

Microzonage sismique spectral de la vallée du Rhône vaudois



En annexe :

Rapport géologique (Groupement Geolosanne)
Rapport de mesures SASW (Geo2X Sàrl Geophysics & Geology)

RÉSONANCE Ingénieurs-Conseils SA

21 rue Jacques Grosselin
CH - 1227 CAROUGE (Genève)

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

Carouge, le 20 novembre 2009

RT 289.02/CL/MK/TB

Résumé

Sur l'ensemble du territoire du canton de Vaud, les cartes des classes de sols de fondations ont été établies. Dans certaines géométries et natures de dépôts, les spectres associés à ces classes de sol ne sont pas adaptés pour un bon dimensionnement sismique. L'Etablissement Cantonal d'Assurance contre les incendies et les éléments naturels du canton de Vaud (ECA-VAUD) a commandé une étude préliminaire visant à cibler les zones devant faire l'objet d'un microzonage sismique spectral (Résonance Ingénieurs Conseils SA, rapport 289.01/CL/MK du 27 Juin 2008). Dans cette étude, la région de la vallée du Rhône vaudois a été considérée comme une région critique du point de vue des effets de site, en raison de sa géométrie 2D de vallée alpine, et un microzonage sismique spectral a été recommandé.

L'ECA-VAUD a ainsi mandaté le bureau Résonance Ingénieurs Conseils SA pour établir un microzonage sismique spectral de la vallée du Rhône vaudois afin de disposer de spectres spécifiques au site pour le dimensionnement ou le contrôle sismique des constructions.

Dans le cas de la vallée du Rhône vaudois, les effets de site ont pu être pris en compte au moyen de simulations numériques en 2D, en raison de la géométrie de vallée alpine profonde de ce secteur. Ainsi, à partir des valeurs de l'aléa sismique local pour le rocher "dur", déterminées pour plusieurs fréquences par le Service Sismologique Suisse (SED), des calculs de l'amplification du mouvement du sol ont pu être menés, pour plusieurs séismes d'input.

L'ensemble des calculs ainsi menés a permis de découper la région d'étude en sept zones dont la réponse sismique peut être considérée comme homogène. Pour deux de ces zones, les spectres des classes de sol C et D ont pu être retenus, et pour les cinq autres zones, des spectres spécifiques sont proposés.

Table des matières

1. Introduction.....	3
2. Modélisation des effets de site	3
2.1 Méthodologie	3
2.2 Séismes de référence.....	5
3.1 Caractérisation du site	8
3.1 Géologie du site	8
3.2 Profils sismiques SASW.....	10
3.3 Mesure des fréquences propres par la méthode H/V.....	13
3.4 Lois de non-linéarité	14
3.5 Profils de calcul	16
4. Calculs et étude de sensibilité	17
4.1 Fonctions d'amplification et spectres de réponse	17
4.2 Difficultés rencontrées avec le programme d'Aki-Larner.....	19
4.3 Comparaison 1D – 2D	21
4.4 Variation des vitesses d'ondes S	22
4.5 Variation de l'angle d'incidence.....	23
5. Résultats et proposition de spectres spécifiques	24
5.1 Résultats des calculs.....	24
5.2 Spectres spécifiques proposés.....	25
6. Conclusion	27
7. Littérature	28

Annexe 1 : Rapport géologique (Groupement Geolosanne)

+ Profils Monthey I et III (Tissières SA)

Annexe 2 : Rapport de mesures SASW (Geo2X Sàrl Geophysics & Geology)

Annexe 3 : Résultats des mesures H/V

Annexe 4 : Profils de calculs

Annexe 5 : Caractéristiques des séismes d'input

Annexe 6 : Résultats des calculs

Annexe 7 : Détermination des spectres spécifiques

Annexe 8 : Carte de microzonage sismique spectral

1. Introduction

Sur l'ensemble du territoire du canton de Vaud, les cartes des classes de sols de fondations ont été établies. Dans certaines géométries et natures de dépôts, les spectres associés à ces classes de sol ne sont pas adaptés pour un bon dimensionnement sismique. L'Etablissement Cantonal d'Assurance contre les incendies et les éléments naturels du canton de Vaud (ECA-VAUD) a commandé une étude préliminaire visant à cibler les zones devant faire l'objet d'un microzonage sismique spectral (Résonance Ingénieurs Conseils SA, rapport 289.01/CL/MK du 27 Juin 2008). Dans cette étude, la vallée du Rhône vaudois a été considérée comme une région critique du point de vue des effets de site et un microzonage sismique spectral a été recommandé.

L'ECA-VAUD a ainsi mandaté le bureau Résonance Ingénieurs Conseils SA pour établir un microzonage sismique spectral de la vallée du Rhône vaudois afin de disposer de spectres spécifiques au site pour le dimensionnement ou le contrôle sismique des constructions.

Le présent rapport décrit les études ayant mené à la carte de microzonage sismique spectral proposée.

2. Modélisation des effets de site

2.1 Méthodologie

Des simulations en une dimension (1D) et en deux dimensions (2D) ont été effectuées dans le cadre de cette étude. Les techniques utilisées pour effectuer ces simulations sont détaillées dans les paragraphes suivants.

En premier lieu, pour toutes ces simulations, les trois éléments suivants doivent être déterminés :

- le profil de vitesses des ondes S,
- le comportement non-linéaire des sols meubles,
- un mouvement sismique à la base de la sédimentation.

2.1.1 Simulation 1D : le logiciel CyberQuake

CyberQuake est un logiciel mis au point en 1997 par le département logiciels du 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 avec des couches planes et horizontales. Il simule les mouvements non-linéaires du sol par une approche viscoélastique 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'entrer le 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. Ensuite, il détermine 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 de tolérance que l'on peut fixer. Le programme calcule alors le mouvement du sol en surface à partir des nouveaux paramètres géotechniques qui ont été déterminés lors de la dernière itération.

Pour des sollicitations faibles à modérées, les solutions obtenues grâce à CyberQuake sont comparables à celles déterminées avec 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'est pas concernée par ce domaine.

2.1.2 Simulation 2D : méthode d'Aki-Larner linéaire équivalente

Pour les simulations 2D, un programme écrit par P.-Y. Bard (LGIT, Université de Grenoble) a été utilisé. Ce programme est basé sur une méthode de calcul dite méthode d'Aki-Larner (1970). Dans le cadre du projet Interreg III-B Sismoalp, Résonance a contribué, en collaboration avec le LGIT (Grenoble), au développement d'une nouvelle version du programme de calcul des effets de site en 2D, selon la méthode Aki-Larner. Cette nouvelle version permet la prise en compte du comportement non linéaire des matériaux, au moyen d'une procédure linéaire équivalente. Ce programme a été testé sur des vallées théoriques avant d'être appliqué dans le cadre du microzonage sismique spectral des secteurs de Brigue et Viège. Ce programme comble une lacune dans les outils disponibles pour les calculs 2D d'effets de site, d'importance notable pour les cas de vallées alpines comme le Valais par exemple. Ce programme a, en particulier, été utilisé dans le cadre du microzonage sismique de la région de Brigue et Viège (Lacave and Koller, 2007 ; Lacave et al., 2008).

La méthode Aki-Larner est basée sur la résolution de l'équation d'ondes classique en sismologie. On considère 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, dans le cas SH. Ensuite, une convolution peut être faite avec un signal sismique "d'input", de manière à obtenir la réponse de la vallée à un séisme incident donné.

Il est à noter ici qu'un tel calcul 2D est limité dans le domaine des hautes fréquences en raisons d'instabilités numériques. Ainsi, le calcul de la fonction de transfert est fait de la manière suivante selon le domaine de fréquence (f_0 étant la fréquence propre fondamentale de la vallée) :

- Entre 0 et $4*f_0$: calcul 2D (Aki-Larner) ;
- au-delà de $8*f_0$: calcul classique 1D ;
- entre $4*f_0$ et $8*f_0$: interpolation linéaire des solutions 1D et 2D avec raccordement aux extrémités de l'intervalle.

Les informations géologiques concernant le centre de la vallée (le centre étant défini ici comme l'endroit le plus profond de la vallée et non comme le milieu du profil) permettent de déterminer un profil de calcul "moyen", c'est à dire un agencement de couches horizontales homogènes caractérisées par leur densité, leur épaisseur et la vitesse de propagations des ondes S dans chaque formation.

Un premier calcul est alors lancé sans tenir compte de la non linéarité. Pour ce faire, les accélérogrammes d'input sont divisés par 1000. La fréquence fondamentale au centre de la vallée (fréquence fondamentale du bassin f_0) est alors obtenue en examinant le rapport des spectres de Fourier des accélérogrammes d'entrée et de sortie du programme (fonction de transfert) pour le point correspondant au centre de la vallée. La fréquence f_0 est ensuite comparée à la fréquence H/V mesurée au centre de la vallée. La comparaison est possible car les vibrations ambiantes tout comme les sollicitations sismiques utilisées pour ce calcul sont des mouvements faibles. Si les deux fréquences ne sont pas les mêmes, le profil de vitesse est ajusté de manière réaliste de façon à se rapprocher de la fréquence H/V. Ces étapes sont répétées jusqu'à ce que la fréquence fondamentale calculée au centre de la vallée et la fréquence H/V mesurée au même endroit soient similaires. Le dernier profil de calcul est alors le profil moyen utilisé dans toutes les simulations avec les accélérogrammes correspondant à l'aléa régional.

2.2 Séismes de référence

L'aléa sismique de la Suisse a été totalement réévalué par le Service Sismologique Suisse (SED, 2004). Les valeurs de l'accélération spectrale, pour différentes fréquences et pour différentes périodes de retour, sont valables pour un sol de type "rocher dur", c'est à dire avec une vitesse des ondes S de l'ordre de 1500 m/s.

La vallée du Rhône vaudois se trouve entièrement en zone de sismicité 3a, selon la carte de zonage sismique de la Suisse (figure 1, à droite), en limite entre la zone 2, côté Villeneuve, et la zone 3b, côté Monthey. Ainsi, la région d'étude est caractérisée par un fort gradient de son aléa sismique, avec, par exemple, une accélération spectrale à 5 Hz qui augmente de 0.7 à 1.2 m/s^2 en allant de Villeneuve à Monthey (figure 1, à gauche), bien qu'étant dans la même zone 3a. La figure 2 montre les valeurs d'aléa sismique au rocher "dur" ($V_s = 1500$ m/s), déterminées par le SED pour les secteurs de Villeneuve, Aigle et Monthey. Pour mener à bien l'étude de microzonage sismique de la vallée du Rhône vaudois, il est donc nécessaire de tenir compte de ces variations. Ainsi, trois spectres de réponse correspondant à l'aléa au rocher dur seront considérés, selon que l'on se trouve en aval, au milieu ou en amont de la zone d'étude.

Pour déterminer le spectre d'input au rocher dur, à la base des dépôts, une forme spectrale inspirée de la forme pour un sol Classe A de la norme SIA-261 a été adoptée. Le spectre ainsi déterminé est un spectre de la forme du spectre A dont le plateau a pour valeur la moyenne des valeurs d'aléa au rocher dur aux périodes 0.1 et 0.2 s.

Les formes spectrales correspondantes sont présentées en noir sur les figure 3, 4 et 5, pour les secteurs de Villeneuve, Aigle et Monthey, respectivement.

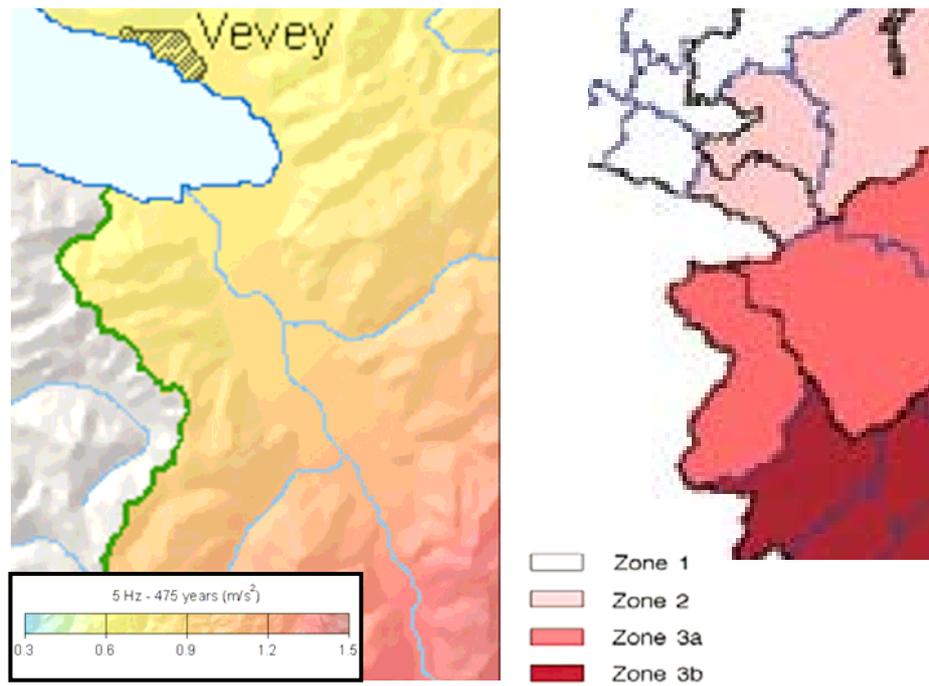


Figure 1 : A gauche: aléa sismique de la région d'étude pour une période de retour de 475 ans et une fréquence de 5 Hz; à droite: zonage sismique de la Suisse, la région d'étude se trouve entièrement en zone 3a.

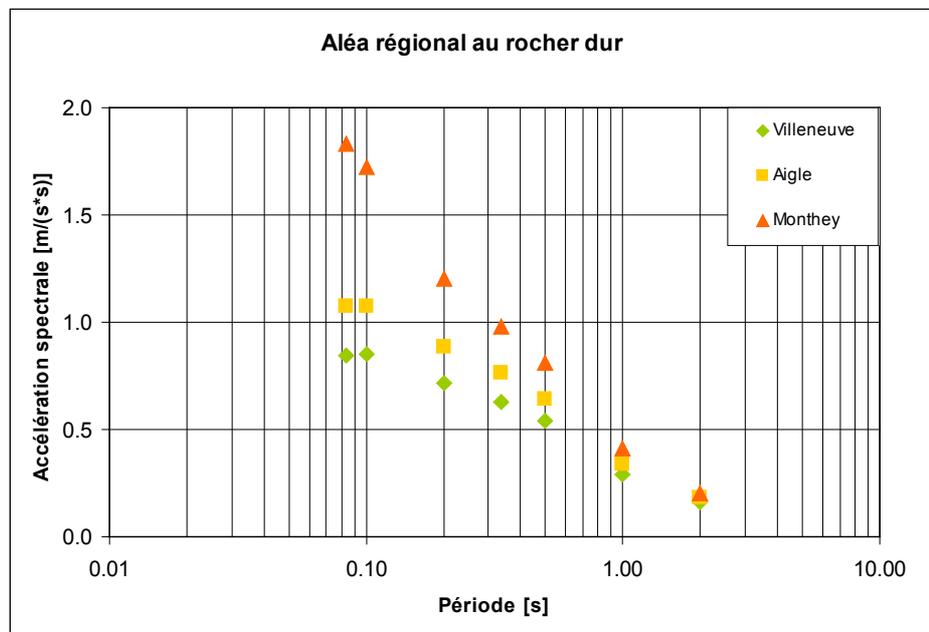


Figure 2 : Points correspondant aux valeurs brutes d'aléa au rocher, calculées par le Service Sismologique Suisse, pour Villeneuve, Aigle et Monthey.

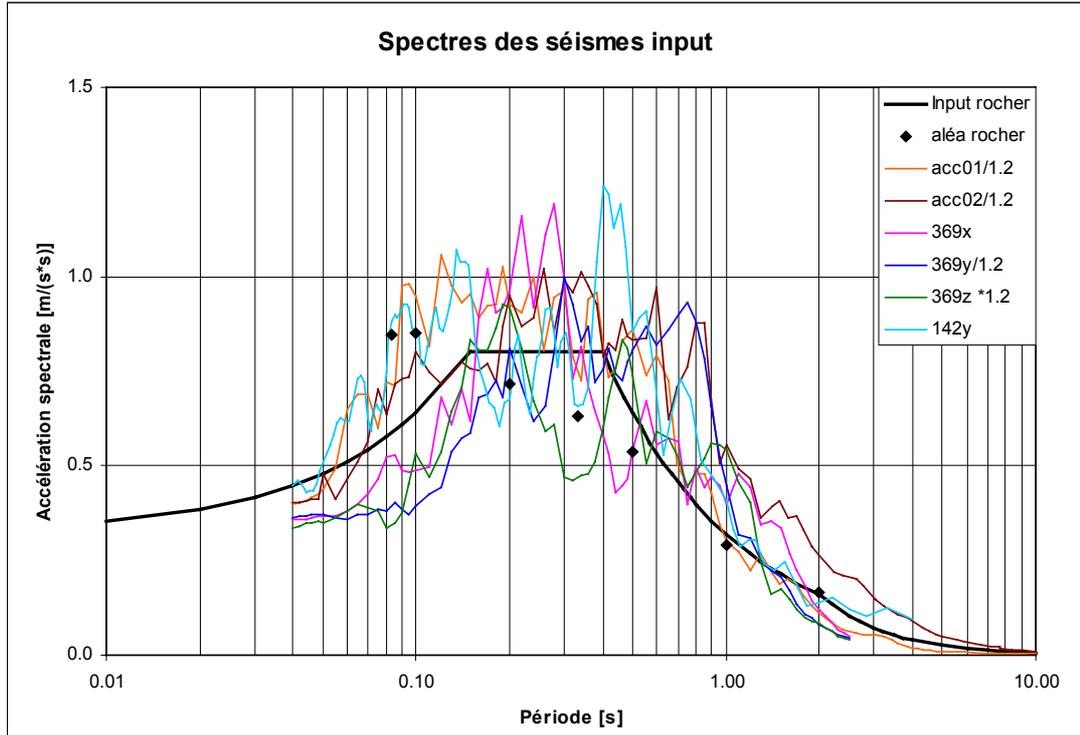


Figure 3 : Spectres des séismes d'input utilisés et comparaison avec le spectre au rocher correspondant à l'aléa pour Villeneuve. Les points noirs indiquent les valeurs brutes d'aléa au rocher, calculées par le SED.

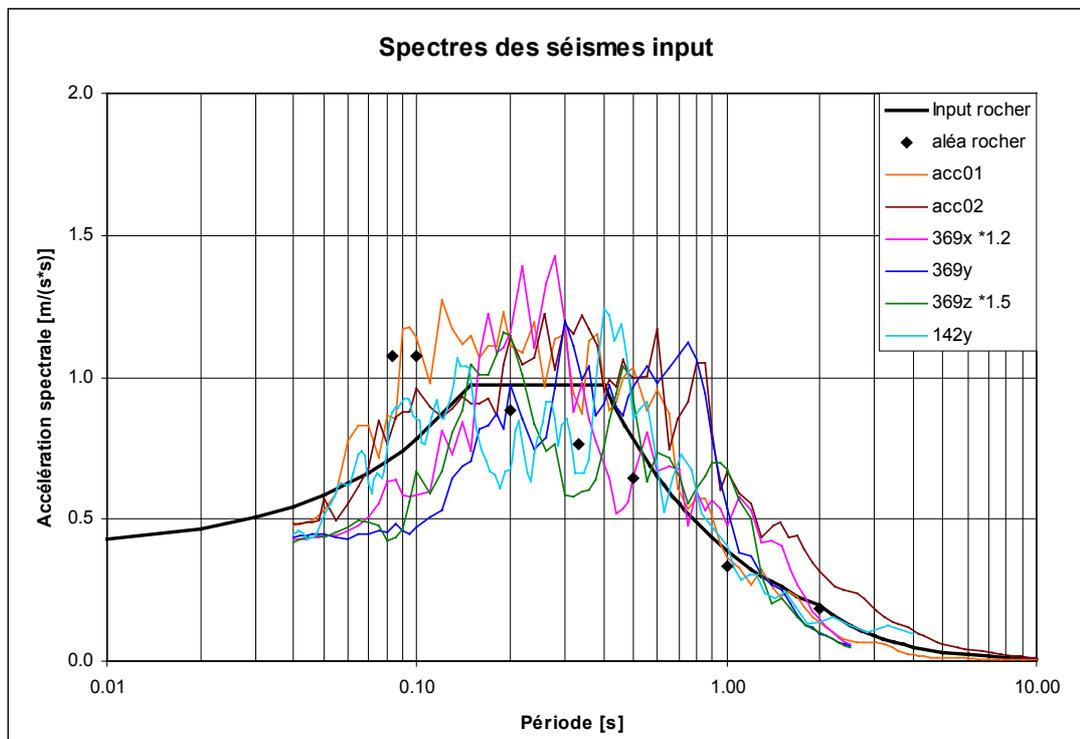


Figure 4 : Spectres des séismes d'input utilisés et comparaison avec le spectre au rocher correspondant à l'aléa pour Aigle. Les points noirs indiquent les valeurs brutes d'aléa au rocher, calculées par le SED.

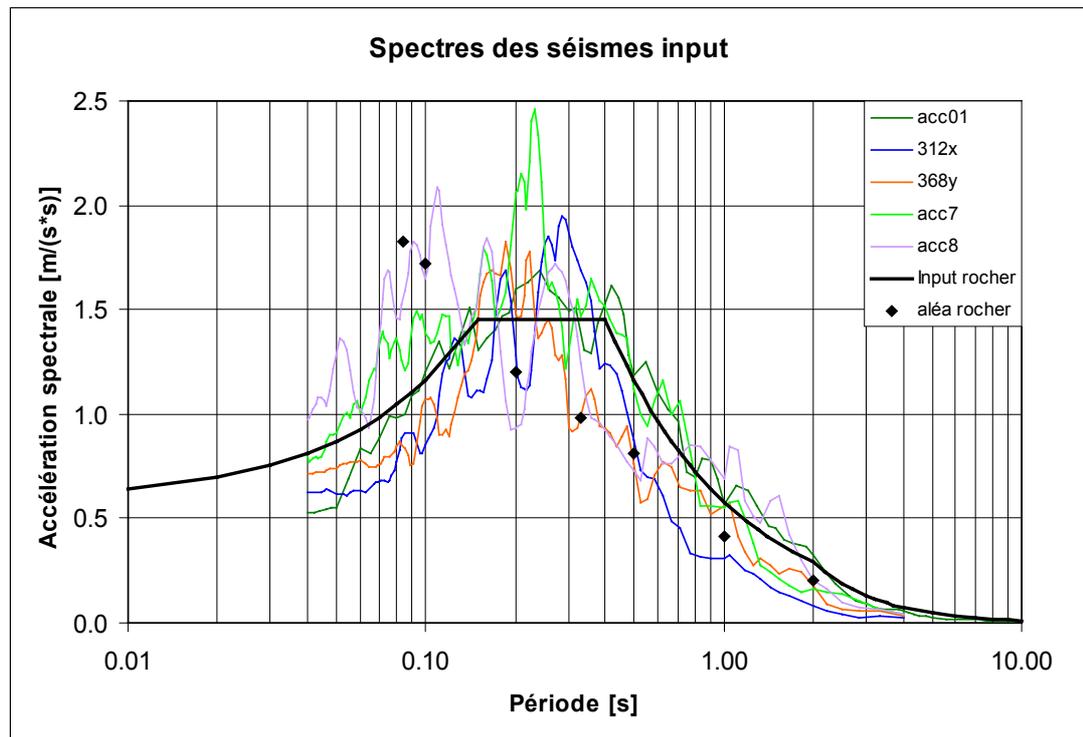


Figure 5 : Spectres des séismes d'input utilisés et comparaison avec le spectre au rocher correspondant à l'aléa pour Monthey. Les points noirs indiquent les valeurs brutes d'aléa au rocher, calculées par le SED.

Pour le calcul des effets de site, plusieurs accélérogrammes ont été choisis 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 ont été choisis parmi la base de données "European Strong-Motion Database, Volume 2" (Ambraseys et al., 2004). D'autres accélérogrammes ont été créés avec un logiciel développé par Sabetta and Pugliese (1996). Ce programme permet 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 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.

Les caractéristiques des séismes retenus pour chaque secteur d'étude sont présentées à l'annexe 5.

3.1 Caractérisation du site

3.1 Géologie du site

La vallée du Rhône vaudois est caractérisée, dans sa partie aval (de Villeneuve à Aigle), par une épaisseur de dépôts considérable pouvant atteindre 800 m. Dans le secteur de Monthey, cette épaisseur diminue à 500 à 600 m, pour finir par une épaisseur nettement plus faible, de 200 à 300 m, dans le secteur de Bex.

La caractérisation géologique et géotechnique du site est décrite en détail dans le rapport du Groupement Géolosanne, joint en annexe 1. Les profils I et III établis par le bureau Tissières SA, dans le cadre du microzonage sismique de Monthey, sont également joints à l'annexe 1.

3.1.1 Soubassement rocheux

En aval, la moitié Ouest de la vallée est occupée par la Molasse Rouge chattienne, la Molasse du Rupellen et le Flysch Sannoisien, tandis qu'en rive droite de la vallée se trouvent les formations du Trias (gypse, cornieules, calcaires dolomitiques et dolomies), du Lias (calcaires spathiques et/ou siliceux prédominants, schistes marneux et marnocalcaires) et du Dogger (calcaires, calcaires marneux prédominants, marnes et schistes argileux).

La bordure Ouest de la vallée aux Evouettes coïncide avec un anticlinal dont le cœur, au niveau de la Plaine, est constituée par les séries calcaires et calcarosiliceuses du Lias et par les formations du Trias, vraisemblablement dominées par des dolomies et des cornieules. Sur la moitié Est de la Vallée, il s'agit d'une grande série monoclinale incluant, depuis les Couches Rouges, les calcaires du Malm, les séries calcaires et marno-calcaires du Dogger, et enfin la série plus ou moins complète du Lias (calcaires spathiques et siliceux, schistes argileux). La présence du Trias est également possible vers le centre de la vallée.

Le toit du rocher débute, vers Vionnaz, par les calcaires de Malm, puis se situe dans les séries du Trias (calcaires dolomitiques, dolomies et cornieules). Les couches se redressent vers Aigle et s'enfoncent en flanc normal pour disparaître sous le Lias inférieur constitué en majorité de calcaires plus ou moins siliceux, avec des intercalations de schistes marno-greus, et quelques marnes dolomitiques à sa base, en continuité avec le Trias.

Dans la partie amont, le soubassement rocheux débute, côté vaudois, par la colline du Montet formée par les gypses et anhydrites de la Nappe de Bex-Laubhorn (Trias). Un plan de chevauchement devrait mettre en contact ces gypses avec l'Autochtone sous l'Alex. Ce dernier devrait débiter par le Flysch parautochtone et le Nummulithique (calcaires et brèches), puis par les calcaires siliceux de l'Hauterivien et les calcaires du Valanginien, ceux-ci n'étant atteints par le surcreusement de la vallée qu'au droit du Rhône et de l'autoroute.

3.1.2 Sédimentation quaternaire

Les informations résultant de forages carottes ont permis l'identification des dépôts liés aux formations les plus superficielles : cônes de déjection de torrents latéraux, dépôts palustres et sédiments fins d'inondation qui couvrent une grande partie de la plaine, alluvions récentes du Rhône et passages de ces formations à des dépôts lacustres plus profonds.

Les dépôts lacustres semblent constituer, de loin, la partie la plus importante des dépôts quaternaires de remplissage de la vallée. En profondeur, ces dépôts reposent en général sur un coussin de moraine rhodanienne d'épaisseur limitée à quelques dizaines de mètres sur les flancs de la vallée, et atteignant 100 à 150 m d'épaisseur au centre de celle-ci en aval d'Aigle.

La moraine de fond n'est connue pour le moment qu'au travers des études sismiques et d'un forage destructif profond pour la recherche pétrolière.

3.2 Profils sismiques SASW

Deux profils sismiques ont été réalisés dans la vallée du Rhône vaudois, par la technique SASW qui permet de déterminer les vitesses des ondes S dans les couches superficielles. SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) est l'abréviation anglaise pour la méthode d'inversion des courbes de dispersion des ondes de surface (Jongmans and Demanet, 1993 ; Jongmans and Campillo, 1993 a et b). Cette méthode donne des résultats d'une qualité similaire à celle des tests cross-hole, mais à un coût bien inférieur, pour les couches superficielles. La réalisation de tels profils permet donc une meilleure définition des paramètres d'entrée nécessaires pour les simulations numériques des effets de site. Ce sont d'ailleurs les couches superficielles qui ont souvent le plus grand impact sur les effets de site.

Les détails concernant la localisation des profils et la géométrie d'acquisition sont donnés dans le rapport du bureau Geo2X Sàrl Geophysics & Geology, Oulens, de février 2009.

L'emplacement des profils a été choisi en fonction des critères suivants :

- situation de chacun des profils sur des terrains de nature différente et de structure superficielle différente, d'après les coupes géologiques du secteur, afin de mesurer les vitesses sismiques dans différentes formations ;
- situation dans une zone non bâtie pour l'installation des capteurs et l'emplacement du tir ;
- emplacement le long d'une route ou d'un chemin, pour des raisons d'accès et pour ne pas abîmer les cultures ;
- emplacement du point de tir à distance suffisante des diverses canalisations enterrées présentes dans le secteur.

Les profils sont donc situés sur deux différents types de dépôts présents en surface dans la vallée du Rhône vaudois, à savoir :

- la tourbe (profil "Villeneuve-Nord"),
- les limons lacustres (profil "Villeneuve-Sud").

Le traitement des données a été effectué avec le logiciel SurfSeis (Multichannel Analysis of Surface Waves, C. B. Park, 1998). Plusieurs modules sont utilisés successivement pour réaliser les opérations suivantes, à partir des données brutes enregistrées par les 48 géophones :

- analyse et traitement des signaux pour identifier correctement la partie correspondant au 1^{er} mode des ondes de surface et pour vérifier le rapport signal/bruit ;
- calcul de la courbe de dispersion de la vitesse de phase ainsi que du rapport signal/bruit dans la bande de fréquence et de vitesse la plus appropriée ;
- procédure itérative d'inversion en ondes S et ajustement du profil de vitesses S, jusqu'à stabilisation du résultat.

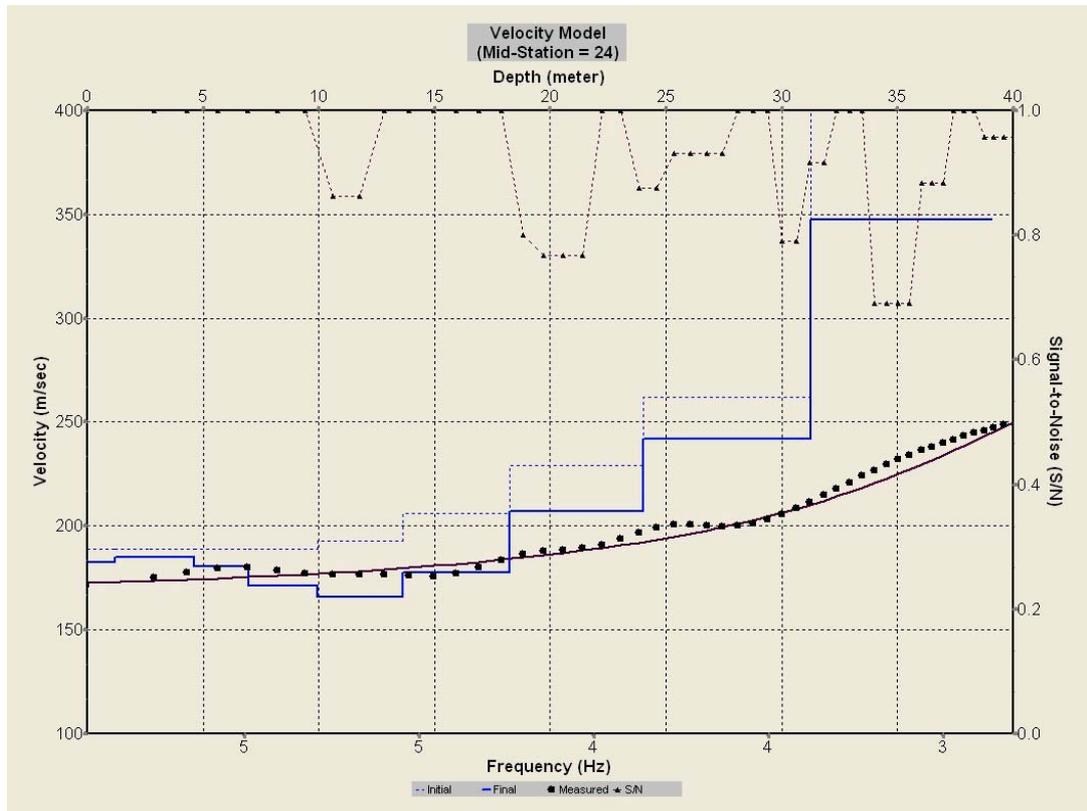
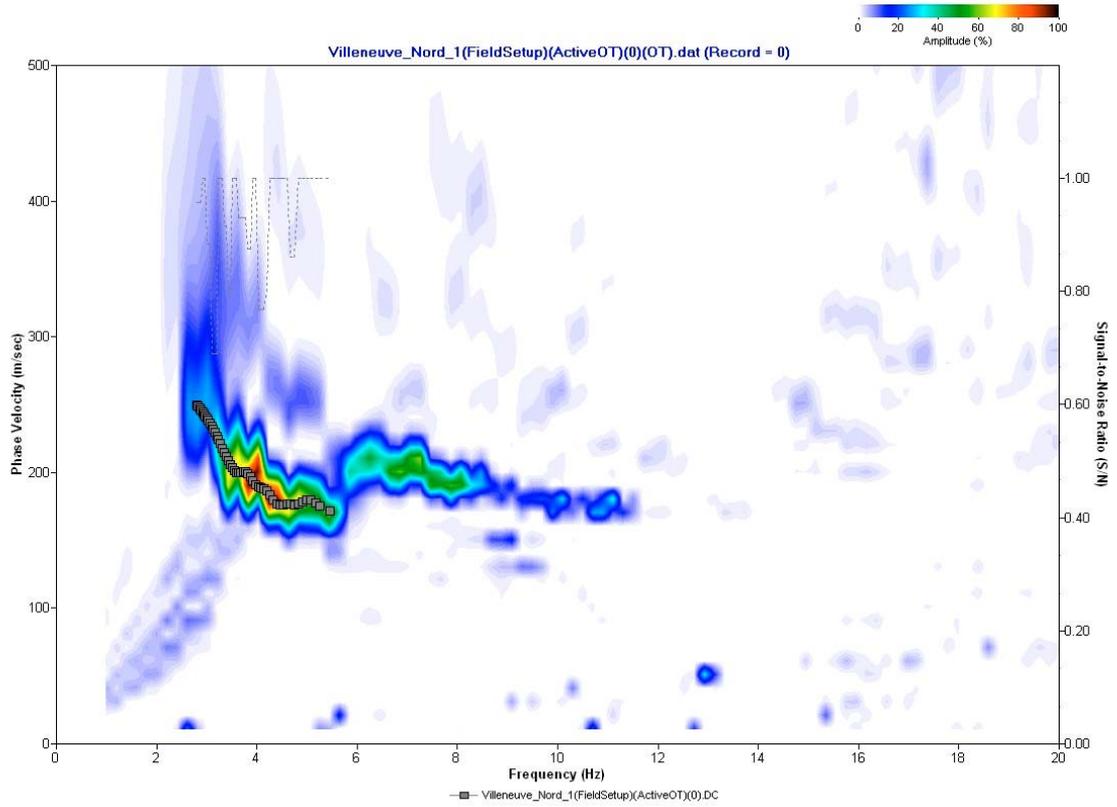


Figure 6 : Profil Villeneuve-Nord. En haut : Diagramme d'énergie dans le domaine vitesse de phase - fréquence, issu des signaux SASW. En bas : profil de vitesse obtenu.

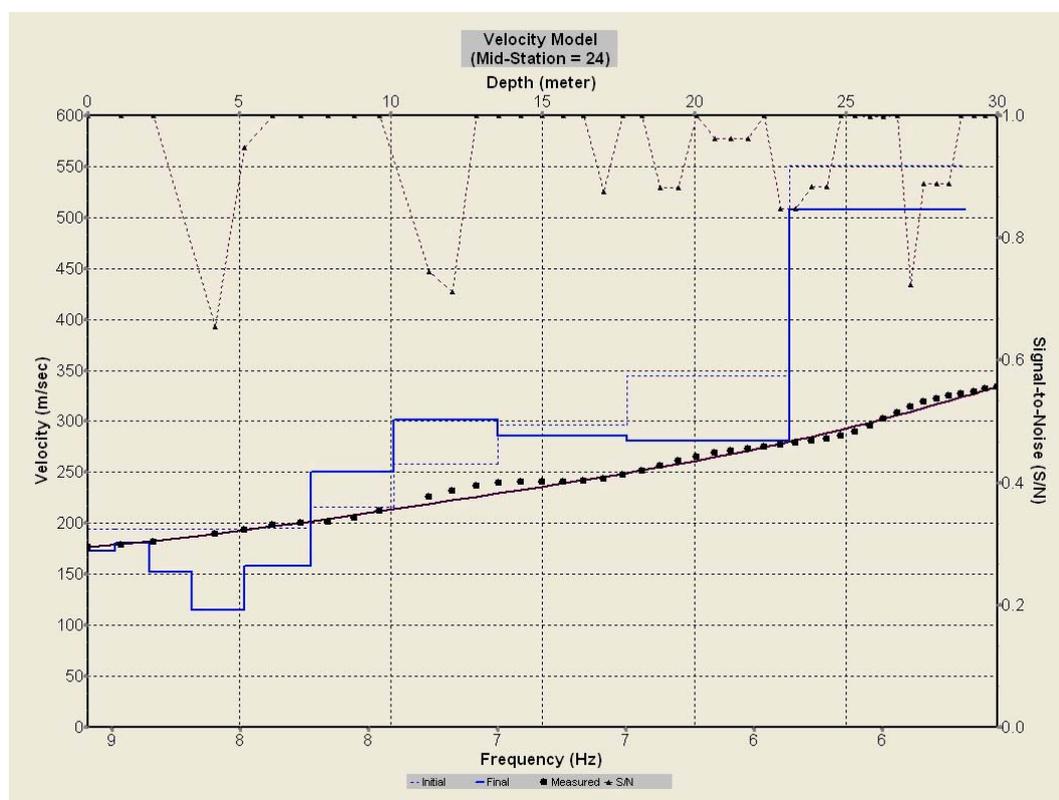
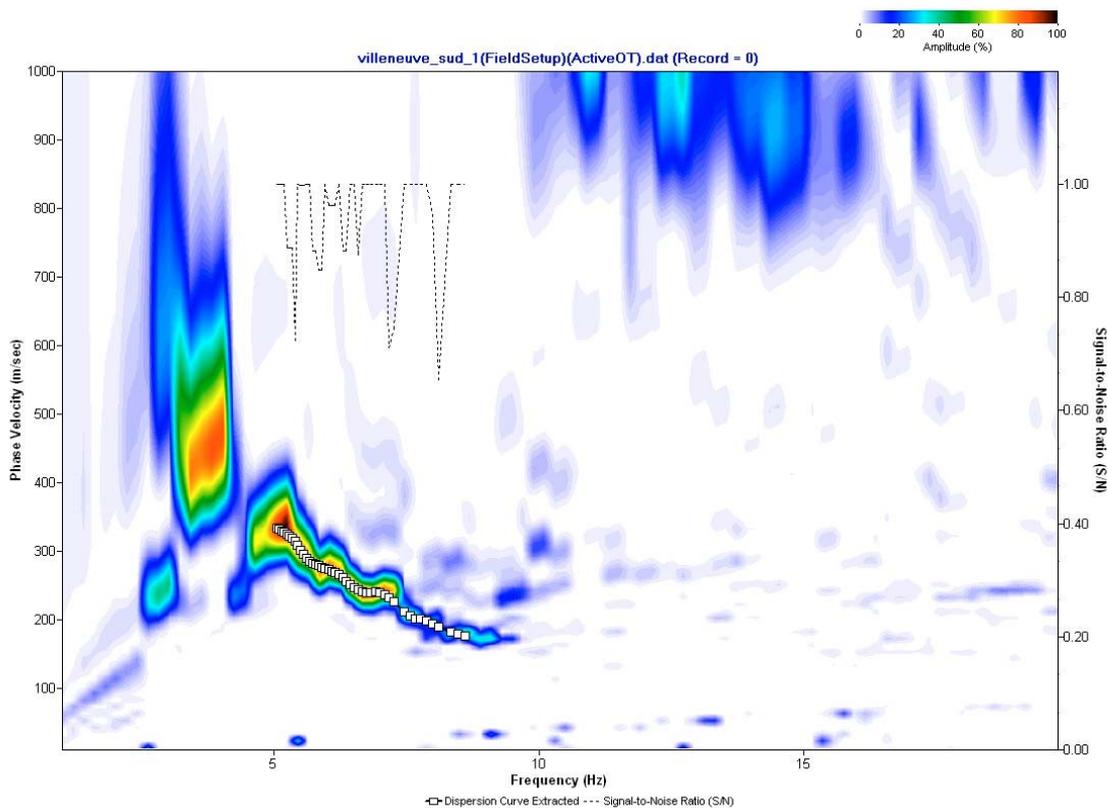


Figure 7 : Profil Villeneuve-Sud. En haut : Diagramme d'énergie dans le domaine vitesse de phase - fréquence, issu des signaux SASW. En bas : profil de vitesse obtenu.

Les figures 6 et 7 montrent les diagrammes d'énergie dans le domaine vitesse de phase – fréquence, ainsi que les profils de vitesse obtenus, pour les profils Villeneuve-Nord et Villeneuve-Sud, respectivement. Le traitement et l'analyse des profils SASW réalisés permet de proposer les valeurs approximatives de vitesses des ondes S, dans les couches superficielles, indiquées dans les tableaux 1 et 2, pour les dépôts de tourbe et de limons lacustres, respectivement.

Tableau 1 : Valeurs de vitesses Vs obtenues pour le profil Villeneuve-Nord (dépôts de tourbe).

Profondeur des dépôts [m]	Valeurs de Vs [m/s]
0 à 18 m	175 m/s
18 à 24 m	210 m/s
24 à 31 m	240 m/s
supérieure à 31 m	350 m/s

Tableau 2 : Valeurs de vitesses Vs obtenues pour le profil Villeneuve-Sud (dépôts de limons lacustres).

Profondeur des dépôts [m]	Valeurs de Vs [m/s]
0 à 7.5 m	170 m/s
7.5 à 10 m	250 m/s
10 à 23 m	300 m/s
supérieure à 23 m	500 m/s

3.3 Mesure des fréquences propres par la méthode H/V

La méthode H/V (aussi dite de "Nakamura") est une méthode empirique pour déterminer la fréquence fondamentale des sédiments reposant sur un socle type rocher. La méthode consiste à mesurer les vibrations ambiantes puis à faire le rapport des spectres de Fourier entre la composante horizontale (moyenne des deux composantes horizontales perpendiculaires mesurées) et la composante verticale (Nakamura, 1989 ; Lachet et Bard, 1994). Cette technique nécessite donc l'emploi d'un sismomètre trois composantes sensible à des fréquences inférieures à 1Hz, la fréquence de résonance d'un bassin sédimentaire très profond pouvant être de l'ordre de 0.2 Hz. Les sources des vibrations ambiantes sont d'origine naturelle (microséismes) et humaines (microtrémors). Les océans constituent la principale source naturelle de vibrations ambiantes, pour les fréquences inférieures à 1 Hz. Quant aux activités humaines, elles peuvent générer des vibrations dans une gamme de fréquences très étendue, plutôt supérieure à 1 Hz.

Les résultats des mesures H/V doivent toujours être interprétés avec prudence car de nombreuses perturbations sont susceptibles de venir parasiter les enregistrements. Les recommandations pour une interprétation correcte ont été fixées par le projet de recherche européen SESAME (2004). Le vent (> 5 m/s), la pluie, les industries ou les constructions souterraines sont des éléments qui peuvent

avoir une influence néfaste sur les résultats. De plus, il est important d'assurer un bon couplage entre le sol et le capteur et de maintenir une bulle de niveau correcte pour le capteur.

L'origine du pic H/V demeure à ce jour imparfaitement comprise. Cependant, la communauté scientifique s'accorde à dire que ce pic est la conséquence d'un changement de polarité des ondes de Rayleigh à la fréquence de résonance du bassin. En principe, ces ondes sont associées à un mouvement elliptique des particules dans le sens rétrograde. Cependant, à la fréquence fondamentale, le mouvement devient prograde. Ceci signifie que le mouvement est nul sur la composante verticale au voisinage de la fréquence fondamentale. Le rapport H/V, lui, devrait tendre vers une valeur infinie.

En pratique, on obtient un pic d'une amplitude finie car les vibrations ambiantes enregistrées sont constituées d'un ensemble d'ondes de volume et d'ondes de surface. Le niveau d'amplification relevé sur les diagrammes H/V n'a toutefois pas de signification même s'il semblerait qu'il représente une borne inférieure du niveau d'amplification réel du sol (Bard, 1999).

Dans le cadre du microzonage de la vallée du Rhône vaudois, un quadrillage comprenant 40 points de mesures a été mis en place afin d'élaborer une carte des isofréquences pour cette région, en complément des mesures qui avaient été réalisées lors du microzonage de la région de Monthey (rapport Résonance / Tissières n° 220.03//CL/MK/JR/FD//PT/SF/EC, du 1^{er} juin 2004). Les mesures H/V permettent, suivant les cas, d'ajuster le modèle de vitesse des ondes S ou la profondeur du rocher, en accord avec les observations géologiques, les mesures SASW, les données de forage ou de sismique réflexion parfois disponibles.

Les résultats des mesures reflètent assez bien la morphologie du toit du substratum rocheux, avec des valeurs comprises entre 0.2 et 0.6 Hz dans la partie centrale de la vallée (plus profonde) et des valeurs d'environ 1 à 2 Hz sur les bordures de la vallée, où la profondeur diminue. En amont de Monthey, la profondeur de la vallée diminue beaucoup et les fréquences propres au centre de celle-ci augmentent à des valeurs d'environ 0.7 à 1 Hz.

Les points de mesure ainsi que les fréquences fondamentales correspondantes sont présentés en annexe 3. La carte des isofréquences propres a été réalisée par le GEOLEP à partir de ces mesures ainsi que des mesures qui avaient été réalisées lors du microzonage de la région de Monthey (Résonance et Tissières, 2004).

3.4 Lois de non-linéarité

Au fur et à mesure que le taux de déformation s'accroît, la rigidité du sol se réduit tandis que l'amortissement devient plus important. Le logiciel CyberQuake tient compte de cette non-linéarité par le moyen de paramètres dits linéaires équivalents. Il est donc nécessaire de définir le comportement du sol en fonction de la déformation. Les lois de non-linéarité utilisées pour le profil de calcul sont présentées sur la figure 8. Il s'agit de la courbe moyenne entre la courbe donnée par Seed & Idriss (1970) et celle selon Ishibashi & Zhang (1993), pour un indice de plasticité $IP = 0$ et pour différentes profondeurs (10, 35, 75 et 100 m). La répartition des courbes en fonction de la profondeur z est la suivante :

- $z = 0-20$ m : courbe moyenne pour $z = 10$ m,

- $z = 20-50$ m : courbe moyenne pour $z = 35$ m,
- $z = 50-100$ m : courbe moyenne pour $z = 75$ m,
- $z > 100$ m : courbe moyenne pour $z = 100$ m.

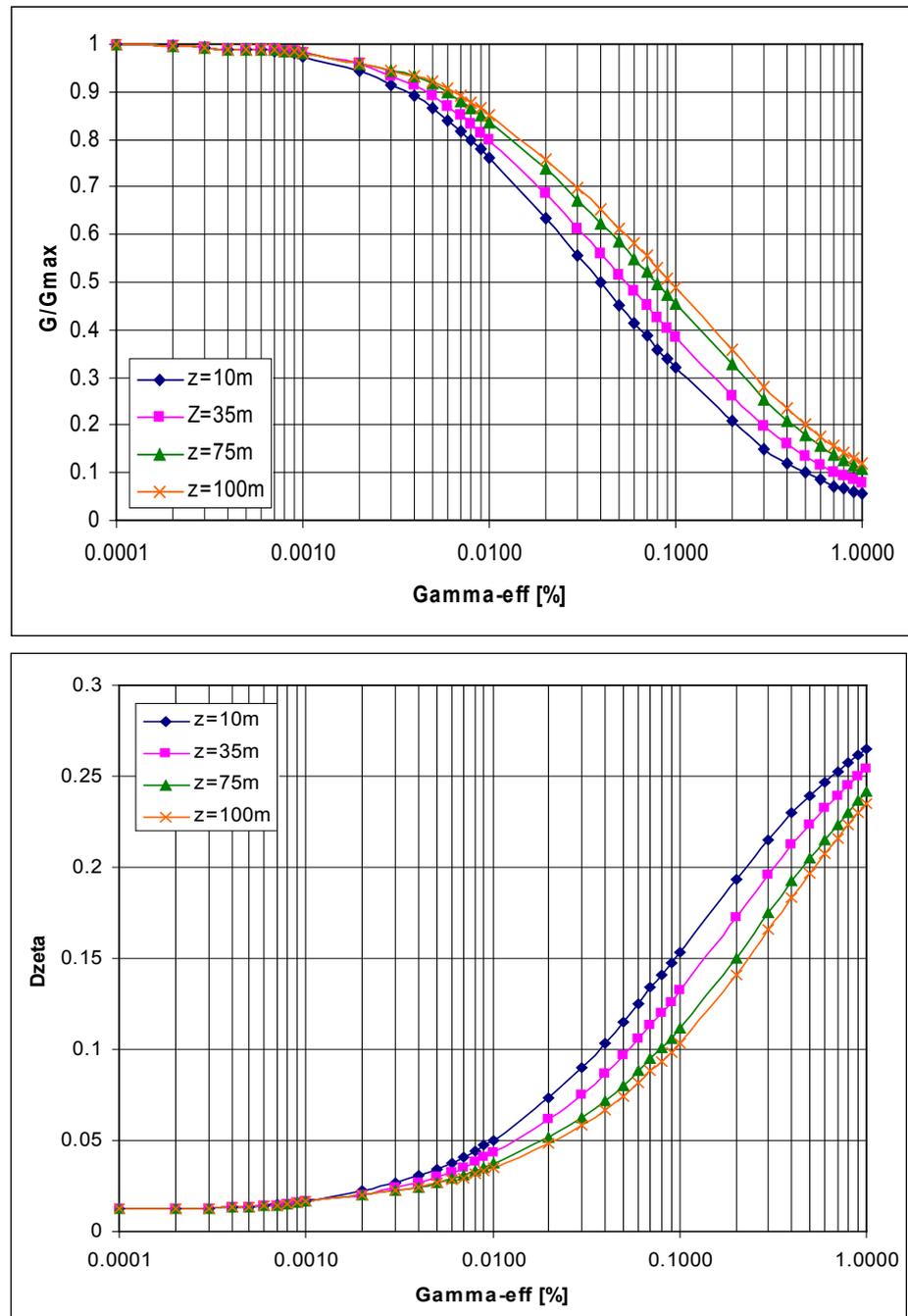


Figure 8 : Lois de non-linéarité utilisées pour les différents dépôts (profils 1 et 3). En haut, module de cisailment en fonction de la déformation; en bas, amortissement en fonction de la déformation.

Au-delà de la profondeur de 100 m, les courbes de comportements des matériaux valables pour $z = 100$ m ont été maintenues car, pour les profondeurs plus importantes, les courbes correspondantes donnent lieu à une non-linéarité trop faible, à notre avis. De plus, la différence à laquelle conduirait de telles courbes est négligeable par rapport aux incertitudes liées à l'estimation des vitesses dans les couches profondes.

3.5 Profils de calcul

La vallée du Rhône se prête logiquement à la réalisation de simulations dites "2D" qui tiennent compte de la géométrie du bedrock dans le calcul de la propagation des ondes sismiques. Par rapport aux simulations 1D, le 2D apporte une bonne retranscription du phénomène de piégeage des ondes apparaissant dans les géométries de dépôts encaissées. L'encaissement de la vallée du Rhône entre Villeneuve et Monthey, défini comme le rapport de la demi largeur sur la profondeur maximale, varie entre 3 et 6. Pour ce type de valeurs, l'effet 2D existe et ne peut être négligé.

Pour cette étude, six profils 2D répartis entre Villeneuve et Bex ont été traités. Le tableau 3 présente quelques caractéristiques des profils. Le plan de situation présenté à l'annexe 4 permet de visualiser leur position.

La figure 9 présente l'ensemble des profils de calculs utilisés, d'aval en amont. Les paramètres de calculs utilisés pour chaque profil sont également présentés à l'annexe 4.

Tableau 3 : Caractéristiques géométriques des profils de calcul.

Nom	Largeur de la vallée [m]	Profondeur maximum [m]	Encaissement	Fréquence H/V centrale [Hz]	Localisation
Profil P1	7000	820	4.3	0.3	Le Bouveret / Villeneuve
Profil P2	5000	815	3.1	0.2	Les Evouettes / Roche
Profil P3	7000	800	4.4	0.3	Vionnaz / Aigle
Profil P4	2500	331	3.7	0.9	Massongex / Bex
Profil Monthey 1	6300	520	6.0	0.4	Monthey / Vers les Moulins (Ollon)
Profil Monthey 3	5200	640	4.1	0.3	Muraz-Collombey / Bois de la Glaive (Ollon)

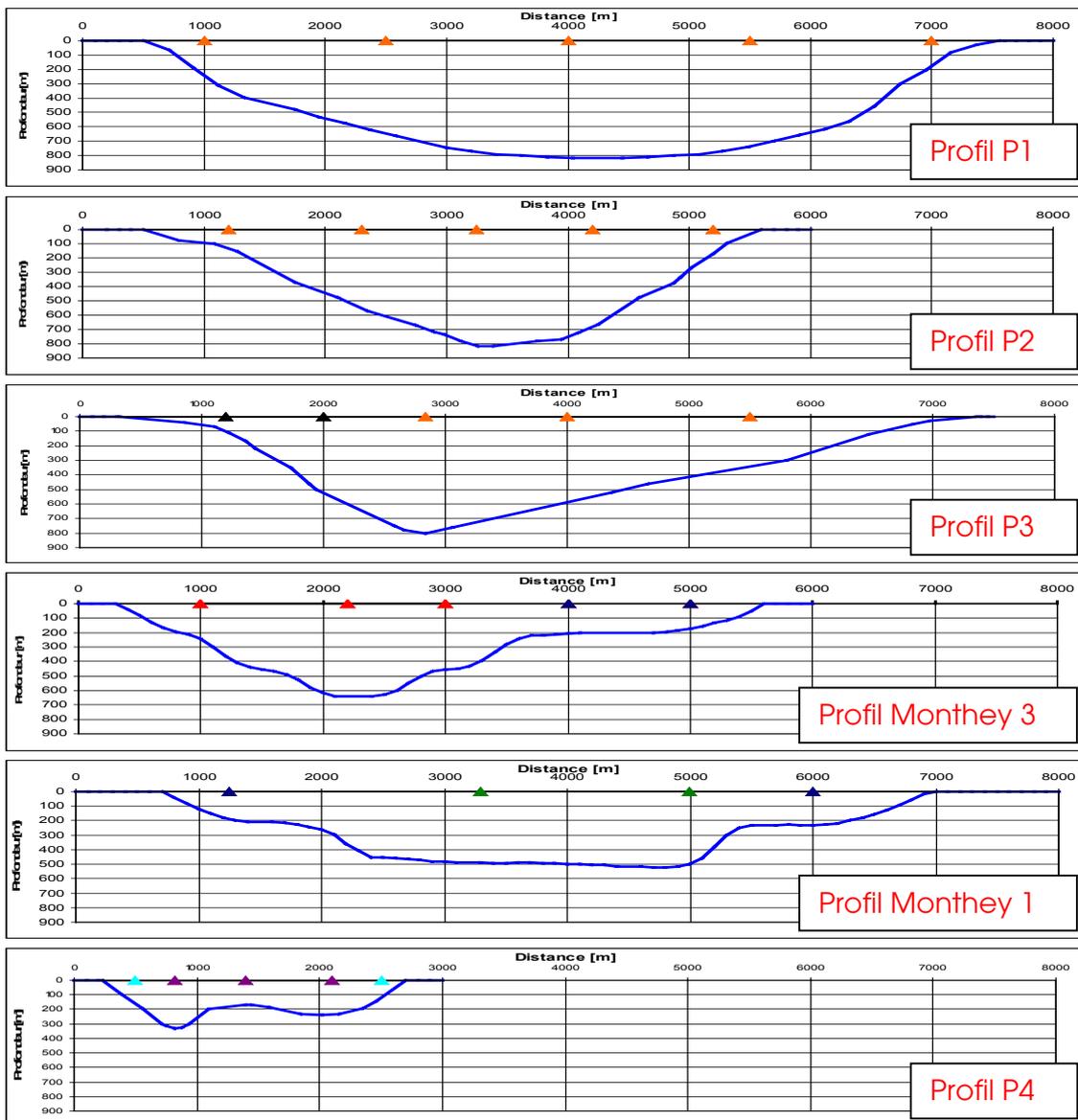


Figure 9 : Coupe schématique des profils de calcul, en regardant vers l'aval. L'échelle de représentation est la même pour tous les profils. Les triangles colorés représentent les récepteurs pour lesquels les simulations ont été effectuées. Les couleurs correspondent aux différentes zones du microzonage final. L'échelle verticale est exagérée d'un facteur 1,7.

4. Calculs et étude de sensibilité

4.1 Fonctions d'amplification et spectres de réponse

Les effets de site sont calculés à l'aide de calculs 2D, pour les six séismes de référence choisis et pour les six profils de calcul. Les résultats obtenus sont présentés sous la forme de "fonctions d'amplification" (rapport entre le spectre de réponse

obtenu en surface des dépôts et le spectre de réponse du séisme d'input pour un site rocheux hypothétique de surface). Ensuite, les fonctions d'amplification sont multipliées par le spectre de réponse correspondant au rocher dur (spectre "input rocher"), afin d'obtenir les spectres de réponse correspondants.

Les figures 10 et 11 montrent, à titre d'exemple, les fonctions d'amplification et les spectres de réponse, respectivement, obtenus à l'issue des calculs au récepteur 3 du profil Monthey 3 pour les six séismes d'input (en noir : moyenne géométrique).

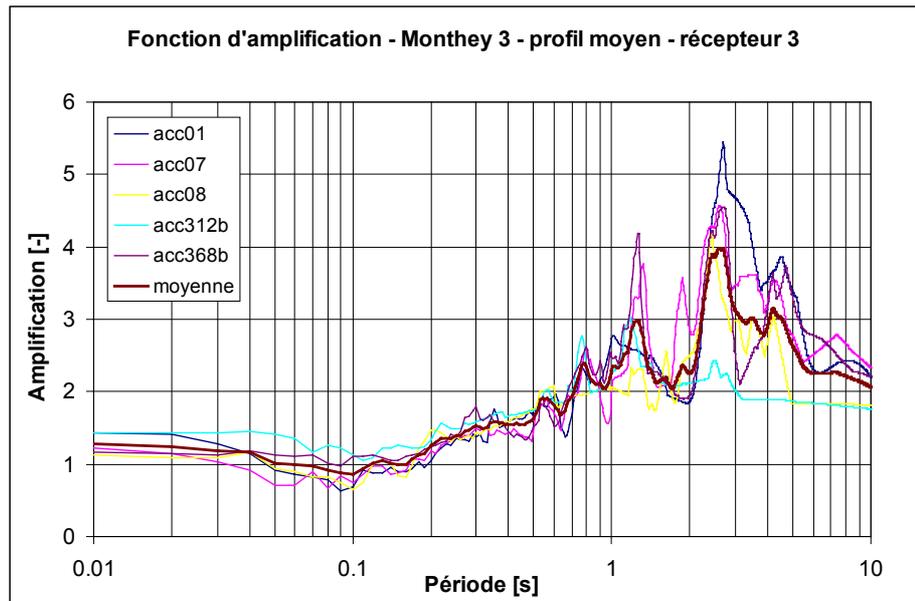


Figure 10 : Fonction d'amplification au niveau du récepteur 3 du profil Monthey 3 obtenue avec le profil de vitesse moyen.

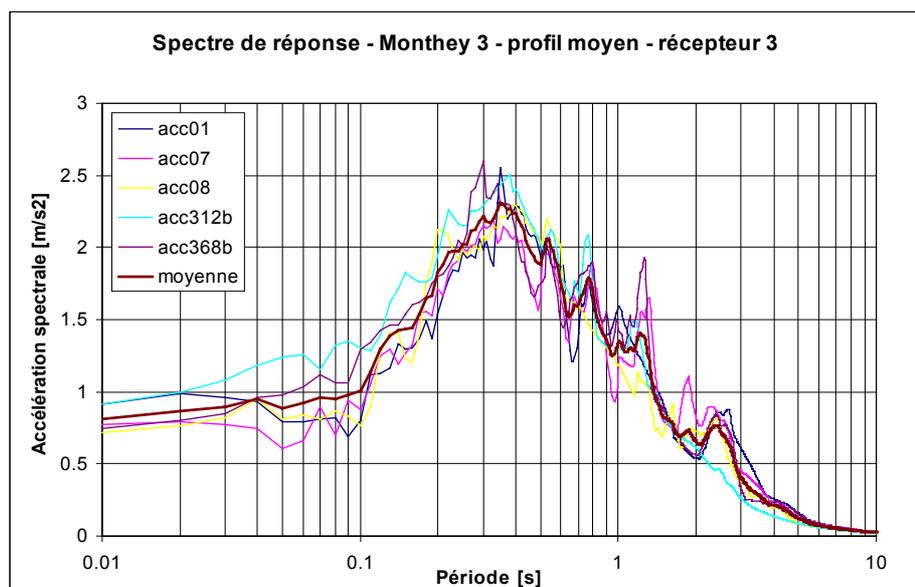


Figure 11 : Spectre de réponse au niveau du récepteur 3 du profil Monthey 3 obtenue avec le profil de vitesse moyen.

L'ensemble des résultats des calculs menés pour chaque récepteur, pour les six profils considérés, sont présentés à l'annexe 6.

4.2 Difficultés rencontrées avec le programme d'Aki-Larner

Certaines simulations, effectuées notamment dans les géométries quaternaires les plus profondes (800 m de dépôts), ont conduit à des accélérations spectrales très faibles. Le calcul 2D a fourni des spectres inférieurs au calcul 1D, caractérisés par des accélérations trop faible selon toute vraisemblance.

Une analyse détaillée des fichiers output du programme de simulation 2D a révélé un dysfonctionnement important. En effet, dans les couches supérieures, les déformations effectives calculées sont décroissantes avec la profondeur, ce qui est logique. Or, à partir d'une certaine profondeur, variant a priori suivant le profil, les déformations calculées deviennent de plus en plus importantes, ce qui est incompatible avec les lois de la physique. Le coefficient d'amortissement correspondant à ces déformations est alors très élevé, ce qui provoque une très forte atténuation du signal comme indiqué sur la figure 12.

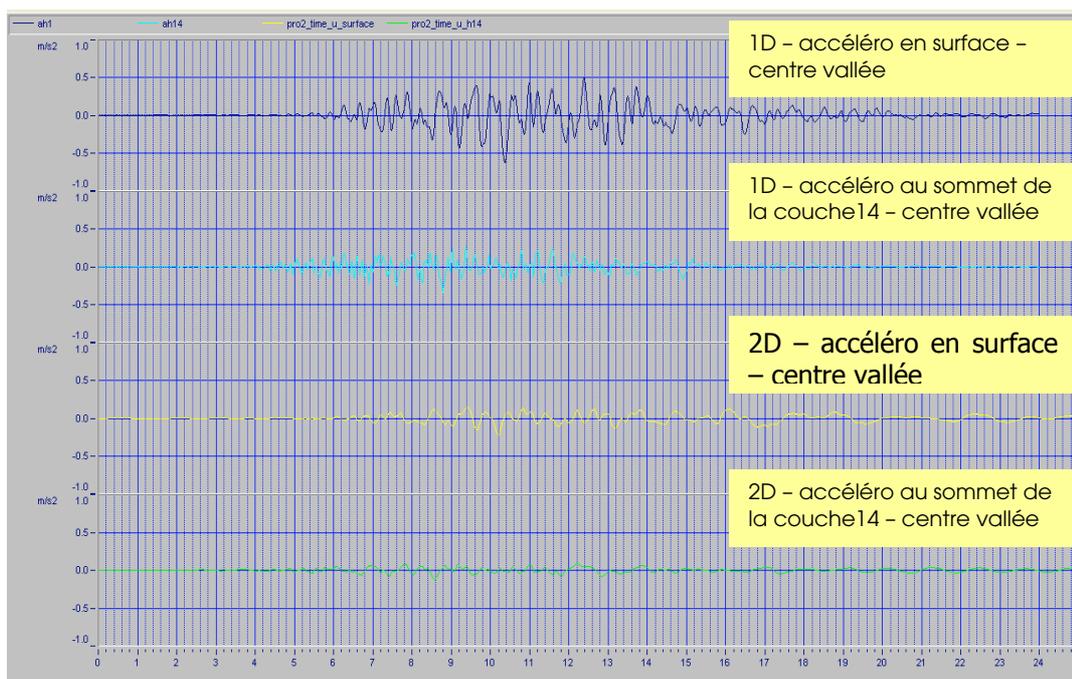


Figure 12 : Comparaison des accélérogrammes obtenus pour le profil P2 dans le cas du calcul 1D et du calcul 2D. La couche 14 est la couche de dépôts meubles la plus profonde, le toit de cette couche se situe, pour le profil P2, à 750 mètres de profondeur.

La figure 12 montre que le signal subit une atténuation très forte dans le cas du calcul 2D lors de la traversée de la première couche de dépôts meubles. Cela se traduit en surface par un signal, lui aussi, de faible amplitude. La comparaison entre les résultats 1D et 2D a permis de conclure à une différence significative des niveaux de déformations atteints dans les couches profondes mais pas dans les couches superficielles. C'est pourquoi une approche hybride, consistant à évaluer

un facteur de qualité moyen pour les couches profondes à partir des résultats de déformations obtenus en 1D, a été testée. Ensuite, ce facteur de qualité a été assigné aux couches profondes dans le programme d'Aki-Larner tout en attribuant un comportement linéaire à ces couches de façon à ce que l'amortissement reste inchangé au fur et à mesure des itérations.

La figure 13 présente des résultats obtenus pour le profil P2 au centre de la vallée (récepteur 3) avec le profil moyen de vitesses des ondes S. Les courbes "moyenne 1D" et "moyenne 2D" correspondent aux simulations "sans changement". La courbe "moyenne 2D - Q = 50" correspond à la simulation 2D dans le cas où les couches inférieures à la profondeur 300 mètres sont définies avec un facteur de qualité $Q = 50$. Cela correspond à un amortissement de 1 %. L'analyse des déformations dans les couches profondes pour le cas 1D a permis de déterminer un facteur de qualité moyen $Q = 25$ pour ces couches. Ce facteur a donc été retenu pour les couches profondes pour effectuer la simulation 2D correspondant à la courbe "moyenne 2D - Q = 25".

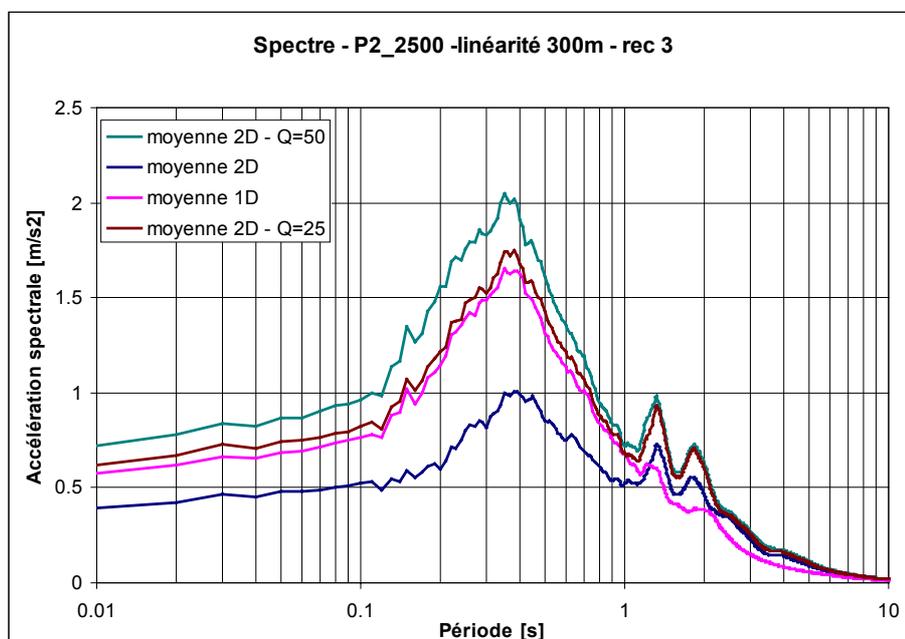


Figure 13 : Spectres de réponse obtenus avec le profil moyen de vitesse des ondes S au centre du profil P2 en modifiant le paramètre d'amortissement dans les couches profondes (profondeur supérieure à 300 mètres).

La figure 13 permet de valider la démarche proposée, les résultats entre le 1D et le 2D devant être semblables dans le domaine des courtes périodes, compte tenu du mode de fonctionnement du programme d'Aki-Larner. L'effet 2D se manifeste quant à lui logiquement dans le domaine des longues périodes ($T > 1$ s) car la vallée est très profonde et sa fréquence de résonance très basse (0.2 Hz).

La démarche ainsi proposée, permettant d'éviter le problème d'instabilités numériques rencontré dans le calcul de la déformation dans les couches profondes, a été appliquée à l'ensemble des profils de calcul.

4.3 Comparaison 1D - 2D

Des calculs 1D ont également été menés, avec les mêmes séismes d'input, à titre de comparaison, de manière à apprécier l'importance de l'effet 2D et de mettre en évidence la gamme de période dans laquelle il est significatif. La figure 14 montre une comparaison des fonctions d'amplification moyennes 1D (en noir) et 2D (en rouge) obtenues avec les six séismes d'input, pour les profils de calcul P1, Monthey 3, Monthey 1 et P4, d'aval en amont, pour le récepteur situé au centre du profil.

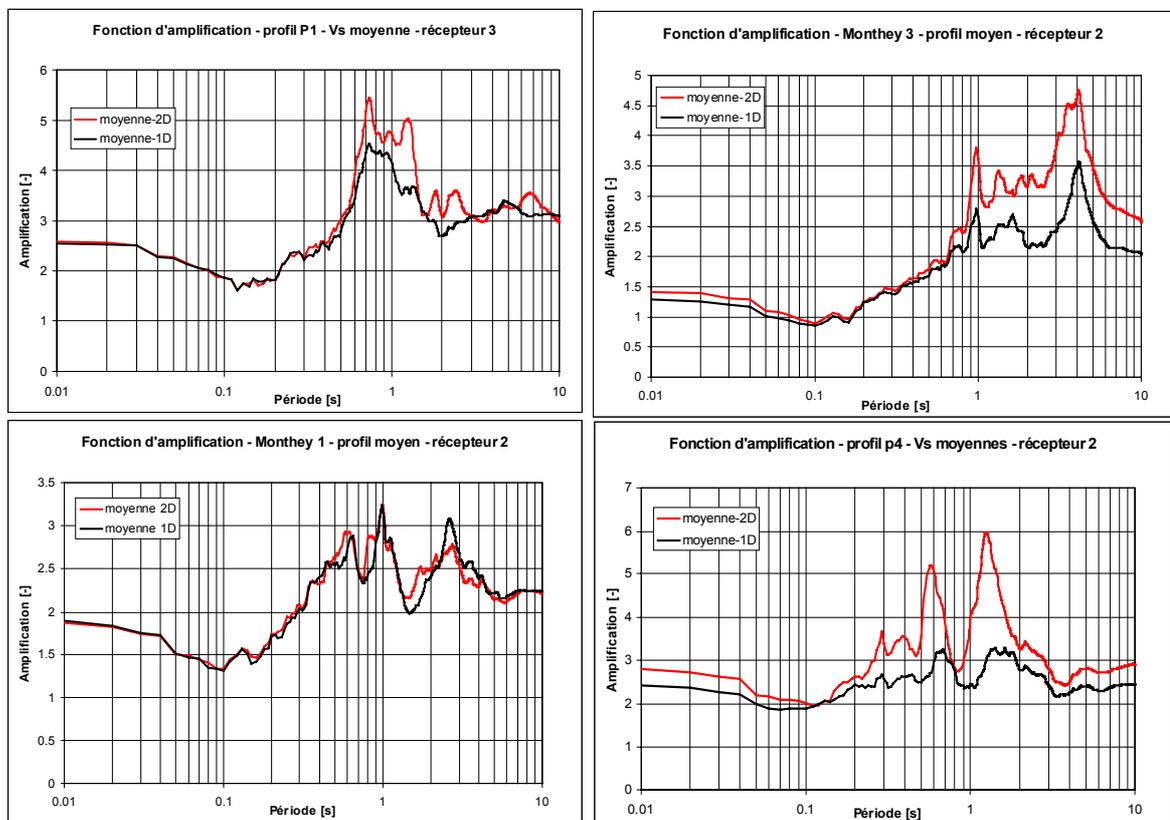


Figure 14 : Comparaison entre les fonctions d'amplification moyennes 1D (en noir) et 2D (en rouge) obtenues avec les six séismes d'input, pour les profils de calcul P1, Monthey 3, Monthey 1 et P4, d'aval en amont, pour le récepteur situé au centre du profil.

Cette comparaison met en évidence la variabilité de l'effet 2D, tant dans son ampleur, que dans la gamme de période à laquelle il se produit, en fonction de la géométrie de la vallée au droit du profil considéré (voir figure 4). Il s'agit là de récepteurs situés au centre de la vallée, les effets 2D sur les bords pouvant être

significativement différents. Les profils P1 et Monthey 3 montrent, par exemple, un effet 2D marqué, pour les périodes supérieures à 0.7 s. L'effet 2D au centre du profil Monthey 1 est nettement moins marqué, tandis que le profil P4, en amont, est marqué par un fort effet 2D sur une large gamme de périodes.

4.4 Variation des vitesses d'ondes S

La vitesse des ondes S est, avec l'estimation de la géométrie du soubassement rocheux, le paramètre le plus déterminant dans la modélisation de l'effet de site. Ce paramètre est généralement mal connu, en particulier quand les dépôts quaternaires sont présents sur une épaisseur importante comme c'est le cas dans la vallée du Rhône. Les mesures SASW permettent une bonne détermination de la vitesse des ondes S dans les couches superficielles (30 à 40 premiers mètres) et les mesures H/V donnent une bonne approximation de la vitesse moyenne des ondes S dans la formation quaternaire. Cependant, les incertitudes concernant ce paramètre restent élevées, d'où la nécessité de tenir compte d'une variation du profil moyen en ondes S dans les simulations. Pour chaque profil et chaque récepteur, le paramètre de vitesse a été varié d'un facteur 1.4 ce qui correspond à une variation d'un facteur 2 du module de cisaillement maximal ($V_s = (G_{\max}/\rho)^{1/2}$). La figure 15 illustre l'influence d'une variation de vitesse d'un facteur 1.4 sur les fonctions d'amplification et les spectres de réponse, dans l'exemple du récepteur 2 du profil P4.

Les pics d'amplification maximale apparaissent pour des périodes d'autant plus longues que les vitesses considérées pour les simulations sont basses. Pour cet exemple précis (figure 15), le profil de vitesses "basses" donne une amplification maximale à la période $T = 2$ s alors que le pic d'amplification se situe à la période $T = 1$ s pour le profil de vitesses "hautes".

De manière à tenir compte de cette grande incertitude sur la détermination des vitesses des ondes S, les profils de vitesse ont systématiquement été variés par un facteur 1.4, pour l'ensemble des calculs effectués.

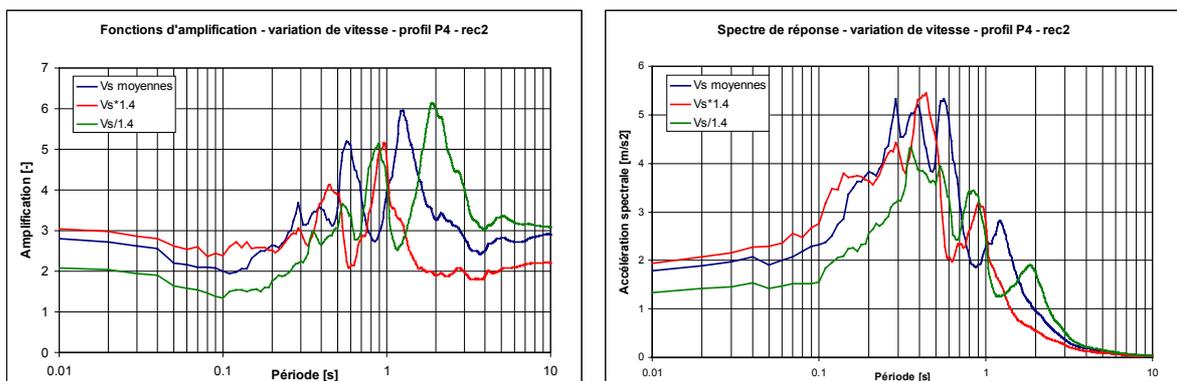


Figure 15 : Fonctions d'amplification (à gauche) et spectres de réponse (à droite) résultant des simulations effectuées avec le profil de vitesse moyen varié d'un facteur 1.4, au niveau du récepteur 2 du profil P4.

4.5 Variation de l'angle d'incidence

Le programme de simulation 2D offre la possibilité de faire varier l'angle d'incidence du champ d'onde à la base de la sédimentation quaternaire. La modification de ce paramètre peut entraîner des différences significatives sur les résultats des simulations. Or, les ondes sismiques excitant la vallée suite à un tremblement de terre n'arrivent pas forcément avec une incidence proche de la verticale, cela dépend des caractéristiques du séisme (distance, profondeur). Ainsi, une variation du paramètre d'incidence lors des différentes simulations s'impose afin de ne pas exclure certains cas de figures pouvant se produire.

Pour cette étude, les simulations ont été effectuées avec une arrivée des ondes sous incidence normale ainsi qu'avec un angle de plus ou moins 30° par rapport à la verticale. Ces variations restent conformes aux limites imposées par la théorie d'Aki-Larner qui est valable pour des angles inférieurs à 30-40°. En effet, l'influence de l'angle d'incidence est variable selon le séisme d'input et surtout selon la forme du substratum rocheux qui, en fonction de l'angle d'incidence, conduit à des ondes arrivant plutôt orthogonalement à l'interface ou au contraire plutôt tangentiellement comme représenté sur la figure 16.

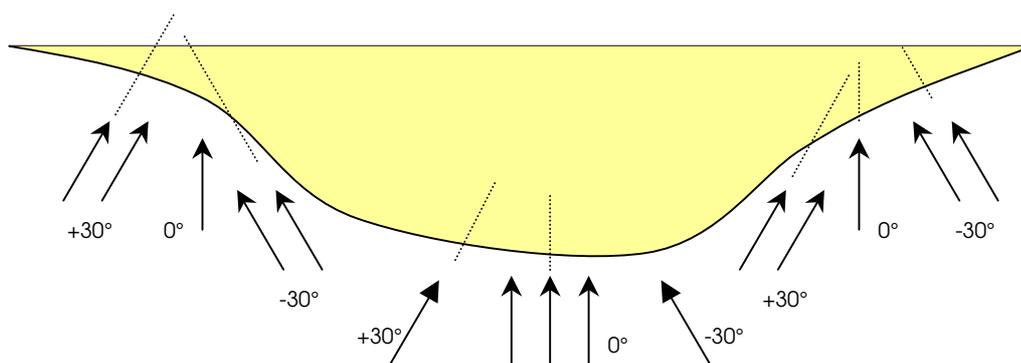


Figure 16 : Arrivée des ondes à l'interface bedrock /dépôts quaternaires selon les incidences 0°, +30° et -30°, par rapport à la verticale.

La figure 17 montre les fonctions d'amplifications obtenues aux récepteurs 1 et 5 du profil P1 sous les trois différentes conditions d'incidence utilisées. Les récepteurs 1 et 5 correspondent aux deux extrémités du profil. La figure 17 permet de confirmer l'importance de ce paramètre puisque d'un côté du profil la simulation avec une incidence +30° donne les amplifications les plus fortes alors que de l'autre, c'est la simulation avec une incidence -30° qui occasionne les plus fortes amplifications (dans ce cas, la simulation avec une incidence normale donne les amplifications les plus fortes au milieu du profil mais ce résultat n'est pas illustré par la figure 17). C'est donc la situation d'incidence orthogonale à la surface du rocher qui donne l'amplification la plus forte. Au passage, notons que le caractère très symétrique de la vallée au niveau du profil P1 est bien illustré par les fonctions d'amplification aux récepteurs 1 et 5 qui sont relativement semblables.

Pour l'ensemble des calculs effectués, l'angle d'incidence a été systématiquement varié de + ou -30° par rapport à la verticale.

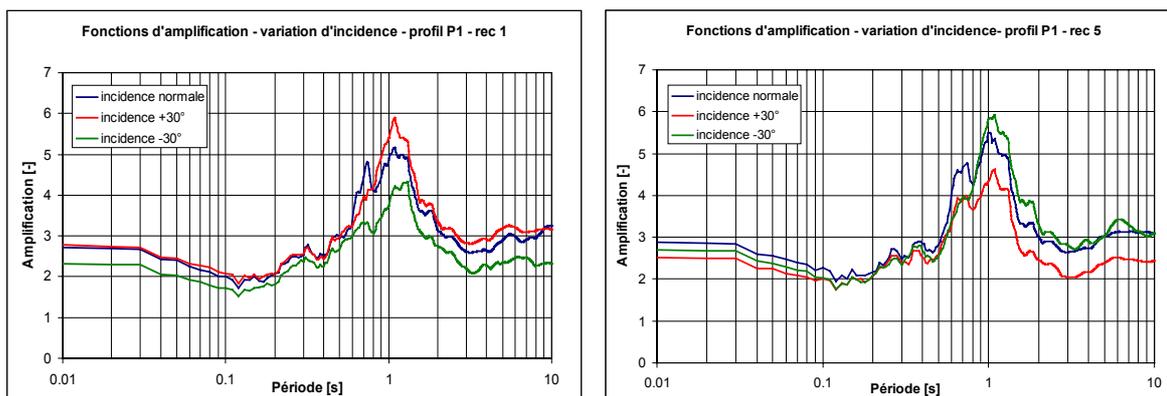


Figure 17 : Fonctions d'amplification (courbes moyennes des six séismes input) obtenues pour le profil P1 au récepteur 1 (à gauche) et au récepteur 5 (à droite).

5. Résultats et proposition de spectres spécifiques

5.1 Résultats des calculs

L'ensemble des résultats des calculs menés pour chaque récepteur des six profils de calculs ont été comparés et groupés par ressemblance (niveau d'amplification, bande de période amplifiée, etc.). L'annexe 7 présente ainsi les résultats de tous les calculs, groupés par réponse similaire. Les secteurs issus de ces regroupements correspondront aux différentes zones auxquelles seront attribués les spectres spécifiques, représentés sur les figures de l'annexe 7.

A l'issue de la présente étude, sept zones sont distinguées, d'aval en amont (voir la carte en annexe 8) :

- la partie profonde de la vallée, de Villeneuve à Aigle, zone à laquelle est attribué le spectre spécifique S5,
- une bande de bord de vallée, entre Vouvry et Vionnaz, à laquelle est attribué le spectre de la classe de sol C de la norme SIA 261,
- une large partie Ouest de la vallée, dans laquelle se situent Muraz et Collombey-Le Grand, à laquelle est associé le spectre spécifique S6,
- la bordure Est de la vallée, de Ollon à la colline du Montet, ainsi que le cône de Monthey, auxquels est associé le spectre de la classe de sol D de la norme SIA 261,
- le centre de la vallée, entre Monthey et le Montet, auquel est associé le spectre spécifique S7,
- le centre de la vallée, entre Massongex et Bex, auquel est associé le spectre spécifique S8,
- la bordure de la vallée côté Bex, ainsi que de Massongex à Lavey-Morcles, zone à laquelle est associé le spectre spécifique S9.

5.2 Spectres spécifiques proposés

La région étudiée est ainsi divisée en sept zones, dont deux sont caractérisées par les spectres C et D de la norme SIA 261 et cinq font l'objet de spectres spécifiques, S5 à S9, pour faire suite à la numérotation entamée dans le secteur d'Yverdon-les-Bains. La figure 18 présente l'ensemble de ces spectres. D'une manière générale, les variations maximales entre les différents spectres proposés sont inférieures ou égales à un facteur 2, selon les périodes considérées.

La partie profonde de la vallée, de Villeneuve à Aigle, zone à laquelle est attribué le spectre spécifique S5, est caractérisée par un mouvement sismique de surface relativement faible. En effet, il s'agit d'un secteur avec un effet 2D important, mais la très grande profondeur des dépôts meubles (plus de 800 m) rend le rôle de l'atténuation des ondes supérieur à l'amplification due à l'effet de piégeage des ondes en 2D. Ainsi, une grande partie de l'énergie sismique est dissipée au travers de cette grande épaisseur de dépôts meubles. De plus, il est à noter de nouveau ici, que l'aléa sismique au rocher dur est plus faible dans cette partie aval de la vallée, par rapport à l'amont, bien que toute la région d'étude appartienne à la zone 3a. Ainsi, pour cette zone profonde de la vallée, le spectre spécifique S5, proposé à l'issue de la présente étude, est caractérisé par une réduction par rapport au spectre de la classe de sol C, zone 3a, de la norme SIA 261, pour les périodes inférieures à 0.75 s, tandis qu'il est à peine supérieur ou équivalent au spectre C pour les périodes supérieures à 0.75 s.

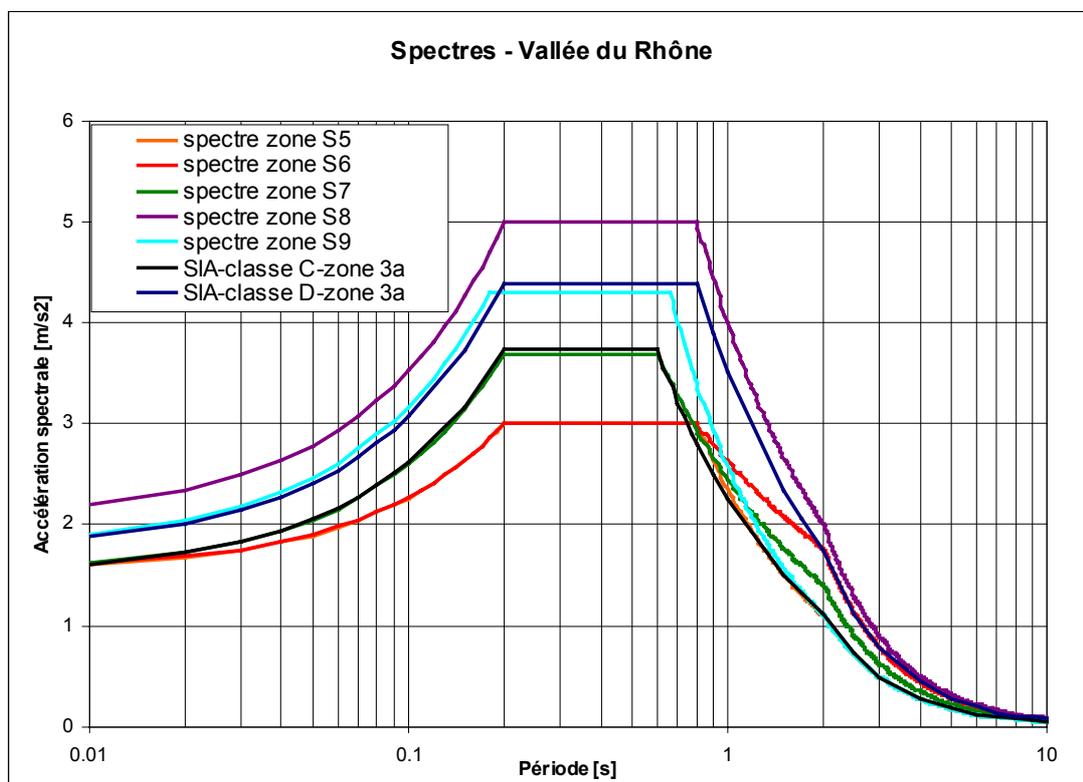


Figure 18 : Spectres de réponse élastiques proposés pour les sept zones déterminées à l'issue du microzonage sismique spectral de la vallée du Rhône vaudois.

Une bande de bord de vallée, entre Vouvry et Vionnaz, présente une réponse légèrement supérieure dans les périodes inférieures à 0.75 s, ainsi, le spectre de la classe de sol C, zone 3a, de la norme SIA 261 a pu être attribué à cette zone.

En remontant vers l'amont, une large partie Ouest de la vallée, dans laquelle se situent Muraz et Collombey-Le Grand, est caractérisée par le spectre spécifique S6, identique au spectre S5 pour les périodes inférieures à 0.75 s (soit réduit par rapport au spectre C de la norme), mais présentant une amplification notable pour les périodes supérieures à 0.75 s, et rejoignant le spectre de la classe de sol D, à partir de la période de 2 s.

En ce qui concerne la bordure Est de la vallée, de Ollon à la colline du Montet, ainsi que le cône de Monthey, le spectre de la classe de sol D, zone 3a, de la norme SIA 261 est proposé. L'amplification y est en effet supérieure, dans toute la gamme de fréquences, l'effet d'atténuation des ondes étant moindre, en raison de la moindre épaisseur des dépôts meubles, et l'aléa sismique au rocher dur étant plus élevé que dans la partie aval de la vallée.

Le centre de la vallée, entre Monthey et le Montet, est associé au spectre spécifique S7, quasi identique au spectre C de la norme SIA 261, pour les périodes inférieures à 0.6 s, et légèrement plus élevé que celui-ci pour les périodes supérieures à 0.6 s.

Le centre de la vallée, entre Massongex et Bex, est caractérisé par un profil 2D moins profond, combiné avec un aléa au rocher élevé. Le spectre spécifique S8, associé à ce secteur, est le plus élevé de la région d'étude. Il est, en effet, supérieur au spectre de la norme SIA 261 pour un sol de classe D, sur l'ensemble de la bande de fréquences.

La bordure amont de la vallée côté Bex, ainsi que de Massongex à Lavey-Morcles, est caractérisée par le spectre spécifique S9. Celui-ci s'apparente au spectre D de la norme SIA 261, jusqu'à la période d'environ 0.6 s, au-delà, le spectre spécifique est nettement plus faible que le spectre D, traduisant le caractère plutôt haute fréquence de l'amplification dans ce secteur. Il est à noter que ce spectre S9 a été étendu à la zone de Lavey-Morcles, bien qu'aucun profil 2D n'ait été pris en compte dans ce petit secteur. En cas de construction importante dans cette zone, il serait judicieux de préciser ce spectre par une étude de site spécifique.

Les cinq spectres de dimensionnement élastiques proposés pour la vallée du Rhône vaudois sont définis comme suit, en fonction de la gamme de période propre (T) considérée :

Spectre S5 :

$T \leq 0.2 \text{ s}$	$Sa = 1.53 + 7.37 \cdot T$	(m/s^2)
$0.2 \text{ s} \leq T \leq 0.8 \text{ s}$	$Sa = 3.0$	(m/s^2)
$0.8 \text{ s} \leq T \leq 2 \text{ s}$	$Sa = 2.35/T^{1.1}$	(m/s^2)
$T \geq 2 \text{ s}$	$Sa = 4.4/T^2$	(m/s^2)

Spectre S6 :

$T \leq 0.2 \text{ s}$	$Sa = 1.54 + 7.32 \cdot T$	(m/s^2)
$0.2 \text{ s} \leq T \leq 0.8 \text{ s}$	$Sa = 3.0$	(m/s^2)
$0.8 \text{ s} \leq T \leq 2 \text{ s}$	$Sa = 2.63/T^{0.58}$	(m/s^2)
$T \geq 2 \text{ s}$	$Sa = 7.02/T^2$	(m/s^2)

Spectre S7 :

$T \leq 0.2 \text{ s}$	$Sa = 1.5 + 11 \cdot T$	(m/s^2)
$0.2 \text{ s} \leq T \leq 0.6 \text{ s}$	$Sa = 3.7$	(m/s^2)
$0.6 \text{ s} \leq T \leq 2 \text{ s}$	$Sa = 2.45/T^{0.81}$	(m/s^2)
$T \geq 2 \text{ s}$	$Sa = 5.6/T^2$	(m/s^2)

Spectre S8 :

$T \leq 0.2 \text{ s}$	$Sa = 2.05 + 14.74 \cdot T$	(m/s^2)
$0.2 \text{ s} \leq T \leq 0.8 \text{ s}$	$Sa = 5.0$	(m/s^2)
$0.8 \text{ s} \leq T \leq 2 \text{ s}$	$Sa = 4/T$	(m/s^2)
$T \geq 2 \text{ s}$	$Sa = 8/T^2$	(m/s^2)

Spectre S9 :

$T \leq 0.18 \text{ s}$	$Sa = 1.76 + 14.11 \cdot T$	(m/s^2)
$0.18 \text{ s} \leq T \leq 0.66 \text{ s}$	$Sa = 4.3$	(m/s^2)
$0.66 \text{ s} \leq T \leq 2 \text{ s}$	$Sa = 2.58/T^{1.23}$	(m/s^2)
$T \geq 2 \text{ s}$	$Sa = 4.4/T^2$	(m/s^2)

Les spectres proposés s'appliquent aux mouvements horizontaux pour un taux d'amortissement relatif de 5 % de la valeur critique. En ce qui concerne les accélérations sismiques verticales, il convient de prendre en compte les deux tiers du spectre proposé pour la direction horizontale, en conformité avec la norme SIA 261.

6. Conclusion

La vallée du Rhône vaudois a pu être étudiée à partir d'un ensemble de simulations 2D, le long de six profils au travers de la vallée. Les calculs ont été conduits à partir de six séismes d'input, choisis conformément à l'aléa sismique local pour le rocher "dur", communiqué par le Service sismologique suisse. L'analyse des fonctions d'amplification obtenues à l'issue des simulations a permis de délimiter sept zones dont la réponse sismique peut être considérée comme homogène, et auxquelles sont associés cinq spectres de dimensionnement spécifiques ainsi que les deux spectres de la norme SIA 261 pour les classes de sol C et D.

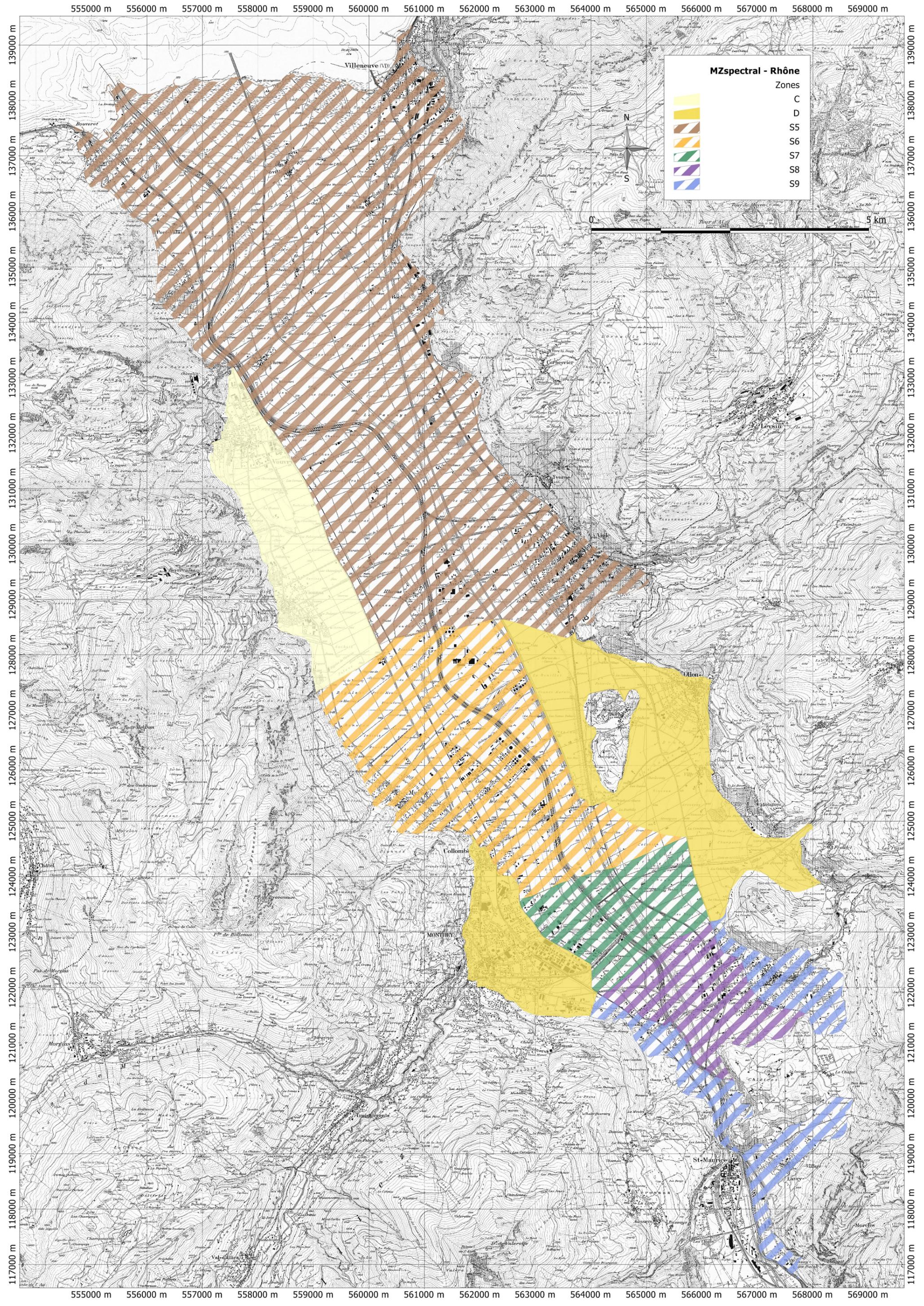
Ces spectres sont présentés sur la figure 18. Leur expression analytique est donnée au chapitre 5.2. La carte de l'annexe 8 indique la répartition géographique des secteurs d'application de ces spectres. Il est recommandé d'utiliser ces spectres à la place de ceux de la norme SIA-261, paragraphe 16.2.3.1, pour le contrôle ou le

dimensionnement sismique des structures dans la vallée du Rhône vaudois. Les spectres inélastiques peuvent être calculés en analogie avec les formules du paragraphe 16.2.4.1 de la norme SIA 261.

7. Littérature

- Aki K. and K.L. Larner (1970), Surface motion of a layered medium having irregular interface due to incident plane SH waves, *J. Geophys. Res.*, 75, pp. 933-954.
- Ambraseys, N., J. Douglas, R. Sigbjörnsson, C. Berge-Thierry, P. Suhadolc, G. Costa and P. Smit, (2004). European Strong-Motion Database, Volume 2. Contract GR/52114/01 (P), Engineering and Physical Science Research Council of the UK.
- BRGM (1998). CyberQuake, User's Guide, Version 2, BRGM, Orléans.
- Ishibashi I and X. Zhang (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations*, Vol. 33, n° 1, 182-191.
- 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.
- Jongmans D. and Campillo M., (1993-a), 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-b), 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.
- Lacave C. and M. G. Koller (2007). Microzonation of the city of Visp (Switzerland) using a 2D equivalent linear approach. *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece*. Paper No. 1755.
- Lacave C, P.-Y. Bard, M. Kham, M. G. Koller (2008). 2D equivalent linear site effect simulation: example applications to two deep valleys. *Bull. Earthquake Eng.* No. 6, pp.197-211. DOI 10.1007/s10518-007-9054-1.
- Nakamura Y. (1989). A Method for Dynamic Characteristics Estimations of Subsurface Using Microtremors on the ground Surface, *QR RTRI*, 30, pp. 25-33.
- Norme SIA-261 (2003). Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zurich.
- Park C. B., (1998). SurfSeis, Multichannel Analysis of Surface Waves, Kansas Geological Survey, USA.
- Résonance Ingénieurs-Conseils SA (2008). Etat des lieux en terme de microzonage spectral dans le canton de Vaud - Etude préliminaire au microzonage spectral. Rapport 289.01/CL/MK, pour l'ECA-Vaud.
- Résonance Ingénieurs-Conseils SA et Tissières SA (2004). Microzonage sismique spectral de la région de Monthey. Rapport 220.03//CL/MK/JR/FD//PT/SF/EC, pour le DTEE, Géologue cantonal du Valais.
- Sabetta F. and A. Pugliese, (1996). Estimation of response spectra and simulation of non-stationary earthquake ground motions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, pp. 337-352.
- Seed, H.-B. et Idriss, I.-M. (1970). Soil moduli and damping for dynamic response analysis. Report N°. FERC 70-10, UCB.

- Service sismologique Suisse, SED (2004). Seismic hazard assessment of Switzerland. <http://www.seismo.ethz.ch>
- SESAME (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations : measurements, processing and interpretation. Sesame European research project. http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivrables/Del-D23-HV_User_Guidelines.pdf
- Schnabel B., J. Lysmer and H.B. Seed (1972). SHAKE – a Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report EERC, 72-12.
- Vucetic M and R. Dobry (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 1, pp. 89-107.



555000 m 556000 m 557000 m 558000 m 559000 m 560000 m 561000 m 562000 m 563000 m 564000 m 565000 m 566000 m 567000 m 568000 m 569000 m

139000 m
138000 m
137000 m
136000 m
135000 m
134000 m
133000 m
132000 m
131000 m
130000 m
129000 m
128000 m
127000 m
126000 m
125000 m
124000 m
123000 m
122000 m
121000 m
120000 m
119000 m
118000 m
117000 m

139000 m
138000 m
137000 m
136000 m
135000 m
134000 m
133000 m
132000 m
131000 m
130000 m
129000 m
128000 m
127000 m
126000 m
125000 m
124000 m
123000 m
122000 m
121000 m
120000 m
119000 m
118000 m
117000 m

MZspectral - Rhône

Zones

- C
- D
- S5
- S6
- S7
- S8
- S9



0 5 km

Villeneuve (VD)

Collombey

MONTHEY

St-Maurice