'autres documents et justificatifs peuvent être demandés par les autorités de surveillance au cas par cas pour un contrôle.

## 2. Termes

**Accélération du plateau** : Accélération maximale dans un spectre de réponse utilisée pour le dimensionnement antisismique.

**Appareil à haute tension** : Appareils électriques pour haute tension.

**Classe de terrain de fondation** : Les mouvements du sol lors d'un tremblement de terre dépendent fortement de la nature du sol. La norme SIA 261 prend cela en compte approximativement, comme la plupart des normes parasismiques, en distinguant différentes classes de terrain de fondation pour lesquelles elle définit différents spectres de réponse.

**Classe d'ouvrage** : Les ouvrages sont répartis d'après la norme SIA 261 selon leur importance en trois classes (CO) par rapport aux séismes. La CO I correspond aux ouvrages « ordinaires », la classe CO II aux ouvrages importants, p. ex. ceux avec fonction d'infrastructure importante, et la CO III aux ouvrages particulièrement importants, p. ex. ceux d'infrastructures ayant une fonction vitale, appelés aussi ouvrages « Lifelines ».

**Facteur de participation** : Facteur qui apparaît dans l'analyse modale (analyse dynamique). Là où il est mentionné dans la présente directive, il indique la différence de grandeur entre le déplacement aux points de raccordement des connexions par câbles et le déplacement spectral de l'oscillateur à masse unique de la modélisation. Le déplacement spectral est celui qui peut être lu directement du spectre de réponse de déplacement (cf. spectre de réponse).

**Fréquence propre** : Fréquence selon laquelle une structure oscille librement, p. ex. après avoir subi une poussée provoquant des oscillations. Les structures continues présentent théoriquement une quantité infinie de fréquences propres ; souvent on comprend implicitement sous le terme de « fréquence propre » la fréquence propre la plus basse – appelée plus précisément « fréquence propre fondamentale ».

**Fréquence propre fondamentale** : Fréquence la plus basse selon laquelle une structure oscille librement, p. ex. après avoir subi une poussée (cf. « fréquence propre »).

**Haute tension** : tous les niveaux de tension égaux ou supérieurs à 1 kV.

**Installations de la distribution d'énergie dans des armoires** : Ces installations comprennent les installations à haute tension encoffrées dans des sortes d'armoires ainsi que les armoires de commande avec installations à basse tension (alimentation et besoins propres). Ce regroupement plutôt arbitraire du point de vue de la technique d'énergie fait du sens dans le contexte de la sécurité sismique qui cherche en premier lieu à éviter le renversement de telles installations lors de tremblements de terre.

**Justificatif** : Sous « justificatif » on comprend aussi bien les contrôles de types que les justificatifs individuels ; ceux-ci peuvent se baser aussi bien sur des calculs que sur des essais. Si le justificatif se rapporte à un contrôle de types, il faut expliquer que le cas isolé concret correspond réellement aux conditions-cadres du contrôle de types.

**Mou :** Pour les connexions par câble on utilise le terme de « mou », emprunté au langage des marins, correspondant au mot anglais « slack ». Un câble qui a du mou peut être tendu sans résistance notable avant que des forces plus importantes soient induites dans le câble. C'est exactement cela qui est important dans les connexions par câbles entre les différents appareils à haute tension. Les termes plus usuels de « jeu » ou « flexibilité », même s'ils désignent quelque chose de similaire, ne sont pas tout à fait exacts.

**Niveaux de qualification d'appareils à haute tension :** Diverses publications CEI [5], [6], [7] définissent une qualification sismique des appareils à haute tension. Cette qualification est classée en trois niveaux : bas (« low »), moyen (« moderate ») et haut (« high »), appelés anciennement « AF2 », « AF3 » resp. « AF5 ». Ces niveaux correspondent à des accélérations du sol maximales (appelées "Zero Period Acceleration ZPA" dans les publications CEI) de 1, 2,5 resp. 5 m/s<sup>2</sup>. Un appareil est qualifié du point de vue sismique s'il supporte le spectre de réponse correspondant au niveau de qualification respectif (appelé Required Response Spektrum RRS dans les publications de la CEI), soit par le calcul, soit expérimentalement, sans que sa fonction ne soit sensiblement altérée.

**Réseau de très haute tension** resp. niveau de réseau 1 : réseau de transport suisse dans le domaine 50 Hz avec une tension de 380 kV ou 220 kV

**Oscillation propre :** Oscillation que fait librement une structure avec une fréquence propre ou une période propre provoquée, p. ex par une poussée.

**Période propre :** Période selon laquelle une structure oscille librement, p. ex. après avoir subi une poussée provoquant des oscillations. C'est l'inverse de la fréquence propre.

**Spectre de réponse :** Réponse (p. ex. réponse de l'accélération, appelée « accélération spectrale », ou bien réponse du déplacement, appelée « déplacement spectral ») d'un oscillateur à masse unique à une excitation dynamique, en fonction de sa période propre et de son amortissement. L'action sismique est généralement définie dans les normes de construction sous forme de spectres de réponse lissés. Ceux-ci présentent ce que l'on appelle un plateau dans lequel l'accélération spectrale est indépendante de la période propre, typiquement dans un domaine entre 0,07 s et 0,5 s qui varie selon la classe de terrain de fondation.

**Tension haute :** Pour un transformateur, la tension du niveau de réseau le plus élevé dont la tension est transformée au niveau de réseau le plus bas (tension basse).

**Tension basse :** voir tension haute.

**Transformateurs :** Sous le terme « transformateurs » on désigne ici uniquement des transformateurs de puissance, pôle régulateur inclus, mais pas les appareils de mesure comme les transformateurs d'intensité de courant ou de tension (appelés aussi « transformateurs » en français).

**Transformateurs de machine :** Transformateurs qui, en tant qu'élément d'une centrale, servent uniquement à la transformation de la tension du générateur à celle du réseau, sont désignés sous le terme de transformateurs de machine – ou aussi les transformateurs principaux lors d'un raccordement immédiat au générateur.

**Transformateurs de puissance :** voir « transformateurs ».

### 3. Action sismique

#### 3.1 Zones sismiques

L'aléa sismique déterminant pour un site donné doit être cherché dans la norme sur les structures porteuses en vigueur SIA 261 [3], chapitre 16.

La norme SIA 261, chapitre 16, définit pour la Suisse cinq zones sismiques : Z1a, Z1b, Z2, Z3a et Z3b (annexe A). La zone sismique Z1 correspond à l'aléa le plus faible, la zone sismique Z3b à l'aléa le plus grand. Pour chaque zone sismique une valeur de référence pour l'accélération du sol maximale, dénommée valeur de calcul de l'accélération horizontale du sol  $a_{gd}$ , est définie (cf. le tableau 2). Ces valeurs de référence correspondent à une période de retour nominale de 475 ans, respectivement une probabilité de dépassement de  $a_{gd}$  de 10 % en 50 ans. La carte des zones sismiques est disponible sous <https://map.geo.admin.ch> (mot-clé zones sismiques).

Tableau 2 Valeurs de dimensionnement de l'accélération horizontale du sol selon la norme SIA 261 ; celles-ci doivent être multipliées par le facteur de terrain de fondation  $S$  et le facteur d'importance  $\gamma_f$ .

Zone sismique	Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
Valeur de réf. SIA 261: $a_{gd}$	0,6 m/s <sup>2</sup>	0,8 m/s <sup>2</sup>	1,0 m/s <sup>2</sup>	1,3 m/s <sup>2</sup>	1,6 m/s <sup>2</sup>

En règle générale, la composante verticale de l'action sismique peut être négligée dans les calculs, car elle est d'importance moindre pour les installations de distribution d'énergie électrique.

#### 3.2 Classes de terrain de fondation

Les mouvements du sol lors d'un tremblement de terre dépendent fortement de la géologie du sol local. La norme SIA 261 en tient compte dans la mesure où la valeur de référence  $a_{gd}$  est multipliée par le facteur de terrain de fondation  $S$  en fonction de la classe de terrain de fondation. Ce facteur prend une valeur de 1,00 à 1,70 pour les classes de terrain de fondation A à E (voir tableau 3). Pour la classe de terrain de fondation F (rare), la valeur de  $S$  doit être déterminée à l'aide d'une étude de site spectrale.

Tableau 3 Facteur de terrain de fondation  $S$  en fonction de la classe de terrain de fondation selon la norme SIA 261, tableau 24.

Classe de terrain de fondation	A	B	C	D	E	F
Facteur de terrain de fondation $S$	1,00	1,20	1,45	1,70	1,70	-

Sous <https://map.geo.admin.ch> (mot-clé classes de terrain de fondation), des cartes de classes de terrain de fondation sont disponibles pour certaines régions de Suisse.

En plus de l'accélération du sol maximale, la norme SIA 261 définit aussi le contenu fréquentiel des mouvements du sol, fortement influencé également par la géologie locale, à l'aide des spectres de réponse. Ceux-ci montrent que les accélérations sismiques des ouvrages et installations peuvent être nettement accentuées selon leur caractéristique dynamique, particulièrement leur fréquence propre fondamentale. Le lecteur trouvera la définition exacte des spectres de réponse dans la norme SIA 261 [3], chapitre 16.2.

Les spectres de réponse mentionnés peuvent être mieux définis pour les réalités géologiques spécifiques à un site grâce à une étude sismologique, appelée microzonage spectral. Là où il existe un microzonage, il faut en tenir compte. Lorsque le microzonage donne un spectre de réponse plus défavorable, donc avec des accélérations spectrales plus élevées que le spectre de réponse de la norme SIA 261, le jugement d'un spécialiste en génie parasismique est nécessaire pour définir si les dispositions de la directive pour une zone sismique plus élevée doivent être respectées.

### 3.3 Classes d'ouvrages

La norme SIA 261 répartit les ouvrages en fonction de leur importance en trois classes d'ouvrages différentes : CO I, CO II et CO III. Les valeurs de référence du tableau 2 valent pour la CO I. Pour la CO II, respectivement III, ces valeurs doivent être multipliées par ce qu'on appelle le facteur d'importance  $\gamma_f$  de 1,2 respectivement 1,5 (tableau 4).

Tableau 4 Facteur d'importance  $\gamma_f$  en fonction de la classe d'ouvrage.

Classe d'ouvrage	I	II	III
Facteur d'importance $\gamma_f$	1,0	1,2	1,5

Les objets ayant une « fonction d'infrastructure vitale » appartiennent à la CO III. Comme une panne de courant à grande échelle entrave singulièrement les actions de sauvetage, les sous-stations dont la tension la plus élevée est égale ou supérieure à 220 kV doivent être assignées à la CO III ; et donc, les valeurs de référence du tableau 2 doivent être multipliées par le facteur d'importance de  $\gamma_f = 1,5$ .

Les sous-stations dont la tension la plus élevée est < 220 kV ainsi que les stations transformatrices importantes doivent être assignées au moins à la CO II. Cependant, pour les sous-stations particulièrement importantes en ce qui concerne la sécurité d'alimentation, un classement supérieur en CO III est judicieux ; le surclassement relève de la responsabilité propre de l'exploitant de réseau.

Pour une multiplication de la valeur de dimensionnement de l'accélération horizontale du sol (tableau 2) avec le facteur de terrain de fondation maximal 1,70 (tableau 3) et le facteur d'importance maximal 1,5 (tableau 4), une accélération du sol maximale de 4,1 m/s<sup>2</sup> en résulte dans la zone Z3b avec le plus grand aléa sismique.

### 3.4 Coefficient de comportement

Il est largement répandu dans le génie parasismique de calculer de façon purement élastique et de tenir compte globalement aussi bien de la surrésistance du matériau par rapport aux valeurs de résistance de calcul que du comportement plastique du système à l'aide de ce que l'on appelle un coefficient de comportement  $q$  ; pour cela, les sollicitations calculées de façon élastique sont divisées par  $q$ .

Les vérifications au soulèvement et au basculement de transformateurs, d'appareils à haute tension, d'armoires de commande, etc. sont à mener avec  $q = 1,0$  conformément à la norme SIA 261 [3]. Pour les vérifications de résistance, p. ex. de boulons d'ancrage, un coefficient de comportement  $q = 1,5$  peut être considéré pour tenir compte de la surrésistance (cf. l'exemple de calcul dans l'annexe D).

Pour les bâtiments, les coefficients de comportement indiqués dans les normes sur les structures porteuses de la SIA sont à considérer.

## 4. Dispositions pour la sécurité sismique de la technique des installations

Les dispositions présentées ci-après, établies en fonction des zones sismiques, concernent, exception faite du paragraphe suivant et des chapitres 4.4 et 4.5, les sous-stations isolées à l'air et les stations transformatrices. Les valeurs de l'accélération spectrale et du mou nécessaire indiquées dans les chapitres 4.1, 4.2 et 4.3 ne sont valables que pour les transformateurs et appareils installés, soit de plain-pied, soit dans un bâtiment à une hauteur ne dépassant pas un rez-de-chaussée surélevé. Lors d'une installation dans les étages supérieurs d'un bâtiment, il faut prendre en compte que les mouvements provoqués par un séisme peuvent être amplifiés par le bâtiment. Pour cela, il est possible de se reporter à la norme SIA 261, particulièrement au chapitre 16.7.

Les expériences à l'étranger montrent que, pour les séismes auxquels il faut s'attendre en Suisse, les installations SF<sub>6</sub> sont pour la plupart peu critiques à condition qu'elles soient suffisamment ancrées. Lors de la construction de nouvelles installations et du remplacement d'installations existantes SF<sub>6</sub> de 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) et plus, il est recommandé de demander au fabricant les certificats sismiques correspondants et, pour tous les niveaux de tension, de veiller à ancrer suffisamment tous les éléments de l'installation. En outre, il faut veiller particulièrement dans les zones sismiques Z3a et Z3b à ce que les entrées de tuyaux ou de câbles dans le bâtiment aient assez de jeu pour que des tassements différentiels possibles de quelques centimètres ne puissent pas provoquer le cisaillement des tuyaux ou des câbles.

Les indications relatives à la répartition en classes d'ouvrages des sous-stations se trouvent au chapitre 3.3.

Les éléments potentiellement les plus vulnérables sont les transformateurs ainsi que, pour le réseau de très haute tension (niveau de réseau 1) resp. pour la tension 132 kV (16,7 Hz), les modèles anciens de disjoncteurs de puissance et les transformateurs de courant à tête car ils présentent des masses relativement grandes en hauteur, ce qui est défavorable en cas de séisme.

En principe, trois causes différentes sont constatées pour les dommages aux transformateurs et appareils à haute tension. Ce sont en ordre décroissant :

1. les forces d'interaction dues aux déplacements relatifs entre les appareils connectés par des conducteurs avec un mou insuffisant pour pouvoir compenser ces déplacements relatifs sans être tendus; en cas de fort séisme en Suisse aujourd'hui, de telles interactions seraient très vraisemblablement le responsable le plus important des dommages causés aux appareils à haute tension.
2. les forces d'inertie dues aux chocs : ceux-ci résultent d'ancrages flexibles ou ayant du jeu ; l'appareil est accéléré et heurte violemment une butée. Ceci peut provoquer des pointes d'accélération qui sont nettement plus élevées que les accélérations sismiques du sol. Lors d'un soulèvement temporaire de transformateurs non ancrés, des chocs violents peuvent en résulter lorsqu'ils retombent.
3. les forces d'inertie dues aux accélérations sismiques du sol.

Toutes ces causes mènent typiquement à des ruptures dans les éléments cassants, p. ex. en porcelaine ou en fonte d'aluminium, tandis que les isolateurs en matière synthétique se comportent généralement mieux.

Les dispositions des chapitres 4.1 et 4.2 doivent prévenir les dommages dus aux causes n° 2 et 3 sur les transformateurs et appareils à haute tension. La problématique importante d'un mou suffisant est réglée dans le chapitre 4.3. L'annexe D contient des feuilles de calcul qui permettent de déterminer les forces d'ancrages pour les transformateurs et appareils à haute tension ainsi que le besoin de mou dans les câbles conducteurs selon le tableau 8. Le chapitre 4.4 est consacré aux installations de la distribution d'énergie en armoires et le chapitre 4.5 traite de la sécurité sismique des systèmes secondaires.

Remarque: Les types spéciaux de sous-stations (comme par ex. les sous-stations mobiles) sont à contrôler au cas par cas en raison de leurs propriétés dynamiques spécifiques.

#### **4.1 Sécurité sismique des transformateurs**

Les dispositions relatives à la sécurité sismique des transformateurs sont détaillées dans le tableau 5. Elles sont valables pour tous les transformateurs. L'utilisation définitive de transformateurs de réserve doit être précisée au cas par cas dans la procédure d'approbation des plans.

Il convient de préciser que le risque de basculement augmente plus un transformateur est élancé, c'est-à-dire plus le rapport entre la hauteur du centre de gravité et la distance au bord le plus proche est élevé.

Les justificatifs nécessaires pour les certificats sismiques peuvent être faits à partir de calculs ou d'essais. Les renvois à des justificatifs explicites pour les transformateurs d'un type similaire sont autorisés s'il peut être prouvé de façon compréhensible que le transformateur à certifier pourrait se comporter au moins aussi bien que ceux pour lesquels le justificatif explicite a été réalisé.

**Tableau 5** Dispositions parasismiques pour nouveaux transformateurs. Les valeurs de l'accélération spectrale <sup>1)</sup> indiquées sont valables pour la classe d'ouvrage III ( $\gamma_f = 1,5$ ) et pour les classes de terrain de fondation D et E les plus défavorables ; sinon prendre les valeurs du tableau 6.

	Certificat sismique à demander au fabricant si la puissance est > 2,5 MVA <sup>1)</sup>	Transformateurs de tous les niveaux de tension Ancrage concernant	
Zone	pour une accélération spectrale <sup>2)</sup> de	le cisaillement resp. le roulement	le soulèvement
Z3b	12,2 m/s <sup>2</sup>	justificatif par le calcul exigé	
Z3a	10,0 m/s <sup>2</sup>		
Z2	7,7 m/s <sup>2</sup>		
Z1b	6,1 m/s <sup>2</sup>		
Z1a	4,6 m/s <sup>2</sup>	pour tensions $\geq 220$ kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz)	
		justificatif par le calcul exigé	sécurisation constructive contre le soulèvement exigée
		sinon toujours au moins	
		sécurisation constructive contre le cisaillement resp. le roulement exigée	sécurisation constructive contre le soulèvement conseillée

<sup>1)</sup> Si des transformateurs sont assignés à la classe d'ouvrage II (cas normal pour le domaine des chemins de fer), un certificat sismique doit être demandé pour une accélération spectrale multipliée (réduite) avec le facteur 0,8 (1,2/1,5).

<sup>2)</sup> Pour les classes de terrain de fondation A, B et C, les valeurs réduites du tableau 6 peuvent être utilisées.

Les transformateurs ont généralement des fréquences propres situées dans le plateau du spectre de réponse [2]. C'est pourquoi pour le dimensionnement de l'ancrage – si aucun examen plus détaillé n'est fait – il faut partir d'une accélération spectrale effective (tableaux 6a et 6b) qui est trois fois plus élevée que l'accélération du sol maximale. Cela tient compte de l'amplification de l'accélération sur le plateau (facteur 2,5) ainsi que d'un amortissement de 2 % (facteur 1,2) de l'amortissement critique. Pour le calcul des forces d'ancrage il faut placer la force résultant de l'action sismique – accélération spectrale effective multipliée par la masse du transformateur – un peu au-dessus de la hauteur du centre de gravité, car le transformateur a un mouvement de basculement lors d'un séisme. Cela signifie que les forces d'inertie – pour une répartition uniforme de la masse – augmentent avec la hauteur. Il est recommandé de placer la force d'inertie résultant de l'action sismique approximativement à une hauteur de  $1,2 h_c$ .

Les transformateurs qui nécessitent une sécurisation contre le soulèvement, mais qui doivent être isolés à cause de problèmes de son solidien, doivent être ancrés de façon que les forces d'inertie puissent être transmises au support sans pont de son solidien. Des exemples d'ancrages pour transformateurs sont présentés dans l'annexe B.

**Tableau 6** Accélération spectrales effectives (3 x accélération maximale du sol) en fonction des classes de terrain de fondations qui doivent être appliquées pour les transformateurs et appareils à haute tension pour CO III ( $\gamma_f = 1,5$ ) pour le calcul des forces d'ancrage quand des calculs plus précis font défaut.

Zone sismique	Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
Classe de terrain de fondation A	2,7 m/s <sup>2</sup>	3,6 m/s <sup>2</sup>	4,5 m/s <sup>2</sup>	5,9 m/s <sup>2</sup>	7,2 m/s <sup>2</sup>
Classe de terrain de fondation B	3,2 m/s <sup>2</sup>	4,3 m/s <sup>2</sup>	5,4 m/s <sup>2</sup>	7,0 m/s <sup>2</sup>	8,6 m/s <sup>2</sup>
Classe de terrain de fondation C	3,9 m/s <sup>2</sup>	5,2 m/s <sup>2</sup>	6,5 m/s <sup>2</sup>	8,5 m/s <sup>2</sup>	10,4 m/s <sup>2</sup>
Classe de terrain de fondation D et E	4,6 m/s <sup>2</sup>	6,1 m/s <sup>2</sup>	7,7 m/s <sup>2</sup>	10,0 m/s <sup>2</sup>	12,2 m/s <sup>2</sup>

Si des transformateurs sont connectés avec des barres conductrices rigides (p. ex. exécution GIL), il faut procéder à des investigations particulières par rapport à d'éventuels déplacements différentiels des points de connexion. Si les composants connectés sont correctement ancrés, il ne faut s'attendre à des déplacements différentiels importants qu'en cas de conditions géotechniques délicates.

#### 4.2 Sécurité sismique des appareils à haute tension

Pour tous les appareils à haute tension d'un niveau de tension égal ou supérieur à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz), une qualification sismique certifiée selon CEI [5, 6, 7] est demandée. Celle-ci diffère en fonction de la zone sismique. Les dispositions pour les appareils à haute tension sont définies dans le tableau 7. La qualification pour une action sismique « modérée » correspond à une accélération maximale du sol de 2,5 m/s<sup>2</sup>. La qualification pour une action sismique « élevée » correspond à une accélération maximale du sol de 5,0 m/s<sup>2</sup>.

Lors du renouvellement d'un appareil, les fondations existantes maintenues doivent, si nécessaires, être adaptées constructivement.

Pour les appareils entre 110 kV (50 Hz) et < 220 kV (50 Hz), une qualification pour une action sismique « modérée » est recommandée dans les zones Z2 et Z3a et une qualification « élevée » dans la zone Z3b, à condition que ces appareils soient assignés à la classe d'ouvrage II.

**Tableau 7** Dispositions parasismiques pour appareils à haute tension avec une tension supérieure à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz).

	Qualification sismique selon CEI [5, 6, 7] pour	Châssis de support et ancrage concernant le basculement et le cisaillement
Zones Z3b et Z3a	action sismique « élevée »	justificatif par le calcul exigé
Zones Z2, Z1b et Z1a	action sismique « modérée »	justificatif par le calcul exigé

Les appareils à haute tension d'un niveau de tension égal ou supérieur à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) ont – châssis de support inclus – majoritairement des fréquences propres

situées sur le plateau de l'action sismique. C'est pourquoi, pour le dimensionnement de l'ancrage, il faut partir – à défaut d'examen plus détaillé – d'une accélération spectrale effective (tableau 6) qui est trois fois plus élevée que l'accélération maximale du sol. Ceci tient compte de l'amplification de l'accélération sur le plateau (facteur 2,5) ainsi que d'un amortissement de 2 % (facteur 1,2) de l'amortissement critique. Pour le calcul des forces d'ancrage, il faut appliquer la force horizontale résultante – accélération spectrale effective multipliée par la masse de l'appareil – approximativement à 1,2 fois la hauteur du centre de gravité, dans la mesure où aucune recherche plus précise n'est faite.

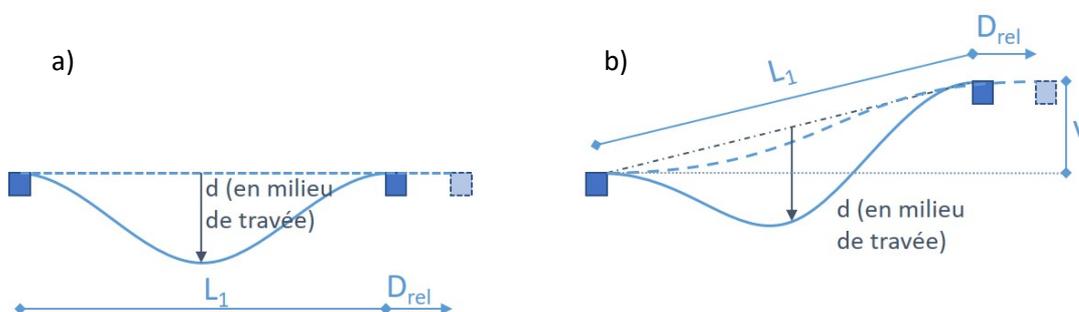
Pour les appareils à haute tension de réserve, par exemple dans les centres d'entretien, il faut faire attention qu'ils ne soient pas endommagés en cas de séisme, soit par renversement, soit par des objets tombant des étagères.

### 4.3 Connexions parasismiques

Les dispositions relatives aux connexions parasismiques sont valables pour tous les appareils à haute tension d'un niveau de tension égal ou supérieur à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz); pour les appareils d'un niveau de tension à partir de 110 kV (50 Hz) et inférieur à 220 kV (50 Hz), elles ont valeur de recommandations.

Les connexions entre deux appareils à haute tension doivent avoir suffisamment de mou pour que les appareils puissent osciller indépendamment les uns des autres en cas de séisme sans que la connexion se tende. Sinon, de grandes forces d'interaction peuvent se produire qui mènent typiquement à des ruptures des isolateurs en porcelaine. En même temps, il faut faire attention à ce que les distances minimales électriques nécessaires entre chaque phase ou par rapport à la terre soient respectées et que, en cas de court-circuit, les forces produites ne puissent pas endommager les appareils. Des explications complémentaires sur le besoin de mou se trouvent dans l'annexe C.

La configuration de conducteur la plus répandue en Suisse, nommée usuellement en chaîne, est représentée dans l'illustration 1a). Une légère modification de cette configuration, avec un décalage vertical des points de raccordement, est représentée à l'illustration 1b).



ill. 1 Configuration de conducteur en a) chaînette (configuration 3 selon [8]) et en b) chaînette avec décalage vertical  $v$  des points de raccordement.

Des câbles conducteurs verticaux reliant l'appareil à des conducteurs horizontaux situés au-dessus représentent la façon la plus appropriée de permettre de très grands déplacements relatifs sans descendre au-dessous des distances minimales électriques. Un exemple de ce type, en Suisse, est présenté dans l'illustration 2.



ill. 2 *Disjoncteurs de puissance de 380 kV reliés essentiellement par des câbles verticaux aux appareils voisins : cette configuration permet de grands déplacements sismiques sans provoquer la tension des câbles.*

Pour la configuration montrée dans l'illustration 1 selon US IEEE Std 1527-2006 [8], la longueur de conducteur minimale  $L_o$  nécessaire entre deux appareils reliés entre eux vaut :

$$L_o = L_1 + D_{rel} + L_2 \quad (1)$$

avec

$L_o$  longueur de conducteur minimale nécessaire ;

$L_1$  distance la plus courte entre les points de raccordement, dite « ligne droite » ;

$D_{rel}$  déplacement relatif maximal des points de raccordement auquel il faut s'attendre pendant le séisme de dimensionnement : cela correspond au mou nécessaire ;

$L_2$  longueur supplémentaire dépendant de la configuration des conducteurs ; peut être admise nulle pour la configuration de conducteur usuelle en Suisse (ill. 1).

avec pour  $D_{rel}$

$$D_{rel} = 1,25 \sqrt{(x_{max,1}^2 + x_{max,2}^2)} \quad (2)$$

où  $x_{max,1}$  et  $x_{max,2}$  représentent les déplacements horizontaux maximaux des appareils connectés. Celles-ci peuvent être calculées avec les méthodes usuelles du génie parasismique (voir annexe C) ou estimées à l'aide du tableau 8.

#### 4.3.1 Dispositions pour appareils 50 Hz (220 kV et 380 kV)

Si aucun calcul sismique n'est fait, les valeurs du tableau 8 sont à respecter pour  $D_{rel}$  à titre d'approximation; ces valeurs sont valables pour la classe d'ouvrage III ( $\gamma_f = 1,5$ ) et se situent dans la plupart des cas du côté de la sécurité.

Si les valeurs du tableau 8 sont utilisées également, au sens de recommandation, pour des sous-stations dont la plus haute tension est supérieure à 110 kV mais inférieure à 220 kV, elles peuvent être multipliées par le facteur 0,75. Ceci vaut pour les sous-stations assignées à la CO II ; lorsqu'elles sont assignées à la CO III, un facteur 0,9 est préconisé. Mais le mou entre deux appareils voisins ne devrait en aucun cas être inférieur à la valeur minimale de 30 mm. Pour les niveaux de tension plus bas, le tableau est sans objet ; dans ces cas-là, le maintien d'un mou minimal n'est pas nécessaire d'un point de vue de la sécurité sismique.

**Tableau 8** Mou nécessaire «  $D_{rel}$  » en [mm] qui doit exister dans le conducteur entre deux appareils à haute tension (sans transformateurs), en relation avec les fréquences propres fondamentales  $f_{01}$  et  $f_{02}$  des appareils reliés, la zone sismique et la classe de terrain de fondation, valable pour la classe d'ouvrage III. Si le tableau est également utilisé pour des transformateurs, il faut compter avec une fréquence propre de 2 Hz du côté des transformateurs.

Fréquences propres fondamentales $f_{01}$ et $f_{02}$	Classe de terrain de fondation	Zone Z1a $D_{rel}$ [mm]	Zone Z1b $D_{rel}$ [mm]	Zone Z2 $D_{rel}$ [mm]	Zone Z3a $D_{rel}$ [mm]	Zone Z3b $D_{rel}$ [mm]
2 Hz – 2 Hz	A	30	35	40	55	65
	B, E	40	55	70	90	110
	C	55	75	95	120	150
	D	80	110	135	180	220
2 Hz – 3 Hz	A	30	30	35	45	55
	B, E	35	45	60	75	95
	C	45	60	75	100	120
	D	65	85	105	140	170
3 Hz – 3 Hz	A	30	30	30	35	45
	B, E	30	35	45	60	75
	C	30	40	55	70	85
	D	35	50	60	80	100

Si les fréquences fondamentales propres, châssis de support *inclus*, ne sont pas connues, on peut se baser approximativement, avec le tableau 8, sur les hypothèses suivantes :

- disjoncteurs de puissance, transformateurs de courant et de tension ainsi que groupes de mesure combinés : 2 Hz ;
- sectionneurs rotatifs, sectionneurs pantographes, isolateurs de support et parafoudres : 3 Hz.

Pour les appareils avec châssis de support particulièrement hauts (comme p. ex. à cause d'un risque d'inondation), il faut augmenter les valeurs du tableau 8 de 20 %. On peut renoncer à cette augmentation si on peut prouver par des mesures de fréquence propre que les fréquences fondamentales propres ne se situent pas plus bas que celles admises ci-dessus.

Le tableau 8 peut également être utilisé pour déterminer le mou nécessaire dans les connexions de câbles avec les traversées de transformateurs. Mais dans ce cas, il faut utiliser une fréquence de 2 Hz du côté des traversées bien que la véritable fréquence propre fondamentale puisse être de 3 Hz ou plus élevée. Cette base de 2 Hz au lieu de 3 Hz ou plus couvre le facteur de participation nettement plus haut valable pour les traversées de transformateurs.

Le contrôle du respect de la résistance au court-circuit doit être effectué selon le chapitre 4.3.3 « Restrictions pour garantir la résistance au court-circuit ». S'il y a des problèmes pour réaliser le mou nécessaire, il faut changer la configuration de conducteur. Il est également possible de procéder à des mesures de fréquence propre et d'évaluer plus précisément le facteur de participation pour permettre de mieux déterminer le besoin de mou.

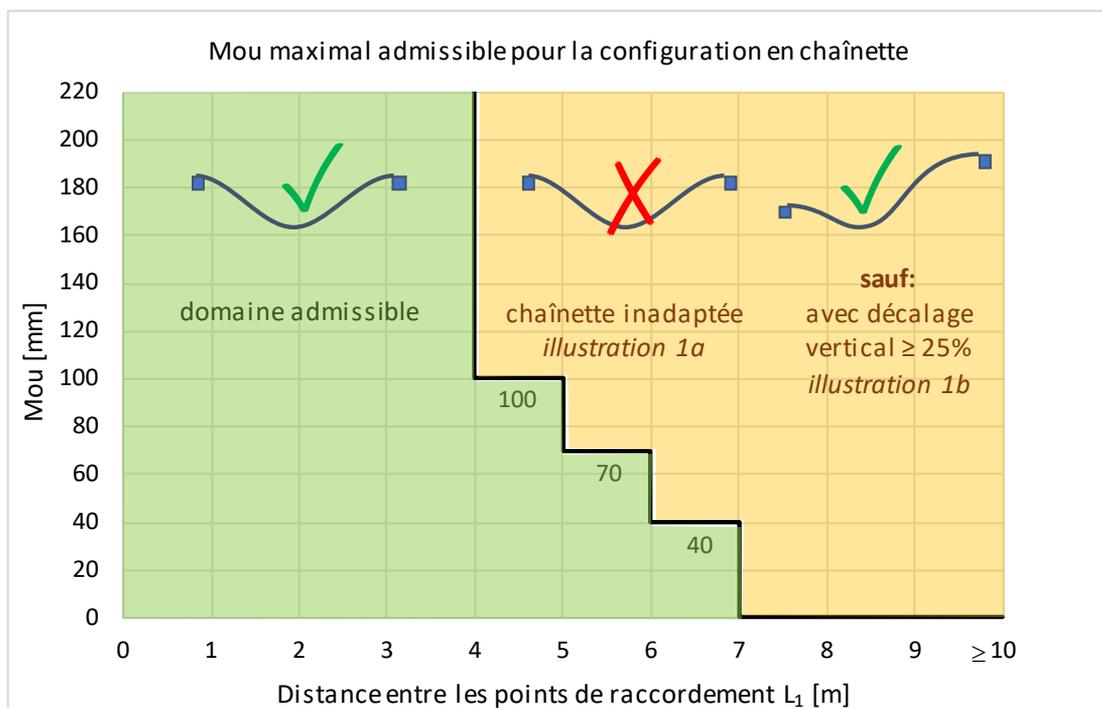
### 4.3.2 Dispositions pour appareils 16,7 Hz (132 kV)

Les sous-stations pour des appareils de 16,7 Hz avec une tension haute de 132 kV sont généralement assignées à la classe d'ouvrage II. Par conséquent, les valeurs du tableau 8 multipliées par 0,80 peuvent être utilisées pour le déplacement relatif nécessaire respectivement pour le mou nécessaire  $D_{rel}$ . Cette réduction résulte du rapport des facteurs d'importance correspondants aux classes d'ouvrage II et III (1,2 / 1,5).

### 4.3.3 Restrictions pour garantir la résistance au court-circuit

Lors de l'installation d'une connexion par câbles, il faut veiller à ce que le mou nécessaire soit mis en place de la manière la plus précise possible. Si le mou est trop faible, il en résulte une sécurité sismique insuffisante, mais si le mou est trop important, la résistance au court-circuit peut être péjorée. Il est donc recommandé de mesurer et de marquer au sol la longueur de corde requise avant le montage afin d'installer la longueur de corde correcte.

Le mou maximal  $D_{rel}$  admissible pour lequel il n'y a pas de conflit avec la résistance au court-circuit est défini pour la configuration en chaînette (ill. 1) par l'illustration 3. Selon la norme CEI 60865-1 [9] aucun problème ne devrait apparaître en cas de court-circuit avec les forces de traction du câble retombant, s'il y a un décalage vertical d'au moins 25 % entre les deux points de raccordement (en référence à la distance horizontale entre les deux points). Pour cette raison, cette configuration est admissible dans l'illustration 3 même pour un grand besoin de mou et une grande distance entre les points de raccordements



ill. 3 Mou maximal admissible pour la configuration en chaînette en fonction de la distance entre les points de raccordement.

#### 4.3.4 Aide au contrôle du mou

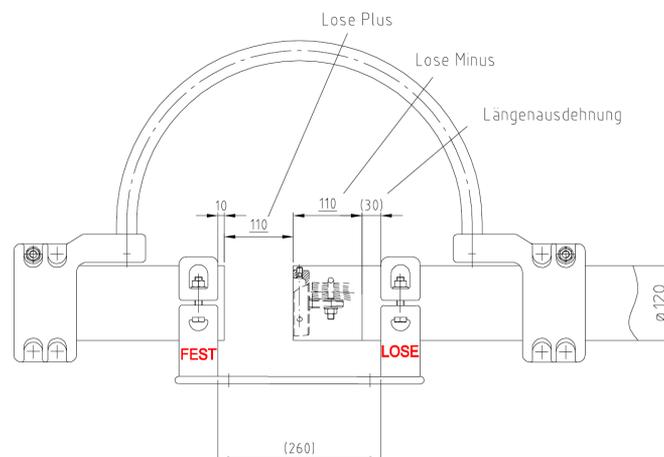
La flèche  $d$ , qui se met en place en milieu de travée en fonction de  $L_1$  et de  $D_{rel}$ , peut être estimée pour les configurations présentées dans l'illustration 1 à quelques pourcents près avec la formule d'approximation suivante:

$$d = \sqrt{(D_{rel} \cdot L_1 / 2)} \quad (3)$$

Lors de la vérification des distances de sécurité électrique, il convient de noter, pour la configuration représentée à l'illustration 1b), que la flèche maximale est légèrement supérieure à la flèche en milieu de travée.

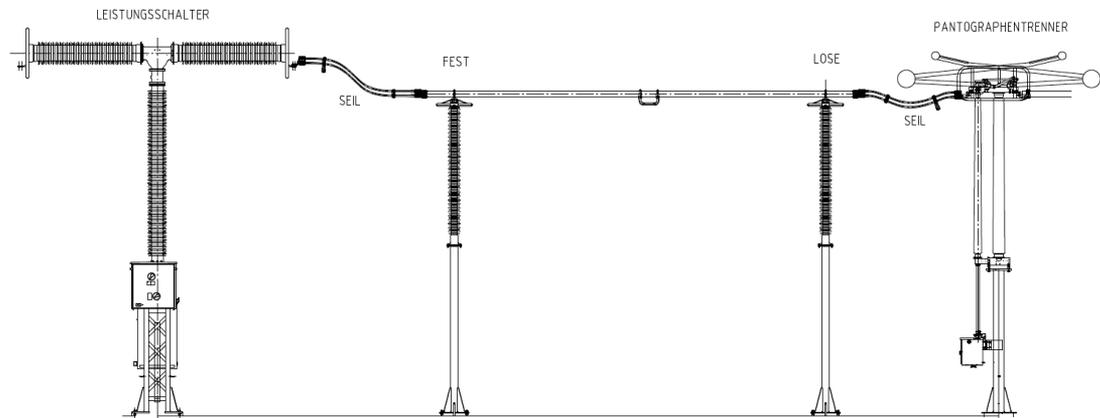
#### 4.3.5 Alternatives pour grandes distances avec connexion par tubes conducteurs rigides

Si des distances plus grandes entre les appareils à connecter doivent être franchies, typiquement entre un pantographe et un isolateur de support sous des barres collectrices, les câbles conducteurs ne sont plus adaptés à la connexion. Pour de telles distances, même un faible mou entraîne des flèches et des forces de court-circuit trop élevées. Dans ce cas, une connexion avec des tubes conducteurs rigides représente une solution possible. Un exemple est présenté à l'illustration 4.



ill. 4 Raccord extensible pour tubes conducteurs rigides avec 110 mm de mou.

S'il n'est pas possible d'obtenir le mou suffisant même avec un tel raccord par tubes conducteurs rigides, la solution consiste à installer deux isolateurs de support identiques dans le champ. Si leur construction est identique, ils peuvent être reliés entre eux par un tube conducteur rigide sans mou significatif (seulement ce qui est nécessaire pour compenser les variations de température). Une connexion aussi rigide garantit que les deux isolateurs de support vibrent en phase lors d'un séisme et qu'il n'y a donc pas besoin de beaucoup de mou. Ces isolateurs de support doivent être installés à proximité des équipements à connecter, qui sont très éloignés l'un de l'autre, afin de pouvoir y être reliés par des conducteurs par câble courts, qui peuvent eux présenter un grand mou, voir illustration 5.



ill. 5 Connexion pour franchir de plus grandes distances avec tubes conducteurs rigides et isolateurs de support ainsi que courtes liaisons par câbles.

#### 4.4 Installations de la distribution d'énergie dans des armoires

Pour les installations à haute tension et pour les installations de la distribution d'énergie avec des tensions  $\leq 1000$  V montés dans des armoires, les dispositions du chapitre 4.5 de cette directive sont applicables en substance, dans le but de prévenir le renversement des armoires causé par un séisme. Dans le domaine des chemins de fer, il faut éviter les migrations de potentiels lors des mesures de sécurisation mécaniques.

La subordination des installations de ce type à cette directive est due aux expériences qui ont prouvé l'importance capitale de la distribution d'énergie électrique pour les travaux de sauvetage suite à un séisme. Lors d'un séisme, les installations de distribution de moyenne à basse tension (niveau de tension 3 à 5 (50 Hz) resp. inférieur à 132 kV (16,7 Hz)) se situent toujours dans la zone sinistrée en raison de leur nombre et de leur concentration géographique. Mais la distribution d'énergie après une catastrophe sismique dépend de manière décisive du maintien du fonctionnement de telles installations dans les régions touchées.

#### 4.5 Sécurité sismique des systèmes secondaires et autres équipements

Pour toutes les zones sismiques et tous les niveaux de tension, les systèmes secondaires, tels que armoires de commande, groupes électrogènes de secours, batteries de secours ou équipements auxiliaires et les équipements, tels que faux-planchers, cloisons de séparation, etc., doivent être sécurisés contre les séismes ; il faut en particulier prouver leur stabilité statique. Les éléments de construction non-structuraux, les installations et les équipements pertinents ainsi que les mesures et les responsabilités doivent être définies spécifiquement pour chaque projet, notamment dans le cadre de la convention d'utilisation (voir entre autres l'annexe F).

En fonction du concept de mise à terre, il peut s'avérer nécessaire dans le domaine des chemins de fer de mettre en œuvre des ancrages isolés (p.ex. pour supports et appareils).

Pour le dimensionnement ou le justificatif de tels éléments, il faut se baser sur la norme SIA 261 [3], chapitre 16.7. Souvent cependant de simples mesures constructives suffisent également. Des exemples de mesures sont présentés dans la publication de l'OFEV "Sécurité sismique d'éléments de construction non-structuraux et d'autres installations et équipements [10]. Des exemples de sécurisation de systèmes secondaires (batteries de secours, armoires de commande) sont présentés dans l'annexe E.

## 5. Dispositions pour la sécurité sismique des bâtiments

Les bâtiments, indépendamment des niveaux de tension, doivent être construits conformément aux exigences en matière de sécurité sismique des normes de construction SIA en vigueur pour les nouveaux bâtiments (SIA 260 ss) ou être entretenus selon les normes de maintien (SIA 269 ss). Pour les bâtiments, il faut établir une convention d'utilisation (voir annexe F). En plus de la structure porteuse, les éléments de constructions non-structuraux, les installations et les équipements doivent être parasismiques (cf. chapitre 4.5).

Lors de la rénovation d'une partie notable d'une installation à haute tension dans un bâtiment existant présentant, sur la base d'un examen, une sécurité sismique insuffisante, il faut mettre en œuvre des mesures de sécurité sismique, s'il est possible de les réaliser pour un coût proportionné et que les conditions de propriété le permettent. Pour déterminer la « proportionnalité », il faut consulter la norme SIA 269/8 [11]. Toutefois il faut noter que dans ces cas la sécurité des personnes est moins à mettre en avant que la sécurité de l'approvisionnement. Il faut considérer une possible interruption d'approvisionnement non seulement par rapport à la perte de gain liée à l'énergie non livrée, mais surtout par rapport aux conséquences pour la société, notamment l'éventuelle complication des travaux de sauvetage dans un vaste périmètre.

## 6. Dispositions pour la sécurité sismique des lignes

### 6.1 Lignes aériennes

Les dispositions relatives à la sécurité sismique des lignes aériennes sont valables pour les tensions égales et supérieures à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz). Pour les lignes aériennes avec des tensions à partir de 110 kV (50 Hz) et inférieures à 220 kV (50 Hz), elles ont valeur de recommandations.

Dans la plupart des cas, les lignes aériennes résistent sans dommages significatifs même aux très forts séismes. Mais des problèmes pouvant entraîner une panne totale de la ligne apparaissent si les fondations des mâts subissent des déplacements permanents importants. Ceux-ci peuvent se produire lors de glissements de terrain ou de liquéfaction du sol déclenchés par le séisme.

Lors de la construction de lignes aériennes du réseau de très haute tension (niveau de réseau 1) et en raison de sa faible redondance du réseau 132 kV (16,7 Hz), il faut juger au moins qualitativement si le déclenchement de glissements de terrain ou l'apparition de liquéfaction du sol à l'emplacement des mâts peuvent être exclus sans examen plus détaillé. En ce qui concerne les glissements de terrain, les cartes de dangers donnent une première indication dans la mesure où la région concernée est répertoriée. En cas de doute, il faut procéder à une analyse quantitative en se basant sur la norme SIA 267 [12].

### 6.2 Câbles d'alimentation

En règle générale, les câbles d'alimentation ne posent pas de problèmes.

Pour les aménagements d'entrées (entrée dans des ponts ou des bâtiments), il faut faire attention aux possibles déplacements différentiels pouvant atteindre quelques centimètres. Pour les traversées de terrains potentiellement glissants, la prudence s'impose ; dans la mesure du possible, ces terrains sont à traverser dans la ligne de plus grande pente. Les câbles d'alimentation ne doivent pas passer sur des ponts présentant une sécurité sismique insuffisante.

## 7. Recommandations pour les sous-stations existantes « importantes »

L'amélioration de la sécurité sismique d'installations existantes est recommandée,

- s'il est réalisable avec de faibles investissements (valable normalement pour la sécurisation des systèmes secondaires), dans toutes les zones sismiques ;
- s'il s'agit du point de vue de la sécurité d'alimentation régionale d'éléments d'installation « particulièrement importants » pour lesquels aucun renouvellement n'est prévu dans les 20 ou plus prochaines années ; cette recommandation se limite aux zones sismiques Z2, Z3a et Z3b.

Il relève de la responsabilité propre des exploitants d'identifier les éléments d'installation existants particulièrement importants et de vérifier si l'amélioration de la sécurité sismique serait « proportionnée ». Une possible interruption d'approvisionnement doit être considérée non seulement par rapport à la perte de gain de l'énergie non livrée, mais surtout par rapport aux conséquences pour la société, notamment la complication drastique des travaux de sauvetage dans un vaste périmètre. Pour évaluer la proportionnalité, la norme SIA 269/8 [11] peut être considérée.

Il est recommandé de déterminer pour les éléments d'installation existants particulièrement importants, avec une longue durée de vie restante, situés dans les zones sismiques Z2, Z3a et Z3b

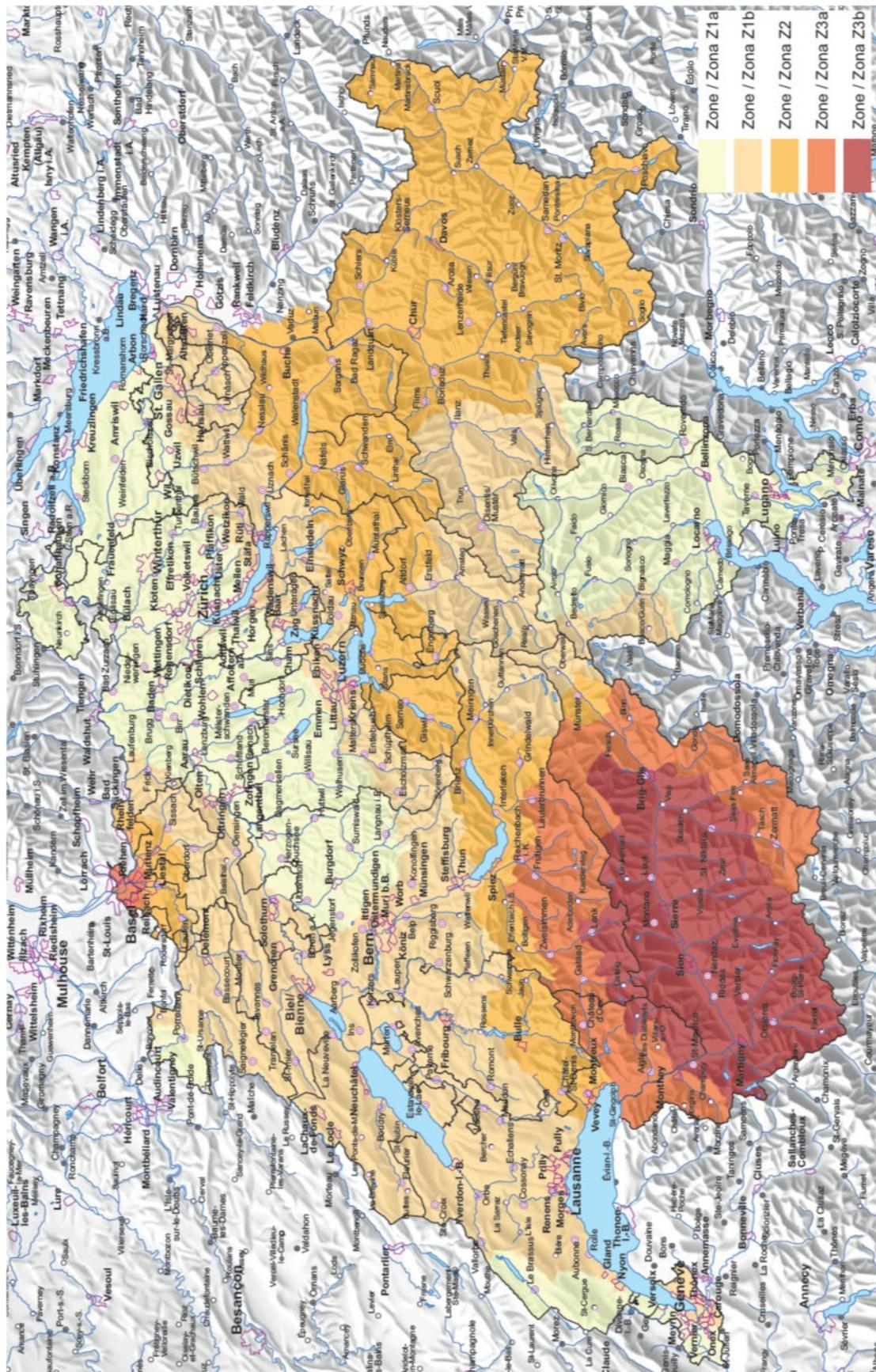
- si les transformateurs peuvent être ancrés contre le soulèvement grâce à des investissements proportionnés ;
- si les fondations et ancrages des appareils à haute tension de tension égale ou supérieure à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) sont suffisants et, dans le cas contraire, si un confortement à coûts proportionnés est possible ;
- si le mou disponible dans les câbles conducteurs entre des appareils d'une tension égale ou supérieure à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) suffit et, dans le cas contraire, si un nouveau câblage sans changement de la configuration générale – et sans violation des dispositions relatives aux distances minimales et à la résistance au court-circuit – à coûts proportionnés est possible.

Si une amélioration complète ou même partielle de la sécurité sismique est estimée proportionnée, il est recommandé de la mettre en place.

## 8. Sources

- [1] Koller M.G. (2009), « Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse », 1<sup>er</sup> rapport intermédiaire, sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, Résonance, Carouge.
- [2] Koller M.G. (2011), « Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse », 2<sup>ème</sup> rapport, sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, Résonance, Carouge.
- [3] SIA 261 (2020): Actions sur les structures porteuses, Norme Suisse SN 505 261, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich.
- [4] ASCE (1999): « Guide to Improved Earthquake Performance of Electric Power Systems », ASCE Manual and Reports on Engineering Practice n° 96, éd. Schiff, A. J., Reston, Virginia.
- [5] (SN) EN 62271-207:2007 [IEC 62271-207:2007]: Appareillage à haute tension -- Partie 207 : Qualification sismique pour ensembles d'appareillages à isolation gazeuse pour des niveaux de tension assignée supérieurs à 52 kV.
- [6] IEC TS 61463 (2000): Spécification technique, Traversées - Qualification sismique, CEI.
- [7] IEC TR 62271-300 (2006): Guide, Appareillage à haute tension - Partie 300 : Qualification sismique des disjoncteurs à courant alternatif, CEI.
- [8] IEEE Std 1527-2006 (2006): IEEE Recommended Practice for the Design of Flexible Buswork Located in Seismically Active Areas, IEEE Power Engineering Society, New York.
- [9] IEC 60865-1 (2011): « Short-circuit currents – Calculation of effects – art 1: Definitions and calculation methods », CEI, Genève.
- [10] OFEV (2015): « Sécurité sismique d'éléments de construction non-structuraux et d'autres installations et équipements », Publication OFEV, Berne. [www.bafu.admin.ch/erdbeben](http://www.bafu.admin.ch/erdbeben).
- [11] SIA 269/8 (2017): Maintenance des structures porteuses – Séismes, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich.
- [12] SIA 267 (2013): Géotechnique, Norme Suisse SN 505 267, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich.
- [13] Dastous J.-B. et Pierre J.-R. (2007), « Design Methodology for Flexible Buswork Between Substation Equipment Subjected to Earthquakes », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, n° 3, pp 1490–1497.
- [14] Dastous J.-B., Filiatrault A. et Pierre J.-R. (2004), « Estimation of Displacement at Interconnection Points of Substation Equipment Subjected to Earthquakes », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, n° 2, pp 618–628.

## Annexe A : Zones sismiques selon SIA 261



Avec l'autorisation de la Société suisse des ingénieurs et architectes, Zurich (voir <https://map.geo.admin.ch>).

## Annexe B : Ancrage de transformateurs



ill. B.1 Transformateur 220 kV / 70 MVA – Zone sismique Z3b – Ancrages (8 pces démontables) directement sur la fondation (avec autorisation d'Axpo).



ill. B.2 Transformateur 236 kV / 60 MVA – Zone sismique Z3b – Cadre de renforcement soudé sur plaques d'ancrage coulées dans le béton (avec autorisation de ewz).



ill. B.3 Transformateur 110 kV / 60 MVA – Zone sismique Z2 – Ancrages (4 pces démontables) avec roues (avec autorisation d'Axpo).



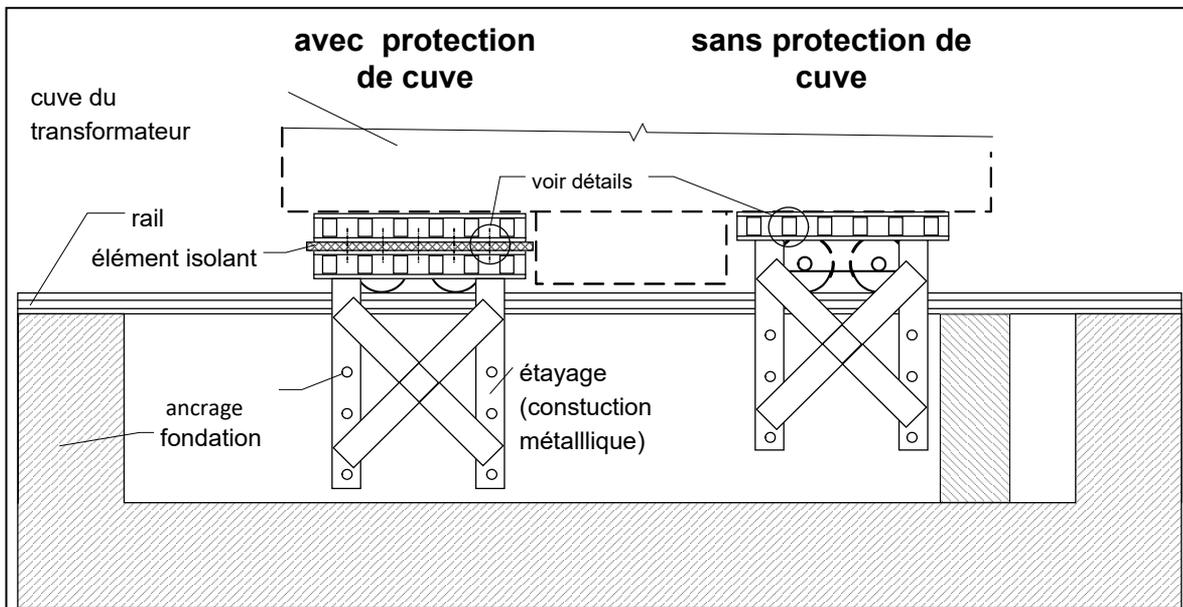
*ill. B.4 Transformateur 110 kV / 125 MVA – Zone sismique Z2 – Ancrages (4 pcs démontables) avec roues (avec autorisation d'Axpo).*



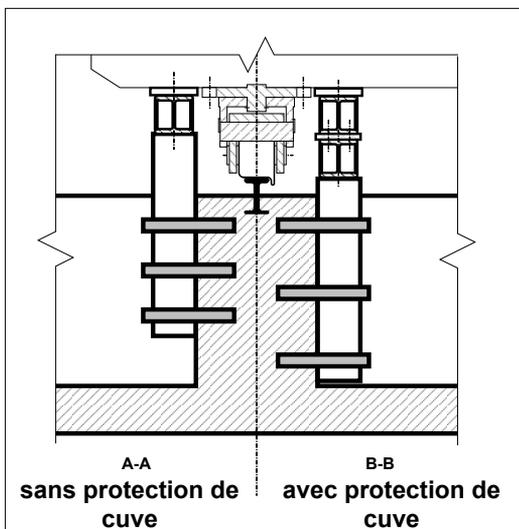
*ill. B.5 Transformateur 50 kV / 25 MVA – Zone sismique Z1b – Ancrage sur une fondation existante renforcée (avec autorisation de energie thun).*



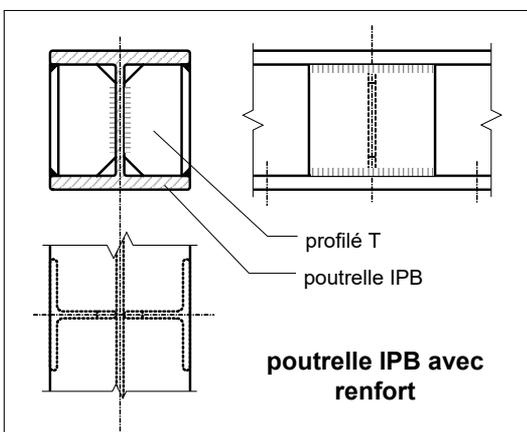
*ill. B.6 Transformateur 110 kV / 40 MVA – Zone sismique Z1a – Ancrage au moyen de deux sabots d'arrêt par roue. Attention au flambage dans le sens transversal et à la stabilité du rail; UNIQUEMENT applicable en zone sismique Z1a (avec autorisation de ekz).*



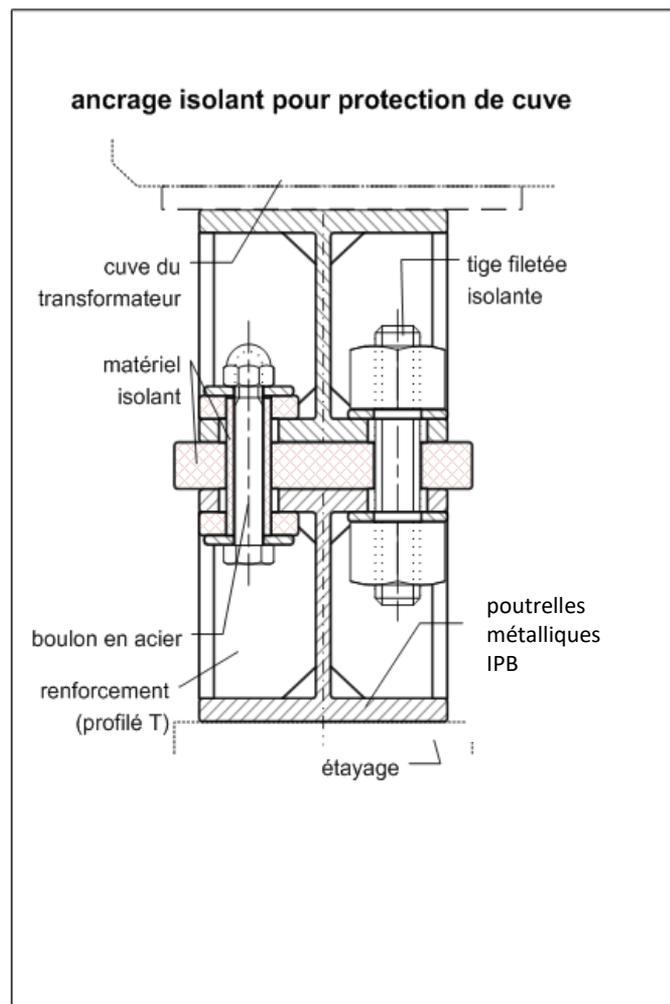
ill. B.7 Schéma d'un ancrage pour transformateurs sur rails



ill. B.8 Détail de ill. B.7



ill. B.9 Renfort de poutrelle



ill. B.10 Possibilités pour un ancrage isolant

## Annexe C : Complément relatif au besoin de mou

### A quoi sert le mou?

La connexion de conducteur entre deux appareils à haute tension doit disposer de suffisamment de mou pour permettre aux appareils d'osciller indépendamment l'un de l'autre pendant un séisme sans que le câble ne se tende. Sinon, des forces d'interaction importantes peuvent survenir, ce qui entraîne généralement la rupture des isolateurs en porcelaine.

Le mou nécessaire dans les connexions par câbles dépend, outre la configuration des conducteurs, en premier lieu des déplacements qui résultent aux points de raccordement des appareils reliés entre eux lors d'un tremblement de terre. Ce déplacement relatif dépend de son côté directement des déplacements des points de raccordement. Ce déplacement – appelé « besoin en déplacement » – dépend fortement de la fréquence propre fondamentale de l'appareil concerné, qui se situe généralement, avec des châssis de support standards, environ entre 2 et 4 Hz. C'est la fréquence propre fondamentale des vibrations dans la direction des connexions par câbles qui est déterminante. Des supports porteurs flexibles ont une action défavorable dans la mesure où ils réduisent la fréquence propre fondamentale et donc augmentent considérablement le besoin en déplacement des points de raccordements.

### Calcul du besoin de mou

Les déplacements individuels des points de raccordements peuvent être déterminés, en cas de séisme, en fonction de la fréquence propre fondamentale de l'appareil, de la zone sismique et de la classe de terrain de fondation, avec les moyens habituels du génie parasismique ; mais dans ce cas, il faut supposer un amortissement équivalent de 2 % de l'amortissement critique. A partir de ces valeurs de déplacement, il est alors facile de calculer les valeurs de  $D_{rel}$  à l'aide de l'équation (2) de cette directive.

Si aucun calcul sismique n'est fait, il est possible de reprendre approximativement pour  $D_{rel}$  dans l'équation (2) les valeurs du tableau 8, du côté sécuritaire dans la plupart des cas et valables pour la classe d'ouvrage III. Ces valeurs se basent sur le fait que les déplacements des points de raccordement ne dépendent pratiquement que de la fréquence propre de l'appareil [13, 14]. Les déplacements se déterminent donc directement à partir du facteur de participation et du déplacement spectral dépendant de la fréquence. Les valeurs du tableau 8 sont valables pour un facteur de participation supposé de 1,6, qui devrait couvrir environ 95 % des cas selon [8,14]. Cela n'est pas valable pour les traversées de transformateurs pour lesquelles, lors du calcul des déplacements de l'extrémité, des facteurs de participation de 3 à 4 peuvent résulter. Pour compenser cela, il doit être admis une fréquence propre nominale de 2 Hz pour les transformateurs, même si la fréquence propre réelle est nettement plus élevée, typiquement de 3 à 4 Hz.

Les valeurs du tableau 8 se basent sur un amortissement de 2 %. De plus, les déplacements d'appareils qui résulteraient sans connexions par câbles sont admis, ce qui est du côté sécuritaire.

### Conflit potentiel avec la résistance au court-circuit

Plus un câble conducteur présente de mou pour garantir la sécurité sismique, plus les forces qui s'exercent en cas de court-circuit sont importantes, ce qui peut entraîner des dommages aux appareils. Les exigences en matière de sécurité sismique, d'une part, et de résistance au court-circuit, d'autre part, risquent donc d'entrer en conflit. De plus, il devient d'autant plus difficile de respecter les distances électriques minimales qu'un câble conducteur doit présenter de mou.

Dans les configurations illustrées à la figure 1, les forces les plus importantes se produisent en cas de court-circuit lorsque le câble conducteur, qui se déforme subitement en raison des forts courants de court-circuit, retombe dans sa position initiale après le court-circuit. Plus la flèche est grande et donc le mou existant important, plus ces forces de traction de la corde retombante deviennent importantes. Des calculs ont montré que ces forces de traction de la corde retombante pouvaient devenir trop importantes même avec des mous relativement modestes. Si le mou nécessaire est trop élevé par rapport à la résistance au court-circuit, il faut donc prévoir une autre configuration de conducteurs, par exemple avec un important décalage vertical.

Le calcul des forces de traction de la corde retombante après un court-circuit est généralement effectué selon la norme CEI 60865-1 [9]. Cette méthode de calcul est toutefois basée sur des modèles de calcul (trop) simples qui négligent la rigidité à la flexion, ce qui donne des résultats non réalistes, en particulier pour des câbles conducteurs courts. Plus le câble conducteur est court, plus les forces de traction de la corde retombante sont mathématiquement surestimées. En outre, ces forces dépendent aussi sensiblement des rigidités des points de raccordement des conducteurs, qui ne sont généralement pas connues avec une précision suffisante. Enfin, les forces maximales qui peuvent être supportées par les points de raccordement des appareils sans dommage varient également d'un appareil à l'autre. Le mou maximal, qui n'entraîne pas encore de forces de traction trop élevées sur la corde retombante, n'est donc connu que de manière très imprécise. Les dispositions contenues dans cette directive sont donc basées sur des évaluations d'experts, qui sont étayées par de nombreux calculs selon la norme CEI 60865-1 [9]. Une force maximale tolérable de 6 kN a été supposée pour les points de raccordement, mais il a également été tenu compte du fait que les valeurs calculées pour les forces de traction de la corde retombante sont trop élevées pour des longueurs de corde inférieures à 8 à 10 m.

**Annexe D : Feuilles de calcul sismique**

Feuille de calcul « Action sismique »

Date:

Page 1

**Sous-station :** .....**Niveaux de tension :** ..... / .....**Requérant :** .....**Projet / Requête:** .....**Action sismique**

Classe de terrain de fondation <sup>(1)</sup> \ Zone sismique	Accélération spectrale effective $S_e$ [m/s <sup>2</sup> ] pour CO III <sup>(2)</sup>				
	Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
CTF A	2,7	3,6	4,5	5,8	7,2
CTF B	3,2	4,3	5,4	7,0	8,6
CTF C	3,9	5,2	6,5	8,5	10,4
CTF D et E	4,6	6,1	7,7	10,0	12,2
CTF F	étude de site spectrale nécessaire				

<sup>(1)</sup> La classe de terrain de fondation peut être déterminée à l'aide du tab. 24 de la norme SIA 261 ou, si disponible, à l'aide d'une carte de classes de terrain de fondation (<https://map.geo.admin.ch> → classe de terrain de fondation);

<sup>(2)</sup> Si la tension supérieure de la sous-station est de 220 kV ou plus, la sous-station doit impérativement être assignée à la CO III. Sinon, l'exploitation est libre du choix entre CO II ou III.  
Pour la CO II, les valeurs du tableau sont à multiplier par le facteur 0,8.

**Classe d'ouvrage (CO II / CO III)** .....**Accélération spectrale effective <sup>(3)</sup>**  $S_e =$  ..... [m/s<sup>2</sup>]

<sup>(3)</sup> A utiliser pour les transformateurs et appareils à haute tension dans la mesure où aucun examen plus détaillé n'existe quant à leur fréquence propre fondamentale ; les résultats sont toujours du côté sécuritaire. Sinon, déterminer  $S_e$  à l'aide de la norme SIA 261, paragraphe 16.2.

Remarques générales : .....

.....  
 .....  
 .....  
 .....

Timbre:

## Forces d'ancrage pour transformateurs

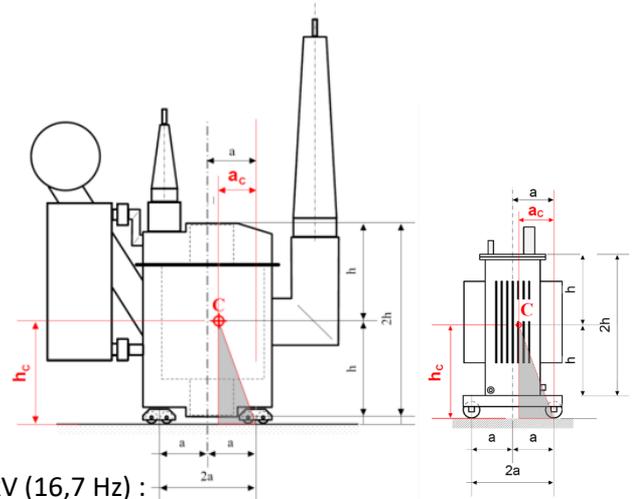
Désignation du transfo : .....

Masse totale en exploitation  $m_{tot}$  : ..... [t]

Hauteur du centre de gravité  $h_c$  : ..... [m]

Distance horizontale minimale  $a_c$  : ..... [m]

Espacement des roues (appuis)  $2a$  : ..... [m]



Justificatifs, si

- Z1a : tension < 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) :  
sécurisation constructive
- Z1a : tension  $\geq$  220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) :  
sécurisation constructive contre le soulèvement,  
justificatif par le calcul de la sécurisation contre le cisaillement resp. le roulement
- Z1b – Z3b : justificatif par le calcul

Action sismique horizontale :  $H = m_{tot}$  [t]  $S_e$  [ $m/s^2$ ] = ..... [kN]

Moment de basculement dû au séisme<sup>(4)</sup>:  $M = 1,2 h_c$  [m]  $H$  [kN] = ..... [kN m]

<sup>(4)</sup> Le facteur 1.2 tient compte approximativement du fait que le transfo fait partiellement un mouvement de basculement, de sorte de que le point d'attaque de la force sismique totale se situe plus haut que le centre de gravité.

Valeurs de dim. : Force cisaillement<sup>(5)</sup>:  $V_{E,d} = H$  [kN] / 1,5 = ..... [kN]  
avec  $q = 1,5$  selon ch. 3.4

Force traction<sup>(6)</sup>:  $Z_{E,d} = \frac{1}{1,5} \left( \frac{M[kNm] - 10 m_{tot} [t] a_c [m]}{2a [m]} \right) = \dots\dots\dots$  [kN]

<sup>(5)</sup> Toujours (tous niveaux de tension et toutes zones sismiques) à sécuriser, du moins constructivement.

<sup>(6)</sup> Traction verticale due au moment de basculement à ancrer de chaque côté. Tient compte de l'action sismique déstabilisante et du poids propre stabilisant (hypothèse:  $g = 10$  [ $m/s^2$ ]).

## Forces d'ancrage pour appareils à haute tension

Désignation de l'appareil : .....

Masse totale en exploitation :  $m_{tot}$ : ..... [t]

Hauteur du centre de gravité :  $h_c$ : ..... [m] (conc. le pied de l'appareil)

Action sismique horizontale :  $H = m_{tot}$  [t]  $S_e$  [ $m/s^2$ ]<sup>(7)</sup> = ..... [kN]

Moment de basculement dû au séisme :  $M = 1,2 h_c$  [m]  $H$  [kN]<sup>(4,7)</sup> = ..... [kN m]

<sup>(7)</sup> Il s'agit de grandeurs élastiques ; pour les vérifications de résistance, ces grandeurs peuvent être divisées par le facteur de comportement  $q = 1,5$  (cf. chapitre 3.4).

Remarques : .....

.....



## Feuilles de calcul sismique – exemple rempli

page 1

Feuille de calcul « Action sismique »		Date: <b>4.3.2020</b> Page 1				
Sous-station : <b>Bauhen</b>		Niveaux de tension : <b>380 / 220 kV</b>				
Requérant : <b>ewz</b>		Projet / Requête: <b>xyz</b>				
Action sismique						
Classe de terrain de fondation <sup>(1)</sup>	Zone sismique	Accélération spectrale effective $S_e$ [m/s <sup>2</sup> ] pour CO III <sup>(2)</sup>				
		Z1a	Z1b	<b>Z2</b>	Z3a	Z3b
CTF A		2,7	3,6	4,5	5,8	7,2
CTF B		3,2	4,3	5,4	7,0	8,6
CTF C		3,9	5,2	6,5	8,5	10,4
<b>CTF D et E</b>		4,6	6,1	<b>7,7</b>	10,0	12,2
CTF F		étude de site spectrale nécessaire				

<sup>(1)</sup> La classe de terrain de fondation peut être déterminée à l'aide du tab. 24 de la norme SIA 261 ou, si disponible, à l'aide d'une carte de classes de terrain de fondation (<https://map.geo.admin.ch> → classe de terrain de fondation);

<sup>(2)</sup> Si la tension supérieure de la sous-station est de 220 kV ou plus, la sous-station doit impérativement être assignée à la CO III. Sinon, l'exploitation est libre du choix entre CO II ou III.  
Pour la CO II, les valeurs du tableau sont à multiplier par le facteur 0,8.

Classe d'ouvrage (CO II / CO III) **CO III**

Accélération spectrale effective <sup>(3)</sup>  $S_e =$  **7,7** [m/s<sup>2</sup>]

<sup>(3)</sup> A utiliser pour les transformateurs et appareils à haute tension dans la mesure où aucun examen plus détaillé n'existe quant à leur fréquence propre fondamentale ; les résultats sont toujours du côté sécuritaire. Sinon, déterminer  $S_e$  à l'aide de la norme SIA 261, paragraphe 16.2.

Remarques générales : **supports porteurs hauts en raison du risque d'inondation**

Timbre:

Feuille de calcul « Forces d'ancrage » Date: **4.3.2020** Page 2

### Forces d'ancrage pour transformateurs

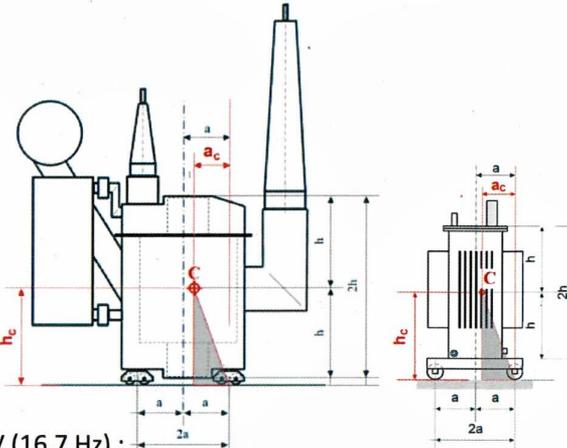
Désignation du transfo : **XY 1000 MVA**

Masse totale en exploitation  $m_{tot}$  : **160** [t]

Hauteur du centre de gravité  $h_c$  : **2,4** [m]

Distance horizontale minimale  $a_c$  : **0,72** [m]

Espacement des roues (appuis)  $2a$  : **1,60** [m]



Justificatifs, si

Z1a : tension < 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) : sécurisation constructive

Z1a : tension  $\geq$  220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) : sécurisation constructive contre le soulèvement, justificatif par le calcul de la sécurisation contre le cisaillement resp. le roulement

Z1b – Z3b : justificatif par le calcul

Action sismique horizontale :  $H = m_{tot} [t] S_e [m/s^2] =$  **1'232** [kN]

Moment de basculement dû au séisme<sup>(4)</sup> :  $M = 1,2 h_c [m] H [kN] =$  **3'548** [kN m]

<sup>(4)</sup> Le facteur 1.2 tient compte approximativement du fait que le transfo fait partiellement un mouvement de basculement, de sorte de que le point d'attaque de la force sismique totale se situe plus haut que le centre de gravité.

Valeurs de dim. : Force cisaillement<sup>(5)</sup> :  $V_{E,d} = H [kN] / 1,5 =$  **821** [kN]  
avec  $q = 1,5$  selon ch. 3.4

Force traction<sup>(6)</sup> :  $Z_{E,d} = \frac{1}{1,5} \left( \frac{M [kNm] - 10 m_{tot} [t] a_c [m]}{2a [m]} \right) =$  **998** [kN]

<sup>(5)</sup> Toujours (tous niveaux de tension et toutes zones sismiques) à sécuriser, du moins constructivement.

<sup>(6)</sup> Traction verticale due au moment de basculement à ancrer de chaque côté. Tient compte de l'action sismique déstabilisante et du poids propre stabilisant (hypothèse:  $g = 10 [m/s^2]$ ).

### Forces d'ancrage pour appareils à haute tension

Désignation de l'appareil : **transformateur d'intensité  $y \geq 220$  kV**

Masse totale en exploitation :  $m_{tot}$  : **1,3** [t]

Hauteur du centre de gravité :  $h_c$  : **3,57** [m] (conc. le pied de l'appareil)

Action sismique horizontale :  $H = m_{tot} [t] S_e [m/s^2]$ <sup>(7)</sup> = **10,01** [kN]

Moment de basculement dû au séisme :  $M = 1,2 h_c [m] H [kN]$ <sup>(4,7)</sup> = **42,9** [kN m]

<sup>(7)</sup> Il s'agit de grandeurs élastiques ; pour les vérifications de résistance, ces grandeurs peuvent être divisées par le facteur de comportement  $q = 1,5$  (cf. chapitre 3.4).

Remarques : .....

Feuille de calcul « Besoin de mou » Date: **4.3.2020** Page 3

### Besoin de mou dans les câbles conducteurs

Appareils reliés entre eux Fréquences propres estimées  $f_{01}^{(8)}$  Distance entre les points de raccordement

Appareil 1 : **isolateur de support**  $f_{01} = \dots 3 \dots$  [Hz]  $L_1 = \dots 3.5 \dots$  [m]

Appareil 2 : **disjoncteur**  $f_{02} = \dots 2 \dots$  [Hz]

<sup>(8)</sup> Sans examen plus détaillé, les hypothèses suivantes sont admissibles, si l'on utilise le tableau 8 :

- **disjoncteurs de puissance**, transformateurs de courant et de tension ainsi que groupes de mesure combinés **2 Hz**
- sectionneurs rotatifs, sectionneurs pantographes, **isolateurs de support** et parafoudres **3 Hz**

Mou nécessaire selon tab. 8 <sup>(9)</sup>  $D_{rel} = \dots 1,2 \cdot 105 = 126 \dots$  [mm]

<sup>(9)</sup> Paramètres d'entrée pour le tableau:  $f_{01}$ ,  $f_{02}$ , classe de terrain de fondation et zone sismique

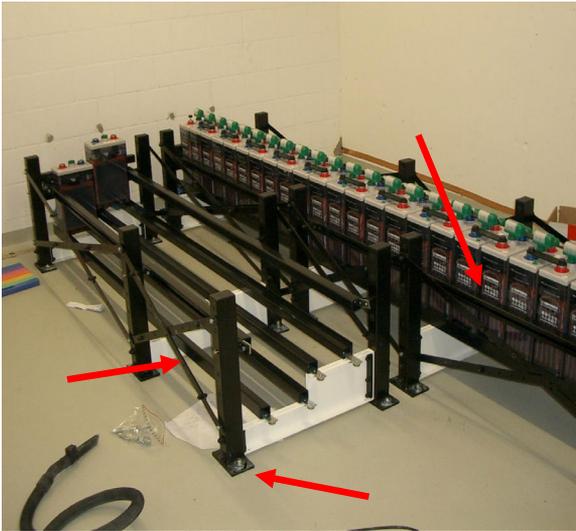
**Attention: Le mou nécessaire pour une configuration de conducteur donnée doit être vérifié quant au respect des distances électriques minimales et quant à la résistance au court-circuit (illustration 3)!**

En cas de problème, il faut modifier la configuration de conducteur (voir p.ex. illustrations 4 et 5 de la directive), ou alors déterminer le besoin de mou de façon plus précise à l'aide de calculs ou de mesures des fréquences propres des appareils (il en résulte souvent un besoin de mou légèrement inférieur).

Tab. 8 directive ESTI: mou nécessaire  $D_{rel}$  pour CO III <sup>(10)</sup> ill. 3 directive ESTI: mou maximal admissible

$f_{01} - f_{02}$	Classe terrain fond.	$D_{rel}$ [mm] selon la zone sismique				
		Z1a	Z1b	Z2	Z3a	Z3b
2 Hz – 2 Hz	A	30	35	40	55	65
	B, E	40	55	70	90	110
	C	55	75	95	120	150
	D	80	110	135	180	220
2 Hz – 3 Hz	A	30	30	35	45	55
	B, E	35	45	60	75	95
	C	45	60	75	100	120
	D	65	85	105	140	170
3 Hz – 3 Hz	A	30	30	30	35	45
	B, E	30	35	45	60	75
	C	30	40	55	70	85
	D	35	50	60	80	100

<sup>(10)</sup> – Pour la CO II multiplier les valeurs du tableau par 0,8, sans cependant passer en dessous de 30 mm.  
 – Pour les supports porteurs particulièrement hauts, **majorer les valeurs du tableau de 20%**.

**Annexe E : Exemples de sécurisation d'éléments non-structuraux**

*ill. E.1/E.2 Sécurisation contre le basculement et la chute de batteries de secours : à gauche, SS Münchwilen (Axpo) : pieds du support entretoisés en diagonale et boulonnés au sol / à droite, SS Bassecourt (Swissgrid) : sécurisation du support par connexion avec le mur / les deux : barres horizontales empêchant le basculement des batteries.*



*ill. E.3 SS Münchwilen (Axpo) : l'intercalation de plastiques ondulés entre des batteries voisines les empêchent de s'entrechoquer.*



ill. E.4/E.5 *Sécurisation d'armoires de commande avec équerres contre le mur (Axpö)*



ill. E.6 *Sécurisation d'armoires de commande par câbles (Organisation en cas de crise canton Bâle-Ville)*



ill. E.7/E.8 *Sécurisation d'armoires de commande au centre d'une pièce jusqu'au mur (Axpö)*

## Annexe F: Convention d'utilisation

### Introduction

Une conception parasismique présuppose des exigences claires du maître de l'ouvrage ainsi qu'une collaboration suffisamment tôt entre les planificateurs pertinents. Selon le règlement SIA 112 (2014), la définition du projet et le cahier des charges du projet permettent de clarifier le mieux possible et en temps voulu les objectifs que poursuit le maître de l'ouvrage et de définir les exigences applicables à l'ouvrage.

La convention d'utilisation fait partie du cahier des charges du projet et fixe les exigences d'utilisation du maître de l'ouvrage (voir SIA 260). La convention d'utilisation est établie sur la base d'un dialogue entre le maître de l'ouvrage et les projeteurs. Le maître de l'ouvrage est responsable d'intégrer le thème de la sécurité sismique dans le cahier des charges du projet dans la phase 2 « Etudes préliminaires » et de fixer les exigences quant à la structure porteuse ainsi qu'aux éléments de construction non-structuraux, aux installations et autres équipements. Les prestations correspondantes des professionnels spécialisés doivent être décrites dans les appels d'offres en fonction du projet. Selon la norme SIA 103 (2014), la convention d'utilisation est à établir sur la base du cahier des charges du projet dans la phase 31 « Avant-projet » et à approuver par le mandant. De plus, la convention d'utilisation doit être actualisée en fonction de l'avancement du projet et si nécessaire être approuvée à nouveau à l'achèvement de chaque phase partielle.

### Aspects pertinents

Pour un usage de la convention d'utilisation opportun et adéquat aux phases du projet, les aspects généraux suivants sont importants : Etat (phase de projet, statut, version, modifications, autorisation, distributeurs, ...), références (directive ESTI), description du projet de construction, signatures (maître de l'ouvrage, directeur général du projet, ingénieur civil, autres projeteurs, ...).

Pour les installations de la distribution d'énergie les aspects suivants sont pertinents pour le respect des dispositions de la présente directive et doivent être définis dans la convention d'utilisation (à compléter en fonction du projet selon l'aléa et l'importance) :

- Classe d'ouvrage (y c. motif selon directive ESTI), zone sismique, terrain de fondation (classe de terrain de fondation, examens géotechniques ou microzonage sismique)
- Concept parasismique ainsi que mesures constructives et relatives à la conception (y c. représentation simple du concept structural du système de contreventement en plan et en élévation)
- Eléments de construction non structuraux, installations et équipements : définition des éléments pertinents y c. motifs ainsi que définition des responsabilités relatives au dimensionnement, à l'appel d'offres, au contrôle et à la réception des travaux (par ex. à l'aide d'un tableau des mesures et des responsabilités)
- Pour les classes d'ouvrage III, définition des exigences concrètes quant à l'aptitude au service afin de garantir le fonctionnement après un séisme (pour le bâtiment et les éléments pertinents du système global)

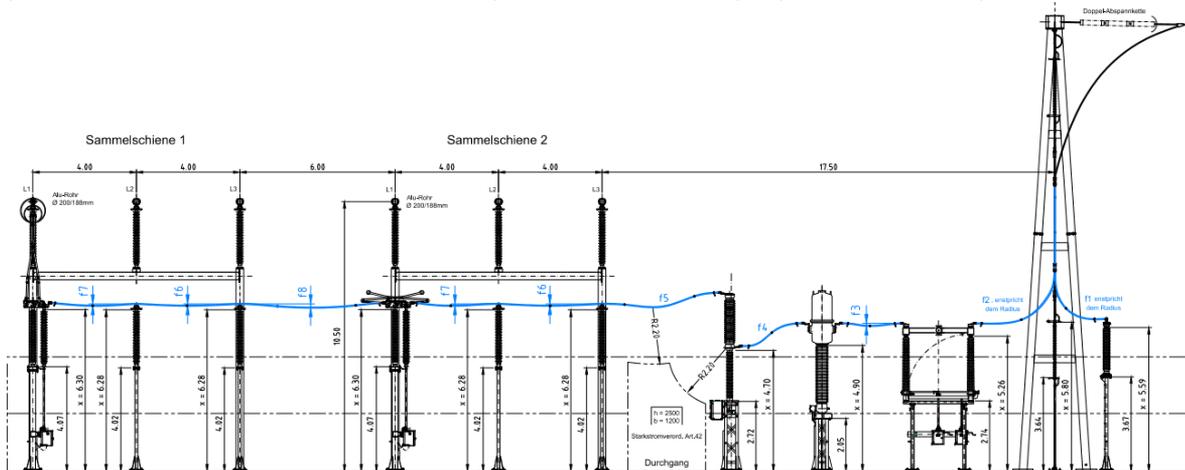
Dans le cas de projet de maintenance d'installations existantes, des réflexions plus poussées sont nécessaires pour définir les exigences et les éléments pertinents selon les normes SIA 269 ss (resp. SIA 269/8) sur la maintenance des structures porteuses (notamment facteur de conformité, décision motivée concernant les mesures, description des mesures de sécurité sismique).

Des aspects complémentaires sont à documenter dans la base de projet ou dans des rapports.

## Annexe G: Plan d'exécution avec informations relatives au besoin de mou

Le besoin de mou, déterminé pour chaque connexion de conducteur (voir annexe D) conformément aux dispositions du chapitre 4.3, doit être précisé dans la demande et les plans d'exécution qui doivent être remis au plus tard avant le début du montage.

Des vues en coupe des champs, contenant un tableau avec les spécifications pertinentes quant au besoin de mou, permettent d'avoir une vue d'ensemble claire. Une désignation univoque de chaque connexion de conducteur avec une mention correspondante dans le tableau est appropriée. L'illustration G.1 et le tableau G.2 présentent un exemple pour une telle représentation.



ill. G.1 Plan d'exécution (extrait) d'une vue en coupe d'un champ d'une sous-station isolée à l'air de 220 kV avec désignation des connexions de conducteur en bleu.

Le tableau résume les paramètres de l'action sismique (zone sismique, classe de terrain de fondation et classe d'ouvrage) ainsi que les fréquences des appareils adjacents pour chaque connexion de conducteur. La longueur réelle du conducteur  $L_0$  résulte de la ligne droite  $L_1$  et du mou  $D_{rel}$ . Ces valeurs doivent respecter les restrictions pour garantir la résistance au court-circuit ou disposer du décalage vertical nécessaire. La flèche indiquée doit être respectée lors du montage et peut être estimée selon la formule (3) de la directive.

Tableau G.2 Tableau du plan d'exécution avec spécifications pertinentes quant au besoin de mou.

Besoin de mou selon directive ESTI n° 248								
Zone sismique: 3a			Classe de terrain de fond.: C		Classe d'ouvrage: III			
Connexion	Frequence		Mou	Points de raccordement				
	$f_{0,r}$ [Hz]	$f_{0,l}$ [Hz]		ligne droite	l. conduc.	flèche	décalage vertical	
	$f_{0,r}$ [Hz]	$f_{0,l}$ [Hz]	$D_{rel}$ [mm]	$L_1$ [mm]	$L_0$ [mm]	$d$ [mm]	$v$ [mm]	[%]
f1	-	-	n.r.	-	-	-	grand	> 25
f2	-	3	n.r.	-	-	-	grand	> 25
f3	3	2	100	2350	2450	350	-	-
f4	2	2	120	2400	2520	380	890	37%
f5	2	3	100	4450	4550	480	440	10%
f6	3	3	70	4000	4070	380	-	-
f7	3	3	70	3340	3410	350	-	-
f8	3	3	70	5575	5645	450	-	-

Remarque : le décalage vertical en pourcent peut être calculé approximativement et du côté de la sécurité en utilisant la ligne droite  $L_1$  (la relation mathématiquement correcte serait le décalage vertical divisé par la distance horizontale entre les points de raccordement).