

Principe pour l'établissement et l'utilisation d'études de microzonage en Suisse

Richtlinien des BWG – Directives de l'OFEG – Direttive dell'UFAEG
Berne, 2004

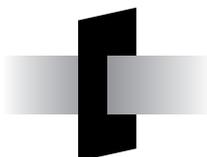


Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation
Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti,
dell'energia e delle comunicazioni

Principe pour l'établissement et l'utilisation d'études de microzonage en Suisse

Richtlinien des BWG – Directives de l'OFEG – Direttive dell'UFAEG
Berne, 2004



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

Impressum

Editeur:	Office fédéral des eaux et de la géologie, OFEG
Tirage:	1500d/700f
Source à mentionner:	Principe pour l'établissement et l'utilisation d'études de microzonage en Suisse, Directives de l'OFEG 2004
Langue:	Version originale en français
Traduction:	Petra Blaser, Petraconsult, Arni (version allemande) Avec la contribution de Hugo Raetzo, (OFEG), Bienne
Figures de couverture:	Tous les extraits de cartes sont reproduits avec l'autorisation de swisstopo PK25/500, DHM25, Luftbild © 2004 swisstopo (BAO46448)
Internet:	Cette publication est disponible sous format PDF sur le site Internet de l'OFEG: www.bwg.admin.ch
Diffusion:	OFCL, Diffusion des publications, CH-3003 Berne, Internet: www.bbl.admin.ch/bundespublikationen
No de commande:	804.806.f
Copyright:	©BWG, Bienne, novembre 2004

Auteurs

Olivier Lateltin (présidence), Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Bienne

Blaise Duvernay, SGEB, Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Bienne

Donat Fäh, GSGL, Service sismologique suisse (SED), EPF Zurich

Prof. Domenico Giardini, Service sismologique suisse (SED), EPF Zurich

Christoph Haemmig, Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Bienne

Corinne Lacave, SGEB/GSGL, Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge

Pascal Tissières, SGEB/GSGL Bureau d'ingénieurs Tissières, Martigny

Florian Widmer, Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Bienne

Groupe d'accompagnement

Christoph Beer, GSGL, Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Berne

Peter Haldimann, Président GSGL, Bureau Dr. H. Jäckli AG, Zurich

Prof. Simon Löw, GSGL, Ingenieurgeologie EPF, Zurich

Walter Müller, GSGL, NAGRA, Zurich

Prof. Aurèle Parriaux, GSGL, Geolep-ENAC, EPF Lausanne

Martin Koller, SGEB, Résonance Ingénieurs-Conseils, Carouge

Jost Studer, GSGL/SGEB, Bureau Studer Engineering, Zurich

Thomas Wenk, président SGEB, Commission de la Norme SIA 261, Wenk Engineering, Zurich

Préface de l'éditeur

Au début de l'année 2003, la Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA) a publié les nouvelles normes SIA 260 à 267 (Swisscodes), de façon à ce qu'elles soient compatibles avec les normes européennes (Eurocodes), actuellement en cours d'élaboration, tout en tenant compte des besoins spécifiques de la Suisse. Comme toutes les autres normes nationales, ces nouvelles normes n'ont pas encore de caractère légal. Mais, en cas de sinistre consécutif à un tremblement de terre, comme elles représentent l'état de l'art, ces Swisscodes définissent le standard de la construction. Certaines exigences, spécialement en ce qui concerne la sécurité des nouvelles constructions et les effets de site en cas de séismes, ont été étendues et renforcées.

La sécurité parasismique des ouvrages futurs figure au premier plan du programme de mesures en sept points de la Confédération (Décision du Conseil fédéral du 11 décembre 2000). Grâce à la collaboration du Service

sismologique suisse (SED/EPFZ), du Groupement suisse de la géologie de l'ingénieur (GSIG) et de la Société suisse du génie parasismique et de la dynamique des structures (SGEB/SIA), la Centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'OFEG a élaboré ce guide pour l'établissement d'études de microzonage, en complément à la norme SIA 261 «Actions sur les structures porteuses». Le but des présentes directives est de faciliter la tâche des professionnels de la construction, en sorte qu'ils prennent mieux en compte l'effet de site dans la conception parasismique et l'étude des ouvrages. Ainsi sera-t-il désormais possible, dans notre pays à sismicité modérée, en appliquant les normes de construction SIA et en tenant compte des sols de fondations, de conférer une sécurité parasismique raisonnable aux nouvelles constructions, sans surcoût notable.

Bienne, novembre 2004

Dr. Christan Furrer
Directeur de l'Office fédéral
des eaux et de la géologie

Table des matières

1. Introduction	8
1.1 Définitions, objectifs et public cible	
1.2 Justificatifs	
1.3 Risque sismique en Suisse	
1.4 Aléa sismique régional en Suisse	
1.5 Classes d'ouvrages et protection parasismique	
1.6 Types de microzonage	
1.7 Choix du type de microzonage	
2. Description des phénomènes	20
2.1 Tremblements de terre	
2.2 Effets de site	
2.3 Effets induits	
2.4 Fréquence fondamentale du sol et résonance sol/structure	
3. Carte des sols de fondation selon SIA 261	30
3.1 Définition	
3.2 Application de la carte des sols de fondation	
3.3 Données de base et documents d'accompagnement	
3.4 Transcription de la légende géologique	
3.5 Légende et interprétation de la carte des sols de fondation	
4. Etude de microzonage sismique spectral	35
4.1 Aléa régional	
4.2 Détermination de l'amplification spectrale	
4.3 Spectre de réponse élastique spécifique au site et carte de microzonage spectral	
4.4 Méthodes	
4.5 Exemples d'études de microzonage spectral (Brig-Visp et Bâle)	
5. Aspects juridiques du microzonage	51
5.1 Cartes de dangers et aménagement du territoire	
5.2 Les devoirs des autorités, des mandataires et du propriétaire	
Annexes	54
A Glossaire	
B Echelle d'intensité EMS 98	
C Définition et utilisation des spectres de réponse	
D Cartes de sols de fondation interactives sur Internet	
Liste des Figures et des Tableaux	62
Bibliographie	64

1. Introduction

1.1 Définitions, objectifs et public cible

Le microzonage est la prise en compte des effets de la géologie et de la topographie locales sur les sollicitations sismiques. Selon la nouvelle norme SIA 261 «Actions sur les structures porteuses» (2003), l'influence de la nature du sol de fondation est en général prise en considération par l'attribution de l'emplacement de l'ouvrage à une des six classes de sol de fondation définies dans la norme. Aux emplacements où les particularités du sol de fondation ne peuvent être décrites selon les critères de la norme, il est nécessaire de procéder à des examens particuliers pour déterminer l'action due au séisme. Ces effets sont à prendre en compte lors de la planification et du dimensionnement de nouveaux ouvrages, ainsi que lors de la vérification de la sécurité parasismique d'ouvrages existants.

L'objectif du microzonage est d'obtenir un niveau de sécurité homogène pour les nouveaux ouvrages quelle que soit la zone sismique ou la géologie locale. Il sert également à identifier les zones dont les sols peuvent comporter des caractéristiques particulièrement défavorables en cas de tremblement de terre et pour lesquels des mesures spéciales peuvent être requises. Le microzonage peut se faire selon deux niveaux. Le premier niveau, le microzonage selon SIA 261, est basé sur l'application de la norme de construction SIA 261, qui définit les sollicitations sismiques sur la base d'une carte des zones sismiques et des classes de sol de fondation. La carte des classes de sol de fondation et d'autres documents pour la prise en compte des effets géométriques servent d'instruments d'aide à l'application. Le second niveau, dit de microzonage spectral, est réservé aux secteurs ou aux ouvrages importants. Il permet de calculer l'influence de la géologie locale et d'obtenir des résultats spécifiques à la zone étudiée, par conséquent plus précis que ceux provenant de l'application directe de la norme de construction SIA 261.

La présente publication fournit des directives complémentaires à la norme SIA 261 permettant d'établir des cartes de microzonage et facilitant leur utilisation par les professionnels (géologues, ingénieurs ou architectes) chargés de la conception et de la réalisation de nouveaux ouvrages. Elle s'adresse aussi aux autorités communales, cantonales ou fédérales chargées de la planification du territoire ou de l'attribution de permis de construire, ainsi qu'aux instances politiques appelées à prendre des décisions concernant les activités ayant des effets sur l'organisation du territoire. Cette publication concerne aussi tous les propriétaires qui devraient être informés sur les actions sismiques concernant leurs parcelles.

1.2 Justificatifs

Les contrastes liés à certaines conditions géologiques et topographiques locales sont susceptibles de modifier la durée, la bande de fréquence et l'amplitude d'un signal sismique incident, de manière parfois très importante et sur une courte distance. Ce phénomène, communément nommé effet de site, est connu depuis le Moyen Age au moins, puisque à la suite du séisme d'Istanbul de 1509, le Sultan Bayazid II a interdit la construction de maisons en zones côtières sur les sols meubles.

Cependant, il faut attendre les années 1980 pour leur prise en compte approfondie par la communauté sismologique internationale, à la suite des séismes de Mexico (1985) et de Loma-Prieta (1989). En effet, la forte variation des dommages dus à un même séisme, dans des secteurs pourtant très voisins (quelques centaines de mètres), ne pouvait qu'être imputée à la géologie locale. Dans l'échelle d'intensité des dommages (MSK), on a noté des différences allant jusqu'à 2 unités d'intensité à quelques kilomètres de distance.

La Suisse n'a pas été épargnée non plus par ces effets de site, comme l'attestent les dégâts engendrés par les séismes de Bâle (1356) ou d'Unterwalden (1601). Le centre historique de la ville de Bâle, situé sur des sols amplifiant fortement les ondes sismiques, a beaucoup souffert (secteurs St-Leonhard-Rathaus, Münster) (Figure 1). La même situation s'est reproduite à Lucerne le 18 septembre 1601, où de nombreux glissements sous-lacustres ont déstabilisé les sédiments fins de la rive occidentale du Lac des Quatre-Cantons, au sud de la ville. Les vieux quartiers construits sur les collines molassiques ont beaucoup mieux résisté que les habitations des quartiers plus récents se trouvant sur des sols fins de la plaine alluviale et des zones riveraines. D'autres séismes historiques ayant occasionné des dégâts pourraient illustrer encore ces effets de site en Suisse (Figure 2).

Les récents tremblements de terre de grande envergure (Northridge 1994, Kobe 1995, Izmit 1999 ou Alger 2003) ont confirmé que le sous-sol géologique a une très grande importance dans la répartition géographique des dégâts. L'influence décisive de la nature locale du sol de fondation sur l'intensité et le contenu fréquentiel dominant de l'excitation sismique est ainsi devenue de plus en plus évidente.

Cette accumulation de faits démontre qu'une meilleure connaissance de l'effet de site (ou de la modification locale des vibrations du sous-sol) par une étude de

microzonage est indispensable aux ingénieurs pour dimensionner des constructions aptes à résister sans grands dommages aux sollicitations sismiques potentielles.

En Suisse (Mayer-Rosa et al., 2000), les premières études de microzonage ont été réalisées dans le canton d'Obwald (Schindler et al., 1996) pour proposer une carte de facteur de correction de l'intensité sismique (échelle MSK) en fonction des sols. Il s'agit d'une étude qualitative de microzonage à l'échelle 1: 25'000, basée sur des corrections d'intensité en fonction de propriétés géotechniques et hydrogéologiques des sols. Une démarche similaire a été suivie à

Bâle (Noack et al., 1999), dans le canton de Soleure et la vallée d'Engelberg (Beer, 1997), ainsi qu'en Valais (Wagner et al., 2000) entre Susten et Brigue. Dans la région de Sion, les effets de site ont été analysés en termes de fréquence fondamentale et d'amplification (Wagner et al., 2000, Frischknecht, 2000). La modélisation numérique et les mesures de terrain du bruit de fond ont été appliquées pour obtenir des cartes d'amplification relative maximale et de fréquences associées à l'échelle locale. D'autres études en cours, du domaine de l'expertise dans le cas de construction (échelle 1: 5'000 à 1: 1'000), se basent sur des simulations numériques pour établir un spectre de dimensionnement spécifique au site de construction,

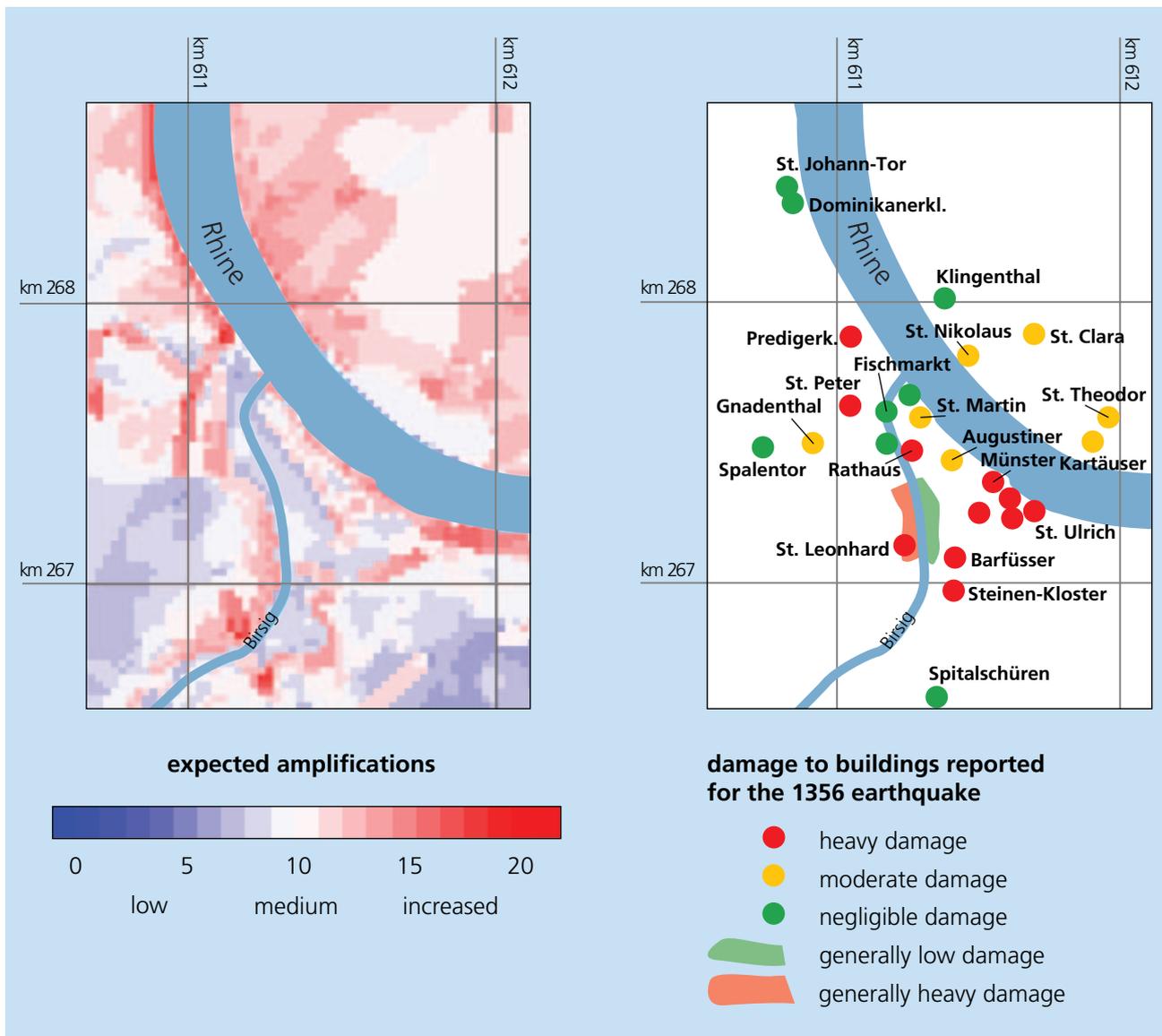


Figure 1: Vue d'ensemble des dégâts aux bâtiments lors du tremblement de terre de Bâle de 1356 et modélisation de l'effet de site (Fäh et al., Service Sismologique Suisse SED, 1997, modifié)

comme par exemple à Viège-Brigue, Monthey ou Bâle (Kind 2002, Kind et al. 2003). La Division principale de la Sécurité des Installations Nucléaires (HSK) a exigé en 1999 d'étudier l'effet de site spécifique aux centrales nucléaires en Suisse. Sous le nom de projet «PEGA-SOS» (Probabilistische Erdbebengefährdungsanalyse für die KKW-Standorte in der Schweiz), les exploitants des centrales nucléaires ont apporté une contribution importante au développement d'un nouveau catalogue des tremblements de terre en Suisse (ECOS, 2003), ainsi qu'aux études de l'effet de site à proximité des installations.

1.3 Risque sismique en Suisse

Le risque lié aux tremblements de terre est le résultat de l'aléa sismique multiplié par le potentiel de dégâts. Du point de vue de l'aléa, des séismes semblables à celui de Kobe au Japon (1995), d'une magnitude de 7 sur l'échelle de Richter, sont relativement rares mais peuvent néanmoins aussi se produire en Suisse. Durant les 700 dernières années, au moins 800 événements de magnitude estimée supérieure à 4, et 90 événements de magnitude supérieure à 5 se sont produits en Suisse et dans ses environs immédiats.

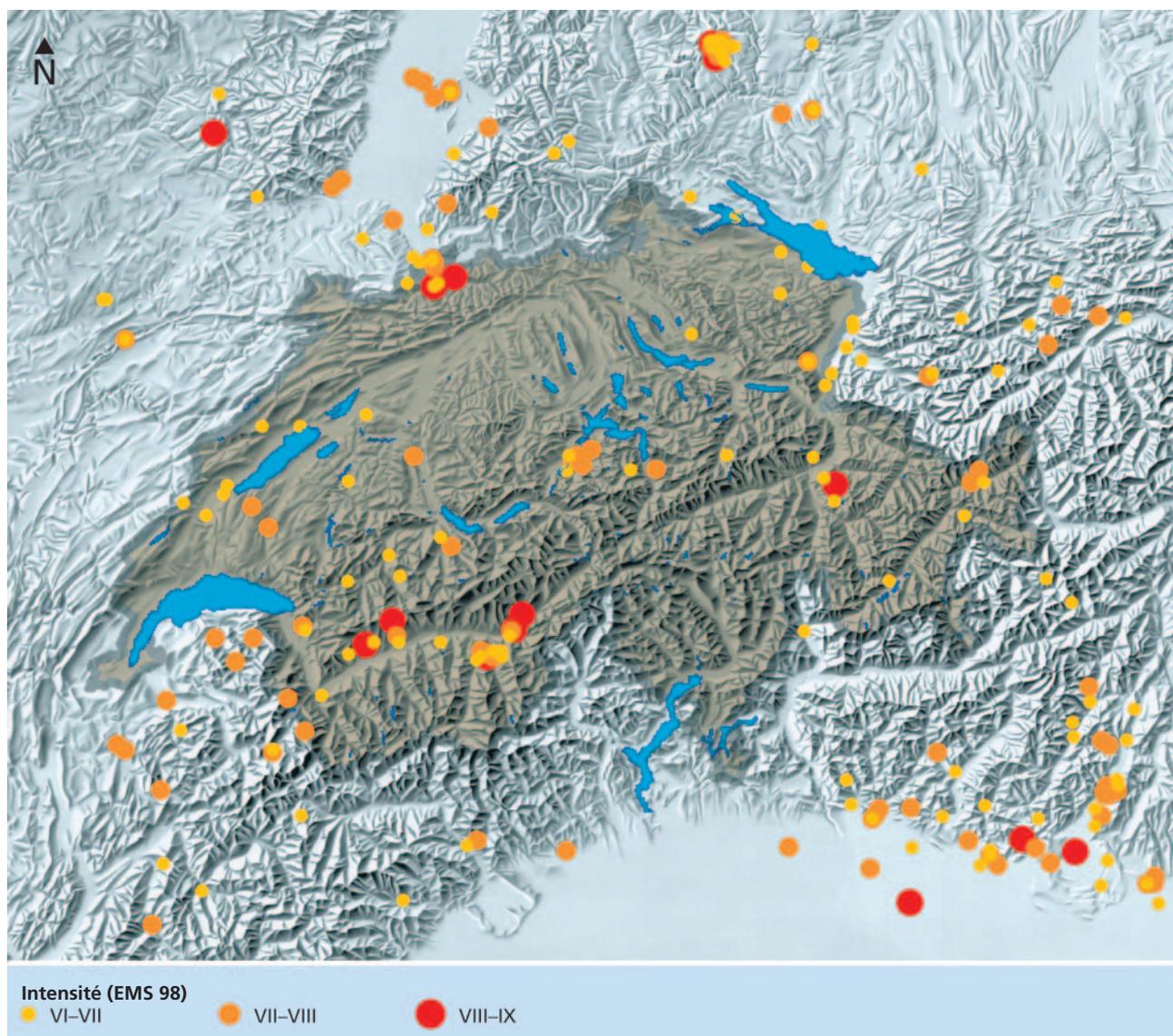


Figure 2: Répartition des tremblements de terre historiques ayant provoqué des dégâts. Source: SED (ECOS), 2003 (Fäh et al., 2003, modifié).

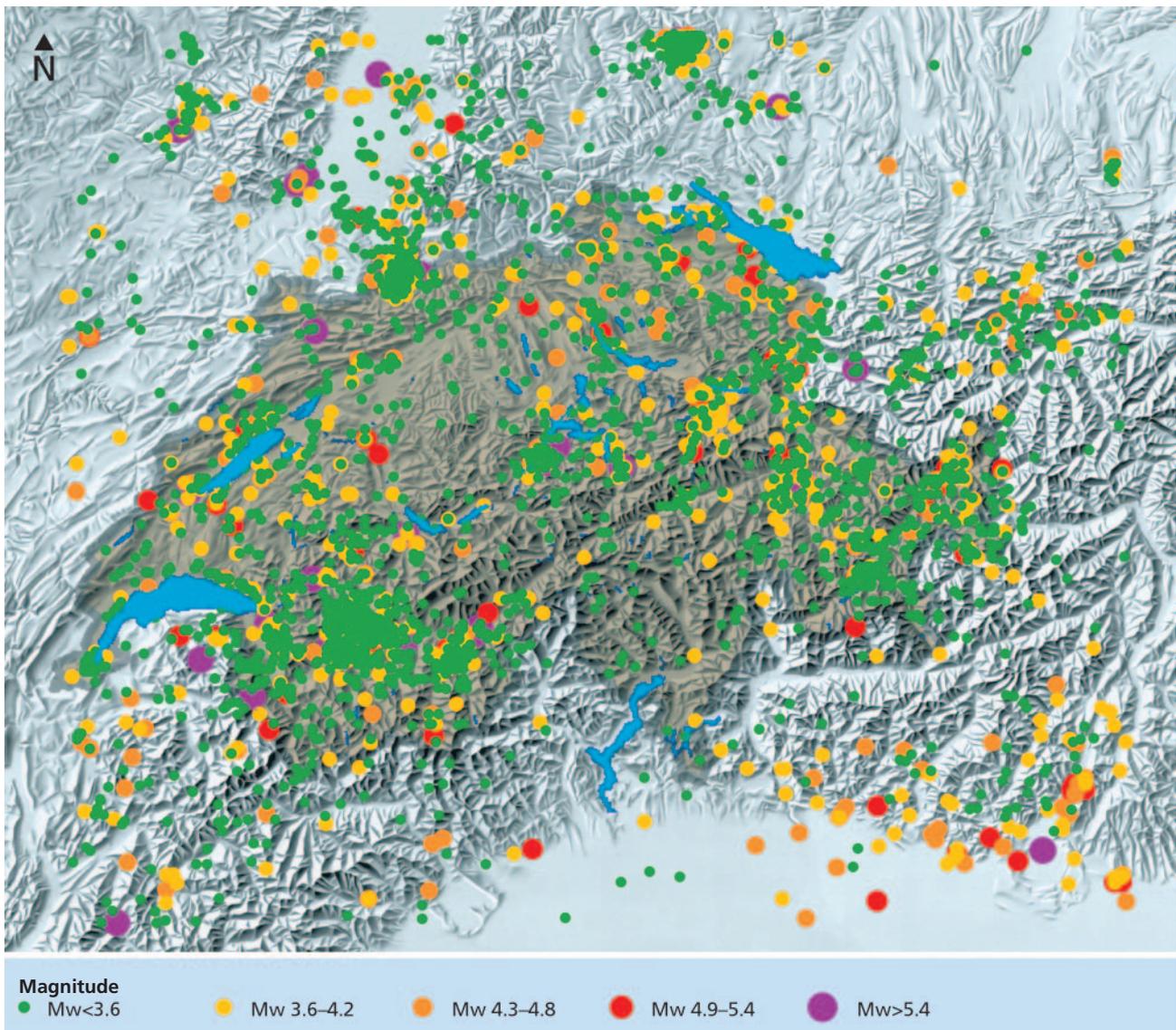


Figure 3: Epicentres et magnitudes moment observés en Suisse et répertoriés par le catalogue ECOS. Source: SED, 2003 (modifié).

On admet que des événements d'une magnitude de 5 se produisent en Suisse tous les 10 ans (magnitude 6: tous les 100 ans) (Figure 3). Le dernier séisme ayant occasionné des dégâts légers s'est produit à Vaz dans le canton des Grisons en 1991. Un séisme d'une magnitude 5–6 peut produire des dégâts dans un rayon d'environ 25 kilomètres; pour une magnitude 6–7, le rayon dépasse les 60 kilomètres. Une magnitude de 6.9 a été estimée pour le séisme qui a détruit partiellement la ville de Bâle en 1356. Des séismes plus faibles (à partir d'une magnitude 5) pourraient déjà entraîner des conséquences fâcheuses dans notre pays, car les constructions ne sont de loin pas systématiquement conçues et dimensionnées pour résister aux sollicitations d'un tremblement de terre.

En effet, plus de 90% des constructions en Suisse ont été réalisées avant 1989, et 70% avant 1970. Jusqu'à cette date, aucune norme parasismique n'existait encore pour les constructions. De 1970 à 1989, les prescriptions des normes étaient largement insuffisantes. C'est-à-dire qu'environ 90% des ouvrages existants ont été dimensionnés selon des règles non adaptées à la protection contre les tremblements de terre. Ces constructions peuvent ainsi ne pas offrir une sécurité suffisante face aux séismes et donc être vulnérables. De plus, l'amplification des ondes sismiques par l'effet de site, qui peut être importante à l'échelle locale en fonction de la situation géologique, n'a réellement été prise en compte de manière réaliste que dans la nouvelle édition des normes de construction datant de 2003.

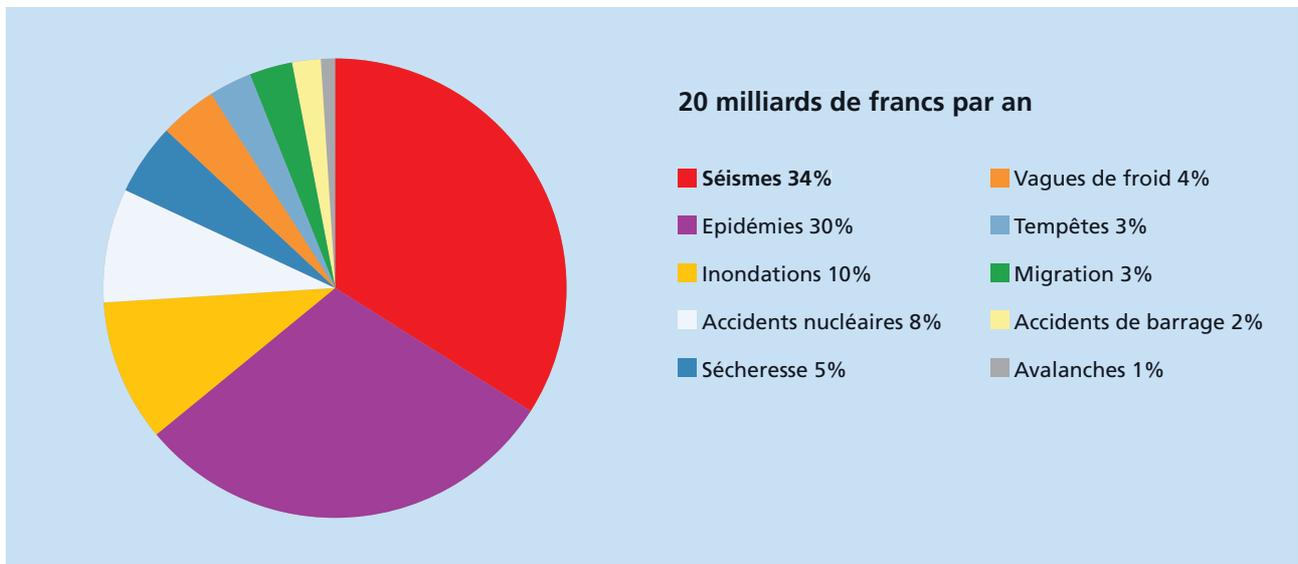


Figure 4: Répartition pondérée des risques en Suisse. Source: KATARISK, 2003.

L'étude KATARISK (2003) a mis en évidence que les tremblements de terre constituent en Suisse le risque prédominant (34%), plus important encore que celui constitué par les inondations ou les épidémies (Figure 4). Ce résultat est surtout le fait de l'énorme potentiel de dégâts lié à la vulnérabilité et à la forte concentration

du bâti en Suisse. En relation avec l'urbanisation et la construction, on a en effet constaté une nette augmentation de la population et des biens de valeur notable. Les constructions et les installations liées aux infrastructures publiques («Lifelines») ont également connu un énorme développement.

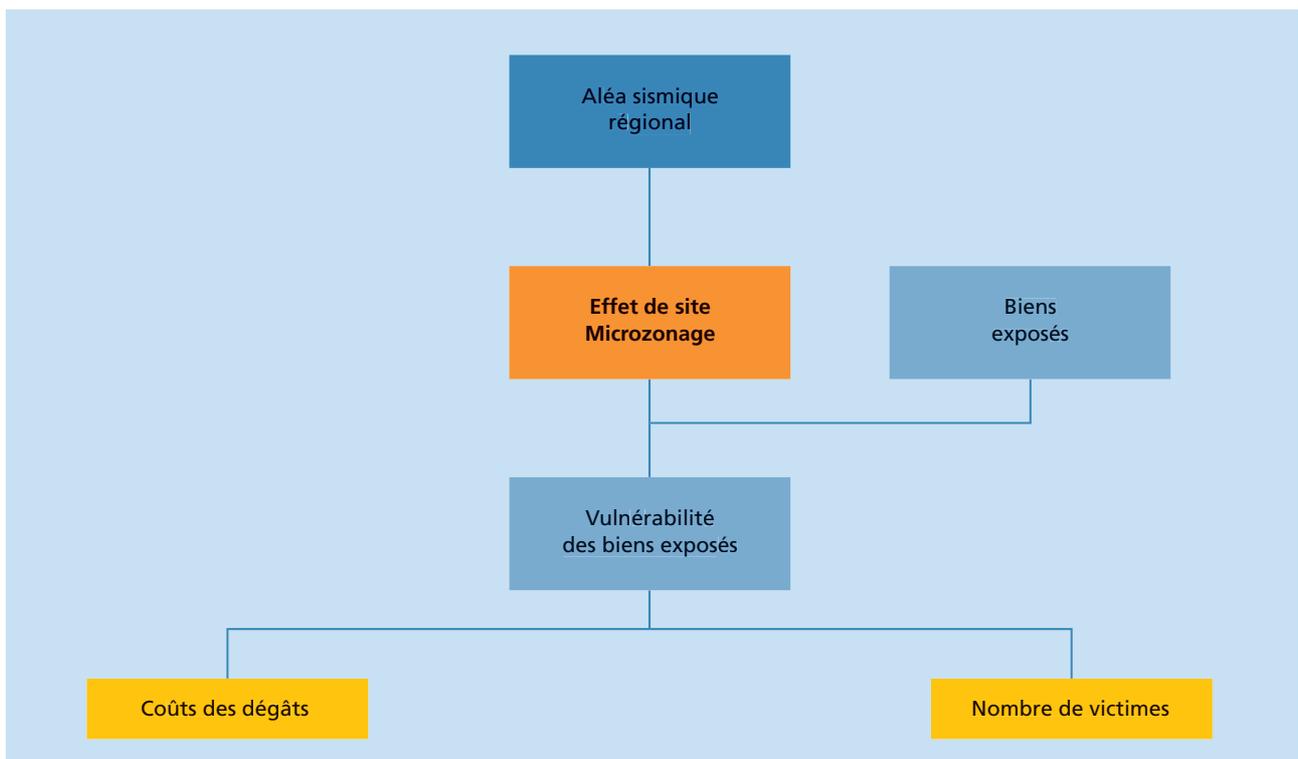


Figure 5: Modèle de calcul d'estimation des dégâts pour un séisme avec prise en compte de l'effet de site (microzonage).

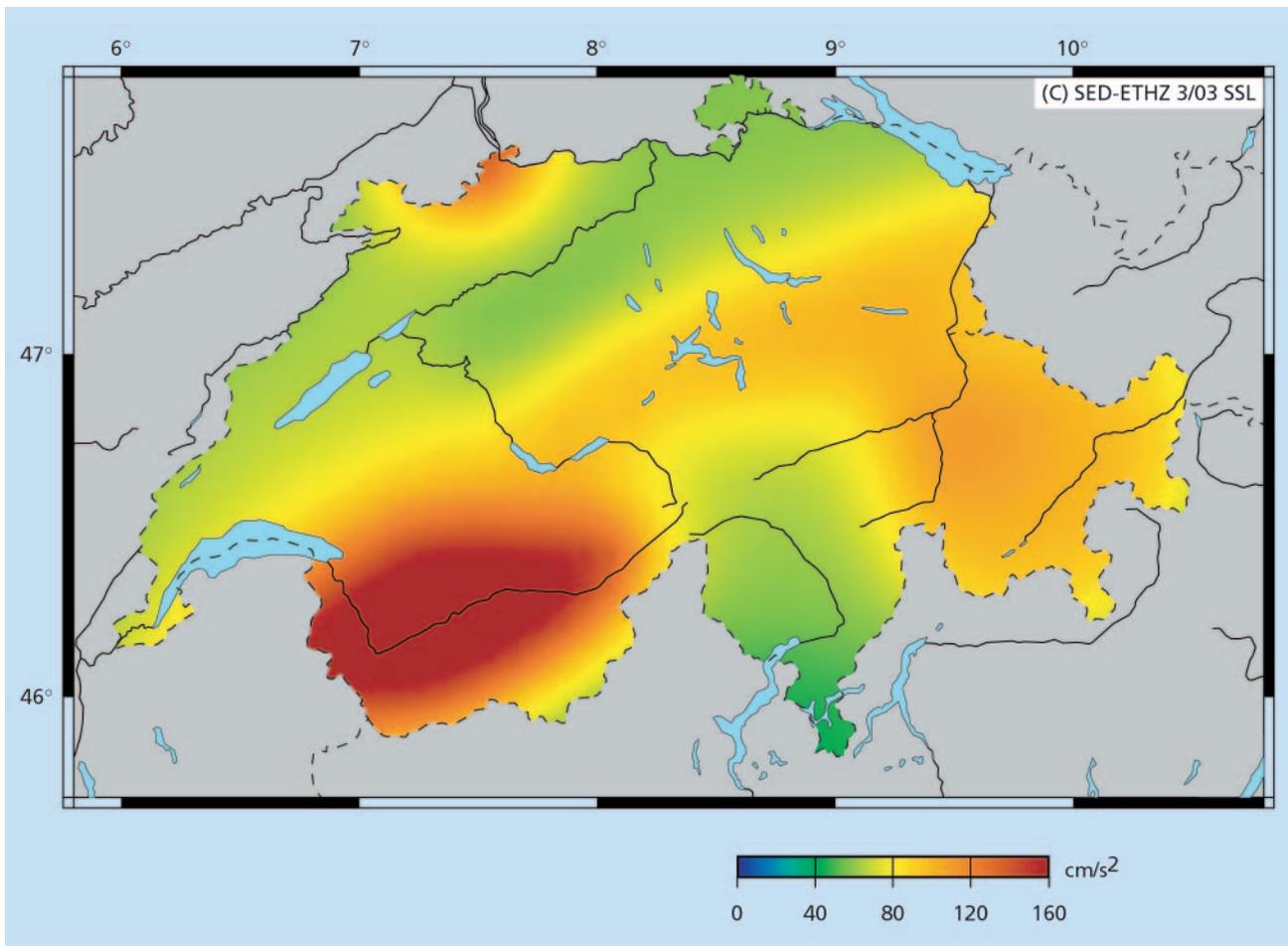


Figure 6: Carte de l'aléa sismique en Suisse représentée par la valeur de dimensionnement de l'accélération horizontale en cm/s^2 , pour une période de retour de 500 ans, Source SED, 2003.

Selon les statistiques des assureurs suisses, les immeubles assurés représentent une valeur d'environ 1800 milliards de francs. A cela s'ajoutent encore 700 milliards de biens mobiliers. Pour un épocentre donné, situé dans la région bâloise, approchant une magnitude de 6.5 et en tenant compte de l'effet de site, de l'inventaire des ouvrages, de la vulnérabilité du bâti et de l'atténuation des ondes sismiques en fonction de la distance (Figure 5), on s'attend à des dégâts de 45 milliards de francs aux constructions et d'environ 15 milliards de francs aux biens mobiliers. Les sociétés de réassurance en Suisse partent du principe, sur la base de leurs scénarios, que des dommages atteignant environ 7 milliards de francs (constructions et biens mobiliers) seront occasionnés pour un événement centennal (magnitude de 5.5–6), 40 milliards de francs pour un séisme d'une période de retour de 500 ans (magnitude de 6–6.5) et plus de 75 milliards de francs pour un événement millénial (magnitude supérieure à 6.5).

1.4 Aléa sismique régional en Suisse

L'aléa sismique en Suisse peut être considéré à l'échelle mondiale comme faible à modéré. Un danger plus élevé existe en Valais, dans la région de Bâle, en Suisse centrale, dans l'Engadine et dans la vallée du Rhin à Saint-Gall. L'aléa sismique, déterminé pour des paramètres caractéristiques tels que l'accélération horizontale maximale, par exemple, est défini comme la valeur statistique que peut atteindre ce paramètre pour un temps de retour donné et en fonction des séismes attendus. Il est calculé notamment à partir de la répartition statistique et géographique de l'ensemble des tremblements de terre historiques répertoriés. Le zonage de l'aléa sismique s'applique à l'échelle régionale, et désigne le procédé consistant à subdiviser une région en secteurs caractérisés par des comportements similaires eu égard aux paramètres déterminants de l'intensité sismique.

La carte des zones d'aléa sismique proposées dans la norme SIA 160 (édition 1989) se basait sur les premières études probabilistes des années 1970 de l'aléa sismique de la Suisse (Sägesser & Mayer-Rosa, 1978). Pour chaque zone, une valeur effective de l'accélération horizontale du sol pour un séisme de dimensionnement avait été fixée pour une période de retour de 400 ans. Les exigences plus sévères de l'Eurocode 8 requièrent comme valeur de dimensionnement la valeur maximale de l'accélération horizontale du sol pour une période de retour de 475 ans. Cette période de retour représente un standard international et correspond à une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans.

Ces 30 dernières années, de nombreux progrès ont été réalisés dans la détermination de l'aléa sismique en Suisse. Il faut relever d'une part le catalogue des séismes (ECOS, 2002), qui intègre toutes les données historiques et instrumentales et qui propose une évaluation homogène de la magnitude. D'autre part, les modèles de sources sismiques ont été affinés. Enfin, de nouvelles lois d'atténuation des ondes sismiques ont été développées pour la Suisse (Bay, 2002) pour des magnitudes comprises entre 3 et 5.5 et des distances entre 10 et 300 kilomètres.

Les nouvelles cartes d'aléa sismique du Service sismologique suisse (SED, 2003) indiquent:

- les valeurs d'accélération spectrale horizontale au rocher à 0.5, 1, 2, 3, 5, 10 et 12 Hz pour une roche dure (V_s : 1500 m/s) et pour une période de retour de 500 ans;
- les valeurs de dimensionnement de l'accélération horizontale maximale pour une période de retour de 500 ans (Figure 6).

Les valeurs de dimensionnement de l'accélération horizontale proposées sont très proches des accélérations effectives du sol prescrites jusqu'ici dans la norme SIA 160 (1989). Le maintien des quatre zones actuelles Z1, Z2, Z3a et Z3b avec leurs valeurs d'accélération respectives de 0,6 m/s², 1 m/s², 1,3 m/s² et 1,6 m/s² s'est ainsi imposé. L'extension géographique des zones de la nouvelle carte proposée par la SIA 261 (2003) correspond mieux (Figure 7) à la répartition de l'aléa sismique que celle de 1989. Le reclassement de la région bâloise (zone 3a) améliore la coordination avec les pays voisins le long de la frontière avec la France et l'homogénéité de la zone 3b en Valais facilite les procédures administratives.

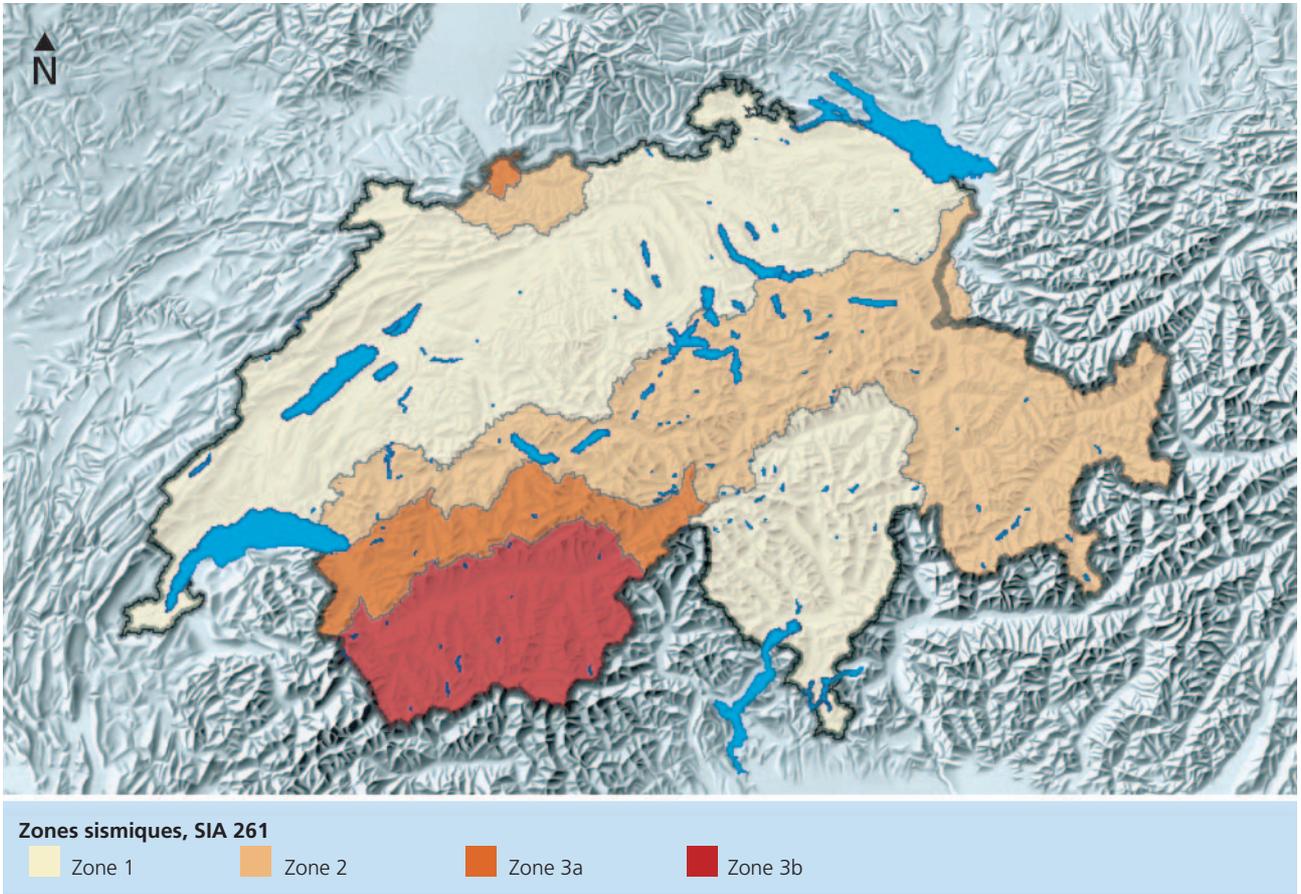


Figure 7: Carte des zones sismiques en Suisse selon la norme SIA 261 (2003).

1.5 Classes d'ouvrages et protection parasismique

Le degré de protection exigé lors du dimensionnement parasismique doit être adapté à l'importance de l'ouvrage. Ainsi, pour un même emplacement, les exigences pour un hôpital sont beaucoup plus sévères que pour un simple immeuble résidentiel.

Dans la norme SIA 261 (2003), trois classes d'ouvrages sont définies. Le choix de la classe d'ouvrage appropriée se fait suivant l'importance de l'ouvrage pour la collectivité ou selon son potentiel d'atteinte à l'environnement en cas d'endommagement. Le Tableau 1 présente la définition des 3 classes d'ouvrages ainsi que des exemples types qui y appartiennent.

CO	Caractéristiques	Exemples
I	<ul style="list-style-type: none"> – pas de rassemblements importants de personnes – pas de marchandises ou d'installations ayant une valeur particulière – pas de risque d'atteinte à l'environnement 	<ul style="list-style-type: none"> – bâtiments d'habitation, bâtiments administratifs et artisanaux – bâtiments industriels et entrepôts – parkings – ponts dont l'importance après un séisme est faible (p.ex. passerelles pour piétons et ponts à usage rural ou forestier, s'ils ne franchissent pas des voies de communication importantes)
II	<ul style="list-style-type: none"> – fréquentation possible par un grand nombre de personnes – marchandises ou installations ayant une valeur particulière – infrastructure ayant une fonction importante – risque limité d'atteinte à l'environnement 	<ul style="list-style-type: none"> – hôpitaux, avec leurs équipements et installations, s'ils n'appartiennent pas à la classe III – centres d'achats, stades, cinémas, théâtres, écoles et églises – bâtiments de l'administration publique – ponts d'une grande importance après un séisme ou ponts franchissant des voies de communication importantes après un séisme – murs de soutènement et talus bordant des voies de communication importantes après un séisme – ouvrages, équipements et installations destinés à l'approvisionnement, à l'évacuation et aux télécommunications s'ils n'appartiennent pas à la classe III – cheminées de grande hauteur
III	<ul style="list-style-type: none"> – infrastructures ayant une fonction vitale – risque considérable d'atteinte à l'environnement 	<ul style="list-style-type: none"> – hôpitaux d'urgence avec leurs équipements et installations – ouvrages, équipements et installations servant à la protection en cas de catastrophe (p.ex. bâtiments du feu ou garages des ambulances) – ponts d'une grande importance pour la desserte d'une région après un séisme – murs de soutènement et talus bordant des voies de communication essentielles pour la desserte de certains ouvrages ou d'une région après un séisme – ouvrages d'une importance vitale pour l'approvisionnement, l'évacuation et les télécommunications – ouvrages, équipements et installations dont la détérioration pourrait mettre en danger l'environnement (p.ex. citernes et canalisations contenant du gaz ou des liquides nocifs)

Tableau 1: Classes d'ouvrages (CO) selon le Tableau 26 de la norme SIA 261 (2003).

L'attribution d'une classe d'ouvrage illustre bien les enjeux et sera un critère déterminant, avec la classe de sol, pour justifier d'éventuelles études complémentaires (microzonage spectral, voir chapitre 4).

1.6 Types de microzonage

Le premier niveau de microzonage, ou microzonage selon SIA 261, se fait sur la base de la carte des zones sismiques et des classes de sols de fondation standardisées proposées dans la norme de construction SIA 261 «Action sur les structures porteuses» (2003).

Le produit final est l'attribution d'un site à une zone sismique et à une classe de sol de fondation auxquels

est associé un spectre de réponse représentant la sollicitation sismique.

La nouvelle norme SIA 261 propose actuellement six classes de sol de fondation distinctes, adaptées aux conditions géologiques locales observées en Suisse. Des spectres de réponse pour le dimensionnement des structures sont proposés en fonction de chacun de ces types de sol de fondation et des 4 zones d'aléa sismique définies dans la cartes des zones sismiques de la norme (voir Figure 7).

Des cartes de classes de sol de fondation SIA 261, rassemblant à l'échelle du 1: 25'000 les principales caractéristiques géologiques des terrains superficiels

1. Microzonage sismique selon SIA 261 (carte des zones sismique et des classes de sols de fondation)	2. Microzonage sismique spectral (ponctuel ou régional)
<p>But: Attribution pour un site donné d'une zone sismique (1, 2, 3a, 3b) et d'une classe de sol selon la norme SIA 261, à laquelle est associé un spectre de réponse de la norme pour le dimensionnement des structures.</p> <p>Facteurs multiplicateurs pour la prise en compte d'effets topographiques.</p> <p>Contenu: Cartographie estimative des classes de sols sur la base de documents existants (cartes géologiques, forages, études géophysiques, etc.) et différenciation selon les 6 types de sol de fondation (A à F) proposés par la norme SIA 261. Différenciation de la classe de sol F selon le type d'effet induit (glissement, liquéfaction, thixotropie, etc.).</p> <p>Cartes de zones à effets d'amplification topographiques et facteurs d'amplification associés.</p>	<p>But: Document présentant les spectres de réponses élastiques et servant de base au dimensionnement des structures spécifiques aux conditions locales. Ces spectres s'appliquent soit pour des objets (ponctuel), soit pour des zones de validité (carte, régional).</p> <p>Contenu: Cartographie précise des sols basée sur des données d'investigation détaillées.</p> <p>Cartes des isofréquences de fréquences fondamentales du sol.</p> <p>Modèle géophysique.</p> <p>Simulations numériques et établissement de spectres de réponse spécifiques.</p> <p>Cartographie des zones de validité des spectres de réponse.</p>
<p>Niveau de détail: Restreint.</p>	<p>Niveau de détail: Poussé (la délimitation parcellaire doit être possible).</p>
<p>Echelle: 1: 25'000</p>	<p>Echelle: 1: 5'000 à 1: 500 (jusqu'à ponctuel)</p>
<p>Territoire concerné: Régions ou cantons dans leur ensemble.</p>	<p>Territoire concerné: Zones à potentiel de risque élevé (voir chapitre 1.7).</p>

Tableau 2: Propriétés des études de microzonage basées sur la norme SIA 261 et des études de microzonage spectral.

(épaisseur environ 30 mètres), sont utilisées en tant que documents d'aide à l'application de la norme SIA 261. Elles sont établies selon la présente directive (chapitre 3) et l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) peut apporter une contribution financière.

D'autres cartes ou documents pour la prise en compte d'effets géométriques devraient également à l'avenir servir d'aide à l'application de la norme SIA 261, en proposant des facteurs de correction appropriés en fonction des effets d'amplification géométriques attendus (effet de crête, de vallée encaissée, de bord de vallée, de bassin). La méthodologie de l'établissement de telles cartes est en cours d'élaboration en Suisse.

Le deuxième niveau de microzonage, ou microzonage spectral, est une étude quantitative de détail réservée aux zones ou objets à fort potentiel de risque. Ce type d'étude permet de calculer l'influence de la géologie locale de manière directe sous la forme de spectres de réponse élastiques. Ces spectres permettent d'obtenir des résultats spécifiques et plus précis que ceux provenant de l'application directe de la norme de construction SIA 261, pour le dimensionnement des structures porteuses.

Ces études de détail sont rendues nécessaires en tenant compte des conditions géologiques défavorables en présence (fournies par la carte des sols de fondation) et des enjeux liés à la densité de population et au type d'ouvrage (voir paragraphe 1.7). Les études de microzonage spectral s'effectuent selon deux niveaux: le microzonage spectral ponctuel, dans le cas d'ouvrages uniques dont la sécurité parasismique doit être garantie, ou les cartes de microzonage spectral, établies à l'échelle locale (1: 5'000 ou plus) pour des zones à forte densité de population ou d'enjeux économiques, à l'échelle d'une parcelle.

Ces études fournissent un spectre de réponse propre sur la base de données géologiques de détail et de modélisations du site spécifique. Les spectres de réponse définis dans l'établissement des cartes de microzonage spectral pourront être soit plus favorables, plus défavorables ou équivalents à ceux préconisés par la norme.

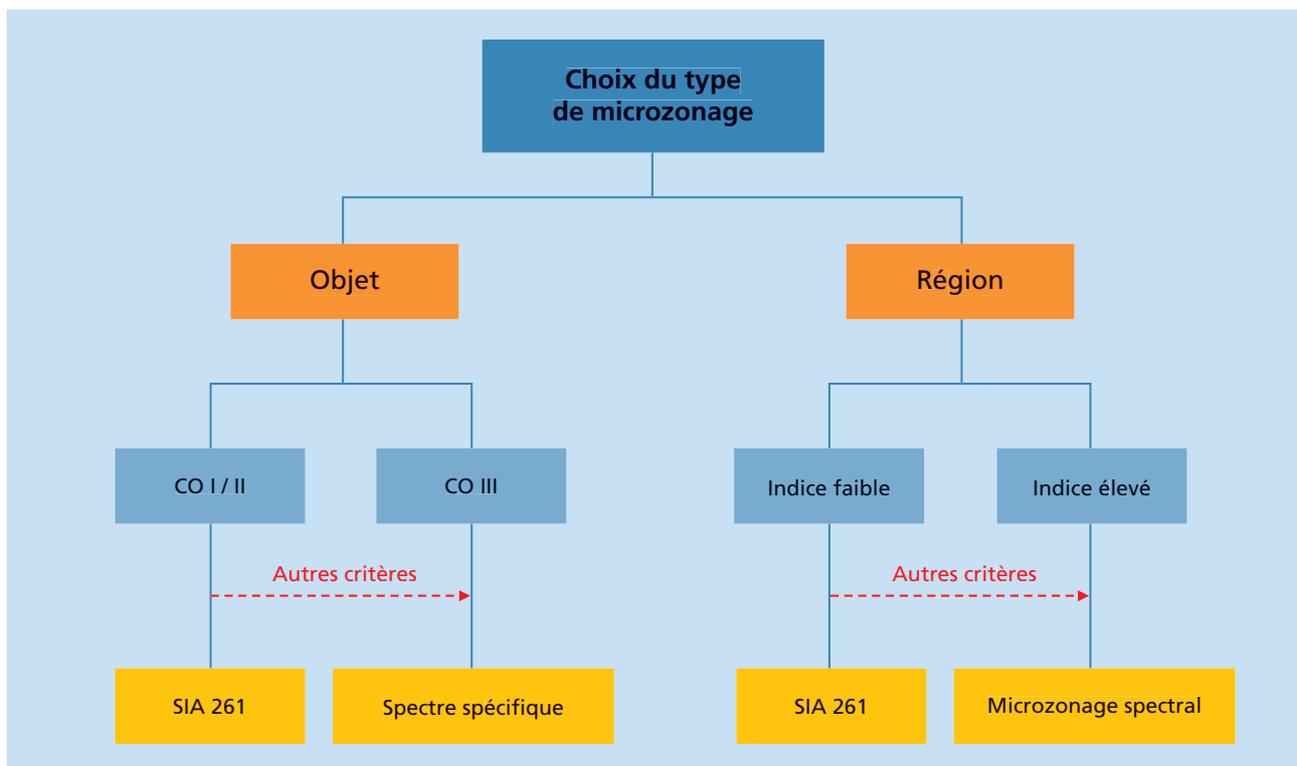


Figure 8: Proposition de procédure pour la sélection du type de microzonage approprié dans le cas d'un ouvrage ponctuel (à gauche) et d'une zone territoriale (à droite).

1.7 Choix du type de microzonage

Les priorités d'établissement d'études de microzonage au sein d'un canton ou d'une région doivent être basées sur le risque. Pour ce faire, le critère de la zone sismique devra également entrer en ligne de compte. Par exemple, pour deux localités à forte densité d'urbanisation relativement similaires et situées pour l'une en zone 3a et pour l'autre en zone 1, la priorité doit être donnée à une étude de microzonage spectral de la localité en zone 3a. Le choix d'effectuer un microzonage selon la norme SIA 261 (cartes des zones sismiques et de sols de fondation) ou un microzonage spectral se fait sur la base des critères énoncés au Tableau 3. La Figure 8 illustre un exemple de procédure de sélection du type de microzonage approprié, destinée aux ouvrages ponctuels (objets) et au microzonage spectral d'une région définie. Les cantons auront la possibilité d'adapter cette proposition en fonction de l'appréciation pondérée des critères supplémentaires et des enjeux socio-économiques qu'ils jugent pertinents.

Une zone à faible densité de population correspond à une zone ou à un quartier possédant un indice de construction inférieur à 0.5, c'est à dire moins de 50% de surfaces construites par rapport à la superficie totale de la parcelle. Cet indice permet, par exemple, de différencier au sein d'une grande agglomération des quartiers résidentiels à villas à faible indice de construction (indice inférieur à 0.5) des quartiers du Centre Ville (indice supérieur à 0.5).

L'exemple de procédure illustrée à la Figure 8 conduit à certains choix d'application possibles, dont la définition est la suivante:

SIA 261:

- Dans le cas d'objets, il s'agit de l'application du spectre de réponse élastique issu du croisement de la classe de sol de fondation SIA 261, déterminée par l'examen de la carte des sols de fondation et/ou de forages locaux, par la zone d'aléa sismique (voir chapitre 3).
- En ce qui concerne une région, il s'agit de l'application du spectre de réponse élastique issu du croisement de la classe de sol SIA 261, déterminée par l'examen de la carte des sols de fondation, par la zone d'aléa sismique (voir chapitre 3).

Spectre spécifique:

- Spectre de réponse élastique spécialement calculé au droit de l'ouvrage considéré (voir chapitre 4).

Microzonage spectral:

- Procédure cartographique fournissant les différentes zones de validité de spectres de réponses élastiques pour l'ensemble d'une région (voir chapitre 4).

1. Région	2. Objet
<ul style="list-style-type: none"> – Zone sismique selon SIA 261 – Densité de population – Importance économique 	<ul style="list-style-type: none"> – Zone sismique selon SIA 261 – Occupation – Classe d'ouvrage SIA 261 – Classe de sol de fondation SIA 261

Tableau 3: Critères déterminant la sélection d'un type de microzonage.

2. Description des phénomènes

2.1 Tremblements de terre

Un tremblement de terre (ou séisme) se manifeste par un ébranlement brutal du sol issu, en profondeur, d'un mouvement relatif de deux compartiments de la croûte terrestre séparés par une discontinuité tectonique (ou faille). La libération brusque d'énergie qui en résulte (Figure 9) se réalise lorsque le seuil de rupture mécanique des roches en profondeur est atteint, après une lente accumulation de contraintes et d'énergie le long des failles. Des ondes de différentes natures et vitesses sont générées et parcourent alors des chemins variés avant d'atteindre un site et de le soumettre à divers mouvements.

Les tremblements de terre provoquent en surface des déplacements cycliques horizontaux et verticaux pouvant atteindre des amplitudes centimétriques à décimétriques, correspondant à des accélérations de quelques centièmes à plusieurs dixièmes de la valeur de l'accélération terrestre due à la pesanteur.

La force et les effets d'un séisme sont couramment appréhendés au moyen de deux systèmes d'échelle: la magnitude et l'intensité (voir Annexe B).

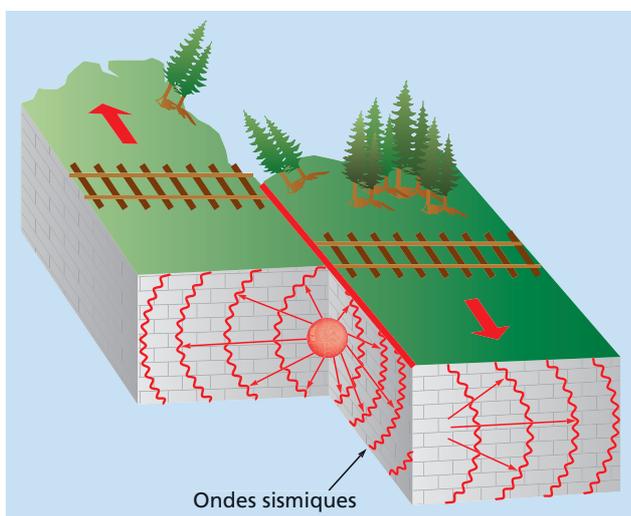


Figure 9: Un tremblement de terre résulte de la libération brusque d'énergie à partir d'une surface de rupture en profondeur.

La magnitude est une valeur qui permet de quantifier l'énergie libérée à la source d'un séisme en se référant à son enregistrement analogique ou digital. L'échelle la plus usitée a été introduite en 1935 par C. F. Richter sur la base d'un instrument standard. L'échelle de magnitude est ouverte aux deux extrémités, mais on observe usuellement des valeurs comprises entre 1 et 9.

La valeur minimale, qui peut être négative, dépend surtout de la sensibilité instrumentale, tandis que la valeur maximale dépend essentiellement de la longueur du segment de faille susceptible de se fracturer en une fois.

L'intensité correspond à une évaluation conventionnelle et harmonisée des dégâts, fondée sur la perception humaine et l'observation des changements affectant les divers types de constructions ainsi que la nature. Il s'agit par conséquent d'appréciations traitées de manière purement statistique. Diverses échelles ont été proposées et peuvent prêter à confusion, mais l'échelle EMS 98 est la plus couramment utilisée en Europe à l'heure actuelle.

Les séismes font l'objet d'une surveillance permanente en Suisse. Le Service sismologique suisse (SED) exploite actuellement deux réseaux de mesures à sensibilités distinctes pour l'enregistrement des séismes. D'une part, un réseau de 30 stations numériques à large bande, destinées à l'enregistrement d'événements sismiques à la fois proches et lointains, sont localisées le plus loin possible de l'influence perturbatrice de la civilisation. Ces stations transmettent en permanence et en temps réel les données d'enregistrement à la centrale d'interprétation de Zurich. D'autre part, un second réseau de stations pour l'enregistrement des mouvements importants ou accélérographes, comprenant une centaine d'appareils de mesure, dont 35 stations, sont localisées à proximité immédiate des barrages. Ce second réseau est utilisé dans le cadre de l'enregistrement d'événements locaux et permet de connaître avec précision l'accélération maximale du sol.

Parallèlement à la surveillance permanente des séismes, le Service sismologique suisse a établi un Catalogue des tremblements de terre de la Suisse (ECOS), qui comprend tous les événements historiques répertoriés depuis l'année 250, les données publiées dans les annuaires de la Commission suisse de sismologie depuis 1879, les données fournies par le réseau instrumental depuis 1975, ainsi que les informations complémentaires de 12 catalogues sismiques de pays voisins et d'agences internationales.

Au cours d'un tremblement de terre, le sol oscille rapidement dans toutes les directions du plan horizontal, ainsi que dans le sens vertical, mais dans une mesure généralement moindre. La durée des mouvements, dans le cas d'un événement de magnitude moyenne, est d'environ 10 à 20 secondes (Figure 10).

L'enregistrement présenté à la Figure 10 provient d'Italie, mais est tout à fait représentatif de ce qui peut se passer en Suisse.

Les effets d'un tremblement de terre sur un ouvrage sont essentiellement déterminés par les amplitudes et les variations temporelles de trois paramètres décrivant les mouvements du sol, soit son accélération (a_g), sa vitesse (v_g) et son déplacement (d_g). Le contenu fréquentiel de ces trois paramètres joue un rôle prédominant au niveau de l'effet sur les structures.

2.2 Effets de site

L'énergie libérée lors d'une rupture sismique dans la croûte terrestre est propagée vers la surface par des ondes dont l'amplitude et le contenu fréquentiel varient au cours de leur trajet. Près de la surface, les contrastes géologiques sont souvent plus importants qu'en profondeur et ils peuvent entraîner une modification du signal,

parfois très importante, sur une distance courte. Ce sont essentiellement ces effets proche de la surface qui sont appelés effets de site (Figure 11).

On considère que plusieurs types de contextes sont susceptibles de provoquer des effets de site.

A) L'effet du contraste d'impédance entre des dépôts meubles, dont les propriétés mécaniques sont généralement faibles, et leur substratum (ou bed-rock) sous-jacent, beaucoup plus compact. Ce contraste est la cause de deux effets: une augmentation de l'amplitude du mouvement du sol par rapport au mouvement incident à la base des dépôts peu consolidés, et un effet de résonance dû au «piégeage» des ondes à l'intérieur des dépôts superficiels.

Ce type d'effet de site est certainement le plus courant et menace particulièrement les agglomérations construites dans des vallées, au bord des rivières ou dans des bassins sédimentaires plats.

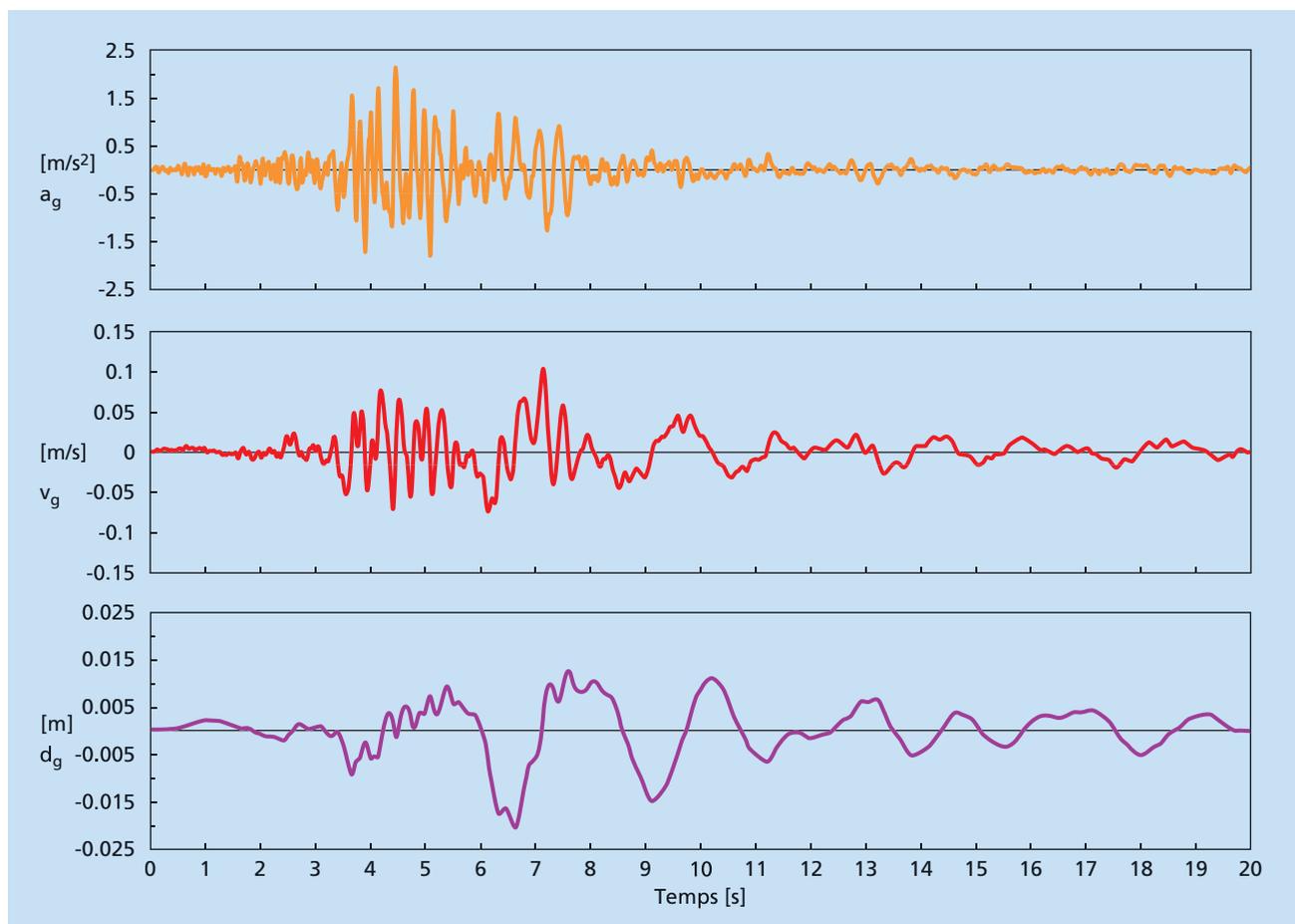


Figure 10: Enregistrement du 15 septembre 1976 d'une réplique de magnitude (M_w) 6.0 du séisme du Friuli (IT) à la station de Forgaria-Cornio, située sur un sol meuble compact à une distance de 14 km de l'épicentre.

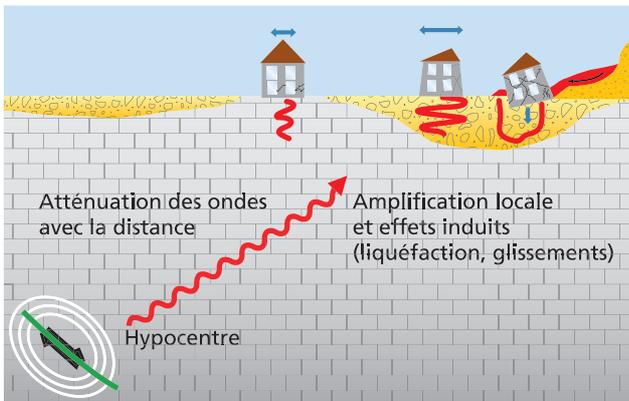


Figure 11: Influence des conditions locales de sols sur les sollicitations sismiques.

B) L'effet de site géométrique, lequel est également directement lié au contexte géologique local. L'effet du contraste d'impédance décrit ci-dessus en a) est, en réalité, rarement l'unique effet de site à considérer, car il est associé la plupart du temps à des effets d'amplification dus à la géométrie du site. L'effet géométrique, qui peut être subdivisé selon les classes suivantes, est encore mal documenté. Sa prise en compte n'est à l'heure actuelle pas encore possible de manière simple, sans faire appel à des simulations complexes. Cependant, il convient de garder à l'esprit que les spectres de réponse de la norme SIA 261 contiennent une marge d'incertitude qui couvre en partie ces effets géométriques.

B1) L'effet de la géométrie du substratum rocheux, plus communément appelé effet de vallée ou de bassin suivant la configuration géologique. L'interface entre les dépôts meubles et le substratum rocheux est souvent caractérisée par une géométrie irrégulière qui engendre une focalisation particulière des ondes à l'intérieur du bassin. Le résultat en est une amplification des ondes sismiques, ainsi qu'un allongement de la durée de la secousse. Cet effet est le plus souvent observé pour des vallées encaissées dont le rapport de la demi largeur sur la profondeur est faible ($L / (2 H) < 10$). A l'heure actuelle, cet effet fait l'objet de plusieurs projets de recherche, dont le projet Interreg III SISMOVALP. Il n'existe pour l'heure pas de consensus pour la détermination d'un facteur d'amplification à appliquer sur la base de la géométrie du substratum rocheux. Il est tout de même admis que ce facteur se situera dans la plupart des cas entre 1.5 et 2.5. Sur la base des recherches en cours, une cartographie des zones à effet de substratum rocheux en Suisse avec des facteurs d'amplification approximatifs sera élaborée.

L'effet d'amplification n'est pas constant sur toute la gamme des fréquences. Il est le plus important pour une fréquence proche de la fréquence fondamentale de la vallée ou du bassin. Pour la vallée du Rhône en Valais, dont le rapport $L/(2 H)$ oscille entre 0.3 et 4, cette fréquence se situe autour de 0.5 Hz, domaine qui n'intéresse qu'un très faible pourcentage des constructions (voir Figure 19).



Figure 12: Effet de site topographique du séisme d'Alger/Boumerdès (2003) avec concentration des dégâts sur les bords des falaises surplombant la vallée.

- B2) L'effet de bord de vallée, où le substratum rocheux et les terrains meubles se rencontrent en surface, provoque la génération d'ondes de surface qui peuvent dominer localement les ondes de volume S habituellement déterminantes. Cet effet se fait ressentir sur une bande parallèle au bord de vallée. Les connaissances relatives à la largeur de cette bande, ainsi qu'à l'effet d'amplification sont à l'heure actuelle limitées. La prise en compte de cet effet n'est pour le moment possible que par des simulations relativement complexes.
- B3) L'effet de site topographique conduit à l'amplification ou à l'atténuation du signal vibratoire, selon que la topographie du relief est respectivement convexe ou concave. Pour obtenir un effet topographique, il faut une morphologie très accidentée susceptible de provoquer des effets de site, même sur un sol rocheux.

Dans le cas du rocher, on observe en général que le mouvement du sol est amplifié à proximité des sommets, tandis qu'il est atténué dans les creux (Figure 12). Ces effets n'apparaissent que dans les cas de configurations topographiques extrêmes (crêtes à pentes raides, bord de falaise, etc.). Les connaissances actuelles

sur les mécanismes de cet effet topographique sont encore limitées, et ne permettent que des estimations approximatives. L'annexe A de l'Eurocode 8 (partie 5, prEN 1998-5:2003), donne des éléments d'information pour la prise en compte de cet effet.

2.3 Effets induits

L'onde sismique peut engendrer sur les terrains des effets induits aux conséquences importantes pour les ouvrages, en fonction de la nature du sous-sol (Figure 13).

Les ondes sismiques peuvent déstabiliser des parois rocheuses et menacer des zones à bâtir situées en aval. Elles peuvent aussi réactiver d'anciens glissements de terrain latents ou mettre en mouvement des pentes instables gorgées d'eau. En présence de terrains meubles saturés en eau et peu compacts, la liquéfaction des sables et des limons et la thixotropie des argiles et des craies sont les illustrations les plus courantes. Ces phénomènes induisent des tassements différentiels des sols pouvant aussi mettre en péril les ouvrages.

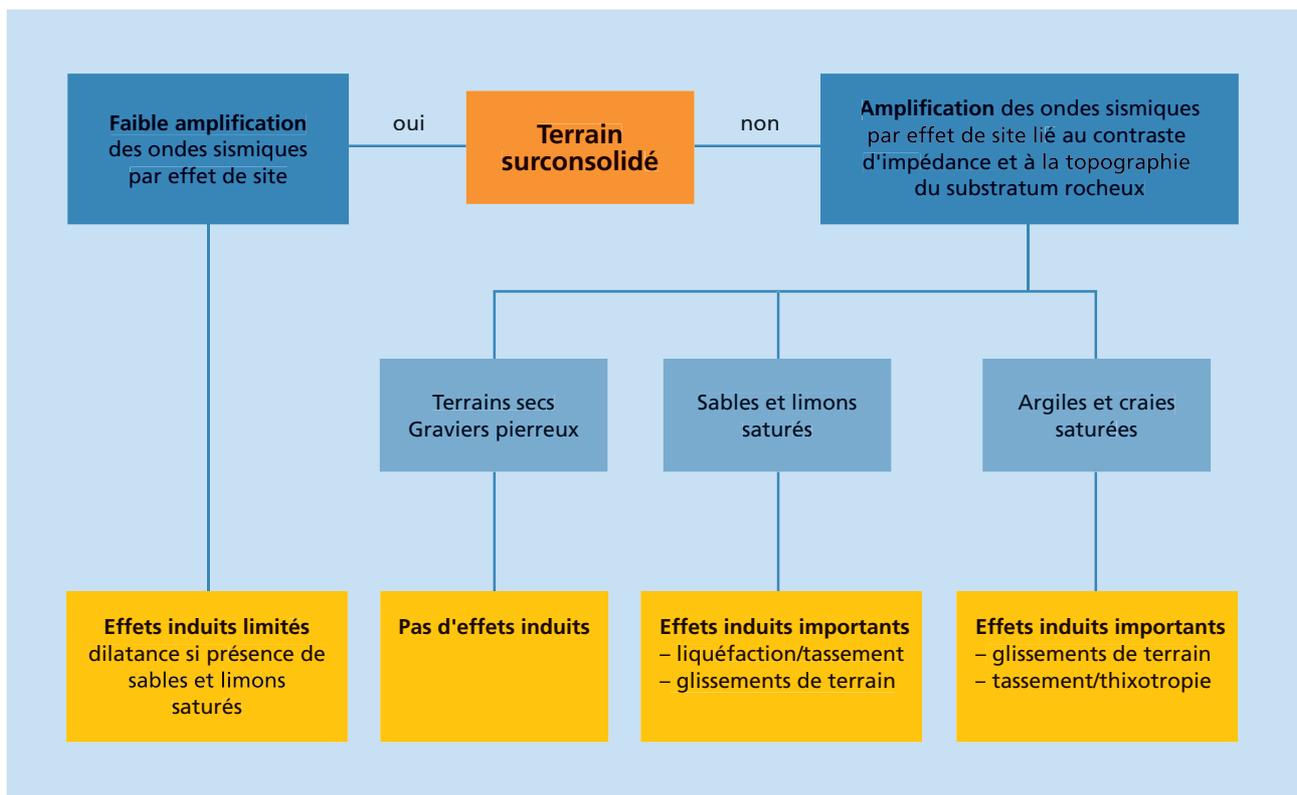


Figure 13: Effets de site induits selon la nature des terrains meubles.



Figure 14: Eboulement du versant S du Rawylhorn consécutif au séisme du 30 mai 1946 à Sierre (magnitude 6 et éboulement de 5 millions de mètres cubes).

a) Eboulement

Une abondante littérature décrit des éboulements intervenus lors de séismes. Dans ce cas, c'est le réseau de discontinuités, stratification, failles, diaclases et schistosité qui est déterminant. Les conditions hydrogéologiques défavorables peuvent encore aggraver l'instabilité lors d'un séisme. Si la paroi rocheuse jouxte une arête, le signal sismique sera par ailleurs amplifié. La composante verticale des ondes sismiques a un effet déstabilisateur plus grand que les accélérations horizontales pour des parois dont l'inclinaison est supérieure à 45°. La sollicitation sismique à prendre en compte lors d'une étude d'équilibre limite correspond aux accélérations maximales horizontales et verticales multipliées par des facteurs pseudo-statiques généralement admis entre 0.1 et 0.5. La Figure 14 illustre l'éboulement du Six des Eaux-froides (ou Rawylhorn) consécutif à l'une des répliques du séisme de Sierre survenue le 30 mai 1946.

En ce qui concerne les glissements rocheux sur niveau de marnes, d'argilites ou de schistes, l'approche est identique à celle des glissements de terrain meuble, hormis le fait que la cohésion des marnes, des argilites ou des schistes exclut le risque de liquéfaction.

b) Glissement de terrain

Un séisme majeur en pays montagneux est susceptible de provoquer de nombreux glissements de terrain, soit par réactivation de glissements stabilisés ou lents, soit par mobilisation de terrains initialement stables (Figure 15). A l'instar d'études de glissements ne tenant pas compte de l'aléa sismique, le facteur primordial est l'eau: il faut donc connaître le régime des écoulements souterrains au sein de la masse pouvant glisser. De plus, si les sols contiennent des sables et des limons liquéfiables, l'augmentation de la pression interstitielle sous charges cycliques contribue encore davantage à déstabiliser les terrains. Des glissements de terrain peuvent donc être induits par des séismes, par augmentation de la contrainte effective horizontale, et par accroissement de la pression interstitielle (dès une magnitude supérieure à 5 environ).

Tableau 4: Etude de la stabilité de terrains sous séismes

- estimation de la sollicitation sismique (accélération horizontale)
 - détermination de la fréquence fondamentale du terrain
 - majoration en cas d'arête dans la proximité



- estimation de la sollicitation hydrogéologique
 - détermination des conditions d'écoulements souterrains



- estimation du potentiel de liquéfaction selon le Tableau 6



- estimation des paramètres de résistance au cisaillement
 - angle de frottement interne
 - cohésion



- calculs de stabilité avec modèles faisant intervenir l'accélération horizontale cyclique et l'éventuelle présence de sols liquéfiables

estimation du danger de coulées de boues



Figure 15: Glissement rotationnel induit par le tremblement de terre du 13 janvier 2001 à la Carretera de San Vicente (El Salvador).

Les calculs de stabilité s'effectuent de manière usuelle (équilibre limite statique), avec simplement une composante horizontale cyclique de l'accélération équivalente à l'accélération horizontale maximale déterminée pour le site, multipliée par un facteur pseudo-statique. La sélection du facteur pseudo-statique n'est pas négligeable et doit dépendre de l'importance de la zone étudiée et du niveau de secousse auquel on s'attend. Il se situe généralement entre 0.1 et 0.5. Si la masse en glissement se situe à proximité d'une arête, le signal sismique est amplifié par la topographie (voir chapitre 2.2).

Diverses méthodes sont à disposition pour le calcul du déplacement de la masse en glissement (Newmark 1965, etc.). Etant donné que ces méthodes négligent les phénomènes de liquéfaction et de coulées de boue, ils doivent être appréhendés indépendamment lors de chaque étude de stabilité.

La démarche détaillée pour l'étude d'un terrain potentiellement instable est présentée dans le Tableau 4.

c) Liquéfaction

On appelle liquéfaction d'un sol un processus conduisant à sa perte de résistance au cisaillement par augmentation de la pression interstitielle et diminution de la contrainte effective entre les grains. Elle est accompagnée de déformations par tassement (Figure 16), dilatance ou glissements de terrains. L'accroissement de la pression interstitielle s'effectue sous chaque cycle de l'onde sismique. La liquéfaction peut affecter des sols saturés, lâches et peu compacts (Tableau 5), dont la perméabilité est faible. Dans ce cas, la pression interstitielle n'a alors pas le temps de se résorber entre deux cycles de charge. C'est pourquoi ce sont uniquement les sables et les limons saturés qui sont susceptibles d'être liquéfiés (terrains dont la perméabilité est comprise entre 10^{-5} et 10^{-6} m/s).

Si ce critère est rempli, l'évaluation de la susceptibilité à la liquéfaction peut être précisée sur le terrain par diverses méthodes directes, comme par exemple des



Figure 16: Enfoncement d'un immeuble vers l'arrière suite à la liquéfaction de son sol de fondation (séisme d'Izmit, Turquie, 1999).

essais standards de pénétration (SPT) et des essais de pénétration par cône (CPT), ou encore en laboratoire par des essais sur cellules triaxiales dynamiques. Des modèles dynamiques permettent aussi de simuler la liquéfaction. En outre, l'Eurocode 8 (partie 5) propose une approche empirique pour la détermination du potentiel de liquéfaction.

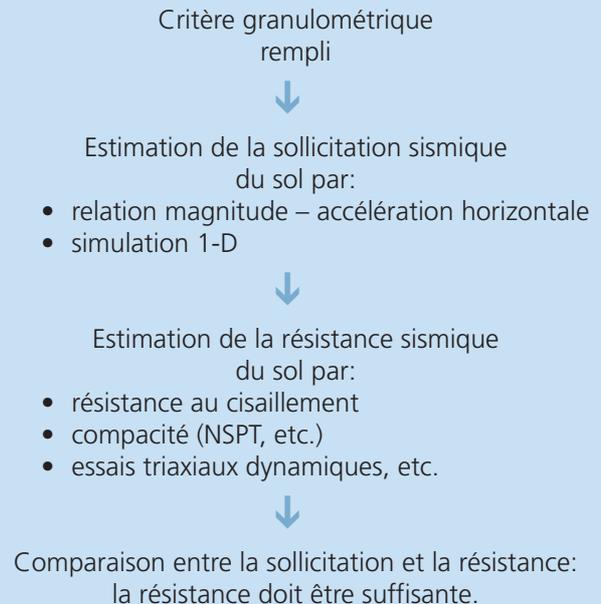
La liquéfaction touche, par définition, les sols lâches qui vont se tasser sous les cycles sismiques. C'est la raison pour laquelle les sols saturés à plus de 20 m de profondeur environ sont suffisamment denses pour qu'ils ne soient plus susceptibles d'être affectés par la liquéfaction.

La susceptibilité à la liquéfaction s'évalue pour chaque ouvrage. En effet, le comportement d'un ouvrage dépend du type de fondation (semelles ponctuelles ou filantes, radier ou pieux). Un sol peut se liquéfier mais n'induire aucun dégât si les fondations de type pieux ont été conçues en connaissance du phénomène (par

Tableau 5:
Le critère granulométrique peut être présenté comme suit si le terrain est saturé et peu compact:

- diamètre à 15 %: $d_{15} > 5 \mu\text{m}$
- diamètre à 50 %: $50 \mu\text{m} < d_{50} < 1.5 \text{ mm}$
- diamètre à 70 %: $d_{70} > 75 \mu\text{m}$.

Tableau 6:
Etude de la liquéfaction sous séismes



ex. insensibilité des pieux aux déformations des sols superficiels ou dimensionnement des pieux avec prise en compte du frottement négatif dû au tassement des terrains superficiels).

Il ne faut pas négliger le fait qu'un terrain liquéfié modifie sa propre impédance, ce qui entraîne de nouveau une modification du signal sismique.

La démarche concernant l'étude de la liquéfaction est résumée dans le Tableau 6.

d) Thixotropie des argiles.

A la suite du dépôt d'argiles en milieu lacustre ou marin, leurs particules se réorganisent lentement pour former une structure tridimensionnelle. Elles forment un réseau de feuilletés disposés plus ou moins orthogonalement entre eux. Une secousse sismique peut provoquer l'effondrement de la structure dont l'équilibre est comparable à un château de cartes. Les argiles vont alors se tasser ou provoquer un glissement de terrain si elles ne sont pas initialement dans un état de surconsolidation. Leur degré de consolidation est donc une caractéristique essentielle de leur comportement en cas de séisme. Même après le phénomène de thixotropie, l'argile reste un matériau au comportement plastique.

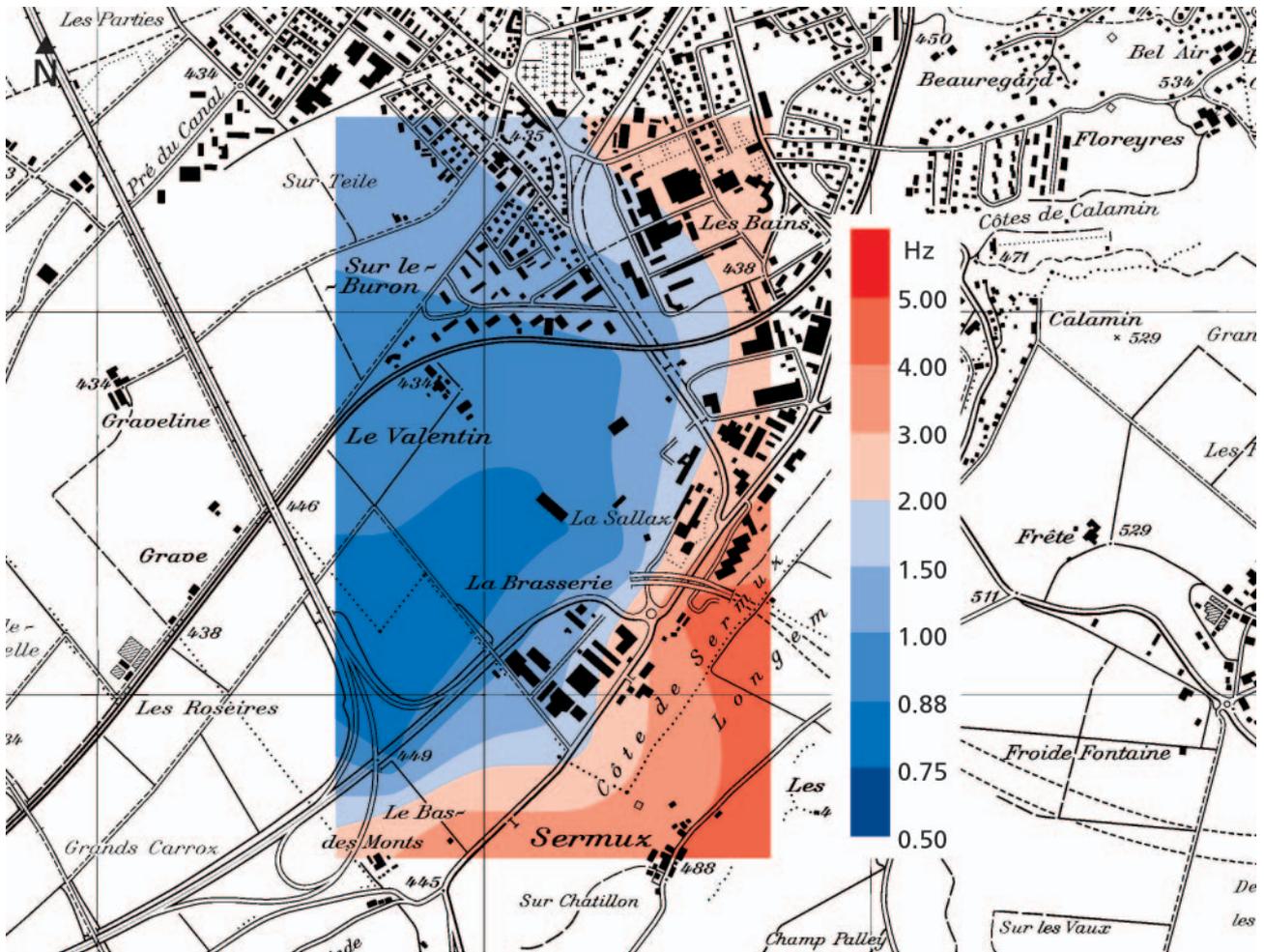


Figure 17: Mesure des fréquences fondamentales des sols meubles, dans la région d'Yverdon (Widmer et al., 2003).

La perméabilité de l'argile étant très faible, la surpression interstitielle créée par les cycles d'accélération va mettre plusieurs heures, voire plusieurs jours pour se résorber. Cette surpression peut maintenir une masse en glissement longtemps après le séisme majeur, surtout si des répliques viennent perturber la dissipation des surpressions. De plus, à la suite des déformations plastiques engendrées par le séisme majeur, la résistance mécanique des argiles est affaiblie (angle de frottement résiduel, cohésion résiduelle).

La thixotropie des argiles reste un phénomène relativement rare en Suisse et très localisé à proximité des lacs ou d'anciens dépôts lacustres.

2.4 Fréquence fondamentale du sol et résonance sol/structure

Un concept important dans le domaine des sollicitations dynamiques est la fréquence fondamentale (ou fréquence propre). Il s'agit de la fréquence à laquelle un sol meuble, une structure ou tout autre objet, vibre naturellement. L'analogie du diapason permet de visualiser clairement ce concept. La période fondamentale est elle définie comme l'inverse de la fréquence fondamentale.

Il est possible d'établir des cartes de fréquence fondamentale des sols meubles (Figure 17) en effectuant des mesures rapprochées de «bruit ambiant» et en traitant ces mesures de manière appropriée.

De manière à évaluer approximativement la fréquence fondamentale d'un sol, dans le cas d'un système multicouche horizontal de sol meuble reposant sur un substratum plus compact (des alluvions surmontant la Molasse du Plateau, par exemple), on peut appliquer la formule suivante:

$$f_0 = \frac{V_s}{4h} \quad T_0 = \frac{4h}{V_s}$$

- f_0 : fréquence fondamentale (Hz)
- T_0 : période fondamentale (s)
- V_s : vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans le sol meuble (m/s)
- h : épaisseur cumulée des couches de sol meuble sur le substratum rocheux (m)

L'application de cette formule présuppose la connaissance du profil de la vitesse des ondes de cisaillement dans la couche de sol meuble.

Dans le cas d'un tremblement de terre, les vibrations du sol induisent une vibration des structures qui sont fondées sur celui-ci. Les fondations des structures suivent les mouvements du sol, tandis que la partie supérieure de celles-ci vibrent de manière différenciée selon la masse et la rigidité de la structure. Les mouvements du sol et ceux de la partie supérieure des structures sont donc en général différents. Lorsque la fréquence fondamentale d'un bâtiment est très proche de celle du sol, on parle du phénomène de résonance sol/structure. Les amplitudes d'oscillation du bâtiment augmentent fortement par rapport à celles des structures environnantes dont les fréquences propres sont éloignées de celle du sol (Figure 18). L'édifice entrant en résonance est donc particulièrement menacé. On s'efforcera dans la mesure du possible de modifier la fréquence fondamentale du bâtiment projeté et de l'éloigner de celle du sol par des mesures constructives de rigidification ou d'assouplissement des structures porteuses.

La Figure 19 présente les domaines de variation des fréquences fondamentales pertinents à différents types de structures. De manière générale, plus un bâtiment est haut (élancé), plus sa fréquence fondamentale est basse.

La détermination de la fréquence fondamentale pour un bâtiment particulier se fait idéalement à l'aide d'une modélisation de la structure porteuse statique couplée éventuellement à des mesures in situ. Un aspect important dans cette détermination est l'évaluation de la perte de rigidité des éléments porteurs de la structure par endommagement lors d'un séisme important. Cette perte de rigidité conduit à une réduction de la fréquence fondamentale.

Si l'on s'intéresse à une catégorie générique de bâtiments, il est possible d'utiliser des formules empiriques simples. Il faut cependant garder à l'esprit que celles-ci ont un degré d'incertitude élevé.

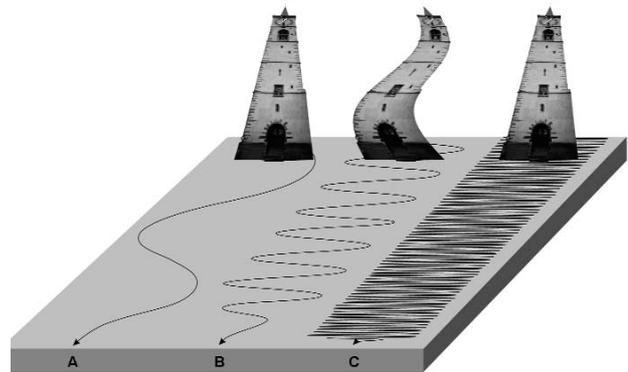


Figure 18: Phénomène de résonance (B) entre le sol et les structures se produisant à une fréquence déterminée (Weidmann, 2002).

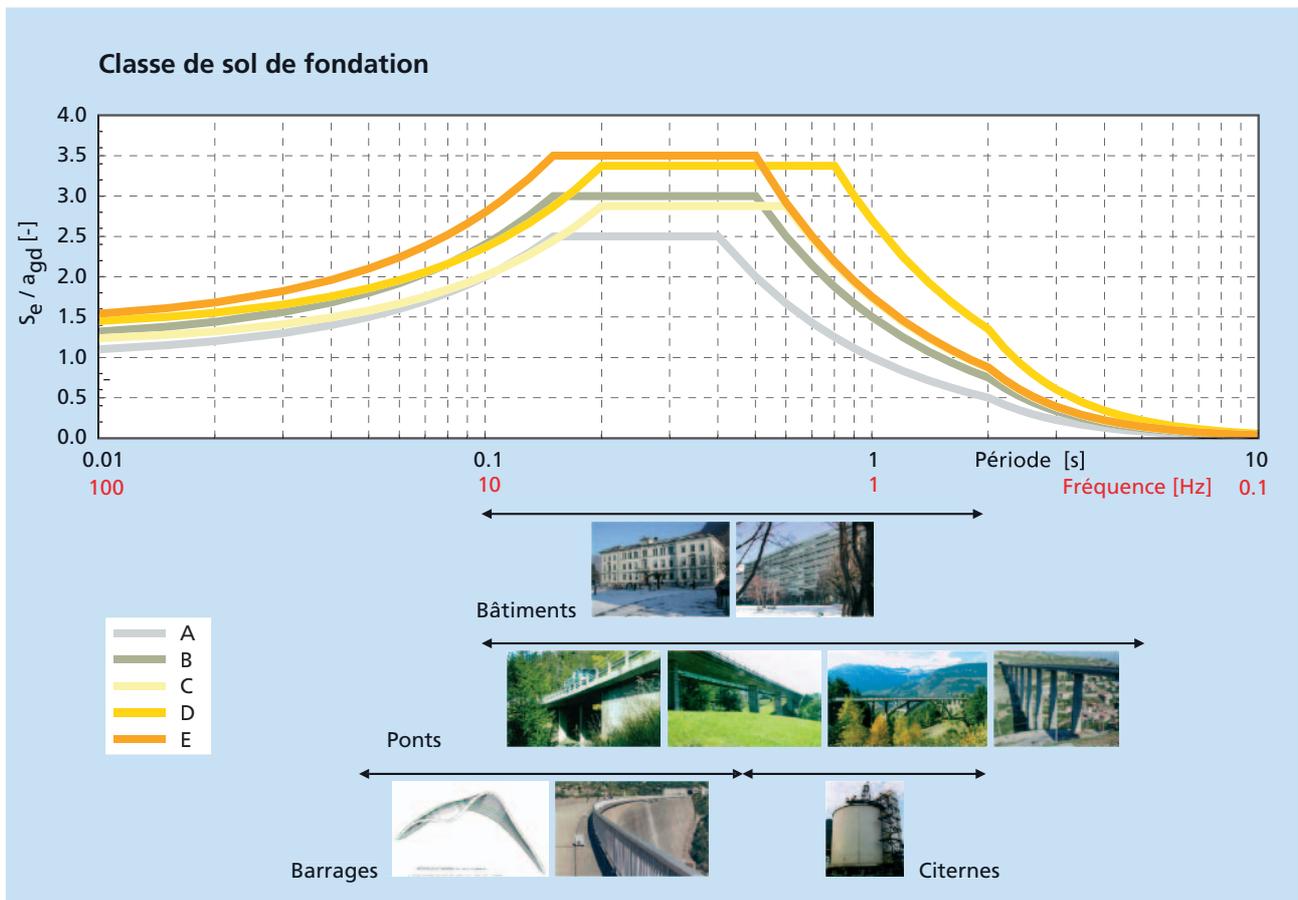


Figure 19: Domaines de périodes fondamentales de certains types d'ouvrages, en relation avec les spectres de réponse des sols de fondation prescrits dans la norme SIA 261 (2003).

3. Carte des sols de fondation selon SIA 261

3.1 Définition

Par analogie avec la démarche adoptée pour l'ensemble des autres dangers naturels, un examen préalable du niveau de danger sismique est pratiqué grâce à la carte des zones sismiques (Figure 7) et à la carte des sols de fondation. La carte des sols de fondation fournit les zones de validité des différentes classes de sols spécifiées dans la norme de construction SIA 261. Elle permet donc de classer les zones en fonction de leur potentiel d'amplification des ondes sismiques. Elle facilite aussi l'identification des zones avec un potentiel notable d'amplification et/ou avec des effets induits dommageables vis-à-vis des structures existantes.

La conception de la carte des sols de fondation consiste à subdiviser le territoire à l'échelle du 1: 25'000 en différentes catégories de sol sur la base des six classes de sol de fondation définies selon la norme de construction SIA 261 (2003).

La classe de sol F, par rapport à la description initiale issue de la norme SIA 261, a été subdivisée en deux catégories, en fonction de la présence de dépôts à structures sensibles et de dépôts organiques (F1) ou de zones instables en glissement (F2). Cette séparation permet de différencier les secteurs d'après la nature des effets induits potentiels. La classe F implique au besoin et selon les enjeux des études plus approfondies de microzonage spectral, afin d'obtenir un spectre de réponse spécifique de la zone examinée (Figure 8) et/ou la confirmation du potentiel pour des effets induits tels que mouvements de terrain, liquéfaction ou thixotropie.

Un exemple de carte de sols de fondation, se basant strictement sur la norme SIA 261, est illustré à la Figure 20; il s'agit de la carte des sols de fondation de la feuille Yverdon-les-Bains au 1: 25'000.

Classe de sol de fondation	Description	$V_{s,30}$ [m/s]	N _{SPT}	S_u [kPa]
A	Roches dures (p.ex. granite, gneiss, quartzite, calcaire siliceux, calcaire) ou roches tendres (p.ex. grès, conglomérats, marnes du Jura) sous une couverture maximale de 5 m de sol lâche.	> 800	–	–
B	Dépôts de graviers grossiers et sables cimentés et/ou roches meubles surconsolidées d'une épaisseur de plus de 30 m.	400–800	> 50	> 250
C	Dépôts de graviers et sables normalement consolidés et non cimentés et/ou matériau morainique, d'une épaisseur de plus de 30 m.	300–500	15–50	70–250
D	Dépôts de sables fins, silts ou argiles non consolidés, d'une épaisseur de plus de 30 m.	150–300	< 15	< 70
E	Couche alluviale superficielle des classes de sols de fondation C ou D d'une épaisseur comprise entre 5 et 30 m, surmontant une couche plus rigide des classes de sols de fondation A ou B.	–	–	–
F1	Structures sensibles et dépôts organiques (p. ex. tourbe, craie lacustre) d'une épaisseur supérieure à 10 m.	–	–	–
F2	Glissements de terrain actifs ou susceptibles d'être réactivés.	–	–	–

Tableau 7: Descriptions des classes de sol de fondation modifiées d'après la norme SIA 261 (2003).

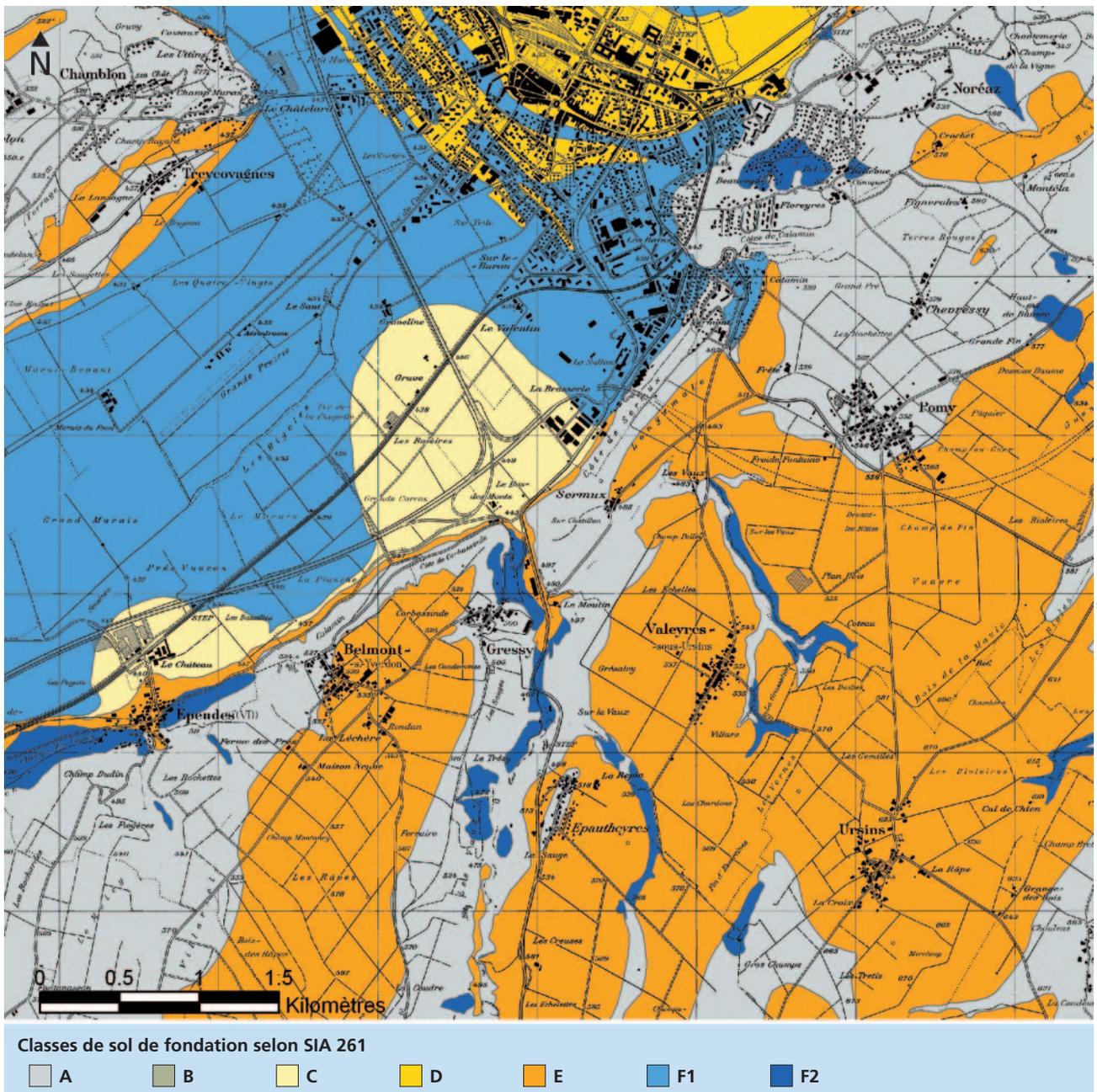


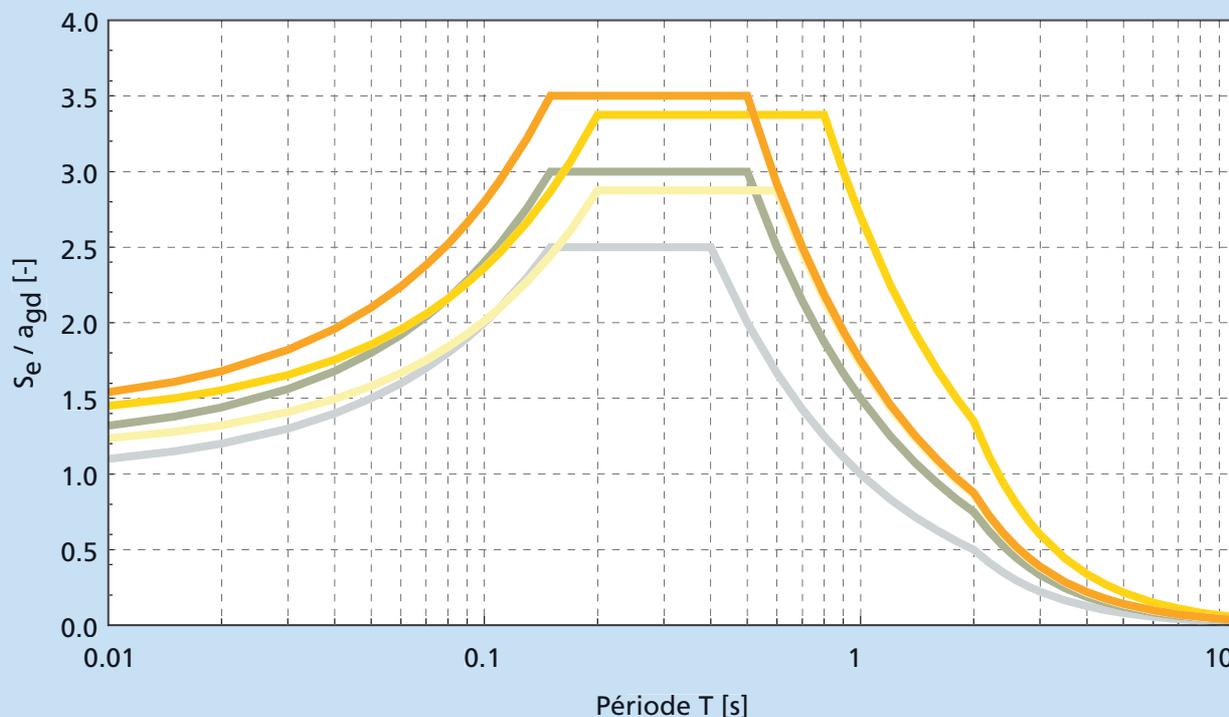
Figure 20: Extrait de la carte des sols de fondation de la feuille Yverdon-les-Bains (Widmer, 2002).

3.2 Application de la carte des sols de fondation

Pour chaque classe de sol de fondation, allant de A à E, sont associés des spectres de réponse élastiques en accélération (Tableau 7 et Figure 21) définis dans la norme de construction SIA 261. Ces spectres de réponse élastiques servent de base au dimensionnement des structures porteuses.

Il n'est dans certains cas pas évident pour l'ingénieur d'attribuer une classe de sol de fondation aux conditions rencontrées au droit d'un ouvrage. Ainsi, pour déterminer la classe de sol adéquate pour son projet, l'ingénieur pourra se servir de la carte de sols de fondation, ainsi que des données géotechniques disponibles pour le projet. Dans le cas où les données géotechniques du projet contredisent la carte, celles-ci doivent servir de base pour la détermination de la classe de sol.

**Spectres de réponse élastiques adimensionnalisés 5 % d'amortissement –
Norme SIA 261 (2003)**



Zone de risque sismique

a_{gd}

Classes de sol de fondation (SIA 261)

1	0.06 g
2	0.10 g
3a	0.13 g
3b	0.16 g

	Classe A
	Classe B
	Classe C
	Classe D
	Classe E

Figure 21: Spectres de réponse associés aux diverses classes de sol selon SIA 261.

En Suisse, les cartes de sols de fondations existantes, de même que diverses informations concernant les tremblements de terre, peuvent être consultées directement par le biais d'Internet sur le site www.bwg.admin.ch (voir annexe D).

Pour la classe de sol F, ainsi que pour les sols ne pouvant être classés dans les classes A à E, des études complémentaires devraient être effectuées pour déterminer les sollicitations sismiques de dimensionnement. Ces études doivent permettre de confirmer ou d'infirmer les phénomènes d'effets induits (glissements, thixotropie, liquéfaction) et de quantifier l'amplification des ondes sismiques pour ces sols particuliers. Dans le cas où des effets induits sont confirmés, cela doit conduire à des mesures constructives pour

protéger les structures vis-à-vis de ceux-ci (fondations profondes, renforcement du sol, etc.).

3.3 Données de base et documents d'accompagnement

Le document essentiel à la conception de la carte des sols de fondation est la carte géologique, lorsque celle-ci est disponible. Il s'agit de retranscrire systématiquement la légende géologique selon les classes de sols de fondation SIA 261 décrites au Tableau 7, et de tenir compte des contours des diverses unités lithologiques présentes au moins sur les 30 premiers mètres d'épaisseur.

Dans les secteurs où les informations sur les formations quaternaires manquent, ou en l'absence de carte géologique, des relevés de sondages mécaniques préciseront la nature et l'épaisseur des terrains meubles, de même que toute donnée issue de méthodes géophysiques (sismiques et/ou électriques). Dans la pratique, on rencontre dans la plupart des cas une stratification hétérogène et complexe des terrains superficiels de couverture. On choisira dans ce cas une affiliation à la classe représentative de la lithologie dominante, sur la profondeur à considérer dans la norme (Tableau 7).

La carte des sols a aussi pour objectif d'identifier les secteurs présentant des effets induits importants (principalement mouvements de terrain et liquéfaction). A ce titre, des cartes de dangers, ainsi que des cartes hydrogéologiques constituent un apport préalable précieux.

La carte des sols de fondation doit impérativement être accompagnée d'un rapport de synthèse explicatif faisant mention de l'ensemble de la documentation utilisée et des diverses étapes effectuées au cours de son élaboration, cela afin de valoriser l'ensemble des informations géologiques consultées. En outre, elle signalera et précisera les principales zones où des incertitudes demeurent, que ce soit quant à la nature des sols ou quant aux effets induits attendus. Par exemple, certains terrains classés D ou E (dépôts de sables fins, silts ou argiles non consolidés) peuvent présenter un potentiel de liquéfaction certain, en fonction notamment du niveau de la nappe phréatique. Dans le cas des zones F1, il faudra si possible détailler les caractéristiques des différentes zones éventuelles (suspicion de liquéfaction, de thixotropie ou de sols tourbeux, etc.).

3.4 Transcription de la légende géologique

Le caractère restrictif des définitions des classes de sols de fondation par la norme SIA 261, telles qu'indiquées par le Tableau 7, peut engendrer des incertitudes au stade de leur transcription à partir des différentes formations géologiques en présence. Le Tableau 8 fournit une aide destinée à cette phase de transcription, en tenant compte de la plupart des configurations géologiques types les plus fréquemment rencontrées en Suisse.

3.5 Légende et interprétation de la carte des sols de fondation

Les classes de sols de fondation de la norme SIA 261 seront représentées cartographiquement par des couleurs distinctes, et permettront d'obtenir rapidement une évaluation générale et qualitative de l'effet de site (Tableau 7 et Figure 20).

Il est proposé d'utiliser des couleurs grisées pour les zones à dominante rocheuse (classes A et B), dont le potentiel d'amplification des ondes sismiques est intrinsèquement faible en cas de tremblement de terre. Un dégradé de teintes jaunes, comprenant les classes de sols meubles C, D et E, représenteront les zones pouvant généralement être à l'origine d'une amplification potentielle modérée. La teinte bleue, attribuée à la classe F, fera ressortir les zones à dépôts sensibles pouvant amplifier notablement le signal incident ou provoquer des effets induits dommageables.

Cette gradation implique que les terrains classés F et figurés en bleu représentent les zones les plus délicates pour lesquelles des études complémentaires sont nécessaires en vue de définir les sollicitations sismiques exactes. Il faut préciser à ce titre qu'il n'existe donc pas d'analogie avec le choix effectué dans le cadre des recommandations fédérales sur la prise en compte des dangers liés aux crues (1997) ou aux mouvements de terrain (1997) dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire, où les zones rouges sont systématiquement associées à une interdiction de construire. En effet, une interdiction de construire ne se justifie pas en Suisse en ce qui concerne l'aléa sismique.

Lithologie / Phénomène et épaisseur	Classes de sol	Remarques
Roche en place	A	
Dépôt d'éboulement 0–5 m sur rocher	A	
Dépôt d'éboulement 5–30 m sur rocher	E	
Dépôt d'éboulement > 30 m sur rocher	C	
Dépôt d'éboulement 0–30 m sur alluvions	C–D	En fonction du type de dépôts sous-jacents
Dépôt d'éboulement > 30 m sur alluvions	C	
Voile d'éboulis 0–5 m	A	
Voile d'éboulis 5–30 m	E	
Voile d'éboulis > 30 m	C	
Tassement de versant rocheux	A	
Glissement de terrain	F2	
Moraine non consolidée 0–5 m sur rocher	A	
Moraine non consolidée 5–30 m sur rocher	E	
Moraine non consolidée > 30 m sur rocher	C	
Moraine non consolidée 0–30 m sur alluvions grossiers	C	
Moraine non consolidée > 30 m sur alluvions grossiers	C	
Moraine non consolidée 0–5 m sur alluvions fins	D	
Moraine non consolidée 5–30 m sur alluvions fins	C–D	En fonction de l'épaisseur de la moraine
Moraine non consolidée > 30 m sur alluvions fins	D	
Moraine de fond consolidée 0–30 m sur rocher	A	
Moraine de fond consolidée > 30 m sur rocher	B	
Sables grossiers, graviers 0–5 m sur rocher	A	
Sables grossiers, graviers 5–30 m sur rocher	E	
Sables grossiers, graviers > 30 m sur rocher	C	
Limons, argiles 0–5 m sur rocher	A	
Limons, argiles 5–30 m sur rocher	E	
Limons, argiles > 30 m sur rocher	D	
Limons, argiles 0–30 m sur alluvions	C–D	En fonction du type d'alluvions sous-jacents
Limons, argiles > 30 m sur alluvions	D	
Marécages, tourbe 0–5 m sur rocher	A	
Marécages, tourbe 5–10 m sur rocher	E–F1	Choix sécuritaire: F1
Marécages, tourbe > 10 m sur rocher	F1	
Marécages, tourbe 0–5 m sur alluvions	C–D	En fonction du type d'alluvions sous-jacents
Marécages, tourbe 5–10 m sur alluvions	C–D–F1	Choix sécuritaire: F1
Marécages, tourbe > 10 m sur alluvions	F1	

Tableau 8: Aide à la décision pour l'attribution d'une formation géologique à une classe de sol de fondation SIA 261 (CREALP, 2004).

4. Etude de microzonage sismique spectral

4.1 Aléa régional

L'aléa sismique de la Suisse a été totalement recalculé par le Service Sismologique Suisse (SED, 2003). Les valeurs de l'accélération spectrale, pour les fréquences de 0.5, 1, 2, 3, 5, 10 et 12 Hz, sont disponibles sous forme de cartes pour différentes périodes de retour (500 et 1000 ans) et cela pour l'ensemble du territoire national (site Internet du SED). Ces valeurs sont valables pour un sol de type rocher «dur», c'est-à-dire dont la vitesse de propagation estimée des ondes S est de l'ordre de 1500 m/s.

4.2 Détermination de l'amplification spectrale

4.2.1 Interprétation des données géologiques et géotechniques

Les données géologiques et hydrogéologiques sont à fournir sous la forme de cartes, mais aussi de coupes, avec indication de la nature des terrains et de leurs épaisseurs. Les informations géologiques doivent être complétées par un maximum de données géotechniques.

Tableau 9: Données de base dans le cadre d'études de microzonage sismique.

- Formations superficielles:
 - nature
 - épaisseur
 - caractéristiques géotechniques
 - vitesses des ondes S
 - fréquence propre
 - granulométrie (et classification USCS)
 - indice de plasticité pour les argiles
 - masse volumique apparente humide
 - compacité, degré de surconsolidation et densité relative
 - niveaux piézométriques des nappes (basses et hautes eaux)
- Soubassement rocheux:
 - formation
 - épaisseur
 - vitesse des ondes S
 - structures tectoniques actives et non actives
 - densité
 - degré d'altération et épaisseur de la zone altérée

Les paramètres clés nécessaires à toute simulation quantitative des effets de site sont: la nature des dépôts, leur épaisseur, leur fréquence propre, leur densité, leur géométrie, ainsi que celle du soubassement rocheux, la vitesse des ondes de cisaillement (ondes S), l'indice de plasticité pour les argiles et le niveau de la nappe phréatique (Tableau 9). Il est donc nécessaire d'obtenir le maximum de documents concernant les études géotechniques ponctuelles qui ont pu être réalisées dans le secteur étudié, qu'il s'agisse d'études destinées à des bâtiments, des infrastructures routières ou ferroviaires, etc. Tous résultats de sondages ou essais disponibles devraient être mis à disposition afin d'utiliser ces informations (résultats de mesures in situ et en laboratoire) pour estimer au mieux les vitesses des ondes S. Parmi les mesures in situ, mentionnons le Standard Penetrometer Tests (SPT) et le Cone Penetrometer Tests (CPT), dont on déduit la compacité des terrains. Il est important de vérifier le type de SPT utilisé avant d'appliquer des formules de corrélation pour déterminer des vitesses des ondes S.

Au stade de l'acquisition des données géologiques et géotechniques, il est important de faire le moins possible d'interprétations préalables. En effet, c'est au moment du choix final des paramètres et de leurs variations que des hypothèses sont énoncées (en accord entre le géophysicien et le géologue).

Le stade de l'acquisition des données géologiques et géotechniques doit aussi être le moment où seront déterminés le potentiel de liquéfaction et les effets induits (glissements de terrain, chutes de pierres, etc.). De plus, un recueil et une interprétation des informations de sismicité historique et des enregistrements de séismes existants seront utiles à la détermination des séismes de référence nécessaires pour les calculs des effets de site.

4.2.2 Mesure de la fréquence fondamentale des dépôts

Etant donné qu'il est difficile d'estimer les vitesses des ondes S ainsi que les épaisseurs des formations rencontrées sur l'ensemble du secteur étudié, la mesure de la fréquence fondamentale des dépôts est une donnée complémentaire très utile. En effet, l'utilisation de cette information peut, lors des simulations numériques, servir à ajuster les valeurs de vitesses non mesurées et/ou d'épaisseur des couches, ainsi qu'à préciser l'extension des domaines avec des caractéristiques relativement identiques.

Plusieurs méthodes expérimentales permettent de mesurer la fréquence fondamentale des dépôts, en de nombreux points, sur un maillage couvrant le secteur d'étude. La méthode la plus courante, souvent appelée méthode de Nakamura, se base sur l'utilisation d'enregistrements de vibrations ambiantes, réalisés à l'aide d'une seule station (sismomètre) ou de plusieurs stations (Méthode Array). La méthode consiste en un rapport spectral entre les composantes horizontales et les composantes verticales des enregistrements de vibrations ambiantes. Cette méthode constitue un outil simple, rapide et peu onéreux de détermination de la fréquence fondamentale des dépôts sédimentaires. Cependant, cette méthode présente une grande incertitude, en particulier lorsque le contraste d'impédance entre dépôts et substratum rocheux est assez faible. La signification et l'interprétation du pic H/V est actuellement encore un sujet de recherche.

A la suite d'une telle campagne de mesures, une carte des isofréquences propres du sol peut être dressée (Figure 17, Figures 26 et 27).

4.2.3 Définition d'un modèle de vitesses des ondes S

Il est fortement recommandé de procéder également à des mesures de vitesses des ondes S. En effet, la connaissance des vitesses des ondes S dans les dépôts quaternaires en Suisse est très limitée. Quelques méthodes, de mise en œuvre assez simple, sont proposées au chapitre 4.4.1. Ces mesures doivent au moins permettre de déterminer les vitesses des ondes S dans les formations superficielles, mais si possible également jusqu'au substratum.

Sur la base de l'ensemble des données et des mesures disponibles, un modèle géophysique de la région étudiée est établi. Ce modèle établit des coupes fournissant les deux paramètres essentiels à la modélisation des effets de site, soit:

- la vitesse des ondes de cisaillement (ondes S)
- la densité des terrains rocheux et meubles

Les coupes indiquent clairement:

- le domaine de variation attendu de la vitesse des ondes S
- le domaine de variation des limites et des contacts entre les différentes strates
- la profondeur et la géométrie du substratum rocheux.

Si des calculs prenant en compte le comportement non linéaire des matériaux sont envisagés, il conviendra aussi d'estimer les paramètres nécessaires à ces modélisations. De plus, si des modélisations en ondes P-SV sont prévues, il conviendra de déterminer également les vitesses des ondes P.

4.2.4 Modélisation numérique de l'amplification

Par la suite, des modélisations numériques des effets de site doivent être réalisées. Il est important de choisir la ou les méthodes de simulation les mieux adaptées au contexte étudié, en tenant compte, en particulier:

- de la géométrie du substratum rocheux, qui détermine le choix de modélisation en 1D, 2D ou même 3D
- du comportement non linéaire des sols attendu (nature des terrains propice à des effets non linéaires, aléa élevé attendu au rocher). Si un effet non linéaire est attendu, il conviendra de le prendre en compte dans les simulations, au moins à l'aide de l'approximation dite «linéaire-équivalente»
- de l'influence de la source sismique (gamme de magnitude, mécanisme, profondeur, distance).

Une estimation des incertitudes liées aux simulations et aux paramètres d'entrée doit être effectuée, les limites et domaines d'application des méthodes utilisées doivent être précisés.

Le résultat de la modélisation numérique est une ou des fonction(s) d'amplification du signal sismique de référence au rocher par les conditions géologiques locales. Une présentation de divers types de méthodes de simulation des effets de site est donnée dans le chapitre 4.4.3.

4.3 Spectres de réponse élastique spécifiques au site et carte de microzonage spectral

Le résultat final d'une étude complète de microzonage est la carte de microzonage spectral. Il s'agit d'une carte du secteur sur laquelle apparaissent les différentes zones définies d'après l'étude des effets de site. Le nombre de ces zones sera variable selon l'importance des effets de site, la variabilité des terrains et l'étendue du secteur étudié. Cependant, il est recommandé de ne pas dépasser un nombre d'environ cinq zones, en raison de l'ensemble des incertitudes liées à l'évaluation des effets de site.

Pour fixer les limites de ces zones, il faudra notamment recourir à certaines données recueillies au stade de la carte des classes de sols de fondation de la norme SIA 261 (Chapitre 3). Les limites seront ainsi établies sur la base de:

- la carte géologique
- la profondeur du substratum rocheux
- la variation de la vitesse des ondes S et de la densité des couches
- la carte des isofréquences fondamentales du sol
- les résultats des calculs d'effets de site en différents points.

Chacune des zones ainsi définies devra être accompagnée du spectre de réponse élastique proposé, qui sera représenté sous forme graphique ainsi que par son expression analytique. Ce spectre correspond au résultat de la multiplication de la fonction d'amplification obtenue par calcul (chapitre 4.2.4) par le spectre de réponse élastique de référence (input) au rocher dur (aléa régional, déterminé au chapitre 4.1). Il conviendra de définir des formes simples (inspirées de celles de la norme SIA 261), sachant que le but ultime d'un microzonage est l'utilisation directe, par les ingénieurs civils, des spectres de réponse élastiques pour le dimensionnement des structures en lieu et place de ceux proposés par la norme SIA 261.

Présentation des résultats de l'étude de microzonage spectral

Les données de base nécessaires (vitesses des ondes S, épaisseur des dépôts, etc.) sont très souvent caractérisées par une grande incertitude. De ce fait, il faut insister ici sur l'importance d'un traitement approprié de ces incertitudes dans l'élaboration du microzonage.

Les points suivants pourront être traités:

- l'ensemble des incertitudes et les hypothèses retenues doivent être clairement explicitées dans le rapport
- les sources des documents et/ou données utilisés devront être citées en référence
- une estimation de la variation des résultats de calculs devra être indiquée dans le rapport.

Le rapport pourra ainsi comprendre les documents suivants:

- des cartes et coupes illustrant le modèle géophysique
- des cartes d'isofréquences fondamentales du sol
- une carte de microzonage avec les spectres de réponse élastiques remplaçant ceux de la norme SIA 261
- une carte des effets induits (liquéfaction, glissements, éboulements, thixotropie)
- un document indiquant la base de données géologiques, hydrogéologiques et géotechniques, leurs incertitudes et les choix effectués par les trois partenaires de l'étude que sont le géologue, le géophysicien et l'ingénieur civil. Ce document décrira également les méthodes d'évaluation des effets de site qui sont à la base des spectres de réponse élastiques choisis, ainsi que les résultats des différents calculs.

4.4 Méthodes

4.4.1 Méthodes pour la détermination des vitesses d'ondes S

La structure de la vitesse de propagation d'ondes S (ondes de cisaillement) dans le sol peut être obtenue par des mesures actives sur le terrain, telles que la sismique réflexion/réfraction d'ondes S, les mesures d'ondes de surface à l'aide d'une station unique ou d'un dispositif de stations, ou encore par des techniques de mesures dans des forages («down-hole» et «cross-hole»). Les méthodes passives basées sur la mesure des vibrations ambiantes (ou micro-secousses) sont d'un intérêt tout particulier, car elles peuvent être appliquées en milieu urbain, où il est généralement impossible de faire des mesures actives par manque de place pour les équipements, ainsi que par l'interdiction d'utiliser des sources explosives.

Chaque technique de mesure a ses avantages et ses inconvénients. Les techniques de sismique réflexion / réfraction d'ondes S impliquent des ondes de volume dans un domaine au-dessus de 30 Hz, qui d'une part permettent de repérer les variations d'interfaces dans le sous-sol, mais qui d'autre part opèrent dans une bande de fréquence supérieure à celle concernant le domaine de la sismologie appliquée à l'ingénierie des tremblements de terre. De plus, les ondes de haute fréquence peuvent être affectées par des hétérogénéités latérales de petite échelle, et les mesures de vitesse ne coïncident pas forcément avec les vitesses d'ondes S pour des fréquences inférieures à 10 Hz. Un des problèmes principaux de la sismique réflexion / réfraction d'ondes S est le couplage de la source au sol et, de ce fait, la profondeur limitée de pénétration des ondes S. Les techniques de mesures au sein de forages verticaux requièrent quant à elles beaucoup de temps et sont également très onéreuses.

L'analyse spectrale des ondes de surface, ou SASW, implique la mesure de la vitesse de groupe et de phase d'ondes de Rayleigh afin de déterminer la structure de vitesse d'ondes S à partir de courbes de dispersion. Les ondes de Rayleigh sont générées par l'application de sollicitations verticales à la surface du sol. Cette méthode présente également une profondeur de pénétration limitée, de l'ordre de 20 à 30 m, et en général, les sédiments ou le rocher plus profonds ne peuvent pas être pris en compte.

Si l'épaisseur des sédiments est connue, la méthode H/V de Nakamura permet d'estimer la vitesse d'ondes S moyenne des sédiments normalement consolidés.

De plus, la forme de la courbe des rapports H/V peut être utilisée pour estimer le profil de vitesse d'ondes S. Yamanaka et al. (1994) et Satoh et al. (2001) ont appliqué cette méthode pour des bassins sédimentaires profonds, Fäh et al. (2001) pour des sites peu profonds. Les méthodes comportant un dispositif de plusieurs stations de mesures ont été établies par Horike (1985), selon les travaux précurseurs de Aki (1957). Ces méthodes font appel aux caractéristiques de dispersion des ondes de surface et permettent de déterminer le profil de vitesse d'ondes S en fonction de l'inversion de courbes de dispersion. Ces vitesses des ondes S peuvent être ainsi déterminées en profondeur jusqu'à plusieurs centaines de mètres.

4.4.2 Méthodes pour la prise en compte du comportement non linéaire

• Simulation 1D linéaire-équivalente:

Certains logiciels permettent de prendre en compte, de manière approximative, la non-linéarité du sol. Cela est fait par le biais de l'approximation linéaire-équivalente, qui se base sur une procédure itérative visant à adapter les paramètres du sol (rigidité et amortissement). Le logiciel SHAKE (Schnabel et al., 1972) est le plus souvent utilisé pour ce type de modélisations (incidence verticale uniquement).

• Simulation 1D non linéaire:

Dans certains cas, si les données géotechniques sont suffisamment précises, il convient de prendre en compte la non-linéarité complète du sol et les phénomènes de liquéfaction. Le logiciel CyberQuake (1998), par exemple, permet de telles modélisations. Il est à noter que, dans la plupart des cas, l'insuffisance de données, géotechniques disponibles conduit à la nécessité de procéder à des sondages mécaniques et à des essais en laboratoire, qui sont relativement coûteux.

4.4.3 Modélisations numériques

Le choix de la méthode utilisée pour l'évaluation des effets de site dépend, d'un point de vue pratique, de plusieurs facteurs: l'ampleur de l'étude, l'importance des enjeux, les données disponibles, la configuration du secteur étudié, etc. L'objectif de ce guide n'est pas de donner une description détaillée des nombreuses méthodes disponibles, mais plutôt d'en faire une énumération en insistant sur les particularités éventuelles de leurs conditions d'applications.

Les méthodes les plus couramment utilisées seront citées, le lecteur étant invité à se référer à la littérature existante pour un inventaire plus exhaustif (Bard and Riepl-Thomas, 1999; Riepl-Thomas et Cotton, 1999). Le Tableau 10 présente un récapitulatif des méthodes décrites plus loin. Les différentes méthodes proposées peuvent parfois conduire à des résultats légèrement différents ou contradictoires. Il incombe donc au spécialiste de choisir la ou les méthodes les plus appropriées au cas considéré (en fonction des champs d'application et des limites associés à chacune d'entre elles) et de mener, dans la mesure du possible, une étude de sensibilité, le tout en fonction des contraintes budgétaires à respecter.

Dans la mesure où les caractéristiques géologiques et géotechniques du site étudié sont connues de manière exhaustive, l'ampleur des effets de site peut être évaluée par des modélisations numériques. Il existe de nombreuses méthodes, avec divers niveaux de sophistication. Le choix d'une méthode doit être fonction des conditions du site étudié (géométrie 1D, 2D ou même 3D), ainsi que du degré de précision des données disponibles. Même si une étude complète de la non-linéarité ne s'avère pas nécessaire, ou n'est pas envisagée en raison du manque de données, il est recommandé, en revanche, d'évaluer l'influence de la non-linéarité par un calcul selon l'approximation linéaire-équivalente. Il est à noter ici que l'influence de la non-linéarité des matériaux reste un sujet encore très discuté entre certains sismologues et la communauté des géotechniciens.

• Simulation unidimensionnelle:

La modélisation unidimensionnelle (1D) constitue la méthode numérique la plus simple et la plus rudimentaire. De ce fait, elle n'est pas adaptée à tous les cas où la géométrie est complexe (vallées alpines encaissées, bassins, etc.). Les modèles 1D sont représentés par des couches homogènes stratifiées horizontalement. La réponse de ce type de modèle est calculée pour un champ d'onde simple primaire (P) ou secondaire (S) à incidence verticale ou oblique. Des modèles plus sophistiqués, tels que la méthode des nombres d'ondes discrets, permettent d'inclure une excitation plus complexe.

• Simulation bidimensionnelle (2D):

Lorsque la géométrie du site est complexe, il convient de ne pas se limiter à des modélisations 1D, qui auraient tendance à conduire à une sous-estimation de l'amplification effective du site. Le cas typique dans lequel il est nécessaire de faire appel à des modélisations 2D est celui des vallées alpines.

Plusieurs méthodes permettent de prendre en compte les effets de diffraction et des multi-réflexions dans des géométries complexes. On peut citer par exemple la méthode de Aki-Larner (1970); la méthode combinée de sommation de modes et différences finies proposées par Fäh et Suhadolc (1994) ainsi que la méthode en différences finies de Moczo et Bard (1993).

• Simulation tridimensionnelle (3D):

La modélisation du mouvement du sol dans des structures 3D, type bassin sédimentaire, est devenue possible grâce aux progrès des moyens informatiques de calcul. Cependant, leur application reste encore réservée à des projets de recherche, en raison de leur très grande exigence en mémoire vive et du manque de connaissance approfondie de l'hétérogénéité de la structure géologique 3D du site étudié. Ces méthodes se limitent aux basses fréquences (1 à 2 Hz au maximum). Les premières simulations 3D ont été réalisées dans le cadre des bassins de Los Angeles et Salt Lake aux Etats-Unis (Olsen et Archuleta, 1996). Dans les Alpes, c'est la ville de Grenoble qui a été choisie comme site pilote pour l'application de telles méthodes (Cotton et al., 1998).

4.4.4 Méthodes expérimentales

Les méthodes expérimentales présentent deux inconvénients majeurs:

- D'une part, elles nécessitent l'enregistrement de données sismiques véritables et impliquent l'installation de plusieurs stations sismiques afin d'enregistrer des séismes. Or, la Suisse étant un pays de sismicité faible à modérée, selon les régions, de telles campagnes de mesures sont forcément longues et donc coûteuses pour obtenir suffisamment d'enregistrements sismiques de qualité satisfaisante (rapport signal/bruit, etc.).

Nom de la méthode	Type de méthode	1D, 2D, 3D ?	Non-linéarité ?	Commentaire
Rapports spectraux classiques	Expérimentale	Selon site d'enregistrement	Linéaire	Enregistrements de séismes (avec site de référence)
Rapports H/V	Expérimentale	Selon site d'enregistrement	Linéaire	Enregistrements de séismes
Simulations linéaire-équivalente type SHAKE ou similaire	Numérique	1D	Linéaire ou Linéaire-équivalent	Insuffisant en cas d'effets 2D prononcés
Simulation non linéaire type CyberQuake ou similaire	Numérique	1D	Non linéaire	Connaissance des lois de comportement non linéaire nécessaire
Simulations 2D type Aki-Larner (1970), Fäh-Suhadolc (1994) Moczo-Bard (1993), ou autre	Numérique	2D	Linéaire ou linéaire-équivalent	Programmes universitaires, combiner avec un calcul linéaire - équivalent, (si non inclus dans la méthode)
Simulations 3D	Numérique	3D	Linéaire	Développement universitaire, connaissance de la structure 3D, limité aux basses fréquences

Tableau 10: Récapitulatif des méthodes d'évaluation des effets de site.

- D'autre part, les méthodes expérimentales ne tiennent pas compte de la non-linéarité du mouvement du sol. En effet, ces méthodes sont basées sur des mesures obtenues à partir d'enregistrements de mouvements faibles et il n'est pas évident de déterminer jusqu'à quel niveau de sollicitation l'extrapolation des courbes d'amplification obtenues est possible.

Il faut citer ici la méthode dite du «rapport spectral classique». Il s'agit d'une méthode basée sur le calcul du rapport spectral entre les enregistrements simultanés d'un séisme sur le site à étudier et sur un site dit de «référence» situé sur un affleurement rocheux (Borcherdt, 1970). Les hypothèses et conditions à respecter pour appliquer cette méthode sont: la

proximité des deux stations, la qualité du rocher de la station de référence, l'utilisation de plusieurs enregistrements, un bon rapport signal/bruit. Du point de vue économique, cette méthode est assez coûteuse, surtout dans les zones à faible sismicité. En revanche, elle peut être considérée comme la plus fiable des méthodes expérimentales.

Dans tous les cas, si des données d'enregistrements sismiques sont disponibles sur un secteur étudié, même en faible quantité, il est important de les utiliser à titre de comparaison et de validation des résultats obtenus par simulations numériques.

4.5 Exemples de microzonage spectral

4.5.1 Région de Brigue-Viège

Le cheminement précis de l'étude pour l'établissement d'une carte de microzonage sismique spectral et des spectres de réponse élastique associés peut être décrit par l'exemple suivant (cette méthode a été appliquée dans le secteur de Brigue/Viège CREALP, 2000, ainsi qu'à Monthey, CREALP, en cours).

La démarche et les étapes de cette étude sont détaillées dans le Tableau 11.

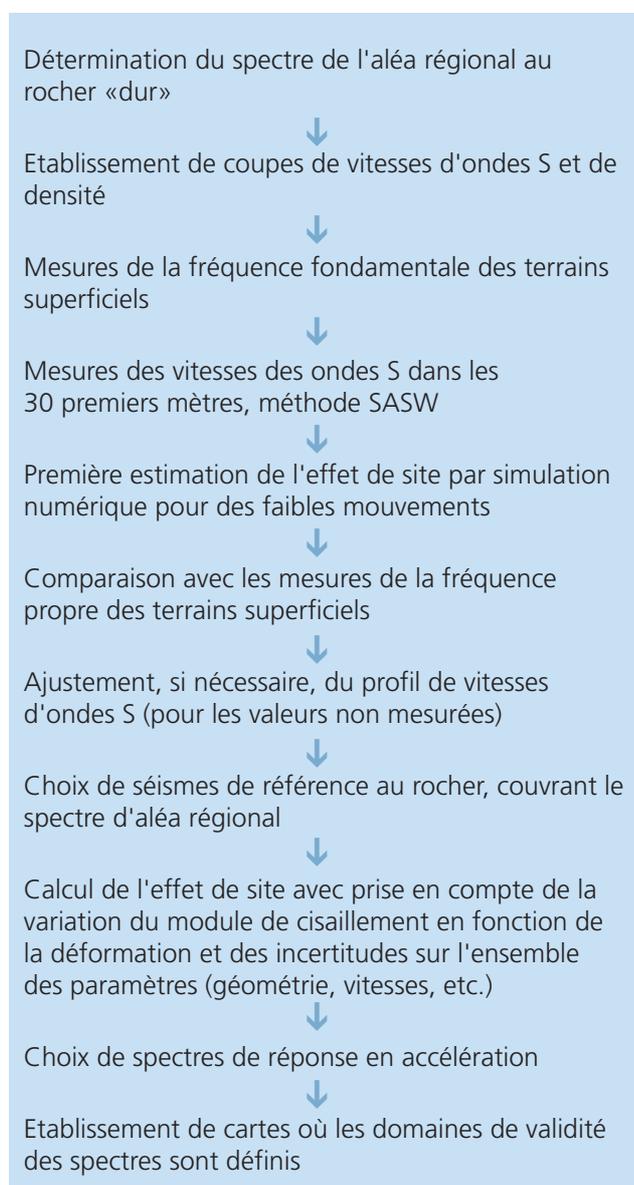


Tableau 11: Démarche utilisée pour l'établissement du microzonage sismique des secteurs de Brigue, Viège et Monthey.

Les zones étudiées étant situées dans une vallée alpine encaissée, des simulations unidimensionnelles (1D) et bidimensionnelles (2D) ont été effectuées dans le cadre de ces études. Les techniques utilisées pour effectuer ces simulations sont détaillées dans les paragraphes suivants.

En premier lieu, pour toutes ces simulations, les trois éléments suivants ont été déterminés:

- le profil de vitesses des ondes S du site à étudier
- le comportement non linéaire des sols meubles étudiés
- un mouvement sismique à la base à l'interface sédiments-roche.

Détermination des profils de vitesse:

Lorsque le secteur étudié n'a pas fait l'objet d'études géotechniques et géologiques très poussées, les données sur la géologie ou les caractéristiques physiques des sols sont rares, voire inexistantes pour les matériaux profonds.

Pour pallier ce manque d'informations, trois études ont été réalisées en parallèle pour permettre une meilleure estimation des caractéristiques géologiques et géotechniques du site:

- une compilation des données géologiques
- des profils sismiques en ondes de surface (méthode SASW)
- une campagne de mesure des fréquences propres du sol (méthode du rapport H/V).

Les informations géologiques et hydrogéologiques ont été tirées de la littérature, au moyen de recherches systématiques. Ces informations ont par la suite été synthétisées sous forme de profils géologiques (Figure 22).

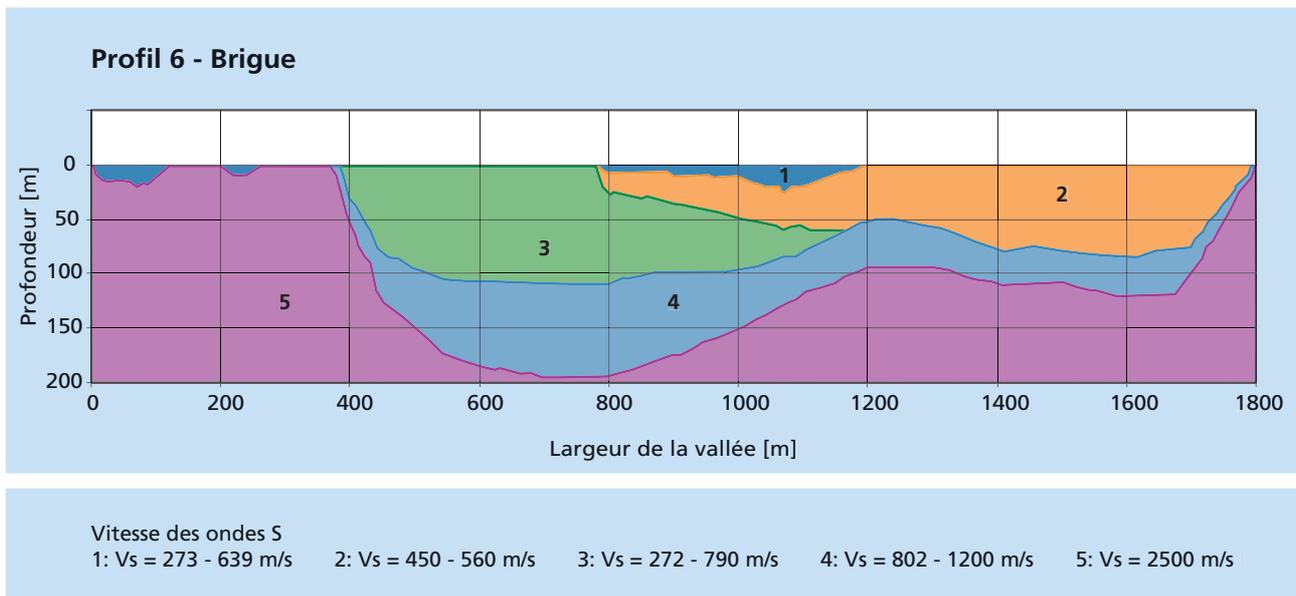


Figure 22: Profil de vitesse des ondes S dans la région de Brigue (CREALP/Résonance/Tissières 2001, modifié, non publié).

La simulation 1D: le logiciel CyberQuake:

CyberQuake est un logiciel mis au point en 1997 par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières BRGM. Ce logiciel permet de calculer les mouvements du sol dans le cas d'une propagation verticale d'ondes planes dans une colonne de sol comportant des couches planes et horizontales. Il simule les mouvements non linéaires du sol par une approche visco-élastique linéaire-équivalente. Cette méthode, développée par Seed et Idriss dans les années 70, est celle qui est utilisée pour simuler la non-linéarité des matériaux dans le logiciel SHAKE (Schnabel et al., 1972).

Il convient donc d'introduire des données relatives au comportement mécanique des différentes couches. Cela consiste à fournir les fonctions liant le module de cisaillement et l'amortissement à la déformation, pour les différentes formations. Le programme commence par calculer une première fois la propagation verticale des ondes dans les différentes couches horizontales. Le programme calcule la déformation dans les couches et ajuste en conséquence le module de cisaillement (G) et l'amortissement (D) en fonction du comportement des matériaux que l'on a indiqué en entrée du programme (courbes $G-\gamma$ et $D-\gamma$). CyberQuake recalcule alors le mouvement des ondes dans ces couches déformées. Il procède ainsi à plusieurs itérations jusqu'à ce que la différence entre la déformation obtenue et celle donnée en entrée soit inférieure à un seuil que l'on peut fixer. Le programme calcule alors le mouvement du sol en surface à partir des nouveaux paramètres géo-

techniques qui ont ainsi été déterminés lors de la dernière itération.

Pour des sollicitations faibles à modérées, les solutions obtenues grâce à CyberQuake sont comparables à celles déterminées par des modèles plus sophistiqués ou des observations sur le terrain. Cependant, en cas d'un comportement non linéaire trop prononcé, les solutions fournies par le modèle linéaire-équivalent ne sont pas satisfaisantes. La présente étude n'a pas été concernée par ce domaine.

Simulation 2D: méthode d'Aki-Larner:

Pour les simulations 2D, un programme écrit par P.-Y. Bard a été utilisé. Ce programme est basé sur une méthode de calcul dite méthode d'Aki-Larner (1970).

Cette méthode est basée sur la résolution de l'équation d'onde classique en sismologie. On considère dans cette théorie une superposition de couches horizontales, homogènes, isotropes et de paramètres physiques différents, sur un demi-espace. La méthode permet de déterminer la réponse impulsionnelle d'un milieu 2D ou 3D soumis à une onde incidente plane.

Il existe plusieurs versions de ce programme. Dans la version utilisée ici, les interfaces entre les différentes couches de la vallée sédimentaire sont planes et horizontales. Seule l'interface entre les dépôts et le substratum rocheux peut avoir une géométrie quelconque.

Combinaison des simulations et mesures:

La procédure suivie pour les modélisations numériques est la suivante:

- calcul 2D pour mouvement faible (séismes faibles, cas linéaire)
- ajustement des vitesses des ondes S (V_s), non mesurées, à l'aide des mesures de Nakamura;
- calcul 1D pour mouvement fort ajusté (voir chapitre 3.4) grâce à CyberQuake pour différents profils verticaux. L'influence approximative de la non-linéarité fait baisser V_s et augmenter l'amortissement
- calcul 2D pour mouvement fort (grands séismes, influence de la non-linéarité) en utilisant les vitesses et amortissements déterminés à l'étape précédente
- calcul des spectres de réponse élastique pour les accélérogrammes simulés
- calcul des «fonctions d'amplification» définies comme étant le rapport entre les spectres de réponses élastique calculés précédemment et les spectres de réponse élastique des signaux utilisés pour simuler l'excitation.

Séismes de référence:

Le calcul de l'aléa sismique de la Suisse a été totalement réactualisé par le Service Sismologique Suisse en 2003 (SED, 2003). Les valeurs de l'accélération spectrale, pour les fréquences 0.5, 1, 2, 3, 5, 10 et 12 Hz et pour différentes périodes de retour, sont données pour un sol de type «rocher dur», c'est-à-dire avec une vitesse des ondes S de l'ordre de 1500 m/s.

Dans le cadre de la nouvelle carte de zonage sismique du Swisscode SIA 261, D. Fäh et T. Wenk ont proposé la formule suivante pour la détermination de a_{gd} , valeur de calcul de l'accélération horizontale du sol pour la classe de sol de fondation A:

$$a_{gd} = \frac{3.5 \cdot S_a + 2.5 \cdot S'_a}{2} \cdot \frac{1}{2.5} \cdot \frac{1}{1.2}$$

avec S_a : accélération spectrale à 5 Hz, et S'_a : accélération spectrale à 10 Hz, pour le rocher SED ($V_s = 1500$ m/s).

Pour le rocher «dur» ($V_s = 1500$ m/s), un spectre de la forme du spectre Swisscode SIA 261 classe A a été utilisé, avec une accélération spectrale du plateau égale à la moyenne entre les valeurs du SED à 5 Hz et

10 Hz, comme spectre de réponse de référence correspondant à un site rocheux. Cela conduit à une valeur de l'accélération à la période nulle égale à:

$$a_o = \frac{S_a + S'_a}{2} \cdot \frac{1}{2.5}$$

Pour le calcul des effets de site, des accélérogrammes ont été sélectionnés de manière à ce que leurs spectres couvrent le spectre input choisi, pour tenir compte de l'aléa sismique au rocher à la base de la structure. Des accélérogrammes réels peuvent être choisis parmi la base de donnée «Internet-Site for European Strong-Motion Data» (Ambraseys et al., 2001). D'autres accélérogrammes peuvent être créés avec le logiciel développé par Sabetta et Pugliese (1996), permettant de générer des accélérogrammes semi-artificiels, pour un couple magnitude-distance et un type de sol donnés. Ces accélérogrammes sont qualifiés de semi-artificiels car, contrairement à d'autres logiciels comme SIMQKE, ils sont créés à partir d'enregistrements réels provenant d'une base de données italienne et, surtout, leur contenu fréquentiel varie avec le temps, comme c'est le cas pour des séismes réels.

Spectres et carte de microzonage sismique:

L'ensemble des simulations effectuées a permis de déterminer des spectres de réponse élastique adaptés qui tiennent compte des spécificités liées à la nature et à la structure des dépôts dans une région donnée. Ces spectres ont été choisis de manière à ce que leur forme reste simple et s'inspire des formes spectrales qui ont été choisies dans la norme SIA 261. En effet, il est primordial que leur utilisation soit aisée, de manière à ce que les ingénieurs chargés du contrôle ou du

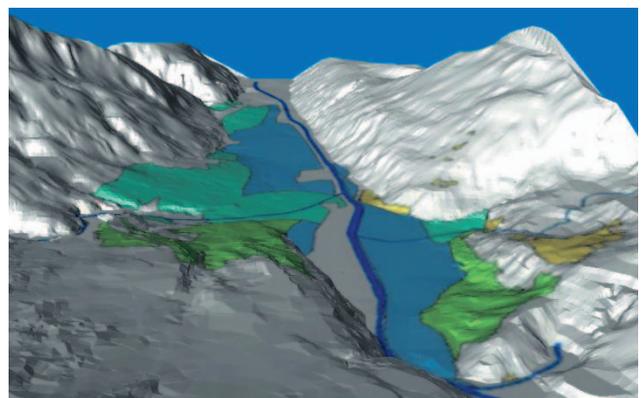


Figure 23: Vue tridimensionnelle de la région de Brigue et de la carte de microzonage sismique spectral (CREALP/Résonance/Tissières 2001, non publié).

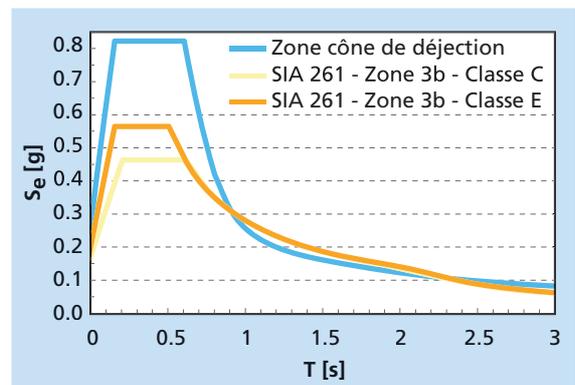
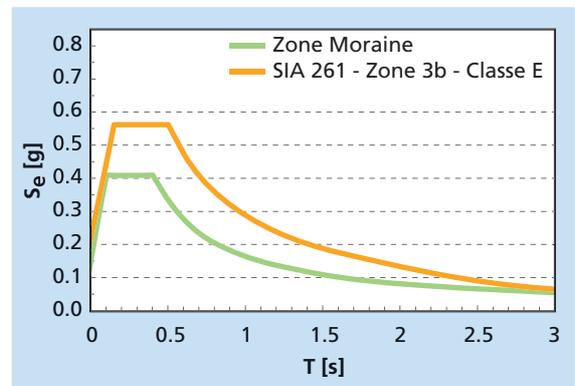
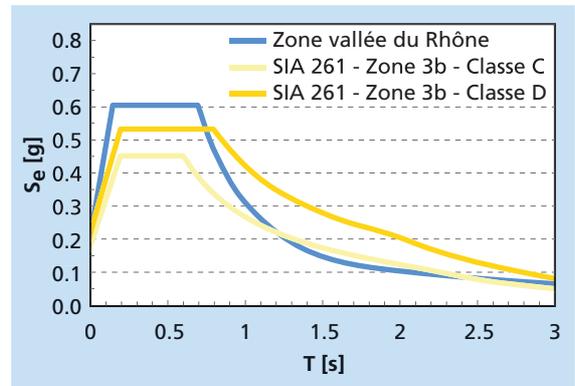
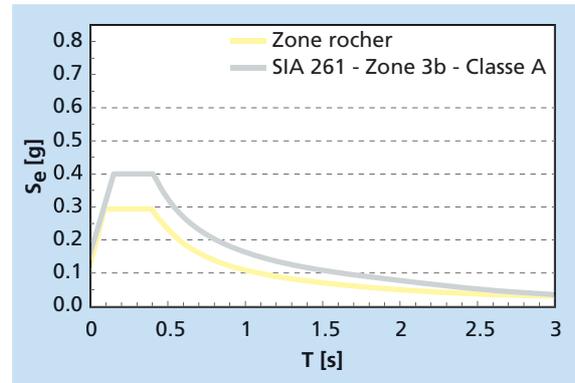
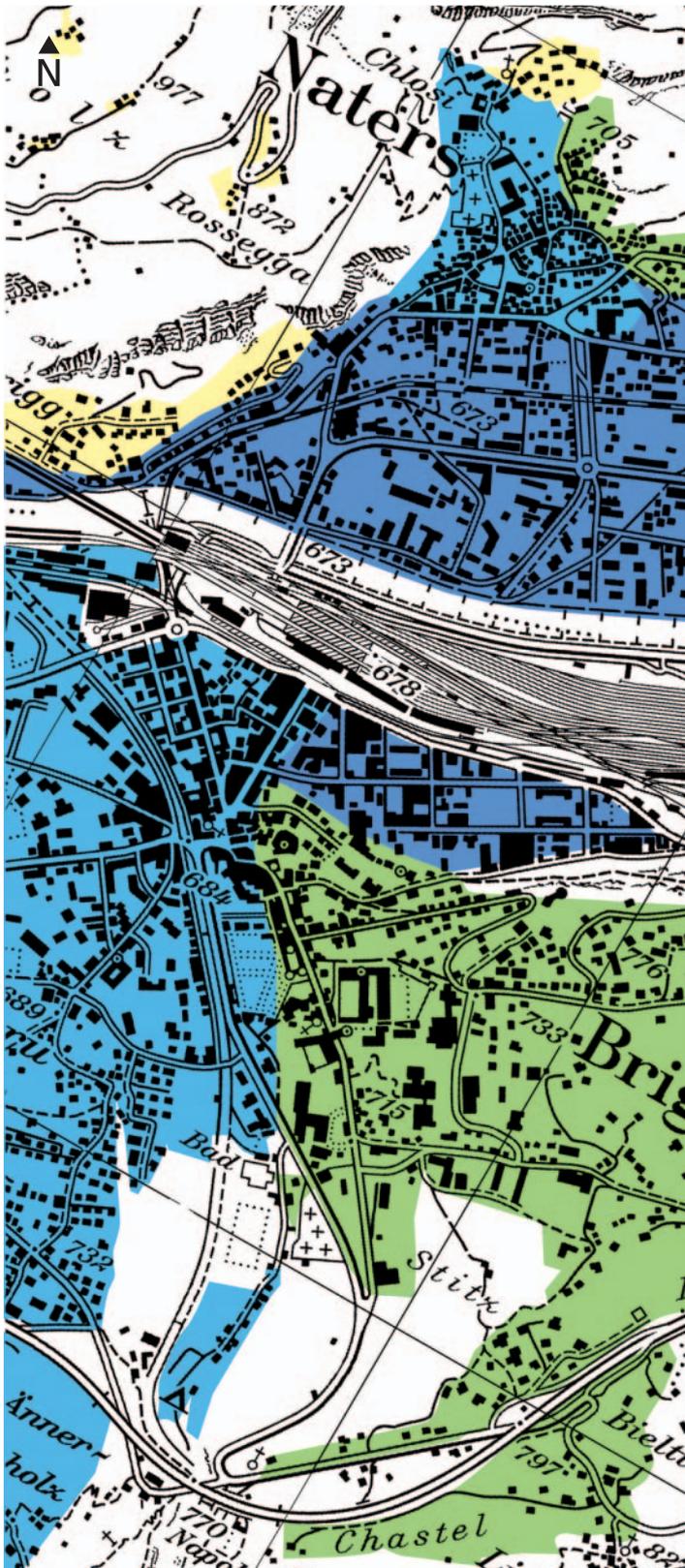


Figure 24: Extrait de la carte de microzonage sismique spectral de la région de Brigue. Comparaison des spectres de réponse élastique obtenus avec ceux de la norme SIA 261 pour la zone sismique 3b et les classes de sol de fondation pertinentes (CREALP/Résonance/Tissières 2001, non publié).

dimensionnement parasismique de structures puissent les utiliser simplement à la place des spectres de réponse élastique donnés dans la norme.

La carte de microzonage sismique spectral, quant à elle, définit les zones de validité des spectres de réponse obtenus. Là aussi, la simplicité d'utilisation reste importante, c'est pourquoi il a été décidé de retenir cinq zones. Ces zones sont déterminées d'après les informations géologiques disponibles et les résultats des simulations numériques. La carte de microzonage doit permettre une utilisation directe. Elle doit donc mettre en évidence les zones clairement définies, ainsi que les spectres de réponse qui y sont associés, ceux-ci étant donnés de manière graphique et analytique.

Les Figures 23 et 24 montrent, à titre d'exemple, une vue tridimensionnelle et un extrait de la carte de microzonage sismique spectral de la région de Brigue.

La Figure 24 présente aussi une comparaison des spectres de réponse élastique déterminés par l'étude de microzonage sismique spectral (spectres locaux) avec ceux d'un microzonage selon les zones de risque sismique et les classes de sol de fondation de la norme SIA 261 (spectres SIA):

- zone «Fels» (rocher); le spectre local est légèrement inférieur au spectre SIA pour la classe de sol de fondation pertinente (classe A)
- zone «Moräne» (moraine). Le spectre local est nettement inférieur au spectre SIA pour la classe de sol de fondation pertinente (classe E)
- zone «Rottental» (plaine du Rhône). Dans la partie constante des spectres (plateau) le spectre local est légèrement supérieur aux spectres SIA pour les classes de sol de fondation pertinentes (classe C ou D). Pour la partie descendante des spectres, le spectre SIA classe C est égal au spectre local et le spectre SIA classe D est supérieur au spectre local
- zone «Schuttkegel» (cône de déjection). Le spectre local est largement supérieur aux spectres SIA pour les classes de sol de fondation pertinentes (classe C ou D) jusqu'à une période d'environ 1 s.

Cette comparaison montre que le microzonage sismique spectral permet de réduire le conservatisme inhérent des spectres des normes là où cela est possible et de repérer les zones avec un potentiel d'amplification marqué pour lesquels un dimensionnement selon des prescriptions supérieures à celles de la norme SIA est nécessaire et justifié.

4.5.2 Région de Bâle

Dans le projet «Scénarios de tremblements de terre pour la Suisse» (Fäh et Giardini, 1998), un microzonage sismique spectral de la ville de Bâle a notamment été effectué (Kind, 2002, Kind et al., 2003). Celui-ci représente un développement du microzonage qualitatif de Bâle publié en 1997 (Noack et al., 1997; Fäh et al., 1997).

Le point de départ est constitué par les valeurs spectrales de l'accélération horizontale pour un rocher dur, pour différentes fréquences entre 0.5 et 12 Hz et pour différentes périodes de retour, comme cela est représenté à la Figure 25 pour la ville de Bâle.

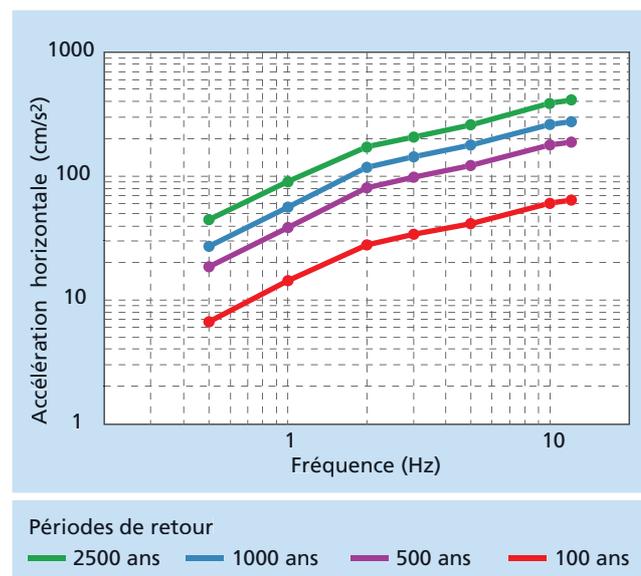


Figure 25: Spectres de réponse élastique pour Bâle, en fonction de différentes périodes de retour et valables pour un sol du type rocher dur. Extrait du site Internet du service sismologique suisse (<http://histserver.ethz.ch/hazard>, modifié).

En raison de l'absence d'enregistrements de tremblements de terre suffisamment forts, le microzonage a été effectué de manière indirecte par la détermination des caractéristiques géophysiques de la structure du sous-sol à Bâle et par la modélisation numérique associée de l'amplification des mouvements du sol. Un point important du travail a été le développement de méthodes bon marché pour la détermination des vitesses d'ondes de cisaillement du sous-sol (ondes S). Des méthodes basées sur l'interprétation de mesures de bruit ambiant ont été développées à cet effet. Celles-ci, outre leur coût modéré, peuvent être mises en œuvre en environnement urbain. La Figure 26 présente les sites pour lesquels des mesures ont été effectuées.

Dans un premier temps, une carte de la fréquence fondamentale de résonance du sous-sol a été établie. Pour ce faire, une analyse de polarisation H/V des vibrations ambiantes a été effectuée sur plus de 250 points de mesures. Les vibrations ambiantes ont la particularité d'avoir une polarisation du champ d'onde selon la composante horizontale pour le domaine de la fréquence fondamentale. De ce fait, il est possible de déterminer la fréquence fondamentale à l'aide de mesures simples.

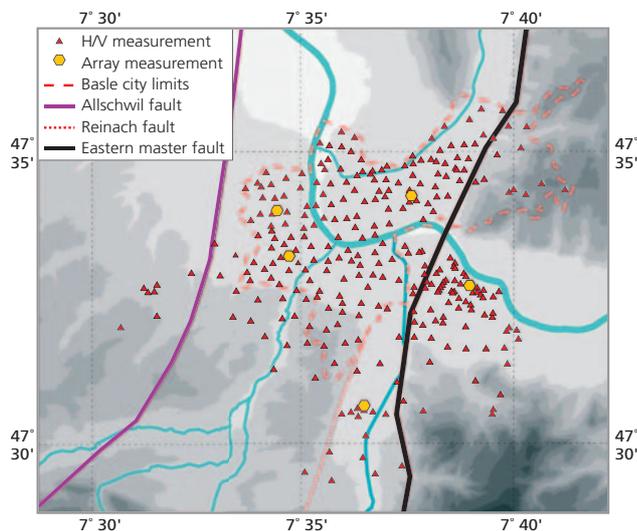


Figure 26: Vue d'ensemble des points de mesure sur lesquels des mesures de bruit ambiant ont été effectuées (Kind, 2002, modifié).

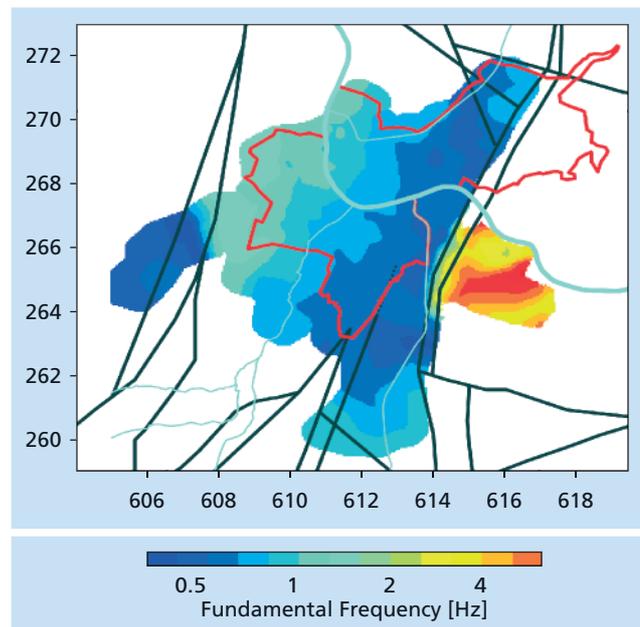


Figure 27: Fréquence fondamentale des sédiments à Bâle. Sont également représentées les failles connues (lignes noires) et les limites cantonales (lignes rouges). (Kind 2002; Kind et al., 2003).

La moitié de la fréquence fondamentale mesurée fournit une limite inférieure du domaine de fréquence pour lequel une amplification importante des mouvements du sol est attendue lors d'un séisme. L'amplification est maximale à la fréquence fondamentale de résonance. Pour les fréquences supérieures, il faut compter sur une amplification dont l'amplitude est fonction de la succession des couches de sédiments. La fréquence fondamentale est donc une grandeur importante en soi. Elle est de plus liée à la vitesse des ondes de cisaillement S des sédiments et à la profondeur du soubassement rocheux. Par interpolation entre les points de mesure, il est possible d'établir la carte de fréquence fondamentale (Figure 27). Au sein de la structure du fossé rhénan, les fréquences fondamentales sont très basses (0.4 à 1 Hz), ce qui révèle des sédiments peu rigides jusqu'à une grande profondeur. En dehors du fossé rhénan, les fréquences fondamentales sont supérieures à 2 Hz.

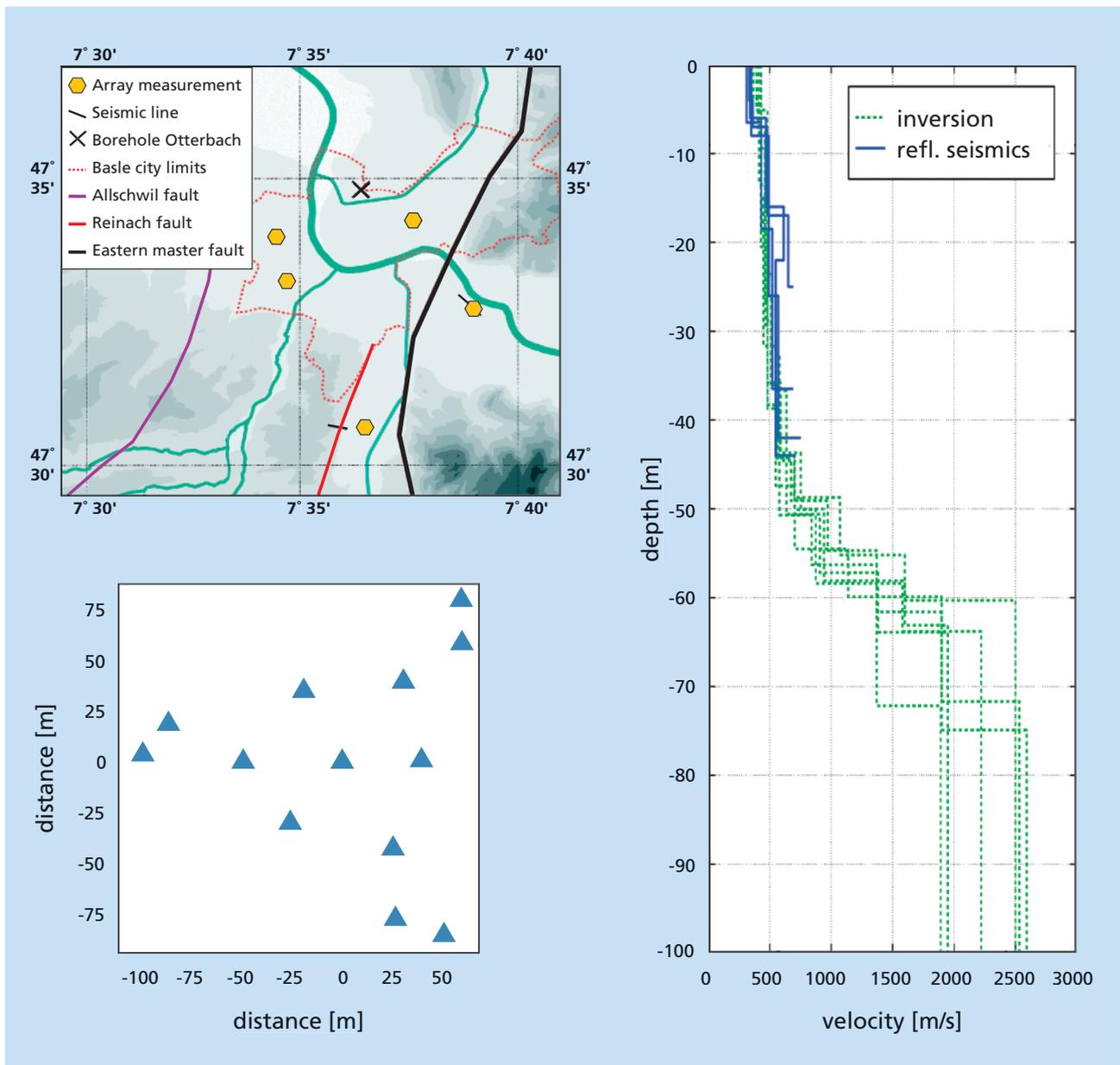
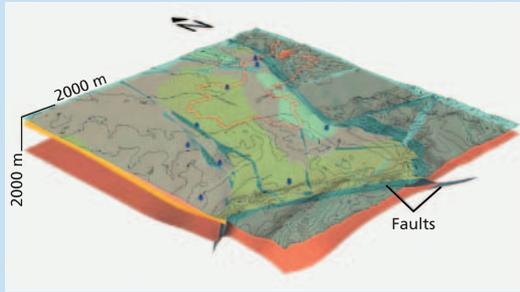


Figure 28: Emplacements des mesures de vitesses d'onde S à Bâle. Disposition typique pour une mesure en réseau et résultats des mesures au point de mesure le plus à l'est (Kind, 2002; Kind et al., 2003, modifié).

Dans un deuxième temps, les profils d'ondes de cisaillement S des sédiments ont été mesurés pour cinq emplacements au sein et autour de la ville de Bâle (emplacements en Figure 28). Les ondes de cisaillement sont un facteur critique pour les effets de site, car leurs amplitudes sont les plus importantes dans le cas de tremblements de terre locaux. Une méthode basée sur l'utilisation de mesures de bruit ambiant par des mini-réseaux de sismographes a été utilisée (7 à 13 instruments, écartement: 200 m). Les résultats pour

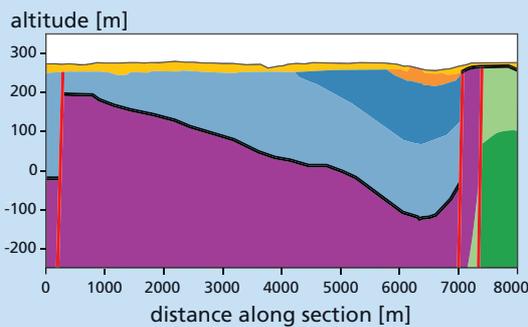
les 100 premiers mètres de sédiments peu rigides du fossé rhénan ont donné des vitesses d'ondes S allant de 400 à 800 m/s. Le développement de la méthode a fait partie intégrante du projet. De plus, deux profils de réflexion sismique d'ondes S, ainsi que des vitesses d'ondes P et S pour le rocher dans les forages géothermiques d'Otterbach, étaient à disposition pour cette étude.



Zechner et al., 2001
Earth Sciences, University of Basel

layer	abbreviation	ρ [kg/m ³]	V_p [m/s]	Q_p	V_s [m/s]	Q_s
Quarternary	QUA	1850	800 ^C (600-1000)	30	450 ^A (400-500)	15
Tüllinger layers	TUE	1850	2200 ^C (1000-2600)	50	725 ^A (650-900)	25
Molasse Alsacienne	ALS	1850	2200 ^D (2200-2800)	50	650 ^A (600-800)	25
Meletta layers	MEL	2000	1800 ^D (1400-2500)	50	600 ^A (450-700)	25
lower Tertiary/ first Meso- zoic	SAN	2350	3400 ^B (3200-3600)	125	2000 ^B (1800-2200)	50
upper Mesozoic	UPM	2550	4000 ^B (3600-4500)	125	2350 ^B (2150-2650)	50

^AArray measurement; ^BBorehole sonic log; ^CReflection seismics; ^DLiterature



depth [m]	V_s (MEL) [m/s]	V_s (ALS) [m/s]	V_s (TUE) [m/s]
25-50	600	575	650
50-75	600	675	850
75-100	600	725	925
100-150	650	775	1000
150-200	650	825	1025
200-250	700	850	1050
250-300	700	875	1075
300-350	750	900	1100
AV100	600 (450-700)	650 (600-800)	725 (650-900)

Figure 29: Modèle 3D: coupe au travers du modèle d'ouest en est et paramètres physiques avec leurs incertitudes (Kind, 2002; Kind et al., 2003, modifié).

L'Université de Bâle a établi un modèle tridimensionnel de la géométrie du sous-sol (Zechner et al., 2003). Celui-ci a servi de base pour l'établissement d'un modèle géophysique 3D intégrant les résultats des mesures, les informations de forage, ainsi que les données géologiques. Par la comparaison des fréquences fondamentales calculées à l'aide du modèle géophysique et celles mesurées in situ, il a été possible d'étendre les informations sur toute la profondeur des sédiments peu rigides et d'améliorer la géométrie du modèle géophysique (Figure 29).

Pour un nombre de profils 2D issus du modèle géophysique, une série de tremblements de terre à différentes distances, différentes profondeurs et résultant de différents mécanismes ont été simulés. La méthode hybride

appliquée (Fäh et Suhadolc, 1994) permet la modélisation de la source sismique et de la propagation des ondes pour un modèle bidimensionnel. Le comportement rhéologique du matériel est linéaire anélastique, car, pour les sédiments et le niveau d'aléa considérés, des comportements non linéaires ne sont attendus que pour quelques zones limitées de la région étudiée. De plus, le calcul réalisé avec un matériel linéaire est plus conservateur que celui effectué à l'aide d'un matériel non linéaire.

Par la comparaison des résultats modélisés pour les profils 2D et ceux modélisés pour une structure de référence (soubassement rocheux), l'amplification spectrale des mouvements du sol a pu être déterminée (spectres de réponse élastique avec 5% d'amortisse-

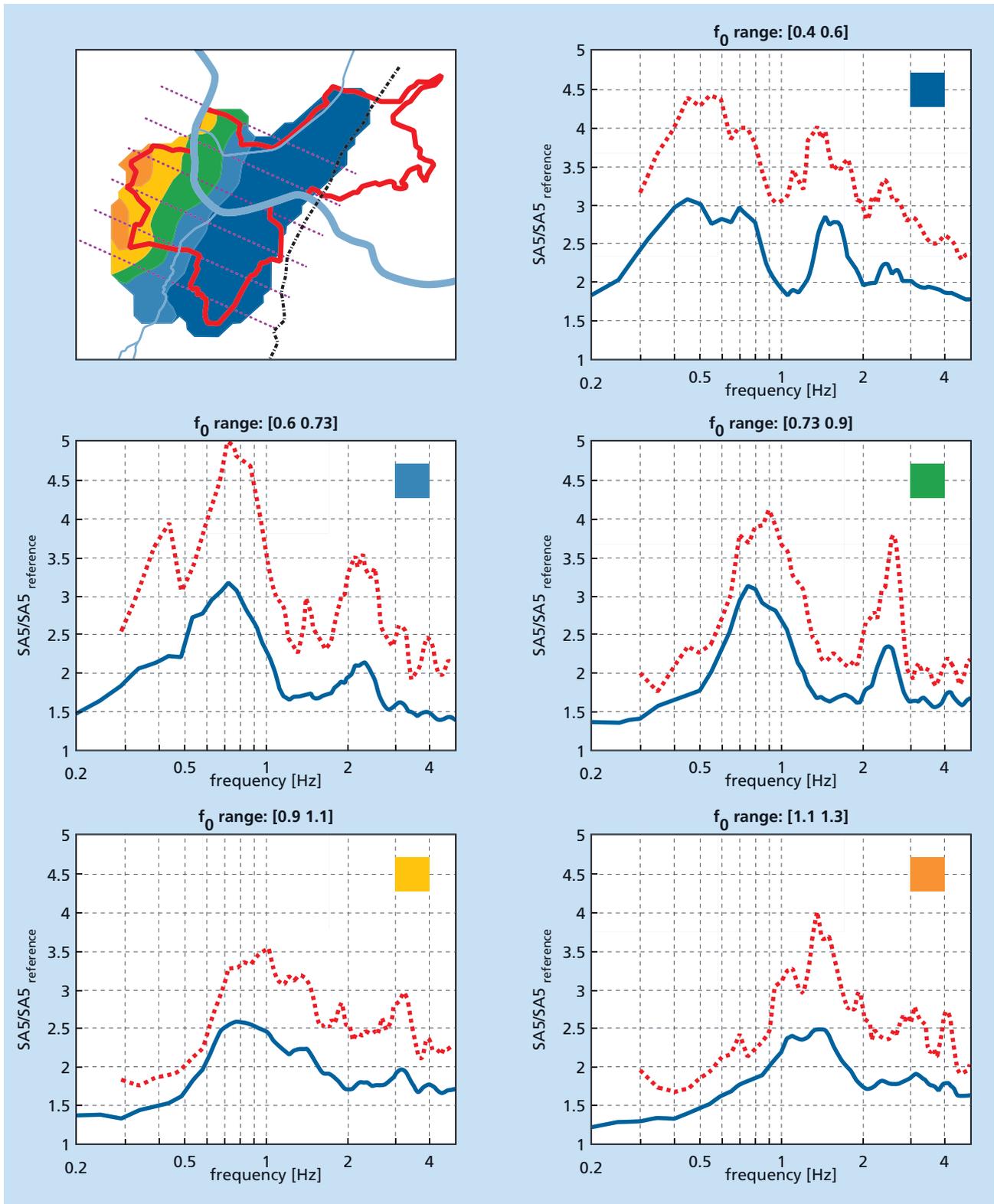


Figure 30: Microzonage de la ville de Bâle: amplification dans les cinq zones de la ville de Bâle (Kind, 2002; Kind et al., 2003). Sur la carte sont également représentés les contours de la ville, ainsi que les cours d'eau. Une ligne en traitillé marque le bord du fossé rhénan. La position des profils 2D des simulations sont marqués par des lignes en pointillé. Les couleurs des différentes zones se retrouvent dans les graphiques des courbes d'amplification. Pour les courbes d'amplification, l'amplification moyenne (ligne bleue continue) et l'amplification maximale (ligne rouge en traitillé) pour une multitude de tremblements de terre sont présentées.

ment). Sur la base de la fréquence fondamentale et de la similitude des courbes d'amplification, la ville de Bâle a été divisée en cinq zones de comportement homogène en cas de tremblement de terre. La définition des zones est basée sur la fréquence fondamentale des sédiments. La Figure 30 montre les amplifications moyennes et maximales attendues dans les différentes zones.

Finalement, l'établissement d'un spectre de réponse élastique propre au site par la multiplication du spectre

de la Figure 25 par les fonctions d'amplification de la Figure 30 a été effectué. Cela conduit à la définition d'un spectre de réponse élastique tenant compte des incertitudes. La Figure 31 illustre un exemple pour deux zones et compare les spectres de réponses élastiques obtenus par l'étude de microzonage avec les spectres de réponse élastiques de la norme SIA 261. Comme les spectres de la norme ont été choisis avec des hypothèses conservatrices, il était attendu que les valeurs du microzonage spectrale soient plus basses.

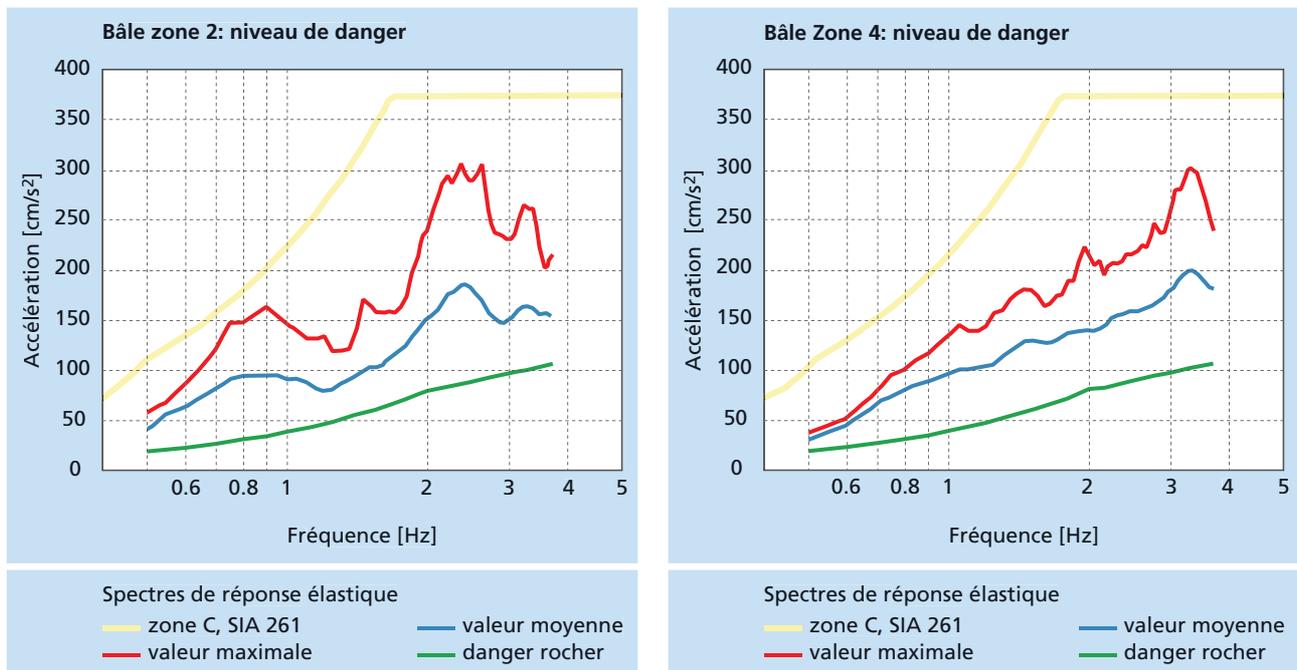


Figure 31: Spectre de réponse élastique de la norme SIA 261 (Zone sismique 3a, classe de sol de fondation C, 5% d'amortissement) comparés avec ceux de l'étude de microzonage pour la zone 2 (en bleu clair à la Figure 30) et la zone 4 (en orange à la Figure 30). (Fäh et al., 2004, modifié).

5. Aspects juridiques du microzonage

5.1 Cartes de dangers et aménagement du territoire

Les études de microzonage sont comparables aux cartes de danger qui sont élaborées en Suisse pour les avalanches, les crues et les mouvements de terrain. A l'aide du microzonage, on détermine les zones dont les sols présentent un comportement défavorable en cas de tremblements de terre et pour lesquels des prescriptions spéciales peuvent être requises lors de constructions ou de travaux de rénovation.

Le microzonage sismique n'aboutit pas en Suisse à une interdiction de construire. Il a, en revanche, une incidence directe sur les plans de zones et les règlements de construction. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de distinguer plusieurs niveaux d'appréciation de l'aléa sismique, en fonction des tâches des différents acteurs concernés ainsi que des utilisations du sol. Le microzonage sismique peut ainsi être considéré comme un des aspects de la facette «dangers naturels» qui relève de la Loi fédérale du 22 juin 1979 sur l'aménagement du territoire (LAT), art. 6 al. 2 let. c.

art. 6 al. 2 let. c de la Loi fédérale sur l'aménagement du territoire:

Les Cantons désignent les parties du territoire qui sont gravement menacées par des forces naturelles ou par des nuisances.

Cette législation trouve sa source à l'art. 75 de la Constitution fédérale (Cst.) consacré à l'aménagement du territoire :

Art. 75 Constitution fédérale:

La Confédération fixe les principes applicables à l'aménagement du territoire. Celui-ci incombe aux Cantons et sert une utilisation judicieuse et mesurée du sol et une occupation rationnelle du territoire.

Le plan directeur cantonal est un instrument au service de l'organisation du territoire. Il sert à la coordination et à la prévention. Quant à sa forme, le plan directeur est constitué d'une carte (échelle 1 : 50'000) et de commentaires. Il détermine l'orientation générale de la planification et de la collaboration. Le plan directeur contient des principes d'aménagement. Il décrit la

situation initiale, du point de vue de l'aménagement du territoire. Dans le domaine des dangers naturels, le plan directeur permet de détecter à l'avance les conflits entre l'affectation du sol et les dangers naturels, d'élaborer une vue d'ensemble sur les documents de base existants ou à établir concernant les dangers naturels (cartes de dangers) et de définir les exigences à mettre en œuvre dans les étapes suivantes de planification, particulièrement dans le cadre du plan d'affectation communal.

Les cartes des sols de fondation (échelle 1 : 25'000) ou les cartes de microzonage sismique spectral, si elles existent, appartiennent aux études de base du plan directeur cantonal. Elles permettent de détecter à l'avance les conflits potentiels entre une affectation du sol et les effets de site liés à l'aléa sismique. Le plan directeur cantonal donne aussi une vue d'ensemble des documents de base existants, permet de formuler les principes relatifs à la prévention parasismique à appliquer par le canton et de définir les exigences à mettre en place dans le cadre du plan d'affectation communal.

Le plan d'affectation devrait absolument tenir compte des zones à effet de site proposées par la carte des sols de fondation. Les prescriptions parasismiques particulières relatives aux zones à effet de site sont fixées dans le règlement communal de construction (Tableau 12, exemple du Valais). Elles ont un caractère contraignant pour les autorités et les particuliers.

5.2 Les devoirs des autorités, des mandataires et du propriétaire

La Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), en tant qu'association faîtière, met à jour régulièrement ses recommandations techniques (p.ex. Swisscodes 2003), qui sont l'expression de l'évolution des nouvelles connaissances et de l'acquis technique reconnu dans le domaine de la construction. Ces normes sont élaborées par des experts et font l'objet d'une très grande demande. Elles font souvent office de règles de l'art dans le domaine de la construction, ce que confirme la pratique juridique usuelle. La plupart des normes contiennent toutefois une clause admettant des dérogations pour autant que la solution choisie soit prouvée comme étant équivalente aux prescriptions fixées par la norme.

La prise en compte de l'effet de site local (géologie et topographie) sur les sollicitations sismiques est nouvelle et a été introduite par la nouvelle norme SIA 261 «Actions sur les structures porteuses» (2003). Le microzonage permet, à l'aide de l'attribution d'une classe de sol de fondation et d'un spectre associé, de dimensionner un ouvrage adapté à la zone sismique et aux conditions géologiques locales.

Le microzonage sismique est le complément local aux normes de construction pour la prévention parasismique. Il obéit à la même logique que l'ensemble des normes de la construction : la sécurité des personnes et des biens. Les différents acteurs (propriétaire, architectes et ingénieurs, Commune, Canton et Confédération) ont différentes tâches à entreprendre.

Les devoirs des autorités

Suite à une Décision du Conseil fédéral du 11 décembre 2000, les autorités fédérales sont tenues de respecter de façon contraignante les normes parasismiques en vigueur:

Le DFI, le DDPS, le DFF et le DETEC doivent respecter, lors de la planification et l'étude de constructions et d'installations nouvelles de la Confédération, les normes parasismiques existantes. Les exigences correspondantes doivent déjà être formulées lors de la mise au concours.

Le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) précise dans une Directive du 29 mai 2000 que:

Le DETEC n'autorise ou ne subventionne plus que des ouvrages et des installations qui respectent, lors de la planification de manière conséquente, les normes parasismiques en vigueur.

Par principe, il relève de la tâche de chaque Canton, dans le cadre du droit de la construction et de la planification, d'exiger et de faire appliquer des prescriptions relatives à la prévention parasismique. Les bases légales de Bâle-Ville seront citées ici en exemple:

Art. 59 Loi sur la construction et la planification (LCP):

Les bâtiments et les installations doivent être sûrs. Ils doivent être conçus, édifiés, équipés et entretenus de telle manière que les personnes n'encourent aucun danger évitable.

Art. 19 Ordonnance sur la construction et la planification (OCP):

Lorsque des lois et des ordonnances ne prescrivent rien d'autre, les bâtiments et les installations doivent être conçus, édifiés, équipés et entretenus selon les règles de l'art reconnues. L'inspecteur des constructions établit une liste de normes et des recommandations correspondant aux règles de l'art. Il fait en sorte que son accès soit rendu publique et la transmet sur demande.

Les obligations des mandataires (architectes et ingénieurs)

Selon le Code pénal (CP), les ingénieurs et architectes peuvent être tenus responsables de tous les vices visibles ou cachés dont l'objet peut être entaché, conformément à l'art. 229 (violation des règles de l'art de construire), s'ils ne tiennent pas compte de l'effet de site:

Art. 229 du Code pénal :

Celui qui intentionnellement aura enfreint les règles de l'art en dirigeant ou en exécutant une construction ou une démolition et aura par là sciemment mis en danger la vie ou l'intégrité corporelle des personnes sera puni de l'emprisonnement et de l'amende. La peine sera l'emprisonnement ou l'amende si l'inobservation des règles de l'art est due à une négligence.

Extrait d'un RCC : périmètres exposés aux dangers géologiques

DANGER SISMIQUE

La carte d'aléa sismique de la Suisse indique que l'ensemble du canton est exposé à un danger sismique modéré. La présence de terrains meubles peut encore augmenter le degré de danger. Partout où elle existe, la carte des sols de fondation avec les spectres spécifiques d'accélération régit le mode de construction parasismique.

Pour toute nouvelle construction – ou transformation visant à agrandir la surface habitable d'un bâtiment existant – les normes Swisscodes 261 et suivantes sont applicables. Pour les bâtiments d'une hauteur égale ou supérieure à deux niveaux sur rez (habitat, bureaux, halles de travail industrielles, etc.), le dimensionnement et les plans de l'ouvrage seront établis ou contrôlés par un ingénieur qualifié et transmis à l'autorité compétente en matière d'autorisation d'habiter.

Pour les bâtiments LIFELINE (hôpitaux, centres névralgiques, locaux de pompiers/ambulance/hélicoptères) et ceux à vocation publique (écoles, piscines, stades, salles de spectacles, surfaces commerciales, installations soumises à l'OPAM), un microzonage sismique spectral fixera le spectre d'accélération adéquat. Le dimensionnement et les plans de l'ouvrage à protéger seront soumis à l'approbation de l'autorité cantonale compétente.

Tableau 12: Extrait d'un règlement communal de construction RCC pour le canton du Valais (2003).

En outre, selon le Code des obligations (CO), les ingénieurs et les architectes s'engagent à réaliser des ouvrages conformément aux attentes du mandant. Lorsque l'application des prescriptions de la SIA est exigée contractuellement ou est assurée au mandant, le mandataire est tenu de prendre en compte les effets de site pour les nouveaux ouvrages.

La prise en compte de l'effet de site, qui complète l'application des principes de base pour la conception parasismique des bâtiments (Bachmann, 2002), est grandement facilitée pour l'ingénieur et l'architecte lors des études préliminaires et des études de projet (nouveaux ouvrages, transformation ou agrandisse-

ment d'ouvrages existants) par la consultation des cartes de sols de fondation (SIA 261) ou des cartes de microzonage spectral et de leurs spectres associés.

La prise en compte de l'effet de site (microzonage) est décidée dans la convention d'utilisation (SIA 260) entre le maître d'ouvrage et ses mandataires et fait partie de la base du projet. Ces études interviennent donc avant la mise à l'enquête publique, au stade du dimensionnement des ouvrages en fonction de la sollicitation sismique attendue. Le contrôle des dispositions parasismiques sur le chantier, lors de la phase d'exécution du projet, peut être rendu plus aisé en consultant ces cartes de microzonage, qui donnent aussi des informations complémentaires sur la qualité des sols de fondations, en termes de propriétés géotechniques.

La responsabilité du propriétaire d'ouvrage

Le propriétaire d'un ouvrage peut avoir une responsabilité causale, en vertu de l'art. 58 du Code des obligations (CO), si un ouvrage a été dimensionné d'une façon erronée en omettant l'effet de site. Il répond du dommage ainsi causé :

Art. 58 Code des obligations

Le propriétaire d'un bâtiment ou de tout autre ouvrage répond du dommage causé par des vices de construction ou par le défaut d'entretien. Est réservé son recours contre les personnes responsables envers lui de ce chef.

Annexe A: Glossaire

Accélération de pointe: Valeur de l'accélération maximale relevée sur un accélérogramme. En anglais, on parle de peak ground acceleration (PGA).

Accélération du sol: Modification cyclique de la vitesse du sol au cours d'un tremblement de terre. La valeur de l'accélération horizontale est en général plus élevée que celle de l'accélération verticale, et induit les plus grands dégâts aux constructions.

Accélération représentative: Correspond à une fraction de la valeur de l'accélération de pointe. L'accélération représentative est pertinente au domaine de fréquences concernant les structures les plus courantes

Accélérogramme: Mesure instrumentale d'un séisme, représentant la variation de l'accélération du sol en fonction du temps.

Aléa sismique: Défini à l'échelle régionale, il représente la probabilité qu'un événement d'une certaine intensité se produise selon une période de retour donnée. Il se calcule statistiquement sur la base de l'ensemble des tremblements de terre historiques répertoriés.

Classe de sol de fondation: La norme SIA 261 définit six classes de sols de fondation représentatives des conditions géologiques rencontrées en Suisse. Ces classes sont prises en compte au stade du microzonage selon SIA 261.

Comportement non linéaire: Modification des propriétés mécaniques d'un sol sous l'action d'un fort séisme, se traduisant par une diminution de la valeur de la vitesse des ondes S et de la fréquence propre.

Effets induits: Processus de mouvements de terrains, de liquéfaction ou de thixotropie engendrés sous l'action du séisme.

Effet de site: Configuration géologique, topographique ou géométrique particulière contribuant à une modification (amplification ou atténuation) de l'onde sismique incidente, de même que de son contenu fréquentiel.

Enjeu: Combinaison des personnes, des biens et des activités pouvant être menacés par un phénomène naturel.

Epicentre: Projection verticale de l'hypocentre d'un séisme en surface.

Essai triaxial: Mesure effectuée en laboratoire consistant à appliquer sur un échantillon des contraintes mécaniques croissantes, selon les trois directions de l'espace, afin d'en déterminer les caractéristiques mécaniques jusqu'à la rupture.

Fréquence fondamentale: Fréquence «naturelle» de vibration d'un sol ou d'une structure, à laquelle l'amplitude du mouvement est maximale.

Hypocentre (ou foyer sismique): Emplacement exact en profondeur de la rupture brusque causant le tremblement de terre, et de la source de propagation des ondes sismiques.

Intensité (MSK, EMS 98): Grandeur décrivant la force d'un séisme, répartie selon une échelle qualitative de douze degrés. Elle est déterminée d'après les observations liées au comportement humain, ainsi qu'aux dégâts sur les bâtiments et sur la nature. Les échelles MSK et EMS 98 sont les plus couramment utilisées en Europe.

Impédance: Grandeur caractérisant un matériau au moyen du produit de sa densité par la vitesse des ondes qui le traverse. On parle souvent de contraste d'impédance entre deux matériaux, engendrant à leur contact des processus de réflexion et de réfraction des ondes sismiques les traversant.

Liquéfaction: Phénomène momentané induit par un tremblement de terre, conduisant à la perte totale de la capacité portante d'un sol meuble. Affecte principalement les sables et limons saturés et peu compacts.

Linéaire-équivalent: Approximation linéaire du comportement non linéaire des sols. Celui-ci implique notamment que l'amplification du signal sismique sur un sol meuble par rapport au signal au rocher est proportionnellement moindre pour les grandes sollicitations que pour les petites sollicitations.

Macrozonage sismique: Démarche cartographique délimitant à grande échelle les différentes zones d'aléa sismique d'un pays ou d'une région donnée. Parfois aussi appelé simplement «zonage sismique».

Magnitude (de Richter): Grandeur introduite en 1935 par C. F. Richter et permettant de rendre compte de l'énergie libérée à la source (ou foyer) du séisme, par le biais d'une échelle logarithmique ouverte. Les valeurs usuelles varient le plus souvent de 1 à 9. Une augmentation d'une unité de l'échelle correspond à la libération d'environ 30 fois plus d'énergie.

Microzonage sismique selon SIA 261: Etape cartographique préliminaire d'une étude complète de microzonage, visant à subdiviser un territoire à l'échelle du 1: 25'000 selon les classes de sols de fondation de la norme SIA 261.

Microzonage sismique spectral: Etudes destinées à quantifier l'effet de site local par le calcul de spectres de réponses spécifiques au site étudié. On distingue les études de microzonage ponctuel (appliqué à un ouvrage unique) des cartes de microzonage spectral (appliquées à un secteur ou à une région définis).

Mitigation (des séismes): Terme dérivé du latin et désignant les actions entreprises dans une optique de diminution des effets d'un événement (sismique).

Ondes P: Les ondes P (ou de compression) sont caractérisées par une trajectoire des particules s'effectuant selon la même direction que la propagation de l'onde.

Ondes S: Les ondes S (ou de cisaillement) sont caractérisées par un mouvement des particules perpendiculaire à la direction de propagation.

Période de retour: Intervalle de temps séparant deux événements sismiques d'intensité ou de magnitude similaire.

Probabilité d'occurrence: Pour une valeur d'intensité ou de magnitude donnée, il s'agit de la probabilité que survienne un événement sismique, en un lieu et à l'issue d'un intervalle de temps déterminés.

Profil de vitesse: Coupe verticale du sous-sol illustrant la variabilité de la valeur de la vitesse des ondes de cisaillement (ondes S) en fonction de la profondeur.

Risque sismique: Grandeur chiffrée, généralement exprimée en mio de francs par année, représentant le produit de l'aléa sismique par la valeur des biens exposés ainsi que par leur vulnérabilité.

Séisme de référence: Séisme pris en compte dans les simulations numériques réalisées au stade du microzonage spectral. On choisit un séisme dont la magnitude, la durée, la distance épacentrale, la profondeur du foyer sont vraisemblables pour un contexte tectonique donné.

Signal sismique: Terme général englobant le contenu fréquentiel d'une onde sismique, son amplitude et sa durée.

Spectre de réponse: Graphique représentant l'accélération horizontale maximale de tout système statique simple possible soumis à un accélérogramme particulier. Voir l'Annexe C.

Vulnérabilité: Notion exprimant l'évaluation, qualitative ou quantitative, des dommages que pourraient subir un ou plusieurs bâtiments de même type pour des séismes de différents niveaux, en général faibles, modérés ou forts. Elle peut être traduite en pourcentage du coût de la construction ou par une échelle variant de 0 (aucun dommage) à 1 (perte totale).

Zonage sismique: Démarche cartographique effectuée à grande échelle et subdivisant une région selon diverses valeurs d'aléa sismique.

Annexe B: Echelle d'intensité EMS 98

Intensité EMS	Définition (résumé)	Description des effets typiques observés
I	Non ressenti	Non ressenti.
II	Rarement ressenti	Ressenti uniquement par quelques personnes au repos dans les maisons.
III	Faible	Ressenti à l'intérieur des habitations par quelques personnes. Les personnes au repos ressentent une vibration ou un léger tremblement.
IV	Largement observé	Ressenti à l'intérieur des habitations par de nombreuses personnes, à l'extérieur par très peu. Quelques personnes sont réveillées. Les fenêtres, les portes et la vaisselle vibrent.
V	Fort	Ressenti à l'intérieur des habitations par la plupart, à l'extérieur par quelques personnes. De nombreux dormeurs se réveillent. Quelques personnes sont effrayées. Les bâtiments tremblent dans leur ensemble. Les objets suspendus se balancent fortement. Les petits objets sont déplacés. Les portes et les fenêtres s'ouvrent ou se ferment.
VI	Dégâts légers	De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Chute d'objets. De nombreuses maisons subissent des dégâts non structuraux comme de très fines fissures et des chutes de petits morceaux de plâtre.
VII	Dégâts	La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Les meubles se déplacent et beaucoup d'objets tombent des étagères. De nombreuses maisons ordinaires bien construites subissent des dégâts modérés: petites fissures dans les murs, chutes de plâtres, chutes de parties de cheminées; des bâtiments plus anciens peuvent présenter de larges fissures dans les murs et la défaillance des cloisons de remplissage.
VIII	Dégâts importants	De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à rester debout. Beaucoup de maisons ont de larges fissures dans les murs. Quelques bâtiments ordinaires bien construits présentent des défaillances sérieuses des murs, tandis que des structures anciennes peu solides peuvent s'écrouler.
IX	Destructions	Panique générale. De nombreuses constructions peu solides s'écroulent. Même des bâtiments bien construits présentent des dégâts très importants: défaillances sérieuses des murs et effondrement structural partiel.
X	Destructions importantes	De nombreux bâtiments bien construits s'effondrent.
XI	Catastrophe	La plupart des bâtiments bien construits s'effondrent et même ceux ayant une bonne conception parasismique sont détruits.
XII	Catastrophe généralisée	Pratiquement tous les bâtiments sont détruits.

Description des divers degrés de l'échelle d'intensité EMS 98.

Annexe C: Définition et utilisation des spectres de réponse

Spectres de réponse élastique

Le concept du spectre de réponse élastique a été introduit en 1932 par M. A. Biot comme moyen pratique pour caractériser les mouvements du sol et leurs effets sur les structures.

Le spectre de réponse élastique est un concept central en ingénierie des tremblements de terre. Il permet de synthétiser la réponse maximale (en déplacement, vitesse ou accélération) subie par n'importe quel système statique élastique à un degré de liberté soumis à un accélérogramme de tremblement de terre.

Le spectre de réponse élastique en accélération est le plus couramment utilisé. Sous une forme lissée et analytiquement définie dans les normes de construction, il définit l'aléa et sert de base pour le calcul des spectres

de réponse de dimensionnement finalement utilisés pour le calcul des sollicitations sismiques de dimensionnement des structures.

L'élaboration d'un spectre de réponse élastique en accélération est présentée schématiquement par la Figure C1. Un accélérogramme est imposé successivement à une série de systèmes statiques linéaires à un degré de liberté ayant un amortissement visqueux de 5%. Pour chaque système statique, l'accélération maximale de la masse durant cette excitation est relevée. Il s'agit de la valeur d'accélération spectrale élastique valable pour la période propre du système statique considéré. De cette manière, le spectre de réponse élastique est construit point par point en balayant l'ensemble des périodes propres d'intérêt pour les structures (généralement de 0.01 à 10 s). La procédure est analogue pour les spectres de réponse en déplacement et en vitesse.

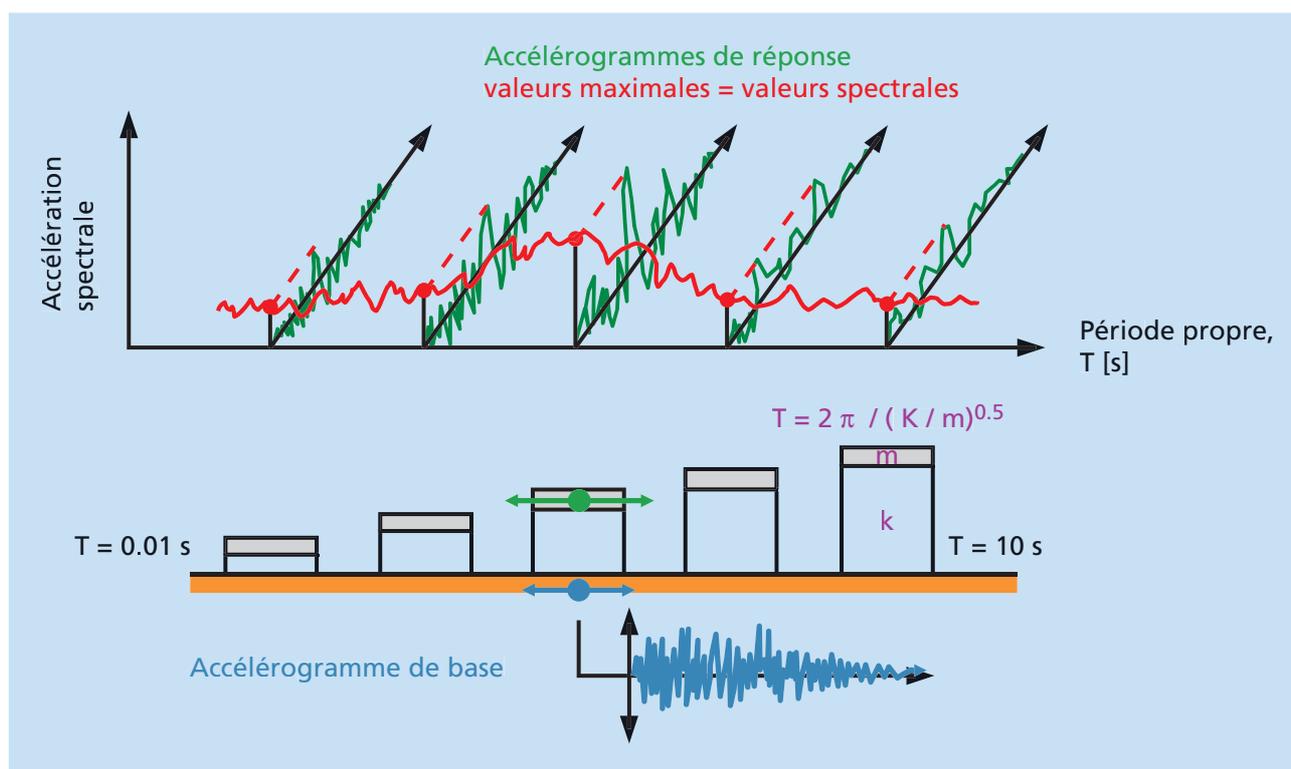


Figure C1: Principe d'élaboration d'un spectre de réponse élastique.

Pour définir des spectres de réponse élastique normés, des spectres de réponses issus de différents accélérogrammes représentatifs de la variabilité de l'aléa sismique pour le domaine d'étude envisagé sont utilisés. En fonction de la variabilité des résultats une courbe enveloppe définie de manière analytique est choisie comme représentative de l'ensemble des spectres de réponse calculés (voir Figure C2).

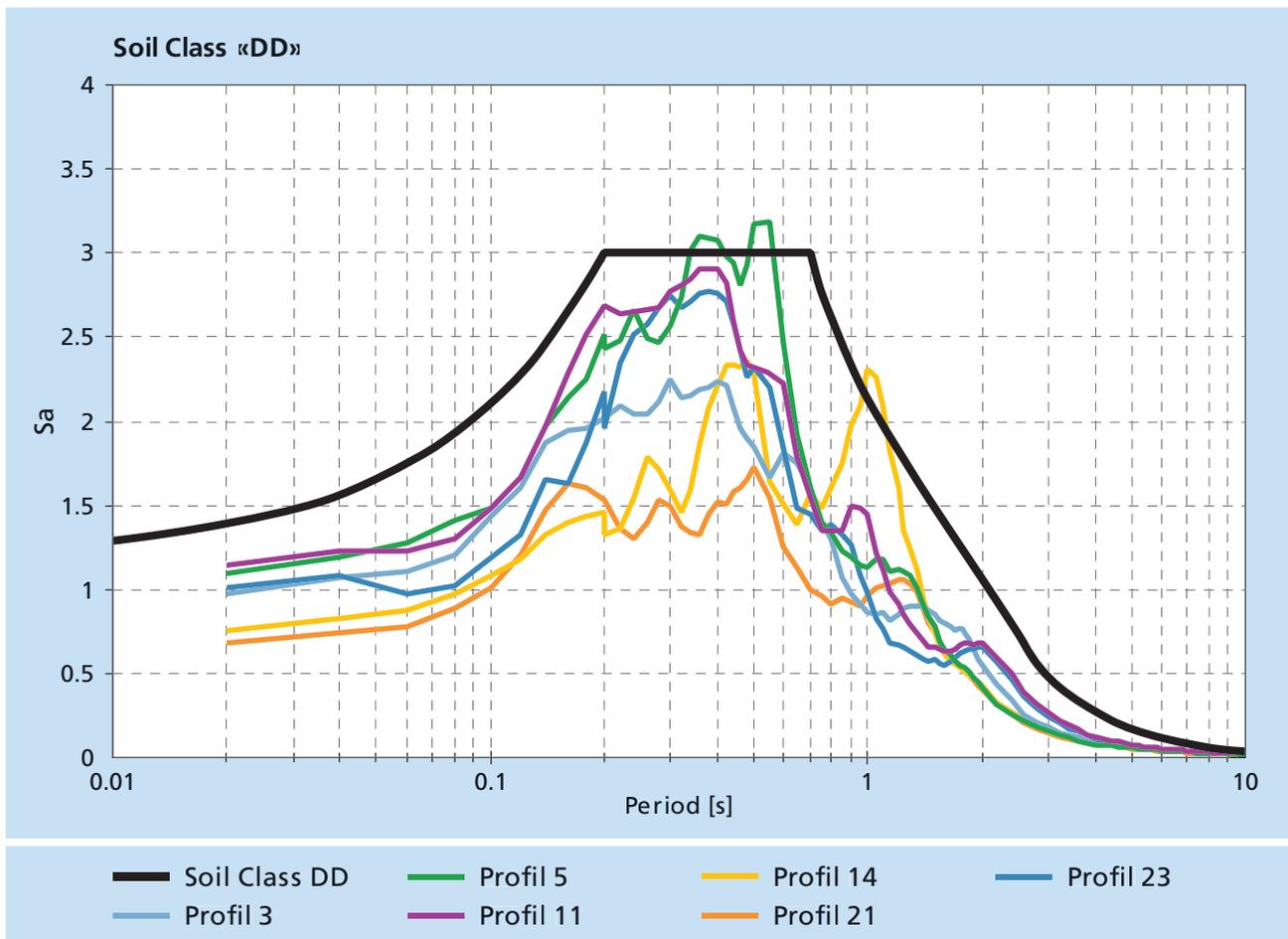


Figure C2: Spectre de réponse élastique idéalisé en fonction des spectres de réponse élastique moyens calculés pour six sites ayant une configuration géologique relativement similaire et dénommée classe de sol DD. Pour chaque site, le spectre de réponse élastique représente la moyenne des spectres de réponses élastiques générés à l'aide de huit accélérogrammes différents. Source: Löw et al., 2002.

La Figure C2 montre bien la variabilité intrinsèque des valeurs d'accélération spectrale élastique possibles pour des conditions données (zone d'aléa sismique et classe de sol définis), ainsi que le choix conservateur des spectres normalisés.

Spectres de réponse de dimensionnement

Les spectres de réponse de dimensionnement sont déterminés sur la base des spectres de réponse élastique en prenant en compte deux facteurs, qui sont le coefficient de comportement de la structure et le facteur d'importance de la structure, respectivement dénommés q et γ_f dans la norme SIA 261.

Le coefficient de comportement q permet de réduire les valeurs spectrales élastiques en fonction de la capacité de la structure considérée à dissiper l'énergie introduite par les secousses sismiques. Plus la structure

est apte à dissiper l'énergie tout en garantissant l'absence de rupture fragile, plus le coefficient q est élevé et plus les valeurs spectrales de dimensionnement sont réduites par rapport aux valeurs spectrales élastiques.

Le facteur d'importance γ_f est un facteur multiplicateur en fonction de la classe d'ouvrage considérée selon le Tableau 27 de la norme SIA 261.

La Figure C3 présente la différence entre un spectre de réponse élastique et un spectre de dimensionnement pour les deux cas suivants:

- $q = 1.5$ et $\gamma_f = 1.2$ (maçonnerie non armée, structure non ductile, classe d'ouvrage II)
- $q = 3.0$ et $\gamma_f = 1.0$ (béton armé, structure ductile, classe d'ouvrage I).

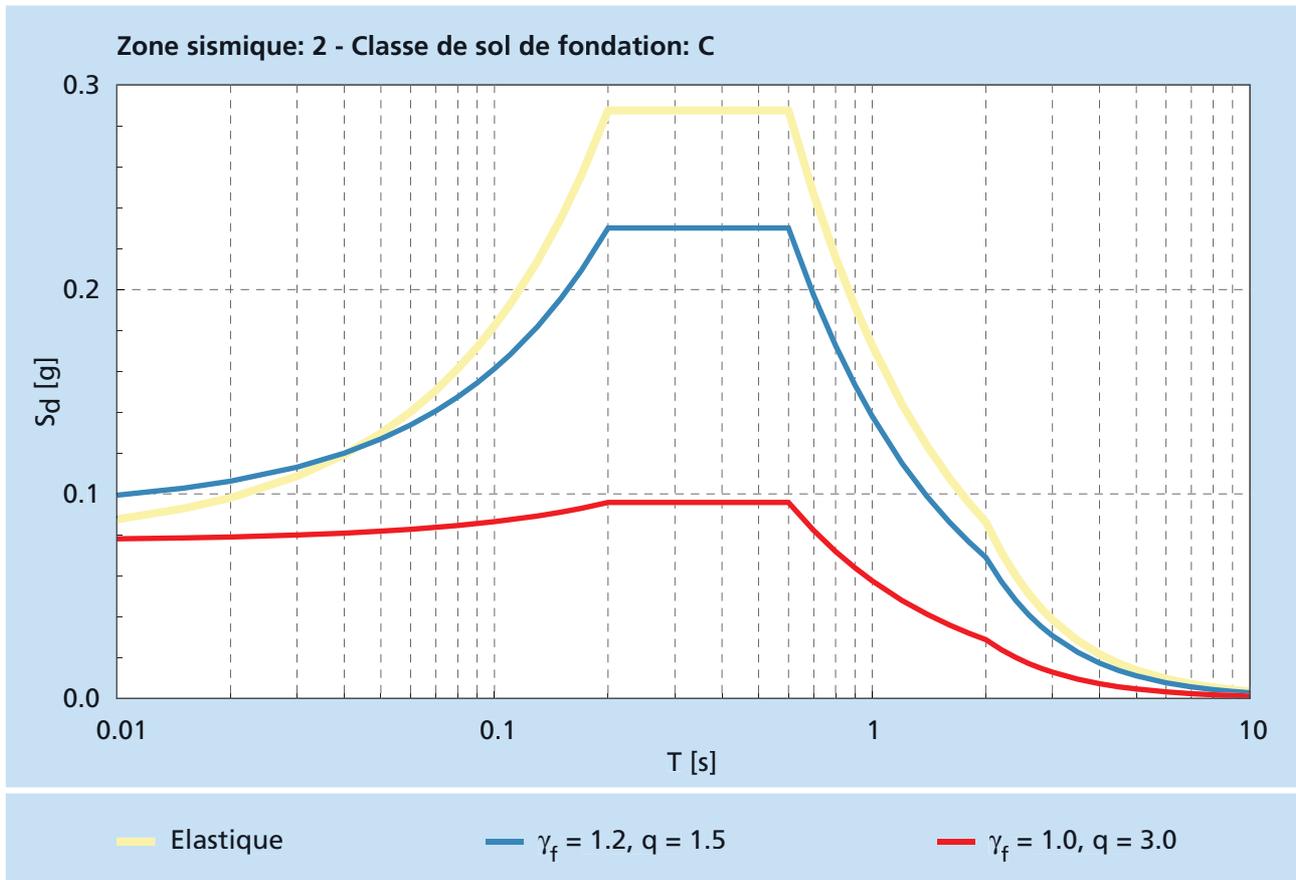


Figure C3: Différence entre spectre de réponse élastique et deux spectres de dimensionnement selon la norme SIA 261 pour un sol de fondation de classe C en zone sismique 2.

La Figure C3 démontre l'importance des choix de l'ingénieur, au travers du facteur de comportement q , sur le niveau effectif des valeurs spectrales de dimensionnement.

Utilisation des spectres de réponse

Les spectres de réponse élastique définissent l'aléa sismique et permettent une comparaison quantitative des sollicitations sismiques attendues dans diverses conditions.

Les spectres de réponse de dimensionnement permettent le calcul des sollicitations sismiques de dimensionnement pour les structures en prenant en compte notamment leur importance et leur ductilité. Le principe d'utilisation est explicité ci-après de manière synthétique pour la méthode dite des forces de remplacement.

- L'ingénieur calcule la période de vibration fondamentale T_1 de sa structure à l'aide d'un modèle de calcul ou d'une formule empirique.
- Il calcule le spectre de réponse de dimensionnement en fonction de la classe de sol de fondation, du coefficient de comportement q et du facteur d'importance γ_f .
- Il lit la valeur d'accélération spectrale de dimensionnement, S_d , qui correspond à la période fondamentale de vibration T_1 calculée.
- Il calcule ensuite, en suivant les prescriptions de la norme SIA 261, les sollicitations de dimensionnement que devra reprendre la structure en fonction de S_d et de la masse m .

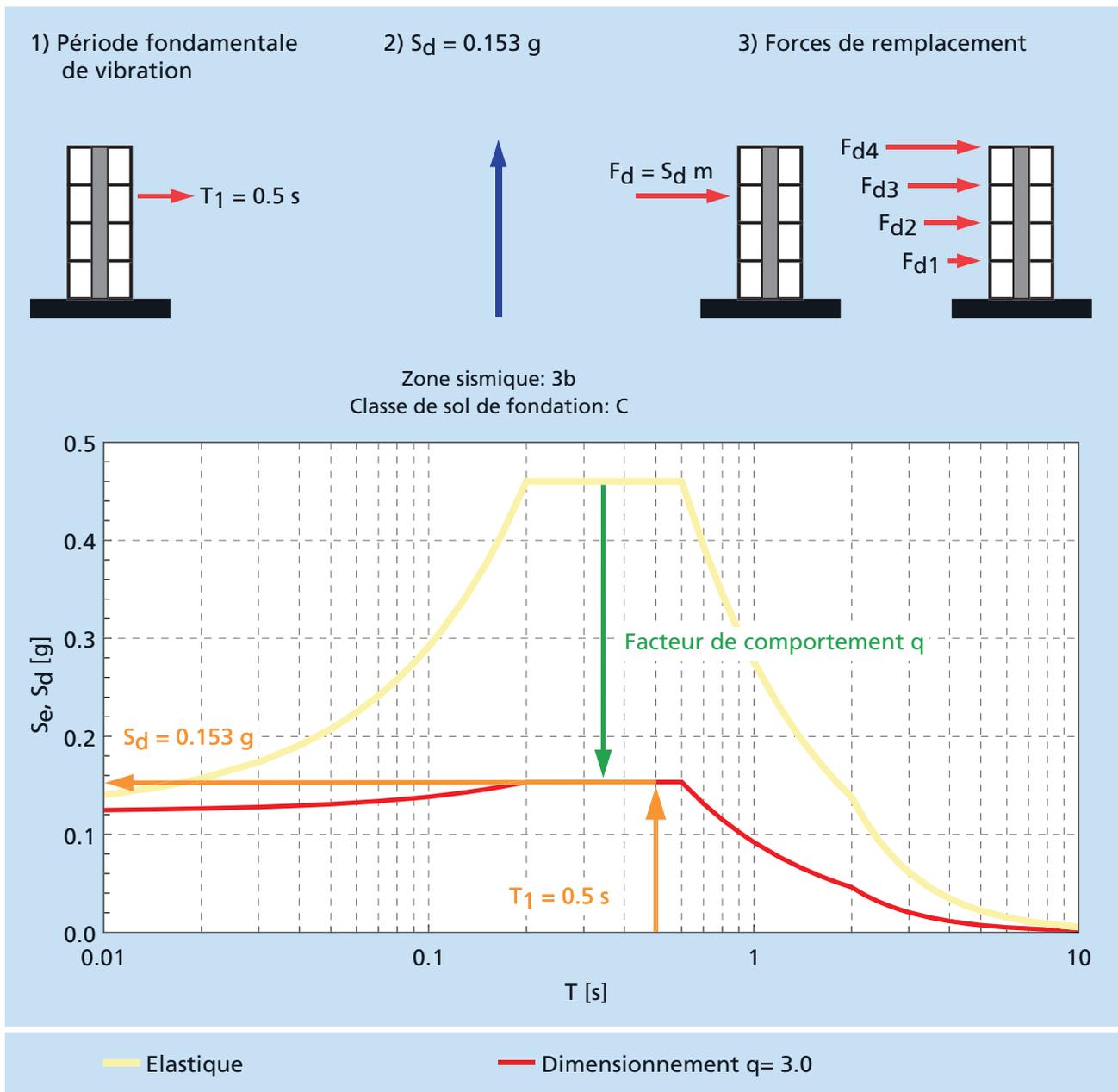


Figure C4: Utilisation du spectre de réponse de dimensionnement dans le cadre de la méthode des forces de remplacement.

Annexe D: Cartes de sols de fondation interactives sur Internet

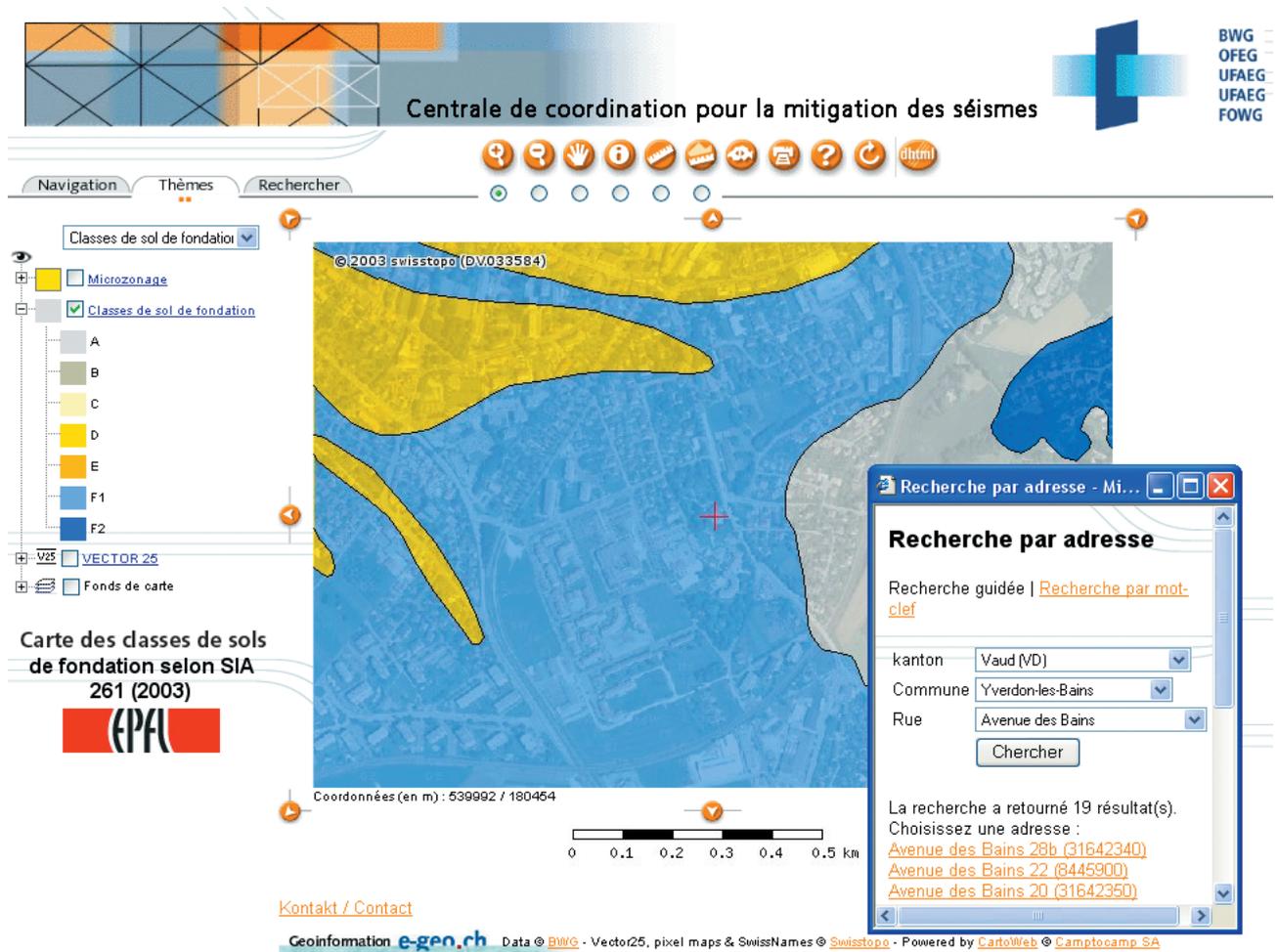


Figure D1: Représentation interactive de cartes de sols de fondations sur internet, sous le site www.bwg.admin.ch. Un outil de recherche par coordonnées (x ; y) et/ou par adresse permet d'obtenir rapidement les informations relatives à l'aléa sismique régional, la classe de sol, ainsi que le spectre de réponse élastique associé. Exemple issu du canton de Vaud (EPFL, 2003).

Liste des Figures et des Tableaux

Figure 1: Vue d'ensemble des dégâts aux bâtiments lors du tremblement de terre de Bâle de 1356 et modélisation de l'effet de site (Fäh et al., Service Sismologique Suisse SED, 1997, modifié).

Figure 2: Répartition des tremblements de terre historiques ayant provoqué des dégâts. Source: SED (ECOS), 2003 (Fäh et al., 2003, modifié).

Figure 3: Epicentres et magnitudes moment observés en Suisse et répertoriés par le catalogue ECOS. Source: SED, 2003 (modifié).

Figure 4: Répartition pondérée des risques en Suisse. Source: KATARISK, 2003.

Figure 5: Modèle de calcul d'estimation des dégâts pour un séisme avec prise en compte de l'effet de site (microzonage).

Figure 6: Carte de l'aléa sismique en Suisse représentée par la valeur de dimensionnement de l'accélération horizontale en cm/s^2 , pour une période de retour de 500 ans, Source SED, 2003.

Figure 7: Carte des zones de l'aléa sismique en Suisse selon SIA 261 (2003).

Figure 8: Proposition de procédure pour la sélection du type de microzonage approprié dans le cas d'un ouvrage ponctuel (à gauche) et d'une zone territoriale (à droite).

Figure 9: Un tremblement de terre résulte de la libération brusque d'énergie sur une surface de rupture en profondeur.

Figure 10: Enregistrement du 15 septembre 1976 d'une réplique de magnitude (M_w) 6.0 du séisme du Friuli (IT) à la station de Forgaria-Cornio située sur un sol meuble compact à une distance de 14 km de l'épicentre.

Figure 11: Influence des conditions locales de sols sur les sollicitations sismiques.

Figure 12: Effet de site topographique du séisme d'Alger/Boumerdès (2003) avec concentration des dégâts sur les bords des falaises surplombant la vallée. Influence des conditions locales de sols sur les sollicitations sismiques

Figure 13: Effets de site induits selon la nature des terrains meubles.

Figure 14: Eboulement du versant S du Rawylhorn engendré par le séisme du 30 mai 1946 à Sierre (magnitude 6 et éboulement de 5 millions de mètres cubes).

Figure 15: Glissement rotationnel induit par le tremblement de terre du 13 janvier 2001 à la Carretera de San Vicente (El Salvador).

Figure 16: Enfoncement d'un immeuble vers l'arrière suite à la liquéfaction de son sol de fondation (séisme d'Izmit, Turquie, 1999).

Figure 17: Mesure des fréquences fondamentales des sols meubles, dans la région d'Yverdon (Widmer et al., 2003).

Figure 18: Phénomène de résonance (B) entre le sol et les structures se produisant à une fréquence déterminée (Weidmann, 2002).

Figure 19: Domaines de périodes fondamentales de certains types d'ouvrages, en relation avec les spectres de réponse des sols de fondations prescrits dans la norme SIA 261 (2003).

Figure 20: Extrait de la carte des sols de fondation de la feuille Yverdon-les-Bains (Widmer 2002).

Figure 21: Spectres de réponse associés aux diverses classes de sols selon SIA 261.

Figure 22: Profil de vitesse des ondes S dans la région de Brigue (CREALP/Résonance/Tissières 2001, modifié, non publié).

Figure 23: Vue tridimensionnelle de la région de Brigue et du microzonage sismique spectral (CREALP/Résonance/Tissières 2001, non publié).

Figure 24: Extrait de la carte de microzonage sismique spectral de la région de Brigue (CREALP/Résonance/Tissières 2001, non publié).

Figure 25: Spectres de réponse élastique pour Bâle, en fonction de différentes périodes de retour et valables pour un sol du type rocher dur. Extrait du site Internet du service sismologique suisse (<http://histserver.ethz.ch/hazard>, modifié).

Figure 26: Vue d'ensemble des points de mesure sur lesquels des mesures de bruit ambiant ont été effectuées (Kind, 2002, modifié).

Figure 27: Fréquence fondamentale des sédiments à Bâle. Sont également représentées les failles connues (lignes noires) et les limites cantonales (lignes rouges). (Kind 2002; Kind et al., 2003).

Figure 28: Emplacements des mesures de vitesses d'onde S à Bâle. Disposition typique pour une mesure en réseau et résultats des mesures au point de mesure le plus à l'est (Kind, 2002; Kind et al., 2003, modifié).

Figure 29: Modèle 3D: coupe au travers du modèle d'ouest en est et paramètres physiques avec leurs incertitudes (Kind, 2002; Kind et al., 2003, modifié).

Figure 30: Microzonage de la ville de Bâle: amplification dans les cinq zones de la ville de Bâle (Kind, 2002; Kind et al., 2003). Sur la carte sont également représentés les contours de la ville, ainsi que les cours d'eau. Une ligne en traitillé marque le bord du fossé rhénan. La position des profils 2D des simulations sont marqués par des lignes en pointillé. Les couleurs des différentes zones se retrouvent dans les graphiques des courbes d'amplification. Pour les courbes d'amplification, l'amplification moyenne (ligne bleue continue) et l'amplification maximale (ligne rouge en traitillé) pour une multitude de tremblements de terre sont présentées.

Figure 31: Spectre de réponse élastique de la norme SIA 261 (Zone sismique 3a, classe de sol de fondation C, 5% d'amortissement) comparés avec ceux de l'étude de microzonage pour la zone 2 (en bleu clair à la Figure 30) et la zone 4 (en orange à la Figure 30). (Fäh et al. 2004, modifié).

Figure C1: Principe d'élaboration d'un spectre de réponse élastique.

Figure C2: Spectre de réponse élastique idéalisé en fonction des spectres de réponse élastique moyens calculés pour six sites ayant une configuration géologique relativement similaire et dénommée classe de sol DD. Pour chaque site, le spectre de réponse élastique représente la moyenne des spectres de réponses élastiques générés à l'aide de huit accélérogrammes différents. Source: Löw et al., 2002.

Figure C3: Différence entre spectre de réponse élastique et 2 spectres de dimensionnement selon la norme SIA 261 pour un sol de fondation de classe C en zone sismique 2.

Figure C4: Utilisation du spectre de réponse de dimensionnement dans le cadre de la méthode des forces de remplacement.

Figure D1: Représentation interactive de cartes de sols de fondations sur internet, sous le site www.bwg.admin.ch. Un outil de recherche par coordonnées (x ; y) et/ou par adresse permet d'obtenir rapidement les informations relatives à l'aléa sismique régional, la classe de sol, ainsi que le spectre de réponse élastique associé. Exemple issu du canton de Vaud (EPFL, 2003).

Tableau 1: Classes d'ouvrages selon le Tableau 26 de la norme SIA 261 (2003).

Tableau 2: Propriétés des études de microzonage indicatif basé sur la norme SIA 261 et des études de microzonage spectral.

Tableau 3: Critères déterminant la sélection d'un type de microzonage.

Tableau 4: Etude de la stabilité de terrains sous séismes.

Tableau 5: Le critère granulométrique d'un terrain saturé et peu compact.

Tableau 6: Etude de la liquéfaction sous séismes.

Tableau 7: Descriptions des classes de sol de fondation modifiées d'après la norme SIA 261 (2003).

Tableau 8: Aide à la décision pour l'attribution d'une formation géologique à une classe de sol de fondation SIA 261 (CREALP, 2004).

Tableau 9: Données de base dans le cadre d'études de microzonage sismique.

Tableau 10: Récapitulatif des méthodes d'évaluation des effets de site.

Tableau 11: Démarche utilisée pour l'établissement du microzonage sismique des secteurs de Brigue, Viège et Monthey.

Tableau 12: Extrait d'un règlement communal de construction RCC pour le canton du Valais (2003).

Bibliographie

Normes et recommandations

AFPS (1990): Recommandations AFPS 90 pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées.

AFPS (1993): Guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique, 21 p. et annexes.

Eurocode 8 (1997): Conception et dimensionnement des structures pour la résistance aux séismes (Collection bâtiments). SIA V 160 801, 5 parties.

JGS (1999): Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards (revised version). Japanese Geotechnical Society, 115 p. and annexes.

Mayer-Rosa, D. et Jimenez, M.J. (2000): Seismic Zoning, State-of-the-art and Recommendations for Switzerland, LHG, Geol. Ber. 26, 75 p. and annexes.

SIA (1989): Norme 160, Action sur les structures porteuses. Zurich, 2^e édition, 101p.

SIA (2003): Norme 261, Actions sur les structures porteuses. Zurich, 75p.

Estimation des effets de site

Abraham, O., Blanchard, D. et Hévin, G. (1997): Exemples d'utilisation des ondes de surface pour la reconnaissance d'objets du génie civil. Colloque GEOFCAN, Géophysique des sols et des formations superficielles, Bondy, France, 81–85.

Aki, K. (1957): Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to micro-tremors. Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ. 35, 415–457.

Aki, K. (1988): Local site effects on strong ground motion. Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 11: Recent advances in Ground motion evaluation, 20, 103–155.

Aki, K. (1993): Local site effects on weak and strong ground motion, Tectonophysics, 218, 93–111.

Aki, K. and Larner, K.L. (1970): Surface motion of a layered medium having irregular interface due to incident plane SH waves. J. Geophys. Res., 75, 933–954.

Ambraseys, N., Smit, P., Berardi, R., Rinaldis, D., Cotton, F. and Berge-Thierry, C. (2000): European Strong Motion Database. European Commission, Directorate General XII, Science, Research and Development, Environment and Climate Programme, CD-ROM.

Bard, P.Y. and Riepl-Thomas, J. (1999): Wave propagation in complex geological structures and their effects on strong ground motion. In Wave Motion Problems in Civil Engineering, Computational Mechanics Publications, Southampton, 57.

Bay, F. (2002): Ground Motion Scaling in Switzerland: Implications for Hazard Assessment. Dissertation Nr.14567, EPF 2002.

Boatwright, J., Fletcher, J.B. and Fumal, T.E. (1991): A general inversion scheme for source, site and propagation characteristics using multiply recorded sets of moderate size earthquakes. Bull. Seism. Soc. Am., 81, 1754–1782.

Borcherdt, R.D. (1970): Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. Bull. Seism. Soc. Am. 60, 29–61.

Borcherdt, R.D. (1994): Estimate of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). – Earthquake Spectra 10, 617–653.

Bouchon, M. (1981): A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media. Bull. Seism. Soc. Am., 71, 959–971.

Bour, M. (1993): Simulation de forts mouvements du sol à partir de petits séismes utilisés comme fonctions de Green empiriques. PhD thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Cotton, F., Berge, C., Lemeille, F., Pitarka, A., Lebrun, B. and Vallon, M. (1998): Tree-dimensional simulation of earthquakes and seismic hazard in the Grenoble's basin (Western Alps). 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France.

CyberQuake (1998): User's Guide. Version 1.1 (Version 2 in Arbeit), BRGM, Orléans.

Duval, A.-M. (1994): Détermination de la réponse d'un site aux séismes à l'aide du bruit de fond: Evaluation expérimentale. Thèse de Doctorat, Paris VI, 265, (in French).

- Fäh, D., Kind, F. and Giardini, D. (2001): A theoretical investigation of average H/V ratios. *Geophysical Journal Int.*, 145, 535–549.
- Fäh, D., Kind, F. and Giardini, D. (2001): Structural information extracted from microtremor wavefields. Submitted to the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, England, paper n° 819.
- Fäh, D., Rüttener, E., Noack, T. and Kruspan, P. (1997). Microzonation of the city of Basel. *Journal of Seismology*, 1, 87–102.
- Fäh, D., D. Giardini, F. Bay, F. Bernardi, J. Braunmiller, N. Deichmann, M. Furrer, L. Gantner, M. Gisler, D. Ise-negger, M.J. Jimenez, P. Kästli, R. Koglin, V. Masciadri, M. Rutz, C. Scheidegger, R. Schibler, D. Schorlemmer, G. Schwarz- Zanetti, S. Steimen, S. Sellami, S. Wiemer, J. Wössner, (2003): Earthquake Catalogue Of Switzerland (ECOS) And The Related Macroseismic Database. *Eclogae geol. Helv*, 96, 219–236.
- Fäh, D., Kind, F., Gisler, M., Sellami, S., Becker, A., Ferry, M., Giardini, D., Zechner, E., Huggenberger, P. (2003): Spektrale Mikrozonierung und Gefährdungsanalyse für Basel Stadt. Ein Bericht zuhanden des Kantons Basel Stadt, Schweizerischer Erdbebendienst EPF Zurich, 20.11.2003.
- Fäh, D. and Suhadolc, P. (1994): Application of numerical wave-propagation techniques to study local soil effects: the case of Benevento (Italy). *PAGEOPH*, Vol. 134, No. 4, 513–536.
- Field, E.H, Hough, S.H. and Jacob, K.H. (1990): Using microtremors to assess potential earthquake site response: A case study in Fluhing Meadows, New York City. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 1456–1480.
- Field, E.H. and Jacob, K. (1995): A comparison and test of various site response estimation techniques, including three that are non reference-site dependent. *Bull. seism. Soc. Am.*, 85, 1127–1143.
- Frischkecht, C. (2000): Seismic soil amplification in alpine valleys. A case study: the Rhône valley, Valais, Switzerland. *Terre & Environnement, Sciences de la Terre*, Université de Genève.
- Graves, R.W. (1995): Preliminary analysis of long period basin response in the Los Angeles region from the 1994 Northridge earthquake. *Geophys. Res. Let.*, 22, 101–104.
- Hartzell, S.H. (1978): Earthquake aftershocks as Green's functions. *Geophys. Res. Let.*, 5, 104–107.
- Hutchings, L. (1994): Kinematic earthquake models and synthesised ground motion using empirical Green's functions. *BSSA*, 84, 1028–1050.
- Horike, M., 1985, Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas, *J. Phys. Earth* 33, 59–96.
- Irikura, K. (1983): Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes. *Bull. Disas. Prev. Inst., Kyoto Univ.*, 33, 63–104.
- Irikura, K. (1986): Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's functions. *Proc. 7th Jap. Earth. Eng. Symp.*, 151–156.
- Irikura, K. and Kamae, K. (1994): Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique. *Annali di Geofisica*, XXXVII-6, 1721–1743.
- Jongmans, D. and Campillo, M. (1993): A study of the response of the Ubaye valley (France) for incident SH and SV waves: comparison between measurements and modeling. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 907–924.
- Jongmans, D. and Campillo, M. (1993): The determination of soil attenuation by geophysical prospecting and the validity of measured Q values for numerical simulations. *Int. Jour. Soil Dynamics and Earth. Eng.*, 12, 149–158.
- Jongmans, D. and Demanet, D. (1993): The importance of surface waves in vibration study and the use of Rayleigh waves for determining the dynamic characteristics of soils. *Engineering Geology*, 34, 105-113.
- Kind, F. (2002): Development of Microzonation Methods: Application to Basle, Switzerland. Dissertation Nr.14548, EPF 2002.
- Kind, F., Fäh, D., Zechner, E., Huggenberger, P., Giardini, D. (2003): Seismic zonation from a 3D seismic velocity reference model of the area of Basle, Switzerland. *BSSA*, Submitted.
- Lachet, C. and Bard, P.-Y. (1994): Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique. *J. Phys. Earth*, 42, 377–397.

- Lermo, J. and Chavez-Garcia, F.J. (1993): Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, 1574–1594.
- Löw, S., Koller, M., Studer, J. A. (2002): Bodenprofile und Übertragungsfunktionen für die neuen Swisscodes. Resultate der Verstärkungsberechnungen. Non publié.
- Lussou, P., Bard, P.Y, Cotton, F. and Fukushima, Y. (2001): Seismic Design Regulation Codes: Contribution of K-Net Data to Site Effect Evaluation. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 5, 13–33.
- Moczo, P. (1989): Finite-difference technique for SH-waves in 2-D media using irregular grids – Application to the seismic response problem. *Geophys. J. Int.*, 99, 321–329.
- Moczo, P. and Bard, P.Y. (1993): Wave diffraction, amplification and differential motion near strong lateral discontinuities. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 85–106.
- Nakamura, Y. (1989): A Method for Dynamic Characteristics Estimations of Subsurface Using Microtremors on the ground Surface. *QR RTRI*, 30, 25–33.
- Olsen, K.B. and Archuleta, R. (1996): 3-D simulation of earthquakes in the Los Angeles fault system. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 575–596.
- Olsen, K.B., Pechman, J.C. and Schuster, G.T. (1995): Simulation of 3-D elastic wave propagation in the Salt Lake basin. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 1688–1710.
- Pavic, R., Koller, M.G., Bard, P.Y. and Lacave-Lachet, C. (2000): Ground motion prediction with the empirical Green's function technique: an assessment of uncertainties and confidence level. *Journal of seismology*, 4, pp. 59–77.
- Pellissier, V., Delessert, F., Maffioletti, W. (2004): Prise en compte de l'aléa sismique dans le domaine de la construction. Contexte légal et aspects juridiques. En préparation.
- Résonance Ing.-Conseils SA, Geologiebüro Rovina&Partner AG, Tissières bureau d'ing. (2000): Praxisbezogene seismische Mikrozonierung der Region Brig-Visp (Wallis). Unveröffentlicher Bericht für Staat Wallis, 65 Seiten.
- Riepl-Thomas, J. et Cotton, F. (1999): Les effets de site, importance, compréhension et estimation. *Cahier Technique n° 17*, Association Française du Génie Parasismique, 41–61.
- Rodriguez-Marek, A., Bray, J.D. and Abrahamson, N.A. (2000): A Geotechnical Seismic Site Response Evaluation Procedure. *Proceedings of the 12th World Conference of Earthquake Engineering*, paper n° 1590.
- Sabetta, F. and Pugliese, A. (1996): Estimation of response spectra and simulation of non-stationary earthquake ground motions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 337–352.
- Satoh, T., Kawase, H., Iwata, T. Higaski, S., Sato, T., Irikura, K. and Huang, H. C. (2001): S-wave velocity structure of Taichung basin, Taiwan estimated from array and single-station records of microtremors, *Bull. Seism. Soc. Am.* 91, 1267–1282.
- Schnabel, B., Lysmer, J. and Seed, H.B. (1972): SHAKE – a Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. *Report EERC*, 72–12.
- Steidl, J.H., Tumarkin, A.G. and Archuleta, R.J. (1996): What is a reference site? *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 86(6), 1733–1748.
- Studer, J. A., Koller, M., Löw, S. (2003): Definition von seismischen Bodenprofilklassen für die Swisscodes. Phase 3. Non publié.
- Tiedemann, H. (1992): Earthquakes and volcanic eruptions: A handbook on risk assessment. *Swiss Reinsurance Company*, 951 p.
- Tumarkin, A.G. and Archuleta, R.J. (1994): Empirical ground motion prediction, *Annali di Geofisica*, XXXVII-6, 1691–1720.
- Yamanaka, H., Takemura, M., Ishida, H. and Niew, M. (1994): Characteristics of long-period micro-tremors and their applicability in exploration of deep layers, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1831–1841.

Argiles

- Ansal, A.M. (2001): Geotechnical aspects of seismic assessment and retrofit. *Proc. of 20th Europ. Reg. Earthquake Eng. Seminar*, Sion, SGEb, 9–22.

Glissement de terrain

Leroi, E., Terrier, M. and Mouroux, P. (1995): GIS-based hazard scenarios for mass movements: evaluating triggering phenomena when mapping slope instability. Proc. 5th Intern. Conf. on seismic zonation, Nice, AFPS Ouest, Ed 1315–1324.

Newmark, N.M. (1965): Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15, 139–160.

Sitas, N. and Khazal, B. (2001): Characteristics of seismically induced landslides in recent earthquakes. Proc. Intern. Conf. On Landslides, Davos, Switzerland, Ed. Kühne M., United Eng. Foundation, Inc. VGE-Verlag, 227–237.

Tika, TH. and Pitilakis, K. (1995): The evaluation of earthquake induced displacements of landslide for Seismic zonation. Proc. 5th Intern. Conf. on seismic zonation, Nice, AFPS Ouest, Ed.1691–1698.

Liquéfaction

Cui, J. and Men, F.L. (1995): On role of Raleigh Wave in microzonation of Soil liquefaction potential. Proc. 5th Intern. Conf. on seismic zonation, Nice, AFPS Ouest, Ed, 1490–1497.

Finn, W.D.L., Lee, K.W. and Martin, G.R. (1976): An effective stress model for liquefaction. ASCE Convention, Preprint 2752, Philadelphia, 169–198.

Kramer, S.L. (1996): *Geotechnical Earthquake Engineering*, prentice Hall, New Jersey.

Seed, H.B. (1976): Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquakes. ASCE Nat. Conv. Philadelphia, Preprint 2752, 1–104.

Seed, H.B., Martin, P.P. and Lysmer, J. (1976): Pore-water pressure changes during soil liquefaction. *J. Geot. Eng. Div. ASCE*, No. 102, GT4, 323–346.

Studer, J.A. and Koller M.G. (1997) *Bordendynamik*, Springer, 262 S

Tissières, P. (1991): Dimensionnement des fondations superficielles et profondes sous l'effet d'un séisme. *Ingénieurs et architectes suisses*, 26, 11.12.1991, 591–596.

Eboulements et glissements rocheux

Marietan, I. (1946): Le tremblement de terre du 25 janvier 1946. *Bull. Murithienne*, 63, 70–87.

Shon, K.J., Su, M.B. and Wang, C.F. (2001): On the chiufengershau landslide Triggered by the chi-chi Earthquake in Taiwan. Proc. Intern. Conf. On Landslides, Davos, 319–328.

Wanner, E et Grütter, M. (1950): Etudes sur les répliques du tremblement de terre du Valais de 1946 à 1950. *Bull. Murithienne*, 67,23–42.

Cartes des sols de fondation

Beer, C. (1996): Erdbeben-Mikrozonierung in der Region Nidwalden und Obwalden. *Mitt. der SGBF*, 132, 13–20.

Beer, C. (1997): Erdbebengefährdung in Abhängigkeit vom Geologischen Untergrund. Diss. Nr.11740, eidg. tech. Hochsch. Zurich (EPFZ).

CREALP (2004): Cartes des sols de fondation pour le microzonage sismique de la Vallée du Rhône (VS) au 1:25'000. Zone Brig-Léman.

Noack, T., Fäh, D. und Kruspan, P. (1999): Erdbebenmikrozonierung für den Kanton Basel-Stadt, LHG, *Geol. Ber.* 24, 80 S.

Wagner, J.-J., Frischknecht, C., Rosset, P., Sartori, M., Schindler, C., Beer, C., Mayer-Rosa, D., Rüttener, E. et Smit, P. (2000): Contribution au zonage sismique dans la vallée du Rhône, entre Sion et Brigue (Rapport SIS-VAL), Beitrag zur seismischen Zonierung des Rhonetals zwischen Sitten und Brig. *Rapp. Géol., Serv. Hydrol. Géol. Nat.*, 25.

Widmer, F. (2002): Projet pilote de microzonage sismique dans le secteur d'Yverdon. Postgrade en Géologie de l'ingénieur et de l'Environnement, travail de diplôme, EPFL – OFEG, 71 p.

Widmer, F., Duvernay, B., Fäh, D., Parriaux, A. (2003): Projet pilote de microzonage sismique à Yverdon (VD). *Bull. Geol. Appl.*

Autres

Bachmann, H. (2002): Conception parasismique des bâtiments – Principes de base à l'attention des ingénieurs, architectes, maîtres d'ouvrages et autorités. Directives de l'OFEG, Bienne.

CREALP (2000): Guide de construction parasismique. Département des transports, de l'équipement et de l'environnement. Rapport 99.06.

ECOS (2002): Voir sous le site internet: <http://histserver.ethz.ch>

EMS (1998): European Macroseismic Scale; Grünthal, G. (Ed.). Cah. Europ. De Géodynamique et de Sismologie 15.

KATARISK (2003): Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Bundesamt für Bevölkerungsschutz.

MSK (1964): Seismic Intensity Scale. Acad. Sci U.S.S.R., Sov. Geophys. Comm.

OFEG (2003): Appréciation de la sécurité parasismique des ouvrages de la Confédération. Principes et directive. Office fédéral des eaux et de la géologie, Centrale de coordination pour la mitigation des séismes.

Weidmann, M. (2002): Tremblements de terre en Suisse. Verlag Desertina, Coire, Suisse.

Zechner, E., Kind, F., Fäh, D., Huggenberger, P. (2001): 3-D Geological model of the Southern Rhinegraben compile on existing geological data and geophysical reference modeling, submitted (2004) to Geol. Rundschau.