

Analyse vibratoire de la réponse dynamique du sol à Bucarest – étude de cas

Alexandru Aldea

Université technique de constructions
Bucarest

Bucarest, Roumanie

<https://orcid.org/0000-0001-8220-3685>

Etienne Bertrand

Université Gustave Eiffel

Marne-la-Vallée, France

<https://orcid.org/0000-0003-2112-0450>

Cristian Arion

Université technique de constructions
Bucarest

Bucarest, Roumanie

<https://orcid.org/0000-0002-1663-2673>

Résumé — La présente étude cible l'analyse vibratoire de la réponse dynamique du sol à Bucarest, avec la présentation d'une étude de cas et l'utilisation de méthodes géophysiques et d'enregistrements de vibrations ambiantes et sismiques. Le site étudié est celui d'une station sismique de Bucarest qui fait partie du réseau sismique de l'Université technique de constructions Bucarest, Roumanie. La station a été installée en 2003 et plus d'une trentaine de séismes ont été enregistrés depuis. On présente la détermination du profil de vitesses des ondes sismiques au site par la méthode PS-logging et une analyse H/V de mesures de vibrations ambiantes et d'enregistrements sismiques. Ces informations et analyses servent à mieux comprendre le comportement dynamique du sol au site de la station sismique, utile dans les études d'aléa sismique local et régional.

Mots-clés — vitesses des ondes sismiques, vibrations ambiantes, enregistrements sismiques, réponse du sol

I. INTRODUCTION

La caractérisation de la réponse sismique du sol est essentielle pour la prise en compte des effets de site dans la définition réaliste de l'aléa sismique. Dans les réglementations parasismiques, l'action sismique est établie en fonction des conditions de site afin de tenir compte de la variabilité de la réponse dynamique du sol d'un site à un autre. La réponse du sol est principalement influencée par les caractéristiques géotechniques des couches de sol et par la topographie. Les premières observations à ce sujet sont apparues dans la littérature scientifique dès le XIX^e siècle, par exemple le géologue roumain Drăgiceanu (1896) écrivait au sujet du séisme Ligure de 1887 [1] : « Un séisme peut être presque inefficace dans un terrain solide, tandis qu'il peut, tout près, devenir désastreux dans un terrain meuble argileux et surtout sablonneux. »

Un réseau sismique digital a été installée en 2003 en Roumanie, dans un projet de coopération avec l'Agence Japonaise de Coopération Internationale JICA [2]. À Bucarest, une station (code UTC1) a été installée dans le campus principal de l'Université technique de construction Bucarest (UTCB). La station enregistre simultanément les accélérations du sol en surface et dans deux forages ayant 28m et 78m de profondeur. Au début, la station a été opérée par le Centre national pour la réduction du risque sismique et depuis 2014 par l'UTCB. Durant la période 2003-2010 et 2014-présent la station a enregistré des accélérogrammes générés par plus d'une trentaine de séismes de magnitudes de moment M_w entre 3,2 et 6 [3].

Nous présentons ici la détermination du profil de vitesses des ondes sismiques sous le site UTC1 par la méthode PS-logging et une analyse H/V de mesures de vibrations ambiantes et d'enregistrements de séismes.

II. TESTS ET ANALYSES

A. Profil de vitesses des ondes sismiques

Dans les règles de conception parasismique, y compris l'Eurocode 8 [4], l'action sismique est définie en fonction des conditions de site. Pour cela, le plus important paramètre quantitatif pris en compte pour la classification des sites est la vitesses moyenne des ondes sismiques de cisaillement dans les premières 30m de couches de sol.

Pour l'estimation du profil des vitesses des ondes sismiques de compression V_p et de cisaillement V_s , une investigation géophysique de type PS-logging a été réalisée au site UTC1 avant l'installation des capteurs sismiques dans les forages.

Dans cette méthode géophysique, un capteur de vitesses est placé à différentes profondeurs dans le forage (d'habitude chaque mètre) et la source de vibration se trouve au-dessus, en surface. Les ondes qui sont générées en surface se propagent à travers les couches de sol depuis la source jusqu'aux capteur. Ainsi, le temps de parcours mesuré caractérise la vitesse de propagation des ondes à travers différentes couches sédimentaires dont les épaisseurs sont connues à partir du profil stratigraphique établi lors de l'exécution du forage.

En 2003 une équipe roumano-japonaise (UTCB et Tokyo Soil Research Co., Ltd.) a réalisé des mesures dans le forage de 78m de profondeur de UTC1, avec un équipement qui été un don de la JICA. Fabriqué par Tokyo Soil Research Co., Ltd., l'équipement est représenté schématiquement en Fig.1 et se compose d'un capteur de vitesses en forage, un système d'acquisition de données relié au capteur par un câble de signal, une batterie portable, un tube d'azote N_2 avec contrôleur et régulateur de pression et une tubulure qui fait le lien avec le capteur de vitesses. Une fois le capteur dans le forage à la profondeur désirée, celui-ci est fixé aux parois du forage à l'aide d'une plaque de fixation activée par la pression de l'azote.

Les ondes sismiques sont générées en surface, à la main, par des frappes d'un marteau de grand poids dans un pieu en bois (pour la génération d'ondes P) et dans une planche en bois (pour la génération d'ondes S). Le pieu et la planche sont équipés avec des capteurs de déclenchement reliés à la station d'acquisition.

Les premiers résultats obtenus par la méthode PS-logging sont les enregistrements de vibrations le long du forage montrant les arrivées des ondes (Fig.2). Ensuite on identifie le temps d'arrivée des ondes à chaque profondeur considérée et on construit la courbe des temps de trajet.

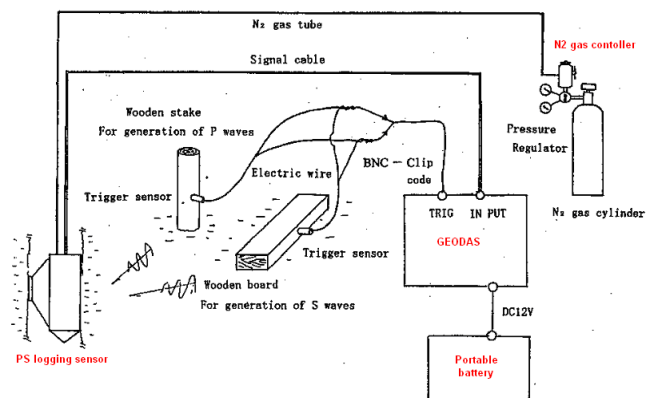


Fig. 1. Schéma du test de PS-logging [5]

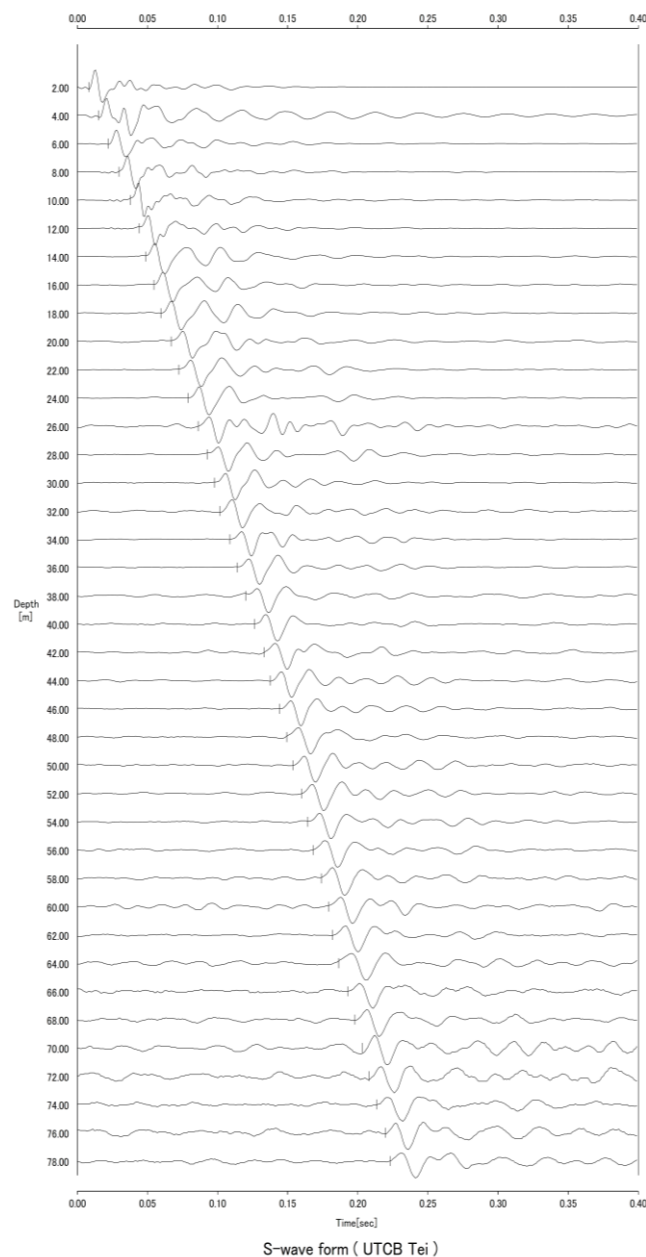


Fig. 2. UTC1 - enregistrements des vitesses des ondes S sur la profondeur du forage

Celle-ci est ensuite corrélée avec le profile stratigraphique du forage et, en tenant compte du temps et de la distance associés au passage des ondes par les différentes couches, on

identifie les vitesses des ondes de chaque couche de sol. Le résultat final est le profil des ondes sismiques au site, Fig.3.

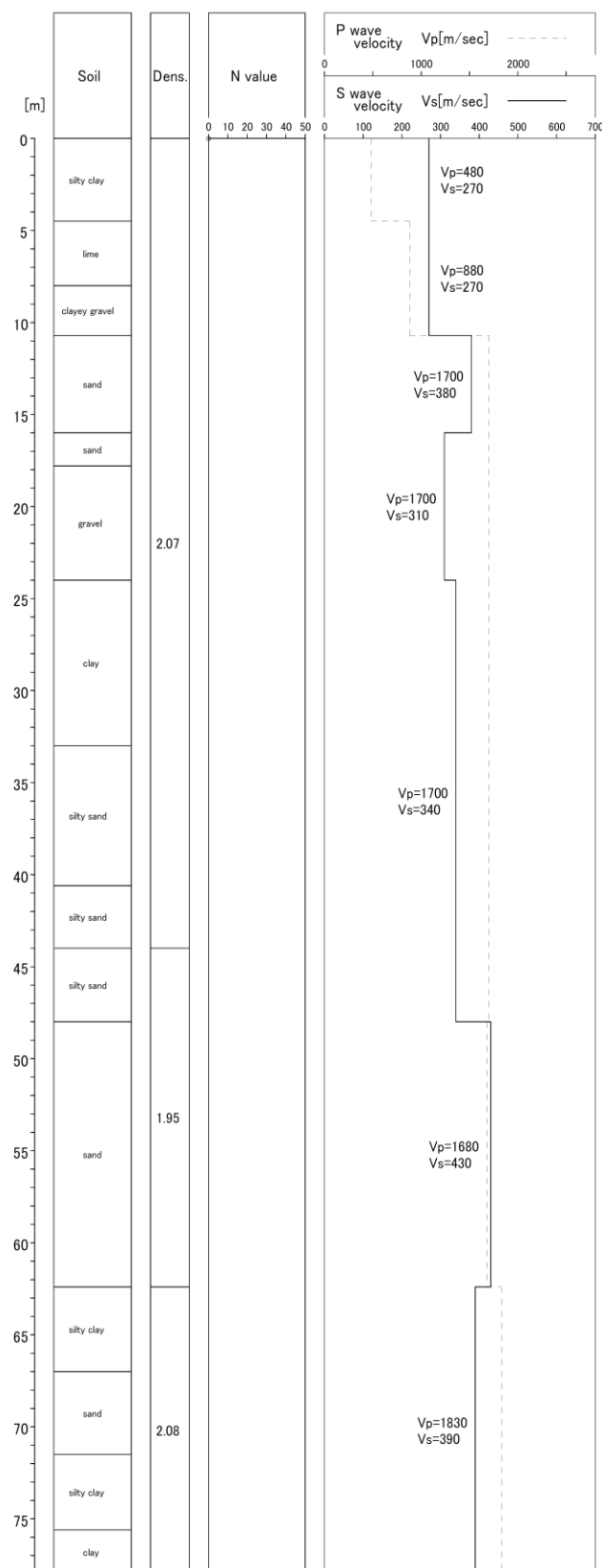


Fig. 3. UTC1 - profils des vitesses des ondes P et S par la méthode PS-logging

La vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur 28m de profondeur est de 329m/s et de 349m/s sur toute la profondeur de 78m. La vitesse moyenne sur les 30m normatifs est ainsi de $V_{S,30}=309$ m/s, donc selon la classification de l'Eurocode 8 [4] au site UTC1 le sol est de classe C (dépôts profonds de sable

dense ou moyennement dense, de gravier ou d'argiles dures avec des profondeurs de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres).

Dans l'hypothèse du comportement élastique du sol, l'estimation de la fréquence fondamentale de vibration de ces colonnes de sol de différentes épaisseurs est : 2,94 Hz pour 28m et 1,12 Hz pour 78m [2].

Le forage sur le site UTC1 n'a pas dépassé les alluvions quaternaires (niveaux peu consolidés), ainsi sur ce site, l'épaisseur sédimentaire est plus importante. Bucarest est situé dans la Plaine Roumaine où le rocher (défini par $V_s \geq 3000\text{m/s}$) se trouve à une profondeur d'environ 1-1,5km [6]. Il y a donc une importante couche de sédiments qui suggère un effet de site plus basse fréquence.

Un effort national de construction d'une base de données géophysiques, géologiques et d'enregistrements sismiques est fait sur la plateforme créée dans le Projet SETTING (2021-2023) « Services thématiques intégrés dans le domaine de l'observation de la Terre – une plateforme nationale d'innovation » [7].

B. H/V – vibrations ambiantes

La méthode des rapports spectraux horizontaux sur vertical (H/V) [8], introduite par Nakamura (1989), est devenue un outil incontournable pour la caractérisation des effets de site et la microzonation sismique. Basée sur l'analyse des vibrations ambiantes, cette méthode permet d'estimer la fréquence fondamentale de résonance des sols à moindre coût, sans nécessiter de forages profonds ou d'essais sismiques actifs. Malgré sa large diffusion, les fondements théoriques et l'interprétation physique de la méthode font toujours l'objet de discussions [9], [10], [11].

Considérons un enregistrement triaxial des vibrations ambiantes au site étudié. On note $U_x(t)$, $U_y(t)$, $U_z(t)$ les mouvements du sol mesurés selon les axes horizontaux (x, y) et vertical (z). Après transformation de Fourier, le rapport spectral H/V est défini comme suit :

$$H/V(f) = \frac{\sqrt{H_1^2(f) + H_2^2(f)}}{2V(f)} \quad (1)$$

avec

$$H_1(f) = |F\{U_x(t)\}| \dots \dots \dots (2)$$

$$H_2(f) = |F\{U_y(t)\}| \dots \dots \dots (3)$$

$$V(f) = |F\{U_z(t)\}| \dots \dots \dots (4)$$

les spectres de Fourier des enregistrements des mouvements du sol selon les composantes horizontales et verticale.

Afin de réduire l'influence de signaux transitoires, ce rapport est calculé sur des fenêtres temporelles successives (typiquement 20 à 60 s), puis moyenné selon une procédure de type Welch [12]. Le pic observé sur le spectre H/V est généralement associé à la fréquence fondamentale de résonance f_0 de la colonne sédimentaire. Cette résonance résulte du piégeage des ondes de cisaillement dans les couches sédimentaires, produisant une amplification sélective du signal à certaines fréquences [13]. La position fréquentielle du pic est considérée comme étant robuste (bonne estimation de f_0) mais son amplitude est en revanche beaucoup plus difficile à relier à un facteur d'amplification quantitatif.

Dans le cadre de l'aléa sismique, la méthode H/V est utilisée pour estimer la fréquence fondamentale des sols et cartographier les zones d'amplification potentielle ; contraindre les modèles de sous-surface pour les calculs de réponse de site 1D, 2D ou 3D [14] et réaliser des microzonages sismiques à large échelle en contexte urbain [9], [15].

Son principal avantage est de fournir une information géophysique robuste et peu coûteuse, avec un maillage spatial beaucoup plus dense que celui permis par les investigations géotechniques classiques. Les limitations de la méthode incitent à l'utiliser comme un outil complémentaire et non exclusif, en association avec des études géotechniques, des simulations numériques ou des méthodes de corrélation sismique [11].

Les premières mesures de vibrations ambiantes au site UTC1 ont été réalisées en 2006 une équipe roumano-japonaise (UTCB et Tokyo Soil Research Co., Ltd.), le résultat de la méthode H/V est présenté en Fig.4. On observe un important contenu fréquentiel en longues périodes (basses fréquences), avec une série de pics dans l'intervalle 1-2s (i.e. 0,5-1Hz), et un pic clair à 5s (i.e. 0,2Hz).

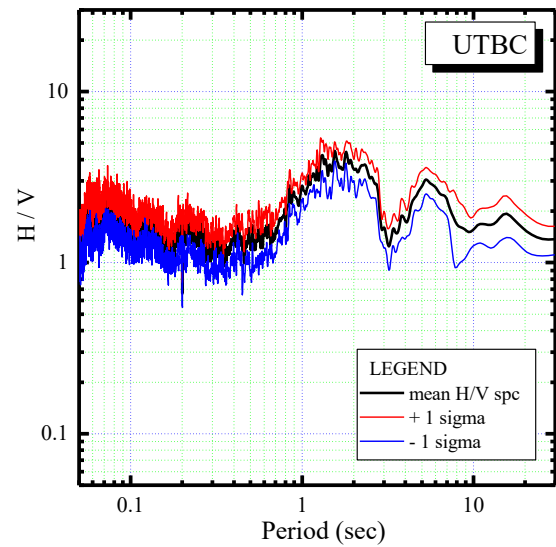


Fig. 4. H/V des vibrations ambiantes, mesures de 2006 [16]

En 2025 de nouvelles mesures ont été réalisées avec des équipements du Centre de recherche sur l'évaluation du risque sismique de l'UTCB : une station d'acquisition CityShark de Leas, France, et un capteur de vitesses LE-3D/5s MkIII de Reftek Systems, Canada, Fig. 5.



Fig. 5. UTC1 – mesurément de vibrations ambiantes, 2025

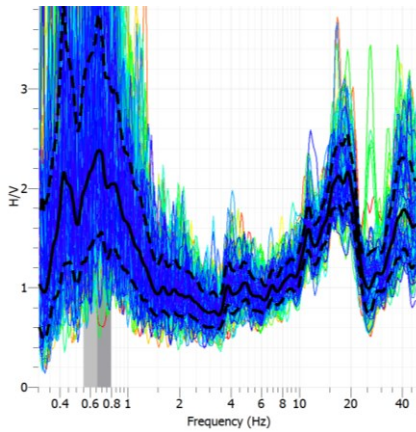


Fig. 6. H/V des vibrations ambiantes, mesures de 2025

3h d'enregistrement continu des vibrations ambiantes a ainsi été réalisé. L'analyse de ces enregistrements a été réalisée avec le logiciel Geopsy [17]. Le résultat est présenté en Fig.6. On identifie clairement deux pics basse fréquence à 0.41 Hz et 0.66 Hz (i.e. 1,5s et 2,4s) en bon accord avec les mesures de 2006.

C. H/V – enregistrements sismiques

La méthode H/V peut-être aussi utilisée sur des enregistrements sismiques [18]. La Fig. 7 présente un exemple de calcul à partir de l'enregistrement obtenu avec le capteur en surface du sol à la station UTC1 lors du séisme du 28.10.2018, magnitude 5,5 dont la source est localisée dans la région de Vrancea. Là encore, un pic de résonance fondamentale est observé vers 0,4Hz sur les deux composantes horizontales. La similarité entre les H/V des deux composantes montre que le site a un sous-sol formé de couches essentiellement tabulaires.

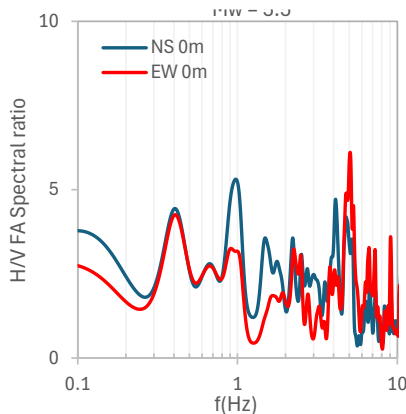


Fig. 7. H/V d'enregistrements sismiques, séisme de Vrancea, 28.10.2018, Mw=5,5

III. CONCLUSIONS

Cette étude met en évidence l'efficacité de la méthode H/V appliquée aux vibrations ambiantes pour caractériser la réponse dynamique des sols. Les résultats confirment la capacité de cette approche à identifier la fréquence fondamentale des dépôts sédimentaires et à fournir des informations pertinentes pour l'évaluation de l'aléa sismique local. Les résultats obtenus confirment la présence d'une fréquence de résonance fondamentale basse, directement liée à l'épaisseur importante des sédiments meubles. Ces observations constituent un apport précieux pour l'évaluation de l'aléa sismique local et la planification urbaine.

REMERCIEMENTS

Merci à l'Agence Japonaise de Coopération Internationale pour le projet déroulé en Roumanie, pour le don d'équipements et pour les mobilités de chercheurs roumains au Japon et de chercheurs japonais en Roumanie.

RÉFÉRENCES

- [1] M.M. Draghiceanu, Les tremblements de terre de la Roumanie et des pays environnants. Contribution à la théorie tectonique. Géologie Appliquée, L'Institut d'art graphiques Carol Göbl, Bucharest, 84p, 1896
- [2] A. Aldea, H. Yamanaka, C. Negulescu, T. Kashima, R. Radoi, H. Kazama, E. Calarasu, Extensive seismic instrumentation and geophysical investigations for site-response studies in Bucharest, Romani", Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, France, Paper Number: 69, 10p., 2006
- [3] A. Aldea, F. Pavel, E. Bertrand, R. Enache, Réponse sismique du sol, étude de cas : UTCB, Bucarest, Roumanie, 10p., 14èmes Journées de Fiabilité des Matériaux et des Structures, Angers, France, 2025
- [4] Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments, EN 1998 -1:2004
- [5] E. Calarasu, H. Kazama, C. Arion, C. Neagu, Velocity profile from borehole tests (PS logging), p.88-97 in: Seismic motions. Examples of application in earthquake engineering, Éditeur A. Aldea, Ed. MatrixRom, Bucarest, 2013
- [6] H. Yamanaka, A. Aldea, S. Fukumoto, N. Poiata, E. Albota, Results From Single-Station And Array Micro-tremor Measurements In Bucharest, Romania, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece, Paper 1522, 12p., 2007
- [7] A. Craiu, A. Aldea, V. Radulescu, C. Dragasanu, M. Ion, Integrated thematic services in the field of earth system observation- a national platform for innovation – SETTING, Proceedings 21st SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings, vol.21, p. 499-508, 2021, 10.5593/sgem2021/1.1/s05.090
- [8] Y. Nakamura, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. QR Railway Technical Research Institute, 30(1), 25–33, 1989
- [9] P.-Y. Bard, Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? Proceedings of the 2nd International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 1999
- [10] D. Fäh, F. Kind, D. Giardini, A theoretical investigation of average H/V ratios. Geophys. J. Int., 145(2), 535–549, 2001
- [11] S. Bonnefoy-Claudet, F. Cotton, P.-Y. Bard, The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review. Earth-Science Reviews, 79(3-4), 205–227, 2006
- [12] K. Konno, T. Ohmachi, Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. Bull. Seismol. Soc. Am., 88(1), 228–241, 1998
- [13] P.-Y. Bard, M. Bouchon, The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys. Bull. Seismol. Soc. Am., 75(2), 519-541, 1985
- [14] O. Rohmer, E. Bertrand, E. D. Mercerat, J. Régnier, M. Pernoud, P. Langlaude, M. Alvarez, Combining borehole log-stratigraphies and ambient vibration data to build a 3D Model of the Lower Var Valley, Nice (France). Eng. Geol., vol. 270, 2020
- [15] SESAME Project, Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. European Commission, Research Directorate General, 2004
- [16] A. Aldea, H. Yamanaka, S. Fukumoto, N. Poiata, E. Albota, E., Examples of invasive and non-invasive methods for estimation of shear-wave velocity profile in Bucharest, Proceedings of International Symposium on Seismic Risk Reduction. The JICA Technical Cooperation Project in Romania, Bucharest, p.131-142, 2007
- [17] M. Wathelet, J.-L. Chatelain, C. Cornou, G. Di Giulio, B. Guillier, M. Ohrnberger, A. Savvaidis, A., Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. Seismological Research Letters, 91(3), 1878--1889, doi: 10.1785/0220190360, 2020
- [18] J. Lermo, F.J.Chavez-Garcia, Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.83, No.5, p.1574-1594, 1993