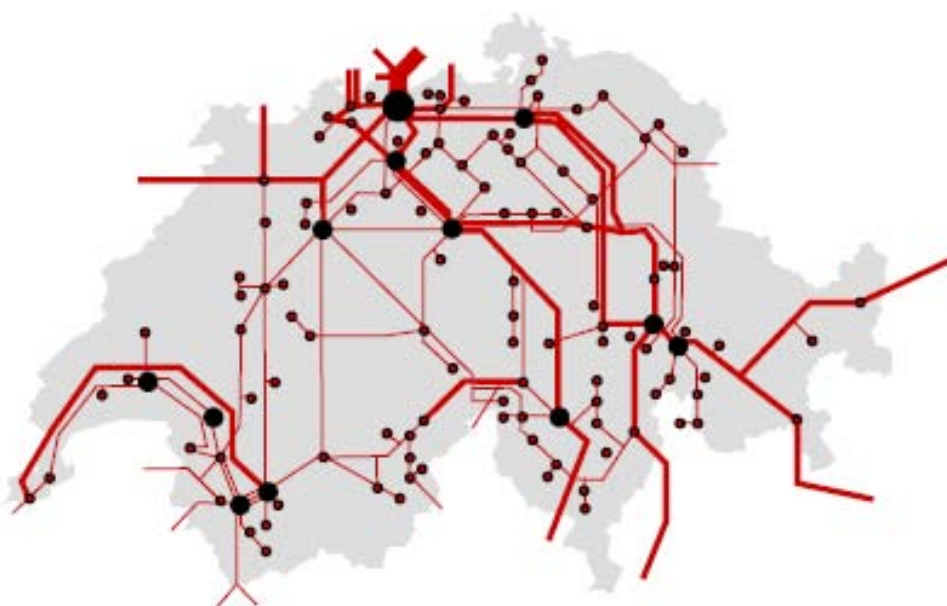


# Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse



## 1<sup>er</sup> Rapport intermédiaire

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

### RÉSONANCE Ingénieurs-Conseils SA

21 rue Jacques Grosselin  
CH - 1227 CAROUGE (Genève)

Tel. +41 22 301 02 53  
Fax +41 22 301 02 70  
E-mail [resonance@resonance.ch](mailto:resonance@resonance.ch)

Carouge, le 15 janvier 2009

TB 285.01-1/MK

## Impressum

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

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

Auteur : Martin G. Koller, Dr. ès sc. techn., ing. dipl. en génie civil EPF

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

Groupe d'accompagnement :

- Adrien Guérig, Forces motrices du Nord-Est de la Suisse (NOK)
- Urs Huber, Inspection fédérale des installations à courant fort (ESTI)
- Frau Bärbel Müller et Markus von Arx, Chemins de fer fédéraux (CFF)
- Pascal Müller, Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz)
- Lambertus Noij et Walter Bleuel, Services industriels de Bâle (IWB)

Le présent rapport a été réalisé sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

Approbation OFEV : 23 janvier 2009, Andreas Götz

*Couverture : Réseau suisse à très haute tension*

## Résumé

Un groupe d'experts a soumis au conseil fédéral en 2004 un rapport sur la mitigation des séismes pour les infrastructures vitales (« lifelines »). L'approvisionnement en énergie électrique y a été identifié comme un des secteurs prioritaires pour lequel il serait nécessaire d'agir au niveau de la sécurité sismique.

Dans le cadre du programme de mesures de la Confédération pour la période 2005 – 2008, la centrale de coordination pour la mitigation des séismes de la Confédération a donné mandat au bureau-conseil Résonance Ingénieurs-Conseils SA, spécialiste en matière de génie parasismique, de faire un état des lieux. Ce travail a été suivi et soutenu par un groupe de spécialistes d'entreprises électriques suisses ainsi que par l'Inspection fédérale des installations à courant fort (ESTI).

Cette étude a pour but d'identifier les points faibles de la distribution d'énergie électrique par rapport aux tremblements de terre, de déterminer les nécessités d'agir, de réunir les normes et standards applicables en Suisse, de développer des procédés d'appréciation pour les installations existantes ainsi que de proposer des mesures constructives types de sécurisation. Les résultats de cette étude doivent servir de base pour mettre au point des aides à l'application pour l'ESTI dans le cadre de l'octroi d'autorisation de projets ainsi que pour sensibiliser la branche des réseaux électriques et l'épauler avec des solutions utilisables dans la pratique.

Les expériences à l'étranger montrent de manière évidente que les plus gros dommages à l'infrastructure de la distribution d'énergie électrique en cas de séisme sont observés dans les sous-stations isolées à l'air. Les lignes aériennes quant à elles supportent relativement bien les tremblements de terre. Plus le niveau de tension est élevé, plus les sous-stations sont vulnérables. Les dégâts observés fréquemment sont des ruptures d'éléments en porcelaine et des dommages aux transformateurs insuffisamment ancrés. Les éléments en porcelaines cassent souvent à cause d'interactions défavorables dues à une flexibilité insuffisante des connexions. Des secousses violentes pouvant engendrer des dommages peuvent également être provoquées par du jeu dans les ancrages ou par une amplification des accélérations sismiques, causée par des châssis-supports souples.

Le présent rapport intermédiaire donne des premières recommandations de protection parasismique des sous-stations en fonction du niveau de tension et de la zone sismique. Il sert de première orientation pour les entreprises électriques. Font partie des recommandations les plus importantes un meilleur ancrage, particulièrement pour les transformateurs, mais aussi pour les autres appareils à haute tension, des connexions plus souples entre les différents appareils ainsi que des mesures de sécurisation contre la chute et le basculement des batteries de secours, des armoires de commande et des doubles planchers souvent présents.

L'étude n'a pas pu répondre jusqu'à présent à toutes les questions ouvertes concernant le comportement sismique de la distribution d'énergie à haute tension. Les problèmes prédominants sont qualitativement identifiés, mais leur impact quantitatif dans le contexte suisse reste à éclaircir dans beaucoup de cas. C'est pourquoi il est prévu dans une deuxième phase d'obtenir, grâce à des études pilotes, des renseignements plus concrets sur l'étendue des problèmes et le coût des mesures de confortement à l'aide de propositions concrètes. Les résultats de cette deuxième phase seront publiés dans le rapport final vers la fin de l'année 2009.

## Table des matières

<b>Résumé .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>6</b>
1.1 Situation initiale .....	6
1.2 But.....	6
1.3 Procédure .....	7
1.4 Terminologie.....	7
<b>2. L'aléa sismique en Suisse .....</b>	<b>8</b>
2.1 Caractéristique de l'aléa sismique en Suisse .....	8
2.2 L'aléa sismique selon la norme SIA 261 .....	11
<b>3. Expériences de dommages lors de séismes .....</b>	<b>13</b>
3.1 Evaluation qualitative de la littérature .....	13
3.2 Seuils de dommages quantitatifs .....	17
3.3 Réflexions de plausibilité .....	19
3.4 Conclusions .....	21
<b>4. Pratique antérieure de construction en Suisse .....</b>	<b>21</b>
4.1 Pratique de construction pour les bâtiments .....	21
4.2 Pratique de construction pour les installations.....	22
<b>5. Normes et directives concernant la sécurité parasismique .....</b>	<b>23</b>
5.1 Normes et directives en Suisse .....	23
5.2 Normes au niveau européen.....	23
5.3 Normes CEI et autres publications CEI .....	24
5.4 Spécifications US (IEEE, ASCE) .....	26
<b>6. Vulnérabilité des sous-stations .....</b>	<b>29</b>
6.1 Eléments d'une sous-station .....	29
6.2 Causes de dommages dans les installations extérieures .....	33
6.3 Enseignements tirés des indications des fabricants .....	34
6.4 Recherche pilote pour la sous-station de Chamoson .....	35
6.5 Conclusions sur la vulnérabilité .....	37
6.5.1 Transformateurs .....	37
6.5.2 Disjoncteurs, sectionneurs, transformateurs de courant et de tension.....	39
6.5.3 Systèmes secondaires .....	40
6.5.4 Stockage du matériel de rechange.....	42
<b>7. Guide pour le contrôle des sous-stations .....</b>	<b>42</b>
7.1 Transformateurs .....	42
7.2 Disjoncteurs, sectionneurs, transformateurs de courant et de tension .....	43
7.3 Systèmes secondaires .....	44
<b>8. Recommandations pour la protection parasismique de sous-stations.....</b>	<b>44</b>
8.1 Mesures pour les transformateurs .....	44
8.2 Mesures pour les appareils à très haute tension .....	47
8.3 Mesures pour les systèmes secondaires .....	49

---

<b>9.</b>	<b>La marche à suivre .....</b>	<b>50</b>
9.1	Etudes pilotes sous-stations.....	50
9.1.1	Transformateurs .....	50
9.1.2	Protection parasismique pour les appareils à très haute tension .....	51
9.1.3	Protection parasismique des systèmes secondaires .....	51
9.2	Etude pilote pour une ligne de transport .....	52
9.3	Propositions administratives.....	52
<b>10.</b>	<b>Sources .....</b>	<b>52</b>
10.1	Normes et directives concernant la sécurité sismique .....	52
10.1.1	Normes suisses .....	52
10.1.2	Normes européennes .....	53
10.1.3	Normes CEI et autres publications CEI .....	53
10.1.4	Standards US et directives (IEEE, ASCE) .....	54
10.2	Autres sources de littérature.....	54
10.3	Sources des illustrations .....	54

## 1. Introduction

### 1.1 Situation initiale

Depuis 2000, la Confédération demande que tous les nouveaux ouvrages soumis à autorisation fédérale ou subventionnés par la Confédération soient construits de façon parasismique selon les normes en vigueur. Depuis 2003, pour les bâtiments et les ponts, il s'agit des normes pour les structures porteuses SIA 260 à 267, et en particulier la norme SIA 261 [S1].

Lors de transformations, la sécurité sismique doit être vérifiée et en cas de besoin améliorée dans la mesure où cela est possible avec des investissements raisonnables. Ici on se base depuis 2004 en premier lieu sur le cahier technique SIA 2018 [S2] qui définit les termes coûts « proportionnés » et « raisonnablement exigibles » ainsi que leur calcul.

L'Inspection fédérale des installations à courant fort (ESTI) est responsable de la surveillance dans le domaine de l'approvisionnement en énergie électrique au niveau de la haute tension. Jusqu'à présent, les bases nécessaires pour l'appréciation de la vulnérabilité sismique ainsi que des prescriptions normatives en matière de sécurité sismique pour les éléments de l'infrastructure de l'approvisionnement en énergie électrique font défaut. De fait, l'ESTI n'a pratiquement pas été en mesure jusqu'à présent de remplir sa fonction de surveillance dans le domaine. Les normes pour les structures porteuses SIA 260 à 267 contiennent certaines indications pour les éléments de structure dits non porteurs ainsi que les installations, mais ces indications sont trop peu spécifiques pour une application ou une vérification concrète dans le domaine de l'alimentation en énergie électrique.

En 2004, un groupe d'experts a soumis au Conseil fédéral un rapport sur la mitigation des séismes pour les infrastructures vitales (« lifelines »). L'approvisionnement en énergie électrique y a été identifié comme un des secteurs prioritaires dans lequel il serait nécessaire d'agir au niveau de la sécurité sismique.

### 1.2 Objectifs

Dans le cadre du programme de mesures de la Confédération pour la période 2005 – 2008, la centrale de coordination pour la mitigation des séismes de la Confédération, rattachée à l'office fédéral de l'environnement (OFEV), a donné mandat au bureau-conseil Résonance Ingénieurs-Conseils SA, spécialiste en matière de génie parasismique, d'établir l'état des lieux de la situation actuelle. Est à traiter la distribution d'énergie sur les niveaux de tension élevés, tandis que les centrales électriques ne sont pas considérées en tant que telles.

L'étude doit

- présenter la problématique sur la base des expériences avec les tremblements de terre à l'étranger,
- décrire la pratique de construction en Suisse jusqu'à présent en ce qui concerne la construction parasismique des éléments utilisés dans la technique de la haute tension, spécialement les sous-stations,
- regrouper les normes et directives correspondantes relatives à la sécurité sismique sur le plan national, européen et international,

- analyser la vulnérabilité de l'approvisionnement en énergie électrique de la Suisse, spécialement des sous-stations et identifier les mesures à prendre,
- définir un procédé pour la détermination de la sécurité sismique des sous-stations, par exemple grâce à un guide,
- proposer des mesures techniques pour le confortement parasismique des sous-stations.

L'état des lieux va servir :

- à l'élaboration des bases techniques pour l'estimation des conséquences des scénarios de séismes sur l'approvisionnement en énergie électrique en Suisse,
- à la définition des mesures nécessaires au niveau fédéral pour l'exécution des décisions du Conseil fédéral concernant la mitigation sismique (contrôle des projets, collecte systématique des informations,...)
- à la sensibilisation de la branche de l'électricité (promotion de la propre responsabilité) ainsi qu'à l'élaboration de bases techniques.

### 1.3 Procédure

Le présent état des lieux se base sur une étude détaillée de la littérature ainsi que sur la visite de deux sous-stations (220/380 kV, sous-station de Breite, canton de Zurich, zone sismique 1 ; poste de couplage de Chamoson, canton du Valais, zone sismique 3b). Pour la sous-station de Chamoson les appareils à haute tension à priori les plus vulnérables ont été examinés si possible à l'aide de calculs approximatifs. Cela a été uniquement possible grâce à la bonne volonté d'EOS qui a mis à disposition comme interlocuteur un ingénieur très expérimenté, Monsieur Jaroslav Pisecky, ainsi que d'autres spécialistes pour la recherche des plans et autres documents.

L'élaboration du présent état des lieux a été accompagnée par un groupe d'experts comprenant (en ordre alphabétique) :

- Blaise Duvernay, OFEV (mandant)
- Adrien Guérig, Forces motrices du Nord-Est de la Suisse (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, Service d'électricité de la ville de Zurich (ewz)
- Lambertus Noij et Walter Bleuel, Service industriels de Bâle (IWB)

Le groupe d'experts s'est réuni trois fois : une fois pour le lancement de l'étude, une fois durant les travaux et une fois après avoir rendu l'esquisse du rapport complet. Les membres du groupe d'experts ont alors fait leur travail de corapporteurs ; leurs commentaires ont été retenus lors de la finition du rapport.

### 1.4 Terminologie

Sous « haute tension » sont compris tous les niveaux de tension de 1 kV ou plus élevés. En Suisse, les subdivisions suivantes sont en outre utilisées :

- les niveaux de tension 220 kV ou 380 kV sont aussi dénommés « très haute tension » (des niveaux de tension supérieurs n'existent pas en Suisse).

- les niveaux de tension entre 1 kV et 36 kV sont aussi dénommés « moyenne tension ».
- entre les niveaux mentionnés, le mot « haute tension » reste inchangé. Ce terme est ambigu dans la mesure où il faut reconnaître à partir du contexte si, dans un cas concret, on parle de toute la gamme de haute tension (1 kV à 380 kV) ou seulement de la gamme du milieu de la haute tension (> 36 kV à < 220 kV).

Le terme « haute tension » est utilisé dans le présent rapport pour toute la gamme à partir de 1 kV, sauf mention contraire.

En outre, le terme « mou » est utilisé dans le présent rapport. Ce terme est emprunté au langage des marins et correspond au mot anglais « slack ». Une amarre qui a du mou peut être tendue sans résistance notable jusqu'à ce que des forces plus importantes soient induites. C'est exactement cela qui est très important pour les connexions entre différents appareils à haute tension. Les termes plus usuels « jeu » ou « flexibilité » ne correspondent pas tout à fait, même s'ils désignent quelque chose de similaire.

## 2. L'aléa sismique en Suisse

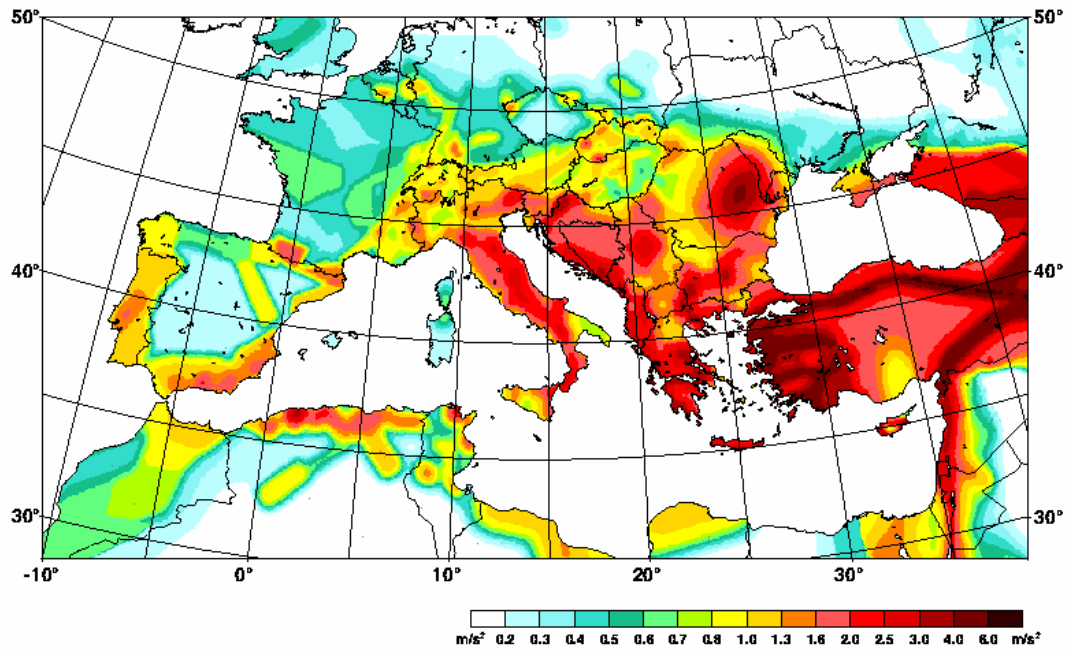
### 2.1 Caractéristique de l'aléa sismique en Suisse

La Suisse est caractérisée, par rapport au niveau international, par un aléa sismique moyen (illustration 2.1). Des tremblements de terre forts sont plutôt rares. Au Valais, il faut compter avec un tremblement atteignant ou dépassant la magnitude (M) 6 tous les cent ans. L'illustration 2.2 montre une vue d'ensemble de l'aléa sismique relatif en Suisse : ce sont surtout le Valais et la région de Bâle qui sont menacés. Mais l'éventualité d'un tremblement de terre causant des dégâts importants ne peut pas être exclue où que ce soit en Suisse.

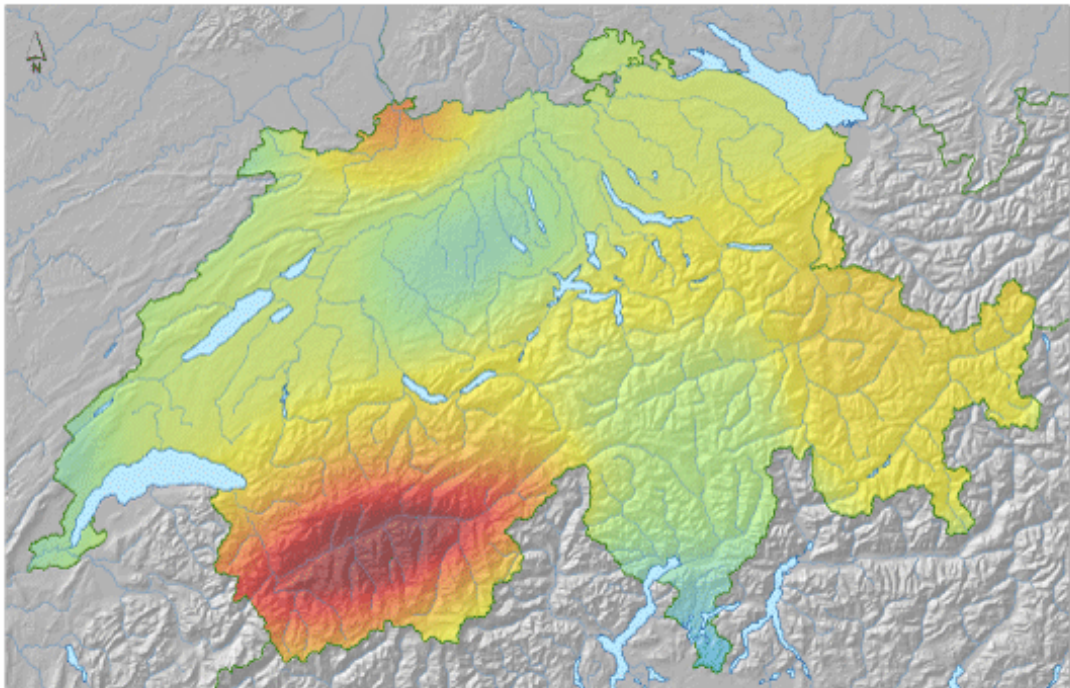
Considéré du point de vue de la probabilité d'un événement, l'aléa en Suisse est dominé par des tremblements de terre de magnitudes plutôt modérées ( $5 < M < 6$ ) qui se produisent à une distance plutôt faible d'un endroit donné. Dans la région de Bâle par exemple, le scénario le plus vraisemblable pour une période de retour de 475 ans est un séisme de magnitude 5 à 5.5 à une distance de 10 à 20 km (illustration 2.3 : parties « les plus noires » dans le diagramme en bas à gauche). Cependant, quand la période de retour augmente, les magnitudes des séismes fournissant la plus grosse contribution à l'aléa augmentent également. Pour une période de retour de plus de 1000 ans, qui sert de base dans la norme SIA 261 pour le dimensionnement des ouvrages dits vitaux (lifeline ; classe d'ouvrage III ; cf. chap. 2.2), il est possible d'interpoler dans l'illustration 2.3 entre les valeurs pour les périodes de retour de 475 et 2500 ans : les scénarios déterminants sont des tremblements de terre avec une magnitude entre 5 et 6 et une distance épacentrale de 10 à 20 km.

Ce n'est que pour les périodes de retour de plusieurs milliers d'années que les tremblements de terre avec des magnitudes entre 6 et 7 apportent une contribution significative pour l'aléa à Bâle. Cela correspond au séisme de 1356, dont la magnitude de moment  $M_w$  a été estimée entre 6.6 (selon le catalogue allemand) et 6.9 (selon le catalogue suisse).





ill. 2.1 : Aléa sismique en Europe : la Suisse se trouve dans la zone d'aléa sismique moyen (source : projet SESAME)

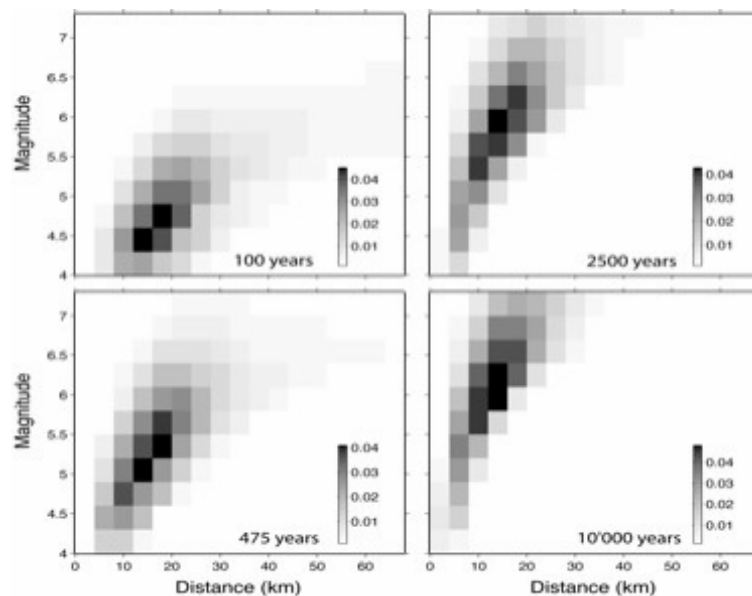


ill. 2.2 : Carte d'aléa sismique pour la Suisse : le rouge foncé correspond à l'aléa maximum, le bleu-vert à l'aléa minimum (Source : SED).

Une situation semblable existe au Valais, tandis que dans les zones d'aléas sismiques plus faibles (vert à vert-jaune dans l'illustration 2.2) les contributions dominantes viennent de tremblements de terre de plus faible magnitude. Par rapport à une

période de retour de plus de 1000 ans, cela représente pour Zurich par exemple des magnitudes de 4.5 à 5.5.

Des tremblements de magnitude modérée ( $< 5.5$ ) peuvent générer des valeurs relativement importantes d'accélération dans la gamme de fréquences élevées ( $> \sim 5$  Hz), mais n'occasionnent souvent que de faibles dommages aux grands bâtiments et ponts car ils n'ont que peu d'énergie dans la gamme de fréquences déterminantes pour ces structures qui est nettement plus basse (environ 0.5 Hz jusqu'à quelques Hz). Les appareils et installations importants de sous-stations ont en général des fréquences de résonance plus élevées et pourraient donc être déjà mis en danger par des tremblements de terre de faible magnitude. La zone de dégâts de tels tremblements de terre reste cependant relativement limitée. Les accélérations pour de tels tremblements de terre, avec une source peu étendue, diminuent relativement rapidement avec la distance à l'épicentre ; pour un séisme de magnitude 5.5, les valeurs d'accélération à 15 km de distance de l'épicentre ne sont plus que la moitié de celles à l'épicentre (à condition que les sols de fondation locaux soient les mêmes). C'est pourquoi il est plutôt improbable que deux sous-stations à très haute tension soient touchées en même temps. La panne d'une sous-station a souvent, grâce la redondance des réseaux d'alimentation en énergie électrique, peu de répercussion sur l'approvisionnement.



ill. 2.3 : Dé-agrégation de l'aléa sismique pour Bâle : plus c'est noir, plus la contribution de la paire magnitude-distance est dominante pour l'aléa (source : SED).

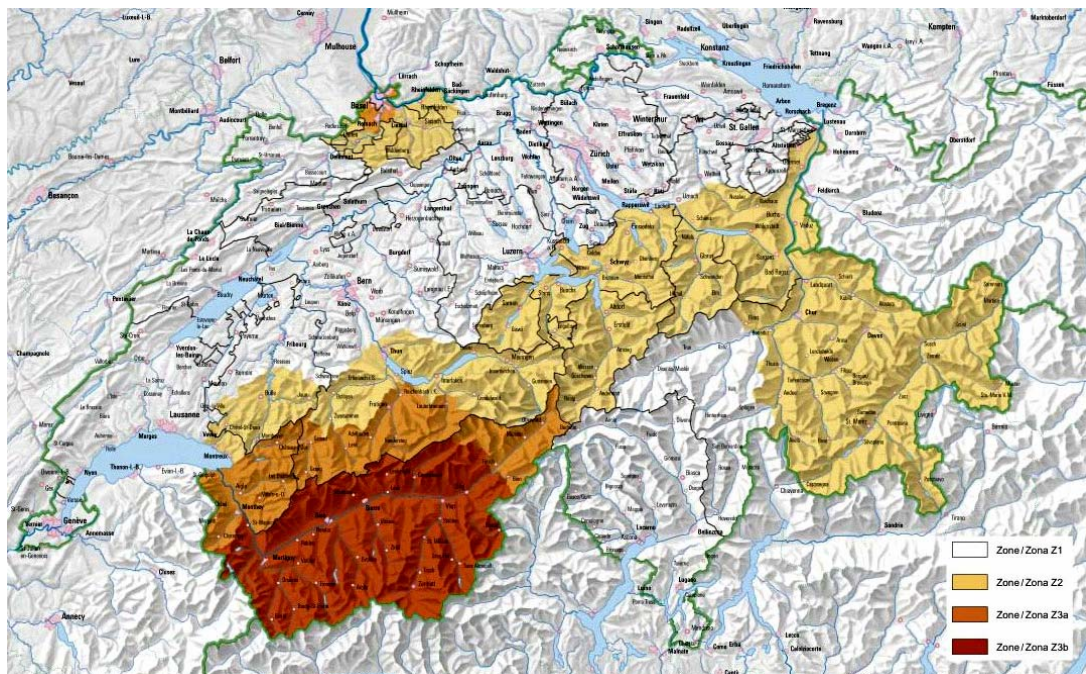
Le tout se présente différemment pour les événements plus rares et vraiment catastrophiques. Plus la magnitude est élevée, plus la zone de dégâts principale est grande. Dans le cas d'un séisme catastrophique comme celui de Bâle en 1356, plusieurs sous-stations du réseau à très haute tension pourraient être touchées et il pourrait bien en résulter un black-out national.

## 2.2 L'aléa sismique selon la norme SIA 261

La norme SIA 261 définit pour la Suisse quatre zones d'aléa sismique : 1, 2, 3a et 3b (illustration 2.4). Pour chaque zone une valeur de référence est définie pour l'accélération sismique  $a_{gd}$ . Cette valeur est donnée pour une période de retour nominale de 500 ans (tableau 1).

Les ouvrages « courants » doivent être dimensionnés pour des tremblements de terre d'une période de retour de 500 ans. Cela signifie que les valeurs d'accélération à respecter selon la norme ont une probabilité de survenance ou plutôt de dépassement de 10 % en 50 ans. Pour des ouvrages vitaux (« lifelines »), ces valeurs d'accélération sont multipliées par un facteur d'importance  $\gamma_I$  de 1.4. On parle ici d'ouvrages de classe d'ouvrages (CO) III. La multiplication par le facteur 1.4 correspond à un allongement de la période de retour à un peu plus que 1000 ans, respectivement à une diminution de la probabilité de dépassement à tout juste 5 % en 50 ans.

Lors d'un tremblement de terre, les mouvements du sol dépendent très fortement de la géologie locale. C'est pourquoi la valeur de référence  $a_{gd}$  doit être multipliée par un facteur de sol de fondation  $S$ . En Suisse, on trouve le plus souvent les classes de sols de fondation C et E. Pour la classe C, il s'agit de sédiments meubles de rigidité moyenne et d'une épaisseur supérieure à 30 m ; pour la classe E, de sédiments meubles de moyenne ou faible rigidité reposant sur des couches d'une rigidité nettement supérieure à une profondeur de moins de 30 m (cf. norme SIA 261 pour les définitions exactes). Le tableau 1 donne un aperçu des accélérations du sol maximales qui résultent pour ces classes de sols de fondation.



ill. 2.4 : Zones sismiques de la Suisse selon la norme SIA 261 publiée en 2003 (source : SIA 261).

La norme SIA 261 définit en plus de l'accélération maximale du sol le contenu fréquentiel des mouvements du sol à l'aide de spectres de réponse. Ce contenu fréquentiel est également fortement influencé par la géologie locale. Les spectres de réponse montrent que les accélérations sismiques peuvent être nettement amplifiées selon les caractéristiques dynamiques des ouvrages et des installations, notamment en fonction de leur fréquence propre fondamentale. Les amplifications les plus importantes se produisent dans ce qu'on appelle le plateau situé quelque part entre 1 et 10 Hz et dont la position et la largeur exactes dépendent en premier lieu de la géologie locale.

*Tableau 1 : Accélérations maximales du sol en  $m/s^2$  selon la norme SIA,261, pour la classe d'ouvrages III et les classes de sols de fondation C et E (arrondi à  $0.1 m/s^2$ , détails voir texte).*

Zone sismique	1	2	3a	3b
SIA 261-valeur de référence : $a_{gd}$	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

Pour rester simple à utiliser, la norme SIA 261 doit couvrir avec seulement quelques classes de sols de fondation toutes les situations de sols existantes en Suisse. Il n'est donc pas étonnant que des études spécifiques de sites, pour lesquels l'influence de la géologie locale peut être déterminée avec bien plus de précision, mènent à des spectres de réponse différents de ceux de la norme SIA 261. Pour cette raison et d'autres non détaillées ici, la norme SIA 261 sous-estime très souvent les accélérations possibles dans la gamme des hautes fréquences, tandis que le contraire, soit une surestimation des accélérations dans la gamme de fréquences basses, est fréquemment constaté.

Des valeurs de seuil pour des dégâts sont souvent indiquées dans la littérature en fonction de l'accélération maximale du sol, appelée en anglais « Peak Ground Acceleration » ou « PGA » (voir tableau 2 dans le chapitre 3.2). D'autre part, il est reconnu, mais pas suffisamment pris en compte, que les dégâts sismiques des ouvrages ne sont que très mal corrélés avec les valeurs de PGA. Comme en règle générale les appareils et installations à haute tension ont des fréquences propres nettement plus élevées que les constructions telles que les bâtiments ou ponts, on peut par contre s'attendre à ce que les corrélations entre les dégâts (qui dépendent de la part d'énergie dans les hautes fréquences) et les valeurs PGA ne soient pas trop mauvaises dans ce cas. Malgré tout, de telles valeurs de seuil, exprimées en PGA, ne sont à comprendre que comme valeurs indicatives très grossières !

### 3. Expériences de dommages lors de séismes

Le présent chapitre se limite aux expériences avec des réseaux de transport et de distribution ainsi qu'avec des appareils et installations de sous-stations. La problématique de la sécurité sismique des bâtiments est traitée dans le chapitre 5.1.

#### 3.1 Evaluation qualitative de la littérature

Un excellent aperçu sur le comportement sismique de systèmes d'approvisionnement en énergie électrique, en particulier aux Etats-Unis, est fourni par le manuel ASCE [1] publié en 1999. Le présent rapport se base très fortement sur cette publication de l'ASCE (« American Society of Civil Engineers »).

Les lignes aériennes résistent bien en règle générale aux tremblements de terre. Font exception les défaillances de fondations de pylônes dues à une liquéfaction du sol ainsi que les glissements de pylônes dus à des instabilités de pentes provoquées par un tremblement de terre. Des courts-circuits et des incendies ont parfois pu être observés quand des conducteurs de phases différentes sont entrés en contact à la suite d'oscillations excessives. Des problèmes isolés sont également survenus pour des lignes fixées à des bâtiments qui se sont eux-mêmes effondrés lors d'un tremblement de terre.

Les dégâts de loin les plus importants ont pu être constatés dans les sous-stations isolées à l'air. Plus le niveau de tension est élevé, plus les éléments individuels sont vulnérables. Aux Etats-Unis, les sous-stations à tension plus basse se sont toutes relativement bien comportées lors des tremblements de terre avec dégâts des dernières décennies, qui se sont quasiment tous produits en Californie. Il faut cependant prendre en considération que pour les sous-stations californiennes - contrairement à la situation en Suisse - les mesures de protection parasismique de base, comme par exemple l'ancrage de transformateurs, représentent une évidence.

En principe, la thèse de doctorat de Bastami [2], datée de 2007, fournit une statistique détaillée des dégâts aux appareils de sous-stations, basée sur les tremblements de terre les plus importants survenus dans le monde ces cent dernières années. Cependant, comme cette thèse contient des données partiellement confidentielles, elle n'a pas pu être publiée en entier. Bastami a pu tout de même publier un extrait de cette statistique lors de la conférence mondiale du génie parasismique à Pékin en 2008 [3]. Lors de la même conférence, Khalvati et Hosseini ont décrit les dégâts aux appareils à haute tension lors des derniers grands séismes iraniens [4].

Dans les sous-stations à très haute tension isolées à l'air, les dégâts sismiques typiques sont les ruptures d'éléments en porcelaine ou l'endommagement de transformateurs dû à un ancrage insuffisant. Les éléments en porcelaine se rompent souvent à la suite d'interactions défavorables entre différents éléments dues à un mou insuffisant des connexions. Mais des secousses violentes par suite de jeu dans les ancrages ou par amplification des accélérations sismiques dues à la souplesse du châssis-support peuvent également occasionner des ruptures d'éléments en porcelaine ou en fonte d'aluminium.

Les expériences sismiques pour des sous-stations isolées au SF<sub>6</sub> sont peu nombreuses. Il semble que les sous-stations isolées au SF<sub>6</sub> résistent bien aux tremblements de terre au moins modérés.



Studer Engineering, à Zurich, a constitué en 2001 pour IWB un dossier sur le comportement des installations d'infrastructure lors de tremblements de terre ayant eu lieu les dix années précédentes [5]. Les chapitres concernant les systèmes d'approvisionnement en énergie électrique ont été aimablement mis à notre disposition par IWB pour l'élaboration du présent rapport.

Le rapport [5] résume le comportement de l'approvisionnement en énergie électrique lors de quelques tremblements de terre importants des dernières années. Ici nous citons à titre d'exemples représentatifs les expériences faites lors des tremblements de terre de Northridge (Californie), de Kocaeli (Turquie) et de Chi-Chi (Taiwan) (informations à partir de [5], légèrement complétées et illustrées par des photos ; les magnitudes indiquées correspondent aux magnitudes de moment  $M_w$ ) :

#### **Northridge ( $M_w = 6.7$ , 1994)**

- Les ruptures d'alimentation étaient le plus souvent dues aux dégâts dans les sous-stations (illustrations 3.1 et 3.2).



*ill. 3.1 : Northridge, 1994 : disjoncteurs détruits 500 kV-SF6 des années 70, avec un centre de gravité extrêmement élevé.*



ill. 3.2 : Northridge, 1994 : traversé de transformateur qui a éclaté (500 kV).

- Se sont révélées les plus sujettes aux dommages les sous-stations avec des niveaux de tension entre 230 kV et 500 kV. En comparaison, les sous-stations de 154 kV ont subi moins de dégâts.
- Des dégâts aux installations de 230 kV et 500 kV se sont déjà produits dans des zones avec une accélération du sol de seulement 1.5 m/s<sup>2</sup>. Lors de tremblements de terre antérieurs, de tels dégâts se sont produits également avec des accélérations encore plus faibles. La plupart des dommages sont survenus sur des isolateurs en porcelaine. Une augmentation de l'ampleur des dégâts avec le niveau de tension et l'âge a été constatée.
- Lors de dommages dans les sous-stations, l'interaction réciproque de différents appareils a joué un grand rôle. De même la défaillance initiale d'un appareil a conduit à des dégâts qui se sont étendus par effets d'interaction.
- Diverses pertes d'huile dans les transformateurs ont été constatées.

#### **Kocaeli ( $M_w = 7.4$ , 1999)**

- Immédiatement après le tremblement de terre, toute la Turquie a subi une rupture d'alimentation due à la défaillance d'une sous-station de 380 kV primordiale à Adapazari (cassures d'éléments en porcelaine, renversement ou endommagement d'appareils dus à des ancrages insuffisants ou manquants).
- Pour la majeure partie du pays, l'approvisionnement a pu être rétabli dans les 12 h, entre autres grâce au relativement grand nombre de pièces de rechange disponibles. Dans la zone sinistrée, la rupture a duré plusieurs jours, ce qui a grandement compliqué les opérations de secours.
- Les sous-stations de 154 kV n'ont subi que peu de dégâts.

- Dans les zones où les secousses ont été les plus fortes, les transformateurs de distribution ont souvent aussi été endommagés.
- Les lignes aériennes et les pylônes n'ont apparemment pas subi de dégâts, sauf ceux situés directement au travers de la faille.



*ill. 3.3 : Kocaeli, 1999 : disjoncteur avec centre de gravité très élevé, détruit dans une sous-station à Adapazari (niveau de tension inconnu) (photo : A.S. Whittaker).*

#### **Chi-Chi ( $M_w = 7.6$ , 1999)**

- De gros dégâts aux transformateurs et autres installations non suffisamment ancrées ont été constatés dans les sous-stations de Chungliiao et Tienlun (cf. illustrations 3.4 et 3.5) ; de nombreux isolateurs ont été endommagés.
- Des lignes aériennes de 345 kV sont tombées en panne en raison de glissements de pentes qui ont entraîné des pylônes.
- La conséquence de ces dégâts a été une rupture d'alimentation de plusieurs jours dans le nord de l'île

Il faut prendre en considération que pour les séismes évoqués ici les magnitudes étaient plus grandes que celles auxquelles on peut s'attendre en Suisse (à l'exception de l'exemple Northridge). Malgré cela, la conclusion que les sous-stations à très haute tension sont vulnérables en premier lieu est valable aussi sans réserve pour la Suisse.





ill. 3.4 : Batteries et armoires de commande renversées dans la sous-station de Chungliào après le séisme de Chi-Chi ( $M_w = 7.6$ ), Taiwan, 1999 (photos : ASCE-TCLEE resp. EQE International Inc., de [2]).



ill. 3.5 : La défaillance des amortisseurs de vibrations avec boîtier en fonte d'un groupe électrogène a occasionné la rupture de la conduite de combustible ; séisme de Chi-Chi ( $M_w = 7.6$ ), Taiwan, 1999 (photos : ASCE-TCLEE, de [2]).

Un examen des rapports techniques (par exemple [6]) et des nombreux rapports de reconnaissance sur les tremblements de terre de l'AFPS (Association française du génie parasismique) confirment également que pour l'alimentation en énergie électrique, les sous-stations à très haute tension sont vulnérables en première ligne.

### 3.2 Seuils de dommages quantitatifs

Les expériences concrètes avec dommages sismiques proviennent en majorité de pays lointains et, en plus de cela, souvent de séismes plus forts que ceux auxquels on peut s'attendre en Suisse. Si l'on essaie de transposer ces expériences à la Suisse, les questions suivantes se posent :

- Dans quelle mesure les appareils de sous-stations lointaines ayant été endommagés correspondent-ils au niveau de leur construction aux appareils utilisés en Suisse ?

- Les appareils ayant subi des dommages dans des zones sismiques très actives sont-ils éventuellement suffisamment résistants pour l'aléa sismique de la Suisse ?

Concernant la première question : la plupart des fabricants d'appareils types four-nissent dans de nombreux pays, voire dans le monde entier. C'est pourquoi on peut présumer que les appareils à haute tension ont des constructions semblables. Quelques éléments, comme les traversées, pour donner un exemple, sont fabriqués au moins depuis quelque temps pour différentes qualifications sismiques. D'autre part, les normes CEI (voir chapitre 5.3) indiquent clairement qu'aucune exigence sismique ne doit être remplie si aucune qualification sismique n'a été demandée. Les entreprises d'électricité suisses n'ont certainement pas, sauf dans quelques rares cas, demandé de telles qualifications aux constructeurs. Les appareils les plus vieux ne sont probablement pas dimensionnés pour résister aux tremblements de terre, même s'ils se trouvent dans des zones sismiques bien connues.

Une certaine différenciation est à la rigueur possible en ce qui concerne l'âge de l'installation et la qualité de l'entretien (p. ex. inspection visuelle). L'âge moyen des installations aux Etats-Unis devrait être plus élevé qu'en Suisse et de ce fait, elles devraient être plus vulnérables. Au cours des vingt dernières années, des progrès ont été faits en ce qui concerne la résistance mécanique des isolateurs en porcelaine. De plus, on constate une nette tendance à la réduction de la masse en hauteur grâce au perfectionnement des appareils isolés au SF<sub>6</sub> et des isolateurs en silicone. Malgré tout, les problèmes fondamentaux, tels les ancrages insuffisants ou le mou manquant dans les connexions, restent les mêmes. Il est donc très raisonnable dans une première approche de considérer les expériences mondiales comme transposables à la Suisse.

Concernant la deuxième question : les descriptions des dommages sismiques des sous-stations que l'on peut trouver dans la littérature sont presque toujours de nature qualitative, c'est-à-dire que l'accélération du sol maximale correspondante n'est pas connue précisément et la gamme de fréquences des accélérations qui se sont produites encore moins. Ces paramètres ne seraient disponibles que si les sous-stations étaient équipées de sismographes pour fortes secousses. Mais un examen de la littérature n'a révélé aucun cas de ce genre suffisamment documenté. C'est pourquoi il est extrêmement difficile de trouver des indications concrètes et quantitatives sur les seuils d'accélération ou de déplacement du sol à partir desquels des dommages sont apparus.

Sur Internet, un tableau non daté de L. Kempner de la « Bonneville Power Administration » a été trouvé. Il est reproduit ici dans une notation adaptée (accélérations en m/s<sup>2</sup>, 10 m/s<sup>2</sup> = 1 g) comme tableau No. 2. On ne sait pas si les données formant la base du tableau proviennent en majorité de sous-stations n'ayant pas ou que peu fait l'objet de mesures antisismiques. Cela est probablement le cas car il faut supposer que les dégâts apparus lors des tremblements de terre des dernières décennies se sont produits aussi, ou même avant tout, dans des installations d'un certain âge qui, même en Californie, n'étaient pas dimensionnées pour des tremblements de terre. Cela signifierait alors que les valeurs de seuil indiquées dans le tableau 2 se référeraient de facto à des sous-stations qui n'ont pas été dimensionnées pour résister aux tremblements de terre.

Le tableau 2 montre clairement que l'accélération du sol maximale critique à partir de laquelle il faut compter avec des dégâts sismiques augmente fortement quand la tension électrique baisse. Exception faite des transformateurs pour les-

quels on ne constate pas une telle tendance au moins pour les trois niveaux de tension retenus. Cela corrobore les observations faites lors du séisme de Kocaeli (1999) où apparemment de nombreux dégâts sur les transformateurs de distribution ont pu être observés.

Tableau 2 : valeurs de seuil en  $m/s^2$ , pour des dégâts à des appareils électriques de sous-stations isolées à l'air (selon L. Kempner).

TYPE D'APPAREIL	500 kV	230 kV	115 kV
Disjoncteur de puissance isolé à l'air	0.5	1.0	2.0 - 3.0
Transformateur de courant	1.0	2.0 - 3.5	5.0
Parafoudre	1.0	2.0 - 3.5	7.5
Sectionneur	1.0	2.0	6.0
Transformateurs non ancrés	1.5	1.5	1.5
Barres collectrices rigides	2.0	2.0 - 3.5	7.5
Disjoncteur à cuve mise à la terre	4.0	5.0	> 7.0

### 3.3 Réflexions de plausibilité

L'expérience que les sous-stations isolées à l'air sont d'autant plus vulnérables que le niveau de tension est élevé peut être démontrée relativement simplement par la physique et est de ce fait absolument plausible.

En général, on peut dire que plus le niveau de tension est élevé, plus les installations des sous-stations sont grandes. Cela s'explique en premier lieu par le fait que la distance minimale entre les différentes phases doit être agrandie quand la tension augmente pour éviter une décharge. Cela implique donc automatiquement que tous les isolateurs et traversées doivent être plus grands. Les distances minimales par rapport au sol à respecter dans une sous-station s'élèvent en Suisse à 6.05 m pour 380 kV, 4.45 m pour 220 kV et 3.35 m pour 110 kV (moins 1 kV permet de réduire l'espacement de 1cm).

En ce qui concerne la taille des isolateurs, il y a quatre effets d'échelle simultanés par rapport aux tremblements de terre. En principe, tous agissent dans la direction d'une vulnérabilité accrue pour des dimensions accrues :

1. La contrainte de flexion maximale dans un isolateur en forme de barre s'élève à ( $\sigma_{\max}$  : contrainte de flexion maximale ; M : moment de flexion ; I : moment d'inertie ; r : rayon de l'isolateur) :

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I} r . \quad (1)$$

Soit  $\lambda$  le facteur d'échelle linéaire. Alors la masse de l'isolateur augmente avec  $\lambda^3$  et le bras de levier par rapport à la base avec  $\lambda$ , si bien que le moment de flexion M à la base pour une valeur donnée de l'accélération effective (accélé-

ration spectrale) devient proportionnel à  $\lambda^4$  à cause des forces d'inertie horizontales. D'autre part, le moment d'inertie  $I$ , sous la barre de fraction, augmente également avec  $\lambda^4$ , si bien que le quotient  $M/I$  devient indépendant de  $\lambda$ . Ainsi il reste dans l'équation (1) une augmentation par  $\lambda$ , car  $r$  est proportionnel à  $\lambda$ . Pour une accélération horizontale identique, il en résulte dans les isolateurs plus grands des contraintes de traction maximales par flexion plus grandes. Ceux-ci sont responsables de la rupture des matériaux cassants comme la porcelaine. En d'autres mots : pour les isolateurs plus grands, la contrainte de rupture donnée est atteinte lors d'accéléérations horizontales plus faibles.

2. La contrainte de rupture est elle-même sujette à un effet d'échelle pour les matériaux cassants comme la porcelaine. La rupture d'un matériel cassant part d'un défaut local et la probabilité qu'apparaisse un défaut responsable d'une rupture dans la zone avec les plus grandes contraintes augmente avec la taille de l'isolateur. Il est donc très probable qu'un isolateur plus grand se casse déjà pour des contraintes plus faibles qu'un petit isolateur. Si on considère comme déterminante la surface de la section près de l'encastrement (les contraintes de traction dues à la flexion y sont les plus grandes), il en résulte alors une augmentation d'environ  $\lambda$  de la probabilité d'une rupture pour une contrainte de traction due à la flexion donnée.
3. Un effet d'échelle relatif au déplacement résulte du fait que les déplacements à la tête d'un appareil sont d'autant plus petits que la fréquence propre de l'appareil considéré est élevée pour une même accélération effective (accélération spectrale) et de fait, les appareils plus petits ont automatiquement des fréquences propres plus hautes. Il faut donc beaucoup moins de mou dans les connexions entre les appareils à fréquences propres élevées qu'avec ceux ayant des fréquences propres basses pour éviter des interactions défavorables entre des appareils voisins.
4. Un autre effet d'échelle potentiel résulte du contenu fréquentiel d'un tremblement de terre. Le potentiel énergétique maximal des tremblements de terre se situe, selon la magnitude, dans la gamme de fréquences de 1 Hz à 10 Hz. Les appareils de sous-stations d'un niveau de tension pas trop élevé présentent des fréquences propres - pour lesquelles l'énergie du séisme à cette fréquence propre est déterminante - situées au-dessus de cette gamme. Les fréquences propres des appareils à très haute tension par contre se trouvent dans la gamme de contenu énergétique maximal. Dans un cas concret, ces fréquences propres (ou plus exactement : fréquences propres fondamentales) ne dépendent pas uniquement de la taille de l'appareil, mais également de son installation : en règle générale, les châssis-supports plutôt flexibles se révèlent défavorables.

Si l'on considère que tous ces effets d'échelle apparaissent en même temps, il n'est pas étonnant que l'accélération du sol maximale critique à partir de laquelle il y a des dégâts sismiques augmente si fortement dans le tableau 2 pour des niveaux de tension décroissants.

Comme mentionné sous le point 3.2, il semble que pour les transformateurs un effet d'échelle aussi fort ne peut pas être constaté. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les transformateurs non ancrés subissent des dommages dus au soulèvement – ou plutôt dus au choc quand ils retombent après avoir été soulevés. Le soulèvement dépend avant tout de la hauteur du centre de gravité par rapport à la dimension de la surface d'appui et ce rapport peut être, selon le type, très défavorable même pour des petits transformateurs.

### 3.4 Conclusions

La prévention sismique pour l'approvisionnement en énergie électrique devrait s'appliquer en première ligne aux sous-stations à très haute tension. Premièrement, il est évident qu'il s'agit des éléments les plus vulnérables du système d'alimentation et deuxièmement, plus le niveau de tension de la sous-station est élevé, plus les effets sont géographiquement étendus.

Si l'on tient compte des délais de livraison extrêmement longs aujourd'hui pour les appareils de sous-stations – pour les transformateurs, les délais de livraison se montent à deux ou même trois ans – il n'est pas indiqué de se fier uniquement à la redondance du réseau. Même dans le cas d'une seule sous-station gravement endommagée, celle-ci serait hors service pour un temps assez long étant donné les délais de livraison pour les appareils de rechange. Pendant ce temps, la sensibilité du réseau vis-à-vis des perturbations serait considérablement plus élevée car, dans ces conditions, la règle de redondance « n-1 » ne serait plus respectée. De plus, plusieurs sous-stations pourraient être endommagées simultanément lors d'un séisme catastrophique rare (cf. chapitre 2.1) et la redondance du réseau ne suffirait alors plus à éviter un black-out.

## 4. Pratique antérieure de construction en Suisse

### 4.1 Pratique de construction des bâtiments

Les normes relatives aux structures porteuses de la Société suisse des ingénieurs et architectes SIA contiennent à partir de 1970 quelques règles parasismiques rudimentaires pour des ouvrages généraux ; d'un point de vue actuel, les prescriptions correspondantes étaient de loin insuffisantes dans la plupart des cas et de plus n'étaient souvent pas respectées par les constructeurs. La norme SIA 160 de 1989 a introduit des dispositions parasismiques modernes en Suisse, mais même celles-ci aussi ont souvent été ignorées.

Les barrages et les centrales nucléaires forment une exception, car pour eux des directives légales sévères existent. Dès le départ, les centrales nucléaires ont été dimensionnées pour résister aux tremblements de terre ; on peut même dire que la construction des centrales nucléaires a donné l'impulsion au développement du génie parasismique tant en Suisse que dans le monde entier. Il y a déjà bien des années que les barrages sont dimensionnés pour une force de remplacement horizontale correspondant à 10 % de leur poids propre. Bien entendu, du point de vue actuel, cette disposition est largement insuffisante et c'est pourquoi en Suisse certains barrages ont été contrôlés au cours des dernières dix à vingt années avec des méthodes plus modernes.

Les nouvelles normes pour les structures porteuses de la SIA, entrées en vigueur en 2003 [S1], imposent des dispositions parasismiques nettement plus sévères par rapport à celles de 1989. Entre-temps, grâce à de nombreuses campagnes de sensibilisation auprès des ingénieurs et architectes, ces nouvelles dispositions sont plus souvent appliquées même si la situation n'est pas encore idéale.

Une conséquence de la situation décrite est que probablement la plupart des bâtiments de sous-stations abritant des appareils de contrôle et de surveillance de la sous-station présentent une sécurité sismique insuffisante par rapport aux exigences

des normes SIA de 2003. Pour la vérification de ces bâtiments, le cahier technique SIA 2018 « Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants » [S2] est théoriquement disponible. Ce cahier technique contient des critères permettant d'évaluer si un confortement parasismique est nécessaire ou non, au cas où la sécurité sismique ne correspondrait pas aux normes de 2003. Ces critères visent à garantir une sécurité acceptable pour les personnes et devraient donc être développés spécifiquement pour la situation des sous-stations pour lesquelles la sécurité de l'approvisionnement prime.

La problématique de la sécurité sismique des bâtiments importants des sous-stations est, contrairement à la situation des appareils, indépendante du niveau de tension.

Des mesures pour l'amélioration de la sécurité sismique de bâtiments de sous-stations n'ont été prises que dans quelques cas isolés. Lorsque par exemple dans la sous-station Wasgenring, un élément central de l'approvisionnement en électricité de Bâle, un renouvellement complet du matériel avec des adaptations nécessaires de la construction a été prévu, la sécurité sismique de l'enveloppe du bâtiment a également été examinée et améliorée avec un investissement de plus d'un demi-million de francs suisses.

#### 4.2 Pratique de constructions pour les installations

Lors de la première réunion du 22 février 2008 du groupe d'experts mentionnés dans l'introduction, il s'est avéré que la sécurité sismique des installations pour l'approvisionnement en énergie électrique en Suisse, à quelques exceptions près, ne constituait pas un thème jusque-là. Cela ne vaut pas pour les centrales nucléaires et les barrages, pour lesquels les installations importantes pour la sécurité ont été dimensionnées aux séismes. Par contre, les sous-stations situées à la sortie d'une usine électrique transformant la tension à un niveau apte au transport montrent en général les mêmes points faibles que les autres sous-stations.

Les Services industriels de Bâle (Industrielle Werke Basel, IWB) représentent une exception digne d'être mentionnée en ce qui concerne le dimensionnement parasismique des réseaux de distribution. Depuis plusieurs années déjà, ils demandent aux fournisseurs d'appareils des déclarations de conformité concernant la sécurité sismique.

Selon les représentants des CFF du groupe d'experts, les bâtiments des sous-stations des CFF sont dimensionnés pour les tremblements de terre selon les normes SIA, toutefois uniquement selon les exigences pour la CO I (tandis que selon le tableau 26 de la norme SIA 261, un dimensionnement plus strict avec un facteur d'importance de 1.2 pour la CO II serait exigé). Mais là encore, les appareils électriques n'ont été que rarement dimensionnés pour les tremblements de terre.

## 5. Normes et directives concernant la sécurité sismique

### 5.1 Normes et directives en Suisse

Les normes pour les structures porteuses SIA No 260 à 267 (spécialement la norme SIA No 261 [S1]) déjà mentionnées sont en vigueur depuis 2003. Elles contiennent des dispositions parasismiques et couvrent théoriquement l'ensemble de la problématique de la sécurité sismique des ouvrages et installations en Suisse - à l'exception des centrales nucléaires et des barrages pour lesquels des directives légales plus sévères sont en vigueur. La norme SIA 261 contient les dispositions parasismiques générales, non-spécifiques aux matériaux. Les normes SIA pour les structures porteuses correspondent en substance aux Eurocodes, mais sont nettement plus succinctes. C'est pourquoi, pour les cas spéciaux non traités par les normes SIA, il faut avoir recours aux Eurocodes.

Les normes pour structures porteuses de la SIA ciblent en première ligne les ouvrages tels que bâtiments, ponts et tunnels, mais contiennent également certaines dispositions pour les équipements et les installations ainsi que pour des structures non porteuses. Celles-ci ne sont cependant pas suffisamment spécifiques pour une application concrète et un contrôle dans le domaine de l'approvisionnement en énergie électrique. En conséquence, elles sont rarement respectées (cf. chapitre 4) et probablement pas connues de bien des responsables de la branche des entreprises électriques.

Il n'existe donc pas de dispositions parasismiques spécifiques suisses pour la branche de l'électricité. Sont appliquées les normes européennes de la CENELEC (chapitre 5.2) qui de leur côté reprennent généralement les normes CEI (chapitre 5.3).

### 5.2 Normes au niveau européen

Le comité européen de normalisation (CEN) est responsable au niveau européen des normes de structures porteuses. L'Eurocode 8 (EC8) [E8] contient les prescriptions pour une construction parasismique. Comme la norme SIA 261, l'EC 8 contient des dispositions pour les équipements et les installations. Mais celles-ci non plus ne sont pas suffisamment spécifiques pour une application concrète dans le domaine de l'approvisionnement en énergie électrique. Elles sont aussi probablement inconnues de beaucoup de responsables de la branche de l'électricité.

Le comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC) est responsable de la standardisation des appareils électriques dans l'espace européen. Actuellement, le CENELEC se compose de 30 pays européens. Généralement, le CENELEC reprend les normes CEI (chapitre 5.3) qui sont du reste relativement peu contraignantes. Pour la recherche de normes sur le site du CENELEC, il est demandé de s'adresser aux membres nationaux, soit en Suisse à Electrosuisse.

Les critères de recherche « tremblement de terre » ou « sismique » sur la page « shop des normes » du site d'Electrosuisse, donnent comme résultat au total sept normes européennes reprises par la Suisse. Il s'agit là de la qualification sismique des disjoncteurs à haute tension [E4] ainsi que d'appareillages à haute tension [E6, E7], des essais sismiques pour baies et bâtis d'installations électroniques [E5] ainsi que les essais de vibration, de chocs, de secousses et de tenue aux séismes applicables aux relais de mesure et aux dispositifs de protection [E1, E2, E3].

Comme il ressort du chapitre 4.2, les normes spécifiques aux tremblements de terre du CENELEC, bien que théoriquement reprises par la Suisse, ne sont jusqu'à présent pratiquement pas respectées. La raison en est sans doute une sensibilisation insuffisante au risque sismique de la branche de l'électricité.

### 5.3 Normes CEI et autres publications CEI

La « International Electrotechnical Commission (IEC) / Commission électrotechnique internationale (CEI) » est une commission de normalisation spécifique à la branche avec un support dans le monde entier. Elle travaille en étroite collaboration avec la « International Organization for Standardization (ISO) ». La CEI a fait paraître de nombreuses publications techniques sous différentes désignations. Il s'agit avant tout de normes internationales (« International Standards »), de spécifications techniques (« Technical Specifications ») et de rapports techniques (« Technical Reports »).

Les normes CEI ne sont pas aussi contraignantes que les normes CENELEC (sauf dans le cas où elles sont strictement identiques). Dans le cadre d'une ordonnance, on pourrait cependant très bien désigner à défaut d'autre chose une publication CEI comme état de la technique.

Diverses publications de la CEI ([E7], [I2], [I3]) définissent une qualification sismique d'appareils à haute tension. Trois niveaux de qualification sont alors distingués : bas (« low »), moyen (« moderate ») et élevé (« high »), « AF2 », « AF3 » et « AF5 » ou appelés, dans le langage courant, « 0.2 g », « 0.3 g » respectivement « 0.5 g ». Ces niveaux correspondent à des accélérations maximales du sol de 2, 3 respectivement 5 m/s<sup>2</sup> (dénommées « Zero Period Acceleration ZPA » dans la publication CEI). Comme d'habitude, le contenu fréquentiel de l'action sismique correspondant à considérer est défini par des spectres de réponse spécifique (« Required Response Spectra RRS » dans les publications de la CEI). Un appareil est considéré comme sismiquement qualifié s'il passe sans perte de fonction essentielle les tests ou calculs numériques avec un RRS correspondant au niveau de qualification respectif.

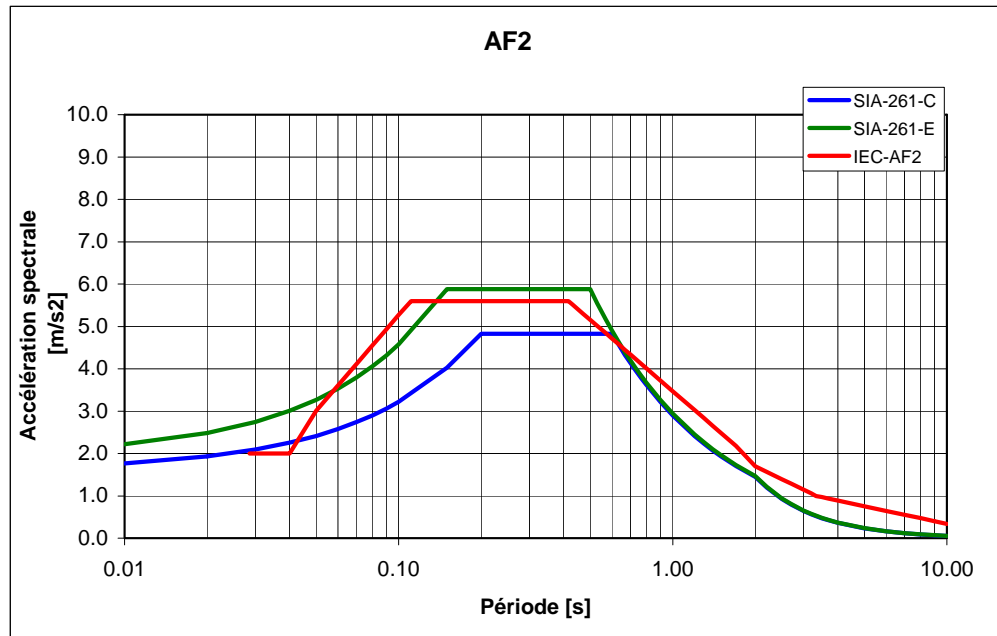
Attention : une qualification sismique du fabricant de l'appareil est fournie uniquement sur demande expresse de l'acheteur.

L'illustration 5.1 montre une comparaison des spectres de réponse définis dans la norme SIA 261 pour la zone 2, CO III et les classes de sols de fondation les plus répandues C et E avec le spectre de réponse utilisé selon la CEI pour la qualification du niveau AF2. Les spectres indiqués sont valables pour un amortissement de 2 % car cette valeur est fixée dans [I3] pour la vérification numérique des disjoncteurs. La comparaison montre que le spectre du niveau de qualification AF2 couvre juste les spectres de la norme SIA 261 pour la zone 2. Compte tenu des incertitudes liées aux spectres de la SIA, il est tolérable que le spectre SIA pour la classe de sols de fondation E dépasse en partie légèrement le spectre CEI. On peut aussi directement conclure de l'illustration 5.1 que le niveau de qualification AF2 est insuffisant pour la zone 3a (et naturellement aussi pour la zone 3b) ; les spectres pour la zone 3a sont à multiplier par le facteur 1.3 et ne sont donc plus couverts par le spectre CEI du niveau de qualification AF2.

L'illustration 5.2 montre une comparaison analogue pour la zone 3b avec le niveau de qualification CEI « moyen », « AF3 » ou « 0.3 g ». En plus des deux spectres de la norme SIA 261 pour les classes de sols de fondation C et E, est présenté comme



exemple le spectre de réponse spécifique pour Monthey, valable pour le bord de la vallée. Il s'avère que les exigences de la norme SIA 261 pour la zone 3b ne sont pas à 100 % couvertes par le niveau de qualification AF3. Malgré cela, on peut admettre que les exigences de la norme SIA 261 pour les zones 3a et 3b sont remplies par le niveau de qualification AF3.



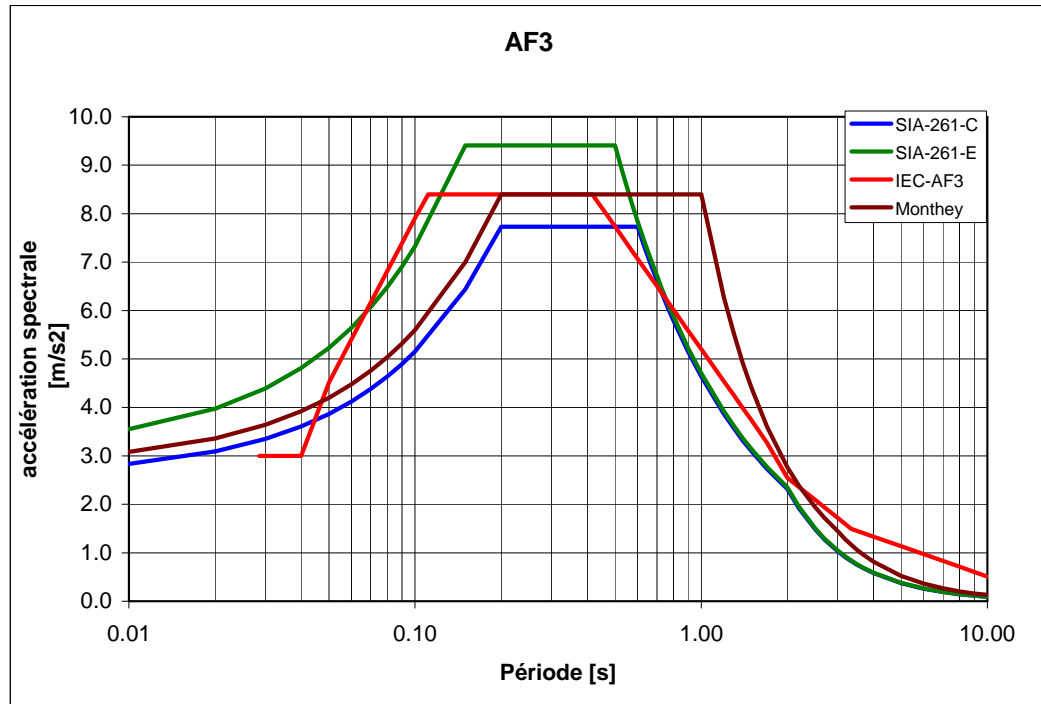
ill. 5.1 : Comparaison des spectres de réponse selon la norme SIA 261 pour la zone 2, classes de sols de fondation C et E (CO III, amortissement 2 %), avec le spectre de réponse à considérer selon la CEI pour le niveau de qualification AF2.

Pour le spectre de réponse spécifique au site de Monthey, il résulte pour une période de 1 s un dépassement de plus de 50 %, ce qui n'est théoriquement plus tolérable. Mais comme les appareils à très haute tension ont des fréquences plus élevées (périodes plus courtes), ce dépassement à 1 s ne devrait pas être d'une importance pratique.

Les spectres pour la qualification sismique, définis dans les publications CEI citées et présentés dans les illustrations 5.1 et 5.2, sont à priori valables uniquement pour des appareils avec appui rigide sur le sol. Si l'on prévoit un châssis-support flexible ou une utilisation dans un étage supérieur d'un bâtiment, il faut en plus prendre en considération que les accélérations sismiques agissant sur l'appareil peuvent être plus fortes que lors d'une implantation rigide sur le sol ou au rez-de-chaussée d'un bâtiment. En pareils cas, il faudrait peut-être exiger pour l'appareil un niveau de qualification supérieur. Mais dans bien des cas, il est également possible d'obtenir du fabricant une qualification de l'appareil avec son châssis-support flexible.

Les installations à isolation gazeuse sont traitées dans la publication [I5].

D'autres publications CEI concernant relais et bâtis sont : [I4], [E3], [E5].



ill. 5.2 : Comparaison des spectres de réponse selon la norme SIA 261 pour la zone 3b, classes de sols de fondation C et E (CO III, amortissement 2%) et un spectre spécifique du site pour Monthey, avec le spectre de réponse à considérer selon la CEI pour le niveau de qualification AF3.

#### 5.4 Spécifications US (IEEE, ASCE)

En ce qui concerne la sécurité sismique, les normes (« Standards ») et les recommandations de l'IEEE (« Institute of Electrical and Electronics Engineers ») priment aux Etats-Unis. Il faut cependant tenir compte que l'application de ces normes est facultative même aux Etats-Unis (« wholly voluntary »).

La norme la plus importante dans le contexte actuel est l'IEEE Std 693-2005 [U1], « Recommended Practice for Seismic Design of Substations ». Cette norme ressemble plus à un manuel et à des lignes directrices qu'à une norme dans le sens habituel ; elle contient de nombreuses explications et des renseignements sans doute très utiles pour le dimensionnement et la vérification des appareils électriques au niveau de la sécurité sismique.

L'IEEE Std 693-2005 définit trois niveaux de qualification sismique – élevé (« high »), moyen (« moderate ») et bas (« low ») – mais qui ne coïncident en aucune manière avec ceux de la CEI. Il y est signalé que les châssis-supports des appareils peuvent amplifier considérablement les accélérations sismiques et donc que, soit tout le système doit être testé, soit alors ces amplifications de l'accélération doivent être numériquement prises en considération lors du choix du niveau de qualification.

Les niveaux de qualification « élevé » et « moyen » sont définis par des spectres de réponse nommés « Required Response Spectra (RRS) » comme pour les normes CEI. Ces RRS définissent les niveaux de sollicitation que doivent supporter les appareils sans dommages et sans aucune dégradation de leurs fonctions. Les conditions à

respecter, par exemple les tensions mécaniques maximales admissibles, sont définies de telle manière que les appareils pour une sollicitation deux fois plus forte (appelée « performance level ») ne subissent encore aucun dommage ou seulement des dégâts négligeables et resteraient pour la plupart en fonction. Ce concept de qualification permet de tester des appareils sans endommagement et ainsi de pouvoir réutiliser les appareils testés.

Pour le niveau de qualification « bas », il n'y a que quelques règles simples à respecter ; il s'agit notamment d'assurer un ancrage minimal ainsi que suffisamment de mou dans les connexions. L'IEEE Std 693-2005 décrit ainsi ce niveau : « The low seismic level represents the performance that can be expected when good construction and seismic installation practices are used, but when no special consideration is given to the seismic performance of the equipment ».

Les RRS comportent pour les niveaux de qualification « élevé » et « moyen » des accélérations maximales du sol (dénommé « Zero Period Acceleration ZPA ») de 0.25 g respectivement 0.5 g. Pour le niveau de qualification « bas », on suppose que les sollicitations allant jusqu'à une accélération maximale du sol de 0.05 g (0.1 g en ce qui concerne « performance level ») sont couvertes.

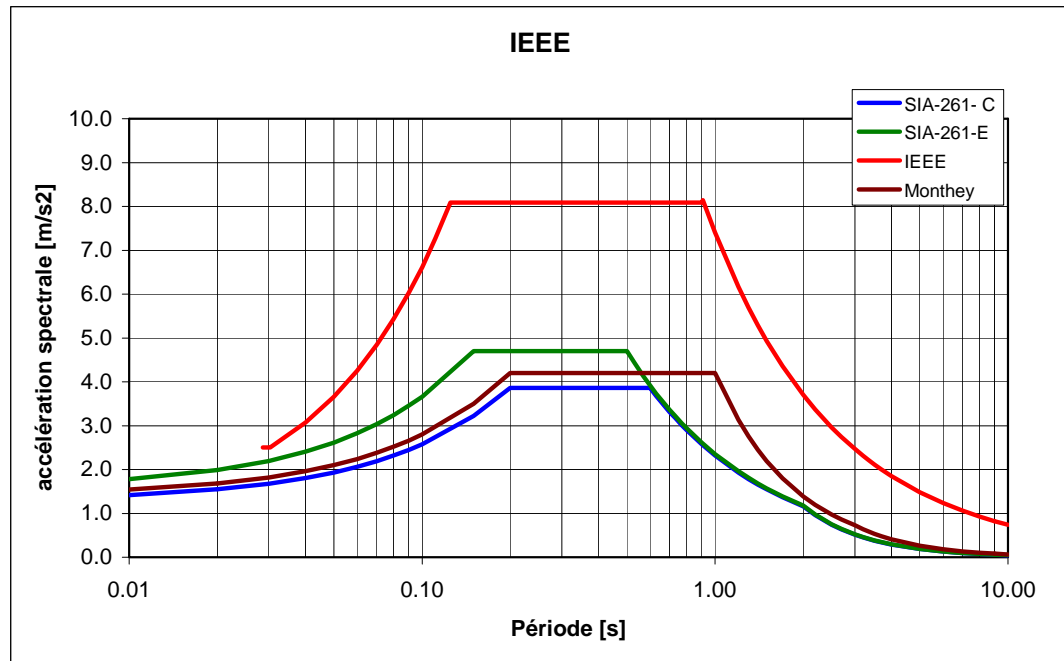
Le concept à deux niveaux cadre bien en principe avec celui de la norme SIA 261 pour les ouvrages de la CO III. La norme SIA 261 demande d'une part que les structures de la CO III puissent supporter le séisme de dimensionnement sans risque d'effondrement et d'autre part, que l'aptitude au service sans restriction soit garantie pour le séisme de dimensionnement réduit de moitié. Il est donc raisonnable de comparer les RRS selon l'IEEE avec les spectres de réponse de la norme SIA 261, divisés par 2 (et au préalable multipliés par 1.4 pour la CO III). L'illustration 5.3 montre une telle comparaison entre le RRS selon IEEE pour le niveau de qualification « moyen » et les spectres de réponse correspondants de la SIA 261 déterminants pour une vérification de l'aptitude au service pour la zone 3b.

Autre détail qui peut être important pour l'évaluation du risque de soulèvement d'un transformateur : pour des fréquences > 33 Hz, les spectres de l'IEEE ne montrent pas d'amplification de l'accélération maximale de sol, tandis que pour les spectres SIA l'amplification s'élève déjà à un facteur de 1.2 pour 33 Hz et un amortissement de 2 %.

L'illustration 5.3 montre également que les niveaux de qualification IEEE sont mal échelonnés pour la situation en Suisse. Même pour les exigences de la zone 3b, le niveau de qualification « moyen » dépasse largement l'objectif. En revanche, le niveau de qualification « bas » couvre uniquement la zone 1. Cela est par contre d'un intérêt pratique car les recommandations de l'IEEE Std 693-2005 peuvent être directement appliquées à la zone 1 en Suisse.

Il faut également noter que l'IEEE Std 693-2005 recommande aussi des configurations de connexions qui devraient assurer une flexibilité suffisante et qui devraient en même temps permettre de maintenir les distances nécessaires entre les différentes phases et par rapport au sol. De plus, il contient des indications détaillées et conservatrices pour la détermination quantitative des mous nécessaires dans les connexions. Un traitement plus approfondi de ce sujet avec des formules plus différenciées pour déterminer la longueur des connexions peut être trouvé dans l'IEEE Std 1527-2006 [U2].

L'IEEE Std 693-2005 souligne que des ancrages rigides sont nécessaires afin d'éviter tout jeu car celui-ci peut occasionner des chocs violents avec des pointes de contraintes élevées et finalement provoquer une rupture de la porcelaine. C'est pourquoi l'IEEE Std 693-2005 recommande de mettre en place des ancrages pour tous les appareils à haute tension comme par exemple des assemblages par soudure entre la base de l'appareil et une plaque de base en acier solidement ancrée dans le béton de la fondation. Pour la conception et le dimensionnement des fondations, on peut se référer au « ASCE Substation Structure Design Guide » [U3].

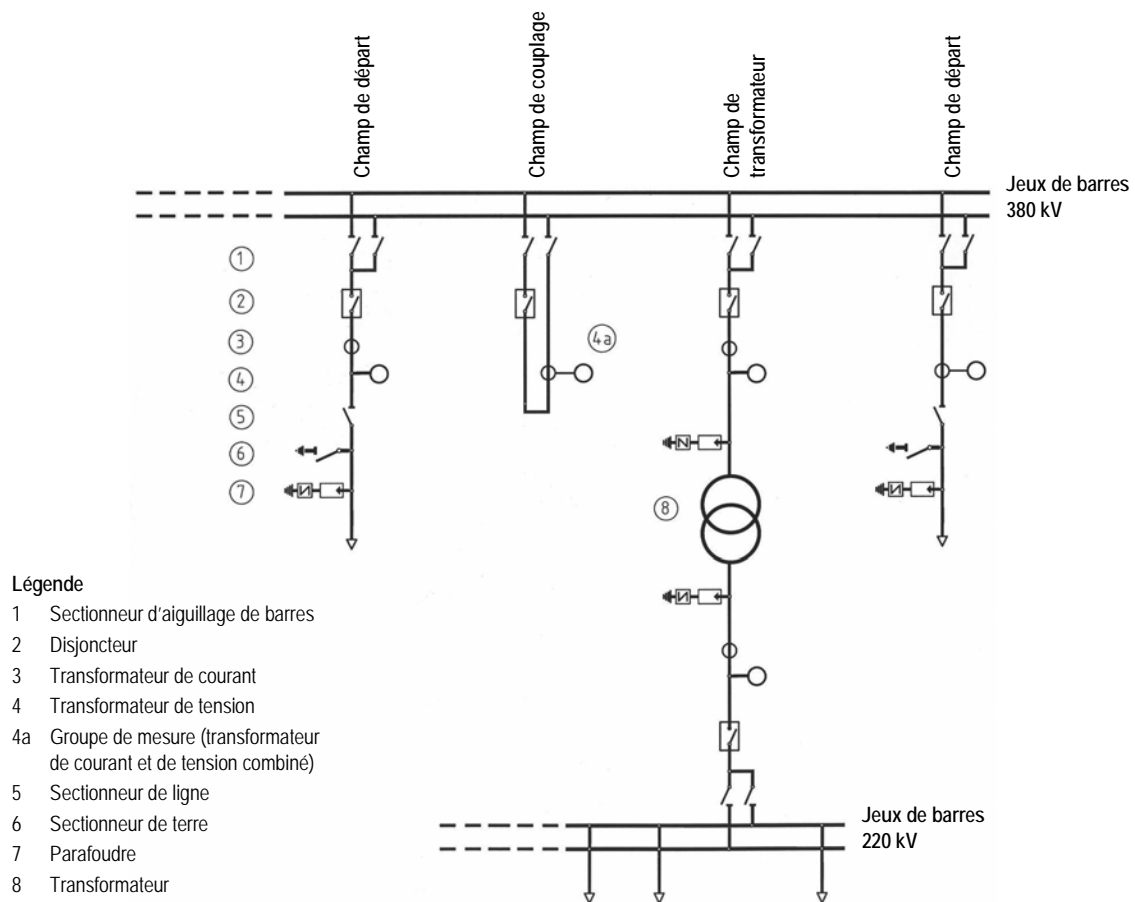


ill. 5.3 : Comparaison entre le RRS selon l'IEEE pour le niveau de qualification « moyen » et les spectres de réponse correspondants (divisés par deux) selon la norme SIA 261 pour la zone 3b, classes de sols de fondation C et E (CO III, amortissement 2%), également inclus le spectre spécifique de Monthey.

## 6. Vulnérabilité des sous-stations

Comme les expériences lors de forts tremblements de terre le montrent, la sécurité de l'approvisionnement en énergie électrique dépend en premier lieu du comportement sismique des sous-stations. Au premier plan se trouvent les niveaux de tension les plus élevés (cf. chapitre 3). Après une brève présentation des éléments les plus importants d'une sous-station, ce chapitre donne un aperçu des connaissances acquises sur la vulnérabilité des sous-stations.

## 6.1 Éléments d'une sous-station



ill. 6.1 : Schéma synoptique unipolaire d'une sous-station à très haute tension.

L'illustration 6.1 montre le schéma d'une sous-station à très haute tension. Au centre se trouve le transformateur qui relie les deux niveaux de tension 380 kV et 220 kV. Pour des raisons de simplicité, seule une phase est dessinée ; en réalité, il y a naturellement trois phases.

Les lignes menant à la sous-station sont, pour chaque niveau de tension, reliées entre elles par un jeu de barres - ici en double pour chaque niveau. De leur côté, les jeux de barres de niveaux de tension différents sont reliés par le champ de transformateur. Pour le fonctionnement de la sous-station plusieurs appareils à haute tension sont nécessaires entre les lignes et les jeux de barres ainsi qu'entre le transformateur et les jeux de barres. Ces appareils sont brièvement présentés ici.

L'utilisation pour chaque niveau de tension de deux jeux de barres en parallèle permet de mettre l'une ou l'autre hors service pour la maintenance. Les deux jeux de barres en parallèle sont connectés entre eux par ce qu'on appelle le champ de couplage.

Dans l'illustration 6.2, on voit des disjoncteurs avec isolateurs en porcelaine capables d'interrompre une ligne sous tension même avec un flux de courant très élevé suite à un court-circuit. Leur masse surélevée est relativement importante - bien que nettement inférieure par rapport aux anciens modèles - ce qui peut dû aux

forces d'inertie conduire à des moments de flexion élevés au pied de l'isolateur de support lors de tremblements de terre. Potentiellement, ces appareils sont donc relativement vulnérables en cas de tremblement de terre.



*ill. 6.2 : Disjoncteur avec isolateurs en porcelaine pour 380 kV.*

L'illustration 6.3 montre des sectionneurs d'aiguillage de barres en forme de sectionneurs pantographe. Le sectionneur d'aiguillage de barres permet un désaccouplement sûr et visible de la ligne du jeu de barres dès que plus aucun courant ne circule dans la ligne. En règle générale, on trouve de chaque côté d'un disjoncteur un sectionneur (voir ill. 6.3) permettant une mise hors service du disjoncteur pour sa maintenance.



*ill. 6.3 : Sectionneurs pantographe pour 220 kV en position « ouvert » (au premier plan) et en position « fermé » (à l'arrière plan).*

L'illustration 6.4 montre des groupes pour la mesure combinée de courant et tension. Ces appareils sont nécessaires pour la facturation de l'énergie transitée par la sous-station ainsi que pour les équipements de protection.



*ill. 6.4 : Groupe de mesure pour 380 kV (transformateurs de courant et de tension combinés)*



*ill. 6.5 : Sectionneur rotatif avec sectionneur de terre pour 380 kV.*



L'illustration 6.5 montre un sectionneur rotatif avec sectionneur de terre. Cet appareil sert à désaccoupler de la sous-station d'une manière sûre une ligne mise hors service et de la mettre à la terre, permettant ainsi des travaux de maintenance sur la ligne garantie sans tension.

L'illustration 6.6 montre un parafoudre (ou parasurtenseur) pour 220 kV. Cet appareil est un dispositif de protection des appareils électriques contre les surtensions électriques transitoires, générées par exemple par la foudre.



*ill. 6.6 : Parafoudre pour 220 kV.*

L'illustration 6.7 montre un transformateur 220 kV/150 kV qui, comme la plupart des transformateurs en Suisse, repose sur des roues. Par rapport à l'écartement des voies, le centre de gravité de ce transformateur est relativement élevé. En cas de fort séisme, cela peut provoquer un soulèvement temporaire suivi d'un choc. Par contre, un renversement complet est peu probable pour les tremblements de terre auxquels il faut s'attendre en Suisse.





ill. 6.7 : Transformateur 220 kV/150 kV.

## 6.2 Causes de dommage dans les installations extérieures

En principe, trois causes différentes sont constatées pour les dommages aux appareils à très haute tension :

- Les forces d'inertie dues aux accélérations sismiques du sol,
- les forces d'interaction dues aux déplacements relatifs entre les appareils connectés par des conducteurs avec un mou insuffisant pour pouvoir compenser ces déplacements relatifs sans être tendus,
- les forces d'inertie dues aux chocs : ceux-ci résultent d'ancrages flexibles ou ayant du jeu ; l'appareil est accéléré et heurte violemment une butée. Ceci peut provoquer des pointes d'accélération qui sont nettement plus élevées que les accélérations sismiques du sol. Lors du soulèvement temporaire de transformateurs, des chocs violents peuvent aussi en résulter lorsqu'ils retombent.

Toutes ces causes mènent typiquement à des ruptures dans les pièces en porcelaine ou en fonte d'aluminium, tandis que les isolateurs en matière synthétique se comportent mieux. Les transformateurs subissent des pertes d'huile pour différentes raisons, par exemple lorsqu'un joint d'une traversée (cf. ill. 6.11) est éjecté par la pression asymétrique exercée. Lors du constat des dégâts après un tremblement de terre il est souvent difficile de déterminer la raison, parmi celles évoquées, qui est responsable du dégât concret.

Les forces d'inertie tout aussi bien que les déplacements relatifs à la tête des appareils peuvent augmenter sensiblement si ceux-ci sont montés sur des châssis-supports (trop) flexibles. La fréquence propre du système appareil-structure porteuse diminue avec la flexibilité grandissante du châssis-support et peut de ce fait, au moins pour des appareils relativement rigides, se déplacer dans la zone d'amplifications maximales (zone de plateau des spectres de réponse). Avec une

fréquence décroissante, les déplacements augmentent à la tête de l'appareil. Dans la zone de plateau du spectre d'accélération, cette augmentation de déplacement est même proportionnelle au carré de la diminution de la fréquence. C'est pourquoi des châssis-supports flexibles s'avèrent généralement peu favorables.

Des appuis en élastomère sous les transformateurs pour une isolation du son solide peuvent s'avérer également peu favorables en cas de tremblement de terre.

Le manuel ASCE [1], déjà cité au chapitre 3.1, attribue une grande importance à la problématique des chocs durs. Il y est notamment indiqué qu'il faut faire la différence entre la résistance et la rigidité d'un ancrage. Lors d'un ancrage avec des boulons et des trous longitudinaux dans les parties à relier, ce qui se pratique pour des raisons de tolérance, des chocs durs peuvent apparaître même si l'ancrage est suffisamment résistant. Cette problématique est importante surtout pour les transformateurs, car ici de grandes masses et par conséquent de grandes forces sont en jeu.

### 6.3 Enseignements tirés des indications des producteurs

Dans le cadre d'une petite enquête, les producteurs d'appareils électriques les plus importants pour la Suisse ont été confrontés à des questions concernant la vulnérabilité sismique de leurs appareils pour installation à l'air libre. Les entreprises suivantes (en ordre alphabétique) qui ont été interrogées sont ABB, Alpha, Areva, Siemens et Trench (successeur de Haefely et propriété de Siemens). Les réponses reçues - très différentes dans leur exhaustivité - se réfèrent en règle générale à des appareils livrables actuellement ; il n'est pas clair si et dans quelle mesure ces réponses sont également valables pour des appareils plus anciens.

Les résultats les plus importants émanant de cette enquête sont :

- Tous les modèles standard des disjoncteurs isolés au SF<sub>6</sub> d'ABB remplissent le niveau de qualification AF3 selon IEC 62271-300 et « moyen » (0.25 g) selon IEEE 693.
- Les disjoncteurs isolés au SF<sub>6</sub> avec isolateurs en porcelaine d'Areva sont livrables sans supplément de prix jusqu'au niveau de qualification AF3.
- Les disjoncteurs isolés au SF<sub>6</sub> de Siemens avec une seule chambre de coupure ont été testés avec 0.5 g et les disjoncteurs avec plusieurs chambres de coupure avec 0.3 g - apparemment dans la version standard. Un dimensionnement pour des exigences plus sévères est possible.
- Une vérification de la résistance parasismique des transformateurs n'est faite chez Siemens que sur demande du client ; pour les clients européens cela n'est que rarement le cas, d'autant plus qu'une vérification mathématique est très complexe et se limite aux pièces principales (noyau, enroulement, traversée). Les transformateurs sont dimensionnés - selon les indications du représentant de Siemens - pour le transport comme suit : dans le sens longitudinal 1.0 g, dans le sens transversal 0.8 g et dans le sens vertical 1.5 g. Remarque : ce renseignement étonne vu les dégâts sismiques souvent observés (en particulier les pertes d'huile). Il faudrait vérifier si éventuellement les transformateurs sont spécialement bloqués lors du transport ; les gros transformateurs (220/380kV) sont généralement transportés sans huile, ce qui diminue les forces d'inertie.

- Aussi bien Alpha que Trench sont d'avis que la responsabilité concernant la rigidité du châssis-support incombe au client ; les justifications parasismiques par calcul des différents appareils se font en général pour un sol rigide.
- Un calcul détaillé selon la méthode des éléments finis d'un sectionneur rotatif de Siemens de 550 kg, avec isolateur en porcelaine et châssis-support haut de 2 à 3 m, montre une fréquence propre des oscillations horizontales de 6 Hz. Le calcul a été fait avec une résistance en traction ultime de la porcelaine lors d'une flexion de 55 MPa (sa détermination n'a pas été précisée) et une contrainte admissible correspondante de 27.5 MPa.
- Selon les indications d'ABB et de Trench, les fréquences propres des appareils à très haute tension se trouvent typiquement dans la plage de quelques Hertz.
- Alpha chiffre les frais supplémentaires d'un sectionneur pantographe pour une version à résistance parasismique (probablement pour le niveau de qualification AF5) à 2 à 3 %.
- Selon l'information fournie par Areva, les installations à isolation gazeuse résistent aux tremblements de terre jusqu'aux niveaux AF2-3 (0.25 à 0.3 g). Pour satisfaire les exigences du niveau AF5, il faut compter avec des frais supplémentaires de 1 % par champ de couplage avec départ câblé ; pour les champs avec des traversées du SF6 à l'air libre, les frais supplémentaires peuvent être plus élevés. Notamment, des renforts pour les châssis-supports sont nécessaires.

En ce qui concerne les installations à isolation gazeuse, Areva a répondu à la question de la résistance parasismique comme suit : « de par notre expérience dans le monde entier avec des installations à isolation gazeuse ayant subi un fort tremblement de terre, nous pouvons généralement conclure que les installations à isolation gazeuse peuvent résister sans dommages même à des séismes puissants si les châssis-supports (et le bâtiment) sont dimensionnés de façon correspondante. Les installations sans renforcement ont subi des dommages partiels au niveau des châssis-supports mais n'ont pas été endommagées en temps que telles et ont pu être remises en service après réparation ».

#### 6.4 Etude pilote pour la sous-station de Chamoson

Ont été étudiés – à l'aide de simples calculs approximatifs – les transformateurs ainsi qu'un type représentatif de disjoncteur, de transformateur de courant et de transformateur de tension. Les calculs se sont avérés difficiles dans la mesure où les indications trouvées dans les archives d'EOS présentaient des lacunes sur les propriétés mécaniques des appareils examinés. En particulier, pour tous les appareils, la « surface de la section d'encastrement » exacte restait inconnue – respectivement il n'était même pas clair si la section transversale de la porcelaine ou une pièce en fonte d'aluminium serait déterminante pour la reprise du moment de flexion en pied (« base moment ») provoqué par un tremblement de terre. C'est pourquoi ces résultats ne peuvent être interprétés que comme des indications de tendances générales.

Les calculs ont été faits à partir du spectre de la classe de sol de fondation D, basé sur la carte des classes de sol de fondation de CREALP.

L'évaluation du comportement des transformateurs (avec leurs fondations) n'a été que très approximative, car leurs fréquences propres ne sont pas précisément connues. Mais même dans des conditions favorables (un comportement quasi ri-

guide du transformateur ; une fondation rigide ne permettant pas un balancement notable), il est très probable que tous les gros transformateurs (380/220 kV, 220/150 kV, 220/16 kV) se soulèveraient en cas de séisme de dimensionnement selon la norme SIA 261. L'ampleur qu'aurait ce soulèvement, seulement faible ou très prononcée, ne peut pas être appréciée sans investigations approfondies.

Pour un disjoncteur d'Alstom (type HGF 115/2C FKF 2-6, masse totale 1400 kg, niveau de tension 220 kV), des documents techniques ont été trouvés dans les archives d'EOS. Ils indiquent non seulement les masses pour chaque élément, mais aussi les forces horizontales maximales qui peuvent être transmises aux points de connexion des conducteurs sans surcharger l'isolateur de support. Malheureusement, le facteur de sécurité utilisé pour le calcul de ces forces ne ressort pas de ces documents. Si l'on convertit la force maximale admissible « statique + dynamique » en accélération sismique équivalente à l'aide des masses des chambres de coupure – en supposant de façon optimiste que la force statique présente au même moment est très faible et donc négligeable – il en résulte environ 30 % de l'accélération du plateau du séisme de dimensionnement. Même si l'on réduit un peu le facteur de sécurité utilisé pour le cas de charge tremblement de terre, le verdict reste bien clair : le séisme de dimensionnement selon SIA 261 conduirait très probablement à la rupture de l'isolateur-support et donc à la destruction totale du disjoncteur. Celui-ci ne supporterait un séisme de dimensionnement sans dégâts notables probablement que dans la zone 1.

De plus, un transformateur de courant à tête typique (masse importante à la tête) de ex-Haefely (IOSK 300 G2, masse totale : 1200 kg, niveau de tension 220 kV) a été étudié. Rien qu'en raison du châssis-support relativement élevé (hauteur 2.6 m) à cause du risque d'inondation à Chamoson, la fréquence propre, même pour un transformateur rigide, se situerait à 2.6 Hz seulement. Si de son côté le transformateur de courant présente pour sa part une fréquence propre de quelques Hertz pour un encastrement rigide à la base, il en résulte pour l'ensemble transformateur/châssis-support une fréquence propre d'environ 1.5 à 2 Hz ; donc dans la zone du plateau du spectre de dimensionnement de la classe de sol de fondation D (plateau de 1.25 à 5 Hz). Si l'épaisseur effective de la paroi en porcelaine de l'isolateur de support est supposée de 25 mm (les documents disponibles ne fournissent aucune indication sur l'épaisseur de paroi), il en résulte une contrainte maximale de traction par flexion de seulement 19 MPa (avec un facteur de comportement de  $q = 1.5$ ). Pour les appareils à très haute tension, les contraintes admissibles de traction par flexion devraient se situer largement au-dessus de 20 MPa (cf. chapitre 6.3 : pour le calcul de Siemens, 27.5 MPa ont été retenus).

Comme le transformateur de courant examiné représente plutôt un cas défavorable (centre de gravité très élevé, masse relativement importante, châssis-support flexible, classe de sol de fondation D défavorable), on peut déduire que les forces d'inertie correspondant à un séisme de dimensionnement selon la norme SIA 261 ne conduiraient généralement pas, même dans la zone 3b, à une rupture de l'isolateur en porcelaine. Mais cela ne veut pas dire que le transformateur de courant résisterait au tremblement de terre ; le problème se situe ailleurs.

Si l'on part d'une fréquence propre de 1.5 Hz, il se produit un déplacement spectral de 100 mm pour une accélération du plateau de  $9.1 \text{ m/s}^2$  (amortissement 2 %, CO III) ; cette valeur est valable au centre de gravité. Le déplacement effectif tout en haut aux raccordements de conducteurs devrait se chiffrer à environ 130 mm. Ce déplacement provoquerait des forces d'interaction entre le transformateur de

courant et la boîte d'extrémité de câble voisine dues aux connexions relativement tendues installées à Chamoson (l'ill. 6.8 montre une configuration de connexion d'appareils semblables). Ces forces devraient causer au moins la rupture d'un des isolateurs des appareils concernés (en fait, il faudrait compter avec un déplacement relatif entre les appareils s'élevant jusqu'à 200 mm).



*ill. 6.8 : Connexions tendues entre une boîte d'extrémité de câble et un transformateur de tension à Chamoson (220 kV).*

Un transformateur inductif de tension (masse concentrée en bas) a également été évalué approximativement. Celui-ci, en particulier à cause de son centre de gravité bas, est sensiblement moins critique par rapport aux forces d'inertie comme par rapport aux déplacements présumés de tête que le transformateur de courant examiné. Malgré cela, le transformateur de tension court également un danger potentiel à cause des interactions avec ses voisins directs.

## 6.5 Conclusions sur la vulnérabilité

### 6.5.1 Transformateurs

Pour les transformateurs, il n'est pas clair dans quelle gamme de fréquences se trouvent les fréquences propres les plus basses du transformateur en tant que tout. Le standard IEEE 693 part du principe que celles-ci se situent à au moins 33 Hz.

Si l'on considère que les transformateurs à Chamoson sont en gros représentatifs en ce qui concerne leur rapport entre la hauteur du centre de gravité et la largeur de la surface d'appui, on ne peut pas exclure un léger soulèvement dans la zone 2 et un soulèvement considérable dans les zones 3a et 3b du transformateur. Le choc de retombée subséquent crée des pointes d'accélération élevées pouvant provoquer des dommages ou la panne du transformateur.

Dans la zone 1, un soulèvement peut se produire uniquement lors de circonstances très défavorables : un balancement très fort d'une fondation isolée sur un sol relativement mou. Pour savoir si le soulèvement dans la zone 1 ne représente en général



réellement aucun problème, il faudrait le vérifier avec quelques mesures de fréquences propres de transformateurs type. L'évaluation provisoire mentionnée ici se base sur la supposition que les fréquences propres les plus basses des transformateurs se situent dans la gamme de 30 Hz ou plus comme supposé dans le standard IEEE 693. Mais aucune bibliographie n'a été trouvée qui confirme cette supposition, par exemple à l'aide de mesures.



*ill. 6.9 : Transformateurs renversés à cause d'un ancrage insuffisant lors du tremblement de terre d'Edgecumbe ( $M = 6.3$ ), 1987, en Nouvelle-Zélande. Photo : M.J. Pender, de [7].*

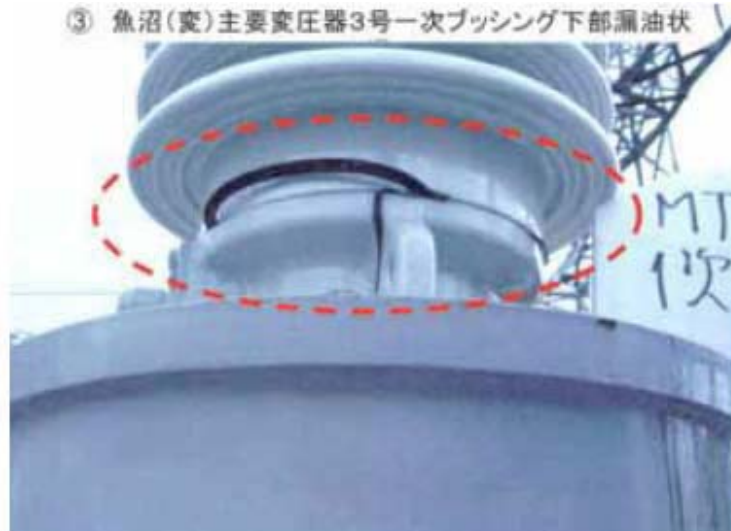


*ill. 6.10 : Défaillance de l'ancrage insuffisant d'un transformateur 132 / 20 kV lors du tremblement de terre de Bam, Iran ( $M_w = 6.5$ ), 2003. (Photo: TREC, de [2]).*

La problématique du soulèvement des transformateurs dépend en premier lieu du rapport entre la hauteur du centre de gravité et la largeur de la surface d'appui et concerne donc potentiellement tous les niveaux de haute tension.

Faute de données, les traversées n'ont pas pu être examinées, mais sont potentiellement très vulnérables (cf. l'ill. 6.11). Lors d'un balancement considérable du transformateur, elles présentent des déplacements de leurs extrémités nettement plus

élevés, ce qui pose de grandes exigences pour les dimensions des mous existant dans les connexions. Cette problématique diminue considérablement avec des tensions plus faibles et se limite donc essentiellement aux niveaux des très hautes tensions.



*ill. 6.11 : Dégât typique : fuite d'huile due à l'éjection d'un anneau d'étanchéité au pied d'une traversée d'un transformateur de 154 kV dans la sous-station d'Uonuma (photo : JSCE, 2004, de [3]) ; tremblement de terre de Niigata Ken Chuetsu ( $M_w = 6.6$ ), Japon, 2004.*

### 6.5.2 Disjoncteurs, sectionneurs, transformateurs de courant et de tension

Les expériences des tremblements de terre (cf. chap. 3) montrent que pour les intensités de tremblement de terre à prendre en considération en Suisse, seuls les appareils des niveaux de tension de 380 et 220 kV sont potentiellement en danger.

Les appareils à très haute tension, y compris leurs châssis-supports, présentent en général des fréquences propres qui se trouvent dans la zone de plateau de la sollicitation sismique. Cela ressort tout autant d'un calcul pour un sectionneur rotatif mis à notre disposition par Siemens que des indications générales d'ABB et de Trench. Les résultats des calculs approximatifs pour les appareils de la sous-station de Chamoson renforcent cette affirmation.

Les appareils potentiellement les plus vulnérables devraient être les disjoncteurs, étant donné leurs grandes masses en hauteur, suivis des transformateurs de courant à tête. Cette appréciation est confirmée par les données statistiques issues de 48 tremblements de terre rassemblées par Bastami [3].

Les châssis-supports flexibles ont potentiellement une influence défavorable, car ils augmentent sensiblement le besoin de mou entre les points de raccordement. De plus, ils déplacent les fréquences propres dans la zone du plateau de la sollicitation sismique pour les appareils dont la fréquence propre fondamentale se situerait, sans châssis-support, en dehors du plateau.

Les calculs pour Chamoson permettent de déduire que les forces d'inertie lors de tremblements de terre dans la zone 1 ne devraient à priori pas représenter un grand problème, même pour les disjoncteurs sur un châssis-support flexible. Cette constatation coïncide avec les déclarations du standard IEEE 693-2005 qui stipule que jusqu'à 0.1 g, les exécutions standard des appareils sont suffisantes tant que celles-ci sont ancrées de manière appropriée. Un problème peut éventuellement apparaître déjà à partir de la zone 1 pour les déplacements des points de raccordement si le mou entre eux n'est pas suffisant.

De plus, les calculs pour Chamoson ont montré que les forces d'inertie en tant que telles ne devraient pas faire subir des dégâts aux transformateurs de courant et de tension ni aux sectionneurs, même dans la zone 3b. Cela concorde avec les indications d'ABB et de Siemens d'après lesquelles leurs appareils à très haute tension tout au moins actuels semblent remplir automatiquement le niveau de qualification AF3, qui couvre juste la zone 3b. Des forces d'interaction dues à des interconnexions raides pourraient malgré tout provoquer des dégâts – la vulnérabilité augmentant fortement quand la fréquence décroît (dans la plupart des cas au carré !).

Des défauts cachés dans les isolateurs en porcelaine, pouvant entraîner une défaillance lors d'un tremblement de terre, ne peuvent cependant jamais être exclus. Il y a quelques années à Romanel, une traversée de cinq ans seulement a explosé sans influence extérieure définissable. Mais de tels dégâts isolés devraient pouvoir, avec un stock raisonnable d'appareils de rechange, être réparés en quelques jours.

Les constatations mentionnées ici concernent les appareils à très haute tension. Pour les niveaux de tension inférieurs, les vulnérabilités sont nettement plus faibles.

### 6.5.3 Systèmes secondaires



*ill. 6.12 : Nicaragua, 1972 (M = 6.2) : Bâtiment pour systèmes secondaires peu avant l'effondrement ; un même type de dégâts est également possible en Suisse. Photo : K.V. Steinbrugge.*



Comme il ressort des explications du chapitre 4.4, il faut partir du principe que, tant que le contraire n'a pas été prouvé, les bâtiments abritant les systèmes secondaires des sous-stations (contrôle, protection, alimentation pour les besoins propres et autres installations auxiliaires) ne répondent pas aux exigences actuelles de la sécurité sismique (cf. l'ill. 6.12).

Les faux planchers ne sont généralement pas sécurisés contre l'effondrement. Souvent, cependant, ils s'étendent « par hasard » sur tous les côtés jusqu'aux murs délimitant la pièce. Dans ce cas-là, ils sont tout de même protégés indirectement contre un effondrement latéral.



*ill. 6.13 : Une installation à moyenne tension sur châssis, entourée d'un faux plancher (à gauche), sans contreventement contre les forces horizontales (à droite : vue sous le faux plancher) ; en cas de tremblement de terre, il y a risque d'effondrement.*



*ill. 6.14 : Batteries hautes et étroites pour l'alimentation sans interruption de la sous-station de Chamoson : les batteries non sécurisées pourraient se renverser déjà lors d'un faible séisme, cf. ill. 3.4.*

Les batteries de secours ne semblent être que très rarement sécurisées contre une chute ou un entrechoquement. Les armoires de commande risquent elles aussi de se renverser tant qu'elles ne sont pas ancrées de façon appropriée.

Ces constatations sont valables indépendamment des niveaux de tension pour toutes les sous-stations à haute tension.

#### 6.5.4 Stockage de matériel de rechange

Il faut partir du principe que le matériel de rechange n'est pas, ou alors seulement par hasard, stocké de manière parasismique. Sans stockage approprié, celui-ci pourrait être endommagé lors d'un tremblement de terre et ne serait donc plus disponible en cas de besoin.

## 7. Guide pour le contrôle des sous-stations

Sur la base des dégâts les plus fréquents dans les sous-stations, il est recommandé de contrôler qualitativement et dans la mesure du possible aussi quantitativement les composants suivants.

### 7.1 Transformateurs

Le premier pas consiste à faire une estimation de la fréquence propre  $f_0$  du balancement du transformateur sur/avec sa semelle de fondation pour pouvoir estimer les forces sismiques et les déplacements spectraux maximaux. Attention : une surestimation de la rigidité entraîne une estimation des déplacements qui n'est pas du côté de la sécurité !

- Ancrage
  - Y a-t-il un ancrage capable de transmettre les forces de traction verticales ainsi que les forces horizontales à la fondation ? Si non : une chute respectivement un déplacement sur ses roues du transformateur sont-ils possibles ?
  - La résistance et la rigidité de l'ancrage sont-elles suffisantes ? Des effets de levier défavorables (« prying actions ») sont-ils possibles de sorte que malgré un ancrage un soulèvement partiel est à craindre ?
  - L'ancrage présente-t-il du jeu pouvant occasionner des chocs ?
  - Le radier de fondation est-il suffisant (épaisseur, armature) pour pouvoir absorber les forces d'ancrage ?
- Connexions
  - Un balancement du transformateur sur/avec sa semelle de fondation est-il admissible (déplacement maximal de la pointe des traversées) ?
  - Des tassements différentiels par rapport à l'environnement sont-ils possibles (fondation du transformateur sur pilotis, les appareils voisins sur fondation superficielle) ?
  - Y a-t-il suffisamment de mou dans les connexions avec les appareils avoisinants ?
- Éléments du transformateur
  - Quelles valeurs les contraintes atteignent-elles à la base des traversées ?
  - Concept de construction des traversées, spécialement le logement de l'isolateur en porcelaine sur le support : est-ce qu'il faut craindre une possible éjection du joint ?

- La structure porteuse du réservoir égalisateur (« conservator ») est-elle suffisante ?
- La structure porteuse des tuyaux de refroidissement (« radiator ») est-elle suffisante ?

## 7.2 Disjoncteurs, sectionneurs, transformateurs de courant et de tension

Le premier pas consiste à évaluer la fréquence propre fondamentale  $f_0$  qui résulte, d'un côté, du balancement de l'appareil, fondation et châssis-support inclus, et de la déformabilité horizontale du châssis-support, de l'autre côté. Un châssis-support déformable peut conduire à un déplacement défavorable de  $f_0$  dans le plateau du spectre !

- Ancrage
  - La résistance et la rigidité de l'ancrage de la construction de support sont-elles suffisantes ? Des effets de levier défavorables (« prying actions ») sont-ils possibles et faut-il craindre des chocs correspondants dus à un soulèvement partiel ?
  - L'ancrage a-t-il du jeu pouvant conduire à des chocs ?
  - Le radier de fondation est-il suffisant (épaisseur, armature) pour pouvoir absorber les forces d'ancrage ?
- Connexions
  - Balancement de l'appareil sur/avec sa semelle de fondation : quelle est la valeur du déplacement maximal (déplacement spectral) du raccordement le plus haut ?
  - Des tassements différentiels par rapport à l'environnement sont-ils possibles (fondation de l'appareil sur pilotis, les appareils voisins sur fondation superficielle) ?
  - Y a-t-il suffisamment de mou dans les connexions avec les appareils avoisinants ?
- Éléments de l'appareil
  - Quelles valeurs atteignent les contraintes à la base des éléments en porcelaine ou en fonte d'aluminium ?
  - Concept de construction, spécialement le logement de l'isolateur support sur l'appui : est-ce qu'il faut craindre une possible éjection du joint ?
  - La résistance du châssis-support est-elle suffisante ?

## 7.3 Systèmes secondaires

- Est-ce que le bâtiment est parasismique ?
- Etagères pour batteries
  - Les batteries sont-elles sécurisées contre une chute ?
  - Un entrechoquement des boîtiers de batterie est-il possible ?
- Les armoires de commande sont-elles sécurisées contre un renversement ?
- Les faux planchers dans les pièces contenant des armoires de commandes ou des batteries sont-ils sécurisés contre un effondrement (structure porteuse contreventée ou étayée de tous les côtés par des murs massifs) ?
- Y a-t-il d'autres éléments à contrôler (par exemple le refroidissement des transformateurs dans des installations souterraines) ?

## 8. Recommandations pour la protection parasismique des sous-stations

Dans ce chapitre, des recommandations pour la protection parasismique sont données, échelonnées en fonction :

- du niveau de tension,
- de la zone sismique, en tenant compte de la classe de sol de fondation,
- du besoin de renouvellement des équipements (par exemple le remplacement d'appareils d'un certain âge) ou non.

Pour les recommandations présentées, il est à chaque fois explicitement indiqué pour quels niveaux de tension et quelles zones sismiques celles-ci sont valables. Pour de nouvelles constructions, ces recommandations devraient absolument être suivies. Leur application même dans les cas où aucun renouvellement n'est prévu peut être décidée en fonction du rapport coûts-réduction du risque. Autrement dit : toutes les mesures de confortement ne demandant que de « faibles » investissements devraient être réalisées rapidement.

La réduction des risques peut en principe être évaluée comme valeur escomptée statistique de la réduction du dommage total comprenant les dégâts immédiats dû au tremblement de terre et les coûts subséquents de la panne d'approvisionnement. Reste cependant la problématique que les coûts subséquents sur le plan économique d'une panne d'approvisionnement sont de très loin plus élevés que les coûts des dégâts à assumer par l'entreprise d'électricité. D'un point de vue supérieur, il est normal de juger la proportionnalité d'un confortement parasismique par rapport au coût global sur le plan économique, même éventuellement en considérant un facteur d'aversion (une plus forte pondération pour des raisons psychologiques que simplement monétaires). Reste à savoir quelle sera la position des différentes entreprises électriques concernant cet aspect.

### 8.1 Mesures pour les transformateurs

Il faut clarifier s'il est possible d'obtenir des fabricants de transformateurs des certificats de comportement conforme en cas de séismes. Pour les nouveaux transformateurs, il faudrait demander pour les zones 3a et 3b un certificat pour le niveau de qualification AF3 et pour les zones 2 et 1 un certificat pour le niveau de qualification AF2 (cf. chapitre 5.3). Mais cela est loin d'être suffisant pour la protection parasismique des transformateurs.

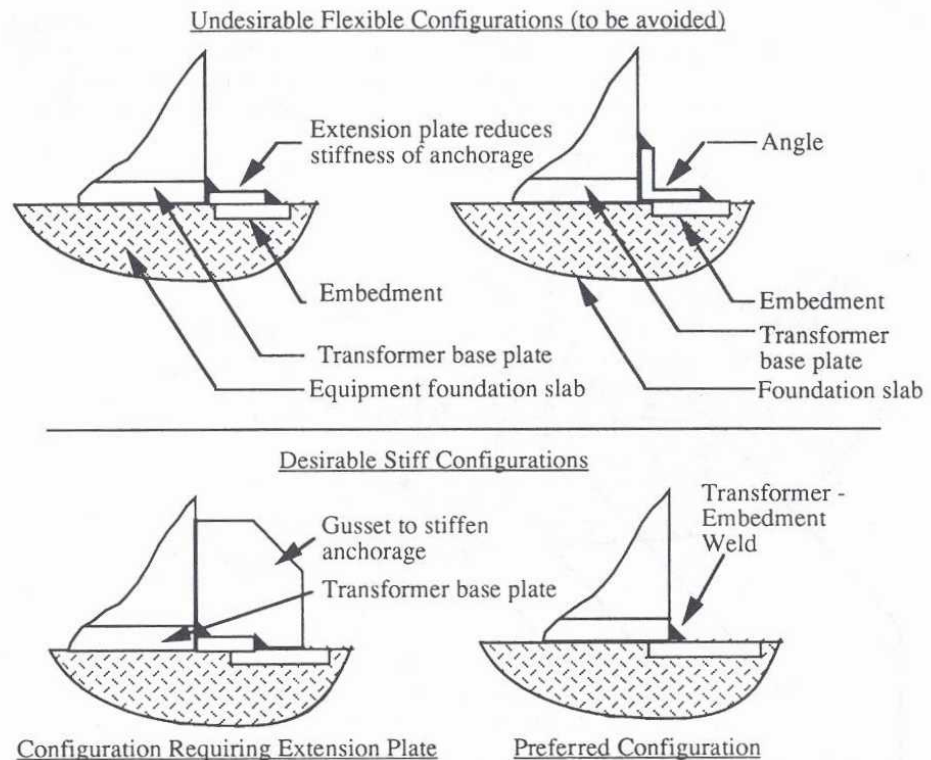
Les points faibles primaires des transformateurs se situent, d'un côté, dans un soulèvement possible, suivi par un choc dur lors de la retombée, et, de l'autre côté, dans les déplacements potentiellement grands – du fait des mouvements basculants du transformateur – des têtes des traversées liées à des connexions n'ayant pas suffisamment de mou.

Le risque de soulèvement dépend en premier lieu de « l'élancement » du transformateur, c'est-à-dire du rapport de la hauteur du centre de gravité à l'écartement des appuis sur rail. Pour des transformateurs pour tensions > 50 kV, ce rapport est largement indépendant du niveau de tension. C'est pourquoi les recommandations suivantes concernant l'ancrage sont à priori valables pour tous ces transformateurs. Les transformateurs pour les tensions plus basses sont en règle générale moins « élancés » et ne doivent donc pas être ancrés contre des forces de traction.

La problématique des connexions avec trop peu de mou ne concerne généralement que les niveaux de tensions les plus élevés (380 et 220 kV).

Dans les zones 3a et 3b, tous les transformateurs > 50 kV devraient être sécurisés contre le soulèvement à l'aide d'ancrages rigides. Les sabots d'enrayage normalement présents, qui bloquent les roues uniquement pour empêcher tout roulement, ne sont pas suffisants. C'est pourquoi l'ASCE recommande vivement dans [1] de souder les transformateurs directement à des plaques en acier (cf. ill. 8.1) qui, de leur côté, sont ancrées dans le béton de la fondation. De tels ancres soudés semblent être évidents de nos jours au Japon et dans les zones sismiques des Etats-Unis. Les désavantages des ancres avec des boulons ou de ceux avec une grande déformabilité sont décrits dans le chapitre 6.2 du présent rapport.

Lors d'un ancrage de transformateurs fait ultérieurement, il faut prendre contact avec le fabricant pour s'assurer que les points d'ancrage côté transformateur sont capables de reprendre les forces d'ancrage. Comme points d'ancrage possibles, ce sont en général plutôt les œillets de transport qui rentrent en ligne de compte.



ill. 8.1: Ancrage de transformateurs : Réalisations défavorables car trop élastiques (en haut) et réalisations rigides recommandées (en bas) ; l'ancrage de la plaque en acier dans la fondation n'est pas dessiné (de [1]).

Il faudra encore clarifier avec plus de précision dans quelle mesure les recommandations pour l'exécution d'un dispositif contre le soulèvement sont valables également pour la zone 2 et peut-être même pour la zone 1. Un paramètre important concernant le risque de soulèvement est la plus basse fréquence propre des oscillations de basculement du transformateur. Comme ce paramètre n'est

qu'insuffisamment connu (cf. chapitre 6.5.1), il est recommandé de mesurer cette fréquence pour quelques transformateurs typiques et configurations de fondation courantes.

C'est au niveau de la très haute tension que les suites potentielles d'une panne de transformateur sont les plus grandes et qu'il est le plus difficile de se procurer des transformateurs de rechange. C'est pourquoi la priorité absolue revient aux niveaux de tensions les plus élevés (380 et 220 kV). Mais il faut également prendre en considération que la probabilité est très grande que plusieurs sous-stations de niveau de tension plus basse soient en même temps touchées par un tremblement de terre. Ainsi plusieurs sous-stations pourraient tomber en panne d'un seul coup. C'est pour cela que l'installation ultérieure de dispositifs empêchant le soulèvement s'impose ici aussi, tout spécialement dans les zones 3a et 3b.

Dans toutes les zones sismiques, il faudrait vérifier que les connexions entre les traversées des transformateurs à très haute tension et les appareils voisins présentent suffisamment de mou (cf. chapitre 8.2). Si cela n'est pas le cas, les connexions devraient être légèrement modifiées.

## 8.2 Mesures pour les appareils à très haute tension

Le présent chapitre s'applique uniquement à la très haute tension. Les appareils dans des sous-stations de niveau de tension inférieur ne devraient avec une grande probabilité pas subir de dégâts essentiels lors de tremblements de terre ; à l'exception peut-être des disjoncteurs 150 kV à centre de gravité élevé de conception ancienne.

De l'analyse de la vulnérabilité des appareils à très haute tension (cf. chapitres 6.2, 6.3 et 6.4) on peut conclure qu'en Suisse – à l'exception des disjoncteurs – il ne faut s'attendre qu'à peu de dégâts directs dus aux forces d'inertie apparaissant pendant un tremblement de terre. Mais lors d'un séisme de dimensionnement, de nombreux disjoncteurs devraient subir des dégâts à partir de la zone 2. Le type de défaillance le plus probable est la rupture à la base de l'isolateur support.

Pour les nouveaux appareils à très haute tension, il est recommandé de demander au fabricant pour les zones 3a et 3b un certificat de comportement conforme en cas de séisme du niveau de qualification AF3 et pour les zones 2 et 1 un certificat du niveau de qualification AF2 (cf. chapitre 5.3). Mais attention : ces certificats ne sont valables en règle générale que pour un montage rigide. Si les appareils sont montés sur des châssis-supports flexibles, il faut prendre contact avec le fabricant pour clarifier leur influence. Selon les circonstances, dans ces cas-là, une qualification sismique d'un niveau au-dessus pour les appareils s'avère nécessaire (AF5 au lieu d'AF3, AF3 au lieu d'AF2 dans la zone 2). De plus, les châssis-supports doivent présenter un dimensionnement suffisant et les ancrages doivent être non seulement suffisamment résistants, mais également le plus rigides possible et sans jeu.

Un comportement certifié en cas de séisme ne garantit pas encore, en lui-même, un comportement sismique satisfaisant. Il faut aussi s'assurer du mou suffisant des connexions entre les appareils. Naturellement, il faut en même temps veiller à respecter les distances minimales de phase à phase ou par rapport à la terre requises par les lois de l'électricité et veiller également à ce que les forces apparaissant lors d'un court-circuit ne provoquent pas de dégâts aux appareils.

La norme US IEEE Std 693-2005 [U1], chapitre 5.4, recommande la configuration de conducteurs représentée dans l'illustration 8.2. Normalement, il est avantageux de prévoir un décalage vertical entre les points de connexion voisins, car ceci permet une connexion flexible sans mettre en cause les distances électriques minimales requises.

Lors du renouvellement d'installations existantes ou de la construction de nouvelles installations, le dimensionnement des mous nécessaires peut également être effectué à l'aide de la norme US IEEE Std 693-2005 [U1], chapitre 5.4. La longueur nécessaire du conducteur  $L_0$  entre deux appareils raccordés doit être au minimum :

$$L_0 = L_1 + 1.5 u_{\max} + L_2. \quad (2)$$

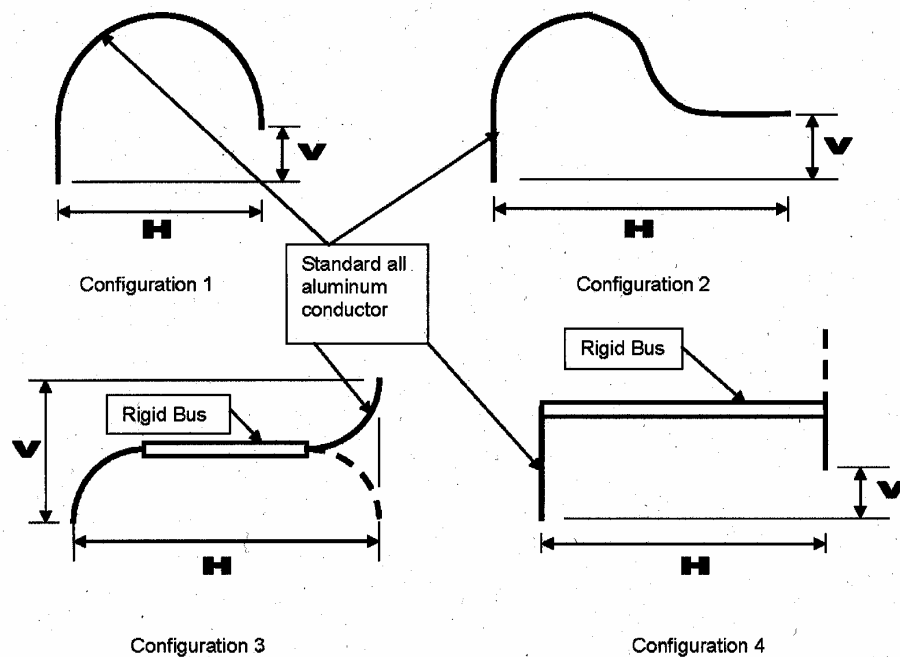
avec

$L_0$  = la longueur du conducteur minimale nécessaire,

$L_1$  = la distance la plus courte entre les points de raccordement,

$L_2$  = une longueur supplémentaire dépendant de la configuration du conducteur (voir en bas),

$u_{\max}$  = le déplacement relatif maximal des points de connexion pendant un tremblement de terre.



ill. 8.2 : Configurations recommandées de conducteurs pour satisfaire les exigences aussi bien électriques que sismiques (de [U1]).

La longueur supplémentaire  $L_2$  dépend de la configuration des conducteurs et de la rigidité à la flexion – en général non négligeable – du conducteur ; son rôle est d'assurer que les points de connexion ne doivent pas endurer des moments de flexion inutiles. La longueur  $L_2$  peut être déterminée à l'aide d'essais ou de calculs.

Le déplacement relatif maximal  $u_{\max}$  peut être déterminé comme la somme de déplacements individuels des points de raccordement des appareils (de [U1], version conservatrice préférée) ou à l'aide de formules reconnues de superposition (voir plus bas) des déplacements individuels. Dans ce contexte, il faut prendre en considération que l'interaction sol-ouvrage, généralement négligée lors de calculs sismiques, peut conduire à une sous-estimation des déplacements, et introduit une incertitude. Donc, lors du renouvellement d'installations existantes ou lors de la construction de nouvelles installations, il est tout à fait raisonnable de déterminer prudemment  $u_{\max}$  comme la somme des déplacements individuels donnés par le calcul.

L'appréciation des connexions existantes peut en revanche se faire avec une formule moins conservatrice selon la norme US IEEE Std 1527-2006 [U2], chapitre 4.4 :

$$L_0 = L_1 + 1.25 u_{\max} + L_2. \quad (3)$$

La norme mentionnée recommande ici de lier  $u_{\max}$  à la racine de la somme des carrés des déplacements individuels, donc d'appliquer la règle dite SRSS (« Square Root of the Sum of Squares »). La formule un peu moins conservatrice CQC (« Complete Quadratic Combination ») est déconseillée, car ses résultats dépendent sensiblement de la connaissance exacte des fréquences propres et des amortissements des différents appareils, qui généralement ne sont pas connus de façon précise.

Il n'a pas été établi jusqu'à présent, de façon quantitative, jusqu'à quel point les forces d'interaction entre les différents appareils du fait d'un mou insuffisant des connexions ainsi que jusqu'à quel point les ancrages présentant des défauts constituent un problème pour les appareils à très haute tension. Mais l'exemple de l'ill. 6.8 laisse supposer que du moins à partir de la zone 2, des problèmes devraient exister en de nombreux endroits.

Il serait économiquement peu réaliste de demander de remplacer avant l'heure des disjoncteurs existants à cause de leur comportement non adapté en cas de séisme plutôt qu'en raison de leur âge. Mais il est recommandé de lancer une recherche pilote dans un petit nombre de sous-stations pour examiner en particulier les mous existants dans les connexions et la qualité des ancrages. Elle permettrait une meilleure estimation quantitative de l'importance réelle des problèmes en Suisse.

De plus, il faudrait réfléchir à la question des réserves raisonnables d'appareils de rechange, en particulier de disjoncteurs.

### 8.3 Mesures pour les systèmes secondaires

Les mesures proposées sont valables pour les sous-stations de tous les niveaux de tension et pour toutes les zones sismiques.

Les nouvelles constructions équipées de systèmes secondaires importants devraient être dimensionnées pour les tremblements de terre selon les normes SIA en vigueur (particulièrement la norme SIA 261) pour les exigences de la classe d'ouvrages III.



Pour les bâtiments existants, il faut partir à priori du principe qu'ils ne remplissent pas les exigences de la norme SIA actuelle. Il est donc recommandé de lancer une campagne d'inventaire de tous les bâtiments contenant des systèmes secondaires importants. Dans un premier temps, ces bâtiments pourraient faire l'objet d'une analyse de leur sécurité sismique selon la procédure OFEV, étape 2. Pour des bâtiments simples dont les plans de construction existent, il faut investir jusqu'à 4 jours, pour des bâtiments plus complexes quelques jours de plus. Si les plans de construction ne sont pas disponibles, il faut compter le temps supplémentaire pour établir les plans et faire des sondages.

Les doubles planchers qui ne sont pas appuyés à des murs solides de tous les côtés (!) ou qui présentent de larges ouvertures doivent être contreventés pour pouvoir reprendre des forces horizontales. Cela devrait être possible à des coûts raisonnables même pour les doubles planchers existants.

Les batteries de secours doivent impérativement être sécurisées contre le basculement ou la chute. De plus, il convient d'empêcher à l'aide de cales minces en élastomère que les boîtiers relativement fragiles ne s'entrechoquent violemment. Les armoires de commande doivent être ancrées de telle manière qu'elles ne puissent pas basculer. Cela est généralement possible avec de simples fixations, de préférence directement dans la dalle en béton. Ces mesures peuvent être appliquées aussi à des installations existantes avec des moyens très simples.

De plus, il faut analyser si une sécurisation contre les tremblements de terre est nécessaire pour d'autres systèmes secondaires. Dans les sous-stations souterraines par exemple, il faudrait aussi analyser le refroidissement des transformateurs ainsi que l'installation d'extinction de feu et, en cas de besoin, leur appliquer un confortement parasismique.

Les mesures mentionnées sont également justifiées même si le bâtiment lui-même n'est pas entièrement conforme aux normes parasismiques. Premièrement, les bâtiments se comportent souvent mieux que selon les prévisions établies par calcul et deuxièmement, il peut y avoir des tremblements de terre moins forts que le séisme de dimensionnement selon la norme SIA 261 mais qui, sans provoquer l'effondrement du bâtiment, peuvent par exemple conduire à la chute de batteries non sécurisées.

## 9. La marche à suivre

Le rapport présenté ici n'a pas pu répondre à toutes les questions ouvertes concernant le comportement face aux actions sismiques de la distribution d'énergie électrique au niveau de la haute tension. Les problèmes prédominants ont pu être reconnus qualitativement, mais dans beaucoup de cas leur ampleur quantitative reste encore vague. Par exemple, pour la problématique de mous insuffisants dans les connexions, l'ampleur de ce problème en Suisse n'est pas claire. C'est pourquoi il est recommandé, à l'aide de quelques études pilotes,

- d'obtenir des connaissances concrètes de l'ampleur des problèmes,
- d'évaluer la faisabilité ainsi que les coûts de mesures possibles de confortement à partir de quelques propositions concrètes.

Il faut prendre en considération que les études pilotes recommandées ne sont possibles qu'avec la collaboration active des entreprises électriques et éventuellement des fabricants d'appareils et de transformateurs. Les collaborateurs qui accompagnent cette étude doivent recevoir de leur hiérarchie un budget en heures correspondant. Sinon, il est pratiquement impossible de demander à un personnel souvent surchargé d'assurer l'accompagnement nécessaire.

## **9.1 Études pilotes sous-stations**

### **9.1.1 Transformateurs**

Les transformateurs représentent en quelque sorte le cœur des sous-stations et méritent pour cela une attention particulière. L'importance du problème de leur soulèvement dépend d'une manière déterminante des fréquences propres les plus basses des mouvements basculants possibles (mouvement basculant sur fondation rigide ou mouvement basculant avec fondation dans le sens d'une interaction sol-structure).

En ce qui concerne les transformateurs, il est recommandé d'utiliser la procédure suivante :

- mesures des fréquences propres de basculement de trois à cinq transformateurs représentatifs (uniquement possible lors d'une mise hors service ou sur des transformateurs de réserve),
- élaboration d'un avant-projet pour l'ancrage contre le basculement d'un transformateur existant, avec des propositions concrètes de construction et une estimation des coûts (judicieux pour un transformateur dans la zone 3a ou 3b).

Le but est d'élaborer des recommandations concrètes pour l'ancrage de transformateurs aussi bien existants et que nouveaux (quels transformateurs ancrer comment ?).

### **9.1.2 Protection parasismique pour les appareils à très haute tension**

Il est recommandé, comme marche à suivre, d'étudier pour une sous-station en zone sismique 1 et pour une sous-station en zone sismique 3a ou 3b les points suivants dans le cadre d'études pilotes :

- vérification des ancrages sur des exemples représentatifs des différents appareils,
- estimation des mous nécessaires dans les connexions entre les différents appareils.

Pour l'étude pilote dans la zone sismique 1, il s'agit de clarifier si les ancrages et les connexions existants sont éventuellement suffisants sans mesures particulières, respectivement si une limitation à quelques mesures simples est possible.

Dans la zone 3a ou 3b, de nombreuses mesures de confortement pour des ancrages et des connexions seront vraisemblablement nécessaires. Il faut cerner l'ampleur de ces mesures de confortement pour une partie représentative de la sous-station à analyser. Ensuite, il faut élaborer des solutions concrètes et estimer leurs coûts.

Il faut également discuter de la question du matériel de réserve, en particulier de celle des appareils les plus vulnérables.

Le but primaire consiste à élaborer des recommandations concrètes pour ce qui est nécessaire de conforter de manière raisonnable dans les sous-stations sans renouvellement simultané et ce qui est à prendre en considération lors d'un renouvellement.

De plus, il faudrait analyser dans quelle mesure il serait possible d'élaborer des propositions concrètes pour les mous nécessaires sous forme de tableaux génériques en tant qu'aides au dimensionnement.

### 9.1.3 Protection parasismique des systèmes secondaires

Il est recommandé, comme marche à suivre, d'éliminer les plus gros défauts dans le domaine de la commande, en particulier de

- sécuriser les batteries de secours contre le renversement et la chute, ainsi que d'empêcher les chocs des boîtiers entre eux par des cales en élastomère,
- sécuriser les armoires de commande contre le basculement,
- contreventer, là où c'est nécessaire, les faux-planchers pour éviter leur effondrement.

Le but est d'acquérir avec ces travaux de sécurisation des expériences concrètes, valables pour toutes les zones sismiques et tous les niveaux de tension.

De plus, pour les sous-stations de l'étude pilote, il faut vérifier de manière grossière la sécurité sismique selon le procédé OFEG, étape 2, des bâtiments abritant des systèmes secondaires importants.

## 9.2 Etude pilote pour une ligne de transport

Il est recommandé de lancer une étude pilote pour une ligne de transport, de préférence dans la zone 3b. Il s'agit ici de parcourir virtuellement une ligne avec un géologue connaissant les lieux et de vérifier s'il y a des mâts dont le socle de fondation pourrait être mis en danger par un séisme. Les dangers possibles sont

- instabilités de versants : les tremblements de terre provoquent des glissements de terrain en premier lieu dans des versants, qui, même sans tremblement de terre, sont des terrains glissants potentiels.
- liquéfaction du sol : il n'y a que quelques endroits en Suisse où cela est possible, car la durée des secousses présumées est tendanciellement insuffisante, vu les magnitudes relativement modestes, pour provoquer une liquéfaction complète du sol.

Le but est d'obtenir une meilleure appréciation de la vulnérabilité des lignes de transport en Suisse. Probablement, seuls peu de points faibles existent, et pourtant, un seul mât déstabilisé peut mettre toute une ligne hors service. Il est donc tout à fait permis de penser que ces quelques points faibles éventuels devraient pouvoir être éliminés sans efforts trop coûteux.

## 9.3 Propositions administratives

En collaboration avec l'ESTI, des propositions concrètes doivent être élaborées pour permettre de savoir ce que l'on peut ou doit demander raisonnablement

comme protection parasismique dans le sens de « Good Practice » lors des renouvellements.

## 10. Sources

### 10.1 Normes et directives concernant la sécurité sismique

Les normes et directives mentionnées contiennent toutes des prescriptions concernant la sécurité sismique ou concernent exclusivement ce sujet.

#### 10.1.1 Normes suisses

- [S1] SIA 261 (2003) : Actions sur les structures porteuses, Norme Suisse SN 505 261, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich.
- [S2] SIA 2018 (2004) : Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants, cahier technique, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich.

#### 10.1.2 Normes européennes

- [E1] (SN)EN 60255-21-1:1995 [IEC 60255-21-1:1988] : Relais électriques -- Partie 21 : Essais de vibrations, de chocs, de secousses et de tenue aux séismes applicables aux relais de mesure et aux dispositifs de protection -- Section 1 : Essais de vibrations (sinusoïdales).
- [E2] (SN)EN 60255-21-2:1995 [IEC 60255-21-2:1988] : Relais électriques -- Partie 21 : Essais de vibrations, de chocs, de secousses et de tenue aux séismes applicables aux relais de mesure et aux dispositifs de protection -- Section 2 : Essais de chocs et de secousses.
- [E3] (SN)EN 60255-21-3:1995 [IEC 60255-21-3:1993] : Relais électriques -- Partie 21 : Essais de vibrations, de chocs, de secousses et de tenue aux séismes applicables aux relais de mesure et aux dispositifs de protection -- Section 3 : Essais de tenue aux séismes.
- [E4] (SN)EN 61166:1993 [IEC 61166:1993] : Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension - Guide pour la qualification sismique des disjoncteurs à courant alternatif à haute tension. *Remarque : la norme IEC servant de base a été retirée en 2006 ; une nouvelle norme, IEC 62271-300, est en préparation.*
- [E5] (SN)EN 61587-2:2001 [IEC 61587-2:2000] : Structures mécaniques pour équipement électronique - Essais pour la CEI 60917 et la CEI 60297 -- Partie 2 : Essais sismiques pour baies et bâtis.
- [E6] (SN)EN 62271-2:2003 [IEC 62271-2:2003], remplacé par EN 62271-207:2007 : Appareillage à haute tension -- Partie 2 : Qualification sismique pour tension assignée égale ou supérieure à 72,5 kV.
- [E7] (SN)EN 62271-207:2007 [IEC 62271-207:2007] : Appareillage à haute tension -- Partie 207 : Qualification sismique pour ensembles d'appareillages à isolation gazeuse pour des niveaux de tension assignée supérieurs à 52 kV.
- [E8] Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes (EN 1998), CEN, Bruxelles.

### 10.1.3 Normes CEI et autres publications CEI

Seules sont mentionnées ici les publications supplémentaires CEI qui n'ont pas été reprises comme normes CENELEC et qui n'ont pas déjà été mentionnées comme telles dans le point 10.1.2.

- [11] IEC 60721-2-6, éd. 1.0 (1990) : Classification des conditions d'environnement. Deuxième partie : Conditions d'environnement présentes dans la nature. Vibrations et chocs sismiques, CEI.
- [12] IEC TS 61463 (2000) : Spécification technique, Traversées - Qualification sismique, CEI.
- [13] IEC TR 62271-300 (2006) : Guide, Appareillage à haute tension - Partie 300 : Qualification sismique des disjoncteurs à courant alternatif, CEI.
- [14] IEC 68-3-3 (1991) : Norme internationale, Essais d'environnement, troisième partie : guide, Méthodes d'essais sismiques applicable aux matériels, CEI.
- [15] IEC 62271-207 (2007) : Norme internationale, qualification sismique pour ensembles d'appareillages à isolation gazeuse pour des niveaux de tension assignée supérieures à 52 kV, CEI.

### 10.1.4 Standards US et directives (IEEE, ASCE)

- [U1] IEEE Std 693-2005 : IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations, recognized as an American National Standard, IEEE Power Engineering Society, New York.
- [U2] IEEE Std 1527-2006 : IEEE Recommended Practice for the Design of Flexible Buswork Located in Seismically Active Areas, IEEE Power Engineering Society, New York.
- [U3] ASCE (2008) : Substation Structure Design Guide.

### 10.2 Autres sources de littérature

- [1] ASCE (1999), "Guide to Improved Earthquake Performance of Electric Power Systems", ed. A.J. Schiff, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice n° 96, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- [2] Bastami, M. (2007), "Seismic Reliability of Power Supply System Based on Probabilistic Approach", PhD thesis, Kobe University, Japan. Non publié, car contenant des données confidentielles ; mais elle a pu être visionnée.
- [3] Bastami, M. (2008), "Seismic Assessment of Medium and High Voltage Power Substation Equipments", Proceedings 14<sup>th</sup> WCEE, Beijing, China.
- [4] Khalvati A.H. & M. Hosseini (2008), "Seismic Performance of Electrical Substations' Equipments in Iran's Recent Earthquakes", Proceedings 14<sup>th</sup> WCEE, Beijing, China.
- [5] Studer Engineering (2001), "Verhalten von Gas-, Wasser-, Elektrizität- und Fernwärme-Infrastruktur bei Erdbeben der letzten zehn Jahre", rapport confidentiel pour l'IWB, Bâle.
- [6] Labbé, P., J.P. Touret & P. Sollogoub (2000), "Effets du séisme sur les équipements. Le retour d'expérience", AFPS, Cahier Technique n° 18, Paris.
- [7] Tiedemann, H. (1992), "Earthquakes and Volcanic Eruptions", SwissRe, Zürich.

### 10.3 Sources des illustrations

Les sources des illustrations sont indiquées dans la plupart des cas dans les légendes, sauf pour les exceptions suivantes :

- les illustrations 3.1, 3.2, 3.3 et 6.12 proviennent du "National Information Service for Earthquake Engineering" (NISEE), University of Berkeley, Californie, USA.
- les illustrations 6.1 à 6.6 ont été mises à disposition par Monsieur A. Guérig, NOK, que nous remercions cordialement.

Comme la thèse de Bastami [2] n'est pas accessible au public, les illustrations 3.4, 3.5 et 6.10 de [2] ont été mises à disposition personnellement par M. Bastami, dûment remercié ici. Les illustrations sans indication de source proviennent soit de l'auteur soit du mandant.