

Généralités sur la méthode

- Les ondes sismiques de surface étudiées par la méthode Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), introduite par (Park et al., 1999), sont classiquement utilisées pour déterminer un profil vertical des vitesses de cisaillement de façon non invasive (cf. profil 1D de Vs en haut à droite de la figure 1). De plus, la succession de profils 1D en onde de cisaillement peut permettre de cartographier des évolutions relatives longitudinales de la rigidité des terrains sous-jacents (pseudo 2D, à droite et au milieu de la figure 1).
- D'une façon générale, les méthodes sismiques consistent toutes à analyser les ondes qui se propagent dans le sol, à la suite d'une excitation mécanique en surface par une source (tir), et enregistrées par des géophones à terre (capteurs mesurant une composante du vecteur vitesse des vibrations du sol) ou hydrophones dans l'eau (capteurs de pression). L'enregistrement d'un tir comprend différents types d'ondes : directes, réfractées, réfléchies et ondes de surface (cf. partie de gauche de la figure 1). Chaque type d'onde analysé donne lieu à une méthode sismique spécifique (transmission, réfraction, réflexion, MASW). Cette fiche s'intéresse uniquement à cette dernière méthode.
- Les ondes de surface naissent de l'interférence des ondes de volume et sont guidées dans les terrains de sub-surface. Pour une fréquence donnée, la majorité de l'énergie est contenue dans une épaisseur de milieu équivalente à la longueur d'onde (λ) de l'onde considérée. Deux types d'ondes de surface apparaissent pour le cas d'un milieu tabulaire à la surface libre : les ondes de Rayleigh et les ondes de Love. Toutes deux peuvent être générées et analysées en MASW. Toutefois, le dispositif le plus simple et actuellement le plus commun est la MASW en ondes de Rayleigh, car pour l'enregistrement des signaux des capteurs verticaux sont suffisants. Cette fiche traitera donc prioritairement de la méthode en ondes de Rayleigh.
- Il est important de préciser, qu'en prenant certaines précautions, l'enregistrement du bruit de fond sismique avec la même chaîne de mesures que la MASW permet également d'obtenir un résultat complémentaire. Ce point sera donc également abordé.

Applications

- la classification des terrains de fondation (conformément à un référentiel choisi : Eurocode 8 ou RFS) peut se faire sur la base d'une évaluation de la V_{s30} (vitesse moyenne harmonique des ondes de cisaillement sur les 30 premiers mètres du sol). Cette donnée permet de prendre en compte forfaitairement l'amplification du signal sismique (connu au rocher) à considérer dans les études de stabilité des ouvrages sous une sollicitation sismique.
- L'identification d'une zone mécaniquement faible ou susceptible de subir une liquéfaction peut se faire dans le cadre d'une approche multi-échelle où en première approche une cartographie de la rigidité des terrains est réalisable par un profil MASW pseudo 2D afin d'identifier une anomalie large et épaisse (cf. figure 2). L'analyse de ce profil nécessite d'intégrer de façon conservative l'incertitude sur le résultat (cf. § limitations) et pour les études de liquéfaction d'être associée à une connaissance précise des niveaux de nappe et de la granulométrie des horizons. Une fois la zone d'intérêt ciblée, elle peut être investiguée par les moyens classiquement utilisés en géotechnique (CPT, SPT).

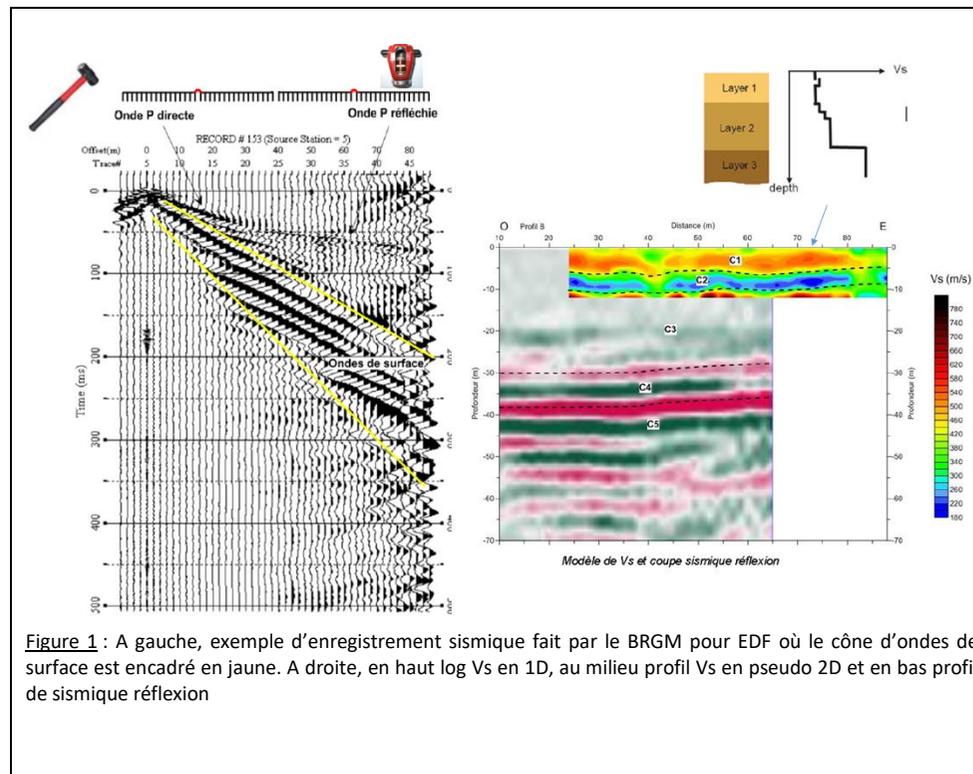


Figure 1 : A gauche, exemple d'enregistrement sismique fait par le BRGM pour EDF où le cône d'ondes de surface est encadré en jaune. A droite, en haut log Vs en 1D, au milieu profil Vs en pseudo 2D et en bas profil de sismique réflexion

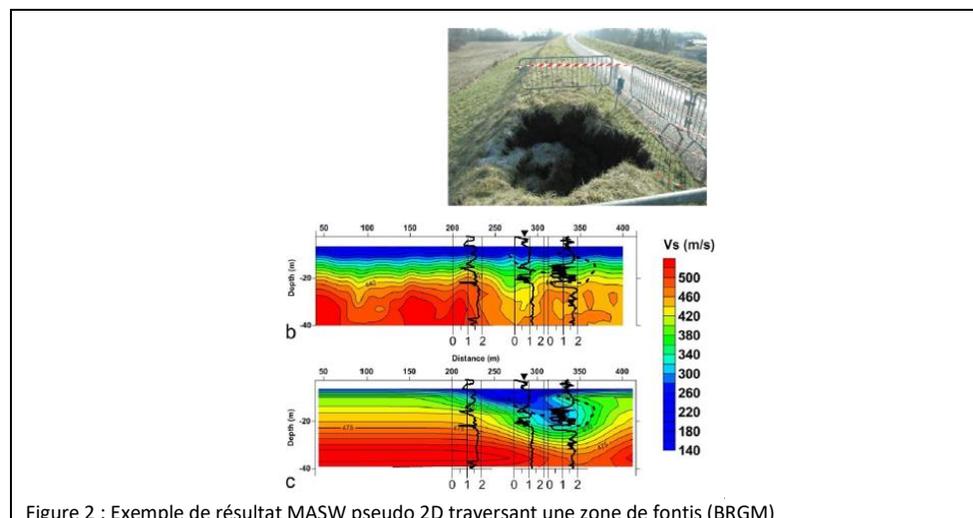


Figure 2 : Exemple de résultat MASW pseudo 2D traversant une zone de fondis (BRGM)

Incertitudes/Limitations / Contraintes / Interdits

- Aujourd'hui, il y a un consensus sur l'incertitude de la V_{S30} issue de la MASW, qui est autour de +/- 10% (Garofalo et al. 2016).
- L'incertitude sur le log Vs à proprement parler reste débattue. Elle peut être potentiellement de +/- 30%. Ce point nécessite donc une certaine prudence sur l'utilisation d'un profil Vs issu de la MASW et donc d'un profil pseudo 2D. Il semble judicieux de caler ce type de résultats avec une approche plus directe.
- Le diagramme de dispersion n'est exploitable que sur une partie de la plage de fréquence et c'est la géométrie du profil qui définit la longueur d'ondes minimale et maximale mesurable (λ_{min} et λ_{max}) et donc la plage de profondeurs investiguées, car en première approche la profondeur d'investigation peut être considérée de l'ordre de la moitié ou du tiers de la longueur d'onde mesurée ($\lambda_i/3 < Z_i < \lambda_i/2$).
 - L'espacement entre capteurs ou «intertrace» impacte la capacité de réaliser un pointé sur les diagrammes de dispersion aux hautes fréquences de deux façons :
 - avec la limite théorique d'aliasing ($\lambda_{min}=2*\Delta x$), critère de Nyquist matérialisé en général par une droite en partie basse des diagrammes de dispersion,
 - avec le niveau d'énergie identifiable sur le diagramme.
 - Les effets de champ proche peuvent limiter la longueur d'onde maximale mesurable (λ_{max}). Le champ proche correspond à la zone dans laquelle la distance source récepteur est trop courte pour que l'interférence entre les ondes de volume réfléchies à la surface libre puisse générer des ondes de surface se propageant à une distance suffisante de l'excitation pour que ces ondes puissent être considérées comme planes. Selon les auteurs, les longueurs d'ondes maximales considérées peuvent varier de 0.4 fois la longueur du dispositif L **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (O'Neill, 2003) jusqu'à L avec une incertitude de 10% sur le pointé (Bodet, 2005; Park, 2015), voire même 2L mais avec une incertitude de 40% sur le pointé (Bodet, 2005). On préconisera donc le critère $\lambda_{max}=L$ pour l'analyse de la MASW et 2L pour du bruit de fond (cf. figure 3).
- La plage de fréquence et l'énergie de la source contrôlera également ces longueurs d'onde minimale et maximale. Si la longueur du profil est très longue, l'énergie des ondes de surface peut devenir plus faible (phénomène d'atténuation) que celle du bruit, c'est un effet de champ lointain.
- La limite en fréquence des géophones, étant le plus souvent de 4.5 Hz, ceci limitera également la longueur d'onde maximale ($\lambda_{max} = \frac{c}{4.5}$, avec c la vitesse de phase du milieu considéré).
- Au-delà du lien avec la profondeur maximale, il est important de noter qu'en général un profil long améliore la focalisation du diagramme de dispersion, ce qui fiabilise le pointé aux basses fréquences. Toutefois, sur des structures spécifiques comme les digues ou à proximité de fondations, la mesure peut être affectée par des effets 3D pénalisants, car ils vont nécessiter de trouver un compromis empirique entre la longueur du dispositif et l'éloignement possible des limites de la structure (cf. figure 4).
- Pour atteindre des profondeurs d'investigation dépassant 30 m, la mesure MASW nécessite soit un dispositif long et une source relativement puissante (par exemple profondeur d'investigation possible de 80 à 100 m en utilisant un dispositif de sismique réflexion), soit doit être couplée et inversée de façon conjointe à des mesures de bruit de fond en réseau (AMV, non décrit dans cette fiche) ou à minima avec la même chaîne de mesure que la MASW mais à condition d'utiliser la méthode SPAC (Fiolleau, 2016).

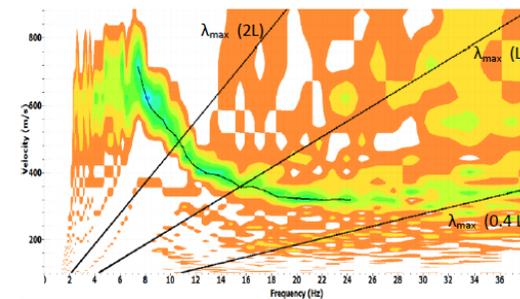


Figure 3 : Diagrammes de dispersion issu d'un enregistrement de bruit de fond, analysé par la méthode SPAC et matérialisation des différentes limites λ_{max} .

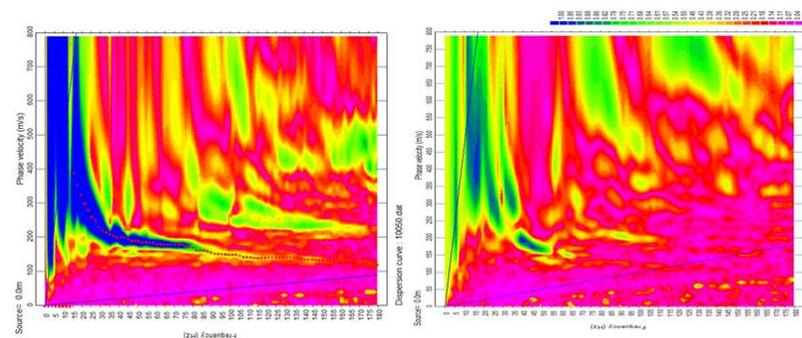
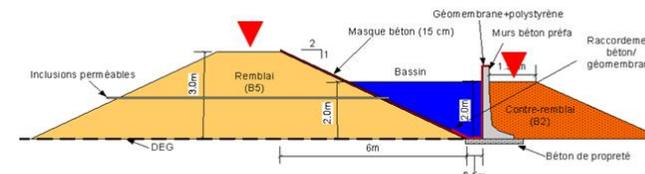


Figure 4 : Illustration de l'impact des effets 3D sur le diagramme de dispersion d'un enregistrement fait en crête de digue et sur un remblai proche d'un mur béton. Des modes supérieurs au mode fondamental apparaissent aussi très énergétiques, au point de rendre le mode fondamental difficile à identifier.

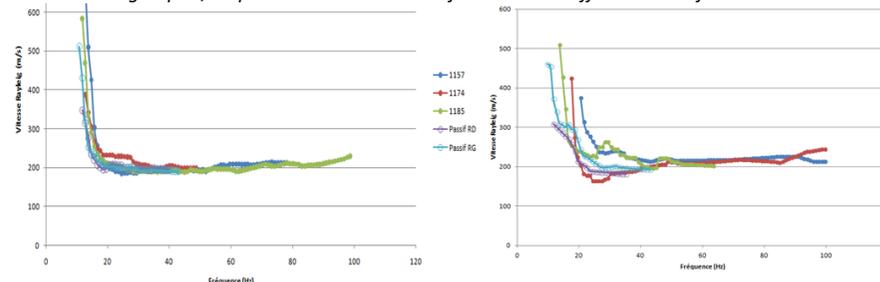


Figure 5 : Compilation de 3 enregistrements MASW et 2 de bruit de fond réalisés avec 2 dispositifs sur une digue. Le graphe de gauche est dans une portion sans variation latérale du contact digue fondation, alors que celui de droite est dans une portion avec une forte variation latérale du contact digue-fondation.

- L'hypothèse d'un milieu tabulaire sur la longueur active est importante et nécessite d'être vérifiée à minima sur la base de la cohérence des tirs en bout (cf. figure 5).

Moyens nécessaires à l'acquisition

- **Equipements** : Capteurs (24 à 96 géophones mesurant la composante Verticale pour la mesure des ondes de Rayleigh et Horizontale pour celle des ondes de Love), câbles de connexion (flûte), enregistreur sismique (amplification du signal, numérisation, visualisation, stockage des données), source sismique (masse, chute de poids, vibreur). Les équipements sont vérifiés (maintenance, étalonnage) périodiquement.
- **Véhicules** : 1 véhicule de transport léger (camionnette, break), de préférence tout-terrain/tout-chemin, permettant le transport du personnel et des équipements.
- **Personnel et compétences** : 1 x opérateur qualifié pour la mise en œuvre, 1 x géophysicien qualifié pour l'interprétation (l'un étant Chef de Mission), 0 à 2 aides non qualifiés.

Mise en œuvre sur le terrain

- **Dispositif de mesures** : Le dispositif de terrain est composé d'un enregistreur sismique relié à un câble sur lequel sont disposés les géophones à la surface du sol. Il est à noter que ce dispositif permet également d'enregistrer les ondes réfractées (V_p), mais avec une profondeur d'investigation plus faible pour un même linéaire de flûte. En effet, la profondeur d'investigation d'un dispositif de sismique réfraction peut être approximée à $1/4$ ou $1/5$ de la longueur de la flûte d'enregistreur, contre $1/2$ à $1/3$ pour les ondes de surface.
- **Travaux préparatoires** :
 - Déclarations administratives et autorisations de travaux dans les propriétés.
 - Piquetage de l'emplacement des capteurs, avec relevé topographique. L'élagage et le débroussaillage sont nécessaires, notamment pour l'enregistrement du bruit de fond sismique.
 - Relevés des singularités du site (remblais, sol décomprimé, fuites, conduites, routes, clôtures, etc.), pouvant influencer sur la qualité des mesures et de l'interprétation, et sur la sécurité du personnel.
- **Installation** : Les capteurs sont fermement plantés dans le sol, le long d'un profil rectiligne. Ils sont connectés sur la flûte et la flûte à l'enregistreur.
 - **Tests** : La continuité électrique et la réponse des capteurs sont vérifiées, ainsi que le circuit de « temps zéro » (ou time break, TB) afin de pouvoir également analyser les ondes réfractées. Les bruits électroniques et naturels sont atténués.
 - En MASW 1D, un dispositif sismique est investigué par 2 tirs minimum aux extrémités de la flûte, avec un déport en général équivalent à 20% de la longueur de la flûte (L). Tous les tirs sont strictement alignés sur le dispositif. Lorsque le risque de remettre en question l'hypothèse tabulaire du sous-sol n'est pas négligeable, il est conseillé d'augmenter le nombre de tirs à l'intérieur du dispositif, afin de pouvoir isoler durant le traitement une fenêtre active plus réduite où cette hypothèse est vraie. Si des structures pouvant générer des effets 3D sont présentes, il est également conseillé d'imbriquer une base courte avec une distance entre traces également courte pour faciliter l'identification du mode fondamentale aux hautes fréquences. De plus, il y a un compromis à trouver sur la longueur



Figure 6 : A gauche, dispositif avec 96 géophones V / A droite enregistreur DaqLink, PC et batterie

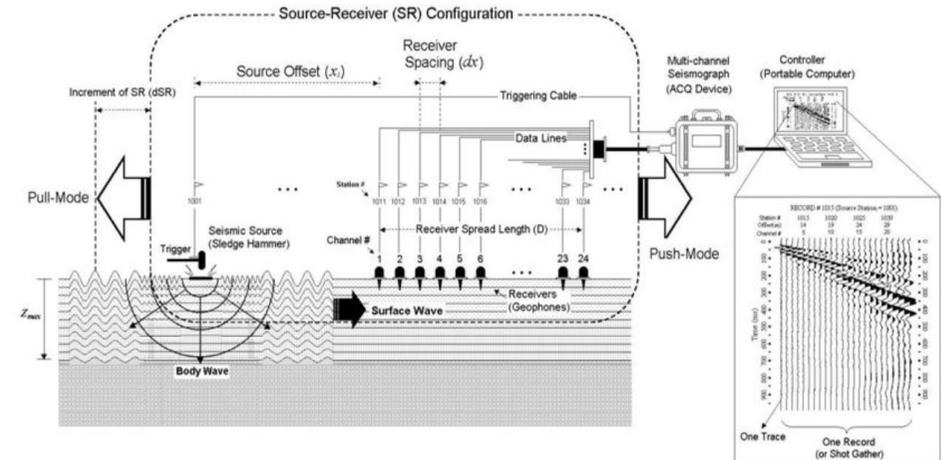


Figure 7 : schéma explicatif du dispositif de terrain (<http://www.masw.com>)



Figure 8 : Sur le terrain, la mise en œuvre est globalement analogue

du dispositif afin que le mode fondamental aux basses fréquences ne soit pas dégradé par des interférences

- En MASW pseudo 2D, le dispositif peut être tracté (landstreamer, cf. figure 9),
- Enfin, pour des analyses en collection CMP, il est nécessaire de réaliser des tirs tous les 2 ou 3 géophones.
- L'enregistrement du bruit de fond doit comprendre au minimum 10 fichiers de 30s, et les opérateurs doivent veiller durant ce temps à ne pas générer de bruit en champ proche (bruit de pas). Lorsque le bruit de fond est trop faible, il faut en priorité faire des enregistrements plus longs (15, 20 fichiers)
- **Sécurité** : La sécurité du chantier doit être assurée par le Chef de Mission, en accord avec le **Système Qualité du prestataire**. Les accès à la zone de mesures seront sécurisés.
- **Contrôle Qualité** : Après chaque tir, l'opérateur contrôle la qualité des enregistrements, le niveau de bruit, le bon état fonctionnel des traces (capteurs + connections). L'enregistrement doit autoriser un dépouillement sans ambiguïtés des mesures. **Le dispositif ne doit pas être démobilisé avant validation du tir.**
- **Production** : Dépend de la difficulté de déplacement sur le terrain et de l'importance de l'équipe. En moyenne, 4 dispositifs de 96 m / 48 capteurs / 2 tirs par jour (hors préparation du terrain).

Traitement et interprétation des données

L'analyse des ondes de surface est généralement décomposée en trois étapes : le contrôle qualité des données sismiques (QC des sismogrammes, filtrage ou isolation du cône d'ondes de surface par un « mute » si nécessaire), traitement des données (estimation de la courbe de dispersion) et inversion (optimisation des paramètres du modèle).

Différentes techniques de traitement du signal peuvent être appliquées pour passer le signal enregistré du domaine temps-distance au domaine fréquence-vitesse (diagramme de dispersion). La plus simple consiste à effectuer une double transformée de Fourier du signal enregistré (domaine fréquence-nombre d'onde) puis de passer dans le domaine fréquence-vitesse (Figure 10).

Toutefois, ces techniques de traitement du signal reposent sur deux hypothèses :

- les vitesses de phase ne varient pas latéralement le long du dispositif de mesure (hypothèse d'un milieu tabulaire),
- la propagation peut être assimilée à une propagation en onde plane.

Concernant, l'hypothèse que le milieu est tabulaire, sauf à utiliser des algorithmes d'inversion prenant en compte tout le champ d'ondes, elle peut être vérifiée à minima sur la base de la cohérence des tirs en bout (cf. paragraphe limites).

Concernant, l'hypothèse d'une propagation en onde plane, elle peut être vérifiée sur la base de la cohérence entre une courbe de dispersion issue de la MASW et du bruit de fond sismique, qui par définition n'est pas concerné par des effets de champ proche.

La méthode SPAC, nécessaire pour analyser du bruit de fond suivant une antenne linéaire, a été introduite par Aki (Aki, 1957) et elle consiste à découper le signal temporel en fenêtres puis, pour chaque fenêtre, à calculer l'auto-corrélation moyenne pour une distance inter-capteurs donnée. Enfin une moyenne des auto-corrélations de l'ensemble des fenêtres est effectuée afin de pouvoir retrouver l'histogramme des vitesses de phase. L'avantage par rapport à la méthode F-K est que le résultat est peu affecté par l'orientation de la source de bruit (cf. figure 8).

L'étape d'inversion repose elle aussi sur l'hypothèse d'un milieu 1D. Différents types d'algorithmes sont utilisés pour minimiser au mieux la différence entre courbe de dispersion mesurée et courbe de dispersion modélisée (misfit). Toutefois, le principe commun est qu'ils recherchent, de façon itérative, le modèle optimum qui minimise l'écart entre les observations et le calcul direct d'une simulation issu

à celle de la sismique réflexion



Géophone monté sur flûte tractée



Géophone avec plaque 3 appuis

Figure 9 : géophone V 4.5 Hz monté sur une flûte tractée à gauche et sur une plaque à droite

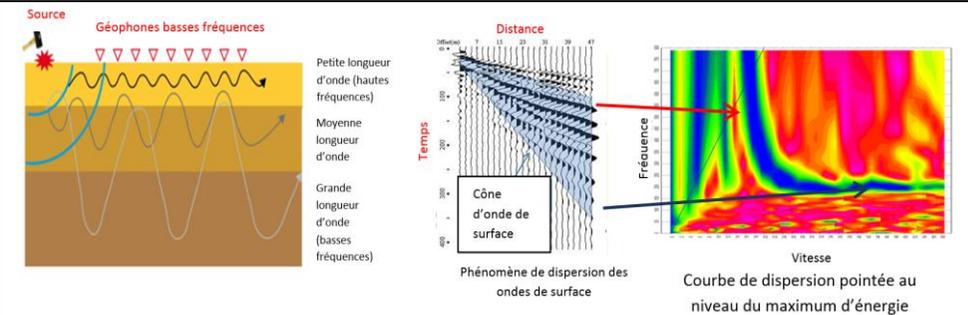


Figure 10 : Schéma de propagation des ondes de surface en fonction de la fréquence et enregistrement associé illustrant la dispersion dans le domaine temporel (évolution de la vitesse de phase en fonction de la fréquence) et sa traduction dans le domaine fréquentiel

du modèle en cours d'évaluation. La solution n'est pas unique et afin de fiabiliser les paramètres et le modèle initial de l'inversion, il est nécessaire d'avoir des données géologiques sur les épaisseurs des couches (sondages mécaniques)

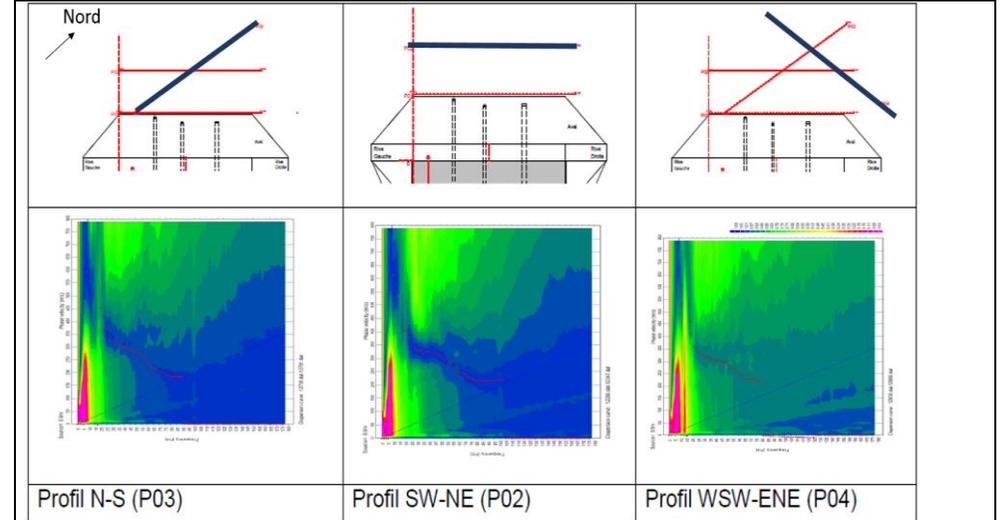


Figure 11 : Ex. de diagramme de dispersion issu du bruit de fond pour différentes orientations du dispositif

Résultats et livrables

Rapport d'étude

Le rapport d'étude comporte plusieurs sections. Un document AGAP spécifiant le plan d'un rapport-type peut être consulté sur le site web (www.agapqualite.org).

- **Section Générale** : Traite des généralités de l'étude, entre autres, localisation, contexte géologique régional, objectifs, mode opératoire, équipement, méthodologie d'interprétation, etc.
- **Section Spécifique** : Traite du paramétrage des équipements, de l'équipe du projet, de la localisation et de la topographie détaillées, des observations de terrain et de la qualité des mesures, ainsi que des résultats spécifiques au site (vitesses et épaisseurs, particularités et anomalies géologiques, etc.).
- **Section Synthèse** : Suivant les objectifs de l'étude, des attentes du client et des termes du contrat, une interprétation avancée (incluant une intégration des résultats avec d'autres méthodes géophysiques et/ou des données géotechniques) pourra être menée. Des conclusions (sur la corrélation entre Vs et lithologie), et des recommandations (sur des études complémentaires éventuellement) sont nécessaires.
- Le rapport comporte un volume texte et un volume cartographique, sur papier et/ou en format électronique. Enregistrements sismiques au format SEG2 ou SEG1 (avec l'entête renseigné), un fichier Ascii pour la position X, Y, Z des capteurs et tirs.

Spécifiquement pour cette méthode, le rapport technique de synthèse en concordance avec le modèle géologique, doit comprendre :

Pour l'acquisition MASW (cf. figure 12):

- films dans le domaine Amplitude-Temps, avant et après isolation du cône d'ondes de surface,
- diagramme de dispersion, sans et avec le pointé de la vitesse de Rayleigh directement sur les images,

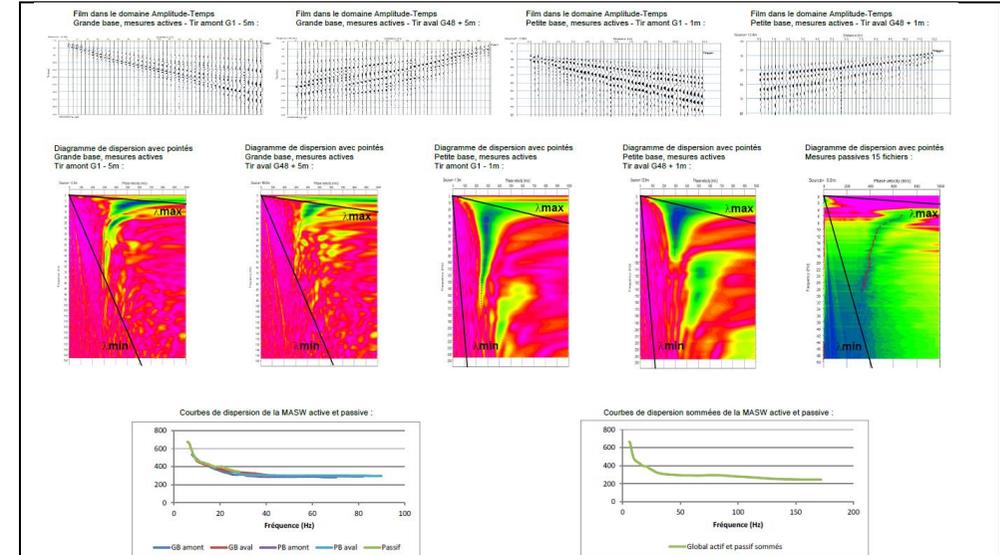


Figure 12 : Planche de synthèse des diagrammes de dispersion d'une base MASW 1D, avec un grand dispositif et 1 petit emboîté et 1 enregistrement du bruit de fond.

- 1 graphe par point d'application de la mesure, avec la superposition des courbes de dispersion de la MASW (tir amont et aval) ainsi que celle du bruit de fond,
- tableau des vitesses de phase Rayleigh finales en fonction de fréquence,
- modèle Vp utilisé pour l'inversion en profondeur,
- profils des Vs en fonction de la profondeur pour une densité donnée,
- superposition des logs Vs sur un profil topographique, avec les éventuels aménagements,
- quand cela existe, superposition des résultats de sondages ou cross-hole, sur la matrice couleur des Vs.

Pour l'acquisition de sismique réfraction (cf. figure 13):

- le tableau des relevés topographiques et coordonnées des points de tir et des récepteurs,
- le tableau des pointés des premières arrivées,
- les graphes des dromochroniques,
- les films sismiques en version papier, avec et sans pointé, et numérique (au format SEG2).

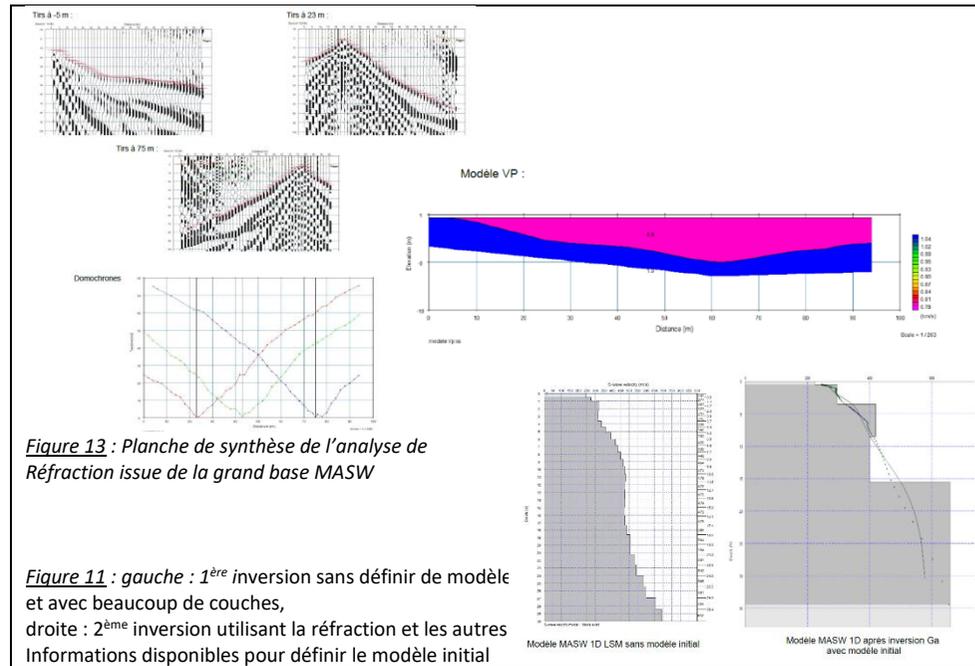


Figure 13 : Planche de synthèse de l'analyse de Réfraction issue de la grand base MASW

Figure 11 : gauche : 1^{ère} inversion sans définir de modèle et avec beaucoup de couches, droite : 2^{ème} inversion utilisant la réfraction et les autres Informations disponibles pour définir le modèle initial

Apport à l'étude géotechnique

- Intégration géophysique / géotechnique : Profil de compacité, interpolation entre forages.
- Calcul des modules géotechniques par intégration de la vitesse VP à la vitesse des ondes de cisaillement (VS).
- Corrélations : (1) entre la vitesse des ondes P et la vitesse des ondes S, (2) entre la vitesse des ondes P et la compacité des sols, (3) entre la vitesse des ondes S et la résistance de pointe du pénétromètre CPT ou SPT.

Gamme des vitesses des principales formations géologiques :

Nature des terrains	Vitesse P (m/s)	Vitesse S (m/s)	Masse volumique (g/cm ³)
Éboulis, terre végétale	300-700	100-300	1,7-2,4
Sables secs	400-1 200	100-500	1,5-1,7
Sables humides	1 500-2 000	400-600	1,9-2,1
Argiles saturées	1 100-2 500	200-800	2,0-2,4
Marnes	2 000-3 000	750-1 500	2,1-2,6
Série argilo-gréseuse saturée	1 500-2 200	500-750	2,1-2,4
Grès poreux et saturés	2 000-3 500	800-1 800	2,1-2,4
Calcaires	3 500-6 000	2 000-3 300	2,4-2,7
Craie	2 300-2 600	1 100-1 300	1,8-2,3
Sel	4 500-5 500	2 500-3 100	2,1-2,3
Anhydrite	4 000-5 500	2 200-3 100	2,9-3
Dolomie	3 500-6 500	1 900-3 600	2,5-2,9
Granite	4 500-6 000	2 500-3 300	2,5-2,7
Basalte	5 000-6 000	2 800-3 400	2,7-3,1
Gneiss	4 400-5 200	2 700-3 200	2,5-2,7
Charbon	2 200-2 700	1 000-1 400	1,3-1,8
Eau	1 450-1 500	—	1
Glace	3 400-3 800	1 700-1 900	0,9
Huile	1 200-1 250	—	0,6-0,9

Dialogue donneur d'ordre / prestataire

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">• <u>A la charge du donneur d'ordre</u><ul style="list-style-type: none">• Cahier des charges détaillé avec objectifs clairs• Plans et documents relatifs à l'ouvrage, à la zone à prospector• Informations concernant les accès et la sécurité du site, et les autorisations administratives.• Documents relatifs à d'éventuelles investigations antérieures | <ul style="list-style-type: none">• <u>A la charge du prestataire</u><ul style="list-style-type: none">• <u>Proposition explicite</u> : Justification de la méthode proposée, adaptation à l'objectif, description des avantages et limitations, facteurs d'influence et/ou non maitrisable, précision des mesures et résultats finaux réalistes.• <u>Rapport d'étude de qualité professionnelle</u> : Rappel des objectifs, méthodologies appliquées, discussion des résultats, conclusions et recommandations pratiques. |
|--|---|

Pour aller plus loin...

- 2017, S. Foti and all., Guidelines for the good practice of surface wave analysis a product of the InterPACIFIC project, Bull Earthquake Eng, DOI 10.1007/s10518-017-0206-7

Liens

- www.abemfrance.eu, www.iris-instruments.com
- <http://www.masw.com/> by Park