



Prise en Compte des Effets de Site 2D dans la Vallée du Rhône Suisse

Corinne Lacave — Thibaut Bailly — Martin Koller

Résonance Ingénieurs-Conseils SA

21 rue Jacques Grosselin, 1227 Carouge, Suisse

corinne.lacave@resonance.ch

RÉSUMÉ. La vallée du Rhône suisse est caractéristique d'une vallée alpine glaciaire encaissée, avec des remplissages de dépôts meubles d'une épaisseur allant jusqu'à plus de 800 m. Dans le cas d'une telle géométrie de dépôts, les spectres associés aux classes de sol des normes de construction ne sont pas adaptés pour un bon dimensionnement sismique. Plusieurs études de microzonage sismique spectral ont été réalisées dans les secteurs de la vallée caractérisés par une certaine urbanisation, afin de disposer de spectres spécifiques au site pour le dimensionnement ou le contrôle sismique des structures. Des campagnes de mesures H/V et MASW ont été réalisées pour déterminer les profils de vitesse des ondes S, puis les effets de site ont été caractérisés au moyen de simulations numériques SH linéaires-équivalentes en 2D. Différentes études de sensibilité ont été menées à bien, notamment pour prendre en compte les effets de l'incertitude sur la détermination des vitesses des ondes S dans les dépôts, de l'encaissement 2D (par rapport à 1D) de la vallée, de la forme du substratum rocheux et de l'angle d'incidence des mouvements sismiques. Des spectres de réponse élastiques spécifiques sont proposés à l'issue de ces études, directement utilisables pour le contrôle ou le dimensionnement sismique des structures.

ABSTRACT. The Swiss Rhône valley is a deep embedded alpine valley, characterized by soft deposits with a thickness up to 800 m. In the case of such geometry, spectra associated with the code soil classes are not appropriate for a good seismic design. Several microzonation studies have been undertaken in areas where the urbanization is significant, in order to define site specific spectra for the design or control of structures. H/V and MASW measurement campaigns have been conducted in order to determine Vs profiles, and site effects have been computed with the aid of 2D linear-equivalent SH numerical simulations. Various sensitivity studies have also been conducted, especially in order to account for uncertainties in the S wave velocity profiles, in the valley embedding characteristics (2D versus 1D effect), the shape of the bedrock, and the incidence angle of seismic waves. Specific elastic response spectra are proposed at the end of such studies which can directly be used for the design or control of structures.

MOTS-CLÉS : Effets de site - Microzonage - Vallée alpine.

KEYWORDS : Site effects - Microzonation - Alpine valley.

1. Introduction

La vallée du Rhône suisse est caractérisée par une géologie qui induit des effets de site sismiques du fait de sa géométrie 2D et de la présence de matériaux meubles sur une épaisseur importante. Dans une telle situation, la seule classification des terrains selon les classes de sols de la norme suisse SIA-261, et l'utilisation des spectres associés à ces classes, ne suffisent souvent pas à garantir un dimensionnement correct des structures. En effet, les spectres de la norme correspondent à des spectres moyens associés à des classes de sols basées sur une description des 30 premiers mètres de dépôts et ne peuvent donc pas être adaptés à tous les types de situations ; notamment, ils ne tiennent pas compte des effets de site spécifiques liés à la géométrie et à la nature de l'ensemble des dépôts dans une vallée ou un bassin sédimentaire.

Le Canton du Valais ainsi que l'Etablissement Cantonal d'Assurance contre les incendies et les éléments naturels du canton de Vaud (ECA-VAUD) ont fait réaliser plusieurs études de microzonage sismique spectral dans les secteurs de la vallée caractérisés par une certaine urbanisation, afin de disposer de spectres spécifiques au site pour le dimensionnement ou le contrôle sismique des structures.

2. Méthodologie

Des simulations en une dimension (1D) et en deux dimensions (2D) ont été effectuées dans le cadre de ces études. Les simulations 1D sont réalisées avec le logiciel CyberQuake (BRGM, 1997), tandis que les simulations 2D sont effectuées à l'aide d'un programme écrit par P.-Y. Bard (ISTerre, anciennement LGIT, Grenoble), basé sur la méthode d'Aki-Larner (1970). Dans le cadre du projet Interreg III-B Sismoalp, Résonance a contribué, en collaboration avec l'ISTerre, au développement d'une nouvelle version du programme de calcul des effets de site en 2D, selon la méthode d'Aki-Larner. Cette nouvelle version permet la prise en compte du comportement non linéaire des matériaux, au moyen d'une procédure linéaire équivalente, similaire à celle utilisée dans le logiciel CyberQuake (Lacave and Koller, 2007 ; Lacave et al., 2008).

La démarche générale adoptée pour les études de microzonage sismique est la suivante :

- Etablissement de profils de vitesse des ondes S et de densité, sur la base de données géologiques, géotechniques, de mesures H/V de la fréquence propre fondamentale des dépôts, de mesure MASW des vitesses des ondes S, etc.
- Choix de séismes de référence représentatifs de l'aléa régional au niveau du soubassement rocheux.
- Calculs 1D et 2D de l'effet de site pour les différents séismes de référence, avec prise en compte du comportement non linéaire des matériaux (approximation linéaire équivalente) et des incertitudes.
- Proposition de spectres de réponse élastiques en fonction des résultats et délimitation des zones de validité de ces spectres, sur une carte de microzonage sismique.

3. Données de base

3.1. Séismes d'input

L'aléa sismique de la Suisse a été réévalué par le Service Sismologique Suisse en 2004 (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. 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. Pour le calcul des effets de site, pour chaque région d'étude, plusieurs accélérogrammes ont été choisis de manière à ce

que leurs spectres couvrent le spectre d'input choisi, pour tenir compte de l'aléa sismique au rocher à la base de la structure. La figure 1 montre, à titre d'exemple, les spectres des séismes d'input utilisés dans la région de Monthey.

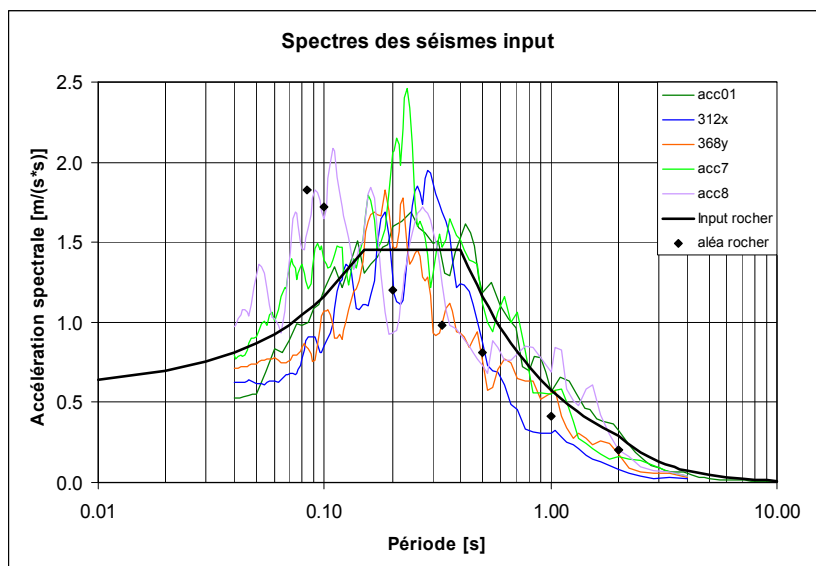


Figure 1. Exemple des spectres des séismes d'input utilisés dans la région de Monthey. Les losanges noirs indiquent les valeurs d'aléa sismique fournies par le Service Sismologique Suisse pour le rocher dur ($V_s = 1500$ m/s) pour ce secteur.

3.2. Profils de calcul

Les données géologiques et/ou géophysiques disponibles permettent l'établissement de profils géologiques au travers de la vallée. La figure 2 montre, à titre d'exemple, les profils de calcul utilisés entre le secteur de Monthey et le lac Léman. Les caractéristiques des dépôts meubles sont déterminées à partir des données géologiques et géotechniques disponibles. Des mesures in situ H/V permettent de déterminer la fréquence propre fondamentale des dépôts, puis de caler les valeurs des vitesses des ondes S dans les dépôts, si l'épaisseur de ceux-ci est connue. Des mesures MASW sont également réalisées pour une meilleure détermination de valeurs de vitesses des ondes S dans les couches superficielles. A l'aide de tous les éléments disponibles, des profils de calculs sont finalement établis pour l'ensemble des coupes au travers de la vallée. Le comportement non linéaire des matériaux est pris en compte au moyen de courbes issues de la littérature, en fonction des matériaux présents dans les dépôts meubles.

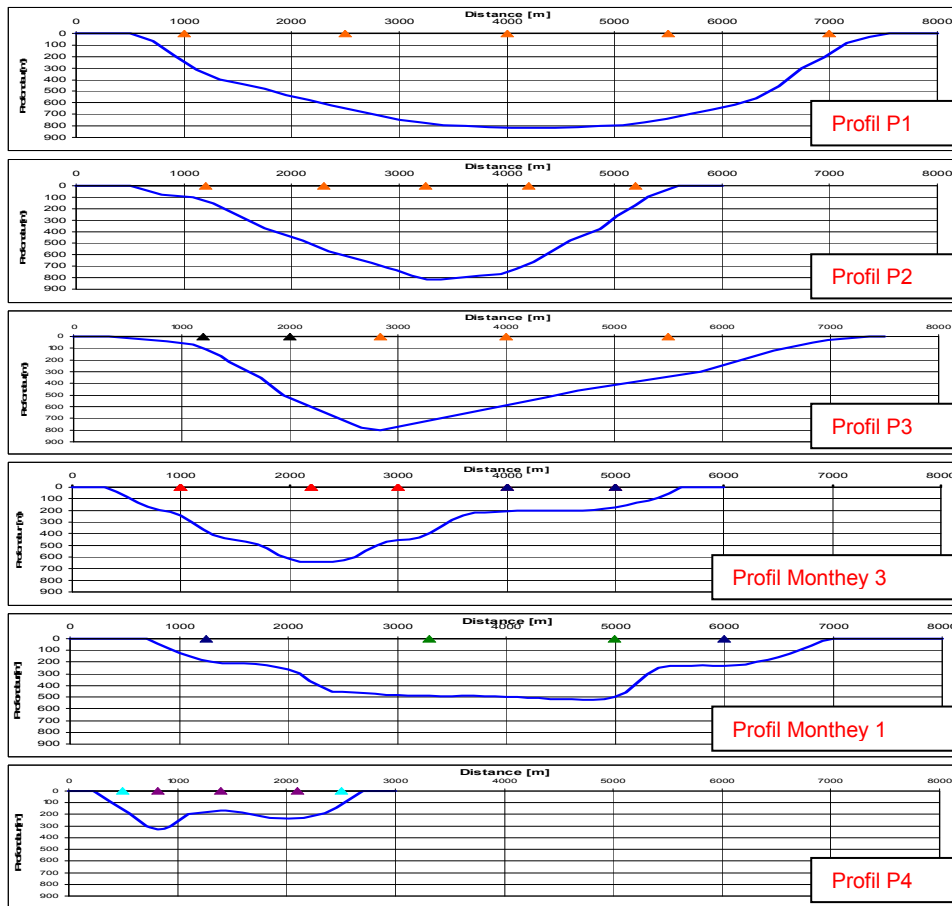


Figure 2. Exemples de profils de calcul au travers de la vallée du Rhône, en regardant vers l'aval, entre le secteur de Monthey (en bas, amont) et le lac Léman (en haut, aval).

4. Calculs et études de sensibilité

L'ensemble des calculs est mené le long des différents profils, pour plusieurs points de contrôle répartis le long de ces profils. En général, les calculs sont menés à bien pour six séismes d'input différents. Les résultats sont analysés en termes 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 au rocher dur (spectre "input rocher"), afin d'obtenir les spectres de réponse correspondants.

4.1. Comparaison 1D / 2D

Des calculs 1D sont également menés, avec les mêmes séismes d'input, à titre de comparaison, de manière à apprécier l'importance de l'effet 2D et pour mettre en évidence la gamme de période dans laquelle il est significatif. La figure 3 montre l'exemple d'une comparaison entre les fonctions d'amplification moyennes 1D (en noir) et 2D (en rouge) obtenues avec six séismes d'input, pour le récepteur situé au centre de différents profils. 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. Il s'agit là de récepteurs situés au centre de la vallée, les effets 2D sur les bords pouvant être significativement différents.

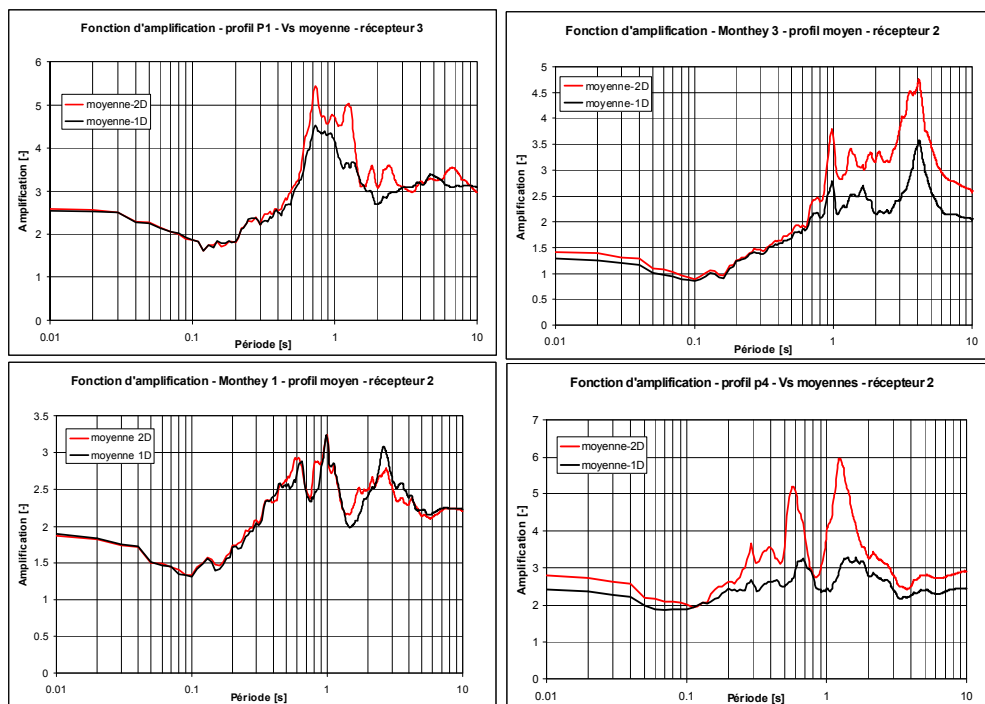


Figure 3. Comparaison entre les fonctions d'amplification moyennes 1D (en noir) et 2D (en rouge) obtenues avec les six séismes d'input, pour le récepteur situé au centre de différents profils.

D'une manière générale, mais pas systématique, les fonctions d'amplification issues des calculs 2D sont caractérisées par une amplification plus grande et légèrement décalée vers les courtes périodes, par rapport aux résultats des calculs 1D. Au vu de l'ensemble des résultats de calculs menés dans la vallée du Rhône suisse, il apparaît très difficile de prédire quel sera l'effet 2D et où il sera plus important dans la vallée. Ce constat est lié au fait que la physique des effets 2D est complexe, car à la fois due à la résonance de la vallée et à la génération d'ondes de surfaces sur les bords de celle-ci.

4.2. Variation des valeurs de V_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 MASW permettent une bonne détermination de la vitesse des ondes S dans les couches superficielles (20 à 30 premiers mètres) et les mesures H/V donnent une bonne approximation de la vitesse moyenne des ondes S dans la formation quaternaire, si son épaisseur totale est connue. 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 4 montre, à titre d'exemple, les fonctions d'amplification et les spectres de réponse résultant de simulations effectuées avec le profil de vitesse moyen varié d'un facteur 1.4.

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

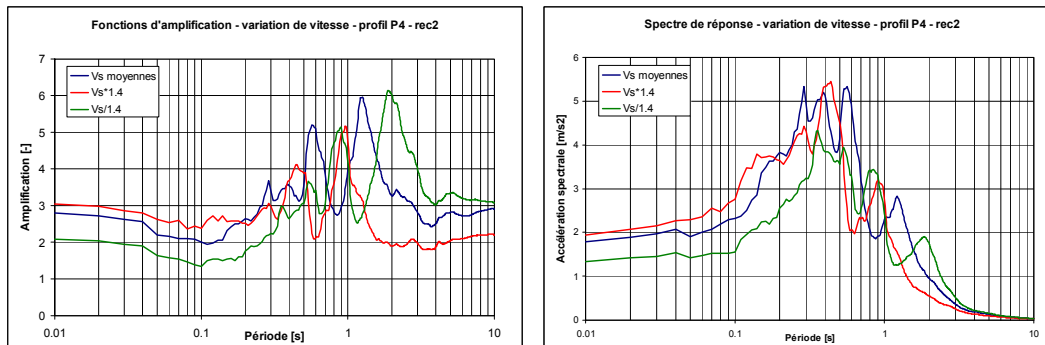


Figure 4. Exemples de fonctions d'amplification (à gauche) et spectres de réponse (à droite) résultant de simulations effectuées avec le profil de vitesse moyen varié d'un facteur 1.4.

4.3. 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 $30-40^\circ$. 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. La figure 5 montre les fonctions d'amplification moyennes obtenues sur un profil, aux récepteurs situés sur le flanc gauche et sur le flanc droit de la vallée, pour différents angles d'incidence.

Pour l'ensemble des profils de calculs, des variations d'angle d'incidence sont considérées, avec un angle de $+30^\circ$ ou -30° par rapport à la verticale.

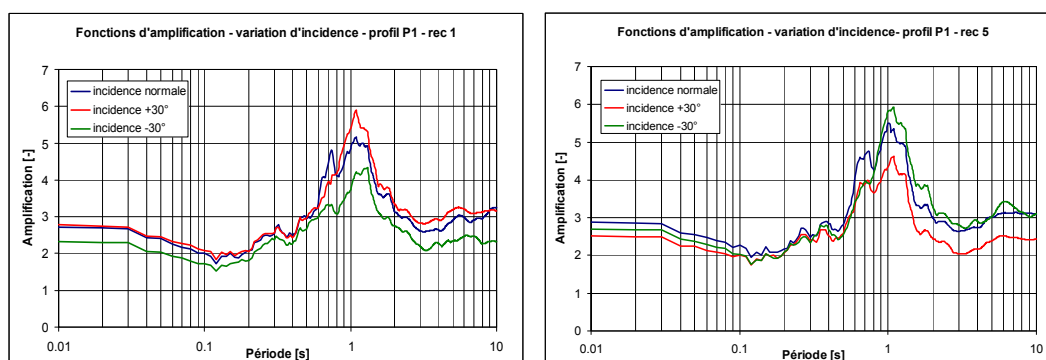


Figure 5. Fonctions d'amplification (courbes moyennes des six séismes input) obtenues sur un profil aux récepteurs situés sur le flanc gauche (à gauche) et sur le flanc droit (à droite) de la vallée, pour différents angles d'incidence.

5. Résultats et zonage

Finalement, pour chaque région d'étude, tous les résultats des calculs menés pour chaque récepteur, sur les différents profils de calculs, sont comparés et groupés par ressemblance (niveau d'amplification, bande de période amplifiée, etc.), comme le montre l'exemple de la figure 6, à droite. A chaque groupe de résultats, incluant l'ensemble des études de sensibilité, est associée une forme spectrale simple (spectre en turquoise sur la figure 6, par exemple). Une fois l'ensemble des spectres ainsi déterminés, une carte de zonage est établie, indiquant les zones de validité de ces spectres spécifiques au site, comme le montre l'exemple de la figure 6, à gauche. De plus, la définition analytique de chaque spectre est donnée, de manière à en garantir un usage simple par les ingénieurs qui sont en charge du dimensionnement ou du contrôle sismique des structures.

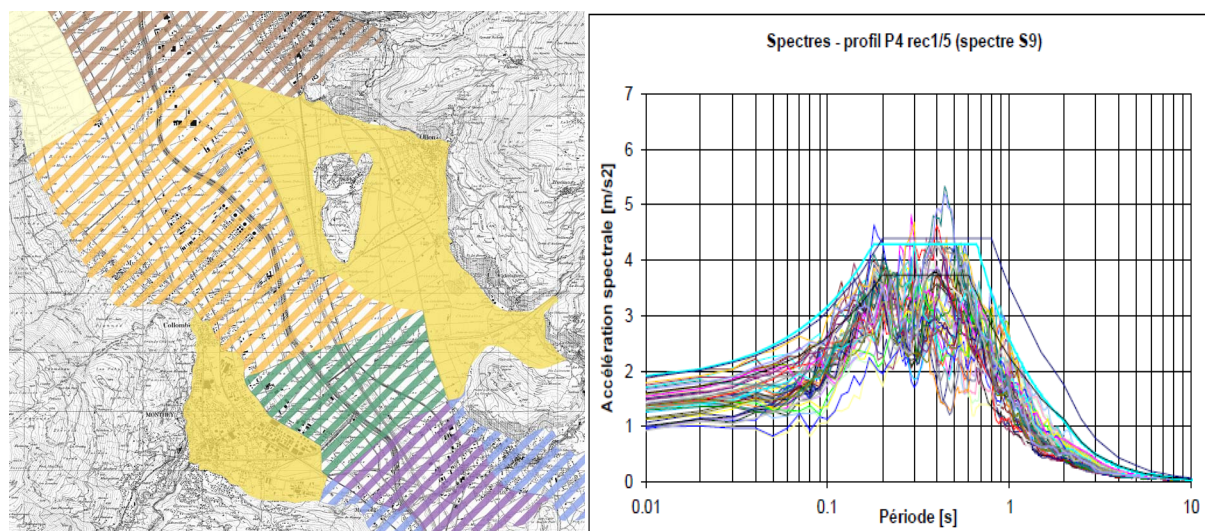


Figure 6. A gauche : extrait d'une carte de microzonage de la vallée du Rhône vaudois et de la région de Monthey. A droite : exemple de détermination d'un spectre spécifique au site (en bleu turquoise), à partir des résultats des calculs. Les spectres en traits fins bleu et noirs sont les spectres de la norme SIA 261, pour comparaison.

6. Conclusion

La vallée du Rhône vaudois (du lac Léman à la région de Bex), ainsi que plusieurs agglomérations importantes de la vallée du Rhône en Valais (Monthey, Sion, Brigue, Viège) ont pu être étudiées à partir d'un ensemble de simulations 2D, le long de profils au travers de la vallée. Les calculs ont été menés à partir de six séismes d'input, choisis en fonction de l'aléa sismique local pour le rocher "dur", communiqué par le Service sismologique suisse. L'analyse des spectres de réponse obtenus à l'issue des simulations a permis de délimiter, dans chaque secteur d'étude, des zones dont la réponse sismique peut être considérée comme homogène, et auxquelles sont associés des spectres de réponse élastiques spécifiques. Des cartes de microzonage indiquent la répartition géographique des secteurs d'application de ces spectres, qu'il est recommandé d'utiliser à la place de ceux de la norme suisse SIA-261, pour le contrôle ou le dimensionnement sismique des structures dans la vallée du Rhône suisse.

Les différentes études de microzonage sismique menées dans la vallée du Rhône suisse conduisent souvent :

- à des plateaux plus élevés et des branches longues périodes plus basses que les spectres de la norme, pour les zones où la profondeur du rocher n'est pas très importante ;
- à des branches longues périodes similaires ou légèrement plus élevées que celles de la norme, et des plateaux parfois plus bas, dans les régions où le rocher se trouve à une très grande profondeur.

Ces considérations sont plutôt liées à l'épaisseur des dépôts meubles qu'à l'influence de l'effet 2D, qui est difficilement appréciable, selon la forme du profil du rocher et la position des points d'intérêt le long de ce profil.

Remerciements

Les études de microzonage sismique effectuées dans la vallée du Rhône suisse ont été financées par le canton du Valais, le CREALP (Centre de recherche en environnement alpin, Valais) ainsi que l'Etablissement Cantonal d'Assurance contre les incendies et les éléments naturels du canton de Vaud (ECA-VAUD).

7. Bibliographie

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.

BRGM (1998). CyberQuake, User's Guide, Version 2, BRGM, Orléans.

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.

Norme SIA-261 (2003). Société Suisse des Ingénieurs et Architectes, Zurich.

Service sismologique Suisse, SED (2004). Seismic hazard assessment of Switzerland. <http://www.seismo.ethz.ch>