



**HAL**  
open science

## Dans la catégorie des méthodes de caractérisation des V S 30 et classes de sol, le gagnant est... : Principaux résultats du benchmark “ InterPacific ”

Fabrice Hollender, Cécile Cornou, Brady Cox, Flora Garofalo, Sebastiano Foti, Pierre-Yves Bard, Matthias Ohrnberger, Aline Dechamp, Christophe Vergniault, Deborah Sicilia

### ► To cite this version:

Fabrice Hollender, Cécile Cornou, Brady Cox, Flora Garofalo, Sebastiano Foti, et al.. Dans la catégorie des méthodes de caractérisation des V S 30 et classes de sol, le gagnant est... : Principaux résultats du benchmark “ InterPacific ” . 9ème Colloque National AFPS2015, AFPS / IFSTTAR, Nov 2015, Marne-la-Vallée, France. insu-01742653

**HAL Id: insu-01742653**

**<https://insu.hal.science/insu-01742653>**

Submitted on 25 Mar 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

## Dans la catégorie des méthodes de caractérisation des $V_{S30}$ et classes de sol, le gagnant est... : Principaux résultats du benchmark « InterPacific »

**Fabrice Hollender\***,\*\* – **Cécile Cornou\*\*** – **Brady Cox\*\*\*** – **Flora Garofalo\*\*\*\*** – **Sebastiano Foti** – **Pierre-Yves Bard\*\*** – **Matthias Ohrnberger\*\*\*\*\*** – **Aline Dechamp\*\*\*\*\*** – **Christophe Vergniault\*\*\*\*\*** – **Deborah Sicilia\*\*\*\*\***  
(+ de nombreux autres collaborateurs)

- \* CEA Cadarache, F-13108, St Paul-lez-Durance, France, [fabrice.hollender@cea.fr](mailto:fabrice.hollender@cea.fr)
- \*\* Univ. Grenoble Alpes, ISTERre, F-38041 Grenoble, France
- \*\*\* University of Texas, 301 E. Dean Keeton Stop C1792, Austin TX 78712, USA
- \*\*\*\* Politecnico di Torino, c.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italie
- \*\*\*\*\* University of Potsdam, Karl-Liebknecht-Str. 24, 14476 Golm, Allemagne
- \*\*\*\*\* CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France
- \*\*\*\*\* EDF CEIDRE, 905, Av. du Camp de Menthe, F-13097 Aix-en-Provence, France

---

**RÉSUMÉ.** L'utilisation de méthodes de caractérisation fiables pour la caractérisation des sites (détermination des classes de sols, des  $V_{S30}$ , de profils de vitesse...) est un enjeu majeur dans de nombreux cas : application des EC8, caractérisation de sites... Les méthodes classiquement utilisées en géotechnique (cross-hole, down-hole) sont onéreuses et impliquent la réalisation de forage(s). D'autres méthodes, basées sur l'analyse de la dispersion des ondes de surfaces sont non-invasives, mais leur traitement demande un niveau certain d'expertise et leur emploi a longtemps été critiqué. Afin de comparer et d'analyser les écarts entre ces différentes approches, trois sites ont bénéficié de plusieurs mesures « invasives » et « non-invasives » traitées par plusieurs équipes internationales dans un contexte de benchmark en aveugle (projet « InterPacific »). La variabilité obtenue entre les résultats des méthodes invasives est plus grande que celle à laquelle nous nous attendions initialement. Inversement, et même si elles ne peuvent rivaliser en termes de résolution verticale, les méthodes non-invasives ont produit des résultats beaucoup moins dispersés que ce à quoi nous nous attendions. En termes de détermination du  $V_{S30}$ , les écarts-types obtenus sont équivalents entre méthodes invasives et non-invasives, voire inférieurs pour les méthodes non-invasives.

**ABSTRACT.** The use of reliable characterization methods for site characterization (determination of soil classes,  $V_{S30}$ , velocity profiles ...) is a major issue in many cases: application of EC8, site characterization... The methods conventionally used in geotechnics (cross-hole, down-hole) are expensive and need the drilling of boreholes. Other methods, based on the analysis of the dispersion of surface waves are non-invasive, but their processing requires a certain level of expertise and their use has long been criticized. To compare and analyze the differences between these different approaches, three sites benefited from several "invasive" and "non-invasive" measurements, processed by various teams within an international benchmark in a blind context ("InterPacific" project). The variability between results obtained with invasive methods is larger than what we expected initially. Conversely, even if they cannot reach the same vertical resolution, non-invasive methods have produced results much less scattered than what we expected. In terms of  $V_{S30}$  determination, the resulting standard deviations are equivalent between invasive and non-invasive methods, or even lower for non-invasive methods.

**MOTS-CLÉS :**  $V_{S30}$ , classes de sol, méthodes invasives et non-invasives, caractérisation de site, ondes de surface, benchmark.

**KEYWORDS :**  $V_{S30}$ , soil classes, invasive and non-invasive methods, site characterization, surface waves, benchmark.

---

## 1. Introduction

La vitesse de propagation des ondes de cisaillement est le paramètre le plus important pour la qualification des effets de site. Il est donc nécessaire de pouvoir bénéficier de méthodes de caractérisation fiables et ce, à différents niveaux de précision : depuis la « simple » détermination de classes de sols (application de réglementations parasismiques de type EC8) ou du paramètre  $V_{s30}$ , jusqu'à la caractérisation approfondie de profils de vitesse jusqu'au substratum rocheux pour des sites d'installations industrielles sensibles.

Les méthodes classiquement utilisées en géotechnique, réputées comme étant la référence (cross-hole, down-hole,... voir Figure 1) sont onéreuses et impliquent la réalisation de forage(s). On parle ici de « méthodes invasives ».

D'autres méthodes, basées sur l'analyse de la dispersion des ondes de surfaces (issues des vibrations ambiantes : méthodes passives, ou générées artificiellement : méthodes actives) sont dites « non-invasives », mais leur traitement demande un niveau certain d'expertise. Outre l'acquisition des données, elles impliquent dans un premier temps l'établissement de « courbes de dispersion » (variation de la vitesse de phase des ondes de surface -Rayleigh ou Love- en fonction de la fréquence), puis, dans un deuxième temps, l'inversion de ces courbes de dispersion en profils de vitesses proprement dits (voir Figure 2). Par ailleurs, l'emploi de ces méthodes dites « non-invasives » a longtemps été critiqué.

Afin de comparer et d'analyser les écarts entre ces différentes approches, le projet « InterPacific » (INTERcomparison of methods for site PARameter and veloCITY profile Characterization) a été mené dans le cadre des projets SIGMA et CASHIMA. Trois sites (« soft soil », « stiff soil », « hard rock ») ont bénéficié de plusieurs mesures « invasives » réalisées par plusieurs équipes, de même que des mesures « non-invasives » traitées par 14 équipes internationales dans un contexte de benchmark en aveugle.

## 2. Sites-test choisis et des mesures réalisées.

Trois sites distincts ont été choisis, en cherchant à varier au maximum les caractéristiques de sols :

- un site « soft soil », localisé en Italie (région d'Emilie Romagne) sur la commune de Mirandola,
- un site « stiff soil », localisé en France dans la ville de Grenoble,
- un site « hard rock », également localisé en France, sur le Centre CEA de Cadarache (commune de Saint Paul lez Durance).

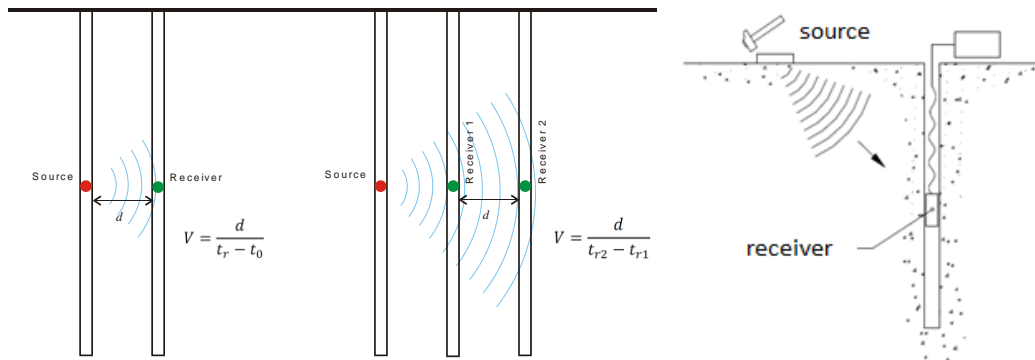
La description lithologique de ces trois sites est communiquée Figure 3 (ces logs n'ont pas été transmis aux participants du benchmark puisqu'il s'agissait d'un exercice « en aveugle »).

Concernant les mesures non-invasives, un ensemble de données a été acquis sur chaque site, tant avec des techniques « actives » utilisant une masse comme source sismique (mesures dites MASW pour « Multichannel Analysis of Surface Waves ») que des techniques passives en réseaux utilisant les vibrations ambiantes (mesures dites AVA pour « Ambient Vibration Array »).

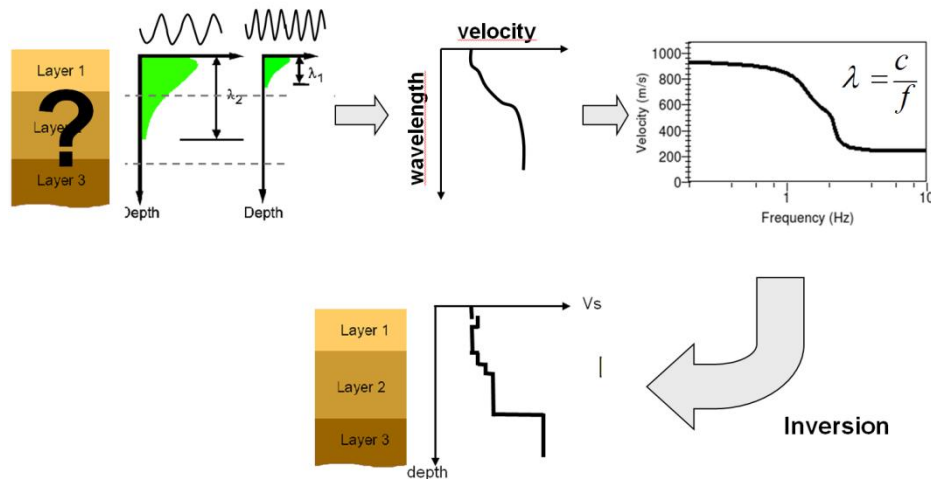
Les mesures MASW ont été acquises avec un dispositif de 24 à 48 géophones, tant en polarisation verticale (pour la mesure des ondes de Rayleigh) qu'en polarisation horizontale (pour la mesure des ondes de Love) en utilisant des inter-traces de 0,5 à 2 m (selon les sites).

Les mesures AVA ont été acquises en utilisant un maximum de 16 sismomètres large-bande à trois composantes, disposés en de nombreux réseaux de différentes tailles (ouvertures de 10 m à 800 m), utilisant différentes géométries (circulaires, triangulaires ou en forme de « L »), le but étant de couvrir un maximum de « pratiques d'acquisition » différentes.

L'ensemble de ces mesures a été communiqué à 14 équipes dont la liste est donnée Tableau 1 afin qu'elles procèdent au traitement.



**Figure 1.** A gauche : principe des mesures « cross-hole », nécessitant la réalisation de 2 à 3 forages. A droite : principe des mesures « down-hole » nécessitant la réalisation d'un forage.



**Figure 2.** Principe d'acquisition et de traitement des méthodes dites « non-invasives » basées sur la détermination de courbes de dispersion des ondes de surfaces, puis leur inversion en profils de vitesse.

Concernant les méthodes invasives, le site de Mirandola disposait déjà de deux forages d'une profondeur de 120 m. Sur le site de Grenoble, trois forages d'une profondeur de 50 m ont été réalisés pour les besoins du projet Interpacific ; de même que sur Cadarache (un forage de 50 m + deux forages de 32 m). Dans le cadre du projet InterPacific, trois sociétés différentes ont réalisé de manière indépendante des mesures sur les trois sites-test. Chaque société a réalisé, puis interprété, ses mesures cross-hole et down-hole ; l'une d'entre elle a également réalisé des mesures PSSL. A ces études s'ajoutent l'analyse réalisée par l'Université du Texas et des études précédentes réalisées sur le site de Mirandola (cf. Tableau 1).

Les mesures invasives ont été traitées de manière complètement indépendante des mesures non-invasives. La présentation commune des deux ensembles de résultat à l'ensemble des deux groupes n'a été faite que lors du workshop de restitution des résultats.

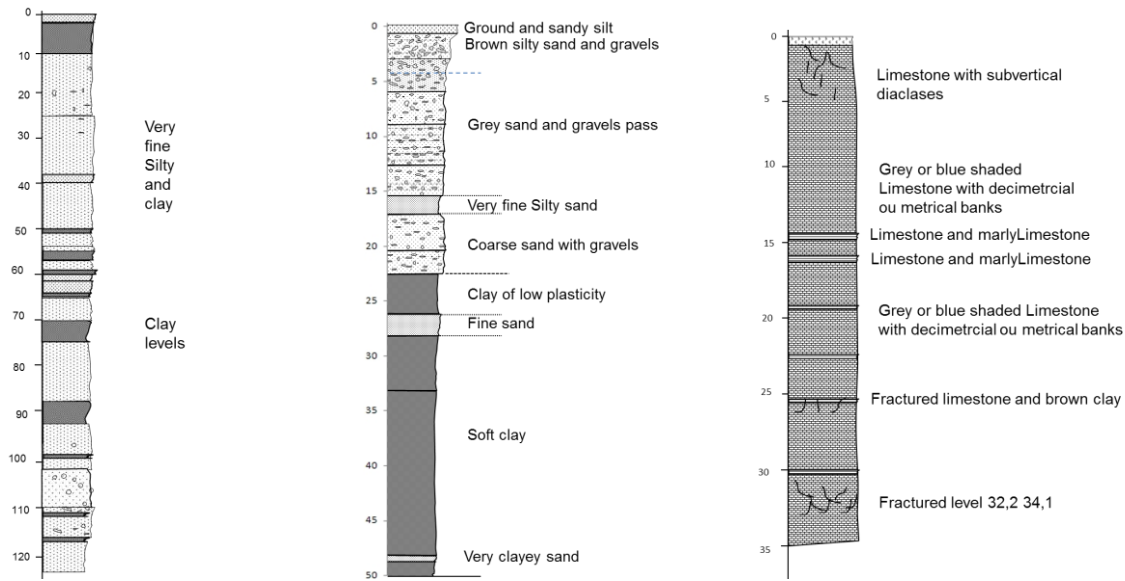


Figure 3. Logs lithologiques des trois sites tests. De gauche à droite : Mirandola, Grenoble, Cadarache.

Tableau 1. Liste des équipes ayant participé au benchmark en traitant les données non-invasives.

ID	Label	Participants	Pays
1	MU	Michael Asten, Monash University	Australia
2	CE	CEREMA	France
3	IST1	IST1 – Cornou, ISTerre	France
4	UT	Brady Cox, University of Texas	USA
5	INGV	Giuseppe di Giulio, INGV	Italy
6	BFO	Thomas Forbriger, Black Forest Observatory	Germany
7	Geom	Koichi Hayashi, Geometrics	USA
8	IST2	Bertrand Guiller, ISTerre	France
9	KU	Shinichi Matsushima, Kyoto University	Japan
10	TT	Hiroaki Yamanaka, Titech	Japan
11	GV	Antony Martin, Geovision	Italy
12	SED	Valerio Poggi, SED ETH	Switzerland
13	PU	Mathias Ohrnberger, Postdam University	Germany
14	PT	Politecnico di Torino	Italy

Tableau 2. Liste des équipes/société ayant participé à l'acquisition et/ou au traitement de données Invasives.

ID	Société	Mirandola	Grenoble	Cadarache	Note
1	Société 1 (CH+DH+PSSL)	X	X	X	
2	Société 2 (CH+DH)	X	X	X	
3	Société 3 (CH+DH)	X	X	X	
4	Université du Texas	X	X	X	a utilisé les données acquises par la Société 1.
5	Region d'Emilia Romagna	X			
6	UniTo-PoliTo	X			
7	INGV	X			

### 3. Résultats de l'application des méthodes non-invasives

Les Figures 4 à 6 présentent les résultats obtenus par les participants du benchmark pour les trois sites-test lors d'une itération de traitement unique, réalisée « en aveugle ». Sur chaque figure, on présente les courbes de dispersions obtenues, de même que le résultat de l'inversion en profil de vitesse. Nous avons demandé aux participants de communiquer leur meilleure estimation du profil de vitesse (selon leur propre jugement). Ce sont ces profils qui sont représentés. Parmi le très large ensemble de données mis à disposition des participants (différentes géométries, différentes ouvertures, méthodes actives ou passives...), chaque équipe a choisi son propre « sous-ensemble » de données en fonction de ses propres codes ou pratiques. Ainsi, certaines équipes n'ont utilisé que des données passives ou au contraire actives, d'autres ont traité l'ensemble des données.

On observe que les résultats obtenus en termes de courbes de dispersion sont cohérents entre les différentes équipes pour les sites de Mirandola et Grenoble. Pour Mirandola, les courbes qui se trouvent au-dessus du paquet principal de courbes sont en fait des modes supérieurs des ondes de Rayleigh et ne sont donc pas de mauvaises estimations. Dans le cas de Cadarache, les courbes de dispersion sont aussi très cohérentes jusqu'à 30 Hz. Au-dessus, la dispersion est plus grande que pour les autres de sites, mais une part de cette dispersion est à attribuer à l'hétérogénéité des formations les plus superficielles sur ce site (les petits réseaux AVA et le MASW n'ayant pas pu être réalisés au même endroit compte tenu des contraintes locales (végétation notamment)).

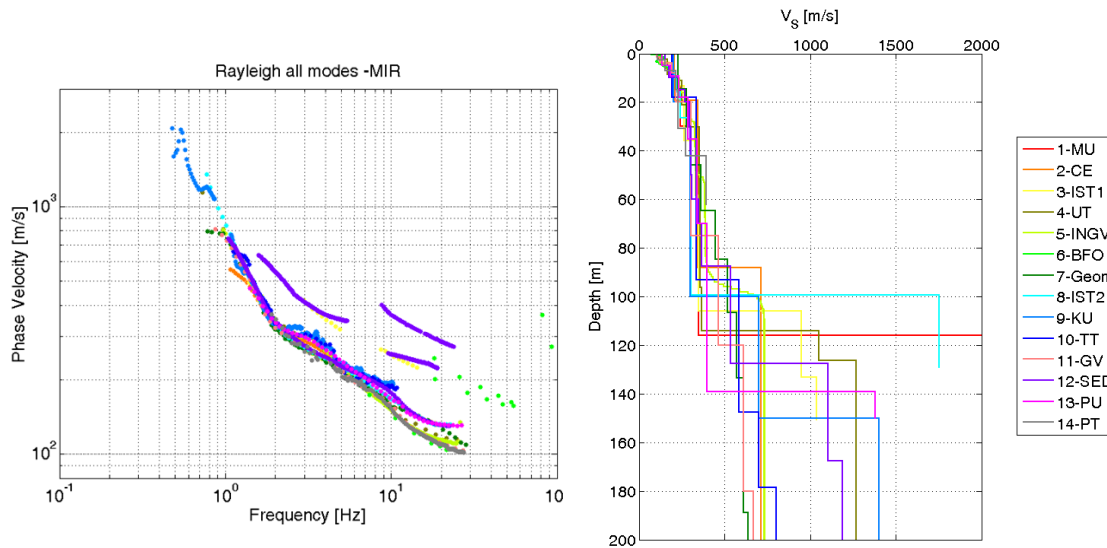
Dans le cas de Grenoble, on peut constater que la courbe de dispersion présente un minimum local à environ 5 Hz, signe de la probable présence d'une couche à faible vitesse.

En analysant maintenant les profils de vitesses obtenus, on constate un très bon accord pour Mirandola jusqu'à environ 80 m. En dessous, on constate que la profondeur du « bedrock » est plus difficilement identifiée, avec des valeurs allant de 90 à 150 m. Il est à noter que Mirandola est le seul site où le bedrock était « atteignable » avec les données non-invasives mises à disposition (dans le cas de Grenoble, le bedrock était trop profond pour les ouvertures de réseaux mis en œuvre, quant à Cadarache, on se trouve dans le bedrock dès la surface...).

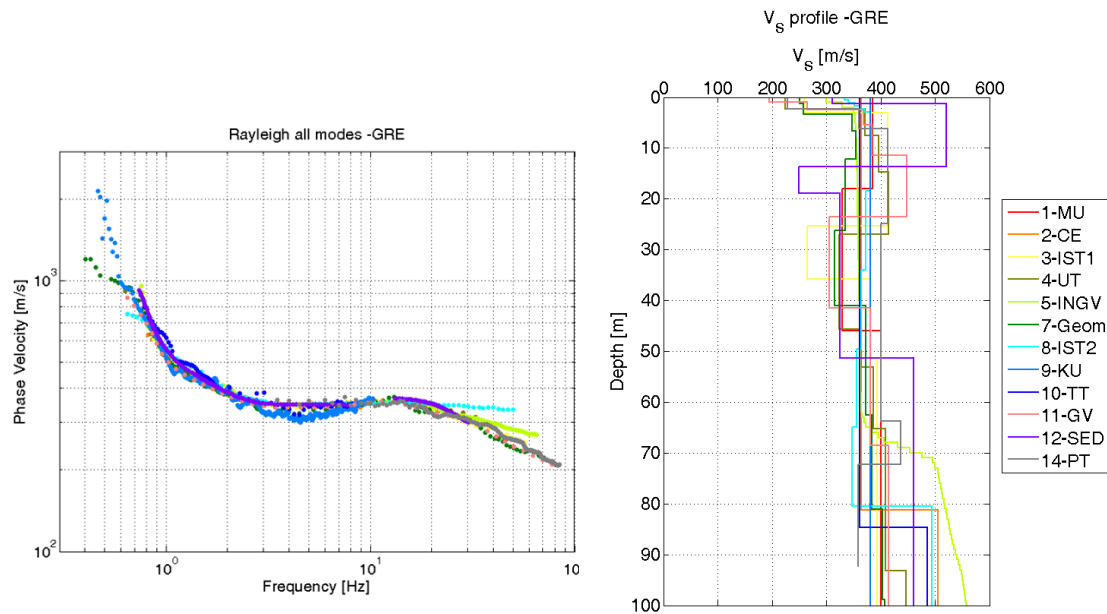
Pour Grenoble, les profils de vitesse restent également relativement cohérents (à l'exception d'un profil). Certaines équipes proposent un profil avec une couche à faible vitesse, bien que la profondeur de cette dernière semble relativement mal contrainte.

Pour Cadarache, les écarts sont plus importants, en rappelant que les hétérogénéités du site peuvent contribuer à la dispersion des résultats. Toutefois, en dessous de 25 m, les résultats obtenus sont très cohérents.

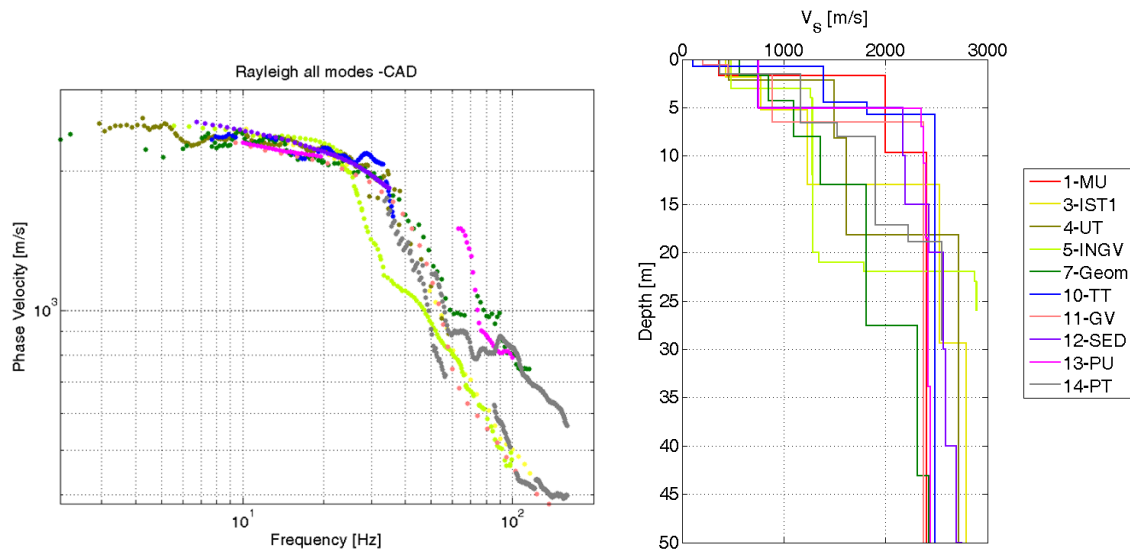
De manière générale et même si l'on observe parfois des différences notables, les résultats nous sont apparus comme satisfaisants pour une première itération, notamment compte tenu du caractère « en aveugle » de l'exercice. Il convient maintenant de confronter ces profils aux résultats des méthodes invasives.



**Figure 4.** Résultats du traitement et de l'inversion des données non-invasives pour le site de Mirandola (« soft soil »). A gauche : courbes de dispersion obtenues. A droite : profils de vitesses résultant de l'inversion.



**Figure 5.** Résultats du traitement et de l'inversion des données non-invasives pour le site de Grenoble (« stiff soil »). A gauche : courbes de dispersion obtenues. A droite : profils de vitesses résultant de l'inversion.



**Figure 6.** Résultats du traitement et de l'inversion des données non-invasives pour le site de Cadarache (« hard rock »). A gauche : courbes de dispersion obtenues. A droite : profils de vitesses résultant de l'inversion.

#### 4. Comparaison des méthodes non-invasives et invasives

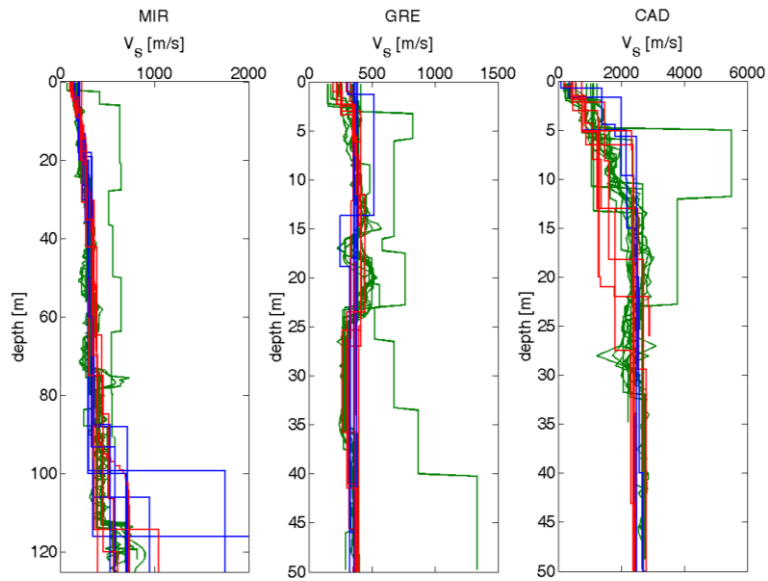
Les Figures 7 et 8 présentent l'ensemble des résultats obtenus pour les trois sites, regroupant les mesures invasives (représentées en vert) et non-invasives (représentées en rouge pour les équipes ayant traité à la fois les données actives et passives, et en bleu pour les équipes n'ayant utilisé que les méthodes passives). Les Figures 7 et 8 sont identiques, à l'exception de l'échelle des abscisses (vitesse) qui est plus réduite, permettant de mieux voir les détails dans le cas de la Figure 8.

On constate avant tout que les méthodes invasives présentent aussi une certaine variabilité, même si elle apparaît légèrement inférieure à celle des méthodes non-invasives. On remarque aussi une mesure invasive complètement aberrante (il s'agit ici de l'interprétation d'une société pour ses mesures down-hole dans laquelle la phase pointée ne correspondait vraisemblablement pas aux ondes S). Aucune équipe ayant traité les mesures non-invasives n'ont produit de résultat aussi éloigné de la moyenne de l'ensemble des mesures. Même nonobstant cette mesure down-hole et à l'inverse de ce à quoi nous nous attendions avant le benchmark, nous avons été étonné par une telle variabilité issue des méthodes invasives (surtout compte tenu de la « réputation a priori » des différentes approches).

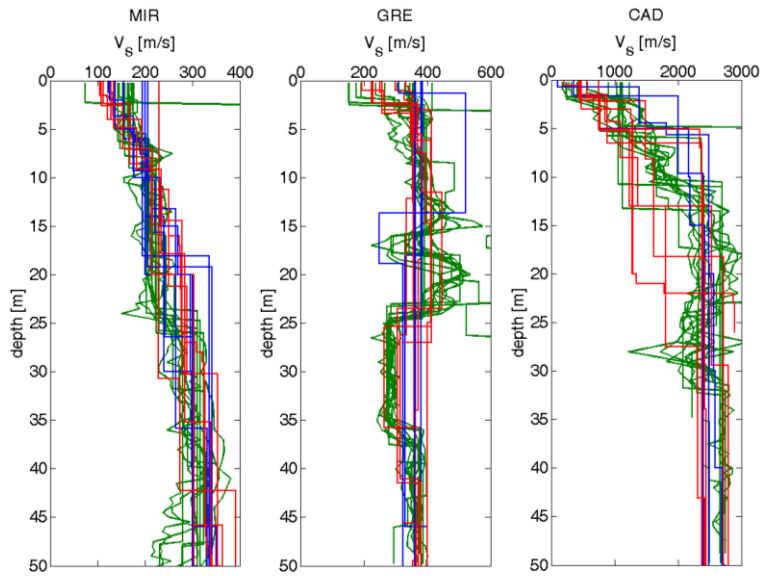
La Figure 9 présente les profils moyens obtenus par classe de méthode : 1/ invasif, 2/ non-invasif actif + passif et 3/ non-invasif passif uniquement. On constate que l'emploi conjoint de données actives (MASW) et passives (AVA) permet une très nette amélioration de la détermination du profil de vitesse. En fait, pour caractériser de manière satisfaisante les couches les plus superficielles, il n'y a en général pas assez de contenu « haute fréquence » dans les vibrations ambiantes : l'emploi d'une méthode active est donc hautement recommandée en complément. A l'inverse, l'emploi des méthodes actives seules ne permet pas de pénétrer suffisamment le milieu.

La comparaison invasif / non-invasif est très satisfaisante pour Mirandola. Pour Grenoble, la couche de faible vitesse reste toutefois nettement moins bien « contrainte » en non-invasif qu'en invasif. Pour Cadarache, on note un écart sensible entre 10 et 20 m, mais encore une fois, l'hétérogénéité du milieu peut participer à cet écart.

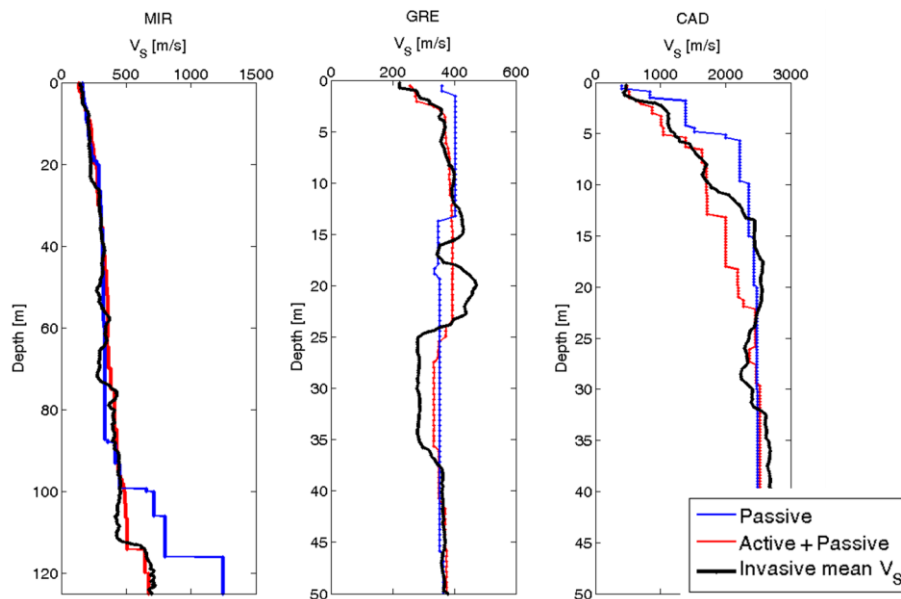




**Figure 7.** Comparaison des profils de vitesse obtenus avec les méthodes invasives (vert) et non invasives (rouge : utilisation conjointe des données passives –AVA– et actives –MASW– ; bleu : utilisation des données passives –AVA– uniquement) pour les trois sites-test.



**Figure 8.** Idem Figure 7 avec échelle des abscisses réduite.



**Figure 9.** Profils moyens obtenus par classe de méthode : noir : invasif, rouge non-invasif actif (MASW) + passif (AVA) et bleu : non-invasif passif (AVA) uniquement.

Intéressons-nous maintenant à la détermination du paramètre  $V_{S30}$ . La Tableau 3 présente les résultats obtenus pour l'ensemble des méthodes et des sites, en donnant les valeurs de  $V_{S30}$  moyenne, l'écart type, de même que le coefficient de variation. Les valeurs moyennes de  $V_{S30}$  sont très proches entre les méthodes invasives et non-invasives. Les valeurs de coefficient de variation obtenues sont elles aussi très intéressantes : on constate même que cette valeur est plus faible pour les méthodes non-invasives pour les sites de Grenoble et Cadarache ! Ce résultat peut paraître à première vue comme surprenant à l'analyse des profils de vitesses qui semblent plus dispersés pour les méthodes non-invasives que pour les méthodes invasives. En fait, cela provient du fait que dans le processus d'inversion, la valeur d'une vitesse à une profondeur donnée n'est indépendante des vitesses obtenues à d'autre profondeur compte tenu du fait que l'entièreté de la courbe de dispersion correspondant à un profil donnée doit approcher la courbe de dispersion mesurée. Malgré la non-unicité de l'inversion, si un profil donné a tendance par exemple à sous-estimer la vitesse dans les premiers mètres, le profil devra nécessairement « surestimer » la vitesse à plus grande profondeur pour « compenser » et produire une courbe de dispersion cohérente avec la courbe de dispersion mesurée. Il en découle des valeurs de  $V_{S30}$  particulièrement fiables et robustes.

La Figure 10 compare les résultats obtenus dans le cadre du benchmark InterPacific à d'autres études confrontant  $V_{S30}$  issues de méthodes invasives et non-invasives. Le présent travail est particulièrement important dans le sens où il évalue les barres d'erreurs pour chacune des méthodes et, pour la première fois, fait une évaluation sur un site particulièrement dur.

## 5. Conclusions

Les résultats ont été analysés en termes de profils de vitesse, de valeur de  $V_{S30}$ , de courbes de dispersion... La variabilité obtenue entre les résultats des méthodes invasives est plus grande que celle à laquelle nous nous attendions initialement. Inversement, et même si elles ne peuvent rivaliser en termes de résolution verticale, les méthodes non-invasives ont produit des résultats beaucoup moins dispersés que ce à quoi nous nous attendions. Il apparaît toutefois important de coupler l'analyse de données actives (MASW) et passives (AVA) pour une

analyse fiable. En termes de détermination du  $V_{s,30}$ , les écarts-types obtenus sont équivalents entre méthodes invasives et non-invasives, voire inférieurs pour les méthodes non-invasives.

L'obtention des courbes de dispersion est maintenant une étape robuste et la courbe de dispersion peut être considérée comme une réelle donnée de site, qui contient une information importante et pertinente vis-à-vis des effets de site.

Dans le cadre d'études qui visent à la détermination du seul paramètre  $V_{s,30}$ , l'utilisation des méthodes non-invasives apparaît comme une alternative particulièrement intéressante aux méthodes géotechniques classiques.

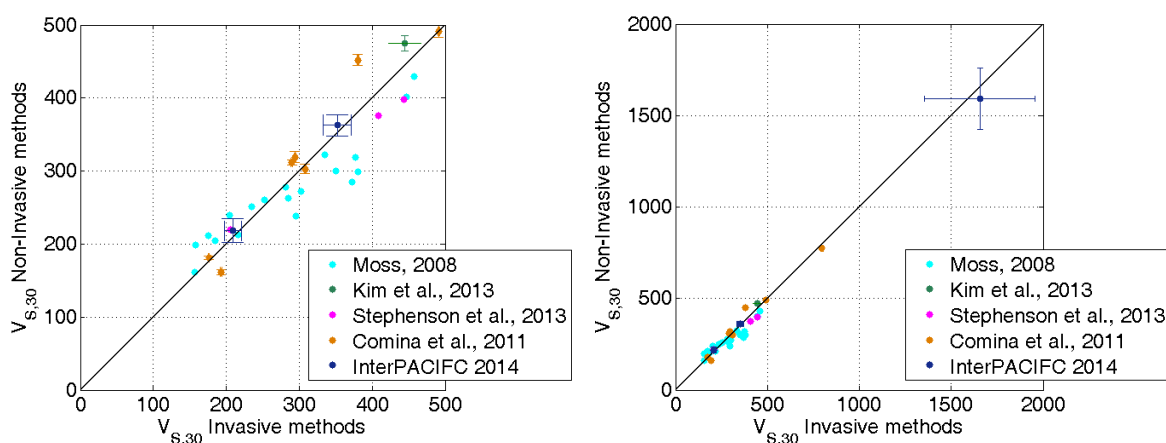
Compte tenu de leur coût, l'emploi des méthodes non-invasives semble également bien appropriée pour la caractérisation des stations des réseaux accélérométriques (ou sismologiques en général) compte tenu du nombre important de stations à caractériser et des budgets souvent réduits disponibles pour ce type de travaux.

Dans le cadre de caractérisation de sites sensibles, l'emploi conjoint des deux types d'approches nous semble toutefois nécessaire afin de bénéficier d'un contrôle lithologique des profils de vitesses établis (accessible grâce à la réalisation de forages), de même que pour parvenir à une résolution verticale satisfaisante.

Dans le cadre du projet InterPacific, un guide de bonne pratique des méthodes non-invasives a en outre été rédigé.

**Tableau 3.** Valeurs statistiques du paramètre  $V_{s,30}$  (moyenne, écart type et coefficient de variation).

Site	Méthode	$V_{s,30}$ moyenne [m/s]	$V_{s,30}$ std [m/s]	$V_{s,30}$ CoV [-]
Mirandola	Invasive	209	12.1	0.058
	Non-Invasive	218	16.3	0.075
Grenoble	Invasive	352	18.8	0.053
	Non-Invasive	363	14.6	0.040
Cadarache	Invasive	1656	301	0.182
	Non-Invasive	1591	168	0.106



**Figure 10.** Comparaison des résultats obtenus dans le cadre du benchmark InterPacific avec d'autres études confrontant  $V_{s,30}$  issus de méthodes invasives et non-invasives.

## 6. Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre des programmes de recherche SIGMA (financé par EdF, le CEA, Aréva et Enel) et CASHIMA (financé par le CEA, l'ILL et ITER Organisation).

Nous remercions l'ensemble des participants au projet InterPacific en nommant ici ceux qui n'ont pu être mentionnés dans la liste des auteurs, faute de place... : Michael Asten, Thibaut Bailly, Giuseppe Di Giulio, Cédric Guyonnet-Benaize, Thomas Forbriger, Bertrand Guillier, Kohichi Hayashi, Antony Martin, Shinichi Matsushima, Emeline Maufroy, Diego Mercerat, Vincent Perron, Valerio Poggi et Hiroaki Yamanaka.

Nous remercions en outre la Région d'Emilie Romagne qui nous a donné l'accès aux forages de Mirandola et nous a communiqué les mesures invasives précédemment réalisées sur ce site.

## 7. Bibliographie

- Comina C, Foti S, Boiero D, and Socco L V, 2011. *Reliability of  $V_s$  Evaluation from Surface-Wave Tests*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, 579-586.
- Kim D S, Park H J, and Bang E S, 2013. *Round Robin Test for Comparative Study of In-Situ Seismic Tests in Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4*, Eds R.Q. Coutinho & P.W. Mayne, CRC Press, Leiden (NL), 1427-1434
- Moss R, 2008. *Quantifying measurement uncertainty of thirty-meter shear-wave velocity*. Bulletin of Seismological Society of America, 98 (3), 1399-1411.
- Stephenson W J, Louie J N, Pullammanappallil S, Williams R A, and Odum J K, 2005. *Blind shear-wave velocity comparison of ReMi and MASW Results with boreholes to 200 m in Santa Clara Valley: Implication for earthquake ground-motion assessment*. Bulletin of Seismological Society of America, 95 (6), 2506-2516.