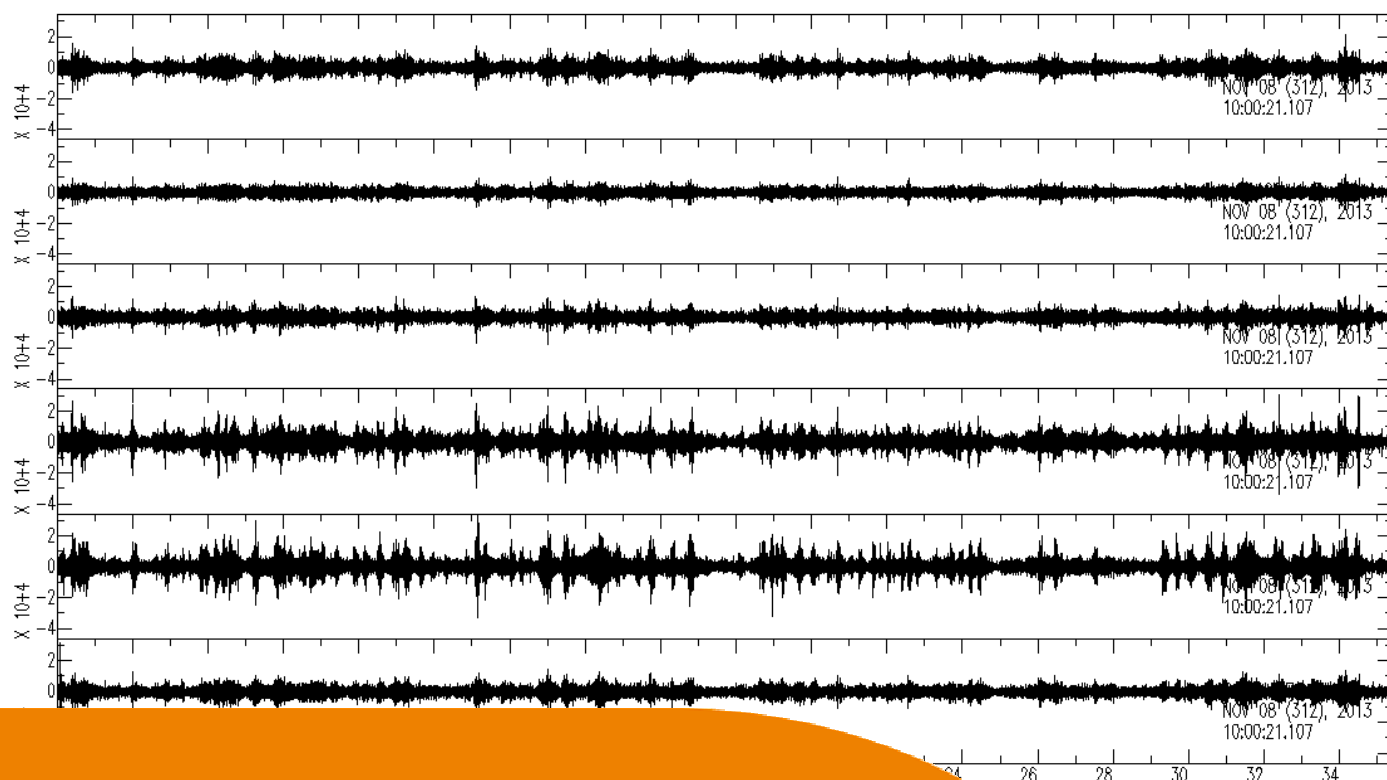
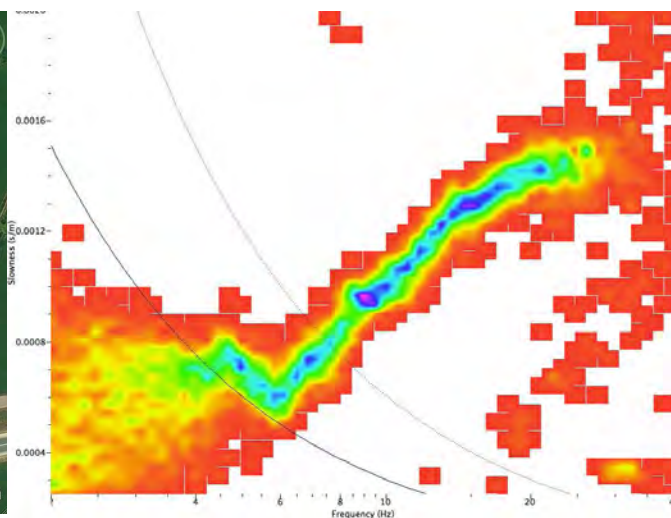


MESURE ET TRAITEMENT DU BRUIT DE FOND EN RESEAU A SALON-DE-PROVENCE ET PELISSANNE (13)



RAPPORT

CEREMA - DTer Méditerranée
Laboratoire de Nice
Service Risque Sismique

Janvier 2014

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
1	20/01/14	Corrections Etienne Bertrand
2	06/02/14	Corrections Jean-Philippe Devic
3	09/07/15	Prise en compte des remarques de la DDTM13
4	27/10/15	Prise en compte des remarques de la DDTM13

Affaire suivie par

Etienne BERTRAND - Service Risque Sismique
<i>Tél. : 04 92 00 81 61/ Fax : 04 92 00 81 39</i>
<i>Courriel : etienne.bertrand@cerema.fr</i>

Rédacteurs

Philippe LANGLAUDE - Service Risque Sismique

Relecteur

Etienne BERTRAND- Service Risque Sismique

Mesure et traitement du bruit de fond en réseau à Salon-de-Provence et Pélissanne (13)

Date : Octobre 2015 (V3)

Auteur : CEREMA – Dter Méditerranée

Responsable de l'étude : Etienne BERTRAND, Laboratoire de Nice - Service Risque Sismique

Participants : Philippe LANGLAUDE, Diego MERCERAT, Michel PERNOUD

Résumé de l'étude :

Le présent rapport traite des mesures de bruit de fond sismique effectuées en Novembre 2013 par le service RS du laboratoire de Nice – CEREMA – Dter Méditerranée, dans le cadre des études préalables à l'établissement du Plan de Prévention des Risques Sismiques (PPRs) des communes de Salon-de-Provence, Grans et Pélissanne (13). Il présente le dispositif d'enregistrement utilisé ainsi que les résultats des traitements effectués.

Zone géographique : Provence Alpes Cote d'Azur – Bouches-du-Rhône (13)

Nombre de pages : 26

N° d'affaire : 1370 000 62

Maître d'ouvrage : DDTM 13

Référence : devis n° 79 2013 D102 du 171 051 2013

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION	7
2 PRINCIPE GENERAL DE LA METHODE F-K.....	7
3 CAMPAGNE DE MESURES DE BRUIT DE FOND EN RESEAU	9
3.1 Matériel utilisé et type de mesure réalisée	9
3.2 Localisation et choix des points de mesures	10
3.3 Contexte géologique et géotechnique	11
3.3.1 Dispositif de mesure du réseau 1 sur la zone T3.....	12
3.3.2 Dispositif de mesure du réseau 2 sur la zone T4.....	14
3.3.3 Dispositif de mesure du réseau 3 sur la zone T7.....	15
4 ANALYSE DES MESURES DE BRUIT DE FOND EN RESEAU.....	17
4.1 Calcul de la fonction de transfert théorique du réseau.....	17
4.2 Calcul des courbes de dispersion	18
4.3 Inversion de la courbe de dispersion.....	19
4.4 Analyse des résultats de l'inversion.....	20
4.4.1 Inversion de la courbe de dispersion du réseau 1.....	21
4.4.2 Inversion de la courbe de dispersion du réseau 2.....	22
4.4.3 Inversion de la courbe de dispersion du réseau 3.....	23
5 CONCLUSION	24
REFERENCES	25

FIGURES

Figure 1 : Exemple de profils de vitesse des ondes de compression et de cisaillement obtenus comme résultats du processus d'inversion.	8
Figure 2 : Fonction de transfert du réseau d'ouverture égale à 10 mètres.	8
Figure 3 : Transformée de Fourier d'une onde sinusoïdale stationnaire ($f=20$ Hz) se propageant du sud vers le nord à une vitesse de 300 m/s dans le réseau de 10 mètres d'ouverture.	9
Figure 4 : Disposition théorique des capteurs utilisée pour les mesures de bruit de fond en réseau.....	10
Figure 5 : Carte IGN de la zone d'étude avec emplacement des trois réseaux de bruit de fond réalisés.	10
Figure 6 : Carte du zonage de 2005 pour les communes de Salon-de-Provence, Grans et Pélissanne. Les trois réseaux réalisés dans la présente étude sont notés de 1 à 3. Les cercles incluant un diamant de couleur représentent les forages géotechniques recensés en 2005.	11
Figure 7 : Carte géologique simplifiée indiquant la profondeur des sédiments trouvée au droit des sondages précédemment réalisés.	12
Figure 8 : Vue aérienne de l'emplacement des capteurs du réseau 1	13
Figure 9 : Colonnes de sol dans la plaine de Crau.....	13
Figure 10 : Vue aérienne de l'emplacement des capteurs du réseau 2.	15
Figure 11 : Vue aérienne de l'emplacement des capteurs du réseau 3.....	16
Figure 12 : Limites de calcul du réseau en « spirale » utilisée pour cette étude.	17
Figure 13 : Diagramme de semblance calculé à partir du réseau 1 à l'Ouest de Salon-de-Provence.	18
Figure 14 : Diagramme de semblance calculé à partir du réseau 2 au Nord de Pélissanne.....	17
Figure 15 : Diagramme de semblance calculé à partir du réseau 3 au Nord de Salon-de-Provence	19
Figure 16 : Contrainte du paramètre « densité » pour le processus d'inversion.....	19
Figure 17 : Contrainte du paramètre « vitesse des ondes de cisaillement » pour le processus d'inversion. ...	19
Figure 18 : Ecart entre le modèle numérique et la courbe de dispersion issue des données acquises sur le terrain.	20
Figure 19 : Profil de vitesses V_s obtenus par inversion d'un modèle théorique composé de 3 couches.....	20
Figure 20 : Ecart entre le modèle numérique et la courbe de dispersion issue des données acquises sur le terrain.	21
Figure 21 : Profil de vitesses V_s obtenus par inversion d'un modèle théorique composé de 2 couches.....	21
Figure 22 : Profil de vitesses V_s obtenus par inversion d'un modèle théorique composé de 2 couches.....	22
Figure 23 : Ecart entre le modèle numérique et la courbe de dispersion issue des données acquises sur le terrain.	22

1 Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une mise à jour des études préalables à l'établissement des PPR sismique réalisées en 2005 à Salon-de-Provence, Grans et Pélissanne. Elle a pour but de mieux contraindre le zonage sismique par l'utilisation de techniques récentes mises en œuvre par le service Risques Sismiques du CEREMA/Dter Med (anciennement, CETE Méditerranée) et notamment pour ce qui concerne les estimations des caractéristiques géomécaniques des colonnes de sol prises en compte pour la définition du mouvement sismique en surface. Plus particulièrement, il s'agit de vérifier les profils de vitesses de propagation des ondes sismiques associées à certaines zones du zonage. En effet, grâce aux techniques d'enregistrement en réseau et d'analyse f-k du bruit de fond sismique, une estimation de la vitesse de propagation des ondes S est possible. Cette technique permet ainsi de vérifier et préciser les colonnes de sols caractéristiques déterminées dans les études de 2005.

2 Principe général de la méthode f-k

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 sismique et d'en tirer des informations sur la stratification du site à partir d'une interprétation en ondes de surface. Le bruit sismique ambiant mesuré par un réseau de stations est ainsi apparu comme une méthode prometteuse de détermination du profil de vitesse des ondes de cisaillement $V_s(z)$. 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. Ces ondes, qui se propagent horizontalement, ont un comportement particulier : elles sont dites dispersives, c'est-à-dire que leur vitesse de propagation dépend de leur fréquence. Leur propagation se fait donc selon une courbe de dispersion qui dépend du profil $V_s(z)$.

Les différentes étapes de la méthode mise en œuvre ici sont :

Etape 1 : Enregistrement du bruit simultanément avec plusieurs capteurs en réseau selon une disposition suivant une géométrie régulière.

Etape 2 : Analyse de ces enregistrements dans le plan fréquence nombre d'onde (f-k) qui nous fournit une courbe de dispersion.

Etape 3 : Inversion de la courbe de dispersion obtenue à l'étape 2 afin d'obtenir des profils de vitesse de propagation des ondes de compression et de cisaillement au droit site ausculté.

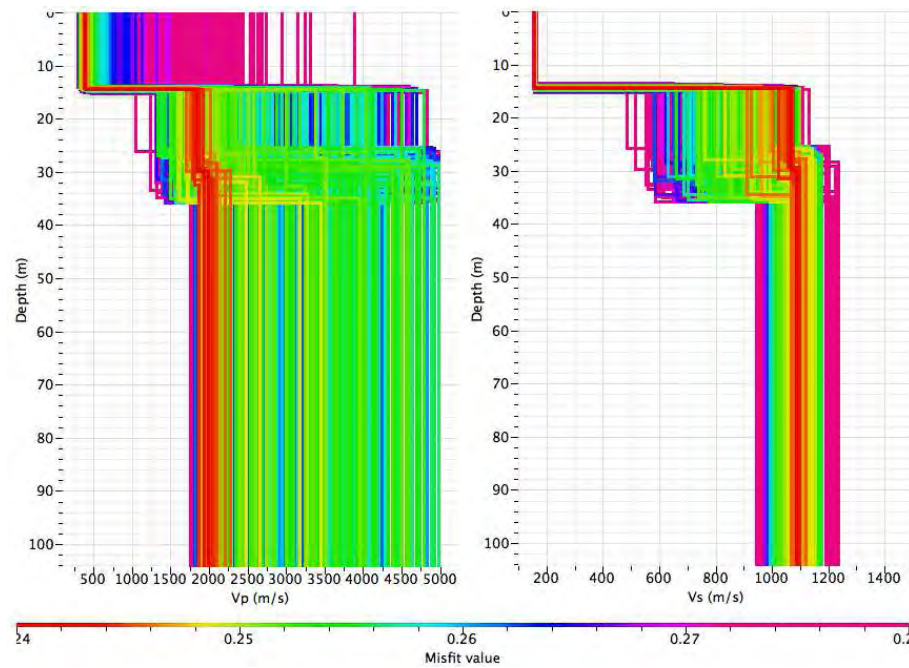


Figure 1 : Exemple de profils de vitesse des ondes de compression et de cisaillement obtenus comme résultats du processus d'inversion.

Selon la géométrie du dispositif sur le terrain, la capacité d'analyse du champ d'onde de surface sera différente. La figure 2 présente la réponse impulsionnelle (ou fonction de transfert) d'un réseau d'ouverture 10 mètres composé de 6 capteurs dont un central et 5 disposés en couronne. Dans le domaine des nombres d'onde, la symétrie circulaire du réseau s'exprime par une réponse caractérisée par un pic central et des maxima locaux se répartissant régulièrement selon un cercle autour du pic central.

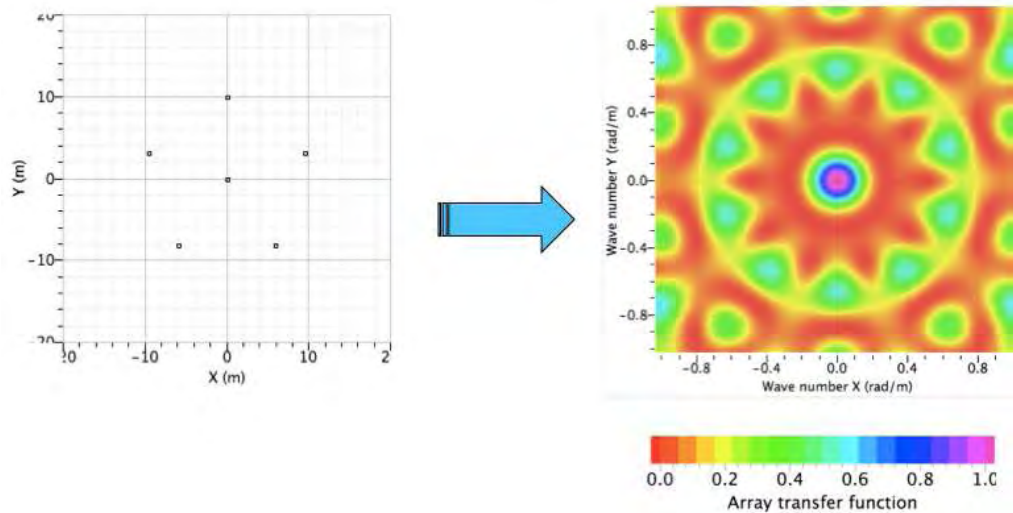


Figure 2 : Fonction de transfert du réseau d'ouverture égale à 10 mètres.

Au passage d'une onde sinusoïdale de surface de fréquence donnée f se propageant à une vitesse V , la réponse du réseau se transforme selon une translation du pic principal, égale au nombre d'onde associé ($k = 2\pi f/V$), dans la direction de propagation. La figure 3 illustre ce décalage pour une onde stationnaire de fréquence $f=20\text{Hz}$, se déplaçant dans le réseau à une vitesse de 300 m/s du sud vers le nord. Dans ce cas, le nombre d'onde vaut 0,42 rad/m.

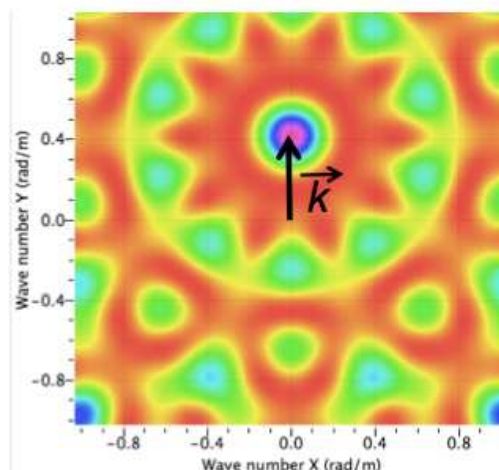


Figure 3 : Transformée de Fourier d'une onde sinusoïdale stationnaire ($f=20$ Hz) se propageant du sud vers le nord à une vitesse de 300 m/s dans le réseau de 10 mètres d'ouverture.

Le principe de la méthode f-k revient à estimer la valeur du module de k , fréquence par fréquence, en détectant automatiquement le décalage du pic principal. La méthode nécessite de filtrer les données en appliquant un filtre passe-bande aussi fin que possible autour des fréquences investiguées. La présence des pics secondaires est un frein à l'analyse et limite le calcul par les effets de repliement de spectre (ou aliasing). La largeur du pic principal est aussi une limite. Elle représente la sensibilité du réseau. A partir du calcul de la réponse du réseau, fréquence par fréquence, un diagramme de semblance dans le domaine fréquence-vitesse est calculé. La courbe de dispersion du milieu est finalement déduite du maximum de semblance.

Chaque étape a une influence sur le résultat final qui est cherché, 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 (comprenant 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 la méthode f-k qui comporte plusieurs stades où le choix des paramètres peut influencer la courbe obtenue. L'étape 3, étape d'inversion, peut donner une gamme de profils très étendue selon l'espace des paramètres choisi en entrée. Cet espace est plus ou moins contraint selon les connaissances préalables sur le site.

3 Campagne de mesures de bruit de fond en réseau

3.1 Matériel utilisé et type de mesure réalisée

Les enregistrements ont été effectués avec un système d'acquisition sismologique autonome et 18 capteurs Lennartz. Les capteurs utilisés sont des sismomètres 3 composantes Lennartz LE3D. Les trois géophones (Vertical, Transversal, Longitudinal) ont une fréquence propre de 0,2 Hertz (5 secondes). Leur transduction est de 400 microvolts/micromètre/seconde.

La station d'acquisition est du type Cityshark (fabricant : Léas). Elle comprend un amplificateur, un numériseur, un système horaire et un système de stockage de l'information. Cette station peut enregistrer un signal en continu depuis 6 capteurs tri-composantes avec une fréquence d'acquisition pouvant aller jusqu'à 500 Hertz. Différents gains peuvent être utilisés. Les données sont stockées sur des mémoires flash de 1Go. Pour cette étude seule les voies verticales des 18 capteurs ont été utilisées.

Nous avons utilisé une géométrie en spirale se décomposant en trois cercles de cinq

capteurs ayant, respectivement, 10 mètres, 50 mètres et 100 mètres d'ouverture. Nous verrons dans le chapitre 4.1, pourquoi cette géométrie de réseau a été retenue. La figure ci-dessous montre la disposition théorique des capteurs.

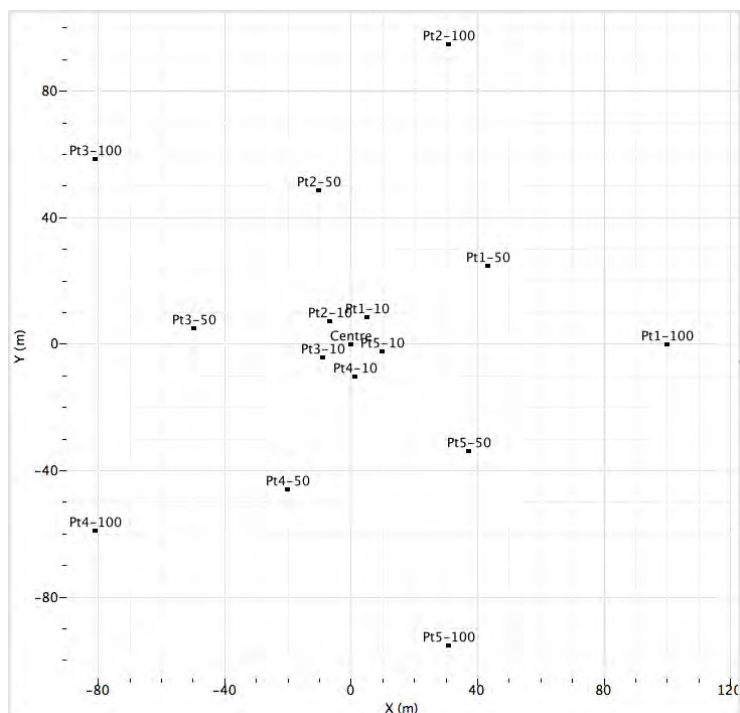


Figure 4 : Disposition théorique des capteurs utilisée pour les mesures de bruit de fond en réseau.

3.2 Localisation et choix des points de mesures

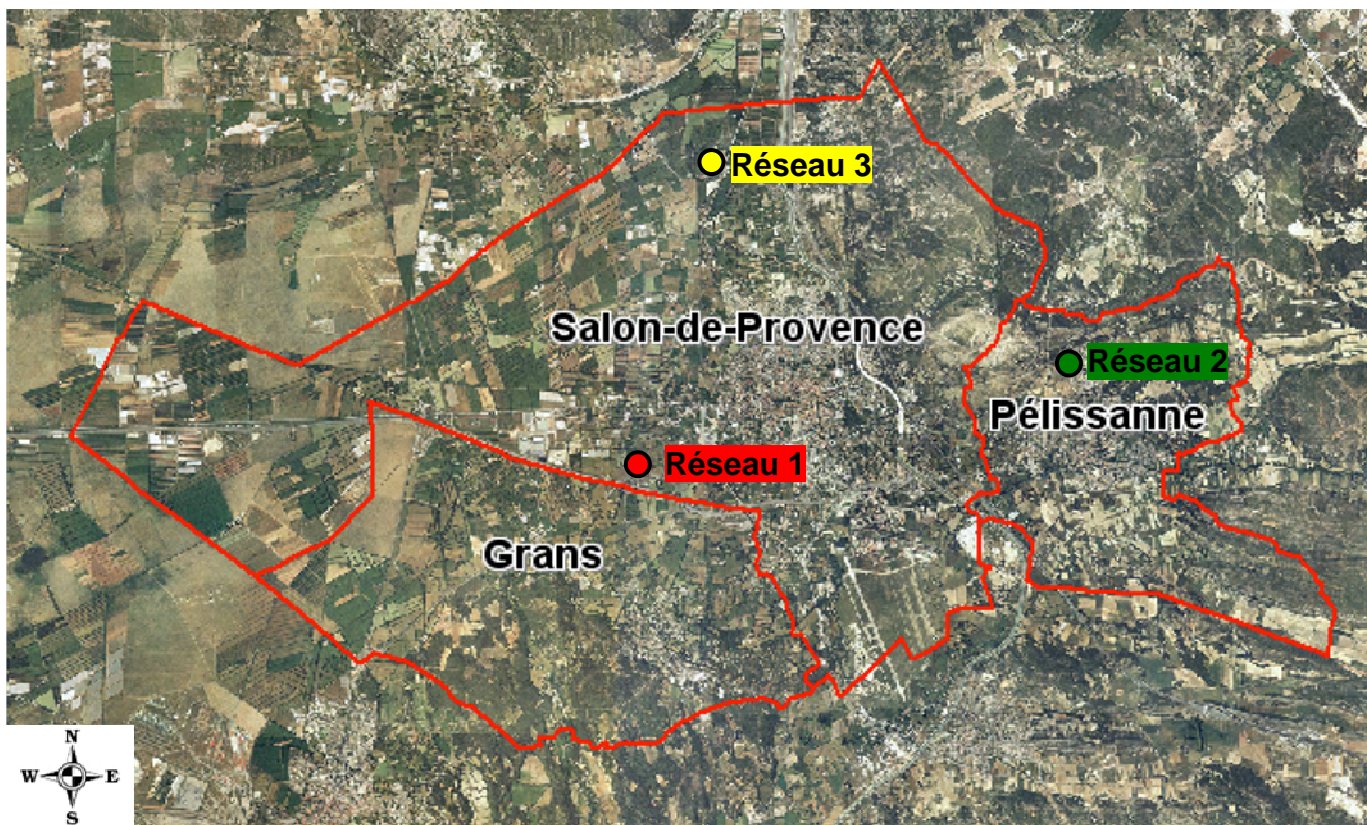


Figure 5 : Carte IGN de la zone d'étude avec emplacement des trois réseaux de bruit de fond réalisés.

Le choix des différents sites de mesure a été effectué en fonction du microzonage établi en 2005 et par les dimensions de l'espace disponible. Les mesures effectuées nécessitant un cercle sans obstacle majeur d'un diamètre de 200 mètres, seuls 3 points de mesure ont pu être effectués. Le réseau 1 est situé à l'Ouest de la commune de Salon-de-Provence, le réseau 2 est situé au Nord de Pélissanne et le réseau 3 au Nord de Salon-de-Provence. La Figure 5 montre l'emplacement des trois sites choisis.

La carte de la figure 6 représente le microzonage réalisé en 2005 à Salon-de-Provence, Grans et Pélissanne. Le microzonage comporte 7 zones numérotées de T1 à T7. Les zones T1 et T2 sont constituées d'affleurements rocheux tandis que les zones T3 à T7 sont constituées de sols mous à raides présentant un effet de site variable d'une zone à l'autre.

Les mesures d'enregistrement du bruit de fond en réseau ont été réalisées dans les zones T3, T4 et T7. L'analyse des mesures acquissent pour cette étude va permettre de préciser la vitesse de propagation des ondes S et l'épaisseur des différents terrains rencontrés sous chaque point de mesure, donnant ainsi une meilleure caractérisation de ces trois zones sujettes à des effets de site lithologiques.

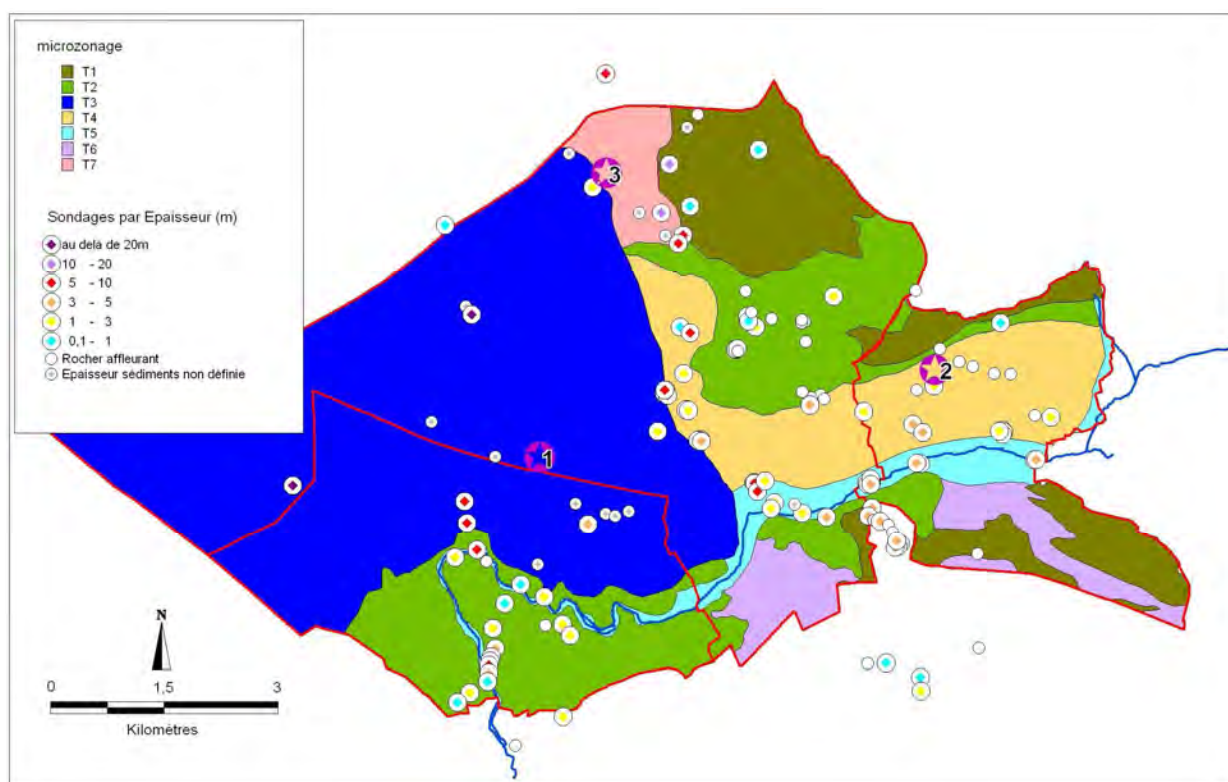


Figure 6 : Carte du zonage de 2005 pour les communes de Salon-de-Provence, Grans et Pélissanne. Les trois réseaux réalisés dans la présente étude sont notés de 1 à 3. Les cercles incluant un diamant de couleur représentent les forages géotechniques recensés en 2005.

3.3 Contexte géologique et géotechnique

Lors des études antérieures, une recherche dans les archives du CETE Méditerranée ainsi que dans la banque de données du sous-sol (BSS, <http://infoterre.brgm.fr>) avait permis d'obtenir près de 150 sondages sur les trois communes. Cependant, la plupart de ces sondages ne comportent pas de description détaillée des colonnes de sol. Ils nous ont permis toutefois d'estimer la nature et l'épaisseur des niveaux quaternaires. La carte géologique simplifiée ci-après renseigne le type de sol sur lequel les mesures ont été réalisées ainsi que sur les

profondeurs de sédiments trouvées par sondages.

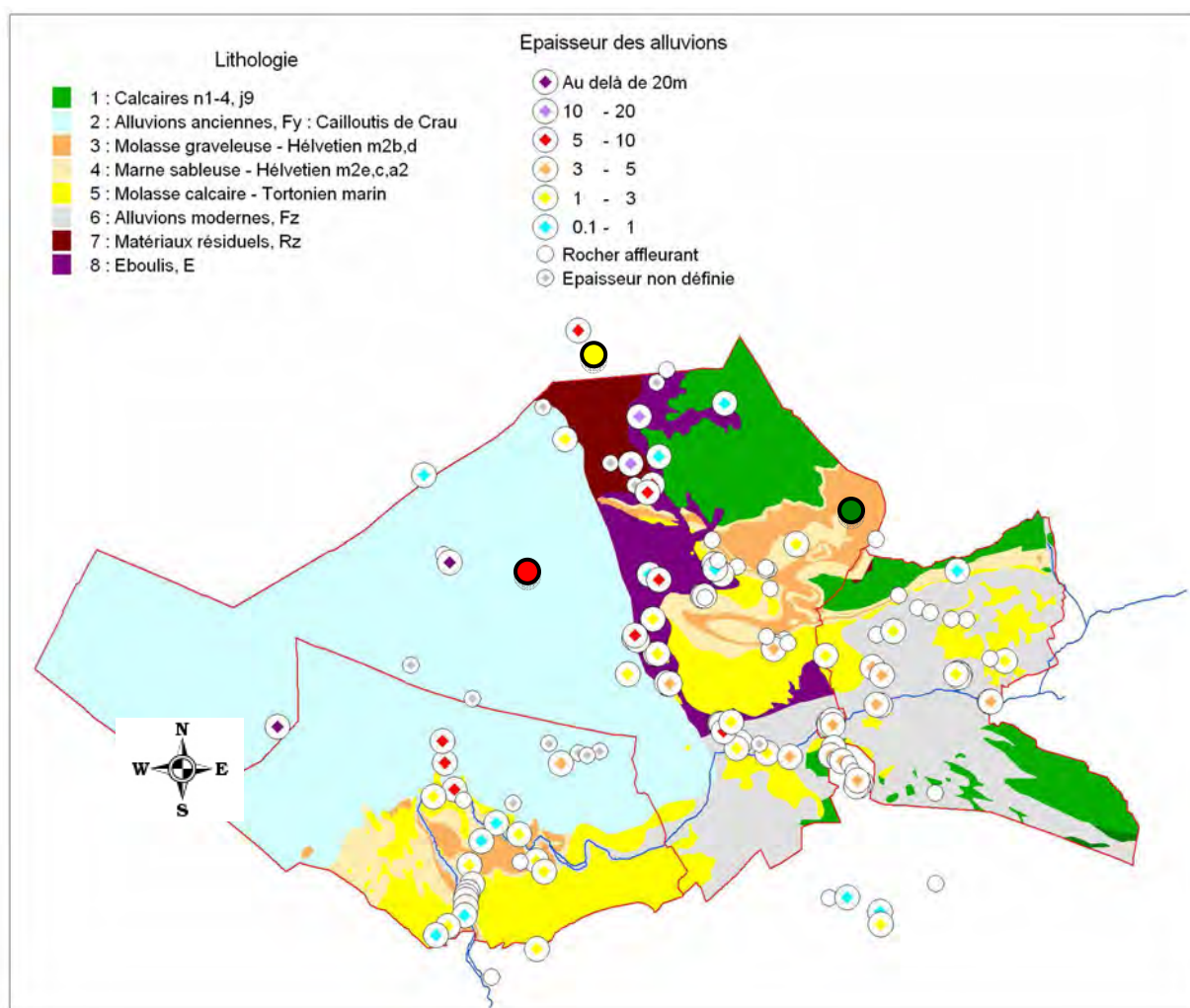


Figure 7 : Carte géologique simplifiée indiquant la profondeur des sédiments trouvée au droit des sondages précédemment réalisés.

3.3.1 Dispositif de mesure du réseau 1 sur la zone T3

Ce point de mesure est situé à l'ouest de la commune de Salon-de-Provence. Le réseau est composé de 16 capteurs répartis selon trois cercles de cinq capteurs ayant respectivement 10, 50 et 100 mètres d'ouverture et d'un capteur placé au centre de ces trois cercles. Une première étape, en laboratoire, a consisté à trouver un terrain suffisamment grand pour accueillir le réseau. Les coordonnées théoriques de chaque capteur ont pu ainsi être déterminées. Les capteurs ont été ensuite placés sur le terrain à l'aide d'un GPS. La photo aérienne ci-dessous montre l'emplacement réel de chaque capteur finalement disposé sur le terrain. L'erreur estimée de localisation par rapport au dispositif idéal est inférieure à 1 mètre.



Figure 8 : Vue aérienne de l'emplacement des capteurs du réseau 1

D'après l'étude de 2005, ce site de mesure est situé sur des alluvions anciennes. Ce terrain appartient à la zone T3 : Sol raide dans le microzonage (Figure 6). Cette zone est constituée du bassin des alluvions de Crau. Selon les données géotechniques disponibles, l'épaisseur de ces alluvions est variable. Elle varie ainsi entre 5 m et 150 m. Afin de tenir compte de ces variations, trois colonnes de sol représentatives ont été utilisées. Elles sont schématiquement replacées dans la figure 9.

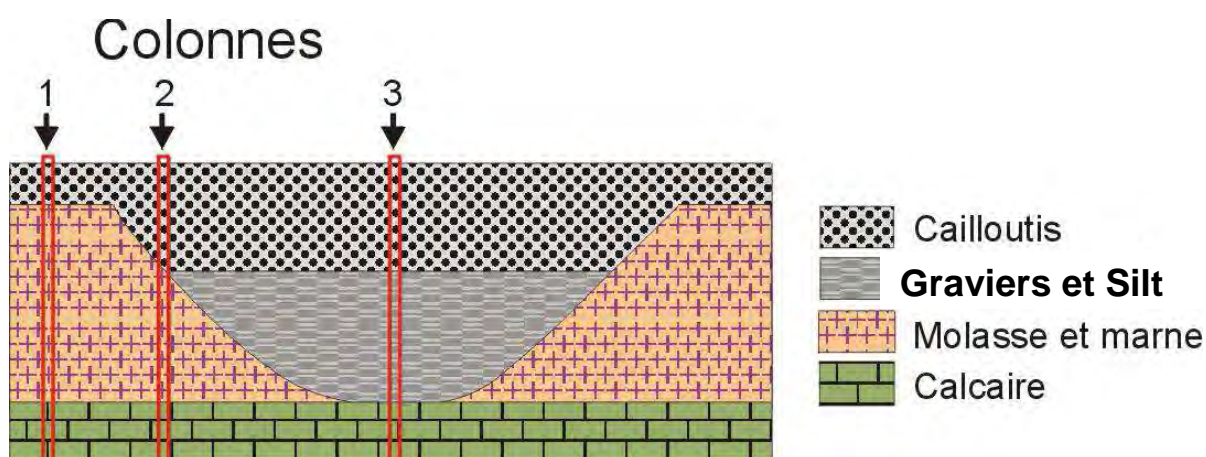


Figure 9 : Colonnes de sol dans la plaine de Crau

Colonne 1

Lithologie	Age	Epaisseur (m)	ρ (Kg/m ³)	Vs (m/s)
Cailloutis	Quaternaire (Würm)	1	1800	500
Poudingue	Quaternaire (Würm)	2	1800	800
Cailloutis	Quaternaire (Würm)	2	1800	600
Molasse calcaire	Tortonien	45	2000	1200
Alternance de Molasse gréseuse et Marne sableuse	Helvétien	100	2000	1000
Calcaire	Crétacé	infinie	2400	2500

Colonne 2

Lithologie	Age	Epaisseur (m)	ρ (Kg/m ³)	Vs (m/s)
Cailloutis	Quaternaire (Würm)	1	1800	500
Poudingue	Quaternaire (Würm)	2	1800	800
Cailloutis	Quaternaire (Würm)	27	1800	600
Molasse calcaire	Tortonien	20	2000	1200
Alternance de Molasse gréseuse et Marne sableuse	Helvétien	100	2000	1000
Calcaire	Crétacé	infinie	2400	2500

Colonne 3

Lithologie	Age	Epaisseur (m)	ρ (Kg/m ³)	Vs (m/s)
Cailloutis	Quaternaire (Würm)	1	1800	500
Poudingue	Quaternaire (Würm)	2	1800	800
Cailloutis	Quaternaire (Würm)	27	1800	600
Gravier	Quaternaire (Würm)	90	1800	1000
Silt	Quaternaire (Würm)	30	1800	1200
Calcaire	Crétacé	infinie	2400	2500

Ces informations vont permettre de contraindre l'espace des paramètres considéré pour l'inversion de la courbe de dispersion. Ainsi notamment, on peut s'attendre à trouver un premier milieu dont la vitesse des ondes S devrait être comprise entre 500 et 800 m/s, représentant les cailloutis de Crau.

3.3.2 Dispositif de mesure du réseau 2 sur la zone T4

Ce réseau est situé au Nord de la commune de Péliganne. La photo aérienne ci-dessous montre l'emplacement des capteurs installés sur ce site. Le protocole utilisé pour déterminer et mettre en place les capteurs de ce réseau est le même que pour le réseau 1.

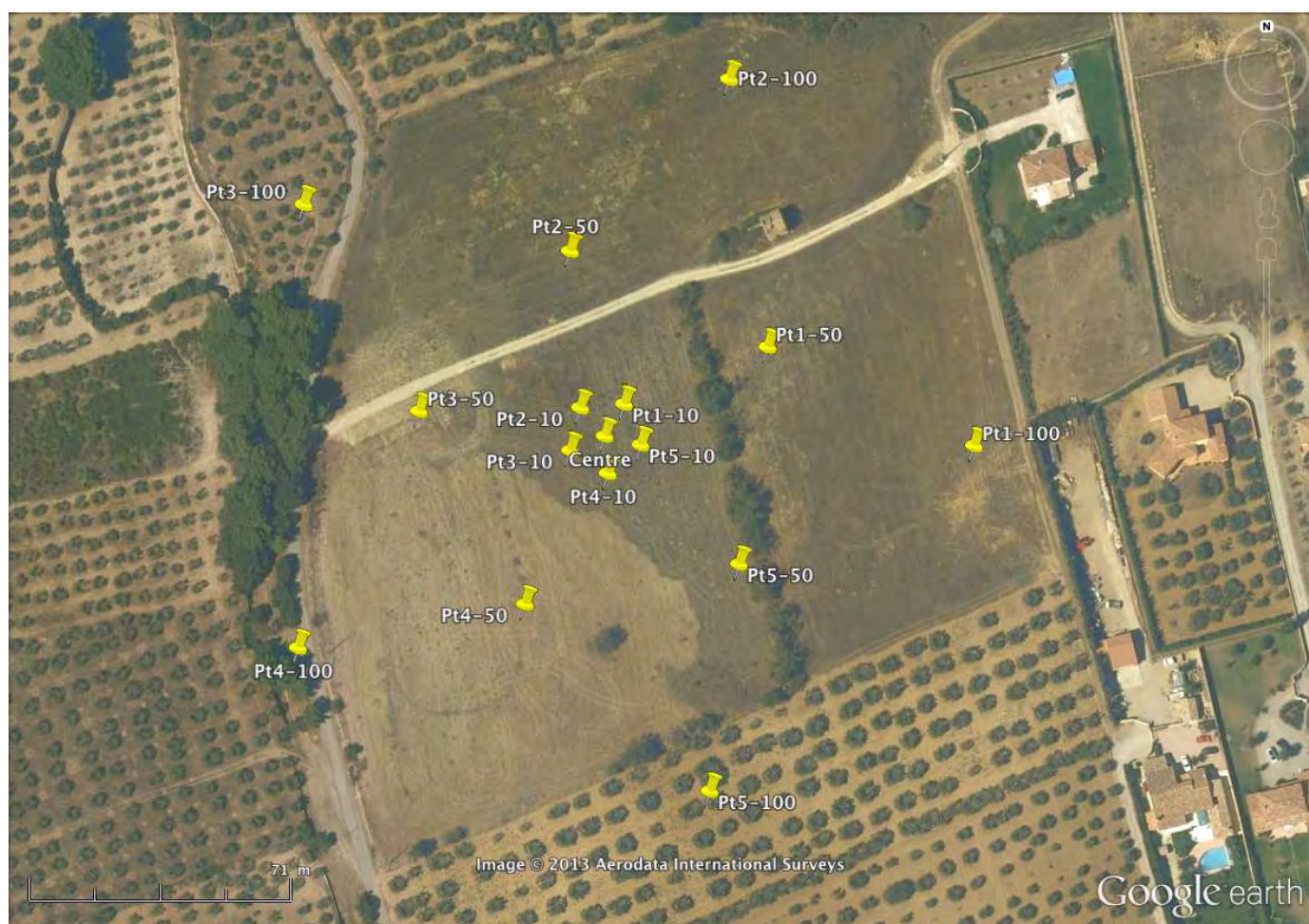


Figure 10 : Vue aérienne de l'emplacement des capteurs du réseau 2.

D'après l'étude de 2005, ce site est localisé sur des colluvions de la zone T4. Cette zone rassemble des terrains de lithologie diverse. L'épaisseur des sédiments, définie par les sondages géotechniques déjà réalisés (Figure 6) est comprise entre 1 et 5 mètres. Dans cette zone, les molasses calcaires et gréseuses sont affleurantes par endroits où sous une très faible couche de colluvions de surface. Le tableau ci-dessous présente la colonne de sol type pour cette zone.

Tableau 1 : Résumé des données géotechniques caractérisant la zone T4.

Lithologie	Age	Epaisseur (m)	ρ_s (Kg/m ³)	Vs (m/s)
Alluvions : limons et sables	Quaternaire	3	1800	200
Molasse calcaire	Tortonien	47	2000	1200
Alternance de Molasse gréseuse et Marne sableuse	Helvétien	100	2000	800
Calcaire	Crétacé	infinie	2400	2500

3.3.3 Dispositif de mesure du réseau 3 sur la zone T7

Ce réseau est situé au Nord de la commune de Salon-de-Provence. La photo aérienne ci-dessous montre l'emplacement précis des capteurs installés sur ce site. Le protocole utilisé pour déterminer et mettre en place les capteurs de ce réseau est le même que pour le réseau 1.



Figure 11 : Vue aérienne de l'emplacement des capteurs du réseau 3.

D'après l'étude de 2005, ce site se trouve sur un terrain alluvionnaire de la zone T7. L'épaisseur des sédiments récents, définie par les sondages géotechniques déjà réalisés, n'est pas constante sur l'ensemble de la zone et d'après la carte géologique simplifiée précédente (Figure 6) celle-ci doit être comprise entre 3 et 20 mètres. On notera que le site de mesure choisi est très proche de la limite géologique du bassin des alluvions de la Crau. Le tableau ci-dessous résume la colonne de sol type considérée pour cette zone.

Tableau 2 : Résumé des données géotechniques caractérisant la zone T7.

Lithologie	Age	Epaisseur (m)	ρ_s (Kg/m ³)	Vs (m/s)
Terre végétale	Quaternaire	0,5	1800	150
Limons argileux	Quaternaire	4	1800	200
Alluvions argilo-sableuses	Quaternaire	5	1800	250
Argile plastique	Quaternaire	8	1800	300
Calcaire	Crétacé	infinie	2400	2500

4 Analyse des mesures de bruit de fond en réseau

Suite à la campagne de mesure sur le terrain, les données sont transférées sur ordinateur au laboratoire. Elles sont ensuite traitées avec le logiciel Geopsy (Whatelet, 2008, Di Giulio, 2006) et les applications qui lui sont associées, en suivant la procédure qui est détaillée ci-dessous. Cette procédure comprend l'analyse des données dans le plan fréquence/nombre d'onde (f-k) et l'inversion de courbes de dispersion.

4.1 Calcul de la fonction de transfert théorique du réseau

La première étape de la méthode consiste à déterminer le domaine de validité des courbes de dispersion calculées. 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. Ces limites sont propres à la géométrie du réseau. Elles influencent le résultat obtenu. Pour les déterminer il faut s'intéresser à la réponse théorique du réseau dans le domaine fréquence-nombre d'onde (f-k), 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 horizontale infinie, de telle sorte que tous les capteurs sont en phase au même moment. Elle est entièrement déterminée par le nombre et la position des capteurs du réseau. La limite de résolution du réseau est donnée par le couple (k_{min} , k_{max}). Ces limites se traduisent, dans le plan fréquence-lenteur (Figures 12), par les courbes $k_{min}/2$, k_{min} , $k_{max}/2$ et k_{max} . Il est admis que le domaine d'investigation possible a pour limite inférieure $k_{min}/2$ et pour limite supérieure, k_{max} .

Après plusieurs tests numériques, la géométrie de type « spirale » a été retenue car elle permet un domaine d'investigation le plus grand possible compte tenu du matériel utilisé. De plus, la limite basse (k_{min}) étant dépendante de la plus grande distance inter-capteur du réseau, nous avons cherché à mettre en place un réseau ayant la plus grande ouverture afin de permettre une analyse du bruit de fond vers les basses fréquences.

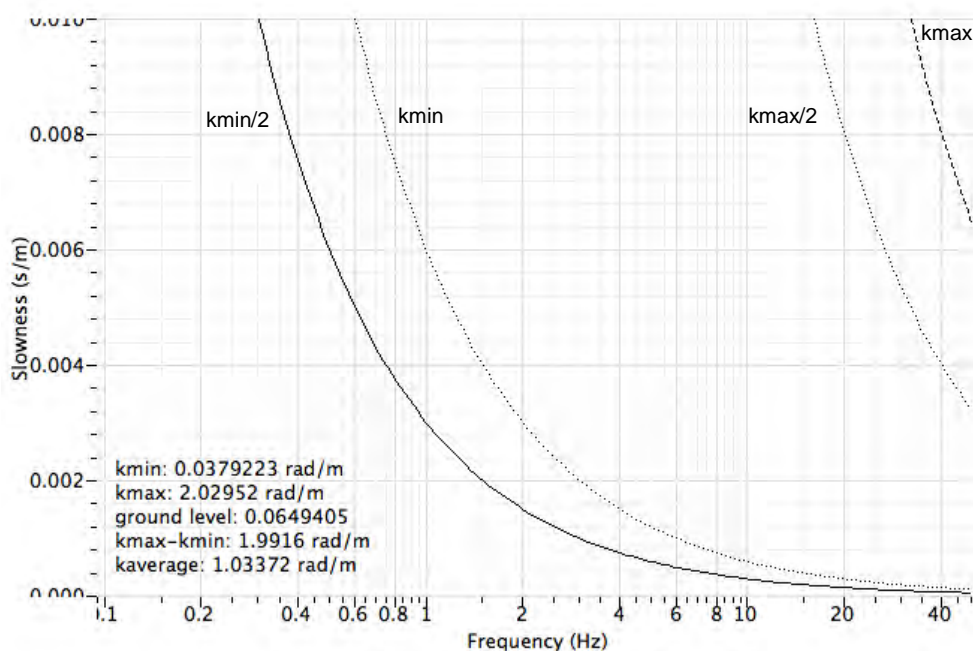


Figure 12 : Limites de calcul du réseau en « spirale » utilisée pour cette étude.

4.2 Calcul des courbes de dispersion

Nous avons déterminé la courbe de dispersion des différents points de mesure (réseau 1, 2 et 3) à partir de la méthode f-k en utilisant le logiciel Geopsy. Cette méthode permet d'obtenir une estimation des vitesses de propagation des ondes de Rayleigh au travers du réseau selon le principe décrit plus haut en fonction de leur fréquence. Les diagrammes de semblance calculés pour les trois réseaux sont présentés sur les figures 13, 14 et 15 respectivement. Sur ces figures, ont été rajoutés les domaines d'investigation possibles, donnés par les hyperboles fréquence-lenteur $k_{min}/2$ et k_{max} calculées précédemment, propres à chaque réseau. Hors de ces limites la courbe de dispersion n'est pas définie. La courbe de dispersion pour chaque réseau est déterminée manuellement en relevant les maxima de semblance sur chaque graphique.

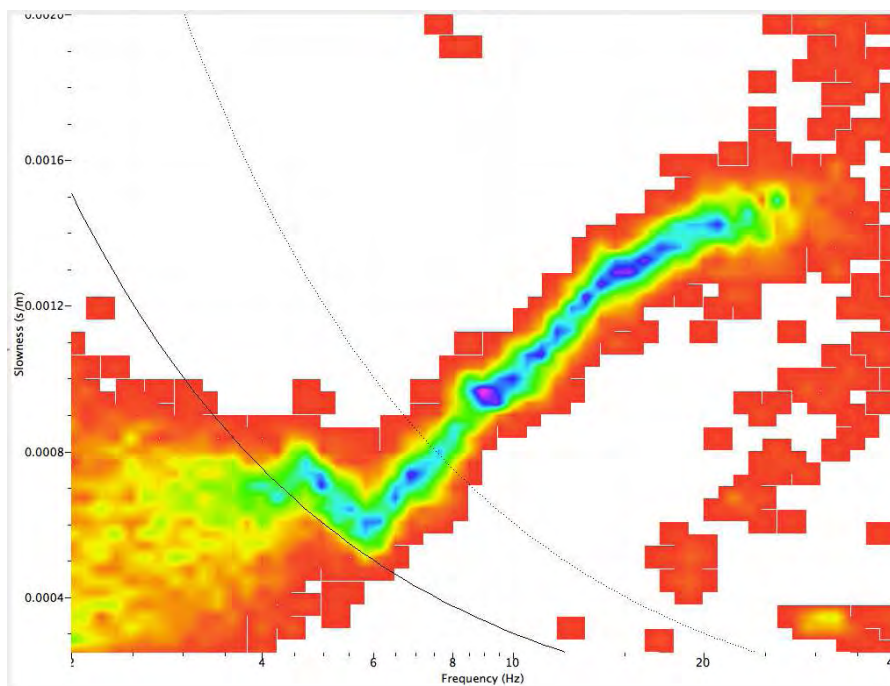


Figure 13 : Diagramme de semblance calculé à partir du réseau 1 à l'Ouest de Salon-de-Provence.

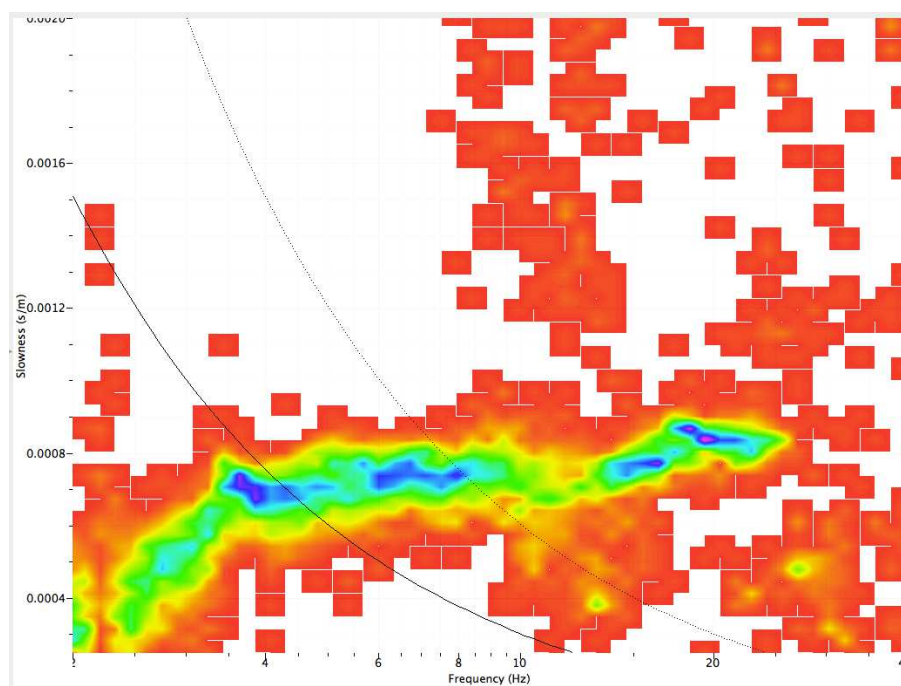


Figure 14 : Diagramme de semblance calculé à partir du réseau 2 au Nord de Pélissanne.

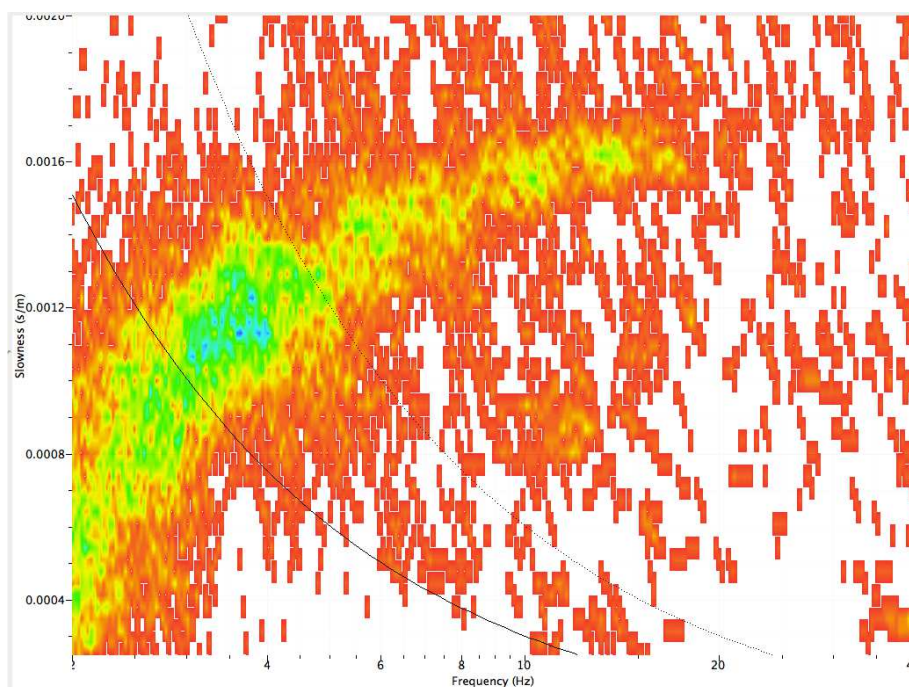


Figure 15 : Diagramme de semblance calculé à partir du réseau 3 au Nord de Salon-de-Provence

Les courbes dispersion déduites de ces diagrammes de semblance sont injectées dans le processus d'inversion qui suit. Le pointage se réalise en suivant les zones les plus énergétiques, c'est-à-dire celles identifiées sur les figures par les couleurs allant du Jaune au bleu.

4.3 Inversion de la courbe de dispersion

L'inversion consiste à retrouver le profil de vitesse de propagation des ondes de cisaillement à partir de la courbe de dispersion. La définition du profil de vitesse à partir des courbes caractéristiques n'a pas de solution analytique, c'est le problème inverse qui permet de le retrouver. Par contre, l'inversion fournit plusieurs solutions possibles. On parle de non-unicité de la solution.

L'inversion des courbes de dispersion est fondée sur un processus itératif et non-linéaire de recherche aléatoire à partir d'un espace de paramètres qui permet de minimiser l'écart entre les courbes calculées et celles 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 géologiques et leur gamme d'épaisseur, la gamme des valeurs de vitesse des ondes P et S par formation, l'évolution de ces vitesses dans chaque formation (constante, linéaire, loi puissance) ou la densité des terrains investigués.

Les données géotechniques en notre possession permettent de réduire cet espace d'investigation. Ces informations vont être injectées dans l'espace initial des paramètres du processus d'inversion afin de mieux contraindre le résultat final. A titre d'exemple, les figures ci-dessous (Figure 16 et 17) montre l'espace des paramètres d'inversion pour le réseau 1 situé à l'Ouest de Salon-de-Provence.

Figure 16 : Contrainte du paramètre « densité » pour le processus d'inversion.

Figure 17 : Contrainte du paramètre « vitesse des ondes de cisaillement » pour le processus d'inversion.

Les données géotechniques disponibles pour cette zone nous permettent de contraindre la densité des différentes couches ainsi que la vitesse de propagation des ondes de cisaillement. La profondeur des différentes interfaces étant variable sur l'ensemble de la zone nous avons choisi de laisser le processus d'inversion tendre vers une solution sans la contraindre. Cela se traduit, dans l'espace des paramètres, à laisser les profondeurs libres (ici, entre 1 et 100 mètres).

4.4 Analyse des résultats de l'inversion

Les profils de vitesse de propagation des ondes de cisaillement résultants de l'inversion ainsi que l'écart entre les courbes de dispersion associées à ces profils et la courbe de dispersion observée, sont donnés sous forme de figure pour chaque réseau. Le jeu de couleur utilisé pour afficher les profils de vitesses correspond à l'erreur entre les modèles théoriques générés par le processus d'inversion et les données observées. Plus cette erreur sera faible (couleur rouge) et plus la courbe de dispersion associée au modèle théorique sera proche de la courbe de dispersion cible.

4.4.1 Inversion de la courbe de dispersion du réseau 1

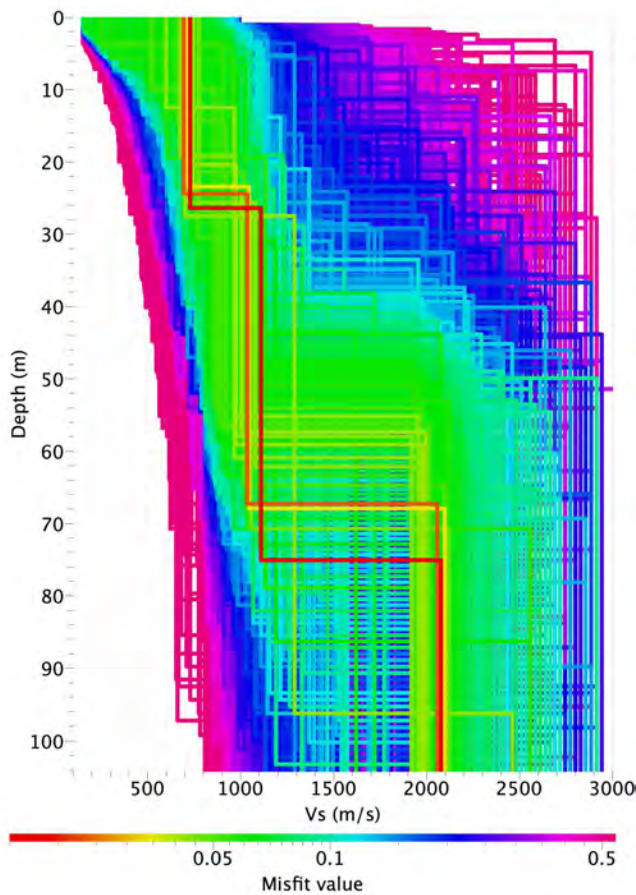


Figure 19 : Profil de vitesses V_s obtenus par inversion d'un modèle théorique composé de 3 couches.

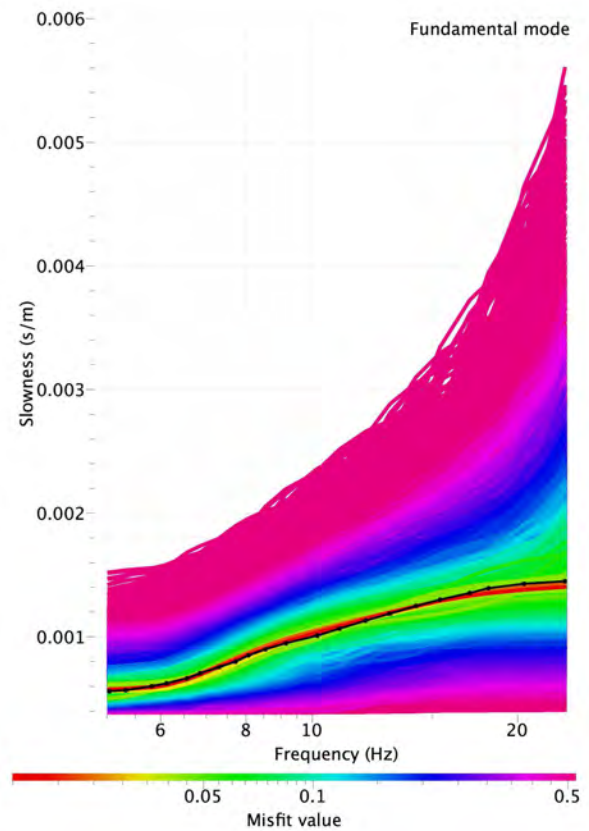


Figure 18 : Ecart entre le modèle numérique et la courbe de dispersion issue des données acquises sur le terrain.

Parmi les solutions proposées par le processus d'inversion, celles dont l'erreur par rapport à la courbe de dispersion pointée est la plus faible (courbe rouge) sont caractérisées par deux interfaces. Une première interface entre 25 et 30 mètres de profondeur délimitant une couche ayant une vitesse d'ondes S comprise entre 500 et 800 m/s puis une deuxième interface plus profonde (entre 75 et 80 mètres) avec une vitesse d'onde S aux alentours de 1000 m/s. Enfin, une couche profonde caractérisée par une vitesse d'onde S aux alentours de 2000 m/s. Ces résultats sont en accords avec les données géotechniques disponibles. Ce profil est en bon accord avec les profils type de l'étude de 2005 pour la zone T3. En effet, d'après les trois colonnes de sols disponibles, le profil de vitesse issu de ce processus d'inversion correspondrait à un point situé entre les colonnes 2 et 3.

4.4.2 Inversion de la courbe de dispersion du réseau 2

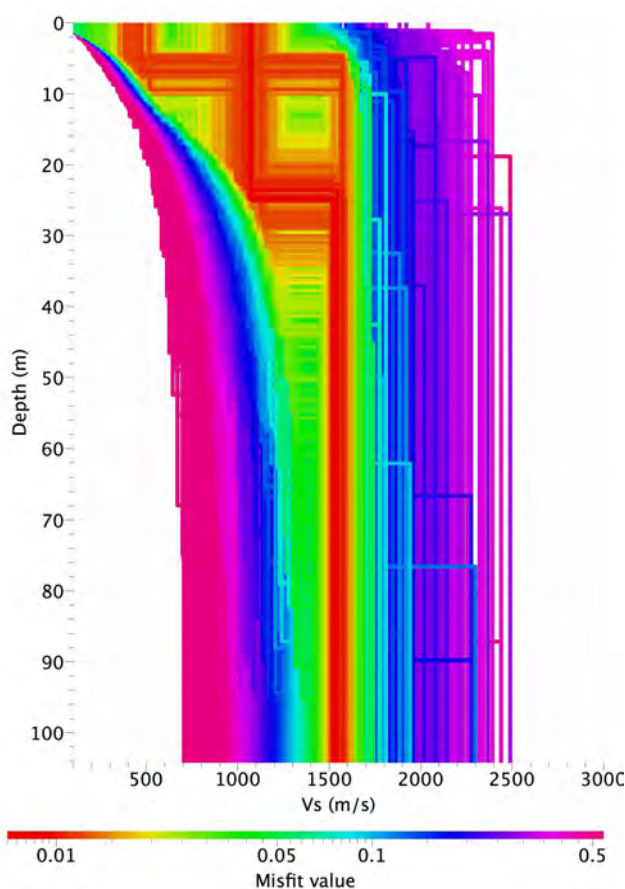


Figure 21 : Profil de vitesses V_s obtenus par inversion d'un modèle théorique composé de 2 couches.

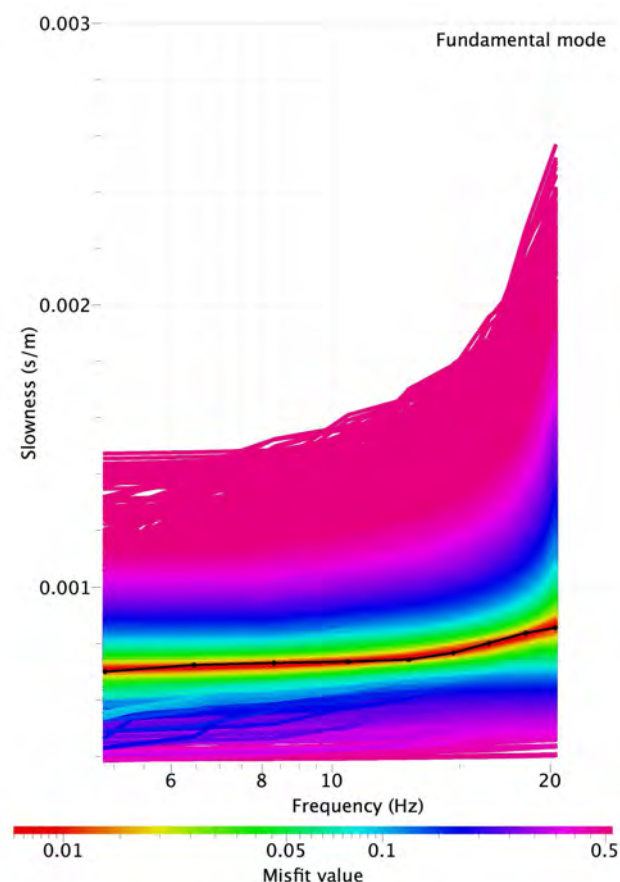


Figure 20 : Ecarts entre le modèle numérique et la courbe de dispersion issue des données acquises sur le terrain.

Compte tenu des observations de terrain et des connaissances géologiques et géotechniques de la zone, un modèle théorique à deux couches a été retenu pour cette inversion. L'espace des paramètres du processus d'inversion a été contraint par la densité des couches et la vitesse des ondes de cisaillement (ondes S). Deux solutions numériquement acceptables sont proposées par le processus d'inversion et sont en accord avec la courbe de dispersion obtenue à partir des données enregistrées sur le terrain. Ces deux solutions sont :

- Une première interface, entre 3 et 10 mètres de profondeur, délimitant une couche caractérisée par une vitesse de propagation d'onde S comprise en 300 et 500 m/s. On notera que pour cette solution, plus la vitesse des ondes S est faible plus la profondeur de l'interface est proche de la surface, et inversement.
- Une seconde solution qui présente une interface plus profonde, entre 20 et 30 mètres, dont le milieu est caractérisé par une vitesse d'onde S aux alentours de 1000 m/s.

Ce terrain, situé au Nord de la commune de Pélissanne, est caractérisé en surface par des alluvions récents dont la vitesse théorique des ondes S est comprise entre 200 et 800 m/s puis un milieu plus induré constitué de molasse calcaire dont la vitesse des ondes S est comprise entre 1200 et 1500 m/s. La première solution trouvée, pour des vitesses d'onde de cisaillement faibles, est en accord avec ces données.

4.4.3 Inversion de la courbe de dispersion du réseau 3

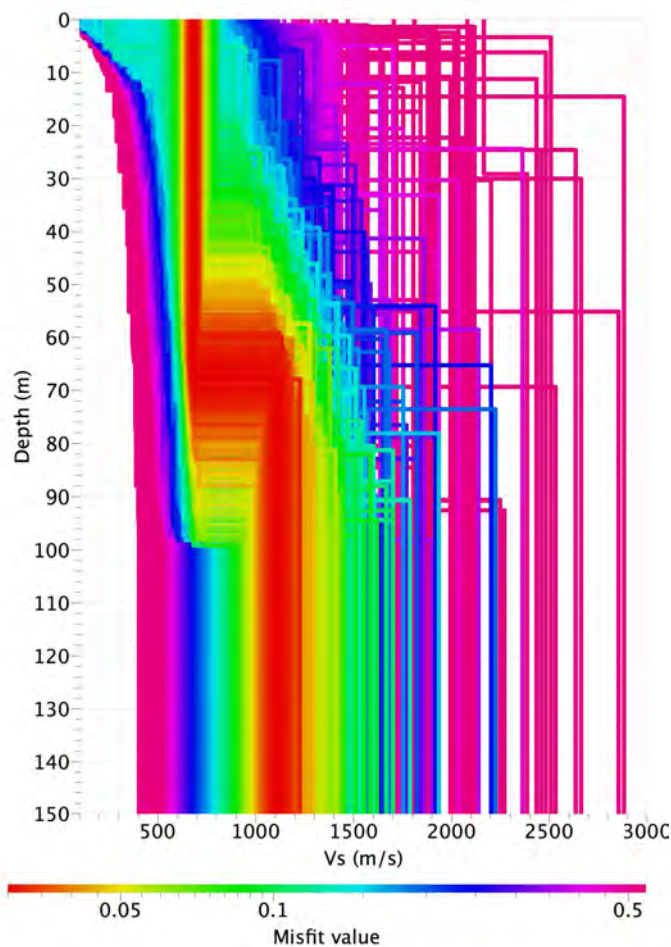


Figure 22 : Profil de vitesses V_s obtenus par inversion d'un modèle théorique composé de 2 couches.

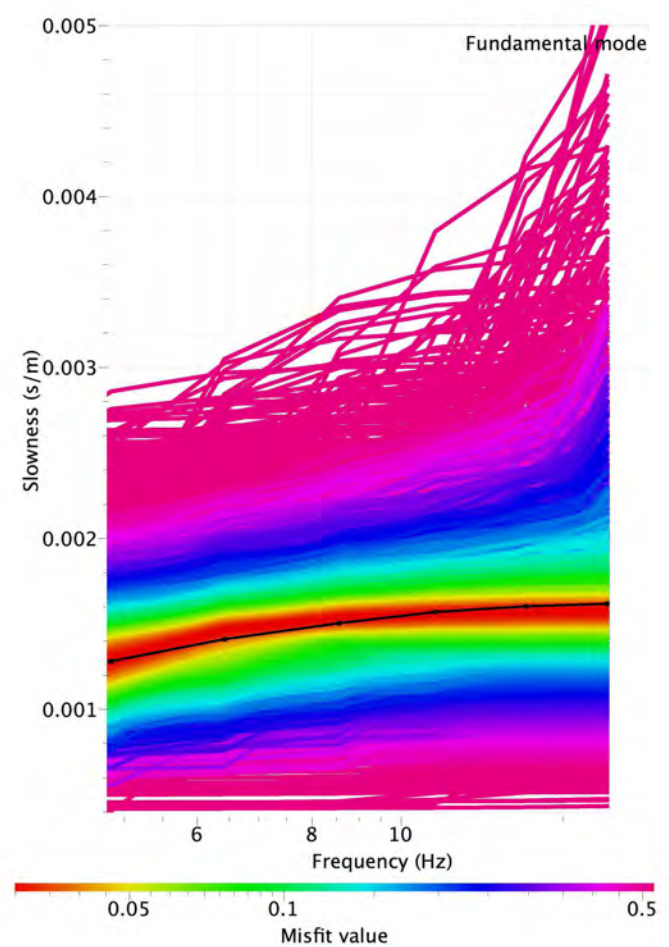


Figure 23 : Ecart entre le modèle numérique et la courbe de dispersion issue des données acquises sur le terrain.

Ce réseau ne présente pas beaucoup de dispersion. En effet, l'analyse f-k montre une vitesse de propagation des ondes de Rayleigh qui ne varie que très peu avec la fréquence. Par conséquent, le profil de vitesse sous le point de mesure est assez peu contraint par cette expérience. C'est pourquoi, aucun des modèles numériques testés n'arrive à reproduire parfaitement la courbe de dispersion. Nous n'obtenons finalement qu'une idée de la vitesse de propagation dans la première couche de sol. D'après nos mesures, celle-ci serait voisine de 600 m/s. L'épaisseur de cette couche reste cependant incertaine.

5 Conclusion

Le but de cette étude est de vérifier la cohérence des résultats obtenus par l'analyse f-k avec les profils de vitesses déterminés lors des études préalables à l'établissement du PPR sismique de Salon-de-Provence (13). La particularité de la méthode utilisée ici étant d'obtenir une estimation de la vitesse des ondes S à partir d'enregistrement de bruit de fond sismique. Les résultats issus de l'analyse f-k des trois réseaux réalisés pour cette étude sont donnés ci-dessous :

- Le réseau 1, mis en place à l'Ouest de Salon-de-Provence sur les anciens alluvions de la Crau (zone T3) a permis de mettre en évidence un premier milieu caractérisé par une épaisseur comprise entre 25 et 30 mètres et par une vitesse d'ondes S entre 500 et 800 m/s. Ces résultats sont parfaitement cohérents avec les profils de vitesses estimées par sondage géotechniques lors des précédentes études ;
- Le réseau 2 a été réalisé sur un terrain classé en zone T4 situé au Nord de la commune de Pélissanne. L'analyse f-k des données acquises sur ce terrain montrent un premier milieu d'environ 5 mètres d'épaisseur caractérisé par une vitesse d'onde S aux alentours de 500 m/s, ce qui vient confirmer les données issues des sondages géotechniques ;
- En ce qui concerne le réseau 3, réalisé au Nord de Salon-de-Provence sur un terrain de la zone T7, la faible dispersion observée sur les données acquises n'a pas permis de déterminer l'épaisseur du premier milieu rencontré. Par contre, la vitesse des ondes S, estimée aux environs de 600 m/s est parfaitement cohérente avec celle déduite des sondages géotechniques réalisés précédemment.

Cette étude, complémentaire à l'étude de 2005, permet de confirmer les colonnes de sol caractéristiques des zones du microzonage. Conformément au devis initial, il reste maintenant à mettre à jour la base de donnée des sondages géotechniques et vérifier la cohérence de nos résultats avec les nouveaux spectres de référence EC8.

Le chef du service Risque sismique

Le directeur du laboratoire de Nice

Etienne Bertrand

Jean-Philippe Devic

Références

Aki K. (1957), Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 415-456.

Campillo, M.(2007) .Phase and correlation in 'random'seismic fields and the reconstruction of the Green function. *Pure and Appl. Geophys.* 163, 457-502.

CETE Méditerranée (2005), *Etudes préalables à l'établissement du Plan de Prévention des Risques sismiques de Salon-de-Provence*, Rapport du CETE Méditerranée, Novembre 2005.

DOFEAS (2011), *Mesure et traitement de bruit de fond sismique sur la digue du Rhône à Arles (Digue rive est)*, Rapport du CETE Méditerranée, janvier 2011.

Di Giulio G., C. Cornou, M. Ohrnberger, M. Wathelet, and A. Rovellii (2006). Deriving Wavefield Characteristics and Shear-Velocity Profiles from Two-Dimensional Small-Aperture Arrays Analysis of Ambient Vibrations in a Small-Size Alluvial Basin, Colfiorito, Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 1915--1933.

Snieder, R., K. Wapenaar, and U. Wegler (2007) Unified Green's function retrieval by cross-correlation; connection with energy principles. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, 75, 036103.

Wathelet, M., D. Jongmans, M. Ohrnberger, and S. Bonnefoy-Claudet (2008). Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over Vs inversion. *Journal of Seismology*, 12, 1-19.

Wapenaar K (2004) Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross-correlation. *Physical Review Letters*, 93, 254301.

Connaissance et prévention des risques - Développement des infrastructures - Énergie et climat - Gestion du patrimoine d'infrastructures - Impacts sur la santé - Mobilités et transports - Territoires durables et ressources naturelles - Ville et bâtiments durables

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction territoriale Méditerranée - Laboratoire de Nice - 56 boulevard Stalingrad 06359 Nice Cedex 4 - Tél : +33(0)4.92.00.81.39
Siège : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33(0)4.72.14.30.30
www.cerema.fr