Bull. angew. Geol. Vol. 8/1 Juli 2003 S. 5-16

Projet pilote de microzonage sismique à Yverdon (VD)

Florian Widmer[1)], Blaise Duvernay[2)], Donat Fäh[2)], Aurèle Parriaux[3)]

Mots clés: Microzonage sismique, effet de site, SIA 261, carte indicative, fréquence propre, fonction d'amplification.

Résumé
Les tremblements de terre représentent actuellement pour la Suisse une menace très importante longtemps sous-estimée. L'augmentation du risque sismique s'explique par le rapide développement des infrastructures de notre société industrielle moderne. La mitigation des séismes s'appuie notamment sur le microzonage sismique, qui précise l'influence des conditions géologiques locales sur le signal sismique. La carte indicative de microzonage sismique constitue à ce titre une étape préliminaire, testée dans le cadre d'un projet pilote à Yverdon. Des données complémentaires fournies par des mesures de fréquences propres du sol (méthode de Nakamura) et par une modélisation 1D (SHAKE2000) permettent de fournir rapidement aux ingénieurs des informations utiles au dimensionnement parasismique des ouvrages.

Zusammenfassung
Grosse Erdbeben können auch in der Schweiz auftreten, auch wenn diese Gefahr lange unterschätzt wurde. Das Erdbebenrisiko hat in der modernen, industrialisierten Gesellschaft zugenommen. Die Erdbebenvorsorge beinhaltet die Mikrozonierung, welche den lokalen geologischen Aufbau bei der Erschütterungsfähigkeit berüksichtigt. Im Pilotprojekt Yverdon wurde ein Gefahrenhinweiskarte für Mikrozonierung erstellt. Zusätzlich zu den geologischen Erhebungen wurden Bodenfrequenzmessungen (nach Nakamura Methode) und 1D-Modellierungen mit SHAKE2000 durchgeführt. Die schnell verfügbaren Resultate erlauben Ingenieuren eine korrekte Erdbebendimensionierung von Bauten.

1. Introduction

1.1 Aléa sismique régional

L'aléa sismique peut être défini comme étant la probabilité qu'un événement sismique d'une certaine intensité survienne au cours d'un intervalle de temps donné. Il est calculé à partir de la répartition statistique de l'ensemble des tremblements de terre historiques répertoriés. C'est selon ce principe qu'a notamment été élaborée une carte d'aléa sismique couvrant les territoires de l'Allemagne, de l'Autriche et de la Suisse (Fig. 1, Grünthal et al., 1998).

Ce document délimite les zones pour lesquelles un tremblement de terre d'une certaine intensité est susceptible de se produire selon une période de retour T de 475 ans, ou autrement dit, avec une probabilité de 10% tous les 50 ans. C'est ainsi que l'on constate que le secteur d'Yverdon est compris dans la zone d'intensité 7 d'après l'échelle EMS-98.

1.2 Concepts et buts du zonage et du microzonage sismique

Le zonage 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 au paramètre déterminant de l'intensité sismique. Actuellement, la Suisse est subdivisée en quatre zones d'aléa sismique distinctes, selon la carte de la nouvelle norme de construction SIA 261 (Fig. 2.). Chacune de ces zones est caractérisée par une certaine valeur d'accélération horizontale effective a_g, calculée pour un événement dont la période de retour T = 475 ans.

- Zone 1 a_g = 0.06 g
- Zone 2 a_g = 0.10 g
- Zone 3 a_g = 0.13 g
- Zone 3b a_g = 0.16 g

[1] Office fédéral des eaux et de la géologie, 2501 Bienne
[2] Schweizerischer Erdbebendienst, ETH-Hönggerberg, 8093 Zurich
[3] Laboratoire de géologie de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne

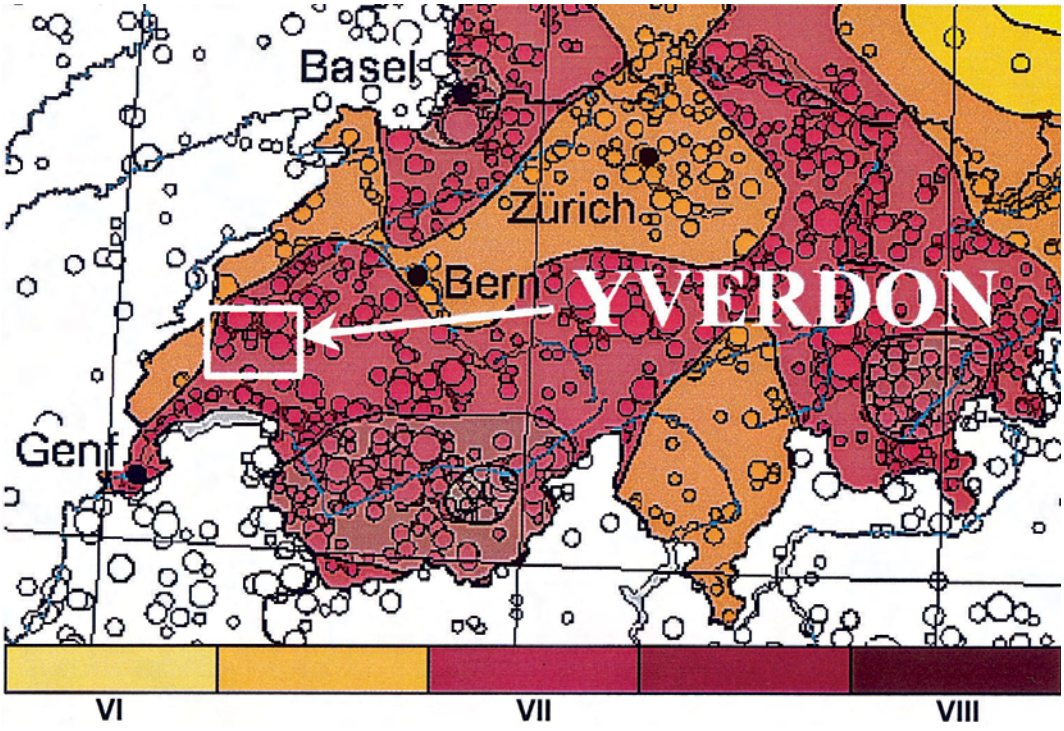


Fig. 1: Représentation du zonage sismique, selon l'intensité EMS-98, effectué au niveau du territoire suisse et situation géographique du secteur d'Yverdon.



Fig. 2: Carte des zones d'aléa sismique de la Suisse selon la norme SIA 261.

Le microzonage sismique, appliqué à l'échelle locale, peut fournir la bande de fréquences, l'amplitude et la variabilité de l'amplification supposée. Il peut ainsi permettre de déterminer un spectre de réponse associé à un site spécifique. Dans certains cas, l'aléa préconisé par la norme peut être réduit, alors que dans d'autres cas il doit être accru. Le concept du microzonage sismique contribue donc à mettre en évidence certains sites dangereux, où des effets de site importants sont susceptibles de survenir.

2. Situation géographique et géologique

La ville d'Yverdon est située dans le nord vaudois, à l'extrémité sud du lac de Neuchâtel. D'un point de vue strictement morphologique, le territoire couvert par la feuille n°1203 (Yverdon-les-Bains) de l'Office fédéral de topographie peut être divisé en quatre parties (Jordi, 1995):

– A l'est, le Plateau est constitué de Molasse d'eau douce inférieure (USM) et de Molasse marine supérieure (OMM). La molasse est en partie surmontée par la moraine de fond rhodanienne, et intensément creusée par le réseau hydrographique.

– Dans sa partie occidentale, le Plateau est interrompu par la Plaine de l'Orbe, qui représente une profonde échancrure d'érosion glaciaire, aujourd'hui comblée par de fins dépôts lacustres et fluviatiles quaternaires (sables, limons, argiles), ainsi que par de vastes formations de tourbes d'origine marécageuse.

– Un anticlinal constitué de Crétacé, le Mont de Chamblon, émerge de la large plaine de l'Orbe. Il est subitement limité à la bordure nord de la feuille par une importante zone de failles.

– A l'ouest de la plaine de l'Orbe s'étend un pays vallonné qui précède la chaîne jurassienne, et où l'on trouve encore des affleurements de Molasse d'eau douce inférieure sous un recouvrement morainique.

– Certaines investigations spécifiques de l'étude ont été menées sur le secteur du parc technologique «Y-Parc», globalement situé au sud de l'agglomération d'Yverdon (coordonées approximatives du site: 539'000/179'500).

3. Carte indicative de microzonage sismique

La carte indicative élaborée dans le cadre de ce travail s'inscrit comme étant une étape préliminaire dans l'établissement du microzonage sismique, dans la mesure où elle met en évidence les zones qui peuvent être globalement soumises à des effets de site, et qui nécessitent des investigations plus détaillées.

L'objectif de la carte consiste à subdiviser le territoire de la feuille Yverdon-les-Bains au 1:25'000 en différentes classes de sol aux comportements plus ou moins défavorables en cas de séisme, sur la base des lithologies figurant sur la carte géologique n°1203 (Jordi, 1994) et des classes de sol de fondation spécifiées dans les Swisscodes (SIA 261, 2002).

3.1 Norme SIA 261 (2003)

La nouvelle norme de construction SIA 261 «Action sur les structures porteuses» remplace la norme SIA 160 (1989), dans laquelle la prise en compte des conditions géologiques locales était insuffisante. La norme SIA 261 prévoyait initialement 5 classes de sols de fondation, lesquelles ont été finalement complétées en 6 classes par une proposition du SFIG (Groupement suisse de géologie de l'ingénieur) d'après l'expérience de l'ensemble des conditions géologiques effectivement observées en Suisse (Tab. 1).

Aux classes allant de A à E sont également associés des spectres de réponse en accélération horizontale.

Classe de sol de fondation	Description	$V_{s,30}$ [m/s]	N_{SPT}	C_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 roche meuble 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.	–	–	–
F	Structures sensibles et dépôts organiques (p.ex. tourbe, craie lacustre, masses en glissement) d'une épaisseur supérieure à 10 m.	–	–	–

Tab. 1: Classes de sols de fondation selon SIA 261. $V_{s,30}$ désigne la valeur moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres du sol, N_{SPT} le nombre de coups/30 cm issu du Test de Pénétration Standard, et c_u la cohésion.

3.2 Conception et implications

C'est donc sur la base de la proposition du SFIG, émise au moment du projet pilote, qu'il s'est agi de retranscrire les lithologies en présence sur le périmètre d'étude en classes de sols de fondation, afin de disposer d'un aperçu préliminaire global des terrains susceptibles de contribuer ou non à une amplification du signal sismique (Fig. 3) de par leur constitution.

Il ressort de la carte indicative une distinction claire entre les formations cimentées (classes A et B), représentées par les Calcaires jurassiens et la Molasse du Plateau, et l'ensemble des dépôts meubles morainiques, alluvionnaires, lacustres ou organiques.

Du point de vue de l'aménagement du territoire et en référence directe à la carte indicative, on peut considérer que les constructions fondées sur les classes A et B peuvent appliquer les normes en vigueur jusqu'alors sans restriction (SIA 160, 1989).

En revanche, les secteurs en classes D et F, de par leur faculté à amplifier le signal sismique (effet de site), devraient nécessiter des études plus spécifiques, notamment dans le cas d'implantation d'ouvrages d'intérêt majeur («lifelines»), afin de déterminer si ces normes y sont toujours applicables. Les zones classées F des glissements affectant les flancs de vallées encaissées sont dans tous les cas peu sujettes à de nouvelles constructions. La plupart des infrastructures urbaines sont situées dans la plaine alluvionnaire de l'Orbe, qui correspond pour l'essentiel à la classe F, et nécessitent donc des études spécifiques.

On ne peut pas exclure enfin que la classe E puisse présenter un comportement dynamique défavorable, dans le cas par exemple de dépôts d'épaisseur importante (jusqu'à 30 m selon les descriptions du Tab. 1).

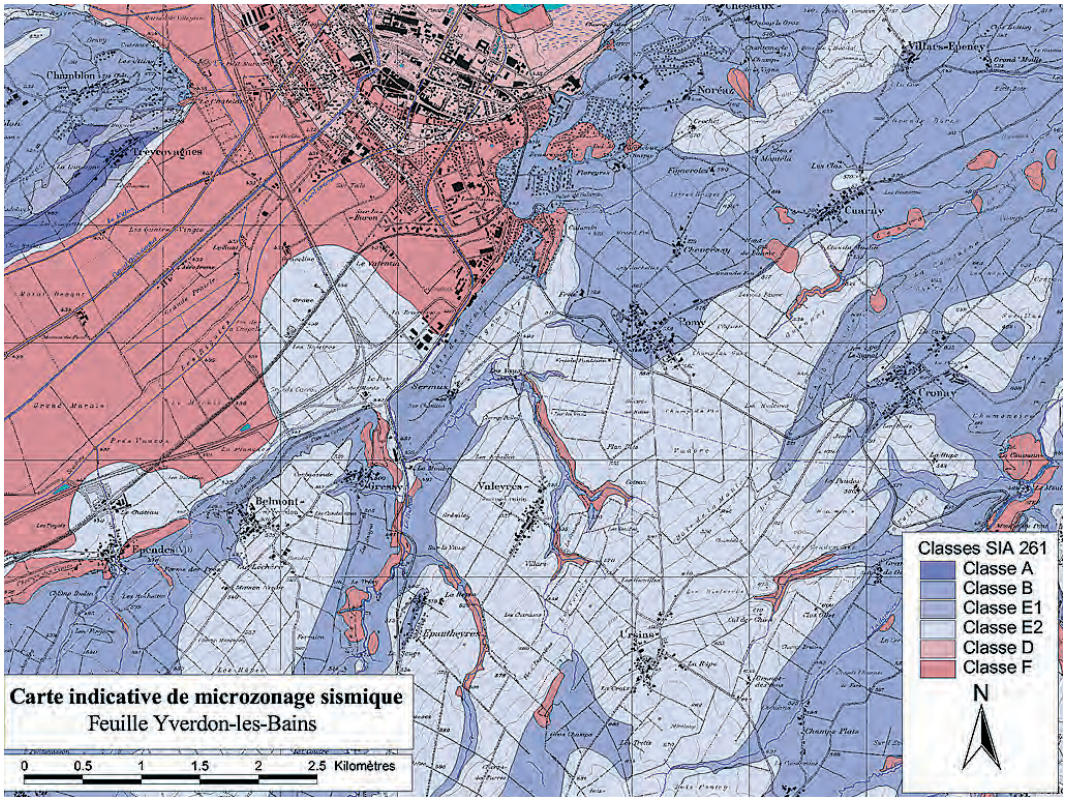


Fig. 3: Extrait de la carte indicative de microzonage sismique de la feuille Yverdon-les-Bains au 1: 25'000.

4. Acquisition des rapports spectraux H/V

4.1 Mise en œuvre

Des mesures de vibrations ambiantes ont été réalisées les 4, 5 et 8 juillet 2002 en 24 points grâce aux équipements du Service sismologique suisse (SED), dans une région située globalement au sud de l'agglomération d'Yverdon (plaine de l'Orbe). La majeure partie d'entre elles ont été effectuées au voisinage du secteur d'«Y-Parc». La technique des rapports spectraux H/V (Nakamura, 1989) a déjà fait ses preuves dans de nombreuses études, et permet d'obtenir une bonne approximation de la fréquence propre (fondamentale ou de résonance) de terrains meubles stratifiés horizontalement et présentant un bon contraste d'impédance avec leur soubassement.

Les vibrations ambiantes microsismiques (bruit de fond) peuvent provenir de plusieurs sources différentes. On citera parmi les plus importantes:

- l'effet du vent sur les arbres et/ou les bâtiments;
- les conditions hydrographiques (débit fluvial) ;
- l'activité industrielle et le trafic routier ;
- le brisement des vagues océaniques sur une côte (en tant que source dans le domaine des basses fréquences).

L'appareillage utilisé pour mener à bien cette étude se compose d'un sismomètre relié à une station d'acquisition.
Pour chaque mesure ponctuelle réalisée, l'enregistrement du bruit de fond par les trois composantes du capteur sismique (une composante verticale et deux composantes horizontales) et son traitement dans le

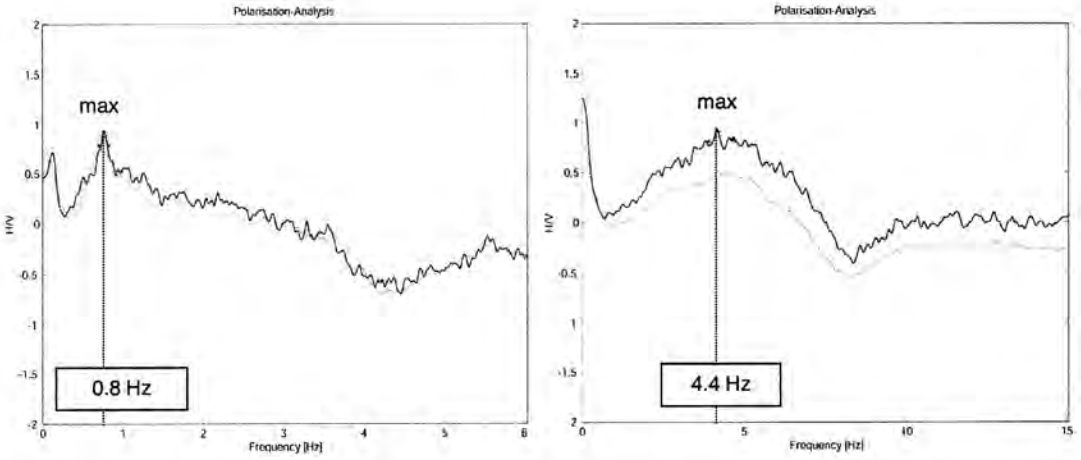


Fig. 4: Représentation du spectre H/V moyen et détermination graphique de la fréquence propre en deux points d'acquisition:
a) situés en milieu de plaine (à gauche)
b) en bordure de plaine (à droite).

domaine spectral (rapport entre les composantes horizontale et verticale) fournira une estimation de la fréquence propre.

4.2 Résultats obtenus

La phase de traitement des données qui a suivi l'acquisition a été effectuée au Service Sismologique Suisse (SED), à l'aide d'un logiciel de traitement du signal mis au point par Donat Fäh (Fäh et al., 2000).

A l'issue du traitement, on obtient finalement le graphique illustrant le rapport H/V en fonction de la fréquence. La fréquence de résonance f_0 du site correspond alors à l'amplitude du plus grand pic sur le spectre H/V. L'intervalle des fréquences ainsi calculées s'étend de 0.6 à 4.4 Hz.

Les différences observées entre la Fig. 4a et la Fig. 4b s'expliquent par le fait que la fréquence propre théorique f_0 augmente proportionnellement en fonction d'une diminution de l'épaisseur des terrains meubles h, en considérant une vitesse des ondes de cisaillement V_s constante:

$$f_0 = \frac{V_s}{4h} \qquad (1)$$

La densité des mesures acquises dans le secteur d'«Y-Parc» a permis de dresser une carte des isofréquences propres (Fig. 5) mettant en évidence l'effet de la variabilité latérale de la fréquence fondamentale au voisinage de la bordure de la plaine de l'Orbe, où l'épaisseur des dépôts fluvio-glaciaires diminue et la molasse chattienne devient affleurante.

4.3 Implications au niveau des constructions

Du point de vue strictement théorique, la fréquence propre des bâtiments doit différer de la fréquence propre du sol, cela afin d'éviter les phénomènes de résonance en cas de séisme. A ce titre, il existe dans la littérature un certain nombre de relations empiriques établissant un lien entre la fréquence fondamentale d'un bâtiment et certains paramètres simples (nombre d'étages, largeur, hauteur et type de sol). Ces relations, dont un exemple tiré de la norme SIA 261 est donné ci-après (2), restent cependant très approximatives. Une détermination de la fréquence propre à l'aide de mesures de vibrations pour les bâtiments existants, voire des méthodes de calcul plus perfectionnées,

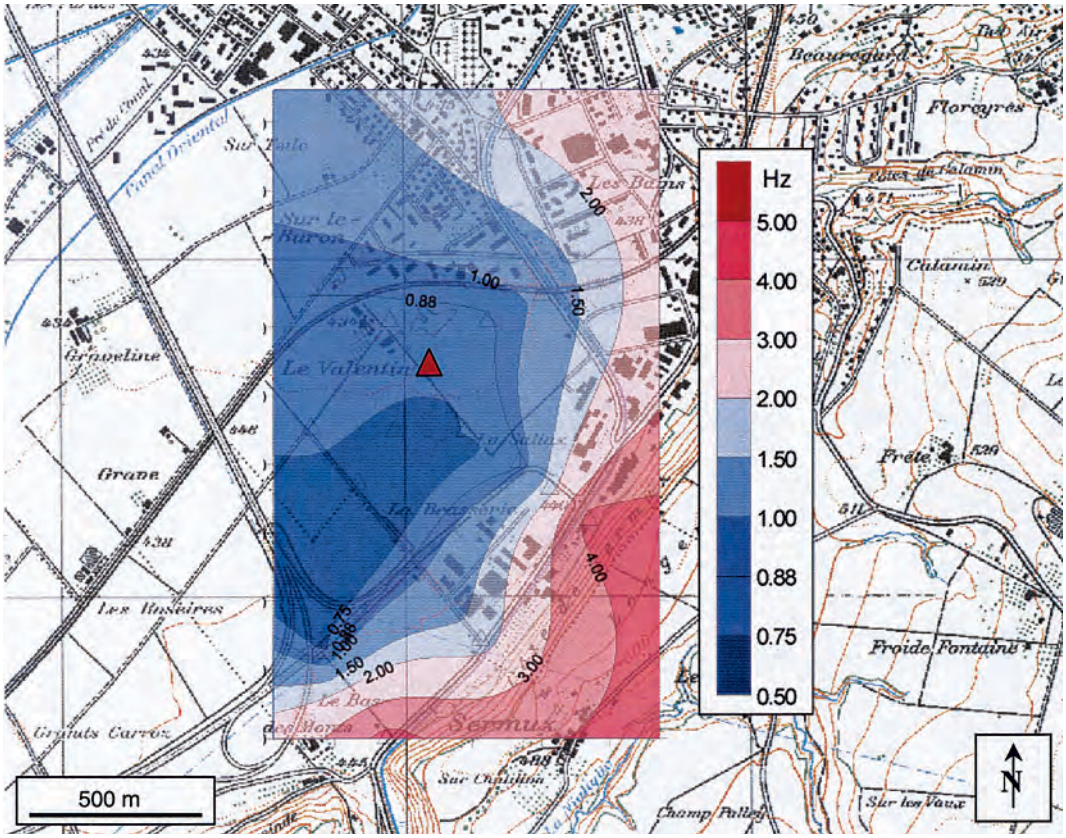


Fig. 5: Carte des isofréquences propres du secteur d'«Y-Parc» obtenues par krigeage; et position du point relatif à la figure 4a (sondage profond, cf. chap. 5: Modélisation 1D à Y-Parc).

sont donc préférables lorsqu'un phénomène de résonance est suspecté.

$$f_0 = 1 / (C_t H^{0.75}) \qquad (2)$$

avec: C_t: coefficient de construction; varie de 0.05 à 0.085
H: hauteur de l'ouvrage hors sol en mètre

Si un bâtiment présente une fréquence propre identique ou proche de celle du sol, les exigences liées à son dimensionnement ou à la vérification de sa sécurité parasismique doivent être accrues par rapport aux exigences de base des normes de construction. On s'efforcera alors dans la mesure du possible de modifier la fréquence propre du bâtiment projeté et de l'éloigner de celle du sol par des mesures constructives de rigidification ou d'assouplissement des structures porteuses.

S'il est vrai que la fréquence propre du sol est une donnée importante pour l'ingénieur, elle doit impérativement être complétée par la mesure de l'amplification du sol au même endroit, afin de permettre un dimensionnement ou une vérification de la sécurité parasismique. Ces données sur l'amplification du sol sont obtenues soit par une modélisation du site spécifique, soit par l'attribution à une classe de sol et à un spectre de réponse définis dans les normes de construction.

5. Modélisation 1D à «Y-Parc»

Une modélisation 1D a été entreprise dans le secteur d'«Y-Parc», afin d'évaluer la réponse

du sous-sol d'un site spécifique soumis à une sollicitation sismique vibratoire horizontale (ondes SH). Pour ce faire, nous avons pu bénéficier de nombreuses informations fournies par une campagne de neuf sondages mécaniques menée par le GEOLEP (Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur de l'EPFL).

5.1 Données disponibles et procédure

La modélisation a été effectuée au droit du forage le plus profond, qui a atteint 102 m sans toutefois toucher le bedrock molassique. Sa localisation est indiquée à la Fig. 5. Des essais de pénétration dynamiques SPT ont été effectués sur place tous les 6 m jusqu'à une profondeur de 80 m environ.

De nombreux échantillons prélevés régulièrement sur toute la longueur de la colonne stratigraphique ont également fourni les paramètres géotechniques nécessaires au calcul d'un profil du module de cisaillement G_{max}, ainsi qu'à l'estimation d'un profil de vitesse de propagation d'onde de cisaillement approximatif V_s (Fig. 6). Selon la nature du sol, des courbes de dégradation du module de cisaillement et d'accroissement du taux d'amortissement, en fonction du cisaillement effectif du sol, sont sélectionnées pour la modélisation.

La sensibilité aux paramètres, prise en compte par le biais de différents modèles envisageables, constitue une démarche importante qui n'a pas pu être testée dans le cadre de l'étude.

Le profil de vitesse de la Fig. 6 est en effet sujet à des incertitudes relatives à l'épaisseur des dépôts sédimentaires (notre choix s'est ici porté à 110 m), ainsi qu'aux valeurs des paramètres géotechniques calculés en laboratoire. La valeur de f_0 mesurée au même endroit par la méthode H/V (0.8 Hz) tend néanmoins à confirmer la validité du profil obtenu, puisque très proche de la fréquence propre calculée à partir de celui-ci (0.84 Hz).

La procédure suivie implique une sélection de séismes de références relatifs à l'aléa sismique régional, que l'on applique ensuite à la base des dépôts sédimentaires afin de calculer la réponse en surface issue du transfert des ondes sismiques au travers de la colonne de sol. Dans le cadre de ce projet, huit accélérogrammes de références issus d'un groupe de travail étudiant les effets de site en Suisse ont été pris en compte. Les hypothèses requises par le logiciel de calcul Shake2000 considèrent une propagation verticale d'ondes S au travers d'un système visco-élastique linéaire composé de N couches d'extension latérale infinie (Schnabel et al., 1972). Dans le cas d'«Y-Parc», il est vraisemblable que des effets 2D puissent survenir, liés à des ondes de surface engendrées par le bord de la plaine. Nous avons considéré la modélisation 1D comme une première étape dans l'optique de l'analyse de l'amplification du mouvement du sol sur le site d'«Y-Parc».
Le logiciel de calcul SHAKE2000 travaille de manière itérative dans le domaine de la fréquence, en ajustant à chaque itération le module de cisaillement et le taux d'amortissement au sein de chaque couche de sol, en fonction du cisaillement effectif calculé lors de l'itération précédente jusqu'à convergence des résultats. Ce mode de calcul par modélisation linéaire-équivalente est jugé satisfaisant pour une région de faible sismicité, où des effets de non-linéarité importants ne sont pas attendus.

5.2 Fonction d'amplification spécifique et spectres de réponse

Le rapport de l'accélération spectrale entre les spectres de réponse des sites «Y-Parc» et «Rocher» fournit la valeur du facteur d'amplification en fonction de la période de vibration, c'est-à-dire la fonction d'amplification quantifiant l'effet de site effectif au droit de sondage profond à «Y-Parc» (Fig. 7).

On constate la variabilité de l'amplification du mouvement du sol en fonction des différents signaux de référence. Le rapport d'am-

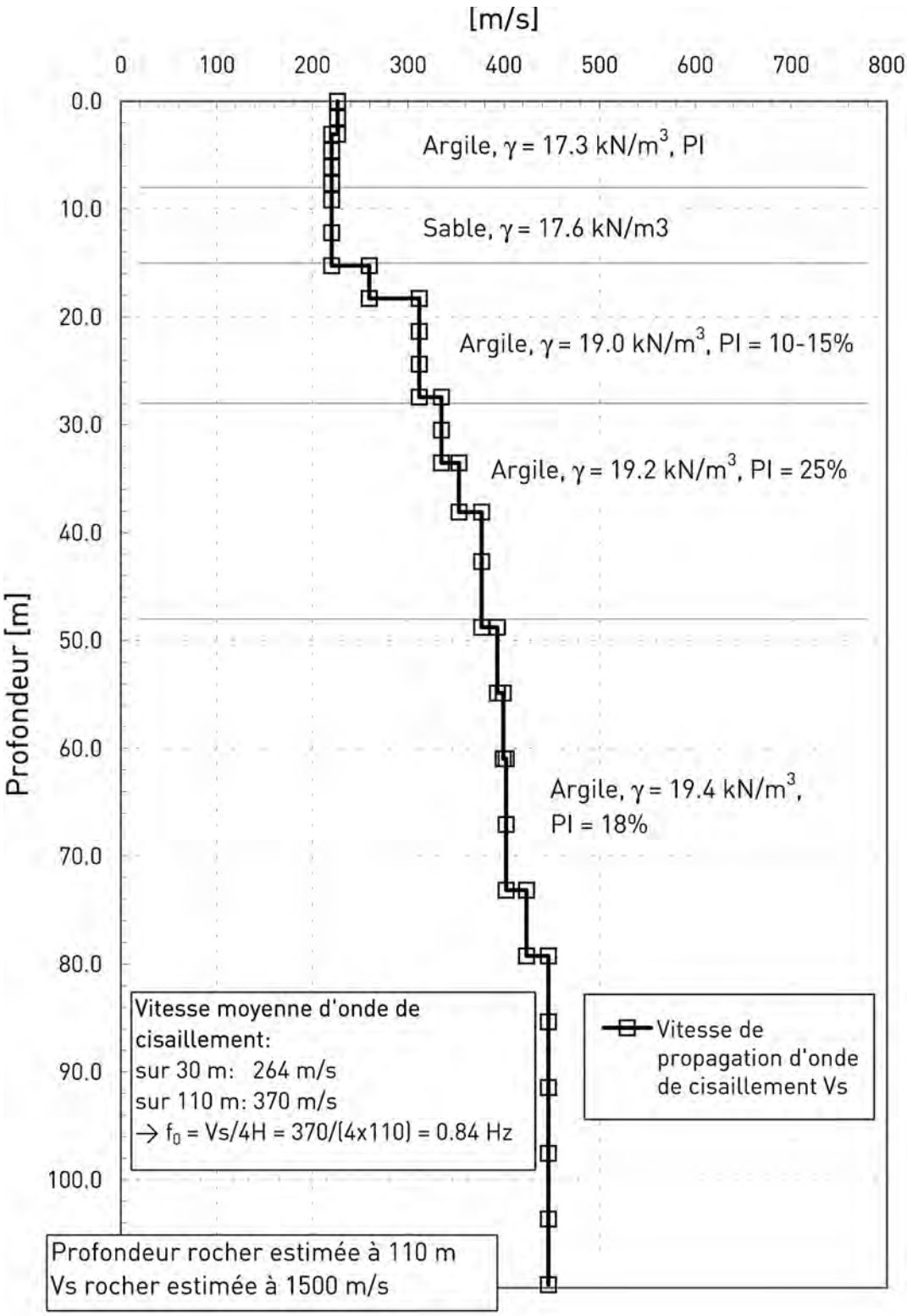


Fig. 6: Profil géotechnique et profil de vitesse de propagation d'onde de cisaillement idéalisés pour le site «Y-Parc».

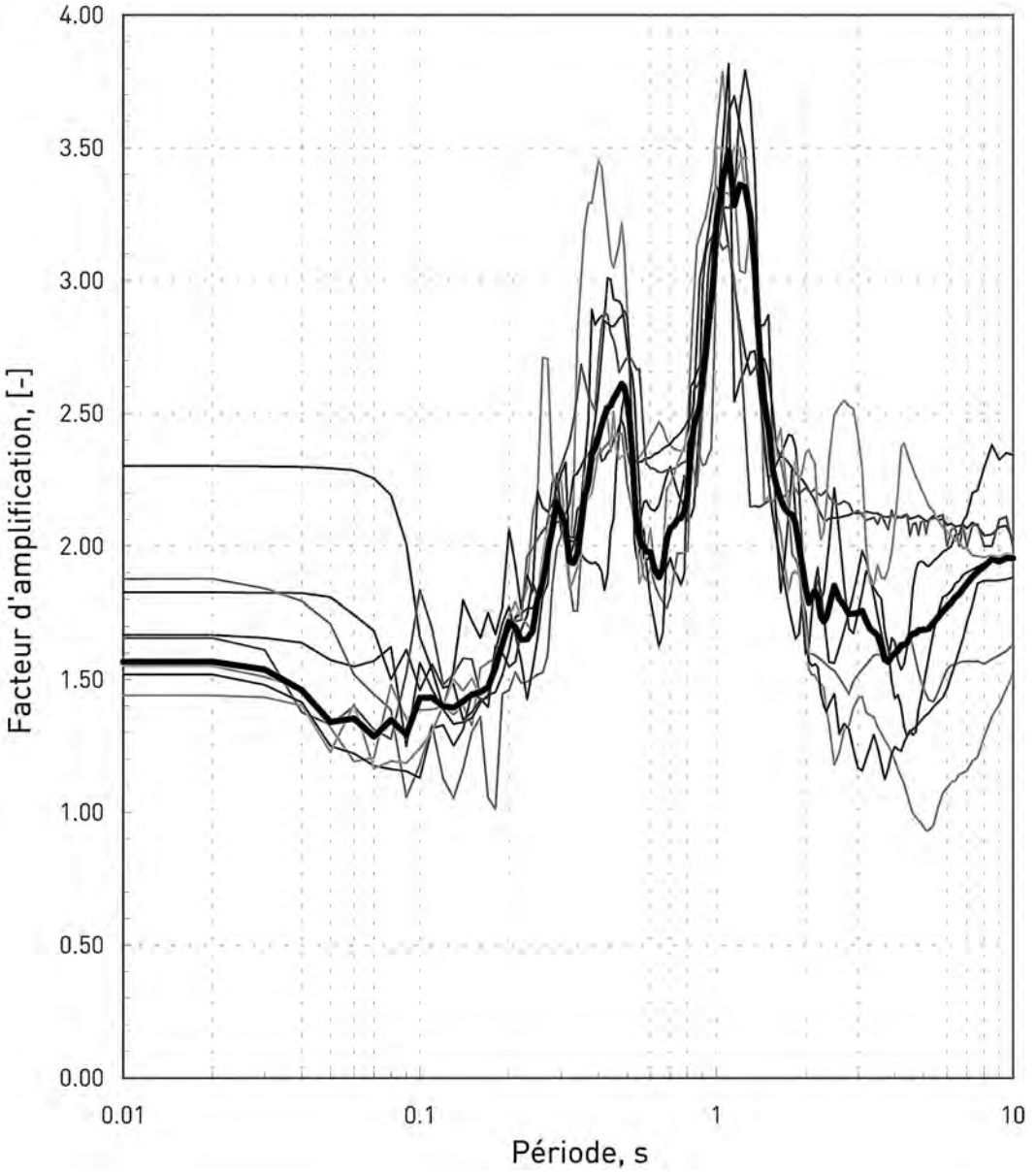


Fig. 7: Fonction d'amplification moyenne calculée pour le site d'«Y-Parc», d'après les huit accélérogrammes de référence des Swisscodes.

plification maximum est obtenu pour la fréquence propre du site.

L'application d'un spectre de réponse est la suivante: pour une structure de fréquence propre f_0, il suffit de lire la valeur du spectre correspondant à cette fréquence pour déterminer l'accélération maximale que subira cette structure soumise au tremblement de terre de dimensionnement. De cette accélération maximale sont déduites les forces horizontales que l'ingénieur doit prendre en compte dans son dimensionnement. Il faut préciser que cette démarche demeure approximative malgré tout.

A la date de rédaction de cet article, il n'a pas été possible de calculer formellement le spectre de réponse du site «Y-Parc» et de le comparer aux spectres de réponse des nor-

mes en vigueur, car le spectre de réponse «Rocher» devant être multiplié par la fonction d'amplification n'était pas encore disponible pour cause d'actualisation par le Service sismologique suisse.

6. Conclusions

6.1 Principaux résultats obtenus, applications

La plupart des mesures H/V ont apporté des résultats d'une précision satisfaisante, confirmant ainsi l'applicabilité de la méthode pour un contexte géologique présentant un contraste d'impédance marqué et une géométrie relativement simple. Les valeurs obtenues, qui varient entre 0.6 Hz (au centre de la Plaine de l'Orbe) et 4.4 Hz (à proximité du bord de la plaine), représentent une donnée importante dans le domaine du génie parasismique, notamment pour identifier des problèmes potentiels de résonance entre le sol et les ouvrages.

La modélisation 1D par le logiciel SHAKE2000 a pu s'appuyer sur des données de terrain réelles et fiables fournies par une campagne de sondages menée par le GEOLEP dans le secteur d'«Y-Parc».

Les propriétés géotechniques des échantillons analysés ont permis de dresser un profil de vitesse au droit du sondage profond, validé par la valeur de fréquence propre mesurée par la technique des rapports spectraux H/V au même point, et d'obtenir aussi grâce à la modélisation une approximation de la réponse dynamique du site pour un événement sismique donné.

La fonction d'amplification calculée grâce à la modélisation 1D (Fig. 7) permettra de calculer le spectre de réponse du site en la multipliant par le spectre de réponse de référence au niveau du rocher. Le spectre de réponse du site «Y-Parc» ainsi calculé sera une donnée directement utilisable par les ingénieurs pour le dimensionnement des ouvrages. Ce calcul n'a pas pu être formellement établi pour cet article, étant donné que le spectre de réponse de référence «Rocher», en cours d'actualisation par le Service sismologique suisse, n'était pas encore disponible.

Signalons de manière générale que la variabilité de l'amplification calculée dépend principalement de l'incertitude liée à certains paramètres. L'amplification augmente en fonction notamment d'une diminution de la vitesse de propagation des ondes S au sein des formations meubles, et d'une façon proportionnelle à leur épaisseur.

Des effets 2D sont susceptibles de se produire au bord de la Plaine de l'Orbe, du fait de l'épaisseur variable des sédiments et de l'apparition probable d'ondes de surfaces engendrées à partir du flanc molassique situé à l'est d'«Y-Parc». Dans le cas d'un séisme violent seulement, des effets de non-linéarité du comportement du sol pourraient également survenir, contribuant notamment à diminuer sensiblement le module de rigidité, la vitesse des ondes S, et par conséquent les fréquences propres du sol.

6.2 Perspectives

La carte indicative représente un premier pas dans l'établissement du microzonage sismique, puisqu'elle permet de cibler rapidement l'attention sur les zones dont les conditions de sols sont les plus défavorables en cas de séisme. Etant basée sur les descriptions des classes de sols de fondation de la norme SIA 261 (2003), elle s'adresse aussi directement aux ingénieurs, en leur proposant des spectres de réponses associés. Mais cette représentation possède également ses limites et doit être considérée comme un microzonage préliminaire. Au sein des zones C à F, les démarches suivantes seraient recommandables en fonction de l'importance du site étudié au niveau de l'aménagement du territoire:

– La consultation de données complémen-

taires d'ordre géotechnique, géophysique et/ou hydrogéologique, pourrait permettre d'affiner progressivement la détermination et la délimitation des classes de sols de fondation dans les zones urbanisées;

– L'usage de méthodes de type SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) pour la détermination de profils de vitesse des ondes S dans les couches superficielles (30 premiers mètres environ);

– L'élargissement des mesures de fréquences propres à d'autres sites, avec la possibilité de pouvoir dresser des profils de vitesse approximatifs par calage avec des sondages mécaniques ayant atteint le bedrock;

– D'autres modélisations 1D au centre de la plaine, voire des modélisations 2D en bordure de plaine, où la géométrie du bedrock peut influencer le signal sismique observé en surface;

– Les résultats de ce projet pilote montrent que la carte indicative de microzonage sismique constitue un outil précieux de planification à l'échelle du plan directeur cantonal pour la prise en compte du risque sismique dans l'aménagement du territoire.

Références bibliographiques

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

Fäh, D., Fortunat, K., Giardini, D. 2000: A theorical investigation of average H/V ratios. Geophysic Journal Int. (2001) 145, 535-549.

Grünthal, G., Mayer-Rosa, D., Lenhardt, W. 1998: Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH Staaten Deutschland, Österreich, Schweiz. In Bautechnik 75 (1998), Heft 10, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Jordi, H. A. 1994: Carte géologique n° 94 d'Yverdon-les-Bains, Atlas géologique de la Suisse, 1:25'000.

Jordi, H. A. 1995: Notice explicative de la feuille 1203 Yverdon-les-Bains, Atlas géologique de la Suisse, 1:25'000.

Nakamura, Y. 1989: A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. QR of R.T.R., 30-1.

SIA 1989: Norme 160, Action sur les structures porteuses. Zurich, 2ème édition, 101 p.

SIA 2003: Norme 261, Action sur les structures porteuses. Zurich, non publié, 75 p.