

INSTALLATION D'UN FORAGE VERTICAL INSTRUMENTE DANS LA BASSE VALLEE DU VAR (NICE, FRANCE)

INSTALLATION OF A BOREHOLE VERTICAL ARRAY IN THE VAR VALLEY (NICE, FRANCE)

Nathalie DUFOUR¹, Jean-Baptiste PAYEUR², Etienne BERTRAND², Diego MERCERAT², Julie REGNIER², Vincent VANCRAENENBROECK³, Morgan ALLIAUME³, Frédéric CAPELLE³, Philippe LANGLAUDE², Michel PERNOUD², Hélène CALISSANO¹, Laurent BATILLIOT¹, Marlène COUDERT¹

¹ Cerema, UMR 7329 GEOAZUR, Aix-en-Provence, France

² Cerema, UMR 7329 GEOAZUR, Sophia-Antipolis, France

³ Cerema, Saint Quentin, France

RÉSUMÉ – Une instrumentation combinant des accéléromètres ou des vélocimètres va être mise en place dans les alluvions de la basse vallée du Var (sablo-graveleux, argileux), à Nice, une des régions les plus sismiques de France métropolitaine. Elle permettra l'enregistrement en continu de l'activité du site, entre et durant les crises sismiques. La caractérisation géotechnique du site est présentée.

ABSTRACT – An instrumentation combining accelerometric or velocimetric will be set up in the sediments of the lower Var valley (sand – rubbles – clay), in Nice, one of the french metropolitan area which is the most subject to earthquake hazard. It will provide long-term recordings in-between and during seismic crisis. Geotechnical parameters of the site are presented.

1. Introduction

Les caractéristiques dynamiques de la réponse d'un sol sont de plus en plus connues grâce à un nombre croissant de sites instrumentés à travers le monde (Zeghal et Elgamal, 2000). A partir des années 1950, aux Etats-Unis (Seattle, Washington) d'abord et au Japon (Tokyo), des stations de mesures de données sismiques ont été mis en place en fond de forage et en profondeur. Les données recueillies ont été employées pour étudier notamment les effets de site et analyser la réponse sismique des sites. Ces dispositifs préliminaires ont été suivis par des installations plus complètes de forages instrumentés notamment à Chiba (Japon), Lotung (Taïwan), Hualien (Taïwan), Port Island (Japon) et Treasure Island (Etats-Unis). Depuis les années 1980, les données provenant de forages instrumentés qui incluent des mesures de la pression interstitielle se sont largement développées (Wildlife Refuge (USA), Lotung (Taïwan)).

Ces expériences passées montrent que les enregistrements réalisés en forage offrent une source d'information intéressante pour évaluer notamment les effets de site, l'évolution des modules des sols, la liquéfaction ou encore calibrer des modèles constitutifs en vue de modélisation.

En France, seuls trois sites sont équipés de forages instrumentés (Guéguen et al., 2015) :

- Le site de Montbonnot près de Grenoble,
- Le site de Belle-Plaine en Guadeloupe,
- Le site de Cadarache.

Dans le cadre du projet PORTE, financé par la région PACA et des Fonds européens de développement régional (Feder), un quatrième réseau sismologique vertical va être installé à Nice, dans la basse vallée du Var. Il fera partie d'une plate-forme technique et innovante dédiée à l'observation environnementale permettant d'obtenir des enregistrements à long terme pendant et entre les crises sismiques. Le site d'implantation ainsi que le système sont présentés dans l'article.

2. Présentation du site

2.1 Localisation

Le dispositif de mesures sera situé dans la basse vallée du Var à Nice dans les Alpes Maritimes, une des régions les plus sismiques de France métropolitaine (Figure 1). La future station comportera trois capteurs (accéléromètres et/ou vélocimètres) situés en fond de forages et un capteur en surface. Pour le moment, deux sondages ont été réalisés pour d'une part caractériser le site et d'autre part accueillir deux des quatre capteurs.

2.2 Géologie de la basse vallée du Var

Le remplissage alluvial de la basse vallée du Var a une épaisseur qui évolue localement de 30-40 m en amont à 100-130 m en aval. Les alluvions sont essentiellement constituées de matériaux sablo-graveleux, intercalés de lentilles et horizons argileux épars, et dans lesquels s'écoule une nappe libre superficielle dont le toit est peu profond.

Les alluvions reposent sur un conglomérat du Pliocène considéré comme le substratum.

La valeur moyenne de la vitesse des ondes S dans les 30 premiers mètres des alluvions est estimée à $V_{s,30} = 235$ m/s ce qui correspond à un sol de type C selon l'Eurocode (European Committee for Standardisation, 2004).

3. Reconnaissances géotechniques du site

3.1 Description du sol

Deux sondages carottés SC1 et SC2, de 10 et 31 m de profondeur respectivement, ont été effectués à Nice pour d'une part caractériser le sol en place et d'autre part servir de forages accueillant l'instrumentation future. Les sols sont décrits dans le Tableau 1. Les valeurs des poids volumiques et des teneurs mesurées sont aussi données dans le Tableau 2.

Tableau 1. Description des sols à partir de la surface

Sol	Profondeur (m)	Description
Sable et graviers (1)	0.0– 12.5	Couche très hétérogène – Sable propre aux graviers (diamètre maximal de 120 mm)
Limons – Argile organique	12.5- 17.5	Limons sableux et argile limoneuse organique
Sable et graviers (2)	17.5- 28.5	Couche très hétérogène – Sable propre aux graviers (diamètre maximal de 100 mm)

Tableau 2. Description des sols à partir de la surface, poids volumique et teneur en eau

Sol	Profondeur (m)	Epaisseur (m)	Poids volumique (kN/m^3)	Teneur en eau (%)
Sable et graviers	0.0– 12.5	12.5	$13.9 \leq \gamma \leq 25.8$	$6.0 \leq w \leq 12.7$
Limons – Argile organique	12.5- 17.5	5.0	$17.4 \leq \gamma \leq 20.1$	10.5
Sable et graviers	17.5- 28.5	11.0	22.5	-

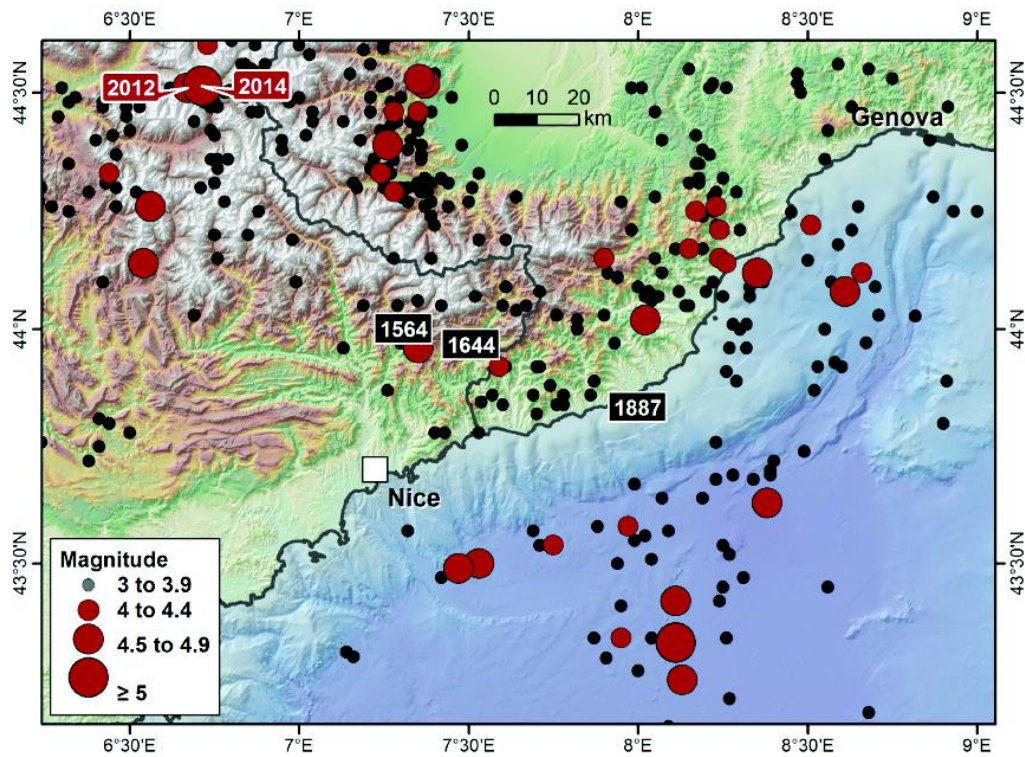


Figure 1. Sismicité régionale mesurée – catalogue BCSF (1960-2015). La ville de Nice est représentée par un carré blanc. Les séismes de Barcelonnette de 2012 et 2014 sont indiqués par des rectangles rouges tandis que trois évènements historiques sont indiqués par des rectangles noirs. D'après (Fernandez Lorenzo et al., 2017).

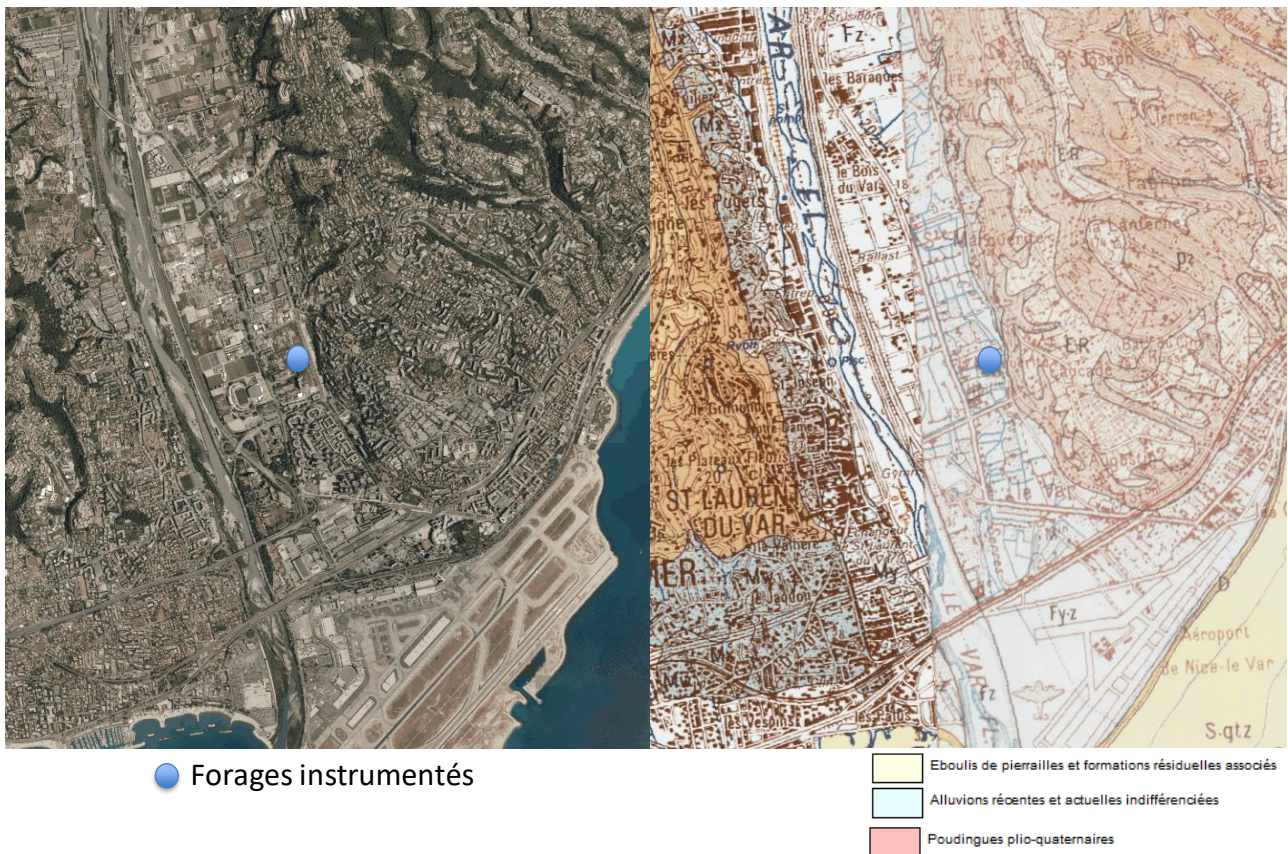


Figure 2. Le site implantation des forages instrumentés : à gauche l'image satellite de la zone, à droite la carte géologique au 1/50 000^{ème}.

3.2 Reconnaissances in-situ

Des essais pressiométriques ont été réalisés à proximité de la zone d'implantation de la future station de mesures (Fondasol, 2016) dans les forages SP1, SP2 et SP3 (Figure 5) de 20 m de profondeur chacun selon le protocole de la norme NF EN ISO 22476-4. Vingt-quatre essais ont été réalisés dans l'horizon Sable et graviers (1), huit dans l'horizon Limons – Argile organique et cinq dans la partie supérieure de l'horizon Sable et graviers (2). Les valeurs moyennes des modules pressiométriques E_m et pression limite nette p_l^* des différents horizons sont synthétisés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Paramètres pressiométriques

Sol	E_{m_min} (MPa)	E_{m_moy} (MPa)	E_{m_max} (MPa)	$p_l^*_{min}$ (MPa)	$p_l^*_{moy}$ (MPa)	$p_l^*_{max}$ (MPa)
Sable et graviers (1)	1.7	7.8	370	0.2	1.7	4.9
Limons – Argile organique	0.8	3.8	12.9	0.1	0.7	2.3
Sable et graviers (2)	11.8	19.9	34.7	1.1	2.1	2.9

L'horizon Sable et graviers (1) présente une forte hétérogénéité illustrée par les valeurs des paramètres pressiométriques tandis que l'horizon Limons – Argile organique est relativement homogène.

3.3 Essais en laboratoire

Des essais triaxiaux cycliques à déformation et fréquence contrôlées ont été réalisés en laboratoire sur des échantillons de sol provenant des sondages carottés SC1 et SC2 dans le but de déterminer les propriétés dynamiques des différents horizons (cf. Tableau 1). Trois échantillons ont été testés : deux échantillons ont été reconstitués à partir du sable prélevé à 0,8 m de profondeur, le troisième est composé de sable silteux prélevé à 20,0 m de profondeur.

L'essai consiste à appliquer plusieurs séquences successives de cycles en condition non drainée dans une gamme de déformations axiales comprises entre 10^{-4} et 10^{-2} . L'évolution de la pression interstitielle est mesurée tout au long de l'essai.

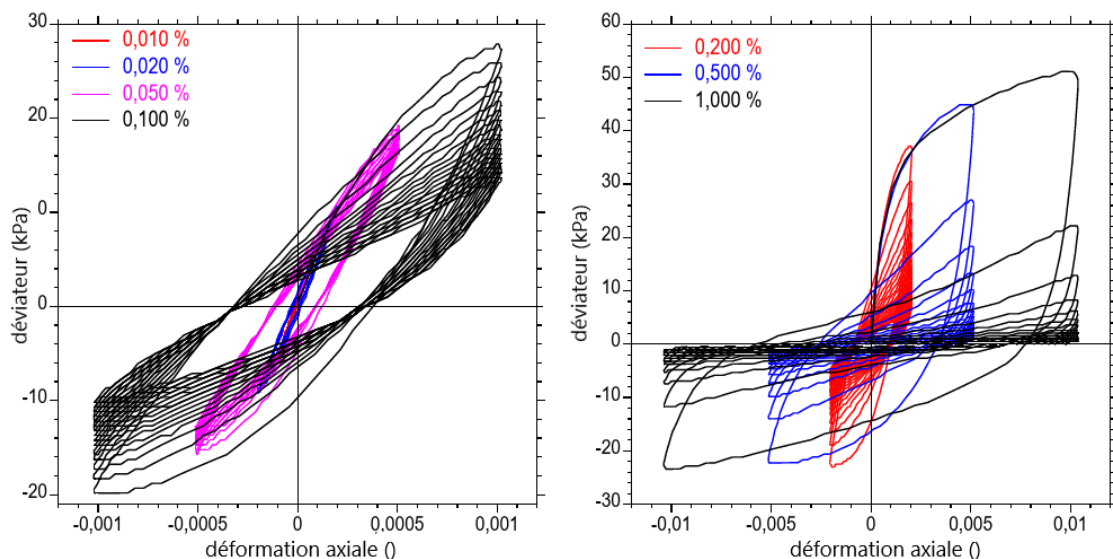


Figure 3. Evolutions du déviateur des contraintes en fonction de la déformation axiale pour des séquences successives de cycles non drainés de déformation axiale : 0.010 % - 0.020 % - 0.050 % - 0.100 % - 0.200 % - 0.500 % - 1.000 % sur un échantillon de sable (0.8 m de profondeur).

Un exemple d'évolution du déviateur des contraintes $q = \sigma'_a - \sigma'_r$ (σ'_a et σ'_r sont les contraintes effectives axiale et radiale) en fonction de la déformation axiale obtenu à partir d'un essai triaxial cyclique sur un échantillon sableux (0.8 m de profondeur) est présenté sur la Figure 3.

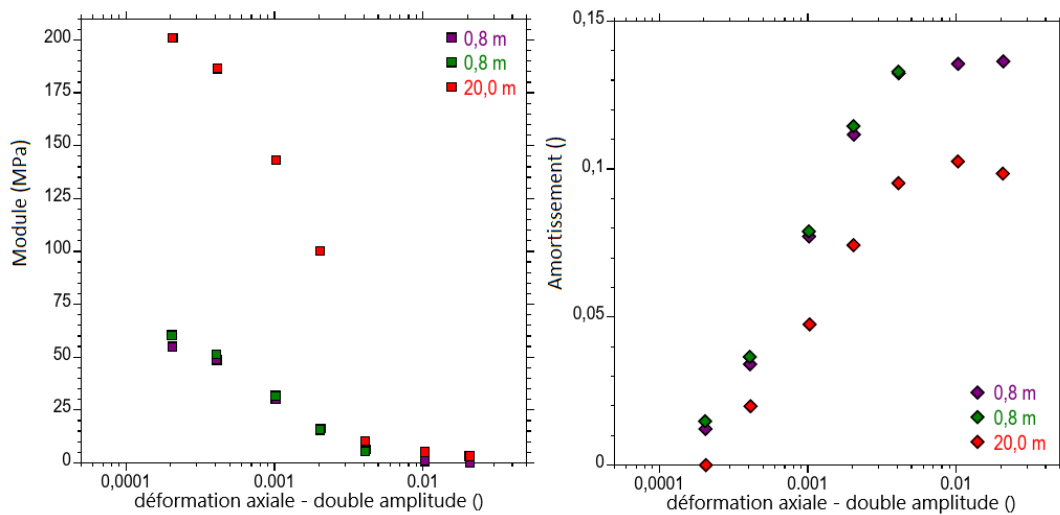


Figure 4. Evolution du module sécant (à gauche) et de l'amortissement (à droite) en fonction de la déformation axiale (double amplitude).

Une approximation en séries de Fourier des courbes expérimentales permet d'effectuer l'identification précise du module d'Young sécant et de l'amortissement (Serratrice, 2016) et d'obtenir les courbes de la Figure 6.

3.4 Mesures géophysiques

Deux campagnes d'acquisition de données sismiques ont été réalisées près des forages SC1 et SC2.

Dans une première campagne, des données de bruit de fond ont été enregistrées en utilisant onze capteurs vélocimétriques (Le3D 5 sec) répartis uniformément sur trois réseaux circulaires concentriques de 5, 20 et 50 m de rayon (voir Figure 5) enregistrant pendant une heure avec une fréquence d'échantillonnage de 150 Hz.



Figure 5. Position des stations du réseau sismique (triangles) et du profile MASW. Les forages SC1 et SC2 sont représentés par les diamants orange et vert. Les forages pressiométriques SP1, SP2 et SP3 sont visualisés par les diamants jaune, bleu et rouge.

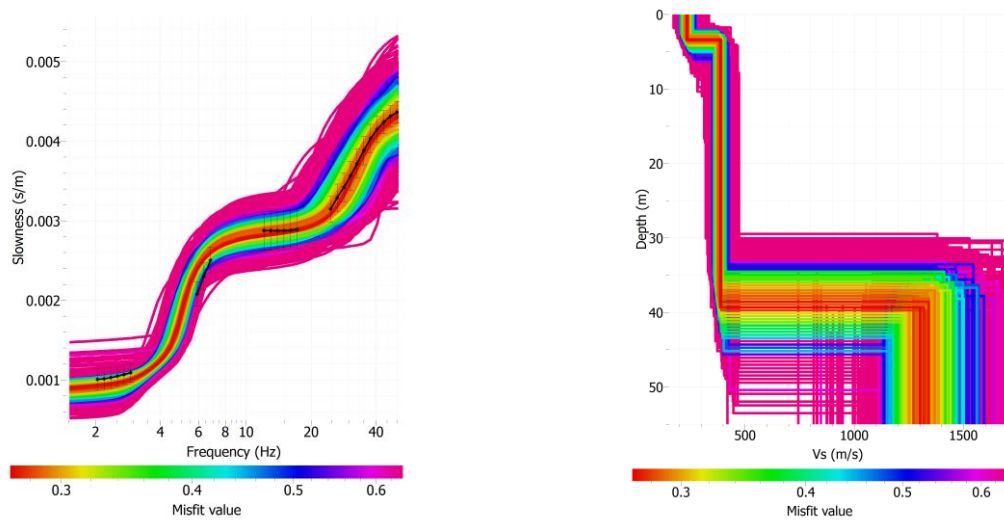


Figure 6. Gauche : Courbe de dispersion calculée pour le site (points noirs) et courbes de dispersions calculées pour chaque modèle (l'échelle de couleur correspond au *misfit*). Droite : Modèles de vitesse Vs avec des valeurs de *misfit* satisfaisantes (< 0.6), prenant en compte trois couches homogènes.

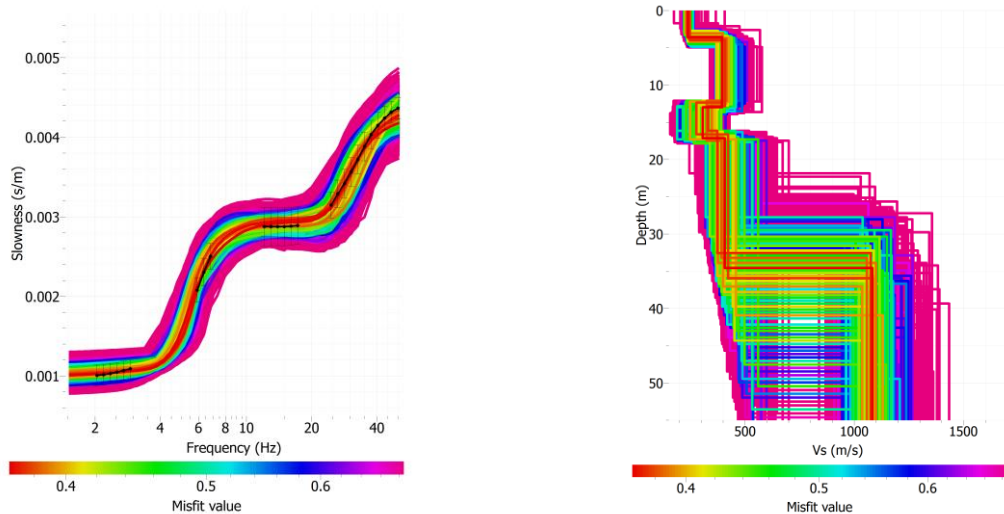


Figure 7. Courbe de dispersion calculée pour le site (points noirs) et courbes de dispersions calculées pour chaque modèle (l'échelle de couleur correspond au *misfit*). Droite : Modèles de vitesse Vs avec des valeurs de *misfit* satisfaisantes (< 0.6) prenant en compte cinq couches homogènes incluant une inversion de vitesse aux alentours de 12 m.

La seconde campagne de mesure correspond à un profil MASW classique constitué de deux réseaux linéaires de 24 géophones (fréquence de coupure de 4.5 Hz) avec une distance inter-capteur de 1.5 m pour le premier (longueur totale de 34.5 m), de 3.0 m pour le second (longueur totale de 69 m) et d'une fréquence d'échantillonnage de 500 Hz. Une masse de 10 kg a été utilisée comme source sismique. La bande de fréquence considérée, en combinant les différentes techniques, est comprise entre 1 et 40 Hz et permet une inversion détaillée des données de dispersion d'ondes de surface afin d'évaluer la position du substratum (correspondant ici aux conglomérats consolidés des collines niçoise situées à proximité et dont les vitesses d'onde S avoisinent les 1200 m/s) ainsi que caractériser les vitesses sismiques des matériaux du bassin sédimentaire.

L'analyse des données a été réalisée en utilisant le logiciel Geopsy (Wathelet et al., 2008). Les données du réseau d'acquisition du bruit de fond ambiant ont été traitées avec les techniques SPAC et FK qui permettent, respectivement, une analyse à des fréquences basses (< 5 Hz) et modérées (5 – 15 Hz). Une analyse FK linéaire a été utilisée pour le profil MASW. L'inversion des courbes de dispersion est réalisée à l'aide

d'un algorithme non-linéaire de voisinage (Wathelet et al., 2008) et en prenant en compte la fréquence de résonance de 2.5 Hz calculée pour ce site. Après plusieurs essais, la colonne de sol a été découpée en trois couches homogènes, ce qui nous donne une concordance satisfaisante avec les données de dispersion. La colonne de sol, résultant du processus d'inversion (voir Figure 6), et utilisant uniquement les données géophysiques, est constituée d'une première couche de 3 à 4 m d'épaisseur de matériaux non consolidés caractérisés par des vitesses V_s d'environ 250 m/s, suivie par une épaisse couche de grave et de sable ($V_s \sim 380$ m/s) allant jusqu'à 30 – 35 m de profondeur où le substratum ($V_s \sim 1200$ m/s) est trouvé.

En allant plus loin, et en prenant en compte les résultats des essais géotechniques in-situ (réalisées dans les forages SP1, SP2 et SP3) ainsi que la caractérisation des échantillons de sol réalisée en laboratoire (forages SC1 et SC2) (voir Tableaux 1, 2 et 3, Figures 3 et 4), le processus d'inversion a été contraint afin d'autoriser une inversion de vitesse sismique (i.e. couche à faible vitesse sismique) entre 10 et 15 m de profondeur (limons sableux et argiles limoneuses organiques décrits dans les sondages SC1 et SC2). Ce nouveau modèle (voir Figure 7), autorisant l'inversion de vitesse, a une concordance très satisfaisante avec les données de dispersion et peut être considéré comme le modèle privilégié pour ce site. Il est constitué d'une première couche de matériaux non consolidés de 3 à 4 m d'épaisseur caractérisés par des vitesses V_s proches de 250 m/s, suivie par une épaisse couche de graves et de sable ($V_s \sim 420$ m/s) allant jusqu'à 35 – 45 m de profondeur où le substratum est trouvé mais entrecoupée par une fine couche d'environ 5 m d'épaisseur de vitesse V_s plus faible d'environ 350 m/s. On peut noter cependant que l'incertitude sur la profondeur du substratum augmente par rapport au précédent modèle.

4. Conclusions

Par son contexte géodynamique, sa géométrie extrême, sa concentration d'enjeux humains, urbains et économiques, la région niçoise constitue un laboratoire naturel pour étudier les risques naturels. C'est en particulier vrai pour le risque sismique, la région étant une des plus concernée en France métropolitaine.

Un des objectifs du projet PORTE, soutenu par la région PACA et le fonds européen FEDER, est la création d'une plateforme technique et innovante dédiée à l'observation environnementale de la région. Dans ce cadre, la réalisation d'un réseau vertical sismologique dans la basse vallée du Var à Nice est proposée.

Des essais in-situ et en laboratoire ont tout d'abord été réalisés pour caractériser le site. Des mesures géophysiques (MASW et AVA) ont permis de mettre en évidence un profil de vitesse des ondes S tandis que des essais en laboratoire ont montré le comportement dynamique des alluvions de la basse vallée du Var.

Les données recueillies par le futur dispositif viendront compléter celles mesurées par un ensemble d'instrumentations sismologiques déjà présentes dans la basse vallée du Var, comme celles du Réseau Accélérométrique Permanent (RAP). Dans ce cadre, le comportement dynamique d'un bâtiment situé à proximité immédiate des forages et en cours de construction sera suivi. L'interaction sol-structure pourra alors être étudiée en détail.

La Figure 8 montre l'ensemble du dispositif de mesures final composé de trois forages accueillant en fond de trou des capteurs (accéléromètres / vélocimètres) à différentes profondeurs au niveau des alluvions et du substratum et un capteur en surface. Les enregistrements mesurés permettront d'étudier plus précisément la propagation des ondes le long de la colonne dans le but de mieux comprendre la réponse sismique du site et du remplissage alluvial.

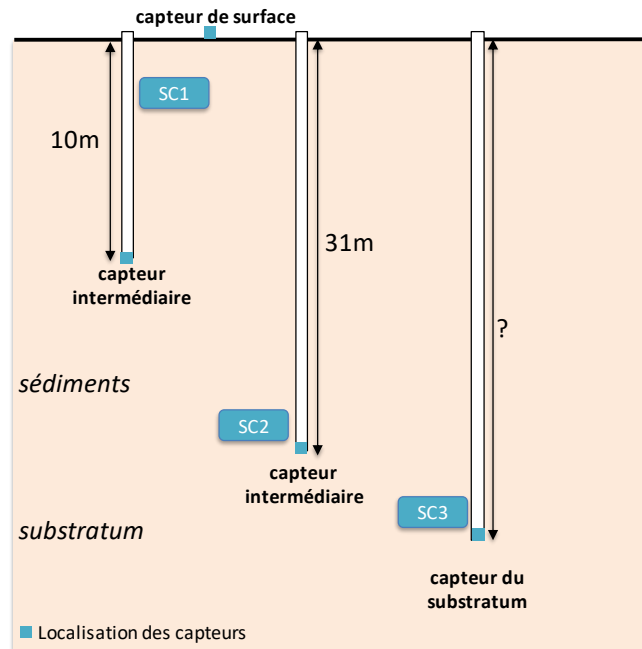


Figure 8. Schéma de l'installation future.

5. Références bibliographiques

- Bonilla L F, Gueguen P., Lopez-Caballero F, Mercerat E. D and Gelis C (2017). Prediction of non-linear site response using downhole array data and numerical modeling: The Belleplaine (Guadeloupe) case study. Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C DOI10.1016/j.pce.2017.02.017
- European Committee for Standardisation, 2004. EN 1998-1: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.
- Fernandez Lorenzo G. W., Santisi d'Avila M. P., Deschamps A., Bertrand E., Mercera tE. D., Foundotos L. and Courboux F. (2017). Numerical and empirical seismic response simulation of buildings: the case study of Nice prefecture. Earthquake Spectra, 2017, DOI 10.1193/042216EQS064M
- Fondasol (2016). Construction de l'Institut Méditerranéen du Risque, de l'Environnement et du Développement Durable (IMREDD), Nice, Mission G2 – Phase AVP, 53p., juin 2016
- Guéguen P., Langlais M., Douste-Bacqué I., and the members of the RAP scientific board (2015). Recent scientific results from the instrumented sites and structures led by the French Accelerometric Network : examples of the Grenoble and Belleplaine vertical arrays, Proceedings of the 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November, Christchurch, New Zealand.
- Serratrice J. F (2016). Mesures des propriétés cycliques des sols limoneux ou argileux au laboratoire, Actes des Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 6-8 July, Nancy, France.
- Wathelet, M. (2008) An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling. Geophysical Research Letters, 35, L09301
- Wathelet, M., Jongmans D., Ohrnberger M., and Bonnefoy-Claudet S. (2008). Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over Vs inversion. Journal of Seismology, 12, 1-19.
- Zeghal M., Elgamal A.W. (2000). A review of site seismic response using vertical arrays, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, 30 January - 4 February, Auckland, New Zealand.