

La mesure du module de cisaillement in-situ réalisée à partir des propriétés de propagation du bruit.

Jérôme Adamy, Edouard Mouton, Grégory Durand,

SISMOCEAN S.A.S., 5 rue de la Lucque, ZAE la Garrigue, 34725 St André de Sangonis

ABSTRACT

Shear wave velocity profiles and shear modulus have been obtained through noise records. It is considered that part of the ambient noise propagates as surface waves. Results of the processing are shown, and are compared to shear wave velocities obtained with cross hole tests and to shear modulus obtained with pressuremeter or with laboratory testing.

INTRODUCTION

Les ondes de surface présentent des propriétés de propagation directement liées au module de cisaillement maximal (G_{\max}). En effet, la vitesse de propagation des ondes de surface est liée à la vitesse de propagation des ondes de cisaillement (V_s), et le module G_{\max} est de la forme $G_{\max} = \rho \cdot V_s^2$. Ceci ouvre la voie à de nombreuses applications dans le cadre de l'étude de la proche surface. Plusieurs dispositifs d'acquisition de données exploitables sont relativement bien connus : soit le SASW basé sur l'enregistrement des trains d'ondes par deux capteurs (Stokoe *et al.*, 1994), soit le MASW (Park *et al.*, 1999 ; Abraham *et al.*, 1999 ; Adamy *et al.*, 2002). La source utilisée est soit impulsionnelle, soit harmonique. Cependant, être en mesure d'opérer en utilisant le bruit comme équivalent « source » (Louis J.N., 2001) présente un intérêt très significatif pour de nombreux sites (industriels en activité, urbains, routes, etc.). En effet, le bruit se propage pour partie sous la forme d'ondes de surface. Nous montrons ici l'étude de la proche surface d'un site terrestre basée sur l'analyse du bruit, et nous en comparons les résultats (profils de V_s et de G) avec ceux obtenus par d'autres méthodes.

PRINCIPE DE LA METHODE

Nous nous sommes basés sur un dispositif de type MASW, donc multi-capteurs, permettant d'extraire les caractéristiques de vitesse de propagation en fonction de la fréquence à partir d'une transformation $(x,t) \rightarrow (v,f)$ (Adamy *et al.*, 2002). Le dispositif est linéaire. Le bruit arrive a priori au dispositif sous tous les angles compris entre 0 et 360°. La vitesse apparente (V_{app}) du bruit au niveau du dispositif est donc lié à sa vitesse réelle (V_{re}) et à son angle d'arrivée α au dispositif par la formule de projection très simple : $V_{\text{re}} = \cos\alpha \cdot V_{\text{app}}$. Par angle d'arrivée au dispositif, on entend l'angle entre le vecteur d'onde et l'axe (orienté) du

dispositif. Le rapport V_{app} / V_{re} en fonction de l'angle α est représenté figure 1 (valeurs V_{app}/V_{re} comprises entre -5 et 5 , pour des raisons de lisibilité du diagramme).

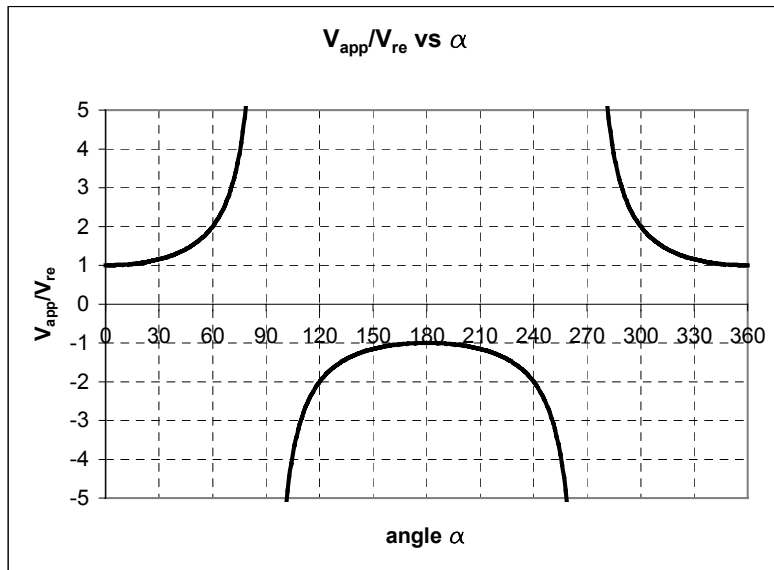


fig.1 – Relation entre V_{app} / V_{re} et α

Nous avons un comportement asymptotique aux angles remarquables $\alpha = 90^\circ$ et $\alpha = 270^\circ$, qui sont des angles d'attaque perpendiculaire au dispositif, d'où une V_{app} infinie. Le rapport V_{app}/V_{re} est égal à 1 (ou -1) pour les angles remarquables de 0° , 180° . Le vecteur d'onde et l'axe du dispositif sont colinéaires dans ce cas. De plus, il apparaît que l'inégalité $|V_{app}/V_{re}| < 1$ est toujours fautive (sous réserve que le champ d'onde soit correctement échantillonné), quel que soit α .

On peut en déduire les deux points suivants :

- Il est impossible d'observer $|V_{app}| < |V_{re}|$,
- La plus petite valeur prise par $|V_{app}|$ est $|V_{re}|$,

Sur un diagramme V-f représentant la dispersion des ondes de surface, qui est précisément un diagramme V_{app} -f et non un diagramme V_{re} -f, cela se traduit par le fait qu'une frontière va se dessiner entre une zone énergétique (zone des observables, où $|V_{app}/V_{re}| > 1$), et une zone à énergie nulle (zone des inobservables, où $|V_{app}/V_{re}| < 1$). Par comparaison, un dispositif utilisant une source active positionnée sur l'axe de la flûte sismique donnera un diagramme de dispersion V_{app} -f sur lequel l'énergie est tout à fait concentrée sur la zone limite où l'on a $V_{app}=V_{re}$.

ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES

Le bruit ambiant a été enregistré avec une flûte sismique de 24 traces, orientée arbitrairement. Les sources de bruit visibles depuis le site étaient dues à une route passante, à des engins agricoles, au passage d'un fleuve. Les données ont été traitées selon la procédure suivante :

- Transformation $x-t \rightarrow \tau-p$ (plan t,p),
- Transformée de Fourier 1D (plan f,p ou f,v),
- Représentation de la distribution d'énergie ε dans le plan (f,v) ,
- Inversion des courbes de dispersion $v_{disp} = v_{disp}(f) \rightarrow v_s = v_s(z)$ où z est la profondeur,

La distribution d'énergie ε est représentée sur la figure 2.

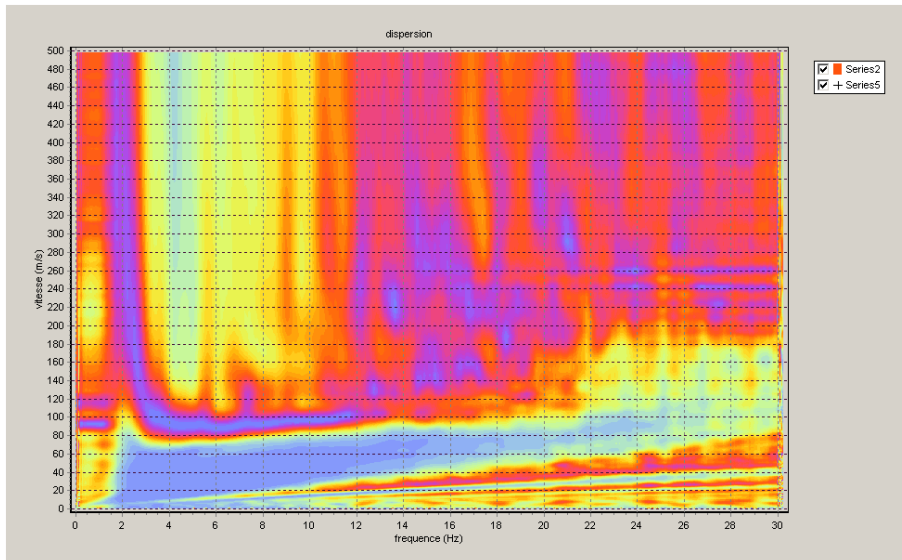


Fig. 2 – Distribution d'énergie ε dans le plan (f, V_{app})

Le bleu clair représente les valeurs de ε proches de 0, le bleu foncé les valeurs de ε maximales.

On peut observer une zone pour laquelle ε est quasi-nulle, pour des $V_{app} < 80$ m/s. Celle-ci correspond à la condition $|V_{app}/V_{re}| < 1$ qui est toujours fautive (pour un champ d'onde correctement échantillonné). On note également la définition précise de la distribution de ε pour des fréquences inférieures à 4 Hz.

Pour les fréquences comprises entre 2 et 20 Hz, la limite entre la zone énergétique et la zone non énergétique est bien exprimée. Cette limite exprime la fonction $V_{app-limite}(f)$ avec $V_{app-limite}$ égale à V_{re} . Cette fonction est utilisée lors de l'inversion pour obtenir le modèle $V_s(z)$ où V_s est la vitesse de cisaillement du sol, et z la profondeur.

RESULTATS

Les résultats obtenus à partir des mesures de bruit sont comparés à des mesures de V_s en cross-hole ainsi qu'aux modules de cisaillement dérivés de mesures cross-hole, d'essais pressiométriques et d'essais de laboratoire (Amar S. et al.).

Les V_s obtenues à partir de l'analyse de la propagation du bruit ambiant sont reportées figure 3. Elles sont similaires aux V_s obtenues à partir de mesures cross-hole, tout en étant légèrement inférieures à celles-ci. On note l'inversion de V_s en très proche surface détectée par les mesures de bruit, qui passe de 140 m/s à 50 m/s entre 1 et 3 m de profondeur.

La figure 4 montre les mesures du module de cisaillement obtenues à partir d'essais in situ et à partir d'essais en laboratoire. On observe une bonne similarité entre l'ensemble des courbes, ainsi qu'entre les résultats du cross-hole et ceux des mesures de bruit jusqu'à 10 m de profondeur. Sous 10 m, le G_{max} obtenu par cross-hole est supérieur à celui obtenu par les mesures de bruit

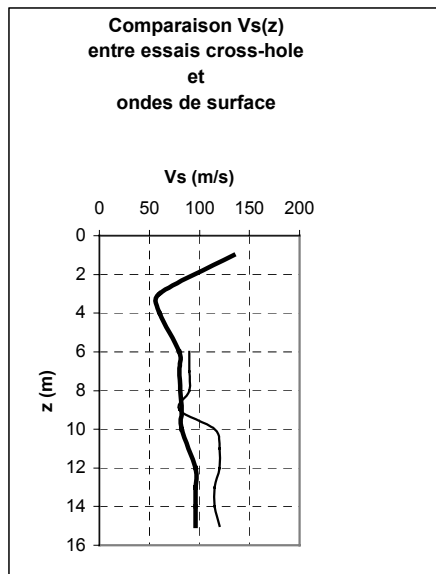


Fig. 3 – Comparaison entre $V_s(z)$ obtenue par essai cross-hole et par traitement du bruit. Cross-hole : courbe fine ; bruit : courbe épaisse.

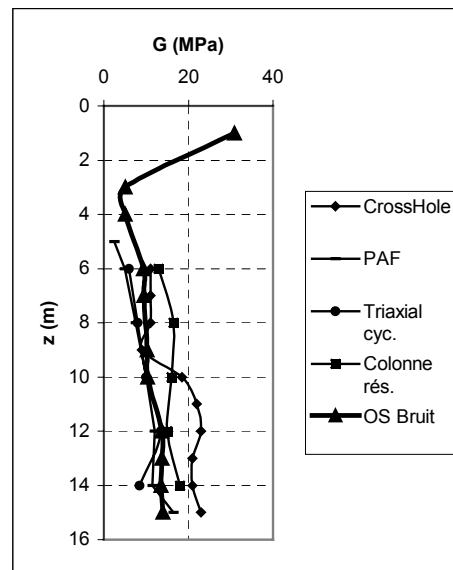


Fig.4 – Comparaison des modules de cisaillement obtenus à partir d'essais in situ (Ondes de surface de bruit, cross-hole, PAF) et d'essais de laboratoire (triaxial cyclique et colonne résonante).

CONCLUSIONS

Ce travail montre que l'étude des propriétés du bruit ambiant rend possible la mesure des vitesses de cisaillement de la proche surface pour des applications géotechniques. Nous avons montré la corrélation entre les V_s obtenues à partir d'enregistrement de bruit et celles obtenues à partir d'essais cross-hole. Nous avons également montré la comparaison entre les modules de cisaillement G obtenus à partir de méthodes in situ ou d'essais en laboratoire. Les deux avantages significatifs de cette méthode, que l'on dénomme Ondes de Surface Passives (OSP) sont :

- Une grande simplicité de mise en œuvre, en particulier par rapport au cross-hole,
- La possibilité de travailler en environnement bruyé, donc en imposant très peu de contraintes liées à la mesure, ce qui peut être d'une importance primordiale,

BIBLIOGRAPHIE

- Abraham O. et al. (1999) – Procédure expérimentale multi-capteurs pour l'enregistrement et le traitement des ondes de surface. Actes du 2^{ème} colloque de géophysique des sols et des formations superficielles, 1999, 113-117.
- Adamy J. et al. (2002) – Ondes de surface aquatiques. Actes du colloque des journées AGAP 2002 LCPC, 4-7.
- Amar S. et al. – La courbe pressiométrique adimensionnelles dans les argiles sous sollicitation non drainées.
- Louis J.N. (2001) – Faster, better : Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. Bull. of Seism. Soc. Of Am., vol.91, n°2, p 347-364.
- Park C.B., Miller R.D. and Xia J. (1999) – Multi-channel analysis of surface wave. Geophysics, vol.64, p800-808.
- Stokoe K.H. et al. (1994) – Characterization of geotechnical sites by SASW method. XIII ICSMFE, Ed R.D. Woods, Oxford & Ibh Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, India, 15-25.