

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'HABITAT ET DE L'URBANISME
CENTRE NATIONAL DE RECHERCHE APPLIQUÉE EN GÉNIE PARASISMIQUE, CGS



PROJET DE RECHERCHE (achevé)

Sur le thème

**IDENTIFICATION DES PROFILS DE VITESSE SUBSTRATUM-SURFACE LIBRE À PARTIR
DES MESURES DE BRUIT DE FOND H/V COMBINÉE AVEC LES DONNÉES
GÉOTECHNIQUES**

(Code du projet : CGS/DMS/REDS/2019/02)

Présenté par

BENCHARIF RAOUF

DIVISION : MICROZONAGE SISMIQUE (DMS)
ÉQUIPE DE RECHERCHE EXPÉRIMENTALE EN DYNAMIQUE DES SOLS (REDS)

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. SOURCES DE BRUIT DE FOND
2. EXPLOITATION DU BRUIT DE FOND
3. PROCÉDURE DE L'INVERSION
4. PROGRAMME OPENHVS
5. PROGRAMME 'HV-INV'
6. THÉORIE DES CHAMPS DIFFUS
7. CHAMPS DIFFUS ET COURBE HVS
8. COURBES HVS (Présente étude)
9. APPLICATION
10. CONCLUSIONS

SOURCES DE BRUIT DE FOND

Le bruit de fond est **l'ensemble de vibrations enregistrées** en permanence au niveau du sol. Autrement dit, le bruit de fond est constitué de **l'ensemble des mouvements** du sol en dehors **des périodes de séisme**.



Toute **source de bruit**, autre qu'un séisme, qui **génère des vibrations** dans le sol peut être considérée comme **origine du bruit de fond**.

SOURCES DE BRUIT DE FOND

Il est possible d'établir une première conclusion schématique sur l'origine du bruit :

- À basses fréquences (**inférieures à 1 Hz**) les sources sont naturelles (océans, conditions météorologiques à grande échelle) ;
- À des fréquences intermédiaires (**entre 1 et 5 Hz**) les sources sont soit naturelles (conditions météorologiques locales) soit anthropiques (urbaine) ;
- À plus hautes fréquences (**au-delà de 5 Hz**) les sources sont humaines.

EXPLOITATION DU BRUIT DE FOND

Du point de vue **historique**, ce n'est qu'au milieu des **années 50** que sont apparues les **deux principales techniques** d'enregistrement et d'analyse du bruit en réseau, **F-K** (Capon, Greenfield, & Kolker, 1967); (Capon J. , 1969); (Lacoss, Kelly, & Nafi, 1969) et **SPAC** (Aki K. , 1957) ; (Aki K. , 1965).

Parmi toutes les méthodes d'exploitation pratiques du bruit de fond, **la méthode du rapport spectral HVSR**, dite méthode de Nakamura (**Nakamura Y. , 1989**), est la plus répandue.

EXPLOITATION DU BRUIT DE FOND

La méthode des rapports spectraux HVSR est basée sur l'enregistrement de bruit de fond. Ce bruit est constitué de **tous les mouvements du sol qui se propagent sous forme d'ondes**.

Malgré tous les débats sur la provenance du rapport HVSR, tous **les auteurs s'accordent** à dire que le rapport HVSR donne une **bonne estimation de la fréquence fondamentale du sol** ;

OK

En contrepartie, l'amplitude du pic de la courbe HVSR, ces auteurs s'accordent à dire qu'elle ne donne pas une estimation assez précise du niveau d'amplification [e.g. (Bonnefoy Claudet, **2004**); (Haghshenas, **2005**)].



COURBES HVSR

Les sources de bruit considérées par la méthode HVSR peuvent être de **nature diverse**. **L'interprétation physique** du rapport spectral est directement liée à **l'ensemble composant le champ d'ondes à l'origine des vibrations ambiantes**. Cela se traduit par la contribution des différents types d'ondes sismiques sur le rapport spectral HVSR.

Pour pouvoir comprendre la nature du bruit ambiant, il faudra **d'abord identifier les différents types de source**.

PROCÉDURE DE L'INVERSION

1. Commencer à partir des données disponibles sur les caractéristiques mécaniques mesurées sur site, puis fixer les valeurs moyennes des paramètres inconnus, par exemple, les valeurs moyennes des vitesses des ondes non mesurées au niveau des couches profondes.
2. Calculer la courbe **HVSR synthétique** à partir des données initiales sélectionnées à l'étape précédente.
3. Comparer la courbe HVSR synthétique avec la courbe HVSR expérimentale mesurée sur le site, puis évaluer la similitude entre les deux.
4. Actualiser les paramètres du sol et répéter les étapes précédentes pour que la différence entre la courbe synthétique et la courbe mesurée soit la plus faible possible.

INVERSION DES COURBES HVSR

Pour une meilleure exploitation du bruit de fond à travers les courbes HVSR, de **nombreux outils** sophistiqués, basés sur diverses **théories complètement indépendantes**, ont été développés par divers chercheurs dans le cadre de l'inversion des courbes HVSR afin de pouvoir déterminer **le profil de vitesse d'un profil de sol**.

Parmi les nombreux outils disponibles **deux codes de calcul** sont largement utilisés dans la pratique, ces deux codes permettent l'inversion des courbes HVSR et ce, en se basant sur deux théories complètement indépendantes.

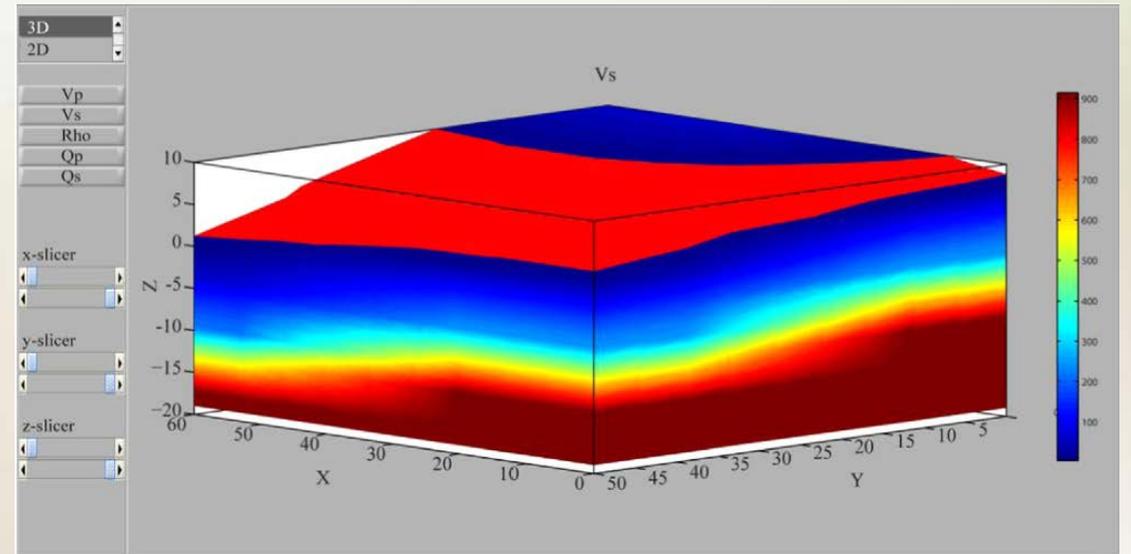
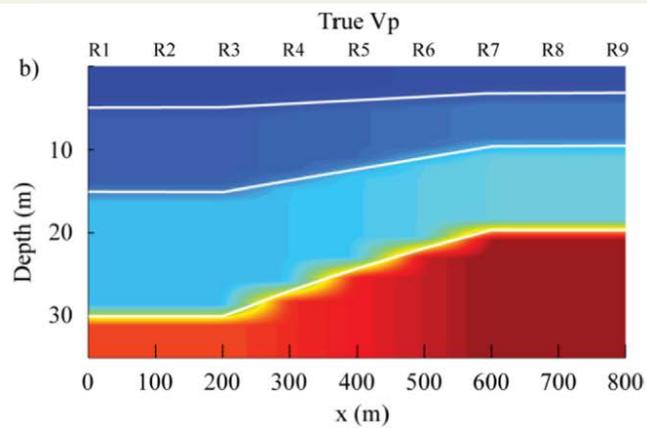
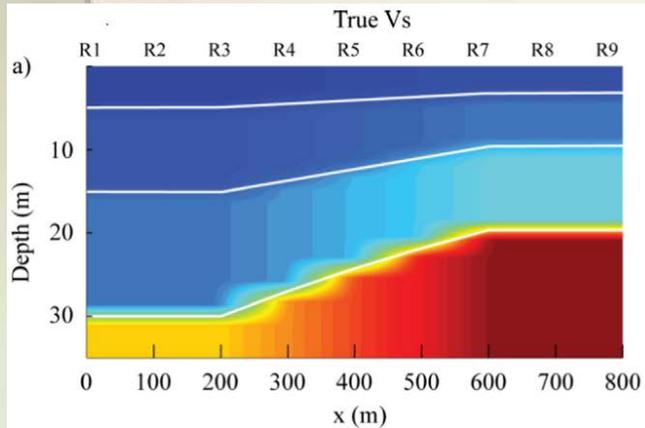
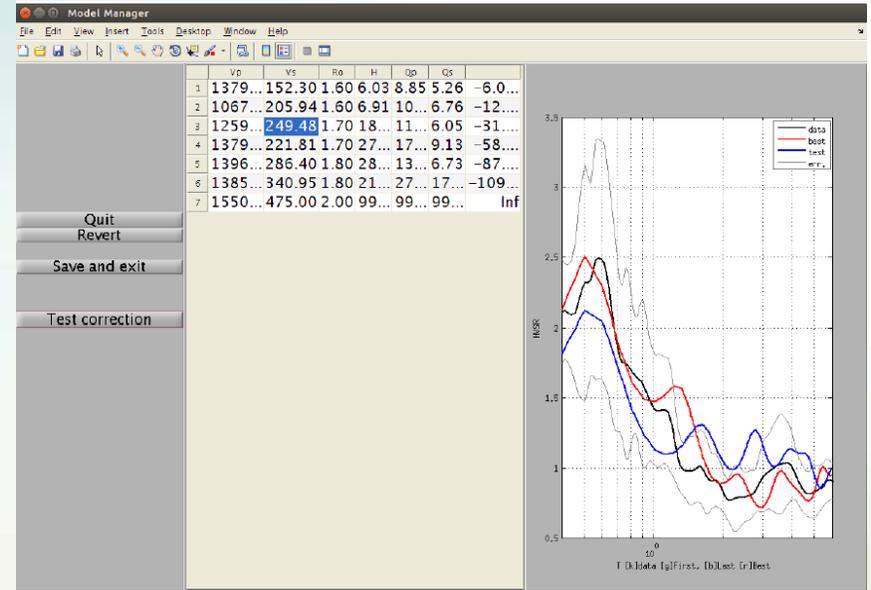
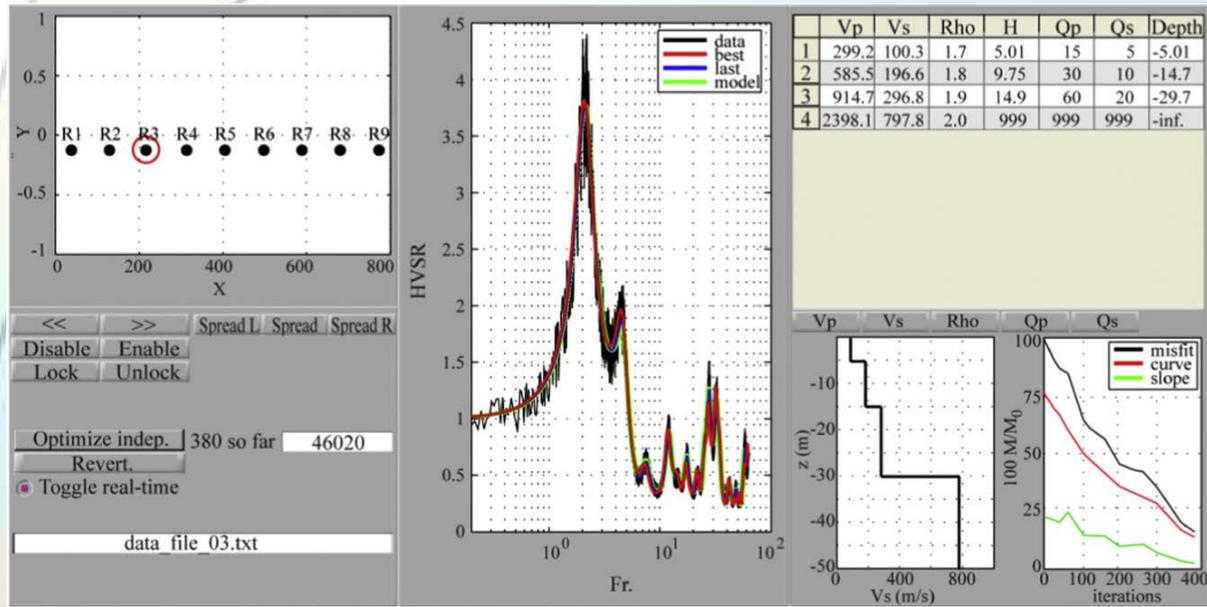
PROGRAMME OPENHVSR

En 2008, Herak ([Herak, 2008](#)) a développé un code dans l'environnement Matlab appelé (ModelHVSR), capable de simuler la distribution 1D des propriétés élastiques d'un profil de sol multicouches par une simple inversion d'une courbe HVSR. Sept ans plus tard Dr. [Bignardi et son équipe de travail \(Bignardi, Mantovani, & Abu Zeid, 2016\)](#) ont lancé une version du code développé initialement par Herak, ce code est appelé **OpenHVSR**.



Théorie de propagation verticale des d'ondes de volume

PROGRAMME OPENHVS



PROGRAMME 'HV-INV'

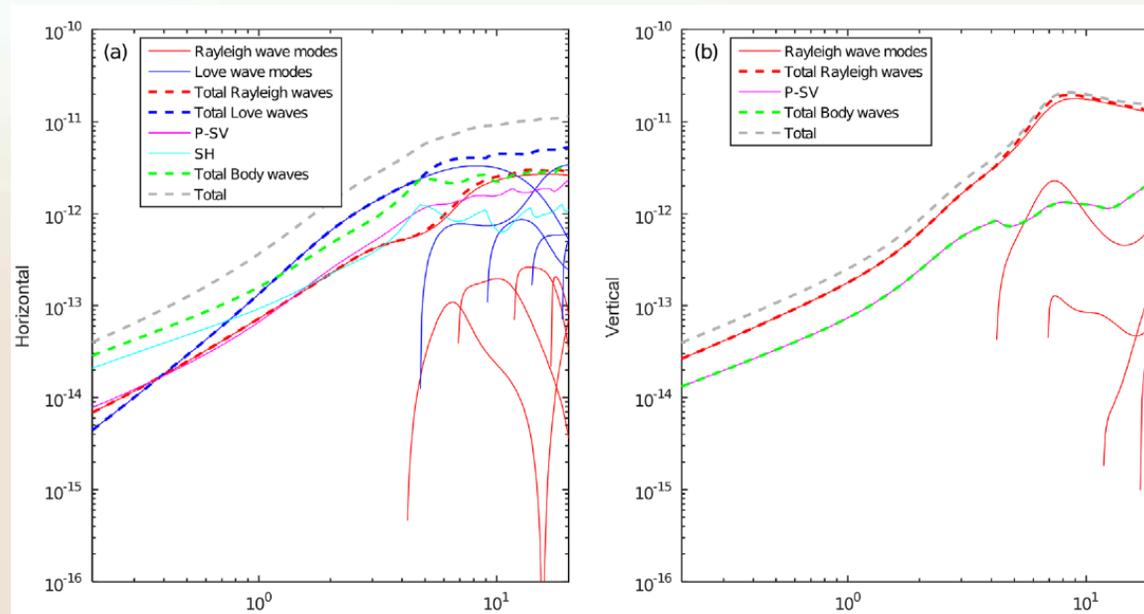
Récemment (en 2016) un nouveau code de calcul dédié à l'inversion des courbes HVSR est développé par un groupe de chercheurs regroupant beaucoup de sommité de réputation internationale (García-Jerez, Piña-Flores, Sánchez-Sesma, Luzón, & Perton, 2016). Le code est appelé 'HV-inv', développé dans l'environnement Matlab et distribué gratuitement (open source).



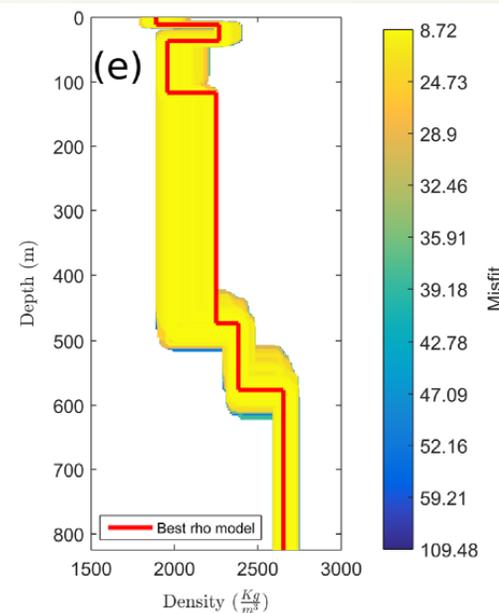
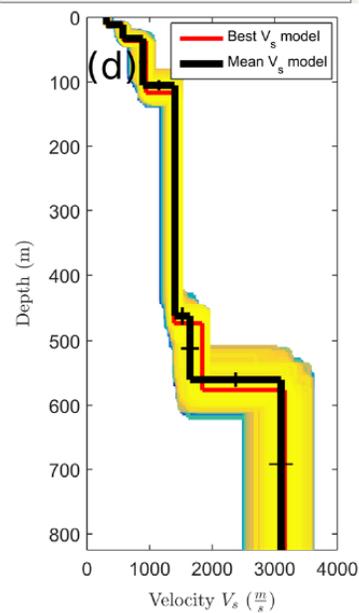
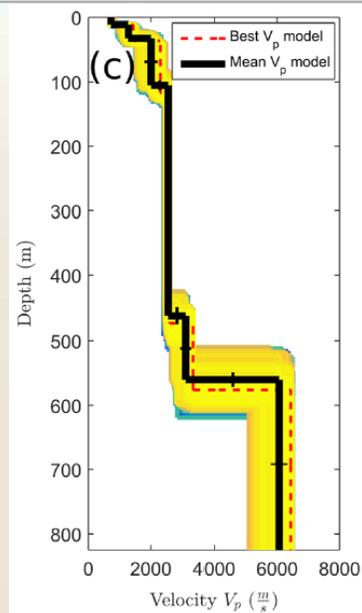
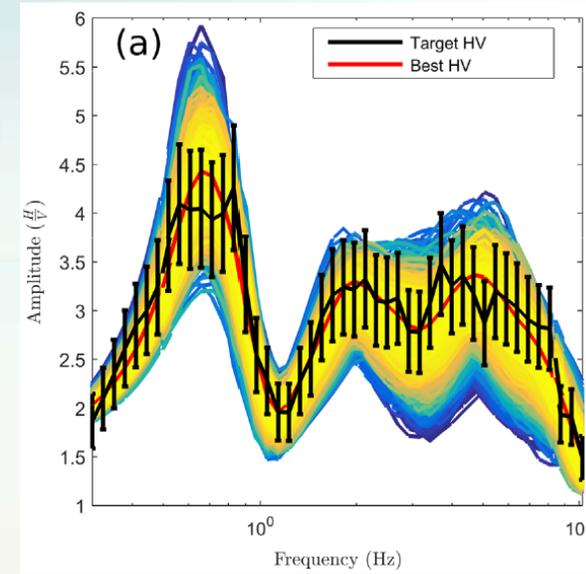
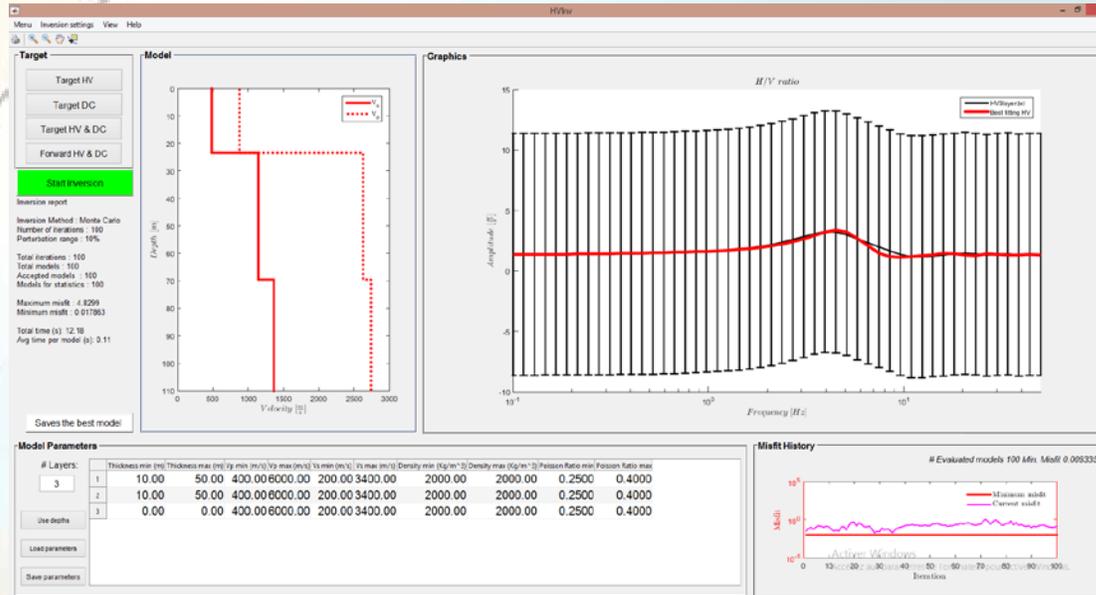
Le code 'HV-inv' est basé sur l'hypothèse de champ diffus. Il fait appel au lien récemment établi entre les mesures de bruit de fond et la théorie de l'élastodynamique via les fonctions de Green (solutions fondamentales).

PROGRAMME 'HV-INV'

L'algorithme permet (1) le calcul des parties imaginaires des fonctions de Green en utilisant des intégrales de contour appropriées dans le plan complexe dans le domaine des nombres d'ondes, (2) un **calcul séparé des contributions** des ondes de Rayleigh, de Love, P-SV et SH également.



PROGRAMME 'HV-INV'



THÉORIE DES CHAMPS DIFFUS

La théorie des champs diffus en élasticité admet que le champ diffus est généré par de multiples formes d'ondes transmettant des informations sur le milieu à partir de tous les trajets de propagation.

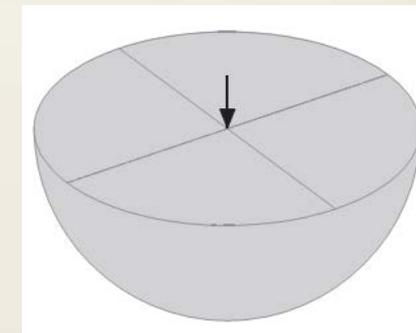
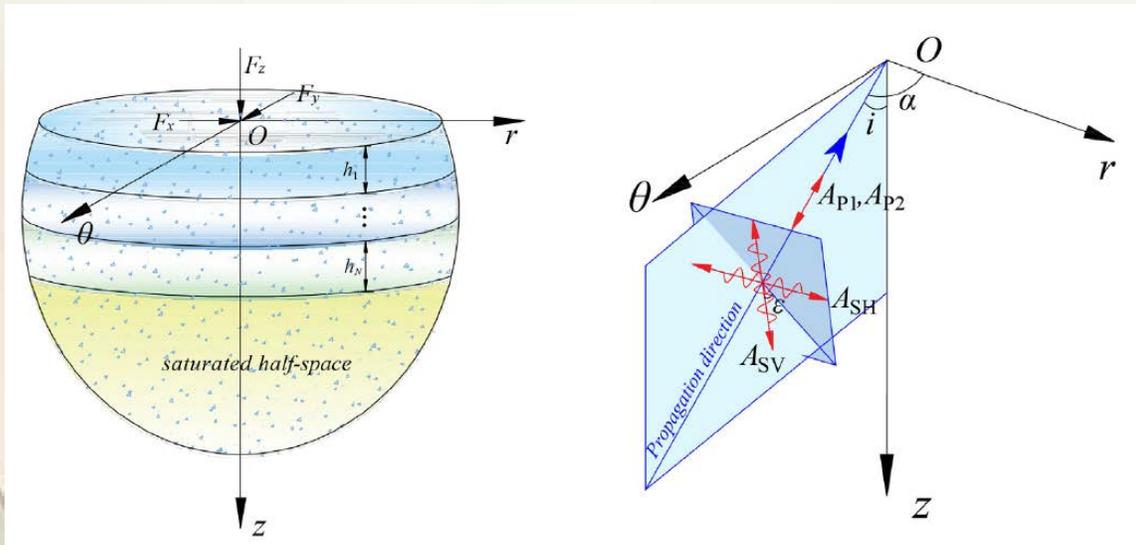


Ce champ **homogène idéal tridimensionnel** équipartitionné conduit à la répartition de l'énergie entre les différents types d'ondes

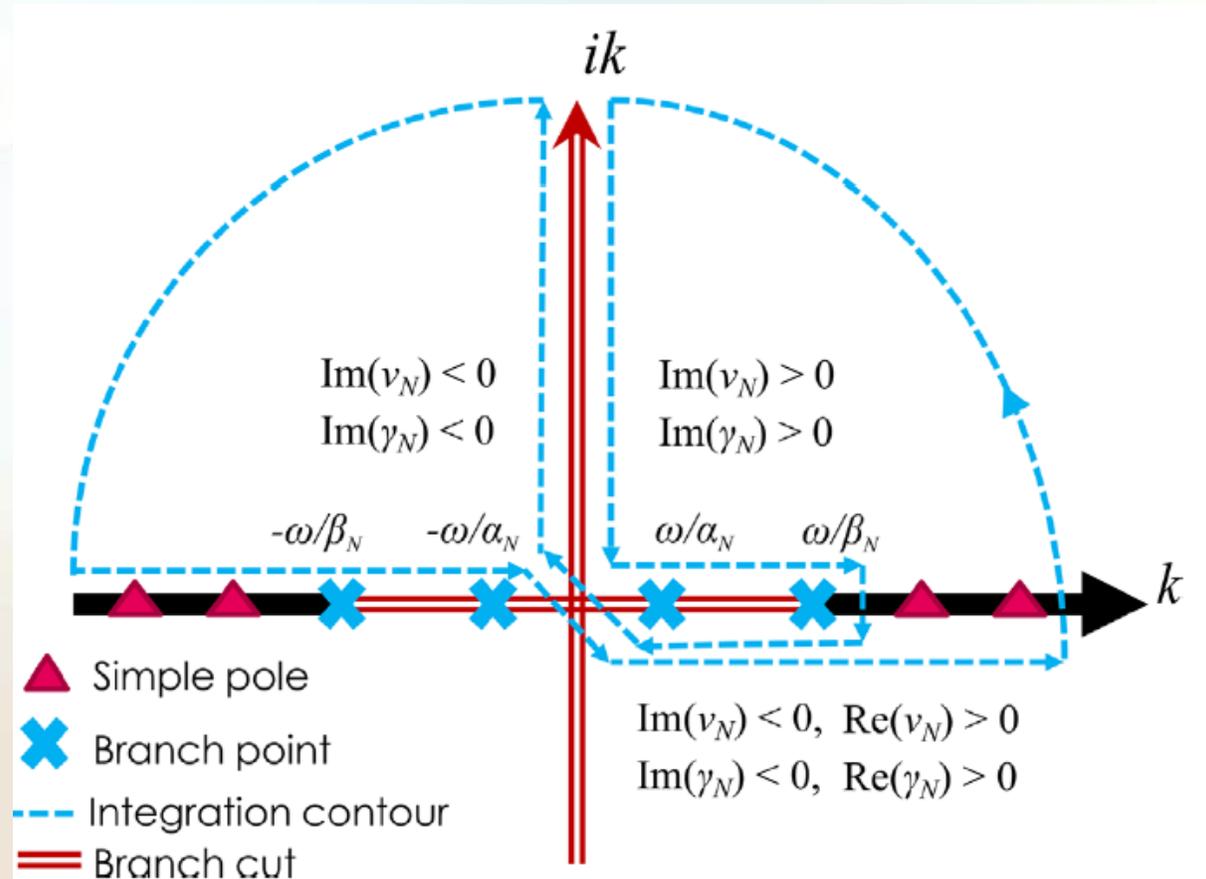
CHAMPS DIFFUS ET COURBE HVSR

La courbe HVSR peut alors être directement exprimée en termes de partie imaginaire des fonctions de Green (Sánchez-Sesma et al. [4]) :

$$HVSR = \sqrt{\frac{Im[G_{11}(x,x,\omega)] + Im[G_{22}(x,x,\omega)]}{Im[G_{33}(x,x,\omega)]}}$$

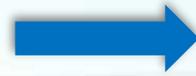


CHAMPS DIFFUS ET COURBE HVSR

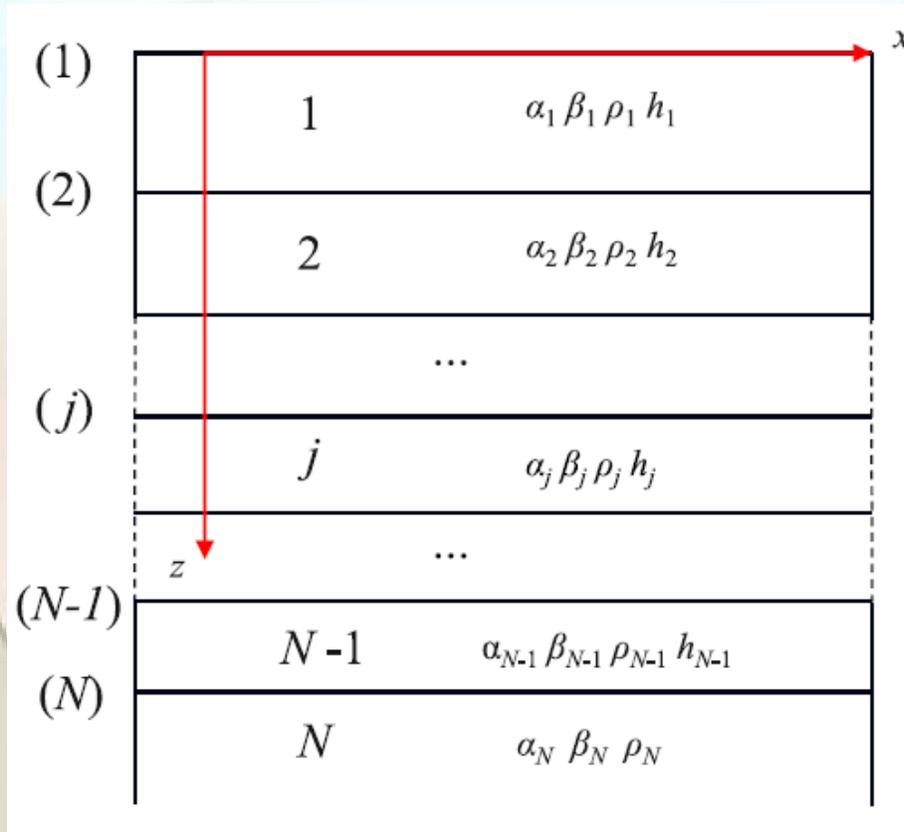


COURBES HVSR (Présente étude)

$$\bar{P} = K \bar{U}$$



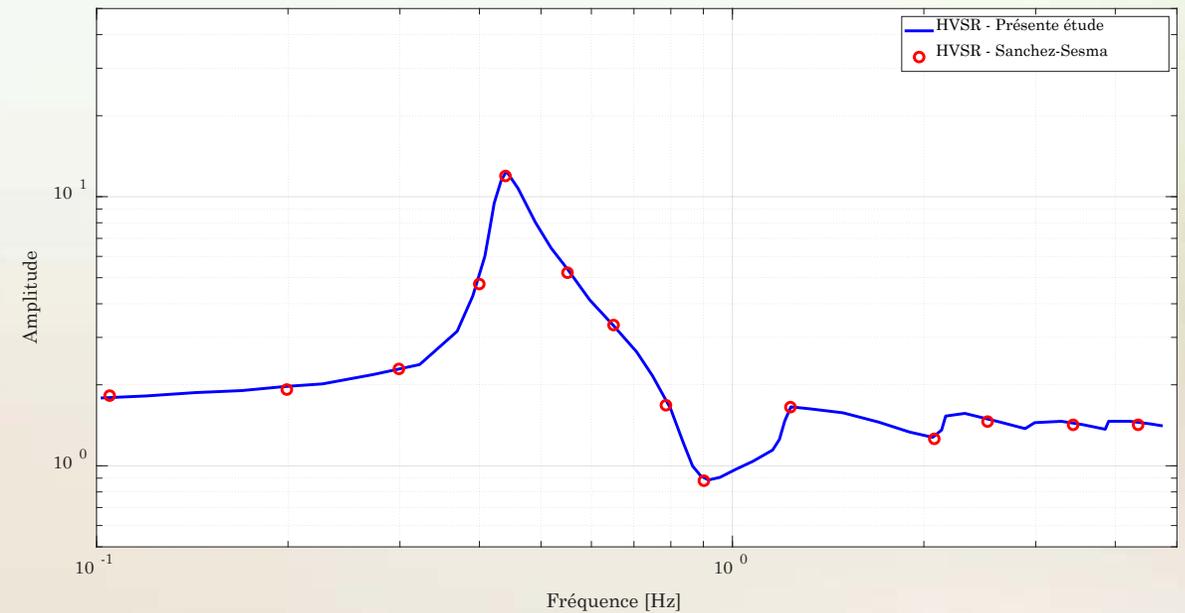
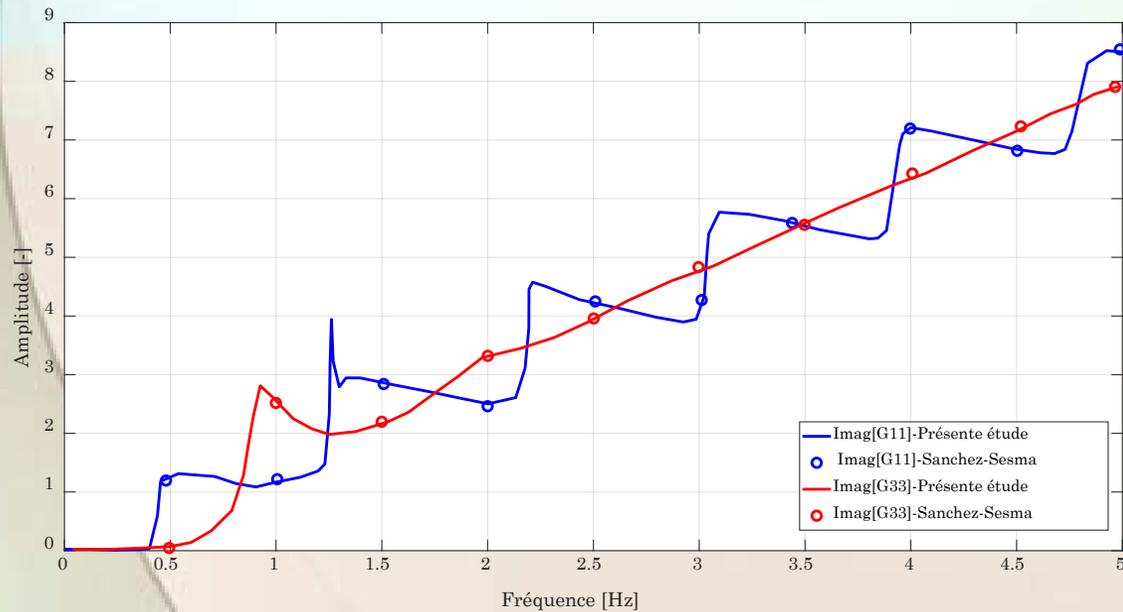
$$\bar{P} = (k^2 A + kB + G - \omega^2 M) \bar{U}$$



$$\begin{cases} \tilde{U}_r^m = \left(\sum_{l=1}^{2N} \gamma_R^{nl} \phi_x^{ml} \frac{d}{dr} f_l^R + \frac{\mu}{r} \sum_{l=1}^N \gamma_L^{nl} \phi_y^{ml} f_l^L \right) \begin{cases} \cos(\mu\theta) \\ \sin(\mu\theta) \end{cases} \\ \tilde{U}_\theta^m = \left(\frac{\mu}{r} \sum_{l=1}^{2N} \gamma_R^{nl} \phi_x^{ml} f_l^R + \sum_{l=1}^N \gamma_L^{nl} \phi_y^{ml} \frac{d}{dr} f_l^L \right) \begin{cases} -\sin(\mu\theta) \\ \cos(\mu\theta) \end{cases} \\ \tilde{U}_z^m = - \left(\sum_{l=1}^{2N} \gamma_R^{nl} \phi_z^{ml} f_l^R k_l \right) \begin{cases} \cos(\mu\theta) \\ \sin(\mu\theta) \end{cases} \end{cases}$$

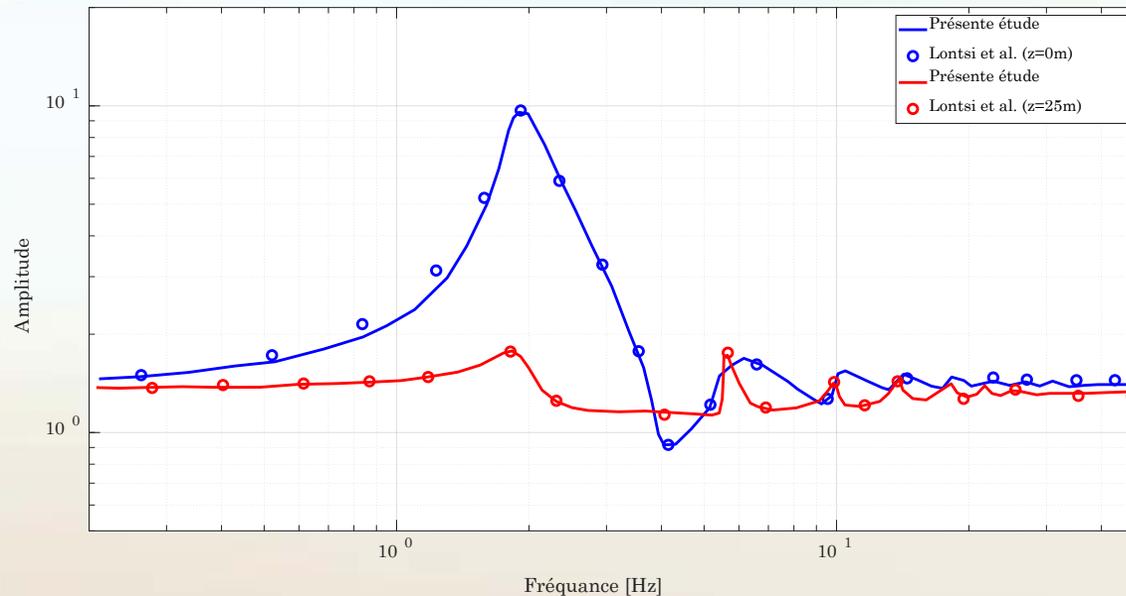
VALIDATION DES RÉSULTATS

$$HVS\!R = \sqrt{\frac{\text{Im}[G_{11}(x,x,\omega)] + \text{Im}[G_{22}(x,x,\omega)]}{\text{Im}[G_{33}(x,x,\omega)]}}$$



VALIDATION DES RÉSULTATS

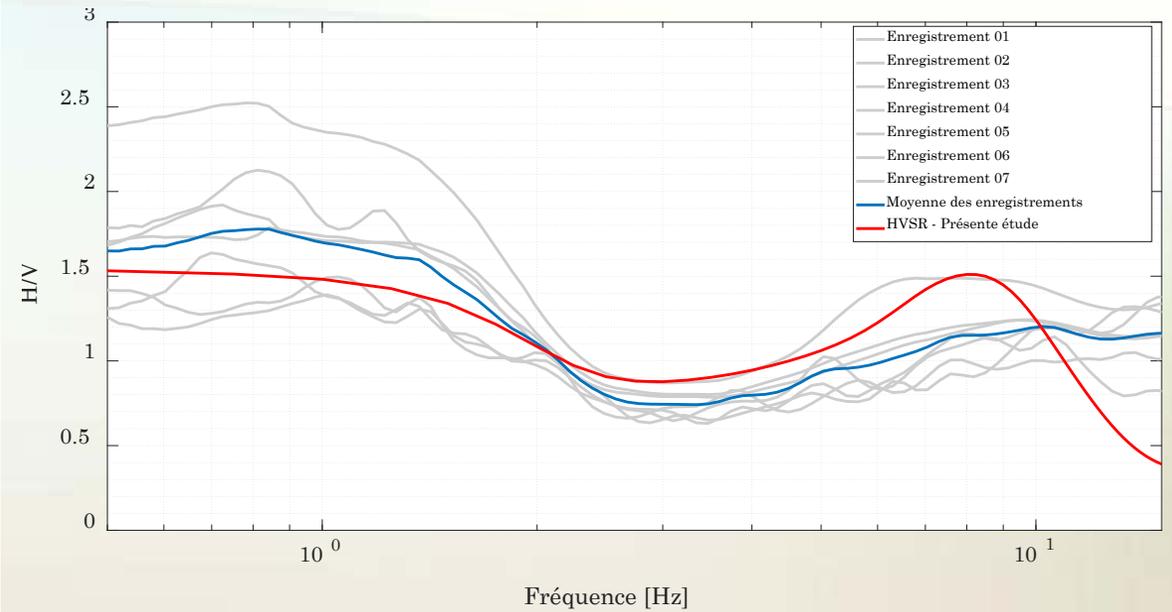
$$HVS\!R = \sqrt{\frac{\text{Im}[G_{11}(x,x,\omega)] + \text{Im}[G_{22}(x,x,\omega)]}{\text{Im}[G_{33}(x,x,\omega)]}}$$



Comparaison avec les résultats obtenus par Lontsi et al. (2019) pour le cas d'une couche molle sur le demi-espace en utilisant la méthode de la matrice des couche minces.

APPLICATION

Modèle (03)	Vitesse (m/s) de cisaillement	Vitesse (m/s) de copression	Masse volumique (kg/m3)	Coefficient d'amortissement	Épaisseur de la couche
Couche 01	170	350	1700	0.05	3
Couche 02	290	550	1800	0.05	5
Couche 03	600	1360	1900	0.05	6
Couche 04	500	1000	1900	0.05	8
Couche 05	1200	2100	2200	0.05	2
Couche 06	620	1210	1900	0.05	6
Couche 07	620	1210	1900	0.05	20
Couche 08	640	1250	1900	0.05	20
Couche 09	660	1290	1900	0.05	20
Couche 10	680	1330	1900	0.05	20
Couche 11	977	1782	1900	0.05	64
Demi-espace	990	1905	2090	0.01	10000



Conclusions

En conclusion, nous rappelons que l'objectif la deuxième phase du projet de recherche était le développement d'une approche robuste pour simuler les courbes HVSR.

Les courbes HVSR synthétiques sont une représentation mathématique des courbes HVSR réelles.

Les courbes HVSR synthétiques peuvent influencer de manière significative le processus d'inversion visant à obtenir des profils de vitesse compatibles avec les mesures de bruit de fond in situ.

Conclusions

Une méthodologie basée sur une approche semi-analytique (méthode des couches minces, TLM) a été utilisée pour effectuer les calculs des courbes HVSR. La méthode se prête bien au traitement des problèmes d'élastodynamique en milieux inhomogènes, tels que la réponse dynamique des profils de sol multicouches.

L'approche adoptée par la génération des courbes HVSR synthétiques est originale, elle est basée sur la théorie des champs diffus développée récemment. (2011).

Conclusions

Ainsi, on remarque que la procédure de calcul de la réponse en déplacements (fonction de Green) d'un profil de sol multicouche via TLM est très simple, elle consiste en les étapes suivantes :

1. Formulation de la matrice de rigidité globale par assemblage des matrices de rigidité élémentaires.
2. Résolution du problème aux valeurs propres quadratique.
3. Choix des modes propres admissibles.
4. Calcul des déplacements.

**MERCI DE
VOTRE
ATTENTION**

