



HAL
open science

Utilisation combinée des méthodes basées sur le bruit de fond dans le cadre du microzonage sismique

Héloïse Céline Emilie Cadet

► To cite this version:

Héloïse Céline Emilie Cadet. Utilisation combinée des méthodes basées sur le bruit de fond dans le cadre du microzonage sismique. Sciences de la Terre. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2007. Français. NNT: . tel-00271292

HAL Id: tel-00271292

<https://theses.hal.science/tel-00271292>

Submitted on 8 Apr 2008

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.

LABORATOIRE DE GEOPHYSIQUE INTERNE ET DE TECTONOPHYSIQUE
et
CENTRE D'ETUDES TECHNIQUES DE L'EQUIPEMENT

Thèse présentée par
Héloïse CADET

Pour obtenir le titre de
Docteur de l'université Joseph Fourier – Grenoble I
Spécialité : Science de la Terre, de l'Univers et de l'environnement

**Utilisation combinée des méthodes basées
sur le bruit de fond
dans le cadre du microzonage sismique**

Date de soutenance : 31 Octobre 2007

Composition du Jury :

Pierre-Yves Bard	LGIT, Grenoble	directeur de thèse
Fabian Bonilla	IRSN Paris	rapporteur
Fabrice Cotton	LGIT, Grenoble	président du jury
Anne-Marie Duval	CETE Nice	conseillère d'études
Donat Fäh	ETH, Zurich	rapporteur
Alberto Luigi Marcellini	IDPA, Milan	examinateur
Nikos Theodoulidis	ITSAK, Thessaloniki	examinateur

Remerciements

Trois années de thèse c'est trois ans de vie, entre Nice et Grenoble, via Briançon, Paris et Marseille, beaucoup de rencontres, d'entraide, de réflexion, d'écoute. Comme il me paraît périlleux de faire une liste de tous ceux qui m'ont aidée, de loin ou de près, à la réalisation de cette thèse, j'ai choisi de laisser les gens se reconnaître seuls dans leurs actes :

Je vous remercie de ...

m'avoir accueillie dans vos laboratoires d'étude qu'ils soient à Grenoble ou à Nice ; de m'avoir initiée aux plaisirs des mesures de bruit de fond ; de m'avoir hébergée dans vos maisons lors de mes déplacements ; d'avoir pris le temps d'écouter mes états d'avancement, d'études, de recherche ; de m'avoir fait découvrir des sports aquatiques ; de m'avoir suivie dans des sports plus terre-à-terre ; de m'avoir donné plusieurs giga de données à traiter ; de m'avoir conseillée, orientée ; d'être venue avec moi sur le terrain tirer des câbles et poser des capteurs ; de savoir faire le tiramisu ; de m'avoir laissé vos clefs en toute confiance ; d'avoir suivi mon travail le plus assidûment possible ; d'offrir son sourire à tous ; de m'avoir prêter main forte pour mes différents problèmes informatiques de Matlab, de Fortran, de shell, d'html et de connexion vers le reste du monde ; de m'avoir aidée pour des questions d'infographie ; de m'avoir invitée à manger ; de vous être intéressé à mon travail sans contrepartie ; de m'avoir fournie en chocolat ; d'avoir corrigé mes erreurs ; de m'avoir soutenue.

Merci à tous.

Héloïse

Résumé

Devant le constat des dégâts dus en partie aux effets de site lors des derniers séismes meurtriers, une meilleure estimation a priori de ces effets locaux apparaît indispensable pour mieux prévenir les risques sismiques. Dans la réalité, les contraintes budgétaires pour ces risques à très longue période de retour, font du développement de méthodes d'estimation peu onéreuses un objectif crucial. Les mesures de bruit de fond, méthode géophysique originale utilisant les vibrations ambiantes d'origine anthropique et naturelle, correspondent à ce type de besoin.

Le but de cette thèse est de développer et de valider des méthodologies opérationnelles utilisant le bruit de fond sismique pour une prise en compte aussi réaliste que possible des effets de site dans un contexte réglementaire. L'idée est de coupler des informations tirées de mesures "H/V" (fréquence fondamentale f_0) et de mesures en réseau (vitesse d'ondes de cisaillement, ou ondes S, au minimum sur les 10 premiers mètres) pour caractériser les conditions de site, et d'établir des corrélations statistiques avec les fonctions d'amplification sur la base d'un grand nombre de données très bien étalonnées, disponibles grâce au réseau japonais Kik-net.

Cette thèse se découpe donc en deux grands volets d'étude : tout d'abord une étude sur la robustesse des méthodes utilisant le bruit de fond pour déterminer sur un site sa fréquence de résonance f_0 et sa vitesse moyenne sur les z 1^{ers} mètres, V_{sz} , puis une étude sur la base de données japonaises Kik-net pour estimer la fonction d'amplification d'un site caractérisé par f_0 et V_{sz} .

Le but du 1^{er} volet est de développer un protocole sur les méthodes combinées utilisant le bruit de fond, dans le but de qualifier la détermination sur un site de la fréquence de résonance fondamentale f_0 (mesures "H/V") et de la vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur les z 1^{ers} mètres V_{sz} (mesures en réseau), avec z entre 5 et 30 mètres selon le site et l'ouverture des réseaux utilisée.

Le but du 2^{ème} volet est d'établir un moyen simple pour définir les modifications à apporter au spectre de réponse réglementaire au rocher pour l'adapter à un site particulier, caractérisé par f_0 et V_{sz} . Des propositions ont été élaborées sur la base des données japonaise Kik-net fournissant, sur plus de 600 sites, un profil de vitesse des ondes de cisaillement et de compression, et des enregistrements en surface et en fond de forage. Après avoir caractérisé chaque site par f_0 et V_{sz} , on estime la fonction d'amplification de puits empirique par un rapport de spectres entre les enregistrements en surface et en profondeur. Ces fonctions sont normalisées vers un rocher de référence et corrigées de l'effet de profondeur pour se ramener à un rapport classique de spectres en surface site / rocher standard.

Une analyse statistique permet alors, à partir de ces fonctions d'amplification empiriques entre une référence standard au rocher et un site, d'établir une fonction correctrice dépendant uniquement des deux paramètres f_0 et V_{sz} . Cette fonction correctrice permet ainsi d'estimer le spectre de réponse d'un site à partir du spectre de réponse au rocher avec plus de précision que les réglementations actuelles : les résultats obtenus dans ce travail pourraient être appliqués à court terme dans les études de microzonage, et à moyen terme déboucher sur de nouvelles propositions réglementaires nationales (ou européennes).

Summary

Recent destructive earthquakes repeatedly showed that site effects can drastically exacerbate damage. Improving the way such local hazard modifications are accounted for in earthquake risk mitigation policies is therefore a major concern, balanced however by tight economical constraints, which emphasize the need for inexpensive, though reliable methods. Noise measurements, an original geophysical method using ambient natural and anthropic vibrations, correspond to this need.

The goal of this thesis is to develop and validate physically sound methodologies based on seismic noise allowing to account for site effects in a regulatory context, and combining simplicity, robustness and reliability. The idea is, in a first stage, to couple information from H/V measurements (resonance frequency f_0) and array measurements (shear waves velocity, at least at shallow depth) to characterize the site conditions, and, in a second stage, to empirically develop statistical correlations between such limited site information and amplification functions, on the basis of the largest available high quality data set, i.e., the Japanese Kik-net data. This thesis is therefore divided into two main sections dedicated, respectively, to each of these two steps.

The 1st section is mainly targeted at proposing a field and processing protocol for the combined utilization of methods based on seismic noise. A series of investigations on synthetic and real data allows to identify the key factors controlling the reliability of estimates of the resonance frequency f_0 and the mean S-waves velocity of the top z meters, V_{sz} (with z varying from 5 to 30 meters according to site conditions and array aperture). The proposed protocol is then intended to warrant – as much as possible – a good control of these key factors.

The goal of the 2nd section is to develop a simple method for proposing a site-specific spectrum on the basis of the regional hazard and the site conditions characterized by f_0 and V_{sz} . A subset of the Kik-net strong motion data is first selected, corresponding to nearly 500 sites with reliable P and S waves velocity profiles down to an average depth far larger than 50 m, and more than 4000 pairs of surface and down-hole seismic recordings. For each site, the site conditions can be characterized by reliable estimates of f_0 and V_{sz} , and the borehole amplification function is estimated with spectral ratio between surface and down-hole recordings. Considering the large variability of depths and velocities for the borehole sensors, these "raw" functions are then normalized with respect to a carefully chosen "standard" reference rock, and corrected from depth effects, in order to approximate amplification function with respect to outcropping, standard rock. A statistical analysis then allows to derive empirical relationships between these normalized and corrected empirical amplification functions, and site conditions described by f_0 and V_{sz} parameters. These amplification functions lead to significantly improved ground motion estimates compared to present earthquake regulations (such as EC8): our results could be readily applied in microzonation studies, and could as well pave the way for the next generation of building codes, with new site classifications and associated amplification functions.

Table des matières:

Remerciements	5
Résumé	2
Summary	3
Table des matières:	5
Table des figures	10
Liste des tableaux	22
Introduction	25
Chapitre I. Détermination de la fréquence de résonance f_0 et de la vitesse des ondes de cisaillement, V_s, à partir de l'utilisation combinée des méthodes basées sur le bruit de fond	31
1. Introduction sur les méthodes liées au bruit de fond sismique	32
1.1. La méthode H/V : brève synthèse.....	33
1.2. La méthode en réseau: analyses FK et SPAC et inversion.....	34
1.2.1. Analyse SPAC (SPatial AutoCorrelation).....	35
1.2.2. Analyse FK (Fréquence – nombre d’onde)	40
1.2.2.1. Réponse théorique et limites associées à un réseau (aliasing et résolution)..	40
1.2.2.2. Réponse du réseau à un champ d’onde	44
1.2.3. L’inversion	46
2. Étude de cas synthétiques sur l’étape d’inversion des courbes de dispersion des modèles de SESAME :	48
2.1. Le calcul direct des courbes de dispersion et de l’ellipticité	49
2.1.1. La courbe de dispersion.....	49
2.1.2. L’ellipticité	50
2.2. Présentation des modèles	51
2.3. Influence de la bande de fréquence sur l’inversion	54
2.4. Influence de l’espace des paramètres initial de l’inversion	58
2.4.1. Modèle M2.1	59
2.5. Apport des ondes de Love	63
2.5.1. Modèle M2.1	64
2.5.2. Modèle M2.2	66
2.5.3. Modèle M10.2b	67
2.5.4. Conclusion.....	68
2.6. Données a priori	69
2.6.1. Contraintes sur V_p	70
2.6.2. Contraintes sur V_s	71
2.6.3. Contraintes sur l’épaisseur	72
2.6.4. Contraintes sur la fréquence de résonance	73
2.6.5. Conclusion.....	74
3. Étude de cas synthétiques sur l’étape d’obtention des courbes caractéristiques (dispersion ou autocorrélation) des modèles de SESAME	76

3.1.	Introduction	76
3.2.	Limites associées à un réseau	77
3.3.	Présentation des réseaux	78
3.4.	Analyse fk	79
3.4.1.	Modèle M2.1	80
3.4.1.1.	Réseaux circulaires	80
3.4.1.2.	Réseaux triangulaires	83
3.4.2.	Modèle M2.3	87
3.4.3.	Modèle M01	88
3.4.4.	Conclusion	89
3.5.	Analyse SPAC	89
3.5.1.	Modèle M2.1	90
3.5.2.	Modèle M23	92
3.5.3.	Modèle M01	94
3.5.4.	Conclusion	96
3.6.	Conclusion: Comparaison des analyses FK et SPAC	97
3.6.1.	Exemple du site M2.1	97
3.6.2.	Remarques générales	98
4.	<i>Analyses sur des sites réels</i>	100
4.1.	Mesures de bruit de fond dans les argiles du Trièves à Saint Guillaume et dans l'Ubaye à Super Sauze	100
4.2.	Analyse de données de bruit de fond en réseau autour de 14 stations-test du Réseau Accélérométrique Permanent (RAP)	101
4.2.1.	Abstract	101
4.2.2.	Introduction	101
4.2.3.	Brief presentation of the method	102
4.2.3.1.	FK and SPAC techniques and their limitations	102
4.2.3.2.	Second step: Inversion	103
4.2.4.	Grenoble basin investigation	103
4.2.4.1.	Array measurements and analyse	104
4.2.4.2.	Conclusions	109
5.	<i>Conclusion : Protocole</i>	111
5.1.	Description du protocole	111
5.1.1.	Vérification de l'hypothèse d'un site tabulaire	112
5.1.2.	Choix l'ouverture des réseaux	113
5.1.3.	Analyses FK et SPAC et comparaison	116
5.1.4.	Définition de la largeur de la bande de fréquence maximale et inversion de la courbe de dispersion finale	117
5.1.5.	Quantifier l'étalement sur les modèles sélectionnés	118
5.1.6.	Vérification de la cohérence entre la fréquence de résonance empirique et la fréquence de résonance des profils sélectionnés	118
5.1.7.	Vérification de la courbe de dispersion par rapport à la profondeur à caractériser	118
5.1.8.	Comparaison aux données existantes	119
5.1.9.	Calcul du degré de confiance	120
5.2.	Applications	120
5.2.1.	Délimitation grossière des zones à effets de site sismiques dans le Sud-Isère	120
5.2.1.1.	Bilan	129
5.2.2.	Application sur le site de Saint Gervais (Article ECEES Genève)	131

5.2.3.	Analyse de données de bruit de fond en réseau enregistrées en Grèce.....	135
5.2.3.1.	Introduction	135
5.2.3.2.	Aigio.....	137
5.2.3.3.	Korinthos.....	138
5.2.3.4.	Lefkas	139
5.2.3.5.	Vartholomio	140
5.2.3.6.	Pirgos.....	141
5.2.3.7.	Patras A	142
5.2.3.8.	Patras 2	143
5.2.3.9.	Conclusion.....	144
5.2.4.	Blind Test ESG Grenoble 2006.....	145
6.	Conclusion	147
Chapitre II. Fonction d'amplification selon la vitesse moyenne et la fréquence de résonance..... 149		
7.	Introduction.....	150
7.1.	Justification du choix des paramètres f_0 et $V_{s,z}$ pour caractériser l'effet de site.....	150
7.2.	Synthèse de la démarche	152
8.	Études sur les données de la base de données japonaise Kik-net.....	155
8.1.	Distribution des données	155
8.2.	Caractérisation des sites par la vitesse moyenne sur les z premiers mètres $V_{s,z}$ et la fréquence de résonance f_0	157
8.2.1.	Vérification du profil de vitesse des ondes S, $V_S(z)$	158
8.2.1.1.	La fréquence de résonance définie par modélisation f_{0m}	158
8.2.1.2.	La fréquence de résonance empirique f_{0e}	159
8.2.1.3.	Résultats et conclusion	159
8.2.2.	Étude sur la distribution des vitesses des ondes de cisaillement.....	161
8.2.2.1.	Abstract	161
8.2.2.2.	Introduction	162
8.2.2.3.	Velocities distribution over the Kik-Net data set	162
8.2.2.4.	Relationships between the different time-average velocities	163
8.2.2.5.	Velocity profiles out of Japan	165
8.2.2.6.	Conclusion.....	167
8.2.2.7.	Bibliography	167
8.2.3.	Détermination de la fréquence de résonance fondamentale.....	169
8.3.	Conclusion sur les informations apportées par les enregistrements.....	172
9.	Comparaison des rapports de spectres de Fourier et de réponse	173
9.1.	Introduction : Pourquoi cette comparaison est-elle utile ?.....	173
9.2.	Comparaison des rapports Fourier et réponse	173
10.	Problème de la définition d'un site au rocher référence.....	179
10.1.	Introduction	179
10.2.	Variability of the velocity profiles of rock sites from Kik-net database	180
10.2.1.	Rock groups.....	180
10.2.2.	Rock sites with V_{s30} higher than 750 m/s.....	181
10.2.3.	Rock sites with $V_{s30}=800$ m/s +/- 50 m/s	182
10.2.4.	Rock sites with $f_0>10$ Hz.....	183
10.2.5.	Rock sites with $f_0>10$ Hz and $V_{s30}>750$ m/s	184
10.2.6.	Rock sites with $f_0>10$ Hz and $750<V_{s30}<850$ m/s	185

10.3.	Variability of the response of rock sites from Kik-net database	186
10.3.1.	Rock sites with V_{s30} higher than 750 m/s	187
10.3.2.	Rock sites with $V_{s30}=800$ m/s +/- 50 m/s	190
10.3.3.	Rock sites with $f_0>10$ Hz.....	190
10.3.4.	Rock sites with $f_0>10$ Hz and $V_{s30}>750$ m/s	191
10.3.5.	Rock sites with $f_0>10$ Hz and $750<V_{s30}<850$ m/s	191
10.3.6.	Conclusion.....	192
10.4.	Variability of the response of rock sites from modeling	193
10.4.1.	Shear wave velocity profiles of the models.....	193
10.4.2.	Response of generic rock sites	194
10.5.	Conclusion.....	195
10.6.	Annex	196
10.7.	Bilan	199
11. Normalisation des fonctions de transfert de puits vers une référence commune.....		200
11.1.	Introduction et but	200
11.2.	Principe.....	201
11.3.	Outils numériques	202
11.3.1.	La méthode du quart de la longueur d'onde.....	202
11.3.2.	La modélisation à une dimension de la réponse élastique à une onde SH	203
11.4.	Choix des modèles de vitesse.....	203
11.5.	Mise en œuvre avec la méthode du quart de la longueur d'onde	205
11.6.	Mise en œuvre avec la méthode de modélisation 1D d'une réponse à une onde SH 207	
11.7.	Comparaison et conclusion	208
12. Correction des fonctions de transfert dans un forage : effet de la surface libre 212		
12.1.	Introduction	212
12.2.	Effet de la surface libre : Observation sur des données réelles	213
12.3.	Effet de la surface libre : Modélisation	218
12.4.	Test de la correction analytique de la surface libre sur les données réelles	222
12.5.	Conclusion.....	224
13. Moyenne et estimation de la fonction correctrice		225
13.1.	Les classes selon V_{sz} et f_0	225
13.2.	Les moyennes des rapports de spectres par classes.....	227
13.2.1.	Comparaison des moyennes selon les deux types de rapport : Fourier et réponse 228	
13.2.2.	Comparaison des moyennes selon les deux types de normalisation	230
13.2.3.	Comparaison des rapports non normalisés et normalisés.....	233
13.2.4.	Comparaison des déviations standard selon les classes	235
13.2.5.	Comparaison avec les spectres réglementaires de l'EuroCode 8 ou EC8	239
13.2.6.	Conclusion.....	243
13.3.	Détermination de la fonction correctrice de l'effet de site entre un rocher de référence et un site caractérisé par V_{sz} et f_0	243
13.4.	Retour sur les données.....	246
14. Applications sur le site-test de l'Ebron		251
14.1.	Introduction	251
14.2.	Résumé des études précédentes.....	251

14.2.1.	Étude géotechnique et géologique.....	252
14.2.2.	Enregistrements et analyses des évènements.....	252
14.2.3.	Enregistrements de bruit de fond et analyse H/V.....	253
14.2.4.	Profil géotechnique Vs de référence.....	254
14.3.	Mesures en réseau: stratégie et analyse.....	254
14.3.1.	Mise en place des réseaux: étapes n°1 et 2.....	255
14.3.2.	Analyse des réseaux : étapes n°3 à 7.....	255
14.4.	Estimation de l'effet de site grâce à la fonction correctrice FCES.....	257
14.5.	Conclusions.....	258
Conclusions générales et perspectives		261
15. ANNEXES		266
15.1.	Nomenclature.....	267
15.2.	La méthode SASW.....	267
15.3.	Bruit de fond.....	268
15.3.1.	Fonction de transfert des modèles.....	268
15.3.1.1.	Fonction de transfert numérique des modèles.....	268
15.3.1.2.	Influence de variations de vitesses et d'épaisseurs sur la réponse du modèle M2.1	269
15.3.2.	Inversion des courbes de dispersion théoriques.....	273
15.3.3.	Inversion des courbes de dispersion estimée à partir de bruit de fond synthétique, par l'analyse FK.....	275
15.3.4.	Inversion des courbes d'autocorrélation estimée à partir de bruit de fond synthétique, par l'analyse SPAC.....	276
15.3.4.1.	Modèle M21.....	276
15.3.4.2.	Modèle M23.....	278
15.3.4.3.	Modèle M01.....	279
15.3.4.4.	Modèle M10.2a.....	281
15.3.4.5.	Conclusion.....	282
15.3.5.	Abaques du protocole.....	283
15.4.	Données Kik-Net.....	284
15.4.1.	Les outils.....	284
15.4.1.1.	La fonction de transfert approximée par la réponse à une onde SH.....	284
15.4.1.2.	Le spectre de Fourier et le rapport de ces spectres : Standard Spectral Ratio (SSR)	285
15.4.1.3.	Le spectre de réponse et le Rapport des Spectres de Réponse (RSR).....	286
15.4.1.4.	Le rapport H/V.....	286
15.4.2.	Vérifier le profil de vitesse des ondes S : Comparaison SSRbh et FTbh.....	287
15.4.3.	Définir la fréquence de résonance : SSRbh vs H/V.....	290
15.4.4.	SSR vs RSR.....	291
15.4.5.	Comparaison des rapports moyens sans et avec la normalisation utilisant la méthode du quart de la longueur d'onde.....	292
15.4.6.	Fonction correctrice.....	293
References		294

Table des figures

Figure 1: Schéma de deux capteurs séparés d'une distance r , avec un azimut f et d'une onde qui se propage selon la direction ? (azimut de propagation)..... 36

Figure 2: Exemple d'un réseau circulaire (à gauche) et des anneaux choisis pour le calcul du coefficient d'autocorrélation (à droite)..... 38

Figure 3: Courbes du rapport d'autocorrélation pour 3 anneaux différents (de haut en bas 16m, 18à24m et 29 à 36m). En gris (avec des barres d'erreur) calcul MSPAC sur des données synthétiques de bruit, simulées pour un réseau circulaire de 17 m de rayon, en vert zone valide des calculs, en rouge courbes théoriques..... 39

Figure 4 : Schéma du calcul des courbes d'autocorrélation fréquence par fréquence pour un couple de capteurs 0-1 séparé par une distance $dx_{0,1}$. Extrait de la formation SESARRAY aux Houches en Novembre 2005, session de Cécile Cornou 39

Figure 5 : Emplacement des réseaux a et b avec un capteur central et 5 capteurs sur un cercle de 25 m de rayon (a) et de 50 m de rayon (b)..... 42

Figure 6: a1 : échelle de la réponse théorique R_{th} ; a2 : R_{th} du réseau (a) dans le plan des nombres d'onde ; a3 : coupe de R_{th} selon la droite noire en a2 ; a4 : Courbes limites du réseau dans le plan fréquence-vitesse correspondant aux nombres d'onde, de gauche à droite : $k_{min}/2$, k_{min} (avec k_{min} la largeur du pic central à l'ordonnée 0.5), $k_{alias}/2$, k_{alias} (avec k_{alias} le nombre d'onde à partir duquel le premier pic d'aliasing atteint 0.5)..... 43

Figure 7: Schéma de principe de la méthode FK, extrait de la formation SESARRAY aux Houches en Novembre 2005. À gauche : traces temporelles et sélection de fenêtres pour la fréquence de 1 Hz en grisé, au milieu : exemple de calcul de la semblance pour trois fenêtres avec la sélection du maximum, à droite : report du maximum dans le plan fréquence-lenteur 45

Figure 8 : Modèle M2.1 : (a) : profil de vitesse des ondes P ; (b) : profil de vitesse des ondes S ; (c) : courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Rayleigh en bleu, courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Love en rouge ; (d) : ellipticité du mode fondamental des ondes de Rayleigh pour ce modèle à une dimension. 51

Figure 9: Modèle M2.2 : (a) : profil de vitesse des ondes P ; (b) : profil de vitesse des ondes S ; (c) : courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Rayleigh en bleu, courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Love en rouge ; (d) : ellipticité du mode fondamental des ondes de Rayleigh..... 52

Figure 10 : Modèle M10.2a : (a) : profil de vitesse des ondes P ; (b) : profil de vitesse des ondes S ; (c) : courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Rayleigh en bleu, courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Love en rouge ; (d) : ellipticité du mode fondamental des ondes de Rayleigh..... 52

Figure 11 : Modèle M10.2b : (a) : profil de vitesse des ondes P ; (b) : profil de vitesse des ondes S ; (c) : courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Rayleigh en bleu, courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Love en rouge ; (d) : ellipticité du mode fondamental des ondes de Rayleigh..... 53

Figure 12 : Modèle M10.3 : (a) : profil de vitesse des ondes P ; (b) : profil de vitesse des ondes S ; (c) : courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Rayleigh en bleu, courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Love en rouge ; (d) : ellipticité du mode fondamental des ondes de Rayleigh; (e) : seulement les modes fondamentaux des ondes de Love (rouge) et Rayleigh (bleu)..... 53

Figure 13 : Sensibilité de l'inversion de la courbe de dispersion des ondes de Rayleigh à la bande de fréquence, sur l'exemple du modèle M2.1, avec un espace des paramètres initial à 2 formations : graphiques de droite (a2,b2,c2,d2) : courbe de dispersion (DC) en noire, DC bruitée (points noirs) et DC correspondant aux modèles de l'inversion (échelle de couleur selon la valeur de l'erreur) ; graphiques de gauche (a1,b1,c1,d1) : profil de vitesse du modèle (en noir) et des modèles obtenus par inversion (couleurs selon l'erreur). De haut en bas: extension de la bande de fréquence sur laquelle la courbe de dispersion est déterminée : 8-20 Hz, 4-20 Hz, 2.5-20 Hz et enfin 1.5-20 Hz..... 54

Figure 14 : Sensibilité de l'inversion de la courbe de dispersion des ondes de Rayleigh à la bande de fréquence, sur l'exemple du modèle M2.1, avec un espace des paramètres initial à 2 formations : graphiques de droite (a2,b2,c2) : courbe de dispersion (DC) en noire, DC bruitée (points noirs) et DC correspondant aux modèles de l'inversion (échelle de gris selon la valeur de l'erreur) ; graphiques de gauche (a1,b1,c1) : profil de vitesse du modèle (en noir) et des modèles obtenus par inversion (niveau de gris selon l'erreur). De haut en bas: extension de la bande de fréquence sur laquelle la courbe de dispersion est déterminée : 2-4 Hz, 2-6 Hz et enfin 2-10 Hz.....	56
Figure 15: Modèle M2.1, courbes de dispersion théoriques de Rayleigh (en rouge et orange) et de Love (en bleu et violet). Limites d'aliasing et de résolution des réseaux circulaires de rayon 8, 17, 41, 60 et 110 mètres.....	58
Figure 16: Exemple sur le glissement de Saint Guillaume, Trièves, de la complémentarité de l'analyse des réseaux de bruit de fond et de la méthode SASW. Superposition de la courbe de dispersion (en noir avec les écarts type) issue du réseau de bruit de fond sismique et de la carte de semblance des ondes de surface à partir d'une source active. Figure issue de [Meric et al., 2007]	58
Figure 17 : Comparaison des inversions du modèle M2.1 selon l'espace des paramètres initial, de haut en bas : 2 formations homogènes, 2 formations avec un gradient dans la 1 ^{ère} , 3 formations homogènes (voir Tableau 2). De gauche à droite: profil Vp, profil Vs et courbe de dispersion. Ensemble des modèles avec une erreur inférieure à 0.1 en couleur, profil de vitesse du modèle initial M2.1 en noir, courbe de dispersion directe et bruitée en points noirs.	60
Figure 18: Sensibilité des résultats à l'espace initial de paramètres: exemple pour le modèle M102b. Comparaison des espaces initiaux de paramètres de haut en bas : 2 formations homogènes, 2 formations dont la 1 ^{ère} avec un gradient, 3 formations homogènes (voir Tableau 2). De gauche à droite: profil Vp, profil Vs et courbe de dispersion. Ensemble des modèles avec une erreur inférieure à 0.11 en couleur, profil de vitesse du modèle initial M10.2b en noir, courbe de dispersion directe et bruitée en points noirs.	61
Figure 19: Inversion avec un espace initial des paramètres ne comprenant pas le modèle M2.1, en couleur modèles sélectionnés après l'inversion, en noir modèle initial M2.1, de gauche à droite : Vp, Vs, courbes de dispersion (points noirs : DC théorique bruitée), zoom sur les 5 1 ^{ers} mètres de Vp puis de Vs.....	63
Figure 20 : modèle M 2.1, inversion des courbes de dispersion des ondes de Love (a) des ondes de Rayleigh (b) et des deux ensemble (c). Modèles sélectionnés avec une erreur inférieure à 0.16 en niveau de gris. En noir : profils de vitesse du modèle. Graphiques 1 pour le profil des ondes P, graphiques 2 pour le profil des ondes S et graphiques 3 pour les courbes de dispersion.	65
Figure 21 : modèle M 2.2, inversion des courbes de dispersion des ondes de Love (a) des ondes de Rayleigh (b) et des deux ensemble (c). Modèles sélectionnés avec une erreur, inférieure à 0.15, en niveau de gris. En noir : profils de vitesse du modèle. Graphiques 1 : profil des ondes P, graphiques 2 : profil des ondes S et graphiques 3 : courbes de dispersion.....	66
Figure 22: modèle M 10.2b, inversion des courbes de dispersion des ondes de Love (a), de Rayleigh (b) et des deux ensemble (c). Modèles sélectionnés avec une erreur, inférieure à 0.3, en niveau de gris. En rouge : profils de vitesse du modèle. Graphiques 1) profil des ondes P, 2) profil des ondes S et 3) courbes de dispersion.	67
Figure 23: Modèle M2.1, comparaison de l'inversion de la courbe de dispersion: en haut sans contrainte, au milieu avec Vp contraint dans le substratum, en bas avec tout le profil Vp contraint à 20 %.....	70
Figure 24: Modèle M2.1, comparaison de l'inversion de la courbe de dispersion: en haut sans contrainte, en bas avec Vs contraint dans le substratum.....	72
Figure 25 : Modèle M2.1, comparaison de l'inversion de la courbe de dispersion: en haut avec l'épaisseur contrainte à 10%, en bas sans contrainte	73
Figure 26: Modèle M2.1, comparaison de l'inversion de la courbe de dispersion: en haut sans contrainte, sélection des modèles avec une erreur inférieure à 0.15, en bas avec une contrainte sur la fréquence du pic de l'ellipticité des ondes de Rayleigh à 2Hz, sélection des modèles avec une erreur inférieure à 0.04.....	74
Figure 27: Modèle M01 : de gauche à droite : vitesse des ondes P, vitesse des ondes S, vitesse des ondes de Rayleigh	76
Figure 28: Modèle M23, de gauche à droite : vitesse des ondes P, vitesse des ondes S, vitesse des ondes de Rayleigh des 3 premiers modes, ellipticité des ondes de Rayleigh	77
Figure 29 : Les différents types de réseau : (a) Implantation des trois réseaux circulaires de rayon respectif: 8m, 17m et 41m, (b) réseau triangulaire parfait de longueur caractéristique de 26m.....	78

Figure 30: Implantation des réseaux triangulaires non réguliers utilisés dans la simulation du bruit pour le modèle M21 (réseaux n°1,2,3,4,6 et 7), de dimension caractéristique respective en m: 8, 8.6, 24,38, 48 et 63 79

Figure 31: Histogrammes bruts de la semblance (échelle de couleur selon la valeur de la semblance) obtenus avec des réseaux circulaires de rayon: a) 8m, b) 17 m et c) 41 m. Courbes fines noires : limite d'aliasing (en trait hachuré correspondant à k_{alias} , en pointillés à $k_{alias}/2$) et limite de résolution (en trait plein $k_{min}/2$ et en pointillés k_{min}) selon la géométrie du réseau..... 81

Figure 32: Détermination de la courbe de dispersion du modèle M2.1 avec l'analyse FK. Les trois graphiques sont les histogrammes dont les valeurs sont représentées en couleur ; courbes épaisses bleues : courbes de dispersion théoriques, mode fondamental et les deux 1^{er} modes supérieurs ; (a) : Histogramme correspondant au réseau circulaire de rayon 8 m ; b): de rayon 17 m; c): de rayon 41 m..... 81

Figure 33: Sur le modèle M2.1 - En haut : inversion de la courbe de dispersion estimée entre 3.2 et 12 Hz, modèles avec une erreur inférieure à 0.8 - en bas: inversion de la courbe de dispersion estimée entre 3.2 et 6.5 Hz, modèles avec une erreur inférieure à 0.6. Graphiques de gauche : profil Vp en gris résultant de l'inversion, en noir : Vp du modèle ; graphiques du milieu: idem avec Vs ; graphiques de droite : courbe de dispersion estimée en noir et correspondant aux modèles de l'inversion en gris..... 83

Figure 34: Implantation du réseau circulaire 1 de longueur caractéristique 8.6m en croix bleues et du réseau triangulaire 2 de longueur caractéristique 8.6m en carré rouge 84

Figure 35: En bleu épais : les courbes de dispersion (mode fondamental et les 2 1^{ers} modes supérieurs) synthétiques du modèle M2.1 ; en noir fin : les courbes de dispersion estimées par la méthode FK. Gauche : histogramme correspondant au réseau circulaire 1 de rayon 8m ; droite : histogramme correspondant au réseau triangulaire 2 de longueur caractéristique de 8.6 m..... 84

Figure 36: Implantation du réseau circulaire 2 de longueur caractéristique 19m en croix bleues et du réseau triangulaire 3 de longueur caractéristique 24m en carré rouge..... 85

Figure 37: En bleu épais : les courbes de dispersion (mode fondamental et les 2 1^{ers} modes supérieurs) synthétiques du modèle M2.1 ; en noir fin : les courbes de dispersion estimées par la méthode FK. Gauche : histogramme correspondant au réseau circulaire 2 de longueur caractéristique de 19m ; droite : histogramme correspondant au réseau triangulaire 3 de longueur caractéristique de 24 m..... 85

Figure 38: Implantation du réseau circulaire 3 de longueur caractéristique 45m en croix bleues et du réseau triangulaire 6 de longueur caractéristique 48m en carrés rouges..... 86

Figure 39: En bleu épais : les courbes de dispersion (mode fondamental et les 2 1^{ers} modes supérieurs) synthétiques du modèle M2.1 ; en noir fin : les courbes de dispersion estimées par la méthode FK. Gauche : histogramme correspondant au réseau circulaire de rayon 45m ; droite : histogramme correspondant au réseau triangulaire de longueur caractéristique de 48 m..... 86

Figure 40: Détermination de la courbe de dispersion du modèle M2.3, en rouge courbe dispersion par calcul direct du mode fondamental et des deux 1^{ers} modes supérieurs, en trait noir fin : limites d'aliasing et de résolution: a) histogramme épuré correspondant au réseau circulaire de rayon 8m ; b) histogramme épuré correspondant au réseau circulaire de rayon 17m, en orange estimation de la courbe de dispersion de 11 à 16.7 Hz ; c) histogramme épuré correspondant au réseau circulaire de rayon 41m, en orange estimation de la courbe de dispersion de 5 à 8.3 Hz..... 87

Figure 41: Détermination de la courbe de dispersion du modèle M01, site au rocher ; limites d'aliasing et de résolution en traits noirs ; a) histogramme correspondant au réseau circulaire de rayon 8m ; histogramme correspondant au réseau circulaire de rayon 17m ; histogramme correspondant au réseau circulaire de rayon 41m 88

Figure 42: SPAC pour le modèle M2.1, cercle2 de rayon 17 mètres : a) Sélection dans le plan fréquence vitesse de phase de la zone de validité des courbes d'autocorrélation par sélection visuelle éliminant les effets d'aliasing et de résolution, délimités par les courbes en pointillés, et courbe de dispersion théorique du modèle en vert. b) en gris (avec les barres d'erreur) : rapports des courbes d'autocorrélation calculées avec SPAC pour trois tailles d'anneau, en vert : parties sélectionnées, en rouge : courbes théoriques..... 90

Figure 43: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 8m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle'' et comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M2.1 91

Figure 44: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 17m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle'' et comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M2.1 91

<i>Figure 45: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 41m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle" et comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M2.1</i>	<i>91</i>
<i>Figure 46: Histogramme correspondant à toutes les courbes de l'analyse SPAC avec les trois réseaux circulaires de 8, 17 et 41 mètres de rayons, modèle M2.1. En traits hachurés : limites choisies de validité, en trait plein fin et trait pointillé : limites d'alias.....</i>	<i>92</i>
<i>Figure 47: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 8m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle", en comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M2.3</i>	<i>93</i>
<i>Figure 48: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 17m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle" en comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M2.3</i>	<i>93</i>
<i>Figure 49: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 41m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle" en comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M2.3</i>	<i>93</i>
<i>Figure 50: Histogramme correspondant à toutes les courbes de l'analyse SPAC avec les trois réseaux circulaires de 8, 17 et 41 mètres de rayons, modèle M2.3. En traits hachurés : limites choisies de validité, en trait plein fin et trait pointillé : limites d'aliasing et de résolution, en trait épais : courbe de dispersion théorique.....</i>	<i>94</i>
<i>Figure 51: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 8m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle" en comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M01</i>	<i>95</i>
<i>Figure 52: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 17m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle" en comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M01</i>	<i>95</i>
<i>Figure 53: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 41m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle" en comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M01</i>	<i>95</i>
<i>Figure 54: Histogramme correspondant aux courbes de l'analyse SPAC du réseau circulaire de 41 mètres de rayons, modèle M01. En traits hachurés : limites choisies de validité, en trait plein fin et trait pointillé : limites d'aliasing et de résolution, en trait épais : courbe de dispersion théorique.....</i>	<i>96</i>
<i>Figure 55: En haut : inversion de la courbe de dispersion obtenue par FK, modèle M2.1, erreur inférieure à 0.8, espace des paramètres à 2 couches. En bas : inversion des courbes SPAC, modèle M2.1, espace des paramètres à 2 couches. Erreur 0.5.....</i>	<i>97</i>
<i>Figure 56: localization of the noise array recordings realised in Grenoble</i>	<i>103</i>
<i>Figure 57 : Site over reference (OGMU) ratio of OGDH and OGSR stations compared with H/V from ambient noise and receiver functions.....</i>	<i>103</i>
<i>Figure 58: H/V ratio, sensors s1 to s3 from the left to the right of the top line, and from s4 to s6 from the left to the right of the bottom line.....</i>	<i>104</i>
<i>Figure 59: Result of the inversion of the SPAC curves, left graph: Vs profiles with the colour corresponding to the error value, right graph: in colour dispersion curves corresponding to the obtained models, in black estimated dispersion curve from FK analyse with the array limits (find the SPAC curves in annex), site OGMU.....</i>	<i>105</i>
<i>Figure 60: Inversion of the dispersion curve (in black) obtained by combining FK and SPAC results, left graph: resulting models in colour according to the misfit value, central graph: estimated curve in black, models in colour, right graph: SH response of the models in colour compared with H/V ratio in dark. Site OGMU.....</i>	<i>105</i>
<i>Figure 61 : H/V ratios of the array of 15m radius, sensors s1 to s3 from the top to the bottom on the left hand and s4 to s6 from the top to the bottom on the right hand</i>	<i>106</i>
<i>Figure 62: Result of the inversion of the SPAC curves; left graph: Vs profiles with the colour corresponding to the error value, right graph: in colour dispersion curves corresponding to the obtained models, in black estimated dispersion curve from FK analyse with the array limits (find the SPAC curves in annex), site OGDH</i>	<i>106</i>
<i>Figure 63: Inversion of the dispersion curve (in black) obtained by combining FK and SPAC results, left graph: resulting models in colour according to the misfit value, central graph: estimated curve in black, models in colour, right graph: SH response of the models in colour compared with H/V ratio in dark. Site OGDH</i>	<i>107</i>
<i>Figure 64: H/V ratio, sensors s1 to s3 from the left to the right of the top line, and from s4 to s6 from the left to the right of the bottom line.....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 65 : Result of the inversion of the SPAC curves; left graph: Vs profiles with the colour corresponding to the error value, right graph: in colour dispersion curves corresponding to the obtained models, in black estimated</i>	

<i>dispersion curve from FK analyse with the array limits (find the SPAC curves in annex); misfit less than 1. Site OGSR</i>	108
<i>Figure 66 : Inversion of the dispersion curve (in black) obtained by combining FK and SPAC results, left graph: resulting models in colour according to the misfit value, central graph: estimated curve in black, models in colour, right graph: SH response of the models in colour compared with SH response of the model in red. Misfit less than 0.7 Site OGSR</i>	108
<i>Figure 67: Comparaison entre un modèle avec un faible contraste (en bleu) et un modèle avec un fort contraste (en rouge), de gauche à droite: profils des ondes P, profils des ondes S et courbes de dispersion du mode fondamental et des deux 1^{ers} modes supérieurs</i>	112
<i>Figure 68: Abaque des modèles avec une vitesse en surface de 180 m/s, en profondeur de 720 m/s et une fréquence de résonance variant de 0.3 à 20 Hz. En rouge, trait plein, les courbes de dispersion des modèles avec une fréquence de résonance variant de 0.3 à 20 Hz ; en rouge pointillé la fréquence de résonance qui représente une limite sous laquelle les ondes de Rayleigh n'ont plus d'énergie ; en couleur : en trait plein la limite de résolution et en pointillé la limite d'aliasing pour des réseaux circulaires de rayon 5, 10, 20, 40, 80, 150m</i>	114
<i>Figure 69: Étapes illustrant l'utilisation des abaques: 1) choisir un abaque correspondant à une vitesse des ondes S caractéristique de la 1ère couche, ici 240 m/s ; 2) choisir la courbe correspondant à la fréquence de résonance définie avec le rapport H/V, ici $f_0 = 4\text{Hz}$; 3) choisir des ouvertures de réseaux qui permettront de balayer la bande de fréquence que l'on souhaite caractériser, ici un rayon de 10 m permet de décrire la courbe de dispersion de 8.5 Hz à 13 Hz.</i>	115
<i>Figure 70 : Histogramme de courbes d'autocorrélation en couleurs superposé par la courbe de dispersion estimée par FK en noire avec des barres d'erreur et une sélection manuelle, à titre d'exemple, de l'extension possible de la courbe de dispersion à basse fréquence. Extrait de l'étude de données grecques, sur le site Patra-A</i>	117
<i>Figure 71: Observation du rôle de la bande de fréquence sur l'information cherchée : la vitesse plutôt en surface ou en profondeur? A gauche : profils de vitesse des ondes S correspondant à la courbe de dispersion inversée à droite. En couleur : échelle de la valeur de l'erreur pour les modèles</i>	119
<i>Figure 72: Proposition d zones sismiques en Rhône-Alpes, source: BRGM</i>	130
<i>Figure 73: Results of the H/V ratios across the Isère valley at Saint Gervais. The upper figure shows the localisation of the transversal profile (red line) and the choice of the place for arrays measurements (red circle). In the lower figure, the colour scale represents the amplitude of the H/V ratio; the abscise axis represent each measured points; the ordinate represents the frequency from 4 Hz to 0 Hz.</i>	131
<i>Figure 74: SPAC Results: inversion of the autocorrelation curves with a initial parameters space with one layer overlaying a bedrock; a) Vp profiles, b) Vs profiles, c) dispersion curve picked in black points and theoretical of the selected profiles in grey</i>	132
<i>Figure 75: FK Results: inversion of the dispersion curve estimated with FK, with an initial parameters space with one layer overlaying a bedrock; a) Vp profiles, b) Vs profiles, c) dispersion curves calculated in black points and theoretical DC of the selected profiles in grey</i>	132
<i>Figure 76: DISPERSION CURVE at Saint Gervais, Isère, France. The blue curve with error bars represents the dispersion curve estimated with the FK analyse. In red, picked dispersion curve corresponding to the models obtain by the inversion of the autocorrelation curves. The blue and green limits correspond to aliasing (high frequency) and resolution (low frequency) limits of the 3 arrays used on the field for the measurements.</i>	133
<i>Figure 77 : Inversion of the final dispersion curve obtained by combining FK and SPAC techniques. (a) Vp profiles, (b) Vs profiles, (c) resulting dispersion curves in grey, target dispersion curve in black, limits in plain line.</i>	133
<i>Figure 78: comparison of the H/V (black curves, plain line for the mean value, dashed lines for the standard deviation) with the SH response of the selected models (in grey)</i>	133
<i>Figure 79: Distribution du nombre d'enregistrements par site</i>	155
<i>Figure 80: Distribution de la distance en km et de la magnitude de la base de données extraite de Kik-net</i>	156
<i>Figure 81: Distribution du PGA [gal] (le maximum sur les trois composantes) et de la magnitude de la base de données extraite de Kik-net</i>	156
<i>Figure 82: Distribution de la distance en km et du PGA de la base de données extraite de Kik-net</i>	157

Figure 83: Représentation des deux types d'estimation de la fréquence de résonance de la structure entre la surface et le fond de forage pour l'ensemble des 496 sites. Un 1 ^{er} tri automatique montre en triangle gris les sites où le profil de vitesse n'est pas fiable et en point noir les sites où le profil de vitesse est fiable. Ce tri n'est pas été conservés par la suite [voir texte].....	159
Figure 84: Exemples de pic non net : comparaison des fonctions de transfert de puits FTbh en noir, Ftsurf en rouge pointillés et des rapports des spectres de Fourier SSRbh en bleu. A gauche le site AICH11, à droite le site AOMH09.....	160
Figure 85: Cas d'incompatibilité ente les fonctions de transfert de puits FTbh en noir, Ftsurf en rouge pointillés et les rapports des spectres de Fourier SSRbh en bleu. A gauche le site AKTH18, à droite le site KGSH03.....	160
Figure 86: Distribution of the time-average velocities of the top 5, 10, 20, 30, 50 and 100 meters. Left: Cumulative distribution in percentage; Right: distribution in percentage.....	163
Figure 87: Linear regression between $\log(VS30)$ and $\log(VSz)$ for $z= 5$ (a1), 10 (b1) and 20 (c1) meters. a and b are the value of the coefficient of equation [1], s is the misfit value; Black dot line represents the regression found by Boore with Californian data, red plain line is the regression find with Kik-net data, blue crosses are the data from Kik-net.....	164
Figure 88: Linear regression between $\log(VS30)$ and $\log(VSz)$ for $z= 50$ (d1) and 100 (e1) meters. a and b are the value of the coefficient of equation [1], s is the misfit value; plain line is the regression find with Kik-net data, crosses are the data from Kik-net.....	165
Figure 89: Relationships of the time-average velocities to depths 5 (a2), 10 (b2), 20(c2) meters with V_{s30} . Blue crosses are the values from non-Japanese profiles; and linear regression from Kik-net (red curve) and Boore (dashed black curve).	166
Figure 90: Relationships of the time-average velocities to depths 50 (d2) and 100 (e2) meters with V_{s30} . Blue crosses are the values from non-Japanese profiles; and linear regression from Kik-net (red curve).....	166
Figure 91: Modèle canonique simple. a) profil de vitesse des ondes S, b) Fonction de transfert numérique à différentes profondeurs de la surface (orange) jusqu'à 75 m de profondeur (rouge); c) Rapport des spectres surface sur profondeur, de 75 mètres (rouge) à 15 mètres (noir) de profondeur.	171
Figure 92 : Comparaison des fréquences du 1 ^{er} pic obtenues avec le rapport H/V des enregistrements en surface (HV_fh) et le rapport SSRbh. En rose : les sites dont les deux fréquences sont proches, en bleu : les sites dont les deux fréquences sont différentes à plus de 20 %.....	171
Figure 93: Rapports SSRbh en noir, H/Vh_F du capteur haut en rouge, H/Vb_F du capteur bas en bleu; pour le site ABSH06. Les écarts types sont représentés en pointillés.....	172
Figure 94: A gauche : Comparaison des fréquences de résonances fondamentales définies avec les rapports des spectres de Fourier SSRbh et des spectres de réponse RSRbh. 77 sites montrent une différence d'estimation de la fréquence de résonance de plus de 30%. A droite : Comparaison des amplitudes du premier pic définies avec les rapports des spectres de Fourier SSRbh et des spectres de réponse RSRbh. 106 sites montrent une différence d'estimation de cette amplitude à plus de 30%.....	174
Figure 95: A gauche : Comparaison des fréquences du pic maximal définies avec les rapports des spectres de Fourier SSRbh et des spectres de réponse RSRbh. 66 sites montrent une différence d'estimation de la fréquence dite maximale de plus de 30%. A droite : Comparaison des amplitudes maximales définies avec les rapports des spectres de Fourier SSRbh et des spectres de réponse RSRbh. 144 sites montrent une différence d'estimation de cette amplitude à plus de 30%.....	175
Figure 96: Exemple illustrant le choix de la fréquence de résonance dépendant de l'échantillonnage des courbes ; à gauche : site NGNH23, à droite : site TKSH12. SSRbh en trait plein, RSRbh en pointillés.	175
Figure 97: SSRbh en trait plein, RSRbh en pointillés, écart type en petits pointillés ; site AOMH15.....	175
Figure 98: Sites où les rapports SSRbh et RSRbh sont nettement différents. SSRbh en trait plein, RSRbh en pointillés, écart type en pointillés fins ; gauche) site FKOH02 ; droite) site OITH10.....	176
Figure 99: A gauche courbe moyenne, en trait plein épais, des rapports SSRbh / RSRbh sur 538 sites ; à droite : écart type du rapport SSR / RSR moyen selon la fréquence.....	176
Figure 100: Comparaison de la valeur du rapport SSRbh et du rapport RSRbh à 25 Hz, en points noirs la différence est inférieure à 30%, en losanges gris, la différence est supérieure à 30%.....	177

Figure 101: Comparaison de la valeur du rapport SSRbh et du rapport RSRbh à 0.2 Hz, en points noirs la différence est inférieure à 30%, en losanges gris, la différence est supérieure à 30%.....	177
Figure 102: Velocity profiles of Kik-net sites with Vs30 higher than 750 m/s, the color refers to the Vs30 value in [m/s] as indicated on the right part, the plain black curve is the mean curve and the dot black curves are the mean curve plus and less one standard deviation. From left to right the view is zoomed	182
Figure 103: Standard deviation of the mean Vs profile for the sites with Vs30>750m/s, the color bar represents the number of profile considered at the corresponding depth.....	182
Figure 104: Velocity profiles of sites with Vs30 between 750 m/s and 850 m/s, the color refers to the Vs30 value. The plain black curve is the mean curve and the dot black curves are the mean curve plus and less one standard deviation. From left to right the view is zoomed.....	183
Figure 105: Standard deviation of the mean Vs profile for the sites with 750<Vs30<850m/s, the color bar represents the number of profile considered at the corresponding depth. From a) to c) the view is zoomed, d): comparison with the standard deviation (blue curve) of the group with Vs30>750m/s.....	183
Figure 106: Vs profiles of sites with resonance frequency higher than 10 Hz, the color scale corresponds to the f0 value in Hertz. The plain black curve is the mean curve and the dot black curves are the mean curve plus and less one standard deviation. From left to right the view is zoomed	184
Figure 107: Standard deviation of the mean Vs profile for the sites with f0>10Hz, the color bar represents the number of profile considered at the corresponding depth	184
Figure 108: Characteristics for sites with f0>10Hz and Vs30>750 m/s. a) Vs profiles, color scale according to the Vs30 value, mean profile in plain black and mean plus one standard deviation in dot black; b) standard deviation of the mean Vs profile of the 9 sites, color scale according to the number of sites taken into account for each depth;.....	185
Figure 109: Characteristics for sites with f0>10Hz and 750<Vs30<850 m/s. a) Vs profiles, color scale according to the Vs30 value, mean profile in plain black line and mean +/- one standard deviation in dot black lines; b) standard deviation of the mean Vs profile of the 5 sites, color scale according to the number of sites taken into account for each depth; c) comparison of the standard deviations: of the groups with f0>10Hz (red curve), Vs30>750m/s (blue curve) 750<Vs30<850 m/s (black curve), f0>10Hz and Vs30>750 m/s (violet curve) and f0>10Hz and 750<Vs30<850 m/s (orange curve).....	185
Figure 110: Mean velocity profiles for each group: f0>10Hz (red curve), Vs30>750m/s (blue curve) 750<Vs30<850 m/s (black curve), f0>10Hz and Vs30>750 m/s (violet curve) and f0>10Hz and 750<Vs30<850 m/s (orange curve).....	186
Figure 111: Normalized standard deviation of the mean profiles for each group. The standard deviation is normalized by the group with Vs30>750m/s. The groups are: f0>10Hz (red curve), Vs30>750m/s (blue curve) 750<Vs30<850 m/s (black curve), f0>10Hz and Vs30>750 m/s (violet curve) and f0>10Hz and 750<Vs30<850 m/s (orange curve). From left to right the view is zoomed.	186
Figure 112: Observed variability of site response for the first group (Vs30 > 750 m/s) : a) H/V ratio of seismic events recorded at the surface; b) SSRbh; the color scale refers to Vs30 value, solid black curves correspond to the average curves for the whole group, dotted black cures correspond to the average +/- one standard deviation	188
Figure 113: a) Mean H/V ratio according to the Vs30 value; b to d: Comparison of mean SSRbh: the means were done according to b) the Vs30 values, c) the VsDH values, d) the depth of the hole values.....	189
Figure 114: Observed variability of site response for the second group (750 m/s < Vs30 < 850 m/s) : a, Left) H/V ratio of seismic events for the surface station; b, right) SSRbh. The color scale refers to Vs30 value, solid black curves correspond to the average curves for the whole group, and dotted black cures correspond to the average +/- one standard deviation.....	190
Figure 115 : Observed variability of site response for the third group (f0 > 10 Hz): a, Left) H/V ratio of seismic events for the surface station; b, right) SSRbh. The color scale refers to Vs30 value, solid black curves correspond to the average curves for the whole group, and dashed black cures correspond to the average +/- one standard deviation.....	191
Figure 116: Observed variability of site response for the fourth group (f0>10 Hz and Vs30>750m/s): a, Left) H/V ratio of seismic events for the surface station; b, right) SSRbh. The color scale refers to Vs30 value, solid black	

curves correspond to the average curves for the whole group, and dashed black curves correspond to the average \pm one standard deviation..... 191

Figure 117: Observed variability of site response for the fourth group ($f_0 > 10$ Hz and $750 < V_{s30} < 850$ m/s): a, Left) H/V ratio of seismic events for the surface station; b, right) SSRbh. The color scale refers to V_{s30} value, solid black curves correspond to the average curves for the whole group, and dashed black curves correspond to the average \pm one standard deviation..... 192

Figure 118: Five groups of sites: $f_0 > 10$ Hz (red curve), $V_{s30} > 750$ m/s (blue curve) $750 < V_{s30} < 850$ m/s (black curve), $f_0 > 10$ Hz and $V_{s30} > 750$ m/s (violet curve) and $f_0 > 10$ Hz and $750 < V_{s30} < 850$ m/s (orange curve); Comparison of : a) mean SSRbh; b) mean H/V seism; the standard deviations for c) the mean SSRbh and d) the mean H/V seism 192

Figure 119: Shear wave velocity profiles of generic rock site models, determined with V_{s30} from 600 m/s to 2800 m/s, represented with a gray scale. 193

Figure 120 : Comparison of the generic rock site models with $V_{s30} = 700$ m/s, 800 m/s and 900 m/s with real V_s profiles with 750 m/s $< V_{s30} < 850$ m/s; a) legend according to V_{s30} ; b) Both real and generic profiles; c) zoom of the first 90 meters; d) Mean real profile for sites with 750 m/s $< V_{s30} < 850$ m/s in purple and generic profiles with $700 < V_{s30} < 900$ m/s..... 194

Figure 121: a) In gray plain lines SH response for generic models; in dot line SH response of the generic model defined with $V_{s30} = 800$ m/s b) in red mean SH response of rock sites with $V_{s30} > 750$, and in blue SH response of generic sites corresponding to the real rock sites with $V_{s30} > 750$ 194

Figure 122: Distribution des caractéristiques de fond de forage en terme de vitesse et de profondeur 201

Figure 123 : Schéma de la normalisation : A station en surface ; B : station en fond de forage qui se trouve parfois au rocher parfois sur des sols plus mous ; C : station fictive à très grande profondeur, environ 8000 mètres, dans un rocher très dur, avec V_s autour de 3600 m/s ; D : station fictive en surface sur un rocher de référence standard avec $V_{s30} = 800$ m/s..... 202

Figure 124: Profils génériques en bleu pour $V_{s30} = 600$ à 2800 m/s; en rouge : profils génériques de $V_{s30} = 100$ m/s à 550 m/s et de $V_{s30} = 2850$ m/s à 3500 m/s ; en noir : profils par mesures down-hole ; les croix vertes représentent les fonds de forage des sites qui sont en dehors de la famille de modèles génériques définis par Boore ; à gauche: site ABSH04; à droite: site ABSH07..... 204

Figure 125: Exemple du site YMTH15. A gauche : avec le profil mesuré en trait plein rouge, la prolongation avec un profil générique en traits discontinus noirs et le profil générique correspondant à $V_{s30} = 800$ m/s en pointillés bleus. A droite : avec le profil générique, en traits discontinus noirs, utile pour le calcul du quart de la longueur d'onde 204

Figure 126: Profil mesuré en trait plein rouge, allongé par le profil générique défini par V_{s30} en traits hachés noirs, et comparé au profil générique de référence standard en pointillés bleus sur quatre sites : a) FKO06 avec le générique $V_{s30} = 300$ m/s, profondeur du puits = 190m ; b) YMTH14 avec le générique $V_{s30} = 300$ m/s, profondeur du puits = 46m ; c) AKTH07 avec le générique $V_{s30} = 250$ m/s, profondeur du puits = 40m ; d) FKO02 avec le générique $V_{s30} = 2200$ m/s, profondeur du puits = 40m 205

Figure 127: Estimation de l'amplification sur le profil générique d'une part, en pointillés bleus, de B à C et d'autre part, en trait plein rouge, de B à C et prolongé par une vitesse constante en surface 206

Figure 128: Exemple du calcul de la fonction de transfert 1D numérique en B, notée FT(B) en pointillés bleus, et estimée par FT(AC)/FT(AB), notée FT(BC), en trait plein rouge..... 207

Figure 129: Estimation des fonctions de transfert avec la méthode du quart de la longueur d'onde en bleu et avec la modélisation SH en rouge. Traits pleins : FT(DC) ; pointillés : FT(BC) sur quatre sites : a) FKO06 avec le générique $V_{s30} = 300$ m/s, profondeur du puits = 190m ; b) YMTH14 avec le générique $V_{s30} = 300$ m/s, profondeur du puits = 46m ; c) AKTH07 avec le générique $V_{s30} = 250$ m/s, profondeur du puits = 40m ; d) FKO02 avec le générique $V_{s30} = 2200$ m/s, profondeur du puits = 40m..... 209

Figure 130: Comparaison des rapports de spectres SSR normalisés avec les étapes 1 et 2; en trait pointillé bleu, normalisation par la méthode du quart de la longueur d'onde ; en trait pointillé rouge, normalisation par les modélisations 1D des fonctions de transfert et en trait plein noir sans normalisation; exemple sur quatre sites : a) FKO06 avec le générique $V_{s30} = 300$ m/s, profondeur du puits = 190m ; b) YMTH14 avec le générique $V_{s30} = 300$ m/s, profondeur du puits = 46m ; c) AKTH07 avec le générique $V_{s30} = 250$ m/s, profondeur du puits = 40m ; d) FKO02 avec le générique $V_{s30} = 2200$ m/s, profondeur du puits = 40m..... 210

Figure 131: Facteur de normalisation $FN(800)$ ($= FT(BC) / FT(DC)$), estimé avec la méthode du quart de la longueur d'onde en trait plein et avec la modélisation 1D à une réponse SH en pointillé sur quatre sites : a) FKOH06 avec le générique $V_{s30}=300$ m/s, profondeur du puits = 190m ; b) YMTH14 avec le générique $V_{s30}=300$ m/s, profondeur du puits = 46m ; c) AKTH07 avec le générique $V_{s30}=250$ m/s, profondeur du puits = 40m ; d) FKOH02 avec le générique $V_{s30}=2200$ m/s, profondeur du puits = 40m..... 211

Figure 132: Schéma de la courbe de l'évolution de l'amplitude normée par l'amplitude original, en prenant en compte seulement l'effet de surface libre ; exemple pour une station à la profondeur correspondant à une fréquence fondamentale de résonance de 2 Hz..... 213

Figure 133: Rapport du spectre au rocher en surface sur le spectre au rocher en profondeur, pour illustrer l'effet de la surface libre sur huit couples de stations proches. Les couples sont notés : « site 1 over site2 », la station en surface du site 2 est la station de référence en surface, la station en profondeur du site 1 est la station de référence en profondeur. Les deux stations de référence sont équivalentes en terme de vitesse caractéristique. En trait fin vertical : fréquence destructrice correspondant au capteur en fond de forage 216

Figure 134: Comparaison des rapports SSR_{bh} et SSR_{surf} sur 8 couples de stations. Les couples sont notés : « site 1 over site2 », la station en surface du site 2 est la station de référence en surface, la station en profondeur du site 1 est la station de référence en profondeur. Les deux stations de référence sont équivalentes en terme de vitesse caractéristique. $SSR_{bh} = \text{site1}(\text{surface}) / \text{site1}(\text{profondeur})$ et $SSR_{surf} = \text{site1}(\text{surface}) / \text{site2}(\text{surface})$ La fréquence destructrice correspondant au capteur en fond de forage est en annotation sur les graphiques et en trait fin gris vertical 217

Figure 135: Réponse du modèle générique défini par $V_{s30}=800$ m/s, à une onde SH avec plusieurs angles d'incidence de 10 à 60°, à différentes profondeurs de 20 à 320 mètres, recalée vers la fréquence fondamentale de 3.2 Hz à 100 mètres de profondeur..... 219

Figure 136: Réponses lissées par Konno-Ohmachi, $b=10$, du modèle générique défini par $V_{s30}=800$ m/s, à une onde SH avec plusieurs angles d'incidence de 10 à 60°, à différentes profondeurs de 20 à 320 mètres, recalée vers la fréquence fondamentale à la profondeur de 100 mètres. 220

Figure 137: Exemple de correction de l'impédance sur un modèle générique défini par $V_{s30}=800$ m/s, considérant la réponse SH à 100m de profondeur : en pointillés rouges : facteur correctif de l'impédance calculé par la méthode que quart de la longueur d'onde ; en vert clair : réponse SH lissée avec Konno-Ohmachi, $b=10$, en bleu la même courbe corrigé de l'impédance, c'est-à-dire la courbe verte divisée par la courbe en pointillés rouges. 220

Figure 138: A partir du modèle générique défini par $V_{s30}=800$ m/s, réponses SH estimées à différentes profondeurs de 20m à 320 m et pour des angles d'incidence de 0° à 60°, corrigées de l'effet d'impédance et décalée vers la fréquence destructrice de référence $f_{dest}=3.2$ Hz..... 221

Figure 139: En bleu courbe moyenne de l'ensemble des réponses SH lissées et corrigées de l'impédance, à différentes profondeurs et différents angles d'incidence, recalées sur la fréquence référence définie à 100m de profondeur. En rouge: Construction analytique d'une courbe type, en trait plein la fonction $cor2$, en tirets la fonction $cor1$ et en pointillés-tirets la fonction correctrice SL , moyenne entre $cor1$ et $cor2$ 222

Figure 140: Comparaison des rapports : SSR_{bh} brut en trait haché rouge, SSR_{bh} corrigé de l'effet de surface libre en point-trait noir et SSR_{surf} en trait plein bleu. La fréquence de résonance du site où le rocher en profondeur est considérée, est en annotation sur les graphiques 223

Figure 141: Caractérisation des rochers par le rapport H/V_{seism} pour les sites en surface (trait plein vert) et en profondeur (pointillés rouges)..... 224

Figure 142: Distribution des couples (V_{sz}, f_0) sur les sites sélectionnés dans la base de données Kik-net... 227

Figure 143 : Schéma des différents types de moyenne sur les rapports de spectres observée..... 228

Figure 144: Comparaison des moyennes avec les deux types de rapports de spectres : de Fourier (SSR) en traits hachurés et pointillés pour les écarts-type, et de réponse (RSR) en trait plein et zone de gris pour les écarts-type ; normalisés avec la méthode du quart de la longueur d'onde ; pour les 24 classes déterminées par $vs30$ et f_0 sur 473 sites. Le trait vertical noir représente la fréquence minimale de la classe considérée. 229

Figure 145: Comparaison des deux types de normalisation sur le rapport des spectres de réponse, en rouge avec la méthode la réponse SH, et en bleu la méthode du quart de la longueur d'onde ; pour les 24 classes déterminées par $vs10$ et f_0 sur 494 sites 231

Figure 146: Comparaison des deux types de normalisation sur le rapport des spectres de réponse, en rouge avec la méthode la réponse SH, et en bleu la méthode du quart de la longueur d'onde ; pour les 24 classes déterminées par vs30 et f_0 sur 473 sites.....	232
Figure 147: Comparaison des rapports de spectres de réponse bruts en trait hachuré, et normalisés avec la méthode du quart de la longueur d'onde, en trait plein; pour les 24 classes déterminées par vs30 et f_0 sur 473 sites	233
Figure 148: Valeur de la profondeur moyenne et de la vitesse de fond de forage moyenne par groupe selon Vs30, représentées avec leurs barres d'erreur type	234
Figure 149: Comparaison des déviations standard sur les moyennes des rapports de spectres de réponse normalisés, avec une classification selon Vs10 en bleu et Vs30 en rouge. Le trait vertical noir représente la fréquence minimale de la classe considérée, les traits horizontaux noirs représentent la valeur 1.3 (soit environ 30% de variabilité) et la valeur 2.....	236
Figure 150: Comparaison des rapports des déviations standard (sur les moyennes des rapports de spectres de réponse normalisés) : déviation standard selon Vs10 sur déviation standard selon Vs30. Le trait vertical noir représente la fréquence minimale de la classe considérée, les traits horizontaux noirs représentent la valeur 1.3 (soit environ 30% de variabilité) et la valeur 1	237
Figure 151: Rapport des écarts-type des RSRn21 (normalisés) d'une classe (V_{sz}, f_0) sur la classe correspondant à la même vitesse V_{sz} sans tri sur f_0 , en trait vertical la fréquence de résonance f_{min} délimitant la borne minimale de la classe considérée.....	238
Figure 152: Comparaison des rapports de spectres de réponse, normalisés avec la méthode du quart de la longueur d'onde, multipliés par le spectre réglementaire au rocher (en trait épais de rouge à vert) avec les spectres réglementaires de l'EC8 en trait fin bleu ; pour les 24 classes déterminées par vs30 et f_0 sur 473 sites, en trait vertical rouge la fréquence de résonance f_{min} délimitant la borne minimale de la classe considérée.	240
Figure 153: Représentation du rapport, noté R, des RSRbh normalisés (?/4) moyens multipliés par le spectre réglementaire au rocher, sur le spectre réglementaire correspondant au groupe considéré, c'est donc le rapport des deux courbes de la Figure 152 pour chaque classe, en trait vertical rouge la fréquence de résonance f_{min} délimitant la borne minimale de la classe considérée.....	241
Figure 154: Comparaison des rapports de spectres, normalisés et corrigés de l'effet de surface libre, multipliés par le spectre réglementaire au rocher (en trait épais de rouge à vert) avec les spectres réglementaires de l'EC8 en trait fin bleu ; pour les 24 classes déterminées par vs30 et f_0 sur 473 sites, en trait vertical rouge la fréquence de résonance f_{min} délimitant la borne minimale de la classe considérée.....	242
Figure 155: Ajustement linéaire sur les valeurs logarithmique de V_{sz} et de l'amplitude moyenne entre f_{min} et 10 Hz, avec l'écart type et le coefficient de corrélation.....	244
Figure 156: Ajustement linéaire sur les valeurs logarithmique (logarithme népérien) de f_0 et de l'amplitude moyenne entre f_{min} et 10 Hz, avec l'écart type et le coefficient de corrélation.....	244
Figure 157: Fonctions correctrices définies avec : en rouge : Vs30 moyen de gauche à droite : 138, 286, 518 et 800 m/s et f_0 moyen de haut en bas : 0.5, 1, 3, 6, 10 et 12 Hz, en tirets rouges avec Vs30 et f_0 égaux à la borne minimale, en tirets bleus avec Vs30 et f_0 égaux à la borne maximale.....	246
Figure 158: Écarts-type (sur les valeurs logarithmiques) moyens selon la fréquence entre les RSRnc et d'une part les fonctions correctrices FCES suivant les différents paramètres (trait plein, vert ; Vs05, violet ; Vs10, bleu ; Vs20, noir ; Vs30 et orange : f_0), et d'autre part les EC8, trait plein rouge : toutes classes confondues et en pointillés suivant les différentes classes de vitesse : rose : classe A, bleu : classe B, gris : classe C et rouge : classe D.....	248
Figure 159: Valeur absolue des résidus amplifications spectrales mesurées et amplifications spectrales calculées, pour tous les sites selon leur classe, selon vs30 et f_0 , en bleu résidus avec la fonction correctrice, en rouge résidus avec les EC	250
Figure 160: Localisation du site de l'Ebron, du séisme en mer Ligure et de la station BOR au rocher à Nice	252
Figure 161: Enregistrements du séisme de Ligure (de haut en bas): à Nice au Mont Boron, station BOR; à la station JUL au rocher à l'Ebron et aux stations sur les argiles AVA et AMO.....	253
Figure 162: gauche) station AMO, droite) station AVA. Pour les deux stations: courbe épaisse noire: SSR moyen, courbe noir pointillés: H/Vn (bruit) moyen, courbe fine grise : H/Vs des événements.....	254

Figure 163 : Gauche) Modèle du profil d'après des mesures de puits; droite) Réponse 1D numérique à une onde SH, du profil modèle.....	254
Figure 164: Géométrie des réseaux, ronds rouges pour le type circulaire, triangles mauves pour le type triangulaire	255
Figure 165 : Inversion, avec un espace initial des paramètres d'une couche sur un substratum avec un gradient de vitesse suivant une loi-puissance: gauche) profils de l'inversion de la courbe de dispersion estimée par FK avec une erreur de moins de 0.7; droite) profils de l'inversion de SPAC avec une erreur de moins de 0.5. Ligne noire épaisse: Profil $V_s(z)$ de référence	256
Figure 166: Gauche) Comparaison de la courbe de dispersion estimée avec FK (courbe noire) et histogramme des courbes SPAC dans le domaine fréquence vitesse de phase, en échelle de gris selon la valeur de la semblance; droite) Courbe de dispersion étendue de 1.8 Hz à 22 Hz en combinant les analyses FK et SPAC	256
Figure 167: Gauche) En échelle de gris (selon la valeur de l'erreur) les profils V_s de l'inversion de la courbe de dispersion étendue avec un espace initial des paramètres d'une couche sur un substratum avec un gradient de vitesse suivant une loi-puissance ; ligne épaisse noire $V_s(z)$ de référence Droite) réponse SH du profil de référence (ligne épaisse grise foncée), H/V_n de la station AVA (ligne noire en pointillés) et réponse SH des modèles obtenus par l'inversion de la courbe de dispersion (graphique de gauche).....	256
Figure 168: Gauche) fonctions de transfert: en trait noir fin: SSRbh corrigé normalisé, moyen sur les sites tels que $180 < V_{S30} < 360$ m/s et $1 < f_0 < 2$ Hz avec les écarts type en gris, en trait plein rouge : SSR moyen à AMO, en pointillés bleus : SSR moyen à AVA. Droite): Comparaison des SSR en AMO, brut (trait plein rouge) et ramené à un rocher de référence (trait pointillé rouge), de la fonction correctrice FCES (trait plein noir) et de SSRbh corrigé normalisé, moyen sur les sites tels que $180 < V_{S30} < 360$ m/s et $1 < f_0 < 2$ Hz (noire pointillés).....	258
Figure 169: Fonction de transfert définie par la réponse à une onde SH pour les cinq sites test. En bas à droite toutes les réponses SH sont représentées sur un même graphique	269
Figure 170: Fonction de transfert définie par la réponse à une onde SH pour le modèle M2.1 avec des variations sur h : l'épaisseur, v : la vitesse des ondes S et c : le contraste d'impédance. En pointillés noirs, réponse SH du modèle initial M2.1 sans variation des paramètres.	272
Figure 171: Modèle M2.1, inversion de la courbe de dispersion par calcul direct, bruitée, définie de 4 à 10 Hz. Observation de la contrainte sur le profil V_p , de haut en bas : sans contrainte, avec V_p contraint au substratum, avec V_p contraint sur tout le profil. Sélection des modèles avec une erreur inférieure à 0.6.....	273
Figure 172: Modèle M2.1, inversion de la courbe de dispersion par calcul direct, bruitée, définie de 2 à 6 Hz. Observation de la contrainte sur le profil V_p , de haut en bas : sans contrainte, avec V_p contraint au substratum, avec V_p contraint sur tout le profil. Sélection des modèles avec une erreur inférieure à 0.13.....	274
Figure 173: Inversion de la courbe de dispersion estimée avec FK pour le modèle M2.3, modèles après inversion avec une erreur inférieure à 0.15 en gris, $640 < V_{s0} < 710$ m/s, modèle numérique en rouge.....	275
Figure 174: Inversion de la courbe de dispersion estimée avec FK pour le modèle M01, modèles après inversion avec une erreur inférieure à 0.15, $760 < V_{s0} < 1050$ m/s, modèle numérique en rouge.....	275
Figure 175: Inversion des courbes SPAC, modèle M2.1, a) : profils des modèles de vitesse des ondes P selon la valeur de l'erreur en niveau de gris, b) : profils des modèles de vitesse des ondes S selon la valeur de l'erreur en niveau de gris, c) Courbe de dispersion des modèles selon la valeur de l'erreur en niveau de gris, courbe de dispersion théorique en vert, d à m) Courbes d'autocorrélation pour différents rayons indiqués en ordonnée (points noirs : calcul SPAC, niveau de gris : modèles sélectionnés)	277
Figure 176: Inversion des courbes SPAC, modèle M2.3 a) : profils des modèles de vitesse des ondes P selon la valeur de l'erreur en niveau de gris, b) : profils des modèles de vitesse des ondes S selon la valeur de l'erreur en niveau de gris, c) Courbe de dispersion des modèles selon la valeur de l'erreur en niveau de gris, courbe de dispersion théorique en vert, d à m) Courbes d'autocorrélation pour différents rayons indiqués en ordonnée (points noirs : calcul SPAC, niveau de gris : modèles sélectionnés)	278
Figure 177: Inversion des courbes d'autocorrélation, paramètres initiaux à 2 couches, modèle M01	279
Figure 178: Inversion des courbes SPAC, paramètres initiaux à 1 couche, modèle M01.....	280
Figure 179: Inversion des courbes SPAC du modèle M10.2a, résultat accepté avec une erreur inférieure à 0.6. La vitesse sur les 10 premiers mètres est bien estimée.....	281

<i>Figure 180 : Coefficient de Poisson moyen sur différents profils de vitesse caractérisés par Vs05, l'échelle de couleur correspond à la gamme de Vs05, pour chaque gamme il est noté le nombre de sites utilisés pour le calcul de la moyenne de la gamme concernée.</i>	285
<i>Figure 181: sites avec Vs non fiables, SSRbh en bleu, FTbh en noir</i>	288
<i>Figure 182: sites avec Vs non fiables, SSRbh en bleu, FTbh en noir</i>	289
<i>Figure 183: Rapport des écarts-type des moyennes obtenues sans et avec la normalisation utilisant la méthode du quart de la longueur d'onde. Rapport RSRn sur RSR bruts en bleu, et $\gamma=1$ en rouge. L'écart type est un facteur multiplicateur qu'il faut multiplier à la valeur moyenne pour obtenir une fois la classique valeur moyenne plus une fois l'écart type.</i>	292

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Caractéristiques des modèles étudiés, la fréquence de résonance f_0 et l'amplitude associée sont définies à partir de la réponse à une dimension à une onde SH, voir pour cela le paragraphe 15.3.1</i>	51
<i>Tableau 2 : Estimation de la vitesse de la 1^{ère} formation avec et sans contrainte sur la profondeur du substratum</i>	72
<i>Tableau 3 : Caractéristiques des réseaux circulaires, définition des nombres d'onde k_{alias} et k_{min} et observation des ordres de grandeur avec des règles simples $k_{alias} \sim 2p/d_{min}$ et $k_{min} \sim 2p/d_{carac}$</i>	79
<i>Tableau 4: Tableau type de résumé des résultats des méthodes combinées utilisant le bruit de fond pour un site</i>	136
<i>Tableau 5: distribution des enregistrements selon la magnitude et le PGA</i>	157
<i>Tableau 6: Moyenne et écart-types des vitesses et profondeur en fond de forage selon la détermination du f_0 avec SSRbh ou HV</i>	170
<i>Tableau 7: Couple de stations pour observer les effets de la surface libre, colonnes n°12 : vitesse ponctuelle en fond de forage ; n°13 : fréquence fondamentale de résonance à la profondeur du fond de forage ; n°14 : fréquence à partir de laquelle les rapports H/V en surface et en profondeur sont différents à plus de 30%; n°15 : Fréquence à partir de laquelle le rapport SL est supérieur à 1</i>	215
<i>Tableau 8: Classes selon différentes vitesses moyennes sur les 5, 10, 20 mètres et classes EC8 selon V_{s30}</i>	226
<i>Tableau 9: Distribution du nombre de sites selon les classes définies par V_{s05}, V_{s10}, V_{s20} et V_{s30}</i>	226
<i>Tableau 10: Classes selon la fréquence de résonance</i>	226
<i>Tableau 11: Niveau d'amplification $A(param)$ de la fonction correctrice de l'effet de site suivant le paramètre, noté param, utilisé (vitesse moyenne ou fréquence de résonance). Amplification estimée avec un ajustement linéaire : $A(param) = (param_{ref}/param)^a$</i>	245
<i>Tableau 12: Écart type de la fonction correctrice de l'effet de site sur l'ensemble des sites, et en dernière ligne, écart type des EC8 par rapport à l'ensembles de sites</i>	248
<i>Tableau 13: Mesures de vitesse d'après les forages réalisés à proximité des stations AVA et AMO</i>	252
<i>Tableau 14: Espace initial des paramètres pour l'inversion, la vitesse évolue avec un gradient dans la première couche</i>	255
<i>Tableau 15: Valeur des fréquences de résonance moyenne par groupe selon V_{s30}</i>	293
<i>Tableau 16: Valeur des fréquences de résonance moyenne par groupe selon V_{s20}</i>	293
<i>Tableau 17: Valeur des fréquences de résonance moyenne par groupe selon V_{s10}</i>	293
<i>Tableau 18: Valeur des fréquences de résonance moyenne par groupe selon V_{s05}</i>	293

Introduction

Les tremblements de terre, un des risques naturels les plus meurtriers, sont source de nombreuses interrogations qui ont fait naître des mythes et légendes il y a fort longtemps. Ainsi au XVII^{ème} siècle le poisson-chat Namazu est tenu pour responsable des séismes au Japon. Portant sur son dos l'archipel nippon, il provoquerait les séismes en s'agitant. Étrangement on entend encore dire que les poissons-chats sont très sensibles aux signes avant-coureurs d'un séisme... Cependant aucune méthode n'a donné de résultats probants pour la prévision de séisme. A défaut de pouvoir prévoir un séisme, on s'attache à en limiter les dégâts par la prévention. Pour cela une bonne connaissance des aléas est nécessaire. L'analyse de l'aléa sismique peut se découper en deux volets : l'étude de la source sismique elle-même (déformation et activité des failles, initiation et dynamique de la rupture), et l'étude de l'effet des ondes émises par la source. Ce deuxième point consiste à estimer le mouvement du sol en un site donné compte tenu des caractéristiques de la source et du milieu traversé. En sub-surface, des effets locaux, dus à la géologie et morphologie du site, peuvent grandement affecter les caractéristiques de ces mouvements, et aggraver dommages.

Après les derniers séismes meurtriers ou à fort coût économique, comme souvent cités : Caracas (Venezuela) 1967, Mexico 1985, Loma prieta (San Francisco) 1989, Kobe (Japon) 1995, Izmit (Turquie) 1999, Francisco (Inde) 2001, Francisco (Iran) 2003, Yogyakarta (Indonésie) 2006, Niigata (Japon) 2004 et 2007, d'importants dégâts dus en partie aux effets de site ont été constatés. Une meilleure estimation a priori des effets de site apparaît alors comme un des éléments essentiels pour mieux prévenir les risques sismiques. De gros efforts ont été faits dans cet objectif depuis le séisme de Caracas en 1967, à la fois pour intégrer cette prise en compte de manière simple dans la réglementation parasismique, et pour élaborer des méthodes plus sophistiquées pour les études ponctuelles.

L'enjeu est de caractériser la modification du signal sismique par les conditions géologiques locales. Nous ne sommes pas démunis d'outils pour cet enjeu mais il s'avère cependant dans la pratique que les méthodes ne répondent pas aux besoins. D'une part, l'approche suivie dans les codes de construction parasismique, nécessairement forfaitaire et simple, apparaît souvent impropre à prendre en compte de nombreux cas de figure. Et d'autre part les méthodes plus élaborées apparaissent souvent trop coûteuses pour une mise en œuvre systématique, en particulier pour les pays en voie de développement et les pays à sismicité modérée. C'est pourquoi le développement de méthodes combinant à la fois la simplicité, le faible coût et la pertinence physique est un objectif important. Les mesures de bruit de fond, méthode géophysique originale utilisant les vibrations ambiantes, correspondent a priori à ce type de besoin, et de plus elles sont applicables en zone urbaine.

Un très grand nombre de travaux sur ce bruit de fond sismique a été entrepris depuis plusieurs décennies, au sein desquels on peut identifier trois contributions majeures : Kanai [Kanai et al. 1954], Francisco [Francisco, 1957] et Nakamura [Nakamura, 1989].

Le travail pionnier de Kanai a consisté à proposer une classification des sites sur la base du bruit de fond pour améliorer la connaissance des effets de la géologie locale. A partir des années 50, grâce au développement technique, les capacités du bruit sismiques ont été rapidement mises en valeur. Les méthodes en réseau, basées sur la propriété dispersive des ondes de surface supposées composer le bruit, naissent. Ces méthodes sont approchées de deux manières différentes : par Francisco ([Francisco, 1957], [Francisco, 1965]) avec l'analyse des corrélations des signaux (SPAC) et par Capon ([Capon et al., 1967], [Capon, 1969]) avec l'analyse dans le plan fréquence-nombre d'onde (FK). Puis vient la méthode du rapport H/V (rapport des

composantes spectrales horizontales sur verticale) introduite par [Nogoshi et al., 1971] puis reprise et développée par [Nakamura, 1989].

Comme mis en évidence par Bonnefoy-Claudet [Bonnefoy-Claudet, 2004], on a assisté depuis deux décennies à une explosion des études et travaux, avec une forte prédominance de la méthode H/V en raison de sa simplicité. Mais malgré cette évolution exponentielle, la pratique actuelle pour le dimensionnement courant ne fait quasiment pas appel à ces techniques; si elles sont plus utilisées dans les études locales de microzonage, cette utilisation donne cependant souvent lieu à de nombreux débats car son application à la modification des spectres selon les conditions de sites n'est absolument pas standardisée et le passage d'une information qualitative et à un dimensionnement quantitatif pose un certain nombre de questions délicates non encore résolues de manière consensuelle. Le but de cette thèse n'est donc pas d'ajouter une nouvelle série de travaux théoriques ou des études de cas à une liste déjà abondante, mais de développer et de valider des méthodologies opérationnelles utilisant le bruit de fond sismique pour une prise en compte aussi réaliste que possible des effets de site dans un contexte réglementaire. L'idée est de coupler des informations tirées de mesures "H/V" (fréquence fondamentale) et de mesures en réseau (vitesse d'ondes de cisaillement, ou ondes S, au minimum sur les 10 premiers mètres) pour caractériser les conditions de site, et d'établir des corrélations statistiques avec les fonctions d'amplification sur la base d'un grand nombre de données très bien étalonnées, maintenant disponibles grâce au réseau japonais Kik-net. Ce travail est donc essentiellement axé vers une utilisation pratique des méthodologies existantes dans la communauté académique, pour la communauté de l'ingénierie parasismique.

Cette thèse se découpe en deux grands volets : tout d'abord une étude sur l'utilisation du bruit de fond pour identifier quels sont les paramètres caractéristiques d'un site que les méthodes actuelles de traitement (H/V, réseau) peuvent permettre de déterminer de façon fiable et robuste, puis une étude sur la base de données japonaise Kik-net pour quantifier la corrélation entre les mouvements sismiques, caractérisés dans le domaine spectral (Fourier ou spectres de réponse), et les caractéristiques du site ainsi accessibles avec le bruit de fond.

Chapitre I : Détermination de la fréquence de résonance f_0 et de la vitesse des ondes S, V_s , à partir de l'utilisation combinée des méthodes basées sur le bruit de fond

Le 1^{er} volet a donc pour but la mise en place d'un protocole sur l'utilisation du bruit de fond pour obtenir de façon rapide, économique, fiable et robuste, des paramètres caractéristiques de site qui soient pertinents et représentatifs. Idéalement, ces paramètres devraient être le profil complet de vitesse $V_s(z)$ jusqu'au substratum rocheux; cependant, les capacités effectives et pratiques du bruit de fond ont conduit à concentrer les travaux sur des paramètres "réduits", à savoir la fréquence de résonance f_0 et la vitesse moyenne des ondes S, V_{sz} , sur les z premiers mètres, avec z entre 5 et 30 mètres. On s'efforcera, dans la réalisation du protocole, de prendre en compte la possibilité d'avoir une grande zone à caractériser, comme par exemple dans le cadre de microzonage sismique.

Compte tenu de l'abondance de la littérature récente sur ce sujet, notamment avec le projet SESAME (2001-2004), on se bornera d'abord à rappeler brièvement quelques généralités sur le bruit de fond sismique, sa nature, et ses méthodes d'utilisation. La méthode ponctuelle H/V, établie par Nakamura en 1989, et la méthode en réseau seront brièvement abordées, dans l'objectif d'en présenter les aspects qui seront utiles dans la suite pour l'établissement d'un protocole opérationnel.

Viendront ensuite une première série d'applications de ces méthodes d'abord sur des modèles, puis sur des cas réels. Les modèles, focalisés sur quelques profils de vitesse typiques et des

simulations numériques de bruit, permettront de tester les paramètres qui ont une influence dans le traitement des données, et en particulier sur l'étape finale d'inversion. Les quelques cas réels discutés ensuite viseront eux à illustrer les contraintes pratiques liées aux conditions d'acquisition sur le terrain, et à l'application de ces méthodes sur des données réelles, tirées notamment d'un projet de caractérisation des stations accélérométriques du Réseau Franciscan Permanent français le RAP.

Tous ces éléments pratiques nous mèneront à définir et proposer un protocole de mesure et d'analyse du bruit de fond pour déterminer les paramètres f_0 (fréquence fondamentale du site) et V_{sz} (vitesse moyenne jusqu'à la profondeur z , z restant généralement inférieur à 30-50 m). Ce protocole a le double objectif de minimiser l'influence de l'opérateur sur les résultats et de fournir un indicateur "objectif" du degré de fiabilité des résultats, basé sur une notation concernant les principales étapes de l'analyse. Ce protocole sera ensuite testé sur plusieurs sites dont ceux appartenant à un projet de pré-zonage sismique dans le Sud-Isère et ceux d'une campagne de mesures en Grèce dans le cadre d'une caractérisation de stations accélérométriques. Ces deux paramètres f_0 et V_{sz} seront exploités dans le 2^{ème} volet pour caractériser l'effet de site.

Chapitre 2 : Fonction d'amplification selon la vitesse moyenne V_{sz} et la fréquence de résonance f_0

Le but de ce 2^{ème} volet est d'établir, sur une base expérimentale, une corrélation entre ces paramètres de site, et les fonctions d'amplification des mouvements sismiques. Pour que ces dernières puissent être facilement et immédiatement utilisables dans la pratique actuelle de l'ingénierie parasismique, ces mouvements sismiques doivent être caractérisés par leur spectre de réponse, et l'amplification doit être mesurée par rapport à un "rocher standard" dans sa définition usuelle. Dans cet objectif, nous avons utilisé une très importante collection d'enregistrements en provenance du réseau japonais Kik-net. Ce dernier répond en effet aux conditions nécessaires pour une telle étude: il est en fonction depuis la fin des années 90 et a enregistré de ce fait plusieurs centaines d'événements, procurant plusieurs milliers d'enregistrements; il est constitué de plus de 600 paires d'accéléromètres installés en surface et en fond de forage, à une profondeur variant de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, permettant d'établir des fonctions d'amplification surface / profondeur sur chacun des sites. Enfin, chaque site a fait l'objet d'une reconnaissance géophysique permettant d'en connaître le profil de vitesses V_S et V_P de la surface au capteur en profondeur. Cet ensemble de données, correspondant à des enregistrements de séismes crustaux ($z_{\text{hypo}} < 25$ km) de magnitude $M_w > 4$ obtenues entre 1998 et 2004, nous a aimablement été transmis par G. Pousse et F. Bonilla. La thèse de Guillaume Pousse est axée vers l'évaluation du mouvement sismique au rocher, avec une prise en considération des mouvements forts et des mouvements faibles. Dans cette thèse nous nous intéressons plus spécifiquement à la modification du mouvement entre un rocher et un site sur un sol quelconque.

- La 1^{ère} étape (**8 et 9**) consistera à caractériser chaque site par son nombre et type d'enregistrements, ses vitesses moyennes sur les 5, 10, 20 et 30 1^{ers} mètres et sa fréquence de résonance.
- Dans la deuxième étape on estimera la fonction de transfert de puits empirique par un rapport de spectres entre les enregistrements en surface et en profondeur. Ce rapport "brut" ne pourra cependant pas être utilisé tel quel car la "référence", c'est-à-dire le capteur en profondeur, s'avère correspondre à des caractéristiques très variables d'un site à l'autre, tant en termes de profondeur que d'impédance mécanique (**10**). Et il correspond de surcroît à un enregistrement en profondeur et non en surface libre comme dans la définition standard du "rocher de référence standard". Un travail important et original devra donc être consacré à l'établissement de fonctions correctrices pour corriger ces deux types d'effet: la variabilité du fond de forage (**paragraphe 11**) et l'effet de surface libre (**paragraphe 12**). Ces étapes permettront d'homogénéiser l'ensemble des fonctions d'amplification expérimentales.

- On pourra alors, étape finale (paragraphe 13), effectuer une série de traitements statistiques sur ces fonctions d'amplification empiriques corrigées, correspondant à une référence standard au rocher en surface. Cela consistera d'abord à établir différentes classifications de sites suivant les valeurs de fréquence fondamentale f_0 et de vitesse moyenne V_{sz} , et à calculer des moyennes de fonctions d'amplification corrigées pour chaque classe. Il sera alors possible de proposer et d'étalonner une famille de fonctions correctrices dépendant uniquement de ces deux paramètres de manière continue, qui permettra alors d'estimer le spectre de réponse d'un site à partir du spectre de réponse au rocher.
- Enfin (paragraphe 14) le protocole complet des mesures à l'estimation du spectre de réponse, sera effectué sur le site-test de l'Ebron.

Chapitre I.

Détermination de la fréquence de résonance f_0 et de la vitesse des ondes de cisaillement, V_s , à partir de l'utilisation combinée des méthodes basées sur le bruit de fond

1. Introduction sur les méthodes liées au bruit de fond sismique

Le bruit de fond sismique se compose de toutes les vibrations ambiantes, d'origine anthropique -comme les industries, la circulation, les machines- ou naturelle -comme le vent, la houle et d'une façon générale tous les mouvements liés aux conditions météorologiques locales, régionales ou globales-. Une limite autour de 1 Hz sépare ces deux types d'origine [Bonnefoy-Claudet, 2004]. C'est un ordre de grandeur, chaque site ayant ses propres particularités.

Dans le cadre du risque sismique et plus particulièrement des effets de site, le projet européen [SESAME] a marqué la volonté de la communauté scientifique à homogénéiser les connaissances sur le bruit de fond sismique, à la fois sur la méthode H/V et sur des méthodes d'analyse du bruit de fond en réseau. Le premier volet de ma thèse s'insère dans la suite de ce programme et s'appuie sur la thèse de Marc Wathelet [Wathelet, 2005], visant une approche plus pratique. Mon objectif n'est pas de rediscuter des aspects théoriques, mais d'en présenter les bases pour pouvoir discuter, en connaissance de cause, les aspects pratiques. Ceci en vue d'arriver à un protocole expérimental utilisable sur le terrain par des techniciens non forcément au fait de tous les détails du logiciel et des méthodes de traitement.

Les méthodes utilisant le bruit de fond font partie des méthodes de prospections géophysiques; comme chaque méthode d'investigation du sol, elles présentent des avantages et des inconvénients.

Sur un plan général, les techniques géophysiques présentent plusieurs avantages par rapport aux méthodes classiques de reconnaissance géotechnique (forages, essais de pénétration). Non destructrices, elles investissent un grand volume de roche ou de sol en place et ne posent pas de problème de représentativité et de remaniement. Elles sont relativement légères et peuvent être utilisées sur des topographies relativement escarpées, rendant leur coût intéressant. Par contre, elles doivent être calibrées par des données géologiques car le modèle résultant de ces mesures n'est pas unique. De plus les propriétés géophysiques obtenues (vitesse des ondes, résistance électriques, propriétés magnétiques) doivent être reliées aux paramètres mécaniques et hydrogéologiques pour être utiles à une étude complète.

L'utilisation de bruit de fond sismique présente plusieurs avantages par rapport aux sources actives : grande profondeur de pénétration en raison du contenu basse fréquence, application facile en milieu urbain, pas de génération artificielle de vibrations. Toutes ces caractéristiques en réduisent le coût.

Dans ce paragraphe 1 d'introduction du 1^{er} volet, les méthodes associées aux mesures de bruit de fond sont brièvement présentées. Il existe deux façons bien distinctes d'utiliser les enregistrements de vibrations ambiantes:

- de manière ponctuelle, avec l'enregistrement d'un seul capteur, la méthode des rapports spectraux H/V [Nakamura, 1989] est utilisée pour donner des informations sur la fréquence de résonance et la réponse d'un site
- avec plusieurs enregistrements simultanés avec plusieurs capteurs, l'analyse en réseau donne le profil des ondes de cisaillement

Cette dernière méthode montre les principaux inconvénients liés à l'utilisation du bruit de fond. En effet, la méthode en réseau, contrairement à la méthode ponctuelle H/V (cf. paragraphe 1.1), nécessite une largeur d'emplacement suffisante sur un terrain à structure tabulaire. De plus la mise en place de réseau de géométrie régulière devient difficile dans une

zone très urbanisée, une des solutions à ce problème est proposée par Matthias Onrherberg [Ohrnberger et al., 2006] avec un système de réseau sans fil.

Enfin, on présentera brièvement l'étape d'inversion.

1.1. La méthode H/V : brève synthèse

C'est au Japon, dans les années 1950, que commence à se développer l'intérêt pour le bruit de fond qui consistait principalement à observer le contenu spectral d'un enregistrement brut. Puis d'autres modes d'analyse sont apparus dont le rapport spectral des composantes horizontales sur la composante verticale avec [Nogoshi, 1970]. Enfin, après une prise de conscience du rôle des effets de site et le développement des outils de traitement du signal, Nakamura publie en 1989 un article dans une revue anglaise [Nakamura, 1989]. Malgré les réticences faces aux justifications données dans cet article, l'intérêt pour cette méthode grandit vite. En effet elle est rapide et économique et permet une extension spatiale des mesures facilement.

Cette méthode consiste à faire le rapport spectral de la composante horizontale sur la composante verticale de l'enregistrement des vibrations ambiantes à un endroit donné. La courbe obtenue est visualisée dans le domaine fréquentiel, elle présente parfois un pic à une fréquence particulière. Si ce pic répond à certains critères, la fréquence du pic peut être identifiée à la fréquence fondamentale du site au lieu de la mesure.

La méthode H/V est maintenant très couramment utilisée ([Lebrun et al., 2001], [Lermo et Chavez-Garcia, 1993], [Mucciarelli, 1998], [Theodulidis et Bard, 1995]) mais son emploi manque encore de standardisation et parfois les interprétations manquent de justifications. Des travaux comme [Fäh et al., 2001], le travail de thèse de [Bonneyoy-Claudet, 2004] et des rapports du projet européen [SESAME, 2001-2004], font un bilan complet sur l'origine du pic sur la courbe H/V et son interprétation. Pour le cas d'une couche sédimentaire sur un rocher, les conclusions suivantes sont à retenir:

- Les sources locales et superficielles génèrent principalement des ondes de surface, un seul pic est alors généralement observé (sauf cas exceptionnels où des contrastes forts coexistent à plusieurs profondeurs);
- Les sources lointaines et/ou profondes génèrent surtout des ondes de volume, plusieurs pics, liés aux harmoniques de la fréquence de résonance, sont alors observés.
- Les sources locales et superficielles contrôlent majoritairement le champ d'ondes c'est pourquoi un seul pic est observable.

Ces remarques peuvent aider à la compréhension des courbes H/V, en particulier lors de la présence de plusieurs pics.

Les conclusions sur différentes structures 1D horizontalement stratifiées sont les suivantes, l'origine du pic varie selon le contraste d'impédance défini par $CI = V_{BR} \rho_{BR} / V_{sed} \rho_{sed}$, avec V la vitesse des ondes S, ρ la densité, BR pour bedrock (substratum rocheux) et sed pour sédiment. Les valeurs de contraste sont données pour un cas simple d'une couche avec une vitesse constante sur un substratum:

- Contraste faible (inférieur à 3): le pic H/V, de faible amplitude, est dû à la résonance des ondes S
- Contraste modéré (entre 3 et 4) à fort (supérieur à 4): le pic H/V est dû à la polarisation horizontale du mode fondamental des ondes de Rayleigh et/ou à la phase d'Airy du mode fondamental des ondes de Love, et/ou à la résonance des ondes S.
- Le pic H/V est considéré proche de l'ellipticité des ondes de Rayleigh dans certains cas où le contraste d'impédance est supérieur à 3.

De plus des études ont été menées dans le cadre du projet [SESAME, 2001-2004] afin de mettre en place un guide d'utilisation pour l'analyse de ces mesures ponctuelles, [Duval, 2004], [Bard, 2004], [SESAME, D08.02], [SESAME D23.12].

Pour finir, l'origine du pic H/V n'est pas unique mais dans le cas de milieux 1D horizontalement stratifiés, ce pic, estimé un suivant le guide d'analyse de SESAME, donne une bonne estimation (déviations inférieures à 20 %) de la fréquence de résonance 1D calculée par la fonction de transfert des ondes SH. Par contre l'amplitude du pic ne donne généralement pas une estimation correcte de l'amplification, dû à la présence des ondes de surface dans le bruit. Une relation qualitative entre l'amplitude du pic H/V et l'amplification pourrait s'envisager dans un milieu où les sources de bruit sont homogènes, principalement dans un milieu où il y a peu de sources locales. Ce type d'études reste à mettre en place. Malgré près de deux décennies d'utilisation extensive de cette méthode, il reste des pistes d'études à explorer.

1.2. La méthode en réseau: analyses FK et SPAC et inversion

L'idée originale d'analyse en réseau de vibrations ambiantes a été formulée par Aki, [Aki, 1957], qui a proposé d'analyser la corrélation spatiale du bruit de fond et d'en tirer des informations sur la stratification du site à partir d'une interprétation en ondes de surface. Puis viennent, entre autres, [Lacoss et al., 1969] pour la méthode FK (fréquence-nombre d'onde), [Capon, 1969] pour la méthode haute résolution FK, [Asten et Henstridge, 1984] et [Tokimatsu, 1997] pour une review des méthodes et [Christensen et Hald, 2004], [Malagnini et al., 1993], [Sato et al., 2001] pour une utilisation des méthodes.

Le bruit sismique ambiant mesuré par un réseau de stations est apparu comme une méthode prometteuse de détermination du profil de vitesse $V_s(z)$ ([Milana et al, 1996] ; [Scherbaum, 2003]; [Wathelet, 2005]). Les hypothèses permettant d'utiliser le bruit de fond sont que celui-ci est principalement composé d'ondes de surface et que le mode fondamental des ondes de Rayleigh domine la composante verticale. Les différentes étapes de cette approche sont :

Étape 1 : L'enregistrement du bruit avec plusieurs capteurs en réseau avec une géométrie particulière (dans nos études nous avons utilisé la CitysharkII avec 6 capteurs qui peuvent enregistrer simultanément)

Étape 2 : L'analyse de ces enregistrements : dans cette étude deux traitements sont considérés : l'autocorrélation spatiale; dont la dépendance fréquentielle est intimement liée à la vitesse de phase, et l'analyse dans le plan fréquence-nombre d'onde qui fournit une courbe de dispersion

Étape 3 : L'inversion des courbes caractéristiques (courbe de dispersion ou courbes d'autocorrélation) obtenues à l'étape 2 afin d'obtenir des profils de vitesse des ondes de compression et surtout des ondes de cisaillement du site ausculté.

Pour l'utilisation complète des mesures à l'analyse on pourra aussi se référer au livrable [SESAME D24.13].

Chaque étape a une influence sur le résultat final qui est recherché, c'est-à-dire le profil de vitesse des ondes S. L'étape 1 de mesures, de part le choix de la géométrie du réseau (comportant le nombre de capteurs, l'ouverture, la disposition, la durée d'enregistrement) influencera le domaine fréquentiel dans lequel les données seront utilisables. L'étape 2 concerne deux méthodes distinctes, FK et SPAC, qui ont chacune des stades de traitement où le choix des paramètres peut influencer les courbes obtenues. L'étape 3, l'étape d'inversion, peut donner une gamme de profils très étendus selon l'espace des paramètres choisi en entrée. Cet espace est plus ou moins contraint selon les connaissances préalables sur le site.

1.2.1. Analyse SPAC (SPatial AutoCorrelation)

Base de la méthode : SPAC pour SPatial AutoCorrélation [Aki, 1957]

Cette méthode a été présentée par Aki [Aki, 1957] qui en a posé les bases, a été plusieurs fois révisée pour répondre à des problèmes pratiques, en particulier sur la régularité des réseaux déployés sur le terrain [Bettig, 2001].

L'hypothèse de base de cette méthode est de considérer que le bruit ambiant est constitué principalement d'ondes de surface, à front d'onde localement plan, stationnaires en temps et en espace, (stationnaires et isotropes), et présentant une distribution azimutale isotrope. Les sources du bruit sont donc supposées venir indifféremment de toutes les directions, ce qui permettra la simplification des équations.

L'opération de base de cette analyse consiste à calculer la corrélation entre deux enregistrements simultanés sur deux capteurs séparés d'une distance r , et orientés dans un azimut f .

Les courbes d'autocorrélation obtenues sont en relation avec les courbes de dispersion des ondes de surface qui composent une majeure partie du bruit de fond sismique, ces courbes offrent donc des informations sur les caractéristiques du sol. Après inversion, les courbes d'autocorrélation doivent permettre d'obtenir des profils de vitesses des ondes P et S.

Les équations qui suivent sont un résumé rapide de [Aki, 1957], pour plus de précisions se référer à l'original.

L'autocorrélation pendant un temps T , entre deux signaux séparés d'une distance r se définit par:

Équation 1

$$f(r) = \frac{1}{T} \times \int_0^T \mathbf{n}_0(t) \mathbf{n}_r(t) dt$$

Avec : $\mathbf{n}_0(t) = u(x_0, t)$ le déplacement au point de coordonnée x_0 au temps t , et $\mathbf{n}_r(t) = u^*(x_0 + r, t)$ le déplacement au point de coordonnée $x_0 + r$, au temps t

Dans le cas d'une seule onde dispersive, d'énergie $\Phi(\omega)$ et se propageant à une vitesse $c(\omega)$ avec ω la pulsation, selon l'azimut φ , [Aki, 1957] montre que l'autocorrélation peut s'écrire:

Équation 2

$$f(r) = \frac{1}{P} \times \int_0^\infty \Phi(\omega) \cos\left(\frac{\omega}{c(\omega)} * r\right) d\omega$$

Autour d'une pulsation ω_0 , Φ peut se définir par (voir [Aki, 1957]):

$$\Phi = P(\omega_0) \mathbf{d}(\omega - \omega_0)$$

avec P l'énergie du spectre et \mathbf{d} un dirac en ω_0 .

Dans ce cas (une seule onde dispersive) l'autocorrélation s'écrit alors:

Équation 3

$$f(r, \omega_0) = \frac{1}{P} P(\omega_0) \cos\left(\frac{\omega_0}{c(\omega_0)} * r\right)$$

C'est en fait une normalisation de l'autocorrélation qui est utilisée, appelée rapport d'autocorrélation :

Équation 4

$$\mathbf{r}(r, \mathbf{w}_0) = \frac{\mathbf{f}(r, \mathbf{w}_0)}{\mathbf{f}(0, \mathbf{w}_0)}$$

Dans ce cas (une seule onde dispersive) le rapport d'autocorrélation peut donc s'écrire:

Équation 5

$$\mathbf{r}(r, \mathbf{w}_0) = \cos\left(\frac{\mathbf{w}_0}{c(\mathbf{w}_0)} * r\right)$$

Dans le cas plus général où la direction de propagation de l'onde n'est pas connue il faut prendre en compte la différence entre θ , l'azimut de propagation, et notons ϕ l'azimut de la direction entre les stations, la vitesse apparente selon l'azimut ϕ est alors $c(\omega) / \cos(\theta - \phi)$. Pour une onde avec un azimut de propagation θ , l'Équation 5 s'écrit:

Équation 6

$$\mathbf{r}(r, \mathbf{w}_0, \mathbf{j}) = \cos\left(\frac{\mathbf{w}_0}{c(\mathbf{w}_0)} * r * \cos(\theta - \phi)\right)$$

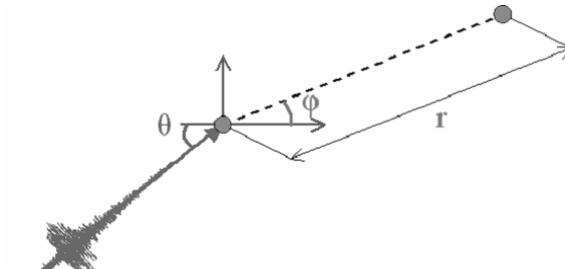


Figure 1: Schéma de deux capteurs séparés d'une distance r , avec un azimut ϕ et d'une onde qui se propage selon la direction θ (azimut de propagation)

Une moyenne azimutale est alors effectuée, et, compte tenu de l'hypothèse d'isotropie, le rapport $\bar{\mathbf{r}}$ s'écrit alors à l'aide de la fonction de Bessel d'ordre 0 J_0 :

Équation 7

$$\bar{\mathbf{r}}(r, \mathbf{w}_0) = J_0\left(\frac{\mathbf{w}_0}{c(\mathbf{w}_0)} * r\right)$$

Concrètement, l'obtention d'une telle valeur moyenne nécessite aussi la prise en considération d'un grand nombre de fenêtres de longueur T , et ce sur de nombreux couples de stations séparés d'une même distance et d'azimut variable.

Si l'on applique cette approche à la composante verticale du mouvement, le rapport d'autocorrélation ρ_z ainsi obtenu est relié à la vitesse de phase des ondes de Rayleigh. Si on l'applique aux composantes horizontales, deux types d'ondes de surface vont entrer en ligne de compte, les ondes de Rayleigh et les ondes de Love. Classiquement, on décompose alors le mouvement en une composante radiale (Rayleigh), en projetant du mouvement horizontal sur l'azimut inter station caractérisé par l'angle ϕ et une composante tangentielle (projection sur la direction perpendiculaire). On obtient ainsi deux autres rapports d'autocorrélation, notés respectivement ρ_r et ρ_ϕ , qui dépendent à la fois des vitesses de phase des ondes de Rayleigh $c_R(\omega)$, de Love $c_L(\omega)$, et du rapport $\alpha(\omega)$ entre l'énergie véhiculée par les ondes de Rayleigh et celle véhiculée par les ondes de Love, [Aki, 1957]. On a alors trois équations: $\bar{\mathbf{r}}_z$, $\bar{\mathbf{r}}_r$, $\bar{\mathbf{r}}_\phi$ et

trois inconnues: $c_R(\mathbf{w})$, $c_L(\mathbf{w})$ et la proportion des ondes de Rayleigh dans le champ d'ondes, notée $\mathbf{a}(\mathbf{w})$.

Le rapport d'autocorrélation dépend de la distance entre deux stations, la fréquence, la vitesse de phase (elle même dépendant de la fréquence). C'est cette relation qui nous permet de déterminer la courbe de dispersion (vitesse des ondes de surface selon la fréquence) qui donne des informations sur le sous-sol.

Les ondes étant supposées stationnaires et isotropes, le coefficient d'autocorrélation est une moyenne sur l'ensemble des ondes arrivant dans toutes les directions de l'espace (? entre 0 et 2p).

Amélioration de la méthode [Bettig et al, 2001] MSPAC (Modified Spacial Autocorrelation):

Ce paragraphe présente brièvement les principales étapes d'amélioration de la méthode, pour plus de précisions se référer à [Bettig et al, 2001].

Le coefficient d'autocorrélation est calculé pour plusieurs paires de capteurs séparés de la même distance r . A chaque paire correspond une droite qui relie les deux capteurs, orientée d'un azimut f (cf. Figure 1). Le coefficient d'autocorrélation correspondant à une distance r , est déterminé par la moyenne azimutale. Une bonne répartition azimutale permet d'obtenir une valeur plus significative du coefficient d'autocorrélation correspondant à une distance r . Dans la pratique, lorsque cette répartition n'est pas uniforme, on attribue des poids variables à chaque paire de récepteur, ces poids étant inversement proportionnels à la densité de points sur le diagramme azimut-distance du type de celui représenté sur la Figure 2. Donc, pour mieux déterminer le coefficient d'autocorrélation, il est utile d'avoir plusieurs capteurs séparés d'une distance r .

En pratique, afin d'avoir plusieurs paires de capteurs séparés d'une distance r , une géométrie circulaire du réseau est souvent choisie. Pour avoir à la fois une bonne répartition azimutale et une bonne distribution de distances inter-capteurs différentes, il est souvent utile de réaliser plusieurs tailles de réseau.

Sur le terrain la mise en place d'un réseau circulaire parfait est difficilement réalisable (présence de bâtiments en milieu urbain, de végétation et de barrières morphologiques en milieu naturel), c'est pourquoi la distance inter-capteur est plus souvent définie par un intervalle de rayon. Dans ce cas de figure, [Bettig et Al, 2001] propose un ajustement de la méthode SPAC. Pour cela la moyenne s'effectue non plus sur un cercle mais sur un anneau.

Ils montrent que pour un anneau $r_1 - r_2$ le coefficient d'autocorrélation moyen est défini par :

Équation 8

$$\bar{r}_{r_1 r_2}(\mathbf{w}) = \frac{1}{P} \sum_{r_1 < r_{ij} < r_2} r(r_{ij}, \mathbf{j}_{ij}, \mathbf{w}) \Delta \mathbf{j}_{ij}, \text{ s'écrit selon } J_1, \text{ le coefficient de Bessel d'ordre 1:}$$

Équation 9

$$\bar{r}_{r_1 r_2}(\mathbf{w}) = \frac{2}{r_2^2 - r_1^2} * \frac{c(\mathbf{w})}{\mathbf{w}} * \left[r \cdot J_1 \left(\frac{\mathbf{w}}{c(\mathbf{w})} r \right) \right]_{r_1}^{r_2}$$

Avec $\Delta \mathbf{j}_{ij}$ l'azimut moyen autour d'un couple de stations i et j , défini par:

Équation 10

$$\Delta \mathbf{j}_{ij} = \frac{(\mathbf{j}_{ij+1} - \mathbf{j}_{ij-1})}{2}$$

Une moyenne azimutale sur l'ensemble des capteurs séparés d'une distance r est effectuée. La géométrie la plus souvent utilisée avec 6 capteurs comme dans la plupart de nos cas d'étude, est un capteur central et 5 capteurs placés sur un cercle dont le rayon (ouverture) caractérise le réseau. Avec ce type de configuration la moyenne azimutale se fait sur environ 5 paires de stations.

Afin de choisir plus facilement différentes distances inter-stations (caractéristique d'un anneau), on trace tous les segments de longueur r et de direction f correspondants aux couples de capteurs caractérisés par leurs distances r et leurs azimuts f . Dans ce plan, des anneaux sur lesquels les moyennes seront effectuées, sont définis (Figure 2). Cette étape est dépendante de l'utilisateur. Les critères pour choisir les anneaux sont un compromis entre une bonne répartition azimutale avec un nombre de couples suffisant pour faire une moyenne et une largeur de l'anneau la plus mince possible.

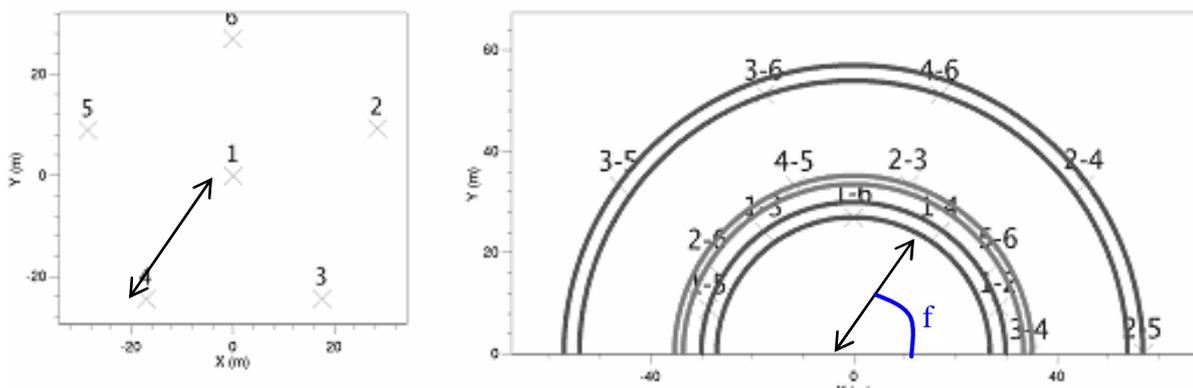


Figure 2: Exemple d'un réseau circulaire (à gauche) et des anneaux choisis pour le calcul du coefficient d'autocorrélation (à droite)

Conclusion

En pratique, pour chaque fréquence étudiée, on découpe les enregistrements en fenêtres temporelles de longueur T . Cette longueur est dépendante de la fréquence étudiée. Dans cette fenêtre la corrélation entre les deux enregistrements est calculée (Équation 1). Le calcul de la corrélation moyenne est fait en moyennant sur toutes ces fenêtres et sur toutes les paires de récepteurs correspondant à une gamme de distance donnée. C'est pourquoi on a une valeur moyenne et des écarts-type qui seront représentés par des barres d'incertitude.

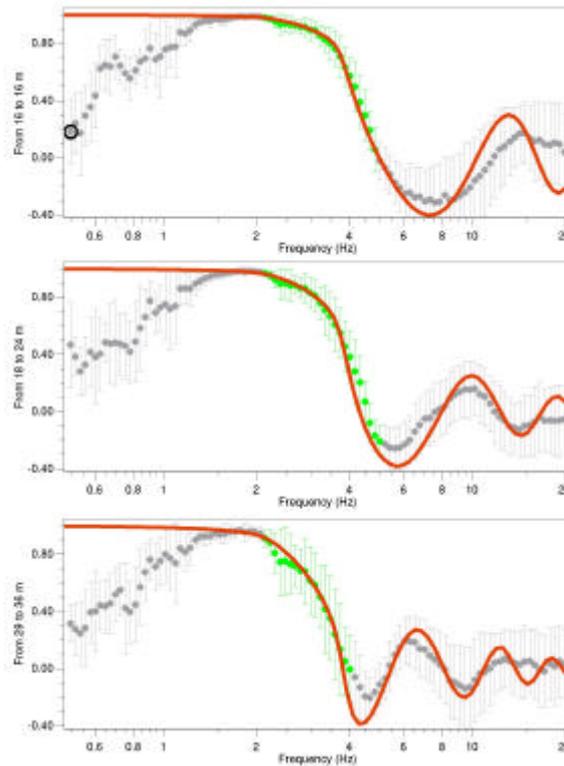


Figure 3: Courbes du rapport d'autocorrélation pour 3 anneaux différents (de haut en bas 16m, 18à24m et 29 à 36m). En gris (avec des barres d'erreur) calcul MSPAC sur des données synthétiques de bruit, simulées pour un réseau circulaire de 17 m de rayon, en vert zone valide des calculs, en rouge courbes théoriques

La taille des fenêtres a une influence sur la bande de fréquence de signaux considérée : des fenêtres trop courtes ne permettront pas de voir la corrélation des basses fréquences ; des fenêtres trop longues rendent les calculs plus longs et le nombre de fenêtres est alors réduit et la moyenne effectuée sur ces fenêtres devient moins significative. C'est pourquoi la longueur d'une fenêtre dépendant de la fréquence étudiée, on impose un nombre de périodes incluses dans cette fenêtre au minimum de 10.

On construit ainsi, pour chaque distance inter-capteur, fréquence par fréquence, les courbes $\mathbf{r}_{r_{ij}}(\mathbf{w})$, ce qu'on peut représenter schématiquement par la Figure 4, extrait de la formation SESARRAY aux Houches en Novembre 2005, session de Cécile Cornou:

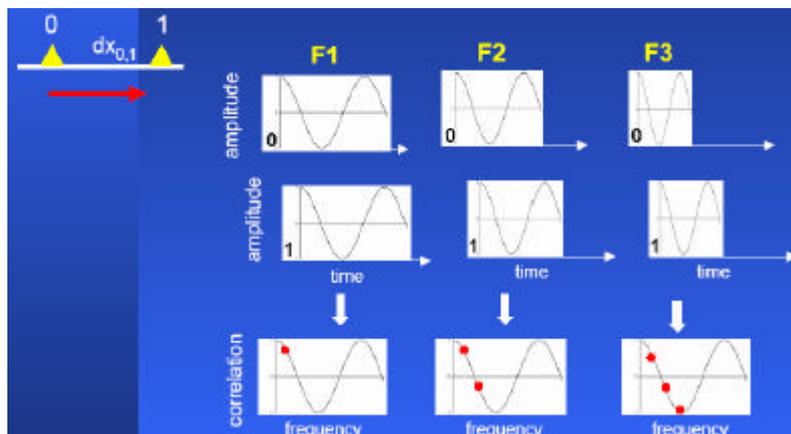


Figure 4 : Schéma du calcul des courbes d'autocorrélation fréquence par fréquence pour un couple de capteurs 0-1 séparé par une distance $dx_{0,1}$. Extrait de la formation SESARRAY aux Houches en Novembre 2005, session de Cécile Cornou

Dans les études effectuées, les courbes SPAC sont calculées grâce au logiciel geopsy [Wathelet 2003] et [Wathelet 2005].

Une fois le calcul de $r_{r_{ij}}(\mathbf{w})$ effectué (Équation 1 et Équation 8) pour chaque anneau caractérisé par r_{ij} , l'étape 2 est alors réalisée, on a défini des courbes d'autocorrélation pour ces différents anneaux. L'inversion (étape 3) de ces courbes d'autocorrélation peut alors être effectuée.

1.2.2. Analyse FK (Fréquence – nombre d'onde)

Cette analyse s'effectue dans le domaine fréquentiel. L'idée de base ("beam-forming") est de sommer l'énergie se propageant suivant un nombre d'onde particulier k (direction et vitesse de phase), et de retenir les directions et vitesse correspondant aux énergies maximales. Cette analyse se fait, à chaque fréquence, sur différentes fenêtres temporelles (comme pour l'analyse SPAC), et l'on obtient in fine une statistique sur les azimuts et vitesses de phase, pour chaque fréquence. On peut représenter ces calculs par des histogrammes dans le plan vitesse de phase-fréquence.

Cette approche explore donc la cohérence qui existe entre tous les capteurs et non pas pour chaque paire de capteurs comme dans la méthode SPAC.

Les hypothèses principales sont :

- dominance des ondes de surface
- milieu homogène à une dimension
- ondes planes

Une description un peu plus détaillée suit, cependant l'origine de la méthode se trouve dans [Lacoss et al., 1969] et [Capon, 1969]. Des descriptions plus synthétiques sont aussi disponibles dans les rapports [SESAME, 2001-2004], et les thèses de [Wathelet, 2005] et [Bonneyoy-Claudet, 2004] qui ont inspirés cette description.

Enfin d'introduire la semblance (ou beam-forming) on commencera par s'intéresser à la réponse du réseau. Cela nous mènera à l'introduction des limites d'aliasing et de résolution liées au réseau d'enregistrements.

1.2.2.1. Réponse théorique et limites associées à un réseau (aliasing et résolution)

Un réseau, selon sa géométrie permet de déterminer la courbe de dispersion sur une bande de fréquence limitée. En effet les mesures en réseau échantillonnent le champ d'onde, et comme tout type d'échantillonnage il présente des limites de résolution et d'aliasing. Les limites d'aliasing et de résolution sont deux limites propres à la géométrie du réseau.

Pour les déterminer, au moins en ce qui concerne l'analyse f-k classique, on doit s'intéresser à la réponse théorique R_{th} du réseau dans le domaine fréquence nombre d'onde, appelée aussi fonction de transfert du réseau. Cette fonction de transfert est la réponse du réseau à une source d'incidence verticale (ou de vitesse infinie de telle sorte que tous les capteurs sont en phase au même moment). Les équations sont tirées de [Wathelet, 2005] équations 1.1, 1.2 et 1.3. Elle peut être représentée dans le plan des nombres d'onde (k_x, k_y) :

Équation 11

$$R_{th}(k_x, k_y) = \frac{1}{n^2} \left| \sum_{i=1}^n e^{-j(k_x \cdot x_i + k_y \cdot y_i)} \right|^2$$

Avec n le nombre de capteurs et (x_i, y_i) la position du capteur i . La réponse est donc entièrement déterminée par le nombre et la position des capteurs du réseau. Par construction, R_{th} montre systématiquement un pic d'amplitude 1 en $(0,0)$ et des pics latéraux d'amplitude moindre (Figure 6, a2 et b2, et en coupe sur les graphiques a3 et b3). Ces pics latéraux représentent le phénomène d'aliasing, qui peut perturber l'obtention et l'interprétation de la courbe de dispersion. En effet dans le cas d'une seule onde plane, la réponse du réseau à cette onde, dans le plan des nombres d'onde, est la réponse théorique translatée par le vecteur (k_x, k_y) de l'onde.

Équation 12 : Réponse du réseau à une seule onde plane :

$$R(k_x, k_y, f) = \left| \sum_{i=1}^n S_i(f) e^{-j(k_x \cdot x_i + k_y \cdot y_i)} \right|^2 = n^2 A^2(f) R_{th}(k_x - k_x^{(1)}, k_y - k_y^{(1)})$$

Avec : n : le nombre de capteurs, (x_i, y_i) les coordonnées du capteur i , et :

Équation 13 : signal enregistré au capteur i , dans le domaine fréquentiel

$S_i(f) = A(f) e^{j(x_i k_x^{(1)} + y_i k_y^{(1)} - 2\pi f t + \Phi)}$ Avec $A(f)$ le spectre en amplitude, $(k_x^{(1)}, k_y^{(1)})$ le vecteur nombre d'onde de l'onde plane (1) qui traverse le réseau, F sa phase.

Dans ce cas la position du pic le plus élevé est liée à la vitesse et l'azimut de l'onde se propageant. Il faut donc être capable de distinguer ce pic des pics "parasites". Quand il n'y a qu'une seule onde c'est le pic le plus élevé mais avec plusieurs ondes, l'addition de pics secondaires dus à l'aliasing peut induire en erreur, et conduire un utilisateur insuffisamment averti à un défaut d'identification de la bonne onde, et donc des erreurs dans l'estimation de la vitesse et de l'azimut. Pour se prémunir contre de telles erreurs, il faut au préalable définir les limites d'aliasing.

Le premier pic d'aliasing apparaît à un nombre d'onde k_{alias} , (Figure 6) et son amplitude est inférieure à celle du pic central. Comme il existe plusieurs pics parasites, il peut arriver en cas de coexistence de plusieurs ondes principales, que plusieurs pics d'aliasing se combinent et se retrouvent avec une amplitude supérieure au pic central. Il est donc prudent de se limiter à une zone réduite dans le plan des nombres d'onde, où l'on soit sûr qu'il n'y a pas d'aliasing. Cette prudence conduit à choisir un nombre d'onde maximal $k_{max} = k_{alias}/2$ comme limite d'aliasing.

Une approche un peu plus conservative est de déterminer k_{alias} à partir du moment où, sur le 2nd pic (ou pic d'aliasing), de la courbe de réponse dépasse 0.5, donc légèrement avant le nombre d'onde correspondant au maximum du 2nd pic (ou pic d'aliasing) si celui-ci dépasse 0.5. De la même façon la limite maximale est alors fixée à $k_{max} = k_{alias}/2$, voir Figure 6. C'est cette approche qui est choisie pour nos études. Cependant on verra que l'effet d'aliasing est visible à l'œil et qu'on ira parfois au-delà de la limite k_{max} .

La résolution, elle, correspond à la possibilité pour le réseau de séparer des ondes ayant des nombres d'ondes relativement proches; elle est donc reliée à la largeur du pic central, elle-même reliée à l'ouverture maximale du réseau. On choisit généralement comme limite de résolution k_{min} , avec k_{min} la largeur du pic central à mi-hauteur du pic central (qui est égal à 0.5 pour une réponse théorique), voir Figure 6. Cependant il arrive souvent que la résolution soit encore acceptable jusqu'à $k_{min}/2$.

Chaque réseau est donc caractérisé par une capacité limitée d'investigation dans le plan des nombres d'onde, limites données par le couple (k_{min}, k_{max}) . Ces limites se traduisent, dans le plan fréquence-vitesse qui nous intéresse ici, par des courbes $c_{min}(f)$ et $c_{max}(f)$ permettant de borner le

domaine d'investigation possible pour la courbe de dispersion (Figure 6, a4 et b4). Plus précisément, on peut écrire:

$$k_{\min} \leq k = 2\pi f/c \leq k_{\max}$$

$$\text{Soit } c_{\min} \leq c \leq c_{\max} \text{ avec } c_{\min} = 2\pi f/k_{\max} \text{ et } c_{\max} = 2\pi f/k_{\min}$$

Dans une représentation linéaire (ou log-log) du plan vitesse – fréquence, ces courbes sont des droites; dans la représentation log-lin utilisée sur la figure 23 et de nombreuses autres, ces courbes présentent une concavité vers le haut.

Comme ordre de grandeur on pourra retenir que :

- k_{alias} est lié à la distance minimale qui sépare deux capteurs du réseau r_{\min} , par : $k_{\text{alias}} \sim 2\pi/r_{\min}$,
- k_{\min} est reliée à la distance maximale qui sépare deux capteurs dans le réseau r_{\max} , par : $k_{\min} \sim 2\pi/r_{\max}$.

Dans notre exemple du réseau (a) on a défini k_{\max} à 0.26, et k_{\min} à 0.1 (Figure 5 et Figure 6). Les ordres de grandeur nous donnent : $2\pi/r_{\min} = 2\pi/25 \sim 0.25$ et $2\pi/r_{\max} = 2\pi/50 \sim 0.125$

Plus l'ouverture (par exemple le rayon dans le cas d'un réseau circulaire) est grande plus les nombres d'ondes limites sont petits donc plus la zone de validité du réseau se déplace vers les basses fréquences, ce qui est observable sur la Figure 6 entre le réseau (a) de 25m de rayon et (b) de 50m de rayon.

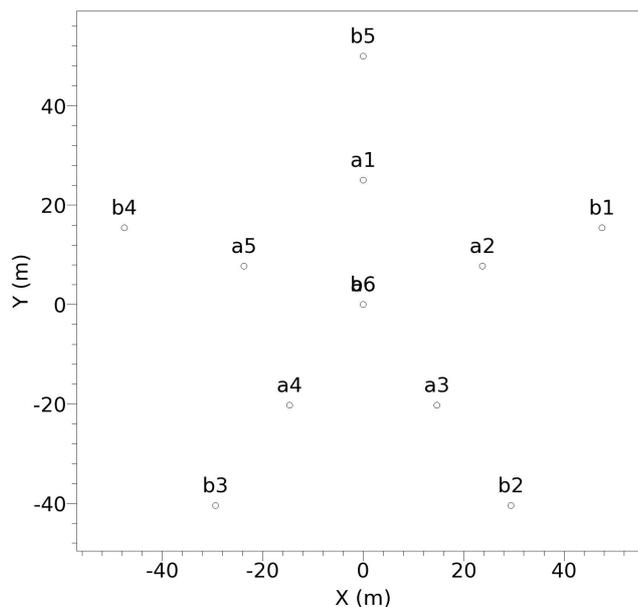


Figure 5 : Emplacement des réseaux a et b avec un capteur central et 5 capteurs sur un cercle de 25 m de rayon (a) et de 50 m de rayon (b).

Sur la Figure 6, graphiques a4 et b4, les deux courbes $k_{\min}/2$, k_{\min} sont représentées car la limite k_{\min} est beaucoup plus conservatrice. Conservatrice dans le sens où plus la limite de résolution en nombre d'onde est élevée, plus on est sûr d'avoir une bonne résolution, et donc une bonne estimation de la vitesse. Cependant cette limite est restrictive et diminue beaucoup la bande de fréquence exploitable.

De même pour l'aliasing la limite $k_{\text{alias}}/2$ est aussi conservatrice. Cependant si seules ces deux limites très conservatrices sont prises en compte le domaine de validité du réseau peut se trouver extrêmement réduit comme ici pour un réseau circulaire centré à 6 capteurs. L'apparition de l'aliasing peut se détecter assez facilement (cf. Figure 31 et Figure 32) dans le plan fréquence

vitesse utilisé pour l'estimation des courbes de dispersion: la limite $k_{alias}/2$ peut donc être assez souvent dépassée en observant l'apparition de l'aliasing.

Par contre la limite de résolution n'est pas forcément aisée à détecter, dans les cas complexes (plusieurs couches, apparition de modes supérieurs etc.) il vaut mieux par prudence s'en tenir aux limites c_{max} associées à k_{min} . Le paragraphe 3.4 utilisant le bruit de fond synthétique évoque et illustre ces problèmes.

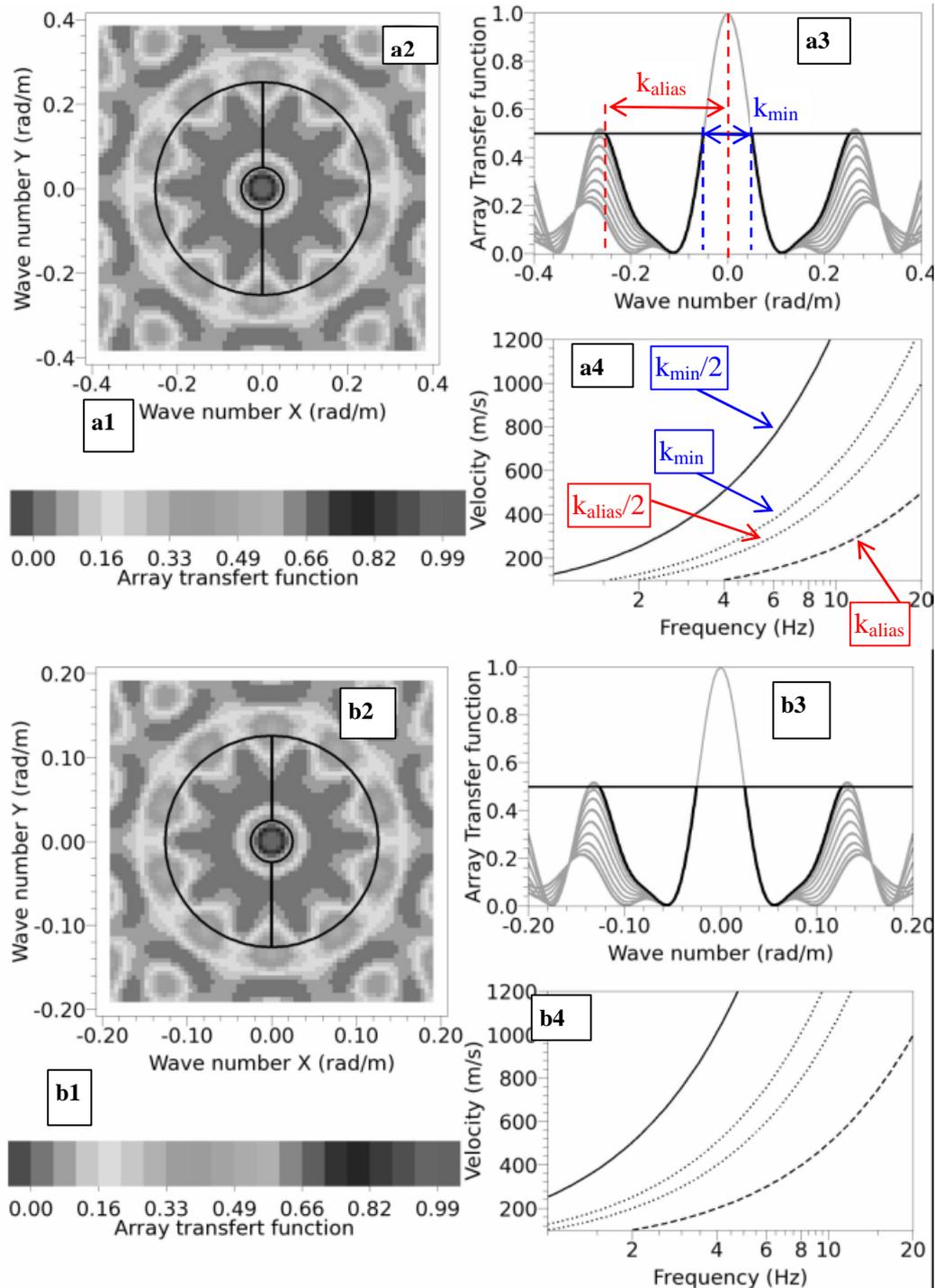


Figure 6: a1 : échelle de la réponse théorique R_{th} ; a2 : R_{th} du réseau (a) dans le plan des nombres d'onde ; a3 : coupe de R_{th} selon la droite noire en a2 ; a4 : Courbes limites du réseau dans le plan fréquence-vitesse correspondant aux nombres d'onde, de gauche à droite : $k_{min}/2$, k_{min} (avec k_{min} la largeur du pic central à l'ordonnée 0.5), $k_{alias}/2$, k_{alias} (avec k_{alias} le nombre d'onde à partir duquel le premier pic d'aliasing atteint 0.5)

D'un point de vue concret, si nous avons à notre disposition un appareil d'acquisition qui enregistre 18 voies, soit 6 capteurs à trois composantes, nous pouvons nous demander si ces 6 capteurs verticaux sont suffisants pour déterminer le mode fondamental de la courbe de dispersion des ondes de Rayleigh sans être influencé par les modes supérieurs. En effet, on remarque souvent que l'influence des modes supérieurs donne une estimation erronée de la vitesse de la courbe de dispersion, surtout à hautes fréquences (au-delà de 10 Hz) et que la courbe de dispersion à des écarts-type de plus en plus important à basse fréquence (problème lié à la résolution).

C'est une des problématiques sur laquelle se pencher car cela va jouer sur la taille des réseaux à utiliser sur le terrain ainsi que sur la pertinence de combiner les réseaux à la méthode SASW (voir annexe 15.4.1.1) qui permet de déterminer la courbe de dispersion à hautes fréquences (au-delà de 10 Hz) avec une meilleure distinction des modes.

1.2.2.2. Réponse du réseau à un champ d'onde

Si on suppose que le champ d'ondes est la somme de q ondes de surface planes, et d'un bruit décorrélé, le spectre du signal enregistré au capteur i peut alors s'écrire sous la forme:

Équation 14

$$X(\vec{r}_i, \omega) = \sum_{m=1}^q S_m^i(\omega) e^{j(\vec{k}_m \cdot \vec{r}_i)} + \mathbf{h}(\vec{r}_i, \omega)$$

Avec : \vec{r}_i : le vecteur coordonnée du capteur i

X : spectre du signal du capteur i

$S_m^i(\omega)$: le spectre complexe de l'onde plane de la source m, enregistré au capteur i

$\vec{k}_m^i(\omega)$: le vecteur nombre d'onde de l'onde plane de la source m, enregistré au capteur i

h : la partie non corrélée du signal

q : le nombre des ondes planes dans le champ d'onde

La réponse du réseau est définie par la somme de tous les signaux translatés, dans le domaine fréquentiel:

Équation 15 : Définition de la réponse du réseau

$$R(\vec{k}, \omega) = \left| \sum_{i=1}^n W_i(\omega) X(\vec{r}_i, \omega) e^{-j(\vec{k} \cdot \vec{r}_i)} \right|^2, \text{ soit, en combinant avec l'Équation 14 :}$$

Équation 16

$$R(\vec{k}, \omega) = \left| \sum_{i=1}^n W_i(\omega) \left[\sum_{m=1}^q S_m^i(\omega) e^{j(\vec{k}_m \cdot \vec{r}_i)} + \mathbf{h}(\vec{r}_i, \omega) \right] e^{-j(\vec{k} \cdot \vec{r}_i)} \right|^2$$

Avec :

$W_i(\omega)$ Poids sur chaque capteur, défini différemment selon les méthodes (égal à 1 pour l'analyse conventionnelle fk, notée CVFK)

n : le nombre de capteurs

Le maximum de la réponse du réseau est atteint lorsque $\vec{k} = \vec{k}_d$ avec \vec{k}_d le nombre d'onde de l'onde plane dominante. Maximiser $R(\vec{k}, \omega)$ permet d'obtenir une estimation des paramètres de propagation.

Pour la méthode conventionnelle, notée CVFK, $W_i=1$ donc :

Équation 17 : maximisation de la réponse du réseau

$$R(\vec{k}, \mathbf{w}) = \left| \sum_{i=1}^n \left[\sum_{m=1}^q S_m^i(\mathbf{w}) e^{j(\vec{k}_m \cdot \vec{r}_i)} \right] \cdot e^{-j(\vec{k} \cdot \vec{r}_i)} \right|^2 \leq n^2 \sum_{m=1}^q R^{(m)}(k_x, k_y, \mathbf{w})$$

Avec $R^{(m)}$ la réponse à une seule onde m , comme défini à l'Équation 12. La réponse du réseau peut être maximiser par la somme des réponses théoriques translatées par les ondes les plus énergétiques

On définit aussi la semblance qui est la réponse du réseau divisée par la puissance spectrale. Le maximum de la semblance, à une fréquence donnée, pour chaque fenêtre temporelle, dans le plan (k_x, k_y) donne la vitesse et l'azimut de l'onde dominante traversant le réseau (cf. Figure 7).

En pratique, l'espace des nombres d'onde est découpé en grille et les paramètres de propagation (direction θ_n et vitesse $C_n(\theta)$) sont calculés pour chaque fréquence, avec

$$\mathbf{q}_n = \arctan\left(\frac{k_{xn}}{k_{yn}}\right) \quad \text{et} \quad C_n(\mathbf{w}) = \frac{\mathbf{w}}{|\vec{k}_n|}, \quad \text{sur différentes fenêtres temporelles (cf. Figure 7). Les}$$

résultats sur les différentes fenêtres permettent d'avoir une statistique sur les azimuts et vitesses de phase, pour chaque fréquence. Cela permet, fréquence par fréquence, de construire l'histogramme dans le plan vitesse de phase-fréquence (cf. Figure 7).

Pour chaque fréquence (axe des abscisses sur l'histogramme), pour chaque fenêtre, la valeur du maximum de la semblance (qui correspond à une vitesse, axe des ordonnées sur l'histogramme) est représentée en niveau de couleur sur l'histogramme. Sur l'histogramme toutes les fenêtres sont additionnées (cf. Figure 7).

La courbe de dispersion des ondes de surface est ensuite définie par recherche des maximaux dans cet histogramme.

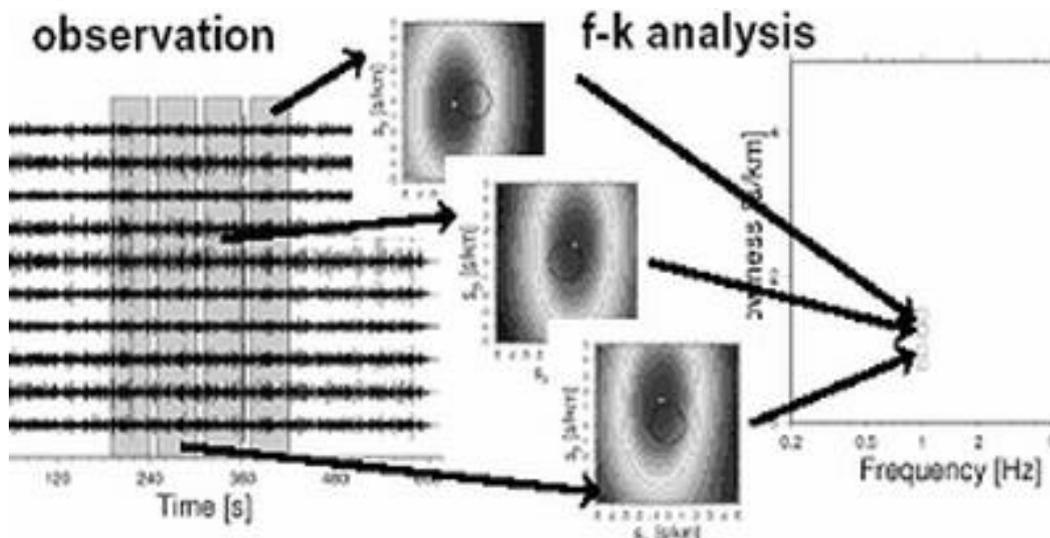


Figure 7: Schéma de principe de la méthode FK, extrait de la formation SESARRAY aux Houches en Novembre 2005. À gauche : traces temporelles et sélection de fenêtres pour la fréquence de 1 Hz en grisé, au milieu : exemple de calcul de la semblance pour trois fenêtres avec la sélection du maximum, à droite : report du maximum dans le plan fréquence-lenteur

La méthode consiste donc à choisir des fenêtres temporelles de différentes tailles suivant la fréquence à caractériser, comme nous l'avons noté au paragraphe précédent pour la méthode SPAC. Puis, après le choix des fenêtres, l'espace des nombres d'onde est découpé. On choisit donc un pas en nombre d'onde qui va définir un pas de grille et un nombre d'onde maximal qui limite la grille. Puis le maximum de la semblance pour chaque fenêtre est recherché. Enfin la moyenne et les écarts-type sont calculés sur ces maximaux pour chaque fréquence. Au final on

obtient l'estimation des vitesses de propagation des ondes dans le milieu selon la fréquence. C'est ce qu'on appelle la courbe de dispersion. Les 1^{ères} étapes sont décrites sur le schéma de la Figure 7, extraite de la formation SESARRAY aux Houches en Novembre 2005.

Ces équations se traduisent matriciellement, facilitant ainsi les calculs des logiciels qui permettent d'obtenir la courbe de dispersion.

Cette courbe de dispersion dépend des paramètres physiques du milieu ($V_p(z)$, $V_s(z)$, densité). L'inversion de cette courbe nous permet d'estimer ces paramètres.

Les deux méthodes décrites seront utilisées dans le paragraphe 3 sur des modèles canoniques. Ces modèles sont présentés dans le paragraphe 3 qui présente aussi une étude sur l'étape d'inversion.

1.2.3. L'inversion

L'inversion consiste à retrouver le profil de vitesse à partir des courbes caractéristiques (dispersion ou autocorrélation). L'inversion constitue la dernière étape de l'analyse des données de bruit de fond en réseau. En effet le calcul des courbes caractéristiques est numériquement possible à partir du profil de vitesse et est effectué par calcul direct (modules `dc_forward` et `spac_forward` de SESARRAY), tandis que la définition du profil de vitesse à partir des courbes caractéristiques n'a pas de solution analytique, c'est le problème inverse qui fournit plusieurs modèles possibles. On parle de non-unicité de la solution.

L'inversion des courbes de dispersion ou d'autocorrélation est fondée sur un processus itératif de recherche aléatoire dans l'espace des paramètres des valeurs, permettant de minimiser l'écart entre les courbes calculées et observées. L'espace initial des paramètres donne une direction de recherche des meilleurs modèles. Cet espace a donc une influence sur les profils finalement sélectionnés. Les principaux paramètres de l'espace des paramètres sont : le nombre de formations et leur gamme d'épaisseurs, la gamme des valeurs de vitesse des ondes S et P par formation, l'évolution de ces vitesses dans chaque formation (constante, linéaire, loi puissance).

Ce processus aboutit à plusieurs solutions possibles, caractérisés par une valeur d'erreur, chacune d'elles s'approchant au mieux de la courbe de dispersion qu'on cherche à reproduire. La sélection du modèle final peut bénéficier d'informations *a priori* (courbes H/V, données géotechniques sur l'épaisseur des couches, la vitesse du substratum etc.).

Le logiciel utilisé pour l'inversion est le logiciel SESARRAY (anciennement `na_viwer` et récemment `DINVER`), développé dans le cadre du projet européen [SESAME, 2001-2004] qui utilise la méthode de voisinage. Cet outil est encore en développement et les mises à jours se succèdent à un rythme soutenu. Pour plus de détails on se réfèrera à la thèse de Marc Wathelet [Wathelet, 2005], et aux livrables [SESAME, D19.06], [SESAME, D21.07]. Ce logiciel est inclus dans le logiciel SESARRAY (<http://www.geopsy.org/>). Ce logiciel se base sur un algorithme de voisinage [Sambridge, 1999]. Cette méthode génère de manière pseudo-aléatoire des échantillons dans l'espace des paramètres. A chaque « échantillon » (en fait, un modèle de sol) correspond une fonction coût (erreur). A partir des meilleurs modèles on génère de nouveaux modèles et ainsi de suite.

La valeur d'erreur, ou fonction coût, est définie dans la thèse de Marc Wathelet [Wathelet, 2005], dans le cas de l'inversion de la courbe de dispersion, par :

Équation 18 :

$$erreur_{dispersion} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_F} \frac{(x_{di} - x_{ci})^2}{s_i^2 n_f}}, \text{ avec } x_{di} \text{ la vitesse de la courbe de dispersion du modèle à la}$$

fréquence f_i , x_{ci} la vitesse de la courbe de dispersion calculée par la méthode FK, s_i l'incertitude de l'échantillon en fréquence considéré, n_F le nombre d'échantillons en fréquence. Si on ne connaît pas l'incertitude à l'échantillon en fréquence considéré, s_i est remplacé par x_{di} .

De même pour l'inversion des courbes SPAC, l'erreur est définie par :

Équation 19

$$erreur_{SPAC} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{k=1}^{n_R} n_{FK}} \sum_{i=1}^{n_R} \sum_{j=1}^{n_{Fi}} \frac{(r_{dij} - r_{cij})^2}{s_{ij}^2}}$$

Avec :

- r_{dij} : la valeur des courbes estimées (d :data) par SPAC à la fréquence f_j pour un anneau i défini par la distance entre r_{i1} et r_{i2} ,
- r_{cij} : la valeur des courbes théoriques calculées (c :calcul) pour un modèle de vitesse, à la fréquence f_j pour un anneau i défini par la distance entre r_{i1} et r_{i2}
- s_{ij} : la variance (erreur sur les courbes SPAC estimées) pour l'échantillon à la fréquence f_j pour un anneau i ,
- n_R : le nombre d'anneaux considérés,
- n_{Fi} : le nombre d'échantillon en fréquence pour l'anneau i

Notons que le pas d'échantillonnage des courbes caractéristiques (dispersion et autocorrélation) est logarithmique et que l'erreur est normalisée par le nombre d'échantillons. Le pas n'a donc pas d'influence sur la valeur de l'erreur.

2. Étude de cas synthétiques sur l'étape d'inversion des courbes de dispersion des modèles de SESAME

Nous avons vu en introduction que la méthode du bruit de fond en réseau peut se décrire par plusieurs étapes : des mesures à l'analyse (voir paragraphe 1.2), et que chacune d'entre elles pouvait avoir une influence sur les résultats finaux (les profils de vitesse).

C'est dans l'optique de tester l'influence de chaque étape que quelques tests ont été réalisés. Ces tests ne sont pas exhaustifs et une étude paramétrique plus poussée permettrait sûrement d'avoir des informations plus précises. Cependant cela souligne que les choix (de paramétrisation, de géométrie de réseau, etc...) ne sont pas anodins. Le but de ces études est donc de repérer les erreurs d'interprétations possibles et l'influence des choix pour établir quelques conseils à suivre pour un utilisateur novice.

Dans ce paragraphe on s'intéressera à l'étape 3, étape d'inversion, à partir des courbes de dispersion (vitesse de phase des ondes de surface selon la fréquence) théoriques de modèles canoniques relativement simples. Les courbes de dispersion sont inversées avec le logiciel SESARRAY.

D'abord le calcul direct des courbes de dispersion est introduit au paragraphe 2.1. Puis les modèles canoniques sont présentés dans les paragraphes 2.2 (profil de vitesse et courbe de dispersion) et **15.3.1**(fonctions d'amplification pour des ondes planes SH). Sur ces modèles ont été calculées des courbes de dispersion par calcul direct. Enfin les paragraphes 2.3 à 2.6, détaillent le rôle de différents paramètres qui influencent les résultats de l'inversion, c'est-à-dire le profil de vitesse. Le but est d'observer l'amélioration des résultats (profils de vitesse) selon les choix faits pour l'inversion.

Sur des modèles simples tabulaires, horizontalement stratifiés, voir 2.2, Présentation des modèles, on définit par un calcul direct leurs courbes de dispersion. Pour le calcul direct voir [Wathelet, 2005] et le paragraphe 2.1. Ces courbes de dispersion sont inversées. L'inversion donne des résultats non-unique. Donc les profils de vitesse obtenus sont parfois nombreux et étalés. On cherche donc à réduire le nombre et l'étalement de ces profils. Sur l'inversion de ces courbes, sont testés:

- L'influence de la largeur de la bande de fréquence (paragraphe 2.3)
- L'influence de l'espace initial de paramètres sur le résultat de l'inversion (paragraphe 2.4),
- Les inversions combinées des courbes de dispersion des ondes de Love et Rayleigh (paragraphe 2.5),
- L'effet des contraintes a priori de l'espace des paramètres sur l'inversion des courbes de dispersion, comme par exemple une épaisseur, une gamme de vitesse etc., (paragraphe 2.6).

On cherche ici à déterminer quelles sont les contraintes les plus pertinentes, c'est-à-dire celles qui auront le plus d'effets sur les modèles de vitesse finalement sélectionnés, en gardant en tête que le but est de déterminer la réponse du sol. Il est donc bienvenu d'observer quelles sont les différences notables sur la réponse du sol selon le modèle choisi, ce qui est fait au paragraphe **15.3.1**.

Sur toutes les inversions qui vont suivre, le résultat sera un ensemble de modèles sélectionnés, définis par leurs profils de vitesse auxquels correspondent des courbes de dispersion et d'ellipticité.

Les modèles sont sélectionnés selon une valeur d'erreur maximale. Le choix de cette valeur est dépendant de l'utilisateur. Dans un cas réel on s'efforcera de sélectionner les modèles dont la courbe caractéristique (dispersion ou autocorrélation) ne dépasse pas l'erreur (barres d'erreur représentées en noir) définie sur la courbe caractéristique venant du calcul à partir des données. Dans cette sélection de modèles la valeur de l'erreur est alors moins significative. En effet on a remarqué que, dans cette sélection, les meilleurs modèles n'étaient pas forcément ceux qui se rapprochaient le plus du modèle théorique. C'est pourquoi on demandera au lecteur de rester prudent sur l'interprétation de l'échelle de couleur représentant l'erreur sur les modèles sélectionnés. Cette remarque ayant été faite après ces études, seuls quelques résultats sont représentés sans échelle de couleur, en particulier pour les études venant après le protocole.

Sur les modèles sélectionnés avec un niveau maximal d'erreur, on prend les valeurs extrêmes des profils de vitesse dans les différentes formations. L'idéal serait d'avoir une moyenne et un écart-type sur l'ensemble des modèles sélectionnés. Cela n'est pas possible à ce stade du logiciel SESARRAY, car les modèles sont accessibles uniquement au format binaire. Une évolution du logiciel est alors souhaitable pour pouvoir effectuer ce genre de calcul.

Si on avait accès à tous les profils sélectionnés on pourrait quantifier l'étalement par l'écart type. Ici on se contente de regarder la différence de vitesse (ou de profondeur) entre les modèles extrêmes sur l'ensemble des modèles sélectionnés. On parlera alors d'étalement. Par exemple, l'étalement de la vitesse de la 1^{ère} couche qualifie la gamme de vitesse balayée à une profondeur fixée par les modèles sélectionnés. L'étalement relatif correspond à la différence des paramètres (vitesse, profondeur) extrêmes divisée par la moyenne de ces paramètres.

2.1. Le calcul direct des courbes de dispersion et de l'ellipticité

2.1.1. La courbe de dispersion

Les courbes de dispersion, soit la vitesse des ondes de surface en fonction de la fréquence, seront calculées par la méthode FK dans des cas d'études réelles. Mais ce chapitre concerne uniquement l'étape d'inversion, c'est pourquoi les courbes de dispersion sont estimées par calcul direct, pour ensuite tester l'inversion sur ces courbes. Le problème direct est détaillé dans la thèse de [Wathelet, 2005] au paragraphe 3. Sur ce paragraphe on retiendra principalement :

- Le calcul des courbes de dispersion essentiellement une recherche de valeurs propres,
- Pour les ondes de Love et de Rayleigh, l'équation du déplacement peut être réduite à un système d'équations différentielles du premier ordre en z .
- Le cas des couches horizontales peut être résolu par la méthode de la matrice de propagation [Aki-Richards, 1980].

Ce qu'il faut retenir: seule la vitesse des ondes S influence la courbe de dispersion des ondes de Love (ondes polarisées uniquement dans la direction horizontale transverse à la direction de propagation), par contre la courbe de dispersion des ondes de Rayleigh (polarisées dans la plan radial) dépend à la fois de la vitesse des ondes S et des ondes P (les deux paramètres de Lamé λ et μ interviennent).

Le nombre de modes possibles augmente avec la fréquence, et, pour certaines bandes de fréquence, des modes différents peuvent avoir des valeurs de vitesse de phase très proches, en particulier pour les ondes de Rayleigh. Il peut donc arriver, selon la structure et la fréquence, que des modes supérieurs soient proches du mode fondamental. Il est alors important de repérer ces

zones de "mode jumping", ou "points d'osculation", car l'inversion des courbes de dispersion passe par une bonne identification préalable du mode concerné, au risque de dériver sur des modèles complètement erronés car fondés sur une hypothèse fautive. En règle quasi-générale, les inversions supposent classiquement que l'énergie des ondes de surface est portée par le mode fondamental.

Compte tenu de l'incertitude sur les courbes de dispersion obtenues après une analyse f-k sur des données réelles, les tests opérés dans cette section seront effectués non sur les courbes de dispersion théoriques, mais sur ces mêmes courbes "bruitées": le bruitage se fait en modifiant, pour chaque fréquence échantillonnée, la valeur théorique exacte par une variation générée aléatoirement mais pouvant valoir jusqu'à plus ou moins 10 % de la valeur exacte, avec une distribution porte. L'idéal aurait été de réaliser plusieurs bruitages aléatoires puis de calculer la moyenne et l'écart type. Ceci a été réalisé trop tard pour être effectué. Cependant les résultats (profils de vitesse sélectionnés après inversion) devraient être robustes quelque soit le bruitage, car l'inversion fournit un grand nombre de modèles ce qui amènerait au final à une gamme de profils statistiquement identique quelque soit le bruitage.

Le module os-forward du logiciel sesarray, basé sur la programmation d'Hermann [Hermann, 1994] et complètement réécrit et optimisé par Wathelet, [Wathelet, 2005], a été utilisé. Ce dernier effectue un calcul direct des courbes de dispersion des ondes de Love et Rayleigh à partir des propriétés mécaniques d'un modèle, dont les paramètres: vitesses des ondes S et P, et densité varient en fonction de la profondeur. Les modèles sont à une dimension (il n'y a pas de variation latérale). La courbe de dispersion sera notée : DC pour « dispersion curve ». L'échantillonnage en fréquence est effectué avec un pas géométrique (log), choisi par l'utilisateur.

Chaque courbe de dispersion est calculée puis bruitée avec 10 % de variation pour simuler le cas réel où le calcul donne courbes de dispersion avec une marge d'erreur. Le « bruitage » s'effectue de manière identique sur chaque échantillon de fréquence en utilisant une fonction (basée sur la fonction randn de Matlab) qui fournit une variation au hasard entre -10 et +10 % qui s'applique sur la valeur de lenteur (et non pas de vitesse). La distribution est une distribution normale.

Pour chaque modèle on donnera l'erreur mesurée entre la courbe de dispersion avec et sans bruit définie par : $erreur_{DC} = \sqrt{\frac{1}{n_F} \sum_{i=1}^{n_F} \frac{(DC_{brute} - DC_{bruit})^2}{DC_{bruit}^2}}$. Cela donne une idée du seuil irréductible en dessous duquel on ne peut pas espérer descendre. (Voir Tableau 1 pour les valeurs de l'erreur)

2.1.2. L'ellipticité

La définition du mouvement particulière d'une onde est le rapport des déplacements suivant les axes horizontaux et l'axe vertical. A la surface d'un sol horizontalement stratifié, le mouvement particulière des ondes de Rayleigh a la particularité d'être elliptique dans le plan déterminé par la verticale et la direction de propagation. C'est pourquoi le mouvement particulière des ondes de Rayleigh est appelé ellipticité des ondes de Rayleigh. Dans des milieux stratifiés, l'ellipticité des ondes de Rayleigh dépend de la fréquence et peut être soit prograde soit rétrograde [Tokimatsu, 1997], [Konno et Ohmachi, 1998].

À l'exception du cas d'un demi-espace infini, il n'existe pas de solution analytique pour calculer l'ellipticité des ondes de Rayleigh. Le logiciel SESARRAY (module dc_forward), nous a permis d'estimer les courbes d'ellipticité.

2.2. Présentation des modèles

Cinq modèles ont été choisis parmi les modèles utilisés dans le programme [SESAME, 2001-2004],[Bonnefoy-Claudet, 2004]. Nous avons conservé des modèles simples qui présentent cependant des caractéristiques différentes. Chacun d'entre eux peut se rapprocher d'une configuration géologique type comme un remplissage sédimentaire simple M2.1 et M2.2 et plus complexe M10.2a, M10.2b et M10.3. Le Tableau 1 présente les principales caractéristiques des modèles. La fréquence de résonance f_0 est la fréquence à une dimension. L'amplitude A_0 correspond à l'amplitude de la réponse SH (voir annexe 15.4.1.1 page 284) avec pour facteur qualité Q_p et Q_s , respectivement, $V_p/10$ et $V_s/10$.

Tableau 1 :Caractéristiques des modèles étudiés, la fréquence de résonance f_0 et l'amplitude associée sont définies à partir de la réponse à une dimension à une onde SH, voir pour cela le paragraphe 15.3.1

Nom du modèle	Nombre de formation	Épaisseurs [m]	V_p [m/s]	V_s [m/s]	ρ (g/cm ³)	f_0 [Hz]	A_0	Coefficient de Poisson	Contraste d'impédance ($V_2 \rho_2 / V_1 \rho_1$)	Erreur entre la DC brute et la DC bruitée
M2.1	2	25	500 2000	200 1000	1.9 2.5	2	10. 7	0.4 0.33	6.58	0.133
M2.2	2	25	1350 2000	200 1000	1.9 2.5	2	10. 7	0.49 0.33	6.58	0.135
M10.2a	3	18 18	1350 1350 2000	250 330 1000	1.9 1.9 2.5	2.05	8.6	0.48 0.47 0.33	1.32 3.99	0.152
M10.2b	3	18 18	1350 1350 2000	250 625 1500	1.9 1.9 2.5	3	12. 3	0.48 0.36	2.5 3.16	0.131
M10.3	3	31.25 375	500 1800 3500	250 750 2000	1.9 2.1 2.5	0.44	6.6	0.33 0.39 0.26	3.32 3.17	0.138

La Figure 8 représente le modèle M2.1. A gauche se trouvent les profils des ondes P et S, graphiques a et b, et à droite les courbes de dispersion (mode fondamental et modes supérieurs) des ondes de Rayleigh (bleu) et de Love (rouge), graphique c, et la courbe d'ellipticité du mode fondamental des ondes de Rayleigh, graphique d. Sur le calcul de la courbe de dispersion on trouvera quelques notes au paragraphe 2.1.

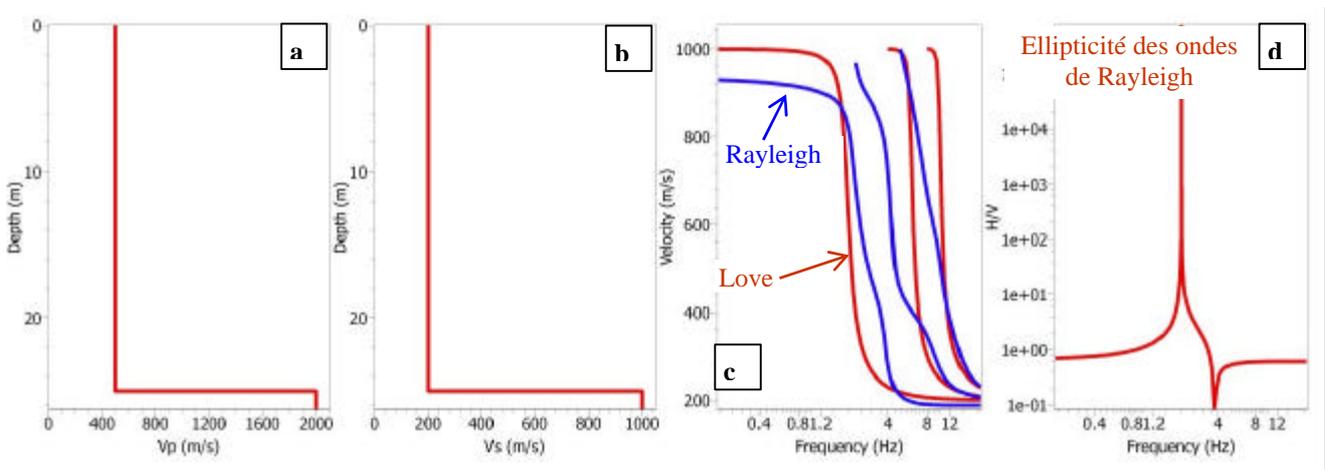


Figure 8 : Modèle M2.1 : (a) : profil de vitesse des ondes P ; (b) : profil de vitesse des ondes S ; (c) : courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Rayleigh en bleu, courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Love en rouge ; (d) : ellipticité du mode fondamental des ondes de Rayleigh pour ce modèle à une dimension.

Ce modèle présente une structure du type couche sédimentaire sur un socle rocheux avec un contraste d'impédance en ondes S de 6.6 à 25 mètres et un coefficient de Poisson de 0.4 pour la 1^{ère} couche et de 0.33 pour le rocher.

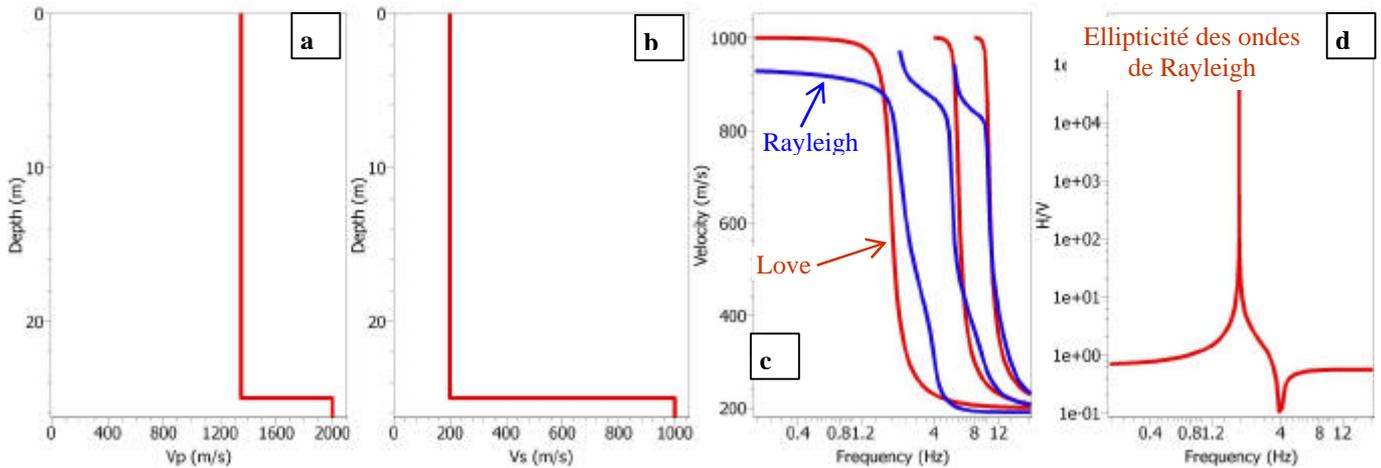


Figure 9: Modèle M2.2 : (a) : profil de vitesse des ondes P ; (b) : profil de vitesse des ondes S ; (c) : courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Rayleigh en bleu, courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Love en rouge ; (d) : ellipticité du mode fondamental des ondes de Rayleigh

Le modèle M2.2 varie par rapport au modèle M2.1 uniquement par la vitesse des ondes P en surface plus élevée (correspondant en fait à une saturation en eau de toute la couche sédimentaire) ce qui affecte légèrement la forme des courbes de dispersion des ondes de Rayleigh (en particulier des modes supérieurs, il y a très peu de différence sur le mode fondamental) comme on peut le voir sur la Figure 9, c.

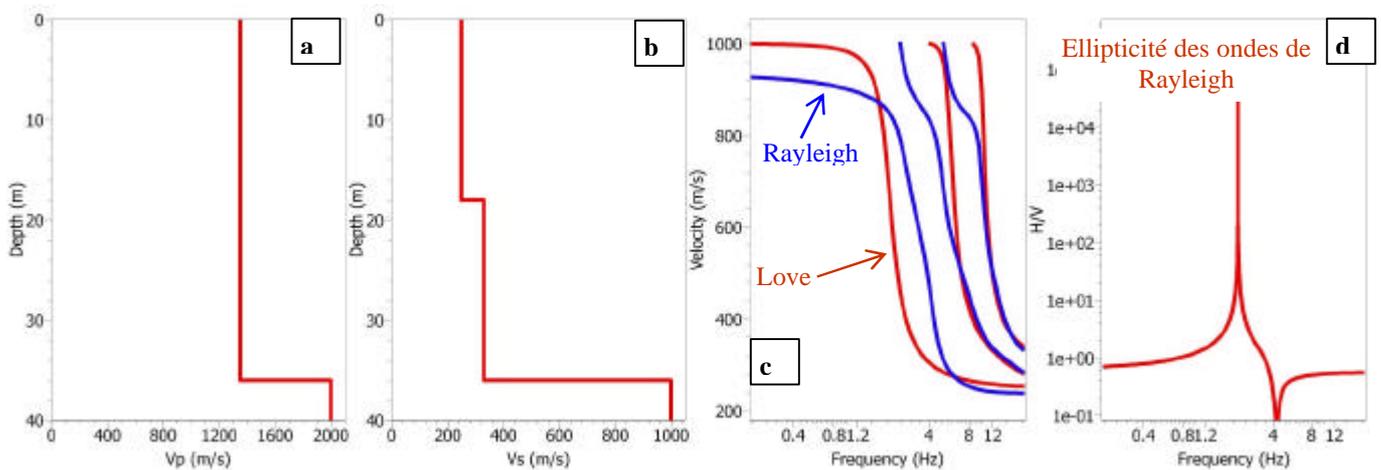


Figure 10 : Modèle M10.2a : (a) : profil de vitesse des ondes P ; (b) : profil de vitesse des ondes S ; (c) : courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Rayleigh en bleu, courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Love en rouge ; (d) : ellipticité du mode fondamental des ondes de Rayleigh

Le modèle M10.2a, Figure 10, présente une structure de deux couches sédimentaires sur un socle rocheux sans changement de vitesse des ondes P entre les deux 1^{ères} couches, avec un contraste d'impédance en ondes S de 1.3 puis de 4.

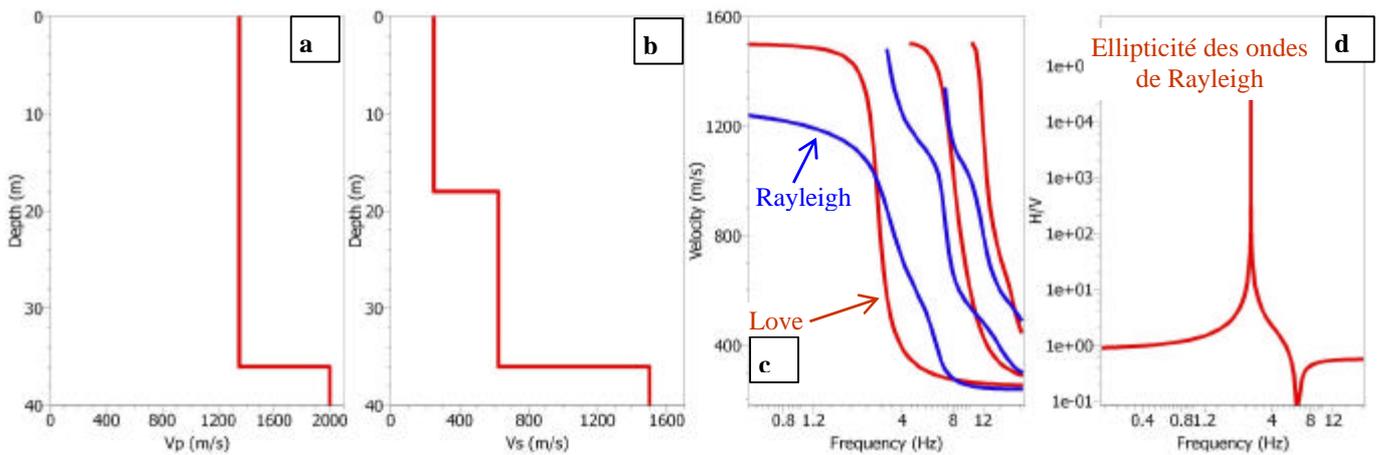


Figure 11 : Modèle M10.2b : (a) : profil de vitesse des ondes P ; (b) : profil de vitesse des ondes S ; (c) : courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Rayleigh en bleu, courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Love en rouge ; (d) : ellipticité du mode fondamental des ondes de Rayleigh

Le modèle M10.2b, Figure 11, présente une structure de deux couches sédimentaires sur un socle rocheux avec un contraste d'impédance en ondes S de 2.5 (plus élevé que pour le modèle M10.2a, c'est la principale différence) puis de 3.2.

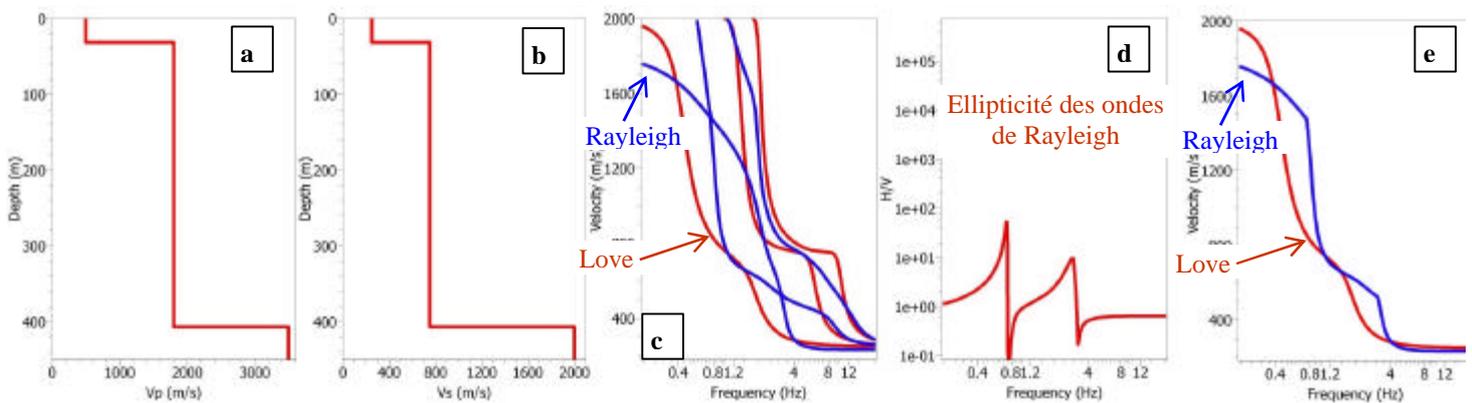


Figure 12 : Modèle M10.3 : (a) : profil de vitesse des ondes P ; (b) : profil de vitesse des ondes S ; (c) : courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Rayleigh en bleu, courbes de dispersion du mode fondamental et des deux premiers modes supérieurs des ondes de Love en rouge ; (d) : ellipticité du mode fondamental des ondes de Rayleigh; (e) : seulement les modes fondamentaux des ondes de Love (rouge) et Rayleigh (bleu).

Le modèle M10.3, Figure 12, présente une structure de deux couches sur un socle rocheux avec un contraste d'impédance en ondes S de 3.3 puis de 3.2, un contraste en onde P, c'est ce qui le différencie des modèles précédents M10.2a et M10.2b.

2.3. Influence de la bande de fréquence sur l'inversion

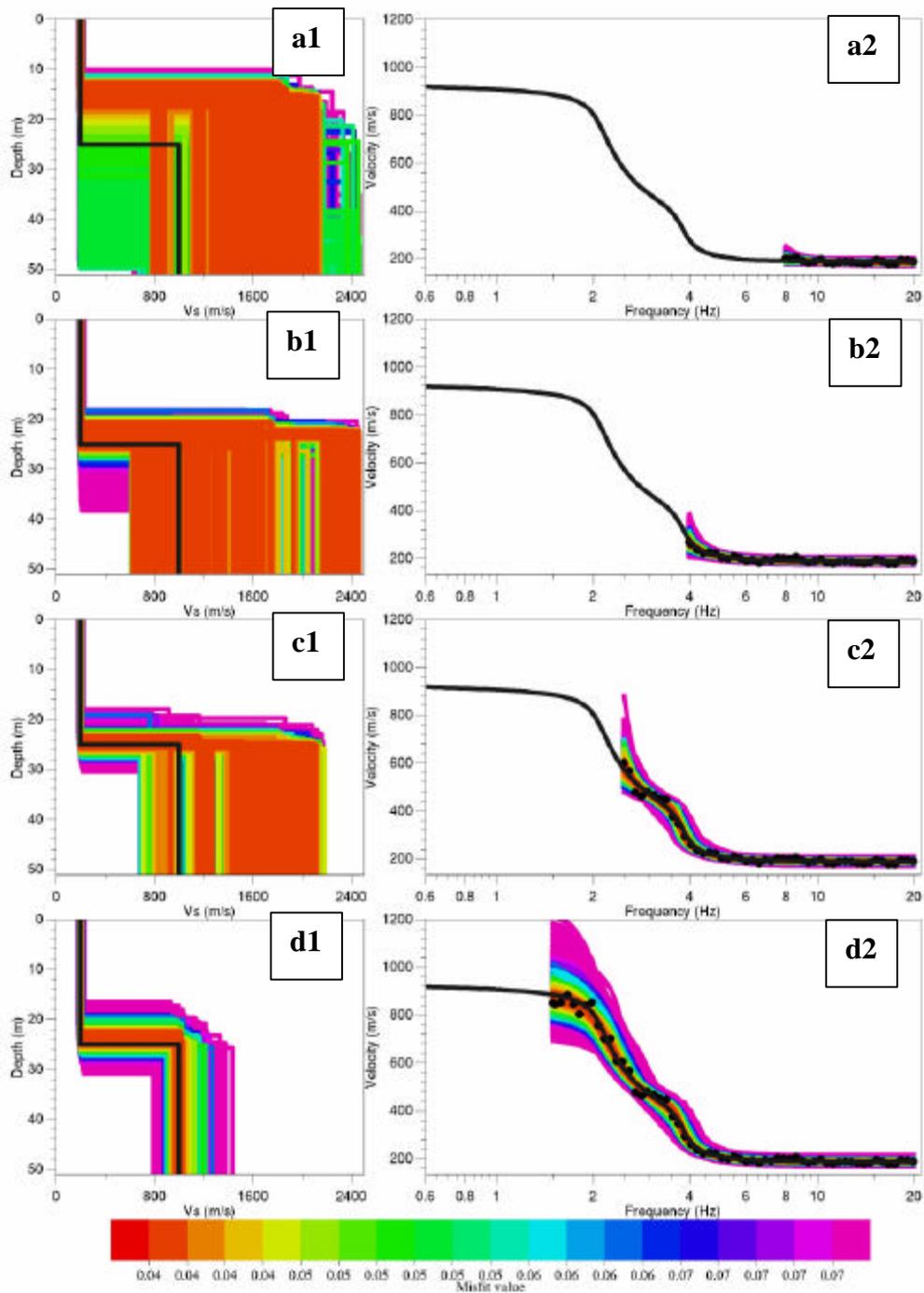


Figure 13 : Sensibilité de l'inversion de la courbe de dispersion des ondes de Rayleigh à la bande de fréquence, sur l'exemple du modèle M2.1, avec un espace des paramètres initial à 2 formations : graphiques de droite (a2,b2,c2,d2) : courbe de dispersion (DC) en noire, DC bruitée (points noirs) et DC correspondant aux modèles de l'inversion (échelle de couleur selon la valeur de l'erreur) ; graphiques de gauche (a1,b1,c1,d1) : profil de vitesse du modèle (en noir) et des modèles obtenus par inversion (couleurs selon l'erreur). De haut en bas: extension de la bande de fréquence sur laquelle la courbe de dispersion est déterminée : 8-20 Hz, 4-20 Hz, 2.5-20 Hz et enfin 1.5-20 Hz

La bande de fréquence accessible à partir de données réelles est toujours limitée vers les basses et les hautes fréquences, à cause non seulement des caractéristiques des capteurs, mais aussi de la bande de fréquence propre du bruit ambiant et des limites de résolution et d'aliasing. Il est donc indispensable de bien appréhender l'influence de la bande de fréquence utilisable. Ce premier test, concernant l'inversion, est l'influence qu'à la largeur de la bande de fréquence, où la courbe de dispersion est définie, sur les profils (résultats) obtenus par inversion de cette courbe de dispersion.

La Figure 13 illustre cette influence pour le modèle M2.1 dans l'hypothèse où la courbe de dispersion est identifiable jusqu'à très haute fréquence (10 fois la fréquence fondamentale, hypothèse très optimiste), et où la limite basse fréquence est variable de 8 Hz ($4 f_0$, cas très pessimiste) à 1.5 Hz ($0.75 f_0$, cas très optimiste). Une première remarque, qui conditionne directement les mesures sur le terrain, est que plus la bande de fréquence est large, meilleurs sont les résultats de l'inversion en terme d'étalement avec une valeur d'erreur équivalente (voir Figure 13 ci-dessous).

Notons que dans cet exemple sur le site M2.1, il y a une erreur globale entre la courbe de dispersion théorique brute et bruitée de 0.13 environ, donc en dessous de ce niveau d'erreur les modèles n'ont pas plus de valeurs les uns par rapport aux autres. L'échelle de couleur ici n'est donc pas représentative.

La Figure 13 présente l'inversion d'une courbe de dispersion, des ondes de Rayleigh du modèle M2.1, définie sur une bande de fréquence de plus en plus large (de haut en bas). Cette figure montre les profils de vitesse résultant de l'inversion en couleurs selon la valeur de l'erreur, et le profil du modèle M2.1 en noir.

La Figure 13 montre que la bande de fréquence sur laquelle est déterminée la courbe caractéristique a une influence sur les profils résultat. Il est donc primordial de déterminer la bande de fréquence à partir des limites d'aliasing et de résolution. La Figure 14 cherche à montrer que les hautes fréquences contraignent la vitesse superficielle.

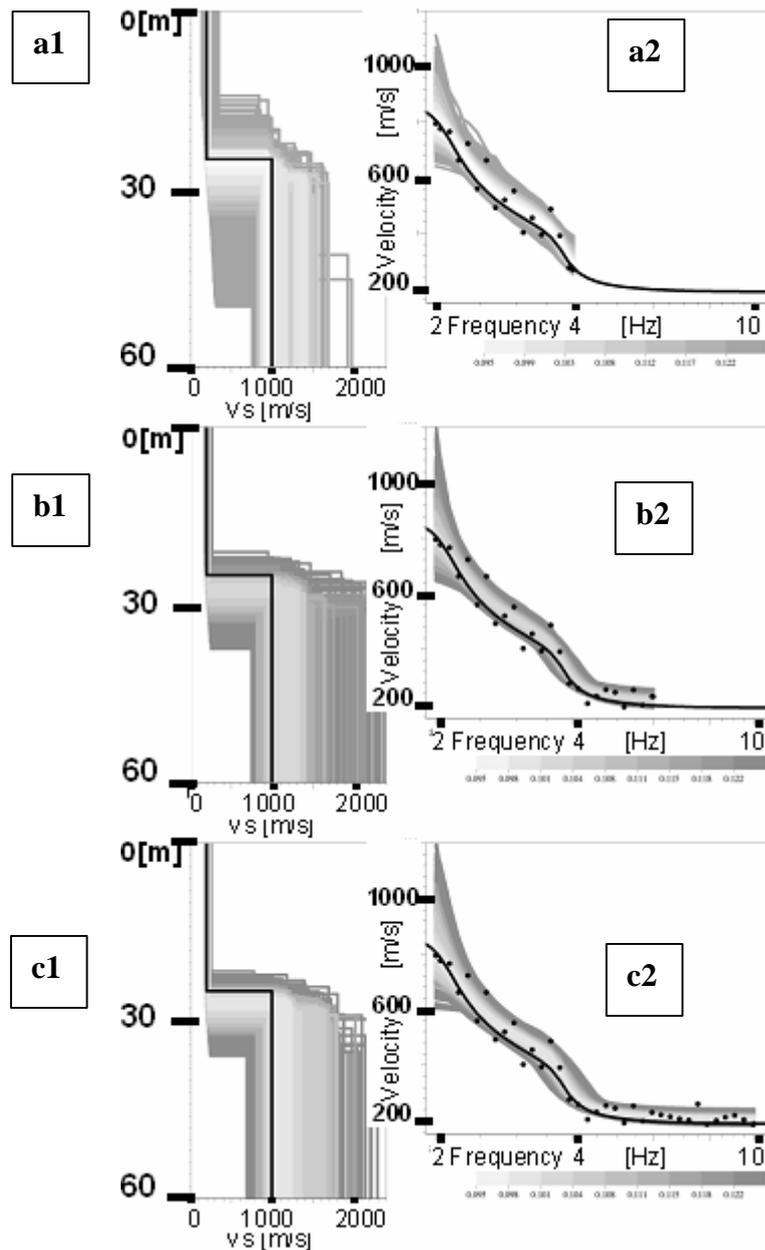


Figure 14 : Sensibilité de l'inversion de la courbe de dispersion des ondes de Rayleigh à la bande de fréquence, sur l'exemple du modèle M2.1, avec un espace des paramètres initial à 2 formations : graphiques de droite (a2,b2,c2) : courbe de dispersion (DC) en noire, DC bruitée (points noirs) et DC correspondant aux modèles de l'inversion (échelle de gris selon la valeur de l'erreur) ; graphiques de gauche (a1,b1,c1) : profil de vitesse du modèle (en noir) et des modèles obtenus par inversion (niveau de gris selon l'erreur). De haut en bas: extension de la bande de fréquence sur laquelle la courbe de dispersion est déterminée : 2-4 Hz, 2-6 Hz et enfin 2-10 Hz

Sur la Figure 13 et la Figure 14, l'amélioration de la définition des profils $V_s(z)$ avec la largeur de la bande de fréquence de la courbe de dispersion inversée, est à noter. Il y a moins d'étalement des modèles possibles, et la profondeur de la première couche est mieux contrainte. On remarque aussi que les hautes fréquences contraignent la surface (Figure 14) et les basses fréquences contraignent la profondeur (Figure 13). La largeur de la bande de fréquence a donc une action directe sur les résultats finaux c'est pourquoi il est important de se demander quelle est la bande de fréquence maximale obtenue avec l'analyse FK des mesures de bruit de fond en réseau. La bande de fréquence utilisable varie selon plusieurs paramètres:

- Selon les ondes : pour des sources locales, les ondes de Rayleigh ne sont plus assez énergétiques en deçà de la fréquence du pic de l'ellipticité (certains auteurs limitent aussi en haute fréquence par la fréquence du ``creux" de l'ellipticité [Scherbaum-2003]). Dans la suite des études on supposera que la fréquence du 1^{er} pic de l'ellipticité est équivalente à celle du rapport H/V (voir [Bonney-Claudet 2004] pour les conditions d'égalité de ces deux fréquences). Les ondes de Love ont un peu plus d'énergie à plus basses fréquences, mais elle chute aussi très rapidement dès que l'on est en dessous de la fréquence de résonance fondamentale ([Lachet, 1994], [Sesame 2001-2004]). Pour cela le contenu fréquentiel des enregistrements et le rapport H/V (considéré proche de l'ellipticité des ondes de Rayleigh dans certains cas où le contraste d'impédance est supérieur à 3) nous donnent des informations. Cependant on ne peut pas avoir une action sur le champ d'ondes existant.
- Selon les réseaux : Ouverture, géométrie, nombre de capteur et nombre de réseaux influencent l'échantillonnage du champ d'ondes. Il existe donc des limites de résolution (définie par le nombre d'onde k_{min}) et d'aliasing (définie par le nombre d'onde k_{max}), dans lesquelles la courbe de dispersion pourra être estimée, voir paragraphe 3.2. Ces limites sont entièrement définies par le nombre et la position des capteurs du réseau. Sur ce point il est possible d'agir.
- Selon le pas d'échantillonnage de l'acquisition : fréquence de Nyquist. Pour les cas d'études de ce chapitre, le bruit synthétique a été simulé avec un pas temporel de 0.00875 secondes.

Toutes ces limitations nous montrent l'importance de choisir les réseaux adaptés au site puisque c'est le seul paramètre sur lequel on peut avoir une action.

La Figure 15 nous montre les courbes de dispersion des ondes de Love et de Rayleigh avec des limites d'aliasing et de résolution de réseaux circulaires, avec un capteur central et 5 capteurs sur la circonférence, de rayon respectif 15, 30, 60 et 110 mètres. La façon de définir ces limites sera expliquée au paragraphe 3.2. Ces réseaux ont été choisis pour correspondre au cas pratique où l'on dispose de 6 capteurs et deux rouleaux de câble de 50m et de 10 mètres pour chaque capteur, correspondant à un rayon maximal de 110m. En pointillé sont représentées les parties des courbes qui sont considérées difficilement estimables avec du bruit de fond en réseau.

En effet en partie haute fréquence, le mélange des modes supérieurs ainsi que l'aliasing réduisent les possibilités d'estimer la courbe de dispersion. Une alternative est l'utilisation de la méthode SASW ou MASW (voir annexe, paragraphe 15.2, page 267). En effet plusieurs sites-test (Saint Guillaume [Meric et al., 2007], Stations RAP de Grenoble, réunion interne avec P. Gueguen) montrent que la méthode SASW permet de définir plus précisément la courbe de dispersion du mode fondamental à hautes fréquences, correspondant aux caractéristiques très proches de la surface. On peut le voir sur la Figure 16 sur un exemple réel dans les argiles du glissement de Saint Guillaume dans le Trièves. Cette approche devrait être testée d'avantage, mais elle semble prometteuse.

A basse fréquence les ondes de surface sont moins énergétiques, les ondes de Rayleigh s'estompent en dessous de la fréquence de résonance et les ondes de Love sont énergétiques jusqu'à légèrement plus basse fréquence. Sur la Figure 15 la limite de 2Hz (passage du rouge à l'orange) pour les ondes de Rayleigh correspond à la fréquence de résonance du site tandis que la limite de 1.5 Hz des ondes de Love (passage du bleu au violet) est définie à partir de l'ouverture maximale d'un le cas pratique de 6 capteurs en réseau circulaire. La limite fréquentielle sur la présence des ondes de Love à basse fréquence n'a pas été déterminée à notre connaissance.

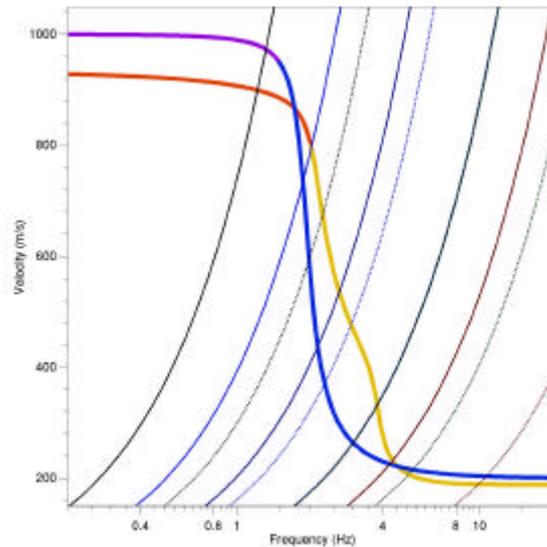


Figure 15: Modèle M2.1, courbes de dispersion théoriques de Rayleigh (en rouge et orange) et de Love (en bleu et violet). Limites d'aliasing et de résolution des réseaux circulaires de rayon 8, 17, 41, 60 et 110 mètres

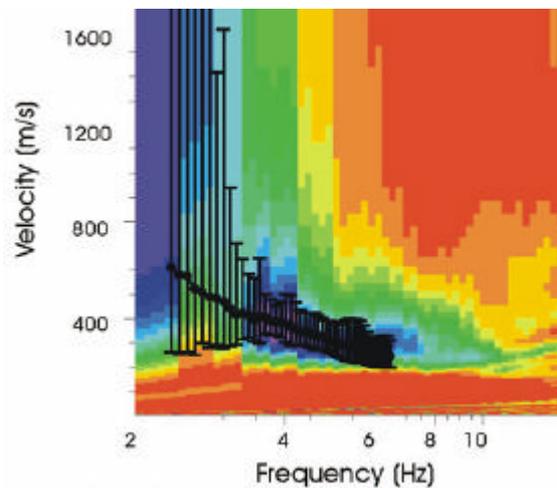


Figure 16: Exemple sur le glissement de Saint Guillaume, Trièves, de la complémentarité de l'analyse des réseaux de bruit de fond et de la méthode SASW. Superposition de la courbe de dispersion (en noir avec les écarts type) issue du réseau de bruit de fond sismique et de la carte de semblance des ondes de surface à partir d'une source active. Figure issue de [Meric et al., 2007]

2.4. Influence de l'espace des paramètres initial de l'inversion

Cette étude a été effectuée uniquement sur les modèles M2.1 et M10.2b. Chaque courbe de dispersion est calculée puis bruitée (avec 10 % de variation) pour simuler le cas réel où le calcul donne des courbes de dispersion avec une certaine marge d'erreur.

Pour inverser une courbe de dispersion on doit cadrer au préalable les limites des modèles à inverser, ou "espace initial des paramètres": nombre de formations (bedrock inclus) au dessus du substratum, et pour chaque couche la gamme d'épaisseur de la formation, les gammes de vitesses des ondes S et des ondes P. Compte tenu de sa très faible influence sur la courbe de dispersion, la

masse volumique est fixée à 2 g/cm^3 . Trois types d'espace des paramètres ont été testés, (voir Tableau 1).

Tableau 1: Espaces des paramètres initiaux

Nom de l'espace	Épaisseur [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	Vs/Vp	? [g/cm ³]	Déviaton de Vp [m/s]	Nombre de sous-formation	Evolution de la vitesse avec la profondeur
2 formations	1-50	200-1500	40-750	0.2 – 0.5	2	0	1	homogène
		1500-3500	450-2480	0.3 – 0.7	2	0	1	homogène
2 formations avec gradient	1-50	200-1500	40-1060	0.2 – 0.7	2	100-1000	5	Gradient (loi puissance)
		1500-3500	450-2480	0.3 – 0.7	2	0	1	homogène
3 formations	3-10	200-800	40-565	0.2 – 0.7	2	0	1	homogène
	10-50	500-1500	150-1060	0.3 – 0.7	2	0	1	homogène
		1500-3500	450-2480	0.3 – 0.7	2	0	1	homogène

2.4.1. Modèle M2.1

La courbe de dispersion des ondes de Rayleigh du modèle M2.1, considérée entre 2 Hz et 10 Hz (pour les raisons invoquées au paragraphe 2.3 : limite d'énergie des ondes de Rayleigh à basse fréquence et limite d'aliasing pour le plus petit réseau à haute fréquence avec un complément d'informations par la méthode MASW) a été inversée avec les trois espaces de paramètres décrits dans le Tableau 1. Les modèles obtenus sont présentés sur la Figure 17.

Le modèle M2.1 est un modèle à deux formations, donc forcément l'espace des paramètres à 2 formations fournit des modèles, sélectionnés selon la même valeur d'erreur maximale de 0.1, qui correspondent le mieux au modèle de M2.1 en terme d'étalement (en particulier au niveau de la détermination de l'épaisseur).

Le choix est donc l'espace des paramètres à 2 formations. Mais si l'on se place dans le cadre où la structure du sol n'est pas connue, alors il est difficile de choisir quel est l'espace des paramètres le plus approprié puisque les trois résultats semblent corrects en surface et peu précis en profondeur. En effet sur les modèles de vitesse sélectionnés, on observe un faible étalement sur les 20 1^{ers} mètres, et un étalement prononcé au-delà de 20 mètres. Notons que pour les trois inversions la vitesse des ondes S en surface est déterminée au pire à 25 % près, voir Tableau 2.

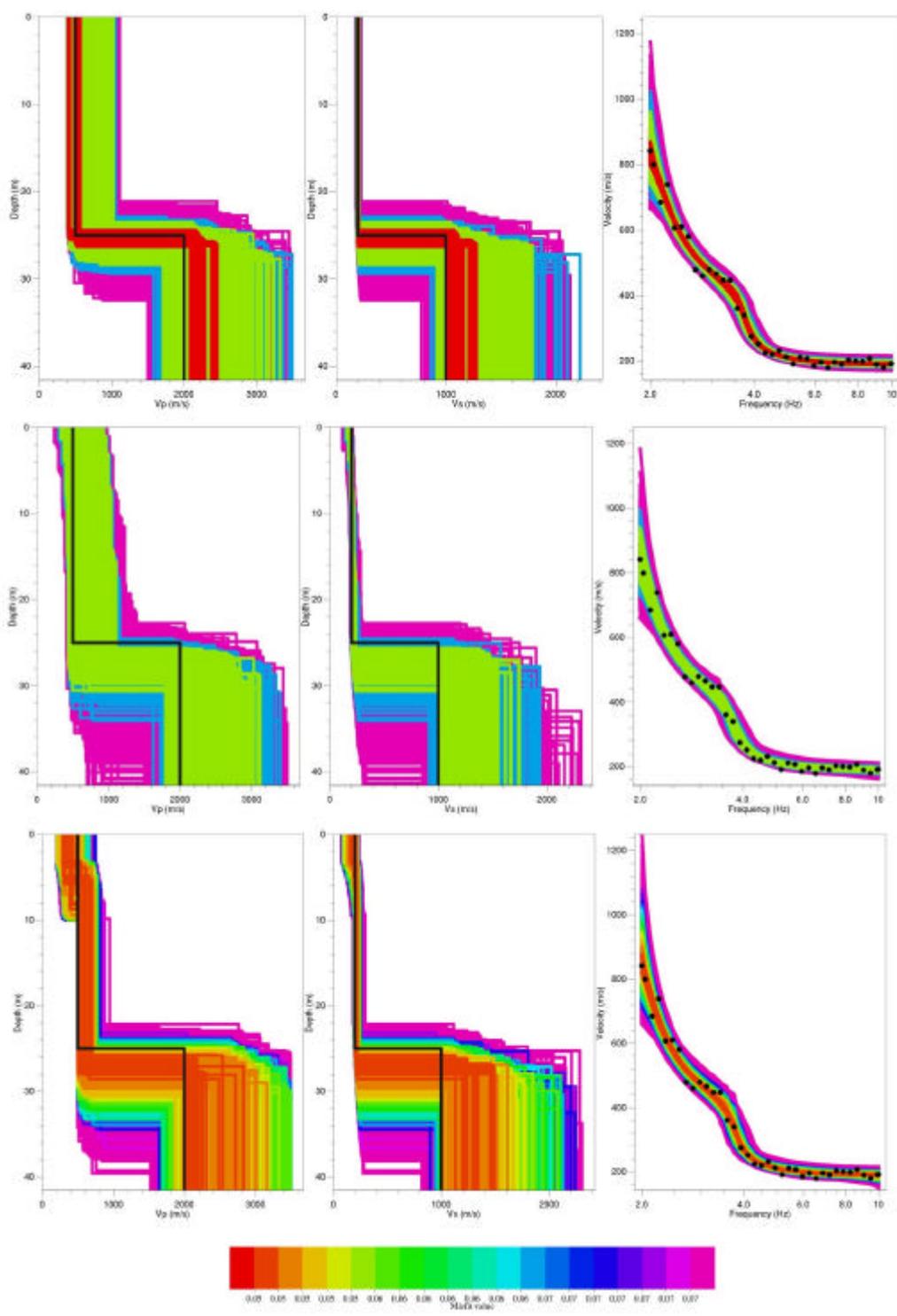


Figure 17 : Comparaison des inversions du modèle M2.1 selon l'espace des paramètres initial, de haut en bas : 2 formations homogènes, 2 formations avec un gradient dans la 1^{ère}, 3 formations homogènes (voir Tableau 2). De gauche à droite: profil Vp, profil Vs et courbe de dispersion. Ensemble des modèles avec une erreur inférieure à 0.1 en couleur, profil de vitesse du modèle initial M2.1 en noir, courbe de dispersion directe et bruitée en points noirs.

Les résultats et la comparaison au modèle canonique sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : Estimation de la vitesse moyenne sur les 10 premiers mètres avec différents espaces initiaux pour l'inversion de la courbe de dispersion du modèle M2.1

Nom de l'espace	Estimation de Vs moyen sur les 10 1 ^{ers} mètres [m/s]	Erreur par rapport au Vs du modèle M2.1 [%]
2 formations	190 – 250	5 à 25 %
2c-grad	170 – 250	15 à 25 %
3 formations	150 - 250	25 %

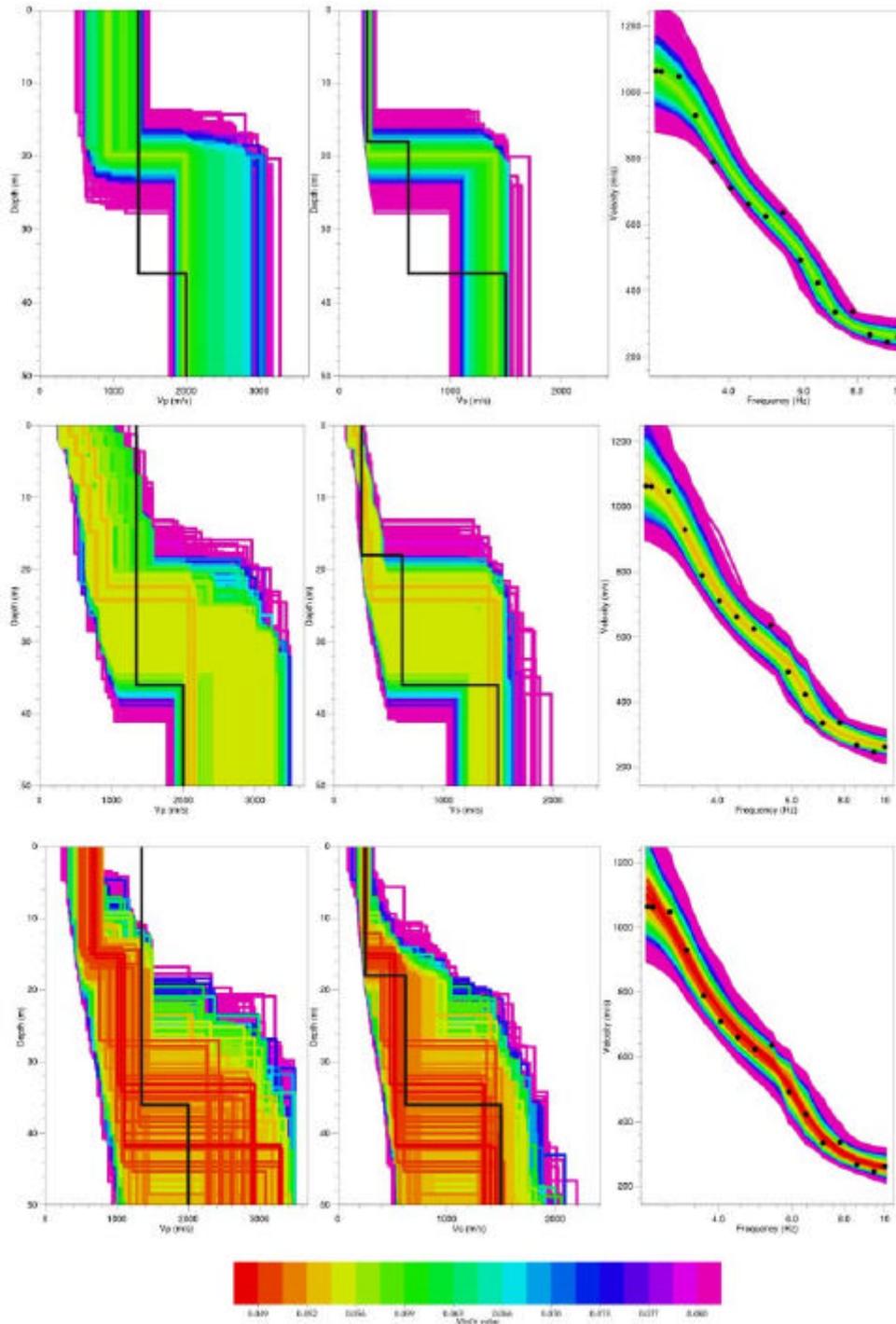


Figure 18: Sensibilité des résultats à l'espace initial de paramètres: exemple pour le modèle M102b. Comparaison des espaces initiaux de paramètres de haut en bas : 2 formations homogènes, 2 formations dont la 1^{ère} avec un gradient, 3 formations homogènes (voir Tableau 2). De gauche à droite: profil Vp, profil Vs et courbe de dispersion. Ensemble des modèles avec une erreur inférieure à 0.11 en couleur, profil de vitesse du modèle initial M10.2b en noir, courbe de dispersion directe et bruitée en points noirs.

La courbe de dispersion des ondes de Rayleigh du modèle M10.2b, considérée entre 2.6 Hz et 10 Hz (pour les raisons invoquées au paragraphe 2.3) a été inversée avec les trois espaces de paramètres décrits dans le Tableau 1. Les modèles obtenus sont présentés sur la Figure 18.

L'erreur étant normalisée (1.2.3) par rapport au nombre d'échantillonnage de la courbe de dispersion en fréquence, l'espacement en fréquence des points retenus sur la courbe de dispersion n'a pas d'influence sur la valeur de l'erreur.

Le modèle M10.2b est un modèle à trois formations, l'espace des paramètres à 3 formations est celui qui fournit le plus grand nombre de modèles avec la plus petite valeur d'erreur. Mais si l'on se place dans le cadre où la structure du sol n'est pas connue, alors il est difficile de choisir quel est l'espace des paramètres le plus approprié. En effet même si les valeurs d'erreur très faibles sont fournies par l'inversion avec l'espace à trois formations, les trois résultats semblent corrects et les meilleurs résultats en terme d'erreur montrent un étalement plus grand des profils de vitesse sélectionnés, à toutes les profondeurs. Notons que pour les trois inversions la vitesse des ondes S en surface est déterminée au pire à 30 % près, voir Tableau 3.

On remarque aussi que le modèle à 3 formations est celui qui donne une estimation de la vitesse en surface moins bonne que les autres espaces initiaux. Dans ce cas on peut penser que le contraste n'est pas assez grand pour être très net sur la courbe de dispersion, le bruitage de la courbe atténue l'effet de cette formation. Donc l'espace à trois formations donne une large possibilité de modèles de vitesse qui ne sont pas forcément cohérents avec le profil réel. Dans ce cas il reste en ouverture, la possibilité d'effectuer d'autre réalisation de bruitage.

Tableau 3 : Estimation de la vitesse moyenne sur les 10 premiers mètres avec différents espaces initiaux pour l'inversion de la courbe de dispersion du modèle M10.2b

Nom de l'espace	Estimation de Vs moyen sur les 10 1 ^{ers} mètres [m/s]	Erreur par rapport au Vs du modèle M10.2b [%]
2 formations	215-325	14 à 30 %
2c-grad	130-270 et 230-430	12 à 28 %
3 formations	200-330	20 à 32 %

Conclusion : Si c'est la vitesse de la première formation qui est cherchée, alors il semble qu'il faudrait utiliser un espace des paramètres simple de type 2 formations avec des gammes de vitesse et de profondeur assez larges, surtout quand aucune donnée extérieure n'est disponible. Cette remarque est valable pour des modèles simples mais semble être aussi adaptée dans des cas réels, certainement plus complexes, étudiés par la suite (étude sur l'Ebron et sur les stations grecques, paragraphes 14 et 5.2.3 réciproquement). Rappelons aussi que la bande de fréquence où est définie la courbe de dispersion comprend la zone plate en haute fréquence de la courbe de dispersion qui caractérise les 1^{ers} mètres. Pour avoir ce résultat on doit donc bien s'assurer que la courbe de dispersion décrit cette zone plate.

La valeur de l'erreur et l'étalement doivent être observés afin de déterminer l'espace des paramètres qui fournit les profils qui semblent le mieux correspondre à la courbe de dispersion.

L'inversion avec un espace ne comprenant pas les paramètres du modèle a été testée (Figure 19). Le résultat montre que les modèles obtenus, avec une faible valeur d'erreur, entrent en butée sur les limites de l'espace initial. Cela semble signifier que les profils cherchent à dépasser l'espace des paramètres pour atteindre une meilleure valeur de l'erreur. Donc, même si l'espace des paramètres est vraiment mal défini (c'est-à-dire qu'il ne contient même pas le modèle initial), le comportement des profils résultant de l'inversion (cherchant à dépasser les limites de l'espace des paramètres) peut permettre de réaliser l'erreur faite sur la détermination de l'espace initial.

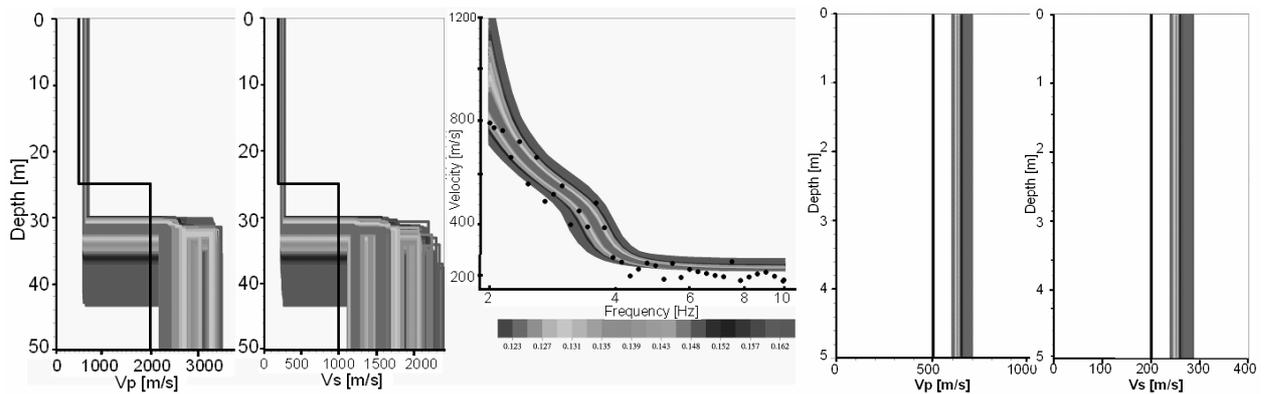


Figure 19: Inversion avec un espace initial des paramètres ne comprenant pas le modèle M2.1, en couleur modèles sélectionnés après l'inversion, en noir modèle initial M2.1, de gauche à droite : Vp, Vs, courbes de dispersion (points noirs : DC théorique bruitée), zoom sur les 5 1^{ers} mètres de Vp puis de Vs

Ces observations mettent en avant la difficulté de trancher pour un espace de paramètres particulier quand il n'y a pas d'informations extérieures. Les résultats peuvent être assez différents surtout en terme de profondeur et de vitesse du substratum. Cependant, même dans les cas étudiés les plus défavorables la vitesse de la première formation est estimée à 32% près dans le pire des cas et en moyenne sur l'ensemble des cas étudiés elle est estimée à 20% près. Bien sûr cela dépendant si la courbe de dispersion est décrite sur la zone plate à haute fréquence caractérisant les 1^{ers} mètres du sous-sol.

Cette remarque est valable pour nos cas d'étude simples. On peut penser que pour des cas réels plus complexes, on ne verra pas d'amélioration des résultats sur la vitesse en profondeur et sur l'épaisseur des formations sédimentaires. Nous retiendrons donc que le résultat le plus fiable est uniquement la vitesse des ondes S de la 1^{ère} couche.

2.5. Apport des ondes de Love

Les ondes de Love ayant plus d'énergie à plus basse fréquence que les ondes de Rayleigh, on peut en principe espérer déterminer leur courbe dispersion en dessous de la fréquence du pic de l'ellipticité des ondes de Rayleigh, fréquence limite pour les ondes de Rayleigh. Cette courbe de dispersion nous donnant ainsi des informations à plus grande profondeur. De plus les ondes de Love sont uniquement contraintes par la vitesse des ondes S, on espère alors être plus précis sur le profil Vs(z). Pour estimer l'apport des ondes de Love trois modèles, M2.1, M2.2 et M10.2b sont considérés. Comme dans les sections précédentes, chaque courbe de dispersion est calculée puis bruitée avec 10 % de variation pour simuler le cas réel où l'analyse FK procure des courbes de dispersion avec une marge d'erreur. Ensuite les courbes de dispersion sont inversées à partir d'un espace de paramètres simple à deux formations, voir Tableau 1. Trois types d'inversion sont comparés :

- L'inversion de la courbe de dispersion des ondes de Love
- L'inversion de la courbe de dispersion des ondes de Rayleigh
- L'inversion des courbes de dispersion des ondes de Love et Rayleigh simultanément

Remarque sur l'inversion des ondes de Love : à l'époque de ces tests, le logiciel d'inversion définissait Vs à partir de Vp et du paramètre Vs/Vp. Donc on définissait des valeurs de Vp même si les ondes de Love ne nous fournissent aucune information sur ces vitesses. C'est pourquoi sur les figures suivantes, concernant l'inversion des ondes de Love, des profils Vp sont représentés.

L'erreur sur l'inversion combinée des ondes de Love et Rayleigh est une moyenne sur l'erreur correspondant aux ondes de Love d'une part, et de Rayleigh, d'autre part.

2.5.1. Modèle M2.1

Dans cet exemple (Figure 20) les figures de haut en bas représentent:

- L'échelle de couleur représente la légende de la valeur de l'erreur
- en haut :
 1. à droite la courbe de dispersion bruitée des ondes de Love en points gris et les courbes de dispersion correspondant aux modèles en couleurs selon leur valeur d'erreur (a3)
 2. au milieu les modèles de profil V_s (couleurs selon la valeur de l'erreur) (a2)
 3. à gauche les modèles de profil V_p (couleurs selon la valeur de l'erreur) (a1)
- au milieu :
 1. à droite la courbe de dispersion bruitée des ondes de Rayleigh en points noirs et les courbes de dispersion correspondant aux modèles en couleurs selon leur valeur d'erreur (b3)
 2. au milieu les modèles de profil V_s (couleurs selon la valeur de l'erreur) (b2)
 3. à gauche les modèles de profil V_p (couleurs selon la valeur de l'erreur) (b1)
- en bas :
 1. à droite les courbes de dispersion bruitées des ondes de Rayleigh et love (points) et les courbes de dispersion correspondant aux modèles en couleurs selon leur valeur d'erreur (c3)
 2. au milieu les modèles de profil V_s (couleurs selon la valeur de l'erreur) (c2)
 3. à gauche les modèles de profil V_p (couleurs selon la valeur de l'erreur) (c1)

Les ondes de Love donnent des modèles légèrement plus contraints en V_s , surtout en profondeur, tandis que les ondes de Rayleigh donnent des modèles plus contraints sur le profil V_p . L'inversion combinée des deux courbes de dispersion donne des modèles moins étalés. La vitesse en surface est estimée à 30% près dans le cas le plus défavorable, voir le Tableau 4. Attention, ici la valeur de l'erreur n'est pas tout à fait comparable d'une inversion à l'autre car ce n'est pas le même objet qui est inversé dans les 3 cas. En effet l'erreur c'est en fait l'erreur par rapport à la courbe inversée et ici on a d'abord la courbe de Love puis la courbe de Rayleigh et enfin les deux combinées.

Cependant notons que la vitesse V_s en profondeur est très mal estimée même si les données sont moins étalées avec l'apport des ondes de Love. Il faut donc garder en mémoire l'incapacité de résoudre V_s au-delà de la première formation (erreur de plus de 50%) avec une telle bande de fréquence.

Tableau 4 : Estimation de la vitesse moyenne sur les 10 premiers mètres avec différentes courbes inversées

Courbe de dispersion	Estimation de V_s moyen sur les 10 1 ^{ers} mètres [m/s]	Erreur par rapport au V_s du modèle M2.1 [%]
Rayleigh	190 à 260	5 à 30 %
Love	180 à 240	10 à 20 %
Rayleigh et Love	180 à 250	10 à 25 %

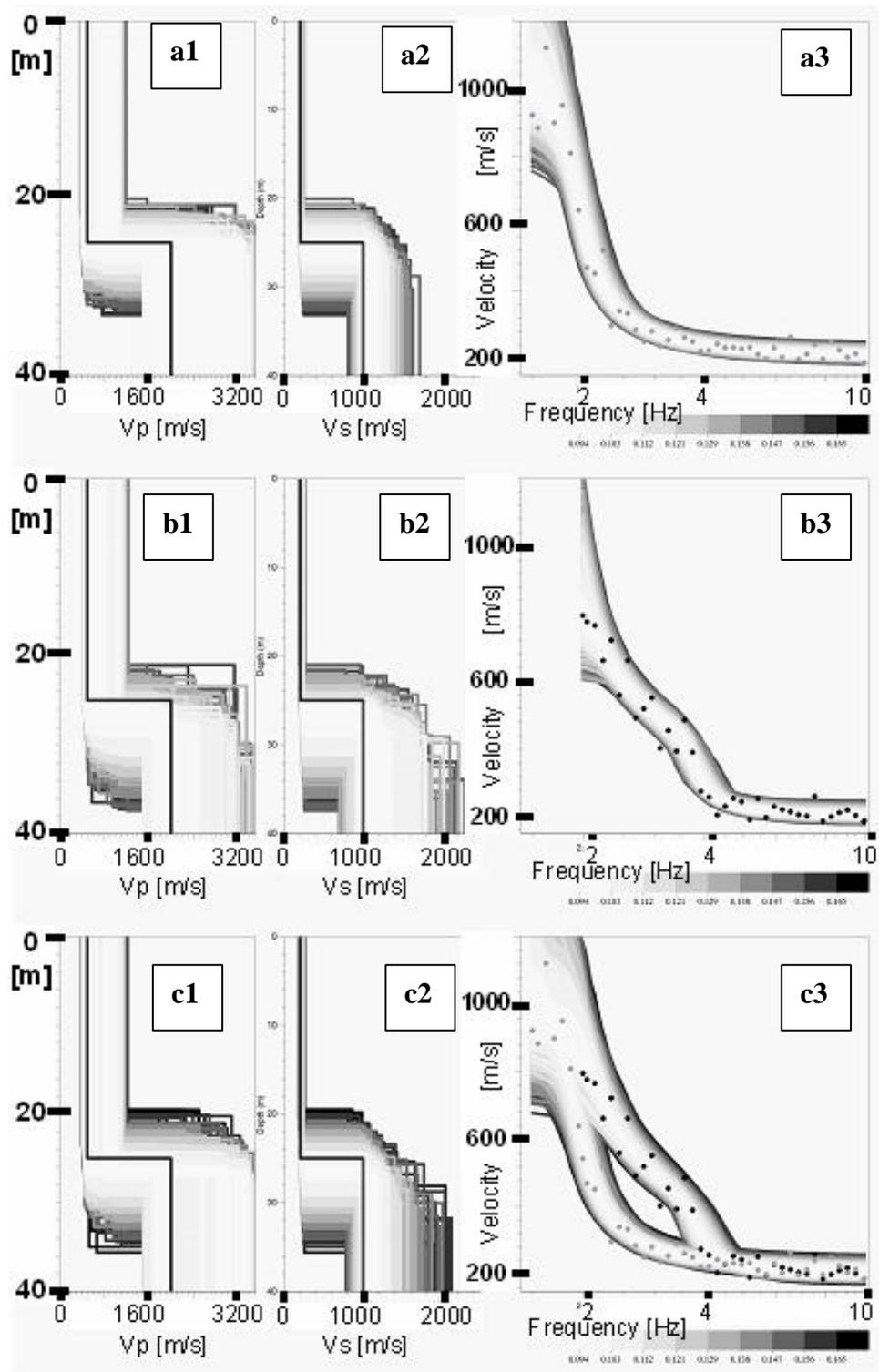


Figure 20 : modèle M 2.1, inversion des courbes de dispersion des ondes de Love (a) des ondes de Rayleigh (b) et des deux ensemble (c). Modèles sélectionnés avec une erreur inférieure à 0.16 en niveau de gris. En noir : profils de vitesse du modèle. Graphiques 1 pour le profil des ondes P, graphiques 2 pour le profil des ondes S et graphiques 3 pour les courbes de dispersion.

2.5.2. Modèle M2.2

Les 9 neufs graphiques de la Figure 21 du modèle M2.2 amènent aux mêmes conclusions qu'avec le modèle M2.1: Une utilisation combinée apporte légèrement plus de contrainte, en particulier sur le profil Vs en profondeur qui reste cependant très mal contraint. Cela n'a pas d'impact sur l'estimation de la vitesse (Tableau 5) de la 1^{ère} formation qui est estimée à 25% près.

Tableau 5 : Estimation de la vitesse moyenne sur les 10 premiers mètres avec différentes courbes inversées

Courbe de dispersion	Estimation de Vs moyen sur les 10 1 ^{ers} mètres [m/s]	Erreur par rapport au Vs du modèle M2.2 [%]
Rayleigh	180 à 240	10 à 20 %
Love	180 à 250	10 à 25 %
Rayleigh et Love	180 à 250	10 à 25 %

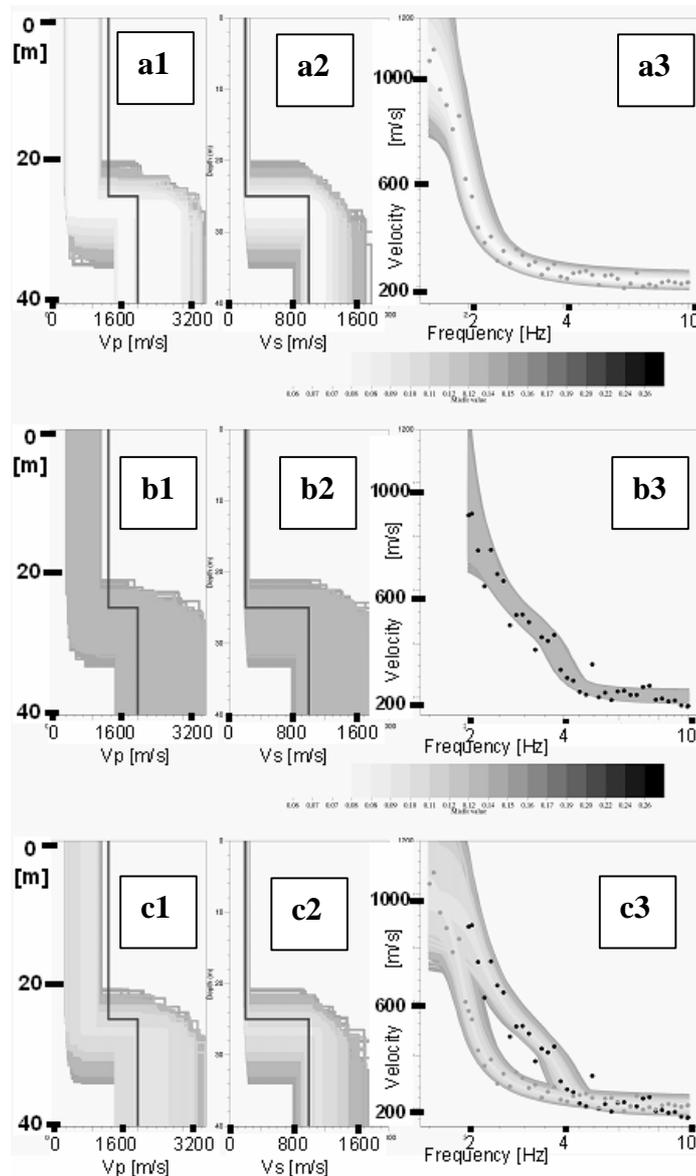


Figure 21 : modèle M 2.2, inversion des courbes de dispersion des ondes de Love (a) des ondes de Rayleigh (b) et des deux ensemble (c). Modèles sélectionnés avec une erreur, inférieure à 0.15, en niveau de gris. En noir : profils de vitesse du modèle. Graphiques 1 : profil des ondes P, graphiques 2 : profil des ondes S et graphiques 3 : courbes de dispersion.

2.5.3. Modèle M10.2b

Les mêmes observations sont valables ici. Notons cependant qu'un espace d'inversion à deux formations pour un modèle à 3 formations ne permet pas une estimation de la vitesse de la 1^{ère} formation (jusqu'à 48% d'erreur) aussi bonne que dans les modèles précédents à deux formations (moins de 20% d'erreur).

Tableau 6 : Estimation de la vitesse moyenne sur les 10 premiers mètres avec différentes courbes inversées

Courbe de dispersion	Estimation de Vs moyen sur les 10 1 ^{ers} mètres [m/s]	Erreur par rapport au Vs du modèle M10.2b [%]
Rayleigh	210 à 370	16 à 48 %
Love	243 à 350	3 à 40 %
Rayleigh et Love	240 à 350	4 à 40 %

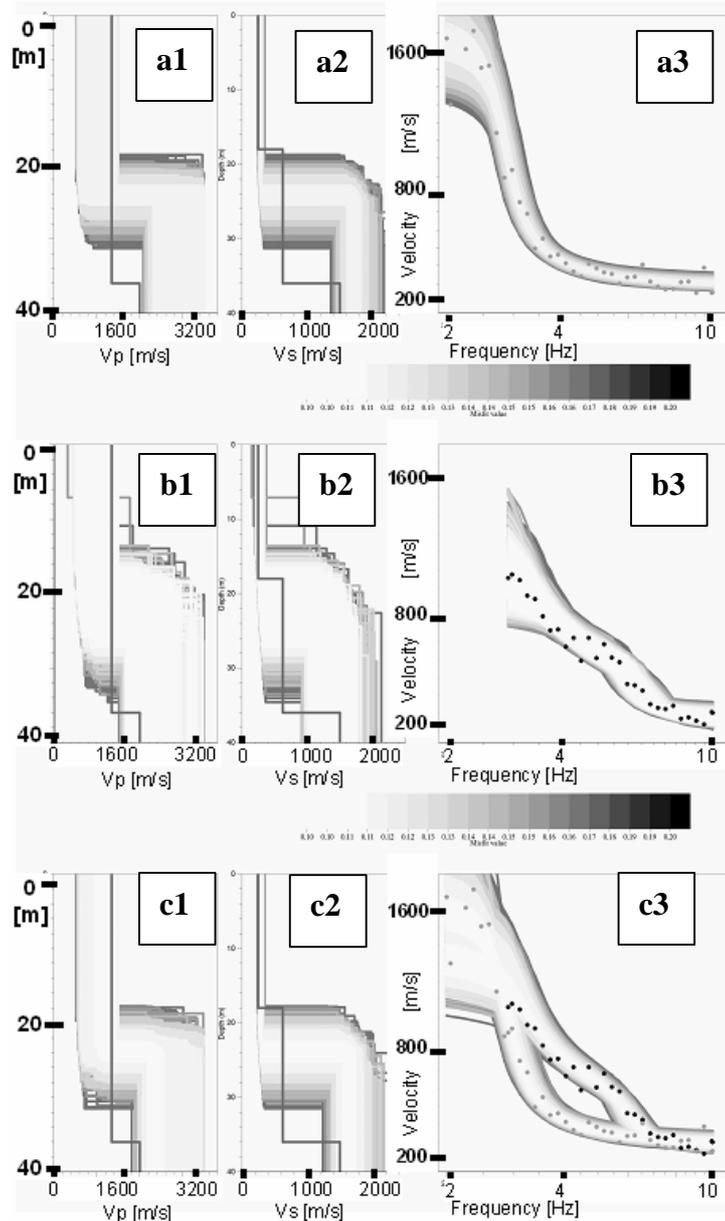


Figure 22: modèle M 10.2b, inversion des courbes de dispersion des ondes de Love (a), de Rayleigh (b) et des deux ensemble (c). Modèles sélectionnés avec une erreur, inférieure à 0,3, en niveau de gris. En rouge : profils de vitesse du modèle. Graphiques 1) profil des ondes P, 2) profil des ondes S et 3) courbes de dispersion.

2.5.4. Conclusion

D'après l'étude des trois modèles ci avant (Figure 20, Figure 21, et Figure 22) la méthodologie à adopter est la suivante:

- Tout d'abord inverser séparément, dans leur gamme de validité (bande de fréquence) les courbes de dispersion des ondes de Love et de Rayleigh ;
- Puis inverser ensemble les deux courbes en contraignant l'espace des paramètres initial par les informations déduites des modèles trouvés avec les inversions précédentes.

Cette méthodologie mériterait d'être testée sur un plus grand nombre de modèles, mais reste cependant une indication utile dans les cas réels.

L'apport des ondes de Love tient uniquement dans le fait que ces dernières peuvent être connues à plus basses fréquences que les ondes de Rayleigh, une information plus basse fréquence va mieux contraindre les paramètres de terrain en profondeur. Les inversions montrent une légère amélioration sur la valeur des vitesses en profondeur, mais surtout une précision sur l'épaisseur de la première formation.

Cet affinement des résultats, par l'apport des ondes de Love, aura peut être une influence primordiale sur la réponse du sol puisque la profondeur est directement liée à la fréquence fondamentale. Une étude paramétrique à ce sujet devrait être envisagée. Par contre les résultats en surface ne sont pas drastiquement améliorés par l'apport des ondes de Love. Donc si le but de la prospection est de connaître uniquement la valeur de la vitesse dans la première formation la connaissance des ondes de Love n'apportera pas une contribution indispensable.

Rappelons cependant que la détermination expérimentale des courbes de dispersion (étape 1 des méthodes en réseau) des ondes de Love n'a pas été étudiée ici et qu'elle n'est pas incrémentée dans SESARRAY. L'augmentation de la bande de fréquence pour ces ondes est donc une hypothèse à confirmer.

2.6. Données a priori

L'inversion donne une gamme de modèles possibles, solution du problème inverse qui n'est pas unique. Le principal problème de l'inversion est cette non unicité des solutions due à la fois à la non linéarité du problème et aux erreurs d'estimation des courbes à inverser. Parmi ces modèles on sélectionne des modèles acceptables selon la valeur de l'erreur. Ce choix est dépendant de l'utilisateur. Un conseil des utilisateurs expérimentés est de sélectionner les modèles qui sont compris dans les barres d'erreur de l'estimation des courbes caractéristiques (courbe de dispersion ou courbes d'autocorrélation). L'ensemble des modèles acceptables est plus ou moins étalé. La précision des résultats est donc limitée par:

- la non-unicité de la solution
- l'étalement des résultats

Étant donnée cette non-unicité et cet étalement, il est souvent indispensable d'avoir des informations extérieures, par exemple sur l'épaisseur, la vitesse, afin de pouvoir contraindre les modèles de vitesse et donc en réduire le nombre et l'étalement.

La contrainte sur V_p , V_s et l'épaisseur se fait en réduisant l'espace des paramètres. En général on ne réduit pas cet espace à une seule valeur pour rester concret. En effet si des informations sur V_p , V_s sont connues, elles viennent de mesures qui ont donc une erreur associée. Pour la profondeur, en général c'est une estimation très localisée alors que le réseau concerne une zone. Là aussi on associera à une information sur la profondeur, une erreur représentative de sa variabilité dans l'espace.

Seul le modèle M2.1 a été testé en évaluant successivement l'apport d'informations sur V_p , V_s , l'épaisseur et la fréquence fondamentale de résonance f_0 . Les conclusions tirées de cette étude ne sont donc pas représentatives de l'ensemble des modèles, mais donnent un point de vue sur la tendance des effets de données a priori.

On compare l'ensemble des modèles possibles qui ont une erreur inférieure à 0.15. Ceci est ici possible car l'objet de départ qui est inversé, ici la courbe de dispersion des ondes de Rayleigh, est toujours le même, sauf pour le cas où on impose une fréquence de résonance. En effet dans ce cas l'erreur, erreur dite globale, est combinée entre l'erreur sur la courbe de dispersion et l'erreur sur l'ellipticité définie uniquement par la valeur de la fréquence du pic :

Équation 20

$$erreur_{ellipticité} = (f_0^{expérimentale} - f_0^{calculée}) / df_0^{expérimentale}$$

et

Équation 21

$$erreur_{globale} = (1 - a)erreur_{dispersion} + aerreur_{ellipticité}$$

(Avec l'erreur_{dispersion} définie dans l'Équation 18 et a pouvant varier de 0 à 1 selon le poids que l'on souhaite donner à la contrainte sur la fréquence de résonance, on choisit ici a =0.5)

La comparaison des modèles se fait de manière intuitive, en gardant un même étalement des modèles sélectionnés autour de la courbe de dispersion initiale, pour les deux cas avec et sans contrainte sur la fréquence de résonance.

2.6.1. Contraintes sur Vp

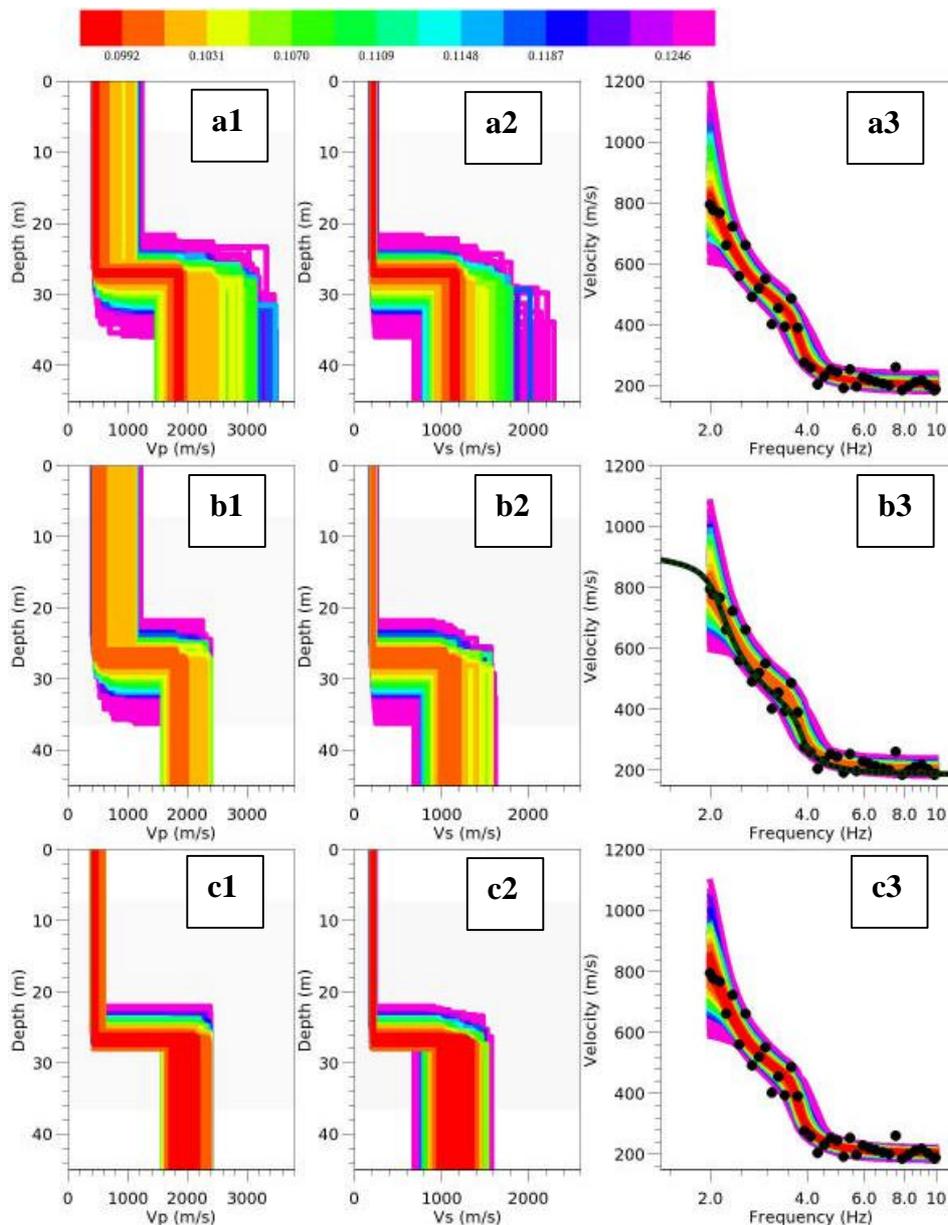


Figure 23: Modèle M2.1, comparaison de l'inversion de la courbe de dispersion: en haut sans contrainte, au milieu avec Vp contraint dans le substratum, en bas avec tout le profil Vp contraint à 20 %

Le cas de figure où le profil des ondes P est connu et le profil des ondes S inconnu, peut se rencontrer assez souvent, les campagnes de réflexion ou réfraction en ondes P étant beaucoup moins rares que leurs homologues en ondes S. Dès lors se pose légitimement la question « La contrainte sur le profil Vp améliore-t-elle la détermination du profil Vs ? ».

La courbe de dispersion des ondes de Rayleigh, bruitée (pour se rapprocher d'un cas réel) et définie entre 2 et 10 Hz, est inversée de trois manières différentes :

- Sans aucune contrainte et avec un espace des paramètres à deux formations (cf. Figure 23, a)
- En contraignant la valeur des ondes P dans le substratum entre 1500 et 2500 m/s (variation de 25% autour de la valeur du bedrock connue), cas où les vitesses des ondes P du substratum de la région sont connues par exemple sur un affleurement rocheux (cf. Figure 23, b).

- En contraignant tout le profil des ondes P, cas où une prospection géophysique, par exemple un profil de réfraction, a été réalisée. La contrainte consiste à réduire l'espace des paramètres autour du profil Vp connu avec une variation de 20% sur ce profil Vp, (cf. Figure 23, c).

Les profils Vp et Vs n'étant pas indépendants de part le logiciel d'inversion, la contrainte sur l'un impose forcément une contrainte sur l'autre. Il y a donc en effet une amélioration de l'étalement du profil Vs en profondeur quand le profil Vp est partiellement ou entièrement contraint, ainsi qu'une amélioration de la définition de la profondeur puisqu'elle est aussi contrainte par la définition du profil Vp. Cependant cela ne change pas les résultats sur Vs en surface qui est toujours bien définie dans ce cas d'un modèle simple d'une formation sur un substratum. Il faudrait tester l'influence de Vp sur des modèles plus complexes.

Afin de voir si la contrainte en Vp pouvait être utile dans le cas où la courbe de dispersion n'est pas définie en hautes fréquences, la courbe de dispersion a été coupée entre 2 et 6 Hz. Les résultats sont très proches et l'amélioration sur les autres paramètres que ceux contraints n'est pas spectaculaire. Il en est de même pour la courbe de dispersion coupée de 4 à 10 Hz, comme on peut le voir sur la Figure 173 et la Figure 174 en annexe.

Notons cependant que la proximité des résultats pour la bande de fréquence entre 2 et 6 Hz comparé à celle entre 2 et 10 Hz est encourageante, étant donné que la zone très haute fréquence (entre 6 et 10 Hz ici) est souvent mal définie par les réseaux comme nous le verrons dans l'étude sur l'étape d'obtention des courbes caractéristiques.

2.6.2. Contraintes sur Vs

On peut facilement imaginer que dans une région donnée, le substratum rocheux soit bien connu a priori, et que donc la gamme de valeurs possibles pour la vitesse d'ondes S puisse y être relativement bien définie. On peut légitimement se demander dans ce cas si une telle contrainte améliore la définition de l'épaisseur. Cela a été testé pour le modèle M2.1 en restreignant les vitesses Vs dans le substratum à l'intervalle 900 m/s à 1100 m/s, soit 10% de variation autour de la vitesse connue. Les résultats en sont présentés sur la Figure 24 et résumés dans le tableau ci-dessous. Les valeurs de la profondeur sont choisies sur les bornes extrêmes des modèles sélectionnés.

Tableau 7 : Estimation de la profondeur de la 1^{ère} formation avec et sans contrainte sur la vitesse du substratum

Courbe de dispersion	Estimation de la profondeur [m]	Erreur par rapport au modèle M2.1 [%]
Sans contrainte	21 à 32	16 à 28 %
Avec VsBR contraint à 10%	21 à 31	16 à 24 %

La seule contrainte de Vs dans le substratum ne change pas drastiquement la détermination de la profondeur. Cela influence la vitesse des ondes P en profondeur puisque Vs et Vp sont liés dans l'inversion.

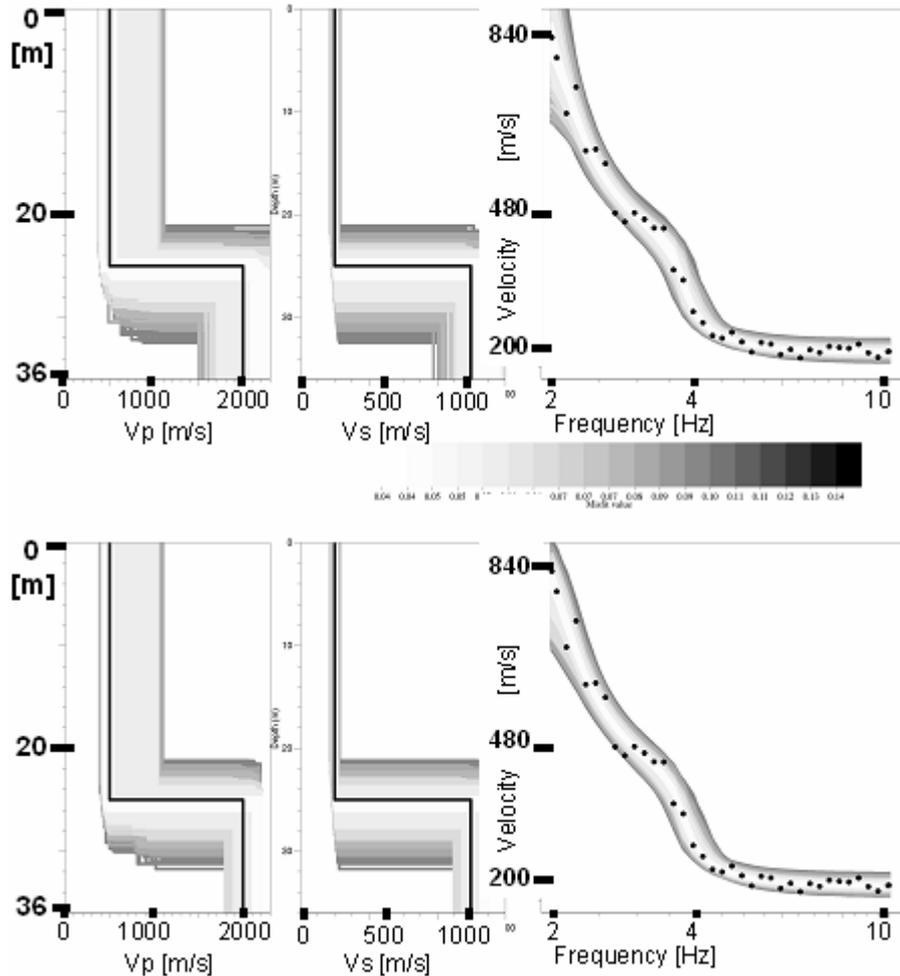


Figure 24: Modèle M2.1, comparaison de l'inversion de la courbe de dispersion: en haut sans contrainte, en bas avec Vs contraint dans le substratum

2.6.3. Contraintes sur l'épaisseur

L'espace des paramètres est réduit pour la variation de l'épaisseur de la 1^{ère} couche entre 21.25 et 28.75 mètres, soit 15 % de variation autour de la profondeur connue.

Quand seule l'épaisseur est contrainte, on peut voir sur la Figure 25, la définition de l'épaisseur est en effet améliorée étant donné qu'elle a été volontairement contrainte. Sans contrainte, l'épaisseur est comprise entre 21 et 36 mètres (modèles extrêmes), soit une erreur entre 16% et 44%. L'étalement est légèrement réduit pour les vitesses en profondeur, mais la définition de la vitesse en surface est sensiblement identique (Tableau 2). Cependant notons que l'épaisseur est souvent un des paramètres des résultats de profils les moins bien définis et qu'il est donc toujours intéressant de récolter des informations à son sujet.

Tableau 2 : Estimation de la vitesse de la 1^{ère} formation avec et sans contrainte sur la profondeur du substratum

Courbe de dispersion	Estimation de la vitesse en surface [m/s]	Erreur par rapport au modèle M2.1 [%]
Sans contrainte	188 à 255	6 à 27 %
Avec h contraint à 15%	185 à 240	7.5 à 20%

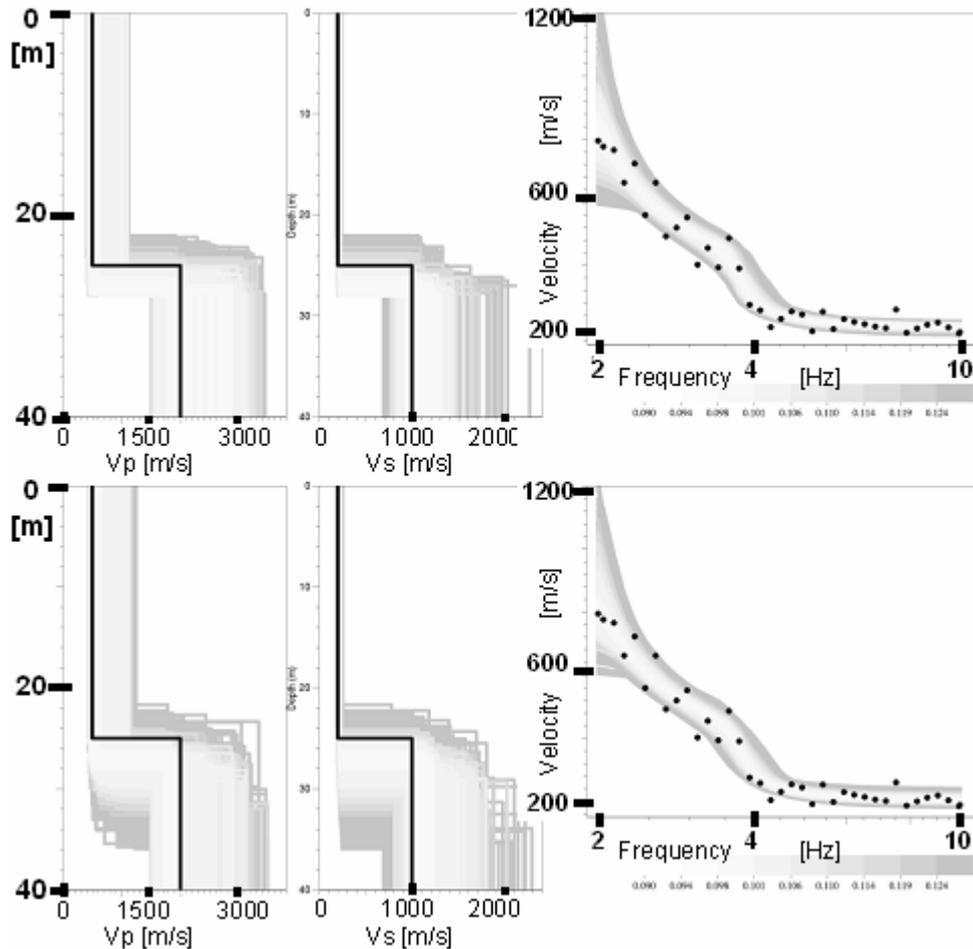


Figure 25 : Modèle M2.1, comparaison de l'inversion de la courbe de dispersion: en haut avec l'épaisseur contrainte à 10%, en bas sans contrainte

2.6.4. Contraintes sur la fréquence de résonance

Le logiciel SESARRAY permet d'inverser la courbe de dispersion avec une contrainte sur la fréquence de l'ellipticité des ondes de Rayleigh. Notons que dans un cas d'étude de terrain on la définit grâce au rapport H/V du bruit. Deux inversions, avec et sans contrainte sur la fréquence de résonance, sont donc réalisées sur la courbe de dispersion du modèle M2.1. L'erreur avec la fréquence en contrainte est définie si avant. L'erreur globale est choisie ici avec $\alpha=0.8$. C'est-à-dire que les modèles sont contraints à 80% par la fréquence de l'ellipticité et 20% par la courbe de dispersion. Ce poids a été choisi de telle sorte que la contrainte sur la fréquence est une influence suffisante sur l'inversion.

Afin de comparer judicieusement les deux inversions présentées sur la Figure 26, comme l'erreur est calculée sur deux objets différents, la courbe de dispersion seule d'une part, et la courbe de dispersion combinée avec la fréquence du pic de l'ellipticité des ondes de Rayleigh d'autre part, on choisit les modèles dont les courbes de dispersion qui couvrent visuellement la même zone autour de la courbe de dispersion estimée (points noirs).

Notons que la valeur de l'erreur n'est pas comparable comme nous l'avons évoqué page 69. Dans ce cas la comparaison semble délicate. Les résultats des inversions ne montrent pas une différence notable, on peut voir dans l'inversion contrainte par la fréquence un nombre réduit de modèles.

La conclusion sur la contrainte sur la fréquence du pic de l'ellipticité des ondes de Rayleigh n'est pas définitive et cet aspect mériterait d'être revu. Dans le livrable, [SESAME D24.13], une étude sur un modèle à deux couches sur un substratum est présentée et conclut sur le fait que l'amélioration concerne uniquement la vitesse des ondes S dans la 2^{ème} formation non pas la profondeur du substratum.

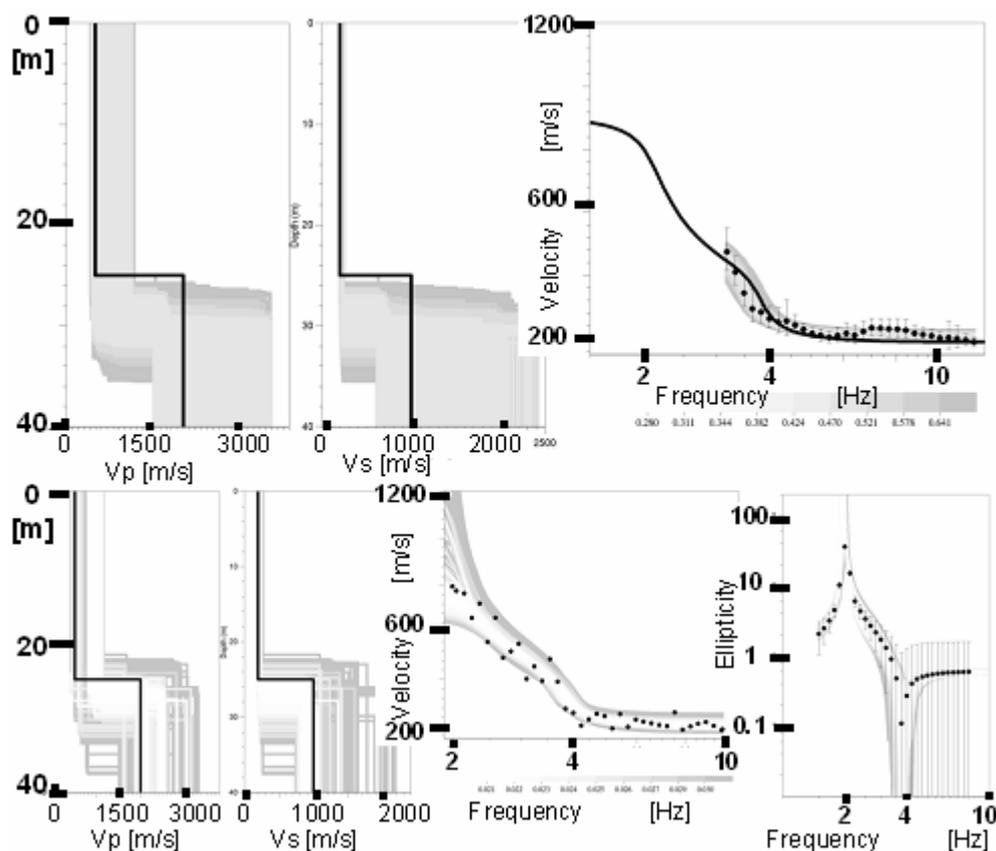


Figure 26: Modèle M2.1, comparaison de l'inversion de la courbe de dispersion: en haut sans contrainte, sélection des modèles avec une erreur inférieure à 0.15, en bas avec une contrainte sur la fréquence du pic de l'ellipticité des ondes de Rayleigh à 2Hz, sélection des modèles avec une erreur inférieure à 0.04

2.6.5. Conclusion

Les informations a priori ont leur rôle car elles diminuent « l'étalement » des modèles possibles à un niveau d'erreur donnée. Cependant la contrainte d'un paramètre semble, dans nos cas d'étude, avoir peu d'influence sur les autres paramètres qui sont toujours autant étalés, sauf pour le cas des profils Vp et Vs qui sont liés par l'inversion.

Notons que les données a priori sont nécessaires si l'on souhaite avoir d'autres informations plus détaillées que celle de la vitesse des ondes S en surface.

Cependant rappelons que ces tests ont été réalisés sur des modèles à une dimension avec des courbes de dispersion synthétiques, sur une large bande de fréquence. Même si la courbe est bruitée, le cas concret de terrain est bien souvent moins évident. Dans ce cadre les informations a priori auront alors un intérêt plus grand pour préciser les résultats en réduisant la gamme de profils possibles.

La réduction de la bande de fréquence fournit des résultats de plus en plus étalés, les données a priori seront d'autant plus bienvenues que la bande de fréquence de la courbe de dispersion est réduite.

Pour finir le complément d'information fourni par une donnée a priori fiable ne peut pas avoir un effet négatif. Il est donc recommandé de contraindre les inversions avec des informations extérieures dès que cela est possible.

D'après les tests effectués sur les modèles présentés au paragraphe 2.2, page 51, l'inversion permet de déterminer la vitesse des ondes S en surface avec une marge d'erreur inférieure à 20 % en moyenne quel que soit l'espace des paramètres choisi au départ de l'inversion. On trouvera en annexe page 268, une petite étude paramétrique sur l'effet d'une erreur de 20% sur la réponse d'un site.

3. Étude de cas synthétiques sur l'étape d'obtention des courbes caractéristiques (dispersion ou autocorrélation) des modèles de SESAME

3.1. Introduction

Dans ce chapitre des simulations de bruit sont utilisées pour tester les méthodes de détermination de la courbe de dispersion (analyse FK) et les courbes d'autocorrélation (analyse SPAC). Ces courbes sont appelées courbes caractéristiques. Ces analyses ont été décrites au chapitre I, paragraphes 1.2.1 et 1.2.2. Le but est de se sensibiliser aux paramètres influant sur la détermination des courbes caractéristiques et de repérer les erreurs d'interprétation possibles. Nous verrons :

1. L'influence de la géométrie des réseaux et la détermination des limites d'aliasing et de résolution
2. La sensibilité des analyses FK et SPAC selon le modèle
3. La comparaison des analyses FK et SPAC

On introduit deux nouveaux modèles, M01 et M2.3, non présentés dans le paragraphe 2.2.

Le modèle M01 (Figure 27) représente un site au rocher « parfait homogène », pour lequel l'absence de dispersion (il n'y a pas de variation de vitesse des ondes de volume selon la profondeur) rendait inutile toute étude au paragraphe 3 d'étude de l'inversion des courbes de dispersion de modèles canoniques.

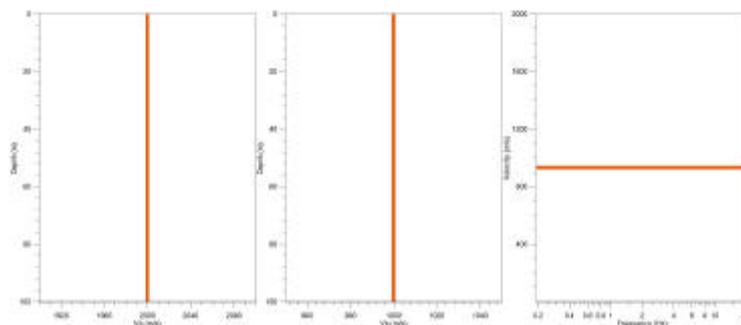


Figure 27: Modèle M01 : de gauche à droite : vitesse des ondes P, vitesse des ondes S, vitesse des ondes de Rayleigh

Le modèle M01 (Figure 27) présente les caractéristiques d'un demi-espace infini, c'est-à-dire un site au rocher avec $V_s=1000$ m/s et $V_p=2000$ m/s. Cependant il est assez éloigné d'un cas réel où une couche d'altération est souvent présente et une augmentation de la vitesse avec la profondeur est généralement observable (voir chapitre III, paragraphe 10.2 « Variability of the velocity profiles of rock sites from Kik-net database »). La simulation de bruit sur un tel site ne sera donc pas forcément représentative d'un site au rocher typique.

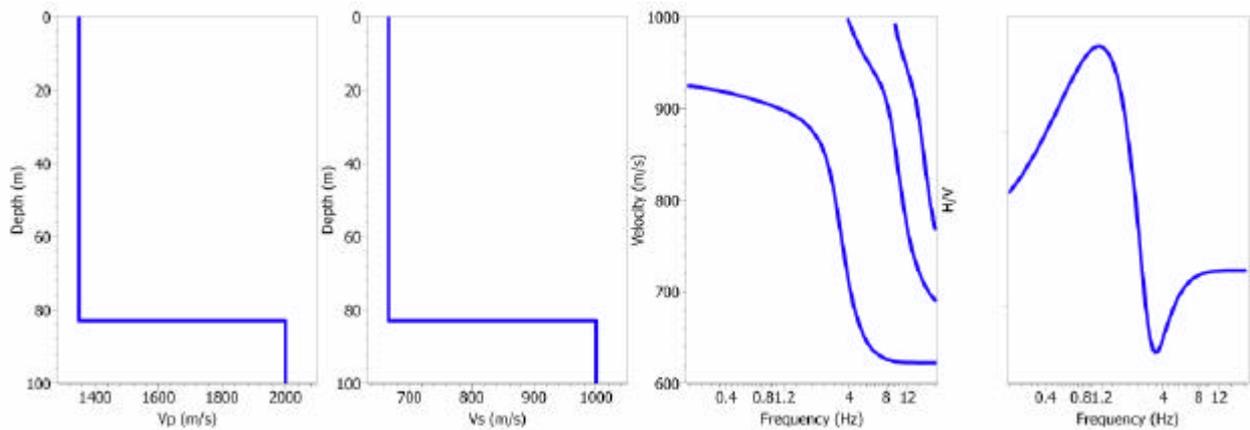


Figure 28: Modèle M23, de gauche à droite : vitesse des ondes P, vitesse des ondes S, vitesse des ondes de Rayleigh des 3 premiers modes, ellipticité des ondes de Rayleigh

Le modèle M2.3 est un modèle du même type que le modèle M2.1 (c'est-à-dire une couche de sédiments sur un substratum) mais avec des vitesses plus élevées et une épaisseur plus importante de façon à garder constante la fréquence de résonance à 2 Hz, Figure 28. Il présente les caractéristiques d'une couche de sédiments raides sur un substratum. Ce modèle présente un contraste nettement moins fort, et donc une amplification et une dispersion beaucoup moins prononcées que pour le modèle M21.

La simulation numérique utilisée ici pour générer des synthétiques de bruit, a été développée dans le cadre du programme de recherche SESAME : un premier code, "ransource" génère des sources de bruit de manière aléatoire autour du réseau de récepteurs [Moczo et al., 2002], puis le code de calcul d'Hisada [Hisada, 1994], [Hisada, 1995] calcule le champ d'ondes rayonné sur la base de la méthode du nombre d'onde discret [Bouchon, 1981]. La simulation du bruit se fait donc en plusieurs étapes décrites brièvement ci-dessous et détaillées dans la thèse de S. Bonnefoy-Claudet:

- Modélisation des sources de bruit, par des points forces dont les caractéristiques (amplitude, direction de la force, temps d'occurrence, fonction source temporelle (Dirac ou pseudo monochromatique)) sont générées aléatoirement.
- Calculs des fonctions de Green du milieu entre chaque couple source-récepteur ([Hisada, 1994], [Hisada, 1995])
- Calculs de la contribution d'une source pour un récepteur (convolution fonctions de Green et fonction source)
- Pour chaque récepteur détermination des synthétiques finaux par sommation des contributions de chaque source.

3.2. Limites associées à un réseau

Les limites d'aliasing et résolution ont été vues dans l'introduction. Elles ne dépendent que de la géométrie du réseau. Évoquons ici une autre limite liée au pas d'échantillonnage en temps des enregistrements : Pour les modèles avec une vitesse rapide en surface, on touche à une autre limite liée au pas d'échantillonnage en temps des enregistrements. En effet, si on regarde la longueur d'onde maximale, soit le nombre d'onde minimal k_{mini} lié à la distance maximale entre deux capteurs du réseau notée L . $k_{\text{mini}} = 2\pi/L$, $k = 2\pi f/c > k_{\text{mini}}$, donc $c < Lf$

Si on a un pas d'échantillonnage dt , la fréquence maximale analysable (Nyquits) est $f_{\text{max}} = 0.5/dt$.

Donc la vitesse maximale compte tenu de l'ouverture L est:

$$C_{\text{max}} = Lf_{\text{max}} = 0.5 L / dt$$

Dans les simulations de bruit utilisées $dt = 0.00875s$. Pour $L = 15$ m, on a $C_{\text{max}} = 857$ m/s

3.3. Présentation des réseaux

Afin d'observer l'influence de la forme et de la taille des réseaux, différentes formes et tailles sont testées sur les modèles synthétiques. Ces réseaux sont présentés ici. La forme du réseau a une influence sur la réponse du réseau. Dans [Wathelet, 2005] on note que : le type de configuration (circulaire, triangulaire, spirale etc.) a peu d'influence sur la variation du pic central tandis qu'il va fortement influencer la limite d'aliasing.

On teste, dans les études qui vont suivre, trois réseaux à peu près circulaires de rayon respectif: 8m, 17m et 41m. Ces réseaux ne sont pas parfaitement circulaires, voir la Figure 29 (a), pour représenter ainsi les cas réels où le positionnement des stations n'est pas toujours possible à une place précise (végétation, escarpement, bâtiments etc.). Afin de pouvoir les caractériser quelle que soit leur forme, leur grandeur caractéristique a été choisie comme étant la moyenne arithmétique des rayons et des distances de deux capteurs successifs sur le cercle. La grandeur caractéristique est en fait la moyenne des « distances les plus courtes ». Cette grandeur caractéristique est liée à l'aliasing. Dans le cas de réseaux non réguliers, elle est plus en lien avec l'aliasing que la distance minimale comme nous le montre le Tableau 3. En effet dans ce tableau on compare les deux ordres de grandeurs pour connaître k_{alias} : $2p/d_{min}$ et $2p/d_{carac}$. On remarque que le second, $2p/d_{carac}$, donne une meilleure approximation de k_{alias} .

Les réseaux triangulaires ont aussi été testés uniquement pour le modèle M2.1. Les réseaux type triangulaire qui ne sont pas parfaits, sont présentés sur la Figure 30. De même, la longueur caractéristique est la moyenne des 9 distances de différentes couleurs représentées sur le réseau triangulaire parfait de la Figure 29 (b). Ce type de géométrie a été étudié uniquement pour le modèle M2.1.

Une expérience sur le site de l'Ebron a aussi été menée sur la géométrie et le nombre de capteurs (paragraphe 14, page 251). La conclusion est qu'un nombre plus élevé de capteur semble améliorer la définition des courbes caractéristiques et que la géométrie triangulaire est plus adaptée à l'analyse FK tandis que la géométrie circulaire est plus adaptée à l'analyse SPAC.

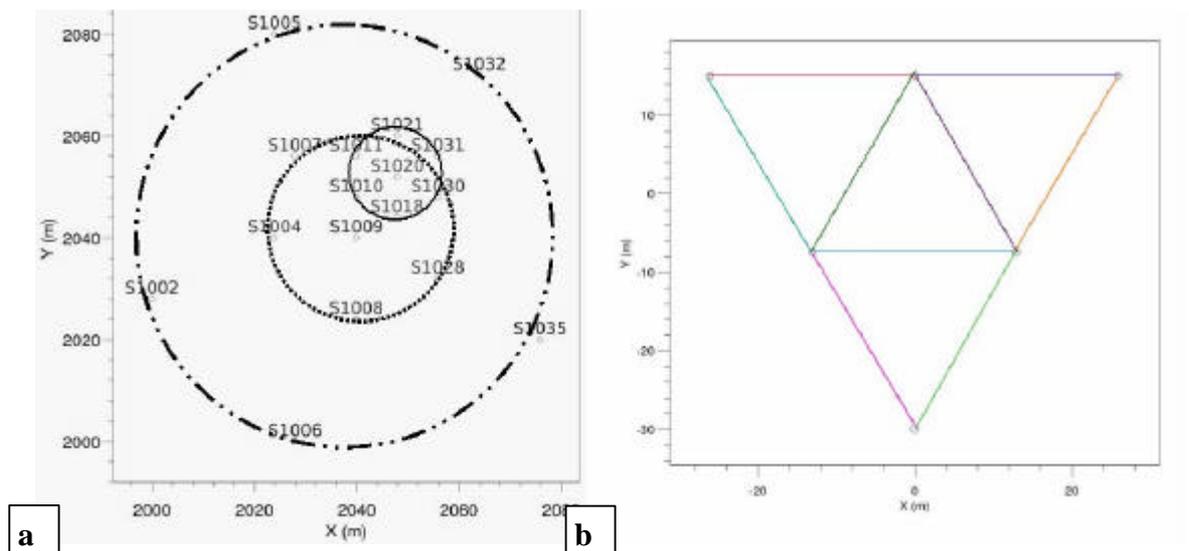


Figure 29 : Les différents types de réseau : (a) Implantation des trois réseaux circulaires de rayon respectif: 8m, 17m et 41m, (b) réseau triangulaire parfait de longueur caractéristique de 26m

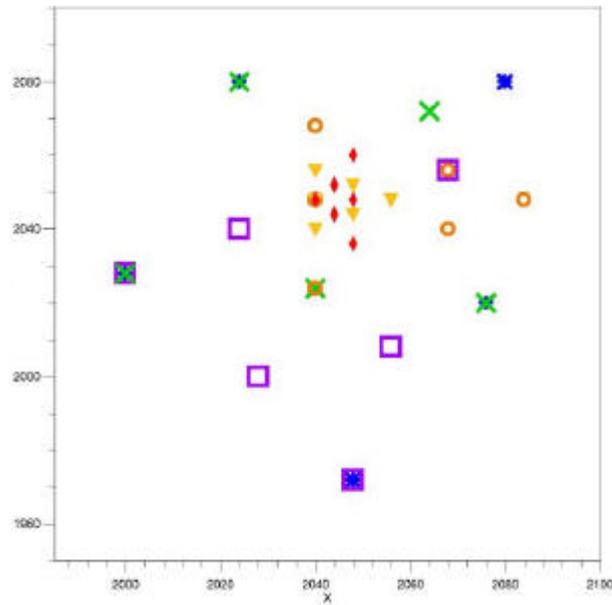


Figure 30: Implantation des réseaux triangulaires non réguliers utilisés dans la simulation du bruit pour le modèle M21(réseaux n°1,2,3,4,6 et 7), de dimension caractéristique respective en m: 8, 8.6, 24,38, 48 et 63

Tableau 3 : Caractéristiques des réseaux circulaires, définition des nombres d'onde k_{alias} et k_{min} et observation des ordres de grandeur avec des règles simples $k_{alias} \sim 2p/d_{min}$ et $k_{min} \sim 2p/d_{carac}$

réseau	Distance minimale	Distance caractéristique	Distance maximale	k_{alias}	$2p/d_{min}$	$2p/d_{carac}$	% entre ordre de grandeur avec d_{min} et k_{alias}	% entre ordre de grandeur avec d_{carac} et k_{alias}	k_{min}	$2p/d_{max}$	% entre ordre de grandeur avec d_{max} et k_{min}
C1	8	8,6	17,9	0,654	0,785	0,731	58,1	11,7	0,274	0,351	28,2
C2	12	18,7	36,9	0,351	0,524	0,336	59,5	4,3	0,142	0,170	19,9
C3	39,6	45,1	80,5	0,145	0,159	0,139	54,5	3,9	0,066	0,078	18,3

3.4. Analyse fk

Analyse détaillée au paragraphe 1.2.2, page 40. Le but de ce chapitre est d'observer la capacité de la méthode à définir la courbe de dispersion selon le type de site étudié et selon le type de réseau utilisé. Pour cela nous disposons de plusieurs simulations de bruit sur les réseaux décrits précédemment.

Dans un premier temps nous calculons la réponse du réseau pour chaque fréquence et chaque fenêtre temporelle. Dans un deuxième temps, les histogrammes de la semblance, dans l'espace vitesse de phase-fréquence, sont représentés. C'est ce qu'on observe sur les figures de ce chapitre. Enfin, un pointage automatique des maximums est effectué sur l'histogramme. Ce pointage décrit, entre les limites d'aliasing et de résolution, la courbe de dispersion.

Les histogrammes sont obtenus avec l'analyse FK pour les trois réseaux de rayon respectif: 8m, 17m et 41m pour les modèles M2.1, M2.3 et M01, et pour les réseaux triangulaires pour le modèle M2.1. La géométrie du réseau a une influence sur la bande de fréquence où est estimée la

courbe de dispersion, voir paragraphe 3.2, page 77. Sur chaque histogramme sont représentés les limites d'aliasing et résolution correspondant au réseau concerné. Ce sont des courbes fines noires, en trait hachuré pour la limite d'aliasing correspondant à k_{alias} , la courbe la plus proche de la précédente (k_{alias}) en pointillés à $k_{alias}/2$; et en trait plein pour la limite de résolution $k_{min}/2$ et la courbe la plus proche de $k_{min}/2$ en pointillés pour k_{min} .

3.4.1. Modèle M2.1

3.4.1.1. Réseaux circulaires

Les trois réseaux circulaires présentés dans la Figure 29 (a) ont été utilisés pour définir la courbe de dispersion à partir du bruit synthétique simulé sur ces réseaux. La Figure 31 représente les histogrammes de semblance (en rouge le nombre de fenêtres temporelles, qui ont leur maximum à cette vitesse, est nul) et les limites d'aliasing et de résolution du réseau utilisé. En pratique, on ne connaît pas le modèle de vitesse donc on ne connaît pas non plus les courbes de dispersion théoriques, c'est pourquoi on ne les représente pas ici. Le lecteur, qui ne connaît pas le logiciel, peut ainsi imaginer la difficulté de chaque étape. En effet à partir de ces histogrammes on va définir la courbe de dispersion. Il y a deux possibilités pour déterminer la vitesse selon la fréquence, soit un choix manuel, en piquant sur la figure, soit une sélection automatique qui définit pour chaque fréquence la moyenne et l'écart type à partir des valeurs de vitesse obtenues sur les différentes fenêtres temporelles. La deuxième solution offre l'avantage de donner un écart type, mais présente l'inconvénient d'être influencée par des artéfacts dus soit aux limites d'aliasing et de résolution, soit aux modes supérieurs. Ces artéfacts sont en partie distinguables visuellement c'est pourquoi le choix manuel des vitesses est parfois préférable.

Un nouvel outil de SESARRAY, dans le module `na_viewer`, permet de « nettoyer » ces artéfacts visibles à l'œil et ainsi de conserver l'estimation des écarts-types. A une fréquence donnée, cet outil permet la visualisation d'une coupe dans l'histogramme. On peut alors couper des bandes de fréquence si on estime qu'elles contiennent par exemple des pics d'aliasing ou des vitesses qui dépassent les valeurs extrêmes attendues. Cet outil donne un aspect tronqué aux histogrammes car ils ont été « nettoyés », et introduit une étape qui peut dépendre de l'utilisateur. On veillera donc à utiliser cet outil avec parcimonie.

Les histogrammes bruts et « épurés » pour les trois réseaux circulaires sont présentés respectivement sur les Figure 31 et Figure 32. Le pointage automatique est alors utilisé à partir des histogrammes de la Figure 32, et matérialisé sur les figures par les points noirs (moyenne statistique) et des barres verticales (écart-type). Les courbes de dispersion pour chaque réseau sont sélectionnées dans une bande de fréquence restreinte par les limites d'aliasing et de résolution avec un jugement subjectif pour choisir où arrêter la courbe entre k_{min} et $k_{min}/2$ et entre k_{alias} et $k_{alias}/2$.

La Figure 32 montre en plus, en bleu foncé, les courbes de dispersion du modèle canonique M2.1 (mode fondamental et les deux modes supérieurs) obtenues par calcul direct. Bien sûr ces courbes n'ont pas été visualisées avant la détermination de la courbe de dispersion pour que le jugement sur la capacité de la méthode à déterminer la courbe de dispersion soit le plus juste possible. Les courbes théoriques sont là pour vérifier l'exactitude des courbes estimées.

Après l'observation des résultats obtenus, notons que:

- L'effet de l'aliasing est en effet visible et suit la courbe correspondante à $k=k_{alias}$ (Figure 31)

- Pour le plus petit réseau: la bande de fréquence exploitable est 5.9 à 12.3 Hz, l'estimation de la vitesse de dispersion (Figure 32, a, courbe noire avec des points) est erronée apparemment à cause de l'influence du 1^{er} mode supérieur. Mais on ne peut avoir donner cette explication que parce que le modèle initial est connu et les courbes de dispersion correspondant à ce modèle ont été déterminées (Figure 32, a, courbes bleu foncé). Dans un cas réel il n'est pas possible de détecter ce biais.
- Pour le réseau de 17m de rayon: la bande de fréquence exploitable est 4.4 à 6.5 Hz, l'estimation de la courbe de dispersion suit de très près la courbe théorique (Figure 32, courbes bleu foncé) et peut même être étendue au-delà de son domaine de validité à plus haute fréquence jusqu'à k_{max} (Figure 32, b).
- Pour le plus grand réseau: la bande de fréquence exploitable est 3.2 à 5 Hz, l'estimation de la courbe de dispersion reste très proche de la courbe théorique (Figure 32, courbes bleues). Là aussi l'estimation des vitesses peut être étendue au-delà du domaine de validité à plus haute fréquence jusqu'à k_{max} (Figure 32, c).
- La courbe de dispersion est bien estimée entre 3.2 et 6.5 Hz.

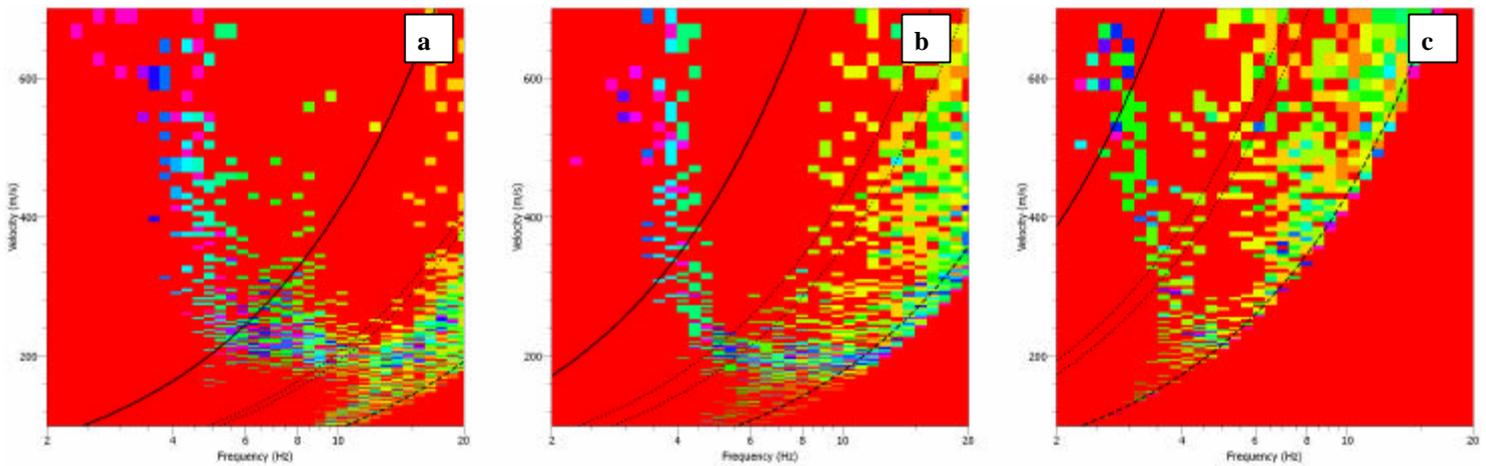


Figure 31: Histogrammes bruts de la semblance (échelle de couleur selon la valeur de la semblance) obtenus avec des réseaux circulaires de rayon: a) 8m, b) 17 m et c) 41 m. Courbes fines noires : limite d'aliasing (en trait hachuré correspondant à k_{alias} , en pointillés à $k_{alias} / 2$) et limite de résolution (en trait plein $k_{min}/2$ et en pointillés k_{min}) selon la géométrie du réseau

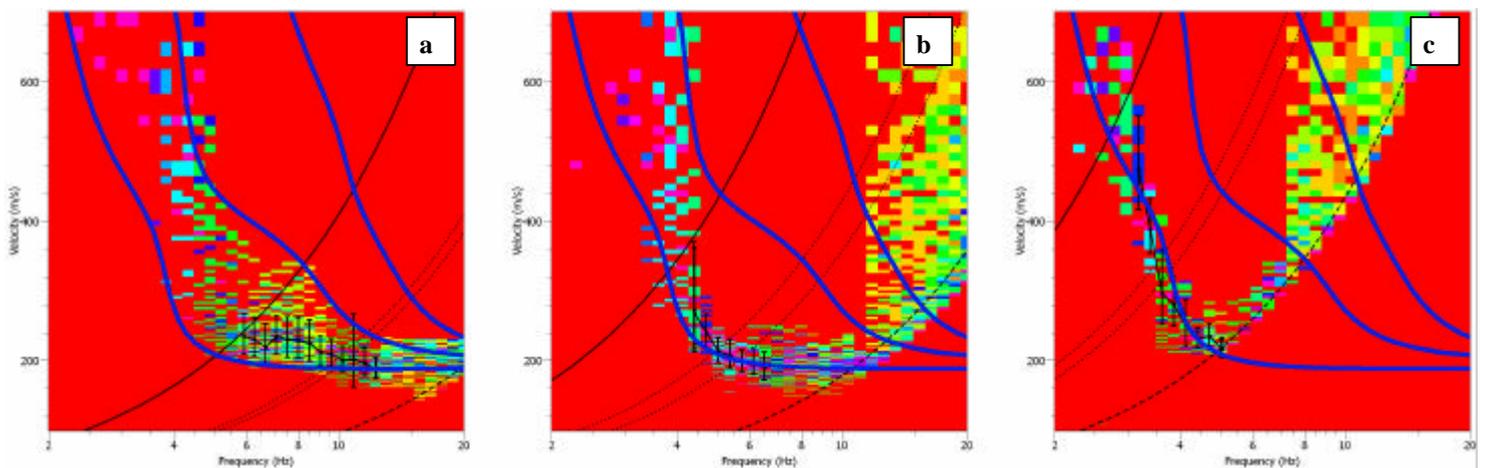


Figure 32: Détermination de la courbe de dispersion du modèle M2.1 avec l'analyse FK. Les trois graphiques sont les histogrammes dont les valeurs sont représentées en couleur ; courbes épaisses bleues : courbes de dispersion théoriques, mode fondamental et les deux 1^{er} modes supérieurs ; (a) : Histogramme correspondant au réseau circulaire de rayon 8 m ; b): de rayon 17 m; c): de rayon 41 m

Conclusion intermédiaire sur la détermination de la courbe de dispersion de M2.1 :

Sur le calcul de la courbe de dispersion nous pouvons retenir qu'il est souvent possible de dépasser la limite d'aliasing $k_{alias}/2$ vers la limite k_{alias} car l'apparition de l'aliasing est repérable. Par contre l'estimation à plus basses fréquences, dépassant la limite de $k_{min}/2$ est toujours supérieure à la vitesse du modèle, et entre $k_{min}/2$ et k_{min} l'estimation est souvent supérieure. Dans ces cas là, il n'est pas possible de détecter à l'œil le manque de résolution qui introduit une erreur sur l'estimation des vitesses. Il faut donc rester prudent sur l'estimation basse fréquence, et la meilleure façon de vérifier ces résultats est d'augmenter le nombre de réseaux avec différents diamètres en respectant la limite de résolution conservative de k_{min} .

Une estimation correcte de la courbe de dispersion est obtenue sur la bande de fréquence 3.2 à 6.5 Hz en mettant bout à bout les courbes de dispersion définies par les deux plus grands réseaux. Cependant l'erreur en hautes fréquences (petit réseau) n'est pas détectable sans connaissance du modèle direct, puisqu'on se place dans un cas d'étude « à l'aveugle » (c'est-à-dire que la détermination de la courbe de dispersion est faite sans superposer les courbes théoriques sur les histogrammes) la courbe de dispersion sera prise en compte de 3.2 à 12 Hz pour l'inversion.

Cette étape d'inversion, dont les paramètres ont été testés au paragraphe 3, est brièvement évoquée ici afin d'observer l'effet de l'erreur sur l'estimation de la courbe de dispersion entre 6.5 et 10 Hz sur le profil de vitesse obtenu par inversion et le résultat de l'inversion de la courbe bien définie mais sur une bande de fréquence plus petite. La question qui se pose est : vaut-il mieux définir la courbe de dispersion sur une large bande de fréquence avec une erreur sur cette courbe, ou réduire la bande de fréquence où la courbe de dispersion est alors définie sans erreur ?

La Figure 33 montre le résultat de l'inversion avec un espace des paramètres à deux couches (voir la Tableau 1) sur la courbe de dispersion définie de 3.2 à 12Hz (graphiques du haut) et de 3.2 à 6.5 Hz (graphiques du bas). Rappelons que l'échelle de valeurs d'erreur n'est pas considérée puisqu'on ne regarde que les limites extrêmes. L'inversion de la courbe de dispersion définie de 3.2 à 12Hz donne, malgré l'erreur sur la courbe de dispersion entre 6 et 10 Hz, une estimation de la vitesse des ondes S en surface qui est correcte : $V_s(0)$ entre 200 m/s et 240 m/s sur l'ensemble des modèles avec une erreur inférieure à 0.8 (valeur choisie pour que les courbes de dispersions des modèles sélectionnés balayent au moins tous les points de la courbe de dispersion définie par le calcul).

Par contre, l'erreur semble se répercuter sur la profondeur de la couche qui est mal modélisée (les modèles de l'inversion montrent une couche légèrement plus profonde que le modèle canonique).

L'inversion de la courbe correspondant seulement aux réseaux circulaires de 17m et 41m (Figure 33, graphiques du bas) donne une estimation de la vitesse des ondes S en surface est correcte ($V_s(0)$ entre 190 m/s et 225 m/s) et la profondeur est un peu mieux estimée puisque dans ce cas le modèle canonique fait parti des modèles sélectionnés.

Si seule la vitesse de la 1^{ère} couche nous aide à estimer l'effet de site alors les résultats obtenus par les deux inversions sont suffisamment précis. L'erreur faite sur la courbe de dispersion à haute fréquence n'a donc pas une répercussion trop néfaste sur les résultats.

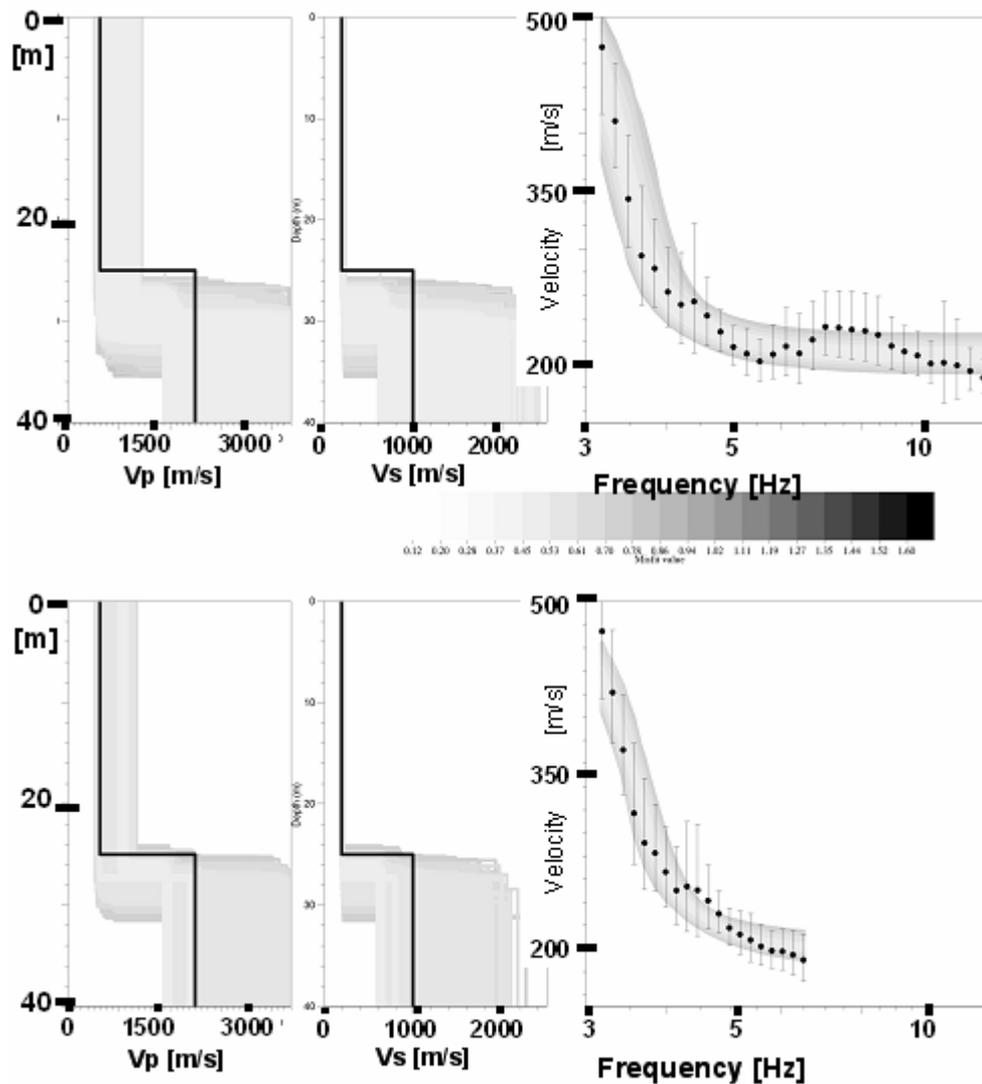


Figure 33: Sur le modèle M2.1 - En haut : inversion de la courbe de dispersion estimée entre 3.2 et 12 Hz, modèles avec une erreur inférieure à 0.8 - en bas: inversion de la courbe de dispersion estimée entre 3.2 et 6.5 Hz, modèles avec une erreur inférieure à 0.6. Graphiques de gauche : profil V_p en gris résultant de l'inversion, en noir : V_p du modèle ; graphiques du milieu: idem avec V_s ; graphiques de droite : courbe de dispersion estimée en noir et correspondant aux modèles de l'inversion en gris

3.4.1.2. Réseaux triangulaires

Le même type d'analyse qu'au paragraphe 3.4.1.1, a été effectué sur des réseaux de type triangulaire afin d'observer la différence dans l'estimation de la courbe de dispersion entre un réseau circulaire et triangulaire. Pour cela, on compare les résultats de l'estimation de la courbe de dispersion avec des réseaux ayant la même valeur de grandeur caractéristique définie au paragraphe 3.3.

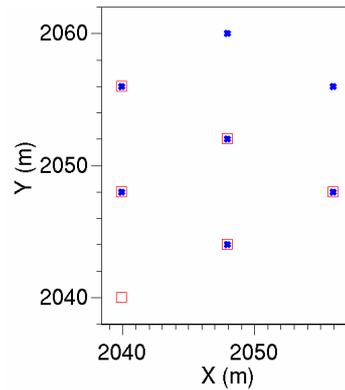


Figure 34: Implantation du réseau circulaire 1 de longueur caractéristique 8.6m en croix bleues et du réseau triangulaire 2 de longueur caractéristique 8.6m en carré rouge

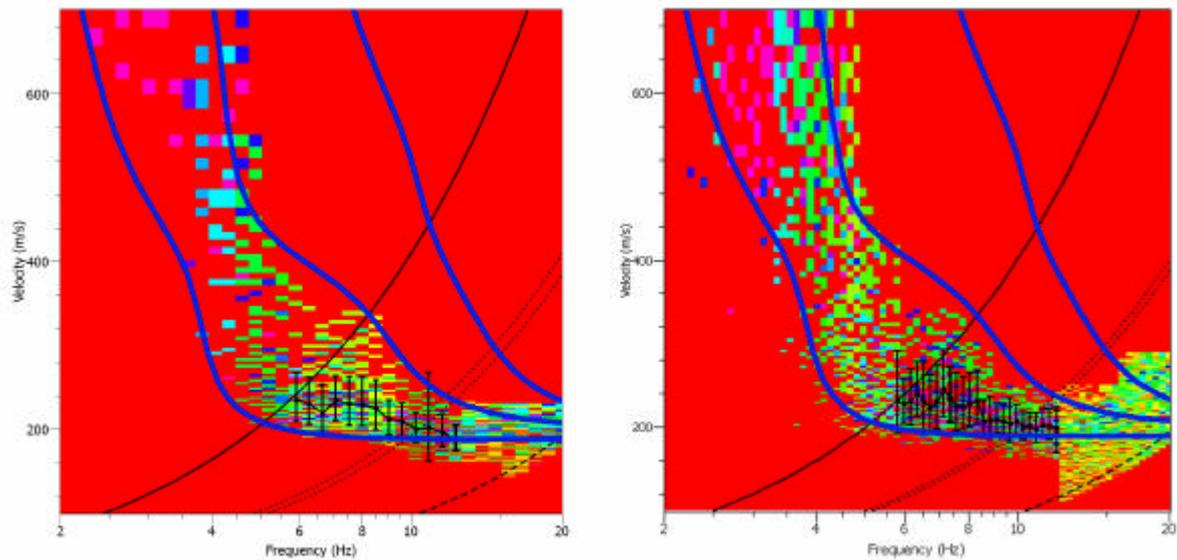


Figure 35: En bleu épais : les courbes de dispersion (mode fondamental et les 2 1^{ers} modes supérieurs) synthétiques du modèle M2.1 ; en noir fin : les courbes de dispersion estimées par la méthode FK. Gauche : histogramme correspondant au réseau circulaire 1 de rayon 8m ; droite : histogramme correspondant au réseau triangulaire 2 de longueur caractéristique de 8.6 m

La bande de fréquence exploitable est définie « à l'aveugle » (c'est-à-dire sans connaître les courbes de dispersion théoriques représentées en bleu) en considérant les limites d'aliasing et de résolution $k_{\min}/2$. La zone de validité des deux réseaux est approximativement équivalente (5.9 à 12.3 Hz pour le réseau circulaire, et 5.8 à 12 Hz pour le réseau triangulaire) et on trouve le même type d'erreur: il y a une surévaluation de la vitesse. Une hypothèse pour expliquer cette surévaluation, serait un mélange entre le mode fondamental et les modes supérieurs qui influenceraient l'estimation de la vitesse.

Nous allons maintenant observer les histogrammes pour des réseaux de plus grande ouverture :

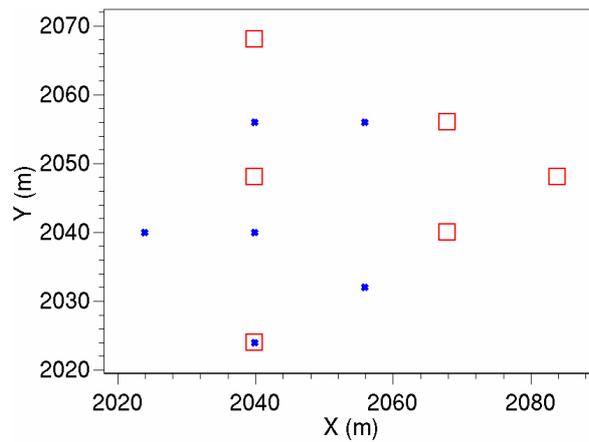


Figure 36: Implantation du réseau circulaire 2 de longueur caractéristique 19m en croix bleues et du réseau triangulaire 3 de longueur caractéristique 24m en carré rouge

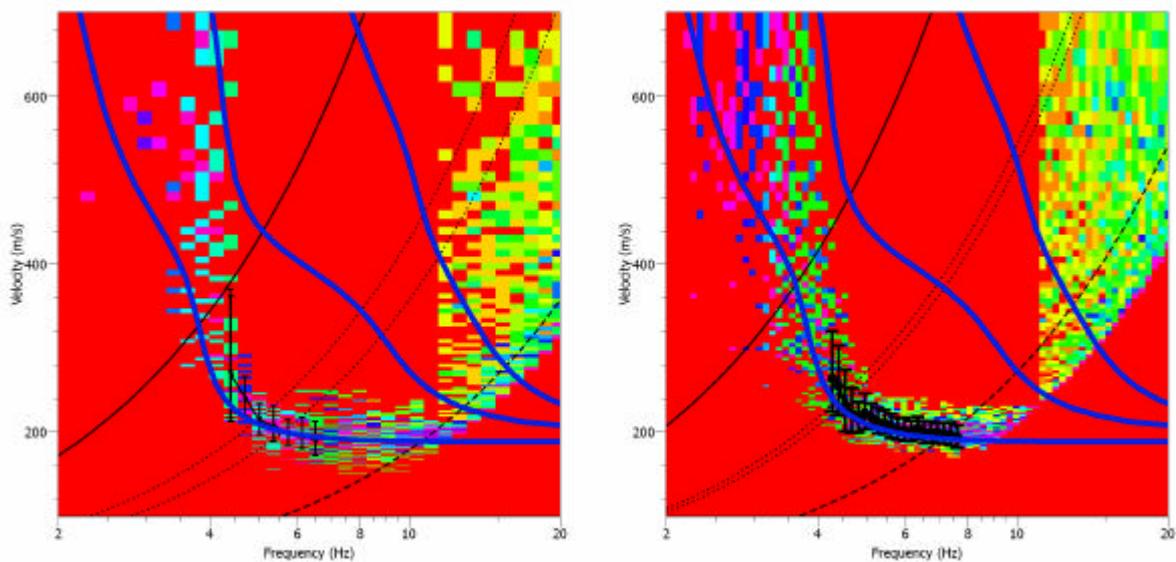


Figure 37: En bleu épais : les courbes de dispersion (mode fondamental et les 2 1^{ers} modes supérieurs) synthétiques du modèle M2.1 ; en noir fin : les courbes de dispersion estimées par la méthode FK. Gauche : histogramme correspondant au réseau circulaire 2 de longueur caractéristique de 19m ; droite : histogramme correspondant au réseau triangulaire 3 de longueur caractéristique de 24 m

La zone de validité des deux réseaux est approximativement équivalente (4.4 à 6.5 Hz pour le réseau circulaire, et 4.2 à 7.6 Hz pour le réseau triangulaire). Les résultats sont très proches, avec un prolongement possible de la courbe de dispersion à haute fréquence jusqu'à k_{alias} , qui fournirait la même bande de fréquence pour les deux réseaux. L'estimation de la courbe de dispersion est correcte et sans différence fondamentale pour les deux types de réseaux triangulaire et circulaire.

Nous allons maintenant observer les histogrammes pour les réseaux avec la plus grande ouverture:

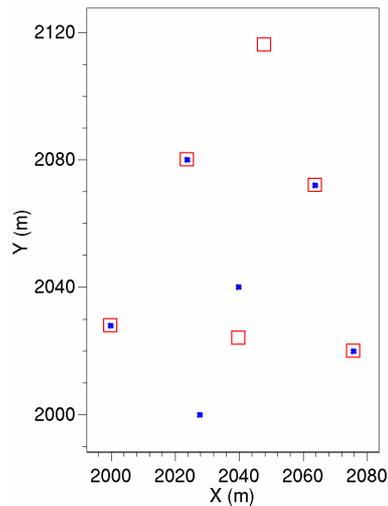


Figure 38: Implantation du réseau circulaire 3 de longueur caractéristique 45m en croix bleues et du réseau triangulaire 6 de longueur caractéristique 48m en carrés rouges

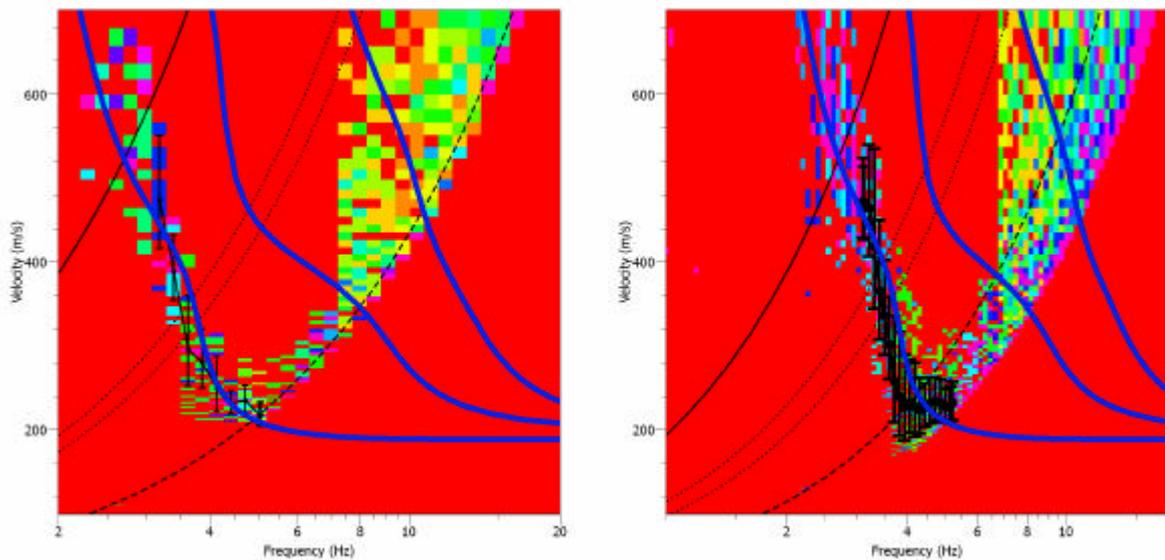


Figure 39: En bleu épais : les courbes de dispersion (mode fondamental et les 2 1^{ers} modes supérieurs) synthétiques du modèle M2.1 ; en noir fin : les courbes de dispersion estimées par la méthode FK. Gauche : histogramme correspondant au réseau circulaire de rayon 45m ; droite : histogramme correspondant au réseau triangulaire de longueur caractéristique de 48 m

La zone de validité des deux réseaux est équivalente (3.18 à 5.1 Hz pour le réseau circulaire, et 3.1 à 5.2 Hz pour le réseau triangulaire). Les mêmes remarques que pour les réseaux précédents, sont valables ici: les résultats des deux types de géométrie sont très proches, et un prolongement de la courbe de dispersion à haute fréquence a été fait jusqu'à k_{alias} . L'estimation est correcte pour les deux types de réseaux.

Conclusion sur la comparaison des géométries de réseau testées sur M2.1 : Il semblerait que les réseaux de type triangulaire et circulaire donnent des résultats équivalents pour la méthode d'analyse FK. Il n'y a donc pas de recommandation spéciale à faire pour le choix de la géométrie des réseaux. Dans la suite des études, seuls les modèles circulaires seront étudiés.

Notons aussi qu'une comparaison des types de géométrie de réseau a été faite sur le site de l'Ebron, au paragraphe 14, page 251.

3.4.2. Modèle M2.3

Un autre modèle synthétique est testé ici pour observer le résultat de l'estimation de la courbe de dispersion avec les trois réseaux circulaires utilisés pour le modèle M2.1. L'analyse FK est donc utilisée pour ce modèle M2.3 qui présente des vitesses plus élevées que le modèle M2.1.

Puisque les vitesses sont plus élevées, la courbe de dispersion (courbe de dispersion théorique : courbes rouges sur la Figure 40) aura aussi des valeurs plus élevées et donc les zones de validité, pour un réseau donné, concerneront des fréquences plus hautes de la courbe de dispersion par rapport au modèle M2.1. En observant la Figure 40:

- Le plus petit réseau, de rayon 8m, ne permet pas de déterminer de vitesse de dispersion particulière dans sa zone de validité car les valeurs de l'histogramme sont trop étalées (Figure 40, a) ;
- Le réseau intermédiaire montre certainement une influence du 1^{er} mode supérieur puisque les valeurs de l'histogramme se situent autour du mode fondamental et du 1^{er} mode de la courbe théorique. La courbe de dispersion est estimée de 11 à 12.7 Hz (Figure 40, b) ;
- Le réseau de rayon 41m donne une estimation de la courbe de dispersion (mode fondamental) entre 5 et 8.3Hz qui est correcte mais légèrement supérieure (Figure 40, c).

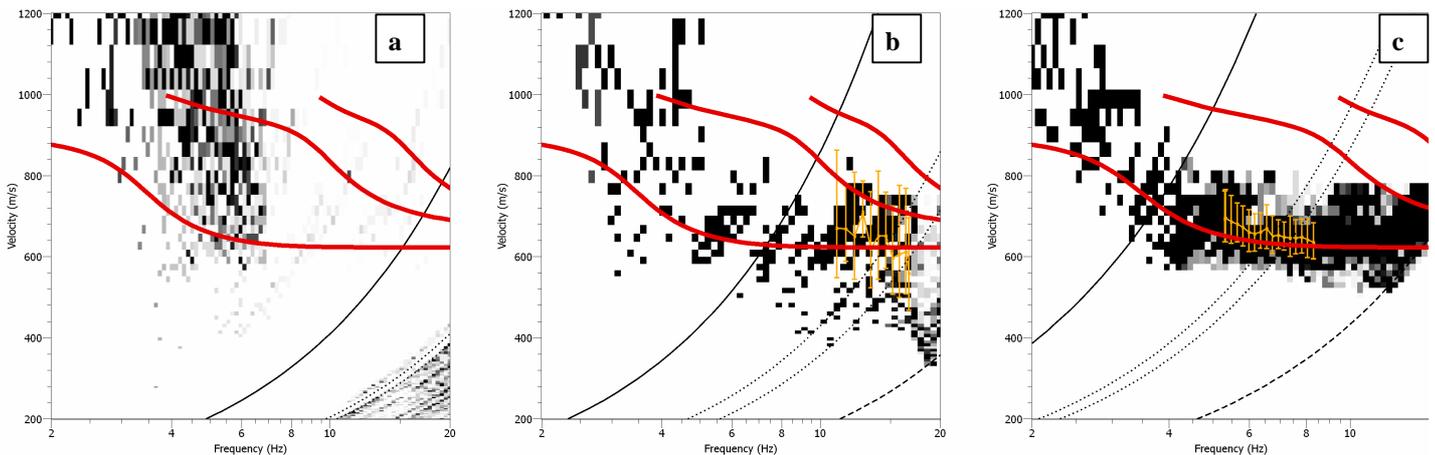


Figure 40: Détermination de la courbe de dispersion du modèle M2.3, en rouge courbe dispersion par calcul direct du mode fondamental et des deux 1ers modes supérieurs, en trait noir fin : limites d'aliasing et de résolution: a) histogramme épuré correspondant au réseau circulaire de rayon 8m ; b) histogramme épuré correspondant au réseau circulaire de rayon 17m, en orange estimation de la courbe de dispersion de 11 à 16.7 Hz ; c) histogramme épuré correspondant au réseau circulaire de rayon 41m, en orange estimation de la courbe de dispersion de 5 à 8.3 Hz

Cette étude nous montre que les réseaux trop petits ne sont pas adaptés aux vitesses élevées. Même si le pas d'échantillonnage peut jouer un rôle, ici avec $dt=0.00875s$, et considérant une distance maximale L_{max} (sur le plus petit réseau) de 20 mètres, on a une vitesse visible maximale de $0.5 \cdot L_{max}/dt$ soit 1142 m/s environ, ce qui est largement supérieur à la vitesse théorique des ondes de Rayleigh. Dans ce cas là on pourrait tester la méthode SASW (annexe § 15.2). De plus, comme le petit réseau n'est pas adapté il faudra chercher une courbe de dispersion avec une faible pente pour les réseaux plus grands, pour caractériser la couche supérieure.

Conclusion : Les plus petites ouvertures des réseaux ne sont pas adaptées à ce site avec des vitesses élevées et un tel pas d'échantillonnage en temps. Cependant, l'inversion de cette courbe de dispersion sur une bande de fréquence réduite a été testée (Figure 175, en annexe) et permet d'estimer la vitesse sur les 10 premiers mètres à 9 % près malgré l'erreur sur la courbe de dispersion.

3.4.3. Modèle M01

Un dernier modèle synthétique est testé ici pour observer le résultat de l'estimation de la courbe de dispersion avec les trois réseaux circulaires utilisés pour le modèle M2.1. C'est un modèle au rocher. On effectue la même étude pour ce modèle d'un site au rocher avec les trois réseaux circulaires.

Pour les deux plus petits réseaux, dans leur zone de validité il y a très peu de cohérence des données (Figure 41). L'estimation faite de la vitesse est beaucoup trop élevée par rapport à sa valeur réelle (erreur de plus de 50%). Ces réseaux de 8m et 17m de rayon ne sont pas adaptés à un site au rocher dont la vitesse des ondes S de 1000 m/s. Cette remarque va dans le même sens que la conclusion sur le modèle M2.3.

Pour le plus grand réseau de 41m de rayon, l'ordre de grandeur de la vitesse dans la zone de validité du réseau est correct (la vitesse des ondes de Rayleigh est environ 900 m/s). Mais lors de l'interprétation, les valeurs de l'histogramme tendent à montrer une courbe dispersive (évolution en fonction de la fréquence) et non pas constante comme elle l'est dans le modèle initial M01.

La courbe de dispersion ainsi estimée fournira, après inversion, des modèles de profils de vitesse non constante avec une couche superficielle qu'on pourrait interpréter comme une zone altérée du rocher. Cependant le modèle représente un rocher sain (voir Figure 27). C'est pourquoi il est indispensable d'avoir une bonne connaissance géologique du site pour éviter des interprétations trop éloignées de la réalité. Sans cela, l'interprétation est délicate, il faut donc être très prudent dans l'utilisation de l'analyse FK pour des sites au rocher.

Conclusion: De même que pour le modèle précédent on préconise des réseaux plus grands et/ou un pas d'échantillonnage temporel plus petit. Ici le pas d'échantillonnage est adapté puisque $dt=0.00875s$, et considérant une distance maximale L_{max} (sur le plus petit réseau) de 20 mètres, on a une vitesse visible maximale de $0.5*L_{max}/dt$ soit 1142 m/s environ, ce qui est supérieur à la vitesse théorique des ondes de Rayleigh.

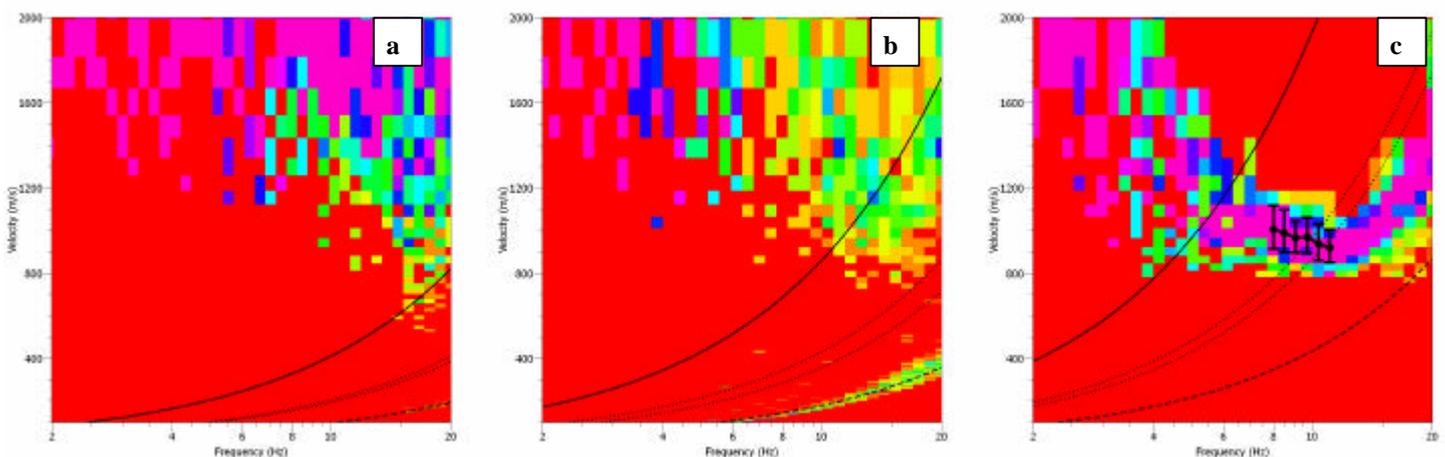


Figure 41: Détermination de la courbe de dispersion du modèle M01, site au rocher ; limites d'aliasing et de résolution en traits noirs ; a) histogramme correspondant au réseau circulaire de rayon 8m ; histogramme correspondant au réseau circulaire de rayon 17m ; histogramme correspondant au réseau circulaire de rayon 41m

La courbe de dispersion n'a pu être définie que sur un bande de fréquence très réduite correspondant au grand réseau, car les autres histogrammes des plus petits réseaux ne sont pas exploitables (voir figure ci-dessus). L'inversion de la courbe de dispersion sur une bande de fréquence très réduite (5.5 à 10.5 Hz) donnera des profils très étalés car il y a très peu de contrainte, voir paragraphe 2.3, « Influence de la bande de fréquence sur l'inversion ». L'inversion modélise difficilement le profil de vitesse de M01 avec une vitesse constante. Cependant l'estimation de Vs sur les 10 premiers mètres se trouve entre 760 et 1050 m/s ce qui approche la vitesse du modèle de 1000 m/s à 25% près.

3.4.4. Conclusion

Le réseau de 8 mètres de rayon (ou longueur caractéristique) semble mal, voire non adapté à la détermination de la courbe de dispersion quelque soit le type de modèle étudié (vitesse des ondes S en surface de 200 à 100 m/s). Afin d'éviter le mélange des modes à haute fréquence on préconisera des réseaux d'au moins 15 mètres de rayon et si besoin (cas où le plat de la courbe de dispersion n'est pas atteint), l'utilisation de la méthode SASW pour préciser la valeur de la courbe de dispersion à hautes fréquences.

La géométrie des réseaux ne semble pas avoir une grande influence sur les ouvertures testées, avec l'analyse FK.

L'interprétation de l'analyse FK au rocher est délicate dans notre exemple. Il faudrait peut-être agrandir l'ouverture. Cependant dans un cas réel il semble peut évident de trouver un site au rocher à une dimension sur une large zone. C'est pourquoi cette méthode n'est pas conseillée sur les sites au rocher.

3.5. Analyse SPAC

L'objectif de ce paragraphe est d'observer les résultats de l'analyse SPAC selon l'ouverture des réseaux utilisés et d'observer la bande de fréquence sur laquelle sont définies les courbes d'autocorrélation.

Comme indiqué plus haut, cette analyse comprend deux étapes principales, tout d'abord le calcul des courbes d'autocorrélation et ensuite leur inversion. L'étape d'inversion ayant déjà été traitée, nous montrons l'inversion des courbes SPAC en annexe (§ 15.3.4, page 276).

Les courbes d'autocorrélation sont estimées par l'analyse SPAC (décrite au paragraphe 1.2.1 du chapitre I), points noirs et barres d'incertitude sur les figures de ce paragraphe. On effectue aussi un calcul direct des courbes d'autocorrélation (avec le logiciel `spac_forward` inclus dans SESARRAY, voir aussi problème direct dans [Wathelet, 2005]) sur chaque modèle, courbes rouges avec points noirs sur les figures de ce paragraphe.

Le module `spac_viewer` nous permet de visualiser ces courbes et l'histogramme dans le plan fréquence-vitesse de phase de ces courbes. En effet les courbes d'autocorrélation sont liées à la vitesse de phase (Équation 9). Toutes les solutions $c(?)$ de cette équation sont calculées indépendamment pour chaque anneau et additionnées. On construit ainsi un histogramme représentant la densité des solutions de la vitesse $c(?)$. Un exemple est représenté sur la Figure 42. Pour plus de détail on se référera à [Wathelet, 2005] pages 102-103.

Ces courbes sont coupées (points verts avec barres d'incertitude sur les figures de ce paragraphe) selon une sélection visuelle ôtant les effets d'aliasing et de résolution, visibles dans le plan fréquence-vitesse de phase comme on le voit sur la Figure 42. On impose quatre courbes limitant les effets d'aliasing et de résolution et les artefacts éventuels (valeur isolée). Ce choix est

visuel et dépendant de l'utilisateur. C'est cette étape qui définira la bande de fréquence exploitable. Cette sélection est faite « à l'aveugle », c'est-à-dire sans superposer les courbes théoriques sur les courbes calculées. Ces courbes sont superposées dans un deuxième temps pour vérifier la qualité des résultats.

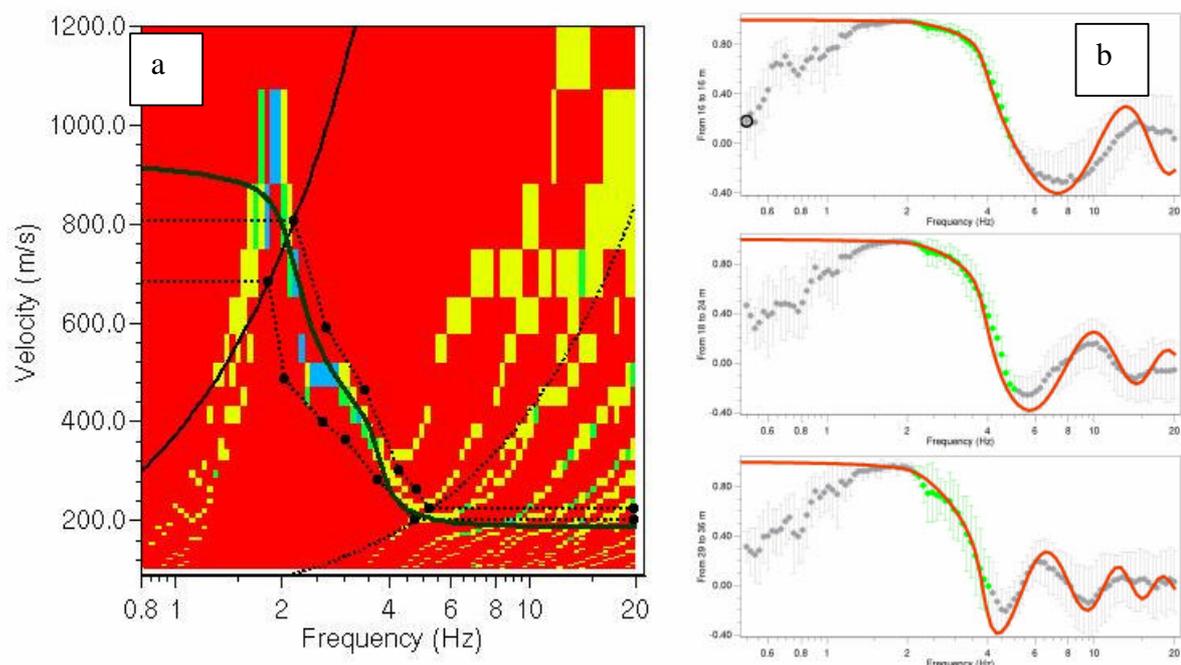


Figure 42: SPAC pour le modèle M2.1, cercle2 de rayon 17 mètres : a) Sélection dans le plan fréquence vitesse de phase de la zone de validité des courbes d'autocorrélation par sélection visuelle éliminant les effets d'aliasing et de résolution, délimités par les courbes en pointillés, et courbe de dispersion théorique du modèle en vert. b) en gris (avec les barres d'erreur) : rapports des courbes d'autocorrélation calculées avec SPAC pour trois tailles d'anneau, en vert : parties sélectionnées, en rouge : courbes théoriques

3.5.1. Modèle M2.1

Les courbes d'autocorrélation estimées et coupées (points verts) correspondent très bien aux courbes d'autocorrélation théoriques du calcul direct (courbes rouges), comme on peut le voir sur les Figure 43, Figure 44 et Figure 45 même pour le plus petit réseau, Figure 43. Les petits réseaux ne sont donc pas à proscrire avec l'analyse SPAC puisqu'ils donnent une information.

Les bandes de fréquence où sont déterminées les courbes SPAC sont nettement plus basse fréquence que celles utilisables avec l'analyse FK. En effet :

- Pour le réseau de 8m (Figure 43, points verts) la bande de fréquence est 2 à 6 Hz alors qu'avec FK elle est entre 5.9 et 12.3 Hz.
- Pour le réseau de 17m (Figure 44, points verts) la bande de fréquence est 1.6 à 5.5 Hz alors qu'avec FK elle va de 4.4 et 6.5 Hz.
- Pour le réseau de 41m (Figure 45, points verts) la bande de fréquence va de 1.55 à 4 Hz alors qu'avec FK elle va de 3.2 à 5.1 Hz.

Cet aspect est très intéressant pour avoir des informations à plus grande profondeur. La bande de fréquence décrite par les courbes d'autocorrélation va donc de 1.55 à 6 Hz ce qui est complémentaire de la bande de fréquence définie par la courbe de dispersion estimée par l'analyse FK, de 3.2 à 12.3 Hz. Sur la Figure 46, l'histogramme correspondant à ces courbes de dispersion nous montre l'apport en basse fréquence.

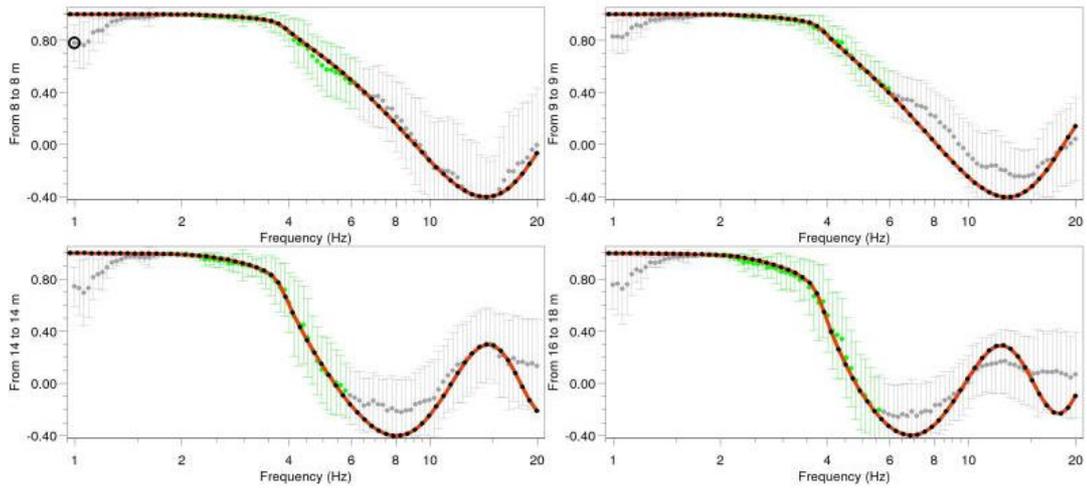


Figure 43: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 8m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle'' et comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M2.1

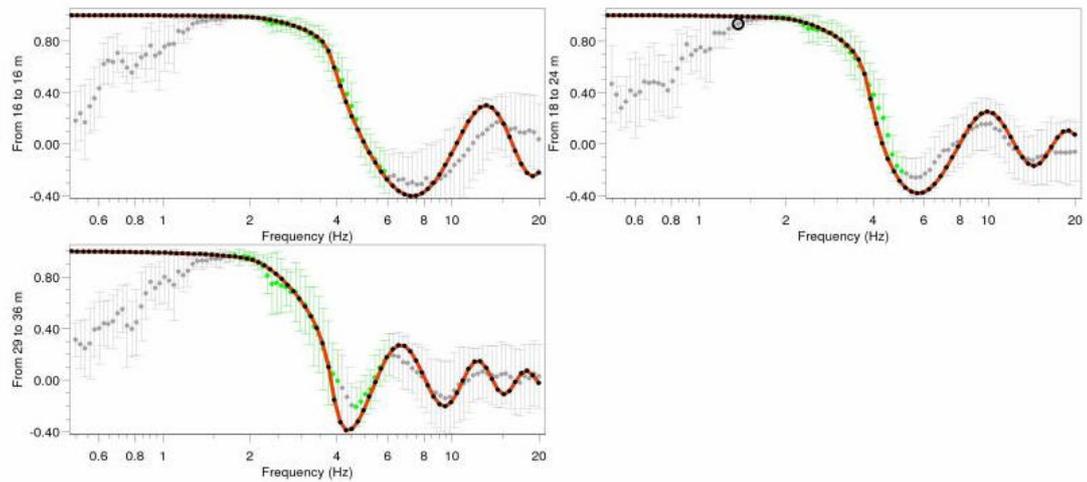


Figure 44: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 17m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle'' et comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M2.1

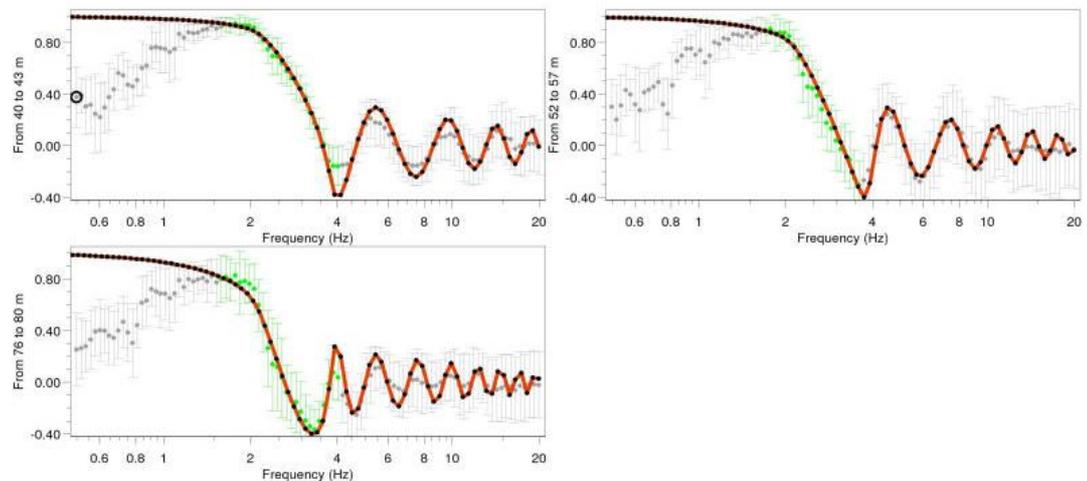


Figure 45: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 41m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle'' et comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M2.1

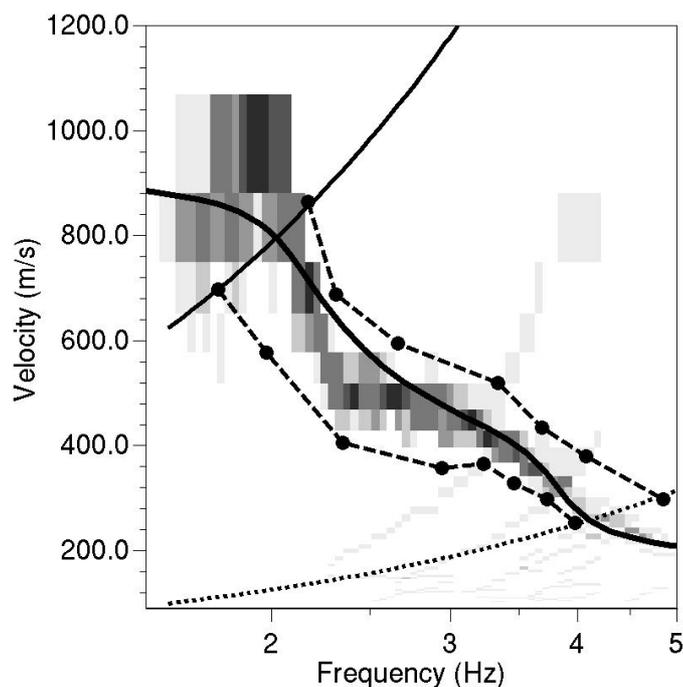


Figure 46: Histogramme correspondant à toutes les courbes de l'analyse SPAC avec les trois réseaux circulaires de 8, 17 et 41 mètres de rayons, modèle M2.1. En traits hachurés : limites choisies de validité, en trait plein fin et trait pointillé : limites d'alias

3.5.2. Modèle M23

La même analyse est réalisée pour le modèle M2.3 avec les trois réseaux circulaires, les courbes d'autocorrélation sont estimées et on effectue aussi un calcul direct des courbes d'autocorrélation du modèle M2.3. D'après les Figure 47, Figure 48 et Figure 49, les courbes estimées par SPAC et coupées s'ajustent bien aux courbes théoriques.

La bande de fréquence décrite par ces courbes va de 1.5 à 8.5 Hz ce qui est nettement plus basse fréquence que la bande de fréquence sur laquelle est estimée la courbe de dispersion avec l'analyse FK, de 5 à 12 Hz. Les deux analyses se complètent. Sur la Figure 50, l'histogramme correspondant aux courbes de l'analyse SPAC confirme cette observation, avec une fréquence minimale autour de 2Hz.

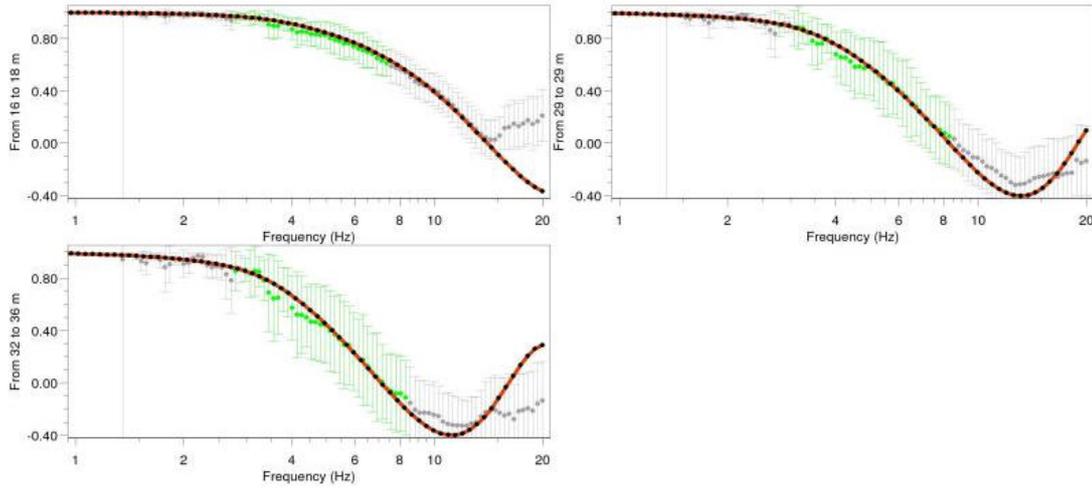


Figure 47: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 8m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle'', en comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M2.3

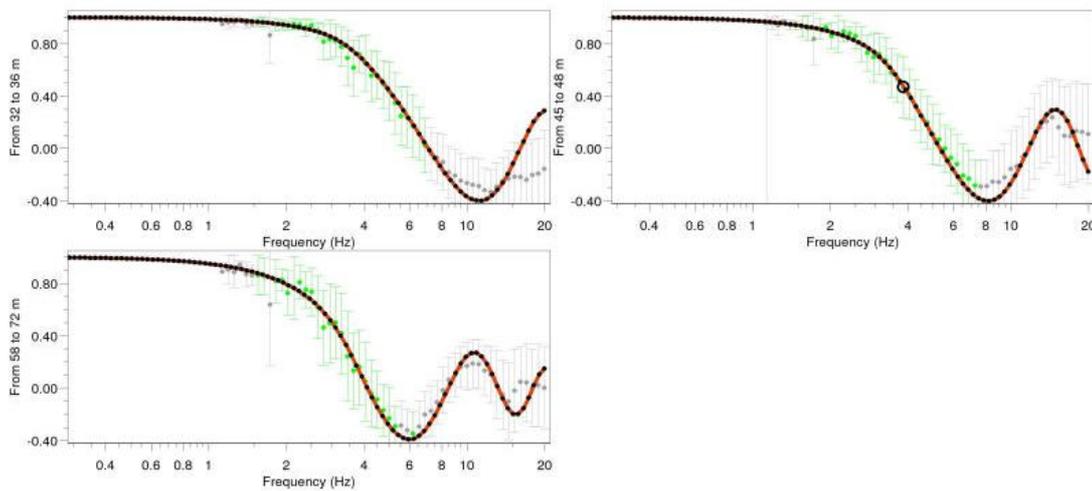


Figure 48: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 17m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle'' en comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M2.3

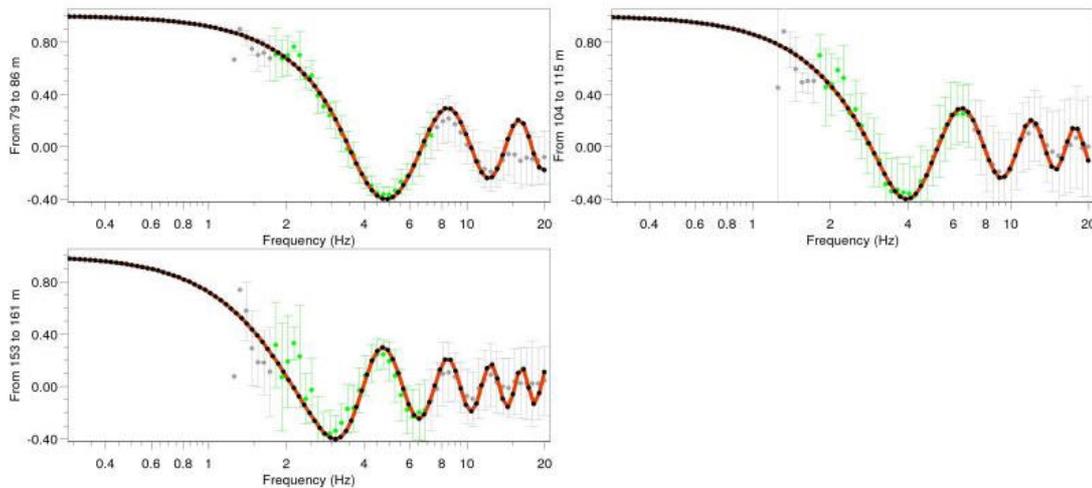


Figure 49: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 41m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle'' en comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M2.3

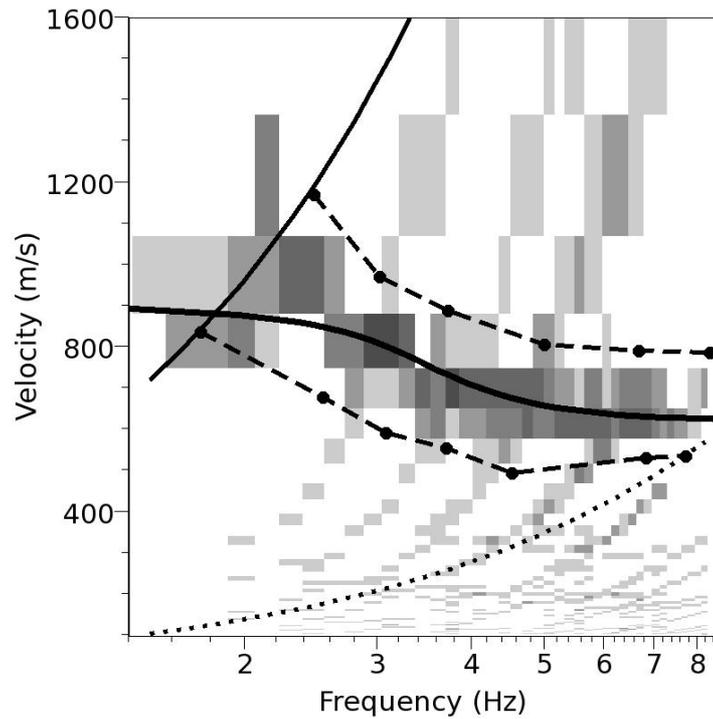


Figure 50: Histogramme correspondant à toutes les courbes de l'analyse SPAC avec les trois réseaux circulaires de 8, 17 et 41 mètres de rayons, modèle M2.3. En traits hachurés : limites choisies de validité, en trait plein fin et trait pointillé : limites d'aliasing et de résolution, en trait épais : courbe de dispersion théorique

3.5.3. Modèle M01

La même analyse est réalisée pour le modèle M01 avec les trois réseaux circulaires, les courbes d'autocorrélation sont estimées. On effectue aussi un calcul direct des courbes d'autocorrélation théoriques du modèle M01. D'après les Figure 51, Figure 52 et Figure 53, les courbes d'autocorrélation sélectionnées s'ajustent bien aux courbes théoriques.

La bande de fréquence décrite par ces courbes va de 1.8 à 14 Hz alors que l'analyse FK définit la courbe de dispersion de 5.5Hz à 10.5Hz. L'analyse SPAC semble mieux adaptée au site avec des vitesses élevées. Sur la Figure 54, l'histogramme correspondant au réseau de plus grande ouverture confirme cette observation. Les deux méthodes SPAC et FK se complètent.

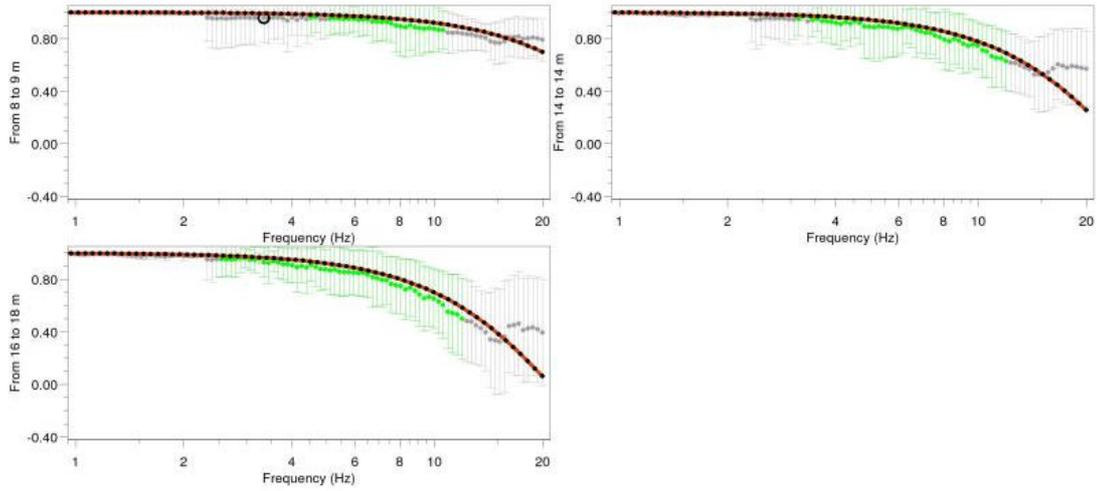


Figure 51: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 8m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle'' en comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M01

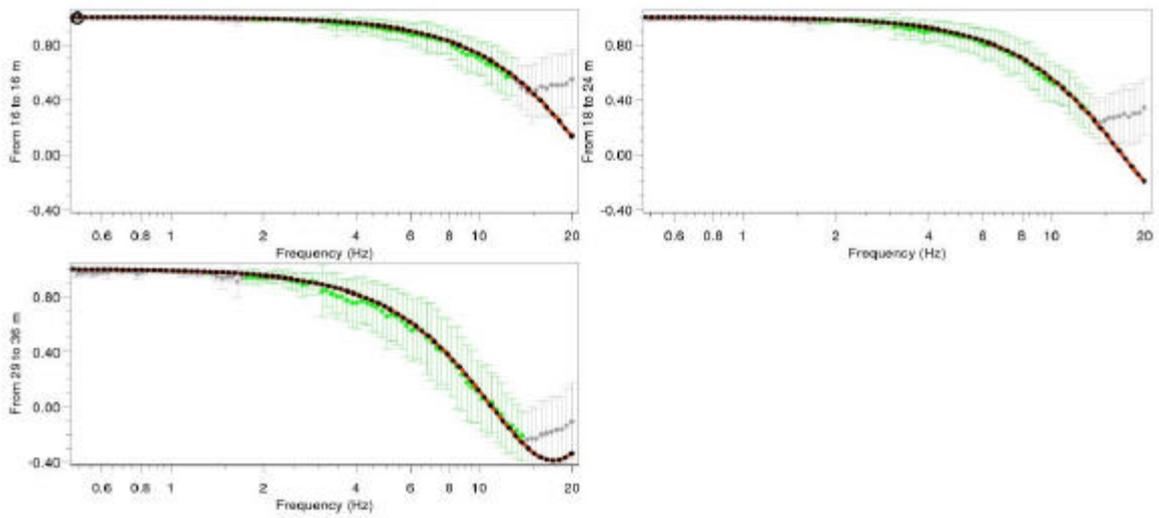


Figure 52: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 17m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle'' en comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M01

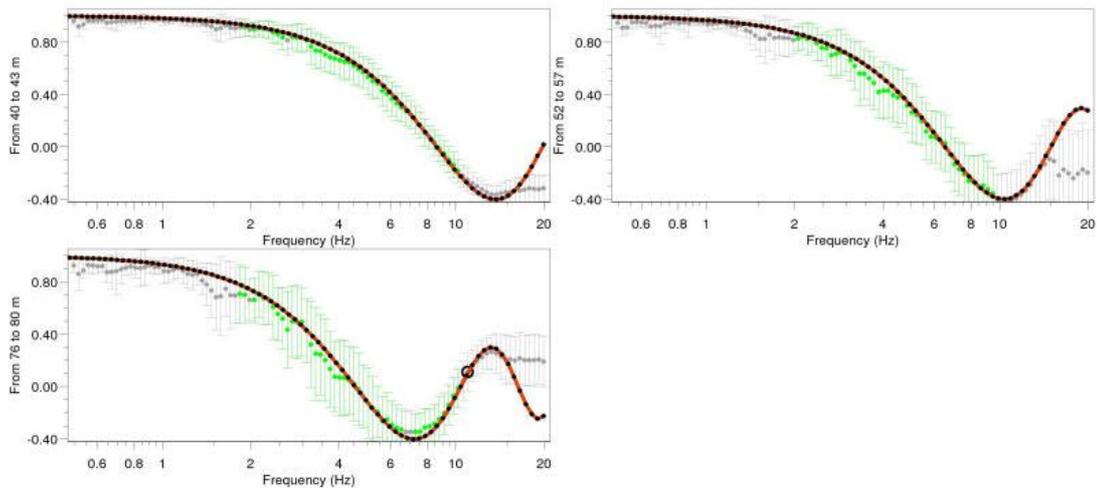


Figure 53: Courbes SPAC calculées pour le réseau de rayon 41m, en vert les zones sélectionnées ``à l'aveugle'' en comparaison avec les courbes théoriques en rouge, modèle M01

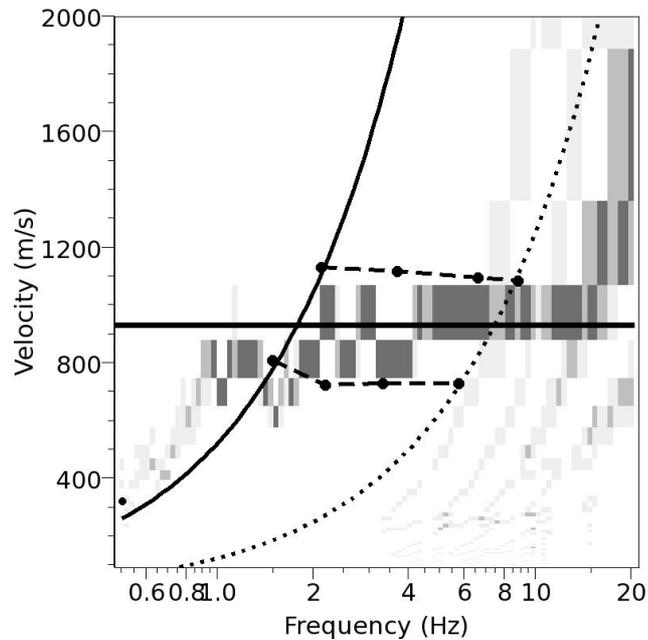


Figure 54: Histogramme correspondant aux courbes de l'analyse SPAC du réseau circulaire de 41 mètres de rayons, modèle M01. En traits hachurés : limites choisies de validité, en trait plein fin et trait pointillé : limites d'aliasing et de résolution, en trait épais : courbe de dispersion théorique

3.5.4. Conclusion

La méthode d'analyse SPAC permet d'avoir des informations à des fréquences plus basses que l'analyse FK. C'est un point important lorsque l'on souhaite avoir des informations à plus grande profondeur. De plus l'analyse SPAC fournit des courbes d'autocorrélation pour les sites au rocher contrairement à l'analyse FK qui ne donne aucune estimation de la courbe de dispersion.

Les petits réseaux sont exploitables avec l'analyse SPAC. En effet, en analysant les simulations sur les petits réseaux avec la méthode SPAC il est possible de trouver des courbes d'autocorrélation en cohérence avec les courbes théoriques, ce qui n'est pas le cas avec l'analyse FK qui estime mal la courbe de dispersion avec les plus petits réseaux, certainement à cause d'une influence des modes supérieurs.

Cependant il reste à tester l'inversion pour savoir si les courbes d'autocorrélation permettent d'obtenir des profils des ondes S et P proches du modèle. Ceci est présenté en annexe (§ 15.3.4, page 276).

Les principales conclusions sont les suivantes :

- L'inversion des courbes d'autocorrélation donne un bon ordre de grandeur de la vitesse des ondes S dans la première couche. Par contre l'épaisseur de la couche est souvent mal définie et la vitesse en dessous de cette couche étalée.
- L'inversion des courbes SPAC, pour le modèle au rocher testé, donne des résultats faux quel que soit l'espace des paramètres initial.
- Les petits réseaux donnent des estimations des courbes d'autocorrélation acceptables alors qu'ils ne donnent pas d'information sur la courbe de dispersion. L'analyse SPAC est donc utile pour ces petits réseaux.

3.6. Conclusion: Comparaison des analyses FK et SPAC

Ces deux analyses ont été testées sur du bruit de fond synthétique sur quelques-uns des modèles. Leur complémentarité est argumentée dans ce paragraphe.

3.6.1. Exemple du site M2.1

La Figure 55 compare, pour l'exemple du modèle M2.1, les résultats des inversions de la courbe de dispersion FK (en haut) et des courbes SPAC (en bas).

- L'analyse FK donne les estimations suivantes: $200 \text{ m/s} < V_s(0) < 240 \text{ m/s}$, soit une erreur maximale de 20%; $25.5 \text{ m} < h < 35.5 \text{ m}$ soit 42 % d'erreur maximale ; $505 \text{ m/s} < V_p(0) < 1200 \text{ m/s}$ soit plus de 100% d'erreur maximale
- L'analyse SPAC donne les estimations suivantes: $140 \text{ m/s} < V_s(0) < 235 \text{ m/s}$ erreur maximale de 30%, $17 \text{ m} < h < 30 \text{ m}$ soit 32% d'erreur maximale; $425 \text{ m/s} < V_p(0) < 1100 \text{ m/s}$ soit plus de 100% d'erreur maximale

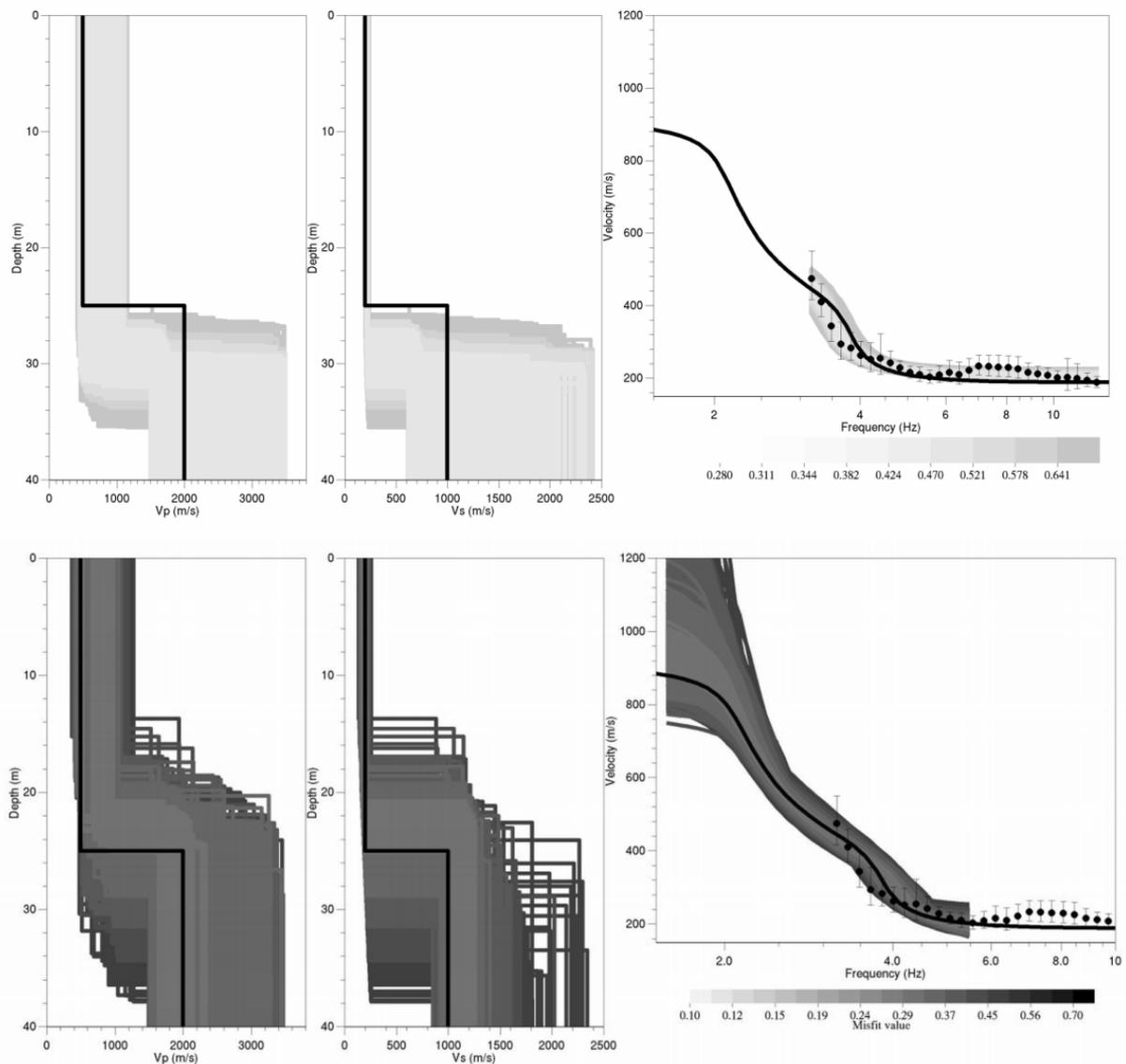


Figure 55: En haut : inversion de la courbe de dispersion obtenue par FK, modèle M2.1, erreur inférieure à 0.8, espace des paramètres à 2 couches. En bas : inversion des courbes SPAC, modèle M2.1, espace des paramètres à 2 couches. Erreur 0.5

Pour ce modèle, l'estimation de Vs en surface est acceptable quelle que soit la méthode utilisée. L'épaisseur est mieux définie avec la méthode SPAC pour l'étude de ce modèle, cette conclusion serait à confirmer par l'étude d'autres modèles. D'une façon générale, la méthode SPAC permet de récupérer des informations à un peu plus basse fréquence.

3.6.2. Remarques générales

Taille des réseaux :

L'analyse FK n'est pas adaptée pour de petits réseaux, dans nos exemples le rayon minimal où les résultats sont acceptables, se situe autour de 15m. Par contre cette analyse donne une bonne estimation de la courbe de dispersion pour des réseaux compris entre 15 et 45m de rayon.

Pour caractériser un site avec des vitesses élevées avec l'analyse FK, comme dans l'exemple du modèle M2.3, il faut de grandes ouvertures de réseau. Le risque est alors dans les cas réels de ne pouvoir valider l'hypothèse d'un site à une dimension sur une surface de plus en plus large.

L'analyse SPAC reste efficace pour de plus petits réseaux que l'analyse FK. Donc dans le cas de sites avec des vitesses élevées elle fournit plus d'information sans nécessiter une ouverture de réseau démesurée. La limite de résolution de SPAC semble donc être plus large. Cependant la limite existe puisque l'exemple du site rocheux M01 montre que l'on bute quand même sur ce problème de limite.

Pour des petits réseaux et/ou vitesses rapides en surface, il y a une condition sur le pas d'échantillonnage temporel des enregistrements de bruit. Pour une ouverture donnée le pas d'échantillonnage doit être diminué quand la vitesse du site augmente. D'après $C_{\max} = 0.5L / dt$, avec L la distance inter-capteur maximale, dt le pas d'échantillonnage en temps et C_{\max} la vitesse maximale visible. Avec les simulations, le pas $dt = 0.00875s$, nous permet d'observer des vitesses de $0.5 * L_{\max} / dt = 1142$ m/s d'environ pour un réseau de rayon 15mètres (L_{\max} au moins de 20 mètres même si le réseau est irrégulier)

Limites en fréquence :

L'analyse SPAC n'a pas les mêmes limites permet de descendre à plus basse fréquence, ce qui améliore la qualité des résultats en profondeur.

Ces deux méthodes sont complémentaires car elles balayent une bande de fréquence différente. Il est donc conseillé d'utiliser systématiquement les deux méthodes en parallèle pour affiner au mieux les résultats.

Lorsqu'il y a une bonne cohérence entre les résultats de ces deux analyses (comparaison de la courbe de dispersion de FK et de l'histogramme à partir des courbes SPAC), on gagne ainsi une plus grande confiance dans les résultats obtenus. Par contre, lorsque les résultats sont fort différents, il est jugé préférable de ne valider aucun des profils obtenus avant d'avoir réexaminé soigneusement les enregistrements, éventuellement en refaire d'autres, et retraité l'ensemble, si possible par d'autres opérateurs. Il est conseillé d'utiliser les deux méthodes pour affiner au mieux les résultats.

Résultats des inversions :

L'inversion, quelle que soit la méthode utilisée, malgré les erreurs possibles, donnent une bonne estimation de la vitesse des ondes S dans la 1^{ère} couche à faible profondeur (10-20 m) et un ordre de grandeur de la profondeur. Par contre la vitesse des ondes P reste très mal déterminée

(ce qui n'est pas grave puisque les phénomènes d'amplification importants dans la pratique sont principalement reliés aux valeurs de Vs).

Type de site :

Rappelons aussi que l'analyse sur un site au rocher semble difficile, ce qui nous pousse à nous demander si l'analyse a été réalisée judicieusement ou/et si la méthode est adaptée pour des sites au rocher? Cette remarque peut aussi être expliquée par le pas d'échantillonnage en temps.

Retenons que cette étude n'est pas exhaustive puisqu'elle s'intéresse à un nombre réduit de modèles et n'entre dans le détail que pour le modèle M2.1 d'une couche de sédiments sur un substratum rocheux.

Ces observations nous ont aidés à réaliser des études sur le terrain d'une part, et à mettre en place un protocole pour minimiser les erreurs d'interprétation et l'influence du choix de l'utilisateur. On a pris en compte en particulier les erreurs d'interprétation liées aux modes supérieurs pour les petits réseaux et l'importance de respecter les limites d'aliasing et de résolution en dehors desquelles les courbes caractéristiques sont mal estimées.

Cependant avant la mise en place de ce protocole des études sur le terrain furent réalisées. Elles sont évoquées au paragraphe qui suit.

4. Analyses sur des sites réels

Plusieurs études sur le terrain ont été menées dont principalement :

- Des mesures et analyses de bruit de fond en réseau dans un site en glissement dans les argiles à Saint Guillaume dans le Trièves, Isère, France [Meric et al., 2007] qui montre une application dans le cadre des glissements de terrain.
- L'analyse de données de bruit de fond en réseau autour de quelques stations-test du Réseau Accélérométrique Permanent français (RAP) qui a été réalisé avant la mise en place du protocole d'étude.
- Des mesures ponctuelles de bruit de fond à Ponta Delgada, Açores, Portugal, en collaboration avec le Portugal pour faire un zonage de la ville avec uniquement la méthode ponctuelle H/V.

A partir de là un protocole a été mis en place (voir paragraphe 5.1, page 111) et d'autres études ont eu lieu et seront décrites dans le paragraphe 5.2, page 120 .

Le matériel de mesure utilisé pour ces études est présenté au paragraphe 5.2.1 page 121, dans l'étude du Sud-Isère.

Les trois 1^{ères} études sont présentées ou résumées dans ce paragraphe 4. Elles nous ont permis de définir les capacités des méthodes utilisant le bruit de fond et de repérer certaines erreurs à ne pas reproduire.

4.1. Mesures de bruit de fond dans les argiles du Trièves à Saint Guillaume et dans l'Ubaye à Super Sauze

Les mesures de bruit de fond peuvent être utiles dans la caractérisation des glissements de terrain. Pour l'étude qui suit on pourra aussi se référer à [Malet, 2003] et [Cravoisier, 2004]. Une application des mesures de bruit de fond sur un glissement de terrain dans les argiles est décrite dans l'article [Meric et al., 2007] « *Seismic noise based methods for soft-rock landslide characterization* ». Les principales conclusions sont résumées ici :

Les méthodes de bruit de fond sont ici utilisées pour identifier la géométrie du glissement de terrain en combinant la fréquence de résonance obtenue avec la méthode ponctuelle H/V et la vitesse des ondes obtenues avec la méthode en réseau. En effet, d'une part les réseaux ont fourni des profils de vitesse en accord avec les mesures géotechniques et l'analyse des ondes de surface avec une source active. Et d'autre part, la méthode ponctuelle H/V met bien en évidence la zone de contact entre les matériaux stables et les matériaux en glissement par un pic à la fréquence correspondant à cette surface de glissement. Cette fréquence et la vitesse moyenne dans les argiles, nous donnent la profondeur de la surface de glissement. Sa répartition spatiale est aussi déterminée par un large déploiement des mesures ponctuelles. Cette investigation est donc une méthode qui est potentiellement très intéressante pour la cartographie 3D des zones de glissement.

Deux glissements ont été étudiés : à Saint Guillaume dans le Trièves et à Super Sauze en Ubaye. Les comparaisons entre les investigations géophysiques et les sondages géotechniques montrent que les méthodes géophysiques passives peuvent être appliquées pour la caractérisation des glissements de terrain.

4.2. Analyse de données de bruit de fond en réseau autour de 14 stations-test du Réseau Accélérométrique Permanent (RAP)

Ce paragraphe concerne une étude réalisée pour quelques stations du Réseau Accélérométrique Permanent (RAP). Les mesures ont été réalisées en septembre 2004, avant la mise en place du protocole décrit au paragraphe 5.1. Elle met en avant la nécessité d'améliorer la démarche d'étude. Un article [Cadet, 2006a] résumant cette étude, a été écrit pour le « Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion » à Grenoble en septembre 2006, en collaboration avec Philippe Gueguen, Anne-Marie Duval et Etienne Bertrand. Cet article s'intitulant "Geotechnical classification of the french accelerometric network (RAP) stations" est présenté dans ce paragraphe. Le paragraphe 4.2.3 est un rappel. Ces répétitions permettront aux anglophones d'avoir un résumé en anglais des paragraphes 1.2 3.1. Un rapport plus détaillé a été effectué, il est disponible à la demande.

4.2.1. Abstract

Improved knowledge of the shallow subsurface structure beneath the French Accelerometric Network (RAP: <http://www-rap.obs.ujf-grenoble.fr>) stations is critically needed to improve empirical attenuation of the seismic motion and earthquake parameters characterization. Variations of geotechnical site conditions, such as the shear wave velocity in the top 30 meters can produce drastic differences in the amplitudes and frequency content of seismic recordings. In order to better describe the effects of the site conditions on seismic records, a reliable geophysical or geotechnical characterization is required for each of the instrumented site. Usual methods (e.g., drilling, CPT or SPT) presently appear too expensive to be considered for a systematic investigation campaign considering the 110 RAP sites. This paper present an alternative tool based on the ambient vibration, partly relied on the results from the SESAME European project. In order to better constrain the site condition, an experimental procedure was applied to the sedimentary accelerometric stations located on the Grenoble basin. We take the benefit from the good knowledge we already have on the soil structure beneath the site and compare geotechnical data and seismological data (H/V spectral ratio and receiver functions).

4.2.2. Introduction

The main objective of the French permanent accelerometric network RAP is to provide a database as complete as possible in order to be used for seismic risk studies, including knowledge of the source effects and seismic movement, propagation and attenuation phenomena, and analyse of site effects. Thus, it is fundamental to have a physical description of the soil below each station. One of the main issues is the number of stations, a classical investigation such as drilling, CPT or SPT will be expensive and time consuming. Because it is a low cost and of quite fast implementation, we apply a method using ambient noise recording that allows a first characterisation. Noise is the ambient vibration from natural and anthropic origin.

Noise records can be analysed on one sensor with H/V method (Nakamura 1989, Sesame deliverable D23.12 2004, Bonnefoy-Claudet 2004) and with several sensors for array method. Array measurements consist of recording at the same time in different places the ambient vibration. Different techniques can be applied. Correlation technique called SPAC, spatial autocorrelation, (Aki 1957, Bettig 2001, sesame project deliverables D24.13) estimates the autocorrelation curves. Frequency-wave number technique (Capon 1969, Tokimatsu 1997,

sesame project deliverables D19.06, D21.07) estimates the dispersion curve of the surface waves. These curves contain information on physical soil parameters such as the shear waves (S-waves) velocity and the compressional waves (P-waves) velocity profiles. With an inversion method, the dispersion curve (or autocorrelation curves) is inverted to obtain a family of models of shear-waves profiles that are of main importance to determine seismic site effects. The software SESARRAY, developed in the frame of the European project SESAME, has been used to analyse the data.

Three stations around Grenoble are presented here; OGMU is installed on a rock site, whereas OGSR and OGDH are located on the sediment basin. The results of the array analyse are compared with available data from seismic recordings.

4.2.3. Brief presentation of the method

4.2.3.1. *FK and SPAC techniques and their limitations*

Both techniques suppose that the waves are plane and the media has a one-dimensional structure. Discrepancy from these main hypotheses will bring miss-interpretation. FK technique (Lacoss 1969, Capon 1999, Tokimatsu 1997, Scherbaum, sesame project), working in the frequency-wave number domain, estimates the dispersion curve looking at the beam power. At a given frequency, for each time window, it identifies the azimuth and velocity of the wave field. The dispersion curve is built frequency by frequency. SPAC technique (Aki 1957, Bettig et al. 2001, sesame project) is based on the correlation between two sensors, separated by distance r and oriented by an angle f . A correlation coefficient is determined for different distances, characterising different depths. We can notice that SPAC and FK techniques are supplemented because they have different hypothesis: one the wave field, SPAC technique supposes a homogenous isotropic wave field. According to the SESAME report D19.06, SPAC technique is more reliable to detect the presence of higher modes. SPAC technique generally gives information for lower frequencies that complete the dispersion curve obtained with FK technique. This allows to build the dispersion curve as follow: first using the CVFK technique, which is the classical FK analyse, the dispersion curve is evaluated between the aliasing and resolution limits giving by the theoretical array response. Then the SPAC curves are estimated and inverted (see next paragraph for some information about the inversion step). Models of soil are obtained and dispersion curves are calculated from these models until the lower frequency of the SPAC curves. A final dispersion curve is defined using the FK estimation and the dispersion curves corresponding to the models obtained by the SPAC inversion. Finally we have a dispersion curve estimated on a larger frequency band than we should have with the FK method alone. Moreover the two methods are crosschecked in order to give a higher confident value to the results and to warn us in the case of no plane waves and/or higher modes disturbances.

As array consist of measuring the wave field with several sensors, there is a spatial sampling that induces aliasing effect and resolution limit. Over these limits the evaluation of the dispersion curve will be misinterpreted. For each kind of array we can determine, using the `build_array` tool included in SESARRAY software, a minimal wave number k_{\min} that corresponds to the maximal resolution, and a maximal wave number k_{\max} that corresponds to the aliasing limit. k_{\min} is the half height of the central peak of the theoretical array response. The aliasing is the first second peak with a value higher than 0.5, the aliasing limit corresponds to half k_{aliasing} . These limits in the velocity versus frequency graph, give a limited frequency band. It is one of the main points of the analyse, because the influence of the frequency band is not negligible: larger is the frequency band better are the results with more constrain and less spread velocity profiles.

4.2.3.2. Second step: Inversion

As the problem is not linear the inversion uses a neighbourhood algorithm (Wathelet, 2005). The main steps are: choose an initial parameters space, compute the dispersion curve of a random model, compare this curve with the estimated one, calculate the error value, disturb the initial model and so on until an acceptable error value is reached. More the number of parameters is high, more there are possible acceptable models. An advice is to start the inversion with simple model, as a layer overlying a bedrock, and make it more complex if the providing models are not satisfying.

4.2.4. Grenoble basin investigation

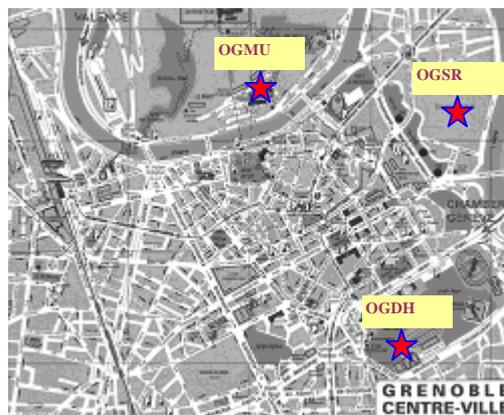


Figure 56: localization of the noise array recordings realised in Grenoble

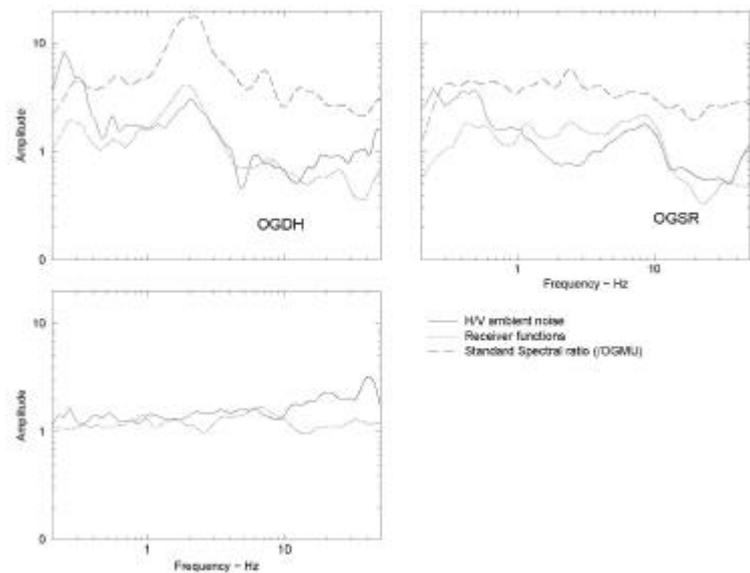


Figure 57 : Site over reference (OGMU) ratio of OGDH and OGSR stations compared with H/V from ambient noise and receiver functions

4.2.4.1. Array measurements and analyse

4.2.4.1.1. OGMU

This station is installed on a rock site, thus, the shear wave velocities should be high and H/V ratio should not show any peak. Two circular arrays of 6 sensors of 12m radius and 16m radius have been done. There is not any noticeable sharp peak (Figure 57), which confirms the rock characteristic of the site.

The SPAC curves are estimated between 6 Hz and 20Hz. Inversion of these curves provides models with a shear waves velocity around 1500 m/s with a high error value (Figure 59). FK and SPAC results are not so close (look at the dispersion curves in the Figure 59, in black the FK estimation of the dispersion curve, in colour the dispersion curves corresponding to the results of SPAC) that decreases the confident value of the result.

The dispersion curve is estimated from 20 to 30 Hz but it is really hard to estimate a velocity value, the error bars of the dispersion curve are really high. The frequency band is quite narrow, so the obtained results can present high error value. Moreover the radiuses of the arrays seem to be too small to characterize high velocity. The dispersion curve will be completed with the SPAC results for lower frequencies until 8.5 Hz. This mixed dispersion curve, from 8.5 to 30 Hz, is take into account for the last inversion process. This inversion provides a shear waves velocity in the rock around 1800m/s (Figure 60). A shallow part seems to present lower physical characteristics that can correspond to the weathered zone. This observation is just a hypothesis. Larger arrays should be done in order to confirm the velocity value on the rock. The response from a SH solicitation has been calculated for the resulting models. A part of them (Figure 60) give a SH response that shows an amplification higher than 2 for a frequency higher than 20 Hz. This is due to a really thin layer with quite high impedance contrast that is maybe not realistic, otherwise it concerns such high frequency that are not of main interest.

To conclude, in this rock site the confidence of the results, particularly the value of the shear wave, is quite low.

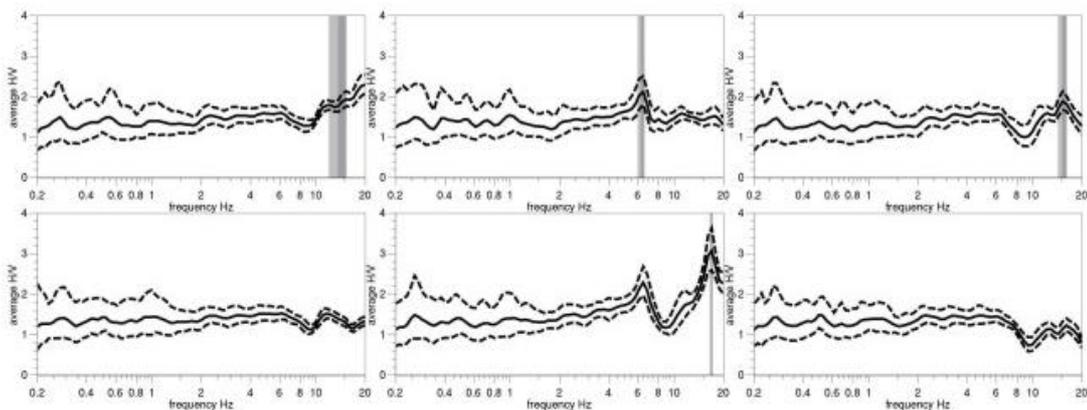


Figure 58: H/V ratio, sensors s1 to s3 from the left to the right of the top line, and from s4 to s6 from the left to the right of the bottom line

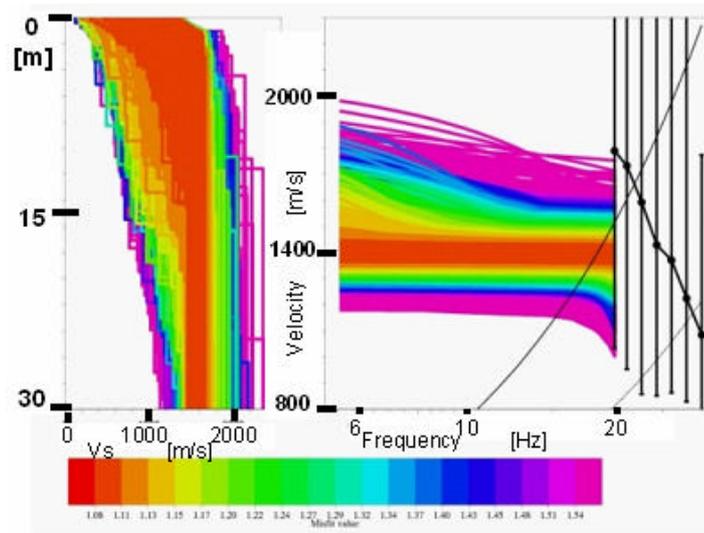


Figure 59: Result of the inversion of the SPAC curves, left graph: Vs profiles with the colour corresponding to the error value, right graph: in colour dispersion curves corresponding to the obtained models, in black estimated dispersion curve from FK analyse with the array limits (find the SPAC curves in annex), site OGMU

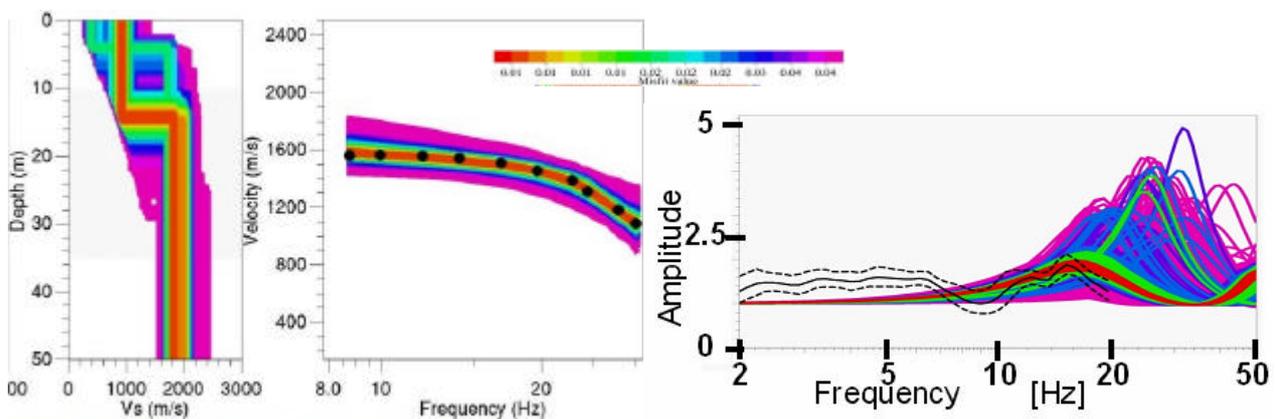


Figure 60: Inversion of the dispersion curve (in black) obtained by combining FK and SPAC results, left graph: resulting models in colour according to the misfit value, central graph: estimated curve in black, models in colour, right graph: SH response of the models in colour compared with H/V ratio in dark. Site OGMU

Nevertheless, the H/V ratio using seismic recordings shows a flat curve, without any amplification between 0.2 and 10 Hz that confirms the rock condition of the site (Figure 58). Even if the confidence of the shear-wave velocity extracted from ambient vibration is quite low, the high value of Vs confirm the rock condition of this station.

4.2.4.1.2. OGDH

The station is located near the skating rink in the centre of Grenoble. Three circular arrays of 6 sensors of 15m, 30m and 45m radius were realized. H/V ratios show a clear, sharp and constant peak appears around 0.25 Hz (Figure 61). This result is consistent with the known H/V values around Grenoble (Banton 2004). Getting only one clear peak is a propitious situation for the array analyse because it is favourable with a 1D site.

SPAC curves are estimated between 0.5 and 5.5 Hz. The obtain Vs profiles from SPAC inversion show a gradient around 180 m/s to 450m/s into the first 50 m that fits quite well with borehole data (Figure 62). The dispersion curve is estimated from 2.2 to 8.3 Hz with the FK technique. The dispersion curve is prolonged until 0.5 Hz thanks to the dispersion curves of the models obtained with SPAC. (Figure 62 and Figure 63) The resulting profiles exhibit a jump

around 20 meters, it has to be checked with other methods (such as geophysics investigation) because it can give a considerable amplification around 3 Hz (to be checked with seismic data for the value of the amplification, Figure 63).

We can notice that the SH response of the models do not correspond to the H/V ratio. One of the reasons is that the arrays aperture does not allow to characterize the layer corresponding to 0.25 Hz resonance frequency, another reason can be the location of the arrays that are 100 to 200 meters far from the OGDH station. However if you look at the result obtained with recording at the station site (Figure 63) we can notice that the H/V ratio from noise as well as the site over reference ratio does not fit quite well with the SH response of the models. This could be due to a non-negligible variation of the shallow sediments layers.

These observations allow to say that it is of main importance to characterize the station with noise measurements as close as possible to the station

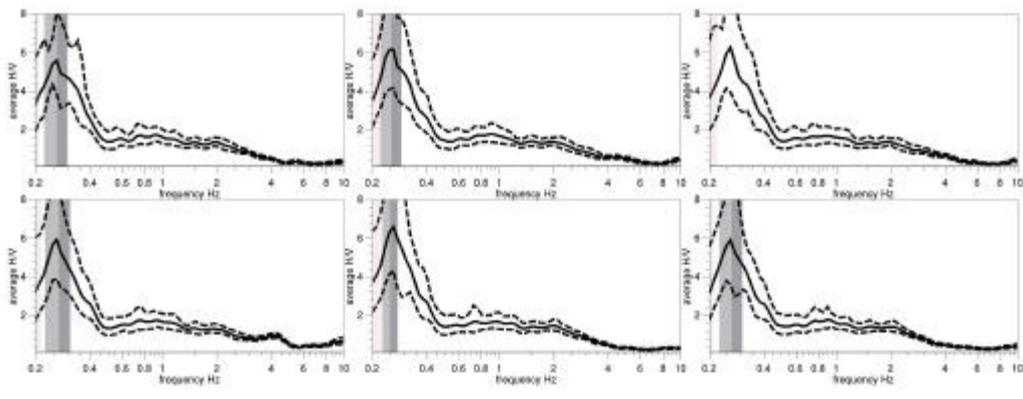


Figure 61 : H/V ratios of the array of 15m radius, sensors s1 to s3 from the top to the bottom on the left hand and s4 to s6 from the top to the bottom on the right hand

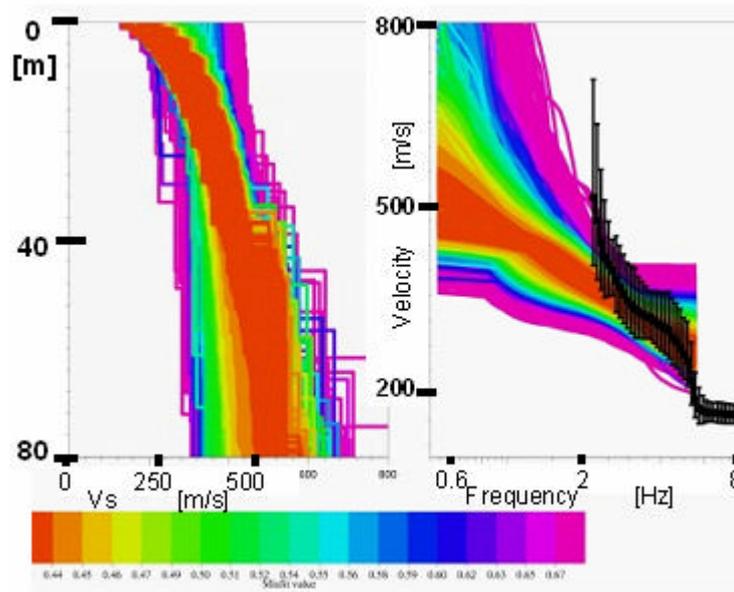


Figure 62: Result of the inversion of the SPAC curves; left graph: Vs profiles with the colour corresponding to the error value, right graph: in colour dispersion curves corresponding to the obtained models, in black estimated dispersion curve from FK analyse with the array limits (find the SPAC curves in annex), site OGDH

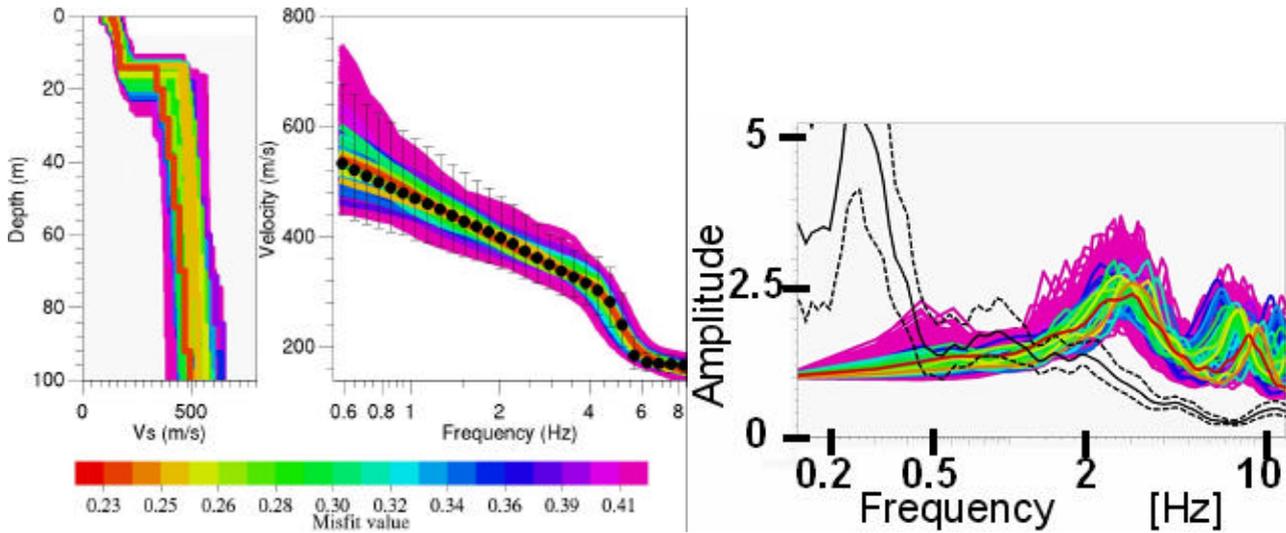


Figure 63: Inversion of the dispersion curve (in black) obtained by combining FK and SPAC results, left graph: resulting models in colour according to the misfit value, central graph: estimated curve in black, models in colour, right graph: SH response of the models in colour compared with H/V ratio in dark. Site OGDH

4.2.4.1.3. OGSR

This station, near the Saint Roch cemetery, is located on the sedimentary basin. Two arrays of 30m and 65m radius were realized. The H/V ratios show three peaks at 0.24 Hz, 0.45 Hz and 9 Hz that are found into both arrays (Figure 64). The peak around 0.45 Hz is a bit higher than the other. The peak around 9 Hz should correspond to a shallow layer that cannot be seen with the array geometries (radius of 30 for the minimum).

SPAC curves are estimated between 0.7 and 4.7 Hz. Inversion of SPAC curves provides models with a velocity gradient from 200 m/s to 450m/s in the first 50 meters (Figure 65).

With the FK analyse we obtain a dispersion curve between 1.6 and 7.4 Hz. The dispersion curve from FK and the dispersion curves corresponding to the models of SPAC inversion fit quite well, as well as the resulting profiles, that gives a higher confident value to the analyse. So we can prolong the dispersion curve until 0.8 Hz. The inversion of this dispersion curve from 0.8 to 7.4 Hz provides the final models that we will keep (Figure 65 and Figure 66). A mean value of shear wave velocity is 400 m/s. The SH response of the resulting models is consistent with the H/V ratios. This coherency gives a great confident value to our results. For this site, the noise array method seems to be well adapted. However, the accuracy of the array does not allow to determine the layer corresponding to 10 Hz that we also find with the H/V from seismic recordings (Figure 66). The array analyse gives a mean value of shear wave that can not provide the detection of really thin layer. This limit depends on the array geometry and the determination of the dispersion curve. Indeed for the high frequencies the higher modes have a high influence on the estimation of the velocity. To improve the accuracy for high frequency a combination with SASW can be considered.

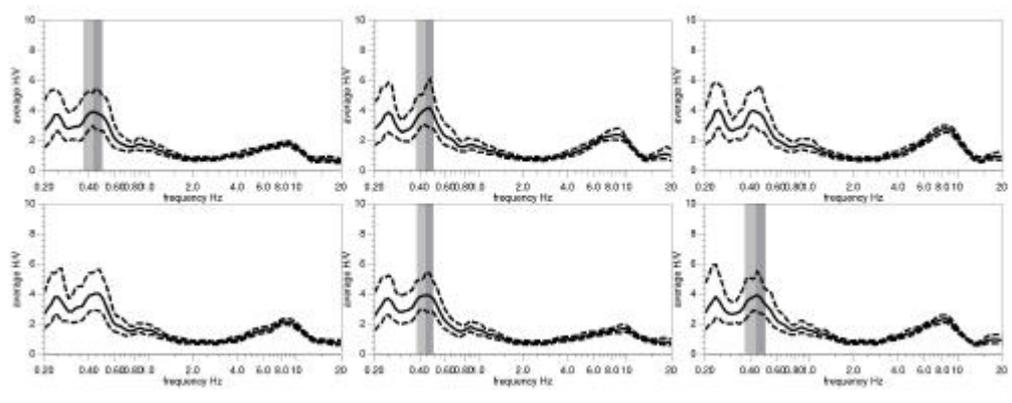


Figure 64: H/V ratio, sensors s1 to s3 from the left to the right of the top line, and from s4 to s6 from the left to the right of the bottom line

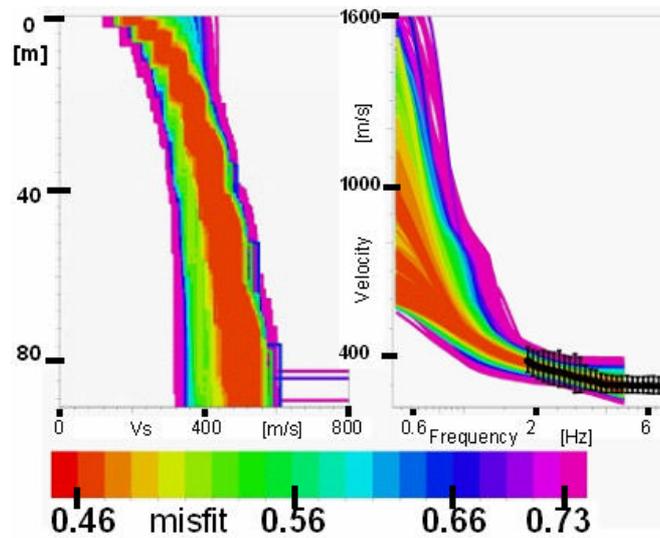


Figure 65 : Result of the inversion of the SPAC curves; left graph: Vs profiles with the colour corresponding to the error value, right graph: in colour dispersion curves corresponding to the obtained models, in black estimated dispersion curve from FK analyse with the array limits (find the SPAC curves in annex); misfit less than 1. Site OGSR

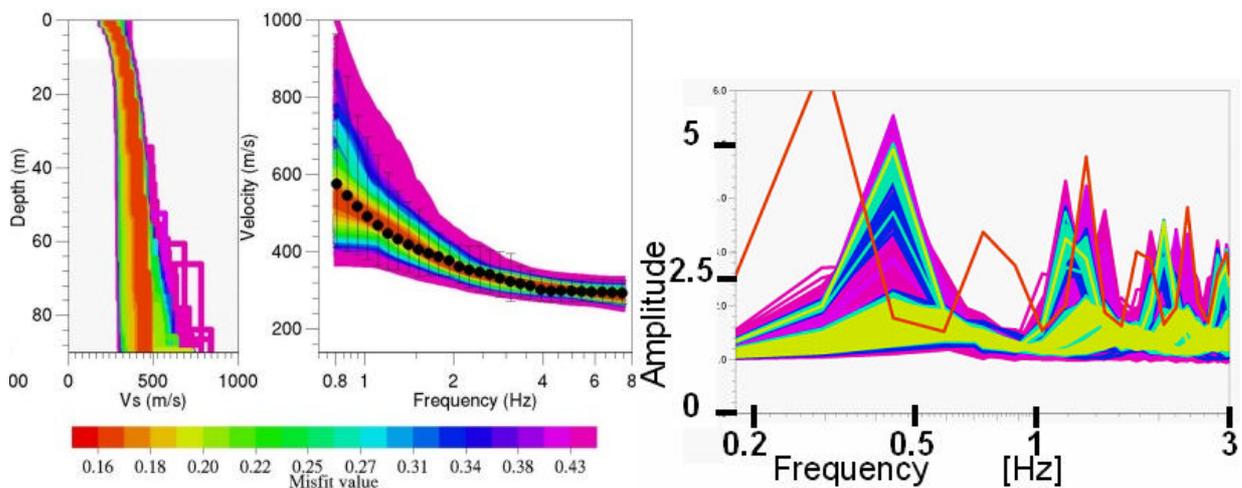


Figure 66 : Inversion of the dispersion curve (in black) obtained by combining FK and SPAC results, left graph: resulting models in colour according to the misfit value, central graph: estimated curve in black, models in colour, right graph: SH response of the models in colour compared with SH response of the model in red. Misfit less than 0.7 Site OGSR

4.2.4.2. *Conclusions*

For the sites located in the sedimentary basin the array analysis provides Vs profiles that are consistent with the Vs from borehole measurements. We did not reach the bedrock with the radiuses used. The results are not reliable below 110 meters depth.

The rock site is not well adapted for the use of array analysis because the configuration does not allow to realize a larger array.

To conclude these associated methods can provide some useful information, as Vs at the subsurface and the resonance frequency, if the site fulfils the main hypothesis (flat area, 1D structure and enough available space in order to characterize the suitable depth). This approach can be useful for a first classification of stations belonging to a seismic network.

The whole measurements were done without following any protocol and sometimes the arrays were not well adapted to the site (too small array aperture or not enough arrays). In order to avoid such mistakes a protocol has been done and it is presented in an article (Cadet, Geneva 2006 ECEES conference, paper 9).

An other alternative in order to improve the data analyse is to cross check other geophysics and geotechnical information as the SASW for example that gives better precision on the velocity for high frequencies. This approach will be realized for other RAP stations.

Ces conclusions rejoignent celles effectuées sur les données synthétiques des paragraphes 3 et 3 précédents. Elles nous permettent de déterminer les étapes importantes dans les mesures de bruit de fond et l'interprétation de ces mesures. C'est ainsi une aide pour la définition d'un protocole d'utilisation décrit dans le paragraphe qui suit.

5. Conclusion : Protocole

5.1. Description du protocole

Toutes les études effectuées, que ce soit sur des données synthétiques ou des données réelles, nous montrent que l'analyse du bruit de fond n'est pas triviale et ne peut pas être effectuée dans une boîte noire.

D'une part la fidélité aux principales hypothèses devra être vérifiée, en particulier l'hypothèse d'un site tabulaire. D'autre part les différentes étapes, des mesures à l'analyse, auront une influence sur le résultat final selon:

- Le choix de la géométrie des réseaux influencent la bande de fréquence et donc in fine les performances de l'inversion (ouverture, nombre de capteur, répartition des capteurs);
- La qualité des mesures (la présence de vent, de sources proches sont néfastes à la qualité des mesures)
- Les choix, dans les analyses FK et SPAC, de la taille des fenêtres, du nombre d'échantillons, du lissage, des couples de capteurs pour SPAC (les livrables du projet [SESAME 2001-2004] conseillent sur les paramètres à utiliser pour les différentes étapes de l'analyse du bruit, [Ohrnberger 2004a] [Wathelet 2003]. Ces choix ne sont pas abordés ici) ;
- La sélection des courbes de dispersion ou d'autocorrélation par tri visuel des effets de l'aliasing et de la résolution, qui est dépendante de l'utilisateur ;
- Le choix de l'espace initial des paramètres de l'inversion ;
- Le choix de la valeur de l'erreur maximale acceptable ;
- Les connaissances préalables sur le site ;
- Le but de l'étude (la vitesse en surface ou le profil de vitesse complet ?)

Afin de réduire les influences possibles de ces différents points et de faciliter la démarche pour l'utilisateur non forcément pleinement converti, un protocole a été mis en place, en vue d'estimer un degré de confiance sur les résultats finaux grâce à un système de notation. Il se compose des huit étapes suivantes, dont 6 sont caractérisées par une notation indiquée entre crochets (la justification des points est donnée dans le détail des étapes):

1. Avec les rapports H/V : vérifier l'hypothèse d'un site tabulaire [1 point] et qualifier le contraste [1 point]
2. Choisir l'ouverture des réseaux
3. Effectuer les analyses FK et SPAC et comparer les courbes caractéristiques [1 point] et les profils [1 point]
4. Définir la largeur de la bande de fréquence maximale et inverser cette courbe finale [2 points]
5. Quantifier l'étalement de la vitesse moyenne en surface des modèles sélectionnés [1 point]
6. Vérifier la cohérence entre la fréquence de résonance empirique (H/V) et la fréquence de résonance théorique des modèles sélectionnés [1 point]

7. Vérifier que la courbe de dispersion concerne la profondeur à caractériser (plate en haute fréquence pour caractériser les 1^{ers} mètres) [1 point]
8. Comparer aux données existantes [1 point]
9. Calculer le degré de confiance estimé sur 10 points

Le descriptif et la notation de ces étapes sont détaillés ici:

5.1.1. Vérification de l'hypothèse d'un site tabulaire

Une hypothèse de base est d'effectuer des mesures sur un site tabulaire, c'est-à-dire un site ayant des caractéristiques physiques qui ne montrent pas de variations latérales. Afin de vérifier cette hypothèse, des mesures ponctuelles, pour une analyse H/V, doivent être réalisées sur le site à étudier. On observe alors l'évolution spatiale de la courbe H/V sur les différents capteurs. Si cette courbe garde une forme constante sur une certaine zone alors cette zone est considérée à une dimension. Cette zone doit avoir la taille de l'étendue du réseau, par exemple un cercle de rayon au minimum de 15 mètres et jusqu'à une centaine de mètres. Elle pourra être un lieu d'étude pour une analyse de bruit de fond en réseau. Cette caractéristique est notée sur un point.

De plus, ces mesures ponctuelles nous permettent de connaître la fréquence de résonance du site. Cette dernière est un paramètre à exploiter. En effet s'il y a un pic important alors il y a certainement un contraste important [Bonnefoy-Claudet, 2004], par exemple entre le remplissage et le substratum rocheux. Dans ce cas de figure, le mode fondamental et le 1^{er} mode supérieur de la courbe de dispersion sont plus séparés et donc les erreurs d'interprétation des modes sont moins fréquents, voir Figure 67. Par contre l'absence ou la faiblesse (amplitude inférieure à 2) d'un pic est caractéristique de peu de contraste ou de sites rocheux. Ces cas de figures ne sont pas propices à une bonne interprétation des mesures de bruit comme nous l'avons vu pour quelques exemples au rocher, sites synthétique M01, page 88, ou site réel OGMU à Grenoble, page 104. La présence d'un pic net sur les rapports H/V (en comparaison avec une bosse aplatie) avec une amplitude supérieure à 2 donnera un point supplémentaire.

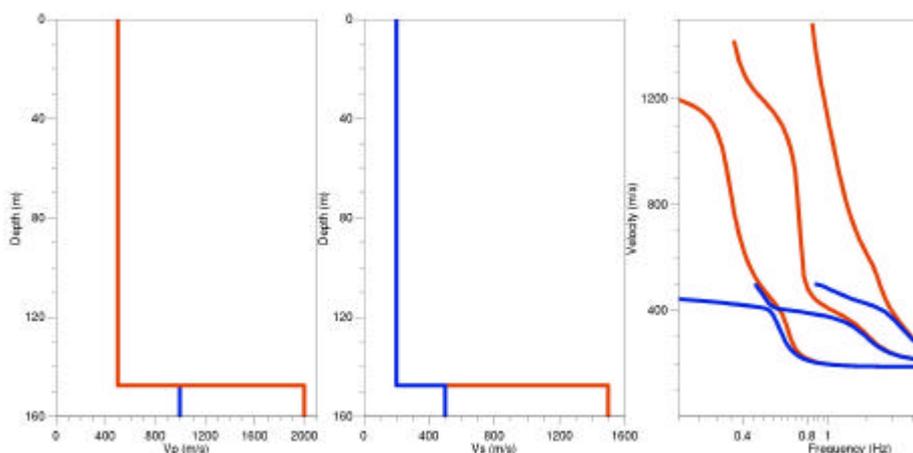


Figure 67: Comparaison entre un modèle avec un faible contraste (en bleu) et un modèle avec un fort contraste (en rouge), de gauche à droite: profils des ondes P, profils des ondes S et courbes de dispersion du mode fondamental et des deux 1^{ers} modes supérieurs

Notons que, dans le cadre de vallées, il est intéressant de réaliser des profils transversaux afin de voir l'évolution de la fréquence de résonance qui est un indicateur de l'évolution du remplissage quaternaire. Cette étape de mesures a été réalisée dans le projet Sud-Isère (voir en exemple le site de Saint Gervais au paragraphe 5.2.1, page 120). Cette étape permet ainsi de caractériser la forme du remplissage sédimentaire. Le rapport de l'épaisseur sur la largeur pouvant apporter une information qualitative sur les effets 2D.

Cette étape de vérification de l'hypothèse 1D, donne donc de nombreuses informations et reste un élément essentiel aux analyses combinées du bruit de fond.

5.1.2. Choix l'ouverture des réseaux

Une fois la zone d'étude délimitée sur le terrain, et la fréquence de résonance estimée, il faut alors revenir sur cette zone pour réaliser des enregistrements en réseau. Le choix de la géométrie a été évoqué au paragraphe 3.4.1 entre un type circulaire et un type triangulaire où on conclue qu'il y a peu de différence entre les deux types de géométrie. Il est aussi évoqué dans l'étude sur le site de l'Ebron que les réseaux circulaires sont plus adaptés à l'analyse SPAC et que les réseaux triangulaires conviennent mieux à l'analyse FK. La géométrie circulaire a plus souvent été adoptée dans nos cas d'étude.

Afin d'aider au choix de l'ouverture (dans le cas d'une géométrie circulaire l'ouverture est assimilée au rayon) une série de 14 abaques (Annexe **15.3.5** page 283) a été réalisée. Ces abaques montrent des courbes de dispersion type et des limites d'aliasing et de résolution de réseaux dans le plan fréquence-vitesse de phase. A titre d'exemple, un de ces abaques est présenté sur la Figure 68. Le but de ces abaques est principalement de faire prendre conscience à l'utilisateur de l'effet de l'échantillonnage d'un réseau qui impose forcément des limites d'interprétation. Ainsi l'utilisateur sera sensibilisé sur le fait qu'un réseau ne décrit qu'une bande de fréquence détruite de la courbe caractéristique. Il faut donc réaliser plusieurs réseaux pour balayer une bande de fréquence suffisamment large. Cette erreur a été observée pour l'étude des stations du RAP, paragraphe 4.2.

La plus part de nos études ont été réalisées avec un appareil d'acquisition Cityshark II qui permet l'enregistrement simultané de 18 voies (six capteurs à trois composantes). Nous avons donc opté pour des réseaux circulaires avec un capteur central et cinq capteurs sur la circonférence tous les 72° , sur un cercle de rayon r , qui caractérise le réseau.

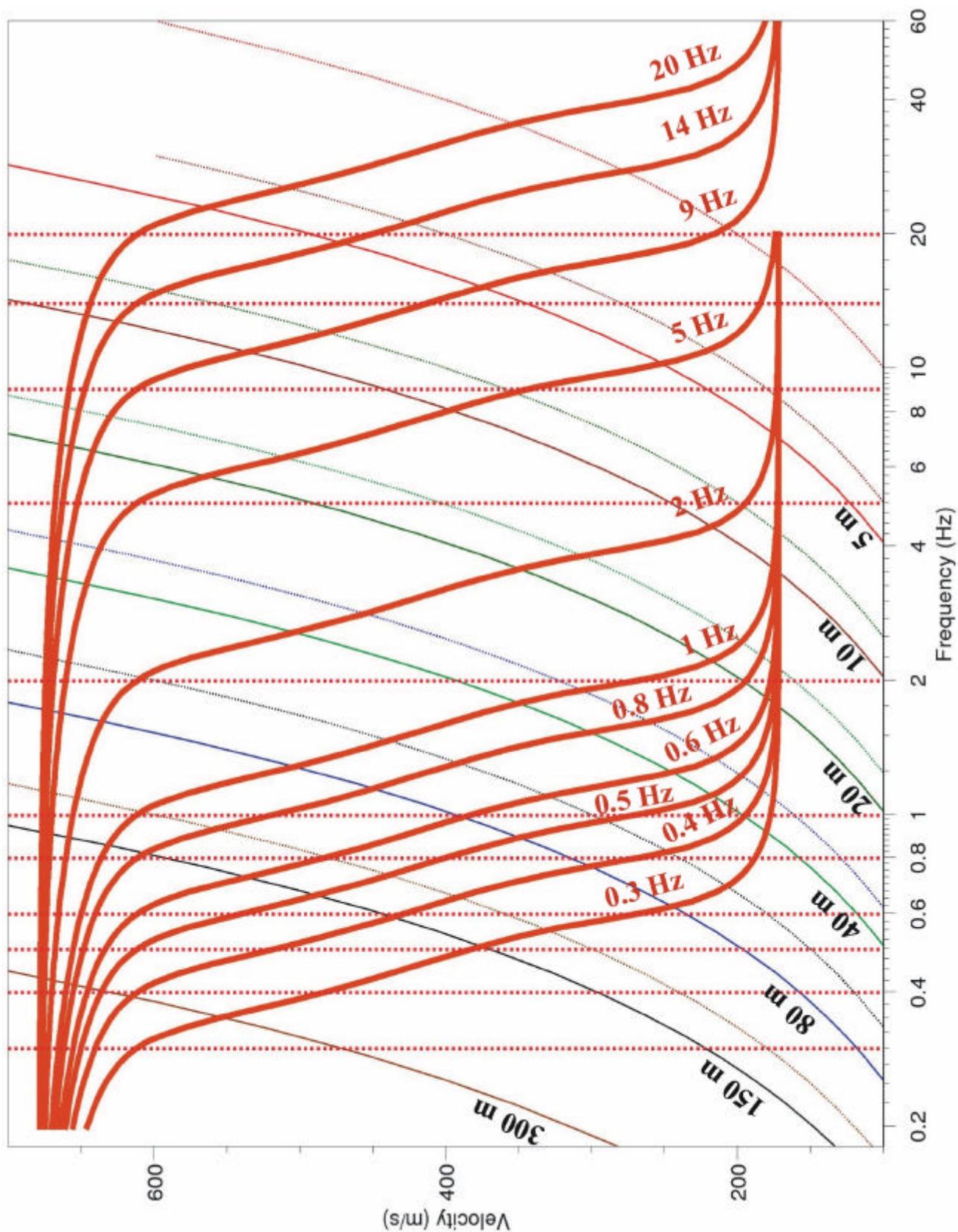


Figure 68: Abaque des modèles avec une vitesse en surface de 180 m/s, en profondeur de 720 m/s et une fréquence de résonance variant de 0.3 à 20 Hz. En rouge, trait plein, les courbes de dispersion des modèles avec une fréquence de résonance variant de 0.3 à 20 Hz ; en rouge pointillé la fréquence de résonance qui représente une limite sous laquelle les ondes de Rayleigh n'ont plus d'énergie ; en couleur : en trait plein la limite de résolution et en pointillé la limite d'aliasing pour des réseaux circulaires de rayon 5, 10, 20, 40, 80, 150m

Ces 14 abaques présentent, dans le plan fréquence-vitesse de phase, différentes courbes de dispersion théoriques des ondes de Rayleigh définies par calcul direct, voir paragraphe 2.1, pour des modèles simples. Ces modèles canoniques sont constitués d'une couche avec une vitesse constante sur un substratum rocheux. La vitesse de la 1^{ère} couche variant de 60 m/s à 1200 m/s, la vitesse du substratum variant de 720 m/s à 1500 m/s. A chaque vitesse de la 1^{ère} couche correspond un abaque. Sur chaque abaque sont représentées les courbes de dispersion correspondant à des modèles avec des vitesses en surface et dans le substratum fixées et une fréquence de résonance variant entre 0.2 à 20 Hz.

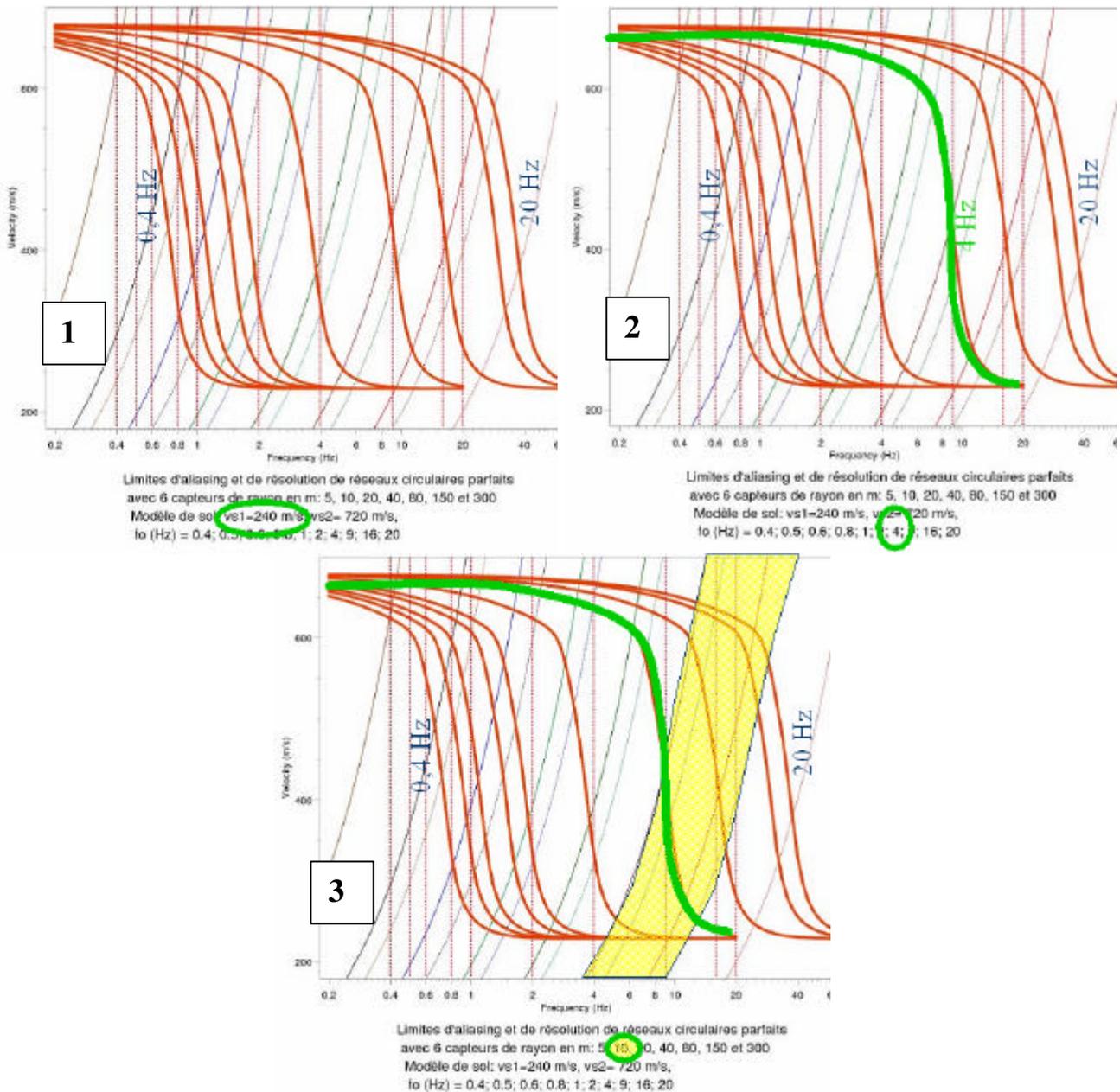


Figure 69: Étapes illustrant l'utilisation des abaques: 1) choisir un abaque correspondant à une vitesse des ondes S caractéristique de la 1^{ère} couche, ici 240 m/s ; 2) choisir la courbe correspondant à la fréquence de résonance définie avec le rapport H/V, ici $f_0=4$ Hz ; 3) choisir des ouvertures de réseaux qui permettront de balayer la bande de fréquence que l'on souhaite caractériser, ici un rayon de 10 m permet de décrire la courbe de dispersion de 8.5 Hz à 13 Hz.

Les limites d'aliasing et de résolution, de réseaux circulaires de rayon variant de 5 à 300 mètres, y sont aussi représentées. Sept réseaux à 6 capteurs sont définis avec un rayon de (en m): 5, 10, 20, 40, 80, 150, et 300. Ces limites sont représentées par : pour l'aliasing k_{\max} la moitié du nombre d'onde pour lequel la valeur de la réponse du réseau ne dépasse pas 0.5 sur le pic secondaire ; et pour la résolution k_{\min} , le nombre d'onde qui correspond à la largeur du pic principal qui se trouve à sa demi hauteur. Cette limite est moins restrictive que celle présentée au paragraphe 3.2. Elle est ici seulement un moyen d'éveiller l'utilisateur à la restriction de la bande de fréquence.

Pour utiliser ces abaques on suppose que la fréquence de résonance est connue grâce aux rapports H/V calculés dans l'étape 1. On suppose aussi que la vitesse des ondes S en surface est grossièrement estimée soit grâce à des données a priori ou par une connaissance géologique, soit par réseau préliminaire. Ce réseau aura un rayon autour de 15 mètres car cette ouverture a permis une estimation correcte des courbes caractéristiques sur les modèles synthétiques (paragraphe 2).

L'ouverture d'un réseau agissant sur la bande de fréquence de la courbe de dispersion il nous paraît nécessaire de réaliser un minimum de 3 réseaux circulaires pour être sûr d'avoir des informations suffisantes. Les étapes d'utilisation des abaques sont illustrées sur la Figure 69 sur un exemple pour un site avec une vitesse de la 1^{ère} couche égale à 240 m/s.

Une fois le choix des ouvertures des réseaux effectué, on réalise les mesures souvent entre 30 minutes et une heure suivant l'ouverture pour avoir des fenêtres temporelles suffisamment longues selon la longueur d'onde à caractériser. Puis vient la partie d'analyse des données.

5.1.3. Analyses FK et SPAC et comparaison

Les deux analyses FK et SPAC sont effectuées sur les données en suivant les conseils suivants :

Suivre les conseils des livrables de SESAME (Choisir une taille de fenêtres temporelles suivant la fréquence concernée, appliquer un anti-trigger, définir une vitesse minimale etc.);

Pour SPAC définir des anneaux contenant au minimum 4 paires de capteurs répartis sur l'anneau et avec un rapport du rayon moyen sur la largeur de l'anneau le plus petit possible ;

Enlever les effets d'aliasing et de résolution qui sont nettement visibles dans le plan fréquence-vitesse de phase, pour améliorer la définition des courbes de dispersion et d'autocorrélation (outil spécifique de SESARRAY);

Définir les courbes de dispersion et/ou d'autocorrélation non seulement pour les valeurs moyennes mais aussi pour les écarts type ;

Pour l'étape d'inversion commencer par un espace des paramètres larges, observer les améliorations avec un espace plus contraint. Restreindre cet espace avec des connaissances a priori ;

Sélectionner des modèles (profils de vitesse) tels que les courbes caractéristiques correspondant ne dépasse pas la barre d'erreur des courbes inversées. Cela définit l'erreur maximale à accepter sur les modèles sélectionnés. Dans cette étape, il manque la possibilité de calculer un profil moyen et un écart-type sur les profils sélectionnés, avec le logiciel SESARRAY.

Une comparaison sur les résultats des inversions des courbes caractéristiques issues des analyses FK et SPAC, peut être faite. D'une part, les profils de vitesse sélectionnés sont comparés. D'autre part, on peut superposer la courbe de dispersion estimée avec FK et l'histogramme des courbes de dispersion dans le domaine fréquence-vitesse de phase (Figure 70). Ces deux comparaisons sont chacune notée sur 1 point.

Pour la comparaison des profils de vitesse, on regarde la différence entre les valeurs extrêmes des profils sélectionnés de la vitesse et la profondeur de la 1^{ère} couche (entre 5 et 30 mètres selon l'ouverture des réseaux) entre les deux analyses. Si cette différence est de plus de 40% alors le score équivaut à 0 point, entre 40 et 25% à 0.5 point et moins de 25% à 1 point.

Pour la comparaison des courbes caractéristiques, on regarde la différence de vitesse de Rayleigh à la fréquence la plus basse de la courbe de dispersion avec le maximum de l'histogramme des courbes d'autocorrélation. La différence est notée selon les mêmes pourcentages.

5.1.4. Définition de la largeur de la bande de fréquence maximale et inversion de la courbe de dispersion finale

Les courbes d'autocorrélation correspondent à un histogramme dans le domaine fréquence-vitesse de phase. En superposant cet histogramme avec la courbe de dispersion estimée avec FK, on peut parfois étendre la bande de fréquence où est estimée la courbe de dispersion. En effet l'analyse SPAC semble avoir une meilleure résolution et permettre une estimation plus basse fréquence de la dispersion des ondes de Rayleigh.

En combinant ces deux approches, on obtient une courbe de dispersion décrite sur une bande de fréquence plus large. L'idéal serait l'inversion combinée des courbes de dispersion et d'autocorrélation qui n'est pas incrémentée dans le logiciel d'inversion à ce stade.

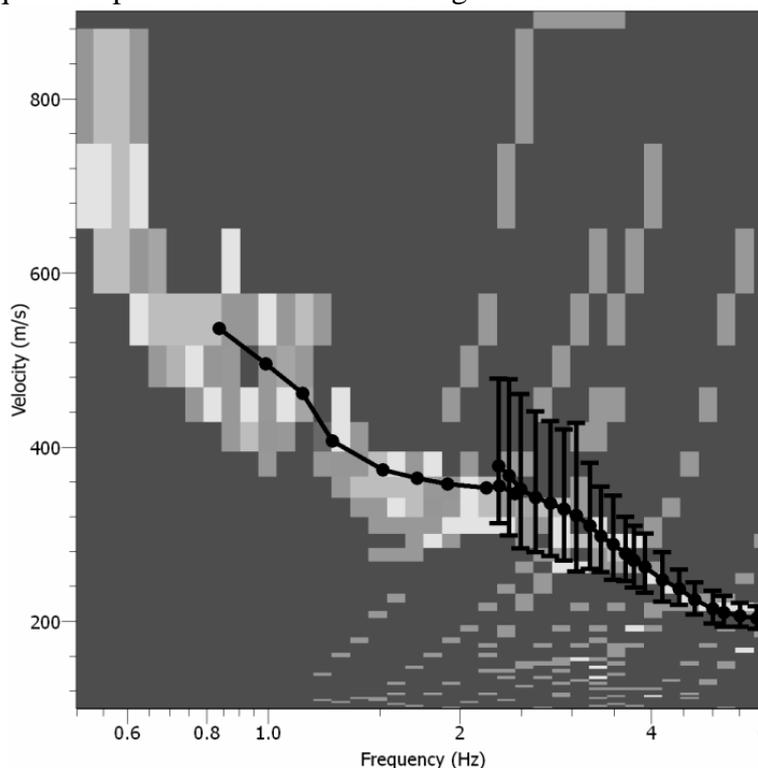


Figure 70 : Histogramme de courbes d'autocorrélation en couleurs superposé par la courbe de dispersion estimée par FK en noire avec des barres d'erreur et une sélection manuelle, à titre d'exemple, de l'extension possible de la courbe de dispersion à basse fréquence. Extrait de l'étude de données grecques, sur le site Patra-A

C'est cette dernière courbe de dispersion qui sera inversée avec l'espace des paramètres choisis dans l'étape précédente et avec les contraintes disponibles. Par exemple la contrainte sur la fréquence de résonance obtenue dans la 1^{ère} étape avec l'analyse H/V est toujours disponible.

Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.3 la largeur de la bande de fréquence influe sur les résultats, cette caractéristique est donc notée. Considérant que la bande de fréquence usuelle la plus large sur laquelle une courbe de dispersion peut être définie va de 0.2 à 20 Hz, la note sur deux est estimée par $\log(f_{\max}) - \log(f_{\min})$ avec f_{\max} et f_{\min} les bornes de la bande de fréquence, et on a $\log(20) - \log(0.2) = 2$, donc la note est sur 2.

5.1.5. Quantifier l'étalement sur les modèles sélectionnés

Nous retiendrons, de l'inversion de la courbe de dispersion mixte entre FK et SPAC, les profils dont la courbe de dispersion théorique ne dépasse pas les barres d'erreur de la courbe de dispersion mixte.

Sur l'ensemble de ces profils on estime une vitesse moyenne sur les 10 premiers mètres (si il n'y a pas de saut de vitesse important, sinon on fait une moyenne sur la 1^{ère} couche homogène) des valeurs extrêmes de vitesse. Une différence inférieure à 100 m/s correspond à 1 point, entre 100 et 200 m/s 0.5 point et supérieure à 200 m/s 0 point.

5.1.6. Vérification de la cohérence entre la fréquence de résonance empirique et la fréquence de résonance des profils sélectionnés

Sur l'ensemble des profils sélectionnés, la réponse à une onde SH est calculée (voir annexe 15.4.1.1 page 284). Cette réponse est comparée au rapport H/V. Cette comparaison constitue un critère de notation : si les fréquences du premier pic, définies par chacune de ces deux courbes, sont similaires à 20% près alors la note est de 1 point, entre 20 et 35 % la note est de 0.5 point, moins de 35 % 0 point.

5.1.7. Vérification de la courbe de dispersion par rapport à la profondeur à caractériser

Si c'est la vitesse de la 1^{ère} couche qui est cherchée alors il faut que la courbe de dispersion aille jusque sur la partie plate correspondant aux hautes fréquences (relativement à la valeur de la vitesse) qui caractérise les couches proches de la surface comme on peut le voir sur la Figure 71.

La notation sur l'estimation de la pente est définie selon le pourcentage suivant :

Si $A(f_{\max}/1.3) - A(f_{\max})$ est inférieure à 15% de $A(f_{\max})$ alors la note est de 1 point,

Si $A(f_{\max}/1.3) - A(f_{\max})$ est entre 15 et 25% de $A(f_{\max})$ alors la note est de 0.5 point,

Si $A(f_{\max}/1.3) - A(f_{\max})$ est supérieure à 25% de $A(f_{\max})$ alors la note est de 0 point.

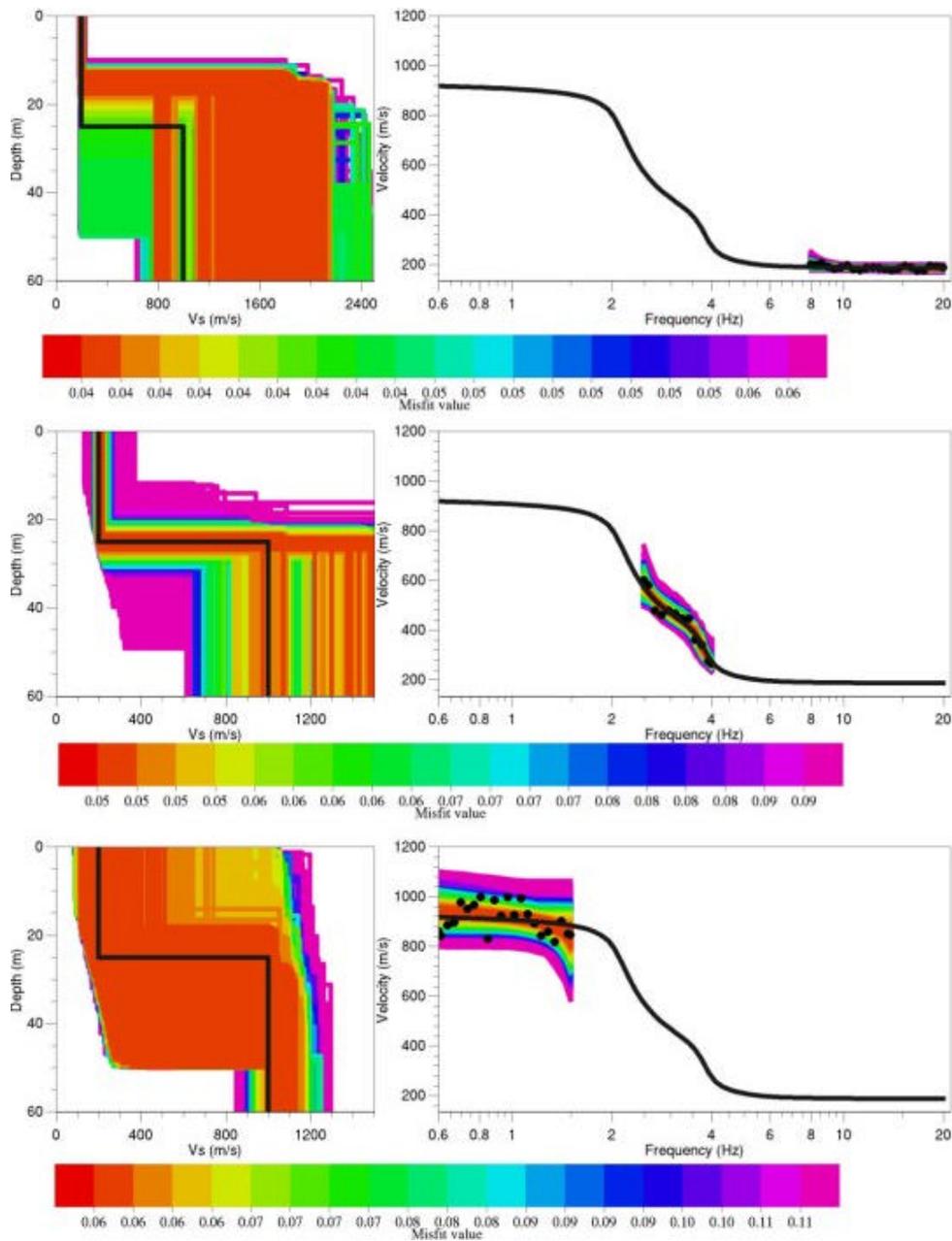


Figure 71: Observation du rôle de la bande de fréquence sur l'information cherchée : la vitesse plutôt en surface ou en profondeur? A gauche : profils de vitesse des ondes S correspondant à la courbe de dispersion inversée à droite. En couleur : échelle de la valeur de l'erreur pour les modèles.

5.1.8. Comparaison aux données existantes

Enfin, les résultats sélectionnés peuvent être comparés à des données existantes. Comme par exemple, les forages et les mesures géophysiques électriques donnant une information sur la profondeur. Une bonne cohérence amène un point supplémentaire. On peut aussi comparer les profils Vs obtenus avec d'autres mesures de Vs (down-hole, réfraction etc.). Cette comparaison est notée sur un point selon la différence entre les valeurs extrêmes de la vitesse et la profondeur de la 1^{ère} couche des profils sélectionnés et des données extérieures. Si cette différence est de plus de 40% alors le score équivaut à 0 point, entre 40 et 25% à 0.5 point et moins de 25% à 1 point. Une contradiction avec les données géotechniques amène à une annulation des résultats de bruit de fond, les résultats ne seront pas considérés fiables.

5.1.9. Calcul du degré de confiance

Le total de l'ensemble des notes expliquées dans les 7 étapes précédentes est sur 10. Un total supérieur à 6 devrait correspondre à des résultats fiables ; un total entre 4.5 et 6 correspond à un traitement à revoir ou à des mesures à ajouter comme par exemple une nouvelle ouverture de réseau ; un total inférieur ou égal à 4.5 montre que la méthode n'est pas adaptée à ce type de site et qu'il faut envisager une autre approche de caractérisation.

Des illustrations sur des cas réels sont présentées dans le paragraphe suivant :

5.2. Applications

Après la mise en place du protocole, plusieurs applications sur le terrain ont eu lieu et sont présentées ici:

- La Délimitation grossière des zones à effets de site sismiques dans le Sud-Isère qui était une étude complète, des mesures à l'analyse, dans un cadre de préparation au Plan de Prévention du Risque Sismique.
- L'analyse de données de bruit de fond en réseau de sites grecques en collaboration avec l'« Institute of Engineering Seismology & Earthquake Engineering » [ITSAK] dont Nikolaos P. Theodulidis et Alekos Savvaidis, pour caractériser les stations sismiques permanentes et tester la méthode utilisant le bruit de fond.
- Des mesures et analyses de bruit de fond en réseau à l'Ebron dans le Trièves, Isère, France qui permet une étude complète avec à la fois des données géotechniques et géophysiques, et des enregistrements de séismes.
- De plus, une participation au « blind test » de l'ESG 2006 a donné lieu à un article [Cadet, 2006b].

5.2.1. Délimitation grossière des zones à effets de site sismiques dans le Sud-Isère

Ce projet a été financé par le pôle grenoblois des risques naturels. Nous présentons ici un résumé des mesures effectuées sur le terrain et des résultats des premières analyses. Un bilan plus complet est disponible [Cadet 2005].

Mots clé : Sud-Isère, Délimitation grossière, effets de site, PPR (plan de prévention des risques), Mesures de bruit de fond, H/V et réseaux

Résumé : L'objectif est de délimiter grossièrement les zones de Sud-Isère susceptibles d'être exposées à des effets de site importants en cas de séisme, en vue d'aider la puissance publique à décider des zones où un PPR serait opportun. A cette fin, une série de zones sélectionnées a priori sur des bases géologiques (vallées de l'Isère, du Drac, de la Bièvre et de la Romanche, Trièves) ont fait l'objet d'une campagne de mesures de bruit de fond, à la fois ponctuelles (méthode H/V) et en réseau (méthode d'analyse en réseau).

Ces mesures permettent d'apprécier les vitesses de propagation des ondes de cisaillement dans les sédiments et les rochers en surface (en vue d'estimer le contraste d'impédance mécanique), et d'autre part les épaisseurs des remplissages sédimentaires (à partir des fréquences de résonance). En croisant ces informations avec la géométrie du bassin sédimentaire (largeur / profondeur) on détermine les zones propices à fort effet de site pour cause soit de très fort contraste, soit d'encaissement prononcé.

5.2.1.1.

Introduction sur le projet

L'identification de forts effets de site dans la cuvette grenobloise, jointe à la révision en cours du zonage sismique national, ont fait émerger la question d'un Plan de Prévention des Risques Sismiques dans l'agglomération grenobloise. Cependant, avant de lancer une étude PPR une discussion préalable avec les élus est nécessaire afin de mieux cerner à la fois les enjeux réels et les contours géographiques de la zone à prendre en compte pour ce type d'étude. Le projet présenté au Pôle Grenoblois s'inscrivait donc dans ce cadre et visait à identifier, sur la base de mesures et de critères simples, les zones de Sud-Isère qui pourraient donner lieu à de forts effets de site. A cette fin, une série de zones sélectionnées a priori sur des bases géologiques (vallée de l'Isère, du Drac, de la Bièvre et de la Romanche, Trièves, Vercors), ont fait l'objet d'une campagne de mesures de bruit de fond, à la fois ponctuelles (méthode H/V, plusieurs centaines de points), et en réseau dense (une demi-douzaine de sites). L'objectif de ces mesures était d'apprécier d'une part les vitesses des sédiments et d'autre part des épaisseurs des remplissages à partir de la fréquence de résonance. En croisant alors ces informations avec la géométrie (largeur / profondeur), on identifie plusieurs zones comme propices à fort effet de site pour cause soit de très fort contraste d'impédance soit d'encaissement prononcé. Ces effets particuliers n'étant pas couverts par la réglementation nationale, forcément forfaitaire, cela amène alors à proposer certaines de ces zones comme candidates potentielles à un PPR sismique. Au-delà de ces critères sur les caractéristiques physiques liées à l'effet de site, la décision concernant le lancement d'un PPR sismique doit aussi tenir compte des enjeux exposés et des perspectives de développement. Il s'agit donc en dernier recours d'une décision politique. En tout état de cause, la zone la plus exposée apparaît clairement comme étant la vallée de l'Isère depuis Pontcharra jusqu'à Port Saint Gervais.

5.2.1.2.

Introduction sur les effets de site

Il existe deux catégories principales des effets de site: ceux liés aux caractéristiques mécaniques du sous-sol, parfois appelés effets "lithologiques", conduisant à des phénomènes de piégeage et résonance des ondes sismiques, et ceux liés à la topographie de surface.

Effets lithologiques: Dans les réglementations ces effets sont pris en compte selon la structure superficielle locale du sol (sur les 30 à 50 premiers mètres). Les paramètres non pris en compte et qui peuvent amener à des effets significatifs sont les suivants:

- les remplissages très épais (au-delà de 50m)
- Les sols à très faibles caractéristiques mécaniques ($V_s < 100$ m/s)
- les vallées ou bassins assez encaissés
- les rochers très durs ($V_s > 1500$ m/s)

Pour identifier les zones où de tels effets peuvent se produire, il faut donc des méthodes permettant d'accéder simplement aux paramètres suivants: épaisseur du remplissage, vitesse en surface, vitesse du substratum, géométrie du remplissage.

Effets de la topographie: Pour ces effets la réglementation utilise un "coefficient topographique" borné à une augmentation de 40 % des actions sismiques en rebord de crête. L'expérience a montré que dans certains cas les effets mesurés peuvent être bien supérieurs à cette valeur de 40 %; cependant il y a, a priori, peu de communes en Sud-Isère où l'habitat se trouve concentré en sommet de relief.

Des effets de site combinés aux aléas amènent parfois à lancer une étude de PPR. Dans le cas de l'Isère le nouveau zonage de l'Isère se trouve en zone Z2 dont une partie en zone Z2b, zone la plus sismique en métropole. Les aléas ne sont donc pas négligeables.

5.2.1.3.

But et démarche

L'objectif étant d'établir un document seulement indicatif en vue d'une aide à la décision de lancer ou non une étude PPR, la méthodologie doit forcément être légère. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser les enregistrements de bruit de fond dont les méthodes d'analyse ont été récemment développées dans le cadre du projet européen [SESAME, 2001-2004].

La démarche est la suivante:

- Choix des sites selon les cartes géologiques et les connaissances des collaborateurs sur les zones du Sud-Isère;
- Estimation de la géométrie des bassins grâce aux cartes géologiques;
- Première campagne de mesures: profil H/V sur l'ensemble des sites choisis;
- Sélection des sites avec un pic H/V prononcé et deuxième campagne de mesures: enregistrements en réseau;
- Analyse des données de bruit: fréquence de résonance f_0 vitesse des ondes S en surface, estimation de l'épaisseur et du contraste des vitesses;
- Interprétation en terme de risque.

Les mesures sont effectuées avec des appareils d'acquisition de LEAS, la station Cityshark I (qui permet l'enregistrement d'un capteur à trois composantes) et la station Cityshark II (qui permet l'enregistrement de 6 capteurs à trois composantes, soient 18 voies). Pour les enregistrements ponctuels la durée varie entre 15 et 30 minutes, tandis qu'en réseau la durée d'enregistrement va de 20 à 60 minutes selon la taille du réseau.

Pour chaque enregistrement et chaque capteur une fiche type est remplie (voir en annexe) indiquant les conditions climatiques, les conditions de sol, les paramètres de l'enregistrement et les particularités de l'environnement.

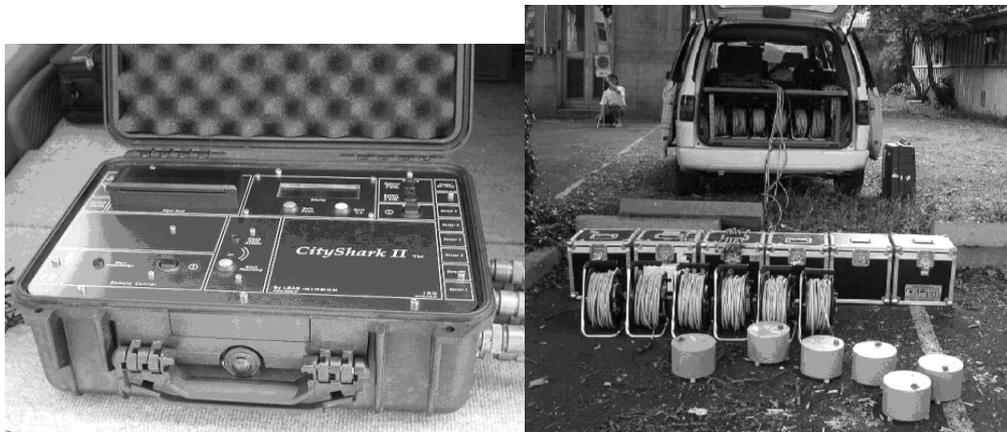


Figure 72: Matériel utilisé

Les capteurs utilisés sont des capteurs Lennartz de fréquence de coupure 0.2 Hz, leur position a généralement été localisée à l'aide d'un GPS. Plus de 300 points de mesures ont été réalisées.

On a réalisé deux types de réseaux: principalement des réseaux circulaires mais aussi des réseaux de types triangulaires emboîtés, voir paragraphe 3.3.

5.2.1.4.

Sites instrumentés

Sur la base de critères géologiques et géomorphologiques, douze sites ont été choisis dans le Sud-Isère (Figure 73 et Tableau 4). Les bassins de remplissage ont été sélectionnés ainsi que les

zones qui promettent un fort développement d'urbanisation comme la plaine de la Bièvre par exemple. Le bassin grenoblois est typique d'un bassin de remplissage. Pour plus de détails sur cette zone voir le rapport de [Banton, 2004].

Au total 12 sites ont été retenus dans des zones de remplissages de bassins sédimentaires ou de synclinaux (Vercors). Aucun site n'a été étudié sur des promontoires topographiques ou sur des pentes instables.

Tableau 4 : Listes des sites étudiés, localisation, géologie et mesures effectuées

Nom du site		Situation géographique	géologie	Type de mesures	Nombre de mesures	Opérateurs
1	Bièvre	Plaine de la Bièvre	Alluvions fluvio-glaciaires	ponctuelle	56	PY Bard, L. Debarros, E. Larose, V. Henry, S. Hok
				réseau	3	
2	Bourg d'Oisans	Vallée de la Romanche	Alluvions fluviales modernes	ponctuelle	22	PY Bard, C. Cornou
				réseau	0	
3	Vaulnaveys	Vallée de la Romanche	Alluvions anciennes post-wurmiennes	ponctuelle	12	PY. Bard, C. Grimmer
				réseau	3	
4	Séchilienne	Vallée de la Romanche	Alluvions fluviales modernes	ponctuelle	14	PY Bard, L. Stelly, C. Cornou
				réseau	0	
5	Pontcharra	Vallée du Grésivaudan	Alluvions fluviales et moraine	ponctuelle	21	C. Grimmer
				réseau	0	
6	Saint Gervais	Vallée de l'Isère	Alluvions fluviales et lacustres récentes	ponctuelle	23	G. Degueurce, Y. Orenge
				réseau	3	
8	Clelles	Trièves	Alluvions fluviales et torrentielles rissiennes	ponctuelle	4	S. Hok
				réseau	0	
7	La Mure	Matheysine	Alluvions fluviales et torrentielles	ponctuelle	7	S. Hok
				réseau	0	
9	Mens	Trièves	Alluvions wurmiens et cône de déjection	ponctuelle	3	S. Hok
				réseau	0	
10	Monestier de Clermont	Trièves	Alluvions fluviales et torrentielles wurmiennes	ponctuelle	9	G. Degueurce, S. Hatton
				réseau	3	
11	Le Sinard	Trièves	Glaciaires, fluvio-glaciaire et glacio-lacustre wurmien	ponctuelle	6	G. Degueurce
				réseau	0	
12	Villard de Lans	Vercors	Alluvions modernes à l'ouest, fluvio-glaciaires post-wurmiennes à l'est	ponctuelle	31	C. Michel, L. Debarros, K. Bezih
				réseau	3	

Les mesures ont été effectuées de Mai à Septembre 2005, grâce à l'aimable participation de Louis Debarros, Eric Larose, Virginie Henry, Pierre-Yves Bard, Laurent Stelly, Cécile Cornou, Cyril Grimmer, Yves Orenge, Sébastien Hok, Sophie Hatton, Gislaine Degueurce et Clotaire Michel. Soit un total de 222 points de mesure et de 18 réseaux (qui complètent les mesures H/V avec plus de 100 points). Ces mesures seraient à compléter par des mesures de vitesses sur du rocher (par des méthodes utilisant une source active par exemple). Pour plus de précisions autour de l'agglomération grenobloise se reporter aux résultats H/V concernant les zones de Voreppe, Saint Egrève et Vif du rapport de [Banton, 2004].

Pour chaque site, on s'est attaché autant que possible à dresser un profil transversal pour avoir une vision des variations spatiales de la fréquence fondamentale et de la réponse H/V. Cela a été possible partout sauf à la Mure, Clelles, Mens et le Sinard où seules quelques mesures ponctuelles ont été effectuées. Les courbes H/V ont été calculées selon les recommandations du projet SESAME (fenêtres suffisamment longues, lissage, moyenne, écart-type...). Une attention

particulière a été accordée au contenu basse fréquence car il peut être significativement perturbé par le vent : Certaines mesures ont ainsi été refaites lorsque cela s'avérait nécessaire. Tous les résultats sont archivés et les courbes individuelles pour chaque site sont disponibles.

Les analyses en réseau ont été faites à l'aide du logiciel SESARRAY et plus particulièrement des techniques FK et SPAC. C'est cette dernière qui s'avère généralement plus robuste. D'une façon générale, il n'a été possible de récupérer de l'information que sur les vitesses des ondes S dans les 1^{ères} dizaines de mètres : ni les vitesses des ondes P, ni la vitesse des ondes S dans le substratum profond ne sont bien contraints.

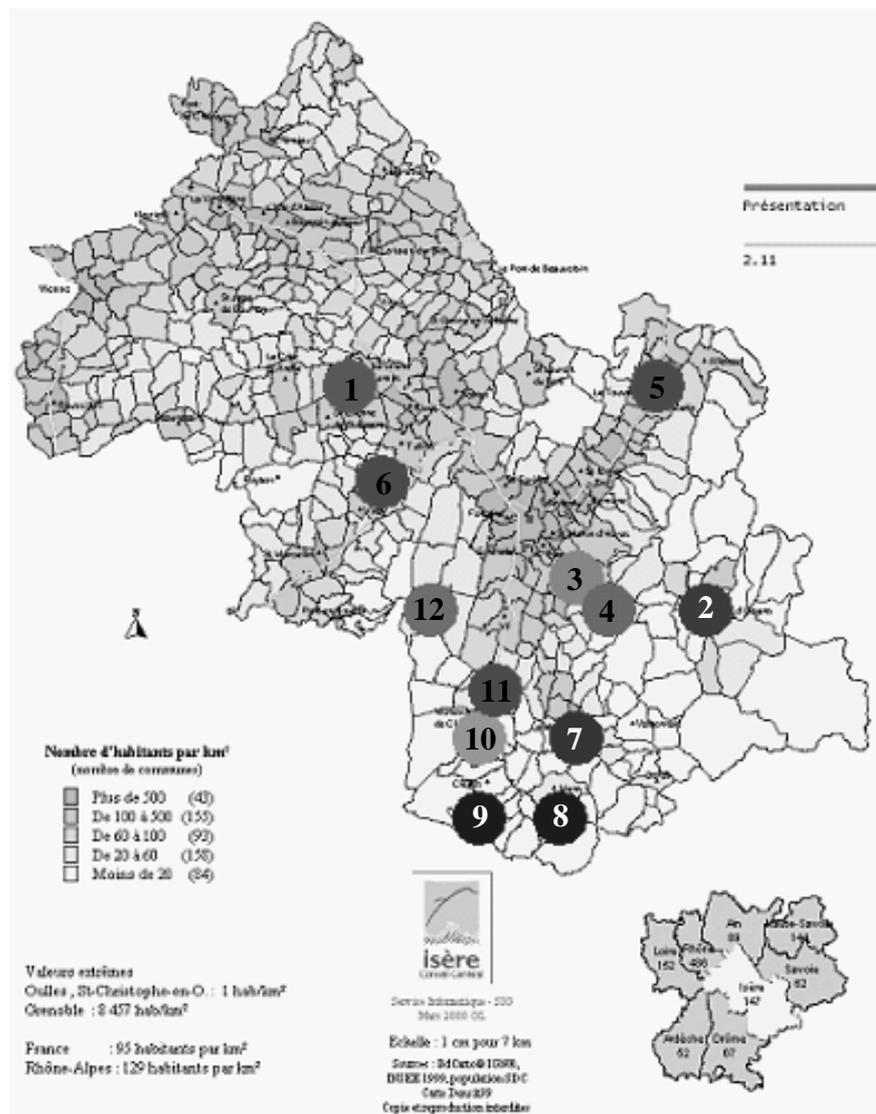


Figure 73: Localisation des sites de l'étude de pré-zonage dans le Sud-Isère, carte de la densité de population

5.2.1.5. *Résumé des principaux résultats*

5.2.1.6. *Bièvre*

Aperçu géologique : dépôts glaciaires, [Bièvre], [Beaudevin, 2005]

Géométrie du bassin : - largeur: 11 km - longueur : 50 km

Profil H/V : Un profil transversal de 34 points a été réalisé entre Sillans et le Grand Lemps, il y a peu de continuité entre les rapports H/V du sud (capteur 1) au nord (capteur 34). Ceci peut s'expliquer par la forte hétérogénéité de la géologie locale. En effet, la plaine de la Bièvre s'étend sur plus de 10 km du nord au sud, et sur environ 45 km de Rives à Beaufort, comportant différents dépôts ([Baudevin, 2005]).

Retenons que l'on retrouve une fréquence de résonance en deçà de 1 Hz qui correspondrait à une épaisseur non négligeable de dépôts (peut-être l'épaisseur de 200m d'alluvions suggérée dans [Baudevin, 2005]). Cependant ce pic n'est pas très net. D'autre part on trouve des pics à plus hautes fréquences (entre 5 et 12 Hz) dans certaines zones: s1 à s6 à Sillans, au nord; puis S24 à S31 à 4km au nord du Grand Lemps, représentant peut-être des dépôts de plus faibles épaisseurs.

Analyse en réseaux : Trois réseaux de type triangulaire ont été réalisés à environ 4 km au sud du Grand Lemps. Le rapport H/V sur les capteurs des réseaux montrent un pic compris entre 0.8 et 1 Hz qui reste cependant très peu marqué. Les modèles-limite retenus sont les suivants:

Tableau 5 : Caractéristiques des modèles limite retenus pour le site de la Bièvre

couche n°	épaisseur min [m]	épaisseur max [m]	Vp min [m/s]	Vp max [m/s]	Vs min [m/s]	Vs max [m/s]
1	12	28	250	700	75	150
2			900	2800	500	1000

Cohérence méthode H/V et analyse réseau: Avec une vitesse Vs moyenne de 100 m/s, la fréquence de résonance entre 0.8 Hz et 1 Hz, on obtient des profondeurs pour la première couche comprises entre 31 et 25m, ce qui est en accord avec les modèles retenus par analyse des réseaux.

5.2.1.7. Bourg d'Oisans

Aperçu géologique : Bourg d'Oisans se situe dans la vallée de la Romanche, dont le cours balaye la plaine, constituée de dépôts d'un ancien lac et de dépôts de la Romanche. Bourg-d'Oisans occupe le coeur d'une bande de terrains sédimentaires qui s'intercale entre les massifs cristallins du Taillefer et des Grandes Rousses. [Gidon, 2006] Substratum: Calcaire marneux

Géométrie du bassin : - largeur: 1.5 km en moyenne - longueur : 13.5 km

Profil H/V : Un profil transversal de 16 points a été réalisé. Ce profil montre deux tendances: un pic basse fréquence autour de 0.4 Hz, et un second pic qui évolue entre 1 Hz et 3.5 Hz, avec une forme qui laisse penser à un bassin à l'envers (la fréquence étant inversement proportionnelle à la profondeur).

5.2.1.8. Vaulnaveys

Aperçu géologique : D'après la carte géologique 797 Vizille, la zone étudiée, vallée de Vaulnaveys, est constituée d'alluvions anciennes post-wurmiennes. Substratum: Calcaire à l'ouest, micashistes à l'est. [Gidon, 2006]

Géométrie du bassin, de Vizille à Uriage : - largeur: 0.75 km en moyenne - longueur : 8.5 km

Profil H/V : Un profil de 13 points a été réalisé au niveau du Plâtre, qui se trouve sur la commune de Vaulnavey, au nord de Vizille, dans la vallée d'Uriage-Vizille. Ce profil montre deux tendances: un pic basse fréquence autour de 0.5 Hz, et un second pic qui évolue entre 1 Hz et 3.5 Hz, avec une forme qui laisse penser à un bassin, sans atteindre l'extrémité est de ce dernier. Pourtant les mesures remontent assez loin dans le hameau du Plâtre. Cela pourrait

s'expliquer par la présence d'un cône de déjection stabilisé, indiqué sur la carte géologique, c'est pourquoi le substratum ne serait pas atteint. De plus sur les côtés est et ouest du profil on ne trouve pas le même type de substratum, d'après la carte géologique: calcaire marneux à l'ouest et socle cristallin à l'est.

Analyse en réseaux : Trois réseaux de type circulaire ont été réalisés dans le hameau du Plâtre. Les résultats des rapports H/V des enregistrements des réseaux, montrent un pic peu pointu, mais cependant de valeur constante, entre 0.46 Hz et 1 Hz. Ceci reste cohérent avec le profil H/V obtenu.

L'analyse fk donne des résultats cohérents avec ceux de l'analyse SPAC. En effet, la comparaison des deux courbes de dispersion obtenues avec fk pour les réseaux de 10 m et de 20m de rayon avec la courbe de dispersion correspondante aux modèles obtenus après inversion des courbes SPAC, sont proches. On estime alors une courbe de dispersion entre 1 et 9 Hz combinant les deux analyses, fk et SPAC. Elle est inversée et on obtient une gamme de modèles. Les deux modèles-limite retenus sont les suivants:

Tableau 6: Caractéristiques des modèles-limite retenus pour le site de Vaulnaveys

couche n°	épaisseur min [m]	épaisseur max [m]	Vp min [m/s]	Vp max [m/s]	Vs min [m/s]	Vs max [m/s]
1	33	50	480	1500	290	320
2			1000	2000	415	800

Cohérence méthode H/V et analyse réseau: Avec une vitesse des ondes S moyenne de 300 m/s et une fréquence de résonance comprise entre 0.5 Hz et 1 Hz, l'épaisseur de la première couche varie de 75m à 150m. Cette épaisseur ne correspond pas à la couche déterminée par nos modèles. La couche considérée n'est pas atteinte avec le type de réseaux utilisés, seule l'ordre de grandeur de Vs en surface est à considérer (non pas l'épaisseur entre 33 et 50m).

5.2.1.9. Séchilienne

Aperçu géologique : D'après la carte géologique 797 Vizille, la zone étudiée, vallée de la Romanche, commune de Séchilienne, est constituée d'alluvions fluviatiles modernes. La forme en losange de cette zone laisse penser à certains qu'il y aurait un "pull-apart". Substratum: Roche métamorphique (amphibolite)

Géométrie du bassin : - largeur: 0.75 km - longueur : 1.5 km

Profil H/V : Un profil de 14 points transversal à la vallée a été réalisé dans le village de Séchilienne. Ce profil montre un pic autour de la fréquence 1 Hz qui est assez constant. Les mesures remontent assez loin sur les bords de la vallée en particulier au sud, à Saint Barthélemy de Séchilienne où on a un étalement de la fréquence de pic vers les hautes fréquences (le substratum est certainement atteint). On peut penser que ce pic autour d'1Hz correspond à l'épaisseur d'alluvions. Avec une gamme de vitesses des ondes S de 200 m/s à 350 m/s l'épaisseur varie de 50 à 85 m de profondeur.

5.2.1.10. Grésivaudan

Aperçu géologique : se référer à : [Gidon, 2006] et <http://biviers.free.fr/bivgeolo.htm>. D'après la carte géologique 773 de Goncelin, cette zone serait remplie d'alluvions fluviatiles de fond de vallée et de moraine des vallées du côté de la Frette. Substratum: calcaire et calcaire marneux

Géométrie du bassin : - largeur: 3 km entre Crolles et Pontcharra, 5 km entre Grenoble et Crolles, - longueur : 45 km de Grenoble à Montmélian, 38 km de Grenoble à Pontcharra

Profil H/V : Un profil transversal à la vallée, constitué de 21 points, a été réalisé entre la Frette et Villard Bozon, au Sud de Pontcharra. Ce profil montre un pic autour de la fréquence 0.45 Hz qui est assez constant. Les mesures remontent assez loin sur les bords de la vallée en particulier à l'ouest où il semblerait que le substratum soit atteint (augmentation de la fréquence du pic). La valeur de la fréquence de pic est assez basse et semble s'accorder aux valeurs connues dans la vallée du Grésivaudan notamment plus proche de Grenoble (voir [Banton, 2004]). On peut s'entendre à une profondeur de sédiments jusqu'à 280m si on considère que la vitesse moyenne des ondes S est la même qu'à Montbonnot, c'est-à-dire 500 m/s.

5.2.1.11. *Le port de Saint Gervais*

Aperçu géologique : Substratum: calcaire urgonien. [Gidon, 2006]

Géométrie du bassin : - largeur: de 4 km à 1.5 km en rétrécissant progressivement de Moirans au Port Saint Gervais - longueur : 15 km de Moirans au Port Saint Gervais

L'analyse de ce site est détaillée au paragraphe 5.2.2.

5.2.1.12. *La Mure*

Aperçu géologique : Sur La Matheysine et la Mure se référer à [Gidon, 2006]. Sur la carte géologique 821 de La Mure, on peut voir que la zone étudiée, Ser Sigaud, au nord de La Mure, se trouve sur des alluvions fluviatiles et torrentielles des lits majeurs. Substratum: Calcaire marneux.

Géométrie du bassin: largeur: 1.4 km en moyenne, longueur : 6 km de Pierre-Châtel à la Mure

Profil H/V : Un profil de 7 points a été réalisé. Malheureusement le vent bruite les données dans les basses fréquences où l'amplitude est très élevée. Les probables fréquences de résonance en ignorant le vent, seraient comprises entre 1.1 Hz et 2.5 Hz.

5.2.1.13. *Mens*

Aperçu géologique : Cette ville se situe à 20 Km au sud-Ouest de la Mure dans le Trièves. Se référer à [Gidon, 2006]. Substratum: Terres noires

Géométrie de la zone de Mens : - largeur: 1.5 km - longueur : 1.7 km

Profil H/V : Trois points de mesures ont été effectués, le rapport H/V montre un pic net et constant à 2.2 Hz, ayant une amplitude assez élevée, autour de 6.

5.2.1.14. *Clelles*

Aperçu géologique : Clelles se trouve sur les terres noires, sur des pentes remplies d'argiles.[Gidon, 2006] Substratum: Calcaire marneux

Géométrie de la zone de Clelles: - largeur: 0.75 km - longueur : 1 km

Profil H/V : Les rapports H/V montrent peu de constance sur les 4 capteurs pourtant proches les uns des autres.

5.2.1.15. *Le Sinard*

Aperçu géologique : La carte géologique 820 où se trouve Le Sinard n'est pas disponible, cependant sur la carte géologique au 250 000^{ème} de Valence Le Sinard se trouve sur une formation glaciaire, fluvo-glaciaire et glacio-lacustre du wurmien.

Géométrie du plateau : - largeur: 1 km - longueur : 2 km

Profil H/V : Les rapports H/V des 6 mesures ne montrent pas de pic.

5.2.1.16. *Saint Paul lès Monestier*

Aperçu géologique : [Gidon, 2006] La carte géologique 820 où se trouve Saint Paul lès Monestier n'est pas disponible, cependant sur la carte géologique au 250 000^{ème} de Valence, Saint Paul les Monestier se trouve sur des alluvions fluviales et torrentielles wurmiennes. Substratum: marnes et calcaire

Géométrie du bassin : - largeur: 1.5 km - longueur : 6 km

Profil H/V : Un profil de 7 points a été réalisé, le rapport H/V montre un pic entre 1 et 1.5 Hz.

Analyse en réseau : Trois réseaux circulaires de rayons 15, 30 et 60m ont été réalisés. Une première analyse des rapports H/V montre des pics à une fréquence comprise entre 1.4 et 1.7 Hz, en particulier si on ne tient pas compte des fortes amplitudes en basses fréquences (sous 0.8 Hz). Ces valeurs restent en cohérence avec le profil H/V effectué légèrement à l'aval des réseaux.

Les traitements SPAC et FK ont été effectués et leurs résultats comparés. Tout d'abord les courbes d'autocorrélation sont inversées. De ces modèles on retiendra une courbe de dispersion que l'on comparera aux calculs FK. On remarque que les résultats FK en profondeur sont bien plus étalés qu'avec la méthode SPAC cependant les ordres de grandeur de vitesses sont cohérents entre les deux méthodes. Notons aussi que la profondeur de la première couche est assez bien contrainte est se situe entre 14 et 22m. Pour terminer l'analyse on combine les courbes de dispersion obtenues avec FK et SPAC pour obtenir une courbe de dispersion moyenne entre 1.2 Hz et 7.8 Hz. Après inversion les modèles obtenus sont plus contraints que ceux des inversions des courbes SPAC ou FK seules. De ces inversions on retiendra les modèles limites suivants:

Tableau 7: Caractéristiques des modèles-limite retenus pour le site de Saint Paul lès Monestier

couche n°	épaisseur min [m]	épaisseur max [m]	Vp min [m/s]	Vp max [m/s]	Vs min [m/s]	Vs max [m/s]
1	14	22	280	700	120	150
2			960	1660	380	560

Cohérence rapport HV et analyse en réseau: Avec une vitesse moyenne Vs de 140 m/s pour la première couche, une fréquence de résonance comprise entre 1.4 et 1.7 Hz, la profondeur de la première couche est comprise entre 20 et 25m, ce qui reste cohérent avec les modèles trouvés par l'analyse en réseau.

5.2.1.17. *Villard de Lans*

Aperçu géologique : Substratum: Calcaire. [Gidon, 2006]

Géométrie du bassin : - largeur: 2 km en moyenne - longueur : 9 km

Profil H/V : Un profil de 31 points a été réalisé transversalement à la vallée du Bouilly à Chapot. Même si les mesures remontent sur le bord de la vallée, à l'est, vers Chapot, on ne semble pas atteindre le substratum (la fréquence du pic HV n'augmente pas). Malgré des dépôts

de diverses origines, le profil des rapports H/V donne des fréquences cohérentes, autour de 0.7 Hz. On trouve aussi un second pic entre 4 et 10 Hz.

Analyse en réseaux : Trois réseaux de type circulaire de rayon 10m, 20m et 40m ont été réalisés. Une première analyse des rapports H/V donne un pic net et constant autour de la fréquence 0.7 Hz. On trouve aussi un second pic entre 4 et 5 Hz. Ce second pic pourrait correspondre à la couche déterminée par l'inversion des courbes SPAC. Les résultats de l'inversion des courbes SPAC donnent des courbes de dispersion qui sont en accord avec les courbes de dispersion calculées par l'analyse FK. Cependant les résultats FK ne sont pas assez précis. En effet, il est difficile de pointer une courbe de dispersion dans les zones de validité des réseaux. Il n'est donc pas possible d'inverser les résultats donnés par FK, ils permettent seulement une confirmation des modèles trouvés après l'inversion des courbes SPAC. De l'inversion des courbes SPAC avec une valeur d'erreur est inférieure à 0.5, les modèles-limite suivants sont retenus:

Tableau 8: Caractéristiques des modèles-limite retenus pour le site de Villard de Lans

couche n°	épaisseur min [m]	épaisseur max [m]	Vp min [m/s]	Vp max [m/s]	Vs min [m/s]	Vs max [m/s]
1	10	15	380	1250	250	350
2			970	2150	450	850

Cohérence rapport HV et analyse en réseau: Avec une vitesse moyenne Vs de 200 m/s pour la première couche, une fréquence de résonance comprise entre 4 et 5 Hz, la profondeur de la première couche est comprise entre 10 et 12.5m, ce qui reste cohérent avec les modèles trouvés par l'analyse en réseau.

5.2.1.18. *Musée Dauphinois*

Ce site est situé au rocher, au musée Dauphinois à Grenoble. Un réseau de 16 m de rayon a été réalisé. L'analyse SPAC donne des vitesses Vs de l'ordre de 1300 m/s.

5.2.1.19. *Bilan*

Cette étude a permis de balayer une grande zone, le Sud-Isère, et de définir les sites prioritaires à revoir pour un éventuel PPR, selon :

- La vitesse des sédiments : dans le cas de sédiments mous
- L'encaissement des vallées
- La proximité des failles
- Les projets de développement

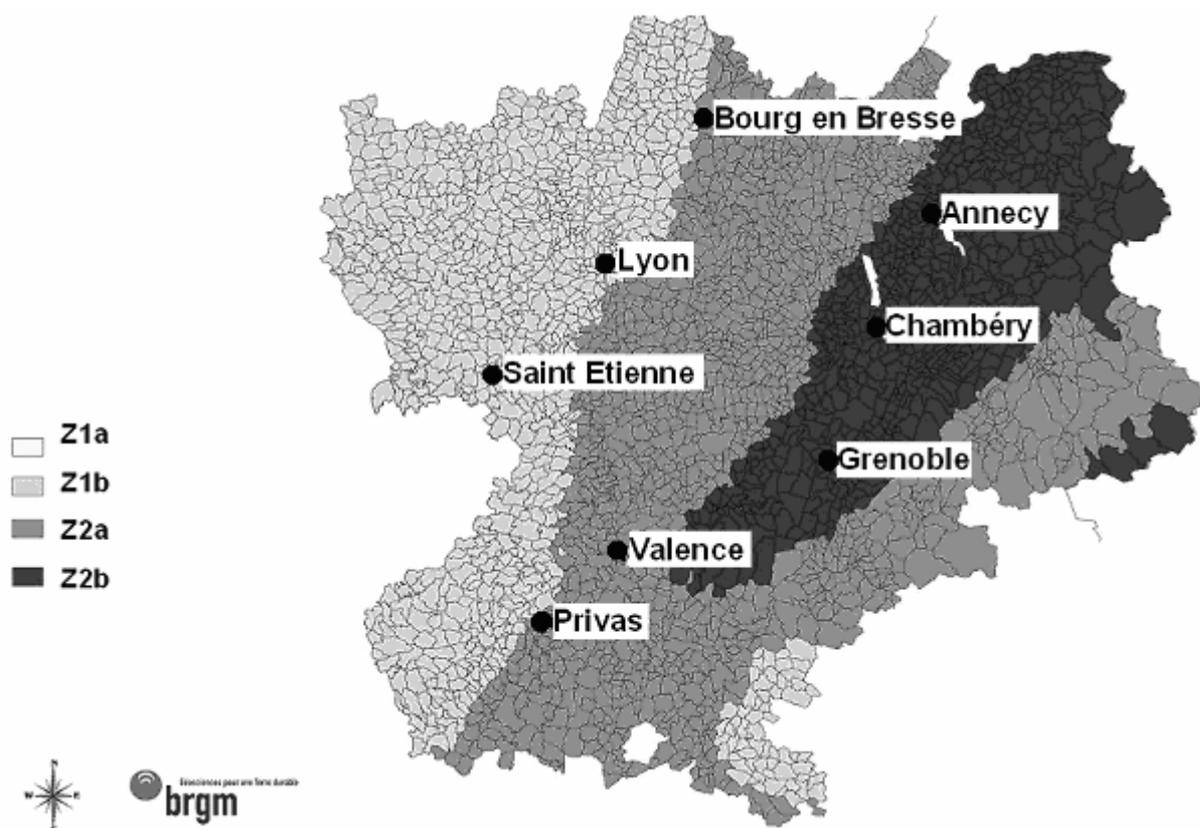


Figure 74: Proposition d zones sismiques en Rhône-Alpes, source: BRGM

Le tableau ci-dessous présente un bilan de ces résultats, avec pour chaque site la fréquence de résonance f_0 , l'épaisseur du remplissage H, la largeur du bassin W, le rapport H/W, la vitesse minimale $V_{S_{min}}$ des ondes S en sub-surface, la zone (Figure 74), et la conclusion sur la nécessité d'un PPR ou non.

Site	f_0 (Hz)	H (m)	W (km)	h/w	$V_{S_{min}}$ (m/s)	Zone	PPR
Grésivaudan	0.45	> 300	3	>0.1	(>250)	Z2b	OUI
Port Saint	0.45	>250	1.5 à 2	>0.15	300	Z2a	OUI
Bièvre	0.8	>200	11	0.02- 0.05	100 ??	Z2a	A voir
Vaulnaveys	1.0 à 3.5	>75	0.75	> 0.1	300	Z2b	OUI
Séchilienne	1.0	>75	0.75	> 0.1	(>300)	Z2b	OUI
Bourg d'Oisans	0.4	>200	1.5	>0.13	?	Z2a	OUI
La Mure	1 à 3	?	1.4	?	?	Z2a	NON
Mens	2 à 4	-	1.5	Faible	?	Z2a	NON
Clelles	4 à 8	-	-	Faible	?	Z2a	NON
Sinard	-	?	1	-	?	Z2?	NON
St-Paul-de-	1 à 2	> 10	1.5	0.01 à	150	Z2?	OUI
Lans-en-Vercors	0.7	> 100	2	> 0.05	300	Z2b	OUI

5.2.2. Application sur le site de Saint Gervais (Article ECEES Genève)

Ce paragraphe a été inspiré de l'article n°1431 « Rapid screening of site effects through microtremors surveys in view of microzonation study » écrit pour la conférence ECEES de Genève 2006. Le site de Saint Gervais présenté ici, fait partie de l'étude présentée au paragraphe 5.2.1.

The steps of the protocol described in paragraph 5.1, were applied to a study over all the South of the Isère region, in the French Alps. Le port Saint Gervais was chosen as an example, it is located on the Isère valley, downstream of Grenoble and Moirans, a little bit upstream of Saint Marcelin, on the North of the limestone massif the Vercors.

A first measurement campaign was performed in order to find a 1D place by observing the variation of the shape of the H/V ratio over the all studied site. The H/V ratios were computed onto a 2 km long transverse profile of 24 points of measurement; this profile shows the evolution of the resonance frequency between 0.45 Hz and 1.2 Hz across the valley that represents the shape of a typical glacial valley (Figure 75). On the sides on the valley, the pick disappears because of the shallow top of the bedrock. From this observation we can deduce that there is an impedance contrast, at least of 3, between sediments and bedrock -it is a favourable case for array analysis- It allows us to choose an appropriate 1D place to deploy array measurements around the sensor n°14 (Figure 75). With the help of the abacuses and the available space, we deployed 3 circular arrays of 6 sensors with 15m, 30m and 60m radiuses.

A constant resonance frequency of 0.5 Hz was provided by the H/V ratio. That corresponds to a deep (at least 100meters) layer that was not reached by our arrays, so only the surface velocity of the first layer will be considered as a reliable result.

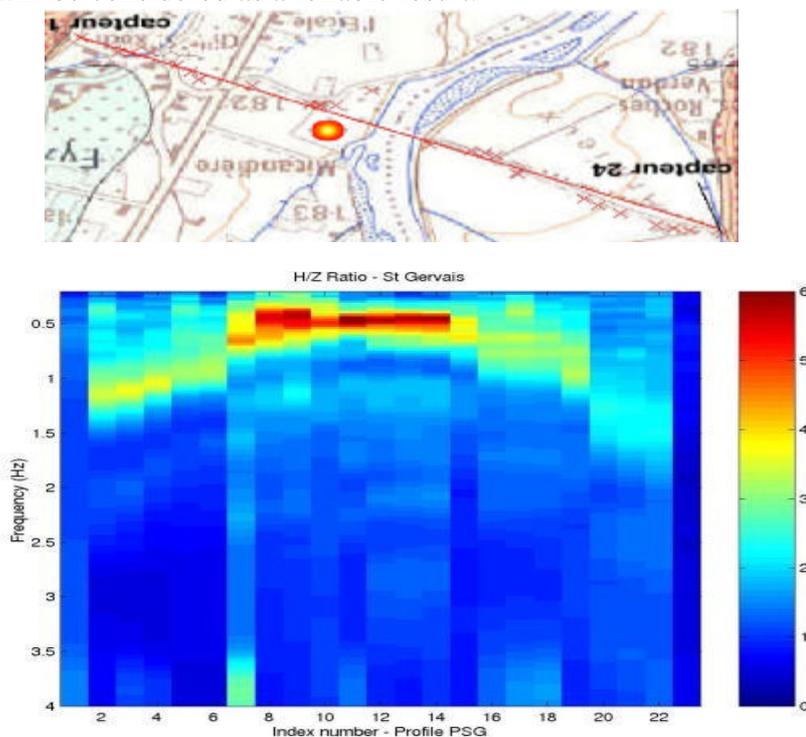


Figure 75: Results of the H/V ratios across the Isère valley at Saint Gervais. The upper figure shows the localisation of the transversal profile (red line) and the choice of the place for arrays measurements (red

circle). In the lower figure, the colour scale represents the amplitude of the H/V ratio; the abscise axis represent each measured points; the ordinate represents the frequency from 4 Hz to 0 Hz.

The dispersion curve estimated with FK technique and the dispersion curves corresponding to the models provided by the inversion of SPAC curves give consistent and complementary curves (Figure 78). The profiles from these two analyses also provide close results as we can see on Figure 76 and Figure 77.

A dispersion curve between 0.6 and 6.5 Hz is then defined mixing FK and SPAC results, its inversion provides a surface S-waves velocity between 270 m/s and 370 m/s (Figure 79). We do not consider the first jump as a really layer because the H/V ratio and the SH response are strongly divergent (Figure 80). With 0.5Hz resonance frequency, the layer thickness will be at least 135m that cannot be reached with our arrays.

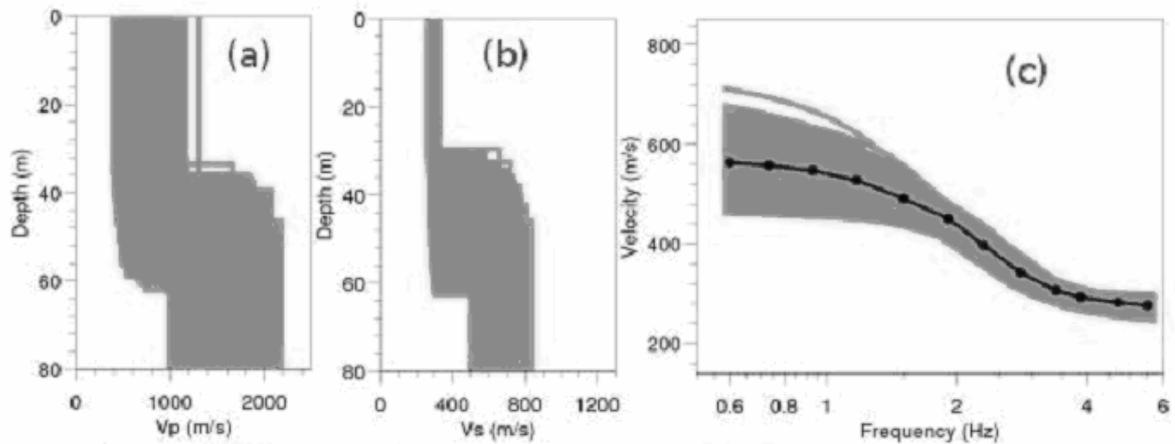


Figure 76: SPAC Results: inversion of the autocorrelation curves with a initial parameters space with one layer overlaying a bedrock; a) Vp profiles, b) Vs profiles, c) dispersion curve picked in black points and theoretical of the selected profiles in grey

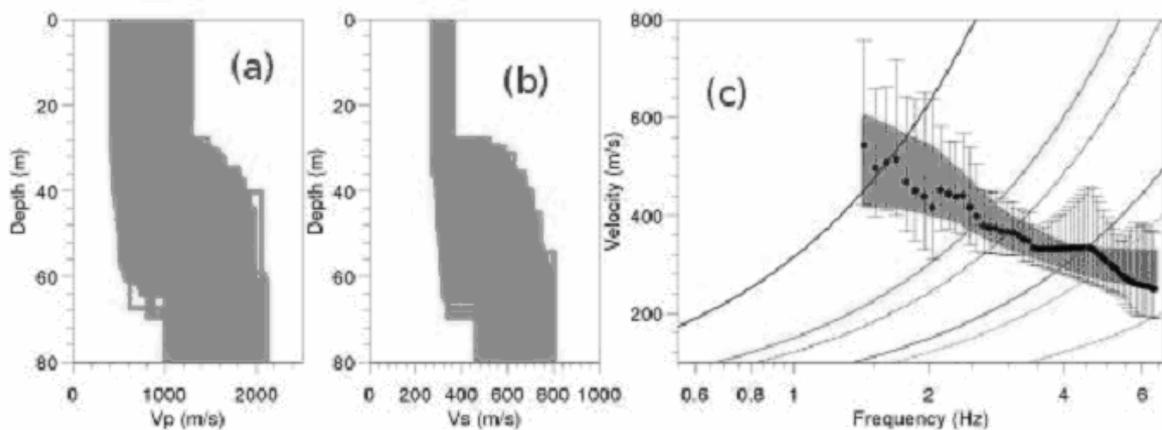


Figure 77: FK Results: inversion of the dispersion curve estimated with FK, with an initial parameters space with one layer overlaying a bedrock; a) Vp profiles, b) Vs profiles, c) dispersion curves calculated in black points and theoretical DC of the selected profiles in grey

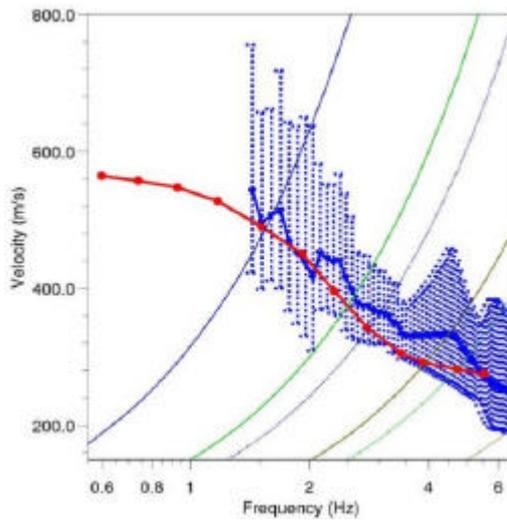


Figure 78: DISPERSION CURVE at Saint Gervais, Isère, France. The blue curve with error bars represents the dispersion curve estimated with the FK analyse. In red, picked dispersion curve corresponding to the models obtain by the inversion of the autocorrelation curves. The blue and green limits correspond to aliasing (high frequency) and resolution (low frequency) limits of the 3 arrays used on the field for the measurements.

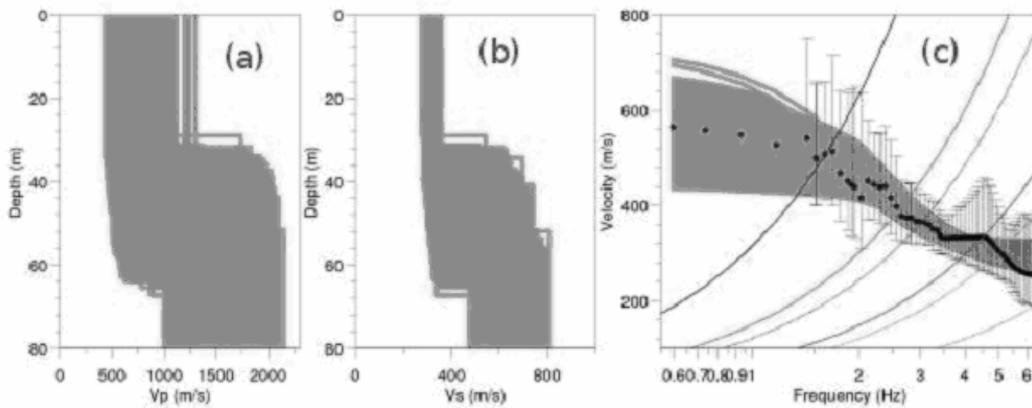


Figure 79 : Inversion of the final dispersion curve obtained by combining FK and SPAC techniques. (a) Vp profiles, (b) Vs profiles, (c) resulting dispersion curves in grey, target dispersion curve in black, limits in plain line.

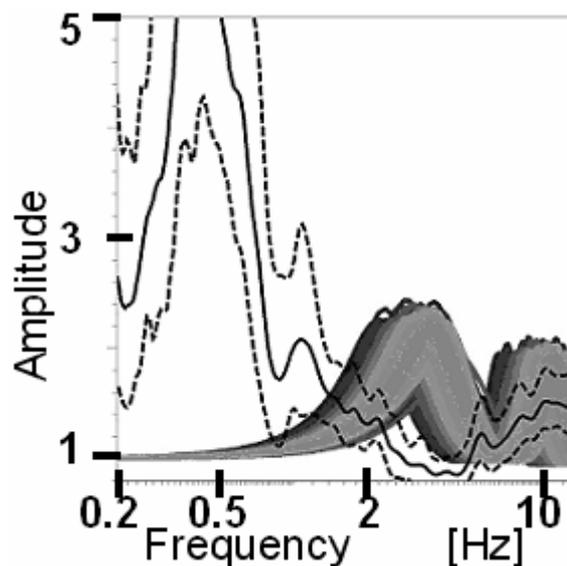


Figure 80: comparison of the H/V (black curves, plain line for the mean value, dashed lines for the standard deviation) with the SH response of the selected models (in grey)

Here are the main steps of the protocol with the associated score:

1. The H/V ratios show sharp and high peaks around 0.5 Hz in the area of array recordings. [2 points]
2. In the 1D zone selected (Figure 79), we have chosen the appropriate arrays aperture using abacuses, with a radius of 15, 30 and 60 meters.
3. The analyses with FK and SPAC provide consistent results (cross-check in Figure 76, Figure 77 and Figure 78). [2 points]
4. Merging the dispersion curves we extend the frequency band from 0.6 to 6.5 Hz. $\log(f_{\max}) - \log(f_{\min}) = \log(6.5) - \log(0.6) = 1$ point
5. The spread of the mean sub-surface velocity is about 90 m/s [1 point]
6. The coherence between the $f_{H/V}$ and the f_0 of the SH response of the selected profiles is very low because the aperture of the array does not allow to reach the deep layer corresponding to the resonance frequency of 0.5 Hz [0 point]
7. Check if the flat slope of the dispersion curve is reached: $DC(5) - DC(6.5) = 267 - 236 = 31$ m/s, less than 15 % of 236 m/s [1 point]
8. There is no geotechnical and geological information available for this area [0 point]

The level of confidence considering all that points is 7 over 10.

The degree of confidence 7/10 corresponds to a valid result. The value of the velocity of the 1st twenty is considered as a confident value.

5.2.3. Analyse de données de bruit de fond en réseau enregistrées en Grèce

5.2.3.1. Introduction

Dans le cadre de la caractérisation des stations accélérométriques, sept stations grecques ont été choisies pour tester les méthodes basées sur le bruit de fond. Ces stations ont été choisies car des mesures de vitesse de cisaillement, par cross-hole ou SPT, sont disponibles. L'étude réalisée suit le protocole décrit au paragraphe 5.1 qui fournit un degré de confiance aux profils de vitesse résultant de l'analyse.

Le but de cette étude est, d'une part de savoir si les méthodes basées sur le bruit de fond sont adaptées à la caractérisation des stations accélérométriques, et d'autre part, de tester le protocole. En effet, grâce à la possibilité de comparer des profils de vitesse résultat avec les vitesses connues par essais géotechniques, cette étude nous permet de vérifier la pertinence de la notation mise en place dans le protocole. De plus on tâchera de mettre en valeur les principaux problèmes d'interprétations.

Cette étude concerne sept sites où ont été réalisées des mesures de bruit de fond en réseau en été 2005 par P. Gueguen, A. Savvaidis et C. Michel. Les étapes 1 et 2 du protocole ont été suivies pour la réalisation des mesures, en particulier pour choisir les ouvertures des réseaux à partir d'abaques. Ceci a été simplifié par la connaissance de vitesse des ondes S, nécessaire pour l'utilisation des abaques.

Compte tenu du matériel disponible, une Cityshark II et 6 capteurs Lennartz, une géométrie circulaire avec un capteur central et cinq capteurs sur la circonférence a été choisie. Un résumé des résultats est présenté ici et on pourra aussi se référer à l'article de la conférence ESG 2006 [Savvaidis et al., 2006], pour d'autres observations.

Pour chaque site les résultats seront présentés sous forme d'un tableau type décrit dans le Tableau 9 qui suit. Pour le système de notation on se référera au descriptif du protocole page 111.

Tableau 9: Tableau type de résumé des résultats des méthodes combinées utilisant le bruit de fond pour un site

Résultats des rapports H/V (réseau de x m de rayon)	Pic ?	Constant ?	score
Graphique de haut: Chaque courbe noire correspond au rapport H/V moyen pour les 6 capteurs Graphique du bas : Le niveau de gris représente l'évolution de l'amplitude pour chaque capteur selon leur position sur le cercle (distance relative à partir du 1 ^{er} capteur en ordonnée)	Y a-t-il un pic net avec une amplitude supérieure à 2 ? (oui=1 point)	Est-ce que la forme des rapports H/V reste stable dans l'espace ? (oui=1 point)	/2
FK et SPAC	Espace initial des paramètres :		
	2c yyym : une couche de yyy mètres au maximum sur un substratum 2c yyymgrad : une couche de yyy mètres au maximum sur un substratum avec une évolution de la vitesse en gradient		
Profils après inversion de SPAC	Profils après inversion de FK	/1	
Profils sélectionnés avec une erreur inférieure à e1, DC théoriques correspondantes en gris ou niveau de gris, et DC estimée avec FK en points noirs	Profils sélectionnés avec une erreur inférieure à e2, DC théoriques correspondantes en niveau de gris, et DC théorique du modèle géotechnique en trait plein	Comparaison des profils de vitesse sélectionnés, obtenus après inversion SPAC et FK (0=nul, 0.5:moyen, 1:bon)	
Courbe de dispersion de SPAC (niveau de gris)	Courbe de dispersion de FK (noire)	/1	
		Comparaison de la DC calculée par FK et des DC correspondants aux modèles sélectionnés de l'inversion de SPAC (0: nul, 0.5: moyen, 1: bon)	
Étalement	Vs0max – Vs0min		/1
$f_0(\text{SH}) = f_0(\text{H/V})$?	Figure avec la réponse SH (niveau de gris) des modèles sélectionnés dans l'inversion de la DC FK et le rapport H/V (courbe noire)		/1
Largeur de la bande de fréquence	Log(fmax)- log (fmin)		/2
Plat ?	On calcule $A(f_{\text{max}}) - A(f_1)$ avec $f_1 = f_{\text{max}}/1.3$, le score en découle (voir protocole)		/1
<p>Commentaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vitesse moyenne sur les 10 1^{ers} m en comparaison avec les mesures géotechniques. - Quels sont les résultats conservés d'après le score final. - Vérification du degré de confiance par rapport aux profils Vs disponibles <p>Remarques sur les principales sources d'erreur avec la prise en compte du but de l'étude : cherche-t-on une vitesse en surface ou un profil complet ?</p>			<p>Total: /10</p> <p>Fiabilité du protocole</p>

Notation : DC : dispersion curve ou courbe de dispersion

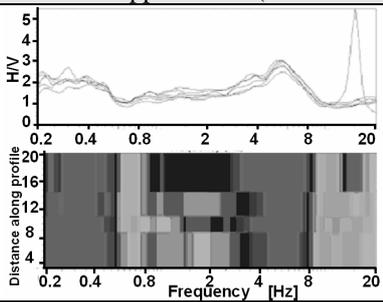
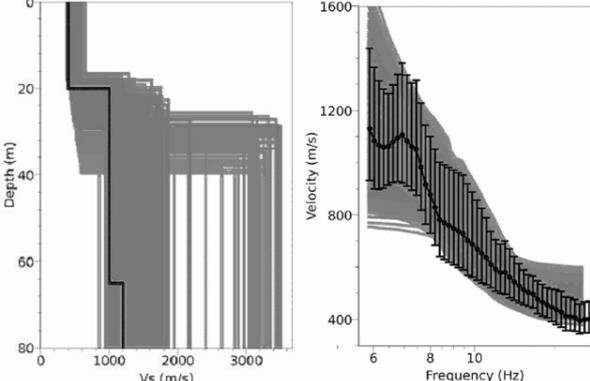
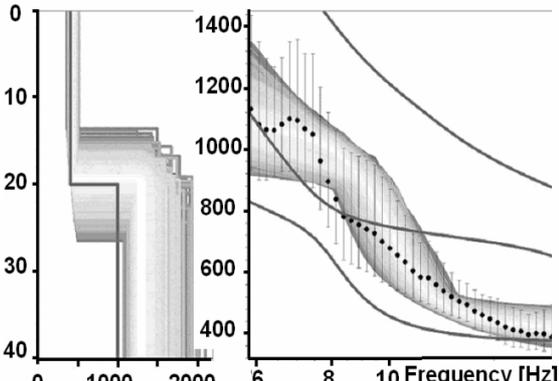
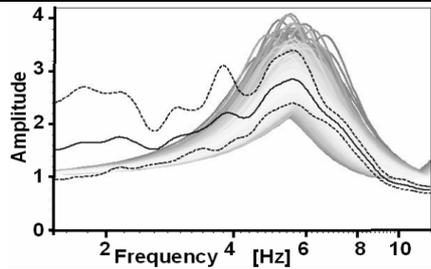
FK : Analyse dans le plan Fréquence- nombre d'onde

SPAC : SPatial AutoCorrelation

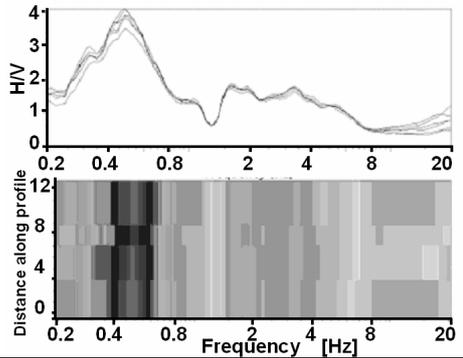
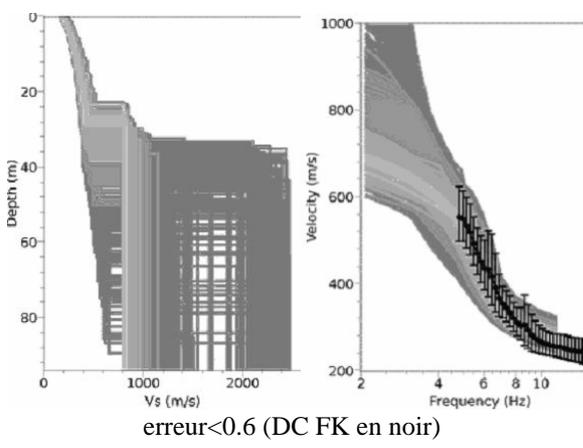
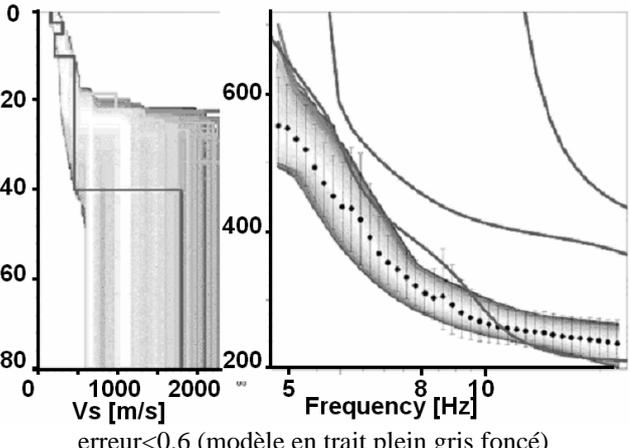
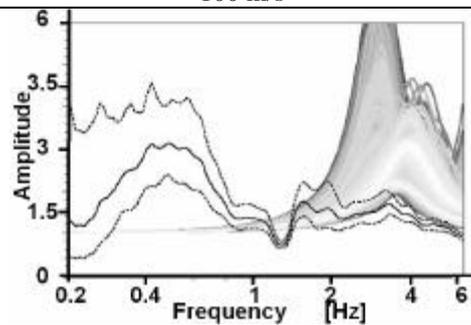
Fmax: fréquence maximale à laquelle est définie la courbe de dispersion

Fmin : fréquence minimale à laquelle est définie la courbe de dispersion

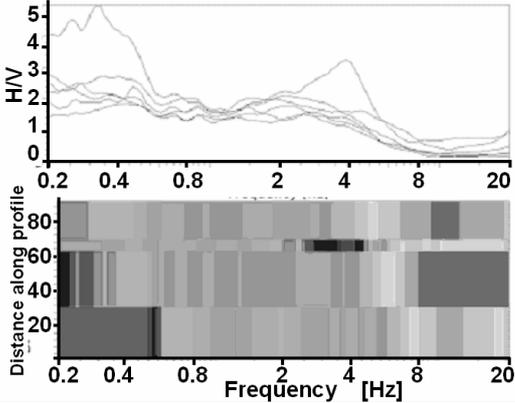
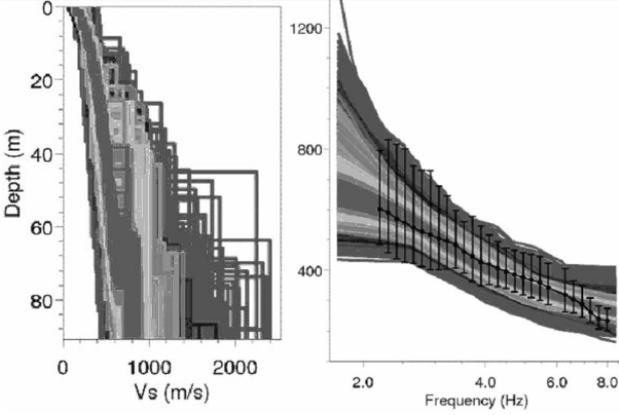
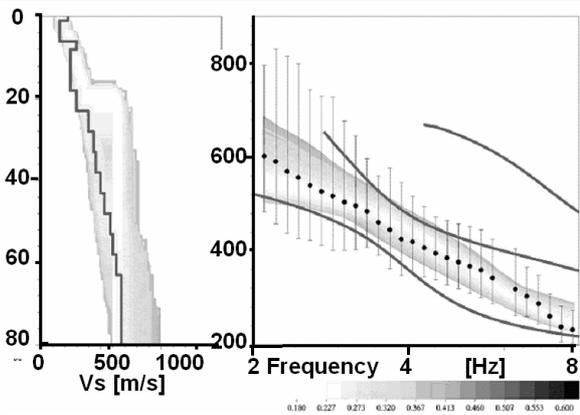
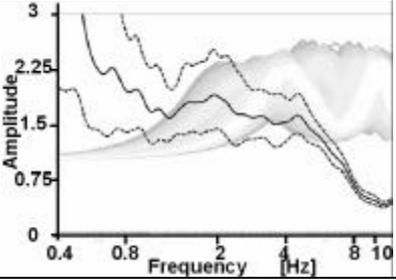
5.2.3.2. Aigio

Résultats des rapports H/V (réseau de 11m)		Pic ?	constant ?	score
		Oui à 5.8 Hz mais avec une faible amplitude	oui	1.5
Fk et SPAC		Espace initial des paramètres: 2c 50 mètres		
Profils après inversion de SPAC		Profils après inversion de FK		0.75
 <p>erreur<0.5 (profil cross-hole en noir, DC FK en points noirs)</p>		 <p>erreur<0.6 (modèle en trait plein foncé)</p>		
Courbe de dispersion de SPAC (vert)		Courbe de dispersion de FK (noire)		1
Étalement		130 m/s		1
$f_0(\text{SH}) = f_0(\text{H}/\text{V}) ?$ Réponse SH en niveau de gris, H/V en noir				1
Largeur de la bande de fréquence		5.9 à 18.7 Hz		0.5
Plat ?		A(18.7)-A(14.4)=388-457=-69m/s entre 15 et 25% de 388 m/s		0.5
Commentaires : - Le score total correspond à un résultat fiable. Estimation :370 <Vs10< 500 m/s. Cependant il y a toujours peu de précision sur la profondeur et la vitesse du substratum est très mal contrainte - Résultats retenus : On ne fait confiance qu'aux valeurs dans la 1 ^{ère} couche c'est-à-dire jusqu'à 15m environ, et une épaisseur de l'ordre de 20m est considérée comme un bon ordre de grandeur pour l'épaisseur de la 1 ^{ère} couche car la réponse SH et le H/V sont proches. - Les profils des mesures géotechniques confirment les résultats retenus, avec Vs10 géotechnique de 400 m/s soit 25% d'erreur au maximum, et les ordres de grandeur de l'épaisseur et de la vitesse du substratum sont bons. - Sources d'erreur : On remarque un saut du mode fondamental au 1 ^{er} mode supérieur de la courbe de dispersion.			Total:	6.25
				Ok

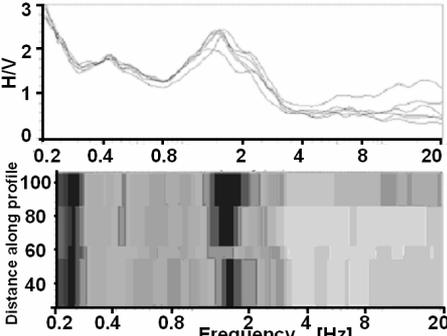
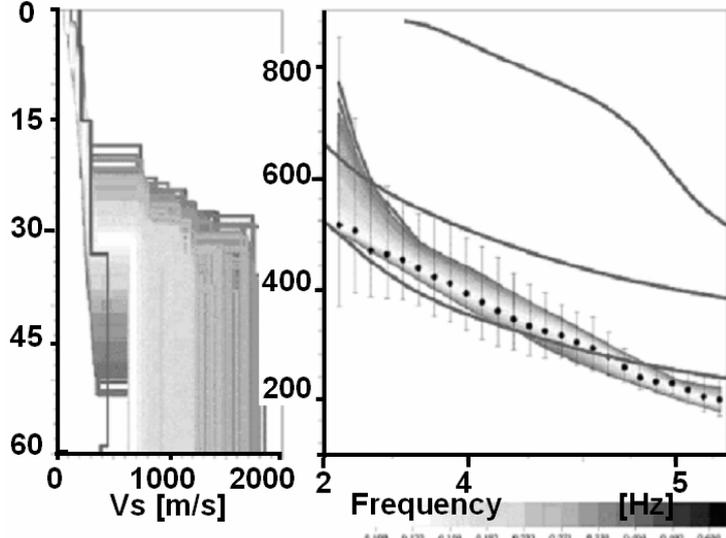
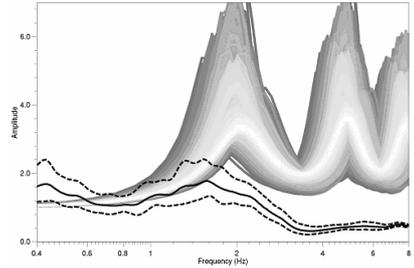
5.2.3.3. Korinthos

Résultats des rapports H/V (réseau 7.6 m)		Pic ?	constant ?	score
		Oui à 0.5 Hz	oui	2
Fk et SPAC		Espace initial des paramètres: 2c100m grad		
Profils après inversion de SPAC		Profils après inversion de FK		0.5
 <p>erreur<0.6 (DC FK en noir)</p>		 <p>erreur<0.6 (modèle en trait plein gris foncé)</p>		
Courbe de dispersion de SPAC (vert-jaune)		Courbe de dispersion de FK (noire)		1
Étalement		100 m/s		1
$f_0(\text{SH}) = f_0(\text{H/V}) ?$				0
Largeur de la bande de fréquence		2.3 à 16.5 Hz (en combinant FK et SPAC)		0.9
Plat ?		A(16) – A(12.3)=236-252=-16 m/s <15% de 236		1
<p>Commentaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le score total correspond à un résultat fiable. 194 m/s < Vs10 < 294 m/s avec l'inversion de la courbe de dispersion - Rmax = 30 m soit une profondeur d'investigation de 20m ce qui correspond aussi à l'épaisseur de la 1^{ère} couche pour laquelle on a confiance dans les valeurs de vitesse - Vs10= 212 m/s avec les mesures géotechniques, soit 38% d'erreur au maximum. Dans ce cas la vitesse des 10^{èmes} mètres est surestimée, et il y a toujours peu de précision sur la profondeur et la vitesse du substratum est très mal contrainte. - Pas de source d'erreur facilement identifiable. On remarque que l'inversion de vitesse n'est pas facilement appréhendable et pourtant à un rôle sur la valeur de Vs10 			Total :	6.4
				Non conservatif !

5.2.3.4. Lefkas

Résultats des rapports H/V (réseau de 58m)		Pic ?	constant ?	score	
		non	Il y a une forme qui est globalement constante	0.75	
Fk et SPAC		Espace initial des paramètres: 2c 100m grad			
Profils après inversion de SPAC		Profils après inversion de FK		0.75	
 <p>erreur < 0.5</p>		 <p>erreur < 0.4 (modèle en trait plein gris foncé)</p>			
Courbe de dispersion de SPAC (couleur)		Courbe de dispersion de FK (noire)		0.75	
Étalement		100 m/s		1	
$f_0(\text{SH}) = f_0(\text{H/V}) ?$				0.25	
Largeur de la bande de fréquence		2.2 à 8 Hz		0.6	
Plat ?		$A(8) - A(6.15) = 232 - 352 = -93 \text{ m/s} > 25 \% \text{ de } 232$		0	
<p>Commentaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le score total correspond au cas où la méthode n'est pas adaptée, $167 \text{ m/s} < \text{Vs}_{10} < 266 \text{ m/s}$ avec l'inversion de la courbe de dispersion - Aucun résultat n'est retenu étant donné le score final de 3.05 - $\text{Vs}_{10} = 213 \text{ m/s}$ avec les mesures géotechniques, soit 25% d'erreur au maximum, la notation est donc pessimiste. Notons l'hypothèse sur le modèle pour le calcul des courbes de dispersion: $V_p = 2 * V_s$, car on ne dispose que du profil $V_s(z)$. - Les modes supérieurs sont proches (DC du modèle géotechnique en rouge), la courbe de dispersion de FK semble être influencée par le 1^{er} mode supérieur. 				Total:	4.1
				conservatif	

5.2.3.5. Vartholomio

Résultats des rapports H/V	Pic ?	constant ?	score
	Oui à 1.5 Hz mais avec une faible amplitude	oui	1.5
Fk et SPAC	Espace initial des paramètres: 2c 100m grad		
Profils après inversion de SPAC	Profils après inversion de FK	0	
Courbes inutilisables	 <p>erreur < 0.4 (modèle en trait plein gris foncé)</p>		
	Courbe de dispersion de FK (points noirs)		0
C	70 m/s		1
$f_0(\text{SH}) = f_0(\text{H/V})$?			
Largeur de la bande de fréquence	2.2 à 5.6		0.4
Plat ?	$A(5.5) - A(4.2) = 200 - 281 = -81 \text{ m/s} > 25\%$ de 200		0
<p>Commentaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le total correspond à un résultat non fiable. Vs10 est estimé entre 110 m/s et 180 m/s. - Aucun résultat n'est retenu étant donné le score final - La vitesse Vs10 géotechnique est de 210 m/s et les résultats de l'inversion sous-estiment Vs10 jusqu'à 47.8 %, les résultats sont en effet peu fiables. 			<p>Total: 3.15</p> <p>ok</p>

5.2.3.6. Pirgos

Résultats des rapports H/V (réseau de 52m)		Pic ?	constant ?	score
		non	oui	1
Fk et SPAC		Espace initial des paramètres: 2c 100m grad		
Profils après inversion de SPAC		Profils après inversion de FK		0.75
<p>erreur<0.9 (modèle en trait plein gris foncé)</p>		<p>erreur<0.5 (modèle en trait plein gris foncé)</p>		
Courbe de dispersion de SPAC (couleur)		Courbe de dispersion de FK (noire)		0.75
Étalement		219 m/s		0
$f_0(SH) = f_0(H/V) ?$				0
Largeur de la bande de fréquence		2 à 20 Hz		1
Plat ?		$A(20) - A(15.5) = 375 - 400 = 25 \text{ m/s} < 15\% \text{ de } 375 \text{ m/s}$		1
<p>Commentaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le score total de 4.5 correspond à des résultats non fiables, les profils sélectionnés donnent $297 < V_{s10} < 516 \text{ m/s}$ - Aucun résultat n'est retenu avec un score final de 4.5 - V_{s10} géotechnique = 203 m/s soit plus de 60% d'erreur. Le résultat est en effet non fiable - L'erreur doit être due à la mauvaise interprétation de la DC qui se trouva sur <u>les modes supérieurs plus énergétiques</u> que le mode fondamental. Il est difficile de détecter cette erreur sans la connaissance du profil de vitesse ! 			Total:	4.5
				ok

5.2.3.7. Patras A

Résultats des rapports H/V (réseau de 60m)		Pic ?	constant ?	score
		Oui autour de 0.3 Hz mais pas toujours très prononcé	oui	1.5
Fk et SPAC		Espace initial des paramètres:		
Profils après inversion de SPAC		2c 100m grad		
		Profils après inversion de FK		0.75
Courbe de dispersion de SPAC (couleur)		Courbe de dispersion de FK (noire)		0.5
Étalement		60 m/s		1
$f_0(\text{SH}) = f_0(\text{H}/\text{V}) ?$				0
Largeur de la bande de fréquence		De 5.86 à 1.59 Hz		0.6
Plat ?		$A(5.86) - A(4.5) = 205 - 230 = 25 \text{ m/s} < 15\% \text{ de } 205 \text{ m/s}$		1
Commentaires : - Estimation avec FK : $125 < V_{s10} < 185 \text{ m/s}$, R max = 60m soit une profondeur d'investigation d'environ 40m - Seule la vitesse moyenne sur les 10 1ers mètres est prise en compte (pas plus car le H/V ne correspond pas à la réponse SH) - Nous n'avons pas de profil pour confronter nos résultats - Les vitesses connues dans ce secteur (cf. Patra2) montre des vitesses beaucoup plus élevées. Ces faibles vitesses peuvent être la cause d'effets de site non négligeables			Total:	5.35
				?

5.2.3.8. Patras 2

Résultats des rapports H/V (réseau de 15m)	Pic ?	constant ?	score
	Oui autour de 0.32 Hz, mais pas très net en basse fréquence	oui	1.5
Fk et SPAC	Espace initial des paramètres:		
	2c 100m grad		
Profils après inversion de SPAC	Profils après inversion de FK	0.5	
<p>erreur<0.7 (modèle en rouge)</p>	<p>erreur<0.5 (modèle en rouge)</p>		
Courbe de dispersion de FK (noire)	Courbe de dispersion de SPAC (couleur)	0.75	
Étalement	225 m/s	0	
$f_0(\text{SH})=f_0(\text{H}/\text{V})$?		0	
Largeur de la bande de fréquence	1.7 and 5 Hz	0.5	
Plat ?	$A(5)-A(3.8)=321-373=54\text{m/s}$ entre 15 et 25% de 321m/s	0.5	
<p>Commentaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le score total de 4.5 correspond à des résultats non fiables, les profils sélectionnés donnent : $215 < V_{s10} < 440$ m/s et le forage donne $V_{s10} \approx 316$ m/s - Aucun résultat n'est retenu avec un score final de 3.75 - La vitesse moyenne sur les 10^{1ers} mètres est estimée à 39 % près au maximum, malgré la probable mauvaise interprétation de la courbe de dispersion qui se situe sur le 1^{er} mode supérieur. Les résultats restent trop étalés et donc peu fiables comme l'indique la notation. - La source d'erreur semble être l'estimation de la DC sur le 1^{er} mode supérieur. - Remarque : Les inversions de vitesse ne sont pas détectées car la DC est mal estimée 			<p>Total: 3.75</p> <p>ok</p>

5.2.3.9. Conclusion

Les principales remarques que l'on peut faire sur cette étude sont :

Les fréquences fondamentales de résonance, obtenues avec la méthode H/V, sont globalement assez basses pour cette collection de sites grecs. Dans ces cas il est difficile de décrire la colonne de sol en entier car nous n'avons pas des ouvertures de réseaux assez grandes pour atteindre la profondeur correspondant à la fréquence fondamentale. C'est pourquoi l'interprétation du saut de vitesse dans les profils obtenus par inversion doit être faite avec précaution car elle correspond rarement à un saut réel. Pour conclure, on peut avoir confiance dans le profil de vitesse avant ce saut s'il existe ou jusqu'à environ un tiers du diamètre le plus large.

Généralement l'analyse SPAC donne des informations plus basses fréquences que l'analyse FK. Ceci nous permet d'allonger la courbe de dispersion obtenue par FK. L'inversion de cette dernière courbe nous donne souvent des informations plus précises, cependant l'estimation de la vitesse sur les 10 premiers mètres n'est pas changée. Mais l'utilisation des deux analyses reste pertinente car la comparaison des résultats des deux analyses nous donne un degré de confiance supplémentaire.

Il arrive souvent de mal interpréter la courbe de dispersion qui saute du mode fondamental au 1^{er} mode supérieur (comme on le voit pour Agio, Patras2 et Lefkas qui est juste influencé par le 1^{er} mode sans montrer de saut) voire au 2^{ème} mode supérieur (Pirgos). Cependant comme ces modes sont proches entre eux à hautes fréquences l'estimation de la vitesse sur les 10 1^{ers} mètres reste acceptable avec une erreur de 19% en moyenne pour les sites fiables (qui ont un score final strictement supérieur à 4.5).

Pour les scores inférieurs à 4.5 l'estimation de Vs10 est souvent dans une large gamme de vitesse qui peut présenter jusqu'à 60 % d'erreur. La notation est pertinente pour juger de la qualité des résultats, en particulier sur l'estimation de Vs10. Elle peut cependant être quelques fois un peu pessimiste (cf. Lefkas), mais reste presque toujours conservative (sauf pour Korinthos).

La précision sur les courbes de dispersion calculées ne permet pas de définir les inversions de vitesse observés sur les profils géotechniques, ni les variations dans de petites couches. On se pose alors la question de savoir quelle précision nous est nécessaire pour continuer vers une étude des effets de site.

Cette étude nous a permis d'une part, de valider le protocole, et d'autre part, de mettre en valeur les problèmes d'une courbe de dispersion mal estimée qui ne permet donc pas d'avoir une connaissance détaillée sur le profil de vitesse. Cette mauvaise estimation semble souvent liée aux modes supérieurs. Pour conclure, avec les méthodes combinées de bruit de fond, le profil Vs(z) n'est pas déterminé entièrement, mais le protocole permet de connaître les sites où les paramètres de fréquence de résonance et de vitesse moyenne en sub-surface peuvent être déterminés de manière fiable sur une zone correspondant à l'étendue du réseau. Rappelons qu'une caractérisation très fine peut aussi s'avérer très ponctuelle et absolument pas robuste dès que l'on fait d'autres mesures similaires à quelques distances. Les mesures en réseau peuvent alors être avantageuses car elles donnent une valeur plus significative pour une zone donnée.

5.2.4. Blind Test ESG Grenoble 2006

Un article [Cadet, 2006b] a été écrit pour le 3^{ème} symposium international sur les effets de la géologie de surface, « Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion », dans le cadre de l'essai en aveugle organisé, à Grenoble, en septembre 2006. Cet article s'intitulant "Blind test " reprend les grandes lignes du protocole en anglais. Les anglophones pourront donc s'y référer. Cependant il a été écrit avant la réalisation plus formelle sur la notation du protocole.

6. Conclusion

Dans un premier temps l'approche numérique (paragraphe 2 et 3) a consisté à :

- d'une part, observer les paramètres influant sur l'inversion et,
- d'autre part, à observer quelques-uns des effets sur l'étape de calcul des courbes caractéristiques (courbe de dispersion et courbes d'autocorrélation)

Les principales conclusions de cette 1^{ère} étape sont l'importance de déterminer les courbes caractéristiques sur une bande de fréquence la plus large possible, la légère amélioration de contraindre l'inversion par des données a priori, la complémentarité des analyses FK et SPAC.

Dans un deuxième temps, quelques études sur des données réelles (paragraphe 4) confirment les conclusions précédentes. De plus ces études nous permettent d'insister sur la nécessité :

- d'enregistrer avec plusieurs tailles de réseaux afin de balayer une bande de fréquence la plus large possible
- de combiner les types d'analyse (dans ces cas d'étude, FK et SPAC mais aussi SASW) afin d'approuver les résultats et de détecter les erreurs d'interprétations possibles comme les sauts de mode (fondamental à supérieurs) sur la courbe de dispersion
- de prendre en compte des données a priori qui ont un effet plus notoire dans le cas d'études réelles où les résultats (profils de vitesse) sont plus dispersés
- de conclure avec une gamme de profils possibles, puisque le résultat de l'inversion n'est pas unique, en précisant le but de l'étude (vitesse en surface, profondeur des sédiments etc..)

Ces étapes numériques et de terrain nous ont aidées à mettre en place un protocole d'étude (paragraphe 5) visant à aider l'utilisateur afin de minimiser son influence sur le résultat final et à fournir un degré de confiance. Ce protocole se découpe en neuf étapes que l'on peut résumer ainsi :

1. Mesures H/V pour vérifier l'hypothèse 1D
2. Choix des réseaux
3. Analyses SPAC et FK et inversion ; puis comparaison et combinaison des résultats
4. Détermination de la largeur maximale de la bande de fréquence
5. Estimation de l'étalement de la vitesse moyenne sur les 10 premiers mètres des modèles sélectionnés
6. Vérification de la cohérence des profils résultant de l'inversion avec les mesures H/V (fréquences de résonance empirique et venant des modèles)
7. Détermination de la profondeur caractérisée
8. Comparaison aux données existantes (géotechnique, géophysique)
9. Calcul du degré de confiance et conclusion sur la fiabilité des résultats

Enfin ce protocole a été testé sur des sites réels (paragraphe 5.2), montrant ainsi l'utilité de prendre en compte les différentes étapes constituant le protocole. En conclusion, les méthodes combinées utilisant le bruit de fond sont capables de déterminer la fréquence de résonance d'un site et la vitesse des ondes S au moins sur les 10 premiers mètres, dans un milieu tabulaire.

En ouverture, notons qu'il reste encore des domaines à préciser et à étudier d'avantage :

- La complémentarité de la méthode SASW qui apporterait d'une part des précisions sur la vitesse à haute fréquence et d'autre part, une distinction parfois plus claire des différents modes sur la courbe de dispersion.(exemple de Saint Guillaume sur la Figure 16).
- Les études paramétriques pour compléter les études synthétiques qui ne sont pas exhaustives, notamment pour préciser la capacité de détecter une couche d'une certaine épaisseur connaissant la précision dans la détermination des courbes caractéristiques.
- L'utilisation des ondes de Love.

Chapitre II.

Fonction d'amplification selon la vitesse moyenne et la fréquence de résonance

7. Introduction

La finalité de cette thèse est une prise en compte plus précise que les réglementations actuelles et néanmoins simple de l'effet de site, en ajustant, pour un site particulier, un spectre de réponse réglementaire défini au rocher, caractérisé par des paramètres physiques facilement mesurables en terme de temps, de coût et de densité spatiale. La fonction permettant d'estimer l'effet de site à partir d'un spectre au rocher est appelée « *fonction correctrice* ».

7.1. **Justification du choix des paramètres f_0 et $V_s z$ pour caractériser l'effet de site**

Les classifications de sol actuelles sont principalement basées sur la vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur les 30 premiers mètres, paramètre maintenant noté V_{s30} , mais aussi sur les résultats d'autres essais comme le SPT, CPT. On considère que ces autres essais suivent la même tendance que V_s . Aucune classification ne fait apparaître la fréquence de résonance comme paramètre caractéristique. C'est pourtant un paramètre qui donne des informations intéressantes sur les fréquences propices à être amplifiées dans le cas d'effet de site. De plus la fréquence de résonance et la vitesse de sub-surface s'avèrent être les paramètres physiques d'un site qui s'obtiennent facilement avec les mesures combinées de bruit de fond, d'après la conclusion du 1^{er} chapitre. De par la facilité d'acquisition et le potentiel d'information que contiennent ces paramètres, il nous a paru judicieux de proposer une fonction correctrice basée sur ces deux paramètres :

- f_0 la fréquence fondamentale du site;
- $V_s z$ la vitesse moyenne sur le z premiers mètres, a priori avec z entre 5 et 30 mètres.

La vitesse moyenne des ondes S sur les z premiers mètres $V_s z$:

Mesures intrusives, mesures non destructives, mesures actives, mesures passives, la mesure de cette vitesse reste nature à un débat [Boore, 2004]. Dans notre étude la contrainte est de définir une vitesse caractéristique qui réponde à deux conditions:

- ne pas demander un coût important; mais
- être suffisante pour donner une caractéristique pertinente au site.

Ces deux conditions sont difficiles à combiner. En effet, pour caractériser en détail un site il faudrait avoir les vitesses des ondes S et P jusqu'au substratum et ce non seulement au droit du site, mais aussi en différents points afin de connaître sa géométrie pour pouvoir repérer les effets 2D et 3D. C'est à dire utiliser des méthodes lourdes, longues et onéreuses, ce qui ne remplit pas la première condition. Cette étude se place dans le cadre d'une caractérisation générale, pour une étude type de risque, comme il peut être demandé pour l'étude d'un plan de prévention des risques (PPR) ou d'une construction spécifique. Ce type de caractérisation ne doit pas être lourd à réaliser car il peut concerner un large territoire. Nous cherchons un équivalent du V_{s30} , choisi à l'origine sur des critères essentiellement pratiques: on pouvait faire en 1 jour un forage SPT à 30 m /100 pieds de profondeur et à partir de là estimer le profil V_s via des corrélations $V_s / NSPT$. Le paramètre V_{s30} ne donne pas une caractérisation complète d'un site mais donne une information

ayant une signification pratique immédiate en ingénierie sismique. De plus il est très souvent répertorié et mesuré par les entreprises, il existe donc une base de données de ce paramètre qu'il serait dommage de mettre de côté.

Étant donné le contexte appliqué de cette étude, la vitesse moyenne sur les 30 premiers mètres sera un des paramètres à la fois à tester et par rapport auquel il faudra comparer d'autres méthodes de classification. De plus, nous avons vu que les mesures de bruit de fond en réseau, méthode non destructive et peu coûteuse, nous donnent des informations sur la vitesse des ondes S en surface, la profondeur dépendant du type de terrain et des ouvertures utilisées pour les réseaux. Nous prendrons aussi en considération diverses vitesses moyennes sur 5, 10, 20 et 30 mètres. Nous chercherons à tester le potentiel de caractérisation de l'effet de site de ces vitesses moyennes. Rappelons que la vitesse moyenne sur les z premiers mètres correspond à la distance z divisée par le temps de trajet moyen sur cette distance. Ce temps de trajet est défini par $t(z) = \int_0^z \frac{dz}{V_s(z)}$ et la vitesse moyenne par $V_{s,z} = \frac{z}{t(z)}$.

La notation utilisée sera : V_{sz} pour la vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur les z premiers mètres et $V_s(z)$ pour la vitesse à la profondeur z .

La fréquence de résonance f_0 :

La fréquence de résonance est un paramètre principalement lié à la vitesse des ondes et à la profondeur du substratum. Il est facilement obtenu à partir de mesures de bruit ambiant grâce à la méthode H/V validée par de nombreux auteurs ([Nakamura, 1989], [Bonney-Claudet, 2004], [SESAME, 2001-2004]). C'est donc une information supplémentaire facile à obtenir et qu'il serait dommage de négliger. La fréquence de résonance comme caractéristique d'un site est a priori pertinente pour tous les sites présentant une couche alluviale ou sédimentaire en surface, mais peut aussi être utilisée pour des sites rocheux en tant qu'indicatrice de la présence d'une zone d'altération superficielle. Elle présente aussi l'avantage d'être apte à détecter l'existence d'une grande épaisseur de sédiments, information inaccessible avec la seule quantité V_{sz} , $z < 50-100$ mètres. La fréquence fondamentale de résonance nous donne la fréquence à partir de laquelle il y a une amplification du mouvement sismique, amplification dont la valeur et la largeur de la bande de fréquence dépendent d'un très grand nombre de facteurs comme notamment le profil de vitesse et d'amortissement, le contraste d'impédance, la géométrie des remplissages, la topographie de surface.

La démarche de ce chapitre est de montrer que ces deux paramètres f_0 et V_{sz} sont complémentaires et que leur combinaison peut donner un bon ordre de grandeur de l'effet de site de la zone étudiée. L'idée est de construire une fonction correctrice dépendant de f_0 et V_{sz} . Pour proposer cette fonction correctrice il est nécessaire de disposer des vitesses des ondes S au droit de stations sismiques. Le nombre d'enregistrements sismiques doit être suffisamment important pour permettre une estimation significative de l'effet de site. Même si le nombre de stations sismiques a considérablement augmenté, il est rare de trouver une station bien caractérisée en termes géotechniques. Le réseau japonais Kik-net répond à ce besoin puisqu'il fournit pour chacune de ses 660 stations un profil de vitesse des ondes S et P, avec plus de 4200 enregistrements de séismes.

7.2. Synthèse de la démarche

Dans le but de caractériser l'amplification du mouvement dû aux conditions géologiques locales, on cherche à mettre en place une fonction modifiant le spectre de réponse au rocher. Pour cela les données du réseau japonais Kik-net seront utilisées et analysées selon la démarche décrite ci-après.

Le réseau japonais Kik-net : les données de base

Après le séisme de Hyogo-ken Nanbu Kobe en 1995, le gouvernement japonais, dans le but d'améliorer la prévention de destructions par les séismes, a installé des réseaux de plusieurs stations sismiques pour l'observation des mouvements forts. Le réseau Kik-net (Kiban-Kyoshin) en fait partie. Kiban pour "Principe essentiel" et Kyoshin pour "mouvement fort". Le réseau Kik-net a été installé à partir de 1998, il regroupe 660 couples de stations avec une station en surface et une seconde en fond du puits de forage. La plupart des stations ont été placées sur des sites avec une fine couche de sédiments. Le déclenchement est donné par le capteur du bas si le seuil de $2 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-2}$ est dépassé [Pousse, 2005].

Nous avons à notre disposition, grâce à Guillaume Pousse et Fabian Bonilla, une base de données regroupant 622 stations avec des profils venant de down-hole, validés par les responsables du site Internet Kik-net (<http://www.kik.bosai.go.jp/>, [communication personnelle]). Les forages atteignent une couche plus dure qui est parfois (mais pas forcément) le substratum rocheux. Parmi elles, 538 ont des enregistrements pour la période comprise entre 1998 et Octobre 2004, que nous utiliserons ici. Je ferai référence à cette base de données avec le terme « base de données Kik-net », terme abusif car la base de données Kik-net est légèrement plus large puisqu'elle contient des enregistrements plus récents d'une part, et que seuls les enregistrements d'événements de magnitude M_{JMA} supérieure à 4,0 ont été sélectionnés [Pousse, 2005]. De plus dans cette base de données ne figurent que les séismes de type crustaux dont la profondeur a été localisée dans les 25 premiers kilomètres de la croûte [Pousse, 2005]. Et enfin les enregistrements ont été filtrés entre 0.25 et 25 Hz

Notation :

- SSR : Standard Spectral Ratio, rapport des spectres de Fourier de la partie la plus énergétique (il n'y a pas de pointage des ondes S) de l'enregistrement du site en surface sur l'enregistrement à la référence en surface. On fait en général la moyenne logarithmique sur l'ensemble des événements disponibles;
- SSRbh : Standard Spectral Ratio Borehole : rapport des spectres de Fourier de la station en surface sur la station en profondeur, moyenne logarithmique sur l'ensemble des événements ;
- RSR : Rapport des Spectres de Réponse: rapport des spectres de réponse de la station en surface sur une station de référence en surface, moyenne logarithmique sur l'ensemble des événements ;
- RSRbh : Rapport des Spectres de Réponse des données de forage (borehole) : rapport des spectres de réponse de la station en surface sur la station en profondeur, moyenne logarithmique sur l'ensemble des événements ;

- FT1D(z) : Fonction de transfert pour un récepteur situé à z mètres de profondeur, d'un site ayant un profil de vitesse $V_s(z)$, définie par un calcul de la réponse à une onde SH verticalement incidente ;
- FT1Dbh : Fonction de transfert de puits, rapport FT1D(0) sur FT1D(z_{max}), avec z_{max} la profondeur du forage
- H/Vh_F : rapport des spectres de Fourier de la composante horizontale sur la composante verticale, du capteur en surface (haut), avec une moyenne logarithmique sur l'ensemble des événements ;
- H/Vb_F : rapport des spectres de Fourier de la composante horizontale sur la composante verticale, du capteur en profondeur (bas), avec une moyenne logarithmique sur l'ensemble des événements ;
- H/Vh_rep : rapport des spectres de réponse de la composante horizontale sur la composante verticale, du capteur en surface, avec une moyenne logarithmique sur l'ensemble des événements ;
- H/Vb_rep : rapport des spectres de réponse de la composante horizontale sur la composante verticale, du capteur en profondeur, avec une moyenne logarithmique sur l'ensemble des événements ;
- Normaliser : ramener un rapport site sur référence à une référence standard.

Présentation des études menées : démarche et détail de chaque étape

La mise en œuvre de la fonction correctrice étant complexe, une synthèse de la démarche est proposée ici :

- Tout d'abord au paragraphe 8.1 les données sont présentées. Sur les 622 stations, nous disposons d'enregistrements de séisme sur 538 d'entre elles.
- Le but du paragraphe 8.2 est de caractériser chaque site par des vitesses moyennes sur les 5 à 100 premiers mètres et sa fréquence de résonance fondamentale. Dans un premier temps nous nous intéresserons à la validation du profil de vitesse puis à la distribution des vitesses.
 - o Au paragraphe 8.2.1 la qualité du profil de vitesse des ondes S sera vérifiée en comparant la fréquence du premier pic du SSRbh à la fonction de transfert FT1Dbh. On estime que si le profil $V_s(z)$ est bien estimé avec les mesures down-hole, alors les fréquences des 1ers pics du SRbh et de la FT1Dbh doivent être proches à 20% près.
 - o Au paragraphe 8.2.2, une étude traite des profils de vitesse de 495 stations sélectionnées, en comparaison avec les travaux de Boore [Boore, 2004]. Ce paragraphe nous permettra d'une part de caractériser les sites par les vitesses moyennes sur les 5, 10, 20, 30, 50 et 100 premiers mètres, et d'autre part d'observer la distribution de ces vitesses moyennes et leur inter-corrélations. Enfin ces relations seront une aide pour la définition des classes de vitesse qui nous permettront d'établir des réponses moyennes à partir des amplifications mesurées sur les stations Kik-net.
- Dans un 2^{ème} temps, sur les 495 stations, la fréquence de résonance fondamentale sera déterminée suivant une démarche particulière (paragraphe 8.2.3) en comparant les rapports SSRbh et les rapports H/Vh_F et H/Vb_F. On essayera ainsi de repérer les sites dont le forage n'atteint pas le dernier contraste mécanique majeur, et où donc même l'enregistrement en profondeur est affecté par une amplification basse fréquence.
- Le but du paragraphe 9 sera alors de déterminer les fonctions d'amplification de la surface par rapport à la profondeur, pour chaque site. Cette opération est conduite simultanément sur les spectres de Fourier et sur les spectres de réponse. Comme le but

final est d'appliquer des fonctions correctrices au spectre de réponse « rocher », une attention particulière est attachée à la comparaison de ces deux types de rapport, à la fois en termes d'amplitude et de bande de fréquence sur laquelle ils sont comparables.

Avec les informations obtenues dans les paragraphes 8 et 9, nous abordons dans les paragraphes **10** à **12** suivants, la caractérisation de l'effet de site avec les paramètres de vitesse moyenne V_{SZ} et de fréquence de résonance f_0 :

- Au paragraphe **10** les problèmes liés au choix du site de référence seront évoqués. En effet il apparaît que les caractéristiques des fonds de forage utilisés comme référence, présentent une très grande dispersion en termes de profondeur z_{max} et de vitesse V_{SDH} , sur l'ensemble de la base de données, et que cela peut biaiser les comparaisons des rapports site/profondeur d'une station Kik-net à l'autre. Le but de ce paragraphe sera de déterminer un rocher de référence standard.
- Nous proposerons donc au paragraphe **11** une procédure de normalisation des rapports surface / profondeur pour se ramener à ce rocher de référence standard. Aucune procédure de ce genre n'ayant été précédemment proposée dans la littérature, nous allons essayer plusieurs possibilités.
- Après cette homogénéisation, il est important de pointer les différences entre un rapport d'un signal en surface sur un signal en profondeur avec un rapport de deux signaux en surface. En effet le signal au rocher en profondeur intègre partiellement l'effet de surface libre et des effets d'interférence destructive en profondeur ce qui n'est pas le cas au rocher en surface. Le but du paragraphe **12** sera de corriger ces effets de surface libre dus à la référence en profondeur pour se rapprocher au plus près d'un rapport de spectres surface sur surface.
- Enfin, une fois tous ces préliminaires accomplis, il sera enfin possible, au paragraphe 13, de proposer une classification basée sur la fréquence de résonance f_0 et/ou la vitesse moyenne des ondes S V_{SZ} sur les z premiers mètres, avec z allant de 5 à 30 mètres. A ces classes sera associée une fonction correctrice des spectres définis au rocher, pour prendre en compte l'effet de site. Différentes classifications seront proposées, leur efficacité en termes de réduction de la variance sera analysée et discutée, ce qui permettra de recommander plus particulièrement certaines d'entre elles.

8. Études sur les données de la base de données japonaise Kik-net

Les buts principaux sont de :

- Présenter les données avec les enregistrements de séismes et les mesures de vitesse ;
- Caractériser chacun des sites par des vitesses d'ondes de cisaillement moyennes et la fréquence de résonance du site.

8.1. Distribution des données

Notre base de données comprend 622 sites avec des profils Vs et Vp. Parmi eux 84 sites n'ont pas d'enregistrements de séismes. Il reste alors 538 sites avec au moins un enregistrement de séisme. Notons que parmi ces 538 il y en a 193 sur lesquels on dispose de strictement moins de 3 événements. Les enregistrements ont été filtrés entre 0.25 et 25 Hz.

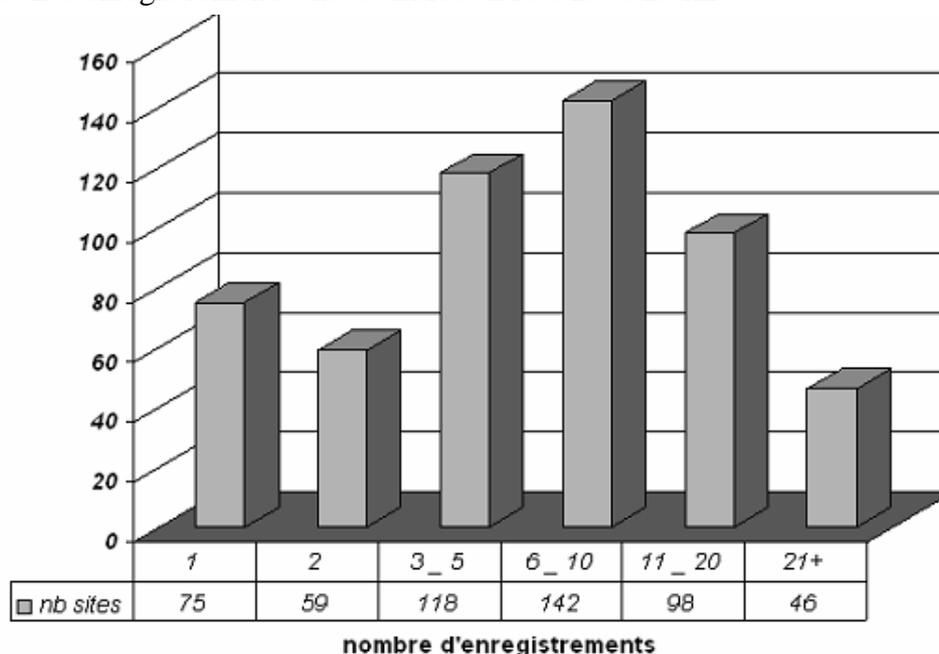


Figure 81: Distribution du nombre d'enregistrements par site

Il y a au total 4 704 enregistrements d'événement, soient 28 224 traces en comptabilisant les trois composantes des deux capteurs, en surface et en profondeur. Les données ont été préalablement filtrées pour diminuer considérablement l'impact qu'ont les stations non déclenchées sur les résultats d'analyse. Cette sélection est décrite dans la thèse de G. Pousse [Pousse, 2004] au paragraphe 2.2 qui évoque le filtre de Fukushima. Afin de voir le type d'évènements sélectionnés dans cette base de données, les distributions de la magnitude, du PGA (Peak Ground Acceleration, accélération maximale sur les 3 composantes sur le capteur en surface) et de la distance sont observées et représentés sur la Figure 82, la Figure 83 et la Figure 84.

- Il y a 88 enregistrements avec un PGA inférieur à 1 cm/s^2 , soit 1.87% ; 2772 enregistrements avec un PGA inférieur à 10 gal, soit environ 58%, et 134 enregistrements avec un PGA supérieur à 100 gal, soit 2.85%.
- 2391 enregistrements correspondent à une magnitude strictement inférieure à 4.5, soit 50.8% des enregistrements.
- Les enregistrements qui correspondent à la fois une magnitude supérieure à 4.5 et un PGA supérieur à 10 gal sont au nombre de 2362, soit 50.2% des enregistrements.
- La distance s'étend de 0.5 km à 343 km.
- Il y a des séismes forts à courte distance, ce qui est rare dans les bases de données européennes

La base de données à notre disposition représente une large gamme de distance, magnitude et PGA.

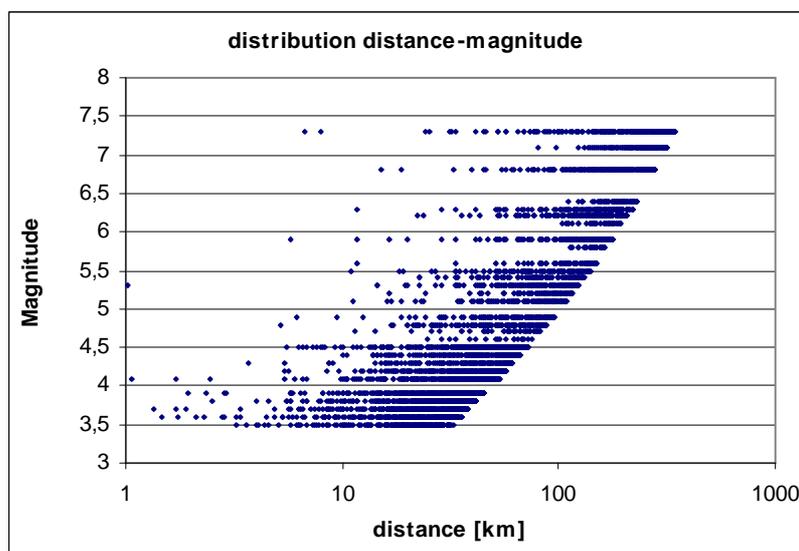


Figure 82: Distribution de la distance en km et de la magnitude de la base de données extraite de Kik-net

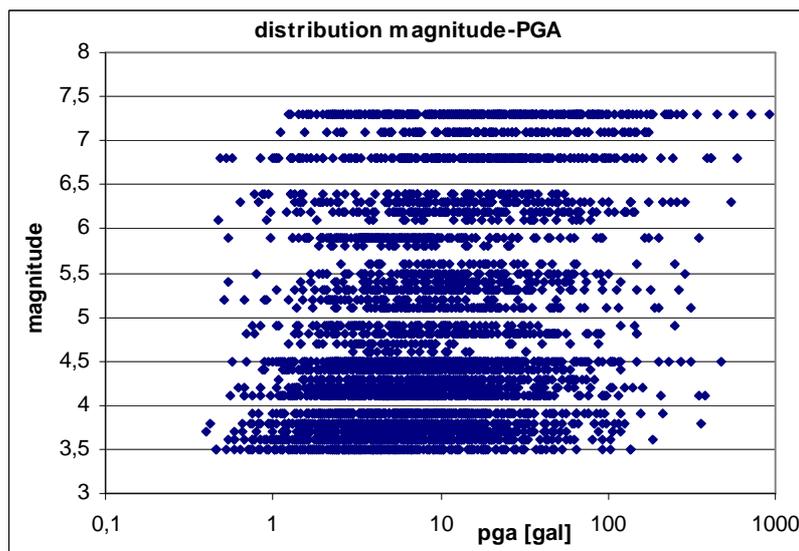


Figure 83: Distribution du PGA [gal] (le maximum sur les trois composantes) et de la magnitude de la base de données extraite de Kik-net

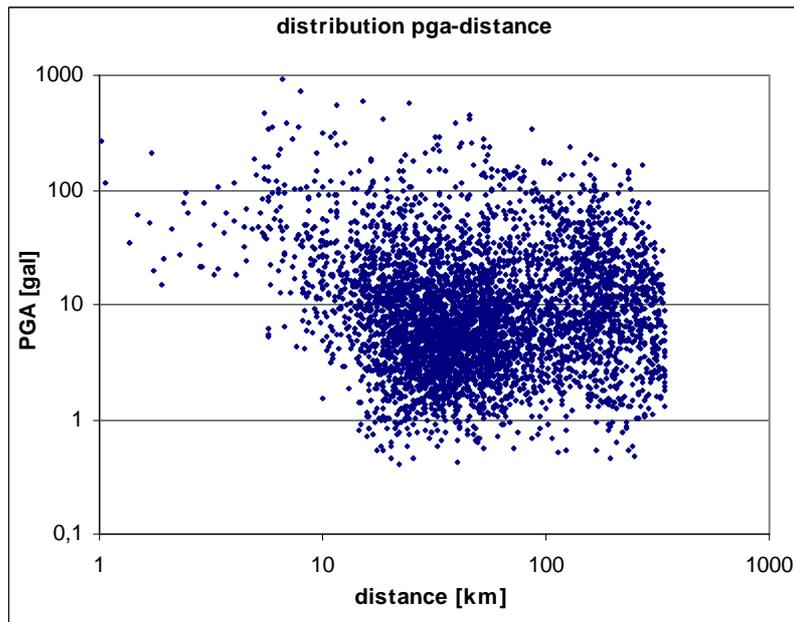


Figure 84: Distribution de la distance en km et du PGA de la base de données extraite de Kik-net

Tableau 10: distribution des enregistrements selon la magnitude et le PGA

PGA[gal]=> Magnitude	1-	1-3	3-10	10-30	30-100	100-300	300+	total
<6.5	4	58	146	218	152	48	9	635
5.5-6.5	12	72	260	199	101	24	2	670
4.5-5.5	13	144	410	303	112	26	1	1009
>3.5	59	520	1074	545	168	22	3	2391

8.2. Caractérisation des sites par la vitesse moyenne sur les z premiers mètres V_{sz} et la fréquence de résonance f_0

Ce chapitre vise à faire un prétraitement des sites de la base de données Kik-net. La démarche de l'étude est de donner une estimation des effets de site grâce aux paramètres V_{sz} , la vitesse moyenne des ondes S sur les z premiers mètres, z variant de 5 à 30 mètres et f_0 la fréquence de résonance. Il faut donc caractériser chacun des 622 sites par V_{sz} et f_0 en s'assurant que ces deux paramètres soient bien définis.

Dans un premier temps les profils de vitesse $V_s(z)$ seront vérifiés grâce à l'observation des fréquences de résonance numériques et empiriques. Puis, ces profils ayant été vérifiés, nous nous intéresseront à l'étude des vitesses en particulier à la distribution des vitesses moyennes. Enfin, pour chaque site, la fréquence de résonance du site sera déterminée à partir de l'observation de deux rapports empiriques : surface sur profondeur (SSRbh, voir en annexe le paragraphe 15.4.3) et horizontal sur vertical.

8.2.1. Vérification du profil de vitesse des ondes S, $V_s(z)$

Les profils de vitesse sont déterminés par down-hole méthode. Cette méthode consiste à mesurer des temps de parcours entre une source en surface et un capteur à différentes profondeurs du forage. La détermination des temps de propagation des ondes P et S entre l'émission et la réception permet de calculer les vitesses moyennes des ondes P et S, connaissant les distances séparant les points d'émission et de réception. L'interprétation des mesures fournies des vitesses de moins en moins précises pour des profondeurs de plus en plus grandes. Cependant, les vitesses moyennes sont valables puisque c'est ce qu'on mesure. Cela représente un intérêt puisque nous allons principalement travailler sur des vitesses moyennes. L'autre biais de cette méthode est la déviation des forages qui induit une erreur dans la distance séparant les deux capteurs donc un biais dans l'estimation des vitesses. Les déviations de forage ne sont pas fournies avec les profils de vitesse. Mais d'après les responsables du site Kik-net (<http://www.kik.bosai.go.jp/>) les profils mis à disposition sont fiables [Communication personnelle, 2006].

Cependant la base de données de profils disponible via Internet est beaucoup plus restreinte que celle que nous avons eu grâce à G. Pousse et F. Bonilla. Il nous a donc paru judicieux de vérifier si ces profils pouvaient être considérés comme étant correctement estimés. Pour cela nous allons comparer les fréquences de résonance 1D correspondant à la couche de sol entre la surface et le fond de forage estimée de deux manières différentes : f_{0m} estimée avec le profil de vitesse et f_{0e} estimée empiriquement. La fréquence f_{0m} est obtenue par une modélisation à une dimension de la réponse du sol à une sollicitation d'une onde SH, les paramètres d'entrée sont principalement les valeurs du profil de vitesse. La fréquence de résonance f_{0e} est estimée à partir de données de séismes. La comparaison s'effectue uniquement sur la fréquence, l'amplitude n'est pas à considérer car dans le cas de la modélisation elle est dépendante de nombreux paramètres physiques, comme par exemple l'amortissement, la densité, les effets 2D-3D, dont nous n'avons pas connaissance. Lorsque les fréquences f_{0m} et f_{0e} sont proches à plus ou moins 20 % le profil des ondes S est considéré comme étant fiable. Nous allons présenter brièvement la détermination de ces deux fréquences.

8.2.1.1. La fréquence de résonance définie par modélisation f_{0m}

La fréquence de résonance f_{0m} est estimée par le premier pic sur le rapport de la fonction de transfert en surface sur la fonction de transfert en profondeur. La fonction de transfert est déterminée par une modélisation à une dimension qui donne la réponse d'une structure tabulaire (horizontalement stratifiée) à une onde plane incidente de type SH dans notre cas. Les hypothèses principales sont en annexe, paragraphe 15.4.1.1.

Le rapport de la fonction de transfert en surface, notée FT_surf, sur la fonction de transfert en profondeur, notée FT_prof, est appelé « Fonction de Transfert de puits ou borehole », notée FTbh. La FTbh est comparable au rapport surface sur profondeur des spectres de Fourier (voir paragraphe 15.4.1.2) en terme fréquentiel. Cependant les amplitudes ne sont pas comparables. En effet, tout d'abord il y a le problème évoqué de l'influence des paramètres, tels que l'amortissement, sur la valeur de l'amplitude des fonctions de transfert, ensuite les interférences destructives entre ondes montantes et ondes descendantes introduisent des valeurs nulles sur la fonction de transfert en profondeur, cela conduit à une amplitude infinie sur le rapport des fonctions de transfert FTbh. Ces interférences destructives existent bien mais dans un cas réel elles n'aboutissent pas à une énergie complètement nulle car le champ d'ondes incident est en fait un mélange d'ondes P et S d'angles d'incidence variés. Le rapport des spectres de Fourier des

données a donc une amplitude très différente. Enfin, dans le principe les fonctions empiriques de transfert surface sur profondeur sont toujours évaluées à partir de spectres lissés. Notons que la fréquence destructrice définie sur la fonction de transfert en fond de forage correspond à la fréquence de résonance de la structure entre les deux capteurs.

La fréquence de résonance f_{0m} définie par la fonction de transfert de puits, FTbh, va être comparée à celle définie par le rapport moyen des spectres de Fourier d'enregistrement en surface sur enregistrement en profondeur.

8.2.1.2. La fréquence de résonance empirique f_{0e}

Le rapport des spectres d'amplitude de Fourier du capteur en surface sur le capteur en fond de forage sera notée SSRbh pour Standard Spectral Ratio Borehole ou « Rapport Standard des Spectres dans le forage », voir en annexe paragraphe 15.4.1.2 pour plus d'informations.

C'est le rapport moyen sur les composantes horizontales, SSRbh, qui nous permet de déterminer de manière empirique la fréquence de résonance f_{0e} de la couche de sol entre les deux capteurs. C'est la fréquence qui correspond au premier pic notable (qui doit avoir une amplitude supérieure à 2) du rapport moyen. Ce rapport est représentatif de la fonction de transfert qui existe entre le capteur en surface et le capteur en profondeur.

8.2.1.3. Résultats et conclusion

Le but de cette présélection n'est pas d'éliminer le maximum de sites mais d'enlever ceux dont on est sûr qu'ils apportent un biais à l'estimation des vitesses. Une première sélection automatique a été faite en éliminant les sites pour lesquels les fréquences f_{0m} et f_{0e} ont un écart de plus de 30%. Ce tri n'est pas satisfaisant car il élimine un grand nombre de sites à cause d'une mauvaise interprétation des pics, voir Figure 85. Un tri visuel a alors été effectué pour éviter d'éliminer des sites qui ne montrent pas sur le SSRbh un pic net mais seulement une bosse (un pic peu net) à la fréquence correspondant au premier pic de la fonction de transfert de puits FTbh comme on peut le voir sur deux exemples sur la Figure 86. Les sites de cette figure sont conservés. Avec un tri visuel seuls 43 sites ont été éliminés, deux exemples de sites éliminés sont montrés sur la Figure 87. Il reste donc 495 sites sur lesquels la suite des études sera effectuée. La liste de l'ensemble de ces sites se trouve en annexe, paragraphe 15.4.1.

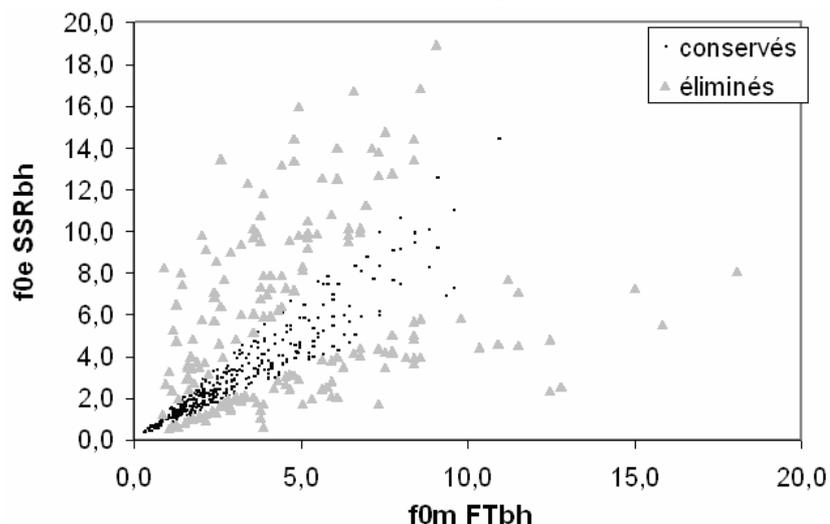


Figure 85: Représentation des deux types d'estimation de la fréquence de résonance de la structure entre la surface et le fond de forage pour l'ensemble des 496 sites. Un 1^{er} tri automatique montre en triangle gris les sites où le profil de vitesse n'est pas fiable et en point noir les sites où le profil de vitesse est fiable. Ce tri n'est pas été conservés par la suite [voir texte]

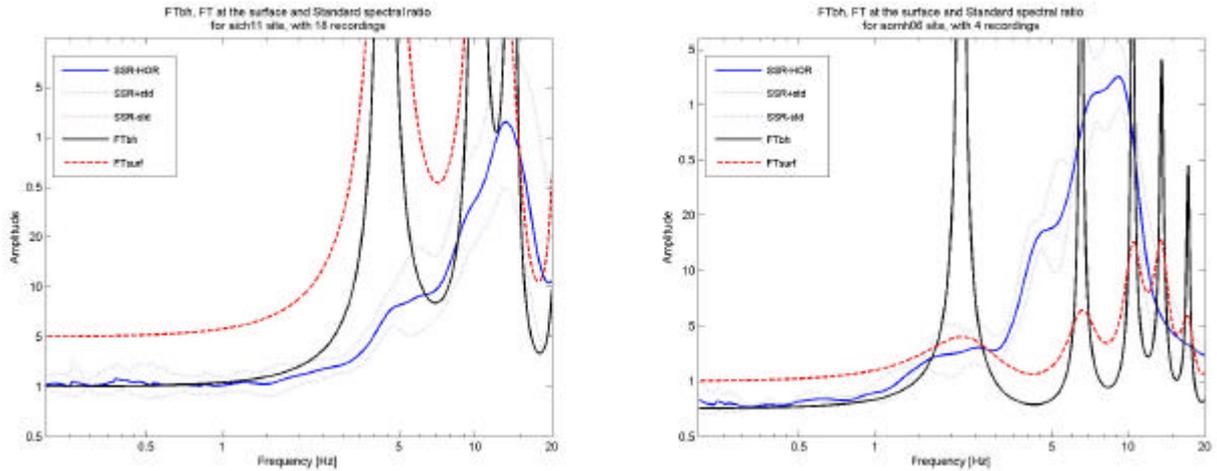


Figure 86: Exemples de pic non net : comparaison des fonctions de transfert de puits FTbh en noir, Ftsurf en rouge pointillés et des rapports des spectres de Fourier SSRbh en bleu. A gauche le site AICH11, à droite le site AOMH09

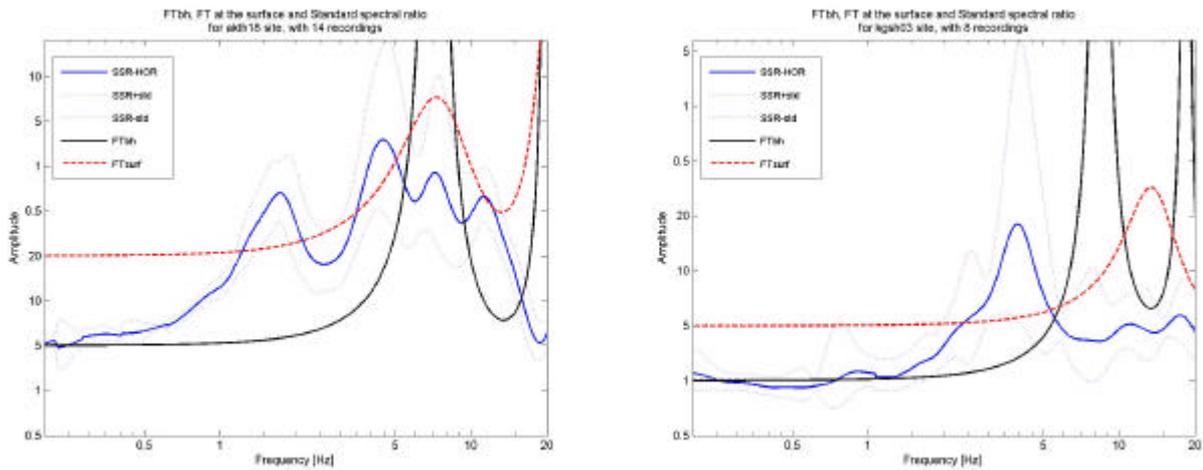


Figure 87: Cas d'incompatibilité ente les fonctions de transfert de puits FTbh en noir, Ftsurf en rouge pointillés et les rapports des spectres de Fourier SSRbh en bleu. A gauche le site AKTH18, à droite le site KGSH03

Notons aussi que si les fréquences des modes supérieurs ne sont pas cohérentes alors le site peut présenter des effets à deux ou trois dimensions. Les sites ayant des effets à deux ou trois dimensions pourraient donc être repérés. Cette comparaison n'a cependant pas été faite pour garder un nombre de sites le plus grand possible. Cependant on a vérifié que les sites étaient isotropes en comparant les rapports surface sur profondeur des deux composantes horizontales, nord-sud et est-ouest.

Nous avons donc un ensemble de 495 sites sur lesquels les vitesses moyennes sont déterminées comme paramètre caractéristique du site. Le deuxième paramètre caractéristique est la fréquence fondamentale du site. Sa détermination est décrite dans le paragraphe suivant.

8.2.2. Étude sur la distribution des vitesses des ondes de cisaillement

Pour illustrer ce paragraphe un article (*short note*) a été écrit sur les distributions et les relations des vitesses moyennes : “ *A shear wave velocity study based on the Kik-net borehole data*”

Ce paragraphe vise à donner une idée des vitesses représentées par la base de données Kik-net. Seuls les profils des forages sont donc pris en compte. Les paramètres considérés pour donner une représentation de la distribution des vitesses sont les vitesses moyennes des ondes de cisaillement sur les 5, 10, 20, 30, 50 et 100 premiers mètres.

En résumé, la vitesse des ondes de cisaillement fournit des informations primordiales pour caractériser un site. La base de données Kik-net, avec quelques 622 profils de vitesse provenant de down-hole, a été utilisée pour observer la distribution des vitesses moyennes sur les 5, 10, 20, 30, 50 et 100 mètres, montrant une distribution d’autant plus étalée que l’épaisseur est grande. En comparaison avec le travail de [Boore, 2004], des relations empiriques ont été établies entre les différentes vitesses moyennes. Les régressions linéaires trouvées sont très proches de celles de Boore déterminées avec des données californiennes. Enfin une analyse en retour a été faite avec des données principalement européennes pour voir si les profils de vitesse de Kik-net sont compatibles avec des données européennes.

Les principales conclusions à retenir sont les suivantes :

- La vitesse moyenne est d’autant plus discriminante que la profondeur considérée est grande. En d’autres termes, la distribution de la vitesse moyenne sur 100 mètres est beaucoup plus étalée que la distribution de la vitesse moyenne sur les 5 premiers mètres. Dans ce cas une valeur de V_{S100} correspondra à quelques sites alors qu’une valeur de V_{S05} sera commune à de nombreux sites qui auront sûrement une réponse différente face à une sollicitation sismique.
- Les régressions linéaires entre les différentes vitesses moyennes, au sein des données japonaises donnent des écarts-type relativement faibles (de 0.07 à 0.31)
- La compatibilité entre les données californiennes et japonaises semble bonne.
- Les quelques données européennes montrent un comportement très proche de celui des données japonaises avec une valeur de l’écart type du même ordre de grandeur pour les deux bases de données. Cela est un point positif pour justifier de l’utilisation des résultats obtenus sur la base de données Kik-net à d’autres sites hors de Japon.

“*A shear wave velocity study based on the Kik-Net borehole data*”

8.2.2.1. Abstract

In the context of site effect estimation, the parameter of shear wave velocity provides primordial information to characterize the site. The Japanese network Kik-net counts 622 stations with a shear wave velocity profiles from down-hole measurements. This database is used to observe the distribution of the time-average velocities to 5, 10, 20, 30, 50 and 100 meters depths. The larger the depth is, the spreader the time-average velocity distribution is. Linear regressions were done to link the different time-average velocities. The results are close to the work of Boore, 2004. Finally a return analysis was done with some non-Japanese data. The linear regressions obtained with the Kik-net database are compatible with these non-Japanese data.

8.2.2.2. *Introduction*

In order to characterize a site for a purpose of site effect it is definitely useful to get some information about the velocity profiles. Intrusive methods, non-destructive methods, with active sources, with passive sources; there are an important kind of possible methods to use. We are not going to compare these different methods, but we can point out that all methods have limits: penetration depth, resolution and cost are the main limits. That is the reason why a complete velocity profile from the surface to the hard bedrock is often difficult and expensive to obtain. So an alternative parameter should be used to characterize a site.

The average shear wave velocity of the first 30 meters of a given site, V_S30 , is widely used in order to classify the site in most of the building codes - Natural Hazard Earthquake Reduction Program, NEHRP; European code eight, EC8 - It was originally chosen because it generally takes on day to realize a 100 feet hole for most of the American places. In that way it was only a practical choice, but the V_S30 value is nowadays really common and the number of V_S30 data is extremely high, so we cannot ignore this soil parameter. But many measurements of surface shear wave velocity do not reach 30 m as Boore (Boore April 2004) has noticed. So we will look at the relation ship between the different time-average velocity (over 5, 10, 20, and 30) parameters. This approach has been done for Californian data (Boore 2004) and will be compared here with Japanese and some European data.

Following the 1995 Hyogo-ken Nanbu Kobe Earthquake, the Japanese government, to improve the prevention of future earthquake disasters, installed networks consisting of a large number of strong-motion observation stations, included Kik-net (Kiban-Kyoshin). Kiban for “essential principle” and Kyoshin for “strong motion”. The Kik-net network was deployed since 1998 gathering 660 stations-couples installed at the surface and at the bottom of boreholes. Most of the stations are placed on the rock or thin sedimentary sites. For each of the station a down-hole measurement was realized. We will observe the velocity distribution over a set of 622 velocity profiles from the Japanese Kik-net network

This paper aims at showing the velocity distribution of the Kik-net stations to observe the capacity of a time-average velocity to z depth to characterize a site. Then the second goal is to put forward the relations between the different time-average velocities to estimate the V_S30 even if the measurements do not reach 30 meters depth. The linear regressions will be compared with the work of Boore (Boore, 2004). Linear regressions with V_S100 and V_S50 will also be done to be an other element of comparison between Japanese and no Japanese shear velocity. This is our third goal, to verify if the Japanese data are comparable with European data. For that aim, a return analysis will be done with non-Japanese shear wave profiles.

8.2.2.3. *Velocities distribution over the Kik-Net data set*

Over the 622 available profiles of Kik-net, a calculation of the time-average velocity to depths 5, 10, 20, 30, 50 and 100 meters was done. The time-average velocity to a depth z is noted V_{Sz} and it is different than the velocity at the depth z $V_S(z)$.

On Figure 88, we can notice that the time-average velocity distribution spreads off with the thickness of averaging. For example the V_{S05} is really less spread than the V_S100 , we can deduce that the V_{S05} should be less discriminator than the V_S100 in term of classifying site.

The V_S30 parameter is defined for 504 stations. It varies from 67 m/s to 2100 m/s so it represents a large band of V_S30 values, but 56 % of the V_S30 is smaller than 450 m/s and 86 % of the V_S30 is smaller than 700 m/s. 84% of the sites has a V_S30 between 200 m/s and 750 m/s. If we are based on the EuroCode 8, the limits of group are defined by 180 m/s, 360 m/s and 800 m/s. The groups B, sites with V_S30 from 360 to 800 m/s, and C, from 180 to 360 m/s, are well represented

by the dataset. The group A, sites with V_{S30} higher than 800 m/s, will regroup 56 sites. But the group of the extremity D, sites with V_{S30} less than 180 m/s, is poorly represented with only 12 stations. A detail study for these specific should be done, moreover because these sites are generally more sensitive to site effect.

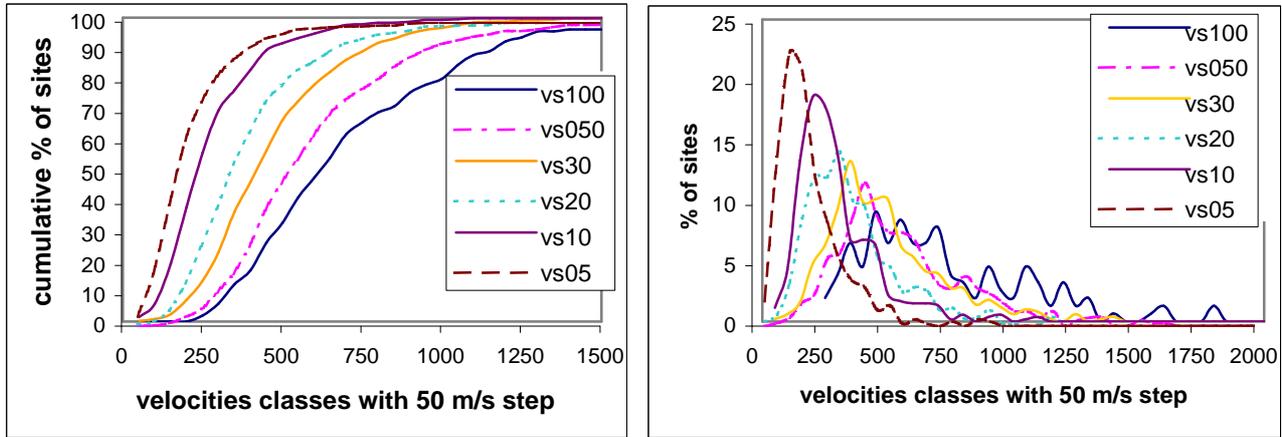


Figure 88: Distribution of the time-average velocities of the top 5, 10, 20, 30, 50 and 100 meters. Left: Cumulative distribution in percentage; Right: distribution in percentage

8.2.2.4. Relationships between the different time-average velocities

The regulations are mainly based on the V_{S30} parameter value. A numerous amount of borehole data will not reach 30 meters depth. Boore (Boore, 2004) described four methods to extrapolate the velocity. He used 135 boreholes from California. The 622 Japanese profiles from Kik-net will be used to compare the second method of Boore. That is to say, the extrapolation using the correlation between V_{S30} and V_{S_z} the time-average velocity to a depth z. Boore found a good correlation using the equation: (equation (5), Boore, 2004)

$$\log(\overline{V}_s(30)) = a + b * \log(\overline{V}_s(d)) \quad [1]$$

The correlations for V_{S05} , V_{S10} and V_{S20} are shown in Figure 89, in comparison with the regression found by Boore (Boore, 2004) in dot red line. The slope is slightly different. Californian regression will give higher V_{S30} for V_{S10} higher than 890 m/s, and smaller V_{S30} for V_{S10} smaller than 890 m/s. For example, for a V_{S10} equal to 140 m/s the V_{S30} from Kik-net regression is 246 m/s, and from Californian regression is 180 m/s. In that case the velocity group from EC8 regulation is not the same using Kik-net regression and Californian regression. Thus it will not provide the same site effect estimation using the regulation. It points out that a linear amplification value linked with the time-average velocity to the available depth could help to select an appropriate estimation of site effect. This approach was studied in Cadet 2006 Thesis.

Moreover 98 % of the Japanese sites have a V_{S10} smaller than 890 m/s, so the Californian estimation provides smaller V_{S30} for a major part of the V_{S30} estimated with Japanese regression. It could mean that the Japanese soils are slightly more compacted than the Californian ones. With the V_{S20} value the difference is less noticeable and will not lead to an important gap for the estimation of V_{S30} .

These linear regressions allow to describe the velocity EC8 classes with time-average velocities to 5, 10 and 20 meters depth as an alternative for classification.

EC8 classes [m/s]	Vs30	Vs5	Vs10	Vs20
D (<180 m/s)	180	70	100	147
C (180-360m/s)	360	170	220	300
B(360-800) A(>800 m/s)	800	510	560	685

Table 8: Velocity limits of the EuroCode 8 determined with VS30 values. VS5, VS 10 and VS 20 values are determined with linear regressions with VS30.

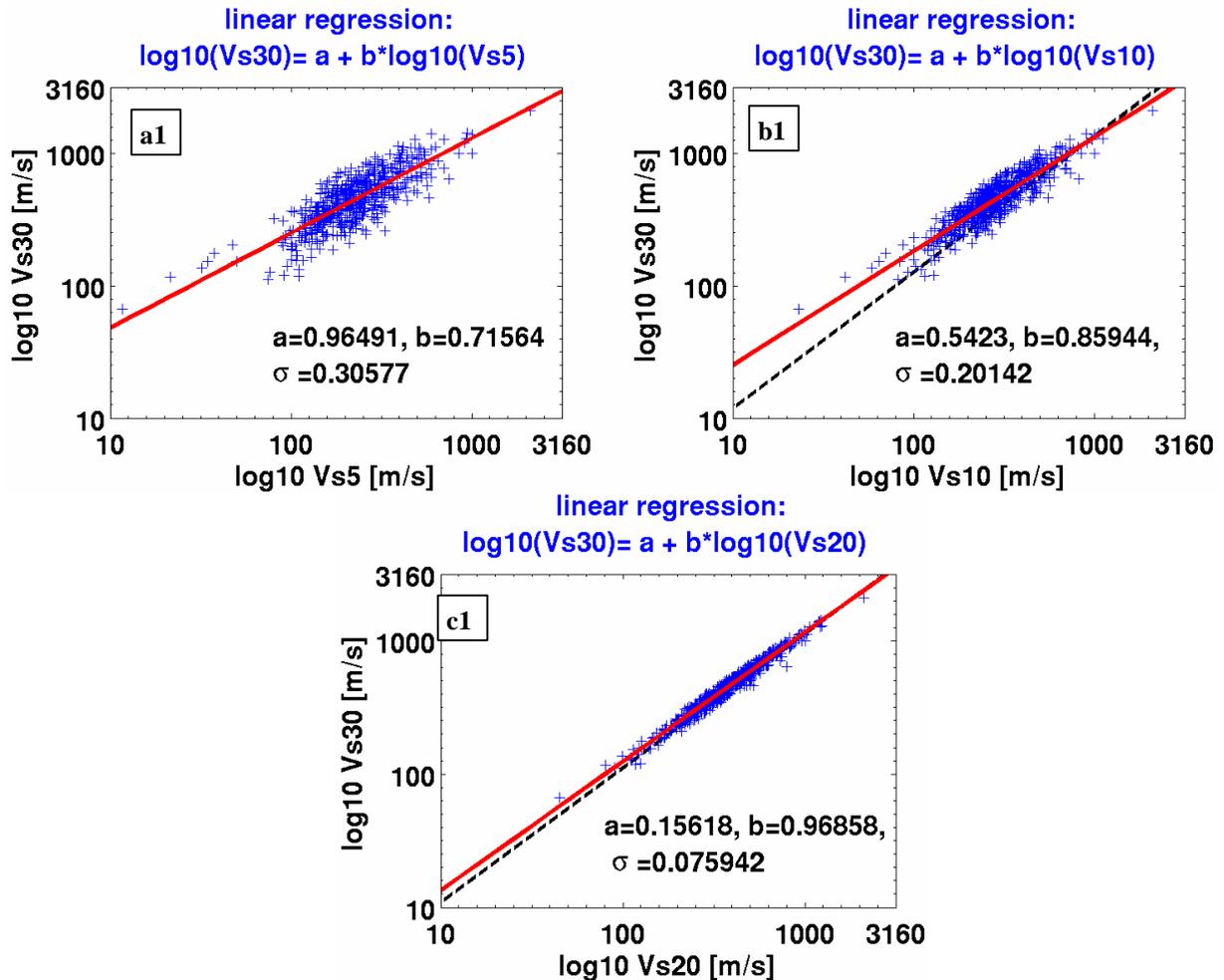


Figure 89: Linear regression between $\log(V_{s30})$ and $\log(V_{sz})$ for $z = 5$ (a1), 10 (b1) and 20 (c1) meters. a and b are the value of the coefficient of equation [1], s is the misfit value; Black dot line represents the regression found by Boore with Californian data, red plain line is the regression find with Kik-net data, blue crosses are the data from Kik-net

Linear regressions between V_{s30} and V_{s50} and V_{s100} were made. They will be used as a characteristic of the distribution of the Japanese data. We have 488 profiles reaching 50m depth and 181 profiles reaching 100 meters depth.

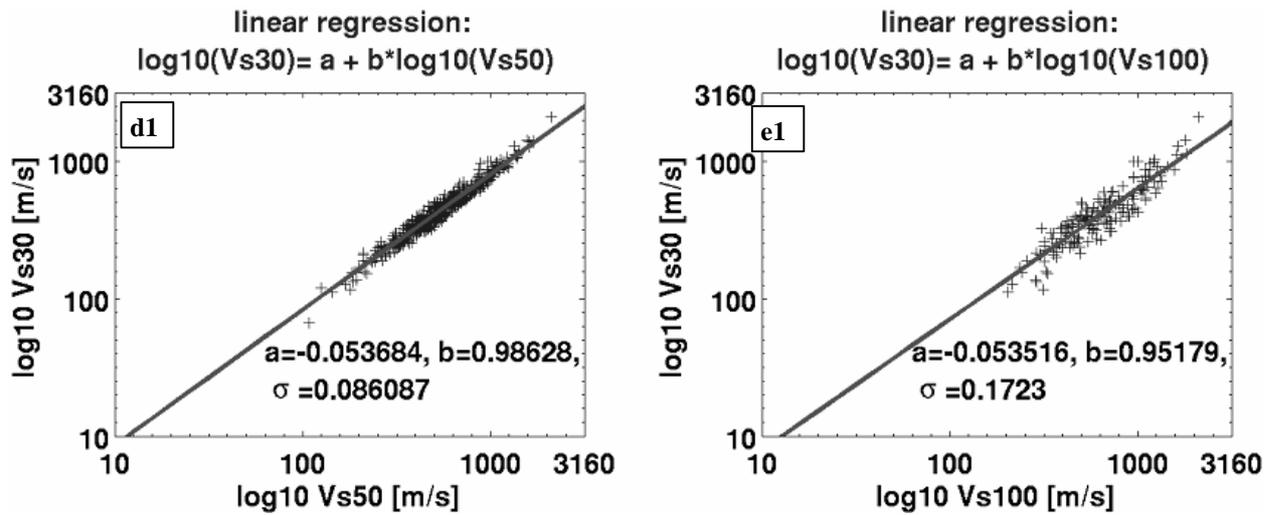


Figure 90: Linear regression between $\log(V_{s30})$ and $\log(V_{s_z})$ for $z=50$ (d1) and 100 (e1) meters. a and b are the value of the coefficient of equation [1], s is the misfit value; plain line is the regression find with Kik-net data, crosses are the data from Kik-net

8.2.2.5. Velocity profiles out of Japan

Twenty-six profiles were collected from deep bore-hole measurements, refraction and reflection surveys. They are from Europe except one from California, 22 of them reach 30 meters depth, 17 reach 50m and 12 reach 100m. More detailed information can be found in the CD-ROM “Generic Alpine Valley Characterization” from SISMOVALP project. We compare the linear regression obtained in paragraph 8.2.2.4 with the distribution of the time-average velocities to depths 5, 10, 20 meters versus V_{s30} .

The non-Japanese data fit well at the Kik-net regressions with the same order of misfit value. We can assume that the velocity behavior within the sediments of the Kik-net database is close enough to other velocity behavior far from Japan.

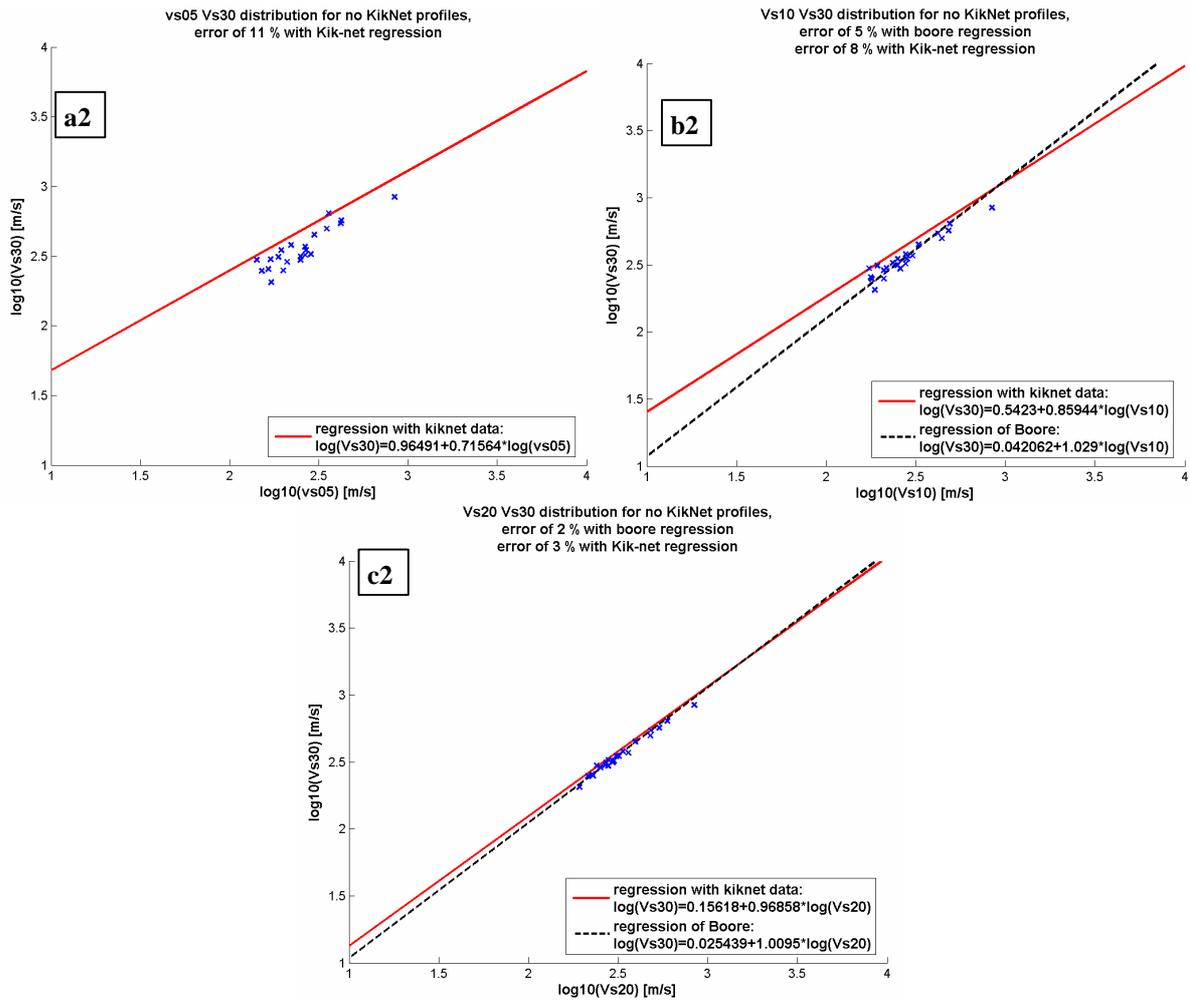


Figure 91: Relationships of the time-average velocities to depths 5 (a2), 10 (b2), 20(c2) meters with V_{s30} . Blue crosses are the values from non-Japanese profiles; and linear regression from Kik-net (red curve) and Boore (dashed black curve).

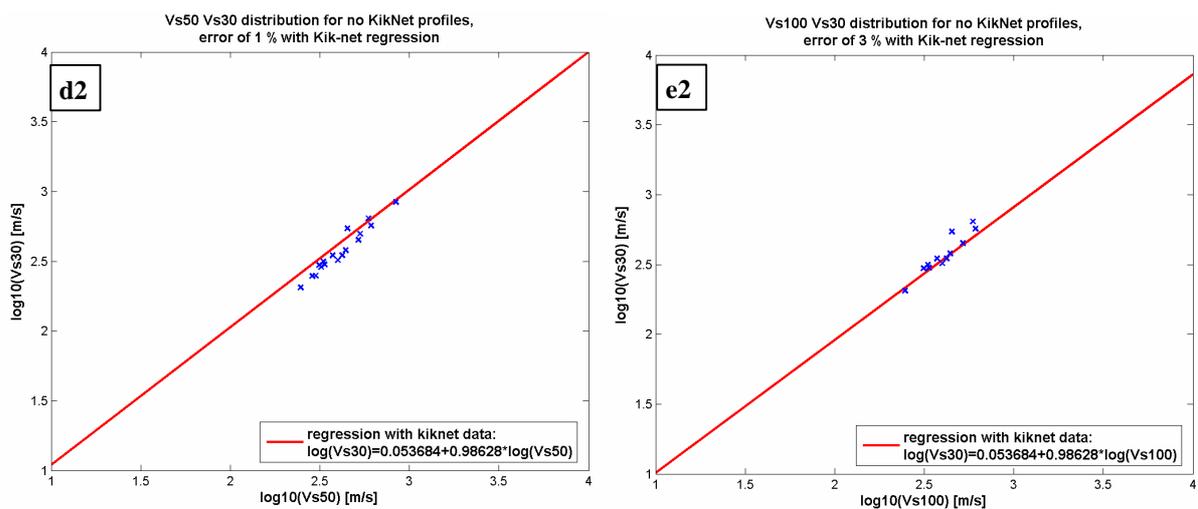


Figure 92: Relationships of the time-average velocities to depths 50 (d2) and 100 (e2) meters with V_{s30} . Blue crosses are the values from non-Japanese profiles; and linear regression from Kik-net (red curve)

8.2.2.6. Conclusion

This short velocity study shows the dispersion of the time-average velocity values. Plotting the distribution of different time-average velocities we remark that more we average over a large thickness, more the time-average velocity value will be discriminating. So it is always better to use the deeper information we have. But in the case of shallow information the linear regressions of the logarithmic values of the time-average velocities to 5, 10 and 20 meters depth with the V_{s30} provide useful information in coherence with the Californian regression realized by Boore. Finally the relationships between the different time-average velocities from the Kik-net database are adaptable to the non-Japanese data available for this study.

8.2.2.7. Bibliography

- Asten M., Boore D., (2005), Comparison of Shear velocity profiles of unconsolidated sediments near the coyote borehole (CCOC) measured with 14 invasive and non-invasive method, *US Geological Survey open-file report* **2005-1169**
- Athanasopoulos G.A. et al. (1999), *Soil Dynamics and earthquake Engineering* **18**,135-149
- Boore D.M. (2004), Estimating V_{s30} (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (Depths<30m), *Bulletin of seismological society of America*, **94**, 591-597
- CETE, E. Bertrand (Decize 2005), "Rapport bruit de fond H/V dans la vallée du Var", *intern report*
- SISMOVALP Project: CD-ROM "generic Alpine Valley Characterization" (2006)

Country	Site name	Kind of measurements	Depth of the profile [m]	Vs05 [m/s]	Vs10 [m/s]	Vs20 [m/s]	Vs30 [m/s]	Vs50 [m/s]	Vs100 [m/s]
Switzerland	Valais monthey	SASW, P and S wave reflection	640	250	260	278	296	313	351
France	Montbonnot	Refraction reflection	552	170	217	268	299	336	388
Italy	PelliceA riverbed	Refraction	300	250	250	295	314	331	376
Italy	PelliceB river	Refraction	300	195	251	320	349	373	448
Italy	PelliceA alluvial	Refraction	300	420	420	481	543	451	546
Italy	PelliceB fluvial	Refraction	300	360	489	595	641	592	728
Slovenia	bovecC	Refraction	270	268	282	309	349	422	511
Switzerland	Valais Visp	SASW, P and S wave reflection	225	299	327	395	450	519	651
Switzerland	Valais brig6	SASW, P and S wave reflection	195	221	278	336	379	441	554
Slovenia	BovecB	Refraction	145	265	277	300	322	399	506
Switzerland	Valais brig7	SASW, P and S wave reflection	125	423	481	537	569	611	722
California	Coyote creek	Suspension log	120	171	187	193	205	247	307
Greece	Vartholomio 1	Unknown	80	200	210	230	249	299	NaN
Greece	Vartholomio 2	Unknown	80	840	840	840	840	840	NaN
Greece	Lefkas	Unknown	75	151	180	214	247	286	NaN
	Adames	Cross-hole	70	350	442	478	497	530	NaN
France	Esteron		51	210	210	252	287	322	NaN
Greece	patras 2	Cross-hole	45	265	304	360	369	NaN	NaN
France	Ebron	Cross-hole	42	165	178	227	255	NaN	NaN
Greece	Pirgos (num_by_hand)	Cross-hole	40	142	174	240	297	NaN	NaN
Greece	Corinthos	Cross-hole	40	188	194	271	312	NaN	NaN
Greece	Korinthos 1	Cross-hole	30	286	235	280	326	NaN	NaN

Table 9: Description of the non-Japanese available shear wave profiles from Europe and US

8.2.3. Détermination de la fréquence de résonance fondamentale

La fréquence de résonance fondamentale peut être facilement obtenue avec la méthode H/V utilisant le bruit ambiant comme nous l'avons vu au Chapitre II. Ce paramètre sera une des caractéristiques utilisées pour estimer l'effet de site, il est donc essentiel de le déterminer le plus précisément possible. La fréquence de résonance fondamentale d'un site correspond à la fréquence de résonance de l'épaisseur de sédiments ou de sol mou qui se trouvent sur un substratum rocheux plus dur en profondeur. Le rapport SSRbh nous donne cette fréquence de résonance si le capteur en fond de forage se trouve bien sur le substratum rocheux. Dans ce cas de figure, la fréquence fondamentale est la fréquence du premier pic notable f_{0e} comme on l'a vu au paragraphe 8.2.3. Mais si le forage n'atteint pas le substratum rocheux, alors le rapport SSRbh n'est pas un bon outil pour déterminer la fréquence de résonance. En effet, imaginons que la fréquence fondamentale correspond à la résonance d'un ensemble de couches plus épais que la profondeur du forage, alors au niveau du capteur de fond de forage cette fréquence est déjà amplifiée de la même façon qu'elle l'est en surface. Dans ce cas le rapport surface sur profondeur nous donnera une valeur proche de 1 comme si il n'y avait pas d'effet de site, alors que l'effet de site est plus profond. La fréquence du premier pic du SSRbh n'est donc pas la fréquence fondamentale.

Sur un exemple théorique sur un modèle de sol simple avec une couche de vitesse constante reposant sur un substratum (Figure 93, a) nous avons calculé, à différentes profondeurs, la réponse à un séisme de magnitude 4.3, à 58.7 km de distance, enregistré à une profondeur de 720 mètres. La Figure 93 (b) nous montre la différence de réponses à différentes profondeurs. On voit que le pic à 1Hz disparaît sous le substratum et l'effet d'interférence destructive apparaît à cette même fréquence. De plus on voit qu'un rapport surface sur profondeur concernant toute la colonne de sol en rouge (Figure 93, c) et concernant seulement les premiers mètres (courbes noire, bleue et violette Figure 93, c) montrent des pics à différentes fréquences. La fréquence fondamentale de résonance 1D est 1 Hz, visible sur la courbe du rapport surface sur profondeur du capteur en fond de forage. Il n'y a pas de pic à 1Hz sur les autres rapports, la fréquence augmente plus la profondeur diminue.

Cela montre que lorsque le capteur du fond de forage n'est pas sur le substratum, le rapport surface sur profondeur ne nous donne pas la bonne fréquence de résonance.

Pour éviter cette erreur d'interprétation nous avons utilisé un autre type de rapport : Le rapport moyen horizontal sur vertical des spectres de Fourier, aussi appelé fonction récepteur, noté H/Vh_F , F pour Fourier sur les enregistrements en surface. En pratique ce rapport moyen donne la fréquence fondamentale du site, mais cependant ne nous donne pas d'information fiable sur l'amplitude. Se reporter en annexe au paragraphe 15.4.3.

La comparaison des deux fréquences du premier pic de ces deux rapports, SSRbh et H/Vh_F , nous permettra de définir les sites pour lesquels la fréquence de résonance n'est pas visible par le SSRbh car le capteur du fond n'est pas assez en profondeur. Cinquante sites montrent des fréquences de premier pic différentes comme on peut le voir en exemple sur la Figure 95. La liste de ces sites ainsi que les courbes associées sont en annexe 15.4.3, page 290.

Pour les sites où la fréquence de résonance n'est pas visible par le rapport surface sur profondeur, cela signifie que ce rapport n'est pas représentatif de l'amplification en dessous d'une certaine fréquence minimale f_{min} . En effet dans la bande de fréquence où les rapports H/Vh_F et H/Vb_F sont proches, les enregistrements en surface et en profondeur sont

sensiblement identiques et le rapport surface sur profondeur est alors « muet » pour cette gamme de fréquence de 0.1 Hz à f_{\min} . Il faut donc déterminer cette fréquence minimale afin de ne considérer sur le rapport surface sur profondeur, que la bande de fréquence où ce rapport donne une bonne estimation de l'amplification due à la colonne de sol. Pour déterminer cette fréquence nous nous basons sur l'observation du rapport H/V_h_F des enregistrements en surface et des enregistrements en profondeur. On estime que le rapport SSRbh ne sera pas significatif sur la gamme de fréquence de 0.1 à f_{\min} où ces deux rapports, H/V_h_F en haut et H/V_b_F en bas, ont une différence d'amplitude de moins de 20 % (Figure 94). En pratique nous avons effectué un pointage manuel de la fréquence minimale puis nous avons vérifié les valeurs de l'écart type sur les rapports H/V_h_F et H/V_b_F .

La Figure 95 nous montre un exemple avec les trois types de courbe. Le rapport surface sur profondeur SSRbh et le rapport H/V_h_F du capteur en surface donnent les mêmes fréquences de résonance, c'est-à-dire les mêmes pics, pour la gamme de fréquence supérieure à 1 Hz environ. Ces amplifications correspondent aux résonances des couches situées entre les capteurs en surface et en fond de forage. Par contre, en dessous de 1 Hz le H/V_h_F montre des pics qui ne n'apparaissent pas sur le SSRbh. Dans cette gamme basse fréquence le rapport H/V_b_F du capteur en fond de forage montre les mêmes pics que le rapport H/V_h_F en surface. Ces pics correspondent donc à une amplification due aux couches en profondeur. Remarquons que le capteur du bas ne montre pas de pics significatifs (amplitude supérieure à 2) au-dessus de 1Hz. Cela confirme que ces amplifications sont dues aux couches qui se trouvent au-dessus du capteur du bas. La fréquence de 1 Hz sera donc la borne minimale de la bande de fréquence où le rapport SSRbh sera utilisé pour les études suivantes.

On peut penser que les sites qui ont leur fréquence de résonance représentée par le rapport H/V sont des sites dont la vitesse ne fond de forage est assez faible. Pour montrer la cohérence des sites sélectionnés, nous effectuons la moyenne et l'écart type de la vitesse de fond de forage ainsi que la profondeur du forage sur l'ensemble des sites dont la fréquence est définie par le rapport H/V et sur tous les autres. Les valeurs obtenues (Tableau 11) montrent une vitesse de fond de forage moyenne pour les sites représentés par le rapport H/V plus faible que pour l'ensemble des autres sites, pour une profondeur moyenne sensiblement équivalente.

Tableau 11: Moyenne et écart-types des vitesses et profondeur en fond de forage selon la détermination du f_0 avec SSRbh ou HV

Ensemble	VsDH [m/s]		Profondeur du forage [m]	
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
Sites dont f_0 est déterminé par H/V	1056	460	104	59
Sites dont f_0 est déterminé par SSRbh	1691	704	92	79

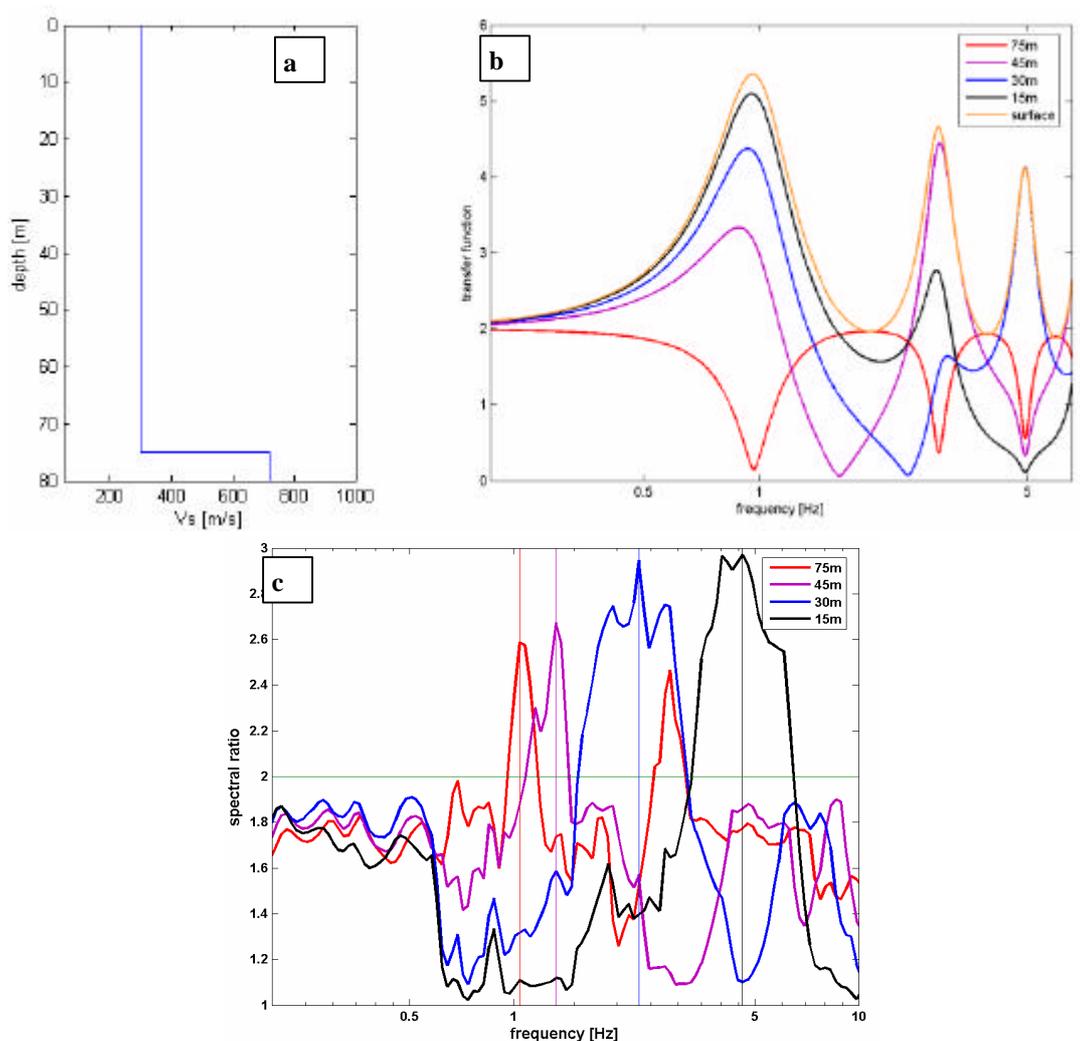


Figure 93: Modèle canonique simple. a) profil de vitesse des ondes S, b) Fonction de transfert numérique à différentes profondeurs de la surface (orange) jusqu'à 75 m de profondeur (rouge); c) Rapport des spectres surface sur profondeur, de 75 mètres (rouge) à 15 mètres (noir) de profondeur.

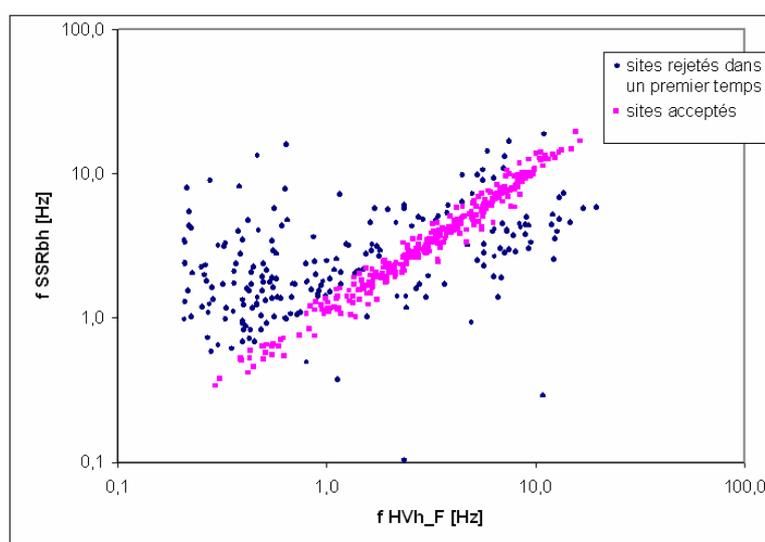


Figure 94 : Comparaison des fréquences du 1^{er} pic obtenues avec le rapport H/V des enregistrements en surface (HV_fh) et le rapport SSRbh. En rose : les sites dont les deux fréquences sont proches, en bleu : les sites dont les deux fréquences sont différentes à plus de 20 %

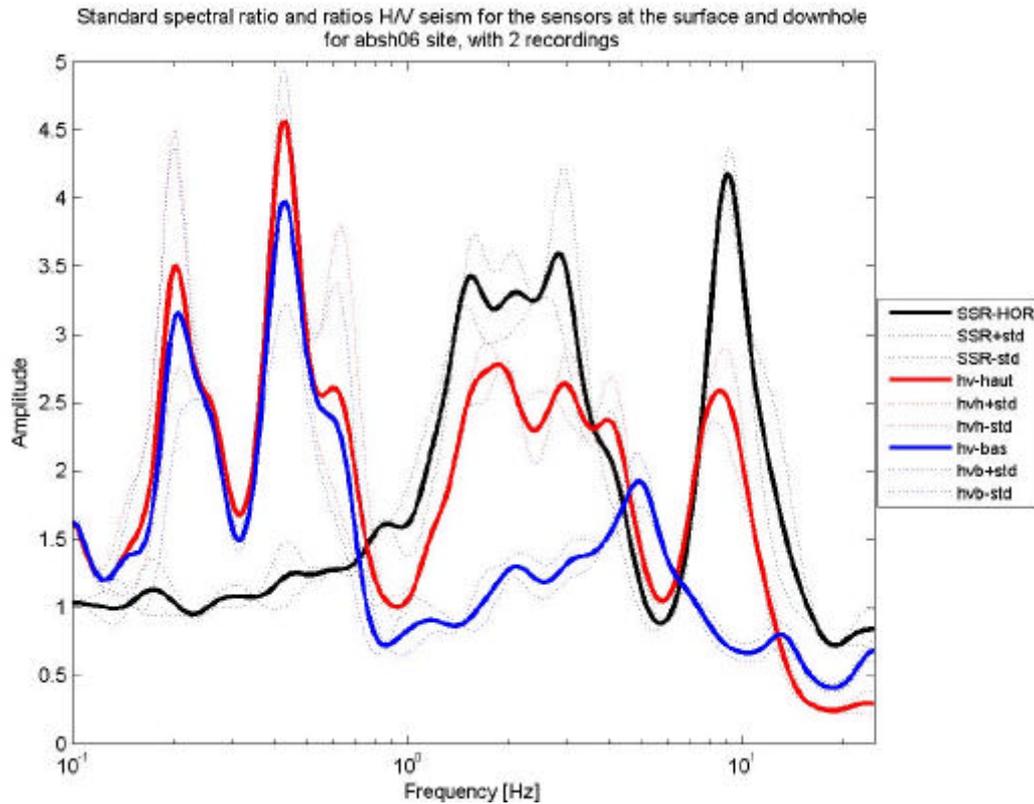


Figure 95: Rapports SSRbh en noir, H/Vh_F du capteur haut en rouge, H/Vb_F du capteur bas en bleu; pour le site ABSH06. Les écarts types sont représentés en pointillés

8.3. Conclusion sur les informations apportées par les enregistrements

- Les profils de vitesse ont été validés grâce au rapport SSRbh et à la fonction de transfert en forage obtenue avec un modèle 1D (paragraphe 8.2.1). Les profils validés sont au nombre de 496 sur les 538 sites ayant des enregistrements. Avec ces profils nous avons déterminé pour chaque site les vitesses moyennes sur 5, 10, 20, 30, 50, 100 mètres et sur l'épaisseur totale du forage.
- Nous avons attribué à chaque site sa fréquence fondamentale de résonance grâce au rapport horizontal sur vertical des enregistrements en surface. L'amplitude qui lui est associée est déterminée sur le rapport SSRbh lorsque celui-ci montre cette fréquence de résonance.
- Dans les cas où le rapport surface sur profondeur ne montre pas la fréquence fondamentale du site, une fréquence minimale à partir de laquelle les rapports surface sur profondeur sont valides, a été déterminée pour 48 sites sur les 496 sites sélectionnés. Pour ces sites la fréquence de résonance est définie par le rapport H/V_F.

9. Comparaison des rapports de spectres de Fourier et de réponse

9.1. Introduction : Pourquoi cette comparaison est-elle utile ?

Le spectre d'amplitude de Fourier représente la distribution de l'énergie du signal dans le domaine fréquentiel. Le rapport du spectre en surface sur le spectre en profondeur est représentatif de la fonction de transfert de Fourier qui existe entre les deux capteurs. Cette grandeur spectrale est préférée par les sismologues en raison de son sens physique et de sa maniabilité mathématique.

Le spectre de réponse élastique représente la réponse à l'événement enregistré d'un oscillateur simple à un degré de liberté. Il est très utilisé en génie parasismique en raison de sa signification pratique. Le rapport des spectres de réponse du capteur en surface sur le capteur en profondeur est représentatif de la fonction de transfert réponse qui existe entre les deux capteurs. La moyenne des rapports des spectres de réponses sur plusieurs événements est notée RSRbh pour Rapport des Spectres de Réponse dans un forage ou « Ratio of the Response Spectra in a BoreHole ».

Ces deux types de rapports, SSRbh et RSRbh, sont certes mathématiquement différents, mais apportent des informations fréquentielles très proches en mettant en valeurs les fréquences de résonance typiques de la structure entre les deux capteurs. Ce sont donc des outils qui caractérisent les effets de site.

Les spectres de Fourier sont généralement utilisés par les sismologues car ils sont une représentation plus maniable mathématiquement, tandis que les spectres de réponse sont plus utilisés par les ingénieurs car ils se rapprochent plus des analyses faites sur les bâtiments. Au final, la caractérisation des effets de site sera utilisée comme paramètre d'entrée pour des études d'ingénierie sur les constructions, les infrastructures etc. Le spectre de réponse est alors mieux adapté à ce genre d'étude, c'est donc celui qui a été choisi dans les réglementations pour définir les actions réglementaires.

La comparaison des ces deux types de rapport, Fourier et réponse, est nécessaire pour corriger les spectres de réponse avec la même méthode que les spectres de Fourier même si l'objet mathématique est différent. L'intérêt est de pouvoir utiliser des fonctions d'amplification à appliquer aux spectres de réponse au rocher.

Nous avons vu les principales hypothèses de calcul des rapports de spectres de Fourier en annexe au paragraphe 15.4.1.2, quelques notions sur les spectres de réponse se trouvent en annexe au paragraphe 15.4.1.3.

9.2. Comparaison des rapports Fourier et réponse

Comparaison de la bande de fréquence amplifiée :

Sur tous les sites, sur les rapports moyens sur l'ensemble des événements disponibles, le premier pic est défini par la fréquence f_0 et l'amplitude A_0 et le pic maximal par la fréquence f_{\max} et l'amplitude A_{\max} . Le pointage se fait en deux temps, d'abord une sélection de la gamme de fréquence où se trouve chaque pic, puis un calcul automatique du maximum dans cette fenêtre fréquentielle. Dans un premier temps l'observation de ces valeurs caractéristiques nous donnera

des informations sur la similitude entre les deux types de rapports SSRbh et RSRbh. Dans un deuxième temps on s'est orienté vers une observation visuelle étant donné les problèmes rencontrés sur le pointage des fréquences comme il est expliqué ci-après et enfin le rapport SSR/RSR moyen sur l'ensemble des sites est aussi observé.

Les fréquences de résonance des deux rapports sont identiques à plus ou moins 30 % pour plus de 85 % des sites (77 sites présentent des fréquences de résonances différentes, voir Figure 96, à gauche). Les différences peuvent être dues au lissage et à l'échantillonnage différent sur les deux courbes qui masquent parfois des fréquences. Par exemple sur la Figure 98 le premier pic sur le SSRbh (autour de 3Hz pour le site NGNH23 et autour de 4Hz pour le site TKSH02) n'est pas visible sur le RSRbh qui semble moins détaillé. Le problème ne vient donc pas de la différence entre les deux rapports mais de la manière de pointer les fréquences de résonance qui correspondent à des pics plus ou moins nets. Les fréquences du pic maximal des deux rapports sont identiques à plus ou moins 30 % sur 472 des sites soit 87.7%.

Les amplitudes des premiers pics ont un écart de moins de 30 % pour 80 % des sites, voir Figure 96 à droite, et les amplitudes maximales ont un écart de moins de 30 % pour 74% des sites. Pour les grandes différences d'amplitude nous pouvons évoquer plusieurs explications :

- Il y a certains sites où on ne compare pas l'amplitude d'un même pic puisque le pointage des pics n'est pas fait avec la même précision sur SSRbh et RSRbh.
- Il y a certains sites, comme AOMH15 voir Figure 99, dont les pics fondamentaux se correspondent mais pas les pics maximaux. En général pour ces sites le nombre d'événements est très bas (un ou deux événements) et ne permet pas une bonne estimation de l'amplitude. C'est une des raisons pour laquelle le nombre d'événement sera pris en compte dans les études qui suivront.
- La différence de l'amplitude des pics maximaux à hautes fréquences (au-dessus de 10 Hz) peut être expliquée par la sensibilité des spectres de réponse au PGA qu'on retrouve pour de très hautes fréquences.

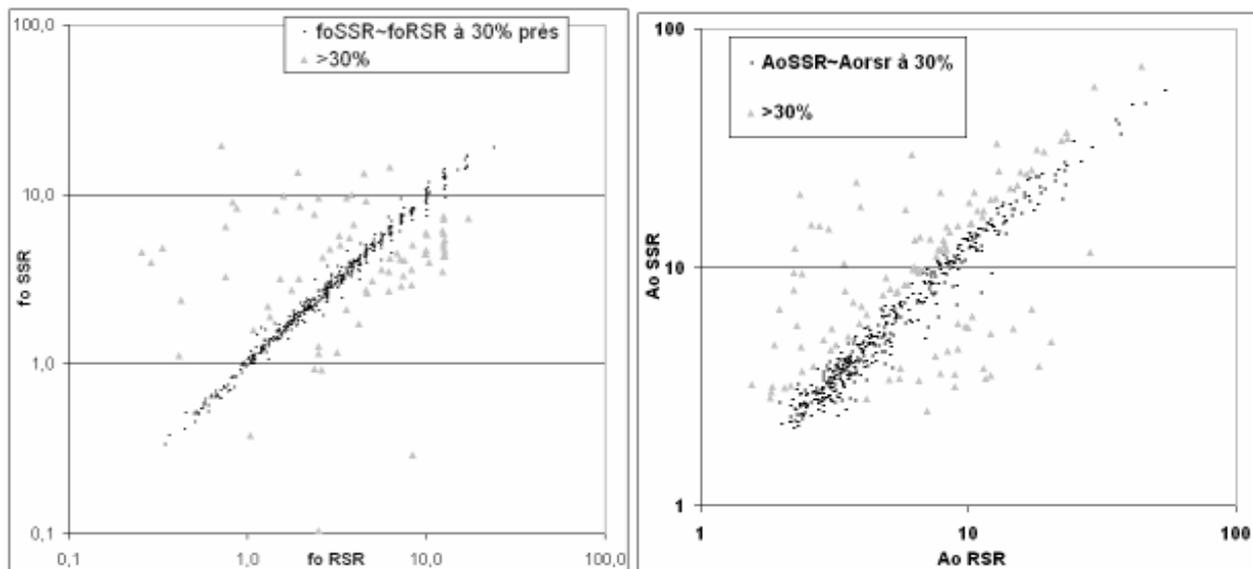


Figure 96: A gauche : Comparaison des fréquences de résonances fondamentales définies avec les rapports des spectres de Fourier SSRbh et des spectres de réponse RSRbh. 77 sites montrent une différence d'estimation de la fréquence de résonance de plus de 30%. A droite : Comparaison des amplitudes du premier pic définies avec les rapports des spectres de Fourier SSRbh et des spectres de réponse RSRbh. 106 sites montrent une différence d'estimation de cette amplitude à plus de 30%.

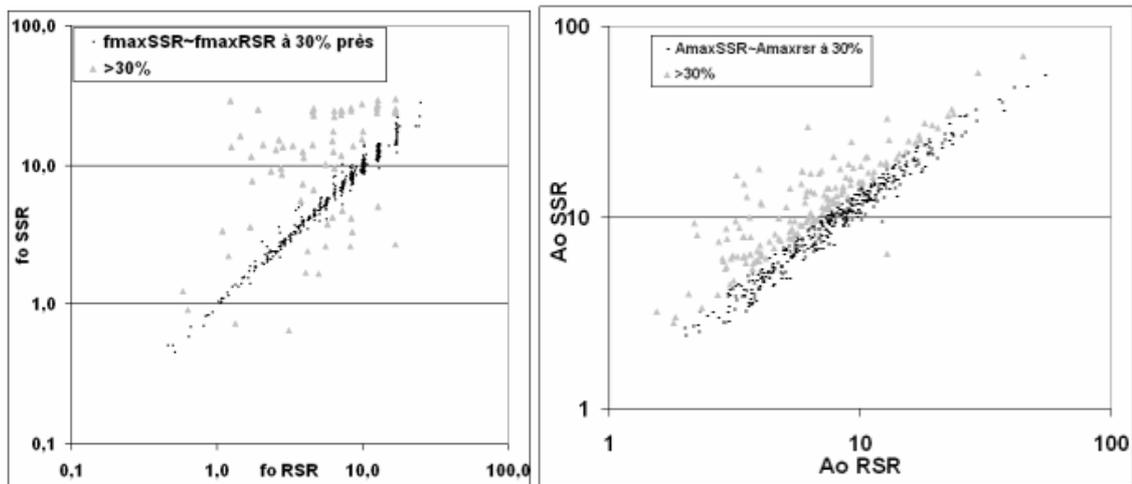


Figure 97: A gauche : Comparaison des fréquences du pic maximal définies avec les rapports des spectres de Fourier SSRbh et des spectres de réponse RSRbh. 66 sites montrent une différence d'estimation de la fréquence dite maximale de plus de 30%. A droite : Comparaison des amplitudes maximales définies avec les rapports des spectres de Fourier SSRbh et des spectres de réponse RSRbh. 144 sites montrent une différence d'estimation de cette amplitude à plus de 30%.

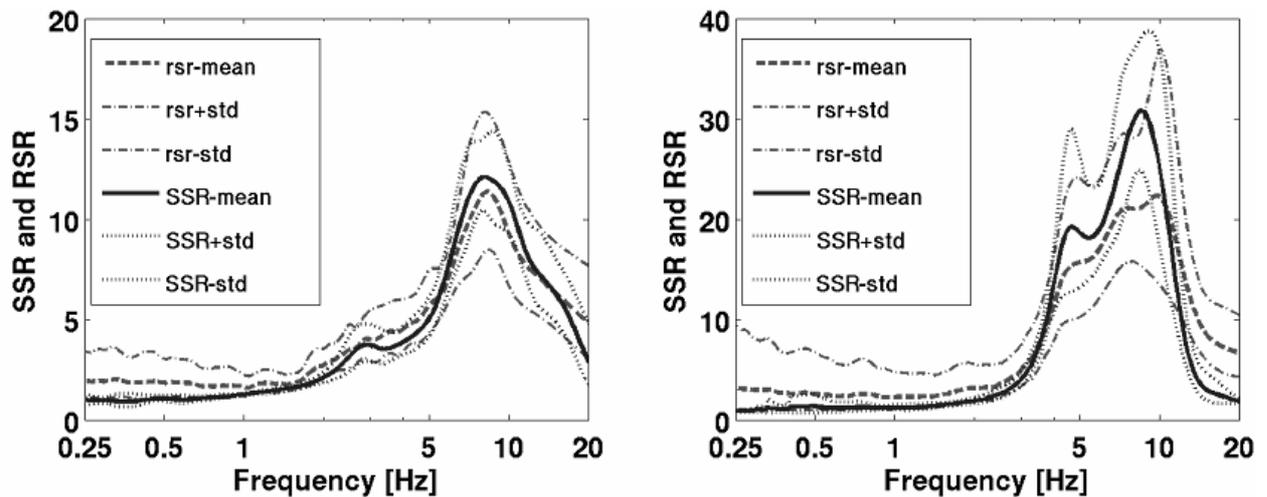


Figure 98: Exemple illustrant le choix de la fréquence de résonance dépendant de l'échantillonnage des courbes ; à gauche : site NGNH23, à droite : site TKSH12. SSRbh en trait plein, RSRbh en pointillés.

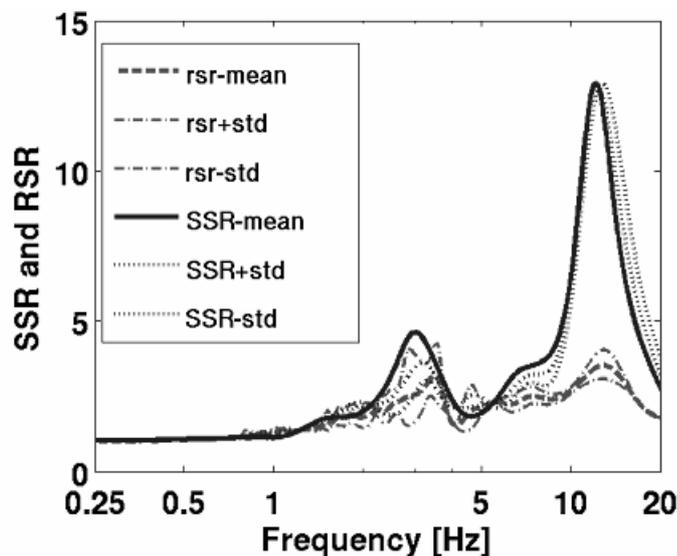


Figure 99: SSRbh en trait plein, RSRbh en pointillés, écart type en petits pointillés ; site AOMH15

En règle générale les rapports SSRbh montrent des pics beaucoup plus nets tandis que les rapports RSRbh sont globalement, plus plats à cause d'un échantillonnage plus grossier. Le choix des pics à pointer est donc souvent difficile à faire. Étant donné les difficultés d'objectivité dans la comparaison des pics des deux rapports SSRbh et RSRbh, une sélection visuelle a été effectuée. Visuellement 18 sites sont considérés comme ayant des rapports SSRbh et RSRbh très différents, cela représente seulement 3.3 % sur les 538 sites avec des données, dont 16 sur les 495 sélectionnés (profil de vitesse considéré fiable), soit 3.2%. La Figure 100 montre deux d'entre eux. Ces 18 sites ont entre 1 et 2 enregistrements, les rapports SSRbh et RSRbh seraient donc à améliorer avec un plus grand nombre d'événements afin de confirmer cette nette différence.

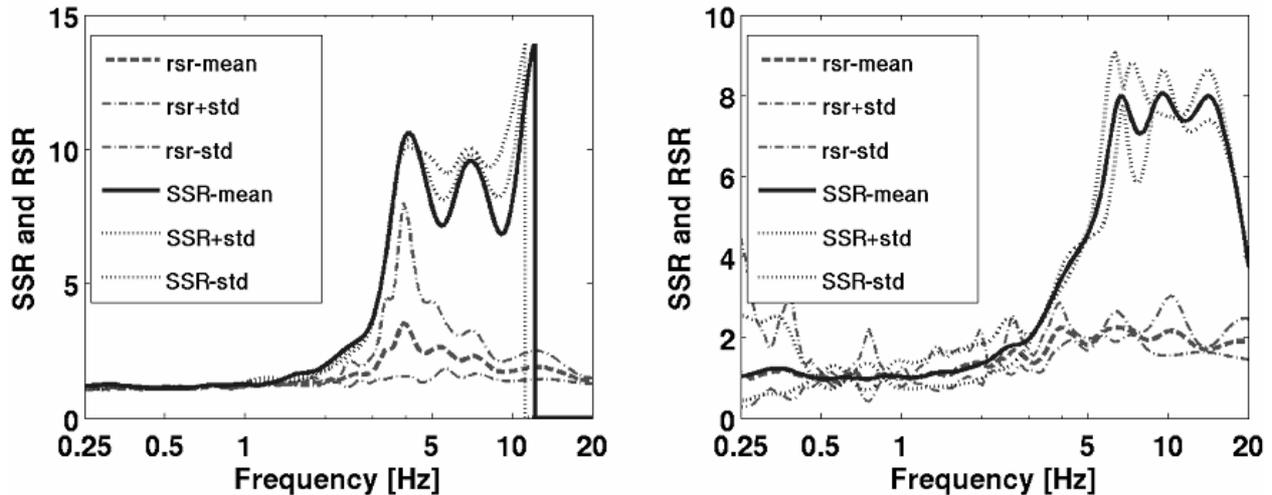


Figure 100: Sites où les rapports SSRbh et RSRbh sont nettement différents. SSRbh en trait plein, RSRbh en pointillés, écart type en pointillés fins ; gauche) site FKO02 ; droite) site OITH10

Enfin le rapport SSRbh sur RSRbh a été effectué pour chaque site. La moyenne (sur les valeurs, non pas sur les logarithmes des valeurs) de ces rapports sur tous les sites nous donne une indication des bandes de fréquence où les RSRbh et SSRbh sont proches. L'écart type correspondant reste relativement faible dans la bande de fréquence 0.3 à 8 Hz.

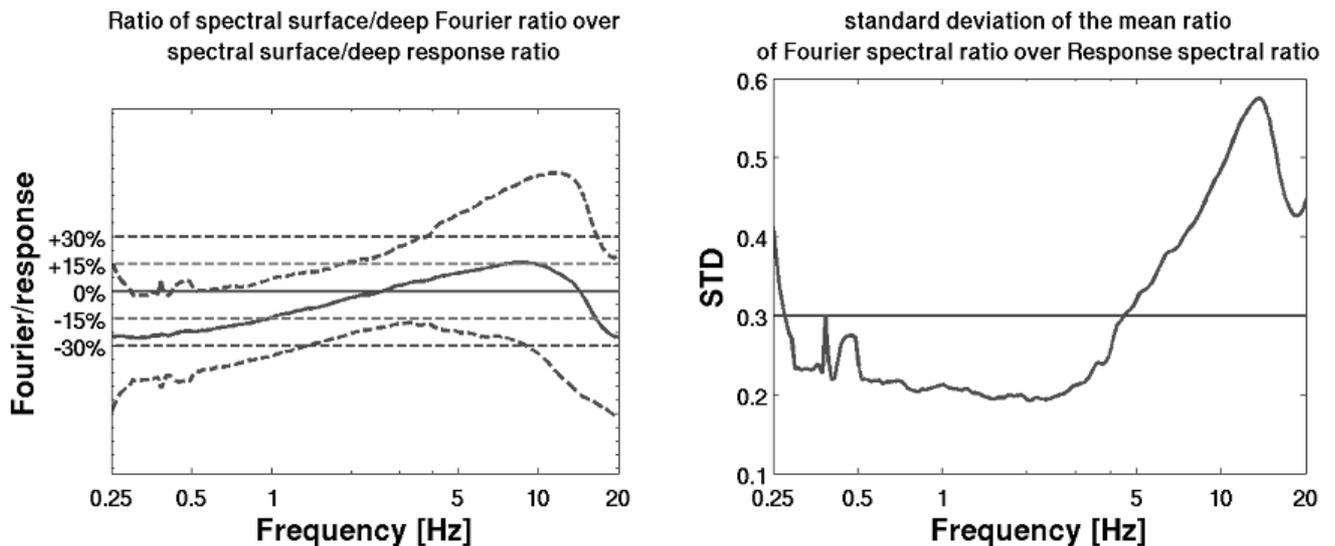


Figure 101: A gauche courbe moyenne, en trait plein épais, des rapports SSRbh / RSRbh sur 538 sites ; à droite : écart type du rapport SSR / RSR moyen selon la fréquence.

Comparaison à hautes fréquences (Figure 102) : Nous avons comparé la différence de ces rapports à 25 Hz soit une période de 0.04s. Sur un rapport de spectre de réponse cela correspond au PGA d'un événement donné. A 25 Hz la différence moyenne des amplitudes est de 42 % avec un écart type de 23 %. La plupart des sites (80,5%) montre à 25Hz une valeur du rapport en réponse plus élevée que le rapport en Fourier. Cette remarque est confirmée par la Figure 101 graphique de gauche, qui montre que les RSRbh sont supérieurs aux SSRbh en moyenne de 0.2 à 2.6 Hz et à partir de 14.4 Hz pour les hautes fréquences.

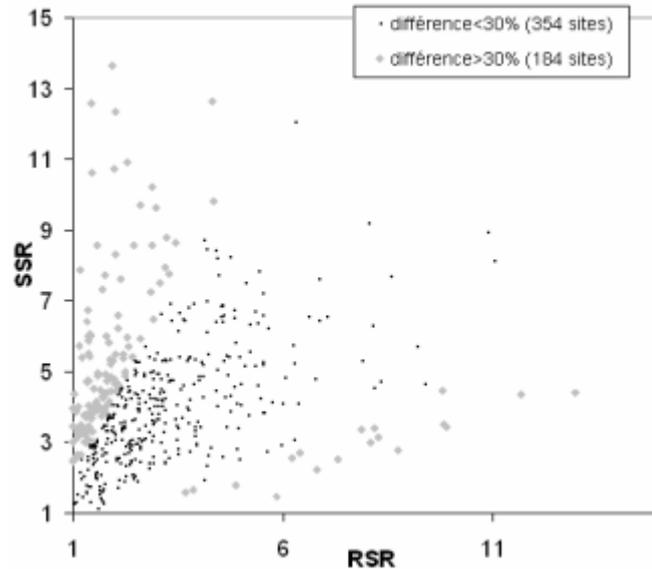


Figure 102: Comparaison de la valeur du rapport SSRbh et du rapport RSRbh à 25 Hz, en points noirs la différence est inférieure à 30%, en losanges gris, la différence est supérieure à 30%

Comparaison à basses fréquences (Figure 103): Les valeurs des deux rapports à 0.2 Hz sont comparées, elles présentent une différence moyenne de 28% avec un écart type de 22%. La plus part (92.2%) des sites montre à 0.2Hz une valeur du rapport en réponse légèrement plus élevée que le rapport en Fourier (Figure 101).

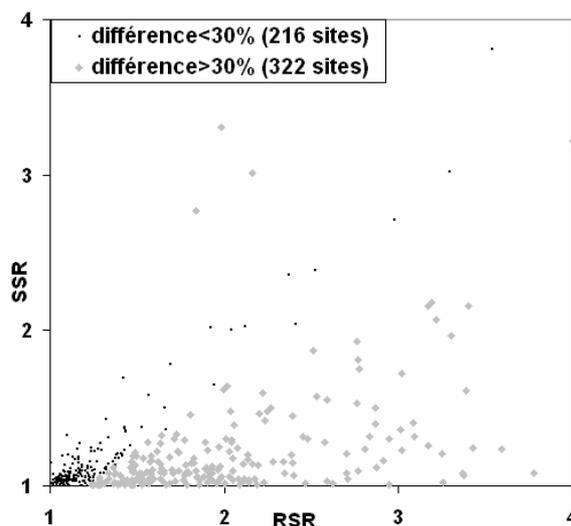


Figure 103: Comparaison de la valeur du rapport SSRbh et du rapport RSRbh à 0.2 Hz, en points noirs la différence est inférieure à 30%, en losanges gris, la différence est supérieure à 30%

Conclusion :

On estime que les SSRbh et RSRbh sont comparables quand au moins une des deux courbes du rapport moyen SSRbh/RSRbh sur l'ensemble des sites plus un écart type et moins un écart type est comprise entre 0.7 et 1.3. Cela correspond à une bande de fréquences entre 0.2 Hz et 9.2 Hz (Figure 101 graphique de gauche). Pour les fréquences au-dessus de 10 Hz les rapports SSRbh et RSRbh sont différents et n'ont donc pas la même signification.

Le rapport de Fourier a tendance à sous-estimer le rapport des spectres de réponses aux deux extrémités : très basse fréquence ($f < 0.5$ Hz) et très haute fréquence ($f > 15$ Hz). Ceci est du au comportement particulier du spectre de réponse dont les valeurs extrêmes sont liées respectivement au déplacement maximal et à l'accélération maximale.

La comparaison entre les rapports de spectre de Fourier et les rapports des spectres de réponse nous permet d'utiliser la même démarche d'étude sur ces deux types de rapports.

10. Problème de la définition d'un site au rocher référence

Il existe de nombreuses méthodes utilisant des enregistrements de séismes pour caractériser les effets de site. Quatre d'entre elles ont été utilisées dans cette étude :

- le rapport des spectres de Fourier des enregistrements d'une station sur le site par les spectres des enregistrements sur une station de référence au rocher, noté SSR ;
- le rapport des spectres de réponse des enregistrements d'une station par les spectres des enregistrements sur le site sur une station de référence au rocher, noté RSR ;
- le rapport des composantes horizontales sur verticales des spectres de Fourier d'une station sur le site, noté H/V_F ;
- le rapport des composantes horizontales sur verticales des spectres de réponse d'une station sur le sol, noté H/V_R.

Les deux premiers rapports nous donnent des informations plus complètes, mais elles nécessitent une station de référence au rocher ce qui est parfois problématique. Bien que les deux derniers rapports ne donnent pas d'estimation du niveau de l'amplification, leur utilité a cependant été mise en évidence par de nombreux travaux, de [Zaré et al., 1999] à [Zhao, 2006], notamment pour une classification de sites. Ces rapports H/V présentent le grand avantage de ne nécessiter aucune station de référence, parfois difficile à trouver sur le terrain.

Dans notre cas d'étude du réseau KIKNET; la station dite de référence est en fond de forage, ce qui pose principalement deux problèmes:

- La disparité des caractéristiques du fond de forage, à la fois en termes de profondeur du forage (notée ici z_{BH}) et de vitesse en fond de forage (V_{SDH}). Une méthode d'homogénéisation permettant de comparer tous les sites sera proposée au paragraphe **11**.
- La situation en profondeur modifie le contenu spectral par rapport à une situation en surface libre, toutes caractéristiques égales par ailleurs (interférences entre ondes incidentes et réfléchies). Cet aspect sera abordé au paragraphe **12** suivant.

L'objet de cette section est d'abord de mettre en évidence la très grande variabilité des caractéristiques de fond de forage en termes de vitesse des ondes de cisaillement et ensuite de montrer l'influence de cette variabilité sur les fonctions d'amplification mesurées avec le rapport spectral site/profondeur. Il en ressort la nécessité de définir des critères quantitatifs sur ce qu'il est possible d'accepter comme un "bon" site de référence en profondeur: plusieurs sont proposés et discutés ici.

Ces travaux ont été regroupés dans un projet d'article intitulé « *Need for defining a standard rock and propositions based on the Kik-net data base* », et reproduit ci-dessous.

10.1. Introduction

It is nowadays recognized that soft soils do amplify the seismic motion compared to hard rock sites. This effect is most often quantified through the so-called Standard Spectral Ratio (SSR) method, i.e., the ratio between the Fourier spectra of ground motion at the studied site and the corresponding one at a reference site. This method requires simultaneous recordings of seismic events at a pair of stations, one located at the studied site, and the other one at a "close enough" reference site.

The needed nearby reference site is an important issue, especially when one wants to compare the site response from one site to another. Ideally, a "good" reference site to be taken into account should be a flat, unweathered rock site to avoid both topographic effect, and high frequency resonance effects due to the weathered zone. According to the new European regulation (EC8), rock sites correspond to sites with an average shear wave velocity over the top 30 meters, V_{s30} , higher than 800 m/s. Other regulations may consider slightly different limits (e.g. V_{s30} between 760 m/s and 1500 m/s for NEHRP, [Borcherdt, 1970, 1992]).

Steidl [Steidl, 1996] has already shown that surface rock sites can have a site response of their own. He considers that a reference site should be equivalent to the input motion at the base of the soil layers and conclude that the rock site response could lead to a biased site effect estimation according to the reference chosen. In our case the issue is not the rock response of its own but the variability of the response from one reference to the other.

The first goal of this paper is to take advantage of the large amount of high quality data from the Kik-net network to investigate the spreading of the velocity profiles, and the associated variability of the response for "rock sites" as defined according to the usual V_{s30} velocity criterion (i.e., $V_{s30} > 750$ m/s). A second goal is thus to improve the definition of what should actually be a "standard reference rock site", in order for amplification values to be comparable from one area to another one.

In order to fulfil those goals, this paper consists of three main sections. The first one presents several possible criteria for defining a rock site, taking into account either the V_{s30} value or the site fundamental frequency f_0 , or a combination of them; these criteria are used to extract subsets of the whole Kik-net sites, from which the actual variability of the corresponding velocity profiles can be investigated.

The second one presents, for each of these Kik-net rock sites subsets, the variability of the observed site response, as derived from the available experimental recordings and both the surface/borehole and the surface H/V spectral ratio techniques.

The third one compares this real, observed site response with the computed site response for the generic rock models proposed by [Boore, 2004] in order to help in defining a "standard reference rock".

10.2. *Variability of the velocity profiles of rock sites from Kik-net database*

The goal of this section is first to present different criteria for the definition of rock sites, and then to investigate the corresponding variability of velocity profiles as derived from the Kik-net sites that fulfill those various criteria.

10.2.1. Rock groups

Various criteria can be used for characterizing a rock site. The most widely used is based on the average shear wave velocity over the top 30 meters, V_{s30} : NEHRP assumes a rock site whenever $V_{s30} > 750$ m/s, while the limit is 800 m/s for EC8. One may also think of a good rock site as a site without low frequency resonance: this would for instance eliminate rock site with a thick weathered layer, which may resonate down to 3-5 Hz (e.g., a weathered granite layer with a V_s down to 300 m/s over the top 15-20 m (see for instance [Havenith et al., 2002])

It was thus decided to consider five different possibilities, as listed in the first column of Table 10. The first two are only based on V_{s30} : the first one corresponds to the classical, very general definition ($V_{s30} > 750$ m/s), the second one is much more restrictive and considers only

a narrow range for Vs30 (750-850 m/s) in view of defining a "standard" reference rock. The third one follows another approach and is based exclusively on the fundamental frequency ($f_0 > 10$ Hz), without any consideration for the velocity profile. The last two are the combination of the first two and the third one.

We then extracted all the sites from the Kik-net data base that correspond to each of these 5 categories: The whole data set consists of 622 instrumented sites with a pair of surface and down-hole sensors, and with down-hole velocity measurements for shear and compression waves. The complete list of sites is detailed in the Appendix for the each rock site category, Table 10 summarizes the main statistics of these site collections: total number, number of sites with available recordings, mean and standard deviations of average velocities VS30 and Vs5, average and standard deviation for velocities at maximum depth VsDH, and fundamental frequencies.

Before commenting in more detail each group, several noticeable points may be pointed out:

There are numerous sites and recordings correspond to a single parameter criterion (first three groups), while only few correspond to combined parameters (last two groups).

Simultaneously, the standard deviation on f_0 for Vs30 categories, and on Vs30 for the third "f₀" category, exhibit significantly higher values (1.75, 1.72 versus 1.19, and 1.51 versus 1.23 and 1.04, respectively)

Both observations witness the fact that these two parameters, Vs30 and f_0 , are highly uncorrelated

Characteristics of the group [m/s]	Nb of sites	Nb of sites with events	Mean value of Vs30 [m/s]	Standard deviation	Mean value of Vs05 [m/s]	Standard deviation	Mean value of VsDH [m/s]	Standard deviation	Mean value of f_0	Standard deviation
Vs30>750	70	58	956	1.23	496	1.53	2191	1.24	5.7	1.75
750<Vs30<850	28	20	799	1.04	387	1.30	2127	1.26	6	1.72
$f_0 > 10$ Hz	32	32	579	1.51	280	1.36	2410	1.19	13	1.19
$f_0 > 10$ Hz & Vs30>750	9	9	863	1.08	362	1.25	2607	1.17	13.4	1.19
$f_0 > 10$ Hz & 750<Vs30<850	5	5	811	1.04	317	1.26	2784	1.17	12.0	1.18

Table 10 : Characteristics of each group from sites of Kik-net

10.2.2. Rock sites with Vs30 higher than 750 m/s

A total of 70 Kik-net sites correspond to this typical criterion for rock site, with borehole depth ranging from 30 m to 275 m. Figure 104 displays all the corresponding shear waves velocity profiles at different scales from 300 meters to 30 meters, together with the average profiles and average plus/minus one standard deviation. Average and standard deviation were calculated on logarithmic values. These average and standard deviation are computed at each depth assuming a lognormal distribution for the velocity.

The Vs30 values in this group span a very wide range, from 752 m/s to 2100 m/s, with mean and median values of 956 and 902 m/s, respectively, while the down-hole velocity varies from 1100 m/s to 3200 m/s. Quite surprisingly, the average velocity profile exhibits a large gradient over the top 50 m (from about 500 m/s at surface to about 2000 m/s at 50 m), and is ten almost constant down to 200 m.

As depicted in Figure 105, the standard deviation at each depth is quite large, around 1.4 when considering only the depths for which 30 profiles, roughly for the top 100 meters (Figure 105, middle graph), expected for the top 10 meters where the standard deviation is larger.

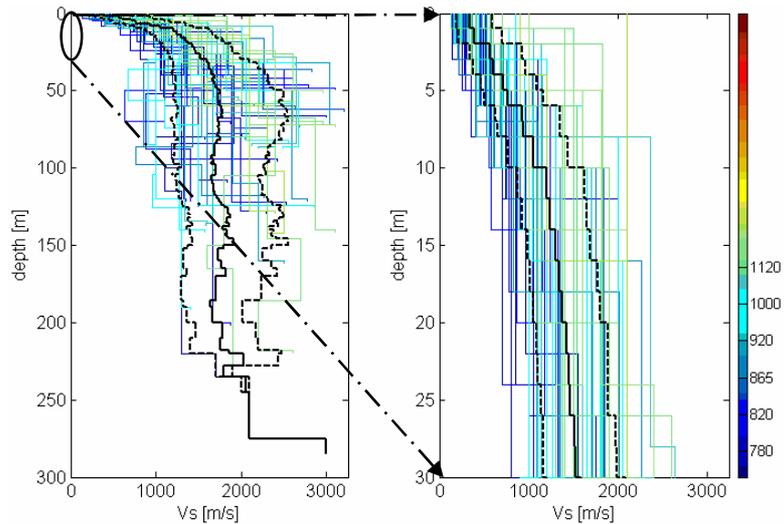


Figure 104: Velocity profiles of Kik-net sites with Vs30 higher than 750 m/s, the color refers to the Vs30 value in [m/s] as indicated on the right part, the plain black curve is the mean curve and the dot black curves are the mean curve plus and less one standard deviation. From left to right the view is zoomed

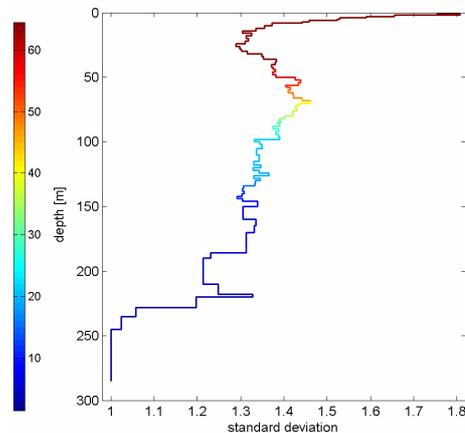


Figure 105: Standard deviation of the mean Vs profile for the sites with Vs30>750m/s, the color bar represents the number of profile considered at the corresponding depth.

10.2.3. Rock sites with Vs30=800 m/s +/- 50 m/s

Considering the large variability of velocity profiles for VS30 > 750 m/s, a more selective criterion was tested in view of defining a standard reference rock site. We choose Vs30=800 m/s +/- 50 m/s for a practical use. Indeed it is a common velocity value in regulation and it is also much easier to find such a rock site rather than a rock site with a Vs30 around 1500 m/s. 28 sites from the Kik-net data fulfill this criterion. Their velocity profiles, presented on Figure 106, are still relatively spread of but the standard deviation is considerably reduced (Figure 107) with respect to the previous group. On may notice, comparing Figure 107 and Figure 104, that the average velocity is significantly reduced at larger depth (around 1500 m/s from 50 to 200 m)

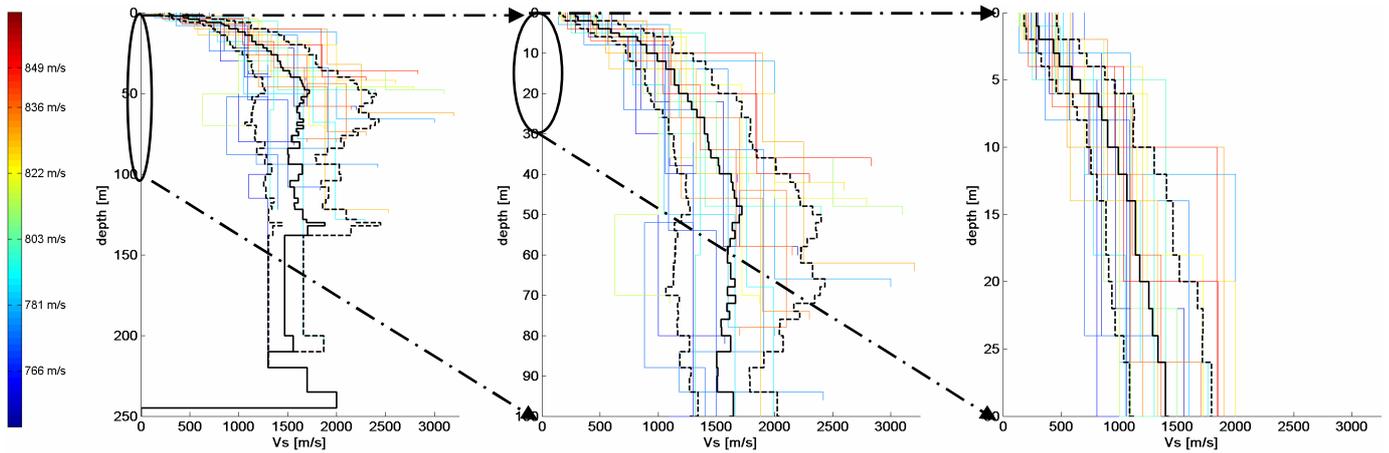


Figure 106: Velocity profiles of sites with Vs30 between 750 m/s and 850 m/s, the color refers to the Vs30 value. The plain black curve is the mean curve and the dot black curves are the mean curve plus and less one standard deviation. From left to right the view is zoomed

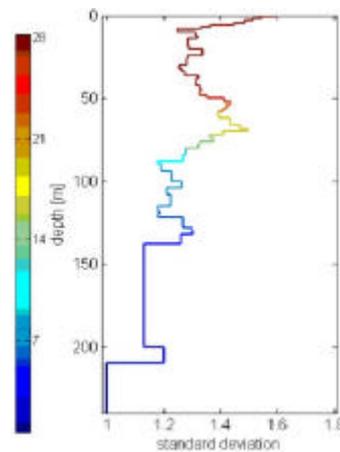


Figure 107: Standard deviation of the mean Vs profile for the sites with $750 < Vs_{30} < 850$ m/s, the color bar represents the number of profile considered at the corresponding depth. From a) to c) the view is zoomed, d): comparison with the standard deviation (blue curve) of the group with $Vs_{30} > 750$ m/s

10.2.4. Rock sites with $f_0 > 10$ Hz

Another characteristic for rock could be the resonance frequency f_0 . Indeed a high f_0 corresponds to the resonance of a thin, stiff layer, which may be associated with a weathered rock, while a low f_0 (below 2-3 Hz) cannot be associated with rocks (soft and/or very thick surface layer-; one exception should be noticed however, corresponding to surface topography effects which may also affect rock at relatively low frequencies, depending on topography size (see [Géli et al., 1988]). Such a criterion would be very convenient for practical cases, since this value can be easily obtained with an H/V analysis of the noise. In our case it was determined with empirical transfer function (cf. next paragraph 10.3). We selected here a rather restrictive condition, with a minimum value for f_0 of 10 Hz (i.e., a couple $V_s > 400$ m/s and $h < 10$ m). There are 31 Kik-net sites fulfilling those conditions, with f_0 varying from 10 to 21 Hz, and the maximum depth ranging between 16 to 140 meters. As expected, the variability of the selected profiles; displayed in Figure 108 is significantly larger than the variability of the profiles of the groups with a selection on Vs30. Several additional observations are worth to be noticed:

Despite the severity of the criterion, the average Vs30 value is somewhat smaller than in the two previous groups (579 m/s), and the surficial velocity significantly smaller (only 280 m/s): this criterion alone may thus lead to keep sites with very thin, soft sedimentary layers, which may

therefore be misleading and contradictory with the objective of defining a standard reference rock site

Once again, the velocity profile exhibits a rather constant value below 50 m: the average value is rather high, around 2000 m/s (same value as in the first group).

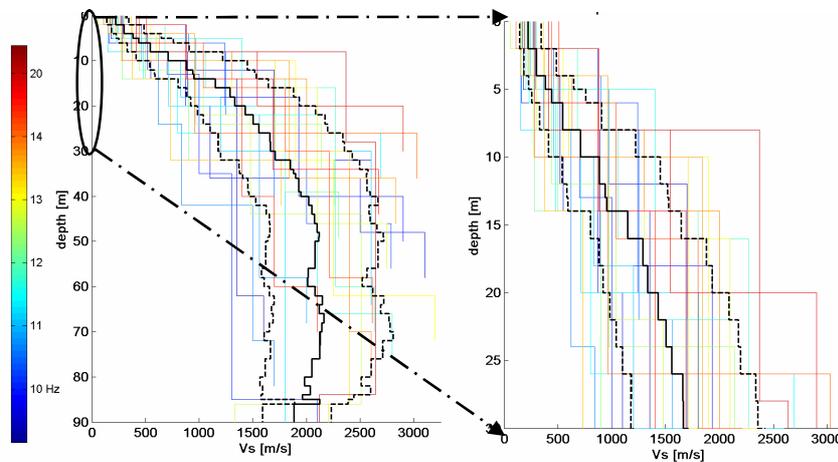


Figure 108: Vs profiles of sites with resonance frequency higher than 10 Hz, the color scale corresponds to the f_0 value in Hertz. The plain black curve is the mean curve and the dot black curves are the mean curve plus and less one standard deviation. From left to right the view is zoomed

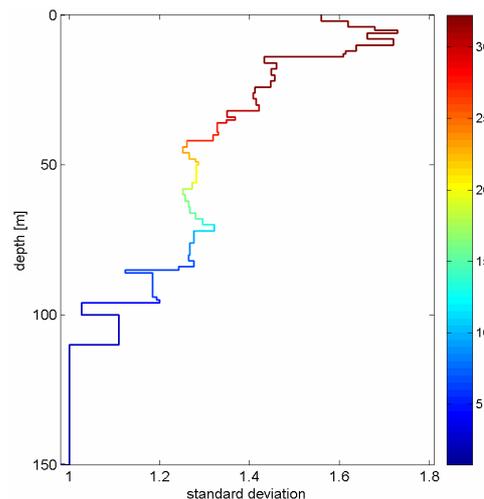


Figure 109: Standard deviation of the mean Vs profile for the sites with $f_0 > 10$ Hz, the color bar represents the number of profile considered at the corresponding depth

10.2.5. Rock sites with $f_0 > 10$ Hz and $V_{s30} > 750$ m/s

This group is the intersection between the first and third sets. It consists of a total of nine Kik-net sites with f_0 higher than 10 Hz and V_{s30} higher than 750 m/s, as listed in Table 14, annex. The corresponding velocity profiles and the associated standard deviation are displayed in Figure 110, which allows to conclude that combining the two criteria lead to a significant reduction in the variability both of the velocity profile and of the fundamental frequency (see also Table 10). This reduction however should be balanced by the fact that the number of sites is also significantly decreased, and that the statistical meaning is reduced

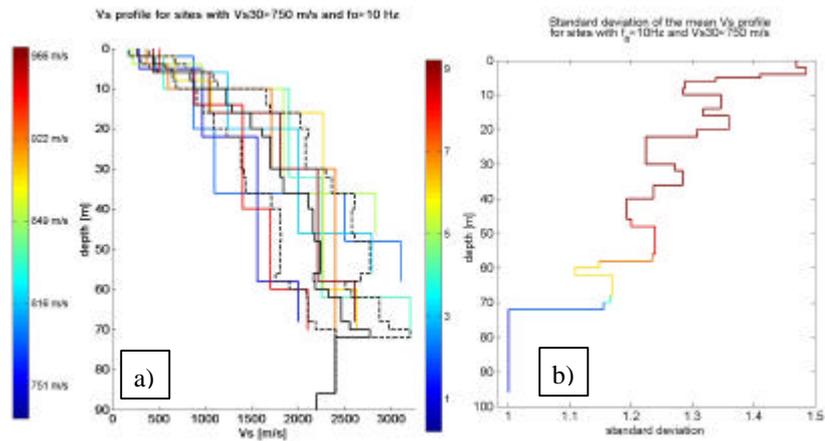


Figure 110: Characteristics for sites with $f_0 > 10\text{Hz}$ and $V_{s30} > 750\text{ m/s}$. a) V_s profiles, color scale according to the V_{s30} value, mean profile in plain black and mean plus one standard deviation in dot black; b) standard deviation of the mean V_s profile of the 9 sites, color scale according to the number of sites taken into account for each depth;

10.2.6. Rock sites with $f_0 > 10\text{Hz}$ and $750 < V_{s30} < 850\text{ m/s}$

Combining now the second and third groups results in a very restrictive definition of rock sites: only five Kik-net sites (listed in Table 15, see annex) have a f_0 higher than 10 Hz and V_{s30} between 750 m/s and 850 m/s. The variability, average profile, and standard deviations are significantly lower (though less significant because of the very few sites) than the first three “single criterion” groups, and comparable to the previous one (Figure 111c). A larger data set should be used to confirm the improvement of choosing such standard reference rock site, but the number of rock sites with deep, reliable V_s profile is still quite small for the whole world, and the Kik-net network is the best single data set.

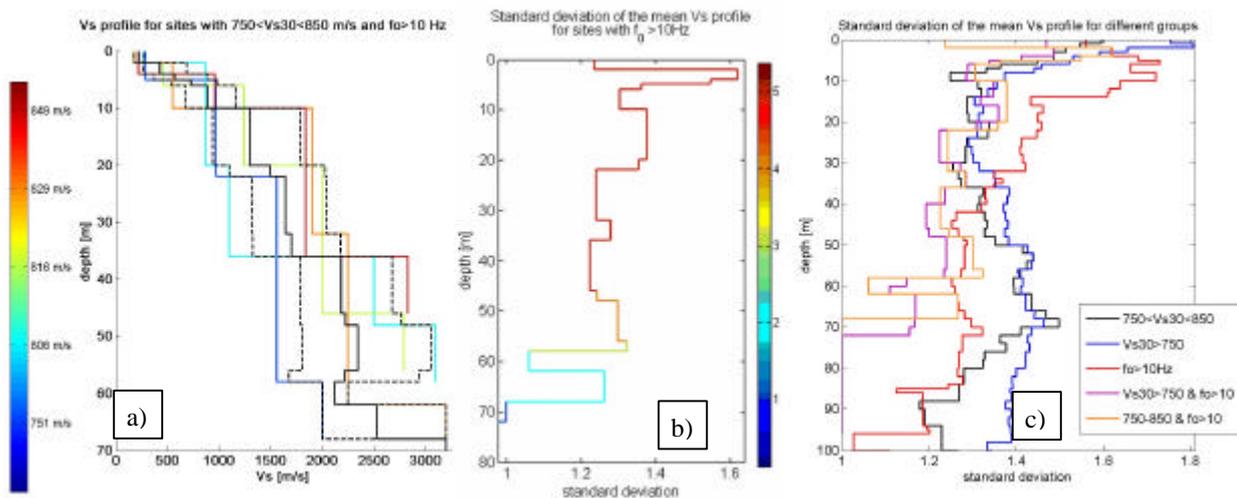


Figure 111: Characteristics for sites with $f_0 > 10\text{Hz}$ and $750 < V_{s30} < 850\text{ m/s}$. a) V_s profiles, color scale according to the V_{s30} value, mean profile in plain black line and mean +/- one standard deviation in dot black lines; b) standard deviation of the mean V_s profile of the 5 sites, color scale according to the number of sites taken into account for each depth; c) comparison of the standard deviations: of the groups with $f_0 > 10\text{Hz}$ (red curve), $V_{s30} > 750\text{m/s}$ (blue curve) $750 < V_{s30} < 850\text{ m/s}$ (black curve), $f_0 > 10\text{Hz}$ and $V_{s30} > 750\text{ m/s}$ (violet curve) and $f_0 > 10\text{Hz}$ and $750 < V_{s30} < 850\text{ m/s}$ (orange curve)

To conclude we compare all the mean velocity profiles (Figure 112) and standard deviation (Figure 113) of the 5 groups. As we like to put forward an improvement with more precise

criteria than $V_{s30} > 750$ m/s, we will divide all the standard deviation by the standard deviation of the group with $V_{s30} > 750$ m/s. The Figure 113 shows that all the other groups provide smaller standard deviation below 70 meters, but the number of sites of each group can be really low at that depth (between 3 and 15 sites). Above 50 meters, the standard deviation is worse for the group with $f_0 > 10$ Hz, and slightly reduced for the other groups.

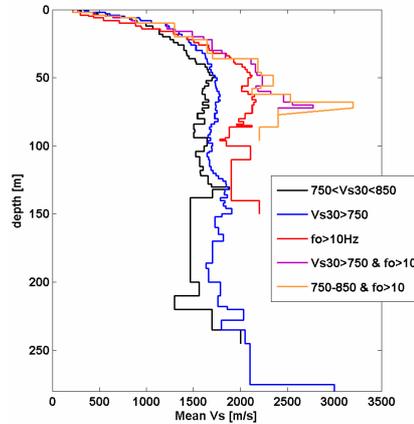


Figure 112: Mean velocity profiles for each group: $f_0 > 10$ Hz (red curve), $V_{s30} > 750$ m/s (blue curve) $750 < V_{s30} < 850$ m/s (black curve), $f_0 > 10$ Hz and $V_{s30} > 750$ m/s (violet curve) and $f_0 > 10$ Hz and $750 < V_{s30} < 850$ m/s (orange curve).

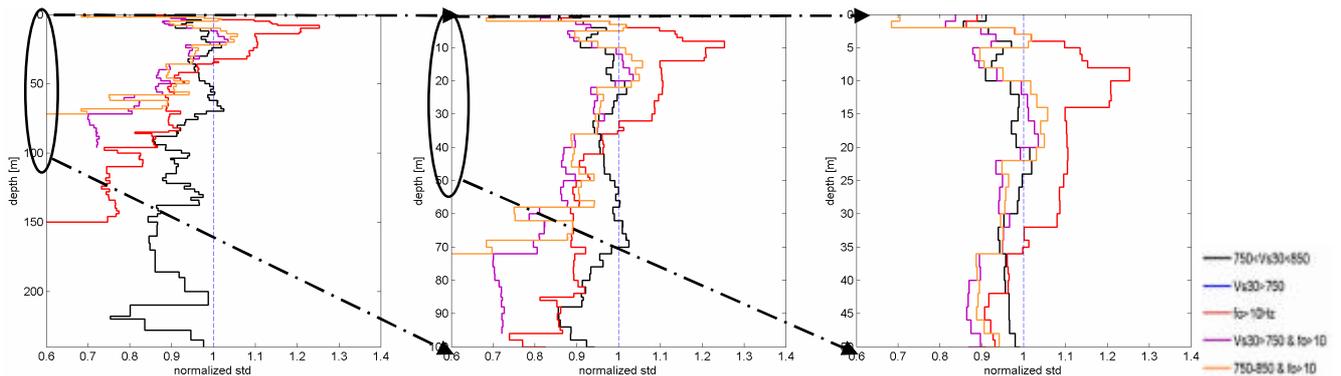


Figure 113: Normalized standard deviation of the mean profiles for each group. The standard deviation is normalized by the group with $V_{s30} > 750$ m/s. The groups are: $f_0 > 10$ Hz (red curve), $V_{s30} > 750$ m/s (blue curve) $750 < V_{s30} < 850$ m/s (black curve), $f_0 > 10$ Hz and $V_{s30} > 750$ m/s (violet curve) and $f_0 > 10$ Hz and $750 < V_{s30} < 850$ m/s (orange curve). From left to right the view is zoomed.

10.3. Variability of the response of rock sites from Kik-net database

The goal of this section is to analyze the variability of reference rock site responses for the five previously defined groups. For the Kik-net sites, two options are available to derive information on the individual site response from the earthquake recordings, through the classical spectral ratio technique:

- The ratio between the Fourier spectra of the surface and down-hole recordings, called below the Standard Spectral Ratio for the Bore-Hole, SSRbh
- The ratio between the horizontal and vertical Fourier spectra of the surface recordings, also called receiver function, and denoted H/Vseism in the following.

Another option could have been to use generalized inversion technique ([Field et al., 1995], [Drouet et al., 2005], [Andrews, 1986]), but applying GI techniques to the whole Kik-net datasets

to derive single station amplification functions would have been beyond our limited scope. Both methods use the Fourier spectra calculated over the complete signal. The Fourier spectra are considered only when the signal over noise ratio is higher than 3, they are smoothed with Konno-Ohmachi smoothing.

The SSRbh technique provides an empirical estimation of the response of the surface site with respect to the deep site. Such estimation may thus present, with respect to the "absolute" site response, two main bias: the first one is related with the fact that the "reference", i.e., the down-hole sensor, does vary from one site to the other, and that it is located at a variable depth and not at the surface (see the variability in down-hole characteristics in Table 10 and the annex). Considering that we deal here only with a subset of rock sites, we will in a first step neglect these biases: the down-hole velocities exhibit rather high values (average and median larger than 2000 m/s, and standard deviation around a factor of 1.2): the correction factor being proportional to the square root of the impedance contrast, the resulting bias should be less than 15-20 % in the high frequency range, and much less at low frequencies.

The H/V technique ([Bard, 1999], [Parolai et al., 2002], [Bonnetoy-Claudet, 2005]) provides only the site fundamental resonance frequency, but cannot provide reliable information on the actual amplification. However, it has often been proposed that a "good" reference site should have a "flat" H/V curve. Its main advantages are to provide an "absolute" measurement of f_0 , without any bias linked to a down-hole reference station, and also to provide an "objective" estimate of the "similarity" between different rock sites: similar velocity profiles should lead to similar H/V curves.

A hard enough rock site should exhibit a low amplitude response, i.e., a SSRbh amplification lower than 2 at least for low frequencies, and a high frequency, low amplitude H/V curve. Indeed assuming a weathered part over the first 10 meters with a mean velocity over 10 meters of 400 m/s, corresponding to the minimum V_{s10} value in our 58 rock sites ($V_{s30} > 750$ group), the lower frequency value for a one dimensional case is $f_0 = V_{s10}/4 * 10 = 10$ Hz.

10.3.1. Rock sites with V_{s30} higher than 750 m/s

Earthquake recordings are available for 58 sites out of the 70 Kik-net rock sites of the first group. The individual SSRbh and H/V Fourier spectral ratios are displayed in Figure 114 for each of these 58 sites, with a colour code related to the V_{s30} value, together with a logarithmic average and standard deviation curves for the whole group.

SSRbh curves exhibit a large site-to-site scattering, for the amplitude values and the amplified frequency band as well (Figure 114, right). Indeed the amplified frequency starts slightly above 1 Hz (a few sites have a peak with an amplitude reaching 4-5 between 1 and 2 Hz), and expands over all the higher frequencies; the peak amplitudes vary from about 2 to 31, with a clear trend for increased amplitudes at higher frequencies: the average curve exhibit a steady increase from 1 at low frequencies up to 5 between 8 and 15 Hz, and the standard deviation also increases regularly from a factor of 1.1 at low frequencies to 2 at 8-15 Hz.

The H/V ratios displayed on Figure 114, left graph, exhibit a similar "qualitative" behaviour: large site to site scattering, increase of the average curve with increasing frequency. The H/V amplitudes are nevertheless significantly smaller, so that both the standard deviations (average around a factor 1.3) and the high frequency maximum of the average curve (around 2 at 10 Hz) are significantly smaller than for SSRbh.

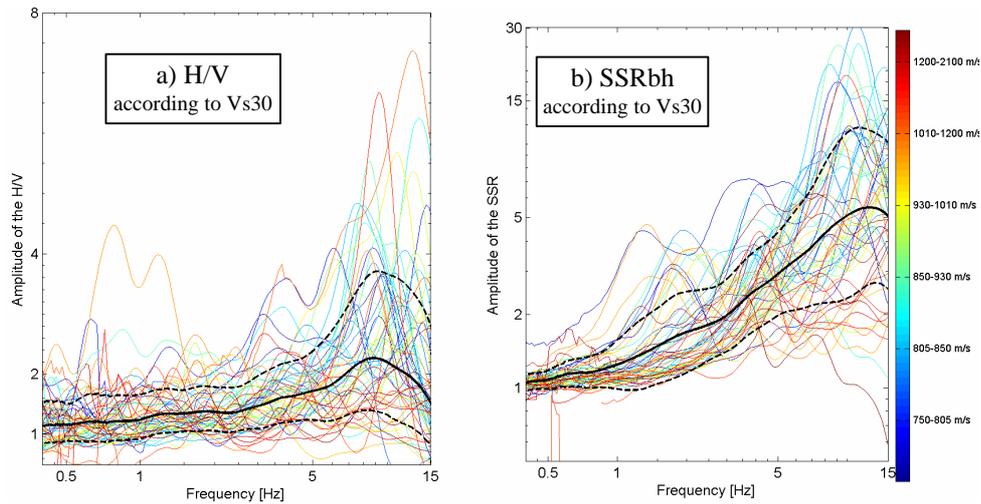


Figure 114: Observed variability of site response for the first group ($V_{s30} > 750$ m/s) : a) H/V ratio of seismic events recorded at the surface; b) SSRbh; the color scale refers to V_{s30} value, solid black curves correspond to the average curves for the whole group, dotted black curves correspond to the average \pm one standard deviation

The site responses displayed in Figure 114 therefore do not correspond to the wished, "ideal" rock site response, where one would expect an amplification lower than 2 below 10 Hz. This could be an indication that the " $V_{s30} > 750$ m/s" criterion is too wide to define a standard rock. Several comments however should be issued before accepting such a conclusion. The variability of the SSRbh results can have several origins:

- The down-hole characteristics, i.e., depth z_{hole} and velocity V_{sDH} : as indicated in Table 13 in the annex, z_{hole} varies from 30 meters to 275 meters and V_{sDH} varies from 1100 m/s to 3200 m/s.
- The velocity profile itself, for which a common proxy is the V_{s30} value (varying from 752 m/s to 2100 m/s).
- The variability of the H/V ratios is essentially linked with the velocity profiles (and their proxy the V_{s30} value).

In order to better capture the respective influence of V_{s30} , V_{sDH} and z_{hole} , we have considered different subgroups of sites according to the values of these parameters, and computed the logarithmic average spectral ratios for each subgroup. The threshold values for each group were adapted so that there are about 10 (± 2) sites per subgroup, in order for the subgroup average to be meaningful. The results, i.e., sensitivity of H/V on V_{s30} and of SSRbh on V_{s30} , V_{sDH} and z_{hole} , are displayed in Figure 115, (a to d, respectively). Roughly, as shown on Figure 115 (a and b), both H/V and SSRbh amplitudes increase with decreasing V_{s30} ; V_{s30} does not affect however the frequency dependence: the maximum amplitude always occurs at high frequencies (8-15 Hz). On the opposite, the borehole depth (z_{hole} , Figure 115d) affects mainly the frequency content and not as much the peak amplitude of the SSRh curves: large z_{hole} values are associated with (slightly) increased low frequency effects, which is consistent with the fact that destructive interferences at depth occur at lower frequencies, and artificially boost the SSRbh values. Finally, the down-hole velocity V_{sDH} is shown in Figure 115c to affect both the maximum amplitude (increasing with increasing V_{sDH}), and the frequency range (low frequency broadening for decreasing V_{sDH}): the first effect is consistent with an increased surface / depth impedance contrast. The second one is probably a bias due to a decrease of f_0 for the subgroup with low V_{sDH} velocities (Table 11).

Table 11: Characteristics of the different groups according to the VsDH value, for the rock sites with Vs30>750 m/s

group according to VsDH	number of sites		Z _{hole} [m]	vs10 [m/s]	vs20 [m/s]	vs30 [m/s]	VsBR [m/s]	f ₀ [Hz]
1100<=VsDH<=1600	11	mean	107	683	818	896	1399	2
		std	1,4	1,2	1,1	1,1	1,1	1,5
1600<VsDH<2000	9	mean	52	698	890	1008	1789	4
		std	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,4
2000<=VsDH<=2300	12	mean	84	585	782	923	2155	6
		std	1,7	1,3	1,2	1,2	1,1	1,8
2300<VsDH<=2600	11	mean	78	705	912	1055	2488	5
		std	1,5	1,7	1,5	1,3	1,0	1,5
2600<VsDH<3000	9	mean	60	557	800	989	2762	10
		std	1,4	1,3	1,2	1,2	1,0	1,4
3000<=VsDH<=3200	6	mean	111	686	890	1038	3083	7
		std	1,8	1,5	1,3	1,3	1,0	1,7

As the H/V ratio will not be influenced by the down-hole characteristics and the H/V ratios exhibit an important variability, the influence of the down-hole characteristics will not be taken into account.

The practical important consequence for site effect estimation is that a high Vs30 reference site may lead to a significant empirical overestimation of the site amplification.

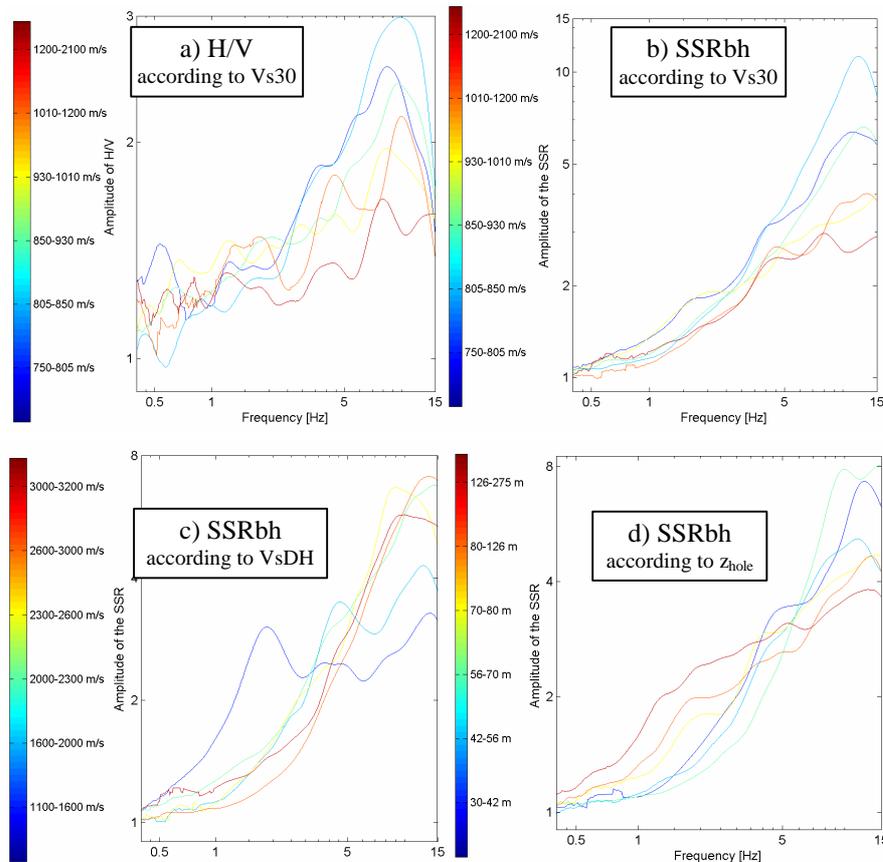


Figure 115: a) Mean H/V ratio according to the Vs30 value; b) to d): Comparison of mean SSRbh: the means were done according to b) the Vs30 values, c) the VsDH values, d) the depth of the hole values

10.3.2. Rock sites with $V_{s30}=800$ m/s \pm 50 m/s

Within the Kik-net set of 28 sites with V_{s30} between 750 m/s and 850 m/s, 20 of them have actually recorded significant crustal events in the period 1998-2004. Their site responses are presented on Figure 116 with SSRbh and H/V curves, in a way similar to Figure 113. Individual site curves exhibit a wide scatter, almost as wide as within the previous group: the standard deviation is not decreased with selecting only sites within a very narrow V_{s30} range $750 < V_{s30} < 850$ m/s, as clearly shown later on Figure 120 c) and d), for both SSRbh and H/V ratios.

The group average curves also exhibit the same general trends (increase with frequency, much higher amplitudes on SSRbh than on H/V), with a slight difference however as to the maximum SSRbh amplitude, which is significantly higher. This is consistent with Figure 115 b) depicting the sensitivity of SSRbh on V_{s30} , considering that the average group V_{s30} is lower than for the previous one.

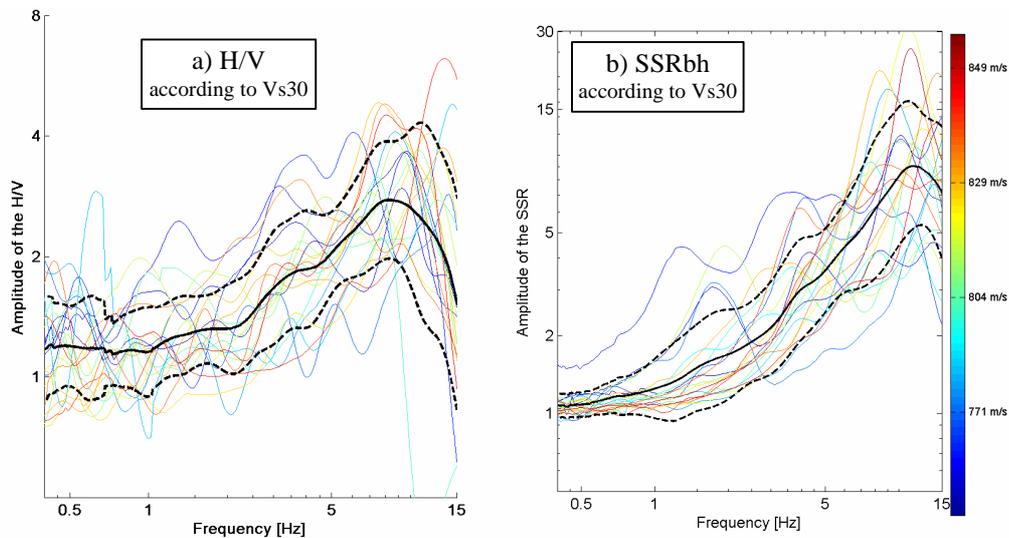


Figure 116: Observed variability of site response for the second group (750 m/s $< V_{s30} < 850$ m/s) : a, Left) H/V ratio of seismic events for the surface station; b, right) SSRbh. The color scale refers to V_{s30} value, solid black curves correspond to the average curves for the whole group, and dotted black curves correspond to the average \pm one standard deviation

10.3.3. Rock sites with $f_0 > 10$ Hz

26 sites with f_0 higher than 10 Hz (out of the total of 32) have recorded events. Site responses estimated with SSRbh and H/V, are presented on Figure 117. All the SSRbh, Figure 117 left, still exhibit a dispersion on the amplitude but the amplified frequency band is significantly reduced and shifted to the high frequency: the average SSRbh is larger than 2 only at frequencies larger than 4 Hz (the similar amplitude threshold was reached at 2.5 Hz for the first group).

The standard deviation, Figure 120 c), is also very much reduced below 5 Hz compared to the two V_{s30} groups. On the contrary, the H/V curves do not show any improvement of the standard deviation, Figure 120 d).

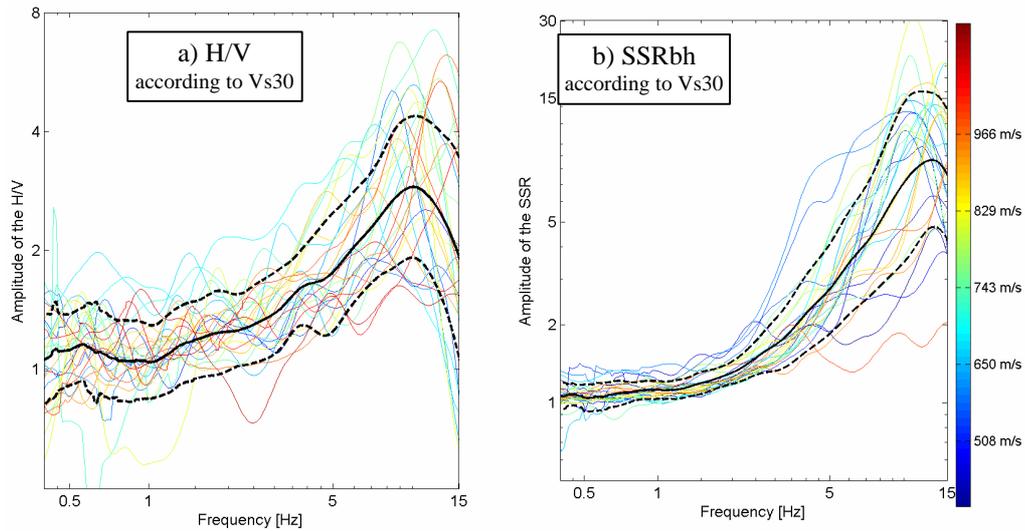


Figure 117 : Observed variability of site response for the third group ($f_0 > 10$ Hz): a, Left) H/V ratio of seismic events for the surface station; b, right) SSRbh. The color scale refers to Vs30 value, solid black curves correspond to the average curves for the whole group, and dashed black curves correspond to the average +/- one standard deviation

10.3.4. Rock sites with $f_0 > 10$ Hz and $V_{s30} > 750$ m/s

All 9 sites with f_0 higher than 10 Hz and $V_{s30} > 750$ m/s did record several events in the period 1998-2004. Site responses estimated with SSRbh and H/V, are presented on Figure 118. Average SSRbh and H/V curves are very close to the average curves for the third group (sites with $f_0 > 10$ Hz), as clearly displayed in Figure 120, a et b. The standard deviation, Figure 120 c), is also reduced compared to the group with $f_0 > 10$ Hz and thus a fortiori to the first two "Vs30" groups. The standard deviation of the mean H/V ratio is only slightly reduced, Figure 120 d).

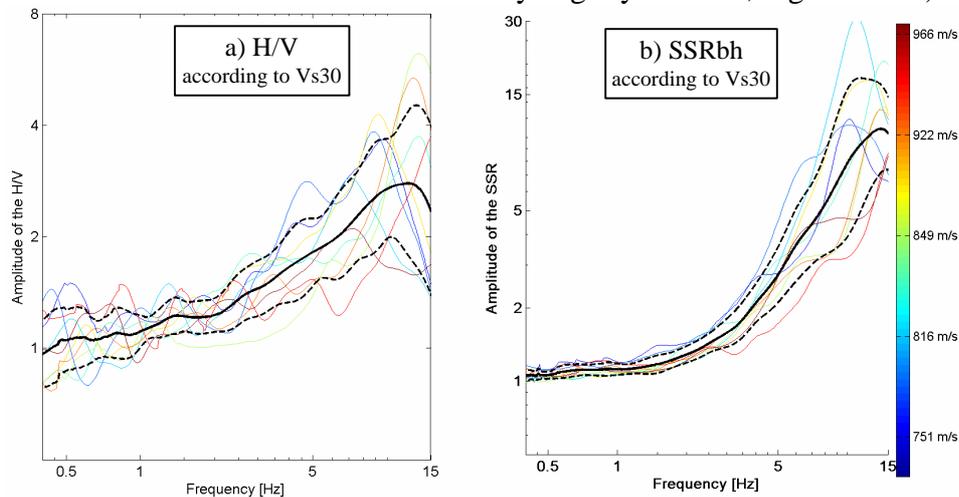


Figure 118: Observed variability of site response for the fourth group ($f_0 > 10$ Hz and $V_{s30} > 750$ m/s): a, Left) H/V ratio of seismic events for the surface station; b, right) SSRbh. The color scale refers to Vs30 value, solid black curves correspond to the average curves for the whole group, and dashed black curves correspond to the average +/- one standard deviation

10.3.5. Rock sites with $f_0 > 10$ Hz and $750 < V_{s30} < 850$ m/s

The site responses of the only 5 that fulfill the conditions $f_0 > 10$ Hz and $750 < V_{s30} < 850$ m/s, are presented on Figure 119. Both the mean values and standard deviation are really close to the ones of the previous group with $f_0 > 10$ Hz and $V_{s30} > 750$ m/s, Figure 120.

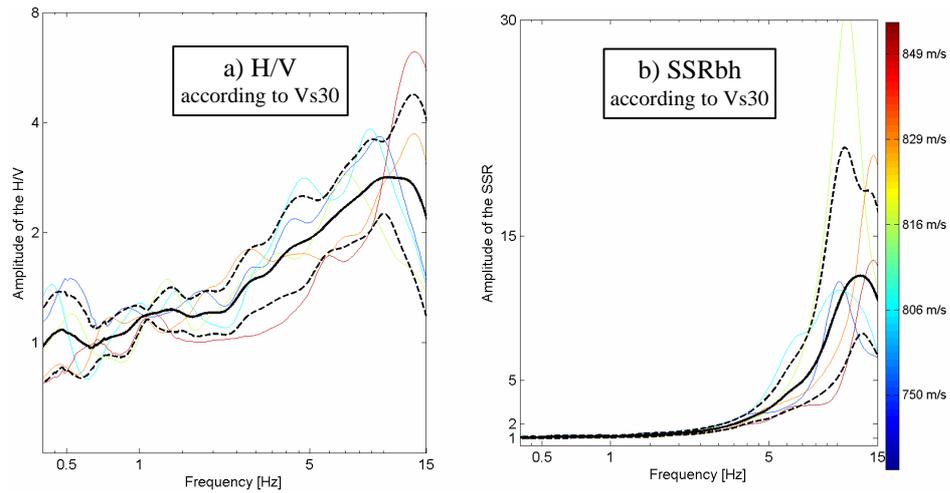


Figure 119: Observed variability of site response for the fourth group ($f_0 > 10$ Hz and $750 < V_{s30} < 850$ m/s): a, Left) H/V ratio of seismic events for the surface station; b, right) SSRbh. The color scale refers to V_{s30} value, solid black curves correspond to the average curves for the whole group, and dashed black curves correspond to the average \pm one standard deviation

10.3.6. Conclusion

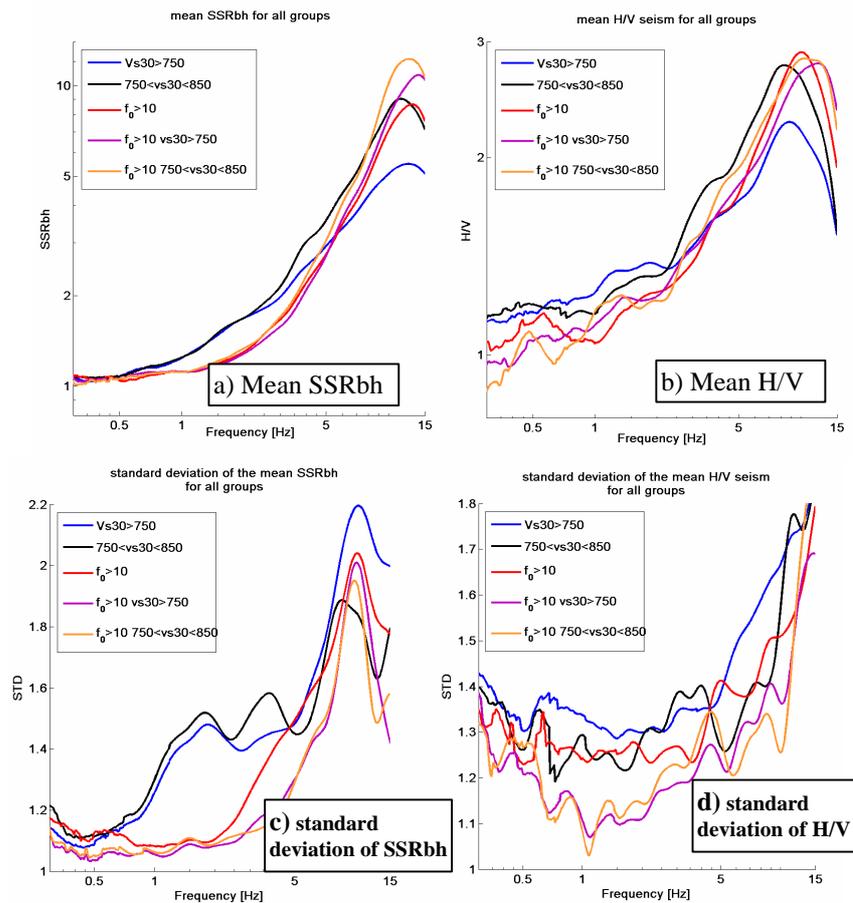


Figure 120: Five groups of sites: $f_0 > 10$ Hz (red curve), $V_{s30} > 750$ m/s (blue curve) $750 < V_{s30} < 850$ m/s (black curve), $f_0 > 10$ Hz and $V_{s30} > 750$ m/s (violet curve) and $f_0 > 10$ Hz and $750 < V_{s30} < 850$ m/s (orange curve); Comparison of : a) mean SSRbh; b) mean H/V seism; the standard deviations for c) the mean SSRbh and d) the mean H/V seism

Figure 120 compares the summary site response results for the five different groups, in terms of average curves and standard deviation for both SSRbh and H/V ratios. Average curves are very similar (especially for the H/V ratio), but groups including the (somewhat restrictive) f_0 criterion exhibit a slightly smaller low frequency (i.e., up to 5 Hz) amplification. The lowest SSRbh standard deviation correspond to hybrid groups combining both criteria - this statement should be however moderated by the fact that these hybrid groups include fewer sites - while the f_0 criterion alone allows to significantly reduce the scatter at frequencies below half f_0 . The main conclusions of this empirical rock site response analysis are twofold:

- Combined criteria are useful in reducing the scatter in rock site response as derived from SSRbh curves, while Vs30 based selection lead to a large variability, even when considering a narrow Vs30 range
- H/V curves are only very poorly sensitive to rock site definition, and could not be used as a reliable indicator of the quality of the rock site

10.4. Variability of the response of rock sites from modeling

10.4.1. Shear wave velocity profiles of the models

The Kik-Net hard rock sites represent one of the largest data set with homogeneous measurements of velocity profiles. It is therefore much interesting and useful to compare it with the previous attempts to derive "generic" rock site velocity profiles, which were based on much fewer actual measurements. We will focus here on the generic rock profile proposed by [Boore and Joyner, 1997], later used by [Cotton, 2006]. These generic models, which exhibit very smooth profiles with velocity monotonously increasing with depth, are completely defined with a Vs30 value and provide a shear wave velocity profile from surface to depth greater than 8000 meters (Figure 121). These models were made for a Vs30 between 600 m/s and 2800 m/s.

We consider here the real profiles with Vs30 between 750 m/s and 850 m/s (28 sites, Kik-net data set #2), and compare them to the generic models defined with Vs30 between 700 m/s and 900 m/s (cf. Figure 122). We can see that the real profiles are much less smooth and often exhibit non-negligible impedance contrast. The mean profile of real sites with Vs30 between 750 m/s and 850 m/s is obviously smoother than any single profile (Figure 122, c). It does, however, exhibit significant differences with the Boore's generic profiles: the velocity gradient is larger at shallow depths (until 30-40 m), and the velocity then stabilized at constant values at depth exceeding 50 m.

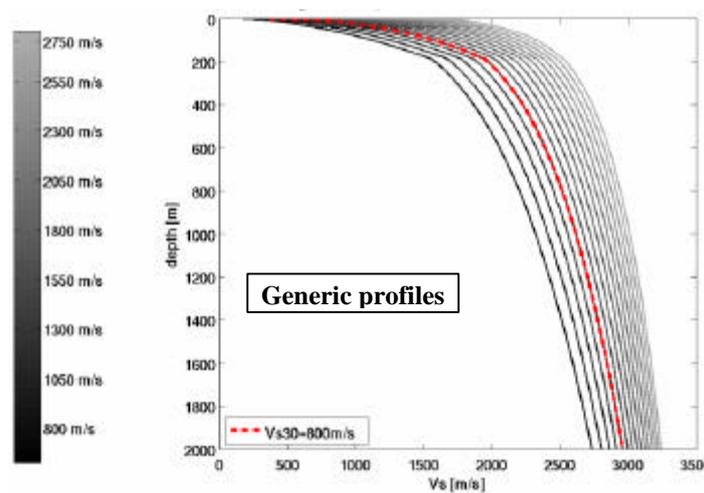


Figure 121: Shear wave velocity profiles of generic rock site models, determined with Vs30 from 600 m/s to 2800 m/s, represented with a gray scale.

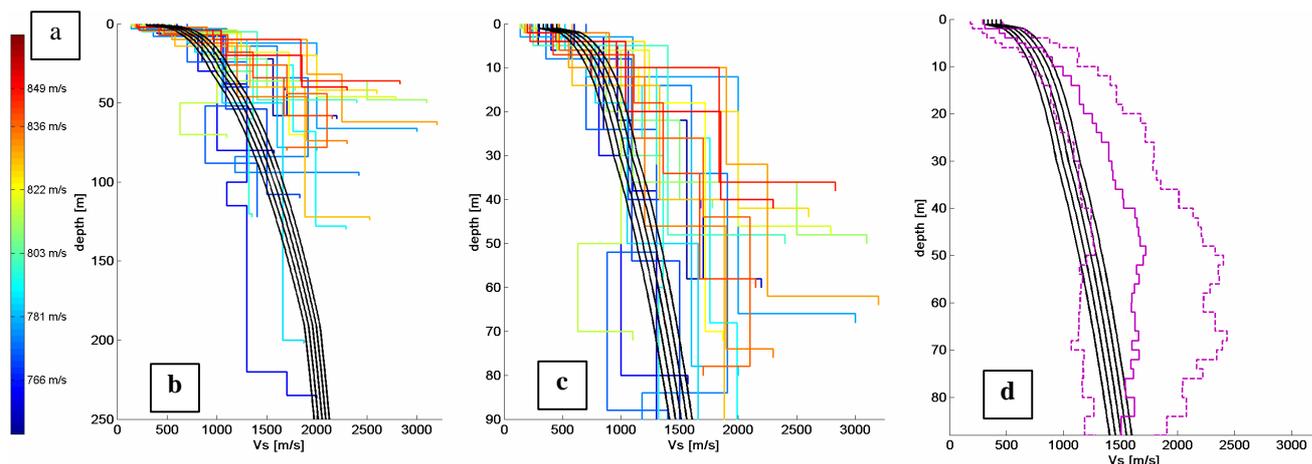


Figure 122 : Comparison of the generic rock site models with $Vs_{30}=700$ m/s, 800 m/s and 900 m/s with real Vs profiles with $750 \text{ m/s} < Vs_{30} < 850 \text{ m/s}$; a) legend according to Vs_{30} ; b) Both real and generic profiles; c) zoom of the first 90 meters; d) Mean real profile for sites with $750 \text{ m/s} < Vs_{30} < 850 \text{ m/s}$ in purple and generic profiles with $700 < Vs_{30} < 900 \text{ m/s}$

10.4.2. Response of generic rock sites

Such significant differences between single and average real velocity profiles and Boore's generic profiles may affect the surface response and the frequency content. We thus investigated their response under vertically incident plane SH waves (cf. Figure 123). To compare the mean site responses for real and generic rock sites, we define the mean generic rock response $SH_{mean}^{generic}$ as the mean of the responses of generic profiles defined with $Vs_{30} > 750 \text{ m/s}$, and for each response is associated a weight according to the number of real sites with the corresponding Vs_{30} : $SH_{mean}^{generic} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i SH_i^{generic}}{\sum_{i=1}^n k_i}$ with n : the number of generic profiles used (here between 750 and 2100 m/s we defined 28 profiles, k_i the number of real sites with Vs_{30} equal $\pm 25 \text{ m/s}$ to the Vs_{30} of the generic profile i).

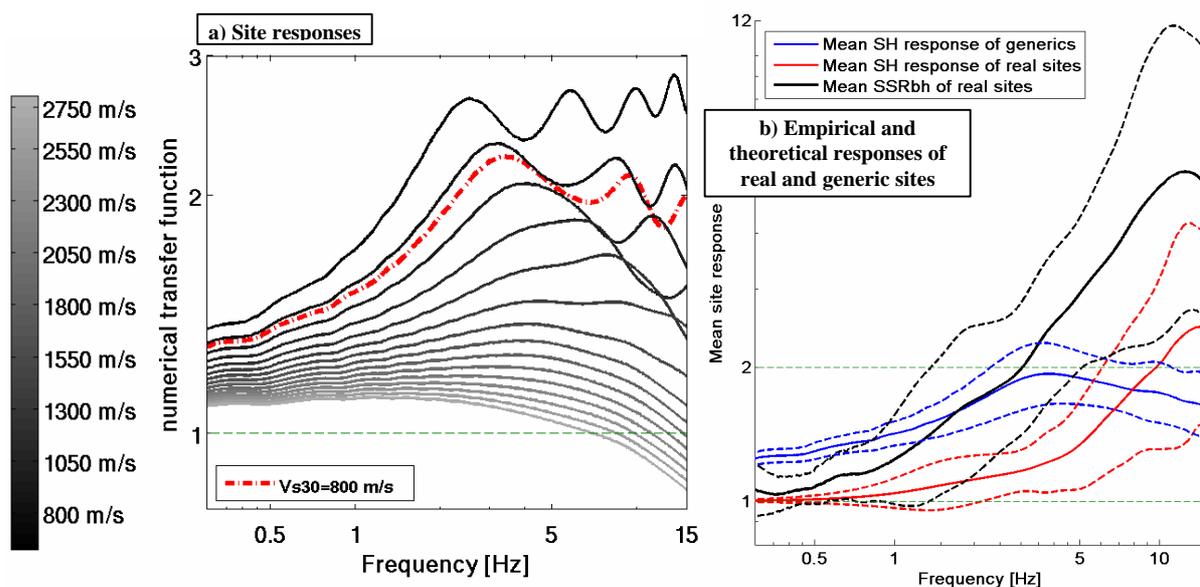


Figure 123: a) In gray plain lines SH response for generic models; in dot line SH response of the generic model defined with $Vs_{30}=800 \text{ m/s}$ b) in red mean SH response of rock sites with $Vs_{30} > 750$, and in blue SH response of generic sites corresponding to the real rock sites with $Vs_{30} > 750$

Three main remarks can be done:

- As already emphasized by Boore and Joyner, generic rock site responses exhibit a non-negligible variability (Figure 123 a, in colour) when V_{30} increases from 750 m/s to 2800 m/s. This variability is greatly reduced when considering V_{S30} between 700 and 900 m/s
- The mean generic rock response (Figure 123 b, blue) and the average of the theoretical real site responses (Figure 123 b, red) are significantly different. This can be linked partly to the smoothness of the generic profiles, as mentioned above, and the large depth of the profiles which is responsible for the low frequency amplification, and partly to the larger shallow gradient for real sites: real responses therefore exhibit larger amplification at high frequencies (higher velocity contrast between surface and shallow depth), and smaller amplification at intermediate frequencies.
- The average of observed responses as estimated through SSRbh (Figure 123 b, black) response, differs significantly from the theoretical response of real sites (Figure 123 b, red), with larger values for the former especially at high frequencies. As will be explained later, this discrepancy may be explained by the frequency dependent free surface effects, which differ at the surface and at depth.

These observations have several important consequences:

- It once again emphasizes the need for a clear and strict definition of a "standard rock" reference site, with respect to which all site amplification functions should be estimated
- The velocity profile of such a standard rock should not necessarily be assumed to be the generic rock profile proposed by [Boore and Joyner, 1997]; the present comparison suggest that the proposals by Faccioli (1992), recently updated by Paolucci and Faccioli (2007, personal communication) based on Italian rock sites are more consistent with Kik-net rock sites than Boore's smooth, deep profiles. Further data are needed from a larger number of rock sites to base a consensual velocity profile.
- Once the standard reference rock is defined, one must also establish a normalization method to correct the amplification functions derived with respect to a local rock (harder or softer). In the present case where the local reference is located at depth, the correction technique should also account for the absence of free surface effects at high frequency. This establishment of such a normalization technique will be addressed in the next section.

10.5. Conclusion

Defining a standard reference rock site is a major issue in estimation of site effect in order to be coherent from a place to an other. It was already proven that rock sites have a non-flat response. Then, if the reference rock site response differs, the estimation of site effect differs too, independently of the proper site effect.

Considering rock sites with a criterion of V_{S30} higher than 750m/s, velocity profiles and site responses show an important variability. With the same criterion, observing generic rock sites, the variability of the theoretical response is also important. This variability is the reason why a standard reference rock site is needed.

We defined a standard reference rock site with V_{S30} between 750 and 850 m/s in order to reduce the amplitude variability and the resonance frequency f_0 higher than 10 Hz in order to

constrain the amplified frequency band. The responses of such sites provide less variability in term of site response, for both real and generic sites.

As the available nearby rock site for a site effect study is obviously not a standard reference site, to correct local reference rock site towards standard reference is then a major issue to compare properly site effect over all kinds of sites with various characteristics. Thus, we should estimate the transfer function between hard rock and standard reference rock. It will be done in the following paragraphs, using theoretical calculations.

10.6. Annex

Sites with $V_{s30} > 750 \text{ m/s}$:

absh01 absh04 akth05 aomh02 fkih03 fkoh05 fkoh06 fkoh10 fksh07 fksh15 gifh11
 gifh16 gifh20 gifh21 gifh22 gifh24 hdkh05 hrsh08 hrsh17 ibrh14 iwth09 iwth14
 iwth17 iwth18 iwth23 kgsh02 kgsh03 kgwh03 kkwh12 kmmh07 kmmh11 kngh21 koch04
 koch10 koch11 kyth04 mieh06 mieh08 mygh03 mygh04 mygh11 myzh02 myzh05 myzh07
 myzh09 myzh16 ngnh22 ngsh06 oith01 oith05 oith10 okyh02 okyh07 sagh01 sagh05
 smnh10 soyh07 srch10 szoh24 tcgh14 tkch10 tkyh13 wkyh06 ymgh01 ymgh06 ymgh16
 ymnh09 ymnh10 ymnh13 ymth03

site	Thicknes s of the hole [m]	vs5 [m/s]	vs30 [m/s]	VsDH [m/s]	Vs _{mean} [m/s]
absh01	70	325	823	1870	1172
aomh02	118	435	872	2270	1146
fkoh10	136	470	921	1580	1353
koch11	200	520	782	1870	1354
myzh16	58	420	847	2150	1100
sagh01	124	353	980	2850	1262
soyh07	128	355	788	2290	1425
szoh24	218	419	1126	2600	1964
ymgh16	58	405	756	2200	989
ymnh09	108	368	768	1830	1113
ymnh10	94	360	771	2420	1236
ymnh13	120	292	788	1350	1137

Table 12: Characteristics of the sites with $V_{s30} > 750 \text{ m/s}$ and without recording events; with Vs5 the mean velocity of the top5 meters, Vs30 the mean velocity of the top 30m, VsDH the velocity at the bottom of the hole, Vs_{mean} the mean velocity over the thickness of the hole

site	Nb seism	Thickness of the hole [m]	vs5 [m/s]	vs30 [m/s]	VsDH [m/s]	Vs _{mean} [m/s]	f ₀ SSRbh [Hz]	A ₀ SSRbh	f _{H/V} surface [Hz]
wkyh06	13	58	290	752	2000	1003	10,2	11,9	9,7
fkih03	14	80	400	760	1570	1012	1,7	3,1	3,6
kmmh07	22	235	600	765	2000	1131	1,3	4,4	1,3
hdkh05	2	40	348	766	1680	823	4,2	6,8	4,0
kkwh12	1	120	700	771	1400	1003	1,8	3,2	0,4
fkoh05	1	66	215	777	3000	1166	9,1	18,0	0,3
hrsh08	3	78	450	781	2000	1140	16,0	12,7	0,6
kngh21	5	48	250	792	2400	946	7,7	9,4	7,6
fksh15	12	30	450	804	1300	804	3,7	3,7	3,8
tkch10	1	40	318	804	1780	910	5,0	4,6	3,9
gifh22	7	48	461	807	3100	1012	10,2	11,2	8,7
gifh20	11	70	460	810	1100	788	1,9	4,4	6,3
iwth14	4	46	273	816	2790	1028	11,0	30,9	7,0
fksh07	32	42	268	829	2600	995	4,4	3,9	11,8
ibrh14	6	62	302	829	3200	1226	14,4	20,7	13,3
akth05	4	122	580	829	2530	1397	3,6	3,8	2,8
gifh16	12	74	375	831	2300	1153	3,9	6,2	3,8
oith10	1	78	470	837	1700	1294	6,7	8,0	6,5
tcgh14	14	40	322	849	2300	982	5,9	6,6	8,0
mygh04	31	36	260	850	2830	934	14,4	13,4	13,4
mygh11	39	120	291	859	2780	1670	3,9	4,9	3,5
oith01	3	124	400	865	1500	1228	2,1	3,6	2,0
kgsh02	7	86	652	874	1300	861	1,8	3,9	1,9
myzh07	3	50	391	878	2500	1118	9,1	25,5	8,6
iwth18	6	60	322	892	2630	1280	12,5	17,3	9,4
ymth03	12	80	530	900	2040	1216	6,6	5,1	6,3
gifh11	9	72	499	904	2680	1514	9,9	9,5	7,5
gifh24	11	44	300	908	2300	1052	6,9	3,2	12,9
myzh02	2	160	405	919	2500	1641	3,3	2,8	1,6
iwth23	6	86	401	923	2200	1540	14,0	13,0	13,0
okyh07	19	60	510	929	2100	1172	16,7	9,8	16,4
mygh03	11	32	389	934	2630	960	7,1	3,8	8,5
ngnh22	7	56	468	939	1700	1108	4,3	3,0	4,0
mieh06	6	82	292	939	2550	1431	5,0	3,1	4,5
gifh21	9	32	395	964	2200	989	2,3	3,5	2,0
iwth09	4	58	440	967	2610	1327	16,8	10,1	7,4
smnh10	65	140	553	967	1570	1190	2,1	3,7	2,3
myzh09	4	74	500	973	1300	902	2,0	3,0	1,8
sagh05	1	126	1000	1000	1350	993	1,4	2,9	0,7
fkoh06	1	190	850	1002	1400	1060	1,4	4,7	0,3
mieh08	7	86	409	1010	2480	1587	8,0	6,2	8,3
srch10	1	134	543	1027	1600	1254	2,3	3,8	0,3
okyh02	7	84	413	1050	2120	1714	3,5	2,1	0,2
kyth04	17	54	598	1069	1960	1260	6,1	3,6	3,8
myzh05	2	64	521	1072	1700	1519	5,8	5,7	1,7
hrsh17	1	30	510	1097	2310	1097	4,8	4,1	5,1
koch04	2	57	462	1098	2600	1477	7,2	2,7	1,1
tkyh13	7	58	483	1110	2500	1437	9,9	19,1	9,3
koch10	2	48	631	1120	1780	1232	4,2	4,4	3,9
absh04	1	140	392	1136	3100	2033	4,2	2,8	0,2
kgsh03	4	56	910	1196	1900	1471	3,9	3,9	3,3
oith05	5	32	700	1269	1900	1271	4,6	2,6	14,6

iwth17	6	70	484	1270	2960	1794	9,2	3,9	9,0
kmmh11	7	275	933	1292	3000	1790	1,3	2,2	1,0
ymgh01	3	72	1000	1388	3100	1730	4,4	2,1	0,6
kgwh03	3	50	600	1410	2950	1689	7,7	2,9	6,8
ngsh06	6	142	947	1421	2300	1963	4,6	5,7	3,4
ymgh06	4	128	2100	2100	2400	2100	2,5	2,2	0,2

Mean	9	88	496	956	2191	1267	6,2	6,9	5,2
Median	6	72	437	902	2235	1203	4,7	4,2	3,9
Standard deviation	11	51	265	217	537	310	4,2	6,1	4,3

Table 13: Characteristics of the sites with $V_{s30} > 750$ m/s and with recording events, with V_{s5} the mean velocity of the top5 meters, V_{s30} the mean velocity of the top 30m, V_{sDH} the velocity at the bottom of the hole, $V_{s_{mean}}$ the mean velocity over the thickness of the hole, f_0 the resonance frequency defined by the SSRbh, A_0 the corresponding amplitude, $f_{H/V}$ the resonance frequency defined with the H/V ratio

Sites with $750 < V_{s30} < 850$ m/s:

absh01 akth05 fkih03 fkoh05 fksh07 fksh15 gifh16 gifh20 gifh22 hdkh05 hrsh08
ibrh14 iwth14 kkwh12 kmmh07 kngh21 koch11 mygh04 myzh16 oith10 soyh07 tcgh14
tkch10 wkyh06 ymgh16 ymnh09 ymnh10 ymnh13

Sites with $f_0 > 10$ Hz:

aich11 ehmh01 ehmh02 ehmh03 fkoh08 fksh01 gifh22 hrsh12 hygh03 hygh07 hygh15
ibrh14 iwth03 iwth09 iwth14 iwth18 iwth23 mieh04 mygh04 mygh12 myzh06 oith08
okyh04 okyh05 okyh06 okyh07 smnh05 smnh09 smnh13 wkyh06 ymgh02 ymgh11

site	Nb seism	Thickness of the hole [m]	vs5 [m/s]	vs30 [m/s]	VsDH [m/s]	$V_{s_{mean}}$ [m/s]	f_0 SSRbh [Hz]	A_0 SSRbh	$f_{H/V}$ surface [Hz]
gifh22	7	48	461	807	3100	1012	10,2	11,2	8,7
wkyh06	13	58	290	752	2000	1003	10,2	11,9	9,7
iwth14	4	46	273	816	2790	1028	11,0	30,9	7,0
iwth18	6	60	322	892	2630	1280	12,5	17,3	9,4
iwth23	6	86	401	923	2200	1540	14,0	13,0	13,0
mygh04	31	36	260	850	2830	934	14,4	13,4	13,4
ibrh14	6	62	302	829	3200	1226	14,4	20,7	13,3
okyh07	19	60	510	929	2100	1172	16,7	9,8	16,4
iwth09	4	58	440	967	2610	1327	16,8	10,1	7,4

mean	11	57	362	863	2607	1169	13	15	11
median	6	58	322	850	2630	1172	14	13	10
Standard deviation to multiply to the mean value	2,51	1,24	1,29	1,08	1,16	1,17	1,18	1,52	1,33

Table 14: Characteristics of the sites with $V_{s30} > 750$ m/s and $f_0 > 10$ Hz

Table 15: Sites with f_0 higher than 10 Hz and V_{s30} between 750 and 850 m/s, with $V_{s_{mean}}$ the mean velocity over the thickness of the hole

site	Nb of records	Thickness of the hole [m]	vs5 [m/s]	vs10 [m/s]	vs30 [m/s]	vsBR [m/s]	V_s mean [m/s]	A_0 SSRbh	f_0 SSSRbh [Hz]
wkyh06	13	58	290	447	752	2000	1003	11,9	10,2
iwth14	4	46	273	422	816	2790	1028	30,9	11,0
mygh04	31	36	260	409	850	2830	934	13,4	14,4
gifh22	7	48	461	602	807	3100	1012	11,2	10,2
ibrh14	6	62	302	390	829	3200	1226	20,7	14,4

10.7. Bilan

Le rapport des spectres de Fourier ou SSR (pour Standard Spectral Ratio), est souvent utilisé pour caractériser les effets de site. Cette méthode nécessite un site de référence au rocher. Souvent les sites ayant une vitesse moyenne sur 30 mètres, V_{s30} , supérieure à 750 m/s sont considérés par défaut comme étant des sites au rocher. Il a déjà été montré que les sites dits au rocher ont une réponse qui leur est propre. Notre problème est la variabilité de cette réponse en utilisant uniquement le critère de vitesse V_{s30} supérieure à 750 m/s. La variabilité de cette réponse ainsi que l'étalement des profils de vitesse sont analysés dans la base de données japonaise Kik-net. L'estimation de la réponse des sites est faite sur chaque site au rocher avec le rapport moyen des spectres des enregistrements en surface sur les enregistrements en fond de puits.

Considérant des critères plus précis, notamment sur V_{s30} et sur la fréquence de résonance f_0 , la réponse moyenne peut montrer un écart type plus réduit. Le site de référence standard au rocher est alors défini avec V_{s30} compris entre 750 et 850 m/s et une fréquence de résonance f_0 supérieure à 10 Hz. Ce site montre une réponse plus contrainte un terme d'amplitude et de bande de fréquence amplifiée.

Dans un cas pratique, le site rocheux le plus proche du site à caractériser, n'est pas forcément un site répondant à ces derniers critères. Afin d'avoir une estimation homogène de l'effet de site, il faudra alors corriger le SSR pour revenir à la référence standard. Pour cela la fonction de transfert entre un site au rocher avec V_{s30} supérieure à 850 m/s et un site de référence standard doit être estimée. Cette fonction de transfert sera déterminée dans le paragraphe 11 grâce à des calculs théoriques (méthode du quart de la longueur d'onde et réponse à une onde SH).

Dans l'étude des données de Kik-net, les stations de référence sont celles en fond de forage. Le paragraphe 11 qui suit, développe la méthode de normalisation des rochers de fond de forage. Cette normalisation permet de ramener un site au rocher très dur vers un site au rocher dit de référence standard avec $V_{s30} \sim 800$ m/s et f_0 supérieure à 10 Hz pour des cas réels.

Enfin, la comparaison entre la moyenne, sur les sites avec $V_{s30} > 750$ m/s, des réponses théoriques et empiriques, nous conduit à penser qu'il est nécessaire de corriger des rapports « de puits », surface / profondeur, vers des rapports classiques, surface / surface. Cet aspect sera abordé au paragraphe 12, page 212, pour l'ensemble des sites de Kik-net.

11. Normalisation des fonctions de transfert de puits vers une référence commune

11.1. Introduction et but

Comme il est introduit au paragraphe 0 précédent, il existe de nombreuses méthodes utilisant des enregistrements de séismes pour caractériser l'effet de site. Le rapport moyen des spectres de Fourier d'un événement d'une station du site à caractériser sur une station de référence est le rapport classique qui donne une estimation de l'effet de site, c'est-à-dire de la fonction de transfert empirique qui existe entre le site et la référence au rocher. L'objectif final étant de donner une estimation des effets de site ce rapport sera la base de notre étude.

Rappelons qu'au paragraphe 9 la comparaison des rapports des spectres de Fourier et des spectres de réponse élastique a été faite et dès lors le raisonnement effectué sur l'un des rapports et aussi effectué sur l'autre. Dorénavant on parlera simplement de rapport de spectres, sous-entendus les spectres de Fourier ou de réponse.

Le rapport des spectres est classiquement utilisé avec deux stations en surface : une station sur le site à étudier et une station de référence au rocher. Dans l'étude des données Kik-net nous avons des stations en surface et en fond de puits. La référence se trouve donc en profondeur. Sur l'ensemble des sites de Kik-net les profondeurs varient de 7 m à 900 mètres. De plus les caractéristiques de vitesse en fond de forage, notée V_{sDH} pour DownHole, varient de 300 m/s à 3300 m/s. Cette distribution est visible sur la Figure 124.

Le but de ce paragraphe 11 est d'homogénéiser la référence. En effet, l'optique de cette étude est d'estimer l'effet de site à partir de rapports moyens de spectres, correspondant à un site caractérisé par une valeur de vitesse des ondes de cisaillement et une fréquence de résonance. L'observation selon les caractéristiques de vitesse et de fréquence se fera par groupe. Il est donc nécessaire que tous les rapports moyens de spectres par site soient homogènes, c'est-à-dire qu'ils aient la même référence au rocher. Or, les caractéristiques de fond de puits sont très étalées comme la Figure 124 nous le montre. Dans un premier temps le fond de puits sera donc ramené à un fond de puits virtuel commun avec une même vitesse et une même profondeur, point représentant une référence temporaire. Schématiquement sur la Figure 125, la référence en B est descendue vers le point C. La fonction de transfert de référence temporaire sera alors A sur C. Puis dans un deuxième temps la référence temporaire sera remplacée par une référence standard d'un site au rocher avec $V_{s30}=800$ m/s. Schématiquement sur la Figure 125, la référence fictive en C est ramenée en D, référence fictive correspondant aux critères de référence standard, voir paragraphe 10, page 179. La description de ces étapes est détaillée au paragraphe 11.2 suivant, qui traite du principe de la méthode.

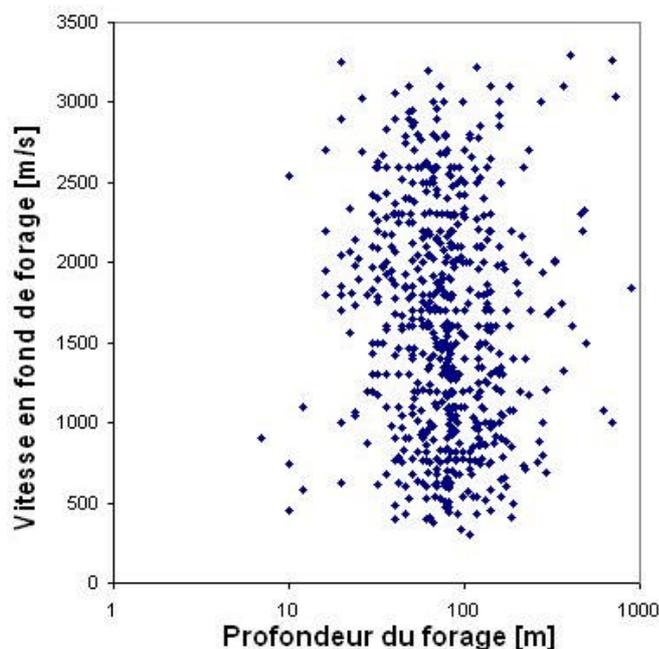


Figure 124: Distribution des caractéristiques de fond de forage en terme de vitesse et de profondeur

11.2. Principe

Le principe est détaillé ici de manière générale pour un site quelconque, il a été appliqué à tous les sites Kik-net.

Nous avons à notre disposition le rapport de spectres A sur B qui correspond à la fonction de transfert de puits entre A et B avec B le capteur se trouvant en fond de forage. Ce rapport est la fonction de transfert empirique qui nous vient de données réelles.

Première étape : Se ramener à une référence commune temporaire :

Comme le fond de forage est variable nous allons nous intéresser à la fonction de transfert entre A et C, avec C un point commun à tous les sites. Nous choisissons, à la suite de Boore une référence à 8000 mètres de profondeur avec une vitesse des ondes S de 3600m/s.

Notons FT(AB) la fonction de transfert entre A et B estimée par le rapport de spectres A sur B. On cherche à définir la fonction de transfert entre A et C : $FT(AC) = A/C = (A/B) * (B/C) = FT(AB) * FT(BC)$ La première étape consiste donc à estimer la fonction de transfert entre B et C qui sont deux stations en profondeur. Pour cela nous utiliserons les outils numériques décrits au paragraphe 11.3. Ces modélisations nécessitent un profil de vitesse, or entre B et C nous ne connaissons pas ces profils. C'est pourquoi des profils de vitesse de modèle générique au rocher sont utilisés. Ces profils sont décrits au paragraphe 11.4 suivant.

Deuxième étape : Se ramener à la référence standard de rocher définie par $V_{s30}=800$ m/s

La référence très profonde à vitesse élevée n'est pas adaptée dans les cas réels où les sites au rocher en surface sont plus couramment utilisés et ont des vitesses bien moins élevées. Il paraît donc plus pratique de ramener la référence temporaire C à la référence standard D d'un site au rocher avec une vitesse V_{s30} de 800 m/s: $FT(AD)=A/D=A/C*C/D= FT(AC) / FT(DC)$

La seconde étape consiste donc à estimer la fonction de transfert entre C et D, station en profondeur vers station en surface. De même qu'à la première étape, nous utiliserons les outils numériques décrits au paragraphe 11.3 avec des profils de vitesse de modèles génériques au rocher.

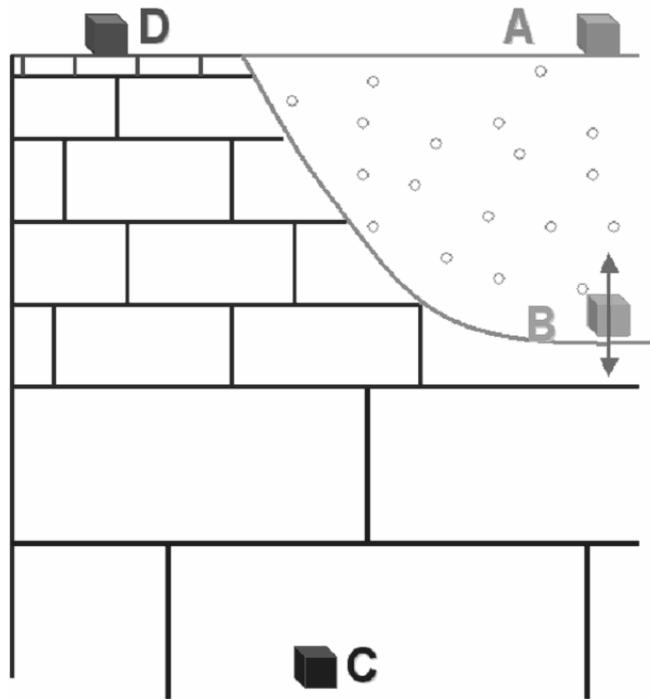


Figure 125 : Schéma de la normalisation : A station en surface ; B : station en fond de forage qui se trouve parfois au rocher parfois sur des sols plus mous ; C : station fictive à très grande profondeur, environ 8000 mètres, dans un rocher très dur, avec V_s autour de 3600 m/s ; D : station fictive en surface sur un rocher de référence standard avec $V_{s30}=800$ m/s

Les deux premières étapes de normalisation se résument par :

$FT(AD) = FT(AB) * FT(BC) / FT(DC)$, le rapport $FT(BC) / FT(DC)$ est le facteur de normalisation relié à la référence au rocher $V_{s30}=800$ m/s, noté $FN(800)$:

$$FT(AD) = FT(AB) * FN(800)$$

Ces deux étapes nous permettent d'homogénéiser les rapports de spectres et de pouvoir les comparer. Nous obtenons des rapports de spectres normalisés.

11.3. Outils numériques

Pour calculer les fonctions de transfert $FT(BC)$ et $FT(DC)$, deux outils sont utilisés : la méthode du quart de la longueur d'onde et la modélisation à une dimension de la réponse élastique à une onde SH dans un cas tabulaire.

11.3.1. La méthode du quart de la longueur d'onde

Cette méthode est entièrement basée sur le profil des ondes S pour définir un facteur d'amplification à la fréquence correspondant à $V_{sz}/4z$ avec V_{sz} la vitesse moyenne sur les z premiers mètres, avec une amplification qui est déterminée par l'impédance.

[Boore, 2003] détaille d'avantage les étapes que l'on peut résumer ainsi : Considérant que le spectre de déplacement peut se définir avec les différentes contributions de la source, du chemin, du site et du type d'instrument, Boore note $G(f)$ la contribution du site. $G(f)$ se décompose en deux : l'amplification $A(f)$ et l'atténuation $D(f)$. Dans sa méthode il ne prend pas en compte les effets de non linéarité à ce niveau. La méthode du quart de la longueur d'onde concerne l'estimation du terme d'amplification $A(f)$. On considère que l'amplification des ondes est donnée par la racine du rapport d'impédance entre la source et la surface. Les équations 11 à 18 [Boore, 2003] résument la démarche :

$A(f(z)) = \sqrt{Z_s / \bar{Z}(f)}$ [Boore, 2003, (11)], avec l'impédance sismique près de la source définie par $Z_s = \mathbf{r}_s \mathbf{b}_s$ [Boore, 2003, (12)], avec \mathbf{r}_s et \mathbf{b}_s la densité et la vitesse des ondes S près de la source. $\bar{Z}(f)$ est la moyenne de l'impédance sismique près de la surface, définie par :

$$\bar{Z}(f) = \int_0^{t(Z(f))} \mathbf{r}(z) \mathbf{b}(z) dt \Big/ \int_0^{t(Z(f))} dt \quad [\text{Boore, 2003, (13)}].$$

Avec $t(Z(f))$ le temps de parcours de la profondeur Z à la surface. $Z(f)$ est introduit dans l'équation implicite : $f(z) = 1 / \left[4 \int_0^{z(f)} \frac{1}{\mathbf{b}(z)} dz \right]$

[Boore, 2003, (14)]. En changeant les variables de temps en profondeur l'équation [Boore, 2003,

$$(13)] \text{ devient } \bar{Z}(f) = \int_0^{z(f)} \mathbf{r}(z) dz \Big/ \int_0^{z(f)} \frac{1}{\mathbf{b}(z)} dz \quad [\text{Boore, 2003, (15)}], \text{ qui se simplifie par :}$$

$$\bar{Z}(f) = \bar{\mathbf{r}} \bar{\mathbf{b}} \quad [\text{Boore, 2003, (16)}] \text{ avec } \bar{\mathbf{r}} = \frac{1}{Z(f)} \int_0^{z(f)} \mathbf{r}(z) dz \quad [\text{Boore, 2003, (17)}] \text{ et}$$

$$\bar{\mathbf{b}} = z(f) \left[\int_0^{z(f)} \frac{1}{\mathbf{b}(z)} dz \right]^{-1} \quad [\text{Boore, 2003, (18)}].$$

Cette méthode fournit une amplification très lissée ([Cotton, 2006], figure 3) qui correspond à la réponse très lissée du site étudié.

11.3.2. La modélisation à une dimension de la réponse élastique à une onde SH

La réponse à une onde plane SH d'incidence nulle est estimée avec la méthode de réflectivité de Kennett, en considérant un milieu plan tabulaire. Les principales hypothèses de calcul sont précisées en annexe, paragraphe 15.4.1.1.

11.4. Choix des modèles de vitesse

Pour estimer les fonctions de transfert des étapes 1 et 2, cheminant de A vers B, puis C, puis D, stations représentées sur la Figure 125, il faut que les profils de vitesse soient connus entre chaque station. Entre A et B le profil est connu, disponible dans la base de données Kik-net. De B à C et de C à D des profils génériques de rocher, définis par [Boore, 2004], sont utilisés. Les profils sont entièrement déterminés à partir de V_{s30} . Sur la Figure 126 en bleu sont représentés les profils pour $V_{s30} = 600$ m/s à 2800 m/s, gamme de V_{s30} pour laquelle le modèle générique, établi par [Boore, 2004], a été défini.

En B, il faut que le profil choisi pour définir la vitesse entre B et C, ait, à la profondeur du fond de forage, la vitesse du fond de forage à plus ou moins 100 m/s afin de définir un profil continu, mixte entre le profil de down-hole AB et le profil générique BC. En utilisant uniquement les profils définis par les bornes $V_{s30} = 600$ m/s et $V_{s30} = 2800$ m/s il y a plus de 200 sites dont la vitesse V_{sDH} tombe en dehors de la famille de profils définie par Boore. La Figure 126 montre l'ensemble de ces sites dont la profondeur du forage et la vitesse en fond de forage sont représentés par des croix vertes. Deux exemples sont montrés sur la Figure 126, la vitesse de fond de forage peut être supérieure ou inférieure aux modèles génériques. Les modèles génériques ont donc été étendus de $V_{s30} = 100$ m/s à $V_{s30} = 3500$ m/s.

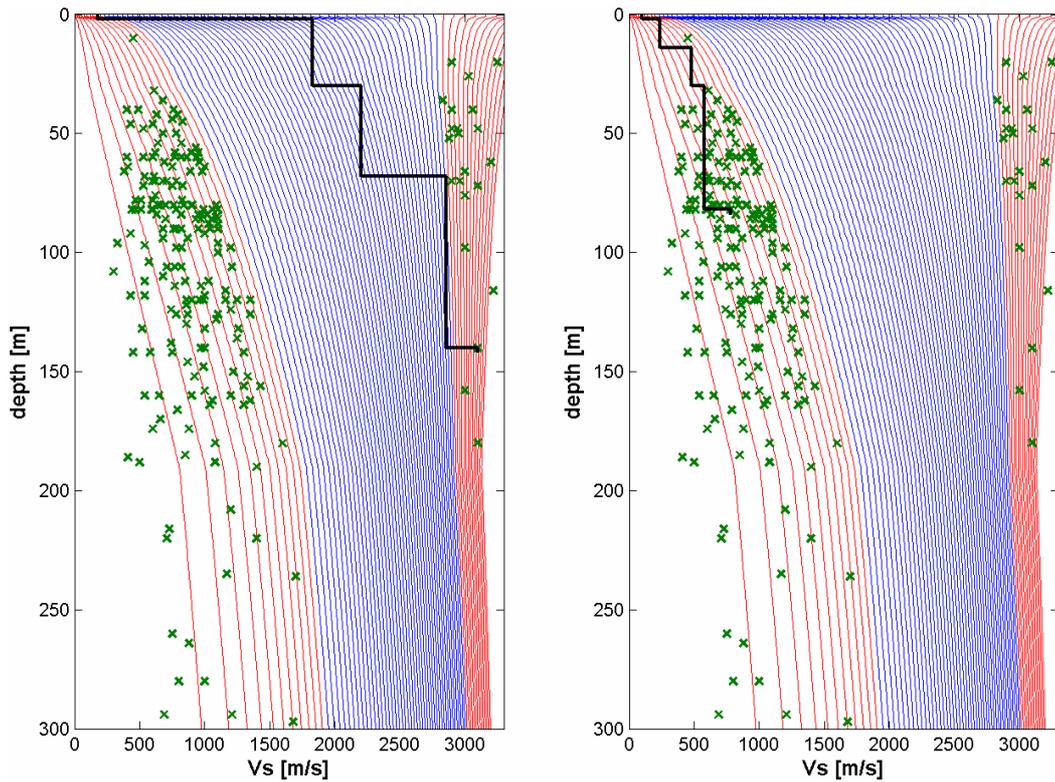


Figure 126: Profils génériques en bleu pour $V_{s30}= 600$ à 2800 m/s; en rouge : profils génériques de $V_{s30}=100$ m/s à 550 m/s et de $V_{s30}=2850$ m/s à 3500 m/s ; en noir : profils par mesures down-hole ; les croix vertes représentent les fonds de forage des sites qui sont en dehors de la famille de modèles génériques définis par Boore ; à gauche: site ABSH04; à droite: site ABSH07

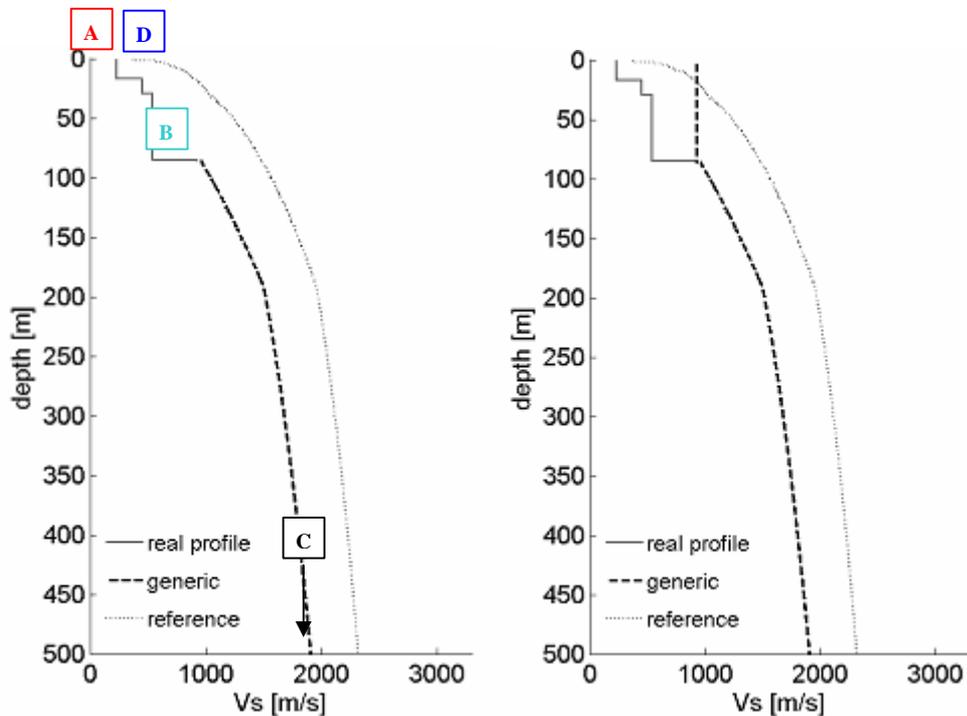


Figure 127: Exemple du site YMTH15. A gauche : avec le profil mesuré en trait plein rouge, la prolongation avec un profil générique en traits discontinus noirs et le profil générique correspondant à $V_{s30}=800$ m/s en pointillés bleus. A droite : avec le profil générique, en traits discontinus noirs, utile pour le calcul du quart de la longueur d'onde

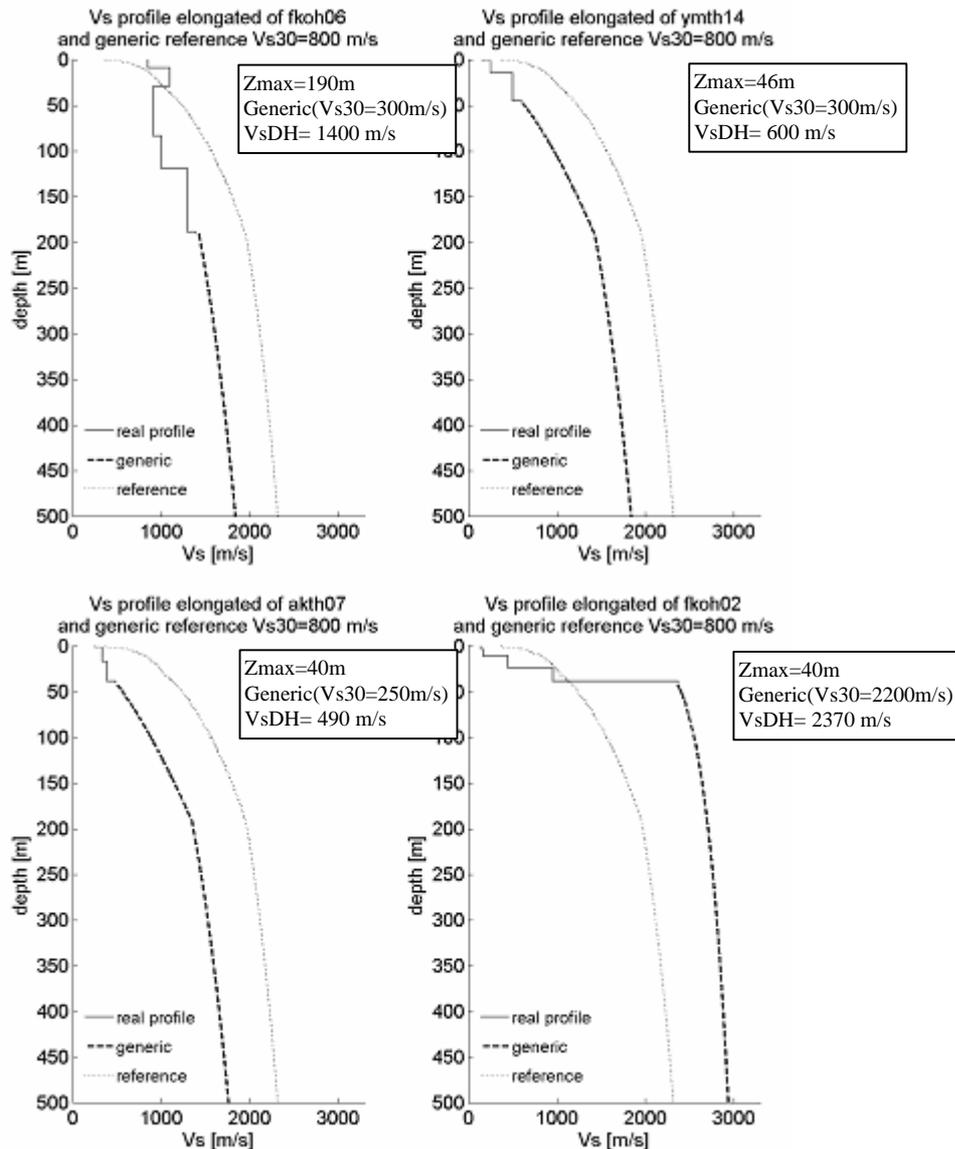


Figure 128: Profil mesuré en trait plein rouge, allongé par le profil générique défini par V_{s30} en traits hachés noirs, et comparé au profil générique de référence standard en pointillés bleus sur quatre site : a) FKOH06 avec le générique $V_{s30}=300$ m/s, profondeur du puits = 190m ; b) YMTH14 avec le générique $V_{s30}=300$ m/s, profondeur du puits = 46m ; c) AKTH07 avec le générique $V_{s30}=250$ m/s, profondeur du puits = 40m ; d) FKOH02 avec le générique $V_{s30}=2200$ m/s, profondeur du puits = 40m

11.5. Mise en œuvre avec la méthode du quart de la longueur d'onde

Première étape : la fonction de transfert entre B et C

Afin de définir l'amplification estimée avec la méthode du quart de la longueur d'onde sur la plus large bande de fréquence possible et à la fois de prendre en compte la profondeur de la station B, le plus judicieux nous a paru de continuer le profil de vitesse de B à la surface avec une vitesse constante, voir l'exemple sur la Figure 127 graphique de droite, courbe noire en pointillés. Les hautes fréquences seront ainsi modifiées par une valeur constante voir Figure 131. Si cet artéfact n'est pas effectué alors il manque une bande de hautes fréquences où l'amplification de la fonction de transfert $FT(BC)$ n'est pas estimée, voir Figure 129. Dans ce cas la fonction de

transfert FT(AC) qui est le produit de FT(AB) avec FT(BC) sera donc elle aussi définie sur une bande de fréquence réduite.

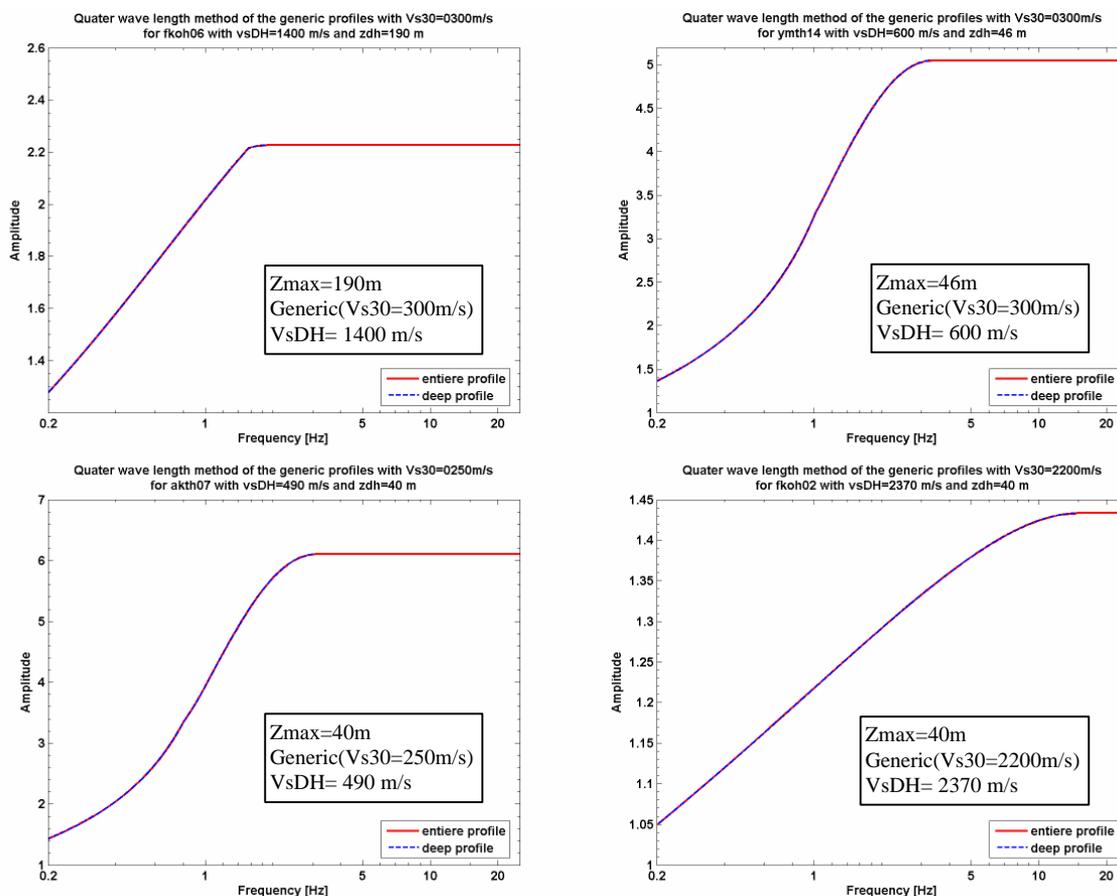


Figure 129: Estimation de l'amplification sur le profil générique d'une part, en pointillés bleus, de B à C et d'autre part, en trait plein rouge, de B à C et prolongé par une vitesse constante en surface

On perd donc une grande part de l'information vers les hautes fréquences en multipliant par une telle fonction de transfert. D'après la Figure 131, courbes pointillées bleues, les observations suivantes peuvent être faites :

- Pour une même profondeur de forage : plus la vitesse Vs30 du modèle générique est élevée plus l'amplitude de la FT(BC) diminue (les deux graphiques du bas sur la Figure 131, pointillés bleus).
- Pour un même modèle générique, plus la profondeur de forage est élevée plus l'amplitude de la FT(BC) diminue (les deux graphiques du haut sur la Figure 131, pointillés bleus).

Deuxième étape: la fonction de transfert entre D et C:

C'est l'amplification estimée avec le quart de la longueur d'onde à partir du profil du modèle générique déterminé par Vs30=800 m/s, de C à D, voir Figure 131, courbe bleue en trait plein.

Notons bien que ce calcul simple ne prend pas en compte l'atténuation, mais comme la normalisation est basée sur le facteur de normalisation qui est un rapport, cela atténue cette omission.

11.6. Mise en œuvre avec la méthode de modélisation 1D d'une réponse à une onde SH

Première étape : la fonction de transfert entre B et C

En prenant simplement la réponse SH au point B comme fonction de transfert(BC), il y a une grande participation des interférences destructrices particulièrement exacerbées sur les spectres de Fourier. Pour éviter ces artefacts et ne garder que les effets d'impédance, nous avons choisi de définir la fonction de transfert FT(BC) comme le rapport entre la fonction de transfert en surface pour le profil AC, notée FT(AC), et la fonction de transfert en surface pour le profil AB, notée FT(AB). Cette fonction de transfert FT(BC) ainsi défini donne approximativement une courbe enveloppe de la fonction de transfert au point B. Les interférences sont effacées comme on le voit sur la Figure 130.

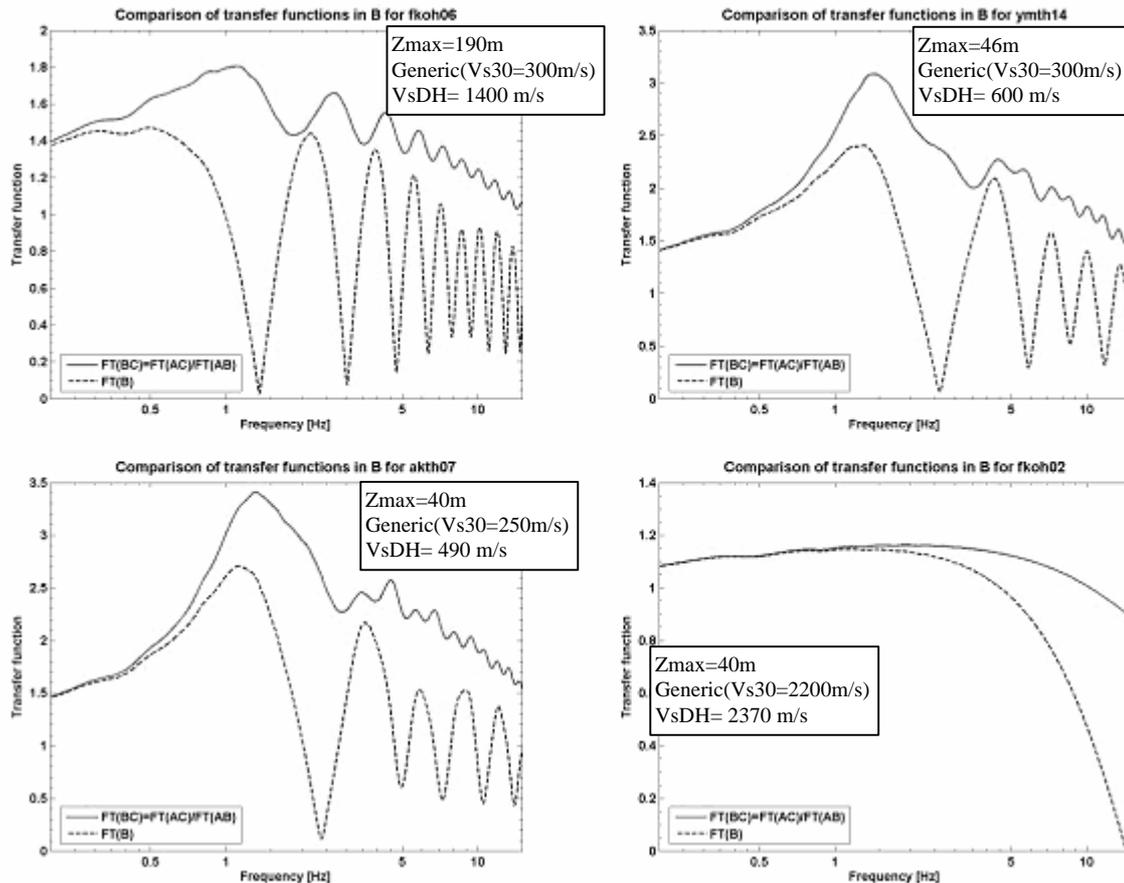


Figure 130: Exemple du calcul de la fonction de transfert 1D numérique en B, notée FT(B) en pointillés bleus, et estimée par FT(AC)/FT(AB), notée FT(BC), en trait plein rouge

La fonction de transfert entre A et B est estimée, c'est la réponse à une onde SH verticalement incidente en A. Puis la fonction de transfert sur le profil mixte, défini par des mesures de down-hole puis étendu jusqu'en C par un modèle générique, est définie par la réponse à une onde SH en A. FT(BC) est alors :

$$FT(BC) = B/C = B/A * A/C = A/C * (1/(A/B)) = FT(AC) / FT(AB)$$

Cette fonction de transfert est propre à chaque site car elle dépend du profil Vs propre à chaque site. Quatre exemples sont représentés sur la Figure 131, courbes rouges en pointillés. Les mêmes remarques faites sur les fonctions de transfert estimées par la méthode du quart de la longueur

d'onde peuvent être faites sur la tendance générale des courbes. Cependant l'observation plus détaillée montre des nuances plus précises.

- Par exemple à une profondeur de forage fixe, en observant les deux graphiques du bas sur la Figure 131, pour FKOH02 lié au profil générique avec $V_{s30}=2200\text{m/s}$, la FT(BC) montre des pics vers le bas liés aux interférences destructives qui ne sont pas visibles si on considère le site AKTH07 lié au profil générique avec un $V_{s30}=250\text{m/s}$ plus faible. Ces interférences sont sûrement liées au fort contraste d'impédance qui existe sur le profil de FKOH02 (voir Figure 128)
- Des oscillations de courte période à hautes fréquences sont souvent visibles, dues aux différents modes de résonance. Ces résonances sont dues aux contrastes d'impédances que l'on trouve sur le profil de down-hole.

Cette modélisation prenant en compte le profil de down-hole est donc plus sensible à la partie entre la surface et le fond de forage qui est déjà prise en compte dans les rapports de spectres empiriques.

Deuxième étape: la fonction de transfert entre D et C

La fonction de transfert en surface pour le profil DC, notée FT(DC), est définie par la réponse à une onde SH incidente, en surface, c'est-à-dire en D, de la colonne de sol déterminée par le modèle générique défini par $V_{s30}=800\text{ m/s}$. Cette fonction de transfert est la même pour tous les sites. Voir la Figure 131, courbe rouge en trait plein.

11.7. Comparaison et conclusion

Malgré des fonctions de transfert FT(BC) et FT(DC) sensiblement différentes suivant la méthode utilisée, voir Figure 131, les deux méthodes de normalisation donnent des facteurs de normalisation $FN(800)=FT(BC)/FT(DC)$ qui ont une tendance générale similaire (Figure 133).

Cependant la méthode de modélisation 1D montre des oscillations qui sont en partie liées au profil de vitesse entre la surface et le fond de forage. Or ce profil est déjà pris en compte avec les rapports de spectres, c'est-à-dire de manière empirique, donc plus proche de la réalité. La fonction de transfert FT(AC) est estimée avec une modélisation, ce qui est moins proche des données qu'une estimation empirique. En effet d'une part il y a des hypothèses et d'autre part le calcul se base sur des mesures de vitesse qui comportent des erreurs. Ces oscillations peuvent avoir des conséquences non négligeables sur le rapport des spectres normalisés, montrant plus de petits pics que la courbe normalisée avec la méthode du quart de la longueur d'onde. La Figure 132 illustre cela avec les rapports de spectres bruts et normalisés avec les deux méthodes.

La normalisation avec la méthode quart de la longueur d'onde a un effet uniquement sur la valeur de l'amplitude sans faire varier les fréquences de résonance ce qui n'est pas le cas avec la réponse SH, voir Figure 132. Certes cette méthode quart de la longueur d'onde est plus simple mais elle garde la forme du rapport de spectres en n'en changeant que le niveau. Elle me semble donc mieux adapter pour conserver les informations du rapport des spectres non normalisé.

Globalement retenons qu'à hautes fréquences la différence vient en majorité de l'atténuation qui est prise uniquement par le calcul de la réponse SH ; et à basses fréquences la différence tient essentiellement dans l'effet du pic d'interférence constructive (résonance) qui est pris en compte uniquement par le calcul de la réponse SH.

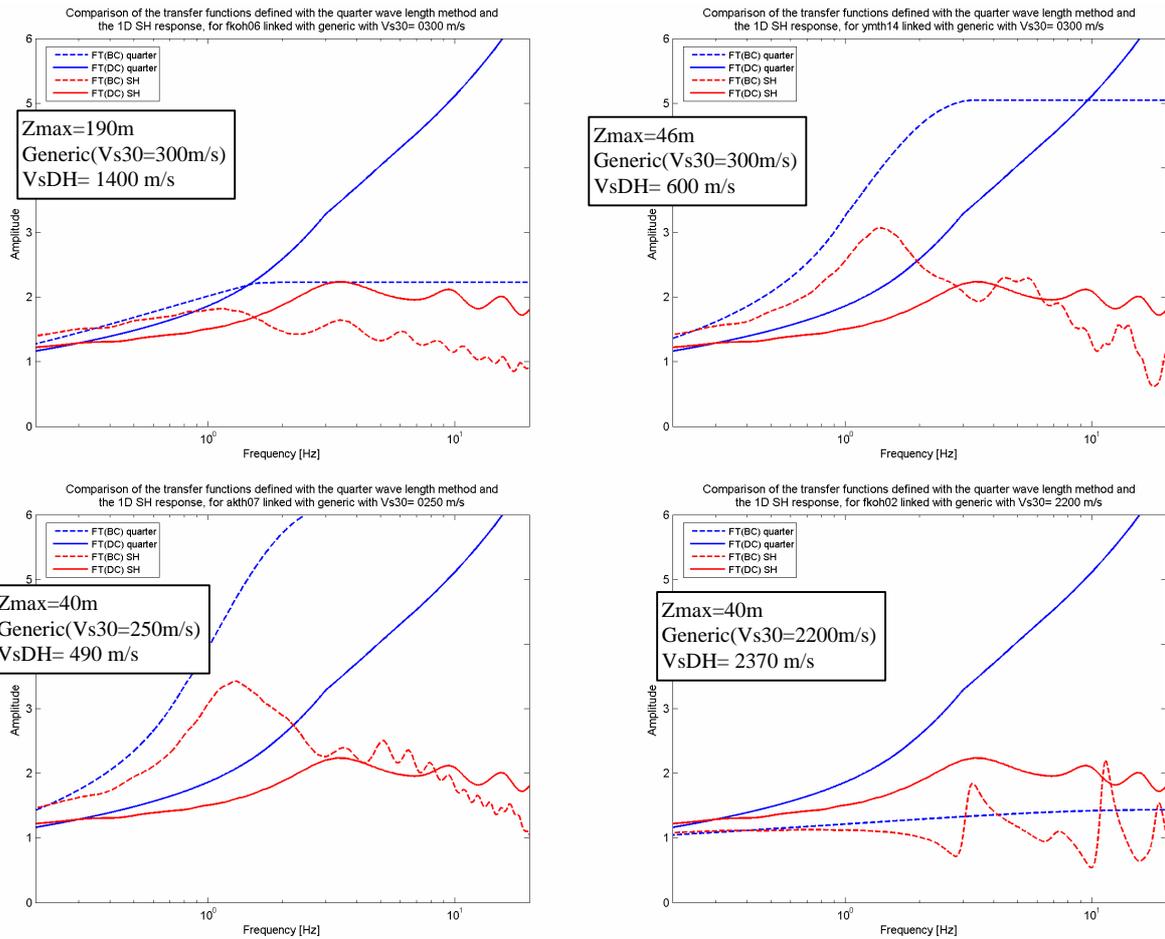


Figure 131: Estimation des fonctions de transfert avec la méthode du quart de la longueur d'onde en bleu et avec la modélisation SH en rouge. Traits pleins : FT(DC) ; pointillés : FT(BC) sur quatre sites : a) FKOH06 avec le générique $V_{s30}=300$ m/s, profondeur du puits = 190m ; b) YMTH14 avec le générique $V_{s30}=300$ m/s, profondeur du puits = 46m ; c) AKTH07 avec le générique $V_{s30}=250$ m/s, profondeur du puits = 40m ; d) FKOH02 avec le générique $V_{s30}=2200$ m/s, profondeur du puits = 40m

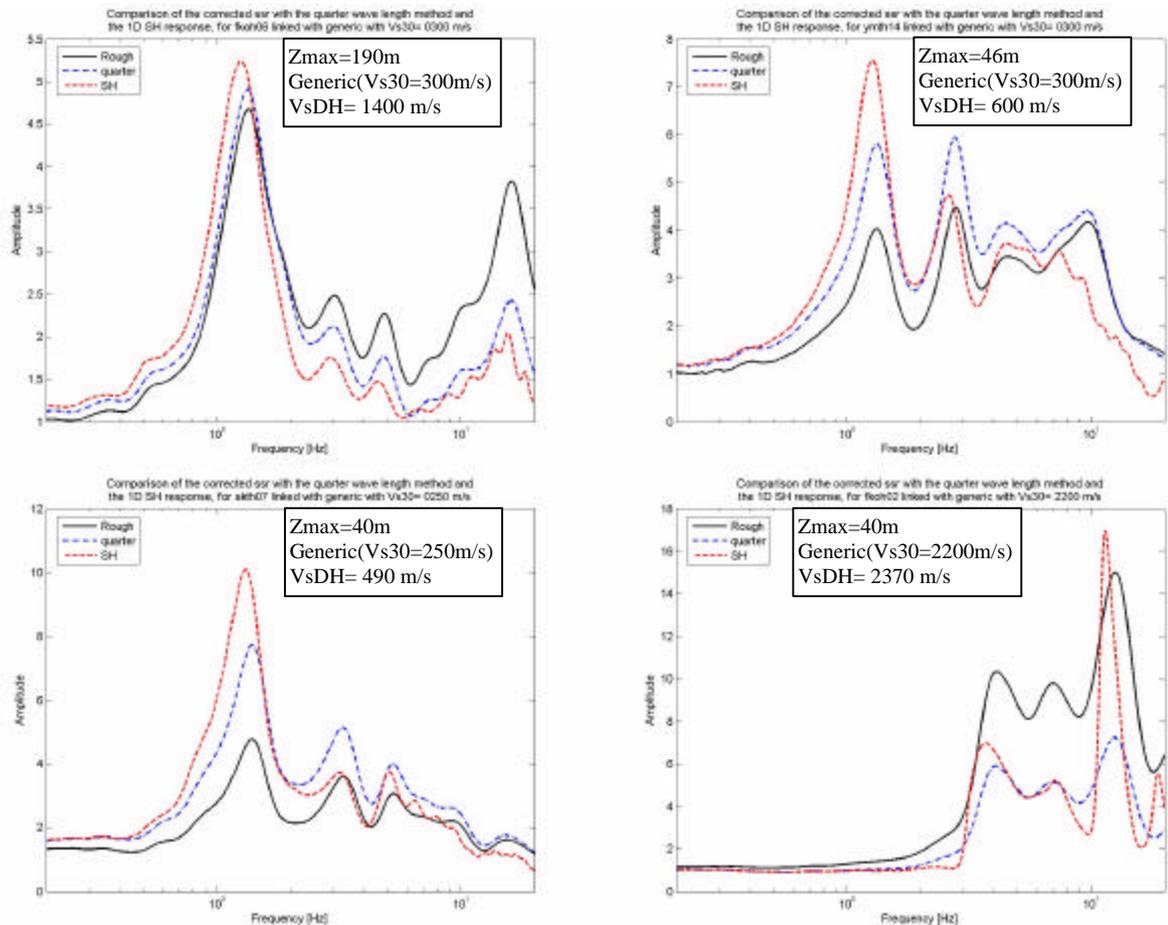


Figure 132: Comparaison des rapports de spectres SSR normalisés avec les étapes 1 et 2; en trait pointillé bleu, normalisation par la méthode du quart de la longueur d'onde ; en trait pointillé rouge, normalisation par les modélisations 1D des fonctions de transfert et en trait plein noir sans normalisation; exemple sur quatre sites : a) FKOH06 avec le générique $V_{s30}=300$ m/s, profondeur du puits = 190m ; b) YMTH14 avec le générique $V_{s30}=300$ m/s, profondeur du puits = 46m ; c) AKTH07 avec le générique $V_{s30}=250$ m/s, profondeur du puits = 40m ; d) FKOH02 avec le générique $V_{s30}=2200$ m/s, profondeur du puits = 40m

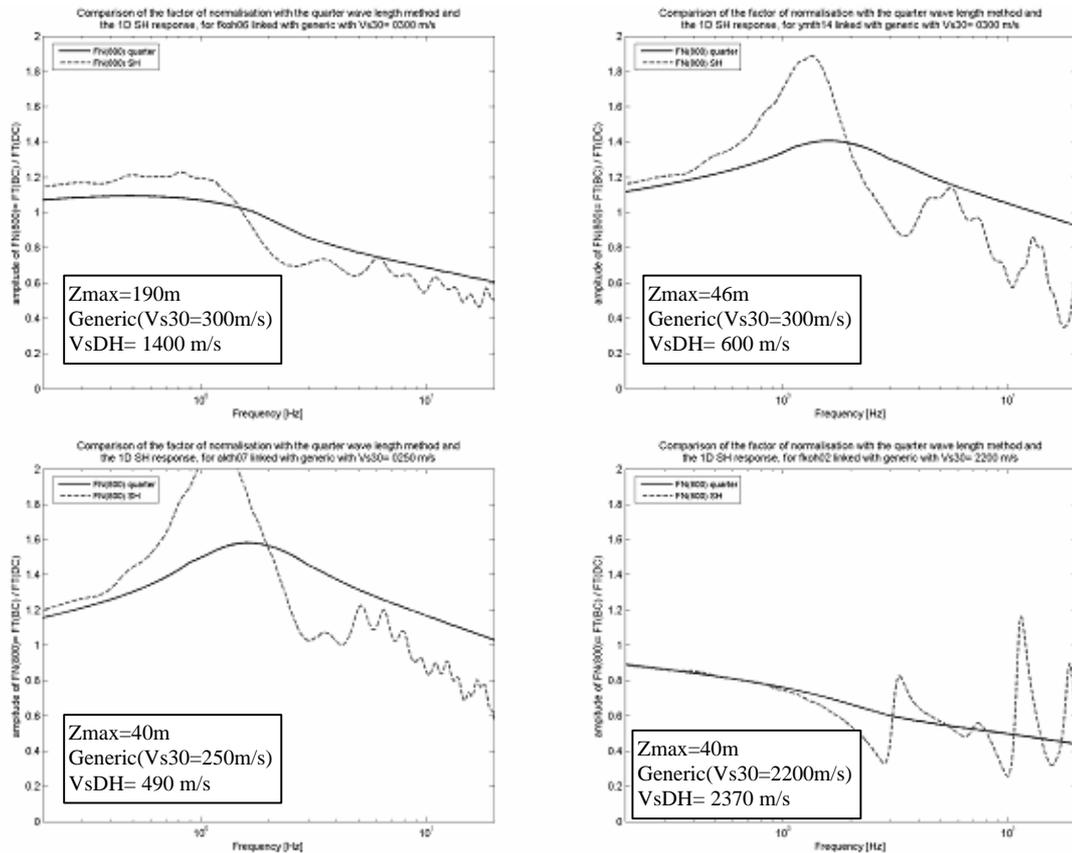


Figure 133: Facteur de normalisation FN(800) (= FT(BC) / FT(DC)), estimé avec la méthode du quart de la longueur d'onde en trait plein et avec la modélisation 1D à une réponse SH en pointillé sur quatre sites : a) FKO06 avec le générique $V_{s30}=300$ m/s, profondeur du puits = 190m ; b) YMTH14 avec le générique $V_{s30}=300$ m/s, profondeur du puits = 46m ; c) AKTH07 avec le générique $V_{s30}=250$ m/s, profondeur du puits = 40m ; d) FKO02 avec le générique $V_{s30}=2200$ m/s, profondeur du puits = 40m

Tous les rapports de spectres ont donc été normalisés vers une référence commune. A ce stade ils peuvent être comparés. De plus comme ces rapports sont comparables, des moyennes selon les paramètres caractéristiques du site, c'est-à-dire les vitesses moyennes et la fréquence de résonance, peuvent être faites.

Cependant, le problème de cette normalisation est de ne pas prendre totalement en compte le fait que la station au rocher soit en fond de forage. En effet, un enregistrement en profondeur amène des biais par rapport à un enregistrement en surface, comme par exemple les effets de surface libre, d'interférence destructrice. Ceci est détaillé au paragraphe suivant. Rappelons que le but est de modifier un spectre au rocher pour prendre en compte l'effet de site, en utilisant les rapports de spectres empiriques de Kik-net. On a donc besoin d'un spectre au rocher défini de la même façon que dans les rapports de spectres empiriques de Kik-net. Pour parer aux problèmes liés à la référence en profondeur, deux solutions persistent :

1. Les rapports de spectres de puits sont normalisés par l'étape 1, c'est-à-dire ramenés en fond de forage en C. La référence est alors prise en fond de puits. Dans ce cas l'estimation des spectres de référence n'est pas en surface mais en profondeur. Cependant les réglementations donnent généralement un spectre de référence au rocher en surface et non pas en profondeur, d'où la solution 2.
2. Les spectres en fond de forage (B sur la Figure 125) sont corrigés de l'effet de surface libre. Dans ce cas de figure il y a une troisième étape de correction qui est détaillée au paragraphe 12 ci-après.

12. Correction des fonctions de transfert dans un forage : effet de la surface libre

12.1. Introduction

Le rapport des spectres est classiquement utilisé avec une station sur le site à étudier en surface et une station de référence, en surface, au rocher. Dans ce cas le rapport sera noté SSRsurf ou RSRsurf. Dans l'étude des données Kik-net les stations disponibles sont sur le site en surface et pour la référence, au rocher en profondeur, en fond de forage. Ce n'est donc pas exactement le même rapport de spectres classique que nous avons utilisé, ce qui implique des différences à considérer. En effet le mouvement au rocher en profondeur n'est pas le même qu'au rocher en surface comme nous l'avons évoqué dans l'introduction, paragraphe 10, page 179 0 :

1. Les ondes réfléchies font partie de l'enregistrement en profondeur, il peut donc y avoir des interférences destructives ou constructives qui auront un effet notable lors du rapport surface sur profondeur, les amplitudes pourront alors être largement exagérées.
2. De plus le contenu basse fréquence des enregistrements surface et profondeur sont très proches, la bande de fréquence similaire dépend, entre autres, de la distance surface-profondeur et de la vitesse moyenne sur cette distance. Cette similarité implique une perte d'information lors du rapport surface sur profondeur. La plus grande longueur d'onde observable d'après Fresnel est de l'ordre de 4 fois la distance D séparant les capteurs haut et bas. Cette longueur d'onde correspond à une fréquence f_{\min} qui est de l'ordre de V_s moyen sur 4 fois cette distance. Le rapport de spectre caractérisera donc le site sur une bande de fréquence limitée par une fréquence minimale.
3. En profondeur l'effet de surface libre se retrouve seulement pour les basses fréquences et n'est pas présent pour les hautes fréquences. Ceci est problématique puisque le rapport de deux spectres enregistrés en surface permettra d'annuler de manière homogène sur toute la bande de fréquences cet effet de surface libre. Tandis que le rapport d'un spectre enregistré en surface sur un spectre enregistré en profondeur ne sera pas corrigé de la surface libre sur l'ensemble des fréquences puisque cet effet n'est plus visible en dessous d'une certaine fréquence pour l'enregistrement en fond de forage.

Sur ces trois principales différences nous pouvons déjà faire quelques commentaires :

1. Les effets d'interférences destructives sont beaucoup moins grands en pratique qu'en théorie [note personnelle de PY Bard]
2. Les similitudes du contenu basse fréquence ne devraient poser problème que pour les sites qui montrent des effets de site sous la station du fond de forage. Cependant ces sites ont été repérés au paragraphe 8.2.3 grâce à l'observation du rapport moyen H/V des enregistrements en surface et en profondeur. Pour ces sites une fréquence minimale sous laquelle les rapports de spectres ne sont pas pris en compte a été définie. Ce point est donc déjà pris en compte.

Le but de ce paragraphe est de corriger un des effets dus à la référence en profondeur, l'effet de surface libre, pour se rapprocher au plus d'un rapport de spectres surface sur surface. C'est une 3^{ème} étape vers un rapport de spectre classique.

Troisième étape : Correction de l'effet de surface libre

Dans un cas simple, élastique isotrope tabulaire homogène, l'amplitude du spectre, non modifiée par les effets d'impédance et d'atténuation, vaut A à la source et $2A$ en surface. Et en effet le déplacement suit l'équation : $u(z, t) = 2A \cos(kz) e^{i\omega t}$, l'amplitude est égale à $2A$ quand $z=0\text{m}$ (en surface) avec A l'amplitude à la source. Cet effet va être visible à toutes les fréquences jusqu'à différentes profondeurs selon la fréquence concernée. A une profondeur donnée on s'attend à avoir une évolution de l'effet de surface libre qui suivrait une courbe du type de celle représentée sur le graphique de la Figure 134. Cette courbe est égale à 2 en basse fréquence et à 1 en haute fréquence. La zone de transition passant progressivement de 1 à 2 se trouvant autour de la fréquence d'interférence destructrice correspondant à la profondeur d'observation. L'idée est de définir cette courbe pour corriger de cet effet non homogène sur toute la bande de fréquence. La correction consistant à diviser le spectre en fond de forage par 0.5 fois cette courbe. Cette courbe correctrice est définie pour chaque fond de forage autour de la fréquence de résonance déterminée grâce à la fonction de transfert de puits.

Dans un premier temps on tâchera d'observer l'effet de la surface libre sur des données réelles, puis dans un deuxième temps, on cherchera à modéliser cet effet.

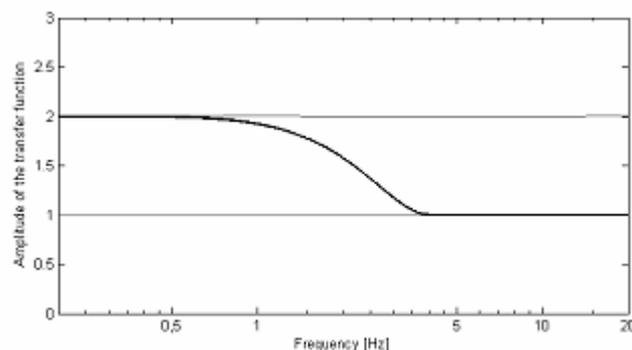


Figure 134: Schéma de la courbe de l'évolution de l'amplitude normée par l'amplitude original, en prenant en compte seulement l'effet de surface libre ; exemple pour une station à la profondeur correspondant à une fréquence fondamentale de résonance de 2 Hz.

12.2. Effet de la surface libre : Observation sur des données réelles

Pour une station en profondeur l'effet de la surface libre peut se schématiser par la courbe de la Figure 134. En surface cette courbe est constante égale à 2 (considérant une normalisation par l'amplitude originale). Le rapport de ces deux courbes type est donc égal à 1 en basse fréquence, passe progressivement à 2 autour de la fréquence de résonance de la station en fond de forage et est égale à 2 à haute fréquence. C'est ce que nous cherchons à observer sur des cas réels. Pour cela les sites sélectionnés doivent présenter le minimum d'effet de site puisque c'est uniquement l'effet de surface libre que l'on cherche à observer. Nous allons donc comparer un enregistrement sur le rocher en surface et sur le rocher en profondeur.

Les conditions pour comparer un enregistrement en surface et en profondeur sont d'avoir une station en surface et en profondeur tel que :

- la distance entre les deux stations soit faible par rapport aux séismes observés ;
- les deux stations soient sur une formation dure afin d'éviter les effets de site ;
- les caractéristiques physiques de la station en surface soient comparables à celles de la station en profondeur ;

- il y ait des enregistrements assez lointains sur les deux stations.

Ces conditions sont exigeantes et une première recherche nous a permis de sélectionner huit couples. Cependant nous n'avons pas fait de sélection sur le fait que les sites au rocher présentent peu d'effet de site pour avoir une plus grande gamme d'observations possibles.

Les huit couples de stations répondant à ces conditions sont présentés dans le Tableau 12. La recherche s'est effectuée en sélectionnant dans un premier temps les stations avec un V_{S30} supérieur à 800 m/s puis en recherchant des stations voisines avec une vitesse en fond de forage se rapprochant au mieux du V_{S30} de la station en surface voisine. Il n'est pas facile de trouver des vitesses en surface qui soient proches des vitesses en profondeur. Ces deux paramètres sont colorés sur le Tableau 12.

En surface l'amplitude est deux fois l'amplitude originale, c'est-à-dire celle enregistrée à très grande profondeur et à basse fréquence. En fond de forage l'enregistrement sera touché par l'effet de surface de manière différente pour chaque fréquence comme schématisé sur la Figure 134. Pour estimer cette influence, le rapport des spectres des composantes horizontales d'un enregistrement en surface au rocher sur un enregistrement en fond de forage au « même » rocher est effectué. Ce rapport est noté SL pour surface libre. Pour ne quantifier que l'effet de surface libre il faudrait que l'enregistrement en surface soit différent de l'enregistrement en fond de forage uniquement à cause de l'effet de surface libre, cependant il y peut y avoir un effet de site et un parcours différent entre ces deux capteurs qui se mélangent avec l'effet de surface libre.

Pour les huit couples ce rapport SL est présenté sur la Figure 135. Quand il y a plusieurs événements disponibles, une moyenne logarithmique est effectuée.

Dans le cas idéal où seul l'effet de surface libre intervient, le rapport SL devrait être égal à 1 à basse fréquence et passer progressivement à 2 autour de la fréquence de destructrice du capteur du fond de forage. Sur la Figure 135 ce type de résultat n'est pas si net. Plusieurs raisons peuvent être invoquées :

- Il existe un effet de site au niveau du capteur au rocher en surface qui aura pour effet d'augmenter les amplitudes à relativement hautes fréquences puisque les sites sélectionnés sont supposés être rocheux. L'effet de site des enregistrements en surface peut être observé sur le rapport des spectres de puits SSRbh.
- Il existe un effet de site sur le capteur du fond de forage qui aura pour conséquence l'observation sur le rapport SL d'amplitudes inférieures à 1. Cet effet de site éventuel peut être observé sur le rapport H/V des événements enregistrés en fond de puits.
- Le trajet de la source vers chaque capteur est sensiblement différent d'un capteur à l'autre, donc les spectres ne sont pas comparables. Ce cas de figure devrait être évité puisqu'on a choisi des capteurs proches et des événements lointains pour relativement minimiser les différences.

Tableau 12: Couple de stations pour observer les effets de la surface libre, colonnes n°12 : vitesse ponctuelle en fond de forage ; n°13 : fréquence fondamentale de résonance à la profondeur du fond de forage ; n°14 : fréquence à partir de laquelle les rapports H/V en surface et en profondeur sont différents à plus de 30% ; n°15 : Fréquence à partir de laquelle le rapport SL est supérieur à 1

N° du couple	couple	Nb seism	distance entre les stations	événement	distance des événements	pga [gal]	magnitude	prof max	vs30	VsBR	vsmean	fdest	f ₀	vsmean/4*fdest
1	absh04	1	10,07	03-09-26-0608		1,56	7,1	140	1136	3100	2033	4,2	4,2	120
	absh05				272,91	2,09		84	624	1800	1030	4,5	4,5	57
2	srch10	1	18	03-09-26-0608	198,86	25,08	7,1	134	1027	1600	1254	2,3	0,3	137
	srch09				215,77	110		98	241	780	408	1,2	1,2	88
3	kgwh03	1	15,15	04-09-05-2357	297	4,12	7,3	50	1410	2950	1689	7,7	7,7	55
	kgwh01				312	23,57		84	255	1287	558	6,4	6,4	22
4	kgwh03	1	12,9	04-09-05-2357	297	4,12	7,3	50	1410	2950	1689	7,7	7,7	55
	kgwh04				282	13,15		58	407	1760	625	5,1	5,1	30
5	tkyh13	4	6,45	04-10-23-1812	168,96	2,15	5,9							
	tkyh12				174,93	4,62								
	tkyh13			04-09-05-2357	333,49	4,83	7,3	58	1110	2500	1437	9,9	9,9	36
	tkyh12				337,89	8,77		120	326	1800	626	2,2	2,2	71
	tkyh13			04-10-23-1834	178,62	8,01	6,3							
	tkyh12				183,89	11,84								
	tkyh13			04-10-23-1756	179,87	11,87	6,8							
	tkyh12				185,7	14,28								
6	tkyh13	4	18,69	04-10-23-1812	168,96	2,15	5,9							
	kngh18				175,3	3,45								
	tkyh13			04-09-05-2357	333,49	4,83	7,3	58	1110	2500	1437	9,9	9,9	36
	kngh18				328,26	18,08		54	388	1200	495	3,1	3,1	40
	tkyh13			04-10-23-1834	178,62	8,01	6,3							
	kngh18				185,01	10,88								
	tkyh13			04-10-23-1756	179,87	11,87	6,8							
	kngh18				186,23	24,5								
7	oith05	1	18,28	00-10-06-1330	288	1,68	7,3	32	1269	1900	1271	4,6	4,6	69
	oith04				300,6	3,05		120	459	960	886	1,6	1,6	135
8	oith05	1	18,91	00-10-06-1330	288	1,68	7,3	32	1269	1900	1271	4,6	4,6	69
	oith07				300,9	11,21		63	276	1600	384	2,2	2,2	43

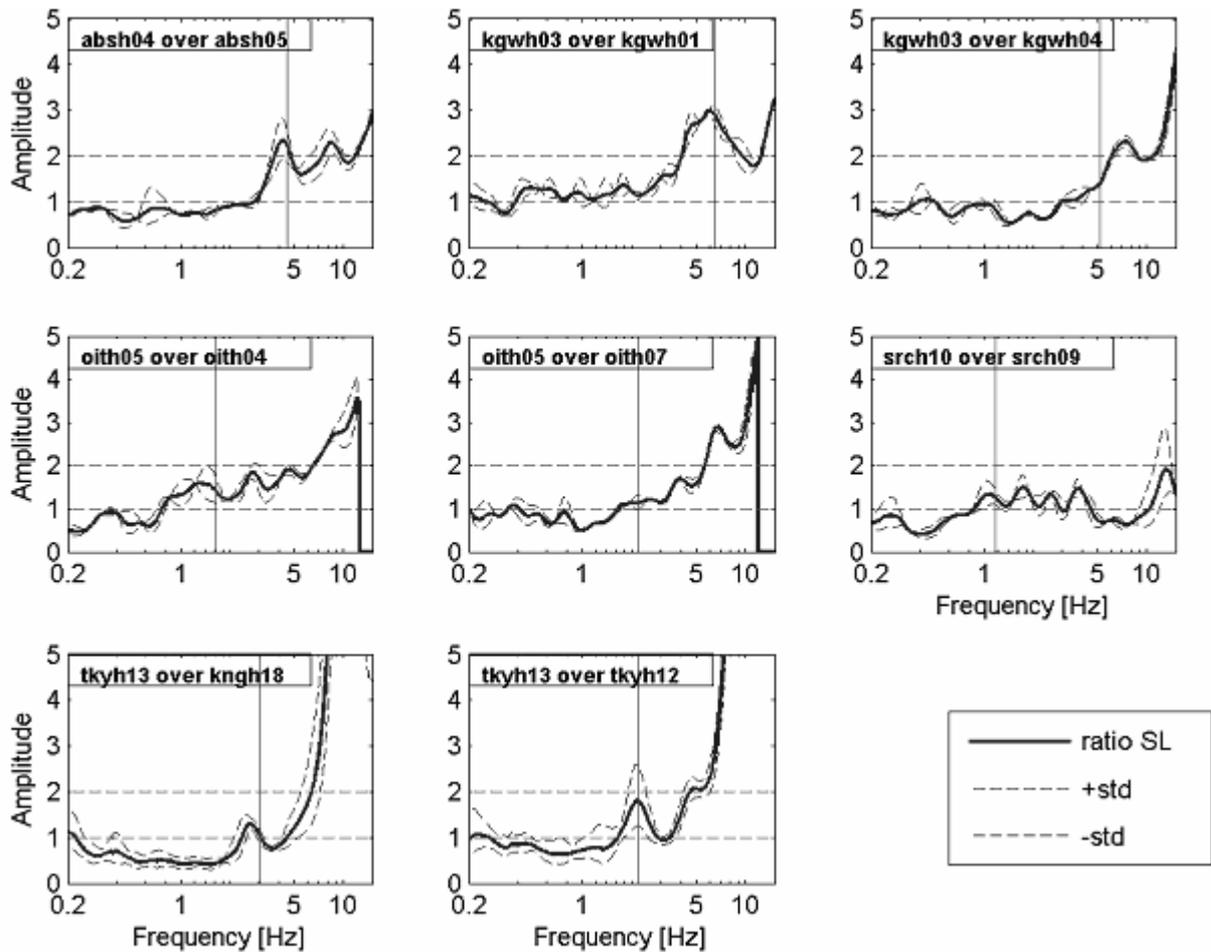


Figure 135: Rapport du spectre au rocher en surface sur le spectre au rocher en profondeur, pour illustrer l'effet de la surface libre sur huit couples de stations proches. Les couples sont notés : « site 1 over site2 », la station en surface du site 2 est la station de référence en surface, la station en profondeur du site 1 est la station de référence en profondeur. Les deux stations de référence sont équivalentes en terme de vitesse caractéristique. En trait fin vertical : fréquence destructrice correspondant au capteur en fond de forage

Sur ces graphiques, Figure 135, pour 5 des couples, les n°4, 5, 6, 7 et 8, le changement de l'amplitude 1 à 2 se fait dans une gamme de fréquence contenant la fréquence de résonance de la station du fond de forage concernée. De plus pour les couples 4, 5 et 6, la fréquence de résonance des sites au rocher en surface ne fait pas parti de cette bande de fréquence, donc le changement d'amplitude ne peut pas être dû à un pic sur la station en surface, c'est-à-dire ne peut pas être dû à un effet de site. Dans ce cas l'hypothèse que ce changement d'amplitude est dû à l'effet de surface libre est plus certaine.

Pour le couple 2, la station de référence en surface à une fréquence de résonance de 0.3 Hz. Cela suppose un effet de site non négligeable d'où la forme du rapport SL qui ne correspond pas à l'effet de surface libre. Les couples 1 et 3 ne correspondent pas non plus à un changement d'amplitude autour de la fréquence de résonance du site pour lequel la station du fond de forage est prise en compte. Dans ce cas il n'y a pas d'explication évidente, on suppose que l'effet de site de la station en surface couvre l'effet de surface libre.

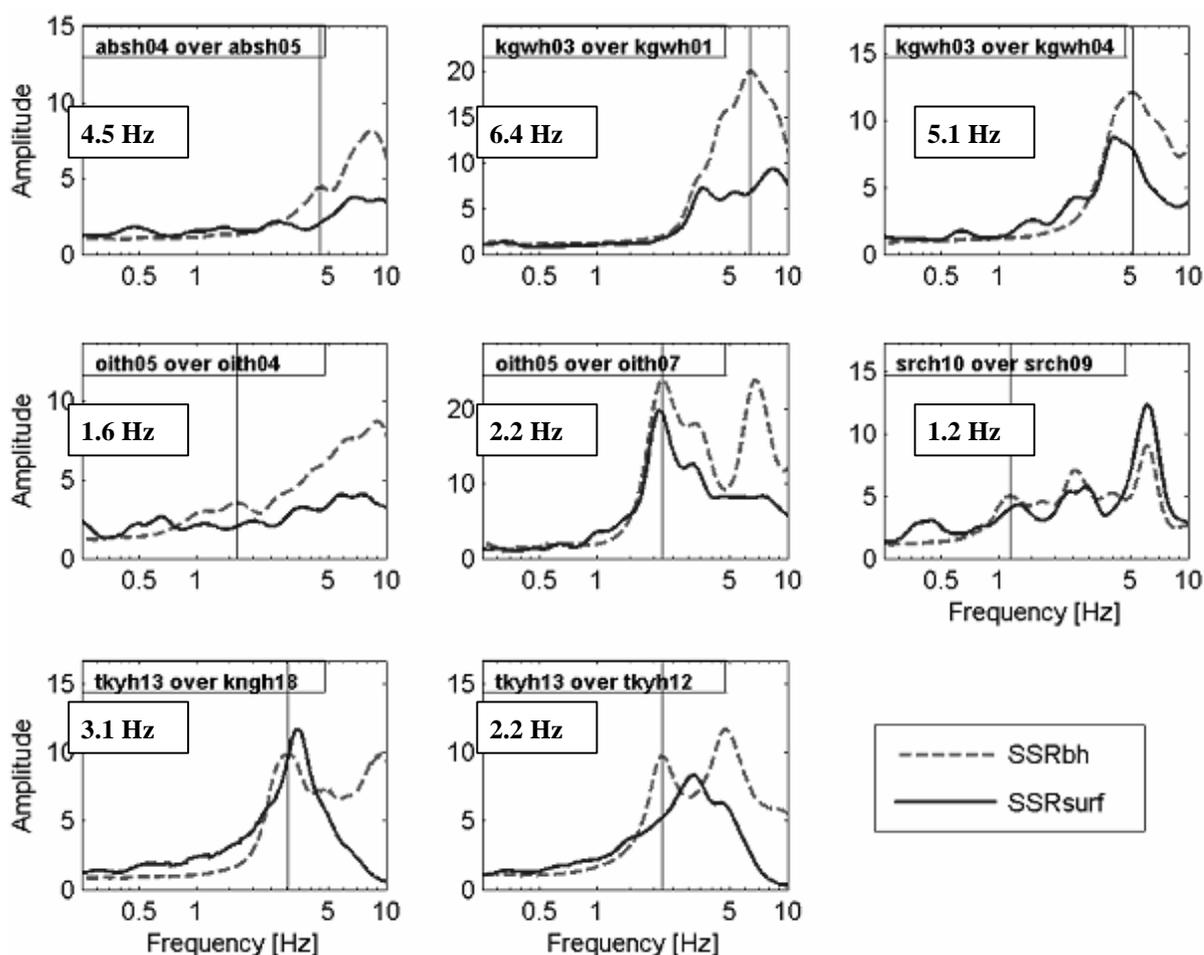


Figure 136: Comparaison des rapports SSRbh et SSRsurf sur 8 couples de stations. Les couples sont notés : « site 1 over site2 », la station en surface du site 2 est la station de référence en surface, la station en profondeur du site 1 est la station de référence en profondeur. Les deux stations de référence sont équivalentes en terme de vitesse caractéristique. $SSRbh = \text{site1}(\text{surface}) / \text{site1}(\text{profondeur})$ et $SSRsurf = \text{site1}(\text{surface}) / \text{site2}(\text{surface})$ La fréquence destructrice correspondant au capteur en fond de forage est en annotation sur les graphiques et en trait fin gris vertical

Pour chaque rapport SL on définit la fréquence f_1 à partir de laquelle le rapport SL est supérieur à 1 (colonne n°15 dans le Tableau 12). D'après les études précédentes au paragraphe 8.2.3, nous avons déterminé le rapport H/V des enregistrements en surface et en profondeur. A partir de ces rapports une fréquence dit fréquence minimale f_{min} , a été définie (voir Tableau 12, colonne n°14), fréquence à partir de laquelle l'écart entre les rapports H/V en surface et H/V en profondeur est supérieur à 30%. Cette fréquence est la limite à partir de laquelle des différences entre la station du haut et du bas sont visibles. Ces différences peuvent être liées aux effets de site et aux effets de surface libre.

Pour les couples n° 1, 7 et 8 cette fréquence f_{min} correspond, à plus ou moins 40 % au maximum, au début de l'évolution de l'amplitude 1 vers 2 du rapport SL à la fréquence notée f_1 (voir colonne 15 sur le Tableau 12). Cette fréquence f_{min} pourrait être une piste pour décrire la courbe type de correction de l'effet de surface. Cette remarque n'est pas valable pour les autres couples. D'autres sites sont nécessaires pour confirmer cette remarque et chercher si la fréquence

limite où l'effet de surface libre est visible, peut être définie par la comparaison des rapports H/V en surface et en profondeur.

Étant donné que les conclusions de ces observations ne confirment pas complètement les effets attendus, une autre visualisation possible est de comparer le SSRsurf avec le SSRbh sur les mêmes couples de stations qu'utilisées ci avant, voir Tableau 12 et Figure 136. Sur cette figure nous remarquons que le SSRbh est très proche du SSRsurf pour les basses fréquences et généralement plus élevé que le SSRsurf pour de plus hautes fréquences. Une des explications mise en avant pour expliquer cette nuance est l'effet de surface libre. En effet à basse fréquence l'effet de surface libre affecte les deux enregistrements, tandis qu'à hautes fréquences l'effet de surface libre est présent uniquement en surface, ce qui multiplie par deux les rapports de spectres.

D'après la Figure 136, la fréquence de résonance du site pour lequel on considère le rocher en profondeur, se trouve comprise entre la fréquence pour laquelle le SSRbh devient supérieur au SSRsurf et la fréquence pour laquelle le SSRbh divisé par deux devient supérieur au SSRsurf. Le couple SRCH10-SRCH09 fait exception. Cette observation nous pousse à penser que l'effet de surface libre a bien sa limite autour de la fréquence de résonance correspondant à la couche de sol entre les deux capteurs en surface et en profondeur.

Pour conclure l'utilisation des rapports SSRbh est conservative car l'amplitude est généralement plus élevée que celle du SSRsurf en hautes fréquences. En basses fréquences cette remarque n'est pas valable mais comme le SSRsurf ne dépasse pas 2 on estime qu'il n'y a pas d'effet de site. Cette différence peut s'expliquer par le fait que pour le SSRbh le rapport se fait sur deux signaux enregistrés au même endroit à une profondeur différente. Alors que pour le SSRsurf, les rapports se font sur deux stations distantes, donc le contenu basse fréquence peut plus facilement être différent. Néanmoins cette différence ne dépassant pas un rapport de 2 et ne présentant pas de pic, on ne parle pas dans ce cas d'effet de site.

12.3. Effet de la surface libre : Modélisation

L'idée est d'observer la réponse d'une onde SH à différentes profondeurs. Pour cela on utilise la modélisation à une dimension évoquée au paragraphe 11.3.2. Afin d'éviter au maximum les effets de site liés à de fortes impédances, c'est sur les profils génériques au rocher, décrits au paragraphe 11.4, que seront faits ces calculs. Plusieurs approches ont été réalisées, notamment celles d'utiliser plusieurs profils génériques sur lesquels la réponse SH est calculée pour une onde SH arrivant suivant différents angles d'incidence variant de 10, 20, 30, 40 et 60 degrés et à différentes profondeurs variant de 0 à 320 mètres. Au final, seules les réponses SH avec les angles d'incidence de 10, 20, 30, 40 et 60 degrés, aux profondeurs 20, 60, 80, 100, 160 et 320 mètres, sur le modèle générique défini par $V_{s30}=800$ m/s, seront retenues. Ces réponses présentent un premier creux d'amplitude nulle à la fréquence destructrice fondamentale, dépendant de la profondeur d'observation de la réponse. Cette fréquence correspond à la fréquence de résonance à cette profondeur d'observation. En effet d'après l'équation pour un cas élastique tabulaire : $u(z, t) = 2A \cos(kz) e^{i\omega t}$, à la profondeur z , $u(z)$ s'annule pour une fréquence égale à $V_s/4z$ modulo(π). Donc la 1^{ère} fréquence destructrice correspond à $f_{dest}=V_s/4z$, avec V_s la vitesse moyenne sur les z premiers mètres.

La réponse du profil générique défini par $V_{s30}=800$ m/s, à une profondeur de 100 mètres est choisie comme référence. La fréquence destructrice de cette réponse est 3.2 Hz, elle est choisie comme fréquence de référence.

Dans un premier temps les courbes des réponses SH à différentes profondeurs et angles d'incidence sont normalisées selon la fréquence destructrice de référence f_{ref} , on observe alors $FT(f/f_{ref})$. Les courbes sont décalées de manière logarithmique afin de faire correspondre les fréquences destructrices fondamentales autour de la fréquence de référence f_{ref} , et de faire correspondre plus grossièrement les fréquences destructrices supérieures des différentes réponses. Cette étape est illustrée sur la Figure 137.

L'effet de surface libre n'est pas le seul représenté. En effet il y a un effet de résonance illustré par les oscillations des réponses SH, il y a aussi un effet d'impédance qui amène une amplitude supérieure à 2 dans la partie basse fréquence.

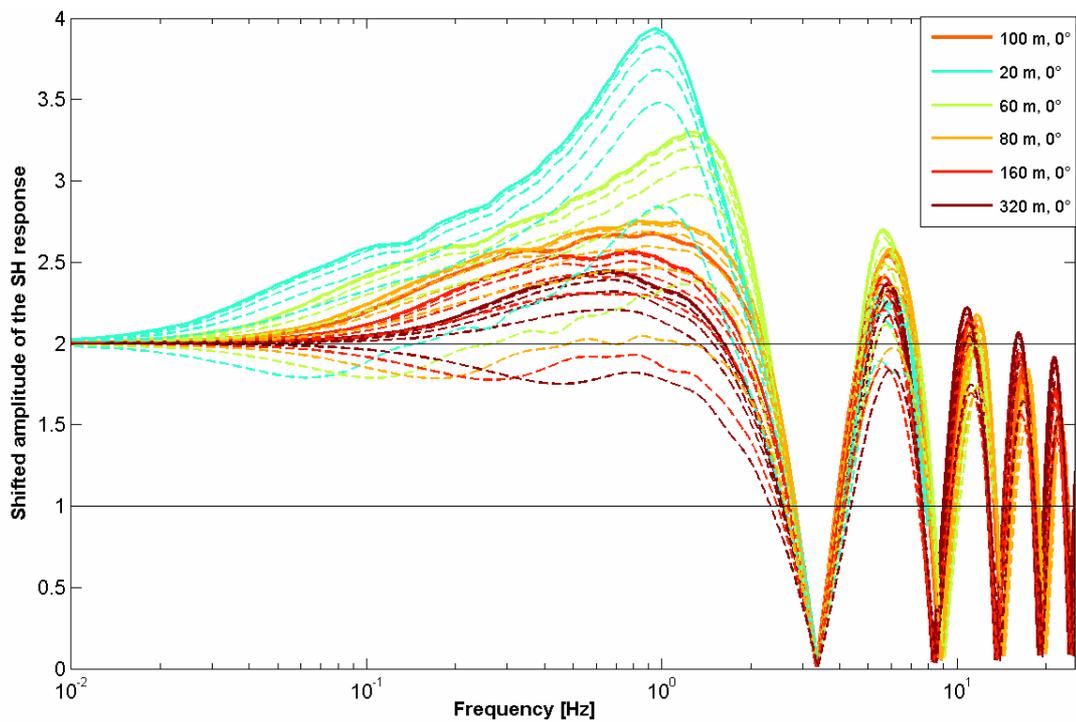


Figure 137: Réponse du modèle générique défini par $V_{s30}=800\text{m/s}$, à une onde SH avec plusieurs angles d'incidence de 10 à 60°, à différentes profondeurs de 20 à 320 mètres, recalée vers la fréquence fondamentale de 3.2 Hz à 100 mètres de profondeur.

Pour corriger des oscillations un lissage Konno-Ohmachi est utilisé avec un faible paramètre $b=10$. Les courbes lissées sont représentées sur la Figure 138. Le lissage réduit les oscillations à hautes fréquences et les courbes tendent vers 1 au-dessus de la fréquence destructrice de référence 3.2 Hz.

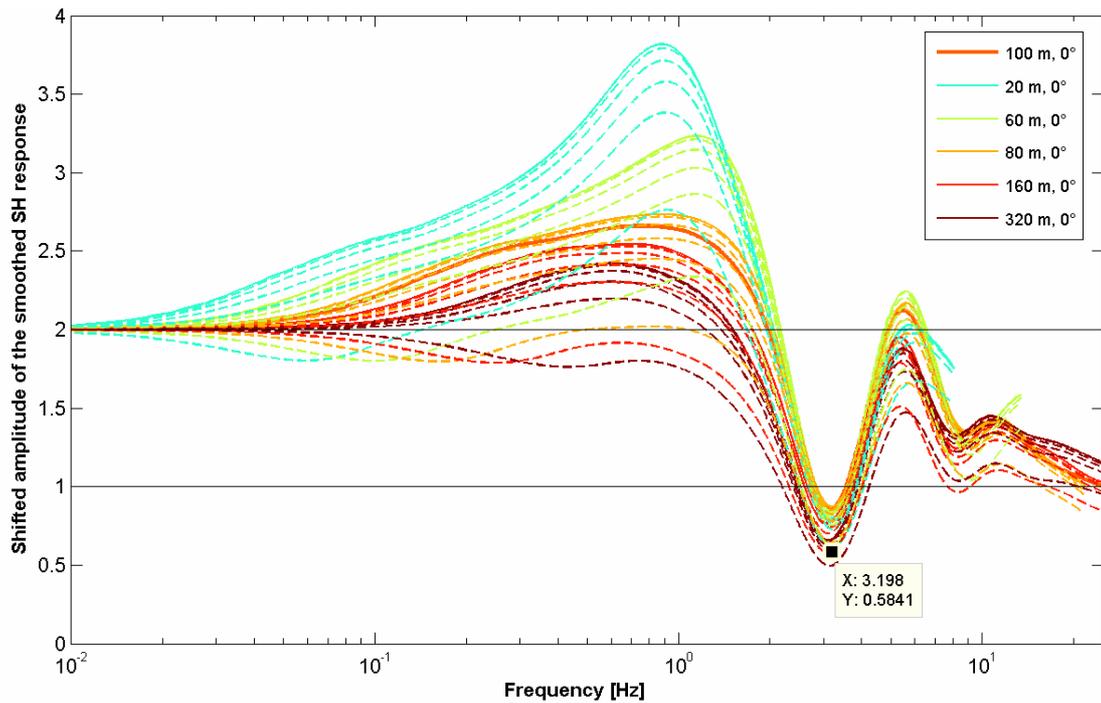


Figure 138: Réponses lissées par Konno-Ohmachi, $b=10$, du modèle générique défini par $V_{s30}=800\text{m/s}$, à une onde SH avec plusieurs angles d'incidence de 10° à 60° , à différentes profondeurs de 20 à 320 mètres, recalée vers la fréquence fondamentale à la profondeur de 100 mètres.

Pour corriger de l'effet d'impédance, ce dernier sera estimé à l'aide de la méthode du quart de la longueur d'onde de la même façon qu'au paragraphe 11.5, c'est-à-dire sur un profil prolongé par une vitesse constante jusqu'à la surface pour avoir un facteur d'amplification constant pour les hautes fréquences. Un exemple de ce type de correction est illustré sur la Figure 139. On remarque que les basses fréquences se rapprochent de 2 mais les hautes fréquences ont tendance à être trop réduite. En effet dans ce calcul simple l'effet d'atténuation n'est pas pris en compte. Dans [Boore, 2003] équations 19 et 20 il propose un terme correctif pour prendre en compte l'atténuation, effet surtout notable à hautes fréquences.

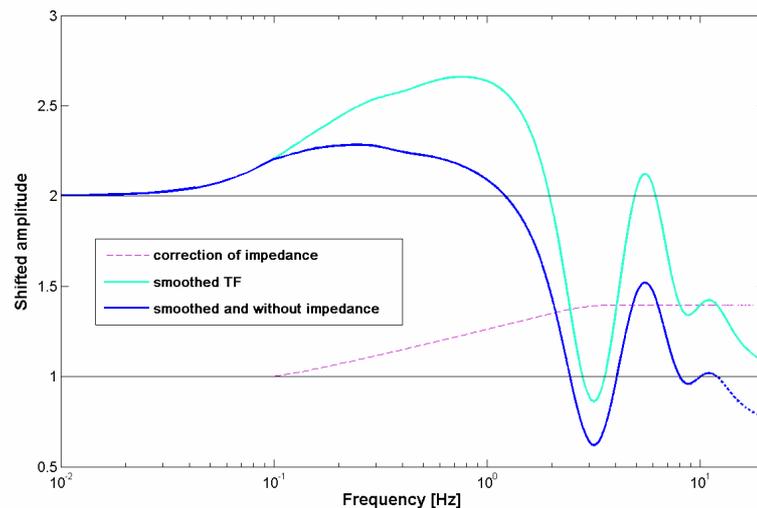


Figure 139: Exemple de correction de l'impédance sur un modèle générique défini par $V_{S30}=800\text{ m/s}$, considérant la réponse SH à 100m de profondeur : en pointillés rouges : facteur correctif de l'impédance calculé par la méthode que quart de la longueur d'onde ; en vert clair : réponse SH lissée avec Konno-Ohmachi, $b=10$, en bleu la même courbe corrigé de l'impédance, c'est-à-dire la courbe verte divisée par la courbe en pointillés rouges.

Cependant comme nous le montre la Figure 140 les différentes réponses selon la profondeur et l'angle d'incidence, corrigées de l'impédance, balayent une gamme d'amplitude qui semble tourner autour de 2 pour les basses fréquences et autour de 1 pour les hautes fréquences. Faire la moyenne devrait donc amoindrir le fait de ne pas prendre en compte l'effet d'atténuation.

Une moyenne est donc effectuée sur l'ensemble de ces réponses lissées et corrigées de l'impédance et est représentée sur la Figure 141 en bleu. Avec les modélisations la courbe moyenne finale est encore difficilement exploitable puisque d'une part elle présente des pics et d'autre part de nombreuses étapes sont nécessaires à son obtention, impliquant de nombreuses hypothèses. C'est pourquoi une fonction dépend de la fréquence de référence, ici 3.2 Hz, représentée en noire sur la Figure 141, sera une première approche pour corriger de l'effet de surface libre. Cette fonction est appelée fonction correctrice de la surface libre, notée SL. Elle est définie par la moyenne entre deux fonctions cor1(f) et cor2(f) :

$$Cor1(f) = 1 + \left[0.5 \times \left(\cos \left(p \times \left[\frac{f - f_{dest}/10 - pas}{2.5 \times f_{dest} - f_{dest}/10 - pas} \right] \right) \right) \right]$$

Avec pas : l'échantillonnage en fréquence

$$Cor2(f) = 1.25 \times \frac{\frac{p}{2} - \arctan \left(f - \frac{f_{dest}}{2} \right)}{p} + 1$$

Pour chacun des 594 sites, chaque rapport de spectres moyen normalisé est multiplié par la fonction SL divisée par deux pour obtenir des rapports de spectres moyens normalisés et corrigés de l'effet de surface libre.

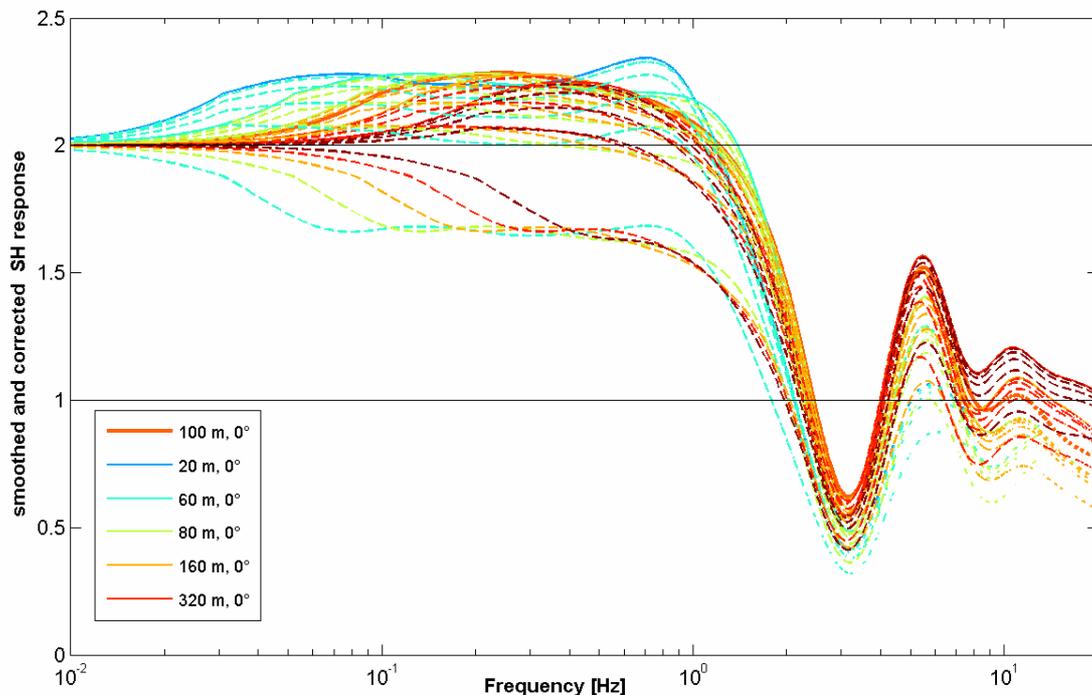


Figure 140: A partir du modèle générique défini par Vs30=800m/s, réponses SH estimées à différentes profondeurs de 20m à 320 m et pour des angles d'incidence de 0° à 60°, corrigées de l'effet d'impédance et décalée vers la fréquence destructrice de référence fdest=3.2 Hz

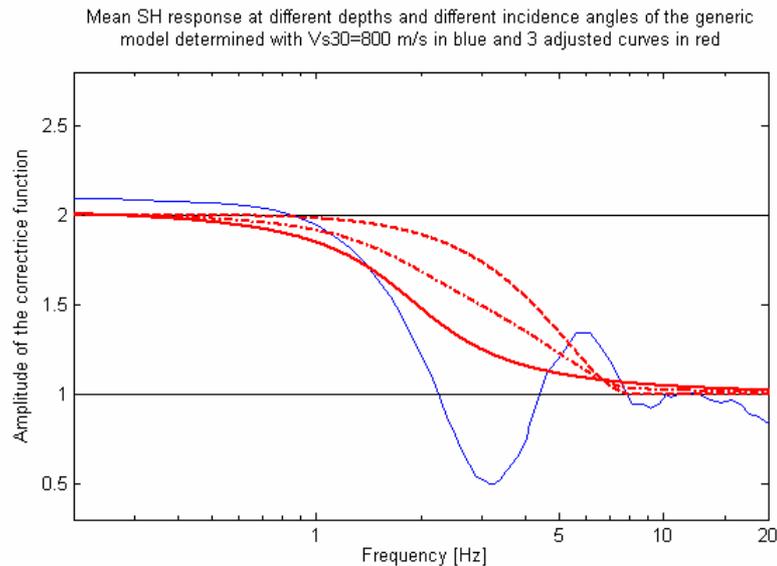


Figure 141: En bleu courbe moyenne de l'ensemble des réponses SH lissées et corrigées de l'impédance, à différentes profondeurs et différents angles d'incidence, recalées sur la fréquence référence définie à 100m de profondeur. En rouge: Construction analytique d'une courbe type, en trait plein la fonction cor2, en tirets la fonction cor1 et en pointillés-tirets la fonction correctrice SL, moyenne entre cor1 et cor2

12.4. Test de la correction analytique de la surface libre sur les données réelles

La fonction correctrice de la surface libre, SL, définie au paragraphe précédent, est testée sur les huit sites-test observés au paragraphe 12.2. Sur la Figure 142 les courbes bleues du SSRsurf, avec une station de référence en surface, et les courbes, noires en trait pointillés, du SSRbh corrigé avec la fonction SL fournissent une réponse qui se rapproche plus du SSRsurf. Les deux rapports, SSRsurf et SSRbh corrigé, sont très proches, autant en terme de bande de fréquence amplifiée qu'en terme de niveau d'amplification. Cette remarque n'est pas valable pour les couples SRCH10-SRCH09, TKYH13-KNGH18 et TKYH13-TKYH12.

Pour ces trois couples, les hypothèses qui pourraient expliquer que la correction de la surface libre n'est pas satisfaisante, sont les suivantes :

- L'effet de surface libre va jusqu'à grande profondeur. La plus grande longueur d'onde λ_{\max} observable est de l'ordre de $V_s/4f_{\text{dest}}$, avec V_s la vitesse moyenne sur l'épaisseur du forage et f_{dest} la fréquence destructrice en fond de forage qui est aussi la fréquence de résonance correspondant à la colonne de sol forcée et non pas au site dans son ensemble. En observant cette longueur d'onde et la profondeur du forage, on se rend compte que pour deux des couples pour lesquels la correction de la surface libre ne semble pas utile, λ_{\max} est proche de la profondeur du forage, voir Tableau 12 pour les sites SRCH09 et KNGH18. Cependant cela ne s'applique pas au couple TKYH13-TKYH12 et le couple OITH05-OITH04 a λ_{\max} plus grand que la profondeur du forage sans pour autant ne pas être adapté à la correction de la surface libre proposée. Cette explication n'est donc pas satisfaisante pour tous les sites testés ici, mais pourrait être à observer sur un plus grand nombre de sites-test.
- La référence en surface est un rocher très dur qui ne présente aucun effet de site, tandis que la référence en profondeur montre une réponse non négligeable. Pour caractériser cela les rapports H/V des sites au rocher sont observés sur la Figure 143 :

- Pour SRCH10-SRCH09, le rocher en surface SRCH10 et le rocher en profondeur SRCH09 montrent des H/V différents mais qui n'expliquent pas la différence d'amplitude entre SSRsurf et SSRbh corrigés.
- Idem pour les deux autres couples

Cette explication n'est donc pas satisfaisante pour ces sites.

Pour conclure, les calculs des SSR corrigés et bruts, de ces huit couples-test, montrent que la correction de la surface libre par la courbe analytique est bonne pour cinq d'entre eux (n°1, 3, 4, 7 et 8 du Tableau 12), moyenne pour les couples 5 et 6 et mauvaise pour le couple 2.

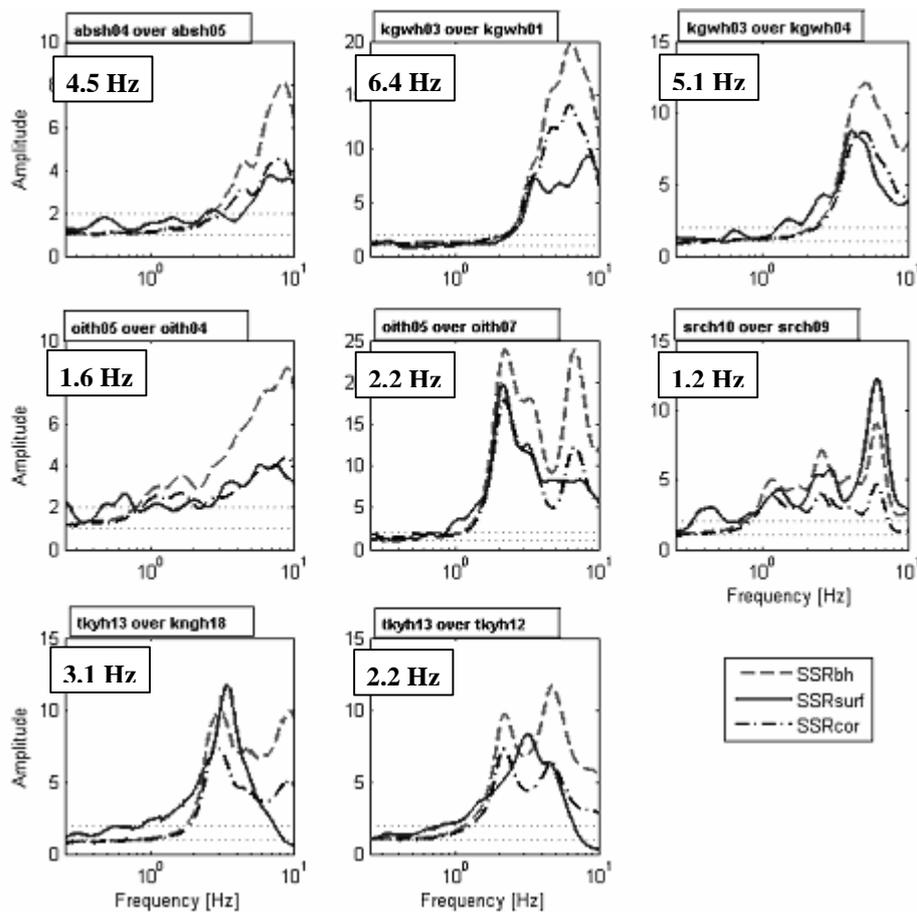


Figure 142: Comparaison des rapports : SSRbh brut en trait haché rouge, SSRbh corrigé de l'effet de surface libre en point-trait noir et SSRsurf en trait plein bleu. La fréquence de résonance du site où le rocher en profondeur est considérée, est en annotation sur les graphiques

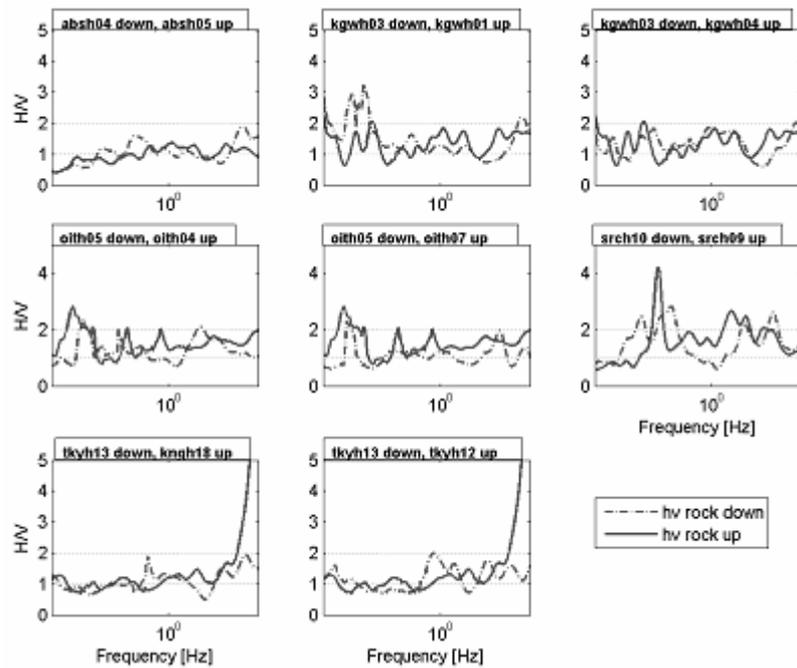


Figure 143: Caractérisation des rochers par le rapport H/Vseism pour les sites en surface (trait plein vert) et en profondeur (pointillés rouges)

12.5. Conclusion

Il n'est pas évident de définir de manière stricte une courbe corrigée de l'effet de surface libre que ce soit avec les données réelles ou avec les modélisations.

En effet avec les données réelles il est difficile de séparer les effets de surface libre des éventuels effets de site. La principale conclusion est que les rapports de spectres en forage montrent souvent des amplitudes plus élevées à partir d'une certaine fréquence. La détermination de cette fréquence devrait se préciser sur de plus nombreux cas d'études. Dans ce paragraphe ces exemples réels servent avant tout d'illustration et une étude plus poussée devrait être réalisée, notamment en ce qui concerne la piste de l'utilisation du H/V pour déterminer une fréquence minimale à partir de laquelle l'effet de surface libre n'est plus visible.

Avec les modélisations la courbe moyenne finale n'est pas utilisable telle quelle. La définition d'une fonction correctrice de la surface libre, avec la fréquence destructrice comme paramètre, approche la courbe moyenne sans les biais dus aux oscillations. Cette correction a été testée sur huit sites-test et donne des SSR corrigés qui sont en majorité très proche des SSRsurf.

Plusieurs alternatives sont alors possibles :

1. Être conservatifs en utilisant ces rapports normalisés tels quels et en prenant en compte en spectre au rocher en surface.
2. Définir un spectre au rocher en profondeur et utiliser les rapports normalisés.
3. Corriger des effets de surface libre pour chaque site avec la fonction définie sur la Figure 141.
4. Caler les rapports de spectres normalisés du groupe C des EC8 au spectre défini par la réglementation pour ce groupe qui le mieux contraint dans la réglementation.

Dans la suite de l'étude les deux types de rapports de spectres normalisés corrigés et non corrigés seront considérés et comparés aux réglementations actuelles.

13. Moyenne et estimation de la fonction correctrice

Grâce à la normalisation vers une référence commune, nous disposons de rapports surface sur profondeur homogènes des spectres de Fourier et des spectres de réponse sur 494 sites. Ces rapports étant comparables, puisqu'ils sont ramenés à une même référence, étape décrite au paragraphe 11, ils vont être utilisés pour effectuer des moyennes selon des classes définies par la vitesse moyenne V_{SZ} avec z égal à 5, 10, 20 et 30 mètres et la fréquence de résonance f_0 . Ces paramètres physiques ont été définis pour chaque site suivant les démarches décrites au paragraphe 8.2. Dorénavant on parlera de rapports normalisés pour les rapports de spectres dont la référence est ramenée à un rocher caractérisé par $V_{S30}=800$ m/s ; et on parlera de rapports corrigés en ce qui concerne les rapports de spectre surface sur profondeur, corrigés de l'effet de surface libre. Le rapport corrigé équivaut à un rapport de deux spectres en surface.

Cette première étape de moyenne par classes nous permettra d'observer l'évolution des rapports de spectres selon V_{SZ} et f_0 et d'évaluer l'amélioration d'un classement utilisant les deux paramètres et non pas seulement la vitesse V_{S30} comme dans la plus part des réglementations.

Tout d'abord les groupes seront décrits, puis les moyennes des rapports de spectres par groupes seront observées. Dans un premier temps les rapports de spectres normalisés seront considérés puis les rapports de spectres normalisés et corrigés de l'effet de surface libre seront ensuite pris en compte.

Les différentes étapes consistent à :

1. Comparer les moyennes sur les rapports des spectres de Fourier et des spectres de réponse pour confirmer les observations faites au paragraphe 9 ;
2. Choisir une des deux normalisations décrites dans le paragraphe 11, en comparant les deux types de moyennes selon la normalisation utilisée ;
3. Comparer les moyennes des rapports normés et des rapports non normés ;
4. Déterminer quelle vitesse moyenne V_{SZ} parmi V_{S30} , V_{S20} , V_{S10} et V_{S05} réduit au mieux les écarts-type, et donne donc le classement le plus pertinent ;
5. Voir si la classification utilisant V_{SZ} et f_0 permet de réduire les écarts-type par classe par rapport à une classification selon V_{S30} seulement ;
6. Après ces choix effectués, les rapports de spectres normalisés corrigés et non corrigés seront comparés aux EC8 ;

Enfin, ces observations nous permettront d'aller vers la définition d'une fonction correctrice de l'effet de site, déterminée à partir des paramètres de vitesse moyenne et de fréquence de résonance.

13.1. Les classes selon V_{SZ} et f_0

Quatre vitesses moyennes ont été prises en compte pour faire des classes : les vitesses moyennes sur les 5, 10, 20 et 30 premiers mètres. Dans le paragraphe 8.2.2 des régressions linéaires ont été faites sur les logarithmes des différentes vitesses moyennes V_{S05} , V_{S10} et V_{S20} par rapport à V_{S30} . Ici des classes sont définies en s'aidant de ces régressions d'une part, mais aussi en prenant en compte la distribution du nombre de sites de la base Kik-net par classe. En

effet en conservant directement les valeurs obtenues par la régression certaines classes n'étaient représentées par aucun site. Le Tableau 13 nous présente les limites des différentes classes et le

Tableau 14 nous donne le nombre de sites par classe sur un total de 494 sites sélectionnés suivant les critères évoqués dans le paragraphe 8, page 155.

Tableau 13: Classes selon différentes vitesses moyennes sur les 5, 10, 20 mètres et classes EC8 selon V_{s30}

Classes EC8	V_{s30} [m/s]	V_{s05} [m/s]	V_{s10} [m/s]	V_{s20} [m/s]
D (<180 m/s)	180	120	140	160
C (180 à 360 m/s)	360	200	250	300
B(360 à 800 m/s) et A (>800 m/s)	800	500	560	685

Tableau 14: Distribution du nombre de sites selon les classes définies par V_{s05} , V_{s10} , V_{s20} et V_{s30}

classe	V_{s30}	V_{s05}	V_{s10}	V_{s20}
Classe I: limites [m/s]	[<180]	[<120]	[<140]	[<160]
Nombre de sites	9	39	8	11
Classe II limites [m/s]	[180 à 360]	[120 à 200]	[140 à 250]	[160 à 300]
Nombre de sites	140	172	101	147
Classe III: limites [m/s]	[360 à 800]	[200 à 500]	[250 à 560]	[300 à 685]
Nombre de sites	281	254	341	292
Classe IV: limites [m/s]	[>800]	[>500]	[>560]	[>685]
Nombre de sites	43	24	44	40

Le découpage des classes selon la valeur de la fréquence de résonance a été fait d'une part de manière à ce que chaque classe soit représentée par au moins 15 sites et d'autre part de manière à balayer, de façon la plus homogène possible, la bande de fréquence où se trouvent usuellement les fréquences de résonance de sites réels. Le découpage n'est donc pas linéaire. En effet si nous raisonnons en terme de profondeur classant les sites par très profond (>200m), profond (100 – 200 m), peu profond (50-100m) et très peu profond (<50m). Dans un cas simple tabulaire la profondeur et la fréquence de résonance fondamentale sont liées par : $h = V_{sh} / 4f_0$. Un découpage de l'espace des fréquences fondamentales avec un pas constant n'est pas représentatif des caractéristiques du site. Un découpage logarithmique serait mieux adapté. Cependant comme on prend en compte le nombre de sites par classe, les limites ont été choisies avec un découpage logarithmique tant que possible mais les dernières classes ont été ajustées pour garder au moins 15 sites par classe. D'où les classes et le nombre de sites associés décrits dans le Tableau 15.

Tableau 15: Classes selon la fréquence de résonance

Classes	$f_0 < 1\text{Hz}$	$1 < f_0 < 2\text{ Hz}$	$2 < f_0 < 4\text{ Hz}$	$4 < f_0 < 8\text{ Hz}$	$8 < f_0 < 12\text{ Hz}$	$f_0 > 12\text{ Hz}$
Nombre de sites	87	98	142	110	39	18

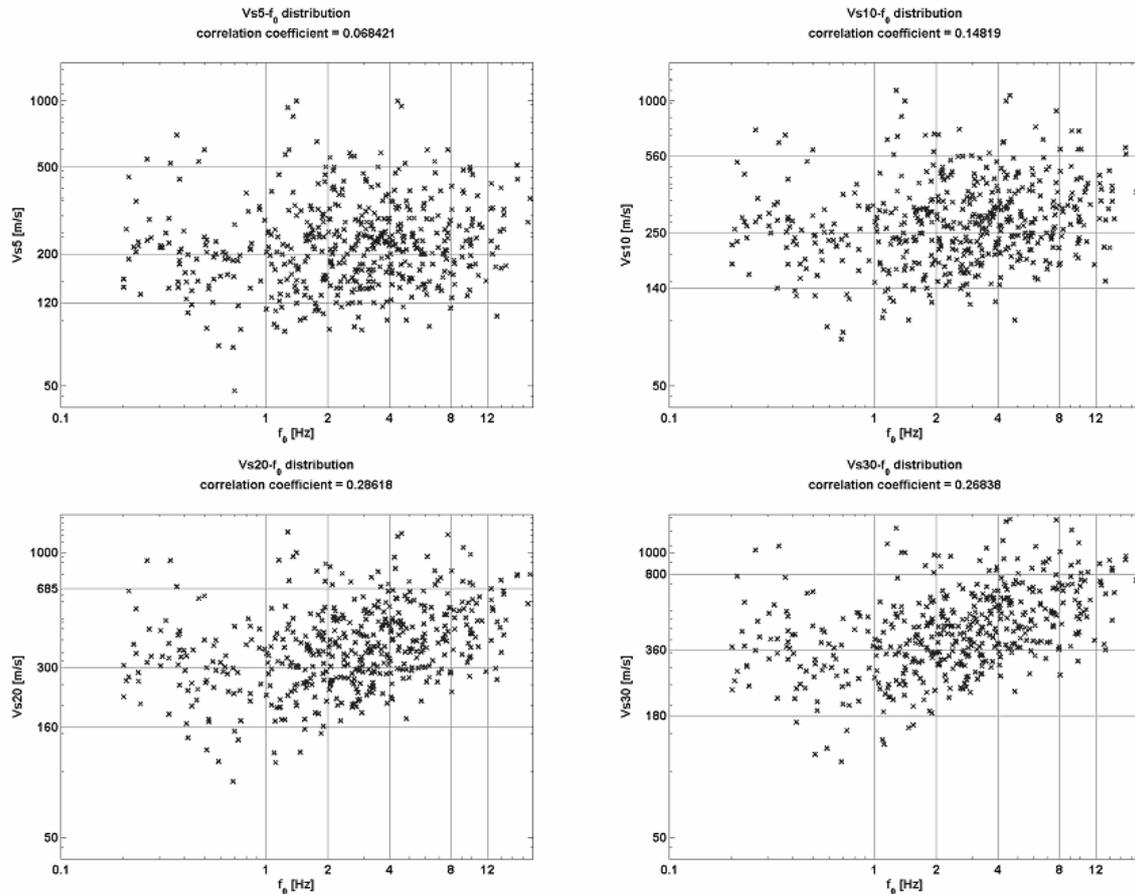


Figure 144: Distribution des couples (V_{sz} , f_0) sur les sites sélectionnés dans la base de données Kik-net

Les distributions (V_{sz} , f_0) semblent très peu corrélées d'après la Figure 144, les coefficients de corrélation : $\frac{\sum (V_{si} - \bar{V}_s)(f_{oi} - \bar{f}_0)}{\left(\sqrt{\sum (V_{si} - \bar{V}_s)^2} \sqrt{\sum (f_{oi} - \bar{f}_0)^2}\right)}$ sont faibles, d'autant plus pour Vs05 qui serait donc le paramètre le plus décorrélé de f_0 , donc celui qui apporterait le plus d'information complémentaire. Cette première observation est positive pour envisager une amélioration dans un classement utilisant ces deux paramètres. En effet dans le cas où deux paramètres sont liés, la classification selon l'un ou les deux paramètres n'apporte pas de nouvelles informations.

Les classes étant définies, les moyennes par classe peuvent être effectuées.

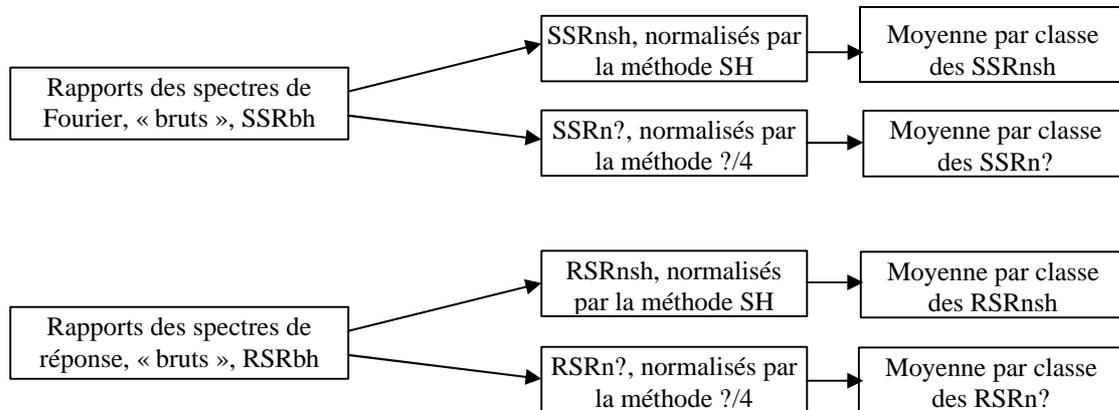
13.2. Les moyennes des rapports de spectres par classes

Pour chaque classe définie au paragraphe précédent, une moyenne des valeurs logarithmiques des rapports de spectres, Fourier et réponse, normalisés vers une référence commune définie par $V_{s30}=800\text{m/s}$, est effectuée. Comme nous avons vu que le nombre d'événements disponibles pour un site peut influencer le rapport moyen des spectres (paragraphe 9), chaque rapport de spectre aura un poids dans les moyennes par classe. Le poids est égal à 1 pour les sites ayant moins de 5 événements et à deux pour les sites ayant strictement plus de 5 événements.

Quatre types de moyenne (Figure 145) sont obtenus : les moyennes sur les rapports normalisés de spectres de Fourier et de réponse, et pour chacune de celles-ci la normalisation a été effectuée avec les deux méthodes, du quart de la longueur d'onde et de la réponse SH, définies au paragraphe 11. Dans un premier temps on observera ces moyennes pour répondre aux

premières étapes présentées dans l'introduction de ce paragraphe 13, puis on introduira la correction de l'effet de surface libre à la dernière étape lors de la comparaison avec les spectres des EC8.

Figure 145 : Schéma des différents types de moyenne sur les rapports de spectres observée



Seules les moyennes selon Vs10 et Vs30 sont présentées ici car elles fournissent une bonne représentation des autres moyennes effectuées et correspondent, pour Vs10, à la vitesse moyenne obtenue avec les méthodes utilisant le bruit de fond (chapitre I), et pour Vs30, à la vitesse moyenne classiquement utilisées dans les réglementations.

13.2.1. Comparaison des moyennes selon les deux types de rapport : Fourier et réponse

Les rapports moyens RSRbh sont supérieurs aux rapports moyens SSRbh pour les très hautes (supérieures à 10 Hz) et très basses fréquences (inférieures à la fréquence fondamentale minimale de la classe considérée) ce qui rejoint les observations effectuées site par site dans le paragraphe 9. Dans ces zones de fréquence les moyennes sur les SSRbh moyens dépassent les écarts-type des moyennes sur les RSRbh. Par contre, dans la bande de fréquence centrale, lorsqu'il y a une différence d'amplitude entre les deux types de moyennes selon les spectres utilisés, cette différence ne dépasse pas les écarts-type. Pour conclure, on garde donc les rapports moyens RSRbh car ils sont plus sécuritaires d'une part, et qu'ils sont plus adaptés aux études d'ingénierie d'autre part.

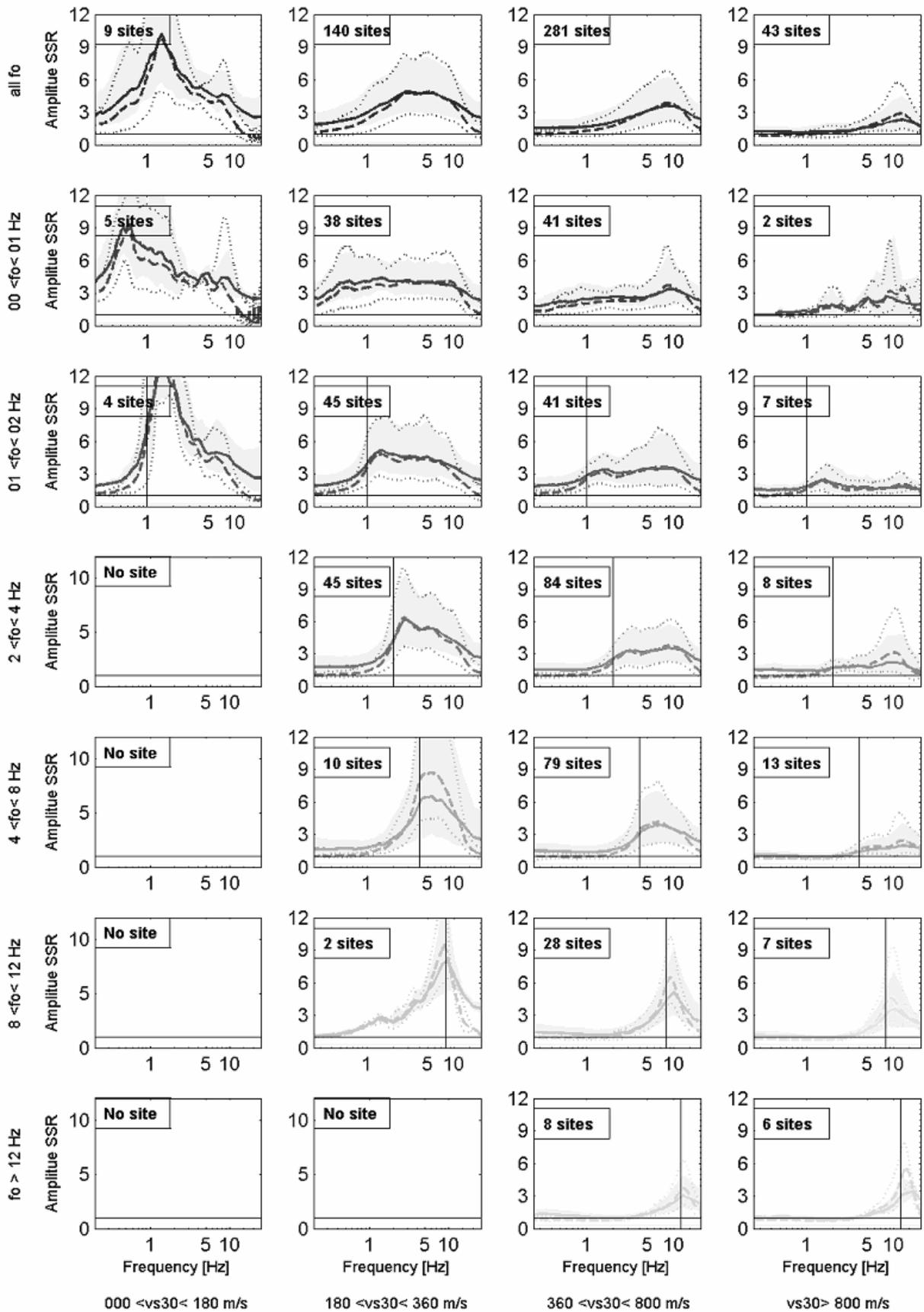


Figure 146: Comparaison des moyennes avec les deux types de rapports de spectres : de Fourier (SSR) en traits hachurés et pointillés pour les écarts-type, et de réponse (RSR) en trait plein et zone de gris pour les écarts-type ; normalisés avec la méthode du quart de la longueur d'onde ; pour les 24 classes déterminées par vs_{30} et f_0 sur 473 sites. Le trait vertical noir représente la fréquence minimale de la classe considérée.

13.2.2. Comparaison des moyennes selon les deux types de normalisation

Les Figure 147 et Figure 148 nous permettent de confronter les moyennes par classe selon le type de normalisation. Nous retrouvons les mêmes remarques que dans le paragraphe 11 de normalisation : il y a quelques variations à haute et basse fréquence. Notamment la normalisation SH donne des courbes plus élevées à basse fréquence car elle prend en compte les interférences constructives, et à hautes fréquences la réponse SH est la seule à prendre en compte l'atténuation. Cependant ces différences restent faibles par rapport à la variabilité des deux courbes (deux normalisations) mise en évidence par les écart-types (traits pointillés sur la Figure 147), même si la méthode quart de la longueur d'onde ne prend pas en compte tous les effets (interférences destructrices, constructrices, atténuation).

La méthode la plus simple est celle du quart de la longueur d'onde et elle fournit des résultats équivalents. De plus la méthode SH n'est plus physique qu'en apparence, en effet le champ d'onde réel est beaucoup plus compliqué qu'une onde SH plane verticale. La représentativité des fonctions de réponse SH est donc, elle aussi, limitée. Enfin la méthode $\lambda/4$ fournit des résultats très lissés, ce qui est bien pour appliquer des corrections (par exemple correction de l'effet de surface libre). Nous allons donc garder cette normalisation dans la suite de nos études.

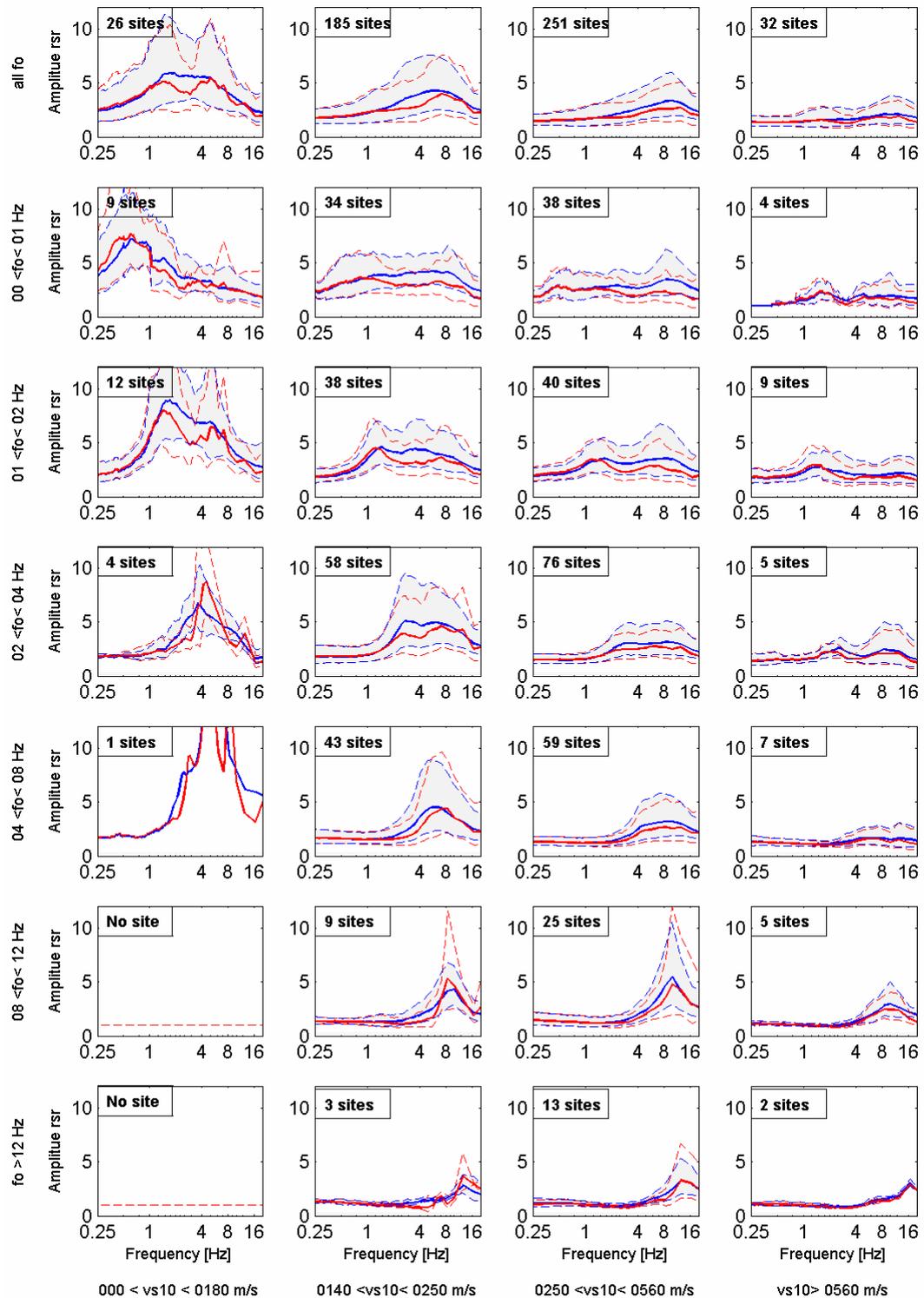


Figure 147: Comparaison des deux types de normalisation sur le rapport des spectres de réponse, en rouge avec la méthode la réponse SH, et en bleu la méthode du quart de la longueur d'onde ; pour les 24 classes déterminées par v_{s10} et f_0 , sur 494 sites

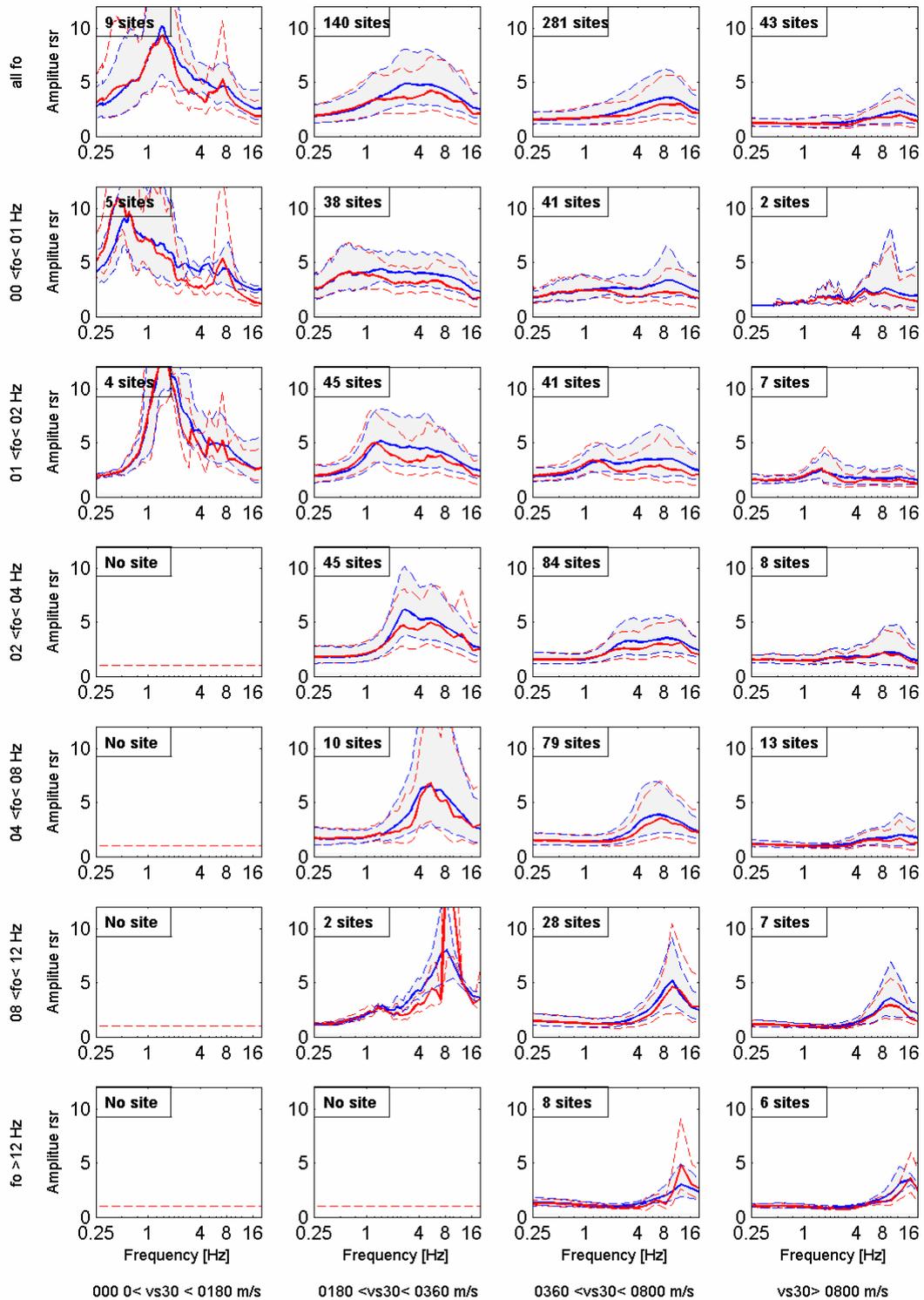


Figure 148: Comparaison des deux types de normalisation sur le rapport des spectres de réponse, en rouge avec la méthode la réponse SH, et en bleu la méthode du quart de la longueur d'onde ; pour les 24 classes déterminées par v_{s30} et f_0 sur 473 sites

13.2.3. Comparaison des rapports non normalisés et normalisés

Les observations sont dorénavant effectuées sur les rapports des spectres de réponse normalisés avec la méthode du quart de la longueur d'onde.

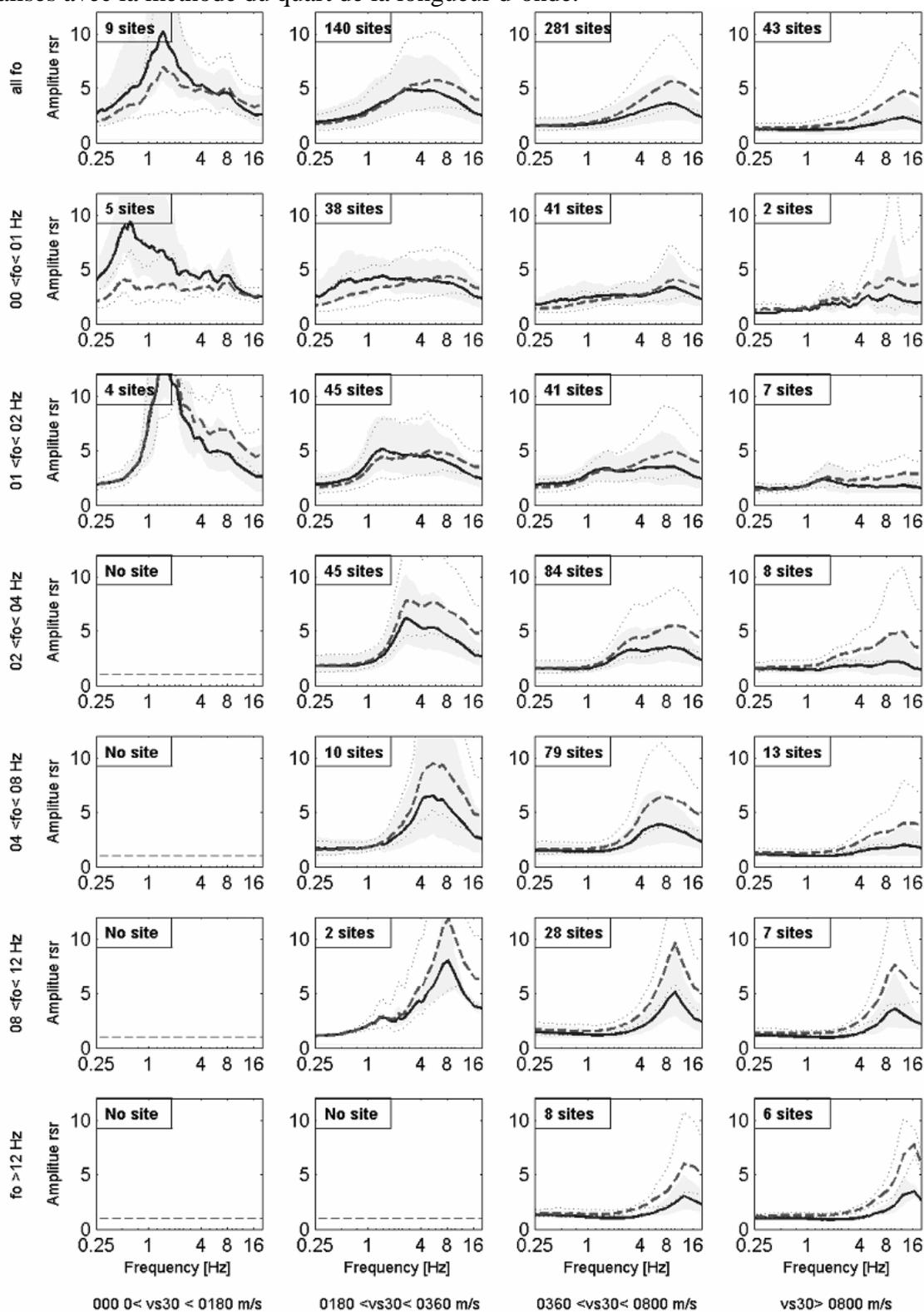


Figure 149: Comparaison des rapports de spectres de réponse bruts en trait hachuré, et normalisés avec la méthode du quart de la longueur d'onde, en trait plein; pour les 24 classes déterminées par vs_{30} et f_0 sur 473 sites

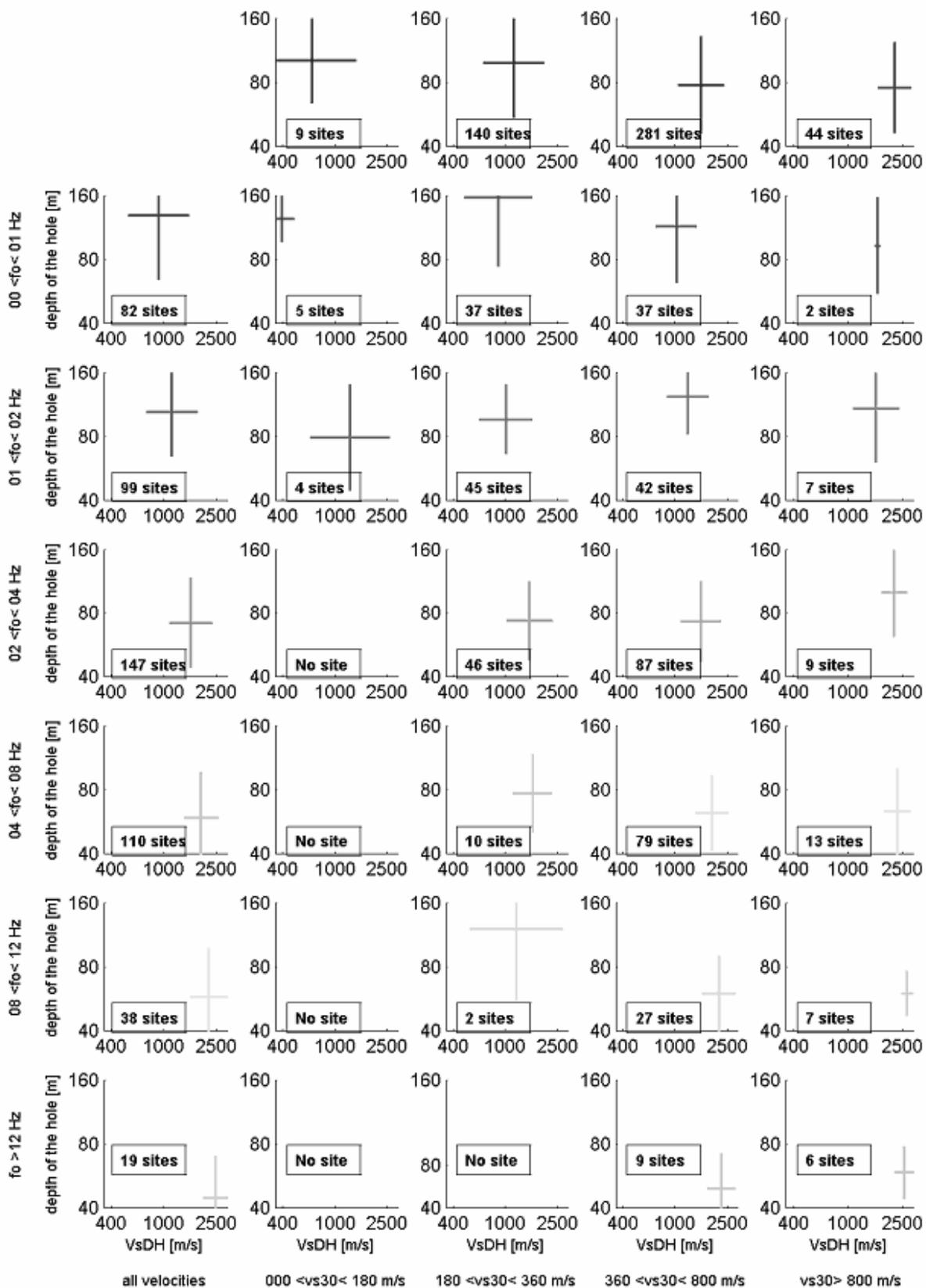


Figure 150: Valeur de la profondeur moyenne et de la vitesse de fond de forage moyenne par groupe selon Vs30, représentées avec leurs barres d'erreur type

De manière générale, la normalisation réduit le niveau d'amplification pour toutes les classes sauf pour les classes ayant une fréquence de résonance inférieure à 1 Hz et des vitesses Vs30 inférieures à 800 m/s. Pour ces classes les basses fréquences sont amplifiées par rapport au rapport brut. Après avoir fait la moyenne par classe de différents paramètres de site, dont la profondeur du forage et la vitesse VsDH¹ en fond de forage, on remarque sur la Figure 150 que ces classes ont une profondeur moyenne relativement plus élevée que les autres classes, ainsi que VsDH relativement plus faible. On peut alors expliquer l'amplification des rapports bruts pour ces classes. En effet, à une profondeur fixée, plus VsDH est faible plus le profil générique utilisé pour compléter le profil réel a de chance de correspondre à un Vs30 inférieur à 800m/s. De même, à VsDH fixée, plus la profondeur est grande plus le profil générique utilisé pour compléter le profil réel a de chance de correspondre à un Vs30 inférieur à 800m/s (voir le facteur de normalisation FN(800) pour quelques exemples sur la **Figure 133**). La normalisation tend à ramener la référence à un rocher avec Vs30 égal à 800m/s, donc à augmenter le rapport brut.

Notons cependant que la normalisation n'améliore pas forcément l'écart type de chaque classe, comme on peut le voir l'annexe **15.4.5**.

13.2.4. Comparaison des déviations standard selon les classes

Comparaison de la classification selon Vs30 et Vs10 (Figure 151 : déviations standard selon chaque classification et Figure 152 : rapport des déviations standard de la classification selon Vs10 sur la classification selon Vs30): Les erreurs sont très proches avec les deux types de classification selon Vs10 et Vs30. Il n'y a pas d'amélioration très nette de Vs10 à Vs30 alors que Vs30 devrait être légèrement plus sélectif puisque les informations concernent 30 mètres de sol au lieu de 10, si on regarde uniquement la ligne du haut qui ne prend pas en compte le paramètre f_0 . Le type de classification selon la vitesse sur z mètres sera effectué pour les 4 vitesses moyennes Vs5, Vs10, Vs20 et Vs30 pour être utilisés selon la connaissance du milieu. Nous ne présenterons ici que Vs30 et Vs10 pour les raisons évoquées auparavant, Vs30 étant typique des réglementations et Vs10 plus adapté aux résultats actuels de l'analyse des mesures de bruit de fond.

Comparaison de la classification avec f_0 et sans f_0 : La déviation standard représentée sur la Figure 151 doit être multipliée à la valeur moyenne pour obtenir la valeur moyenne plus une fois l'écart type. On remarque que la déviation standard augmente considérablement pour les fréquences supérieures à la fréquence minimale de la classe considérée. On a donc peu d'amélioration sur la contrainte de la valeur de l'amplification par classe par rapport à une classification ne prenant en compte qu'un paramètre de vitesse. Cependant la classification sans prendre en compte f_0 (graphiques de la 1^{ère} ligne de la Figure 151) montre une déviation standard toujours supérieure à 1.2 sur toute la bande de fréquence alors que la classification avec l'information sur f_0 permet de réduire la bande de fréquence où la déviation standard est élevée. Ceci est plus clairement visible sur la Figure 153 où le rapport des déviations standard sans tri sur f_0 sur les déviations standard avec un tri sur f_0 est représenté pour chaque groupe. Il y a donc une amélioration à classer les sites selon les deux paramètres f_0 et Vs_z.

¹ VsDH : shear wave Velocity of the downhole, vitesse des ondes S en fond de forage

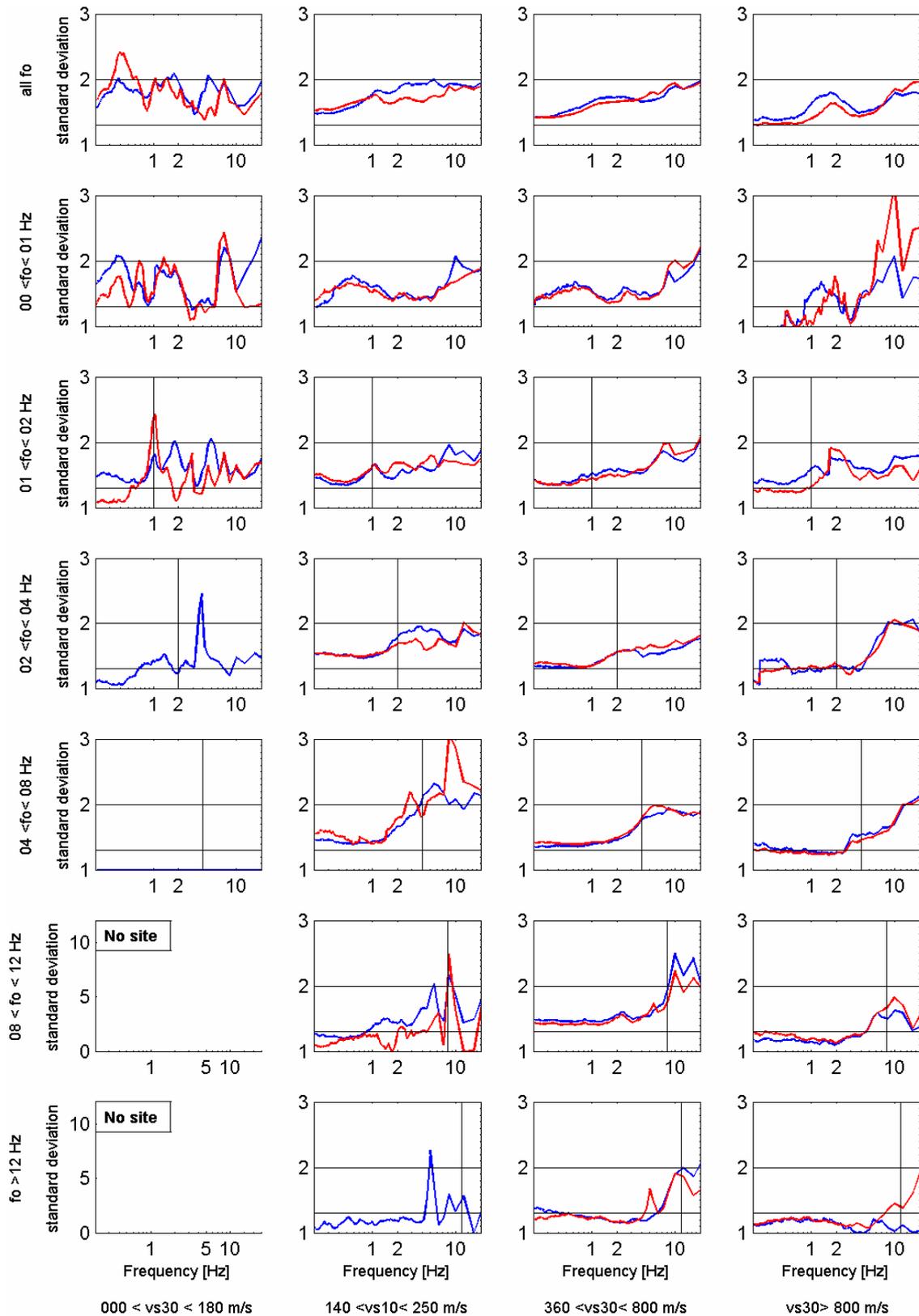


Figure 151: Comparaison des déviations standard sur les moyennes des rapports de spectres de réponse normalisés, avec une classification selon V_{s10} en bleu et V_{s30} en rouge. Le trait vertical noir représente la fréquence minimale de la classe considérée, les traits horizontaux noirs représentent la valeur 1.3 (soit environ 30% de variabilité) et la valeur 2

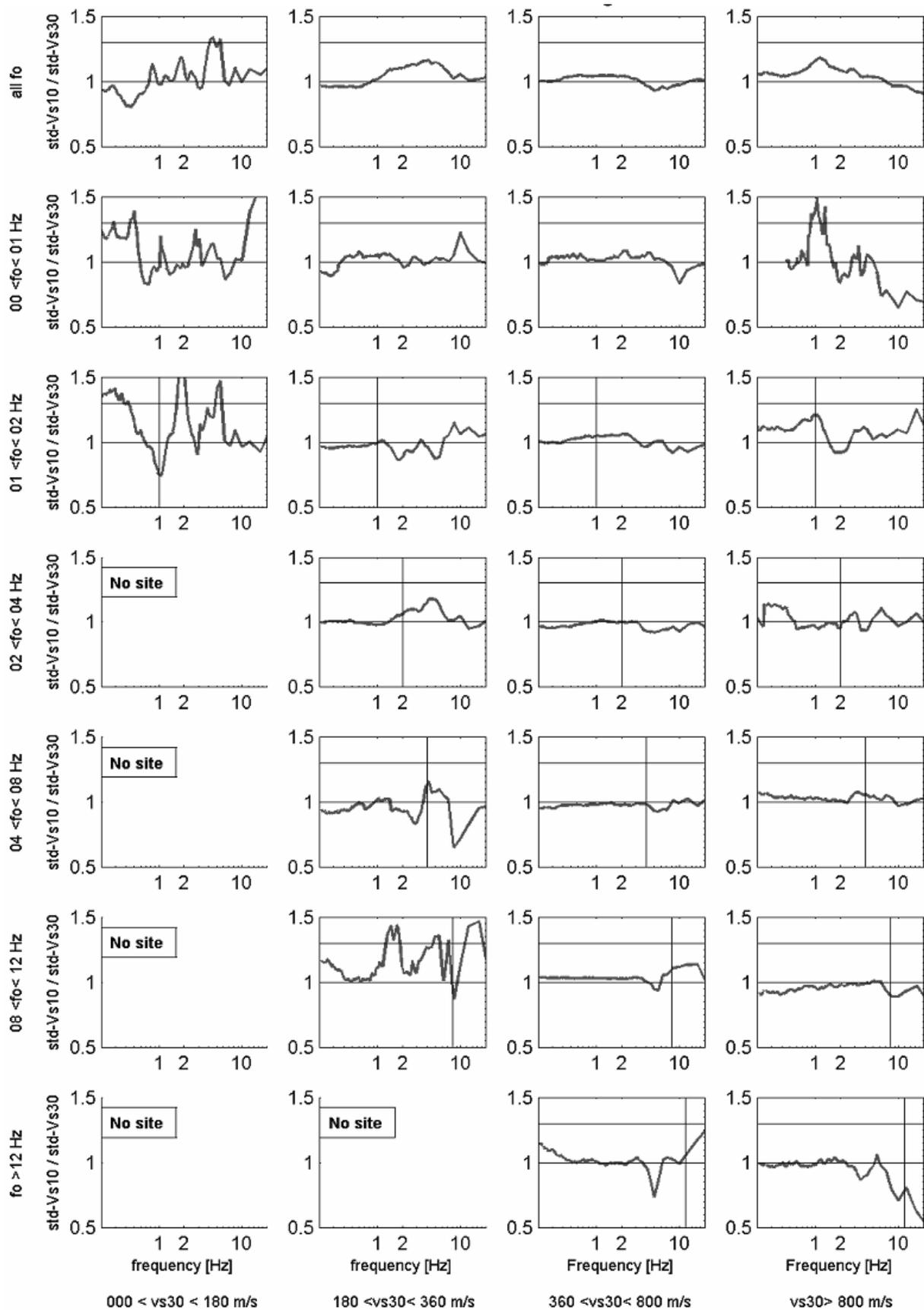


Figure 152: Comparaison des rapports des déviations standard (sur les moyennes des rapports de spectres de réponse normalisés) : déviation standard selon Vs10 sur déviation standard selon Vs30. Le trait vertical noir représente la fréquence minimale de la classe considérée, les traits horizontaux noirs représentent la valeur 1.3 (soit environ 30% de variabilité) et la valeur 1

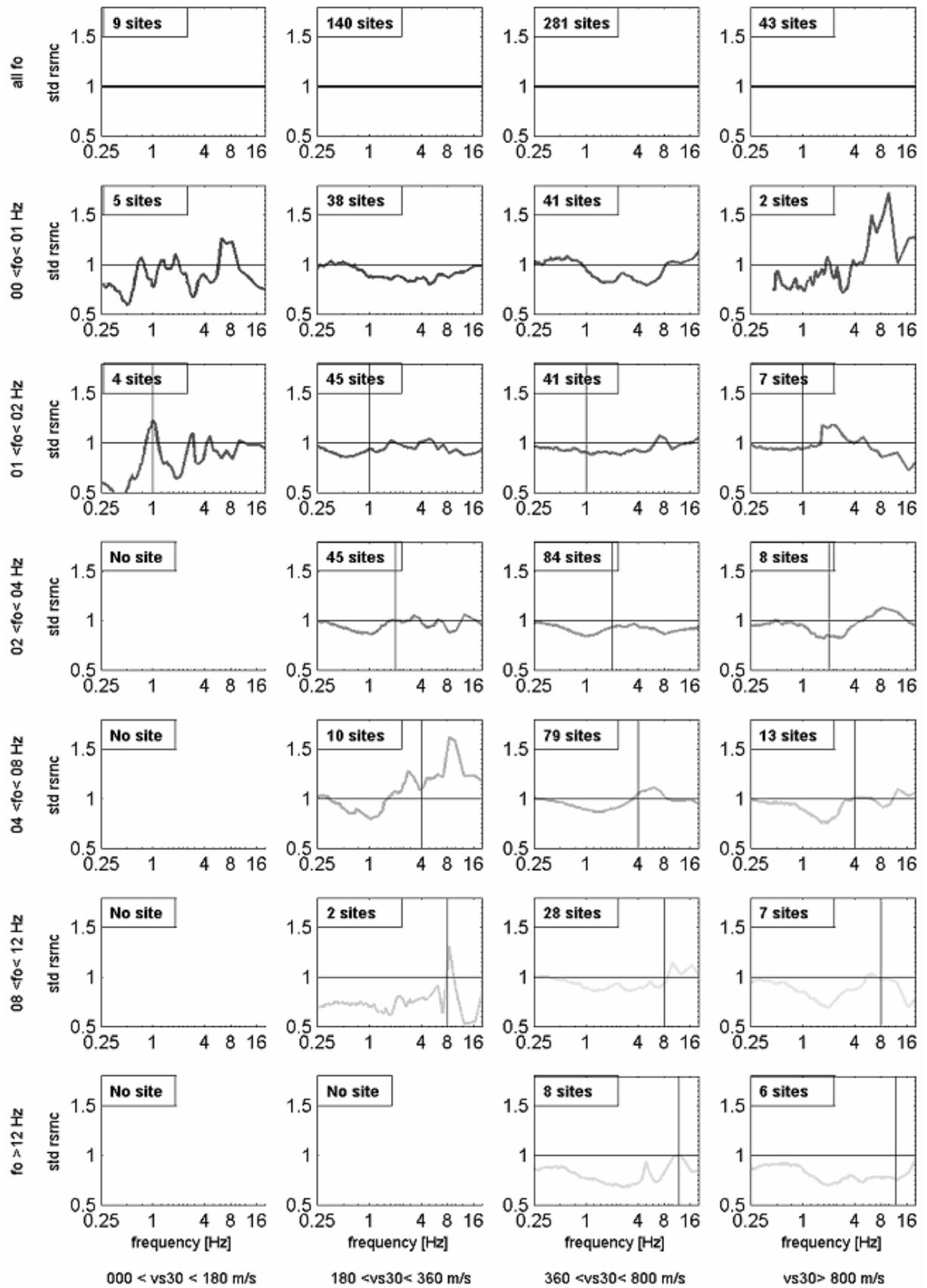


Figure 153: Rapport des écarts-type des RSRn21 (normalisés) d'une classe (V_{sz} , f_0) sur la classe correspondant à la même vitesse V_{sz} sans tri sur f_0 , en trait vertical la fréquence de résonance f_{min} délimitant la borne minimale de la classe considérée

13.2.5. Comparaison avec les spectres réglementaires de l'EuroCode 8 ou EC8

Sur la Figure 154, les graphiques de la première ligne représentent la classification selon V_{s30} uniquement. Les rapports de spectres multipliés par le spectre réglementaire au rocher des EC8 (traits épais en couleur, considérant un p_{ga} de 1 m/s^2 qui n'aura pas d'impact car on compare des rapports) peuvent être comparés aux spectres réglementaires définis par l'EC8, représentés en traits fins bleus. Les spectres réglementaires des EC8 présentent systématiquement un plateau inférieur à celui obtenu avec les données de Kik-net. Cette différence peut avoir deux origines:

- a. Une différence du niveau d'amplification défini avec les EC8 et estimé empiriquement avec la base de données Kik-net
- b. Une différence liée au fait que les références prises pour Kik-net sont toujours en profondeur alors que les EC8 sont toujours estimés en surface.

La différence entre ces deux rapports étant principalement liée à l'effet de surface libre, nous allons alors utiliser les rapports de spectres normalisés et corrigés pour trancher sur la problématique mise en valeur par cette comparaison.

De plus, le rapport R nous permet de visualiser l'effet de surface libre. Soit R la division entre le rapport des spectres normalisés multipliés par le spectre réglementaire au rocher, par le spectre réglementaire du groupe i concerné :

$$R = RSRN_i * EC8(A) / EC8(i) = S_{surf}(i) * EC8(A) / (S_{rock_down} * EC8(i))$$

En effet si le spectre en surface correspondant au groupe i est proche du spectre en surface défini par les EC8 pour ce même groupe (sans considération sur la fréquence de résonance) alors le rapport R peut se simplifier par : $R = EC8(A) / S_{rock_down}$, soit le rapport d'un spectre au rocher en surface sur un spectre en rocher en profondeur. Ces deux spectres ne diffèrent principalement que par l'effet de surface libre, on devrait trouver une courbe du type : égale à 1 en basse fréquence (les deux enregistrements ont une amplitude multipliée par 2) et à 2 en haute fréquence (l'effet de surface libre n'est plus visible pour le capteur en profondeur). En effet, les courbes de ce rapport R obtenues, représentées sur la Figure 155, mettent en valeur l'existence d'un effet du à l'enregistrement en profondeur qui pourrait s'assimiler à l'effet de surface libre étudié au paragraphe 12.

Les moyennes sur les rapports de spectres normalisés et corrigés de l'effet de surface libre (sur chaque site, comme expliqué au paragraphe 12), notés RSR_{nc} , sont alors calculés. La comparaison avec les spectres des EC8 est montrée sur la Figure 156. On voit alors que les niveaux d'amplification sont beaucoup plus proches avec la correction de l'effet de surface libre. Cette remarque nous permet d'une part de valider l'approche de la correction de l'effet de la surface libre, et d'autre part, de montrer la cohérence entre les RSR_{nc} et les spectres réglementaires des EC8.

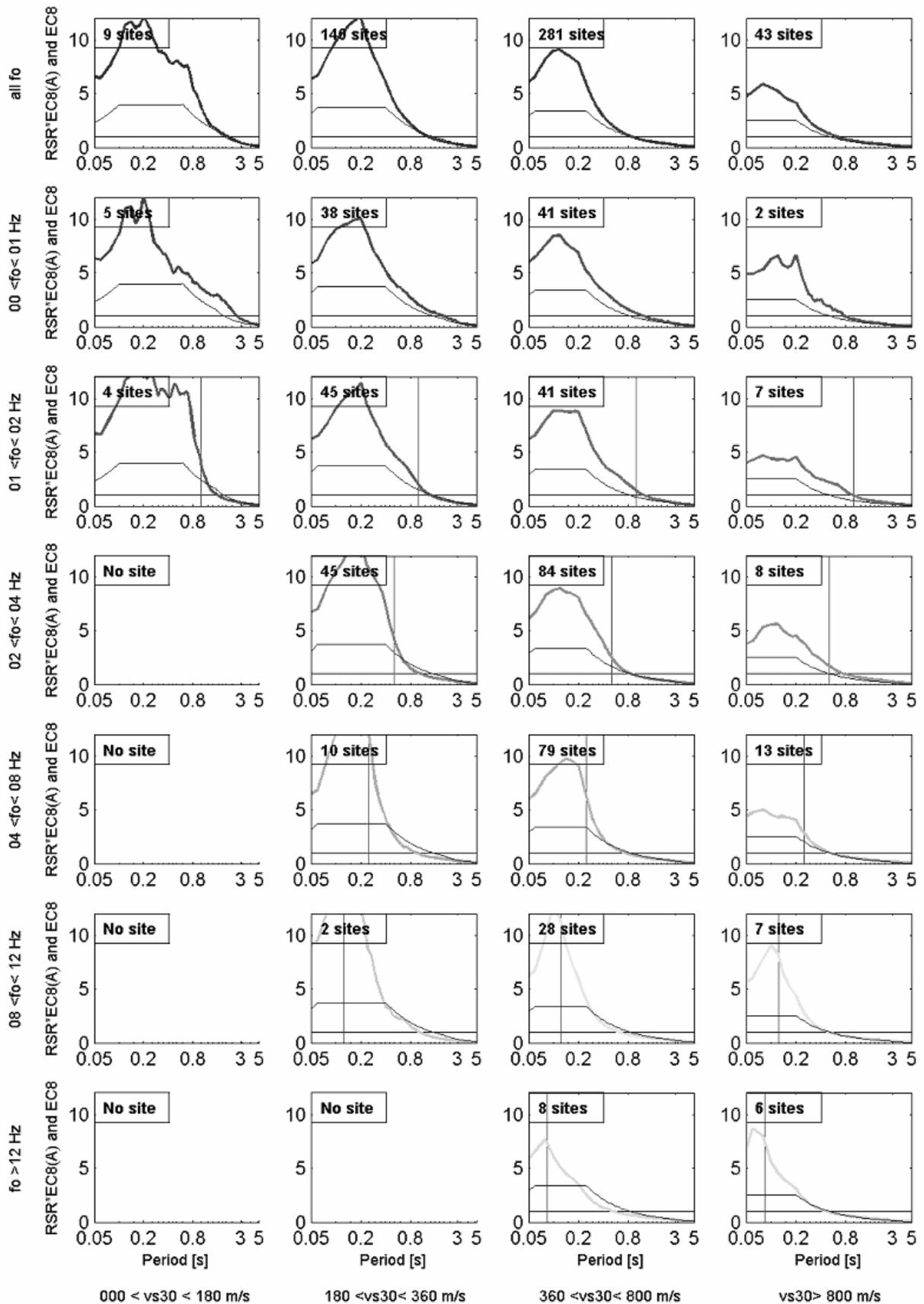


Figure 154: Comparaison des rapports de spectres de réponse, normalisés avec la méthode du quart de la longueur d'onde, multipliés par le spectre réglementaire au rocher (en trait épais de rouge à vert) avec les spectres réglementaires de l'EC8 en trait fin bleu ; pour les 24 classes déterminées par vs_{30} et f_0 sur 473 sites, en trait vertical rouge la fréquence de résonance f_{min} délimitant la borne minimale de la classe considérée.

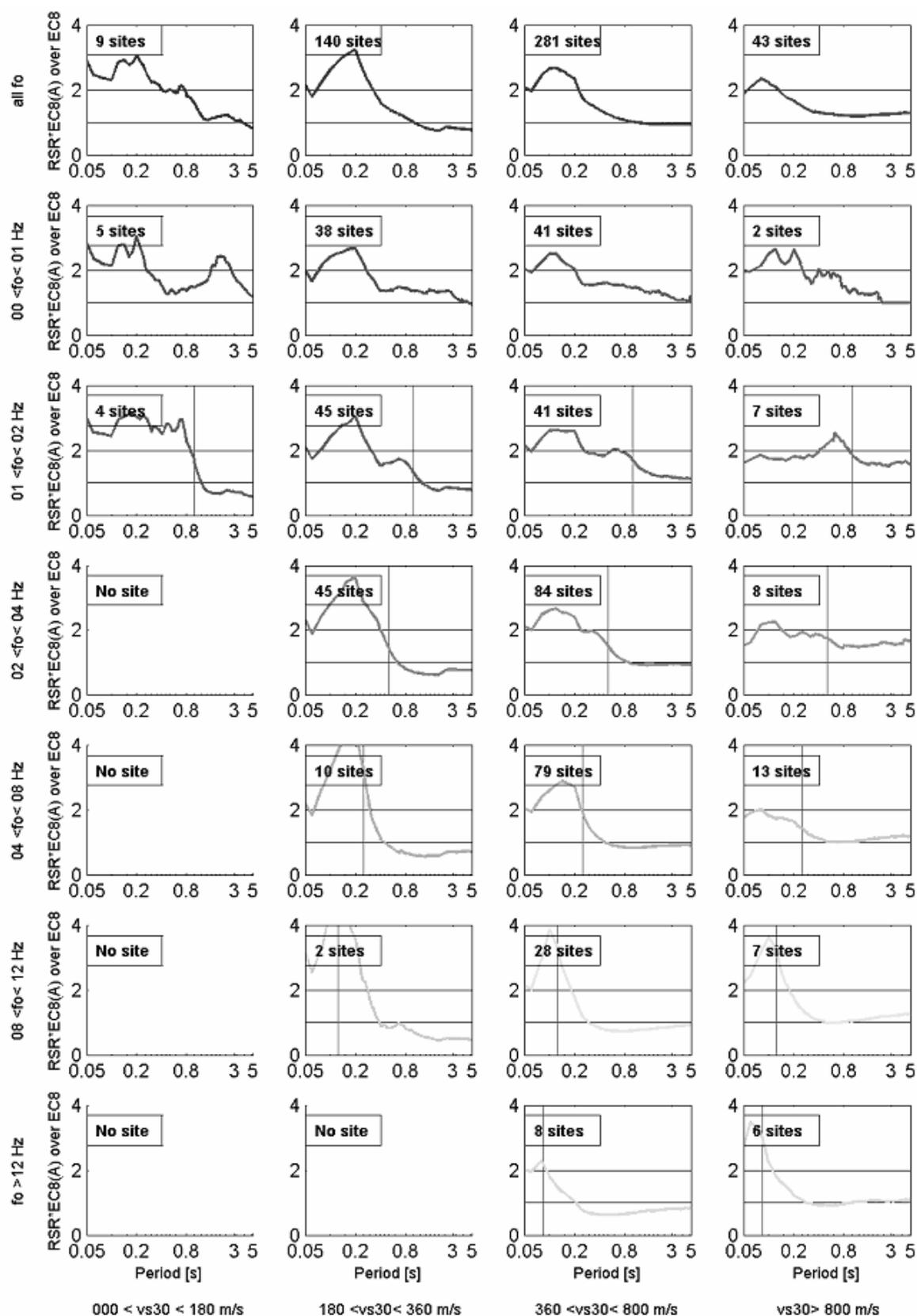


Figure 155: Représentation du rapport, noté R, des RSRbh normalisés ($\frac{R}{4}$) moyens multipliés par le spectre réglementaire au rocher, sur le spectre réglementaire correspondant au groupe considéré, c'est donc le rapport des deux courbes de la Figure 154 pour chaque classe, en trait vertical rouge la fréquence de résonance f_{min} délimitant la borne minimale de la classe considérée.

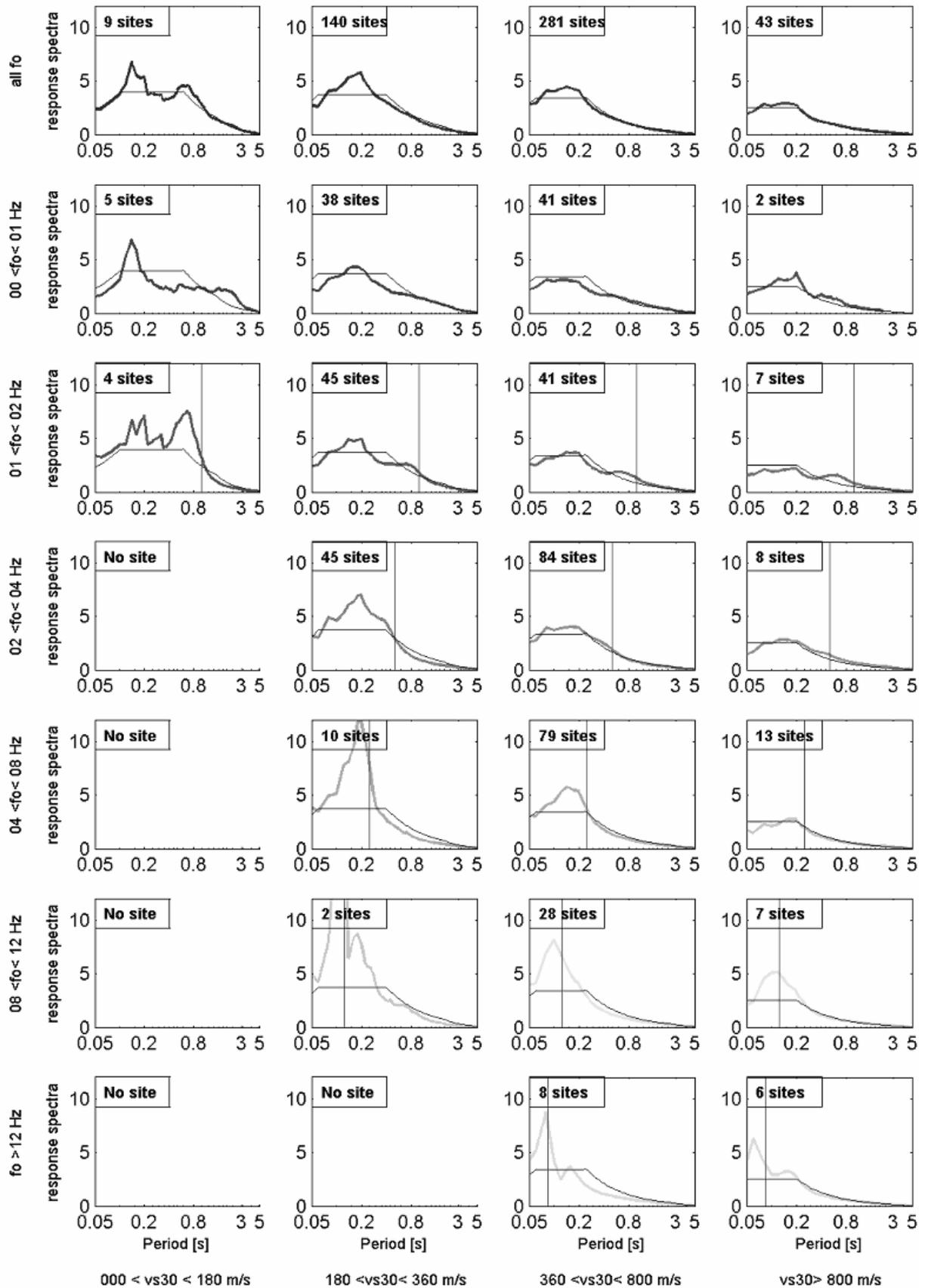


Figure 156: Comparaison des rapports de spectres, normalisés et corrigés de l'effet de surface libre, multipliés par le spectre réglementaire au rocher (en trait épais de rouge à vert) avec les spectres réglementaires de l'EC8 en trait fin bleu ; pour les 24 classes déterminées par vs_{30} et f_0 sur 473 sites, en trait vertical rouge la fréquence de résonance f_{min} délimitant la borne minimale de la classe considérée.

13.2.6. Conclusion

Pour chaque site, nous avons choisi de normaliser les rapports des spectres de réponse par la méthode du quart de la longueur d'onde et de corriger ces rapports par la fonction correctrice de l'effet de la surface libre. C'est sur ces rapports normalisés et corrigés que sont faites des moyennes par classe. De plus nous avons choisi de garder les rapports des spectres de réponse pour pouvoir effectuer une comparaison avec les réglementations (EC8).

Les classifications selon Vs05, vs10, Vs20 et Vs30 donnent des écarts-type équivalents. On préférera utiliser Vs10 qui est facilement obtenu par les analyses de bruit de fond, et Vs30 pour pouvoir faire des comparaisons avec les réglementations actuelles.

La classification sans prendre en compte f_0 montre une déviation standard toujours supérieure à 1.2 sur toute la bande de fréquence alors que la classification avec l'information sur f_0 permet de réduire la bande de fréquence où la déviation standard est élevée. Il y a donc une amélioration à classer les sites selon les deux paramètres f_0 et V_{sz} .

Les classes correspondant à la classification des EC8, c'est-à-dire sans tri sur les fréquence de résonance, donnent des niveaux d'amplification très proches de ceux estimés par les EC8, en particulier pour le groupe B (Vs30 entre 360 et 800 m/s) qui est parmi les plus contraints des groupes des EC8.

L'avantage de la classification selon les deux paramètres V_{sz} et f_0 est d'avoir une variation sur la bande de fréquence amplifiée avec un même V_{sz} , ce qui n'est pas pris en compte dans les réglementations actuelles.

La dernière étape consiste, par observation de l'évolution des courbes moyennes par classes, à résumer ces courbes par classe en une fonction correctrice de l'effet de site dépendant de V_{sz} et f_0 . C'est le sujet du paragraphe suivant.

13.3. Détermination de la fonction correctrice de l'effet de site entre un rocher de référence et un site caractérisé par V_{sz} et f_0

Les moyennes précédentes mettent en évidence une évolution des rapports de spectres suivant les paramètres V_{sz} et f_0 . Il existe des classes où le rapport moyen n'est pas défini par manque de données. Pour combler à ce manque et aller plus loin qu'une classification classique, une fonction analytique, en fonction de la fréquence, est définie suivant V_{sz} et f_0 . Elle est appelée fonction correctrice de l'effet de site : $FCES_{[param]}$, et décrite sous la forme : $1 + F(f/f_0) * A(param)$, avec param le paramètre utilisé (vitesse moyenne ou fréquence de résonance), A l'amplitude et F la bande de fréquence amplifiée.

De manière très simple la fonction $A(param)$ est définie en faisant un ajustement linéaire sur les valeurs de l'amplitude moyenne entre la fréquence de résonance minimale de la classe et 10Hz, par classe de vitesse. On a donc, pour chaque classe (V_{sz}, f_0), une amplitude moyenne, soit $4*7=28$ valeurs dans le cas où toutes les classes sont décrites (ce qui n'est pas atteint avec notre base de données). Pour avoir plus de données d'autres classes ont donc été définies. L'amplitude moyenne est attribuée à la valeur moyenne des vitesses du groupe de vitesse considéré. La Figure 157 nous montre les ajustements linéaires pour les différentes vitesses moyennes Vs05, Vs10, Vs20 et Vs30. Le Tableau 13 nous donne les valeurs des coefficients de l'ajustement linéaire représentant l'amplification selon les quatre vitesses moyennes Vs30, Vs20, Vs10 et Vs05.

De plus on a aussi conservé aussi calculer les valeurs d'amplitudes moyennes pour les classes de fréquences de résonance sans tri sur les Vs_z. Ceci pour le cas où il n'y aurait pas de vitesse connue sur le site étudié. Ces moyennes entre f₀ et 10 Hz, en fonction des classes en fréquence, sans tri sur les vitesses, est calculé et présenté sur la Figure 158.

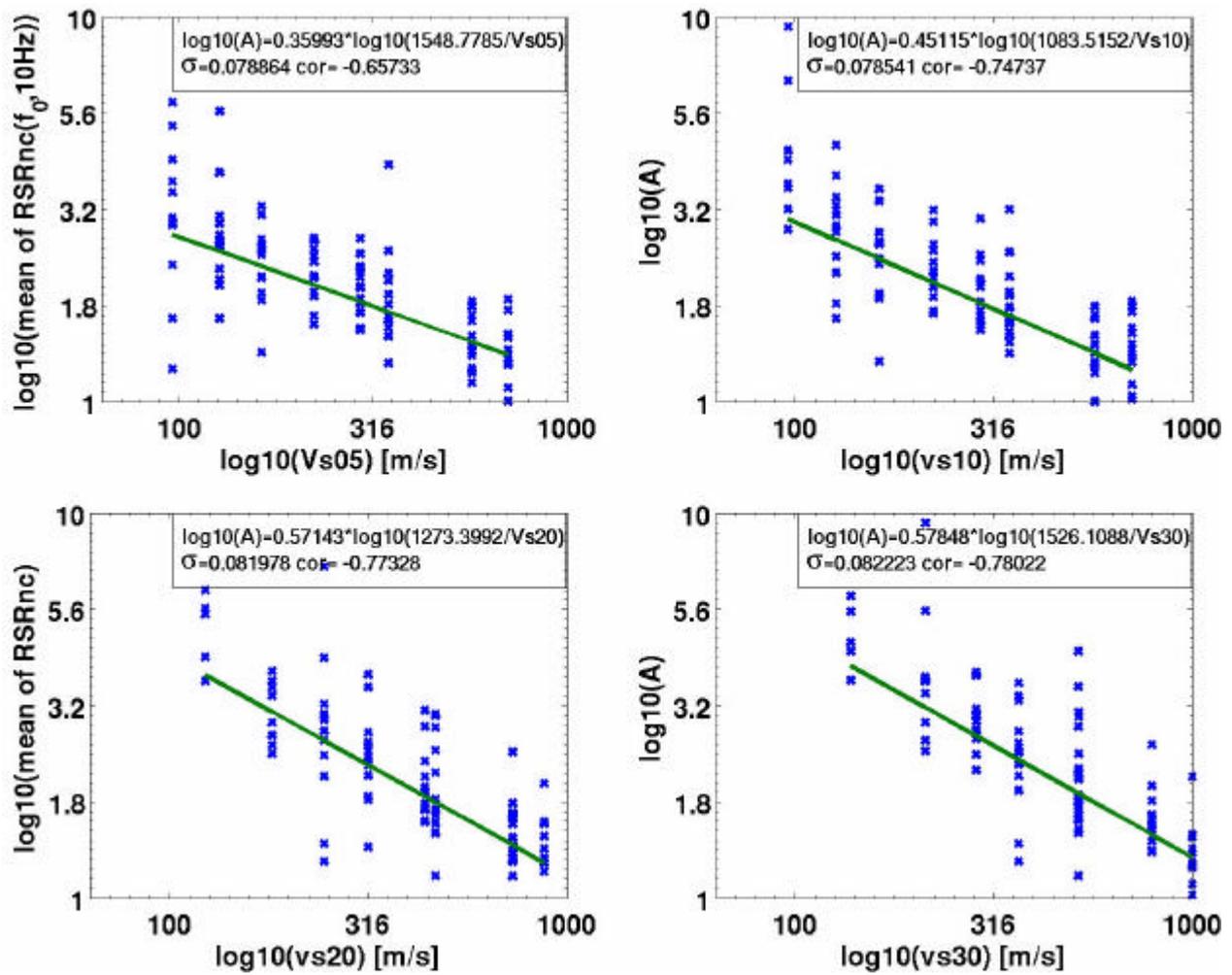


Figure 157: Ajustement linéaire sur les valeurs logarithmique de Vs_z et de l'amplitude moyenne entre f_{min} et 10 Hz, avec l'écart type et le coefficient de corrélation

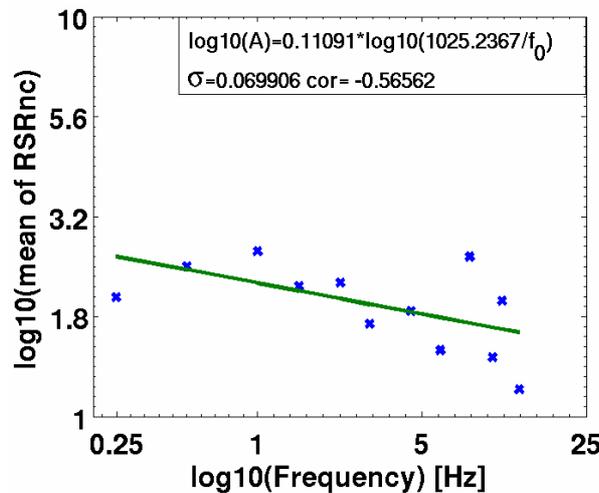


Figure 158: Ajustement linéaire sur les valeurs logarithmique (logarithme népérien) de f₀ et de l'amplitude moyenne entre f_{min} et 10 Hz, avec l'écart type et le coefficient de corrélation

Tableau 16: Niveau d'amplification A(param) de la fonction correctrice de l'effet de site suivant le paramètre, noté param, utilisé (vitesse moyenne ou fréquence de résonance). Amplification estimée avec un ajustement linéaire : $A(\text{param})=(\text{param}_{\text{ref}}/\text{param})^a$

Paramètre considéré, param	a	param _{ref}
Vs05	0.35993	1548.7785
Vs10	0.45115	1083.5152
Vs20	0.57143	1273.3992
Vs30	0.57848	1526.1088
f ₀	0.11091	1025.2367

Avec l'écart type : $s = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (\log(A_{\text{moy}}(i)) - \log(AL(i)))^2 \right)}$ et le coefficient de corrélation :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Vs_i) - \log(Vs_{\text{mean}})) (\log(A_{\text{moy}}(i)) - \log(A_{\text{mean}}))}{\sqrt{\sum (\log(Vs_i) - \log(Vs_{\text{mean}}))^2} \times \sqrt{\sum (\log(A_{\text{moy}}(i)) - \log(A_{\text{mean}}))^2}}$$

Avec :

- n : le nombre d'échantillon de mesures de l'amplitude selon une vitesse Vs_i qui correspond à la vitesse médiane de la classe i considérée. Il y a donc autant d'échantillons que de classes.
- A_{moy}(i) : le log de l'amplitude moyenne entre f_{min} et 10 Hz de la classe i telle que les sites de cette classe i aient une fréquence de résonance entre f_{min} et f_{max}.
- AL(i) : le log de l'amplitude estimée grâce à l'ajustement linéaire dont les coefficients sont déterminés dans le Tableau 16 selon un paramètre de vitesse ou de fréquence
- A_{mean} : la moyenne sur les n A_{moy}(i)
- Log : le logarithme de base 10

La forme simplifiée pour la fonction correctrice de l'effet de site FCES, dépendant de Vs_z et f₀, que nous retenons est constituée de :

- une fonction constante égale 1 de 0.2 Hz à 0.7* f₀, c'est-à-dire $F(f/f_0)=0$ pour $0 < f < 0.7 * f_0$
- une rampe linéaire entre 0.7* f₀ et f₀, c'est-à-dire : $F\left(\frac{f}{f_0}\right) = \left(\frac{A-1}{0.3}\right) * \frac{f}{f_0} + 1 + \frac{7}{3}(1-A)$
pour $0.7 * f_0 < f < f_0$
- un plateau d'amplitude A(param) défini dans le Tableau 16 jusqu'à 10 Hz, c'est-à-dire $F(f/f_0)=1$ pour $f_0 < f < 10 \text{ Hz}$

L'utilisation de cette fonction correctrice de l'effet de site constitue la dernière étape du protocole qui commence par les mesures de bruit de fond pour aller jusqu'à l'estimation du spectre réglementaire sur le site étudié. La Figure 159 montre, par classe, l'évolution de la fonction correctrice construite avec le paramètre Vs30 et f₀.

Afin de répondre au cas pratique où la fréquence de résonance ne serait pas connue, nous avons aussi déterminé une fonction correctrice de l'effet de site uniquement en fonction d'une vitesse moyenne, FCES_[Vs_z]. L'amplitude du plateau A reste la même qu'avec la FCES_[Vs_z,f₀].

Cependant il faut déterminer une fréquence de résonance fictive f_{fict} pour pouvoir décrire la forme de la fonction FCES. On choisit f_{fict} comme étant la fréquence de résonance moyenne de l'ensemble de sites appartenant au groupe de vitesse considéré pour le site étudié. Les valeurs de ces fréquences fictives par groupe de vitesse sont présentées en annexe. Cette fonction est une alternative qui n'a pas encore été validée.

Pour chaque groupe de vitesse A, B, C et D, la déviation standard, entre les EC8 et les fonctions correctrices, la plus basse correspond à une classe en fréquence. Pour les classes A, B, C et D, c'est le groupe tel que $1 > f_0 > 2$ Hz, et pour la classe A c'est le groupe tel que $2 > f_0 > 4$ Hz. Cela nous laisse penser que les EC8 ont été établis sur des sites qui ont des fréquences de résonance dans ses gammes.

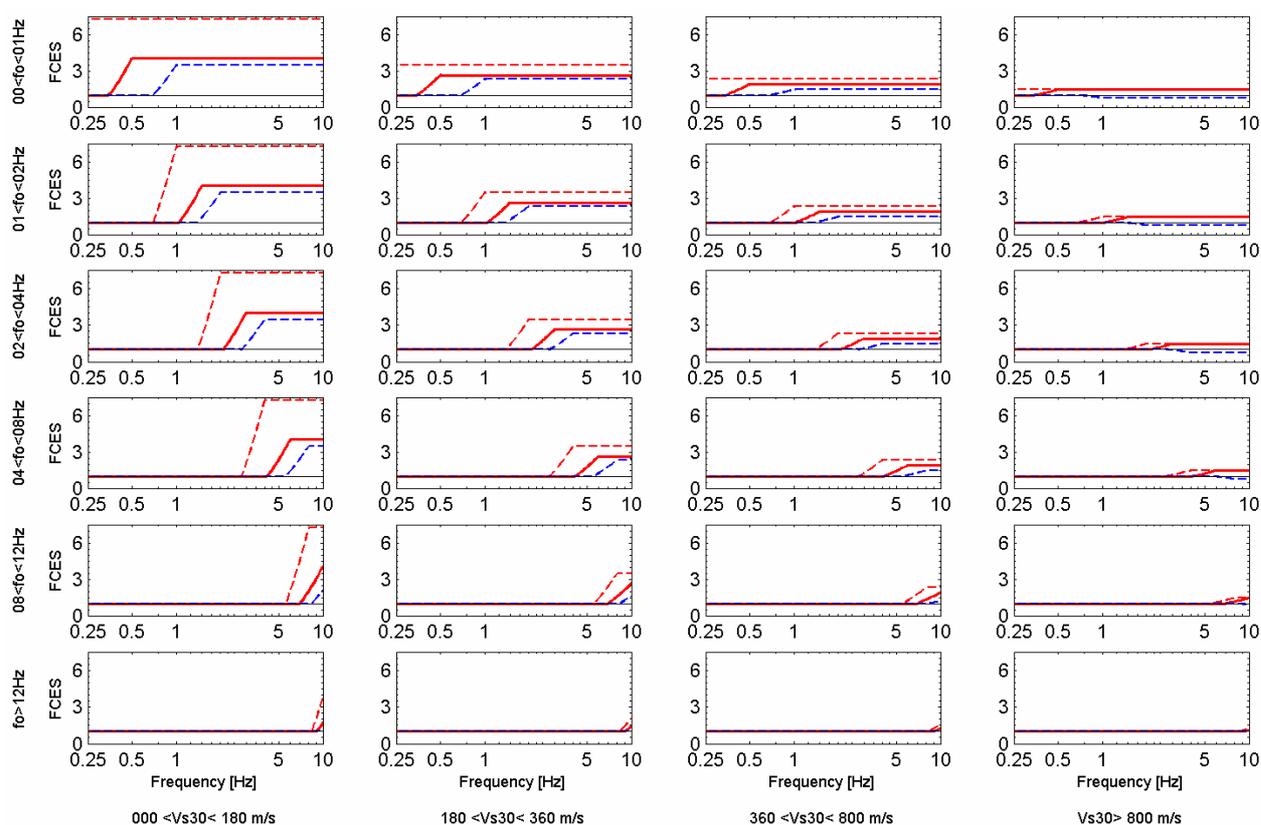


Figure 159: Fonctions correctrices définies avec : en rouge : Vs30 moyen de gauche à droite : 138, 286, 518 et 800 m/s et f_0 moyen de haut en bas : 0.5, 1, 3, 6, 10 et 12 Hz, en tirets rouges avec Vs30 et f_0 égaux à la borne minimale, en tirets bleus avec Vs30 et f_0 égaux à la borne maximale.

13.4. Retour sur les données

Afin de voir si la fonction correctrice de l'effet de site FCES est judicieusement définie, nous allons observer son écart avec les rapports de spectres empiriques, normalisés et corrigés de l'effet de surface libre.

Pour cela, pour chaque site j , les résidus sont calculés pour chaque période T_i :

Équation 22 : Résidu pour le site j à la période i, et résidus des valeurs logarithmiques (logarithme de base 10) pour le site j à la période i

$$RES_j^{FCES}(T_i) = (RSRnc_j(T_i) - FCES_j(T_i))$$

$$RES \log_j^{FCES}(T_i) = (\log(RSRnc_j(T_i)/FCES_j(T_i)))$$

Avec RSRnc_j le rapport des spectres de réponse normalisé et corrigé du site j et FCES_j la fonction correctrice correspondant au site j.

Ensuite, pour chacun des 495 sites sélectionnés, la moyenne des écarts-type est calculée pour les fréquences allant de 0.25 à 10Hz, soit des périodes entre 0.1 et 4s :

Équation 23: Ecart-type moyen pour le site j sur les valeurs normales et les valeurs logarithmiques (logarithme de base 10)

$$s_j^{FCES} = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (RES_j^{FCES}(T_i))^2 * \left(\frac{dT}{T_i} \right) \right)}$$

$$s \log_j^{FCES} = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (RES \log_j^{FCES}(T_i))^2 * \left(\frac{dT}{T_i} \right) \right)}$$

Avec n le nombre d'échantillons de période entre 0.1 et 4s.

Enfin pour chaque fonction correctrice (suivant les différents paramètres choisis pour la définir) l'écart type entre le rapport empirique et la fonction analytique est caractérisé par :

Équation 24: Ecart-type moyen, caractéristique de la fonction correctrice FCES

$$s_{FCES} = \exp \left(\frac{\sum_{j=1}^q \log(s_j^{FCES}) * P_j}{\sum_{j=1}^q P_j} \right)$$

Avec q : le nombre de site concerné et P_j le poids du site j : 1 si le site a moins de 5 évènements, 2 si le site à plus de 5 évènements. Le logarithme est de base 10.

Ce calcul est effectué selon les quatre vitesses moyennes Vs30, Vs20, Vs10 et Vs05, et la fréquence f₀.

Pour pouvoir comparer cet écart-type aux EC8 on effectue de même le calcul de l'écart pour chaque site, à chaque période, entre le rapport de spectres empiriques RSRnc (normalisé et corrigé) et le spectre EC8, correspondant au site selon son Vs30, divisé par le spectre réglementaire au rocher des EC8, noté EC8(A). Pour cela il suffit de remplacer FCES_j par EC8_j/EC8(A) dans les Équation 22, Équation 23 et Équation 24.

De même une moyenne par classe A, B, C et D puis sur l'ensemble des classes est effectuée. Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 17: Écart type de la fonction correctrice de l'effet de site sur l'ensemble des sites, et en dernière ligne, écart type des EC8 par rapport à l'ensembles de sites

Paramètre considéré param	Sigma	Sigma des valeurs en log10	Somme des poids
Vs05 et f_0	0.820	0.296	743
Vs10 et f_0	0.757	0.281	743
Vs20 et f_0	0.849	0.299	735
Vs30 et f_0	0.888	0.304	711
f_0	0.852	0.304	743
EC8	1.024	0.353	711
EC8(A)	0.458	0.284	70
EC8(B)	0.884	0.347	438
EC8(C)	1.502	0.390	184
EC8(D)	1.960	0.365	9

D'après les valeurs du Tableau 17, les écarts-type entre la fonction correctrice FCES et les rapports empiriques (entre ~ 0.75 et ~ 0.88) sont plus faibles que celui (~ 1.02) entre les spectres réglementaires des EC8 et les rapports empiriques. Quand on regarde plus en détail les écarts types avec les EC8 selon la classe A, B, C ou D, on remarque que les classes D et C sont moins proches des données par rapport aux fonctions correctrices. Par contre la classe B est équivalente aux fonctions correctrices et la classe A est meilleure.

Il y a donc globalement une amélioration dans l'utilisation de la fonction FCES par rapport à l'utilisation des EC8, sur la base de données Kik-net, sauf pour les sites au rocher.

De plus, l'écart type obtenu avec la fonction correctrice déterminée par la fréquence de résonance est plus élevé que ceux obtenus avec la FCES déterminée par Vs_z mais cependant plus faible que l'écart type défini avec les EC8. Cela nous pousse vers une réflexion sur une classification basée uniquement sur cette fréquence, c'est une perspective de recherche à considérer, [Zhao et al. 2006].

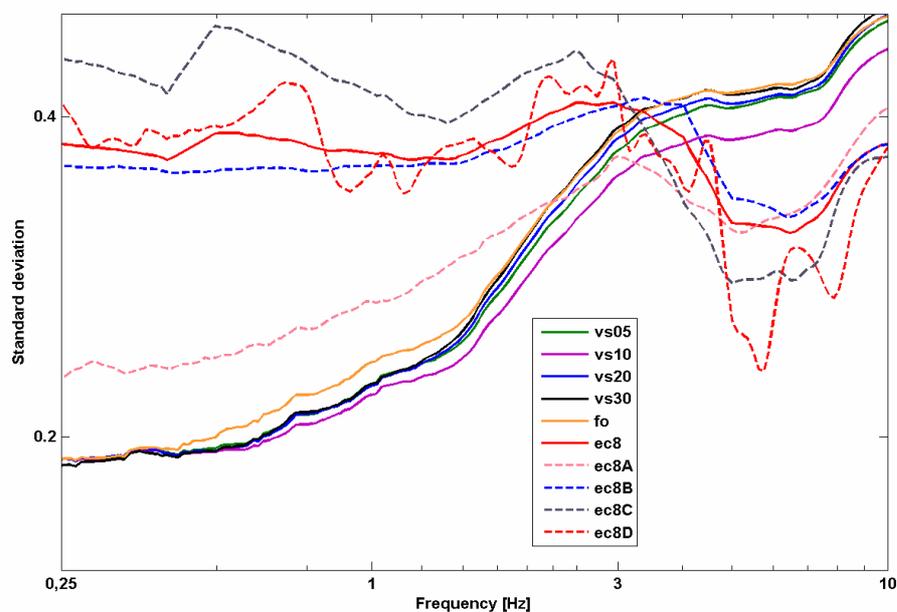


Figure 160: Écarts-type (sur les valeurs logarithmiques) moyens selon la fréquence entre les RSRnc et d'une part les fonctions correctrices FCES suivant les différents paramètres (trait plein, vert : Vs05, violet : Vs10, bleu : Vs20, noir : Vs30 et orange : f_0), et d'autre part les EC8, trait plein rouge : toutes classes confondues et en pointillés suivant les différentes classes de vitesse : rose : classe A, bleu : classe B, gris : classe C et rouge : classe D.

La Figure 160 nous montre les écarts-type moyens selon la période, définis par :

Équation 25: Ecart type moyen à la période T_i

$$s^{FCES}(T_i) = \sqrt{\frac{1}{M} \left(\sum_{i=1}^m (RES_j^{FCES}(T_i))^2 * P_j \right)}$$

$$s \log^{FCES}(T_i) = \sqrt{\frac{1}{M} \left(\sum_{i=1}^m (RES \log_j^{FCES}(T_i))^2 * P_j \right)}$$

Avec m le nombre de sites définis à la période T_i , M la somme des poids.

On effectue de même entre les RSRnc et les EC8 du site divisé par le spectre EC8 au rocher.

Une analyse comparative des résidus entre des amplifications spectrales mesurées et amplifications spectrales calculées par la fonction correctrice (Figure 160) met en avant l'amélioration par rapport aux EC8 de la fonction correctrice pour les fréquences en dessous de 3 Hz environ. La valeur du plateau des fonctions correctrices semble cependant être mal définie et devra être améliorée.

En effet, nous avons dans un premier temps privilégié la simplicité pour la fonction correctrice. Même si la forme proposée conduit déjà à une amélioration sensible par rapport aux EC8, l'analyse des résidus (Figure 161) montre qu'il serait utile de rechercher une fonction correctrice un peu plus élaborée présentant un maximum d'amplification autour de la fréquence fondamentale, et décroissant ensuite avec la fréquence. En effet, sur la Figure 161 on voit que les résidus augmentent sensiblement à partir de la fréquence fondamentale minimale de la classe observée. Cela permettrait de gagner encore en précision et d'améliorer l'accord avec les observations. Nous n'avons pas eu le temps de conduire cette étape finale dans le laps de trois ans imposé, et comptons la réaliser dans les mois qui viennent. Cette option fait parti de nos perspectives proches.

L'utilisation de cette fonction est donc justifiée par son écart type considérablement diminué par rapport aux classifications actuelles (EC8), en particulier en dessous de 3Hz (au-dessus de 0.3s), cependant elle devra être testée sur d'autres régions que le Japon pour permettre une validation plus intransigeante.

Le paragraphe 14 suivant présente une application sur le site test de l'Ebron.

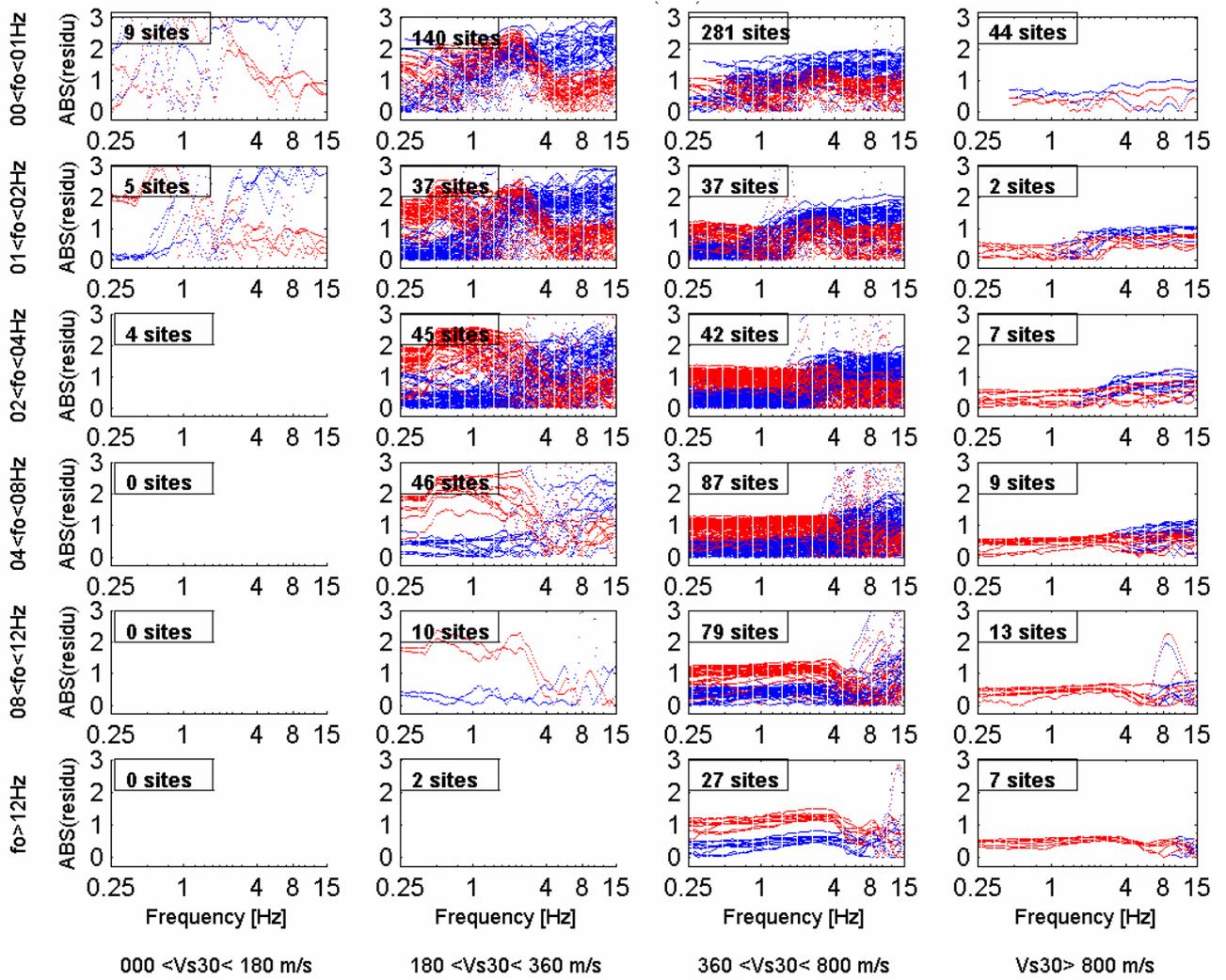


Figure 161: Valeur absolue des résidus amplifications spectrales mesurées et amplifications spectrales calculées, pour tous les sites selon leur classe, selon vs30 et f_0 , en bleu résidus avec la fonction correctrice, en rouge résidus avec les EC

14. Applications sur le site-test de l'Ebron

Le site de l'Ebron permet de tester l'ensemble du protocole partant des mesures jusqu'à l'estimation du spectre de réponse. Un papier pour le colloque de l'AFPS 2007 a été écrit sur ce site [Cadet, 2007]. Ce paragraphe s'inspire de cet article et entre un peu plus dans le détail.

14.1. Introduction

Le chapitre II décrit un protocole pour les mesures et l'analyse du bruit de fond. Ce protocole a été testé sur quelques sites (voir paragraphe 5.2). Le chapitre III utilise les résultats de ce protocole pour déterminer le spectre de réponse réglementaire d'un site, qui prend en compte les effets de site. Un protocole complet est alors décrit partant des mesures de bruit de fond jusqu'à l'estimation des effets de site. Cette démarche s'appuie sur la base de données du réseau japonais Kik-net. Il est donc intéressant de pouvoir confronter les résultats de ce protocole complet sur des sites hors du Japon. Le site de l'Ebron (Figure 162) convient parfaitement pour tester le protocole complet, des mesures de bruit de fond jusqu'à l'estimation de l'effet de site. En effet, sur ce site-test une première campagne de mesures a été réalisée en 1995, comprenant des enregistrements d'événements sur plusieurs stations, à la fois dans les argiles et sur le rocher, des mesures géotechniques de cross-hole et des mesures ponctuelles de bruit de fond.

Le premier but de ce paragraphe est de confirmer la fiabilité de l'analyse du bruit de fond à fournir les paramètres V_{sz} avec z variant de 5 à 30 mètres, et f_0 , en utilisant le protocole expliqué au paragraphe 5, page 111. Le deuxième but est de tester la fonction correctrice de l'effet de site établie au paragraphe 13, page 225.

Pour compléter l'étude de 1995, deux configurations de réseau (une circulaire à 16 capteurs et un triangulaire à 18 capteurs) ont été réalisées.

14.2. Résumé des études précédentes

L'étude de 1995 regroupe des enregistrements de séismes, des enregistrements ponctuels de bruit de fond, des simulations numériques de fonctions de transfert grâce à des données de cross-hole. Dans ce résumé nous nous intéresserons seulement aux stations AVA et AMO qui se trouvent proches des mesures de bruit de fond en réseau. JUL est la station de référence au rocher. Il n'y a pas d'information quant à la vitesse à la station JUL. Une description complète des mesures et analyses de 1995 se trouve dans le rapport "Franchissement de l'Ebron", [CETE 1995].



Figure 162: Localisation du site de l'Ebron, du séisme en mer Ligure et de la station BOR au rocher à Nice

14.2.1. Étude géotechnique et géologique

Tableau 18: Mesures de vitesse d'après les forages réalisés à proximité des stations AVA et AMO

Depth [m]	Vs [m/s]	Vp [m/s]	Formation géologique
0 – 5	165	673	Sandy beige clay
5 – 10	193	1400	Soft sandy gray clay
10 – 17	305	1625	Stiff sandy gray clay
17 – 23	339	1625	

La zone d'étude se trouve sur des argiles molles d'origine lacustre post-glaciaire, typique de la région du Trièves. L'épaisseur de ces argiles peut dépasser 100 mètres. Le substratum est principalement du calcaire. Deux profils cross-hole ont été réalisés dans la zone d'étude. Le cross-hole près des stations AMO et AVA atteint 23 mètres avec les valeurs de vitesses du Tableau 18.

14.2.2. Enregistrements et analyses des évènements

Cinq stations sismologiques ont été installées sur l'Ebron, pendant trois mois. 19 événements faibles ont été enregistrés avec 16 télé-séismes et 3 séismes régionaux dont l'épicentre est à moins de 200 km. Le séisme régional le plus important a eu lieu le 21 Avril 1995, c'est un séisme en mer Ligure, avec une magnitude de 4.7, situé au large de Nice, à 200 km de l'Ebron. L'amplitude maximale des ondes S pour ce séisme est plus importante aux stations installées sur les argiles (AVA, AMO) que sur la station au rocher BOR (Nice Mont Boron) plus proche, à 20 km de l'épicentre. La Figure 163 montre les enregistrements du séisme de Ligure aux stations sur les argiles AMO et AVA, et aux stations au rocher JUL à l'Ebron et BOR à Nice, localisé sur la

Figure 162. Une amplification nette dans les argiles comparée aux sites au rocher est visible, même si l'un des sites au rocher (BOR) est dix fois plus proche de l'événement que les stations sur les argiles (20 km / 200 km).

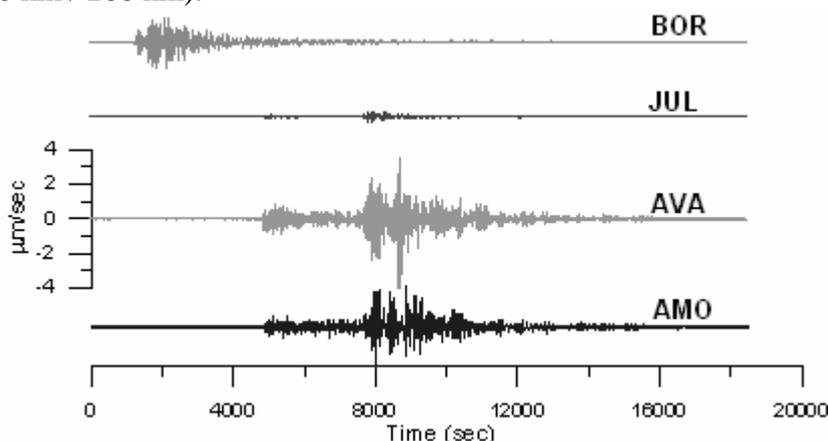


Figure 163: Enregistrements du séisme de Ligure (de haut en bas): à Nice au Mont Boron, station BOR; à la station JUL au rocher à l'Ebron et aux stations sur les argiles AVA et AMO

La différence entre la vibration aux sites au rocher et aux sites sur les argiles peut être interprétée comme un effet de résonance du signal dans la couche d'argile. Les argiles multiplient la vitesse maximale par rapport aux enregistrements au rocher. Le rapport des spectres Fourier du site au rocher JUL sur un site aux argiles a été réalisé pour les 19 événements sur chaque station sur des argiles. Ce rapport est noté SSR pour Standard Spectral Ratio, il correspond à la réponse sismique du site sur les argiles. Le rapport a été considéré uniquement lorsque le rapport signal sur bruit était supérieur à 3 pour, à la fois, la station au rocher et la station sur les argiles. Le nombre suffisamment élevé des événements enregistrés nous permet d'obtenir une bonne estimation du SSR moyen. Les courbes moyennes pour AVA et AMO sont représentées sur la Figure 164 en traits épais. A la station AVA l'amplification concerne la bande de fréquence de 1.5 à 5 Hz. Son niveau atteint 20. A AMO, qui est aussi située sur les argiles, la fonction de transfert montre la même forme avec une amplitude maximale autour de 14. Le rapport des spectres de Fourier horizontal sur vertical, des événements sismiques, noté H/Vs est aussi calculé (courbe fine sur la Figure 164). Ce rapport détermine la fréquence de résonance mais ne fournit pas d'estimation sur l'amplification.

14.2.3. Enregistrements de bruit de fond et analyse H/V

La méthode ponctuelle H/V a été utilisée lors de la 1ère campagne de mesures. Plusieurs points de mesures ont été enregistrés sur les stations AVA, AMO et JUL. Dans l'argile le H/V montre un pic net entre 1 et 2 Hz avec un niveau entre 5 et 10. Le niveau d'amplification est nettement plus faible que celui observé sur les SSR (14 à 20) comme on peut le voir sur la Figure 164. Les fréquences de résonance obtenue par les trois méthodes H/Vn, H/Vs et SSR sont très proches pour les deux stations AVA et AMO (Figure 164), et sont entre 1.25 et 2 Hz.

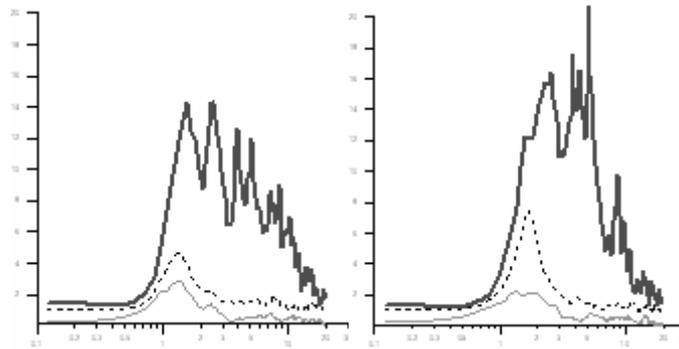


Figure 164: gauche) station AMO, droite) station AVA. Pour les deux stations: courbe épaisse noire: SSR moyen, courbe noir pointillés: H/Vn (bruit) moyen, courbe fine grise : H/Vs des événements

14.2.4. Profil géotechnique Vs de référence

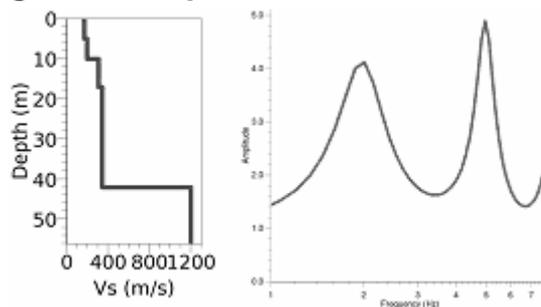


Figure 165 : Gauche) Modèle du profil d'après des mesures de puits; droite) Réponse 1D numérique à une onde SH, du profil modèle

Avec toutes les informations précédentes, nous estimons un profil de vitesses V_s en combinant les données de cross-hole (Cf. Tableau 18) et la fréquence de résonance estimée avec H/V et SSR. Les données de cross-hole ne fournissent d'informations que jusqu'à 25 mètres. Dans un cas simple à une dimension, la fréquence de résonance f_0 est liée à la vitesse moyenne V_s et à l'épaisseur h de la couche qui entre en résonance par la formule $f_0 = V_s/4h$. La fréquence de 1.8 Hz, considérant une vitesse moyenne de 300 m/s grâce aux données de cross-hole, correspond à une épaisseur totale de 42 mètres pour la couche d'argile (Figure 165). Nous proposons une vitesse du substratum avec un contraste d'impédance de 4, ce qui correspond à un pic H/V visible [Bonnefoy-Claudet, 2004], soit une vitesse de 1200 m/s. Ce profil $V_s(z)$ sera notre profil géotechnique de référence. Il faut cependant remarquer que la vitesse dans le substratum peut être sensiblement plus élevée, dans la mesure où le site JUL est sur du calcaire jurassique, dont on sait que dans la région il peut avoir une vitesse supérieure à 2000 m/s. Il sera comparé aux profils obtenus avec les méthodes combinées de bruit de fond dans la partie qui suit.

Avec le profil géotechnique de référence ainsi défini, en utilisant un calcul 1D, nous calculons la réponse de la colonne de sol à une onde SH verticalement incidente (voir paragraphe 15.4.1.1, page 284 en annexe). Cette fonction de transfert numérique montre un pic autour de 2 Hz (Figure 165, b).

14.3. Mesures en réseau: stratégie et analyse

Afin de déterminer la vitesse des ondes S entre 5 to 30 mètres avec des enregistrements de bruit de fond, nous suivons le protocole défini au paragraphe 5.1.

14.3.1. Mise en place des réseaux: étapes n°1 et 2

Étape 1: sélection d'une zone entre AMO et AVA où la fréquence de résonance est stable, autour de 1.8 Hz et avec une amplitude supérieure à 5. Le rapport H/V montre a pic net et constant avec une amplitude élevée, nous avons donc confiance en la qualité tabulaire du site. (2/2 points)

Étape 2: Une ouverture de réseau réalisable (rayon inférieur à 150m) devrait être suffisant pour décrire la couche molle de sol décrite par le profil $V_s(z)$ de référence. Nous déployons deux réseaux avec 2 géométries, circulaire avec 16 capteurs verticaux, et triangulaire avec 18 capteurs verticaux. La distance maximale entre deux capteurs est 130m, voir Figure 166.

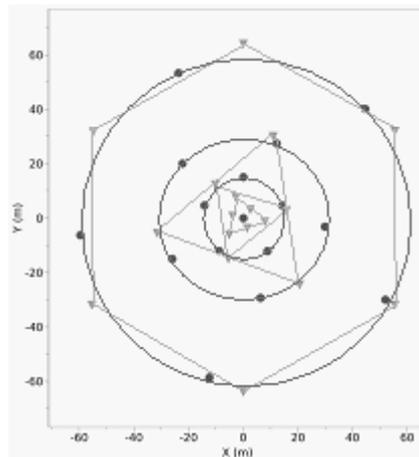


Figure 166: Géométrie des réseaux, ronds rouges pour le type circulaire, triangles mauves pour le type triangulaire

14.3.2. Analyse des réseaux : étapes n°3 à 7

Nous avons utilisé les deux méthodes d'analyse FK et SPAC. Le réseau triangulaire est utilisé pour le calcul de la courbe de dispersion avec la méthode CVFK car il fournit une plus grande bande de fréquence où la courbe est définissable. Par contre les courbes d'autocorrélation calculées avec SPAC sont mieux définies avec le réseau de type circulaire. L'inversion a été faite avec différents espaces initiaux de paramètres, celui retenu, Tableau 19, fournit des profils de vitesses selon FK et SPAC très proches.

Tableau 19: Espace initial des paramètres pour l'inversion, la vitesse évolue avec un gradient dans la première couche

Thickness [m]	V_p [m/s]	V_s [m/s]
1 to 100	200 to 3500	100 to 2000
8	800 to 4000	400 to 3000

Étape 3: Comparaison FK et SPAC. Tout d'abord les profils obtenus séparément à partir des inversions des courbes FK et SPAC sont proches, Figure 167, (1/1 point). Ensuite la courbe de dispersion de FK (bande de fréquence de 3 à 22 Hz) et l'histogramme des courbes d'autocorrélation dans le plan fréquence nombre d'onde sont compatibles et complémentaires, Figure 168. (1/1 point).

Étape 4: Cette compatibilité nous permet d'étendre la courbe de dispersion estimée avec FK jusqu'à 1.8 Hz (Figure 168). Notons que cette limite correspond à la limite naturelle, donnée par la fréquence de résonance, sous laquelle les ondes de Rayleigh n'ont pas d'énergie. (log22-log1.8=1/2 points)

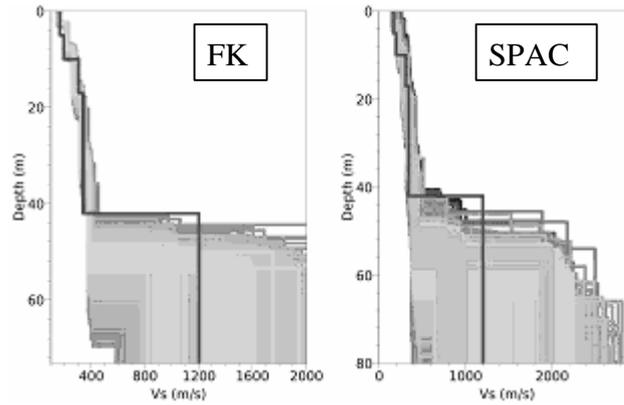


Figure 167 : Inversion, avec un espace initial des paramètres d'une couche sur un substratum avec un gradient de vitesse suivant une loi-puissance: gauche) profils de l'inversion de la courbe de dispersion estimée par FK avec une erreur de moins de 0.7; droite) profils de l'inversion de SPAC avec une erreur de moins de 0.5. Ligne noire épaisse: Profil Vs(z) de référence

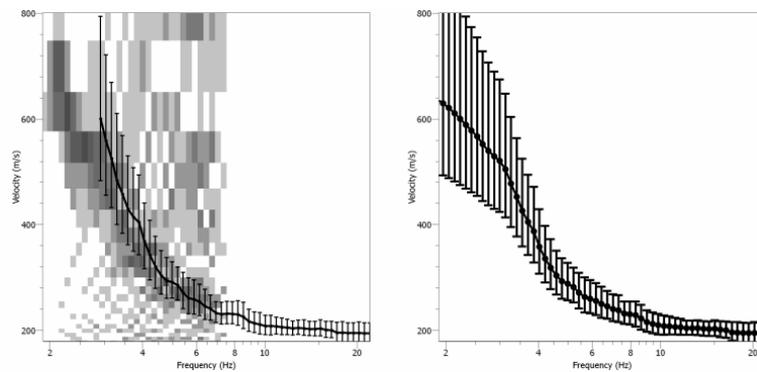


Figure 168: Gauche) Comparaison de la courbe de dispersion estimée avec FK (courbe noire) et histogramme des courbes SPAC dans le domaine fréquence vitesse de phase, en échelle de gris selon la valeur de la semblance; droite) Courbe de dispersion étendue de 1.8 Hz à 22 Hz en combinant les analyses FK et SPAC

Étape 5: Cette courbe de dispersion étendue est plate pour les hautes fréquences et permet de caractériser la subsurface (1 point).

Étape 6 : La courbe de dispersion étendue est inversée avec l'espace des paramètres du Tableau 19. Les profils en résultant sont sélectionnés s'ils ont une valeur d'erreur inférieure à 0.8, Figure 169. La fréquence de résonance de la réponse SH sur les modèles sélectionnés est la même que celle définie par le rapport H/Vn (2 points, Figure 169).

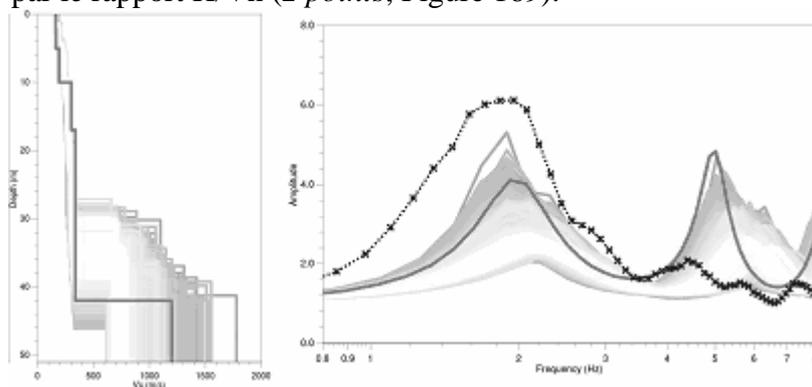


Figure 169: Gauche) En échelle de gris (selon la valeur de l'erreur) les profils Vs de l'inversion de la courbe de dispersion étendue avec un espace initial des paramètres d'une couche sur un substratum avec un gradient de vitesse suivant une loi-puissance ; ligne épaisse noire Vs(z) de référence Droite) réponse SH du profil de référence (ligne épaisse grise foncée), H/Vn de la station AVA (ligne noire en pointillés) et réponse SH des modèles obtenus par l'inversion de la courbe de dispersion (graphique de gauche)

Étape 7 : Les résultats sont présentés sur la Figure 169 qui montre une bonne corrélation avec le profil $V_s(z)$ de référence pour les couches superficielles (jusqu'à 25m environ) mais une différence non négligeable pour la partie plus profonde (0.5 point, Figure 169).

Pour conclure sur l'interprétation des mesures de bruit de fond, les profils sélectionnés, Figure 169, sont proches du profil de référence $V_s(z)$ venant de mesures de puits, pour les couches molles dans les argiles. La moyenne de vitesse sur les 30 1^{ers} mètres V_{s30} est environ 270 m/s d'après les résultats du bruit de fond en réseaux et de 280 m/s d'après les mesures de forage. Le protocole nous permet de ne pas oublier les étapes essentielles comme : utiliser plusieurs méthodes d'analyse comme FK et SPAC, essayer différents espaces de paramètres pour garder celui qui donne les profils les plus proches entre l'inversion des courbes venant de SPAC et FK, combiner les résultats des deux analyses si elles sont compatibles, vérifier avec des données a priori (fréquence de résonance H/V, données géotechniques etc.), déterminer le score pour chaque étape et finalement estimer le degré de confiance.

La somme des scores des étapes du protocole nous donne un degré de confiance très bon de 8.5/10, qui correspond à un résultat fiable. Dans ce cas, comme la valeur de V_s en surface est estimée de manière fiable, une estimation de l'effet de site peut être réalisée en se basant sur la fréquence de résonance f_0 , et la vitesse moyenne sur les 30 1^{ers} mètres, V_{s30} , ou d'autres vitesses moyennes V_{sz} , comme V_{s05} (165 m/s), V_{s10} (179 m/s) et V_{s20} (247,5 m/s)

14.4. Estimation de l'effet de site grâce à la fonction correctrice FCES

La moyenne sur les rapports de spectres surface sur profondeur normalisés et corrigés de l'effet de surface libre (paragraphe 11 et 12) des sites de Kik-net qui ont un V_{s30} entre 180 m/s et 360 m/s et une f_0 entre 1 et 2 Hz, fournit une fonction de transfert type entre le site et la référence standard, définie par $V_{s30}=800$ m/s (paragraphe 13.2). Cette fonction de transfert, appelée courbe Kik-net (courbe noire fine sur la Figure 170, gauche), est comparée à la fonction de transfert estimée pour le site de l'Ebron caractérisé par $V_{s30}=280$ m/s et $f_0=1.8$ Hz. Cette fonction de transfert est déterminée par le rapport standard SSR aux stations AMO et AVA avec JUL comme station de référence au rocher (courbes rouge et bleue pointillé, Figure 170, gauche). On remarque une différence d'amplitude entre ces deux types de fonctions de transfert venant soit de Kik-net, soit des enregistrements sur le terrain (AMO, AVA). Cette différence peut être justifiée par plusieurs hypothèses :

- Tout d'abord, aucune vitesse n'est connue à la station de référence JUL. Si la vitesse moyenne V_{s30} à la station JUL est supérieure à 800m/s, ce que l'on suspecte, alors le rapport de spectres fournit une amplitude plus grande que si la référence avait un V_{s30} autour de 800m/s. Cela met en avant le problème d'un site de référence, relevé au paragraphe 10. Pour montrer que cette hypothèse est plausible, nous supposons que V_{s30} à la station JUL est d'environ 1500 à 2000 m/s et nous corrigeons son spectre pour le ramener à une station de référence avec $V_{s30}=800$ m/s. Le niveau d'amplification est en effet diminué (Figure 170, droite) mais reste loin du niveau observé empiriquement.

- Deuxièmement il peut y avoir des effets 2D-3D. Cela est d'autant plus probable que la fonction de transfert expérimentale se caractérise par une amplification large bande sans séparation nette entre une fondamentale et des harmoniques, et que les topographies de surface et de subsurface dans cette zone du Trièves sont connues pour être très complexes.
- Enfin les argiles de l'Ebron peuvent avoir un faible amortissement, ce qui augmente l'amplification.

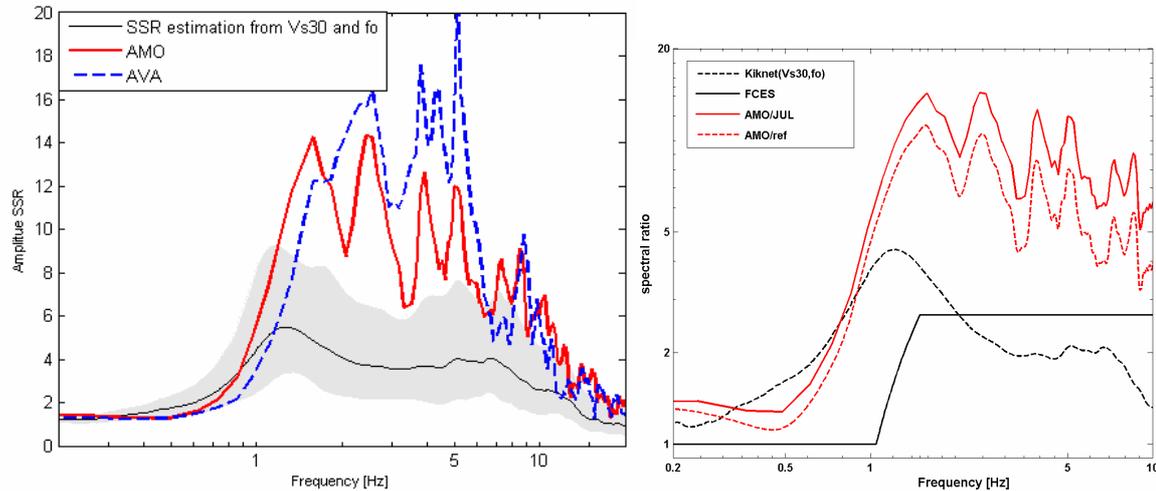


Figure 170: Gauche) fonctions de transfert: en trait noir fin: SSRbh corrigé normalisé, moyen sur les sites tels que $180 < V_{s30} < 360 \text{ m/s}$ et $1 < f_0 < 2 \text{ Hz}$ avec les écarts type en gris, en trait plein rouge : SSR moyen à AMO, en pointillés bleus : SSR moyen à AVA. Droite): Comparaison des SSR en AMO, brut (trait plein rouge) et ramené à un rocher de référence (trait pointillé rouge), de la fonction correctrice FCES (trait plein noir) et de SSRbh corrigé normalisé, moyen sur les sites tels que $180 < V_{s30} < 360 \text{ m/s}$ et $1 < f_0 < 2 \text{ Hz}$ (noire pointillés)

D'après le paragraphe 13, avec la fréquence $f_0 = 1.8 \text{ Hz}$ et $V_{s30} = 280 \text{ m/s}$ la fonction correctrice dépendant de V_{s30} est définie par les coefficients $a = -0.57848$ et $b = 4.2406$. Elle définit une valeur de plateau à 2.67 (Figure 170, droite) qui reste très faible par rapport au maximum de l'amplification et aussi par rapport à la valeur moyenne des SSR à AMO et AVA de 1.8 Hz à 10 Hz qui est entre 7 et 10.

14.5. Conclusions

Suivant les étapes du protocole, l'analyse des mesures de bruit de fond fournit un profil de vitesse des ondes S suffisamment précis pour être en cohérence avec des mesures géotechniques pour les couches en surface. Cependant les méthodes basées sur le bruit de fond sont plus rapides et moins onéreuses qu'un forage. C'est un des principaux avantages. De plus, la grande densité des points de mesure permise par l'aspect économique de la méthode, permet d'obtenir des informations sur l'étendue spatiale des effets de site. Les deux paramètres, V_{sz} et f_0 , sont estimés de manières fiables avec ces mesures de bruit. Ces paramètres peuvent aider à estimer l'effet de site en utilisant les rapports moyens et/ou la fonction correctrice, définis dans le paragraphe 13.

Cette conclusion est valable pour un site à structure tabulaire dans un contexte argileux. Plus d'expériences devront être réalisées dans d'autres contextes géotechniques pour confirmer la validité de ces méthodes. Nous garderons une attention particulière à ne pas interpréter le profil de vitesse obtenu par le bruit de fond trop profondément, mais de ne considérer seulement que la 1^{ère} couche. Un indicateur de la profondeur maximale à considérer pourrait être l'étalement de la vitesse sur les différents modèles de vitesse sélectionnés, à une profondeur donnée.

La courbe Kik-net estimée à partir de V_{s30} et f_0 doit encore être validée sur des sites extérieurs à la base de données Kik-net. Les domaines de validité devront être plus précisément définis en particulier en ce qui concerne la référence au rocher. À terme cette méthode présente l'avantage de ne pas nécessiter de recherche d'un site de référence ni même d'enregistrements de séisme, ce qui représente un important avantage économique. La sous-estimation importante des SSR observées par les amplifications prédites suggère cependant, d'une part, par delà les ajustements liés au site de référence, l'intérêt et le besoin d'une meilleure prise en compte quantitative des effets 2D et 3D. D'autre part, la révision des niveaux d'amplification des fonctions correctrices.

Conclusions générales et perspectives

Le premier volet de ce travail a concerné les mesures et l'analyse du bruit de fond dans le but de caractériser un site par sa fréquence de résonance f_0 et la vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur les z premiers mètres, V_{sz} . Les études numériques et les études de cas réels nous ont permis de mettre en évidence les étapes qui ont une influence sur les résultats finaux, c'est-à-dire les profils de vitesse. Grâce à ces observations, un protocole de mesure et d'analyse de bruit de fond, combinant les méthodes, ponctuelle et en réseau, a été proposé. Ce protocole est une aide pour l'opérateur et permet de réduire l'influence de ce dernier sur les résultats (courbe caractéristique, profil de vitesse). Un système de notation, défini avec le protocole, permet d'éliminer les cas d'études discutables.

Ce protocole permet une évaluation simple et fiable de la fréquence de résonance f_0 et une vitesse moyenne sur les z premiers mètres, V_{sz} avec z variant de 5 à 30 mètres, sur une large zone d'étude, s'adaptant ainsi à une application telle que les plans de prévention des risques. Enfin, la variation dans l'espace des paramètres f_0 et V_{sz} peut être définie de manière assez simple.

Ce protocole présente cependant des limites certaines. D'une part les résultats se limitent à des milieux tabulaires. D'autre part, les études synthétiques sur l'analyse du bruit de fond en réseau ne représentent pas toutes les configurations possibles. Et enfin, il a été établi sur la base d'une version précoce du logiciel geopsy/Sesarray, qui a beaucoup évolué depuis. Pour améliorer ce travail, nous proposons, en perspectives :

- D'effectuer d'autres études paramétriques sur l'analyse du bruit de fond en réseau. Notamment la sensibilité, à la fois des analyses FK et SPAC et de l'inversion, à déterminer une couche d'épaisseur z selon la taille du réseau.
- D'améliorer les résultats des mesures de bruit de fond par :
 - o L'utilisation de la méthode complémentaire SASW/MASW, apportant d'une part des précisions sur la vitesse à haute fréquence et d'autre part, une distinction parfois plus claire des différents modes.
 - o L'analyse des composantes horizontales

Le deuxième volet avait pour but de définir une fonction correctrice d'un spectre au rocher pour prendre en compte l'effet de site.

L'étude des données des 622 stations, avec un total de 4 705 séismes, du réseau japonais Kiknet nous a permis d'aborder différentes problématiques, en huit points :

1. Validité des mesures de vitesse down-hole pour les sites KIKNET: Sur les 538 sites pour lesquels des enregistrements de séismes étaient disponibles sur la période 1998-2004, la comparaison entre fonction de transfert empirique surface/profondeur et fonction de transfert numérique calculée d'après le profil de vitesse résultant de mesures down-hole a permis de tester la qualité de ces mesures. La similarité entre les fréquences du 1^{er} pic sur les rapports de spectres des enregistrements (surface sur profondeur) et sur les fonctions de transfert de puits calculées (l'amplitude n'est pas

prise en considération) a ainsi conduit à valider les profils fournis pour 495 de ces 538 sites (soit 92%, pourcentage remarquable), qui ont été retenus pour la suite des études.

2. Relations statistiques entre les vitesses moyennes sur différentes épaisseurs : L'abondance et la qualité des données ont permis d'analyser le degré de corrélation entre les différentes vitesses moyennes calculées sur les premiers 5, 10, 20, 30, 50 et 100 mètres. Ces régressions s'avèrent tout aussi représentatives pour des profils obtenus hors du Japon et permettent donc de proposer leur utilisation dans d'autres régions.
3. Évaluation de la fréquence fondamentale des sites KIKNET : Cette fréquence fondamentale du site a été déterminée en pointant la fréquence du premier pic sur le rapport H/V séisme. Une comparaison entre cette fréquence et celle donnée par le rapport spectral surface/profondeur a en effet montré les limites de ce dernier lorsque le capteur en profondeur n'est pas assez profond pour être dans le véritable substratum. Dans ce cas il y a un effet de site à plus grande profondeur que le fond du forage (ce qui se produit pour environ 10% des sites "validés", soient 441 sites sur 495). De plus, il apparaît que ces fréquences fondamentales ne sont que très faiblement corrélées avec les vitesses moyennes de proche sub-surface, y compris avec V_{s30} , ce qui confirme le bien-fondé d'une classification selon ces deux paramètres.
4. Comparaison des fonctions d'amplification surface/profondeur en termes de spectres de Fourier et de spectres de réponse : Lorsque les calculs sont basés sur suffisamment d'enregistrements différents, les rapports moyens sont globalement très proches l'un de l'autre. Les écarts les plus significatifs se situent à très basse et très haute fréquence, où le rapport des spectres de réponse est généralement supérieur au rapport Fourier. Cette similarité dans la bande de fréquence intermédiaire permet de les confondre dans la suite de l'étude.
5. Analyse des sites "rocheux" : Une analyse détaillée des 70 sites Kik-net répondant au critère usuel "site rocheux" (i.e., $V_{s30} > 750$ m/s) révèle en fait la grande disparité de profils de vitesse et de fonctions d'amplification site/profondeur. Or les méthodes de type site sur référence qui sont utilisées pour déterminer l'effet de site, nécessitent une référence au rocher. Cette variabilité nous a amené à proposer une définition plus restrictive pour les "sites de référence standard", correspondant à V_{s30} compris en 750 et 850 m/s, et une fréquence fondamentale f_0 supérieure à 10 Hz.
6. Normalisation : homogénéisation des fonctions d'amplification site/profondeur via l'établissement d'une méthode de normalisation des caractéristiques mécaniques de fond de forage : Les fonds de forage, sur l'ensemble des sites étudiés, montrent une grande variabilité de leurs caractéristiques de profondeur et de vitesse, qui biaise les fonctions d'amplification site/profondeur. Une procédure pour corriger ces biais a donc été proposée, via une fonction de normalisation ramenant le fond de forage local vers la référence standard telle que définie à l'étape précédente. Deux approches différentes ont été considérées, l'une avec la méthode du quart de la longueur d'onde de Boore [Boore, 2003], l'autre avec les fonctions de transfert théoriques SH (*psv1d* en fortran réalisé par JC Gariel et P.Y. Bard), qui s'avèrent in fine produire des résultats très cohérents. Cette procédure a été alors appliquée à l'ensemble des fonctions d'amplification expérimentales site/profondeur. A ce stade tous les rapports sont normalisés et donc comparables.
7. Correction de l'effet de surface libre : Pour se ramener au cas usuel où l'on évalue l'amplification par rapport à un site rocheux standard en surface (et non pas en profondeur), il a fallu aussi analyser les différences liées aux interférences entre ondes

incidentes et réfléchies existant en fond de forage. Une seconde fonction correctrice a alors été définie, avec une formulation très simple prenant en compte la fréquence « destructrice » de chaque site. Différents tests sur des modèles numériques et quelques données expérimentales se sont avérés satisfaisants. Son effet corrige à la baisse (d'un facteur 2) la partie haute fréquence, à partir d'une fréquence propre au site, des fonctions d'amplification site/profondeur. Elle a été appliquée à toutes les fonctions d'amplification empiriques normalisées obtenues à l'issue de l'étape précédente.

8. Corrélation entre caractéristiques de site et fonctions d'amplification : Après toutes ces étapes préliminaires de sélection de sites, de caractérisation des sites par leur vitesse et fréquence de résonance, de normalisation et de correction de l'effet de site ; on a pu enfin mettre en relation ces fonctions d'amplification normalisées et les paramètres de site V_{sz} et f_0 . On a tout d'abord observé des moyennes de spectres par classe (V_{sz} , f_0). Puis, à partir de ces observations, on a mis en place une fonction correctrice continue de l'effet de site. Elle permet de déterminer le spectre de réponse d'un site caractérisé par V_{sz} et f_0 à partir d'un spectre de réponse au rocher standard, éventuellement réglementaire. Pour chaque paramètre, V_{s05} , V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} et f_0 , cette fonction correctrice a été établie. Toutes ces fonctions correctrices prévoient plus précisément les amplifications spectrales observées sur le réseau Kik-net que le font les EC8. La fonction correctrice définie avec V_{s10} , et f_0 reflète au mieux les résultats empiriques, même si elles ne prennent pas en compte explicitement certains phénomènes comme les effets 2D ou 3D, et les effets non-linéaires. Elle est ainsi définie de 0.25 à 10Hz:

- $FCES(f) = 1$, pour $0.25 < f < 0.7 * f_0$
- $FCES(f) = \left(\frac{A-1}{0.3} \right) * \frac{f}{f_0} + \frac{10}{3} (1 - 0.7A)$, pour $0.7 * f_0 < f < f_0$ avec
 $A(V_{s10}) = (1083.5 / V_{s10})^{0.45115}$
- $FCES(f) = A$, pour $f_0 < f < 10$ Hz

Applicabilité

Ces fonctions correctrices peuvent être appliquées sans difficulté à toutes les études de microzonage pour une application locale, et pourraient sans doute servir de base de réflexion pour la prochaine génération de règles nationales. Cette fonction correctrice $FCES_{[V_{sz}, f_0]}$ est utilisable sur tout site caractérisé par une vitesse au minimum sur les 5 premiers mètres et une fréquence de résonance. La fonction correctrice uniquement définie par une fréquence de résonance $FCES_{[f_0]}$ montre aussi une cohérence intéressante avec les données de Kik-net, avec une précision comparable aux réglementations EC8 (voire meilleure).

Dans le cas où seule la vitesse est connue et qu'il n'y a pas de fréquence de résonance évidente, des alternatives ont aussi été abordées, mais non testées. La fonction correctrice $FCES_{[V_{sz}]}$ est alors définie uniquement avec V_{sz} .

Limites de l'étude :

Ces trois ans de recherche m'ont permis d'aborder divers sujets, des mesures de bruit de fond en réseau à l'analyse des rapports spectraux d'enregistrements de séismes. Chacun d'entre eux a été étudié en gardant en tête l'objectif de cette thèse : trouver une méthode simple pour modifier les spectres de réponse au rocher pour les adapter aux conditions du site considéré.

Dans ce cadre, les études présentent forcément des limites :

- La durée des séismes n'est pas prise en compte.
- Les fonctions correctrices de l'effet de site ont été établies grâce à un jeu de données conséquent, avec des caractéristiques de vitesse fiables. Cependant, nous n'avons pas pris en compte les différents niveaux sismiques (magnitude, PGA). Cela peut apparaître comme un inconvénient par rapport aux formes spectrales proposées dans les EC8, qui intègrent, un peu, l'effet des non-linéarités. Notons cependant qu'elles le font à leur manière, très forfaitaire, et que leur justification est issue d'un jeu de données considérablement plus restreint, et géotechniquement beaucoup moins bien contraint.
- La forme de la fonction correctrice à ce stade est très simple et décrit uniquement les fréquences de 0.25 à 10 Hz, soit les périodes de 0.1 à 4 secondes. De plus et surtout, elle n'est pas optimale et demande un travail supplémentaire pour minimiser l'écart aux données

Améliorations possibles :

Conscients des limites de ces études, nous proposons des pistes à suivre pour améliorer et compléter ce travail :

- La précision sur la dépendance fréquentielle des fonctions d'amplification et sur les niveaux d'amplitude devrait être effectuée assez rapidement: des résultats préliminaires conduisant à des fonctions de type résonateur simple, c'est à dire beaucoup plus "piquées" autour de la fréquence de résonance fondamentale, avec une amplitude à la résonance dépendant légèrement de la vitesse en surface.
- Non-linéarité : Il serait intéressant d'effectuer la même démarche vers une fonction correctrice, avec un tri selon les PGA et/ou les magnitudes. Ce type de tri pourrait permettre de mettre en avant les éventuels effets non linéaires.
- Effet 2D : le réseau Kik-net rassemble des sites qui se rapprochent plus ou moins d'un milieu tabulaire idéal de sorte que les spectres calculés représentent un milieu moyen. La part de sites ayant une géométrie 2D ou 3D du substratum n'est pas connue. Ces sites provoquent généralement une amplification plus importante que les sites purement tabulaires. Leur influence devrait donc se retrouver dans la moyenne plus une fois l'écart type des fonctions de transfert moyennes obtenues, ou dans la forme des fonctions d'amplification avec une bande amplifiée plus large. Ainsi pour appliquer la fonction correctrice à des configurations complexes (vallée encaissée) qui amplifient plus, on peut suggérer d'établir la fonction correctrice non plus sur la moyenne des rapports mais sur la moyenne augmentée d'un écart-type.

- Dans le cas des sites sans mesure de vitesse, outre la fonction correctrice basée sur la fréquence de résonance $FCES_{[f_0]}$, on pourrait aussi s'intéresser à l'évolution des rapports de spectres selon la profondeur du forage et la fréquence de résonance.

15. ANNEXES

15.1. Nomenclature

Normaliser : c'est ramener la référence en fond de forage à une référence standard définie par $V_{s30} = 800\text{m/s}$.

Corriger : on parle de rapport de spectres de puits corrigé lorsqu'on effectue la correction de l'effet de surface libre pour se ramener le plus près possible d'un rapport classique de deux enregistrements en surface.

15.2. La méthode SASW

Quelques références utiles: [Anderson et al., 2003], [Kenneth et al., 2004], [Stephenson et al., 2005], [Park et al., 1999], [Malagnini et al., 1995], [Matthews et al., 1996], [Foti et al., 2003]
<http://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/masw.html>,
<http://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/active.html>.

SASW, pour Spectral Analysis of Surface Waves ou Analyse spectral des ondes de surface. La méthode SASW est basée sur la caractéristique dispersive des ondes de Rayleigh. La vitesse des ondes de Rayleigh est définie par les propriétés (V_s , mais aussi V_p et la densité) du sol en sub-surface jusqu'à une profondeur d'approximativement une ou deux fois la longueur d'onde correspondante. Rappelons que plus les longueurs sont grandes plus elles concernent les propriétés du sol en profondeur.

Procédure : La méthode SASW consiste à déterminer la courbe de dispersion des ondes de surface à un site donné et de l'inverser pour obtenir le profil des ondes de cisaillement. La procédure sur le terrain n'est pas décrite en détail ici. Retenons que l'on utilise une source active (par exemple un marteau et une plaque), et des géophones avec une fréquence de coupure assez basse (4.5 Hz par exemple). On additionnera plusieurs coups de marteau pour éliminer le bruit incohérent. Le réseau de capteurs est linéaire, caractérisé par la distance inter-capteur d et la distance maximale D entre les deux capteurs des extrémités. Ces deux longueurs sont reliées aux longueurs d'ondes qui seront analysables, elles-mêmes reliées à la profondeur d'investigation d'une part et à la longueur de résolution d'autre part.

Pour cela, une source active est utilisée pour générer des ondes de surface avec différentes longueurs d'onde qui sont enregistrées par deux capteurs ou plus, à une distance connue. Pour les ondes de Rayleigh on n'utilise que la composante verticale. Les sources sont placées de manière symétrique de chaque côté du profil et ces données sont moyennées dans le but de supprimer le bruit incohérent.

L'analyse des données consiste à repérer visuellement et pointer le début des ondes de surface (on pointe la phase) sur chaque enregistrement filtré autour d'une fréquence donnée. On fait cela pour tous les différents offsets. On a ainsi une courbe de vitesse des ondes de Rayleigh en fonction de la fréquence pour tous les offsets. Ces courbes sont ensuite combinées pour définir ainsi la courbe de dispersion. Cette courbe est alors inversée. L'inversion se fait de la même manière que la courbe de dispersion définie par les mesures de bruit de fond en réseau (logiciel SESARRAY, module dinver).

15.3. Bruit de fond

15.3.1. Fonction de transfert des modèles

15.3.1.1. Fonction de transfert numérique des modèles

Rappelons que la finalité de cette thèse est d'estimer l'effet de site. Nous avons choisi de ne garder que la vitesse moyenne et la fréquence de résonance pour estimer cet effet de site. C'est le sujet du chapitre II. Cependant, une alternative peut être de déterminer à partir des profils V_s l'effet de site. Ce cas serait possible si le profil de vitesse est entièrement déterminé jusqu'au substratum rocheux. A posteriori et actuellement, les analyses réseau ne nous permettent pas de définir un tel profil de vitesse.

Cependant il est toujours intéressant de savoir quelle est la réponse des modèles de sol, décrits au paragraphe 2.2, à une sollicitation et quelle l'influence d'une variation de vitesse sur cette réponse.

Tout d'abord notons que dans un cas tabulaire la fréquence de résonance f_0 est liée à V_s , la vitesse moyenne des ondes S sur l'ensemble de la couche qui entre en résonance, et h , l'épaisseur de cette couche, par la relation $f_0 = V_s/4h$. A partir de cette relation, si h augmente de $x\%$, avec V_s constant, alors f devrait diminuer de $\{1 - [1/(1+x/100)]\} * 100$. Et si V augmente de $y\%$, avec h constante, alors f devrait augmenter de $y\%$.

Ensuite dans un cas tabulaire à une dimension, l'amplification est définie par :

$A_0 = C / (1 + 0.5\pi\zeta_1 C)$, avec $C =$ contraste d'impédance. De même si le contraste d'impédance varie de $x\%$, l'amplification varie dans le même sens.

Pour connaître observer cet effet nous allons déterminer la fonction de transfert numérique pour chaque site. Pour cela nous utilisons un calcul numérique qui détermine la réponse d'une couche de sol à une onde SH dans un cas unidimensionnel. Les hypothèses utilisées sont détaillées en annexe au paragraphe 15.4.1.1. Cette modélisation nous permet de définir la fréquence de résonance et l'amplitude correspondante de ces modèles synthétiques. Les paramètres de fréquence de résonance f_0 et d'amplitude A_0 ainsi définis, sont notés sur les deux dernières colonnes du Tableau 1. Notons que la réponse SH prend en compte l'effet de surface libre et qu'on doit diviser A_0 par deux si on veut le comparer à une amplification du site par rapport à une référence au rocher.

Du modèle 2.1 au modèle 2.2 seule la vitesse des ondes P augmentent dans la première couche, cela n'influence ni la fréquence de résonance, ni l'amplification du premier pic (voir Tableau 1 et Figure 171).

Le pourcentage d'augmentation entre deux paramètres (par exemple la vitesse) est calculé selon la formule : $P(\%) = (V_i - V_j) * 200 / (V_i + V_j)$, avec V la vitesse, i et j correspondant à un site différent. Il en est de même pour les autres caractéristiques d'épaisseur et de contraste d'impédance.

Du modèle 10.2a au modèle 10.2b seule la vitesse des ondes S augmente dans la deuxième couche de 62 % et dans le substratum de 40%.

Les contrastes d'impédance entre la 1^{ère} et la 2^{ème} couche, $V_2 \rho_2 / V_1 \rho_1$, (avec V la vitesse des ondes S et ρ la densité) est de 1.32 pour M10.2a, et de 2.5 pour M10.2b. Les contrastes d'impédance entre la 2^{ème} couche et le substratum, $V_{sub} \rho_{sub} / V_2 \rho_2$, est de 4 pour M10.2a, et de 3.2 pour M10.2b, soit 23% de différence entre les deux modèles. La fréquence de résonance est alors légèrement plus élevée, passant de 2.1 Hz à 2.9 Hz de M10.2a à M10.2b (32%). L'amplitude

augmente de 35% passant de 8.6 à 12.3. Une augmentation est attendue puisque pour des cas simples à une dimension l'amplification est directement liée au contraste d'impédance (voir Tableau 1 et Figure 171). On remarque que l'amplification augmente d'un modèle à l'autre d'un pourcentage du même ordre de grandeur que le contraste d'impédance avec le substratum.

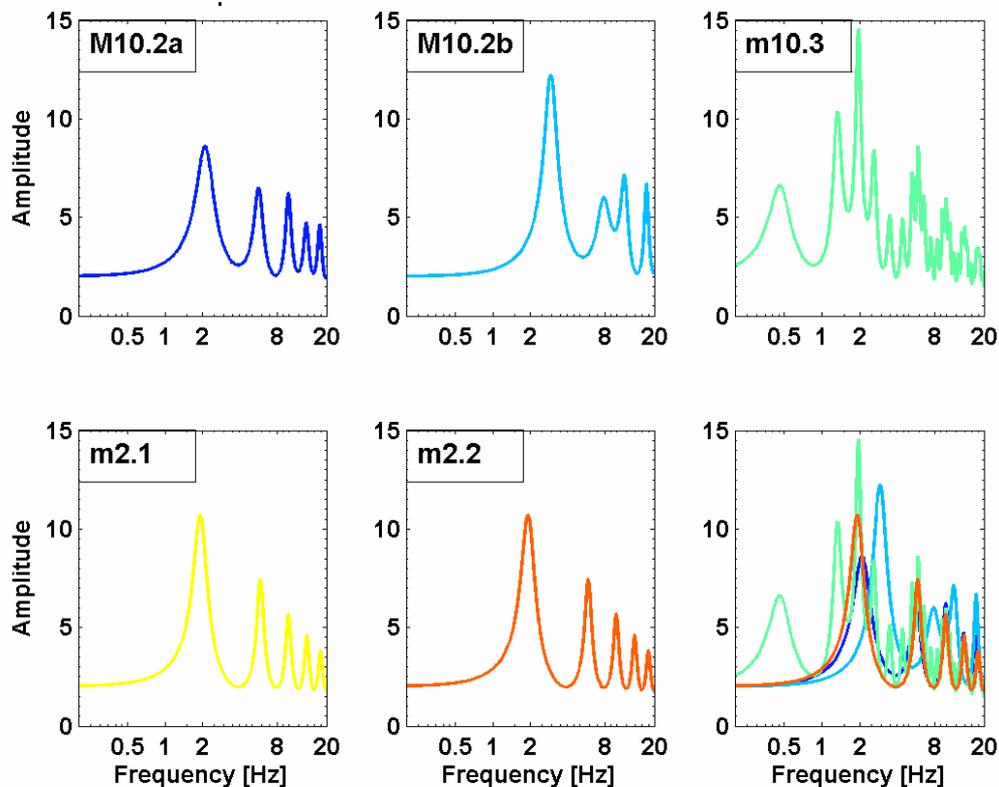


Figure 171: Fonction de transfert définie par la réponse à une onde SH pour les cinq sites test. En bas à droite toutes les réponses SH sont représentées sur un même graphique

Comme les modèles présentés ici ne balayent que peu de possibilités de comparaison, il est intéressant de réaliser d'autres variations des paramètres de vitesse et d'épaisseur.

15.3.1.2. Influence de variations de vitesses et d'épaisseurs sur la réponse du modèle M2.1

Dans un cas tabulaire, le profil de vitesse des ondes S définit la fréquence de résonance et l'amplification, f_0 et A_0 , grâce à la réponse à une onde SH, caractérisant l'effet de site. Pour avoir une idée de l'influence d'une mauvaise interprétation de Vs sur ces caractéristiques de l'effet de site, quelques tests de variabilité ont été réalisés sur le modèle M2.1.

Les paramètres d'épaisseur et de vitesse ont été perturbés pour ces tests. Ces perturbations sont des erreurs imposées à ces paramètres, calculées en pourcentage par rapport au modèle initial M2.1. La Tableau 16 et la Figure 172 nous présentent les modèles et les réponses SH associées. Nous savons, dans le calcul 1D de la réponse SH, que la fréquence fondamentale est contrôlée par l'épaisseur de sédiment la plus grande et que l'amplitude est contrôlée par la différence de contraste. La relation $f_0 = V_s/4h$ nous permet d'estimer le pourcentage d'erreur sur f_0 . Les études paramétriques nous permettent d'estimer le pourcentage d'erreur sur les caractéristiques f_0 et A_0 par rapport au modèle initial M2.1, résultant de l'erreur imposée aux paramètres du profil de vitesse. De plus le calcul de la réponse à une onde SH permet la visualisation de ces erreurs. Les pourcentages d'erreur résultant sont estimés par : $Pr(\%) = 100 \cdot (V_0 - V_{mod})/V_0$, par exemple pour la vitesse V_0 du modèle initial M2.1 et V_{mod} du modèle modifié.

15.3.1.2.1. *Variation de la profondeur, notée h*

La profondeur est augmentée de 15% et de 30%, les valeurs sont décrites sur le Tableau 16. Dans ces cas, seule la valeur de la fréquence de résonance varie de 10% et 32%. La relation $f_0=Vs/4h$ n'est pas exactement vérifiée. Nous retiendrons que l'erreur imposée sur la profondeur implique une erreur du même ordre de grandeur sur la fréquence de résonance et cependant l'amplification reste la même.

15.3.1.2.2. *Variation de la vitesse des ondes S notée, v*

La vitesse des ondes S est augmentée de 15% et de 30% sur les deux couches puis de 15% et 30% sur la couche supérieure seulement, ce qui revient à augmenter le contraste entre les deux couches. Les valeurs sont décrites sur le Tableau 16.

De la même façon, l'erreur sur la vitesse du modèle, en conservant un même contraste d'impédance, implique une erreur du même ordre de grandeur sur la fréquence de résonance f_0 et très peu d'erreur sur l'amplification A_0 .

15.3.1.2.3. *Variation du contraste des ondes S, noté c*

Le contraste est diminué de 15% et 30% en faisant uniquement varier la vitesse des sédiments. L'erreur sur le contraste d'impédance implique une erreur du même ordre de grandeur sur la fréquence de résonance, ce qui est en accord avec la relation $f_0=Vs/4h$.

L'erreur sur l'amplification est environ deux fois plus petite que l'erreur imposée sur le contraste. Cette remarque est valable avec les modèles M10.2a et M10.2b dont le contraste d'impédance au substratum diminue de 21 % impliquant une différence de f_0 de 32% et d'amplification A_0 de 43%.

15.3.1.2.4. *Variations combinées de l'épaisseur h, la vitesse des ondes S, v et le contraste d'impédance, s : notées hv et hc*

Une combinaison de variation sur les paramètres d'épaisseur et de vitesse peut impliquer une erreur plus grande ou une erreur réduite selon si les effets s'opposent ou s'ajoutent. Par exemple, la fréquence de résonance f_0 dans un cas 1D est liée à Vs et h par $f_0=Vs/4h$, si Vs augmente et h aussi les effets sur f_0 vont s'annuler. C'est le cas du modèle M21_hv+ où l'on retrouve une fréquence de résonance très proche du modèle initial malgré une variation de 30% de la vitesse et de l'épaisseur. Par contre si h diminue et que Vs augmente, les effets vont s'ajouter. C'est le cas du modèle M21_hv-+ où il y a une variation 89 % de la fréquence et très peu de changement de l'amplification qui est liée au contraste.

La combinaison d'une variation d'épaisseur et de contraste implique une variation sur la fréquence si les effets s'ajoutent, et pas de variation si les effets s'annulent. Par contre l'amplification varie du même ordre de grandeur divisé par deux que la variation du contraste.

15.3.1.2.5. *Conclusion*

Pour conclure, cette étude rapide pour un modèle simple d'une couche sur un substratum, montre que :

- Si seule l'épaisseur augmente alors f_0 diminue du même ordre de grandeur et A_0 est stable.
- Si seule la vitesse de la 1^{ère} couche augmente alors f_0 augmente du même ordre de grandeur et A_0 varie environ 5 fois moins.
- Si le contraste d'impédance diminue alors f_0 augmente du même ordre de grandeur et A_0 diminue environ 2 fois moins.
- Une combinaison des variations des paramètres agira différemment selon si les effets s'additionnent ou s'annulent

En bref : une erreur sur le profil de vitesse implique une erreur du même ordre de grandeur sur la fréquence fondamentale et une erreur moitié moins grande pour l'amplification A_0 dans un

cas tabulaire d'une couche sur un socle rocheux. Ces observations sont valables pour des cas très simples, pour avoir une conclusion valable sur d'autres cas il faudrait faire une étude paramétrique complète.

Tableau 16: Caractéristiques du modèle M2.1 avec des variations de paramètres de 15% (noté +) et 30% (noté ++). Les noms des modèles sont choisis selon leur variation en épaisseur (h), en contraste d'impédance (c) ou en vitesse (v).

Nom du modèle	Nombre de formation	Épaisseurs [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	? [g /cm ³]	f ₀ [Hz]	A ₀	Différence de f ₀ par rapport à M2.1 [%]	Différence de A ₀ par rapport à M2.1 [%]
M2.1	2	25	500 2000	200 1000	1.9 2.5	2	10. 7	0	0
M21_h+	2	28.75	500 2000	200 1000	1.9 2.5	1.4	10. 7	10.5	0
M21_h++	2	32.5	500 2000	200 1000	1.9 2.5	1.54	10. 7	32	0
M21_v+	2	25	500 2000	230 1150	1.9 2.5	2.3	11	-16	-3
M21_v++	2	25	500 2000	260 1300	1.9 2.5	2.6	11. 2	-32	-5
M21_hv+	2	32.5	500 2000	260 1300	1.9 2.5	2	11. 2	-2	-5
M21_hv++	2	17.5	500 2000	260 1300	1.9 2.5	3.71	11. 1	-89.5	-4
M21_c+	2	25	500 2000	230 1000	1.9 2.5	2.3	9.8	-16	8.4
M21_c++	2	25	500 2000	260 1000	1.9 2.5	2.6	8.9	-32	17
M21_hc++	2	32.5	500 2000	260 1000	1.9 2.5	2	8.9	0	17

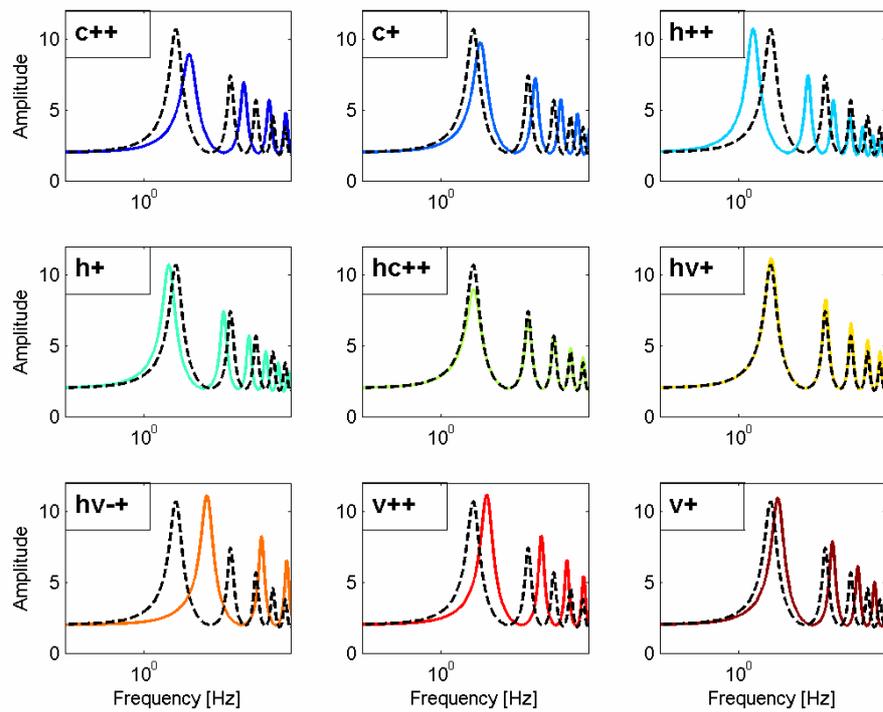


Figure 172: Fonction de transfert définie par la réponse à une onde SH pour le modèle M2.1 avec des variations sur h : l'épaisseur, v : la vitesse des ondes S et c : le contraste d'impédance. En pointillés noirs, réponse SH du modèle initial M2.1 sans variation des paramètres.

15.3.2. Inversion des courbes de dispersion théoriques

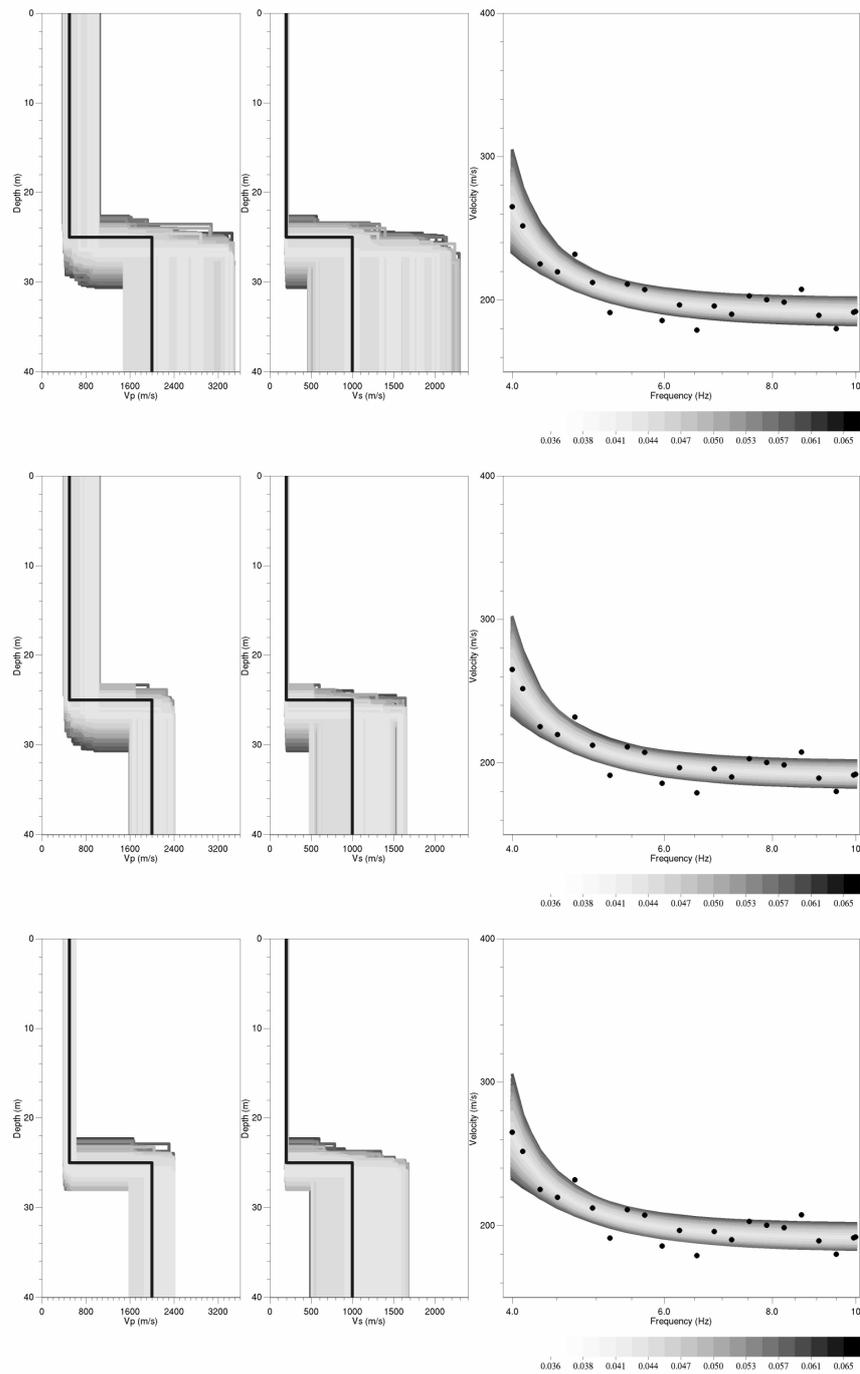


Figure 173: Modèle M2.1, inversion de la courbe de dispersion par calcul direct, bruitée, définie de 4 à 10 Hz. Observation de la contrainte sur le profil Vp, de haut en bas : sans contrainte, avec Vp contraint au substratum, avec Vp contraint sur tout le profil. Sélection des modèles avec une erreur inférieure à 0.6

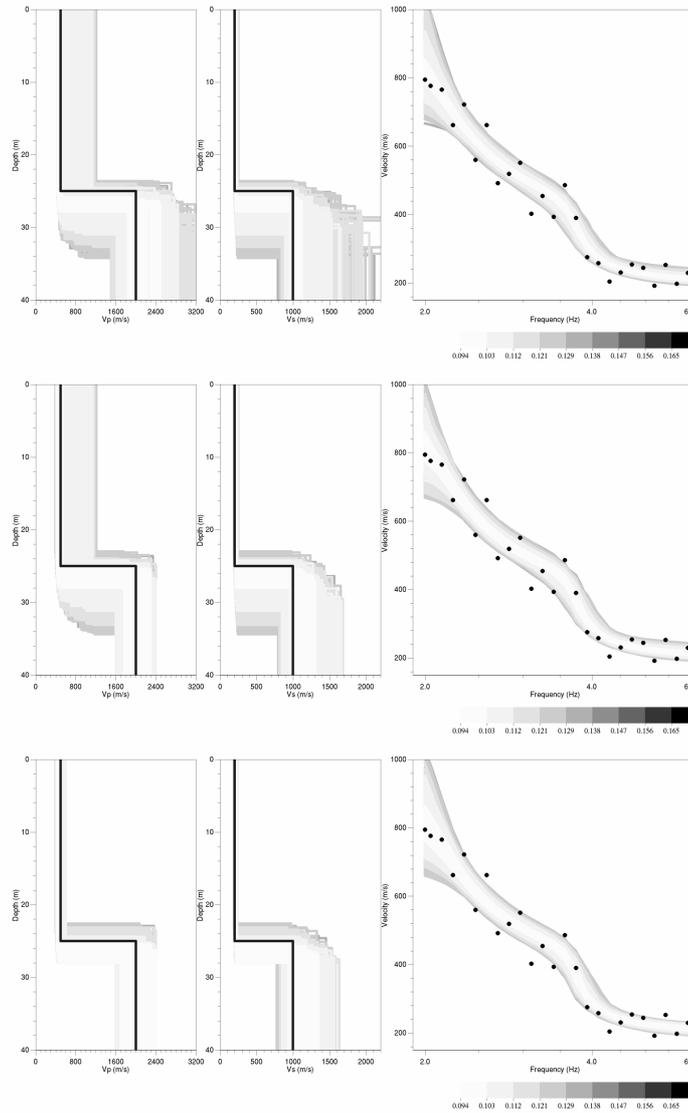


Figure 174: Modèle M2.1, inversion de la courbe de dispersion par calcul direct, bruitée, définie de 2 à 6 Hz. Observation de la contrainte sur le profil Vp, de haut en bas : sans contrainte, avec Vp contraint au substratum, avec Vp contraint sur tout le profil. Sélection des modèles avec une erreur inférieure à 0.13

15.3.3. Inversion des courbes de dispersion estimée à partir de bruit de fond synthétique, par l'analyse FK

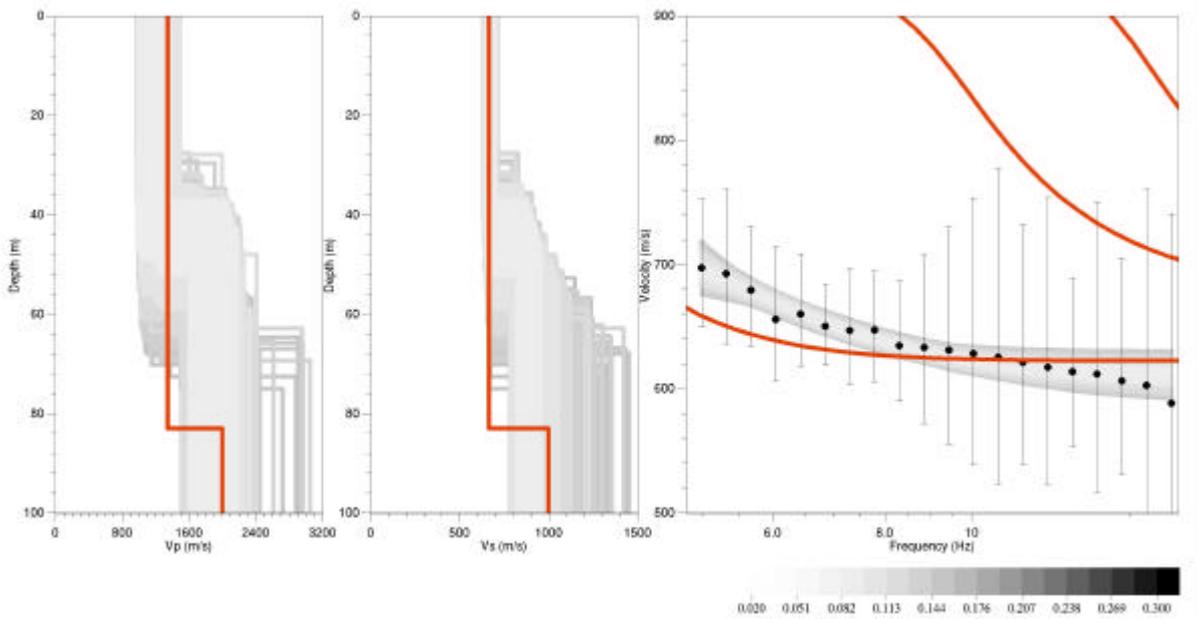


Figure 175: Inversion de la courbe de dispersion estimée avec FK pour le modèle M2.3, modèles après inversion avec une erreur inférieure à 0.15 en gris, $640 < Vs_0 < 710$ m/s, modèle numérique en rouge

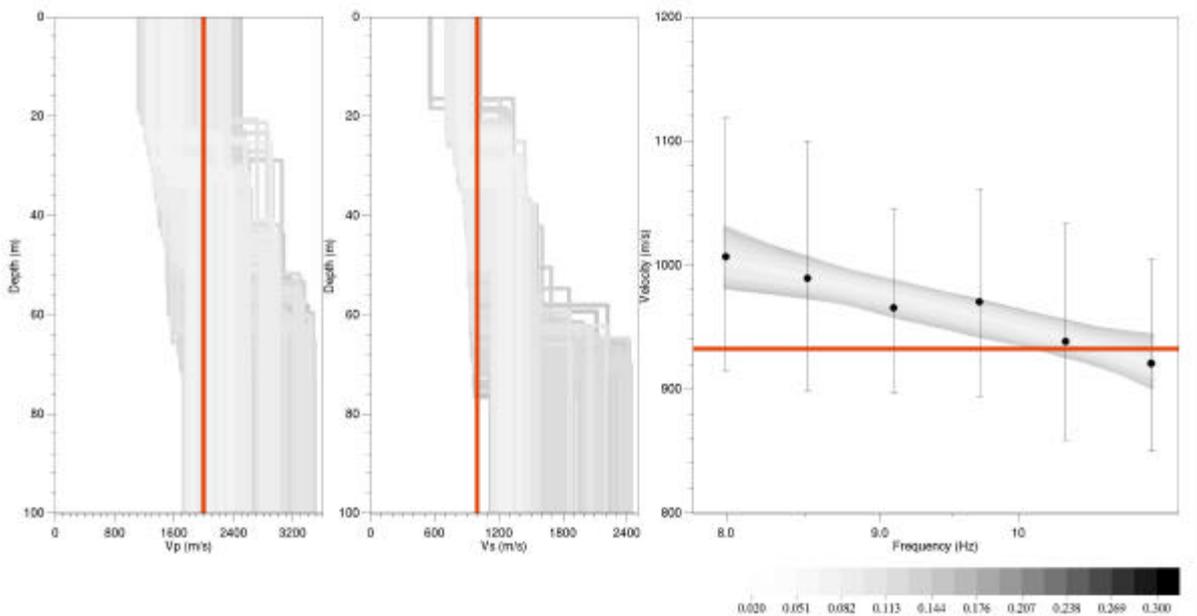


Figure 176: Inversion de la courbe de dispersion estimée avec FK pour le modèle M01, modèles après inversion avec une erreur inférieure à 0.15, $760 < Vs_0 < 1050$ m/s, modèle numérique en rouge

15.3.4. Inversion des courbes d'autocorrélation estimée à partir de bruit de fond synthétique, par l'analyse SPAC

Après quelques observations il apparaît plus judicieux d'inverser l'ensemble des courbes d'autocorrélation obtenues plutôt que de les inverser réseau par réseau, ainsi une plus large bande de fréquence est déterminée.

Pour inverser les courbes d'autocorrélation, le logiciel *na_viewer* est utilisé. Il a été développé dans le cadre du projet SESAME. L'inversion donne directement les profils en ondes S et P. Puis un calcul direct est effectué pour avoir les courbes de dispersion des modèles qui sont représentées par une échelle de couleur correspondant à la valeur de l'erreur.

15.3.4.1. Modèle M21

Les courbes d'autocorrélation ont été estimées sur 10 anneaux différents en comptabilisant les 3 réseaux, elles sont inversées avec un espace des paramètres initial à deux couches.

Les paramètres du modèle M2.1 sont compris dans cet espace initial. Les résultats représentés sur la Figure 177, montrent des courbes d'autocorrélation (graphiques d1 à d10, courbes en niveau de gris) bien modélisées pour chaque gamme de rayons. L'estimation du profil de vitesse est bonne en surface. Par contre l'estimation de la vitesse au substratum et de l'épaisseur des couches est très peu précise. En effet il y a une grande variation (Figure 177 graphiques a et b) des valeurs possibles sur l'ensemble des modèles sélectionnés avec une erreur inférieure à 0.5. Les courbes de dispersion théoriques des profils obtenus par l'inversion de SPAC sont estimées entre 1.55 et 5.6 Hz. Elles s'ajustent bien avec la courbe de dispersion théorique du modèle M2.1 ((Figure 177 graphique c).

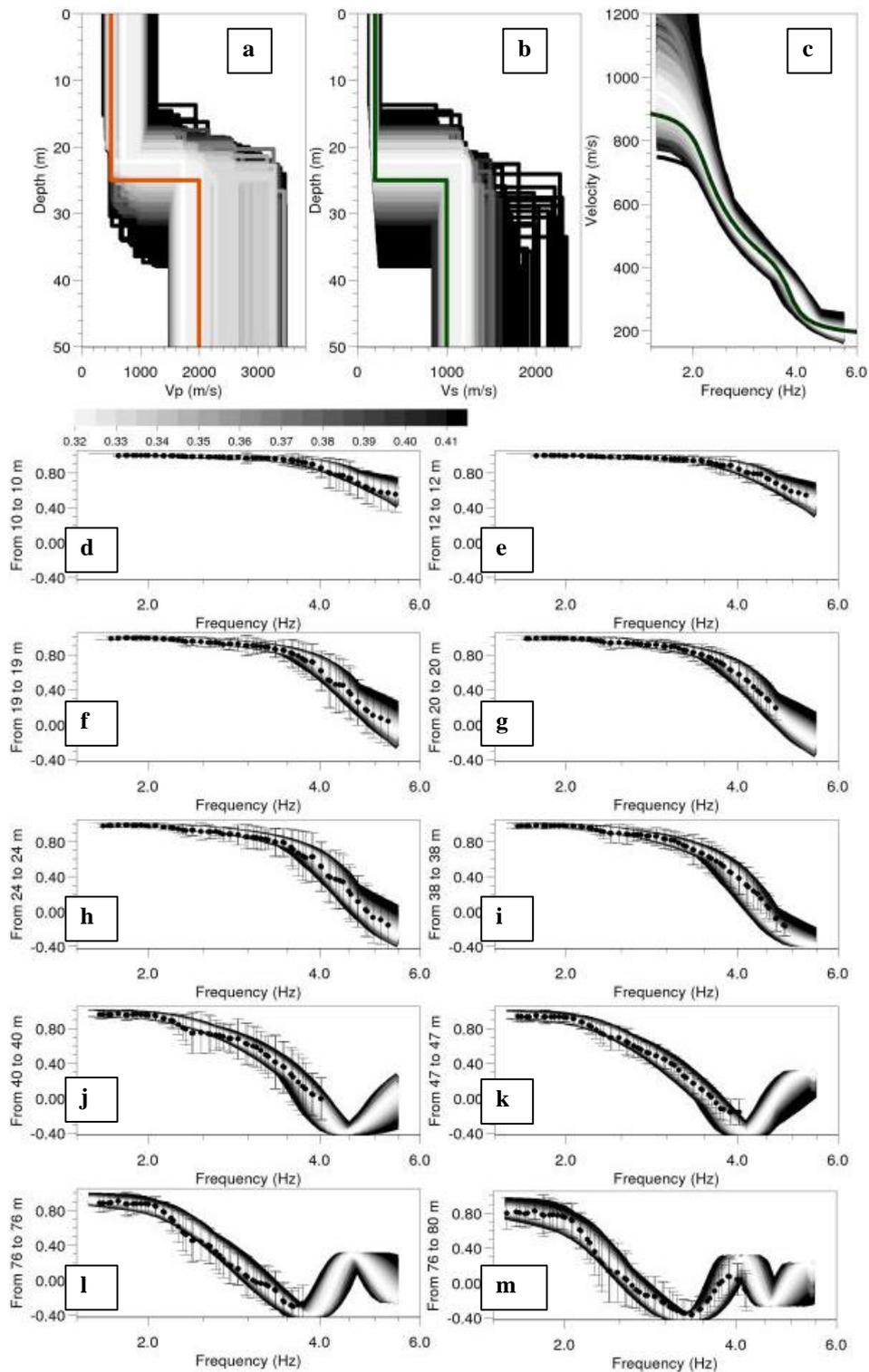


Figure 177: Inversion des courbes SPAC, modèle M2.1, a) : profils des modèles de vitesse des ondes P selon la valeur de l'erreur en niveau de gris, b) : profils des modèles de vitesse des ondes S selon la valeur de l'erreur en niveau de gris, c) Courbe de dispersion des modèles selon la valeur de l'erreur en niveau de gris, courbe de dispersion théorique en vert, d à m) Courbes d'autocorrélation pour différents rayons indiqués en ordonnée (points noirs : calcul SPAC, niveau de gris : modèles sélectionnés)

15.3.4.2. Modèle M23

Les courbes d'autocorrélation ont été estimées sur 8 anneaux différents de 10 à 47 mètres de rayon moyen, elles sont inversées avec un espace des paramètres initial à deux couches qui comprend les paramètres du modèle M2.3.

Les remarques faites pour le modèle M2.1 sont valables ici sauf pour la courbe de dispersion des profils résultants de SPAC qui est surestimée en dessous de 2.8 Hz.

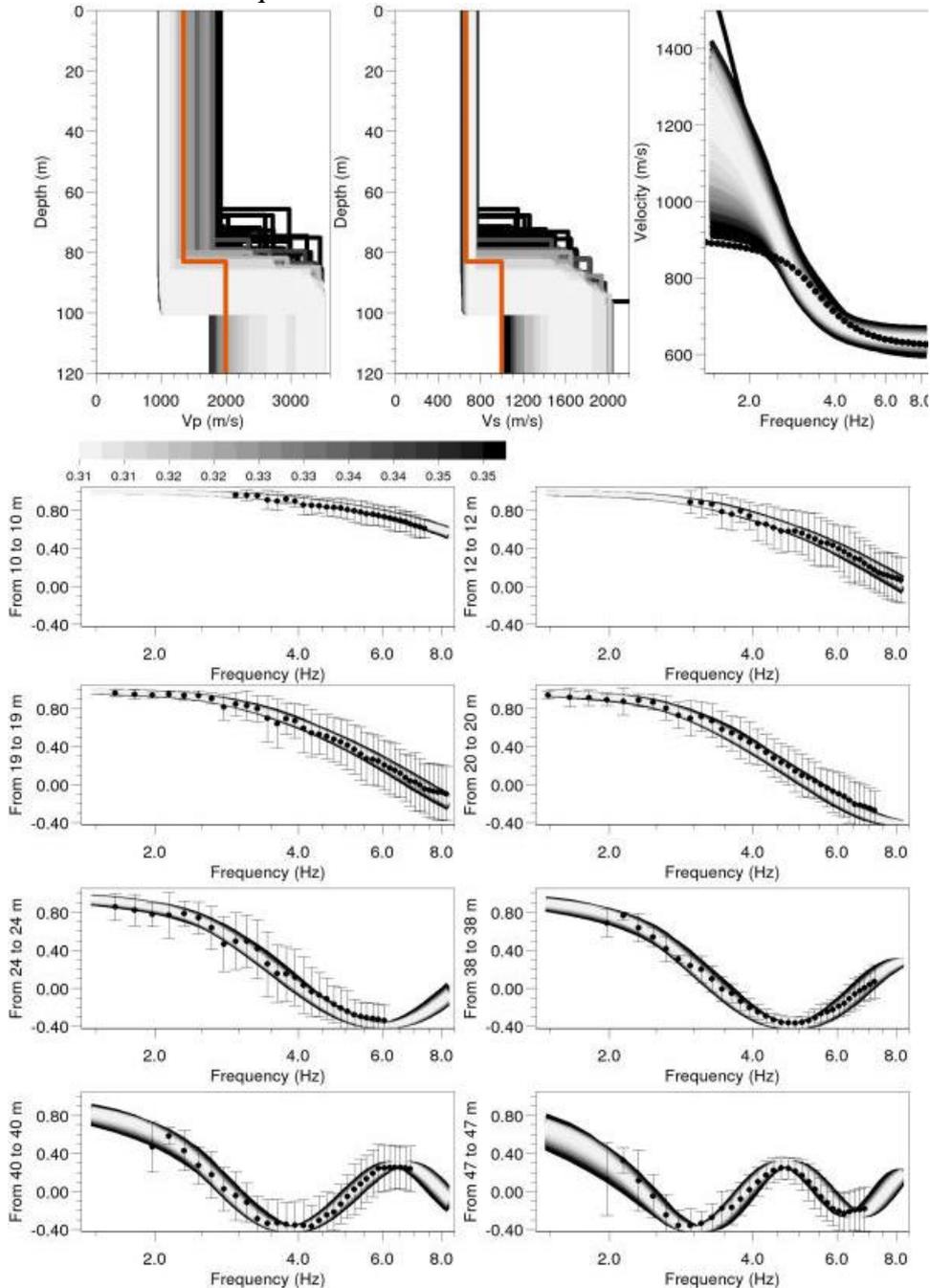


Figure 178: Inversion des courbes SPAC, modèle M2.3 a) : profils des modèles de vitesse des ondes P selon la valeur de l'erreur en niveau de gris, b) : profils des modèles de vitesse des ondes S selon la valeur de l'erreur en niveau de gris, c) Courbe de dispersion des modèles selon la valeur de l'erreur en niveau de gris, courbe de dispersion théorique en vert, d à m) Courbes d'autocorrélation pour différents rayons indiqués en ordonnée (points noirs : calcul SPAC, niveau de gris : modèles sélectionnés)

15.3.4.3. Modèle M01

Neuf courbes SPAC ont été estimées sur neuf anneaux de 10 à 76 mètres, deux inversions vont être testées avec deux espaces de paramètres initiaux différents, un avec une couche en surface l'autre représentant un demi-espace homogène.

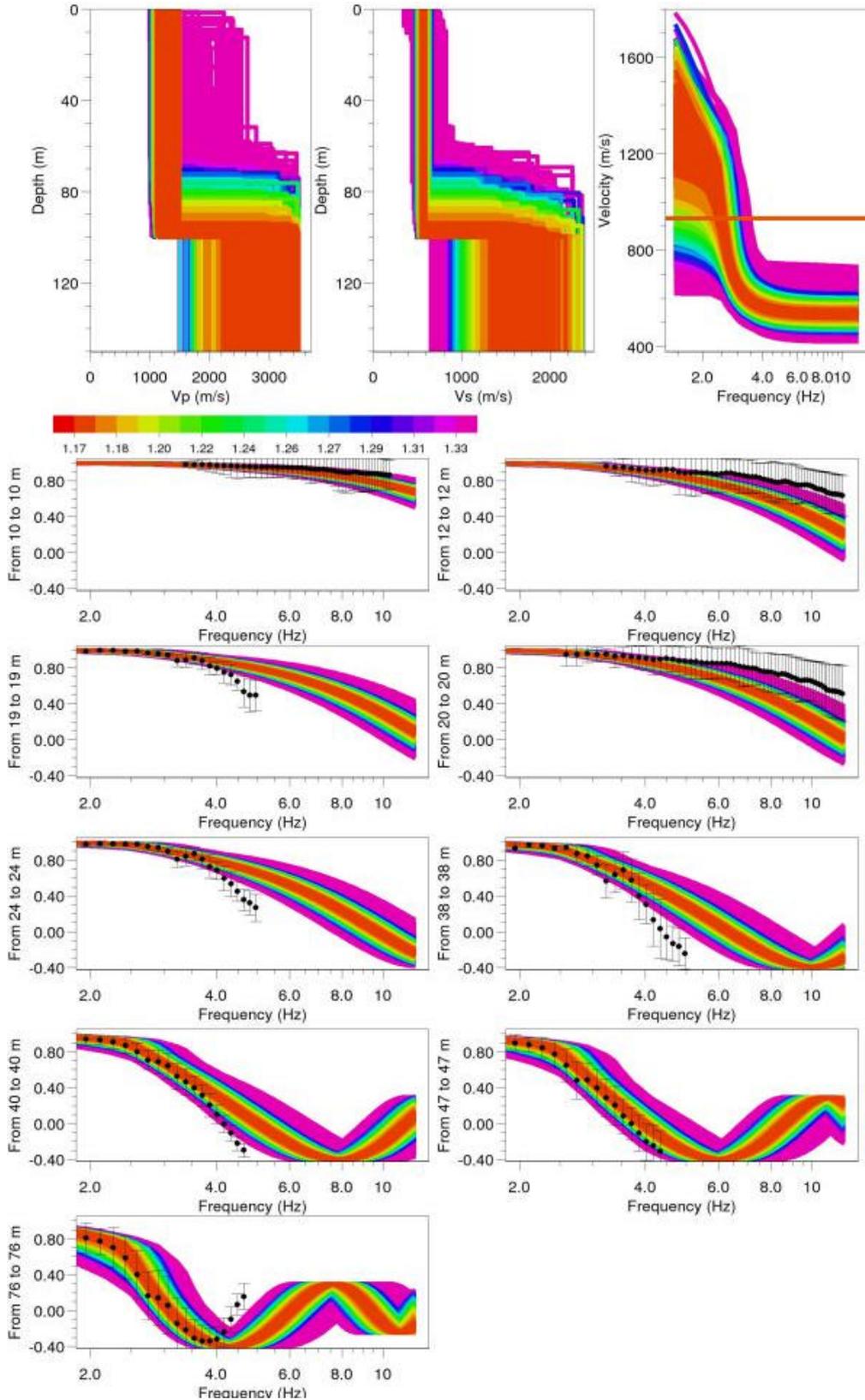


Figure 179: Inversion des courbes d'autocorrélation, paramètres initiaux à 2 couches, modèle M01

Ce cas est plus délicat. En effet dans l'hypothèse d'un manque d'information sur le site on peut penser qu'il y a soit une couche de rocher altéré en surface, soit une couche de dépôt, dans ces cas de figure l'espace des paramètres choisi est un « deux-formations » (Figure 179). L'inversion trouve alors des modèles qui sont loin du modèle de départ ($V_s=1000$ m/s et $V_p=2000$ m/s) et la courbe de dispersion correspondante s'éloigne d'autant plus de la vitesse des ondes de Rayleigh, non dispersive dans ce cas là (trait horizontal rouge sur la Figure 179). Cependant la valeur d'erreur est très élevée et on voit d'ailleurs que les modèles des courbes SPAC s'ajustent mal aux courbes SPAC calculées, ce qui peut nous alerter sur le bien fondé des profils de vitesse obtenus.

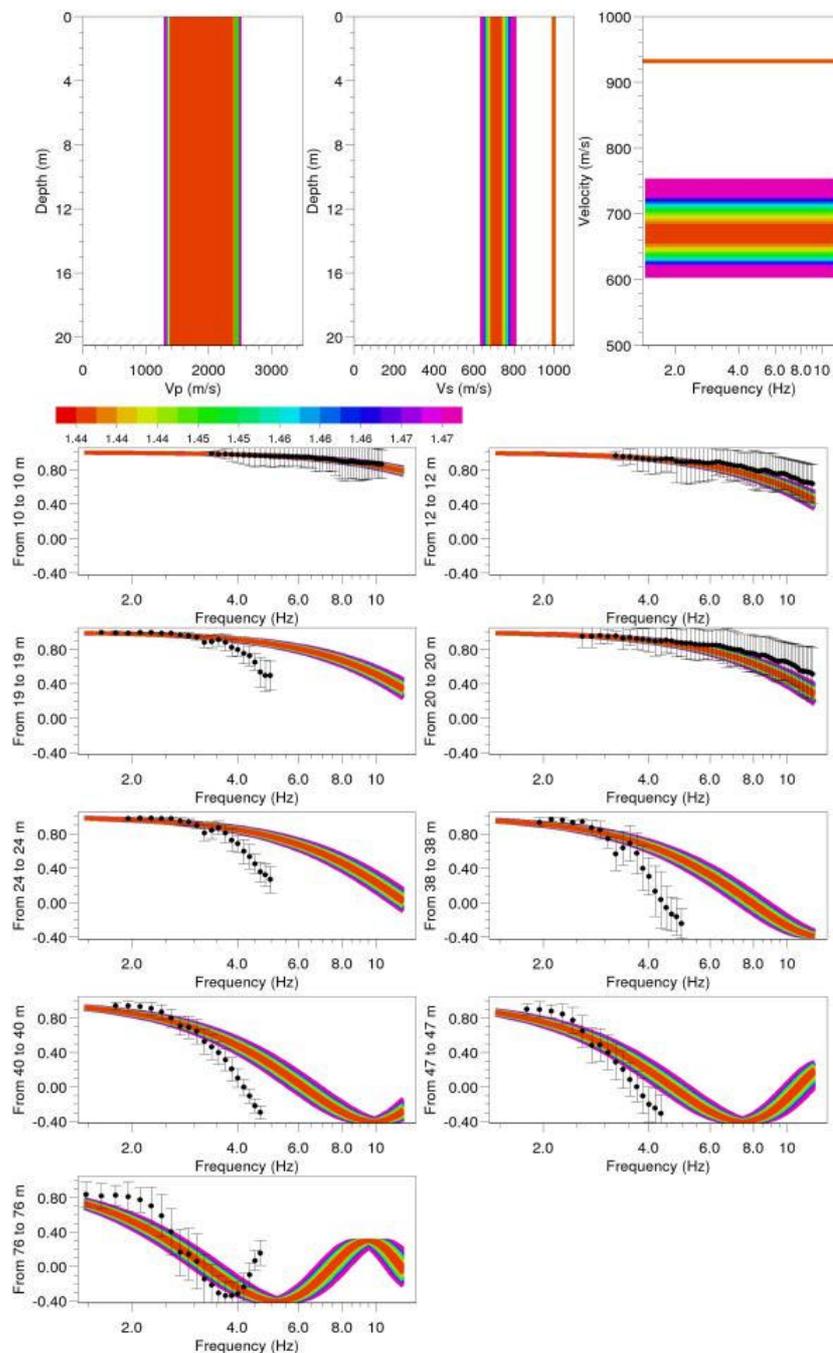


Figure 180: Inversion des courbes SPAC, paramètres initiaux à 1 couche, modèle M01

Le 2^{ème} cas de figure intègre la connaissance du site comme étant un rocher sain. Sur du rocher sain, on impose alors un modèle à une seule formation homogène et on obtient des

résultats très éloignés du modèle canonique, voir Figure 180. Cependant étant donné la valeur de l'erreur et le mauvais ajustement des courbes d'autocorrélation (en couleurs) aux courbes calculées par SPAC (points noirs) qui est visible à l'œil, les résultats ne seront pas pris en compte dans un cas d'étude classique. La méthode SPAC ne semble pas adaptée pour des sites au rocher. L'inversion est discutable ici étant donné le mauvais fit entre les données et les modèles. Attention cette remarque est sous réserve des améliorations faites sur le logiciel inversant les courbes SPAC. Ici on a utilisé l'ancienne version « na_viewer », maintenant le module pour l'inversion est « dinver ».

15.3.4.4. *Modèle M10.2a*

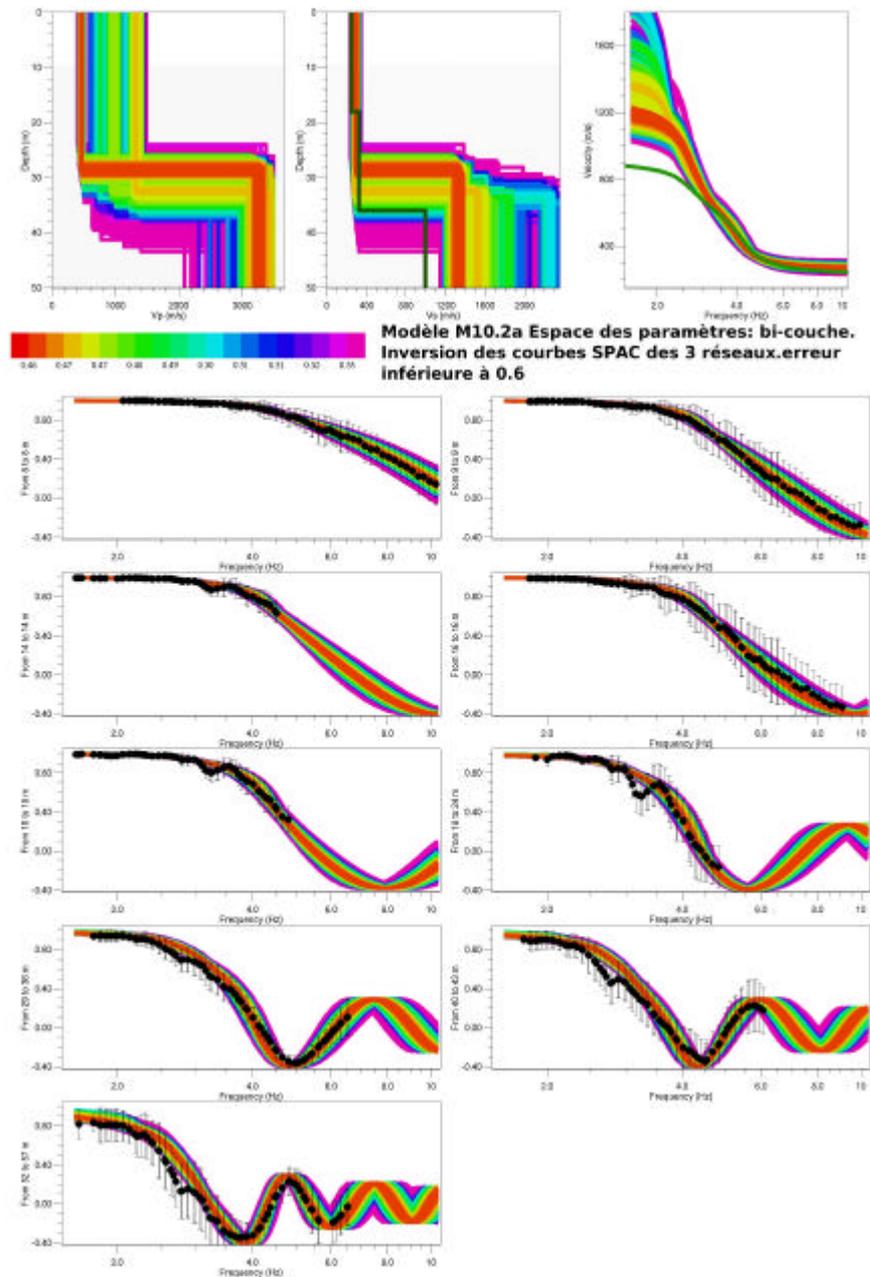


Figure 181: Inversion des courbes SPAC du modèle M10.2a, résultat accepté avec une erreur inférieure à 0.6. La vitesse sur les 10 premiers mètres est bien estimée

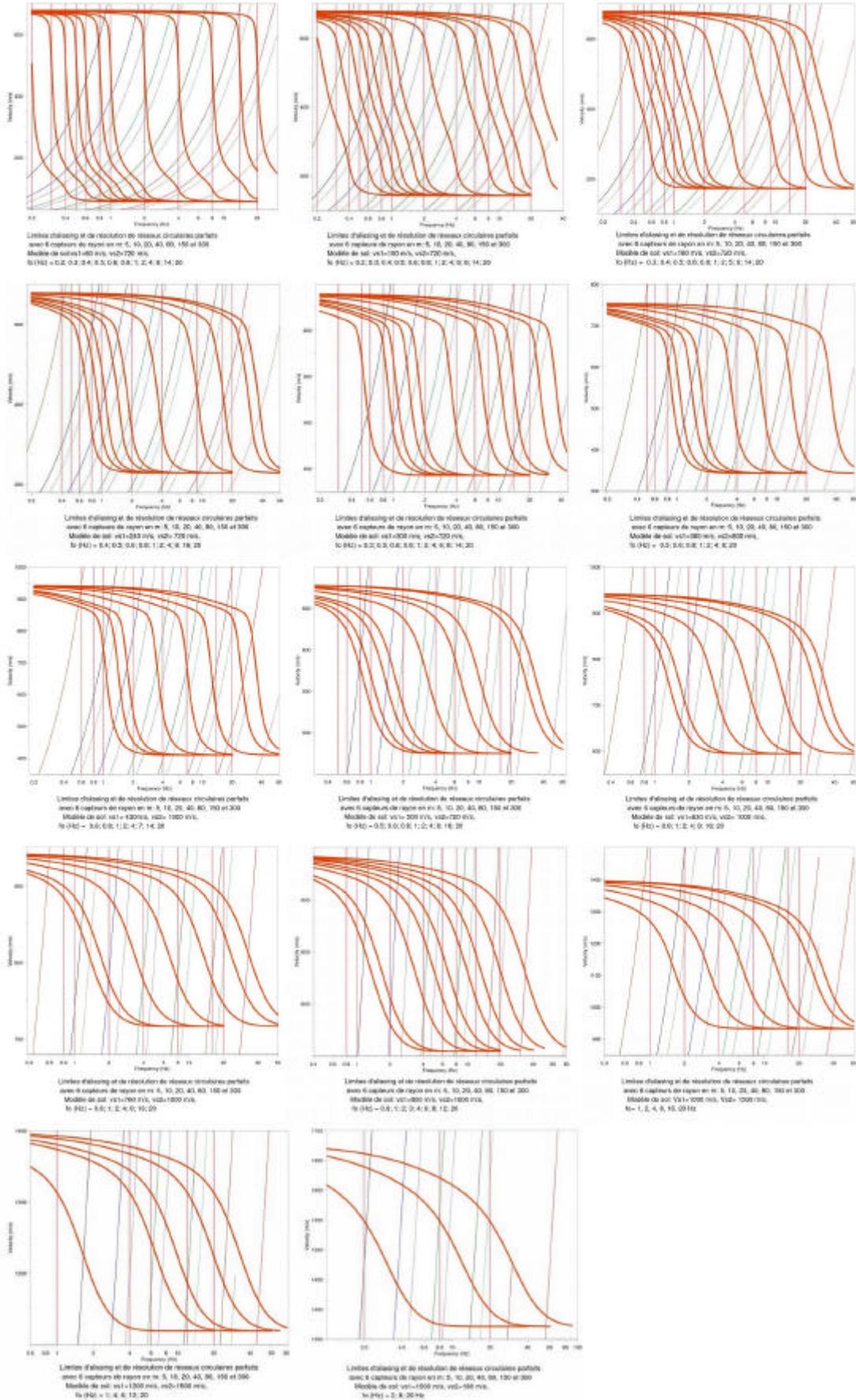
15.3.4.5. *Conclusion*

L'inversion des courbes d'autocorrélation donne un bon ordre de grandeur de la vitesse des ondes S dans la première couche. Par contre l'épaisseur de la couche est souvent mal définie et la vitesse en dessous de cette couche étalée.

L'inversion des courbes SPAC, pour le modèle au rocher testé, donne des résultats faux quel que soit l'espace des paramètres initial. Attention cette remarque est sous-réserve des améliorations faites sur le logiciel inversant les courbes SPAC. Ici on a utilisé l'ancienne version « na_viewer », maintenant le module pour l'inversion est « dinver ».

Les petits réseaux donnent des estimations des courbes d'autocorrélation acceptables. Mais avec ces mêmes réseaux on définit difficilement la courbe de dispersion. Seule l'analyse SPAC est donc utile pour les petits réseaux.

15.3.5. Abaques du protocole



15.4. Données Kik-Net

15.4.1. Les outils

15.4.1.1. La fonction de transfert approximée par la réponse à une onde SH

La fonction de transfert est déterminée par une modélisation à une dimension qui donne la réponse d'une structure tabulaire (horizontalement stratifiée) à une onde plane incidente de type SH dans notre cas. La réponse à une onde plane SH d'incidence nulle est estimée avec la méthode de réflectivité de Kennett, en considérant un milieu plan tabulaire. La modélisation utilise donc les profils de vitesse. Cette fonction de transfert analytique est notée FT. Le programme (*psvld* en fortran réalisé par JC Gariel et P.Y. Bard) utilisé calcule la fonction de transfert à différentes profondeurs. Le calcul a été fait pour la fonction de transfert en surface et à la profondeur du fond de forage. Les principales hypothèses de calcul sont les suivantes, sachant que sous incidence verticale, les paramètres des ondes P n'ont aucun rôle :

- La densité à la profondeur z selon la valeur de V_s à la profondeur z :
 - 1.7 g/cm^3 pour $V_s(z) \leq 180 \text{ m/s}$
 - 2 g/cm^3 pour $180 < V_s(z) \leq 360 \text{ m/s}$
 - 2.2 g/cm^3 pour $360 < V_s(z) < 1500 \text{ m/s}$
 - 2.5 g/cm^3 pour $1500 < V_s(z)$

- Dans le cas (pour les modèles génériques) où on ne dispose que des valeurs de V_s , la vitesse des ondes de compressions V_p est définie selon le coefficient de Poisson moyen ν (Figure 182) estimé sur l'ensemble des profils de Kik-net :
$$V_p = V_s \times \sqrt{\left(\frac{2 * (\nu - 1)}{2\nu - 1} \right)}$$
; pour une profondeur entre 0 et 20 mètres $\nu = 0.4$, de 20 à 500m $\nu = 0.35$, et au-delà de 500m $\nu = 0.3$

- Les facteurs de qualité ont été estimés grossièrement par : $Q_p = V_p/10$ et $Q_s = V_s/10$ (NB: Les facteurs de qualité ne dépendent pas de la fréquence)
- L'amortissement est spécifié à 20Hz
- On considère une onde SH, verticalement incidente
- on calcule la TF pour 2048 valeurs de fréquence régulièrement espacées de 0 à 25 Hz
- Dans un premier temps on considère que le forage atteint un « rocher de référence », ça sera la vitesse donnée par le point le plus profond du forage.
- On calcule aussi la réponse en fond de forage, c'est à dire au sommet de la couche représentant le dit « rocher de référence »

Dans le cas d'une couche uniforme élastique et isotrope sur un substratum rigide et indéformable, avec une sollicitation d'ondes SH d'incidence verticale la solution de l'équation se simplifie sous la forme : $u(z, t) = 2 A \cos(kz) e^{i\omega t}$ [2] qui représente la somme de l'onde montante et de l'onde descendante, avec $k = \omega/V$ le nombre d'onde et V la vitesse des ondes.

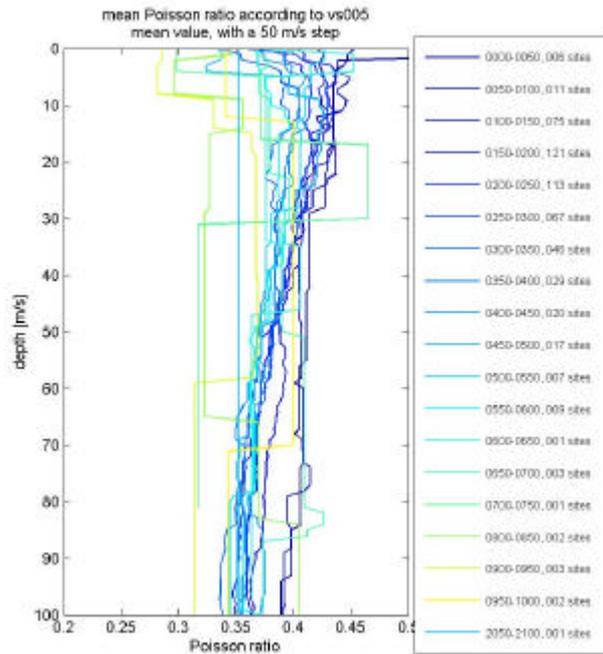


Figure 182 : Coefficient de Poisson moyen sur différents profils de vitesse caractérisés par Vs05, l'échelle de couleur correspond à la gamme de Vs05, pour chaque gamme il est noté le nombre de sites utilisés pour le calcul de la moyenne de la gamme concernée.

15.4.1.2. *Le spectre de Fourier et le rapport de ces spectres : Standard Spectral Ratio (SSR)*

La moyenne logarithmique sur l'ensemble des enregistrements des rapports des spectres d'amplitude de Fourier du capteur en surface sur le capteur en fond de forage sera notée SSRbh pour Standard Spectral Ratio Borehole ou « Rapport Standard des Spectres dans le forage ». Ce rapport a été réalisé sur chaque enregistrement selon une procédure type (divers programmes en SAC et fortran par P Gueguen, adaptés et améliorés par H Cadet et E Bertrand) :

- i. Choix des fenêtres temporelles pour le signal (avec la majeure partie de l'énergie du séisme et non pas une sélection précise sur les ondes S) et pour le bruit pour les enregistrements en surface et en profondeur et pour les composantes verticale et horizontales.
- ii. Transformée de Fourier sur ces fenêtres
- iii. Lissage sur les spectres (Konno et Ohmachi avec une constante b de 20)
- iv. Rapport signal sur bruit qui doit être supérieur à 3
- v. Rapport des spectres surface sur profondeur
- vi. Moyenne logarithmique sur plusieurs événements

Il y a donc une sélection préalable sur les enregistrements de fenêtres temporelles qui est un travail non négligeable.

Ce rapport est représentatif de la fonction de transfert qui existe entre le capteur en surface et le capteur en profondeur.

15.4.1.3. *Le spectre de réponse et le Rapport des Spectres de Réponse (RSR)*

Le spectre de réponse élastique est basé sur le principe d'un oscillateur simple à un degré de liberté de pulsation propre ω et de taux d'amortissement ξ . Cet oscillateur est régi par l'équation:

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega\dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = -a(t) \quad [1]$$

Avec $a(t)$ l'accélération du sol ou la sollicitation soumise à l'oscillateur simple, $x(t)$ le déplacement relatif.

Cette équation est résolue par l'intégrale de Duhamel dans le domaine temporel.

Le spectre de réponse est représenté par les valeurs maximales de la réponse à une accélération du sol donnée en fonction de la période propre de l'oscillateur. La valeur du PGA se retrouve à hautes fréquences, c'est-à-dire lorsque la rigidité de l'oscillateur est très grande alors il oscille de la même façon que la sollicitation à sa base. Au contraire, le spectre de Fourier a une asymptote nulle à très haute fréquence. Mais dans les deux cas c'est une approche exclusivement fréquentielle, la répartition de l'énergie dans le temps se traduisant uniquement dans la phase du spectre de Fourier.

Dans notre étude les spectres de réponse sont calculés sur l'ensemble des séismes enregistrés en surface et en fond de forage. Le rapport des spectres de réponse donne l'amplification qui existe entre la surface et le fond de forage, fréquence par fréquence. Cet aspect se rapproche de la fonction de transfert qui existe entre le fond de forage et la surface.

Ce calcul a été réalisé avec un programme en Fortran (réalisé par E Bertrand, modifié par H Cadet) qui calcule les spectres de réponse à partir d'un accélérogramme. Les principales hypothèses sont:

- Taux d'amortissement critique: 0.05
- les spectres sont calculés entre 0.01 s et 5 s avec un pas linéaire de 0.02 s

Il n'y a pas de présélection de fenêtres de bruit et du signal comme dans le calcul SSRbh. C'est donc une méthode beaucoup plus rapide à mettre en œuvre.

15.4.1.4. *Le rapport H/V*

Le rapport horizontal sur vertical des spectres de Fourier de la fenêtre temporelle d'un événement est aussi appelé fonction récepteur. Ce rapport donne une estimation des effets de site sur la base des hypothèses suivantes : l'incidence d'arrivée des ondes sous le site est quasi verticale et la composante verticale est associée à la résonance des ondes P, et les composantes horizontales à celles des ondes S.

La moyenne sur tous les événements d'un site est notée H/Vh_F , F pour Fourier sur les enregistrements en surface. En pratique ce rapport moyen donne la fréquence fondamentale du site, mais cependant ne nous donne pas d'information fiable sur l'amplitude. Ce calcul est effectué avec les mêmes outils utilisés pour le rapport SSRbh (cf. paragraphe 15.4.1.2), en prenant en compte une condition sur le bruit et un lissage Konno-Ohmachi de paramètre $b=20$. Cette fréquence est la même que celle obtenue avec le rapport H/V du bruit de fond [Haghshenas, 2005].

On définit de même le rapport H/Vh_R pour les spectres de réponse avec les mêmes hypothèses de calcul évoquées au paragraphe 15.4.1.3.

15.4.2. Vérifier le profil de vitesse des ondes S : Comparaison SSRbh et FTbh

Liste des sites dont le profil Vs est considéré comme étant fiable :

ABSH02	CHBH14	GIFH26	ISKH06	KMMH13	MYZH12	OKYH01	SZOH38
ABSH03	EHHM01	GIFH28	ISKH07	KMMH14	MYZH13	OKYH02	SZOH39
ABSH04	EHHM03	GIFH29	ISKH08	KMMH15	MYZH14	OKYH03	SZOH40
ABSH05	EHHM05	GNMH07	ISKH09	KMMH16	NARH01	OKYH04	SZOH41
ABSH06	EHHM06	GNMH08	IWTH01	KMMH17	NARH02	OKYH05	TCGH07
ABSH07	EHHM07	GNMH09	IWTH02	KNGH18	NARH03	OKYH06	TCGH08
ABSH08	EHHM08	GNMH10	IWTH03	KNGH20	NARH04	OKYH07	TCGH10
ABSH09	EHHM09	GNMH11	IWTH04	KNGH21	NARH05	OKYH08	TCGH11
ABSH10	EHHM11	HDKH01	IWTH05	KOCH01	NARH06	OKYH09	TCGH12
ABSH11	FKIH02	HDKH02	IWTH07	KOCH02	NARH07	OKYH10	TCGH13
ABSH12	FKIH04	HDKH03	IWTH08	KOCH03	NGNH08	OKYH11	TCGH14
ABSH13	FKIH05	HDKH04	IWTH09	KOCH04	NGNH11	OKYH12	TCGH15
ABSH14	FKIH06	HDKH05	IWTH10	KOCH07	NGNH13	OKYH13	TCGH16
ABSH15	FKIH07	HDKH06	IWTH11	KSRH01	NGNH14	OKYH14	TKCH01
AICH04	FKOH01	HDKH07	IWTH13	KSRH02	NGNH15	OSKH03	TKCH02
AICH05	FKOH02	HRSH01	IWTH14	KSRH03	NGNH16	OSKH04	TKCH03
AICH06	FKOH03	HRSH02	IWTH15	KSRH05	NGNH20	OSMH01	TKCH04
AICH07	FKOH05	HRSH04	IWTH16	KSRH06	NGNH21	OSMH02	TKCH05
AICH08	FKOH06	HRSH05	IWTH17	KSRH08	NGNH22	RMIH04	TKCH06
AICH09	FKOH07	HRSH06	IWTH18	KSRH09	NGNH23	RMIH05	TKCH07
AICH11	FKOH08	HRSH07	IWTH19	KSRH10	NGNH24	SAGH04	TKCH08
AICH12	FKOH09	HRSH08	IWTH20	KYTH01	NGNH25	SAGH05	TKCH10
AICH14	FKSH01	HRSH09	IWTH21	KYTH02	NGNH30	SBSH08	TKCH11
AICH15	FKSH02	HRSH10	IWTH22	KYTH03	NGNH31	SBSH09	TKSH01
AICH18	FKSH03	HRSH11	IWTH23	KYTH04	NGNH32	SIGH01	TKSH02
AICH19	FKSH04	HRSH12	IWTH24	KYTH05	NGNH35	SIGH02	TKSH03
AICH20	FKSH05	HRSH16	IWTH25	KYTH06	NGSH04	SIGH03	TKSH04
AICH21	FKSH06	HYGH01	IWTH27	MIEH01	NGSH05	SIGH04	TKYH12
AICH22	FKSH08	HYGH02	KGSH01	MIEH02	NGSH06	SITH05	TKYH13
AKTH01	FKSH09	HYGH03	KGSH02	MIEH03	NIGH02	SITH06	TTRH01
AKTH02	FKSH10	HYGH04	KGSH04	MIEH04	NIGH03	SITH07	TTRH02
AKTH03	FKSH11	HYGH05	KGSH05	MIEH05	NIGH04	SITH10	TTRH03
AKTH04	FKSH12	HYGH07	KGSH06	MIEH06	NIGH05	SITH11	TTRH04
AKTH05	FKSH13	HYGH08	KGSH07	MIEH07	NIGH06	SMNH01	TTRH05
AKTH06	FKSH14	HYGH09	KGSH10	MIEH08	NIGH07	SMNH02	TTRH06
AKTH08	FKSH16	HYGH10	KGSH11	MIEH09	NIGH08	SMNH03	TTRH07
AKTH09	FKSH17	HYGH11	KGSH12	MIEH10	NIGH09	SMNH04	TYMH01
AKTH10	FKSH18	HYGH12	KGSH13	MYGH01	NIGH10	SMNH05	TYMH04
AKTH11	FKSH19	HYGH13	KGWH02	MYGH02	NIGH11	SMNH06	TYMH05
AKTH12	GIFH03	HYGH14	KGWH03	MYGH03	NIGH13	SMNH07	TYMH06
AKTH14	GIFH04	HYGH15	KGWH04	MYGH04	NIGH14	SMNH08	TYMH07
AKTH15	GIFH05	HYMH02	KKWH05	MYGH05	NIGH15	SMNH09	WKYH01
AKTH16	GIFH07	HYMH03	KKWH07	MYGH06	NIGH16	SMNH10	WKYH02
AKTH17	GIFH08	IBRH11	KKWH08	MYGH07	NIGH17	SMNH11	WKYH03
AKTH19	GIFH09	IBRH12	KKWH11	MYGH08	NIGH18	SMNH12	WKYH04
AOMH01	GIFH10	IBRH13	KKWH12	MYGH09	NIGH19	SMNH13	WKYH05
AOMH03	GIFH11	IBRH14	KKWH13	MYGH10	NMRH01	SMNH14	WKYH06
AOMH05	GIFH12	IBRH15	KKWH15	MYGH11	NMRH02	SMNH15	WKYH07
AOMH06	GIFH13	IBRH16	KMMH01	MYGH12	NMRH03	SMNH16	WKYH08
AOMH08	GIFH14	IBUH01	KMMH02	MYZH01	NMRH04	SRCH01	WKYH09
AOMH09	GIFH15	IBUH02	KMMH03	MYZH02	NMRH05	SRCH02	WKYH10
AOMH10	GIFH16	IBUH03	KMMH04	MYZH03	OITH01	SRCH03	YMGH01
AOMH11	GIFH17	IBUH04	KMMH05	MYZH04	OITH02	SRCH04	YMGH02
AOMH12	GIFH19	IBUH05	KMMH06	MYZH05	OITH03	SRCH05	YMGH03
AOMH13	GIFH20	IBUH06	KMMH07	MYZH06	OITH04	SRCH06	YMGH04
AOMH14	GIFH21	IBUH07	KMMH08	MYZH07	OITH06	SRCH07	YMGH05
AOMH15	GIFH22	IKRH01	KMMH09	MYZH08	OITH07	SRCH08	YMGH06
AOMH16	GIFH23	IKRH02	KMMH10	MYZH09	OITH08	SRCH09	YMGH07
AOMH17	GIFH24	IKRH03	KMMH11	MYZH10	OITH10	SRCH10	YMGH08
AOMH18	GIFH25	ISKH01	KMMH12	MYZH11	OITH11	SZOH35	YMGH09

YMGH10	YMTH03	YMTH07	YMTH10	YMTH13
YMNH11	YMTH05	YMTH08	YMTH11	YMTH14
YMNH14	YMTH06	YMTH09	YMTH12	YMTH15

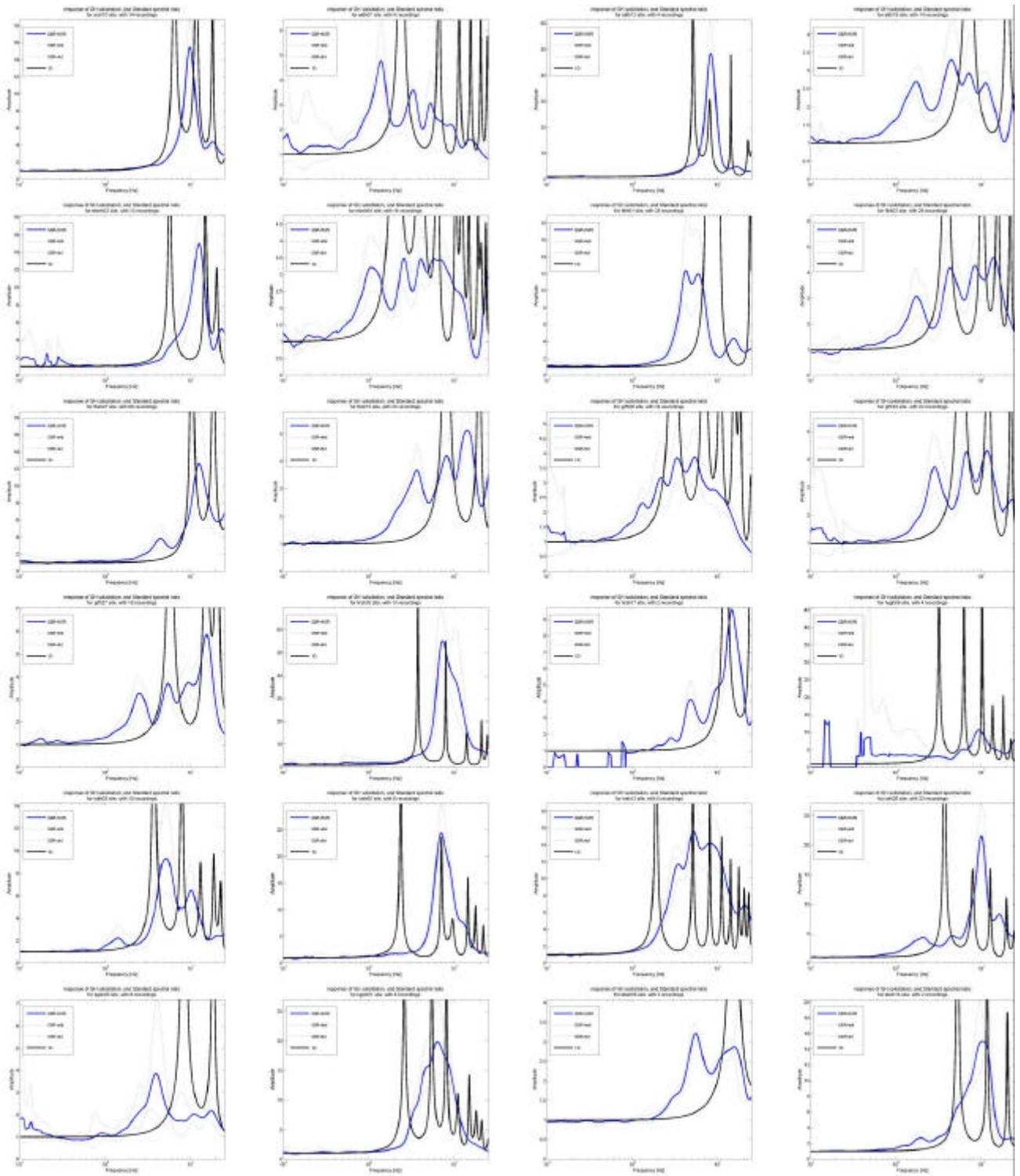


Figure 183: sites avec Vs non fiables, SSRbh en bleu, FTbh en noir

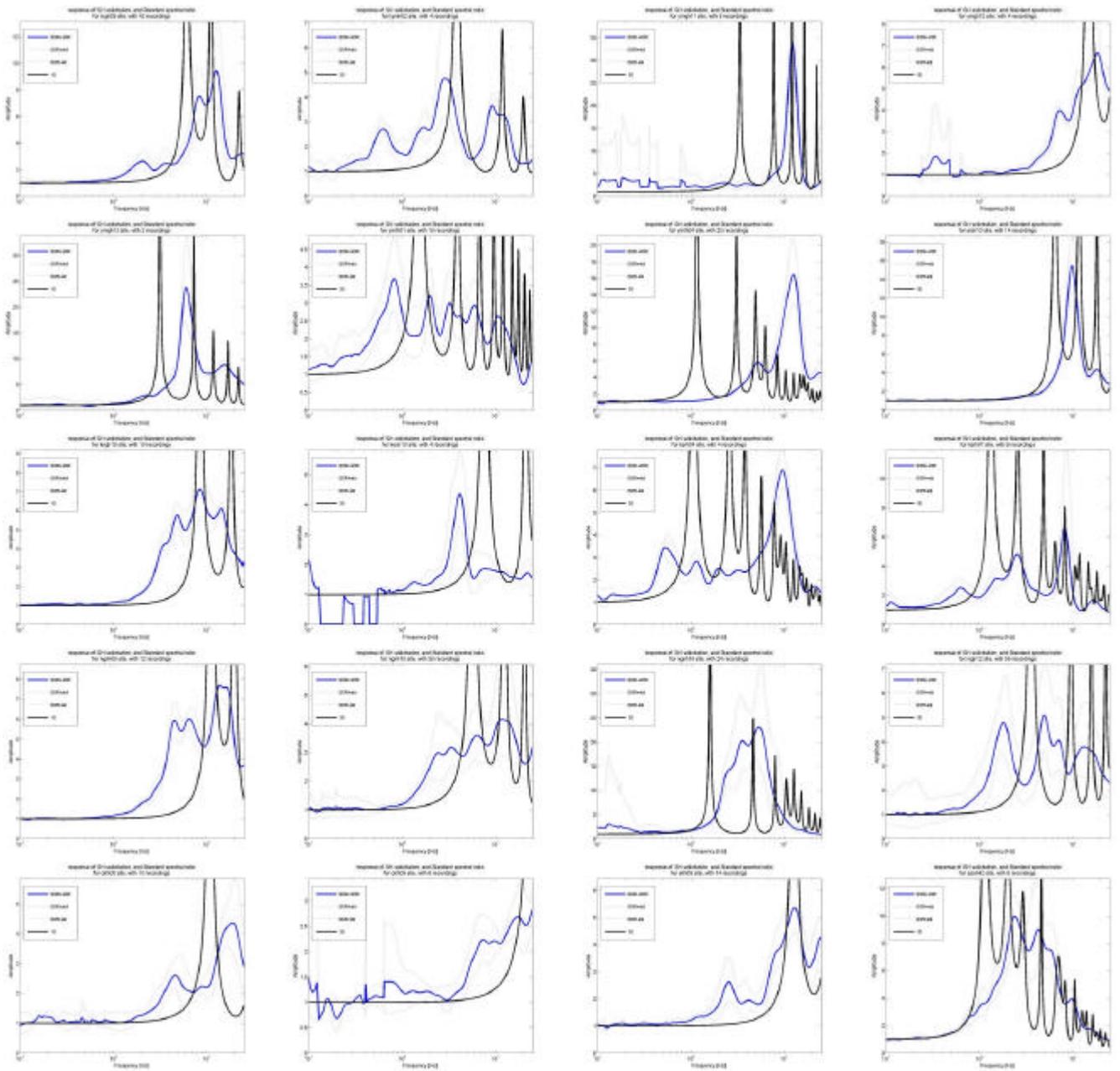
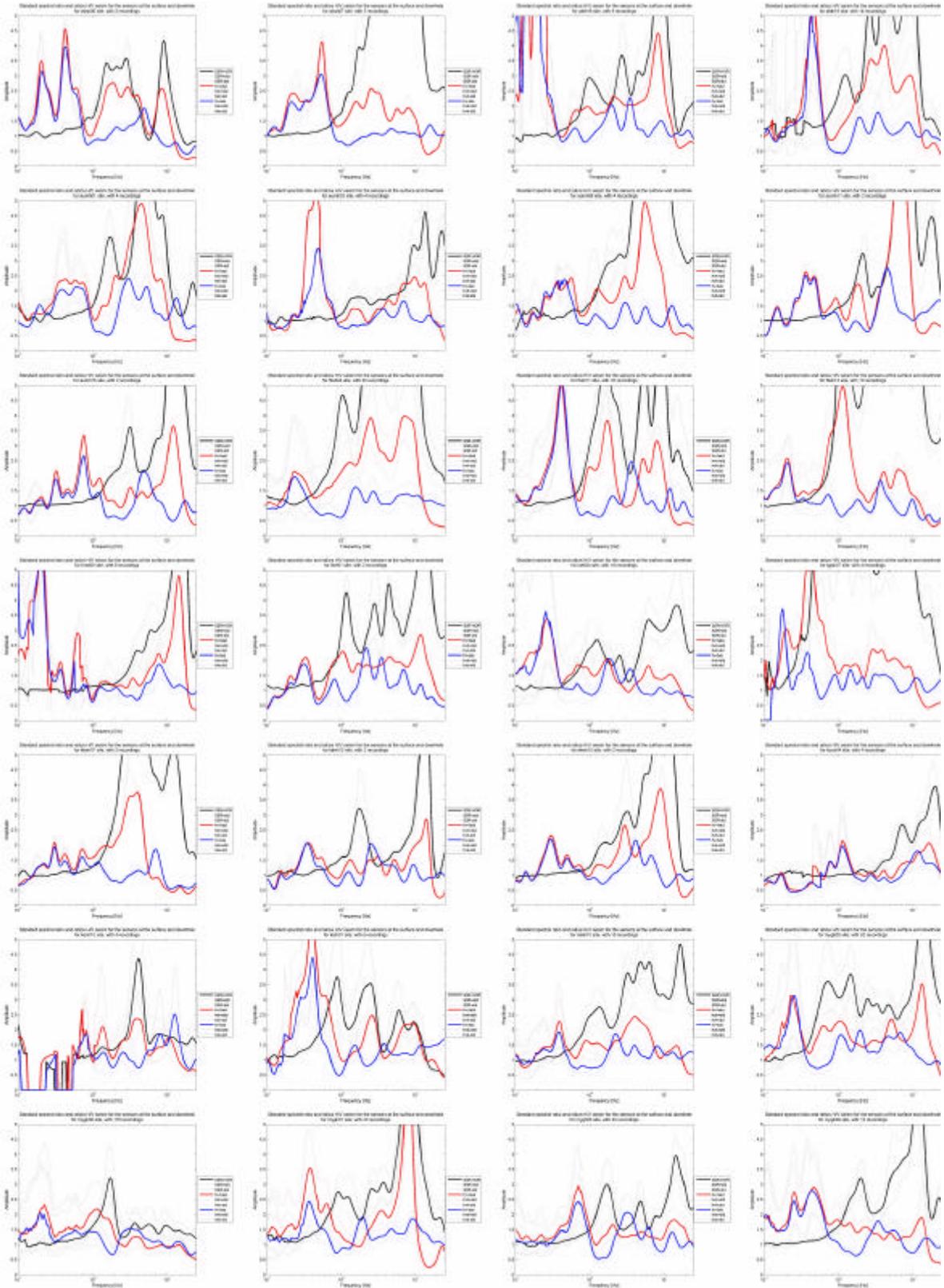
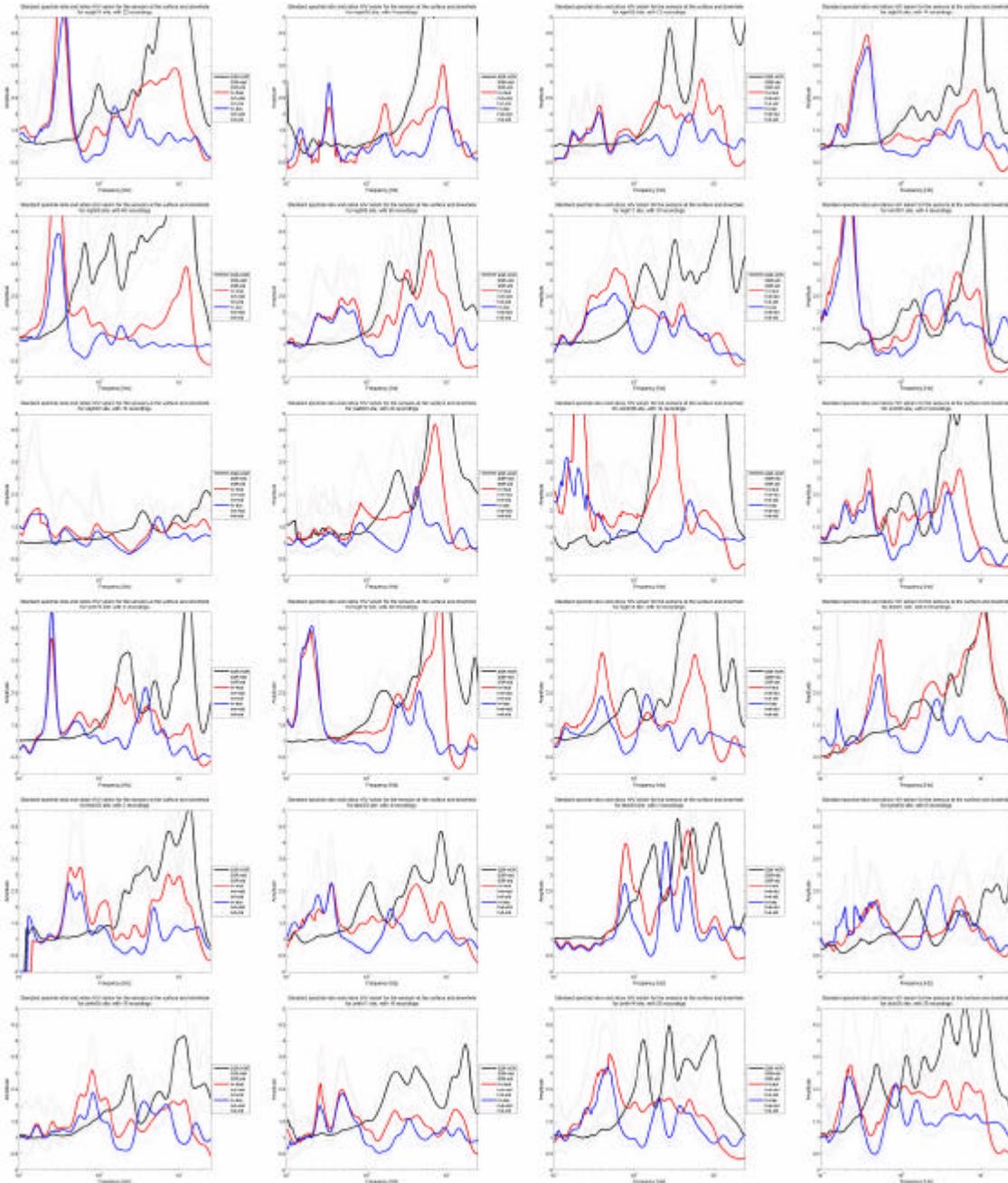


Figure 184: sites avec Vs non fiables, SSRbh en bleu, FTbh en noir

15.4.3. Définir la fréquence de résonance : SSRbh vs H/V





Liste des 50 sites dont la fréquence de résonance est définie par le rapport H/V séisme :

absh06 absh07 aich05 akth16 akth19 aomh01 aomh03 aomh06 aomh11 aomh15 fksh04
 fksh11 fksh14 hrsh08 ikrh01 iwth24 kgsh07 kkwh07 kkwh12 kkwh15 koch04 ksrh01
 mieh10 mygh05 mygh06 mygh07 mygh08 mygh09 mygh10 myzh05 ngnh35 nigh04 nigh08
 nigh09 nigh17 nmrh01 oskh04 smnh06 srch08 srch10 tcgh10 tcgh15 tkch01 tkch02
 tkch03 tkch04 tymh04 ymth05 ymth11 ymth14

15.4.4. SSR vs RSR

Liste des sites dont SSR est différent de RSR:

fkoh02 fkoh03 fkoh05 fkoh08 fkoh09 ibuh02 kkwh05 kkwh06 kkwh07 kkwh12 kkwh13
 kkwh14 kkwh15 kngh20 oith10 srch01 srch02 srch05 ttrh02

15.4.5. Comparaison des rapports moyens sans et avec la normalisation utilisant la méthode du quart de la longueur d'onde

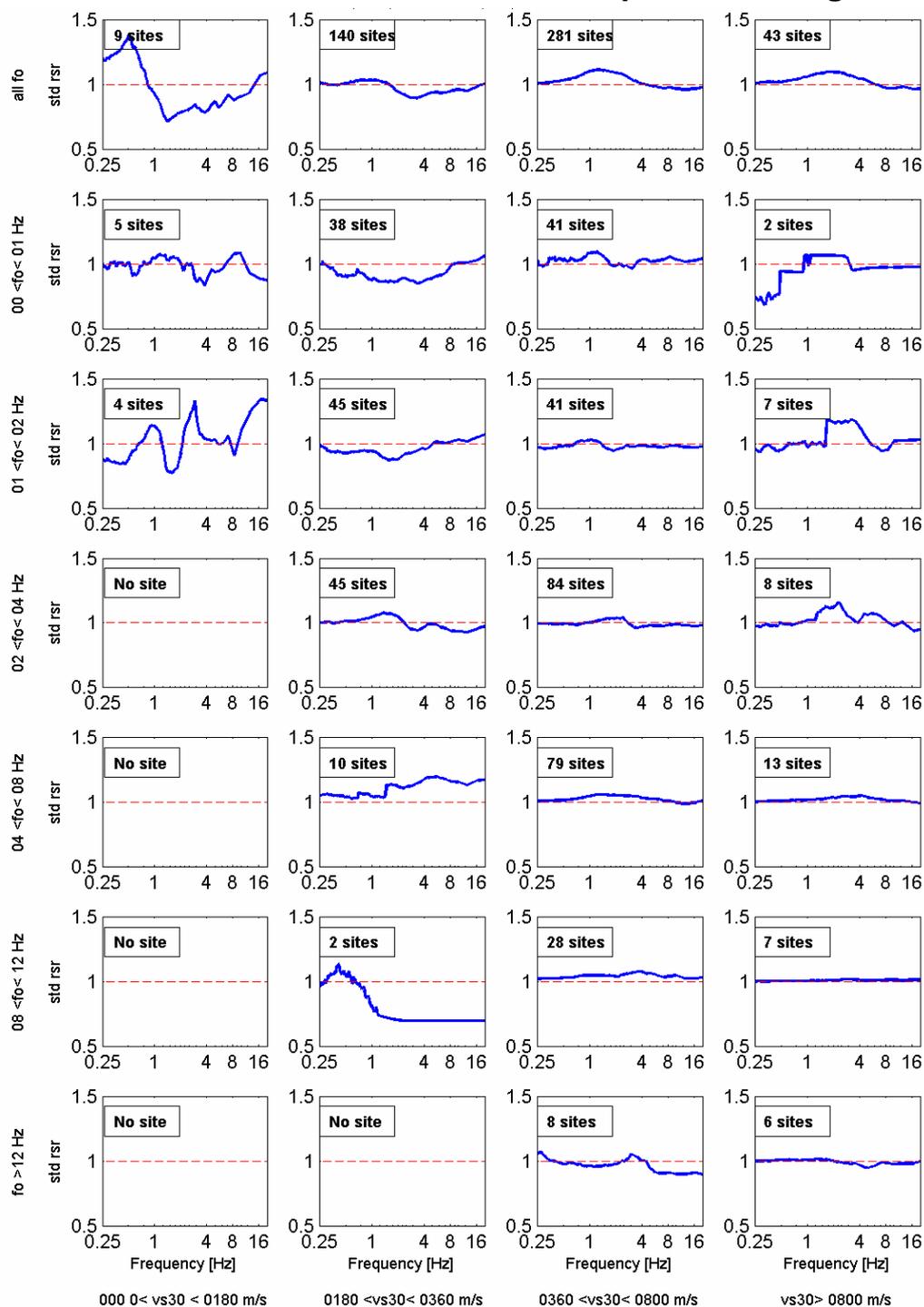


Figure 185: Rapport des écarts-type des moyennes obtenues sans et avec la normalisation utilisant la méthode du quart de la longueur d'onde. Rapport RSRn sur RSR bruts en bleu, et $y=1$ en rouge. L'écart type est un facteur multiplicateur qu'il faut multiplier à la valeur moyenne pour obtenir une fois la classique valeur moyenne plus une fois l'écart type.

15.4.6. Fonction correctrice

Afin de répondre au cas pratique où la fréquence de résonance ne serait pas connue, nous avons aussi déterminé une fonction correctrice de l'effet de site uniquement en fonction d'une vitesse moyenne, $FCES_{[V_{sz}]}$. L'amplitude du plateau A reste la même qu'avec la $FCES_{[V_{sz},f_0]}$. Cependant il faut déterminer une fréquence de résonance fictive f_{fict} pour pouvoir décrire la forme de la fonction FCES. On choisit f_{fict} comme étant la fréquence de résonance moyenne de l'ensemble de sites appartenant au groupe de vitesse considéré pour le site étudié.

Tableau 20: Valeur des fréquences de résonance moyenne par groupe selon Vs30

Vs30 =>	<180	180 – 360	360 – 800	>800
f_0 moyenne [Hz]	0.82	1.46	2.90	4.3
Écarts-type	1.60	2.32	2.62	2.60
Nombre de sites	9	140	281	44

Tableau 21: Valeur des fréquences de résonance moyenne par groupe selon Vs20

Vs20 =>	<160	160 – 300	300 – 685	>685
f_0 moyenne [Hz]	0.87	1.82	2.84	3.62
Écarts-type	1.63	2.52	2.69	2.82
Nombre de sites	11	147	292	41

Tableau 22: Valeur des fréquences de résonance moyenne par groupe selon Vs10

Vs10 =>	<140	140 – 250	250 – 560	>560
f_0 moyenne [Hz]	1.19	2.27	2.81	2.78
Écarts-type	2.02	2.58	2.76	3.04
Nombre de sites	26	185	252	32

Tableau 23: Valeur des fréquences de résonance moyenne par groupe selon Vs05

Vs05 =>	<120	120 – 200	200 – 500	>500
f_0 moyenne [Hz]	1.78	2.32	2.79	1.95
Écarts-type	2.22	2.75	2.72	2.94
Nombre de sites	39	172	260	24

References

- [Aki, 1957] Aki K., *Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors*, Bull. Earth. Res. Inst., **1957**, vol. 35, p 415-456
- [Aki, 1965] Aki K., *A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust*, Geophysics, **1965**, 30-4, 665-666
- [Aki-Richards, 1980] Aki, K., and P.G. Richards. *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, **1980**, vol. 1 & 2. W.H. Freeman & Co., San Francisco
- [Anderson et al., 2003] Anderson N., Chen G., Kociu S., Luna R., Thitimakorn T., *Vertical shear wave velocity profiles generated from spectral analysis of surface waves: field examples*, Missouri department of transportation research, avril **2003**, development and technology, Jefferson City, Missouri.
- [Andrews, 1986] Andrews, D.J., *Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size*. In: Earthquake Source Mechanics, **1986**, S. Das, J. Boatwright and C.H. Scholz (editors), AGU, Washington, D.C., 259–268. a
- [Asten et Henstridge, 1984], Asten M.W., Henstridge J.D., *Array estimators and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins*, Geophysics, November **1984**, vol.49, n°11
- [Banerji, 1924] Banerji S.K., *Microseisms associated with the incidence of south-west monsoon*, Nature, **1924**, 114-2868, 576.
- [Banerji, 1925] Banerji S.K., *Microseisms and the Indian monsoon*, Nature, **1925**, 116-2928, 866.
- [Banton, 2004] Banton, J., *Étude géotechnique du bassin grenoblois: application au risque sismique*, Rapport de stage ingénieur, Polytech'Grenoble, Université de Grenoble, **2004**.
- [Bard, 1998] Bard, P.-Y., M. Zaré, and M. Ghafory-Ashtiany. *The Iranian accelerometric data bank: a revision and data correction*, Journal of Seismology and Earthquake Engineering, **1998**, IIEES Tehran, **1-1**, 1-22
- [Bard, 1999] Bard P.-Y., *Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?*, in proceedings of the effects of surface geology on seismic motion, Irikura, Kudo, Okada & Sasatani, Japan, **1999**, vol.3, p 1251-1279.
- [Bard, 2004] Bard PY and SESAME participants, *The SESAME project: an overview and main results*, in proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, August **2004**, n°2207.
- [Beaudevin, 2005] Beaudevin C., *Les paysages glaciaires*, **2005**, <http://www.paysagesglaciaires.net/>, http://morphoglaciare.free.fr/site_source/Pour_en_savoir_plus/cambran_bonnevaux.html
- [Bettig et al., 2001] Bettig B., Bard P.-Y., Scherbaum F., Riepl J., Cotton F., Cornou C., and Hatzfeld D. *Analysis of dense array noise measurement using the modified spatial auto-correlation method (SPAC). Application to the Grenoble area*, Bolletino di geofisica teorica ed applicata, **2001**, 42-3-4, 281- 304.
- [Bièvre] Site Internet du conseil général de l'Isère
http://www.isere-environnement.fr/pages/ENS_CartePaysage_item/id/5045,
- [Bonney-Claudet, 2004] Bonney-Claudet, S., *Nature du bruit de fond sismique : implications pour les études des effets de site*, Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, décembre **2004**, 241 pages.

- [Boore, 2003] Boore David M., *Simulation of ground motion using stochastic method*, Pure and applied geophysics, **2003**, vol. 160, pp 635-676
- [Boore, 2004] Boore David M., *Estimating Vs(30) (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depth<30m)*, Bulletin of the seismological society of America, Avril **2004**, Vol.94, N°2, pp. 591-597
- [Boore and Joyner, 1997] Boore D.M., Joyner W.B., *Site amplifications for generic rock sites*, Bulletin of the seismological society of America, **1997**, 74(5), 2035-2039.
- [Borcherdt, 1970] Borcherdt R. D. and J.F. Gibbs, *Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake*, in Bull. Seism. Soc. Am, **1970**, 66, 467-500.
- [Borcherdt, 1992] Borcherdt, R.D., and G. Glassmoyer. *On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California*, Bulletin of the seismological society of America, **1992**, 82, 603-641.
- [Bouchon, 1981] Bouchon M., *A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media*, Bulletin of the Seismological Society of America; August **1981**; v. 71; no. 4; p. 959-971
- [Cadet et al., 2005] Cadet H., Bard P.-Y., Gueguen P., *Délimitation grossière des zones à effet de site sismique dans le Sud-Isère - Bilan des mesures effectuées sur le terrain et résultats des 1^{ères} analyses*, rapport d'avancement interne, Octobre **2005**, 84 pages.
- [Cadet et al., 2006a], Cadet H., Gueguen P., Duval A.M., Bertrand E., *Geotechnical classification of the French accelerometric network (RAP) stations*, Proc. of the third international symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, ESG, Grenoble, September **2006**, paper n°113.
- [Cadet, 2006b], Cadet H., *Blind test*, **2006**, Proc. of the third international symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, ESG, Grenoble, September 2006
- [Cadet et al., 2006c], Cadet H., Bard P.-Y., Gueguen P., Cornou C., *Rapid screening of site effects through micro tremor surveys in view of microzonation studies*, in Proc. of the first European conference on earthquake engineering and seismology ECEES, Geneva, 3-8 September **2006**, ID 1431.
- [Cadet et al., 2007] Cadet H., Duval A.M., Bertrand E., *Case study of noise array measurements in soft clay at l'Ebron, Trièves, Isère, France*, conférence nationale de l'AFPS, Juillet **2007**, Paris, article n°34.
- [Capon et al., 1967] Capon J., Greenfield R.J. et Kolker R.J., *Multidimensional maximum-likelihood processing of a large-aperture seismic array*, IEEE, **1967**, 55, 192-211.
- [Capon, 1969] Capon J., *High-resolution frequency-wave number spectrum analysis*, PRC. IEEE 57, **1969**, 1408-1418.
- [CETE, 1995], Duval A.M., Méneroud J.P., Vidal S., Fréchet J., Gamond J.F., Bard P.-Y., *Franchissement de l'Ebron, étude de l'aléa sismique local*, rapport interne n° 93/95666/74, Mai **1995**, CETE méditerranée, laboratoire de Nice.
- [Cotton, 2006] Cotton F., Sherbaum F., Bommer J.J., Bungum H., and Sabetta F., *Criteria for selecting and adjusting ground motion models for specific target regions: Application to central Europe and rock sites*, Journal of Seismology, **2006**, DOI: 10.1007/s10950-005-9006-7
- [Cornou, 2002] Cornou C. *Traitement d'antenne et imagerie sismique dans l'agglomération grenobloise (Alpes françaises) : implications pour les effets de site*, **2002**, Thèse de l'Université Joseph Fourier Grenoble, 260p.
- [Christensen et Hald, 2004] J.J. Christensen and J. Hald, *Technical review, Beamforming*, Brüel & Kjaer Sound and vibration measurements A/S, 2004, Denmark.
- [Cravoisier, 2004] Cravoisier S., *Étude géophysique multi-méthodes d'un glissement de terrain en déformation lente : exemple des argiles de Saint Guillaume (38)*, rapport de stage à LIRIGM, maître de stage S. Garambois, **2004**.

- [Drouet et al., 2005] Stéphane Drouet, Annie Souriau and Fabrice Cotton, *Attenuation, Seismic Moments, and Site Effects for Weak-Motion Events: Application to the Pyrenees*, Bulletin of the Seismological Society of America; October **2005**; v. 95; no. 5; p. 1731-1748; DOI: 10.1785/0120040105
- [Drouet, 2005] Drouet Stéphane, *Analyse des données accélérométriques pour la caractérisation de l'aléa sismique en France métropolitaine*, Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, Géophysique, Mai **2006**, 206 pages. http://www-rap.obs.ujf-grenoble.fr/DOC/these_drouet.pdf
- [Duval, 2004] Duval A.M., Châtelain J.L., Guillier B., SESAME WP02 team, *Influence of experimental conditions on the H/V determination using ambient vibration (noise)*, in proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, August **2004**, n°306.
- [Faccioli, 1992] Faccioli, E., *Selected Aspects of the Characterisation of Seismic Site Effects, Including Some Recent European Contributions*. Invited Lecture, Proc. International Symposium on The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, **1992**, (ESG1992), Odawara (Japan), March 25-27, Vol. 1, pp. 65-96.
- [Fäh et al., 2001] Fäh D., Kind F., Giardini D., *A theoretical investigation of average H/V ratios*, Geophysics journal Int., vol. 145, pp 535-549, **2001**.
- [Field et al., 1995] Field, E.H. and K. Jacob. *A comparison and test of various site response estimation techniques, including three that are non reference-site dependent*. Bulletin of the seismological society of America, **1995**, 85, 1127–1143.
- [Foti et al., 2003] Foti S., Sambuelli L., Socco V.L. et Strobbia C., *Experiments of joint acquisition of seismic refraction and surface wave data*, Near surface geophysics, **2003**, 1, pp 119-129.
- [Géli et al., 1988] Géli, L., P.-Y., Bard and B. Jullien. *The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results*. Bull. Seism. Soc. Am., **1988**, 78, 42–63
- [Gidon, 2006] Gidon Maurice, http://geol-alp.obs.ujf-grenoble.fr/h_oisans/index_oisans.html, <http://www.geol-alp.com>
- [Haghshenas, 2005] Haghshenas Ebrahim, *Conditions géotechniques et aléas sismique à Téhéran*, **2005**, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 288 pages
- [Haskell, 1953] Haskell N.A., *The dispersion of surface waves from point sources in a multi-layered medium*, Bulletin of the Seismological Society of America, **1953**, 54, p. 377-393.
- [Havenith et al., 2002] Havenith, H.B, D. Jongmans, E. Faccioli, K. Abdrakhmatov and P.-Y. Bard, 2002. Site effect analysis around the seismically induced Ananevo rockslide, Kyrgyzstan, *Bull. seism. Soc. Am.*, 92-8, 3190-3209.
- [Hermann 1994] Hermann R.B., Computer programs in seismology, 1994, vol IV, Saint Louis University
- [Hisada, 1994] Hisada Y., *An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths*, Bulletin of the Seismological Society of America, **1994**, 84-5, 1456-1472
- [Hisada, 1995] Hisada Y., *An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths (part 2)*, Bulletin of the Seismological Society of America, **1995**, 85-4, 1080-1093
- [Kenneth et al., 2004] Kenneth H. Stokoe, Jennie C., Milton T., Asli Kurtulus MS, Farn-Yuh Menq, *SASW measurements at the NEES Garner Valley Test Site, California*, Data report, College of engineering, University of Texas at Austin, 13 January **2004**.
- [Kanai, 1983] Kanai K., *Engineering seismology*, University of Tokyo Press, **1983**, Tokyo, 251 pages.
- [Konno et Ohmachi, 1998] Konno K. et Ohmachi T., *Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor*, Bulletin of the Seismological Society of America, **1998**, 88-1, 228-241.
- [Lachet, 1994] Lachet C., Bard PY., *Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of the "Nakamura's" technique*, Journal of Physics of the earth, **1994**, 42, 377-397.

- [Lacoss et al., 1969] Lacoss R.T., Kelly E.J. and Toksöz M.N., *Estimation of seismic noise structure using array*, Geophysical Journal International, **1969**, vol. 163, p 169-182
- [Lebrun et al., 2001] Lebrun F., Hatzfeld D., Bard P.Y., *Site effect study in urban area: experimental results in Grenoble (France)*, Pure and applied geophysics, **2001**, 158-12, 2543-2557.
- [Lermo et Chavez-Garcia, 1993] Lermo J. et Chavez-Garcia F. J., *Site effects evaluation using spectral ratios with only one station*, Bulletin of the seismological society of America, **1993**, 83-5, pages 1574-1594.
- [Malagnini et al., 1993] Malagnini L., Rovelli A., Hough E. et Seeber L., *Site amplification estimates in the Garigliano valley, Central Italy, based on dense arrays measurements of ambient noise*, Bulletin of the seismological society of America, **1993**, 83-6, pages 1744-1755.
- [Malagnini et al., 1995] Malagnini L., Hermann, R.B., Biella G., De Franco R., *Rayleigh waves in quaternary alluvium from explosive sources: determination of shear wave velocity and Q structure*, Bulletin of seismological society of America, vol.85, n°3, pp 900-922, juin **1995**.
- [Malet, 2003] Malet J.P., *Les "glissements de type écoulements" dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydromécanique*, Thèse de l'université Louis pasteur à Strasbourg I, 332p, **2003**.
- [Matthews et al., 1996] Matthews M.C., Hope V.S. et Clayton C.R.I., *The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles*, Proc. Instn civ. EnGRS Geotech; Engng, **1996**,119, pp 84-95.
- [Meric et al., 2007] Meric O., Garambois S., Mallet J.P., Cadet H., Gueguen P., Jongmans D., *Seismic noise based methods for soft-rock landslide characterization*, Bulletin of the seismological society of America, **2007**, n 2, pages 137-148.
- [Milana et al, 1996] Milana G., Barba S., Del Pezzo E., Zambonelli E., *Site response from ambient noise measurements: New perspectives from an array study in central Italy*, Bulletin of the Seismological Society of America, **1996**, 86-2, 320-328
- [Moczo et al., 2002] Moczo P., Kristek J., *FD code to generate noise synthetics*, SESAME Report D02.09, **2002**, 31pp.
- [Mucciarelli, 1998] Mucciarelli M., *Reliability and applicability of Nakamura's technique using microtremors: An experimental approach*, Journal of earthquake engineering, **1998**, 2-4, 1-14
- [Nakamura, 1989], Nakamura Y., *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*, **1989**, Quaterly Report Railway Tech. Res. Inst., 30-1, pp 25-30
- [Nogoshi et Igarashi, 1970] Nogoshi M. et Igarashi T., *On the propagation characteristics of microtremor*, J. seism. Soc. Jpn, **1970**, 23, 264-280.
- [Nogoshi et Igarashi, 1971] Nogoshi M. et Igarashi T., *On the propagation characteristics of microtremor (part2)*, J. seism. Soc. Jpn, **1971**, 24, 26-40..
- [Ohrnberger, 2004a] Ohrnberger M., *User manual for software package CAP – a continuous array processing toolkit for ambient vibration array analysis*, **2004**, SESAME report D18.06m 83 pp.
- [Ohrnberger, 2004b] Ohrnberger M., Schissole E., Cornou C., Bonnefoy-Claudet S., Wathelet M., Savvaidis A., Scherbaum F., and Jongmans D., *Frequency wavenumber and spatial autocorrelation methods for dispersion curve determination from ambient vibration recordings*, **2004**, 13th WCEE, Vancouver, Canada. Paper N° 0946.
- [Ohrnberger et al., 2006] Ohrnberger Matthias, Vollmer Daniel, Scherbaum Frank, *WARAN, a mobile wireless array analysis system for in-field ambient vibration dispersion curve estimation*, in Proc. of the first European conference on earthquake engineering and seismology ECEES, Geneva, 3-8 September **2006**, ID 2017.
- [Paolucci, 2007] Paolucci, Sismoalp 2007, personal communication

- [Park et al., 1999] Park C.B., Miller R.D., Xia J., *Multichannel analysis of surface waves*, Geophysics, May-June **1999**, vol. 34, n°3, p 800-808
- [Parolai et al., 2002] Parolai S., Bormann, Milkereit C., *New relationships between Vs, thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany)*, Bulletin of seismological society of America, **2002**, 92-6, pages 2521-2527.
- [Pousse, 2005a] Pousse G., C. Berge-Thierry, F. Bonilla and P.-Y. Bard. Eurocode 8 design response spectra evaluation using the K-Net Japanese database, Journal of Earthquake Engineering, **2005**, 9-4, pp 547-574.
- [Pousse, 2005b] Pousse G., *Analyse des données accélérométriques de K-net et Kik-net : implication pour la prédiction du mouvement sismique – Accélérogrammes et spectres de réponse – et la prise en compte des effets de site non-linéaires*, Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I, spécialité terre solide, Octobre **2005**, 211 pages, <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/06/87/48/PDF/these.pdf>
- [Rey et al., 2002] Rey J., Faccioli E., Bommer J.J., *Derivation of design soil coefficients (S) and response spectral shapes for Eurocode 8 using the European strong-motion database*, Journal of seismology, **2002**, vol. 6, 547-55.
- [Sambridge, 1999] Sambridge M. *Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm searching a parameter space*, J. Geophys. Res., **1999**,103, 4839-4878.
- [Sato et al., 2001] Sato T., Kawase H., Shin'ichi M., *Estimation of S-wave velocity structures in and around the Sendai Basin, Japan, using arrays records of microtremors*, Bulletin of the seismological society of America, **2001**, 91-2, pages 206-218.
- [Savvaidis et al., 2006] Savvaidis A., Cadet H., Gueguen P., Panou A., Michel C., Theodulidis N., Kalogeras I., *Accelerograph stations site characterization using ambient noise: selected stations in Greece*, in Proc.of the third international symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, ESG, Grenoble, September **2006**, paper n°064
- [SESAME, 2001-2004] <http://SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>
- [SESAME, D08.02] *H/V technique: experimental conditions*, final report on measurements guidelines, LGIT Grenoble, CETE Nice, WP02, deliverable D08.02, Juillet **2003**.
- [SESAME, D12.09] Bard PY., Bonnefoy-Claudet S., Cornou C., Fäh D., Kristek J., Moczo P., Report on simulation of seismic noise, WP09, Report on parameter studies, deliverable D12.09, Décembre **2004**.
- [SESAME, D19.06] *Report on FK/SPAC capabilities and limitations - Derivation of dispersion curves -*, University of Postdam, Germany, WP06, deliverable D19.06, January **2005**
- [SESAME, D21.07] Wathelet M., Jongmans D., Final report, WP07, *Array measurements: inversion of velocity profile*, deliverable D21.07, Mai **2004**
- [SESAME D23.12] *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations - measurements, processing and interpretation -*, WP12, deliverable D23.12, December **2004**
- [SESAME D24.13] Jongmans D., Ohrnberger M., Wathelet M., Final report, WP13, *Recommendations for quality array measurements and proceeding*, deliverable D24.13, Mars **2005**
- SESARRAY <http://www.geopsy.org>
- [Scherbaum, 2003] Scherbaum F., Hinzen K-G. and Ohrnberger M., *Determination of shallow shear wave velocity profiles in the Cologne, Germany area using ambient vibrations*, Geophys. J. Int, 2003, 152, 597-612.
- [Stephenson et al., 2005] Stephenson W.J., Louie J.N., Pullammanappallil S., Williams R.A., Odum J.K., *Blind shear-wave velocity comparison of ReMi and MASW results with boreholes to 200 m in Santa*

Clara Valley: Implications for earthquake ground-motion assessment, Bulletin of the Seismological Society of America, **2005**, vol95, n°6, 2506-2513.

- [Theodulidis et Bard, 1995] Theodulidis N.P., Bard P.Y., *Horizontal to vertical spectral ratio and geological conditions: an analysis of strong motion data from Greece and Taiwan (SMART-1)*, Soil dynamics and earthquake engineering, **1995**, 14-3, 177-197
- [Tokimatsu, 1997] Tokimatsu K., *Geotechnical site characterisation using surface waves*, **1997**, Proc.IS-Tokyo 95/1st Intl.Conf.Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, Japan, 14-16 November, 3, 1333-13368.
- [Wathelet 2003] Wathelet M., Report on the inversion of velocity profile and version0 of the inversion software, 2003, SESAME report D14.07.
- [Wathelet et al., 2004] Wathelet M., Jongmans D., Ohrnberger M., *Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements*, EGU, first general assembly, Nice, France, Avril **2004**.
- [Wathelet, 2005] Wathelet, M., Array recordings of ambient vibrations: surface wave inversion. Ph. D. thesis, Liège University, May 12, (2005), 161 pages
- [Zaré et al., 1998] Zaré M., Bard P.Y., Ghafory-Ashtiany M., *Site categorization for the Iranian strong motion network*, Proceedings of the Xith European Conference on Earthquake Engineering, Paris, Septembre **1998**, Bish, Labbé & Pecker Editors, Balkema.
- [Zhao et al. 2004] Zhao J.X., *Site classification for strong ground motion stations in Japan using H/V response spectral ratio*, proceeding of the 13th world conference of earthquake engineering, **2004**, Vancouver BC Canada, paper 1278.
- [Zhao et al. 2006] Zhao J.X., *An empirical site classification method for strong motion station in Japan using H/V response spectral ratio*, Bulletin of the Seismological Society of America, June **2006**, vol.96, n°3, p914-925.

<http://www.kik.bosai.go.jp/>

Résumé

Devant le constat des dégâts dus en partie à aux effets de site, après les derniers séismes meurtriers, une meilleure estimation a priori de ces effets locaux apparaît indispensable. Dans la réalité, les contraintes budgétaires font du développement de méthodes peu onéreuses un objectif crucial. Les mesures de bruit de fond, méthode géophysique utilisant les vibrations ambiantes, correspondent à ce type de besoin.

Le but de cette thèse est de développer et de valider des méthodologies opérationnelles utilisant le bruit de fond pour une prise en compte des effets de site dans un contexte réglementaire. Cette thèse se découpe donc en deux grands volets d'étude :

Tout d'abord le développement d'un protocole sur les méthodes utilisant le bruit de fond, pour déterminer sur un site la fréquence fondamentale f_0 (mesures "H/V") et la vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur les z 1^{ers} mètres V_{sz} (mesures en réseau).

Puis une étude sur les données de Kik-net pour établir une fonction dépendant des deux paramètres f_0 et V_{sz} qui définisse, à partir d'un spectre au rocher, un spectre de réponse prenant en compte les effets de site locaux. Après avoir caractérisé les 622 sites par f_0 et V_{sz} , on estime la fonction d'amplification entre les enregistrements en surface et en profondeur. Ces fonctions sont normalisées vers un rocher de référence et corrigées de l'effet de surface libre pour se ramener à un rapport classique de deux spectres en surface. Une analyse statistique, à partir de ces fonctions d'amplification empiriques, permet alors de définir la fonction cherchée.

Abstract

The latest major earthquakes showed that site effects can drastically exacerbate damages. In order to assess the local hazard that may threaten the buildings, costless methods should be developed as the methods based on seismic noise measurements. The goal of this thesis is to elaborate an operational methodology, partially based on these noise methods, in order to adapt the spectrum given in the seismic codes to the local site conditions. For that aim, two complementary parts were realized:

The first one aims at establishing a protocol describing the combined utilization of methods based on seismic noise. It attempts to provide, for a given site, the resonance frequency f_0 (H/V method) and the mean S-waves velocity of the top z meters, V_{sz} (array method).

The second part of the work consists of computing correction function allowing to modulate the rock response spectrum in order to take into account the soil conditions knowing only V_{sz} and f_0 . The 622 sites of the Japanese Kik-net database were characterized in this way. Then 28000 seismic recordings were exploited to deduce amplification functions between surface and depth. An original method is proposed to standardize the reference rock site in one hand, and to simulate the free surface effect in the other hand. Finally, with the empirical amplification functions between a standard rock reference and a site, we compute mean curves depending on the f_0 and V_{sz} parameters. These curves allow to establish, by a statistical analysis, an analytic function completely defined by f_0 and V_{sz} . Its application is compared to the actual regulations.