

Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse

Réseaux et installations > 1kV



2^{ème} Rapport

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement

RÉSONANCE Ingénieurs-Conseils SA 21 rue Jacques Grosselin CH - 1227 CAROUGE (Genève)

Tél.	+41 22 301 02 53
Fax	+41 22 301 02 70
E-mail	resonance@resonance.ch

Carouge, le 16 septembre 2011

TB 285.03-1/MK/ST

Impressum

Mandant : Office fédéral de l'environnement (OFEV), dépt. Prévention des dangers, CH-3003 Berne. L'OFEV est un office du département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire : Résonance Ingénieurs-Conseils SA, CH-1227 Carouge

Auteurs : Martin G. Koller, Dr. ès sc. techn., ing. dipl. en génie civil EPF. Sylvette Thomassin, Dr. en sismologie, Université Grenoble I.

> Les annexes A et C sont de : Martin Hässig, Axpo (Annexe A) Pascal Müller, ewz, et Schindler + Partner SA (Annexe C)

Accompagnement OFEV : Blaise Duvernay, ing. dipl. en génie civil EPF Sven Heunert, ing. dipl. en génie civil EPF

Groupe d'accompagnement :

- Walter Bleuel, Industrielle Werke Basel (IWB)
- Adrien Guérig et Martin Hässig, Axpo SA (autrefois NOK)
- Urs Huber, Inspection fédérale des installations à courant fort (ESTI)
- Madame Bärbel Müller et Markus von Arx, Chemins de fer fédéraux (CFF)
- Pascal Müller, Elektrizitätswerke Zürich (ewz)

Le présent rapport a été réalisé sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Le mandataire porte seul la responsabilité de son contenu.

Approbation OFEV : 12 septembre 2011, Andreas Götz (version allemande)

Couverture : Excitation active d'un transformateur par lâcher, pour la détermination des fréquences propres.

Le programme de mesures de prévention parasismique mis en place depuis 2000 par la Confédération a, entre autres, défini le système d'infrastructure de la distribu tion électrique comme secteur prioritaire par une enquête de vulnérabilité au séisme. Cela s'explique par le caractère indispensable de l'alimentation en courant électrique pour le bon fonctionnement de beaucoup d'autres infrastructures et principalement de celles qui sont absolument nécessaires pour la gestion d'un séisme. C'est pourquoi, sur mandat de l'OFEV, une étude sur la sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse a été réalisée de 2008 à 2011. Les buts de cette étude étaient d'identifier les points faibles de la distribution d'énergie électrique par rapport aux séismes, de quantifier leur ampleur et ainsi de déterminer la nécessité d'agir. Les résultats sont développés dans le "1er Rapport intermédiaire" (1), du 15 janvier 2009, ainsi que dans le présent 2e rapport. L'étude a été suivie par des experts dans le domaine de la distribution d'énergie; ils ont également participé en détail à la rédaction des rapports mentionnés.

Les expériences à l'étranger montrent que les dommages, de loin, les plus graves provoqués à l'infrastructure de la distribution d'énergie électrique, en cas de séisme, ont été observés dans des sous-stations isolées à l'air, tandis que les lignes aériennes ont la plupart du temps bien résisté aux séismes. Plus le niveau de tension est élevé, plus les sous-stations sont vulnérables.

En cas de séisme important, il faut compter aussi en Suisse avec la défaillance de sous-stations à très haute tension isolées à l'air, directement touchées. Il faut alors s'attendre à des dommages aussi bien sur les transformateurs de puissance, particulièrement sur leurs traversées, que sur les appareils à très haute tension. L'un des problèmes principaux est représenté par les connexions par câbles entre les appareils qui n'ont pas aujourd'hui assez de mou, ce qui fait que les différents appareils ne peuvent pas osciller indépendamment les uns des autres ; si les connexions par câbles se tendent brusquement, il s'ensuit de grandes forces d'interaction qui peuvent conduire à la rupture des appareils, en particulier des isolateurs en porcelaine. De même, les systèmes secondaires, tels les batteries de secours ou les armoires de commande, présentent aujourd'hui des points faibles significatifs et seraient susceptibles de tomber en panne, déjà lors de faibles séismes.

C'est pourquoi il est nécessaire d'agir en premier lieu au niveau de la sécurité sismique des transformateurs de puissance, particulièrement au niveau de leur ancrage, de la garantie de "mou" suffisant dans les connexions par câbles entre les appareils à très haute tension ainsi que de la sécurisation des systèmes secondaires (batteries de secours, armoires de commande, etc.) de tous les niveaux de tension. Des mesures préventives dans ces domaines permettent d'augmenter de façon significative la sécurité d'alimentation en cas de séisme. Des mesures dans ce sens prises dans le cadre des rénovations d'installations n'entraînent que des coûts supplémentaires extrêmement faibles. Il en va donc de l'intérêt propre – et de la responsabilité propre – des exploitants de réseaux de recourir à de telles mesures dès que l'occasion se présente.

Les connaissances et propositions concrètes exposées dans le rapport intermédiaire du 15.01.2009 et dans le présent 2° rapport sont mentionnées dans l'ébauche d'une nouvelle directive de l'ESTI sur la "Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse". En prévision d'une "application parasismique conforme" de cette future directive, il est important de sensibiliser les acteurs concernés à la problématique de la sécurité sismique et de les former en conséquence.

Table des matières

Résun	né	
1.	Intro	duction5
	1.1 1.2 1.3 1.4	Situation initiale
2.	Com	portement sismique des transformateurs9
	2.1 2.2 2.3 2.4	Données bibliographiques relatives aux fréquences propres de basculement9 Mesures sur des transformateurs
	2.5	Projet pilote d'un ancrage de transformateur16
3.	Com	portement sismique d'appareils à très haute tension
4.	Mou	dans les connexions22
	4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	Mesures de fréquences propres sur des appareils à très haute tension
5.	Systè	èmes secondaires et autres équipements
	5.1 5.2 5.3	Vulnérabilité40Mesures recommandées40Etude pilote SS Herdern44
6.	Con	clusions et nécessité d'agir44
7.	Sour	ces
Annex	ke A:	Ancrage de transformateurs (Axpo SA)
Annex	ke B:	Câbles conducteurs SS Benken (ewz)

Annexe C: Etude pilote de l'ewz sur les systèmes secondaires

1. Introduction

1.1 Situation initiale

Depuis 2000, la Confédération met en œuvre un programme de mesures "Mitigation des séismes" (www.bafu.admin.ch/seismes) qui concerne, entre autres, les systèmes d'infrastructure. En 2004, un groupe d'experts a conclu que la distribution d'énergie électrique est un des secteurs prioritaires concernant l'analyse de la vulnérabilité sismique et la définition de mesures à prendre. La raison de cette priorisation revêt du caractère indispensable de l'électricité pour le bon fonctionnement de nombreuses autres infrastructures et principalement celles qui sont absolument nécessaires pour faire face à un tremblement de terre. Les autres secteurs définis comme prioritaires sont ceux liés à la phase de sauvetage et à la gestion de catastrophe, les domaines de la communication et de la santé ainsi que le trafic routier et l'épuration des eaux usées.

De 2008 à 2011, une étude a été menée sur mandat de l'OFEV, dont les premiers résultats figurent dans le "1^{er} Rapport intermédiaire" (1), daté du 15 janvier 2009. Les buts de cette étude étaient d'identifier les points faibles de la distribution d'énergie électrique face aux tremblements de terre, de définir la nécessité d'agir, de rassembler les normes et standards applicables en Suisse, de mettre au point des procédés d'appréciation pour les installations existantes ainsi que de proposer des mesures constructives de sécurisation. Cette étude a été suivie par un groupe d'experts dans le domaine de la distribution d'énergie électrique qui ont également relu en détail le rapport mentionné.

Les expériences à l'étranger montrent que les dommages, de loin, les plus graves provoqués à l'infrastructure de distribution d'énergie électrique, en cas de séisme, ont été observés dans des sous-stations isolées à l'air, tandis que les lignes aériennes ont la plupart du temps bien résisté. Plus le niveau de tension est élevé, plus les sous-stations sont vulnérables. Les dommages récurrents, dus aux séismes, sont des ruptures d'éléments en porcelaine et des dommages causés à des transformateurs insuffisamment ancrés. Les éléments en porcelaine se brisent souvent à la suite d'interactions défavorables dues à une flexibilité insuffisante des connexions par câbles. Des chocs provoqués par du jeu dans les ancrages ou une amplification des accélérations sismiques due à la flexibilité du châssis peuvent également causer des dégâts.

L'expérience montre que les installations isolées au SF6 sont peu sensibles aux tremblements de terre, si chaque élément de l'installation est suffisamment ancré.

A la publication du 1^{er} rapport intermédiaire (1) les questions en suspens concernant le comportement de la distribution de l'énergie électrique en cas de séisme n'ont pas toutes encore trouvé de réponse. Certes les problèmes prédominants ont été qualitativement identifiés, mais leur importance quantitative n'était pas encore claire.

Une des conclusions les plus importantes était que l'absence d'ancrage empêchant le soulèvement de gros transformateurs représente l'un des problèmes potentiels les plus importants en Suisse. Toutefois, l'importance du danger réel de soulèvement dépend des fréquences propres fondamentales des oscillations de basculement des transformateurs et, sur ce point, les données fournies par la littérature sont contradictoires. D'un côté, le standard américain IEEE Std 693-2005 (2) part implicitement du principe que ces fréquences se situent au-dessus de 33 Hz, ce qui voudrait dire qu'en Suisse aucune sécurisation contre le soulèvement ne serait nécessaire jusqu'à, et y compris, la zone de sismicité Z2 (dorénavant dénommée uniquement "zone" Z2). D'un autre côté, quelques rares publications scientifiques font état de fréquences propres mesurées dans une gamme de 3 à 4 Hz; si ces données sont exactes, alors des sécurisations contre le soulèvement seraient également nécessaires dans la zone Z2 et voire même dans la zone Z1.

Dans le domaine de la distribution d'énergie électrique, l'Inspection fédérale des installations à courant fort (ESTI) est responsable de la surveillance, respectivement l'Office fédéral des transports (OFT) pour ce qui est des chemins de fer. Mais jusqu'à présent, les bases nécessaires concernant la vulnérabilité des éléments de l'infrastructure de l'approvisionnement en énergie ainsi que des prescriptions normatives claires concernant la sécurité sismique faisaient défaut, si bien que par le passé les autorités de surveillance citées ne pouvaient pratiquement pas assumer cette responsabilité de façon concrète.

Cependant, compte tenu de leur fonction d'infrastructure significative, les sousstations les plus importantes devraient être, selon la norme actuelle sur les structures porteuses SIA 261, Tableau 26, cataloguées, déjà actuellement, dans la classe d'ouvrage III et les autres, dans la classe d'ouvrage II. Cette répartition ne semble cependant pas avoir été souvent appliquée jusqu'ici.

1.2 Objectifs

La suite de l'étude devait, à l'aide de différentes études pilotes, confirmer les déclarations qualitatives du 1er rapport intermédiaire (1) ainsi que livrer des déclarations quantitatives et relatives aux coûts. Concrètement, il s'agissait :

- de déterminer dans quelles zones sismiques en Suisse la sécurisation de transformateurs contre le soulèvement est nécessaire ; pour cela, les fréquences propres fondamentales de transformateurs types devaient être mesurées ;
- d'acquérir des connaissances concrètes sur l'ampleur des problèmes en Suisse, particulièrement en ce qui concerne les ancrages d'appareils à très haute tension et les conséquences du mou existant actuellement dans les connexions par câbles;
- d'obtenir les premières expériences sur la sécurité sismique des systèmes secondaires ;
- d'évaluer approximativement, à l'aide de cas concrets, la faisabilité aussi bien que les coûts d'éventuelles mesures de confortement.

Les résultats de l'étude doivent servir de base

- pour sensibiliser la branche de l'électricité à la problématique générale des tremblements de terre et la soutenir avec des approches méthodologiques et des solutions concrètes,
- pour élaborer une directive ESTI qui aidera l'inspection fédérale dans l'exécution de ses tâches d'autorisation de projets.

L'étude résumée dans les deux rapports (dans (1) et dans le présent rapport) fait état des principes de la directive ESTI mentionnée. Ainsi, ces rapports permettent aux ingénieurs chargés de la construction et de la maintenance d'installations à haute tension de comprendre les principes des différentes dispositions de la directive ESTI. Dans le présent rapport, quelques-uns des termes techniques utilisés peuvent ne pas être connus de certains lecteurs, selon leur milieu professionnel. Les termes les plus importants sont expliqués ci-après.

Amortissement : Mesure indiquant comment une vibration libre diminue avec le temps. L'amortissement est souvent indiqué comme pourcentage de ce qu'on appelle l'amortissement "critique", mais sous ce terme on comprend l'amortissement strictement nécessaire à un oscillateur déporté de sa position d'équilibre pour qu'il revienne au repos sans effectuer d'oscillations.

Classe d'ouvrage : Les ouvrages sont répartis par la norme SIA 261 en trois classes (CO) par rapport aux séismes. La CO I correspond aux ouvrages "ordinaires", la CO Il 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".

Classe de sol 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 sol de fondation pour lesquelles elle définit différents spectres de réponse. La classe de sol de fondation la plus répandue dans le Plateau est la classe C.

Facteur de participation : Facteur qui apparaît dans l'analyse modale (analyse dynamique). Là où il est mentionné dans le présent rapport, 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 de basculement : Fréquence propre correspondant à une oscillation de basculement.

Haute tension : Sous "haute tension" on désigne tous les niveaux de tension égaux et supérieurs à 1 kV.

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 "AF2", "AF3" et "AF5": Diverses publications CEI définissent une qualification sismique des appareils à haute tension (cf. (1)). Cette

qualification est classée en trois niveaux : bas ("low"), moyen ("moderate") et haut ("high"), appelés "AF2", "AF3" resp. "AF5". Ces niveaux correspondent à des accélérations du sol maximales (appelées "Zero Period Acceleration ZPA" dans les publications CEI) de 2, 3 resp. 5 m/s2. Le contenu fréquentiel correspondant de l'action sismique à prendre en considération est défini comme il se doit à l'aide des spectres de réponse (appelés "Required Response Spektrum RRS" dans les publications CEI). Un appareil est qualifié de sismique s'il supporte le RRS correspondant des niveaux de qualification respectifs, soit mathématiquement, soit expérimentalement, sans que cela nuise fondamentalement à sa fonction.

Niveaux de très haute tension : On parle de "niveaux de très haute tension" ou "très haute tension", dans le présent rapport, pour les niveaux de tension de 380 kV et 220 kV. Il n'existe pas de tension supérieure en Suisse.

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 aussi "accélération spectrale", ou bien réponse du déplacement, appelée aussi "déplacement spectral") d'un oscillateur à masse unique soumis à une excitation dynamique, en fonction de sa période propre et de son amortissement. L'effet sismique est généralement défini dans les normes de construction modernes 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 quelque part entre 0.1 s et 1 s (quelque peu différent selon la classe de sol de fondation).

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).

1.4 Remerciements

La plupart des analyses réalisées dans le cadre de l'étude pilote présentée ici n'auraient pu être faites sans la collaboration active et engagée de plusieurs représentants du secteur de l'électricité que nous remercions chaleureusement. De l'Axpo SA, autrefois NOK SA, ont collaboré (dans l'ordre d'importance de leur participation lors des mesures dans la SS Breite)

- M. Hässig, responsable du département Transformateurs et convertisseurs,
- A. Guérig, responsable du département Planification/Projets,
- H. Koch, responsable des sous-stations Nord,
- H. Hefti, collaborateur de la SS Breite.

De l'ewz, ont collaboré

- P. Müller,
- R. Lochmann (Schindler & Partner),

- K. Arnold,
- HP. Wittwer.

Les coûts pour les mesures des connexions par câbles à Benken ont été pris en charge par l'ewz. Nous la remercions de cette contribution.

Que soit remercié également, pour sa participation engagée, le groupe d'accompagnement cité dans l'impressum.

2. Comportement sismique des transformateurs

Comme mentionné dans l'introduction, en Suisse, l'absence d'ancrage empêchant le soulèvement des gros transformateurs représente l'un des problèmes potentiels les plus importants lors de séismes. Toutefois le danger de soulèvement dépend des fréquences propres fondamentales des oscillations de basculement et, sur ce point, les données fournies par la littérature sont au moins implicitement contradictoires. C'est pourquoi ces fréquences propres ont été mesurées sur cinq transformateurs types.

2.1 Données bibliographiques relatives aux fréquences propres de basculement

Selon le standard américain IEEE Std 693-2005 (2), les sollicitations sur les transformateurs, exception faite des traversées et des parafoudres, peuvent être calculées de manière quasi statique selon les annexes A.1.3.1 et D.3, en multipliant la masse par l'accélération maximale du sol. Ceci signifie implicitement que les fréquences propres fondamentales de basculement devraient être supérieures à 33 Hz, car sinon il faudrait tenir compte d'une amplification par rapport à l'accélération maximale du sol. D'un autre côté, une précédente version de ce standard, IEEE Std 693-1997, a donné un coefficient d'amplification de 2 par rapport à l'accélération du sol pour le point de fixation des traversées sur le toit du transformateur.

Ibáñez et al. (1973) (3) relatent les fréquences propres mesurées sur des transformateurs de 500 kV en Californie. Les valeurs les plus basses étaient de 2.70 et 3.35 Hz, avec des valeurs d'amortissement de 10 %, resp. 2 %, de l'amortissement critique. Bellorini et al. (1998) (4) ont mesuré, en Italie, sur un transformateur de 230/135 kV, une fréquence propre de 3.5 Hz et un amortissement de 2 %. Villaverde et al. (2001) (5) rapportent des mesures en Californie sur un transformateur Pauwels de 500 kV et sur un transformateur Westinghouse de 500 kV, tous deux monophasés. Les plus basses fréquences trouvées étaient 3.4, resp. 2.4 Hz, avec des valeurs d'amortissement de 1.5 à 3.6 %.

Toutes les fréquences propres fondamentales mesurées se situent dans le plateau de la sollicitation sismique, ce qui est implicitement en contradiction avec (2). Si l'on suppose prudemment un amortissement de 2 %, il s'ensuit que les accélérations au 2/3 de la hauteur du transformateur sont environ 3 fois plus grandes que l'accélération maximale du sol. Sur le toit du transformateur, il en résulterait une accélération jusqu'à 4.5 fois plus grande. Cela signifierait, du moins théoriquement, que des mesures contre le soulèvement seraient nécessaires en Suisse, même dans la zone Z1.

Comme la mise en place de mesures contre le soulèvement sur tous les transformateurs importants de Suisse nécessiterait un investissement financier considérable, il a été décidé d'effectuer des mesures de fréquences propres sur des transformateurs. Ce faisant, il fallait particulièrement vérifier si les valeurs basses que l'on trouve dans la littérature ne sont pas dues, par hasard, seulement à des oscillations locales, par exemple de traversées, mais correspondent bel et bien à des oscillations de basculement du bloc transformateur.

2.2 Mesures sur des transformateurs

Des mesures d'oscillations propres ont été réalisées sur cinq transformateurs différents; pour les détails, le lecteur est renvoyé au rapport de mesure correspondant (6). Ces transformateurs couvrent pratiquement le spectre entier, du transformateur à très haute tension le plus grand au transformateur de distribution au niveau du quartier. Toutefois, la priorité a été donnée aux tensions les plus élevées. Il s'agit des transformateurs suivants (cf. illustration 2.1):

- BBC-MFO "31", 380/220 kV (200 MVA), monophasé, pôle de réserve de la SS Breite (Axpo),
- Sécheron "32", 380/220 kV (1000 MVA), monophasé, transformateur principal de la SS Breite (Axpo),
- SMIT 220/110/16 kV, (160/160/53.3 MVA), triphasé, transformateur principal de la SS Wittenwil (Axpo),
- Siemens 150/22 kV (50 MVA), triphasé, transformateur principal dans la SS Zurich-Herden (ewz),
- Transformateur de distribution Rauscher&Stöcklin 11 kV/400 V (1 MVA), triphasé, station transformatrice Himmeribrücke à Zurich-Seebach (ewz).

Sur les transformateurs de l'Axpo les oscillations propres pour lesquelles les traversées oscillent en premier lieu (et dans un cas, le réservoir d'expansion) ont également été mesurées.

Le tableau 2.1 donne un aperçu des fréquences propres mesurées. Il confirme que les fréquences propres fondamentales se situent soit dans la zone, soit dans le voisinage immédiat, des fréquences qui correspondent au plateau des spectres de réponse en accélération. Autrement dit, les fréquences propres de tous les transformateurs mesurés se situent dans la zone de la sollicitation sismique la plus forte.

Le tableau 2.2 contient les valeurs d'amortissement mesurées. Sous "longitudinale" on désigne normalement la direction du courant électrique. Dans les transformateurs de distribution, cette direction n'est pas évidente; "longitudinal" correspond dans ce cas à la direction de la plus grande longueur du transformateur.



Illustration 2.1: Tran

- Transformateurs mesurés :
- (a) BBC-MFO 31, 380/220 kV monophasé, SS Breite,
- (b) Sécheron 32, 380/220 kV monophasé, SS Breite,
- (c) SMIT 220/110/16 kV triphasé, SS Wittenwil,
- (d) Siemens 150/22 kV, triphasé, SS Zurich-Herdern,
- (e) Rauscher&Stöcklin 11 kV/400 V, triphasé, Zurich-Seebach.

Transformatour	Fréquenc	ce (Hz)	
	longitudinale	transversale	
BBC-MFO 31, 380/220 kV, pôle de réserve E	Breite		
Oscillation de basculement transfo	4.25	5.0	
Traversée	7.0	6.0	
Réservoir d'expansion	5.5	7.1	
Sécheron 32, 380/220 kV, pôle principal Bre	əite		
Oscillation de basculement transfo	3.65	4.9	
Traversée	6 – 7 ?	7.4	
SMIT 220/110/16 kV, Wittenwil			
Oscillation de basculement transfo	3.25	4.95	
Traversée	6.3	?	
Siemens 150/22 kV, Zurich-Herdern			
Oscillation de basculement transfo	4.3	5.5	
Rauscher&Stöcklin 11 kV/400 V, Zurich-See	bach		
Oscillation de basculement transfo	4.4	3.9	

Tableau 2.1:	Fréquences propres	mesurées des	différents t	transformateurs.
--------------	--------------------	--------------	--------------	------------------

Tableau 2.2:	Valeurs	d'amortissem	ent	mesurées	sur	trois	transformateurs,	en	%	de
	l'amortis	ssement critiq	ue.							

Transformatour	Amortissement (% critique)				
	longitudinal	transversal			
BBC-MFO 31, 380/220 kV, pôle de réserve	1.7 %	1.2 %			
Sécheron 32, 380/220 kV, pôle principal	0.9 %	0.75 %			
SMIT 220/110/16 kV	1.1 %	?			

Il ressort du tableau 2.2 qu'il s'agit, pour les oscillations propres avec les fréquences les plus basses, réellement d'oscillations du bloc transformateur à proprement dit (et non pas seulement d'oscillations d'une traversée, d'un réservoir d'expansion ou d'un détail quelconque).



Illustration 2.2: Accélérations horizontales lors du débattement (tentative de "Snap back") sur le toit du transformateur (en haut, noir) et à environ un tiers de hauteur (en bas, rouge) ; le bloc transformateur, en entier, participe à l'oscillation.

2.3 Conclusions des mesures sur les transformateurs

Le tableau 2.3, repris du 1er rapport intermédiaire (1), donne un aperçu des accélérations du sol nominales maximales avec lesquelles il faut compter dans les différentes zones sismiques en Suisse, selon la norme SIA 261.

Tableau 2.3 : Accélérations	du so	ol maximales	en	m/s²	selon	la	norme	SIA	261,
arrondies à 0.	1 m/s²,	pour la class	se d	<i>'ouvr</i> a	age III	et l	les class	es a	le sol
de fondation (C et E.								

Zone sismique	Z1	Z2	Z3a	Z3b
Valeur de référence SIA 261 : a _{ga}	0.6	1.0	1.3	1.6
CO III: $a_{gd} \times \gamma_f$ (=1.4)	0.8	1.4	1.8	2.2
Sol de fondation C: $a_{gd} \times \gamma_f \times S(C)$ (=1.15)	1.0	1.6	2.1	2.6
Sol de fondation E: $a_{gd} \times \gamma_f \times S(E)$ (=1.4)	1.2	2.0	2.6	3.1

L'illustration 2.3 présente la répartition de la Suisse en zones sismiques. Les zones Z3a et Z3b concernent uniquement le canton du Valais, une petite partie des cantons de Berne et de Vaud ainsi que la région de Bâle.



Illustration 2.3: Zones sismiques de la Suisse selon la norme SIA 261 de 2003 (Source : SIA 261).

Si on estime prudemment l'amortissement à 2 %, valeur maximale indiquée par l'IEEE Std 693-2005 (2, chapitre 6.9), cela donne une amplification du plateau d'un facteur 3, c.-à-d. que l'accélération maximale agissant effectivement, appelée "accélération spectrale", s'élève à trois fois l'accélération maximale du sol.

La force d'inertie horizontale qui résulte d'un tremblement de terre agit un peu audessus du centre de gravité du transformateur. C'est pourquoi il est approprié de parler d'un degré d'élancement du transformateur, défini comme le rapport entre la hauteur du centre de gravité et la moitié de l'écartement des appuis. Si le rapport entre l'accélération de la pesanteur et l'accélération spectrale horizontale est à peu près de la même grandeur ou plus grand que le degré d'élancement, il se produit un soulèvement temporaire.

Dans la zone Z1, pour les classes de sol de fondation (CSF) C et E, les accélérations spectrales maximales sont de 3.0, respectivement de 3.6 m/s2. Pour les grands transformateurs, le degré d'élancement se situe typiquement entre 3.3 et 3.6. Ceci provoque donc pour la CSF C dans la zone Z1 juste le début du soulèvement : 3.3 à 3.6 > 9.81/3.0 (= ~3.3). Plus le degré d'élancement dépasse le rapport entre l'accélération de la pesanteur et l'accélération spectrale, plus le soulèvement est prononcé. Pour la CSF E, l'inégalité vaut : 3.3 à 3.6 > 9.81/3.6 (= 2.7). Dans ce cas il faut donc compter avec un soulèvement un peu plus net, mais dont la hauteur reste encore particulièrement faible.

Après le soulèvement temporaire, le transformateur retombe sur son support, ce qui engendre, par l'impact, de fortes pointes d'accélération qui peuvent provoquer en particulier la rupture des isolateurs en porcelaine des traversées. Mais le soulèvement entraîne avant tout aussi des déplacements plus grands des extrémités supérieures des traversées, elles-mêmes reliées par des conducteurs à des appareils voisins à haute tension. Cependant, le mou disponible dans ces connexions par câbles suffit déjà souvent à peine, sans soulèvement (cf. illustration 2.4) et encore moins lors d'un soulèvement du transformateur. Ainsi de grandes forces d'interaction peuvent se produire qui provoquent la rupture complète de la traversée ou - en premier lieu dans le type de construction américain ou japonais l'éjection typique de l'anneau d'étanchéité à la base de la traversée (cf. illustration 6.11 dans le 1er rapport intermédiaire).



Illustration 2.4: Connexion sans mou suffisant entre une traversée du pôle principal et une traversée du pôle régulateur, sur le transformateur Sécheron 32 (380/220 kV) dans la SS Breite.

L'effet de l'absence de mesures de sécurisation contre le soulèvement peut être imagé comme suit : si l'accélération sismique est suffisamment forte, le transformateur veut se soulever. Imaginons dans l'illustration 2.4 que le pôle principal (traversée du pôle principal à droite dans l'illustration) veuille se soulever vers la droite. Comme il faut supposer que le pôle régulateur (traversée du pôle régulateur à gauche dans l'illustration) n'oscille pas en phase avec le pôle principal, cela signifie que le pôle principal est gêné dans son soulèvement par la connexion ferme avec le pôle régulateur. Il ne viendrait à l'esprit de personne d'empêcher un soulèvement du transformateur par un blocage à la pointe d'une traversée mais c'est exactement ce qui se produit. La conséquence immédiate est – très probablement – une défaillance de la traversée.

Un soulèvement est théoriquement possible pour les transformateurs usuels dès que l'accélération effective du sol dépasse la valeur de 1 m/s2. C'est le cas, déjà dans la zone Z1, pour les classes de sol de fondation D ou E. D'un autre côté, un léger soulèvement de quelques millimètres seulement n'a certainement pas les mêmes conséquences qu'un soulèvement plus fort. Ceci est également confirmé par la statistique qui montre que la limite de dégât pour des transformateurs non ancrés se situe aux alentours d'une accélération du sol effective de 1.5 m/s2 (cf. tableau 2 dans le 1er rapport intermédiaire). Cette valeur est dépassée en Suisse, à partir de la zone Z2, pour toutes les classes de sol de fondation importantes (B, C, D et E).

2.4 Recommandations pour sécuriser les transformateurs contre le soulèvement

Une approche échelonnée, selon les zones sismiques, est recommandée pour sécuriser les transformateurs contre le soulèvement. L'application de ces recommandations relève de la propre responsabilité des exploitants de réseaux et finalement de leur propre intérêt, compte tenu des coûts de remplacement importants et des longs délais de livraison pour les transformateurs.

- Dans la zone Z1, pour les nouvelles installations, il est recommandé de prendre des mesures constructives simples contre le soulèvement si les coûts restent relativement faibles (cf. chapitre 2.5). Pour les transformateurs existants, on peut renoncer à les ancrer après coup si les roulettes, sur lesquelles la plupart des transformateurs reposent, peuvent transmettre à la fondation 30 % du poids du transformateur comme force horizontale, sans flamber. Cela signifie que plusieurs roulettes – et pas seulement une – devraient être bloquées pour éviter que la totalité de la force sismique se concentre sur une seule roulette.
- Dans la zone Z2, pour les nouveaux transformateurs, il faut exiger du fabricant un certificat pour le "niveau de qualification AF2 " selon les normes CEI ou un certificat équivalent. En plus, tous les transformateurs ayant un degré d'élancement > 2 doivent être suffisamment ancrés et munis d'un dispositif de sécurisation efficace contre le soulèvement. Pour les transformateurs existants les plus importants, il est recommandé de les ancrer ultérieurement dans un délai raisonnable si leur durée de vie restante dépasse 20 ans. Il relève de la responsabilité des exploitants des sous-stations d'identifier les transformateurs les plus importants pour la garantie d'approvisionnement en électricité.
- Dans les zones Z3a et Z3b, pour les nouveaux transformateurs, il faut exiger du fabricant un certificat pour le "niveau de qualification AF3" selon les normes CEI ou un certificat équivalent. De plus, tous les transformateurs doivent être suffisamment ancrés et sécurisés contre le soulèvement. Pour les transformateurs existants les plus importants, il est expressément recommandé de les ancrer ultérieurement dans un délai raisonnable si leur durée de vie dépasse 20 ans. Il relève de la responsabilité des exploitants des sous-stations d'identifier les transformateurs les plus importants pour la garantie d'approvisionnement en électricité.

2.5 Projet pilote d'un ancrage de transformateur

Chez Axpo SA, un projet pilote d'un ancrage parasismique, y compris sécurisation contre le soulèvement, d'un nouveau transformateur a été lancé, dans le but de sonder l'application dans la pratique et d'évaluer les coûts. Un rapport détaillé sur le sujet se trouve à l'annexe A. Il s'agit d'un transformateur pour les niveaux de tension 220/110 kV (160 MVA) avec une masse en état de marche d'environ 200 t. Un exemple de transformateur de cette dimension est le transformateur de Wittenwil sur l'illustration 2.1c.

Les coûts supplémentaires d'un ancrage parasismique d'un tel transformateur dans les zones Z1 et Z2 ont été évalués à une somme globale comprise entre CHF 75'000.- et 100'000.-. Dans les zones 3a et 3b, les coûts devraient être à peine supérieurs. La limite inférieure concerne plutôt les nouvelles installations, tandis que la limite supérieure est valable plutôt pour l'équipement d'installations existantes. A titre de comparaison, un nouveau transformateur de cette dimension, installé sur place, coûte à peu près 4 Mio. de francs suisses.

3. Comportement sismique d'appareils à très haute tension

Sur la base des expériences acquises dans le monde, lors de tremblements de terre, on peut conclure, que pour la sismicité en Suisse, pratiquement seuls les appareils des niveaux de tension 380 et 220 kV sont menacés. Les appareils

potentiellement les plus vulnérables sont les disjoncteurs, suivis par les transformateurs de courant à tête, parce que ces appareils présentent des masses relativement grandes en hauteur (cf. à ce sujet les explications données dans (1)) – même si les masses des appareils modernes ont diminué, comparées aux types de construction d'autrefois.

Le type de dommage le plus fréquent est la rupture de porcelaine. Après un séisme il est cependant souvent peu clair si les forces d'inertie en tant que telles ou plutôt les forces d'interaction dues à une tension soudaine des connexions entre des appareils voisins ont conduit à la rupture. Dans le présent chapitre, il n'est question que des effets immédiats des forces d'inertie sur les appareils à très haute tension ; l'interaction entre des appareils voisins – le problème de "mou" insuffisant dans les connexions – est traitée au chapitre 4.

Les forces d'inertie en tant que telles peuvent conduire principalement aux modes de rupture suivants:

- rupture par flexion dans l'isolateur de support,
- défaillance du châssis de support,
- défaillance de l'ancrage du châssis de support dans la fondation,
- défaillance de la fondation à la suite d'un dépassement des contraintes admissibles du sol.

Dans le sens d'une étude générique, les comportements parasismiques de deux disjoncteurs de la SS Breite et d'un disjoncteur de la SS Chamoson, ainsi que d'un transformateur de courant à tête et d'un groupe de mesure de la SS Breite, ont été analysés, pour des implantations hypothétiques dans toutes les zones sismiques.

Les appareils à très haute tension, y compris leurs châssis de support, présentent presque toujours des fréquences propres situées dans le plateau de la sollicitation sismique (cf. rapport de mesure (6)). Tous les calculs ont été faits en supposant que l'accélération du plateau agit sur l'appareil. Ils ont été faits sur la base des classes de sol de fondation B ou C. Pour les classes de sol de fondation D et E, les résultats devraient être de 10 à 15 % plus défavorables. Pour tous les calculs, un facteur d'importance de 1.4, valable pour la classe d'ouvrage III, a été pris en compte.

Les données trouvées dans les archives des sous-stations pour ces appareils n'ont pas permis des calculs fiables des contraintes de porcelaine des appareils existants. Mais selon (1), des calculs approximatifs pour Chamoson ont montré que les forces d'inertie lors de séismes dans la zone Z1, même pour les disjoncteurs avec des châssis de support flexibles, ne sembleraient pas représenter un gros problème. Ce résultat coïncide avec les affirmations de l'IEEE Std 693-2005 (2) qui part du principe que jusqu'à 0.1 g les exécutions standards d'appareil suffisent tant qu'ils sont convenablement ancrés. Cependant, dans les zones Z2 et Z3 les disjoncteurs qui n'ont pas été dimensionnés au séisme sont potentiellement menacés.

En outre, les calculs approximatifs pour Chamoson ont montré que les forces d'inertie, en tant que telles, agissant sur les transformateurs d'intensité de courant et sur les transformateurs de tension ainsi que sur les sectionneurs, ne devraient pas provoquer des dommages, même dans la zone Z3b. Cela coïncide avec les affirmations de ABB et de Siemens selon lesquelles leurs appareils à très haute tension actuels satisfont apparemment automatiquement le niveau de qualification CEI AF3 (cf. (1)). Ce niveau de qualification couvre de justesse la zone Z3b.

L'illustration 3.1 montre les disjoncteurs analysés dans le cadre de l'étude générique, avec leur châssis de support. Ces configurations peuvent être considérées comme représentatives des types de construction usuels en Suisse. Toutefois ont été sélectionnés de façon ciblée des disjoncteurs qui présentaient une configuration défavorable, c.-à-d. qui avaient tendance à présenter les châssis de support les plus élancés et/ou les fondations individuelles les plus petites. Pour le disjoncteur de Chamoson, il faut noter que le châssis de support est un peu plus haut qu'habituellement à cause du risque d'inondation, ce qui est tendanciellement un facteur défavorable supplémentaire parce les ancrages et les fondations doivent supporter des moments de basculement plus élevés.

Pour tous les calculs génériques effectués, aussi bien les châssis de support que leurs ancrages dans les fondations se sont révélés suffisants. Des problèmes surviennent par contre si les disjoncteurs reposent sur des fondations individuelles relativement petites.



Illustration 3.1: Disjoncteurs analysés:

(a) ABB ELF SP6-2 (380 kV), SS Breite, (b) Alstom HGF 115/2 (380 kV), SS Chamoson, (c) Sprecher HGF 214/2 (220 kV), SS Breite.

Le tableau 3.1 montre les facteurs de conformité pour la résistance sismique des fondations des disjoncteurs analysés. Le facteur de conformité indique quelle fraction du séisme, appliqué selon la norme SIA pour le dimensionnement de nouveaux appareils, est supportée sans dommage. Un facteur de conformité de 0.5, par exemple, signifie que la sécurité suffit juste pour un séisme deux fois moins fort que le séisme de dimensionnement.

Les calculs génériques mentionnés ont été faits pour deux contraintes admissibles du sol typiques : 0.25 MPa et 0.5 MPa. Ces contraintes admissibles ont toutefois été majorées du facteur 1.5, vu que le séisme représente une sollicitation de courte

Disjoncteur	Dimension fondation	σ _{ad} dans le sol	Zone Z1	Zone Z2	Zone Z3a	Zone Z3b
	(L * l * h) (m)	(MPa)	Fac	cteur de c	onformité	∋́ (-)
	1.7 * 1.7 * 1.0	0.25	3.5	2.1	1.6	1.3
ADD ELF 3F0-2		0.5	3.7	2.2	1.7	1.4
Alstern UCE 115/00	00*00*10	0.25	0.6	0.4	0.3	0.2
AISTOM HGF 115/2C	0.8 ^ 0.8 ^ 1.0	0.5	0.7	0.4	0.3	0.3
	00*00*10	0.25	1.8	1.1	0.8	0.7
	0.9 0.9 1.0	0.5	1.9	1.1	0.9	0.7

Tableau	3.1: Fac	teur de cont	formité c	des fo	ndati	ons	des	disjor	ncte	eurs	analy	sés po	our
	des	contraintes	admissik	bles c	du soi	$\sigma_{_{ad}}$	de	0.25	et	0.5	MPa,	pour	la
	clas	se d'ouvrage	ə III.										

Une comparaison des résultats du tableau 3.1 montre que ceux-ci ne dépendent pratiquement pas de la qualité du sol ; le facteur décisif est la géométrie, c.-à-d. la dimension de la fondation parce que la stabilité au basculement est déterminante. On peut conclure qu'en règle générale, il existe des problèmes seulement dans les zones Z3a et Z3b. Le disjoncteur Alstom de Chamoson (illustration 3.1b) fait exception puisqu'il combine un châssis de support particulièrement haut avec une fondation dont les mesures sont particulièrement petites. Pour ce cas spécial, la sécurité parasismique n'est déjà pas atteinte pour la zone Z1.

L'exemple du disjoncteur ABB, qui repose sur un châssis de support quelque peu "élargi", nécessitant automatiquement une fondation plus grande, montre de façon saisissante que seuls sont menacés les appareils qui reposent sur des fondations individuelles particulièrement petites.

Des contraintes de sol trop élevées n'entraînent, en soi, pas de défaillance de l'appareil à très haute tension concerné. Cependant les déformations plastiques survenant dans le sol conduisent à une chute des fréquences propres et donc à une augmentation du besoin en déplacement des points de raccordement des conducteurs. Formulé plus simplement : les déformations plastiques dans le sol augmentent les déplacements des points de raccordement des conducteurs. Cela augmente la nécessité de mou dans les connexions avec les appareils voisins, respectivement, augmente la probabilité qu'une de ces connexions devienne tendue et donc que tout à coup de grandes forces d'interaction se produisent, pouvant conduire à la rupture d'un isolateur en porcelaine. Ou, exprimé de façon plus parlante: les câbles des conducteurs empêchent en quelque sorte l'appareil concerné de basculer, ce qui entraîne de fortes sollicitations internes dans l'isolateur de support en porcelaine qui peut se briser.

16.09.2011

Une faible augmentation des dimensions des fondations permet déjà de régler le problème de la sécurité contre le basculement. Pour les nouvelles fondations, il est recommandé d'agrandir simplement la surface de fondation. Une deuxième possibilité, avant tout, comme renforcement de fondations existantes, consiste à augmenter la hauteur de la fondation, par exemple en surbétonnant, pour améliorer la sécurité contre le basculement et ainsi diminuer la concentration des contraintes à proximité du bord sur lequel la fondation basculerait autrement. Cela donne, en cas de séisme, des contraintes maximales du sol plus faibles, malgré un poids de fondation plus élevé.

En outre, a été analysé l'ancrage, d'apparence quelque peu exotique, d'un groupe de mesure et d'un transformateur de courant à tête qui reposent sur une sorte de chariot, lui-même placé sur un châssis de support métallique (illustrations 3.2 et 3.3) : deux roulettes du chariot positionnées en diagonale sont retenues aux rails par un étrier de serrage. Ces rails, de leur côté, sont fixés au cadre en métal placé au-dessous par deux pinces de serrage par appui ; ces pinces sont visibles au centre de l'image de droite sur l'illustration 3.3. Les supports du cadre en métal reposent sur une fondation commune, essentiellement plane.

Aussi bien la fixation des roulettes par les étriers de serrage que la fondation seraient même suffisantes dans la zone Z3b. Par contre, les pinces de serrage sont critiques car elles risquent de s'ouvrir dès qu'elles doivent transmettre une grande force de traction verticale. Le facteur de conformité est seulement de 0.5 dans la zone Z1, classe de sol de fondation C; dans la zone Z3b, ce facteur vaut seulement 0.2. Ce résultat souligne, de façon saisissante, que, même dans la zone Z1, on trouve des ancrages insuffisants pour les appareils à très haute tension.



Illustration 3.2: Appareils analysés : (a) Groupe de mesure Ritz KSKEF 450, SS Breite, (b) Transformateur de courant à tête Haefely IOSK 420, SS Breite.



Illustration 3.3: Gros plans de l'ancrage du groupe de mesure de l'illustration 3.2a; les pinces de serrage sur les rails, visibles au centre de l'illustration de droite, sont critiques.

Comme déjà mentionné dans l'introduction, les installations SF6 présentent peu de risque en cas de tremblement de terre si elles sont suffisamment ancrées et si le bâtiment qui les abrite est résistant aux séismes. L'illustration 3.4 montre l'exemple d'un ancrage d'une telle installation.

En résumé, on peut retenir que sont menacés par les forces d'inertie sismiques, en premier lieu, les appareils reposant sur de petites fondations individuelles. Les ancrages standards dans les fondations semblent, en règle générale, suffisants, même dans la zone Z3b ; mais des cas isolés insuffisants, comme par exemple sur l'illustration 3.3, ne peuvent pas être exclus et ce même dans la zone Z1. C'est pourquoi, il est recommandé de faire contrôler au moins les nouveaux ancrages et fondations par un ingénieur, dans la zone Z1, au moins sur le plan constructif et, à partir de la zone Z2, à l'aide de calculs.



Illustration 3.4: Installation SF6 dans la SS Herdern (ewz): ancrage dans le plancher.

4. Mou dans les connexions

La connexion entre deux appareils à haute tension devrait avoir assez de mou pour que les appareils puissent osciller indépendamment l'un de l'autre en cas de séisme, sans que la connexion ne devienne tendue. Autrement, de grandes forces d'interaction peuvent apparaître et entraîner une rupture des isolateurs en porcelaine et, par conséquent, la destruction des appareils.

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 câbles conducteurs lors d'un tremblement de terre. Ce déplacement – appelé "besoin en déplacement" – dépend fortement de la période propre, ou fréquence propre, de l'appareil concerné. Les fréquences propres des appareils à très haute tension, reposant sur des châssis de support standards, se situent généralement entre 2 à 4 Hz, mais peuvent dans certains cas aussi être plus basses.

4.1 Mesures de fréquences propres sur des appareils à très haute tension

Dans les sous-stations (SS) Breite et Benken les fréquences propres fondamentales, dites simplement "fréquences propres", de nombreux appareils à très haute tension, ont été mesurées. Les résultats sont rassemblés dans un rapport de mesure (6).

Comme les appareils du niveau de tension 380 kV sont un peu plus gros que ceux du niveau de tension 220 kV, il faut s'attendre à ce que les fréquences propres des appareils de 380 kV aient tendance à être plus basses que les fréquences propres des appareils de 220 kV. Les fréquences propres dépendent également de la rigidité du châssis de support sur lequel reposent les appareils. Les soubassements dans la SS Breite peuvent être considérés comme typique pour la Suisse, tandis que dans la SS Benken les supports porteurs sont particulièrement hauts à cause du risque d'inondation et, de ce fait, potentiellement plus flexibles. C'est pourquoi les fréquences propres mesurées dans la SS Benken devraient avoir tendance à correspondre aux valeurs limites inférieures.

Les mesures concrètes ont montré que les tendances des différences mentionnées ne sont pratiquement pas significatives par rapport à la variabilité des fréquences propres d'un appareil à l'autre. Les fréquences propres des appareils à très haute tension équipés d'isolateurs en porcelaine se situent, par exemple, dans les zones suivantes, même si, au cas par cas, des valeurs légèrement plus basses peuvent apparaître :

- disjoncteurs, transformateurs d'intensité de courant et transformateurs de tension ainsi que groupes de mesure combinés : environ 2 Hz,
- isolateurs de support et sectionneurs pantographes : environ 3 Hz,
- parafoudres et sectionneurs rotatifs : environ 4 Hz.

Il vaut la peine de signaler que les appareils équipés d'isolateurs en matière synthétique ont des fréquences propres plus basses que les appareils comparables équipés d'isolateurs en porcelaine (cf. rapport de mesure (6)). La fréquence propre la plus basse, à savoir 1.2 Hz, a été mesurée dans la SS Breite pour un groupe de mesure de 380 kV du type RITZ KSKEF 450 équipé d'isolateurs en matière synthétique. La masse plus faible des isolateurs en matière synthétique est manifestement plus que compensée par la rigidité plus faible, par rapport aux isolateurs en porcelaine. Cela signifie que le besoin de mou dans les connexions entre les appareils équipés d'isolateurs en matière synthétique est un peu plus grand que pour les connexions entre les appareils équipés d'isolateurs en porcelaine. Mais la probabilité de rupture des isolateurs en matière synthétique, quand la connexion devient tout à coup tendue, est nettement plus faible que pour les isolateurs en porcelaine. Dans le cas des isolateurs en porcelaine, des explosions peuvent, selon les circonstances, se produire déjà lors d'actions extérieures particulièrement faibles, ce qui peut être exclu dans le cas des isolateurs en matière synthétique.

4.2 Besoin en déplacement

Le tableau 4.1 donne un aperçu du besoin en déplacement à la hauteur d'un oscillateur à masse unique équivalent, ce qu'on appelle "déplacement spectral". Le besoin en déplacement réel aux points de connexion des câbles conducteurs est majoré par ce qu'on appelle le facteur de participation. Ce facteur dépend de la répartition de la masse et de la rigidité sur la hauteur et devrait se situer en règle générale pour les appareils à très haute tension dans la zone entre 1.2 (appareils à centre de gravité élevé) et 1.5 (appareils avec répartition régulière de la masse par rapport à la hauteur). Dans des cas particuliers de répartition fortement irrégulière de la masse, il peut résulter aussi des valeurs fondamentalement plus grandes. Pour les transformateurs à très haute tension, pour lesquels le centre de gravité de la masse se situe environ à un tiers, ou même un quart, de la hauteur de la borne de raccordement à la pointe de la traversée, le facteur de participation se situe dans un ordre de grandeur de 3 à 4.

Le tableau 4.1 contient les déplacements spectraux pour les classes de sol de fondation A, B et E. Les valeurs pour les classes de sol de fondation C et D sont de quelques pour cents plus faibles, pour les fréquences indiquées, que pour les classes de sol de fondation B, respectivement E. Du tableau 4.1 il ressort clairement que la fréquence propre, malheureusement connue de façon imprécise sans mesures sur place, est, de loin, le paramètre d'influence le plus important.

Tableau 4.1: Déplacement spectral en (mm) (sans facteur de participation) selon SIA 261, en fonction de la fréquence propre f_o d'un oscillateur à masse unique équivalent et de la zone sismique, pour les classes de sol de fondation A, B et E, un facteur d'importance $\gamma_F = 1.4$ et un amortissement de 2 % de l'amortissement critique.

f _o	4 Hz				3 Hz			2 Hz			
CSF	А	В	Е	А	В	Е	А	В	Е		
Zone Z1	4.0	4.8	5.6	8.0	9.6	11.2	12.7	19.1	22.3		
Zone Z2	6.6	7.9	9.3	13.3	16.0	18.6	21.2	31.8	37.1		
Zone Z3a	8.6	10.3	12.0	17.3	20.7	24.2	27.5	41.3	48.2		
Zone Z3b	10.6	12.7	14.8	21.2	25.5	29.7	33.9	50.8	59.3		

Le dimensionnement des mous nécessaires peut être déterminé grâce à la norme US IEEE Std 693-2005 (2), chapitre 5.9. La longueur de conducteur minimale, $L_{\sigma'}$ nécessaire entre deux appareils reliés entre eux est :

 $L_{o} = L_{1} + 1.5 \Delta + L_{2}$

(1)

Page 24

avec

- L₁ distance la plus courte entre les points de connexion,
- L₂ longueur supplémentaire dépendant de la configuration du conducteur (voir ci-dessous),
- Δ déplacement relatif maximal des points de connexion pendant le séisme.

La longueur supplémentaire L_2 dépend de la configuration des conducteurs et de la rigidité à la flexion du conducteur – en général non négligeable ; elle doit garantir que les points de connexion n'aient pas à absorber des moments de flexion inutiles. La longueur L_2 peut être déterminée à partir d'essais ou de calculs.

Selon la norme US IEEE Std 1527-2006 (7), chapitre 4.4, L_{\circ} peut être définie à l'aide d'une formule moins conservatrice :

$L_0 = L_1 + 1.25 \Delta + L_2$

(2)

Le déplacement relatif maximal Δ doit être déterminé à partir des déplacements individuels, selon IEEE Std 693-2005, comme la somme des déplacements individuels des points de connexion des appareils voisins, respectivement selon IEEE Std 1527-2006, à l'aide de la règle appelée SRSS ("Square Root of the Sum of Squares"). Il faut tenir compte du fait que l'interaction sol-structure, généralement négligée dans les calculs sismiques, conduit à une sous-estimation des déplacements et introduit une incertitude. C'est pourquoi il est parfaitement sensé de procéder avec prudence dans le calcul de la longueur de conducteur minimale L_o. Pour cette raison, il est recommandé, pour la Suisse, de calculer avec 1.5 Δ , mais d'utiliser la règle SRSS, moins conservatrice, pour déterminer Δ .

Le tableau 4.2 donne un aperçu des déplacements relatifs "1.5 Δ" qui doivent être possibles entre deux appareils voisins sans que la connexion ne devienne tendue. Les valeurs indiquées sont valables pour un facteur de participation admis à 1.6, qui couvre selon (7) 95 % des cas pouvant apparaître. Le tableau contient les valeurs pour les classes de sol de fondation (CSF) A, B et E. Pour la CSF C, les valeurs de la CSF B peuvent être appliquées pour des usages pratiques, et pour la CSF D les valeurs de la CSF E. Le tableau 4.3 contient des valeurs arrondies qui peuvent être utilisées si aucune mesure, ou aucun calcul plus précis, n'ont été faits.

Le mou effectif (longueur de câble supplémentaire), nécessaire pour assurer un déplacement relatif voulu sans que la connexion devienne tendue, dépend énormément de la configuration du conducteur. L'illustration 4.1 montre les cas les plus importants. La configuration 1 convient le mieux, généralement, si de grands déplacements relatifs doivent être possibles. La force dans le câble conducteur n'augmente, dans ce cas, que lentement et dépend, en premier lieu, de la rigidité à la flexion du câble conducteur.

Tableau 4.2: Mou nécessaire "1.5 Δ " en (mm), qui doit être disponible dans le câble conducteur entre deux appareils à très haute tension (sauf transformateurs de puissance), en fonction des fréquences propres fondamentales f_{01} et f_{02} des appareils reliés entre eux, de la zone sismique et de la classe de sol de fondation, en supposant un facteur de participation de 1.6 et un amortissement de 2%, pour la classe d'ouvrage III.

Fréquences appareils	Classe de sol de fondation	Zone Z1 1.5 ∆ (mm)	Zone Z2 1.5 ∆ (mm)	Zone Z3a 1.5 ∆ (mm)	Zone Z3b 1.5 ∆ (mm)
2 Hz – 2 Hz	A	43	72	94	115
	B	65	108	140	172
	E	75	126	163	201
2 Hz – 3 Hz	A	36	60	78	96
	B	51	85	111	137
	E	60	99	129	159
2 Hz – 4 Hz	A	32	53	69	85
	B	47	79	103	126
	E	55	92	119	147
3 Hz – 3 Hz	A	27	45	58	72
	B	33	54	70	87
	E	38	63	82	101
3 Hz – 4 Hz	A	21	36	46	57
	B	26	43	55	68
	E	30	50	65	80

La configuration 3 est la plus simple et en même temps, de loin, la plus répandue. Pour un déplacement relatif donné qui doit être possible, elle exige cependant la plus grande flèche. C'est pourquoi pour des déplacements relatifs plus grands, cette configuration peut entraîner des problèmes avec les distances d'isolation minimales à respecter. Un autre inconvénient est que la force dans le câble conducteur augmente brusquement dès que le mou initialement disponible est "épuisé". Donc, du point de vue de la sécurité sismique, les configurations avec un fort déport vertical, comme on peut le voir sur l'illustration 3.2a, sont favorables. Tableau 4.3: Valeurs arrondies pour le mou nécessaire "1.5 △" en (mm) qui doit être disponible dans le câble conducteur entre deux appareils à très haute tension (sans transformateurs de puissance) pour des paramètres identiques à ceux du tableau 4.2 (CO III, facteur de participation 1.6, amortissement 2 %).

Fréquences appareils	Classe de sol de fondation	Zone Z1 1.5 ∆ (mm)	Zone Z2 1.5 ∆ (mm)	Zone Z3a 1.5 ∆ (mm)	Zone Z3b 1.5 ∆ (mm)
2 Hz – 2 Hz	A	45	75	95	115
	B, C	65	110	140	170
	D, E	75	125	165	200
2 Hz – 3 Hz	A	35	60	80	95
	B, C	50	85	110	135
	D, E	60	100	130	160
2 Hz – 4 Hz	A	35	55	70	85
	B, C	50	80	105	125
	D, E	55	95	120	145
3 Hz – 3 Hz	A	30	45	60	75
	B, C	35	55	70	90
	D, E	40	65	85	100
3 Hz – 4 Hz	A	30	35	45	60
	B, C	30	45	55	70
	D, E	30	50	65	80



Illustration 4.1: Configurations de conducteur (de la norme américaine Std 1527-2006 (7)).

4.3 Bases pour le contrôle de connexions existantes

L'illustration 4.2 montre, pour la configuration 3, le développement pour une estimation simple du déplacement relatif possible • en fonction de la flèche d et de la distance q entre les points de connexion des conducteurs. Comme seul un ordre de grandeur est nécessaire, on suppose, pour simplifier, que la connexion par câbles se compose de quatre arcs de cercle égaux. Ce développement se limite, de plus, aux premiers termes pertinents du développement en série de Taylor des fonctions trigonométriques et est donc valable uniquement pour une flèche atteignant au maximum 10 à 20 % de la distance entre les points de connexion des conducteurs. Cette condition devrait être cependant remplie en Suisse dans la plupart des cas.

De l'illustration 4.2 il ressort que le déplacement relatif possible augmente avec le carré de la flèche. Comme, d'un autre côté, le besoin en déplacement augmente, dans une large mesure, avec le carré de la période propre des appareils à très haute tension considérés, la flèche doit augmenter essentiellement de façon linéaire avec la période. C'est la période de l'appareil oscillant le plus lent qui est déterminante en premier lieu.



Illustration 4.2: Développement d'une formule simple pour l'estimation du rapport entre la flèche d et le déplacement relatif possible Δ pour la configuration 3.

Le tableau 4.4 donne la flèche nécessaire pour la configuration 3, en fonction du déplacement relatif et de la distance entre les points de connexion des conducteurs des appareils voisins. Ce tableau représente seulement un rapport géométrique et est donc valable indépendamment des autres paramètres tels que zones sismiques, classes de sol de fondation ou bien fréquence ou période propre des appareils.

Tableau 4.4: Flèche nécessaire d en (mm) pour pouvoir assurer un déplacement relatif voulu ∆ sans mise sous tension de la connexion pour une distance donnée q entre les points de connexion des conducteurs. Ce tableau représente un rapport purement géométrique et est donc valable pour toutes les zones sismiques, classes de sol de fondation et fréquences propres des appareils.

Dépl. relatif Δ (mm)	30	60	120	200
Distance q = 1.5 m	130	185	260	335
Distance q = 3.0 m	185	260	365	475
Distance q = 4.5 m	225	320	450	580
Distance q = 6.0 m	260	365	520	670

L'illustration 4.3 montre une autre configuration de conducteur, ci-après dénominée configuration 5, dans laquelle les points de connexion se trouvent à différentes hauteurs, mais la dénivellation est en général bien plus petite que la distance horizontale entre les points de connexion. Le conducteur part horizontalement des points de connexion et les relie approximativement par deux arcs de cercle.

L'illustration 4.3 montre le développement pour une estimation simple du déplacement relatif possible Δ en fonction de la dénivellation h et de la distance q entre les points de connexion. Ce développement se limite, de plus, aux premiers termes des séries de Taylor des fonctions trigonométriques et de la fonction des racines et est donc valable uniquement pour une dénivellation atteignant au maximum 1/3 (tout au plus $\frac{1}{2}$) de la distance entre les points de connexion des conducteurs.

Attention : le déplacement relatif Δ calculé sur l'illustration 4.3 n'est qu'une valeur limite supérieure, qui serait atteinte si le conducteur ne présentait aucune rigidité de flexion et donc si, aux points de connexion, des courbures (coudes) infiniment grandes pouvaient être admises. En réalité, indépendamment de la rigidité à la flexion du conducteur, des dénivellations encore plus grandes que dans le tableau sont donc nécessaires. Tant qu'aucune clarification plus précise n'aura été faite, il est proposé de partir d'un supplément nécessaire de 50 %. C'est pourquoi la configuration des conducteurs 5 devrait, en règle générale, être remplacée par une configuration similaire à celle de la configuration 4 (cf. illustration 4.1). Cela signifierait cependant que les connexions de conducteurs ne peuvent plus être faites horizontalement. Comme alternative avec des départs de conducteurs horizontaux plus simples, une configuration 5 qui présenterait un mou supplémentaire, comme dans la configuration 3, serait envisageable.



Illustration 4.3: Configuration de conducteurs 5: Développement d'une formule simple pour l'estimation du rapport entre la dénivellation h (entre les points de connexion des conducteurs) et le déplacement relatif possible Δ.

La configuration de conducteurs 5 donne vite l'impression, optiquement, d'un mou suffisant, mais ceci est trompeur. Comme il ressort d'une comparaison des formules d'approximation sur les illustrations 4.2 et 4.3, la dénivellation des points de connexion doit (pour autant qu'elle reste faible par rapport à la distance entre ceux-ci) être, dans la configuration 5, plus de 16 fois la flèche de la configuration 3, pour pouvoir admettre un déplacement relatif similaire (resp. 24 fois si l'on vise, comme recommandé, 1.5 fois la dénivellation).

Le tableau 4.5 donne la dénivellation nécessaire pour la configuration de conducteurs 5 en fonction du déplacement relatif et de la distance entre les points de connexion des conducteurs des appareils voisins. Ce tableau, aussi, ne représente qu'un rapport géométrique et est donc valable indépendamment des autres paramètres tels que zones sismiques, classes de sol de fondation ou fréquence propre des appareils. Il faut tenir compte du fait que le déplacement relatif possible Δ , au moins dans l'approximation des formules données, dépend du carré de la dénivellation h. Si h est, ne serait-ce que d'un facteur 1.4, trop petit, alors le Δ maximal possible est déjà d'un facteur 2 trop petit !

Tableau 4.5: Valeur limite inférieure de la dénivellation en (mm) pour pouvoir assurer un déplacement relatif désiré ∆ sans mise en tension des connexions pour une distance donnée q entre les points de connexion des conducteurs (" – " signifie que la valeur se situe en dehors du domaine de validité des formules d'approximation de l'illustration 4.3). Ce tableau représente un rapport géométrique et est donc valable pour toutes les zones sismiques, classes de sol de fondation et fréquences propres des appareils.

Dépl. relatif. Δ (mm)	30	60	120	200
Distance q = 1.5 m	520	735	-	-
Distance q = 3.0 m	735	1040	1470	-
Distance q = 4.5 m	900	1270	1800	-
Distance q = 6.0 m	1040	1470	2080	2680

Les flèches qui ont été déterminées du point de vue de la sécurité sismique doivent être contrôlées au niveau des forces dynamiques survenant en cas de courtcircuit. Si des problèmes relatifs au court-circuit apparaissent, il faut choisir une configuration de conducteurs mieux adaptée.

4.4 Etude pilote pour l'évaluation du mou dans la SS Breite

Les relations présentées au chapitre 4.3 ont été utilisées dans la SS Breite pour l'évaluation des connexions qui semblaient les plus critiques. Pour ce faire, il a été supposé que la classe de sol de fondation dans la Breite était la classe C, la plus répandue.

En bas à gauche sur l'illustration 4.4, on peut voir les connexions entre un groupe de mesure et un sectionneur rotatif pour 220 kV. L'illustration 4.5 montre un gros plan pris de la direction opposée.



Illustration 4.4: En bas à gauche : connexions relativement tendues entre les groupes de mesure et sectionneurs rotatifs (220 kV) dans la SS Breite.



Illustration 4.5: Gros plan des connexions visibles sur l'illustration 4.4 entre les groupes de mesure et sectionneurs rotatifs (220 kV) dans la SS Breite (photographié de la direction opposée).

Le câble conducteur entre le groupe de mesure et le sectionneur rotatif est relié à l'horizontale aux deux points de connexion situés à des hauteurs différentes ; il s'agit donc de la configuration de conducteurs 5. Selon la définition de l'illustration 4.3, la distance horizontale (q) est de 1.64 m et la dénivellation (h) de 220 mm. La valeur limite supérieure du déplacement relatif admissible (Δ) n'est donc que d'à peine 5 mm. Pour des fréquences propres estimées à 2 Hz, pour le groupe de mesure, et à 4 Hz, pour le sectionneur rotatif, le besoin en déplacement est de 47 mm, selon le tableau 4.2, donc presque le décuple.

Pour couvrir le besoin d'un déplacement relatif de 47 mm, la dénivellation selon la formule finale de l'illustration 4.3 devrait être de 680 mm, resp. compte tenu de la rigidité à la flexion du conducteur environ 1.5 fois la valeur, donc environ 1 m. Une solution plus simple, pour une adaptation aux exigences, serait d'amener du mou supplémentaire dans la connexion sans changer la dénivellation. Avec cela, il faudrait rallonger le câble conducteur existant d'environ 45 mm, ce qui donnerait une flèche de juste 180 mm.

Sur l'illustration 4.6, il s'agit d'une connexion de 220 kV de la configuration 3 entre un sectionneur pantographe et un isolateur de support. Pour une distance des points de connexion des conducteurs de 3.57 m, la flèche est de 220 mm. Cela signifie selon l'illustration 4.2 qu'un déplacement relatif maximal de jusqu'à 36 mm est possible avant que de grandes forces n'apparaissent dans le câble conducteur. Si l'on part de fréquences propres de 3 Hz pour le sectionneur et l'isolateur de support, le besoin en déplacement relatif est alors (1.5 x Δ , selon le tableau 4.2) de 33 mm ; le mou disponible suffit donc juste dans l'implantation de la Breite. En revanche, le mou disponible ne suffirait plus à partir de la zone Z2.

Page 32



Illustration 4.6: Connexion entre sectionneur pantographe et isolateur de support dans le champ transfo 31 (220 kV) de la SS Breite.

L'illustration 4.7 montre une connexion 220 kV de la configuration 3 entre un isolateur de support et un sectionneur rotatif. La distance des points de connexion des conducteurs est de 4.95 m, la flèche d'environ 340 mm. Cela signifie qu'un déplacement relatif maximal de jusqu'à 62 mm est admissible.



Illustration 4.7: Connexion entre isolateur de support et sectionneur rotatif dans le champ transfo 31 (220 kV) de la SS Breite.

Si l'on part de fréquences propres de 3 Hz pour l'isolateur de support et de 4 Hz pour le sectionneur, le besoin en déplacement relatif (1.5 x • selon le tableau 4.2), même pour la zone Z2 et la classe de sol de fondation E, ne dépasse pas 50 mm. Le mou disponible serait suffisant dans ce cas, aussi dans la zone Z2, pour toutes les classes de sol de fondation, dans la mesure où les fréquences propres supposées sont exactes ou plus élevées que les valeurs supposées. Cependant, dans la zone Z3a, respectivement Z3b, le mou disponible pour les classes de sol de fondation D et E, respectivement B à E, ne serait plus suffisant.

Dans l'illustration 4.8, on peut voir les connexions entre un transformateur d'intensité de courant, un transformateur de tension et un sectionneur rotatif (champ transfo 32, 380 kV). Bien que les points de connexion se situent à des hauteurs légèrement différentes, on peut partir approximativement de la configuration de conducteurs 3. Pour des raisons d'exploitation, il n'a pas été possible de mesurer, sur place, la flèche dans ce cas et pour les exemples suivants.



Illustration 4.8: Connexions entre transformateur d'intensité de courant, transformateur de tension et sectionneur rotatif dans le champ transfo 32 (380 kV) de la SS Breite.

Entre le transformateur d'intensité de courant et le transformateur de tension dans l'illustration 4.8, la flèche devrait à peine avoir plus de 50 mm et, selon les plans, les points de connexion sont espacés d'environ 2.2 m. Avec des fréquences propres estimées à 2 Hz pour le transformateur d'intensité de courant et à 3 Hz pour le transformateur de tension, le besoin en déplacement relatif est de 51 mm. Selon la dernière formule de l'illustration 4.2, la flèche devrait être de 205 mm. Cela est, avec certitude, nettement plus que la flèche existante.

Entre le transformateur de tension et le sectionneur, la flèche disponible devrait se situer dans un ordre de grandeur de 100 mm pour une distance horizontale des points de connexion d'environ 3.3 m. Avec des fréquences propres estimées à 3 Hz pour le transformateur de tension et à 4 Hz pour le sectionneur, le besoin en déplacement relatif est de 26 mm. Selon la dernière formule dans l'illustration 4.2, la flèche devrait alors être d'environ 180 mm. Cela est très vraisemblablement plus que ce qui est disponible.

L'illustration 4.9 montre des connexions 380 kV entre un transformateur d'intensité de courant, un transformateur de tension et un sectionneur rotatif. Ici, seule la connexion entre le transformateur d'intensité de courant et le transformateur de

16.09.2011

tension est examinée de plus près. Il s'agit de la configuration de conducteurs 5 avec – selon le plan – une distance horizontale d'environ 2.2 m et une dénivellation d'environ 0.5 m. Avec des fréquences propres estimées à 2 Hz pour le transformateur d'intensité de courant et à 3 Hz pour le transformateur de tension, le besoin en déplacement relatif est de 51 mm. Selon la dernière formule de l'illustration 4.3, la dénivellation devrait être théoriquement de 820 mm, mais pratiquement, elle doit être environ 1.5 fois plus grande, donc environ de 1.2 m. Cela est bien plus que la dénivellation existante. D'un autre côté, on peut conclure à partir de ce résultat que la dénivellation existante entre le transformateur de tension et le sectionneur rotatif – environ 0.9 m – devrait suffire du fait des fréquences propres plus élevées.



Illustration 4.9: Connexions entre transformateur d'intensité de courant, transformateur de tension et sectionneur rotatif dans le champ Lägern-Nord (380 kV) de la SS Breite.

Sur l'illustration 4.10, la connexion 380 kV entre groupe de mesure et isolateur de support est intéressante ; elle peut approximativement être attribuée à la configuration 3.

La distance horizontale entre le groupe de mesure et l'isolateur de support est selon le plan - d'environ 4.6 m et la flèche devrait se situer dans un ordre de grandeur de 0.5 m. La fréquence propre du groupe de mesure (Ritz KSFEK 450), avec un isolateur en plastique, a été mesurée sur place (6) et n'est, dans la direction du conducteur, que de juste 1.2 Hz. Il en résulte un besoin en déplacement relatif de 66 mm qui exige une flèche de 340 mm. La flèche disponible devrait donc suffire ici bien que le besoin en déplacement relatif soit relativement élevé, à cause de la faible fréquence propre du groupe de mesure.

16.09.2011



Illustration 4.10: Connexions entre un groupe de mesure Ritz KSKEF 450 et un isolateur de support dans le champ de couplage (380 kV) de la SS Breite.

Sur l'illustration 4.11, on peut voir la connexion entre le pôle principal et le pôle de régulation du transformateur 31 (380/220 kV).



Illustration 4.11: Connexion entre pôle principal et pôle de régulation du transformateur 31 de la SS Breite.

Les câbles conducteurs sur l'illustration 4.11 sont raccordés verticalement à chaque axe des traversées, elles-mêmes penchées l'une vers l'autre de façon à ce que les formules des illustrations 4.2 et 4.3 ne soient plus valables. Comme, dans ce cas, les directions initiales des câbles conducteurs sont nettement différentes aux points de connexion, la rigidité flexionnelle du câble joue un rôle encore plus marqué que dans la configuration 5. Purement qualitativement, le câble

Page 36

conducteur existant semble avoir la longueur minimale nécessaire pour éviter des moments de flexion inutiles aux points de connexion. C'est pourquoi le câble conducteur devrait être prolongé, environ, du montant du besoin en déplacement relatif. La flèche qui en résulte est évaluée, simplement, à l'aide d'un modèle.

La fréquence propre la plus basse du transformateur 31 a été mesurée à 4.25 Hz. Si l'on part, pour les deux pôles, d'une valeur prudente de 4 Hz (pour tenir compte approximativement des oscillations supplémentaires des traversées) et si l'on tient compte d'un facteur de participation de 4, cela donne un besoin en déplacement relatif (facteur 1.5 analogue à celui du tableau 4.2 inclus) de 38 mm. Un prolongement du câble conducteur de ce montant devrait entraîner, selon une estimation approximative, une flèche d'environ 200 mm.

L'illustration 4.12 montre la connexion, avec parafoudre intercalé, entre le pôle principal et le pôle de régulation du transformateur 32 (380/220 kV). La connexion de la configuration 3 est pratiquement tendue et devrait, ici aussi, être rallongée du besoin en déplacement relatif. La fréquence propre du transformateur la plus basse mesurée est 3.65 Hz dans la direction du conducteur. Si l'on se base, pour le calcul, sur 3.5 Hz (avec facteur de participation 4) pour le transfo et sur 4.0 Hz (avec facteur de participation 1.3) pour le parafoudre, cela donne, des deux côtés du parafoudre, un besoin en déplacement relatif de 35 mm. Pour une distance horizontale des points de connexion de 0.9 m, cela signifie qu'une flèche d'environ 100 mm serait nécessaire. Il faudrait vérifier si une telle flèche serait possible sans que ne se produisent des moments de flexion indésirables dans le câble conducteur, qui devraient être absorbés par les pointes de traversée aux points de connexion.



Illustration 4.12: Connexion entre le pôle principal et le pôle de régulation du transformateur 32 de la SS Breite.
4.5 Etude pilote pour l'évaluation du mou dans la SS Benken

Dans la SS Benken, les connexions de trois champs ont été mesurées par un géomètre (cf. annexe B). Il s'agit du champ de transfo D32 et du champ de couplage D34 du côté 380 kV ainsi que du champ de couplage F22 du côté 220 kV. Les longueurs des câbles conducteurs ainsi que les distances droites entre les points de connexion des appareils voisins respectifs ont été relevées. Cela a permis de déterminer immédiatement le mou réellement disponible.

Comme les longueurs des câbles conducteurs et les distances entre les appareils n'étaient déterminées qu'au centimètre près et que le mou correspond à la (petite) différence entre ces grandeurs mesurées, les valeurs obtenues pour le mou étaient approximatives. Il s'est révélé que cette faible précision était cependant suffisante pour évaluer l'étendue de la problématique de l'insuffisance de mou.

La SS Benken se situe dans la zone Z2 et, pour le sol, la classe de sol de fondation D a été retenue. Cependant, l'évaluation du mou disponible a été faite de façon générique pour toutes les zones sismiques en Suisse, dans chaque cas pour la classe de sol de fondation D. Comme la SS Benken présente des châssis de support légèrement plus hauts qu'habituellement, à cause du danger d'inondation, et qu'il s'agit d'un sol de fondation relativement "tendre", le besoin de mou dans les connexions – à cause de fréquences propres tendanciellement plus faibles – devrait être ici légèrement plus élevé qu'ailleurs. C'est pourquoi les résultats, appliqués à d'autres sous-stations en Suisse, devraient être tendanciellement plutôt pessimistes.

Comme déjà mentionné au point 4.1, les fréquences propres ont été mesurées sur de nombreux appareils à très haute tension. Cela a permis de faire une évaluation du besoin de mou plus fine qu'avec de simples estimations de fréquences. C'est pourquoi le besoin de mou a été déterminé de deux façons différentes : d'une part, de façon précise, c.-à-d. à l'aide de fréquences propres mesurées et des facteurs de participation estimés pour chaque appareil, et d'autre part, pour simplifier, à l'aide du tableau 4.3.

Les tableaux 4.6 et 4.7 donnent un aperçu des résultats pour le champ de transfo D32, une fois le besoin de mou calculé à l'aide de la méthode précise et une fois à l'aide de la méthode simplifiée, c.-à-d. à l'aide des fréquences propres estimées, selon le chapitre 4.1 ainsi que selon le tableau 4.3. Le besoin de mou calculé de façon simplifiée est d'un facteur 1 à 2 plus grand que le besoin de mou précis. La raison principale de cette différence réside dans l'estimation des fréquences propres des appareils, bien plus que dans les simplifications resp. les arrondis qui sont à la base du tableau 4.3. Les fréquences propres des appareils ont, effectivement, une très grande influence sur le besoin de mou.

Malgré la différence mentionnée dans le calcul des mous nécessaires, l'évaluation permettant de savoir si les mous disponibles sont suffisants est très similaire (dans les zones Z1 et Z3b, un peu moins favorable selon la méthode simplifiée). Pour le cas concret de Benken, cela donne même le même résultat : dans le champ de transfo D32, seule la connexion entre le sectionneur rotatif et le transformateur de tension dispose de mous suffisants ; toutes les autres connexions sont trop tendues.

Dans le champ de couplage D34, seule la connexion entre le sectionneur pantographe et le transformateur de tension présente des mous suffisants ; selon le calcul précis du besoin de mou, ce serait même le cas dans la zone Z3b. Les autres connexions sont trop tendues pour la zone Z2.

Tableau 4.6: Aperçu sur le mou disponible et sur le mou nécessaire selon la méthode précise entre les appareils du champ de transfo D32 à Benken (Z2, CSF D). Les valeurs de mou sont valables, pour chacune des connexions correspondantes, entre les appareils mentionnés dans la colonne de gauche.

Appareil	f₀ (Hz) mesurée	Mou disponible	Besoin de mou (mm)	Suffisant pour la zone				
Sectionneur	4.1	(mm)	a Benken	Z1	Z2	Z3a	Z3b	
rotatif	4.1	130	61	oui	oui	oui	oui	
Transformateur	2.4	~ 150						
de tension	2.4	50	63	oui	non	non	non	
Transformateur	3.3	~ 50						
d'intensité de			95	non	non	non	non	
courant		~ 50						
Disioncteur	1.8							
	-	~ .30	100	non	non	non	non	
Sectionneur	2.8		100	non		1011		
pantographe	2.0	20	50	non			202	
lsolateur de	3 /	~ 20	50	non	HOH	HOH	HUH	
support	5.4							

Tableau 4.7: Aperçu du mou disponible et du mou nécessaire selon le tableau 4.3 entre les appareils du champ de transfo D32 à Benken (Z2, CSF D). Les valeurs de mou sont valables ,pour les connexions correspondantes, entre les appareils mentionnés dans la colonne de gauche.

Appareil	pareil f _o (Hz) estimée		Besoin de mou (mm)	Suffisant pour la zone				
Sectionneur	Λ	(mm)	a Benken	Z1	Z2	Z3a	Z3b	
rotatif	4	~ 130	95	oui	oui	oui	non	
Transformateur	2	100						
de tension	2	a. 50	125	non	non	non	non	
Transformateur	2		120	11011	11011	Поп		
d'intensité de courant			125	non	non	non	202	
		~ 00	120	HOH	HOH	non	HOH	
Disjoncteur	2	20	100					
Sectionneur	0	~ 30	100	non	non	non	non	
pantographe	3	00	/ 5	202				
lsolateur de	2	~ 20	00	non	non	non	non	
support	3							

Dans le champ de couplage F22, la situation est semblable. Seule la connexion entre le sectionneur pantographe et le disjoncteur présente, pour le site de Benken, des mous suffisants, et ceci seulement selon le calcul précis du besoin de mou. Les autres connexions sont trop rigides pour la zone Z2.

4.6 Conclusions relatives au mou

Les analyses du besoin de mou, pour les sous-stations Breite et Benken, montrent que le problème d'insuffisance de mou pour les niveaux de tension 380 kV et 220 kV est important, déjà dans la zone Z1. Les niveaux de tension plus bas ne posent guère de problème selon l'expérience internationale relative à l'insuffisance de mou. Selon une estimation très approximative, on peut supposer que, dans la zone Z1, environ la moitié des connexions par câbles existantes sont trop tendues. Dans la zone Z2, cela devrait être vrai pour environ trois quarts des connexions par câbles. Dans les zones Z3a et Z3b enfin, pratiquement seules les connexions par câbles qui ont un grand déport vertical entre les points de connexion ne posent aucun problème. On peut voir un exemple à ce sujet un peu à gauche du milieu de l'image sur l'illustration 4.4 : il s'agit des câbles conducteurs qui partent à droite des groupes de mesure.

Etant donné ce résultat défavorable, il serait opportun, d'un point de vue purement technique, d'assurer ultérieurement un mou suffisant aux connexions. Pour les installations existantes, des mesures de fréquences propres pourraient aider à déterminer exactement le besoin de mou et ainsi à diminuer le nombre de câbles conducteurs à changer.

L'ewz a évalué approximativement le confortement hypothétique de la SS Benken concernant le mou. Par champ de lignes ou de transformateurs, les coûts d'un démontage des câbles conducteurs existants et d'un nouveau câblage ont été estimés à environ CHF 80'000.-. Par champ de couplage, l'estimation se monte à environ CHF 40'000.-. Ces coûts sont tellement élevés que, même sans calcul détaillé de rentabilité, on peut conclure qu'il serait, au maximum, justifié de conforter dans tout le pays les champs de connexion ou de transformateurs les plus importants du point de vue de la sécurité de distribution régionale d'énergie et, parmi ceux-ci, uniquement ceux pour lesquels il n'est prévu aucun renouvellement d'appareils dans un avenir "très proche", donc à peu près dans les 20 prochaines années. Il est de la responsabilité des gestionnaires de réseaux d'identifier ces champs de lignes ou de transformateurs particulièrement importants et de vérifier si ceux-ci devraient être confortés par un mou suffisant, éventuellement avant un renouvellement général d'appareils.

Si l'on désirait conforter de façon conséquente les sous-stations les plus importantes au niveau du mou, le problème, en plus des coûts élevés, serait aussi la mise hors service des champs de lignes à conforter. C'est pourquoi les travaux nécessaires ne pourraient être réalisés que sur un laps de temps assez long, en même temps que les travaux de réparation et de maintenance à effectuer de toute façon.

Etant donné ce problème, et particulièrement les coûts élevés, la problématique du mou ne peut être réglée, pour l'essentiel, que dans le cadre des renouvellements d'appareils, car les champs correspondants doivent alors être mis de toute façon hors service et que les frais supplémentaires restent peu importants.

5. Systèmes secondaires et autres équipements

5.1 Vulnérabilité

En raison de la pratique de la construction en Suisse jusqu'à présent et en raison du fait que la sécurité sismique n'était, par le passé, à quelques exceptions près, pas thématisée en Suisse, dans les installations d'approvisionnement en énergie, il faut supposer que la plupart des bâtiments existants, qui abritent les systèmes secondaires des sous-stations (contrôle, protection, alimentation pour les besoins propres et autres installations auxiliaires) ou également des installations de distribution d'énergie dans des armoires, ne répondent pas aux exigences actuelles en matière de sécurité sismique. Ceci vaut aussi bien pour les bâtiments eux-mêmes que pour les équipements ou appareils mentionnés.

Les systèmes secondaires suivants, typiques dans les sous-stations, et vulnérables en cas de tremblements de terre, peuvent, par leur défaillance, sensiblement perturber le fonctionnement d'une sous-station et par conséquent l'approvisionnement en énergie :

- les faux-planchers ne sont généralement pas contreventés et sont de ce fait susceptibles de s'effondrer s'ils n'atteignent pas, de tous les côtés, les murs massifs qui entourent la pièce;
- les batteries de secours ne sont que très rarement sécurisées contre la chute et les entres-chocs entre elles ;
- les armoires de commande (ainsi que, de manière analogue, les installations de distribution d'énergie dans des armoires) risquent de se renverser si elles ne sont pas convenablement ancrées ;
- les parois de séparation, les plafonds suspendus, les écrans, etc. peuvent tomber.

Ces analyses sont valables pour toutes les sous-stations à haute tension quels que soient les niveaux de tension.

5.2 Mesures recommandées

Les nouvelles constructions abritant des systèmes secondaires importants devraient être dimensionnées pour résister aux séismes, selon les normes SIA applicables, en particulier la norme 261. Ceci vaut aussi bien pour le bâtiment que pour les installations. Les éléments de construction non porteurs doivent être dimensionnés selon le chapitre 16.7 de la norme SIA 261. La publication de l'OFEV prévue pour 2011 concernant la sécurité sismique des éléments de construction non porteurs (8) peut aussi rendre ici de précieux services.

Les bâtiments de commande existants devraient faire l'objet d'une analyse parasismique. Cela représente, pour les constructions simples, si les plans d'ingénieurs sont disponibles, un investissement d'une semaine de travail environ ; beaucoup plus pour les bâtiments complexes. Si aucun plan n'est disponible, il faut encore compter du temps supplémentaire pour des prises de mesures et des sondages.

Lors de la vérification des bâtiments existants, il est possible d'utiliser en substance le cahier technique SIA 2018 (9). Il faut cependant tenir compte du fait que dans les bâtiments de commande, c'est moins le risque lié aux personnes que le risque sociétal d'une panne d'approvisionnement en énergie qui est au premier plan.



Illustration 5.1: Fixation d'un nouveau faux-plancher, atteignant de tous les côtés les murs massifs, chevillé aux murs et au sol (ewz). Si le fauxplancher n'atteint pas un mur massif, même d'un côté seulement, il ne faudrait pas seulement boulonner ces appuis mais également les contreventer avec des barres diagonales.

Comme une étude pilote de l'ewz l'a montré (cf. chapitre 5.3 et annexe C), les mesures parasismiques de systèmes secondaires sont possibles à des coûts particulièrement faibles, mais présentent un grand effet en cas de séisme pour ce qui est de la réduction des dommages et d'une éventuelle interruption d'exploitation.

Les faux-planchers qui n'atteignent pas complètement, de tous les côtés, des murs massifs (!) doivent être contreventés pour résister aux forces horizontales. Si les fauxplanchers atteignent, de tous les côtés, des murs massifs, aucune mesure particulière n'est théoriquement nécessaire. Il est recommandé, cependant, d'effectuer, si possible, quelques assemblages par chevilles (illustration 5.1).

Les batteries de secours doivent être sécurisées contre la chute ou le renversement (illustration 5.2). En plus, il faut s'assurer, à l'aide d'une fine couche en élastomère, que les boîtiers relativement fragiles ne peuvent pas s'entrechoquer (illustration 5.3).



Illustration 5.2: Sécurité contre le basculement et la chute de batteries de secours dans la SS Münchwilen (Axpo SA) : pieds des supports contreventés en diagonale et boulonnés au sol ; des profils horizontaux empêchent le basculement des batteries.



Illustration 5.3: SS Münchwilen (Axpo SA) : des couches de plastique ondulé, entre les batteries, voisines les empêchent de s'entrechoquer.

Il faut également ancrer les armoires de commande de façon à ce qu'elles ne puissent pas basculer. Les armoires de commande placées le long d'un mur massif peuvent être fixées directement au mur à l'aide d'équerres et de chevilles (illustration 5.4). Pour les armoires au centre d'une pièce, une fixation est possible, soit au sol par ancrage, soit aux murs au moyen de rails placés au-dessus qui vont de mur à mur et y sont ancrés (illustration 5.5). Les éléments à centre de gravité très élevé, comme par ex. les stations de couplage MT, risquent particulièrement de basculer et devraient être, en conséquence, ancrés très minutieusement.



Illustration 5.4: Ancrage d'armoires de commande positionnées le long d'un mur, à l'aide d'équerres et de chevilles (Axpo SA).



Illustration 5.5: Ancrage d'armoires de commande au centre d'une pièce, à l'aide de rails placés au-dessus et fixés aux murs massifs (Axpo SA).

Pour les sous-stations souterraines, il faut également vérifier la sécurité sismique, par exemple, du refroidissement des transformateurs ainsi que des installations d'extinction et les conforter, le cas échéant.

Les mesures recommandées sont utiles, même si le bâtiment en soi ne remplit pas totalement les exigences de sécurité parasismique. Premièrement, les bâtiments se comportent souvent mieux que ce que les calculs permettent d'attendre, et deuxièmement, il peut y avoir des tremblements de terre plus faibles que le séisme de dimensionnement selon la norme SIA 261, qui ne provoquent, par conséquent, pas la ruine du bâtiment mais qui, par exemple, peuvent déjà faire tomber des batteries non sécurisées.

Les mesures mentionnées plus haut devraient être appliquées de façon standardisée dans la branche en raison de leur grande efficacité et de leurs coûts faibles par rapport aux frais opérationnels nécessaires à l'entretien et au renouvellement.

5.3 Etude pilote SS Herdern

La sous-station Herdern, Zurich (zone Z1) a été mise en service en 1971. Elle alimente en énergie électrique environ 40 stations-transformatrices, stations d'abonnés à haute tension et stations de redresseur à "Zurich West" ainsi que dans certaines parties du quartier d'Aussersihl.

Dans le cadre d'une transformation complète de la sous-station, l'ewz a réalisé, entre autres, une étude pilote relative à la sécurité parasismique des systèmes secondaires. Toutes les installations et tous les éléments non porteurs ont été sécurisés. Un rapport à ce sujet se trouve à l'annexe C.

Les coûts des mesures de sécurité parasismique pour les systèmes secondaires ont représenté environ 1 % du total des coûts de transformation. Encore 2 % ont été nécessaires selon une estimation pour la sécurité parasismique de l'ensemble de la technique primaire.

Comme dans la sécurité parasismique des systèmes secondaires, ce sont, le plus souvent, des aspects constructifs qui sont au premier plan, il faut s'attendre à ce que les coûts correspondants, dans les zones Z2 et Z3, soient à peine plus élevés. On peut donc partir du principe que les coûts de la sécurité parasismique des systèmes secondaires, s'ils peuvent être engagés dans le cadre d'une transformation, atteignent un à deux pour cents des coûts de transformation.

6. Conclusions et nécessité d'agir

Des expériences internationales montrent qu'en cas de séisme les dommages, de loin, les plus importants sont observés dans l'infrastructure de distribution d'énergie, dans les sous-stations à très haute tension isolées à l'air. Plus le niveau de tension est élevé, plus les sous-stations sont vulnérables.

En raison de la sismicité moyenne qui domine en Suisse, il faut s'attendre, chez nous aussi, à des séismes qui peuvent provoquer la défaillance des sous-stations directement touchées. Des dommages sont attendus aussi bien dans les transformateurs de puissance, en particulier dans leurs traversées, que dans les appareils à très haute tension. L'un des problèmes principaux est posé aujourd'hui par les connexions par câbles trop tendues entre les appareils Bien que les différents appareils ne peuvent pas osciller indépendamment les uns des autres, cela peut entrainer de grandes forces d'interaction qui peuvent conduire à la rupture des appareils. Les systèmes secondaires également, tels que par exemple les batteries de secours ou armoires de commande, présentent aujourd'hui de graves points faibles et seraient susceptibles de tomber en panne.

Ainsi, il y a nécessité d'agir pour minimiser le risque sismique dans la distribution d'électricité et également pour préserver les intérêts des entreprises. La nécessité consiste à agir, en premier lieu, sur la sécurité sismique des transformateurs de puissance, en ce qui concerne, en particulier, leur ancrage, sur la garantie d'un mou suffisant pour les connexions par câbles entre les appareils à très haute tension, ainsi que sur la sécurisation des systèmes secondaires (batteries de secours, armoires de commande, etc.), de tous les niveaux de tension. Des mesures préventives dans ces domaines permettent d'augmenter de façon significative la sécurité d'approvisionnement en cas de séisme. Des mesures prises dans le cadre

de renouvellements d'installations n'entraînent qu'un supplément de coûts particulièrement faible. Il est de la responsabilité, et en fin de compte aussi dans l'intérêt propre des exploitants de réseau, de mettre en place de telles mesures de sécurisation.

Les enseignements présentés dans le 1er rapport intermédiaire du 15.01.2009, et dans l'actuel 2e rapport, sont repris dans le projet d'une nouvelle directive de l'ESTI relative à la "Sécurité parasismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse". En prévision d'une application "adaptée aux séismes", de cette future directive, il est important de sensibiliser les acteurs concernés à la problématique de la sécurité sismique et de les former en conséquence.

7. Sources

- (1) Koller M. (2009), "Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse", 1er rapport intermédiaire, sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge.
- (2) IEEE Std 693-2005 (2005), IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations, recognized as an American National Standard, IEEE Power Engineering Society, New York.
- (3) Ibáñez P., R. Vasudevan und E.J.Vineberg (1973), "A Comparison of Experimental Methods for Seismic Testing of Equipment", Nuclear Engineering and Design, Vol. 25, 150-162.
- (4) Bellorini S., M. Salvetti, F. Bettinali und G. Zafferani (1998), "Seismic Qualification of Transformer High Voltage Bushings", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, n° 4, 1208-1213, October 1998.
- (5) Villaverde R., G.C. Pardoen und S. Carnalla (2001), "Ground Motion Amplification at Flange Level of Bushings Mounted on Electric Substation Transformers", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30, 621-632.
- (6) Résonance Ingénieurs-Conseils SA (2010), "Equipements de sous-stations électriques : mesures in situ des fréquences propres". RT-285.02-2, 03.11.2010, Carouge.
- (7) 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.
- (8) Publication OFEV relative au dimensionnement sismique des éléments de construction non porteurs, prévue pour 2011.
- (9) SIA 2018 (2004), Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants, cahier technique de la Société suisse des ingénieurs et architectes, Zurich. Ce cahier technique sera remplacé dans un avenir proche par la norme SIA 269/8.

Annexe A: Ancrage de transformateurs (Axpo SA)



Aktennotiz

Thème	Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse
De	Martin Hässig EUU-T
Date	4. novembre 2009, 23. décembre 2010 (Rev. 01)
No. réf.	EU 2860_01
à	Dr. Martin Koller, Résonance Ingénieurs-Conseils SA
Pour information à	Christian Lindner Adrien Guérig Georg Hauenstein

Ancrage de transformateurs dans les zones sismiques 1 et 2 (Plateau et Préalpes sans la région de Bâle)

1. Introduction

Les recherches effectuées jusqu'à ce jour (en partie avec le concours d'Axpo SA) sur la sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse démontrent que les transformateurs, en tant que composants importants et onéreux d'une sous-station, devraient être ancrés afin d'éviter des dommages durables provoqués par des tremblements de terre, comme ils sont attendus dans les zones sismiques 1 et 2. Sans résoudre déjà les questions de la nécessité, de l'urgence ou du type et du volume des mesures à prendre, quelques éléments sont esquissés ci-après relatifs à la possibilité d'ancrage, basés sur les connaissances actuelles de l'auteur.

Pour la zone 3, les ancrages sont vraisemblablement nécessaires dans tous les cas. La question de savoir jusqu'à quel point les propositions d'ancrages suivantes suffisent resp. doivent être développées aussi dans cette zone n'a pas été clarifiée.

Dans un premier temps, nos réflexions relatives aux ancrages partent de l'intention de laisser les transformateurs sur les roulettes pour pouvoir en cas d'urgence retirer facilement et rapidement le transformateur de son emplacement et, le cas échéant, le remplacer par une unité de réserve (il-lustration 1). La réflexion est moins guidée par la fréquence d'une telle situation que par la nécessité de ne pas perdre de temps pour effectuer le changement.

Lors de la mise en place d'un ancrage, en particulier s'il est ajouté ultérieurement, il faut accepter de nombreuses restrictions :

- a) Aucune soudure ne peut être effectuée aux rails, car autrement leur acier commence à se fragiliser et les rails ne peuvent plus supporter les lourdes charges.
- b) Les soudures à la cuve de transformateur doivent être par principe évitées. Les sections de soudure nécessaires peuvent être exécutées uniquement aux nervures et aux griffes à partir desquelles aucune transmission de chaleur notable aux parois de la cuve en contact avec de l'huile ne peut se produire.



- c) Les points d'accrochage et de soutien prévus pour le soulèvement ne doivent pas être affaiblis ou altérés dans leur fonction.
- d) L'introduction de la force doit être répartie pour que la probabilité de déformations plastiques de la cuve, en particulier au niveau des soudures existantes et étanches à l'huile, soit faible.



Illustration 1 Roulettes doubles avec blocage (boulonné sur le rail) transformateur 160 MVA 220/110 kV (selon le type de 180'000 à 240'000 kg)

La construction de l'ancrage lui-même devrait suivre les directives suivantes:

- a) Transmission et introduction des forces de retenue dans la fondation.
- b) Construction légère (cas de charge à préférer : charge de traction).
- c) Ancrages nombreux et répartis (réduction des charges ponctuelles sur la cuve du transformateur et la fondation).
- d) Les éléments fixes de l'ancrage ne doivent pas empêcher le changement de transformateurs (entrée et sortie).
- e) La construction ne doit pas nécessiter d'entretien, doit être résistante à la corrosion, flexible et facilement fabricable en série pour différentes dispositions. Pour cela, il faut autant que possible avoir recours à peu de pièces différentes, principalement des produits commerciaux ou des éléments de construction simples standardisés.



2. Fondations pour transformateurs pour les niveaux de réseau 1 et 2

Dans les sous-stations d'Axpo SA, les fondations de transformateur disposent directement sous l'emplacement du transformateur d'un bac à huile, le plus souvent dimensionné pour retenir le liquide qui s'écoule et les eaux de pluie. Comme protection contre le feu, on utilise des couches de gravier ou des grilles de recouvrement spéciales (illustration 2).

Les constructions en béton des fondations comportent une cuve (illustration 3) dans laquelle quatre murs portants sont exécutés, en tête desquels les rails sont disposés (illustration 4, illustration 5). Selon la situation, des murs coupe-feu sont construits au-dessus du terrain.



Illustration 2 Emplacement pour un transformateur 160 MVA 220/110 kV, NE 2





Illustration 3 Vue d'en haut d'une installation des rails





Illustration 4 Coupe transversale avec les murs porteurs de l'installation des rails





Illustration 5 Rails en tête de mur





Illustration 6 Bac de récupération d'huile avec armature d'attente pour les murs supportant les rails



Illustration 7

Armature et coffrage extérieur des murs porteurs



3. Propositions pour les ancrages

Le but de l'ancrage est de contrecarrer les forces qui s'exercent pendant un tremblement de terre de façon à ce que le transformateur ne soit pas déplacé (composante horizontale des forces). De plus, il faut éviter que le transformateur puisse être soulevé sur un côté sous l'action des forces horizontales provoquant un basculement, comme des forces verticales agissant directement, et puisse ensuite retomber "brutalement". C'est pourquoi des ancrages verticaux, soumis à la traction, sont préférables. Pourtant, il faut prévoir aussi des ancrages résistant de façon horizontale. Si les forces agissant sont trop grandes pour l'ancrage horizontal (freinage des roulettes ainsi que résistance de celles-ci transversalement à la direction de marche) ou si le nombre de points permettant l'introduction des forces des ancrages dans la cuve resp. dans la fondation est insuffisant, il faut empêcher une "chute" du transformateur dans le cas d'un flambage des roulettes.

Une autre mesure consiste à mettre en place des murs de renforcement ou des profilés transversalement aux murs porteurs ; on pense alors à deux murs ou profilés traversant toute la cuve d'un côté à l'autre dans la zone des roulettes qui, exécutés comme murs, ont une épaisseur de 50 cm environ chacun et par conséquent sont positionnés à une distance de centre à centre de 150 cm. Cette mesure semble être appropriée pour la zone sismique 2, et spécialement pour la zone 3. Il en résulte ainsi des simplifications par rapport à la disposition des ancrages. En plus, des ancrages soumis à la compression (flambage) peuvent être envisagés, ainsi que des appuis fixes au lieu des roulettes, car le remplacement des roulettes à l'aide de vérins hydrauliques peut se faire plus simplement et avec plus de sécurité (illustration 12). Une autre variante avec des profilés métalliques transversaux est indiquée dans les illustrations 10 et 11.





Gabarit d'espace libre pour transports ferroviaires, centre de gravité et surface d'appui



La grandeur géométrique et la position du centre de gravité varient très peu pour les transformateurs d'Axpo SA dans la NE 1 et NE 2 car les gabarits de transport (profil CFF) sont principalement déterminants pour la grandeur (Illustration 8). De ce fait, il devrait être possible de procéder d'après un dimensionnement unique, avec le poids (classes de poids) comme seul paramètre.

4. Estimation des coûts

En fonction du volume des mesures nécessaires, les coûts varient entre CHF 75'000.00 et CHF 110'000.00 par transformateur (125 ... 160 MVA, poids 180'000 ... 240 '000 kg)

a)	Ingénierie initiale (unique)		
	Concept, étude de pièces standardisées, dimensionnement	CHF	30'000.00
b)	Ancrage	CHF	77'200.00
	comprenant :	0.15	
	- Ingénierie / exécution par transformateur	CHF	5'000.00
	- 16 plaques d'ancrage à env. 100 kg, CHF 1'500.00 / pièce	CHF	25'000.00
	- 96 boulons adhésifs	CHF	10'000.00
	- 16 ancrages verticaux M 30, d'env. 1.2 m chacun	CHF	3'200.00
	- 8 ancrages horizontaux M 30, d'env. 4 m chacun	CHF	4'000.00
	- Adaptation protection contre l'incendie ou		
	vidange et remplissage	CHF	4'000.00
	- Montage, adaptation au transformateur incl.	CHF	10'000.00
	- Supplément pour acier V4A	CHF	16'000.00
C)	Dispositif antichute (pos. 5 dans l'illustration 9)		
•)	A pièces par transformateur	СНЕ	12'000.00
	4 pieces par transformateur	CIII	12 000.00
d)	En plus, deux murs transversaux (evtl. pour zones 2 et 3)	CHF	17'000.00
,	chacun d'env. 9 m de longueur. 2.4 m de hauteur.		
	0.5 m d'énaisseur		
	volume total 21 m^3		



Illustration 9 Idée et éléments d'un ancrage, 1 : plaque d'ancrage, 2 : ancrage vertical, 3 : ancrage transversal (diagonal en croix), 4 : ancrage longitudinal (diagonal en croix), 5 : dispositif antichute (4 pièces.)





Illustration 10 Confortement avec ancrage par profilés métalliques (coupe longitudinale)





Illustration 11 Confortement avec ancrage par profilés métalliques (coupe transversale)





Illustration 12 Ancrage avec introduction des forces de traction et de compression dans la fondation¹



¹ Schiff, A. J.: Guide to improved earthquake performance of electric power systems, ASCE Publ. No. 96, 1999, Fig. 5.49 et 5.50





Illustration 13 Schéma d'ancrages pour transformateurs sur rails²

5. Positionnement des propositions

Les propositions s'accordent, du moins en partie, avec celles des sources de la littérature déjà citées [Schiff]. Elles ont été élaborées comme recommandations pour les zones sismiques de la Californie (faille de San Andreas) et pour les régions centrales de l'Amérique du nord.

6. Autres mesures pour le confortement de la sécurité sismique

Blocage de toutes les roulettes, les dispositifs de blocage eux-mêmes doivent être sécurisés contre les chutes consécutives à une secousse (Illustration 1).

La conception des connexions vers les traversées côté tension primaire, tension secondaire et tension tertiaire, doit être vérifiée dans chaque cas particulier pour assurer des mous suffisants (Illustration 14).

Lors d'un confortement visant à augmenter la sécurité sismique, les constructions porteuses pour le réservoir d'expansion et pour les refroidisseurs ou radiateurs doivent être vérifiées. Il faudra vraisemblablement les conforter avec des raidisseurs diagonaux (Illustration 15).

² Schiff, Fig. 5.48







Illustration 14 Exemple de câbles de connexion "tendus"



Illustration 15 Exemple de renforcement d'une suspension de radiateur³

³ Schiff, Fig. 5.73



7. Effets d'un ancrage parasismique sur les concepts existants

La protection de la cuve (installation isolée du transformateur avec une ou peu de connexions de mise à terre de la cuve, qui utilisent comme dispositif protecteur un transformateur d'intensité de courant) devient inopérant par la connexion électrique entre la cuve et la terre. Ce concept de protection n'est pas utilisé chez Axpo SA, mais appliqué en Suisse.

Si un incident (pas un séisme) rend nécessaire le changement d'un transformateur, il faut prévoir pour le démontage des ancrages, le temps nécessaire dans le "chemin critique" du démontage. Si les mesures de sécurité parasismique sont appliquées de façon conséquente, il faut aussi démonter un ancrage au transformateur de réserve.

Meilleures salutations Axpo SA

Martin Hässig Responsable du département Transformateurs et convertisseurs Annexe B: Câbles conducteurs SS Benken (ewz)

18-OCT-2010 DGN: I:\Vermess\ewz\UW_Benken\CAD\aufn_strang2_3000-0100-21.dgn

roStation v8\Workspace\Standards\pen\plotattribute.pen



EWZ, UW Benken, Detailaufnahmen Strang 2, Ansicht 1:50									
	Wälli AG Ingenieure			wälli	Proje	ekt Nr. 45 x 105cm	3000-	0100-2	21 - 2
	CH-9320 Arbon Brühlstrasse 2a	T. 071 447 89 40 F. 071 447 89 45	arbon@waelli.ch www.waelli.ch		Entwurf	Gezeichnet	Kontrolliert	Änderung	Datum
				Ingenieure	BB	MS	BB		18.10.2010





+

Plotdatum: 18-OCT-2010 DGN: I:\Vermess\ewz\UW_Benken\CAD\aufn_strang1_3000-0100-21.dgn Pentable: V:\MicroStation_v8\Workspace\Standards\pen\plotattribute.pen



+

+

EWZ, UW Benken, Detailaufnahmen Strang 1, Ansicht 1:50								
Wälli AG I	ngenieure		wälli	Proje	ekt Nr. 45 x 63cm	3000-	0100-2	21 - 1
CH-9320 Arbon Brühlstrasse 2a	T. 071 447 89 40 F. 071 447 89 45	arbon@waelli.ch www.waelli.ch		Entwurf	Gezeichnet	Kontrolliert	Änderung	Datum
,	Ingenieure	BB	MS	BB		18.10.2010		





+

18-OCT-2010 I:Wermess\ewz\UW_Benken\CAD\aufn_strang3_3000-0100-21.dgn \^-\MirznStation_v8\Workspace\Standards\pen\plotattribute.pen

Pentab

Plotdatun DGN:

EWZ, UW Benken, Detailaufnahmen Strang 3, Ansicht 1:50									
Wälli AG li	Wälli AG Ingenieure			Proje	ekt Nr. 45 x 42cm	3000-	0100-2	21 - 3	
CH-9320 Arbon Brühlstrasse 2a	T. 071 447 89 40 F. 071 447 89 45	arbon@waelli.ch www.waelli.ch	Ingenieure	Entwurf BB	Gezeichnet MS	Kontrolliert BB	Änderung	Datum 18.10.2010	

Annexe C: Etude pilote de l'ewz sur les systèmes secondaires





Entreprise d'électricité de la ville de Zurich Rénovation de la sous-station Herdern



Rapport final du contrôle de la sécurité sismique des systèmes secondaires et des équipements

Ta	ble des matières	Page
1.	Introduction	3
2.	Situation initiale	5
3.	Modélisation	5
4	Explications relatives au tableau	6
5.	Mesures planifiées et réalisées	7
6.	Résumé	13
An	nexe	14

ANNEXE : Tableau Ancrage horizontal de l'aménagement intérieur pour charges sismiques avec coûts approximatifs

1. Introduction

Descriptif succinct

La sous-station Herdern, à la Pfingstweidstrasse 85 dans le quartier industriel, a été mise en service en 1971 et alimente depuis en énergie électrique environ 40 stations transformatrices, stations d'abonnés à haute tension et redresseurs dans la partie "Zurich Ouest" ainsi que dans certaines parties du quartier d'Aussersihl.

Avant les transformations

La sous-station disposait d'une station de couplage en plein air de 150 kV sur le toit du bâtiment, avec barre collectrice simple, deux champs de ligne et trois champs de transformateur. Les trois transformateurs 30 MVA de 150/11 kV se trouvaient dans des cellules en plein air adossées au bâtiment. La station de couplage 11-kV, ouverte et isolée à l'air, était composée de 4 secteurs comprenant au total 40 champs et située au rez-de-chaussée. S'y trouvaient également la salle de contrôle avec la commande locale et les appareils de protection, la télécommande centralisée, une station transformatrice locale ainsi que des pièces annexes telles qu'entrepôts et salle de ventilation. Le plan au sous-sol était réduit et comprenait la cave des câbles 11-kV ainsi que la salle des batteries.

Mesures

Le conseil municipal avait décidé en 1972 une augmentation progressive de la moyenne tension de 11 à 22 kV, ce qui permettait de pratiquement doubler la capacité de transport des câbles d'alimentation. Entre-temps, plus de 85 % des stations transformatrices et plus de 80 % des câbles à moyenne tension sont dimensionnés pour 22 kV. Quelques-uns des circuits fonctionnant avec 11 kV avaient atteint leur limite de performance du fait de l'augmentation de la charge dans la zone d'approvisionnement (Zurich Ouest) et ne pouvaient plus être agrandis. C'est pourquoi il fallait faire passer la tension de 11 à 22 kV et donc, dans la sous-station Herdern, les installations correspondantes telles que transformateurs, stations de couplage à moyenne tension, ont été remplacées par des installations de 22 kV. Le montage d'une nouvelle station de couplage de 22 kV était prévu dans l'ancien entrepôt de la sous-station existante. Ainsi celle-ci pouvait être installée sans restrictions importantes d'exploitation ni installation provisoire pendant la durée des transformations. L'espace prévu devait cependant avoir une cave pour faire passer des câbles à moyenne tension. La place étant limitée, seule l'installation d'un station de couplage compacte isolée au SF6 était possible, composée d'une double barre collectrice divisée en 4 secteurs de 54 champs en tout.

La ligne de 150 kV Hönggerberg – Sihlfeld a été mise en boucle dans la sous-station Herdern. Pour une séparation éventuellement nécessaire du réseau de 150 kV en deux sous-réseaux, c'est la condition préalable pour pouvoir réduire le courant de court-circuit L'augmentation des courants de charge et de court-circuit a rendu nécessaire le remplacement des appareils à haute tension de la station de couplage en plein air de 150 kV. Comme l'installation existante sur le toit du bâtiment ne pouvait pas être agrandie pour des raisons de place, elle a dû être remplacée par une station de couplage compact isolée au SF6 comprenant 8 champs. Il était prévu de la monter dans l'espace libéré de la station de couplage de 11 kV. La nouvelle station de couplage isolée au gaz de 150 kV comporte une double barre collectrice avec 4 champs de lignes, 3 champs de transformateurs et 1 champ de couplage.

Les trois transformateurs installés avaient un rapport de 150 kV sur 11 kV pour une puissance nominale de 30 MVA chacun. Le changement de tension prévu exigeait d'abord deux nouveaux transformateurs d'une puissance nominale de 50 MVA chacun et une tension secondaire de 22 kV. Les installations secondaires ont été remplacées en raison de leur âge. Les travaux prévus impliquaient, au niveau des bâtiments, les adaptations suivantes :

- Mise à disposition des locaux pour les stations de couplage à haute et moyenne tension
- Construction de blocs de tubes pour haute et moyenne tension
- Construction de nouveaux locaux pour les installations auxiliaires
- Mesures de prévention des incendies

En détail, ces travaux peuvent être décrits ainsi :

- Fonçage de caves pour câbles à moyenne tension
- Construction d'env. 210 micro-pieux / semelles de fondation
- Renforcement du sol de la station de couplage 150 kV au moyen de profilés métalliques
- Longerons / piliers dans la cave des câbles (reprise des charges)
- Déplacements de câbles à cause du battage des micro-pieux
- Mise en boucle de quatre lignes de 150 kV (deux lignes par forage horizontal)
- Démontage d'installations en plein air sur le toit de la sous-station (appareils et construction métallique)
- Réhaussement de murs dans les locaux annexes
- Cage d'escalier de secours
- Isolation thermique
- Nouvelles installations d'aération / de chauffage avec récupération de la chaleur émise par les transformateurs +T02 / +T03
- Eclairage et détecteurs d'incendie
- Aménagements extérieurs (nouvelle clôture avec porte)



Illustration 1+2: Schéma de la sous-station (avant et après transformation)

Dans le projet de rénovation de la sous-station Herdern, les systèmes secondaires et les équipements ont été, entre autres, étudiés par rapport à leur comportement en cas de tremblements de terre, pour les conforter en cas de besoin. Aux fins du présent rapport, ont été examinés les éléments suivants:

- éléments de la technique secondaire (commande, surveillance et protection)
- cellules moyenne tension (technique primaire, mais du point de vue sismique comme les armoires de commande)*
- autres éléments non porteurs tels qu'armoires, faux-planchers, cloisons de séparation, etc.

D'autres éléments de la technique primaire, tels les transformateurs > 1MVA, ont également été étudiés, mais ne sont partie intégrante de ce rapport (transformateurs auxiliaires <1 MVA voir chap. 5.5).

Les équipements qui en cas de défaillance mettent en danger des personnes ou portent préjudice à l'exploitation d'installations importantes doivent être dimensionnés au cas de charge sismique, aussi bien pour l'élément non porteur lui-même que pour ses assemblages, ses fixations ou ses ancrages. Pour cela, les forces horizontales provoquées par une action sismique sont déterminées selon la norme SIA 261 (2003). Comme il s'agit d'un cas de charge exceptionnel, il ne faut rajouter aucun supplément de sécurité et de charge.

* font partie des " installations de distribution d'énergie dans des armoires"

3. MODÉLISATION

Les structures porteuses pour les constructions nouvelles doivent être calculées d'après les nouvelles normes SIA 260 ss. (2003). Pour les systèmes porteurs réguliers (voir les critères selon la norme SIA 261, chiffres 16.5.1.3 et .4) dont la période de vibration fondamentale est inférieur à 2 s, on peut appliquer la méthode des forces de remplacement pour vérifier la sécurité structurale pour le cas de charge sismique. Avec cette méthode, les forces de remplacement horizontales ne sont pas réparties linéairement sur la hauteur du bâtiment, mais dans la pondération de la distance au niveau d'encastrement (répartition triangulaire des forces de remplacement pour des masses d'étages constantes).

Pour les bâtiments plus complexes avec des périodes propres plus élevées ou pour des bâtiments très excentriques ou irréguliers, il faut appliquer la méthode du spectre de réponse. Dans ce cas, il faut alors également tenir compte des modes de vibrations plus élevés qu'il n'est plus possible d'omettre.

Pour les **éléments de construction non porteurs,** tels que murs et armoires, rayonnages, plafonds suspendus et faux-planchers, on applique de manière similaire au bâtiment une force de remplacement horizontale correspondant à l'action sismique et calculée selon la formule (48) de la norme SIA 261. De même que pour la répartition de la charge dans les bâtiments, les altitudes des installations dans les bâtiments jouent un rôle. Pour déterminer la force horizontale qui s'applique, la **période de vibration fondamentale de l'élément de construction** est importante tout comme sa hauteur sur fondation.

Alors que la position dans les bâtiments est assez facile à déterminer, la période fondamentale de parties d'installation, d'armoires, de conduites, de faux-planchers etc. est, quant à elle, difficile à déterminée. C'est un peu plus facile par ex. pour les murs non porteurs avec des conditions d'appui définies. C'est pourquoi, il est important de pouvoir définir des limites pour les forces maximales possibles. Avec ces ordres de grandeur il est possible d'évaluer les frais d'une fixation ou de la construction elle-même.

Il y a une valeur limite supérieure si les fréquences propres des équipements sont égales à celles du bâtiment et une résonance se met en place. Pour les éléments de constructions plus rigides,
mais aussi pour les plus souples, ce n'est pas le cas et la force de remplacement à prendre en compte est plus faible.

En supposant que la période de vibration fondamentale des éléments de construction non porteurs corresponde à celle du bâtiment ($T_a=T_1$) et que l'élément de construction se trouve tout en haut du bâtiment ($z_a=h$), la formule (48) de la norme SIA 261 se simplifie comme suit :

$$F_a = 4 \frac{a_{gd} S}{g} \frac{\gamma_f}{q_a} G_a$$

- *a_{gd}* valeur de dimensionnement de l'accélération du sol
- γ_f facteur d'importance
- S paramètre pour déterminer le spectre de réponse élastique
- *G*_a poids propre de l'élément de construction non porteur
- g accélération du sol
- *q*_a coefficient de comportement pour les éléments de construction non porteurs

Remarque : selon l'Eurocode 8, les éléments de construction non porteurs sont dimensionnés pour une force de remplacement horizontale calculée à l'aide de la formule 4.25 (chapitre 4.3.5) qui diffère de la formule SIA seulement en ce qui concerne le facteur de hauteur et le facteur de résonance. La formule de l'EC8 donne pour la valeur limite supérieure (résonance) une force horizontale plus élevée d'environ 35 %. Lors de la prochaine révision partielle de la norme SIA 261, l'équation (48) doit être remplacée par la formule de l'EC8.

4. EXPLICATIONS RELATIVES AU TABLEAU

L'en-tête du tableau « Ancrage horizontal de l'aménagement intérieur pour charges sismiques » présente les paramètres relatifs au bâtiment et à l'emplacement. La valeur Sd (dans ce cas, la valeur maximale du spectre de dimensionnement) définit la part des charges verticales du bâtiment (charges quasi permanente) qui doit être prise en compte comme force de remplacement horizontale due à l'action sismique. Y sont pris en compte l'accélération du sol a_{gd} (zone sismique Z1), le paramètre de la classe de sol de fondation S (classe de sol de fondation E) et le facteur d'importance γ_f (classe d'ouvrage CO III). Avec le coefficient de comportement prise en compte dans le calcul élastique linéaire. Plus une structure porteuse est également prise en compte dans le calcul élastique linéaire. Plus une structure porteuse est ductile, plus la réduction du spectre élastique de réponse est grande.

La période de vibration fondamentale du bâtiment a été évalué avec la formule d'approximation en fonction de la hauteur de la construction (formule 38, norme SIA 261). La comparaison entre la période fondamentale du bâtiment et la période estimée de l'équipement renseigne sur la prédisposition à la résonance.

Dans le présent bâtiment à un étage encastré à partir du RdC, les forces horizontales sur les équipements dues à l'action sismique représentent moins de **20% du poids propre**. Malgré les imprécisions provenant des fréquences propres inconnues, cette valeur supérieure semble raisonnable pour **tous les éléments de l'installation dans la sous-station Herdern**.

Même avec le report défavorable du point de référence (par conséquent de l'horizon d'encastrement) sur le sol de la cave, ces 20 % sont atteints au maximum. Avec la surélévation prévue, les charges horizontales sur les équipements situés dans les caves ou au rez-dechaussée seront plus petites d'un point de vue purement mathématique, car la période de vibration fondamentale du bâtiment augmente.

Dans le tableau toutes les parties importantes de l'installation sont présentées.

Sur des fiches individuelles (pas partie intégrante du rapport, mais base pour le tableau) des détails sont donnés sur l'équipement de la partie de l'installation, p. ex. armoires de commande (fixation intérieure des tiroirs, épaisseurs de tôle, etc.), sur l'ancrage et la stabilité des éléments de l'installation eux-mêmes ainsi que sur la fondation (ancrage dans le béton ou sur les semelles). Ces renseignements sont listés dans le tableau.

5. MESURES PLANIFIÉES ET RÉALISÉES

Toutes les mesures pour les systèmes secondaires ainsi que pour les stations de couplage à moyenne tension et les équipements sont listées dans le tableau en annexe et résumées dans ce chapitre. Les systèmes de refroidissement des transformateurs primaires ont été étudiés avec la technique primaire et non indiqués ici.

5.1 Cloisons de séparation

En plus du risque au niveau des personnes, les cloisons non porteuses peuvent endommager également des éléments importants pour l'exploitation, et donc les hautes cloisons en maçonnerie ont été stabilisées par des profilés métalliques, à intervalles réguliers, en tenant compte du nouveau concept de protection incendie (illustration 3).



III. 3 : Profilé métallique confortant les cloisons en maçonnerie

III. 4 : Châssis de plancher pour l'ancrage d'éléments

5.2 Faux-planchers

De très nombreux éléments importants pour l'exploitation, tels que les armoires de commande, reposent sur de faux-planchers et ainsi pas directement sur le sol en béton. D'un côté, le faux plancher doit être lui-même sécurisé contre le flambage horizontal sous le poids des éléments fixés sur lui. D'un autre côté, pour l'ancrage d'éléments cette distance doit être prise en compte dans le calcul. Pour les installations lourdes, des châssis de plancher indépendants du faux-plancher, séparés et ancrés individuellement, ont été installés (illustration 4). Dans la SS Herdern, les fauxplanchers atteignent de tous les côtés des murs massifs et, pourtant, quelques chevillages ont été réalisés (illustrations 5+6). D'autres entretoisements ne sont pas nécessaires dans ce cas.



Illustration 5 : Chevillage dans le sol en béton



Illustration 6 : Chevillage dans le mur massif

5.3 Armoires de commande (armoires en général)

Les armoires de commande ont été examinées quant à leur fixation (basculement et déplacement). Le point important est l'emplacement du centre de gravité de la masse dans l'armoire. Les composantes des armoires (éléments encastrés, tiroirs, châssis, etc.) ne doivent pas se déplacer. S'il y a un faux-plancher sous les armoires, celui-ci doit aussi être pris en compte dans le calcul de l'ancrage.

Pour les armoires aménagées de manière presque centrée, de réels problèmes de basculement apparaissent à partir d'une hauteur d'environ 2.00 m et d'une profondeur de 0.60 m ou moins. Si elles sont contre un mur, le basculement n'est possible que par l'arête avant de l'armoire.

Par principe, toutes les armoires de commande (valable pour les armoires en général) positionnées devant un mur en béton ou une paroi en maçonnerie (renforcée) porteuse (illustration 7, cas b) doivent être fixées à ceux-ci (mesure la plus simple, la plus économique et la plus efficace). Ainsi, il ne faut plus visser au sol que des forces horizontales d'environ 10 %, ce qui est possible avec des vis minces (c'est généralement déjà le cas).

Pour les armoires de commande disposées de manière isolée (illustration 7, cas a), les distances entre les ancrages du châssis de plancher ont été contrôlées (critique plus ceux-ci sont éloignés de l'alignement de l'armoire et diminuent ainsi le bras de levier des points de basculement et augmentent la traction sur l'ancrage des châssis de plancher).



Illustration 7 : Calcul des forces d'ancrage pour armoires

Des vis relativement minces soumises à la traction pour fixer les armoires au sol en béton (soit directement, soit par l'intermédiaire d'un châssis de plancher) ont un effet très positif sur la sécurité de basculement (illustrations 8+9+10). Elles doivent de plus présenter une résistance à la traction "interne" suffisante, c.-à-d. être construites de façon que d'éventuelles forces de traction puissent être transmises des vis de fixation au sol à travers les parois jusqu'aux étagères. En reliant les différents éléments d'armoire minces entre eux (illustration 11), on forme un élément compact plus gros, moins sujet au basculement.

Il est en tout cas judicieux de sécuriser toutes les armoires de commande contre un déplacement horizontal. Les forces d'ancrage sont directement proportionnelles aux poids internes des armoires. Il faut donc toujours partir de l'idée que les armoires sont pleines.



III. 8 : Boulonnage de l'armoire sur le châssis de plancher



Ill. 10 : Boulonnage de l'armoire sur châssis de plancher



III. 9 : Fixation du châssis de plancher (armoire commande 150 kV)



III. 11 : Elément de fixation entre armoires

5.4 Stations de couplage (Siemens NXPlus) à moyenne tension (MT)

Les éléments d'installation lourds et encombrants (stations de couplage à moyenne / haute tension) ont été contrôlés quant à leur stabilité et leur comportement à la déformation. En outre, les fondations (planchers, dalles comme soubassement, cadres) ont été contrôlées pour ces charges transmises.

En raison de leur importance, il faut selon le rapport sécuriser les cellules contre les séismes, indépendamment du niveau de tension de la sous-station. Ces cellules ayant un centre de gravité relativement élevé sont fixées de façon la plus efficace de manière horizontale au sommet de l'armoire (hauteur env. 2.65 m). Dans le sens transversal, il faut le faire à l'aide de barres minces de traction resp. de compression, fixées environ tous les 2.00m. La fixation aux deux murs en béton doit être prévue pour la traction resp. la compression (membrure continue de mur en mur).

En plus, les éléments de cellule sont complètement sertis et maintenus sur le haut par une équerre. L'avantage de cette solution est qu'aucune force de traction n'agit sur l'ancrage au sol. Les forces horizontales peuvent être absorbées sans problème par les deux vis de fixation existantes par cellule ! De la même façon, ceci doit également être fait dans le sens longitudinal, le raccord des différents éléments entre eux (illustration 11) se révélant très positif pour la sécurité contre le basculement. Les 2-3 dernières armoires doivent cependant quand même être étayées au mur en béton environ tous les 2.00 m contre le basculement latéral.

L'étayage contre le deuxième mur transversal en maçonnerie n'est pas possible (existant sans entretoise), c'est pourquoi il faut, soit relier le cadre longitudinal avec le cadre de la face afin d'absorber l'effort de traction, soit l'ancrer au moyen de deux tirants de tension diagonaux. Les mesures prévues sont visibles sur les illustrations 12 et 13.



III. 12 : Mesures station de couplage MT isolée au gaz 22kV (NXPlus) - Plan horizontal



III. 13 : Mesures station de couplage MT isolée au gaz 22kV (NXPlus) - Coupe du principe

5.5 Transformateurs auxiliaires 1 MVA

Bien que ce transformateur présente un élancement d'environ 2.3 < 3 et que, de ce fait, il risque peu de basculer, l'ewz projette de l'ancrer contre le soulèvement, car il s'agit là de l'alimentation des besoins propres.

Le transformateur équipé de roulettes est posé sur des rails dans une cuve de récupération d'huile. A l'intérieur de la cuve, les rails doivent être ancrés contre les déplacements (vissés sur la traverse en béton ou calés dans la cuve).

Les roulettes seront bloquées (boulonnages en tête de rail ou blocage des roulettes avec des butoirs). La force horizontale est selon le poids d'environ 5 - 8 kN. Pour sécuriser la cuve, il faut visser des équerres contre les déplacements devant et derrière sur les deux traverses en béton, 2 goujons M16 par traverse en béton. Les mesures prévues sont visibles en couleur sur les illustrations 14 et 15.



Illustration 14 : Mesures transformateur auxiliaire – Plan horizontal



Illustration 15 : Mesures transformateur auxiliaire - Coupe

5.6 Batteries de secours

Il est planifié de sécuriser les batteries de secours contre le basculement et la chute, entre autres au moyen de sangles. On s'assurera en plus à l'aide de fines couches d'élastomère que les boîtiers relativement fragiles ne puissent s'entrechoquer violemment. Les cadres seront fixés au sol par des équerres. Ces mesures sont présentées dans les illustrations 5.2 et 5.3 dans le rapport final, au chapitre 5.2.

5.7 Autres éléments

De manière générale il est aussi important que toutes les sortes de fixations de câbles puissent également, en plus des forces verticales, absorber 20 % de charges supplémentaires dans toutes les directions. Cela semble être rarement critique. Des mesures pour les connexions enfichables (suspendues) peuvent également se révéler importantes.

En fonction de leur importance pour l'exploitation, il faut sécuriser également tous les ordinateurs ordinaires, et principalement leurs écrans, contre le basculement et la chute. Une mesure très simple consiste à fixer les écrans sur les tables au moyen de fermetures velcro.

5.8 Coûts des mesures

Les coûts de la protection parasismique des éléments de la technique secondaire, tels que les stations de couplage à moyenne tension, et des autres aménagements représentent dans le cas de la SS Herdern à peine 1 % du total des coûts de transformation. Ces coûts de transformation ne comprennent naturellement pas les coûts d'acquisition des nouveaux appareils (transformateurs, station de couplage SF6). Le coûts sont donc très faibles comparés aussi aux coûts usuels d'entretien et de renouvellement.

Les autres mesures pour la technique primaire sont également en cours de planification et en partie déjà exécutées. Pour certains éléments (p. ex. installation SF6), les mesures ne sont pas encore clairement définies. Pour d'autres en revanche, sans tenir compte du futur contenu de la nouvelle directive ESTI, la question se pose de savoir si les mesures sont proportionnées. Toutefois, il s'avère à l'heure actuelle qu'il faut compter avec 2 % supplémentaires du total des coûts de transformation pour protéger les installations de la technique primaire de la SS Herdern contre les séismes.

6. RÉSUMÉ

La sous-station Herdern a été retenue comme projet pilote pour l'étude "Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse" pour analyser dans la pratique l'aspect de la sécurité sismique des systèmes secondaires et des équipements et donner des indications sur les coûts. La technique primaire a été également traitée dans le cadre du projet de rénovation de la SS Herdern, mais ne fait partie intégrante de ce rapport. En outre, les cellules à moyenne tension ont été assimilées aux armoires de commande parce qu'elles présentent le même comportement du point de vue de la sécurité sismique. De plus, les autres installations, telles les cloisons de séparation ou les faux planchers, ont également été analysées.

Selon le chapitre de la norme SIA 261 relatif aux éléments de construction non porteurs (chiffres 16.7), les applications des forces horizontales pour les équipements en cas de séisme ont été définies. Pour estimer les forces à moindre frais, les forces théoriquement maximales ont été retenues. Ce procédé est utile car c'est moins la résistance de chaque système de fixation qui est déterminante, que le fait que l'élément soit vraiment fixé ou stabilisé. Les systèmes de fixation existants ont été contrôlés et renforcés le cas échéant. Pour les éléments non stabilisés, des mesures de protection ont été planifiées, calculées et en partie déjà réalisées.

Dans le tableau ci-joint, "Ancrage horizontal de l'aménagement intérieur pour charges sismiques", les différentes parties de l'installation ont été énumérées avec leur poids propre et la part de ce poids qui doit être appliquée au centre de gravité comme force de remplacement horizontale. La force horizontale maximale à la suite d'un séisme se situe, pour la SS Herdern, toujours audessous de 20 % du poids propre des éléments. Les paramètres des bâtiments déterminants et les autres valeurs pour le calcul de la force de remplacement horizontale sont présentés dans l'entête du tableau.

Dans le tableau sont également indiquées les mesures planifiées contre le basculement ou le déplacement des éléments d'installation. Tous les types d'armoires ou d'étagères, donc également les armoires de commande ou les stations de couplage importantes pour l'exploitation, ont été fixés au sol. Pour les faux-planchers, il est surtout important de fixer au sol les éléments lourds au moyen de châssis de base autonomes. Et là encore, leur stabilité a également été contrôlée.

En plus des éléments de la technique secondaire, toutes les autres installations qui en cas de défaillance peuvent mettre en danger des personnes, endommager la structure porteuse ou porter préjudice à l'exploitation, ont également été vérifiées. Et par conséquent, des éléments simples, comme les ordinateurs, ont été également vérifiés, tout comme les cloisons de séparation, les faux-planchers ou les plafonds suspendus.

Dans le domaine de la sécurité sismique d'éléments non porteurs, il existe en principe des mesures très efficaces dont l'application n'entraîne que de faibles coûts. Par conséquent, à l'avenir ces mesures doivent être appliquées.

Exception faite de la sécurité des personnes, il relève de l'appréciation de l'exploitant de décider quels éléments sont importants pour son exploitation et pourraient en cas de défaillance conduire à une très longue interruption d'exploitation ou bien également compliquer ou retarder la remise en exploitation.

Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) Schindler + Partner AG, Ingenieure

Pour le rapport :

P. Müller (ewz) A. Recher / R. Lochmann (Schindler + Partner)

Annexe

Tableau Ancrage horizontal de l'aménagement intérieur pour charges sismiques avec approximation des coûts

Ancrage horizontal de l'aménagement intérieur pour charges sismiques												
Caractéristiques du bâtiment $S_d=2.5$ yf a_{ad} S / g q Composante horizontale pour $T_B < T < T_c$ selon SIA 261, art 16.2.4												
Emplacement Classe d'ouvrage Sol de fondation		Zone 1 CO III Type E	a _{gd} = 0.6 y _f = 1.4 S= 1.4		S _d = 0.15			Pour T ₁ = 0.167 s période de vi		ibration fondamentale du bâtiment 0.05 ${\rm \mathring{H}}^{75}$		
Coeffi	Coefficient de comportement Béton massif q = 2.0 h= 5.00 (m) Hauteur total de l'ouvrage (RdC sol = Hauteur de référence 0.00m)											
Rapp	Rapport force horizontale / poids propre des aménagements intérieurs F _A = force horizontale au centre de gravité											
Elémer	$q_{a} = 2.0 \text{ pour équipements tels que armoires, ettaestime} \qquad G_{A} = \text{poids propre}$ Eléments de construction non porteurs (48) SIA 261 17.7.2 $F_{a}/G_{a} = 2 \text{ y}_{f} a_{gd} S (1 + z_{g}/h) / 9.81 q_{a} (1 + (1 - T_{g}/T_{1})^{2}) \qquad T_{a} = \text{période de vibration fondamentale des aménagements intérieurs}$											
No:	Désignation installation:	Local No. Emplacement dans le bâtiment	Centre de gravité z _a (m)	Poids G _a	Pointe	F _a / G _a non réal.	conservateur	Type de fixation au sol	Conditions du fabricant	Mesures:	Coûts en CHF	Etat Mesures
					Ta = T1 max.	Ta = 2 T ₁ Ta = 0	Ta = 0.5T ₁					
1	Faux planchers	RdC: Local de commande	0.30		0.127	0.064	0.102	collés	aucune	atteignent les murs de tous les côtés (généralement : pour bords libres, prévoir ur étayage contre les charges horizontales)	2000	Mesures appliquées
2	Armoires de commande: KA 21-23	RdC: Local de commande	1.60	< 500 kg	0.158	0.079	0.127	Châssis de plancher vérifiés OK. 2 x M8/M10	aucune	relier les armoires entre elles sur la face frontale 2 - 3 x (en hauteur). Sertir les armoires longitudinalement et les étaier latéralement contre le mur par des barres de traction ou de compression (env. 1 armoire sur 3). Fixer chaque armoire sur le châssis de plancher avec des vis, 2 x M8 / x M4.		Mesures en partie appliquées
3	Armoires de commande: KA 05-20	RdC: Local de commande	1.60	< 500 kg	0.158	0.079	0.127	Châssis de plancher vérifiés OK. 2 x M8/M10	certificat	relier les armoires entre elles sur la face frontale 2 - 3 x (en hauteur). Sertir les armoires longitudinalement et les étaier latéralement contre le mur par des barres de traction ou de compression (env. 1 armoire sur 3). Fixer chaque armoire sur le châssis de plancher avec des vis, 2 x M8 /4 x M4.	5000	Mesures en partie appliquées
4	Armoire de distribution BT	SS-S: Local besoins propres	1.10	150 kg	0.146	0.073	0.117	Châssis de plancher vérifiés OK 2 x M8/M10 /armoire	non remplies	armoire boulonnée sur le châssis de plancher avec vis, 2x M8 par traverse, serrée en quinconce. Basculement: sécuriser en plus avec des vis, 2 x M6.	^s 13000	Mesures en partie appliquées
4a	Armoires de distribution	SS-S: Local de téléconduite	1.60	< 500 kg	0.158	0.079	0.127	Châssis de plancher vérifiés OK 2 x M8/M10 /armoire	aucune	armoire boulonnée sur le châssis de plancher avec vis 2 x M8 par traverse. Basculement: fixer au mur (p.ex. équerre) ou sécuriser en plus avec vis, 2 x M6 (sur le châssis de plancher).	2000	Mesures en partie appliquées
5	Batteries	SS-S: Local des batteries	0.42		0.130	0.065	0.104	Châssis de plancher vérifiés OK 2 x M8/M10	remplies	basculement/ déplacement: sécuriser les batteries avec des membrures et des couches intermédiaires. Fixer les cadres au sol avec des équerres.	1500	Mesures: application planifiée
6	Rails Duresca	SS-S: Câve des câbles MT	0.00		0.120	0.060	0.096	Châssis de plancher vérifiés OK 2 x M8/M10	remplies	vérifier la fixation des connecteurs à l'installation (NXPlus) au RdC.	10000	Mesures: application planifiée
7	Cellules NX Plus	RdC: local MT	1.80	1800 kg	0.163	0.082	0.130	Vissées sur rail au sol	non remplies	à centre de gravité élevé, fixées par vis, 2 x M16 aux rails coulés dans le béton, OK. Fixer le haut des armoires dans le sens transversal à l'aide de barres de traction contre/entre les murs tous les 2.0 m (au barre de compression armoire/mur). Sens longitudinal avec équerres (transversal) et fixer 3 x contre le mur pour les 2 - 3 dernières armoires (par étais diagonaux sur murs en brique sili calcaire existants).	53000 x-	Mesures: application planifiée
8	Armoires télécommande centralisée (TCc)	RdC: locaux TCc 1600/317 Hz	1.80	2300 kg	0.163	0.082	0.130	Vissées	remplies	armoires sont vissées au sol, OK.	Ī	Mesures appliquées
8a	Convertisseur TCc	RdC: local TCc 1600 Hz	1.50	300 kg	0.156	0.078	0.125	Vissé au mur et posé sur le sol	aucune	aucune fixation armoire/cadre fixation de l'armoire au mur avec équerres.		Aucune mesure (Démontage 2014)
8b	Convertisseur TCc	RdC: local TCc 317 Hz	1.80	300 kg	0.163	0.082	0.130	Armoire fixée au sol devant avec 2 x M8	aucune	armoires reliées entre elles en haut (devant/derrière). fixation au mur en haut derrière avec deux équerres.	500	Mesures: application planifiée
9	Armoire <mark>öB</mark> station transfo Pfingstweid	RdC: station transfo	1.50	300 kg	0.156	0.078	0.125	Châssis de plancher vérifiés OK 2 x M10	non remplies	armoires vissées au cadre avec2 x M8 (façade) chacune. en plus, fixation au mur (dos) contre la traction.	500	Mesures: application planifiée

9a	Distribution MT	RdC: station transfo	1.50	800 kg	0.156	0.078	0.125	Châssis de plancher vérifiés OK, fixés en plus au mur	non remplies	armoires vissées au cadre avec 4 x M8 chacune, OK.		Mesures appliquées
10	Distribution BT	RdC: station transfo.	1.50	300 kg	0.156	0.078	0.125	Châssis de plancher vissé	non remplies	armoires vissées au cadre avec 4 x M8 chacune, OK.		Mesures appliquées
11	Transformateur 30 MVA Centre de gravité supposé comme +T02/+T03	Transfo + T01	2.55	60 to	0.181	0.091	0.145	Roulettes	non remplies	Basculement trans. aux rails > Non. Fixer le transfo pour forces transversales par couplage (voir illustration "Kessel_Erdbeben_Stütze" dans le rapport final ewz, SS Herdem) uniformément sur les deux rails. Sécuriser le transfo contre tout rouleme sur les rails. Reprise des "forces horizontale de 37.5 %" par des entretoites vissés sur les rails. (Kessel_Erdbeben_Stütze). Etayage par le fabricant ! Définir la valeur de la force horizontale ! Elancement env. 3.3 > 3.0.		Mesures à appliquer selon la directive ESTI
11a	Refroidisseur	Transfo + T01	2.15	9.7 to	0.171	0.086	0.137	Roulettes	non remplies	Analogue au transfo. Etayage par le fabricant ! Définir la grandeur de la force horizontale! Elancement env. 2.8 < 3.0.	445000	Elancement < 3.0 Mesures à appliquer
12	Transformateur 50 MVA	Transfo + T02	2.55	78.7 to	0.181	0.091	0.145	Roulettes	non remplies	Analogue au + T01. Etayage par le fabricant ! Définir la grandeur de la force horizontale! Elancement env. 3.3 > 3.0.		Mesures analogues à +T01
12a	Refroidisseur	Transfo + T02	2.15	13.1 to	0.171	0.086	0.137	Roulettes	non remplies	Analogue au transfo. Etayage par le fabricant ! Définir la grandeur de la force horizontale! Elancement env. 2.8 < 3.0.		Elancement < 3.0 Mesures à appliquer
13	Transformateur 50 MVA	Transfo + T03	2.55	68.3 to	0.181	0.091	0.145	Roulettes	non remplie	Analogue au + T01. Etayage par le fabricant ! Définir la grandeur de la force horizontale! Elancement env. 3.3 > 3.0.		Mesures analogues à +T01
13a	Refroidisseur	Transfo + T03	2.15	11.6 to	0.171	0.086	0.137	Roulettes	non remplies	Analogue au transfo. Etayage par le fabricant ! Définir la grandeur de la force horizontale! Elancement env. 2.8 < 3.0.		Elancement < 3.0 Mesures à appliquer
14a	Armoires GOS	RdC: local HT	1.60	500 kg	0.158	0.079	0.127	Châssis de plancher vissés avec 2 x M14 par élémt	aucune	Armoires reliées entre elles devant/derrière. Fixation sur le châssis de plancher avec 2 x M8 par élémt. En plus, fixation au mur avec 2 - 3 équerres par rangée d'armoires.	1000	Mesures: application planifiée
14	Station de couplage 150kV (Station 8DN9)	RdC: local HT	1.50	3 to	0.156	0.078	0.125	Plaque d'acier boulonnée	Install. juqu'à 0.2g OK.	Pieds d'appui de l'installation S ${f ar b}$ soudés sur plaque d'acier.		Aucune mesure (fixation suffisante au montage)
15	Traversées SF6 vers transfos extérieurs	Local HT / Cellules transfo	2.00		0.168	0.084	0.134	Brides d'attache, supports	non remplies	Calcul à réviser par le fabricant.	60000	Décision sur les mesures en suspens
16	Besoin propre - Transfos T10 jusqu'à T30 1 MVA	RdC: Cellules BP	0.93	3.2 to	0.142	0.071	0.114	Transfos sur roulettes dans la cuve à huile (aucune fixation de la cuve)	non remplies	Visser sur rails les roulettes de transfo avec butoirs500 kg/par 2 roulettes). Caler ou visser les rails dans la cuve. Fixer læuve devant/derrière avec des équerres (par dessus les deux traverses de rail) (2 x M16 chacune). Elancement env. 2.3 < 3.0. Blocage du transfo et fixation de la cuveaux traverses en béton.	6000	Mesures: application planifiée
17	Aération	SS-S/RdC	0.80		0.139	0.070	0.111	Monobloc posé sur le sol		Monobloc: visser cadre supplémentaire (comme à la protection civile) sur le sol. Canaux: fixer des étais latéraux. Ventilateurs au plafond: monter des étais sur les côtés.	25000	Mesures: application planifiée
18	Chauffage	SS-S/RdC	1.13	2250 kg	0.147	0.073	0.118	Accumulateur de chaleur posé sur le sol		Accumulateur: construction de fixation sur le sol ou aux murs. Tuyaux: sécuriser sur les côtés avec des étais.	30000	Mesures: application planifiée
19	Cloisons de séparation	SS-S/RdC	Hauteur local	300 kg/m'				Profilés métalliques	aucune	Stabilisation avecprofilé double T en fonction du rapport longueur/hauteur du mur, fixation au sol et au plafond	6000	Mesures appliquées
20	Engineering										20000	
Coût total des rénovations										680500	Somme totale	
25000000											505000	Somme systèmes primaires
											175500	Somme systèmes secondaires
									-		[%]	correspond en [%]
									816600	Total, 20% d'incertitudes incl.	3.3	
										Systèmes primaires, 20% d'incertitudes incl.	2.4	du coût total des rénovations
									210600	Systèmes secondaires, 20% d'incertitudes incl.	0.8	