

Méthode H/V en géotechnique. Application à un modèle bicouche

S. BRÛLÉ
E. JAVELAUD

MÉNARD
2, rue Gutenberg
91620 Nozay, France

Résumé

L'avènement des Eurocodes au statut de normes européennes pour les règles constructives du bâtiment et du génie civil, conduit à l'écriture ou à la refonte des normes d'application nationale. Depuis 2010, la norme EN 1998 ou Eurocode 8 a engendré une révision de la réglementation française en matière de cartographie de l'aléa sismique ainsi que la définition des paramètres intervenant dans la justification des ouvrages à risque normal et à risque spécial. La vitesse des ondes de cisaillement est privilégiée pour la classification des sols, donc dans la définition des spectres réglementaires de réponse élastique. L'acte de construire impose la définition d'une classe de sol pertinente à partir des investigations réalisées. C'est en vertu de sa commodité de mise en œuvre que la mesure du bruit de fond sismique dont découle la méthode « H/V » a été testée pour estimer la période fondamentale T_0 des sols dans une finalité géotechnique. La méthode existe depuis une vingtaine d'années et a connu son essor dans les travaux de recherche fondamentale en sismologie comme le projet SESAME en Europe dont certains des résultats ont servi de support théorique à cet article. Dans des conditions d'usage restrictif, comme pour les modèles de sol bicouche avec un net contraste d'impédance entre les deux formations, il est possible de pré-caractériser une classe de sol au sens de la norme EN 1998.

Mots-clés : méthode H/V, bruit de fond, Eurocode 8, classification des sites.

H/V method in geotechnical engineering. Application to a two layers model

Abstract

The implementation of the Eurocodes which have the status of European standards for the constructive rules for buildings and civil engineering, led to the writing or to the revision of the national standards. Since 2010, the standard EN 1998 or Eurocode 8 engendered a revision of the French regulations in seismic hazard mapping as well as the values of the parameters occurring in the design of normal and special seismic risk projects. The shear wave velocity values V_s is the more important criteria for ground type definition and so for the elastic spectrum. Building project needs representative ground type definition based on investigations. That's the reason why the horizontal to vertical spectral ratio seismic ambient noise method was tested to estimate the ground fundamental period T_0 in a geotechnical purpose, by virtue of its ease of use. The method exists since about twenty years and was concerned with a significant development these last years at instigation of the seismological research SESAME project in Europe. Some of the SESAME conclusions were used as theoretical support to this article. In conditions of restrictive use, as for two soil layers models with a net acoustic impedance contrast, it is possible to pre-characterize the ground type in the sense of the standard EN 1998.

Key words: H/V method, microtremor, Eurocode 8, site classification.

La réglementation française en matière de justification aux séismes des ouvrages courants a évolué en 2011 avec les mises en application d'un nouveau zonage sismique de la France (décrets n° 2010-1254 et n° 2010-1255 du 22 octobre 2010, arrêté du 22 octobre 2010, arrêté du 19 juillet 2011) et de nouvelles règles constructives décrites dans les normes EN 1998 (2005), dites Eurocode 8. Ces règles prennent en compte la modification du mouvement sismique en surface dans les formations superficielles considérées comme pouvant être à l'origine d'effet de site se traduisant par une amplification du signal et un allongement de la durée de celui-ci.

La définition des spectres de réponse élastiques est avant tout sismologique. Elle traduit le phénomène physique de mise en résonance des bassins sédimentaires par une compilation d'accélérogrammes et de modélisations numériques. Ces spectres sont dépendants notamment de paramètres, tels que la vitesse des ondes de cisaillement V_s , l'épaisseur H de remplissage sédimentaire et l'amortissement ξ_s du sol. C'est ainsi que le principal paramètre retenu est le profil de vitesse des ondes de cisaillement dans les formations superficielles, idéalement jusqu'au substratum sismique lorsque des études particulières sont réalisées, sinon limité à 30 m pour identifier les sols selon la classification proposée dans le document : sols de classe A à E et S_1 et S_2 (tableau I).

Plusieurs méthodes géophysiques fondées sur l'analyse des ondes sismiques sont utilisées pour obtenir un profil de vitesse des ondes de cisaillement. Il peut s'agir des méthodes ponctuelles en forage comme le *cross hole*, *up hole*, *down hole* (Semblat et Pecker, 2009). Pour couvrir des surfaces plus importantes, citons les méthodes sismiques à base de réflexion et réfraction, ainsi que des méthodes relatives à l'inversion de la dispersion des ondes de surface telles que l'analyse spectrale des ondes de surface ou SASW (Fabriol *et al.*, 1998) et l'analyse multi-canaux des ondes de surface ou MASW (Park *et al.*, 1999 ; Bard *et al.*, 2009). Sont également développées des méthodes fondées sur l'enregistrement de bruit de fond sismique dont la méthode H/V moncapteur ou en réseau (Cornou et Wathelet, 2007). Ces méthodes peuvent être combinées selon l'objectif de l'étude. Leur utilisation dépend du caractère ponctuel ou étendu de l'analyse, de la profondeur d'investigation ou du degré de précision recherché. Dès les études préalables, les projets

constructifs nécessitent la prise en compte d'une classe de sols représentative du contexte géologique au sens de la norme EN 1998. Cette classification est établie sur la base des vitesses des ondes de cisaillement, soit un paramètre défini dans une gamme de déformation plus petite ($\epsilon < 10^{-4}$) que celle des reconnaissances mécaniques *in situ* comme les essais au pressiomètre et les essais au pénétromètre statique ($\epsilon > 10^{-4}$). L'extrapolation de résultats d'investigations mécaniques peu profondes à l'ensemble des matériaux constitutifs d'un bassin sédimentaire et l'usage de relations pour obtenir des paramètres en petites déformations à partir d'essais mécaniques peuvent conduire à des erreurs de classification des sols (Brûlé *et al.*, 2010a). Rappelons que les conséquences d'une classification inadaptée sont plus significatives avec la norme EN 1998 qu'avec les anciennes règles dites PS92 (norme NF P 06-013, 1995), car les spectres sont plus contrastés d'une classe de sol à l'autre.

Cet article présente les possibilités d'utilisation de la méthode géophysique du bruit de fond sismique moncapteur (Nakamura, 1989 ; Konno et Ohmachi, 1998 ; Projet SESAME, 2005 ; Haghshenas *et al.*, 2008), pratique à mettre en œuvre sur le terrain car les moyens d'acquisition sont légers. L'intérêt de cette méthode est notamment de révéler la fréquence propre d'un site. Ce résultat peut contribuer à la définition de paramètres en petites déformations pour un modèle bicouche constitué d'une formation superficielle homogène reposant sur substratum rigide, lorsque des conditions d'épaisseur de sol et de contraste d'impédance sismique sont réunies. Si l'épaisseur de sol est connue, une première valeur de vitesse des ondes de cisaillement peut être estimée. Cette méthode doit cependant être réalisée par des spécialistes et toujours être couplée aux données géologiques ou aux sondages mécaniques existants. Après le rappel des phénomènes physiques et le cadre réglementaire français, la méthode du bruit de fond sismique est développée dans des conditions restrictives d'usage. En première publication dans ce type d'application, trois exemples sont présentés. Le premier concerne l'estimation de la vitesse des ondes de cisaillement d'une formation superficielle. Le second montre l'usage de la méthode pour une pré-caractérisation des classes de sol pour différents sites éligibles pour recevoir un projet constructif. Enfin, le dernier cas concerne la détermination de la période fondamentale T_0 d'un bassin alluvionnaire.

TABLEAU I Classification des sols selon la norme EN 1998.
Ground types according standard EN 1998.

Classe de sol	Description lithologique	$V_{s,30}$ (m/s)
A	Rocher ou autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant	> 800
B	Dépôts raides de sables, de graviers ou d'argiles sur-consolidées, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des propriétés mécaniques avec la profondeur	360 – 800
C	Dépôts profonds de sables de densité moyenne, de graviers ou d'argiles moyennement raides ayant des épaisseurs de quelques dizaines à quelques centaines de mètres	180 – 360
D	Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couches cohérentes molles) ou comprenant une majorité de sols cohérents mous à fermes	< 180
E	Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de V_s de classe C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus raide avec $V_s > 800$ m/s	
S_1	Dépôts composés, ou contenant, une couche d'au moins 10 m d'épaisseur d'argiles molles/vases avec un indice de plasticité élevé ($PI > 40$) et une teneur en eau importante	< 100
S_2	Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes A à E ou S_1	

Phénomènes et enjeux

1.1

Contexte sismique

La rupture d'une faille engendre des ondes sismiques qui se propagent dans la Terre puis interagissent avec les structures naturelles et anthropiques (Fig. 1).

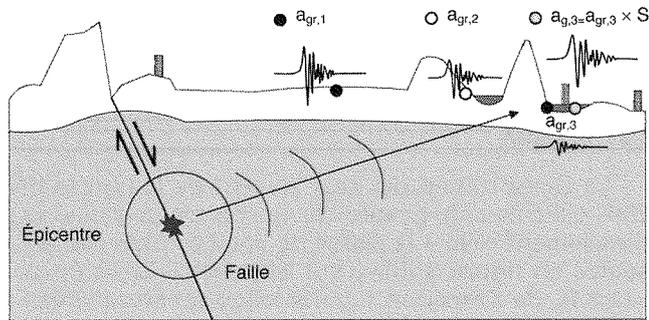


FIG. 1 Schéma de principe décrivant la rupture d'une faille qui engendre des ondes sismiques dont l'amplitude varie en particulier avec la distance épacentrale ($a_{gr,3} < a_{gr,2} < a_{gr,1}$) et selon les conditions géologiques locales ($a_{g,3} > a_{g,3}$). S représente l'augmentation de l'accélération due à l'effet de site.

Block diagram describing the fault disruption involving seismic waves whose amplitude vary with the epicentral distance ($a_{gr,3} < a_{gr,2} < a_{gr,1}$) and local geological features ($a_{g,3} > a_{g,3}$).

L'amplitude des mouvements vibratoires générés en surface au rocher par les séismes dépend essentiellement de la source (magnitude de moment M_w), du type de mécanisme au foyer, de la distance épacentrale et des matériaux traversés. Pour les ouvrages à risque normal, les décrets et arrêté du 22 octobre 2010 complétés par celui du 19 juillet 2011 précisent le zonage sismique du territoire français et les accélérations de référence a_{gr} à considérer en tout lieu du territoire national pour le dimensionnement de structures fondées au rocher. Les mouvements sismiques sont par ailleurs modifiés en surface lors de leur interaction avec les conditions topographiques (effet de site topographique) et les formations superficielles (effet de site lithologique) ce qui entraîne des phénomènes d'amplification/de déamplification qui peuvent être très importants, avec d'éventuels allongements de la durée du signal. A titre d'exemples, nous citons le village de Rognes (Bouches-du-Rhône, France) pour lequel les dommages furent plus sévères pour certains ouvrages en haut de relief lors du séisme de Lambesc en 1909 (Levret *et al.*, 1986) et l'amplification très importante du signal sismique au droit de la ville de Mexico (effet de site lithologique ; figure 1, avec $a_{g,3} > a_{g,3}$) lors du séisme de 1985. Dans cet article, nous examinons la caractérisation de l'effet de site lithologique.

1.2

Phénomène physique de l'effet de site lithologique

L'amplification des ondes est peut-être due à leur piégeage dans les formations superficielles reposant sur un substratum (Fig. 2a). Le piégeage peut égale-

ment se produire entre la surface et une formation sous-jacente offrant une impédance $\rho_2 V_{s2}$ propice à la réflexion des ondes à l'interface (Fig. 2b). La notion de substratum est relative. Nous la réservons à une formation offrant un net contraste d'impédance avec les sols qui la recouvrent, constituant ainsi un puissant réflecteur sismique pour les ondes réfléchies en surface. Les études géotechniques définissent plutôt une surface en profondeur au-delà de laquelle les déformations générées sur les sols par l'ouvrage construit, sont faibles à négligeables. Ainsi, substratum « sismique » et substratum « géotechnique » ne sont pas nécessairement confondus. La notion de substratum géotechnique est relative. Elle correspond aux terrains en profondeur pour lesquels la déformation engendrée par la charge de l'ouvrage est négligeable.

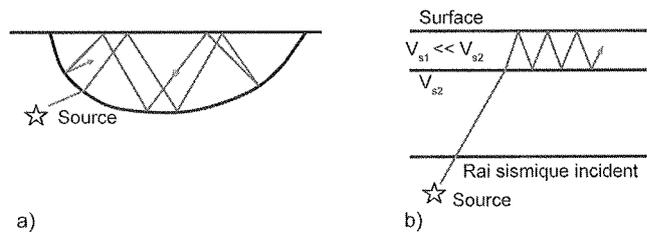


FIG. 2 Schéma de principe du piégeage des ondes avec analogie optique du rai incident et réfléchi. a) Piégeage à l'échelle d'un bassin sédimentaire. b) Piégeage dans une formation superficielle, avec V_{s1} et V_{s2} les vitesses des ondes de cisaillement dans les formations 1 et 2.

Diagram describing the wave entrapment compared with an incident and reflected optical ray. a) Wave entrapment in a sedimentary basin. b) Wave entrapment in superficial layers with V_{s1} and V_{s2} , respectively the layers 1 and 2' shear wave velocities.

Dans les deux sous-paragraphes qui suivent, le phénomène physique 1D ou 2D/3D de l'effet de site est rappelé mais l'article vise exclusivement les contextes se ramenant au cas 1D.

1.2.1

Phénomène 1D

Pour des formations dont la stratification est à dominante horizontale (structure 1D), les effets de piégeage concernent essentiellement les ondes incidentes de volume, effectuant des réflexions successives entre la surface et un réflecteur sismique en profondeur. A partir de la fonction de transfert complexe, dans le cas d'une bicouche horizontale et pour des ondes S incidentes verticalement dans un milieu mono-dimensionnel, la fréquence du sol pour le premier mode fondamental de vibration F_0 est donnée par la relation suivante (1) :

$$F_0 = \frac{V_{s1}}{4H} \quad (1)$$

où V_{s1} et H sont respectivement la vitesse des ondes de cisaillement et l'épaisseur de la couche superficielle.

Effets géométriques : phénomènes 2D et 3D

L'effet de site lithologique peut être fortement amplifié lorsque les bassins sédimentaires ont des géométries 2D/3D, en raison en particulier des ondes de surface générées, et qui se propagent et se réfléchissent en bordure de bassins. Ces dernières deviennent dominantes dans certaines géométries 3D et conduisent à une augmentation importante de l'accélération du sol et de la durée du signal. Ces phénomènes sont particulièrement présents dans les vallées encaissées et dans les sites ayant des géométries 3D. Des études détaillées ont été lancées en France pour certaines villes qui présentent des effets de site majeurs. Ce sont par exemple les cas de Grenoble, d'Annecy, de Nice ou de Lourdes (Guéguen, 2009). L'étude détaillée des effets de site nécessite d'avoir une bonne connaissance géomorphologique et géologique des zones étudiées, ainsi qu'un modèle géophysique réaliste des formations superficielles et du substratum sismique présents. Un paramètre fondamental est la connaissance du profil de vitesse des ondes de cisaillement V_s .

Dans le cadre de cet article, nous examinons spécifiquement les effets de site 1D. Pour s'assurer que la profondeur des formations superficielles dans les vallées est suffisamment faible par rapport à leur extension latérale pour que l'on puisse considérer que le cas est de résonance 1D, Bard et Bouchon proposèrent en 1985 un rapport de forme en deçà duquel l'amplification est de nature 1D (Bard et Bouchon, 1985). Par ailleurs, une fréquence propre homogène sur toute la largeur d'une vallée peut être un signe d'effet de site 2D tel que le rappelle Rénalier dans sa thèse de 2010 (Rénalier, 2010). Le guide de bonnes pratiques SESAME (2005) suggère également des méthodes pour détecter les effets de site 2D/3D.

1.3

Effet de site : prise en compte du phénomène dans la norme EN 1998 ou Eurocode 8

La prise en compte de l'effet de site lithologique se fait, dans la réglementation française 2011 et pour les ouvrages à risque normal (EN 1998, 2005), selon les approches suivantes :

- lorsqu'un plan de prévention des risques naturel sismique (PPR sismique) existe, il s'impose. Les PPR sismiques déjà réalisés ou en cours d'élaboration concernent essentiellement des communes à topographie et géomorphologie complexe, et prennent en compte les effets de site lithologique. La base de données GASPARG consultable sur Internet (<http://macommune.prim.net/gaspar/index.php>) recense les différents PPR sismiques existants ou en préparation ;
- au sens de la norme EN 1998, des études particulières doivent être réalisées pour les sols de classes S_1 et S_2 (Tableau I) car les spectres de réponse élastique ne sont pas proposés.

Pour les autres classes de sol (hors classes S_1 et S_2), les études particulières sont autorisées pour définir les spectres de réponse. Cependant, la norme EN 1998 propose une prise en compte des effets de site fondée sur la définition de cinq classes de sol (A, B, C, D et E). Le paramètre principal reste la vitesse des ondes

de cisaillement donnée pour une gamme de distortion inférieure ou égale à 10^{-5} , utilisée selon le nombre de couches de sols en moyenne harmonique sur les 30 premiers mètres depuis la surface ($V_{s,30}$), indépendamment de la profondeur du substratum sismique. Il est rappelé en (2) la valeur moyenne de la vitesse des ondes de cisaillement sur les 30 premiers mètres $V_{s,30}$ paramètre jugé suffisant pour caractériser les effets de site selon la norme EN 1998.

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{si}}} \quad (2)$$

1.4

Les enjeux

La classification des sols au sens de la norme EN 1998 est très engageante car le spectre de calcul est directement relié à la classe de sol. Les trois cas présentés en figure 3 illustrent les enjeux. Trois épaisseurs H_1 de formation superficielle sont considérées : 4, 14 et 25 m. Pour chaque cas, les classes de sol ainsi que les spectres de réponses élastiques associées sont présentés selon l'approche des Règles PS92 et EN 1998. Deux constatations sont à faire pour ce cas simplifié de modèle bicouche : la seule variation latérale d'épaisseur du sol 1 modifie la classe de sol et le contraste des spectres de réponses est plus significatif avec la norme EN 1998 qu'aux Règles PS92. L'effet d'une classification erronée des sols donc d'un dimensionnement inadapté des structures se trouve accentué avec la norme EN 1998. Dans ce contexte, la méthode H/V peut être utilisée comme un outil pratique pour aider à la classification des sols.

2

Méthode H/V

Différentes méthodes géophysiques existent pour mesurer la vitesse des ondes de cisaillement dans les sols. Le lecteur intéressé trouvera une description des principales méthodes classiquement utilisées dans des ouvrages spécialisés (Cornou et Wathelet, 2007 ; Pecker et Semblat, 2009).

2.1

Choix de la méthode H/V

Le bruit de fond est constitué de bruits aléatoires et périodiques dus aux activités humaines et naturelles. Les niveaux d'accélération en jeu sont très faibles. Ils sont de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-3} m/s² à comparer à l'accélération des séismes réglementaires en France, comprises entre 1 à 4,5 m/s². L'origine du bruit de fond est aujourd'hui discutée par de nombreux auteurs qui l'attribuent en proportions variables aux ondes de volumes et/ou de surfaces (Nakamura, 1989 ; Bonnefoy-Claudet, 2004).

La mesure du bruit de fond sismique pratiquée avec un capteur unique montre son intérêt dans une démarche de pré-caractérisation des classes de sol dans le cadre des études sismiques quelle que soit la taille du projet. Cette méthode, introduite par Nakamura en 1989, permet de déterminer la fréquence

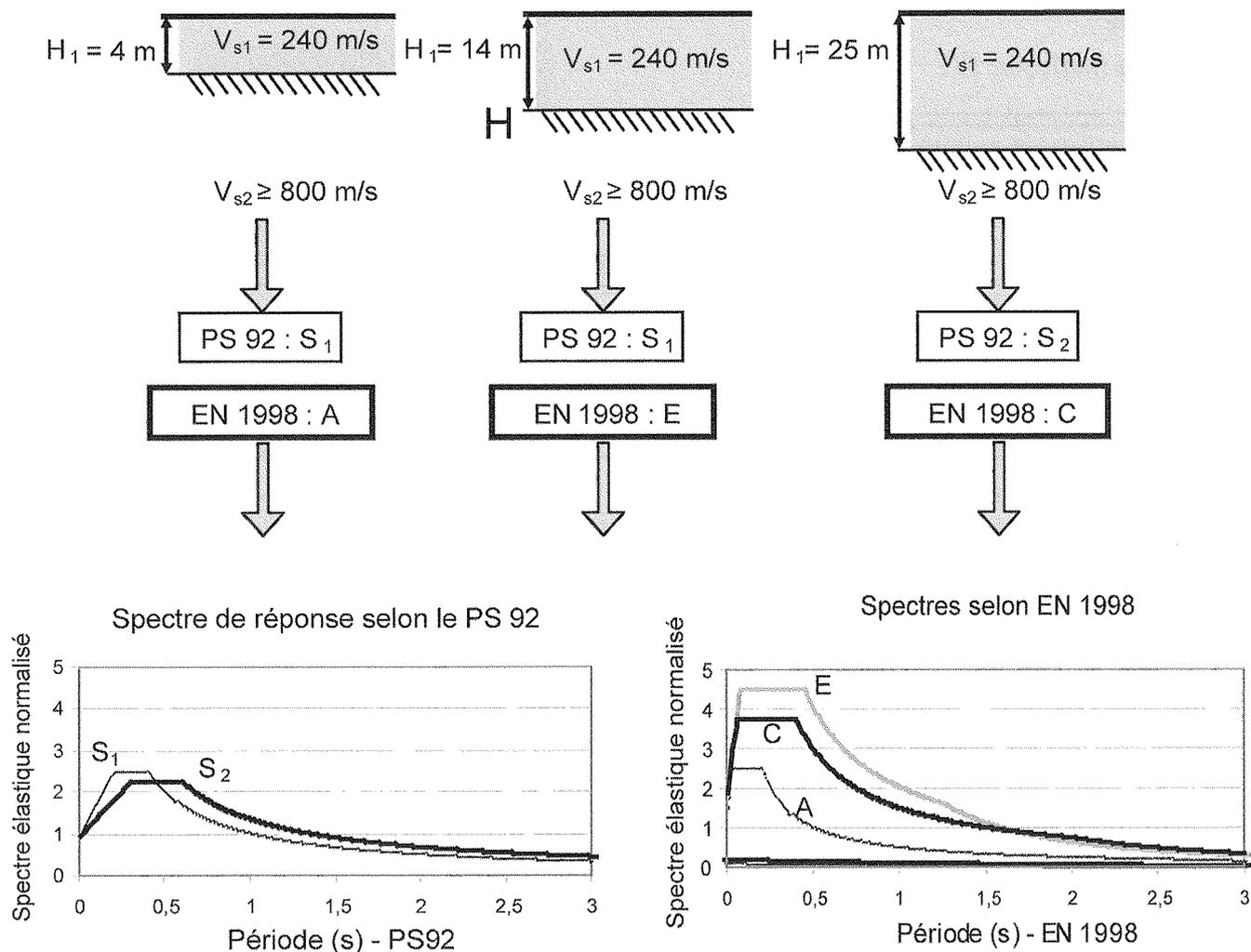


FIG. 3 Effet de la variation d'épaisseur d'une couche superficielle (V_{s1} de 240 m/s) surmontant un substratum rocheux ($V_{s2} > 800$ m/s) sur la classe de sol et le spectre de réponse normé calculé avec un amortissement de 5 %, selon deux règlements (Règles PS92 et EN 1998). EN 1998, cas d'un bâtiment de catégorie d'importance II. PS92, cas d'un bâtiment de classe B.
 Impact of the fluctuation of the superficial layer thickness ($V_{s1} = 240$ m/s) laying on the bedrock ($V_{s2} > 800$ m/s) on the ground type and on the corresponding elastic spectrum. The value of the damping ratio is 0.05 according to the French PS92 rules and EN 1998. Specific category of the building is II according to EN 1998, en B according to PS92.

propre F_0 (Nakamura, 1989 ; Haghshenas *et al.*, 2008) d'un site (Fig. 4) et de vérifier ainsi le risque de résonance sol-structure. Dans le cas de site 1D, et lorsque l'épaisseur de formation superficielle H reposant sur un substratum sismique est connue, elle permet également d'estimer la vitesse V_s des ondes de cisaillement de la formation superficielle. Enfin, dans certains cas, la classe de sol peut être déterminée simplement en utilisant la valeur de V_s calculée à partir de (1) et connaissant H . La méthode H/V doit cependant être pratiquée par des spécialistes et toujours être couplée aux données géologiques ou aux sondages mécaniques existants. Les moyens d'acquisition sont légers et le nombre de points mesurés peut être multiplié sur des surfaces importantes pour apprécier l'évolution latérale des caractéristiques des sols en petite déformation. Ainsi, dans le domaine des petites déformations du signal sismique (hypothèse d'un milieu élastique), des valeurs de module de cisaillement G peuvent être prises en compte dans les études préalables.

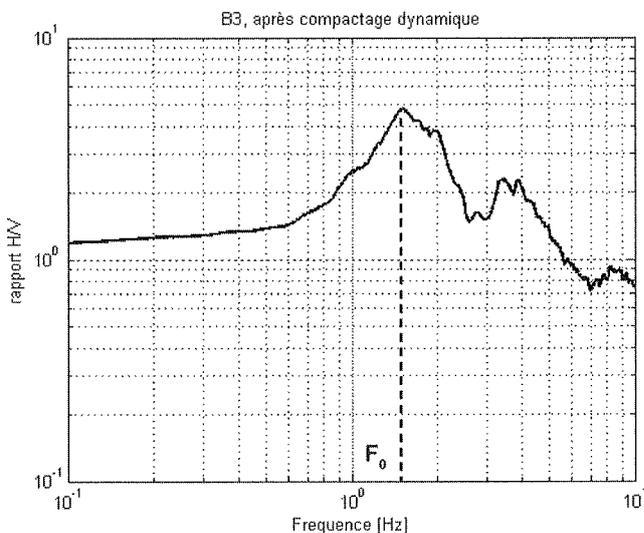


FIG. 4 Détermination de F_0 après rapport des deux composantes horizontales sur la composante verticale des amplitudes spectrales du bruit sismique enregistré.
 Identification of F_0 using seismic noise record and horizontal to vertical spectral ratio.

Principe la méthode H/V

Avec un appareil manu-portable, la méthode consiste à enregistrer le bruit ambiant depuis la surface du sol, puis à effectuer le rapport de la moyenne des deux composantes horizontales sur la composante verticale des amplitudes spectrales du bruit sismique enregistré. En un point de mesure, l'opérateur enregistre le bruit de fond sur des durées suffisantes en fonction du contrôle qualité imposé et sélectionne ensuite des fenêtres d'enregistrement à partir desquelles l'analyse des rapports spectraux sera réalisée.

L'impédance sismique pour les ondes de cisaillement se définit comme le produit de la vitesse V_s (m/s) par la masse volumique ρ (kg/m³) du milieu de propagation.

Dans le cas de site 1D présentant un fort contraste d'impédance A entre les sols de recouvrement et le substratum rocheux (3), l'application de la méthode H/V dite de Nakamura (Nakamura, 1989) donne une bonne estimation de la fréquence prédominante du site F_0 (Haghshenas *et al.*, 2008).

$$A = \frac{\rho_2 \cdot V_{s2}}{\rho_1 \cdot V_{s1}} \quad (3)$$

Connaissant l'épaisseur de formations superficielles jusqu'au substratum sismique, la vitesse des ondes de cisaillement V_s de la couche superficielle peut être estimée par application de l'équation (1) : $V_s = 4 \cdot H \cdot F_0$.

Les conditions de bonne mise en œuvre de la méthode H/V ont été précisées dans le cadre du projet européen SESAME (2005). La mesure du bruit de fond sismique pratiquée avec un capteur unique présente un intérêt en phase préliminaire en complément de l'analyse géologique et géotechnique, dans une démarche de pré-caractérisation des classes de sol dans le cadre des études sismiques.

Les avantages de la mesure du bruit de fond avec un seul capteur résident dans la simplicité de l'appareillage, dans le caractère manu-portable des équipements et dans l'obtention rapide d'une première information sur les fréquences dominantes du sol sans passer par des étapes de traitement du signal nécessitant une compétence et une expérience aussi affirmées que pour d'autres techniques de mesure des ondes sismiques. Cependant, une recherche d'interprétation plus avancée des résultats requiert le concours de personnels qualifiés.

2.3

Modèle bicouche

L'application de la méthode H/V est limitée dans notre analyse au cas du modèle bicouche (Fig. 5). La technique montre son efficacité pour identifier la valeur F_0 quand le rapport d'impédance A , entre les deux sols considérés, est contrasté, à savoir égal au moins à 4 (SESAME, 2005).

Considérons un sol 1 reposant sur un substratum tel que $V_{s2} > 800$ m/s, ce dernier répondant aux critères d'un sol de classe A selon la norme EN 1998. La fréquence fondamentale du sol 1 étant déterminée par l'expression $V_s = 4 \cdot H \cdot F_0$, il est possible de produire un abaque à trois paramètres : H , V_{s1} et F_0 . Cet abaque permet, connaissant deux des trois paramètres, d'esti-

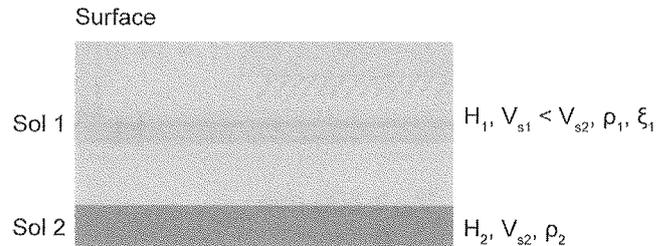


FIG. 5

Modèle de sol bicouche retenu avec H , l'épaisseur de sol, V_s , la vitesse des ondes de cisaillement, ρ , la masse volumique et ξ , l'amortissement.

Two layers model with H , the soil thickness, V_s , wave velocity, ρ , the density and ξ , the damping ratio.

mer le troisième par lecture directe (Fig. 6). Dès les études préalables, les sondages mécaniques peuvent fournir la valeur de H_1 et la mesure du bruit de fond, F_0 . La connaissance de F_0 permet d'estimer une valeur de la vitesse des ondes de cisaillement et de statuer sur la résonance potentielle de l'ouvrage projetée avec le sol. Par exemple, pour une épaisseur identifiée de 35 m de matériaux alluvionnaires par un sondage de la Banque de données du sous-sol (BSS) du Bureau de recherches géologiques et minières, avec la mesure d'un pic de fréquence à 2 Hz, soit une période T_0 de 0,5 s, il convient de considérer une valeur moyenne de V_s à 280 m/s, soit un sol de classe C à l'Eurocode 8 pour cette gamme d'épaisseur et de vitesse. Sur ce même sol, examinons à présent un cas de résonance potentielle.

$$T_1 = C_1 \cdot H^{3/4} \quad (4)$$

En utilisant l'expression (4) de la norme EN 1998 pour obtenir une valeur approchée de la période fondamentale de vibration T_1 d'un bâtiment de hauteur H inférieure à 40 m, à portiques spatiaux en béton ($C_1 = 0,075$), nous voyons que pour des ouvrages d'environ 12,5 m de hauteur (3 à 4 étages), la période T_1 vaut 0,5 s, valeur égale à la période fondamentale T_0 . Dans ce cas la méthode H/V permet d'identifier rapidement les cas critiques de résonance au stade d'une étude préalable.

2.4

Logigramme pour utilisation de la méthode H/V dans le cas d'un modèle bicouche

Un logigramme est présenté en figure 7 afin de résumer la démarche envisageable pour le cas d'un modèle bicouche et 1D.

3

Cas d'étude

Trois exemples sont présentés dans les paragraphes suivants. Ils sont le résultat d'études menées en marge de travaux de renforcement ou d'amélioration de sol pour des projets de construction de bâtiments à risque normal. Dans les trois cas, nous avons considéré être en présence d'une configuration de sol bicouche avec un modèle 1D représentatif du contexte géologique. Le

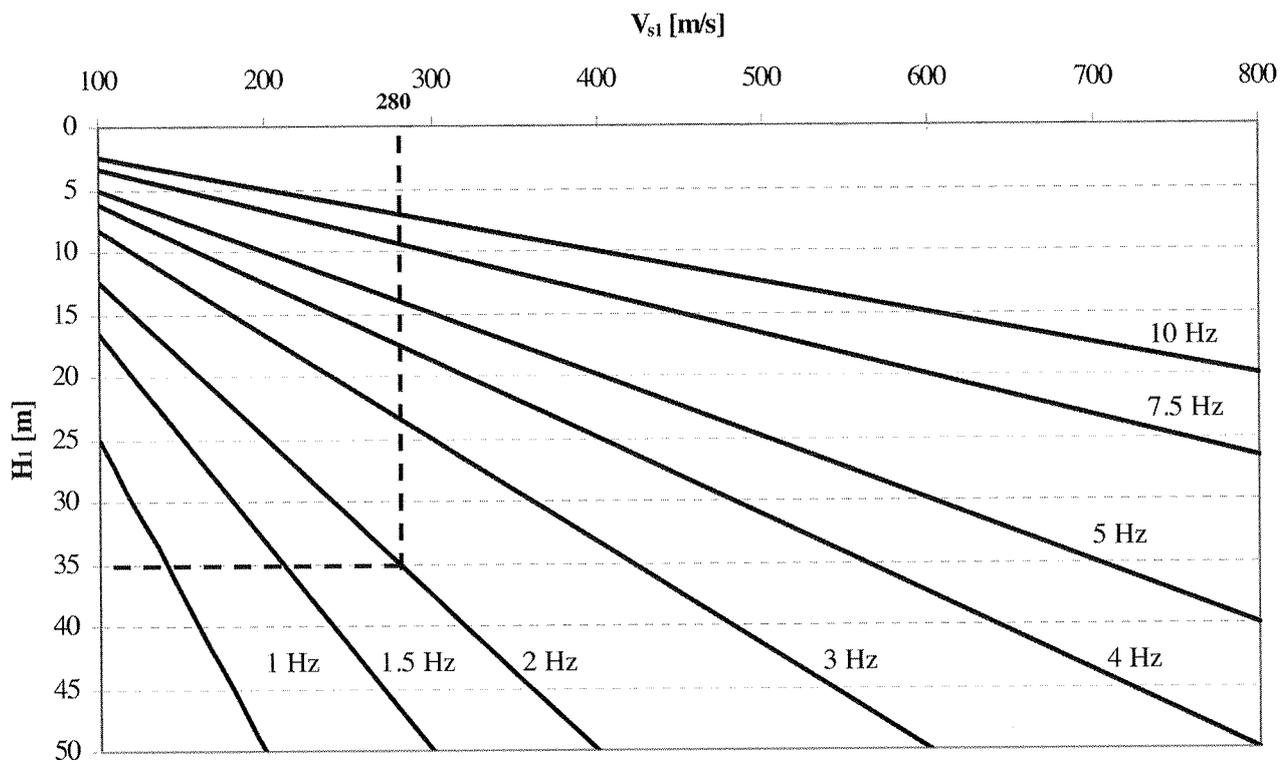


FIG. 6 Abacus (H_v, V_{s1}, F_0) for a two layers model in case of $\rho_2 \cdot V_{s2} / \rho_1 \cdot V_{s1} > 4$.
 Abacus (H_v, V_{s1}, F_0) for a two layers model in case of $\rho_2 \cdot V_{s2} / \rho_1 \cdot V_{s1} > 4$.

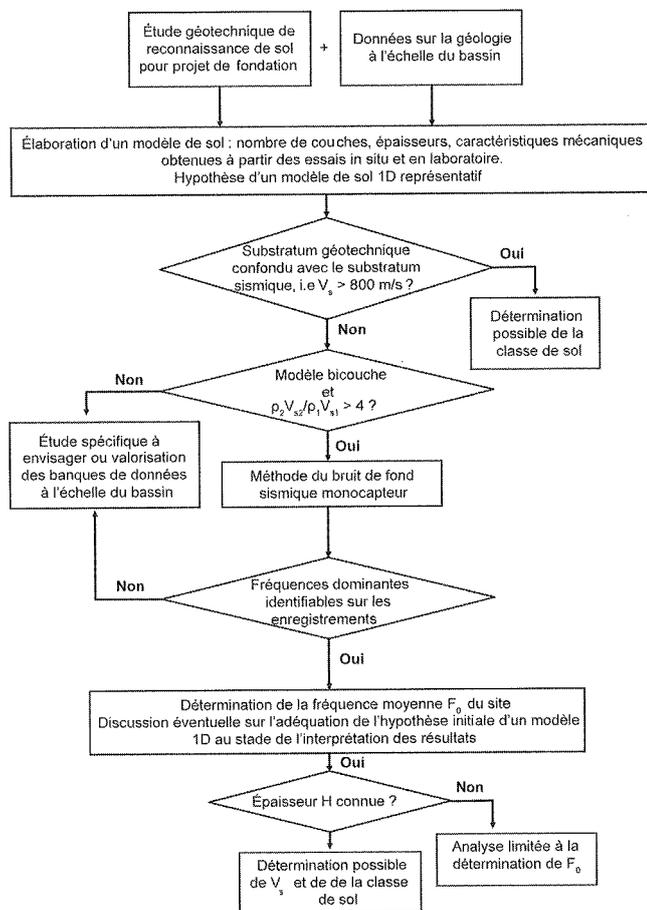


FIG. 7 Principe de l'utilisation conjointe de la mesure du bruit de fond à l'étude géotechnique pour un modèle de sol bicouche.

Process flowchart describing the seismic ambient noise measurement coupled with geotechnical study in case of a two layers model.

premier exemple présente la recherche de valeurs de V_{s1} pour un site à Annemasse (Haute-Savoie, France), le deuxième, l'utilisation de la mesure du bruit de fond sismique pour sélectionner le site le plus adapté au projet (vallée du Rhône, France), le troisième illustre l'intérêt de la détermination de la période fondamentale T_0 du sol à Givors (Rhône, France). Ces mesures ont été réalisées pour parfaire notre compréhension de la méthode H/V et de ses limites d'application. Elles n'ont pas eu d'incidences sur le dimensionnement des ouvrages.

3.1

Appareillage

Les capteurs utilisés pour enregistrer le bruit de fond sismique sont des vélocimètres semblables ou dérivés de ceux classiquement utilisés en sismologie. Il en existe de différents types, ayant en particulier des bandes passantes de largeur variable. La connaissance du contexte géologique importe dans le choix du capteur car de manière générale la fréquence fondamentale d'un bassin diminue lorsque sa profondeur augmente. Pour les applications de la méthode H/V en géotechnique, l'épaisseur de formation superficielle sera généralement faible, et la fréquence fondamentale relativement élevée. Pour les exemples présentés dans cet article, elle est toujours supérieure à 1 Hz. Plusieurs chaînes d'acquisition ont été testées lors du projet SESAME afin de contrôler leur capacité à fournir des signaux de qualité suffisante pour que la méthode H/V puisse être appliquée. Les vélocimètres ayant une fréquence de coupure à 0,2 Hz (Guillier *et al.*, 2008), voire même 1 Hz (Strollo *et al.*, 2008) sont considérés comme adaptés à l'acquisition de signaux dans la plage de fréquence allant de 0,1 à 20 Hz.

Deux types de vélocimètres ont été utilisés dans cet article : le capteur trois composantes Lennartz Le 3D 5 s (fréquence de coupure 0,2 Hz) associé à une station d'acquisition Cityshark et le capteur trois composantes Micromed Tromino version « V30 et risques sismiques » de fréquence propre de quelques Hertz corrigée numériquement par le logiciel joint à l'instrument. La capacité de ce second instrument à fournir des spectres H/V fiables a été confirmée lors de mesures réalisées par les deux sismomètres sur le site de Givors où la fréquence fondamentale vaut 1,4 Hz (voir exemple traité en § 3.4).

3.2

Estimation de la vitesse des ondes de cisaillement V_{s1} de formations superficielles

Les premières applications de la méthode H/V en France pour estimer la vitesse des ondes de cisaillement de formations superficielles pour des projets courant d'amélioration de sol remonte à 2009 (Brûlé *et al.*, 2009). Il s'agissait de la construction d'un centre hospitalier en Haute-Savoie (France) sur un site dont la géologie est constituée de formations argilo-caillouteuses de compacité moyenne à bonne et d'épaisseur variable, surmontant des moraines consolidées. L'épaisseur de recouvrement est parfaitement connue au droit du projet car plusieurs milliers de forages ont été réalisés avec un maillage moyen de 2,2 x 2,2 m lors

de la réalisation du renforcement de sol préalable à l'édification de la structure. Ce type de renforcement consiste à réaliser des inclusions cylindriques de béton selon des maillages adaptés pour améliorer la portance et/ou réduire la déformation verticale des sols sous la charge du projet. L'objectif ici était de confirmer la classe de site au sens des Règles PS92, document alors en vigueur au moment de la réalisation de l'ouvrage, et retenue lors de l'étude géotechnique sans mesure directe des caractéristiques du sol en petites déformations. L'enjeu du contrôle était de s'assurer que la structure serait dimensionnée avec le bon spectre de réponse.

La géologie du site étant bien définie (lithologie et épaisseur de recouvrement) et le contexte étant propice au contraste d'impédance recherché, une campagne de mesures de bruit de fond a été réalisée, puis la fréquence propre F_0 du site a été déterminée en chaque point de mesure par application de la méthode H/V (Nakamura, 1989). Le tableau II définit les conditions d'acquisition des mesures et le tableau III présente les épaisseurs de formations superficielles ainsi que les fréquences propres F_0 déterminées aux points de mesure. Bien que l'épaisseur de formations superficielles H_1 soit fortement variable au droit des points de mesure (de 3,5 m à 10,8 m) et que la fréquence F_0 déterminée varie également largement (de 4,4 à 15 Hz), le produit $V_s = 4.H_1.F_0$ est constant et voisin de 200 m/s. Le sol était ainsi de catégorie C (Norme NF P 06-013, 1995) après estimation de la valeur de V_{s1} avec l'équation (1).

TABLEAU II Paramètres de mesure du bruit de fond sismique au droit du projet d'Annemasse.
Seismic noise recording parameters at Annemasse.

Point	Localisation		Date de l'acquisition	Durée d'acquisition	Fréquence d'échantillonnage	Couplage capteur/sol	Conditions météorologiques (vent/pluie)
	Latitude Nord en degrés décimaux	Longitude Est en degrés décimaux					
3	46,140792	6,319058	09/02/2009	20 min	100 Hz	Sur dalle béton	Oui/oui
4			30/04/2009	20 min	100 Hz	-	Non/non
5			30/04/2009	20 min	100 Hz	-	Non/non
6			30/04/2009	20 min	100 Hz	-	Non/non
7a			30/04/2009	20 min	100 Hz	-	Non/non
7b			30/04/2009	10 min	100 Hz	Sur radier béton	Non/non

TABLEAU III Paramètres de traitement et résultats des mesures de bruit de fond sismique à Annemasse.
Seismic noise recording processing parameters and results at Annemasse.

Point	Filtre	Conformité aux critères Sésame	H_1 (m)	F_0 (Hz)	V_{s1} (m/s)
3	Konno et Ohmachi, paramètre b = 40	Oui	10,8	4,4	190
4	Konno et Ohmachi, paramètre b = 40	Oui	4,5	11	198
5	Konno et Ohmachi, paramètre b = 40	Oui	3,5	13,5	189
6	Konno et Ohmachi, paramètre b = 40	Oui	4,4	11,5	202
7a	Konno et Ohmachi, paramètre b = 40	Oui	3,6	15	216
7b	Konno et Ohmachi, paramètre b = 40	Oui	3,6	13	187
				V_{s1} moyen	197 m/s

Par ailleurs, une mesure complémentaire de bruit de fond a été réalisée sur un affleurement morainique afin de s'assurer qu'il s'agit bien du substratum sismique. Pour ce cas, le rapport des deux composantes horizontales sur la composante verticale des amplitudes spectrales du bruit sismique ne permet pas de distinguer de pic à une fréquence particulière. Dans cette situation, le substratum géotechnique du projet est confondu avec le substratum sismique.

3.3

Variation de la classe de sol avec l'épaisseur H_1 : intérêt pour l'aménageur

La figure 3 citée en § 1.4 montre la variation de la classe de sol par simple modification des épaisseurs du sol de recouvrement. Les spectres de réponse élastique étant très différents et le coût de la construction parasismique aussi, l'intérêt d'un aménageur souhaitant implanter un projet est de retenir un sol de classes A ou C plutôt que E. Dans l'hypothèse de la recherche d'un terrain à bâtir, la campagne d'investigation géophysique peut se réduire à plusieurs points de mesure du bruit de fond sismique pour classer les sols. C'est dans cette logique que des mesures ont été effectuées en région lyonnaise (France), dans la plaine alluviale du Rhône avec une lithologie constituée d'alluvions surmontant un substratum morainique ou cristallophyllien.

Afin de préciser la vitesse des ondes de cisaillement V_s se propageant dans les sables et graviers, des mesures de bruit de fond ont été réalisées en quatre points de la vallée du Rhône (Fig. 8) où les conditions suivantes sont réunies : les sables et graviers (alluvions du Rhône) reposent directement sur le substratum sismique ; l'épaisseur des sables et graviers étant connue, cet agencement peut être simplifié par un modèle bicouche avec un contraste d'impédance suffisant pour déduire, de la fréquence fondamentale F_0 déterminée en surface par la méthode H/V, la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans la couche superficielle, donc la classe de sol.

Dans ce cas, l'information obtenue dans la Banque de données du sous-sol (BSS) a permis de sélectionner plusieurs sondages archivés pour lesquels le contexte géologique et la profondeur des formations sont précisément connus. Les sondages ont été repositionnés avec soin grâce à leurs coordonnées GPS, et des mesures de bruit de fond sismique ont été réalisées au droit de chacun d'eux. Les conditions d'acquisition sont détaillées dans le tableau IV et les rapports spectraux sont présentés en figure 9. La vitesse des

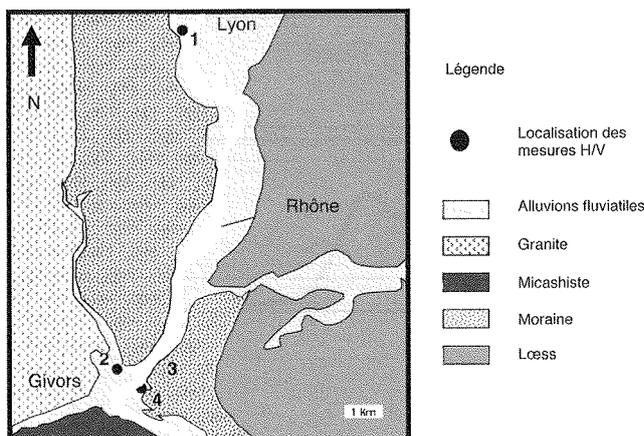


FIG. 8 Carte géologique simplifiée de la vallée du Rhône au sud de Lyon et emplacements des mesures du bruit de fond sismique.

Simplified geological map of the Rhône river valley south of Lyon City and location of seismic noise measurements.

ondes de cisaillement dans les sables et graviers du Rhône est estimée par l'utilisation de la formule $V_{s1} = 4 \cdot H_1 \cdot F_0$ adaptée pour le contexte considéré pour chacun des cas (Tableau V). La vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les alluvions du Rhône est estimée à l'Est de Givors à $V_{s1} = 242$ m/s (moyenne arithmétique).

Au droit des sondages, les alluvions du Rhône reposent sur un substratum rocheux (morainique ou cristallophyllien). La vitesse des ondes de cisaillement y est toutefois supposée supérieure à 800 m/s. Au sens de la norme EN 1998, les classes de sol correspondantes sont les classes E ou C, en fonction de l'épaisseur de la formation alluvionnaire qui varie latéralement de 7,3 m à 26 m suivant les sondages. Nous sommes typiquement dans un contexte pour lequel la variation des épaisseurs d'alluvions peut conduire à des effets de site contrastés. Par exemple, en cas de rapide remontée de substratum en bordure de la vallée du Rhône, là où l'épaisseur de formation superficielle diminue et où le relief débute, des sols de classe A peuvent être identifiés. L'intérêt de la méthode H/V est alors de produire une première « cartographie » de fréquence F_0 . Notons que pointer des fréquences sur les diagrammes de rapports spectraux, ne permet pas de statuer directement sur la géométrie et la composition des couches géologiques à l'origine de cette information. C'est en combinant les informations géologiques et géotechniques, qu'un modèle bicouche peut être déterminé pour alors envisager l'obtention de paramètres tels que V_s .

TABLEAU IV

Paramètres de mesure du bruit de fond sismique dans la vallée du Rhône.
Seismic noise recording parameters for Rhone river valley survey.

Point	Localisation		Date de l'acquisition	Durée d'acquisition	Fréquence d'échantillonnage	Couplage capteur/sol	Conditions météorologiques (vent/pluie)
	Latitude Nord en degrés décimaux	Longitude Est en degrés décimaux					
1	45,732047	4,818414	09/06/2010	8 x 14 min	128 Hz	Plaque métallique lourde	Non/non
2	45,594653	4,775258	09/06/2010	40 min	128 Hz	Plaque métallique lourde	Non/non
3	45,599597	4,793331	09/06/2010	20 min	128 Hz	Plaque métallique lourde	Non/non
4	45,594075	4,789367	08/06/2010	20 min	128 Hz	Plaque métallique lourde	Non/non

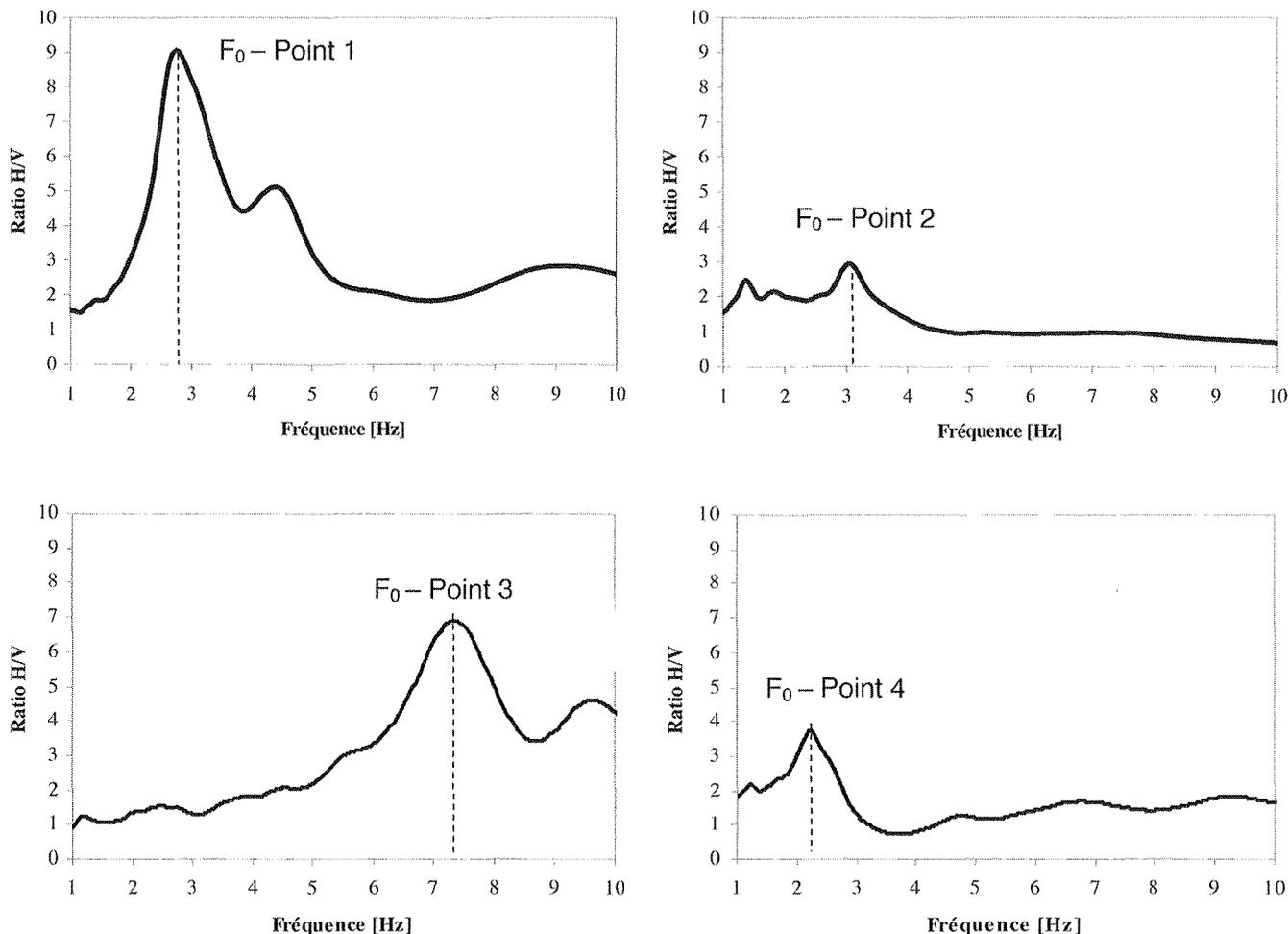


FIG. 9 Détermination de F_0 à partir des rapports spectraux H/V issus de mesures de bruit de fond sismique dans la Vallée du Rhône.
Identification of F_0 using H/V ratio based on seismic noise records in Rhône Valley.

TABLEAU V Paramètres de traitement et résultats des mesures de bruit de fond sismique dans la vallée du Rhône.
Seismic noise recording processing parameters and results for Rhone river valley.

Point	Filtre	Conformité aux critères Sésame	H_1 (m)	F_0 (Hz)	V_{s1} (m/s)	Classe de sol
1	Konno et Ohmachi, paramètre $b = 40$	Oui	23 ⁽¹⁾	2,87 ⁽²⁾	264	C
2	Konno et Ohmachi, paramètre $b = 40$	Oui	20,1 ⁽³⁾	3,1	249	E
3	Konno et Ohmachi, paramètre $b = 40$	Oui	7,3 ⁽⁴⁾	7,34	214	E
4	Konno et Ohmachi, paramètre $b = 40$	Oui	26,5 ⁽⁵⁾	2,25	239	C
				$V_{s1 \text{ moyen}}$	242 m/s	

avec :

– H_1 : épaisseur des alluvions ; la donnée est issue de sondages réalisés lors d'études géotechniques ou de la BSS du BFGM ;

– F_0 : fréquence propre (Hz) mesurée du sol (méthode de Nakamura) ;

– V_{s1} : vitesse moyenne des ondes de cisaillement (m/s) déterminée par $V_{s1} = 4.H_1.F_0$.

⁽¹⁾ Point 1 : mesures de bruit de fond réalisées à proximité du sondage de référence n° 06986S0199/F2.

⁽²⁾ Moyenne des fréquences dominantes obtenues lors des huit mesures.

⁽³⁾ Point 2 : l'épaisseur de formation superficielle est connue au droit du sondage de référence n° 07226A0245/F situé à proximité du point de mesure. La topographie étant plane à cet endroit, nous retenons comme épaisseur de formation superficielle au droit de la mesure de bruit de fond, celle observée au niveau du sondage.

⁽⁴⁾ Point 3 : l'épaisseur des alluvions est connue aux deux sondages de références n° 07226X0125/R48 et 07226X0117/R40 situés à proximité, à savoir 7,3 m. La cote du terrain naturel est régulière à cet endroit en bord de Rhône et supposée ayant peu variée dans le temps ; nous retenons comme épaisseur de formation superficielle, celle déterminée au droit des sondages.

⁽⁵⁾ Point 4 : le toit du substratum a été estimé à la cote de 130 m à partir des deux sondages de la banque de donnée du sous-sol les plus proches, à savoir les sondages référencés 07226X0126/R49 et 07226A0264/N7. La cote du point de mesure est estimée à 156,5 m IGN en déterminant la différence d'altitude entre le point référence IGN les plus proches et le point de mesure. L'épaisseur des alluvions au droit du point 4 est donc estimée à 26,5 m.

With:

– H_1 : alluvium thickness; data obtained from geotechnical site investigation or from the BRGM Soil Data Base (BSS);

– F_0 : measured soil fundamental frequency (Hz) according to the Nakamura's method;

– V_{s1} : shear wave velocity (m/s) calculated with relation $V_{s1} = 4.H_1.F_0$.

Estimation de la période fondamentale d'un bassin alluvial

Cet exemple illustre l'intérêt de combiner les moyens de reconnaissance géologique, géotechnique et géophysique, dans le contexte de remplissage alluvionnaire d'épaisseur incertaine. En effet, les seuls sondages géotechniques peuvent définir une profondeur suffisante d'investigation pour répondre aux questions de la géotechnique des fondations, tandis que le phénomène physique d'amplification du signal sismique, donc l'effet de site, donc la classe de sol, requiert la connaissance de la profondeur d'un réflecteur sismique qui est parfois bien plus profond que le substratum géotechnique.

La méthode H/V a été employée dans le cadre d'un chantier de compactage dynamique des sols réalisé par Ménard en 2009 pour améliorer 7 à 15 m de remblais superficiels gravo-sableux reposant sur les alluvions du Gier (Brûlé *et al.*, 2010b). Le niveau de la nappe se trouve 5 à 6 m sous la surface d'origine du terrain.

Au démarrage des études, les données issues des investigations mécaniques *in situ* ne permettaient pas de considérer un modèle bicouche comme défini en § 3.4. Le substratum était suspecté en profondeur d'après la géomorphologie du site en thalweg entaillé dans des formations granitiques et cristallophylliennes visibles à l'affleurement sur les versants. La morphologie et la lithologie du site (Fig. 10) peuvent laisser entrevoir les effets de piégeage d'onde décrits en figure 2a et figure 2b.

La mesure de bruit de fond sismique a permis d'estimer la fréquence fondamentale du bassin, sans nécessairement connaître son épaisseur H_1 de remplissage (Brûlé *et al.*, 2010a). Les mesures ont été effectuées sur une zone test de 35 par 150 m et sont présentées en tableaux VI et VII. La fréquence propre moyenne du sol F_0 pour 80 mesures est estimée à 1,44 Hz. Un exemple de rapport spectral obtenu est présenté en figure 11a. Avec un écart-type de 0,03 Hz, la disper-

sion des 80 mesures est limitée. Des mesures de bruit de fond réalisées à proximité du projet sur des affleurements rocheux granitiques (Fig. 11b) présentent un spectre H/V proche de l'unité, ce qui confirme le substratum sismique. En complément des sondages mécaniques réalisés avant travaux pour caractériser les sols (essais au pénétromètre statique, essais au pressiomètre Ménard), nous avons sélectionné la méthode de mesure de vitesse des ondes de cisaillement par la méthode d'analyse multi-canaux des ondes de surface (Park *et al.*, 1999) ou, en anglais Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW) pour obtenir un profil de vitesse des ondes de cisaillement V_s . Ainsi, plus de quarante profils ont été réalisés dans la zone d'étude (Brûlé *et al.*, 2010b). Il apparaît que le profil moyen de vitesse est le suivant : de 0 à - 5 m, $V_s = 134$ m/s ; de - 5 à - 10 m, $V_s = 210$ m/s ; de - 10 à - 17 m, $V_s = 269$ m/s. Au-delà, et jusqu'à trente mètres de profondeur, V_s vaut 344 m/s. Pour se rattacher aux classes de sols selon la norme EN 1998-1, la vitesse moyenne des ondes de cisaillement doit être calculée sur les trente premiers mètres. Ainsi, $V_{s,30} = 244$ m/s ce qui correspond à un site de classe C. Les sondages mécaniques disponibles pour ce projet recommandaient de rechercher un ancrage des fondations profondes vers 20 m en décrivant une classe D de sol.

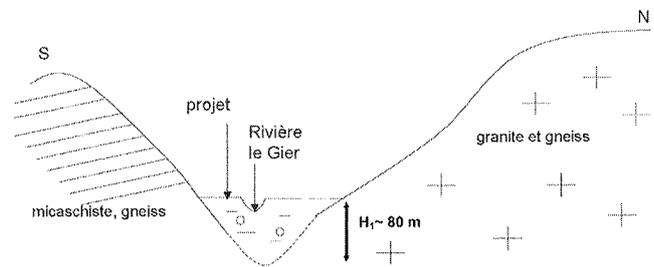


FIG. 10 Géomorphologie de la vallée du Gier vers la confluence avec le Rhône.

Geomorphology of the Gier river valley near the location of the confluence with Rhône river.

TABLEAU VI Paramètres de mesure du bruit de fond sismique dans la vallée du Gier près de la confluence avec le Rhône. Seismic noise recording parameters for Gier river valley near the Rhône river.

Nombre de points de mesure	Localisation		Date de l'acquisition	Durée par acquisition	Fréquence d'échantillonnage	Couplage capteur/sol	Conditions météorologiques (vent/pluie)
	Latitude Nord en degrés décimaux	Longitude Est en degrés décimaux					
80	45,58635	4,763183	28-30/08/2010	10 min	128 Hz	-	Non/non
1	45,581989	4,769233	14/01/2010	12 min	128 Hz	-	Non/non

TABLEAU VII Paramètres de traitement et résultats des mesures de bruit de fond sismique dans la vallée du Gier. Seismic noise recording processing parameters and results for Gier river valley.

Nombre de points de mesure	Localisation	Filtre	Conformité aux critères Sésame	F moyenne (Hz)	Écart-type (Hz)
80	Sur site de mesure dans la vallée	Konno et Ohmachi, paramètre b = 40	Oui	1,44	0,03
1	A l'affleurement rocheux à flanc de versant de la vallée	Konno et Ohmachi, paramètre b = 40	Oui	Aucun pic	-

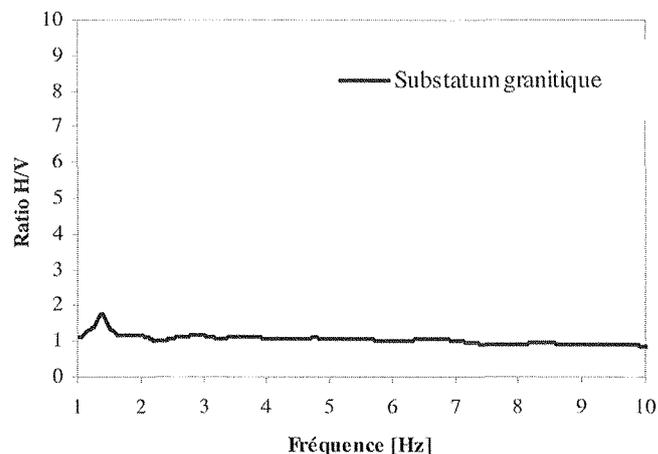
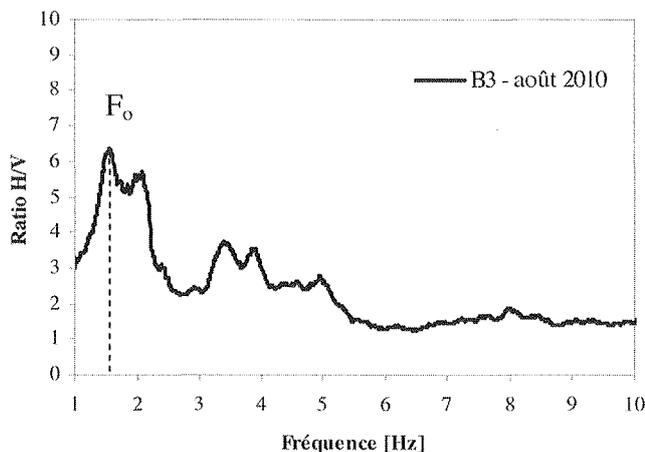


FIG. 11

Détermination de F_0 à partir des mesures de bruit de fond sismique dans la vallée du Gier.
Identification of F_0 using seismic noise records in Gier Valley.

L'expression (1), $F_0 = V_s/4.H_1$ indique que la fréquence fondamentale sera d'autant plus basse que H_1 est grand ou V_s est petit. En considérant l'hypothèse d'un modèle bicouche avec, *a minima*, une valeur de V_s à 244 m/s pour toute l'épaisseur des alluvions, la valeur minimale de H_1 déduite de (1) est de 42 m. La fréquence F_0 mesurée ne pouvait pas être compatible avec l'hypothèse d'un remplissage de 20 m d'épaisseur. Ainsi, le « substratum géotechnique » n'est pas confondu avec le substratum sismique qui est estimé par ailleurs à 80 m et, pour ce cas, la classe de sol déterminée sur la base d'investigation mécanique *in situ* et les méthodes géophysiques ne donnent pas le même résultat : D pour l'un et C pour l'autre. La seule approche par reconnaissances géotechniques n'est pas suffisante pour caractériser une fréquence F_0 et une vitesse V_s représentatives de la lithologie du site.

4

Conclusion

Ce retour d'expérience montre l'importance à fournir des valeurs représentatives de F_0 et de V_s en couplant les données géologiques, géotechniques et géophysiques et cela quel que soit le stade des études de sol. Une classification erronée des sols occasionne un dimensionnement inadapté des ouvrages avec la norme EN 1998.

Les spectres de réponse élastique ayant été élaborés sur la base d'hypothèses conduisant à retenir la valeur de $V_{s,30}$ comme représentative des effets de site lithologique, une reconnaissance géotechnique et géophysique poussée jusqu'à 30 m au moins est à envisager sans connaissance géologique particulière ou accessible dans les données archivées d'un secteur d'étude. La valeur de $V_{s,30}$ ne peut pas être incohérente avec le profil général de V_s à l'échelle d'un bassin de

plusieurs centaines de mètres. Pour aider à développer les analyses dans ce sens, la méthode H/V mérite d'être employée pour les modèles de sol bicouches. Elle permet d'obtenir, avec des mesures en surface et sans considération de profondeur de remplissage et d'agencement des formations constitutives, des informations simples nécessitant peu de traitement préalable à leur exploitation.

Le contraste d'impédance A défini dans l'équation (3) doit être au moins égal à 4 et l'épaisseur de sol H_1 doit être connue par différents moyens : études archivées, sondages géotechniques réalisés dans le cadre du projet. Dans ces conditions, il est possible de pointer une fréquence dominante sur le spectre du rapport des deux composantes horizontales sur la composante verticale des amplitudes spectrales du bruit sismique enregistré par la méthode H/V. Cette fréquence dominante F_0 peut être assimilée à la fréquence fondamentale moyenne du sol pour le premier mode de vibration. Toujours avec l'appui de spécialistes et dans une approche de pré-caractérisation des paramètres en petite déformation du sol, la vitesse V_{s1} des ondes de cisaillement du sol de recouvrement peut être estimée. Cette valeur peut contribuer à statuer sur l'hétérogénéité du site en multipliant les points de mesure quand tous les autres paramètres sont calés, avec, par exemple la production d'une carte des fréquences traduisant une variabilité de H_1 et/ou de V_{s1} . Cette méthode peut aussi permettre de définir une pré-classe de sol selon la norme EN 1998 et de statuer sur les cas de résonance du bâtiment avec le sol.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier deux auteurs pour la qualité de leurs conseils dans le cadre de nos travaux sur la mesure du bruit de fond appliquée à la géotechnique : le Professeur Yutaka Nakamura (Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japon), le Professeur Tatsuo Ohmachi (Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japon).

Bibliographie

- Bard P.Y., Bouchon M. – Two dimensional resonance of sediment-filled valleys. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 1985, p. 519-541.
- Bard P.Y., Tsuno S., Hobiger M. – *Caractérisation géophysique des formations superficielles du secteur La Petite Tronche – Péage – Ancien Hôpital*. Rapport interne. Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique (Observatoire de Grenoble), 2009.
- Bonnefoy-Claudet S. – *Nature du bruit de fond sismique : implication pour les études des effets de site*. Thèse de l'université Joseph Fourier, Grenoble, France, 2004.
- BRGM (Bureau des recherches géologiques et minières). Banque de données du sous-sol (<http://infoterre.brgm.fr>).
- Brûlé S., Javelaud E., Pal O., Rizzo A.V., Brunet-Manquat E. – Le nouveau centre hospitalier d'Annemasse et Bonneville (CHIAB) en Haute-Savoie : un projet de renforcement de sol hors norme. *Revue Travaux*, 866, 2009, p. 73-81.
- Brûlé S., Javelaud E.H., Bitri A. – Analyse de la réponse sismique d'un site après travaux d'amélioration de sols par compactage dynamique haute énergie. *Conférence franco-maghrébine en ingénierie géotechnique*. Gammarrh, Tunisie, 2010a.
- Brûlé S., Javelaud E.H., Ohmachi T., Nakamura Y., Inoue S. – H/V method used to qualify the modification of dynamic soil characteristics due to ground improvement work by means of heavy compaction process. A case study : The former Givors's glass factory area. *7th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 5th International Conference on Earthquake Engineering*, 3-5 mars 2010, Tokyo, Japon, 2010b.
- Cornou C., Wathelet M. – Extraction des profils de vitesse en onde S à partir des techniques « bruit de fond en réseau » : Résultat d'un benchmark international. *6^e Colloque GEOFCAN*, 25-26 septembre 2007, Bondy, France.
- Fabriol H., Bitri A., Lebrun B., Baltasat J.M. – *Application de la méthode SASW (analyse spectrale des ondes de surface) dans le district d'Annecy*. Rapport BRGM n° R40392, décembre 1998.
- Guéguen P. – *Sismologie urbaine : aléa local, dynamique des structures, interaction site-ville et vulnérabilité urbaine*. Habilitation à diriger les recherches, Université Joseph-Fourier, Grenoble I, 2009.
- Guillier B., Atakan K., Chatelain J.-L., Havskov J., Ohrnberger M., Cara F., Duval A.-M., Zacharopoulos S., Teves-Costa P. – The SESAME Team. Influence of instruments on the H/V spectral ratios of ambient vibrations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 2008, p. 3-31.
- Haghshenas E., Bard P.-Y., Theodulidis N., SESAME WP04 Team – Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 2008, p. 75-108.
- Konno K., Ohmachi T. – Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical component of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88 (1), 1988, p. 228-241.
- Levret A., Loup C., Goula X. – The Provence earthquake of June 02 1909 (France) New assessment of near-field effects. *8th European Conference on Earthquake Engineering*, volume 2, page 4.2.79, Lisbon, Portugal, September 1986.
- Nakamura Y. – A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI)*, 30 (1), 1989.
- Norme EN 1998 – *Calcul des structures pour leur résistance au séisme – Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments*. EN 1998-1 Comité européen de normalisation, 2005.
- Norme NF P 06-013 – *Règles de construction parasismiques*. Règles PS applicables aux bâtiments, dites Règles PS 92, 1995.
- Park C.B., Miller R.D., Xia J. – Multi-channel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64, 3, 1999, p. 800-808.
- Rénalier F. – *Caractérisation sismique de sites hétérogènes à partir de méthodes actives et passives : variations latérales et temporelles*. Thèse de l'université Joseph Fourier, Grenoble, France, 2010.
- République française – Arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal ».
- République française – Arrêté du 19 juillet 2011 modifiant l'arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal ».
- République française – Décret n° 2010-1254 du 22 octobre 2010 relatif à la prévention du risque sismique.
- République française – Décret n° 2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français.
- Semblat J.F., Pecker A. – *Waves and vibrations in soils : Earthquakes, Traffic, Shocks, Construction works*, IUSS Press, 2009.
- SESAME. – *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations – measurements, processing and interpretations*. SESAME European research project. Deliverable D23.12, 2005.
- Strollo A., Bindi D., Parolai S., Jäcker K.-H. – On the suitability of 1st geophone for ambient vibration noise measurements in the 0.1-20 Hz frequency range : experimental outcomes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 2008, p. 141-147.