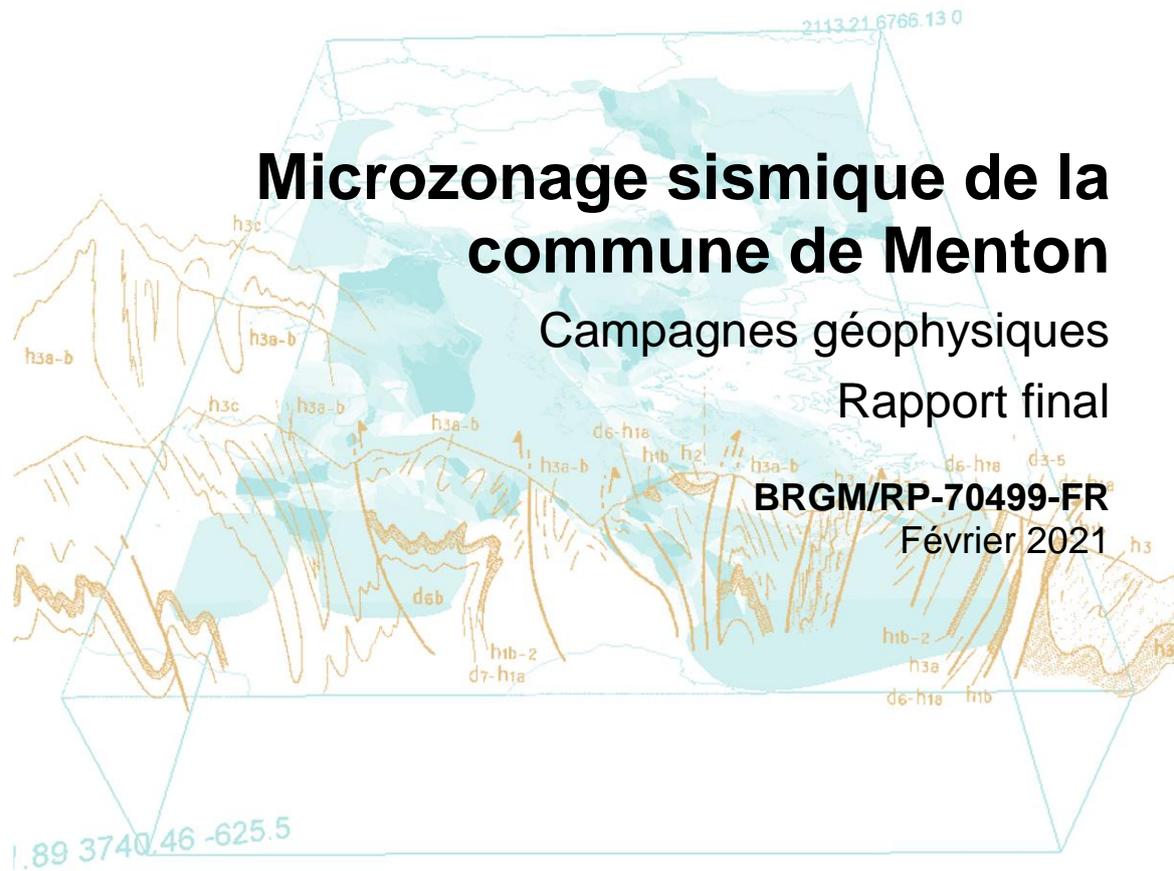


Document public





Document public

# Microzonage sismique de la commune de Menton

Campagnes géophysiques  
Rapport final

**BRGM/RP-70499-FR**  
Février 2021

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Service public du BRGM 2020

**M. Delatre, A. Roullé, A. Colombain**  
Avec la collaboration de  
**A. Bitri, B. Maurice**

**Vérificateur :**

Nom : De Martin Florent  
Fonction : Expert scientifique  
Date : 17/02/2021  
Signature :



**Approbateur :**

Nom : Norie Alexander  
Fonction : Directeur régional  
Provence-Alpes-Côte d'Azur  
Date : 25/02/2021  
Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement  
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.  
Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

**Mots-clés** : Microzonage, Campagne géophysique, PPR sismique, Menton.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Delatre M, Roullé A., Colombain A, Bitri A, Maurice B (2021)** – Microzonage sismique de la commune de Menton - Campagne géophysique. Rapport BRGM/RP-70499 -FR 82 p., 47 fig., 13 tab., 3 ann.

## Synthèse

Dans le cadre de la réalisation de Plan de Prévention du Risque Sismique (PPRS) de Menton, le BRGM a réalisé une campagne de mesures géophysiques destinées à identifier la susceptibilité des formations superficielles à présenter des effets de site, à qualifier la fréquence de résonance de ces formations et leur profil de vitesse d'ondes S, et à étudier la variabilité spatiale de ces paramètres. Ce rapport présente l'ensemble des mesures réalisées dans le cadre de cette campagne.

Trois types de mesures ont ainsi été menées :

- Mesures ponctuelles H/V pour caractériser la fréquence de résonance des formations géologiques superficielles considérées ;
- Profils sismiques MASW pour caractériser les profils de vitesse d'ondes S ( $V_s$ ) avec la profondeur ;
- Mesures de bruit de fond en réseau pour caractériser les profils de vitesse d'ondes S avec la profondeur. Cette méthode est complémentaire des mesures MASW et permet d'atteindre des profondeurs de pénétration supérieures à celles des profils MASW.

Au total, 72 mesures H/V, 8 profils MASW et 2 séries de mesures en réseau ont été réalisées par le BRGM avec l'appui du CEREMA sur les formations géologiques suivantes :

- Alluvions du centre-ville et des vallées du Borrigo et du Caréi ;
- Colluvions de pente plutôt développées sur la formation des grès d'Annot,
- Complexe littoral situé le long du littoral, au débouché des torrents et sous le bâti de la ville, constitué de dépôts anthropiques, de formations littorales sableuses et caillouteuses ainsi que les dépôts alluviaux, qu'il n'est pas toujours facile de distinguer, appelé dans ce cas « Complexe littoral indifférencié » ;
- Grès d'Annot et Flyschs oligocènes présents de part et d'autre des vallées du Borrigo et du Caréi ;
- Formations marno-calcaires présentes au Nord de la commune.

Ces données ont ensuite été traitées et interprétées. Elles serviront de données d'entrée pour la phase 2 du projet qui vise à aboutir à un microzonage de la commune de Menton, étude préalable à un PPR sismique.



# Sommaire

<b>1. Contexte de l'étude .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Campagne de mesures .....</b>	<b>11</b>
2.1. DEROULEMENT DES CAMPAGNES DE MESURES .....	11
2.2. MESURES H/V .....	12
2.2.1. Installation des sismomètres.....	12
2.2.2. Configuration des sismomètres.....	13
2.2.3. Acquisition des données .....	13
2.2.4. Traitement et interprétation des données.....	15
2.3. MESURES REFRACTION / MASW / REMI .....	20
2.3.1. Acquisition des données .....	20
2.3.2. Traitement et interprétation des données.....	22
2.4. MESURES DE BRUIT DE FOND SISMIQUE EN RESEAU .....	23
2.4.1. Installation des sismomètres.....	23
2.4.2. Configuration des sismomètres.....	25
2.4.3. Acquisition des données .....	26
2.4.4. Traitement et interprétation des données.....	27
<b>3. Conclusions.....</b>	<b>37</b>
<b>4. Bibliographie .....</b>	<b>39</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Photo du point H/V « M098 ».....	12
Figure 2 : Implantation des mesures H/V, MASW et réseau acquises par le BRGM dans le cadre du PPRS de Menton sur fond de carte géologique fournie par le CEREMA. Un zoom sur la partie Sud de la commune est présentée sur la figure suivante. Des zooms plus fins sont présentées en annexe 1 et 2.....	14
Figure 3 : Implantation des mesures H/V, MASW et réseau acquises par le BRGM dans le cadre du PPRS de Menton sur fond de carte géologique fournie par le CEREMA. Les indications en rouge font référence à des noms de lieux utilisés dans le texte. ....	15
Figure 4 : Exemple de rapport H/V sur les alluvions du centre ville (point M088) avec une fréquence de résonance autour de 3 Hz.....	16
Figure 5 : Exemple de rapport H/V sur les colluvions de pente du Parc du Pian (point M201) avec une fréquence de résonance autour de 4.6 Hz.....	17
Figure 6 : Exemple de rapport H/V sur les flyschs oligocène (point M031) avec une fréquence de résonance autour de 3 Hz.....	18
Figure 7 : Interprétation préliminaire des mesures H/V réalisées sur Menton en superposition de la carte géologique fournie par le CEREMA. Cette carte synthétise les résultats de l'ensemble des mesures H/V (BRGM+CEREMA). La légende de la carte géologique est donnée sur la Figure 2. ....	19
Figure 8 : Photo illustrant le dispositif de mesures sismiques utilisé. Agathe Roullé contrôlant la Géode avec le PC au centre du dispositif de 24 traces (intertrace 3 m) et Mickael Delatre au tir n°4. Profil réalisé à l'école Anne Frank.....	21
Figure 9 : Photo d'un capteur installé « MEA3 ».....	24
Figure 10 : Orthophotographie (source : IGN) de la ville de Menton avec le dispositif A-B.....	26
Figure 11 : Orthophotographie (source : IGN) de la ville de Menton avec le dispositif B-C. La ligne rouge représente la ligne MASW casino.....	27
Figure 12 : Dispersion mesurée sur le dispositif A-B. En noir : courbe de dispersion pointée par l'opérateur avec barres d'erreurs sur le dispositif A-B ; en vert : courbe de dispersion pointée par l'opérateur avec barres d'erreurs sur le dispositif B-C.....	28
Figure 13 : Dispersion mesurée sur le dispositif B-C. En noir : courbe de dispersion pointée par l'opérateur avec barres d'erreurs sur le dispositif B-C ; en vert : courbe de dispersion pointée par l'opérateur avec barres d'erreurs sur le dispositif MASW casino. ....	29
Figure 14 : Modèles issus de l'inversion des courbes de dispersion, misfit=1, profil Vs.....	31
Figure 15 : Dispersion vitesse-fréquence de la vitesse des ondes de Rayleigh des modèles ajustés par l'inversion au misfit =1, comparée en mesures. En rouge : le mode fondamental de Rayleigh modélisé à partir des profils précédents, en noir : les observations.....	32
Figure 16 : Réponse SH des modèles 3 couches inversées à partir des courbes de dispersion, qp=200 et qs=100. ....	33
Figure 17 : Modèles issus de l'inversion des courbes de dispersion, misfit=1, profil Vs.....	34
Figure 18 : Dispersion vitesse-fréquence de la vitesse des ondes de Rayleigh des modèles ajustés par l'inversion au misfit =1, comparée en mesures. En rouge : le mode fondamental de Rayleigh modélisé à partir des profils précédents, en noir : les observations.....	35
Figure 19 : Réponse SH des modèles 3 couches inversées à partir des courbes de dispersion, qp=200 et qs=100. ....	36
Figure 20 : Exemple de fiche terrain pour les mesures H/V réalisées à Menton. ....	44
Figure 21 : Plan des points H/V réalisés 1/6 (Le Borrigo). ....	45

Figure 22 : Plan des points H/V réalisés 2/6 (Castellar Nord).....	45
Figure 23 : Plan des points H/V réalisés 3/6 (Castellar). ....	46
Figure 24 : Plan des points H/V réalisés 4/6 (Vallée du Caréi).....	46
Figure 25 : Plan des points H/V réalisés 5/6 (centre).....	47
Figure 26 : Plan des points H/V réalisés 6/6 (Est). ....	47
Figure 27 : Photo du profil MASW « stade » réalisé au Stade Lucien Rhein le 15/09/2020.....	54
Figure 28 : Plan du profil MASW « stade » réalisé au Stade Lucien Rhein le 15/09/2020.....	55
Figure 29 : Photo du profil MASW « parc » réalisé au Parc départemental du Pian le 15/09/2020. ....	56
Figure 30 : Plan du profil MASW « parc » réalisé au Parc départemental du Pian le 15/09/2020. ....	56
Figure 31 : Photo du profil MASW « parkingcaréi » réalisé sur un parking dans la vallée du Caréi le 15/09/2020. ....	58
Figure 32 : Plan du profil MASW « parkingcaréi » réalisé sur un parking dans la vallée du Caréi le 15/09/2020. ....	59
Figure 33 : Photo du profil MASW « castellar » réalisé sur le parking des services techniques le 16/09/2020. ....	60
Figure 34 : Photo du profil MASW « castellar2 » réalisé sur le chemin privé après le parking des services techniques le 16/09/2020.....	61
Figure 35 : Plan du profil MASW « castellar2 » réalisé sur le chemin privé après le parking des services techniques le 16/09/2020.....	62
Figure 36 : Photo du profil MASW « parc Michel » réalisé dans le parc Saint Michel le 16/09/2020. ....	63
Figure 37 : Photo du profil MASW « ecole » réalisé dans l'école primaire d'Anne Franck le 16/09/2020. ....	64
Figure 38 : Plan du profil MASW « ecole » réalisé dans l'école primaire d'Anne Franck le 16/09/2020. ....	65
Figure 39 : Photo du profil MASW profil « casino » réalisé sur la place des Jardins de Biovès 17/09/2020. ....	66
Figure 40 : Plan du profil MASW profil « casino » réalisé sur la place des Jardins de Biovès 17/09/2020. ....	67
Figure 41 : Profil MASW inversé du Stade Louis Rhein.....	68
Figure 42 : Profil MASW inversé du Parc du Pian. ....	69
Figure 43 : Profil MASW inversé du Parking de Caréi. ....	70
Figure 44 : Profil MASW inversé de Castellar. ....	71
Figure 45 : Profil MASW inversé du Parc Michel. ....	72
Figure 46 : Profil MASW inversé de l'Ecole primaire d'Anne Frank. ....	73
Figure 47 : Profil MASW inversé du Casino. ....	74

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Intervenants pour l'acquisition, le traitement et l'interprétation des données géophysiques de la campagne de mesures de Menton. ....	11
Tableau 2 : Récapitulatif de valeurs de Vs30 (m/s) calculées sur l'ensemble des profils sismiques inversés sur la commune de Menton. ....	22
Tableau 3 : Rayon des cercles implémentés pour les antennes des mesures réseau. ....	24
Tableau 4 : Durée d'acquisition des données des antennes réseau. ....	25
Tableau 5 : Modèle moyen de vitesse Vs et incertitudes.....	32
Tableau 6 : Modèle moyen de vitesse Vs et écart-type. ....	35
Tableau 7 : Récapitulatif des mesures H/V acquises par le BRGM sur la commune de Menton.....	49
Tableau 8 : Coordonnées des géophones #2-#4-#6-#7-#9-#11-#12-#14-#15-#17-#20-#21-#22-#23-#24 prises au GPS différentiel Trimble Geo 7x. ....	57
Tableau 9 : Coordonnées des géophones #1-#24 prises au GPS différentiel Trimble Geo 7x, profil « castellar2 ». ....	62
Tableau 10 : Coordonnées des géophones #1-#24 prises au GPS différentiel Trimble Geo 7x, profil « parc-Michel ». ....	63
Tableau 11 : Récapitulatif des coordonnées géographiques des profils MASW. ....	75
Tableau 12 : Recapitulatif des fichiers brutes et traités des profils MASW.....	75
Tableau 13 : Récapitulatif des coordonnées GPS et noms des capteurs pour les mesures réseau. ....	80

## Liste des annexes

Annexe 1 : Mesures H/V .....	41
Annexe 2 : Mesures réfraction / MASW / REMI .....	51
Annexe 3 : Mesures de bruit de fond sismique en réseau .....	77

# 1. Contexte de l'étude

Pour mieux caractériser le risque sismique sur le département des Alpes-Maritimes, la DDTM06 pilote un ensemble de missions portant, entre autres, sur l'élaboration de Plan de Prévention des Risques Sismiques (PPRS). Après celui de Saint Laurent du Var, la Préfecture souhaite porter les efforts de connaissance sur la commune de Menton, grâce à la réalisation d'un microzonage sismique en deux phases entre 2020-2022, pour aboutir à un PPRS en 2022.

Dans ce cadre, la phase 1 (2020) de ce travail a consisté à apporter la connaissance nécessaire à l'élaboration du microzonage, à la fois en inventoriant et structurant l'existant, mais également à l'aide de campagne de terrain géologique et géophysique complémentaires. Ces campagnes ont été menées grâce à une collaboration BRGM-CEREMA, le BRGM étant responsable de la campagne géophysique et le CEREMA de la campagne géologique.

L'objectif de la campagne géophysique est d'identifier la susceptibilité des formations superficielles à présenter des effets de site, qualifier la fréquence de résonance de ces formations et leur profil de vitesse d'ondes S ainsi que d'étudier la variabilité spatiale de ces paramètres. Elle fait l'objet du présent rapport.

Le travail s'est orienté en priorité sur les formations géologiques susceptibles de présenter un effet de site lithologique dans la mesure où ces dernières ont potentiellement une vitesse d'onde S faibles par rapport au rocher sous-jacent, favorisant ainsi l'amplification des ondes sismiques dans les gammes de fréquences du bâti, à savoir (Figure 2):

- Les formations alluvionnaires du bord de mer et des vallées fluviales (code Fz) (maillage fin avec une cible de 200 m entre points) ;
- Les colluvions de pente présentes en bord de mer notamment à l'Est de la commune (représentation sous forme de hachurés) (maillage fin avec une cible de 200 m entre points) ;
- Les flyschs (code g et go) présents au centre de la commune et présentant des niveaux d'altération variables (maillage lâche avec une cible de 1 km entre points) ;
- Les formations marno-calcaires du Nord de la commune (code C3-7) (maillage lâche avec une cible de 1 km entre points).

Trois types de mesures ont été menées :

- Mesures ponctuelles H/V pour caractériser la fréquence de résonance des formations géologiques superficielles considérées ;
- Profils sismiques MASW pour caractériser les profils monodimensionnels de vitesse d'ondes S ( $V_s$ ) avec la profondeur ;
- Mesures de bruit de fond en réseau pour caractériser les profils monodimensionnels de vitesse d'ondes S avec la profondeur. Cette méthode est complémentaire des mesures MASW et permet d'atteindre des profondeurs de pénétration supérieures à celles des profils MASW.



## 2. Campagne de mesures

### 2.1. DEROULEMENT DES CAMPAGNES DE MESURES

Deux campagnes de mesures géophysiques ont été réalisées par le BRGM dans le cadre du PPRS de Menton, en collaboration avec le CEREMA :

- S1 du 14/09/2020 au 19/09/2020: mesures sismiques (MASW) et sismologiques (réseaux et H/V) ;
- S2 du 05/10/2020 au 10/10/2020 : mesures H/V.

Pour les mesures réseau et H/V, les sismomètres utilisés sont les Güralp CMG6-TD du BRGM avec une bande passante de 0,1 Hz à 50 Hz.

Concernant les mesures MASW, une partie du matériel a été loué à Géoréva. En cas de présence de topographie sur le profil, les positions (x,y,z) des géophones concernés ont été enregistrées grâce à un GPS différentiel Trimble Geo 7x, dont l'antenne externe été positionnée sur un mât à 2m de hauteur.

Pour l'ensemble des mesures, la localisation des points a été décidée conjointement avec le CEREMA en fonction des données géologiques, géotechniques et géophysiques disponibles. Les traitements et interprétations des mesures ont également été discutés conjointement lors de réunions techniques dédiées.

Les intervenants BRGM pour cette étude ont été les suivants :

Méthode	Acquisition	Traitement	Interprétation
MASW	A. Colombain, M. Delatre, B. Maurice	A. Bitri	BRGM : M. Delatre, A. Roullé + CEREMA : J. Régnier, L. Lenti
Réfraction (profil du casino)	A. Colombain, M. Delatre, B. Maurice	A. Bitri	
H/V (points acquis par le BRGM)	A. Roullé, A. Colombain	A. Roullé	
Réseau	BRGM : M. Delatre, A. Colombain, A. Roullé, B. Maurice + CEREMA : M. Pernoud, P. Langlaude, M. Malascrabes, F. Hervouet, F. Adamo	M. Delatre	

*Tableau 1 : Intervenants pour l'acquisition, le traitement et l'interprétation des données géophysiques de la campagne de mesures de Menton.*

## 2.2. MESURES H/V

Le BRGM a réalisé 72 mesures H/V sur la commune de Menton. Au moment de la rédaction du rapport, 46 mesures H/V ont été réalisées par le CEREMA en complément.

Un récapitulatif du principe de ces mesures ainsi que des localisations et interprétations de l'ensemble des mesures réalisées est disponible en annexe 1.

### 2.2.1. Installation des sismomètres

Les capteurs ont été mis en place suivant cette procédure :

- Positionnés en orientation nord mesurée par boussole ou GPS main (précision de mesure  $\pm 5^\circ$ ) ;
- Mise à niveau ; étant donné que les CMG6-TD sont en capacité de se recalibrer pour optimiser la bande dynamique, la précision de la mise à niveau n'est pas fondamentale ;
- Recouverts d'une boîte lestée pour les protéger du vent et/ou de la pluie, avec plaquette explicative des mesures.

Ci-dessous une image typique de capteur installé :



Figure 1 : Photo du point H/V « M098 ».

### 2.2.2. Configuration des sismomètres

Chaque capteur a été configuré de la manière suivante :

- Nom sismomètre : ME+N° (n° définis préalablement - si point supplémentaire 20X, 30X, etc) ;
- Fréquence d'échantillonnage 200 Hz ;
- Variation de la configuration du mode en « duplicate » ;
- Coordonnées GPS acquises avec un GPS Garmin62s et/ou GPS du sismomètre.
- Enregistrement des données directement sur le PC ou télécharger en fin de journée avec un disque dur Guralp.

Pour chaque acquisition, la fréquence d'échantillonnage choisie est de 200 Hz pour viser une fréquence de Nyquist de 100 Hz, largement supérieure à la fréquence de traitement maximale de 45 Hz. Il a en effet été décidé de limiter la bande de fréquence utilisée dans les signaux à l'intervalle 0,2 - 45 Hz afin de filtrer les fluctuations de la masse à basse fréquence et le pic d'origine électrique à 50 Hz qui peut parasiter le signal électronique via le câble GPS.

### 2.2.3. Acquisition des données

La première semaine de mesures a permis d'échantillonner la réponse sismique des sols sur l'ensemble des formations présentes sur la commune. Après analyse de ces premières mesures, les positions des points H/V restants ont été redéfinis en collaboration avec le CEREMA afin de mieux caractériser certaines zones présentant des réponses de sol complexes (flyschs) ou à préciser (alluvions des vallées du Borrigo et du Caréi) (voir Figure 2 et Figure 3 pour la localisation des points et des noms de lieu utilisés dans le texte). Ces points de mesures complémentaires ont été acquis soit par le BRGM (semaine S2) soit par le CEREMA.

Par ailleurs, les points H/V réalisés en ville ont été fait pour la plupart tôt le matin ou dans la soirée pour limiter le bruit lié aux activités anthropiques (circulation automobile notamment).

Pour chaque point, une fiche de terrain a été complétée (cf. Annexe 1). Le temps d'acquisition était au minimum de 20 minutes pour permettre de suivre les critères qualité définis par le projet européen SESAME (2014).

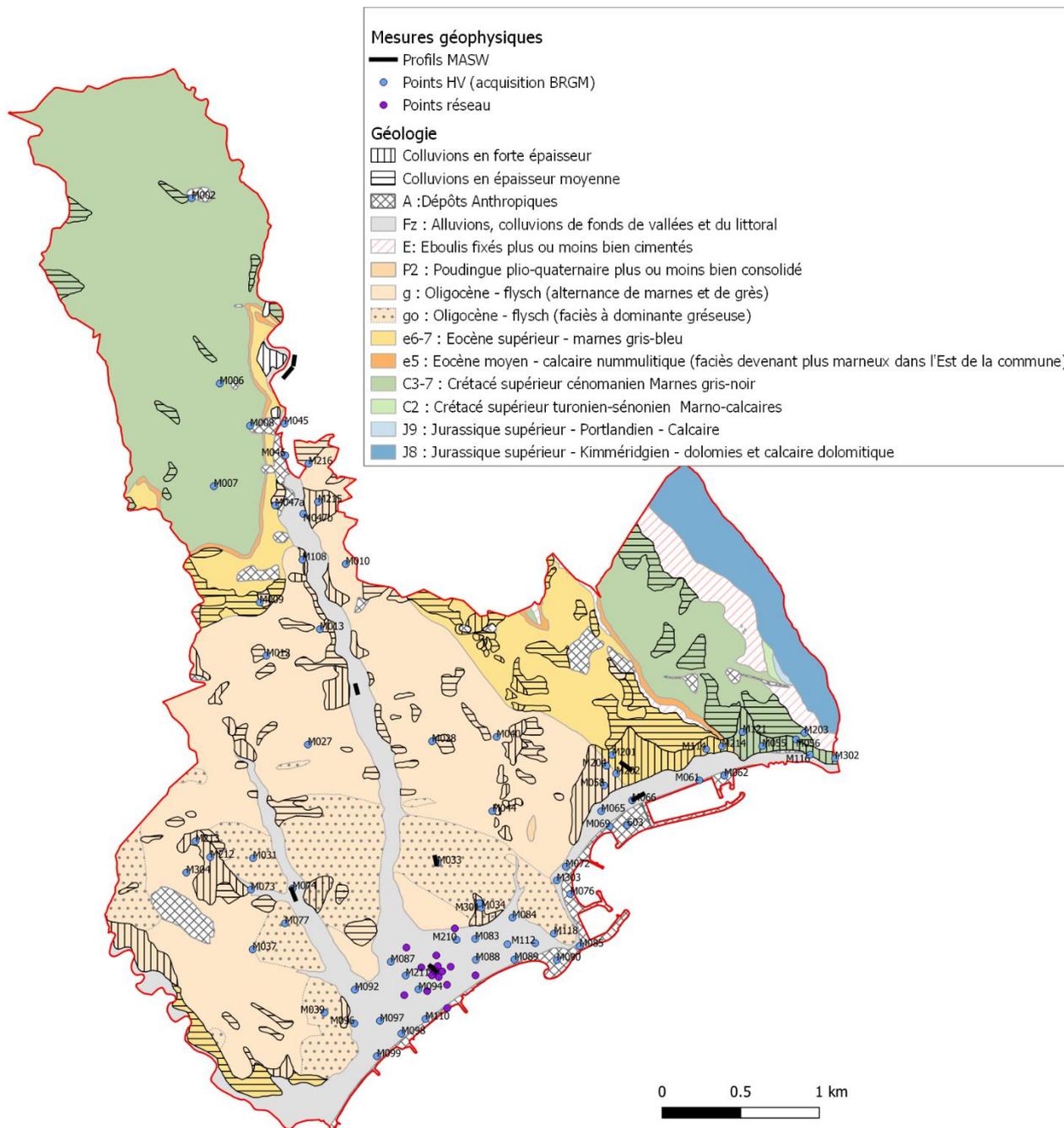


Figure 2 : Implantation des mesures H/V, MASW et réseau acquises par le BRGM dans le cadre du PPRS de Menton sur fond de carte géologique fournie par le CEREMA<sup>1</sup>. Un zoom sur la partie Sud de la commune est présentée sur la figure suivante. Des zooms plus fins sont présentées en annexe 1 et 2.

<sup>1</sup> Carte réalisée pour le POS (1/5000 - 1978) par le CETE-Méditerranée, complétée/modifiée dans le cadre de plusieurs projets notamment la Thèse M. Hernandez (2009 –UNSA/GeoAzur), le Projet AD-VITAM (2020 - BRGM/GeoAzur).

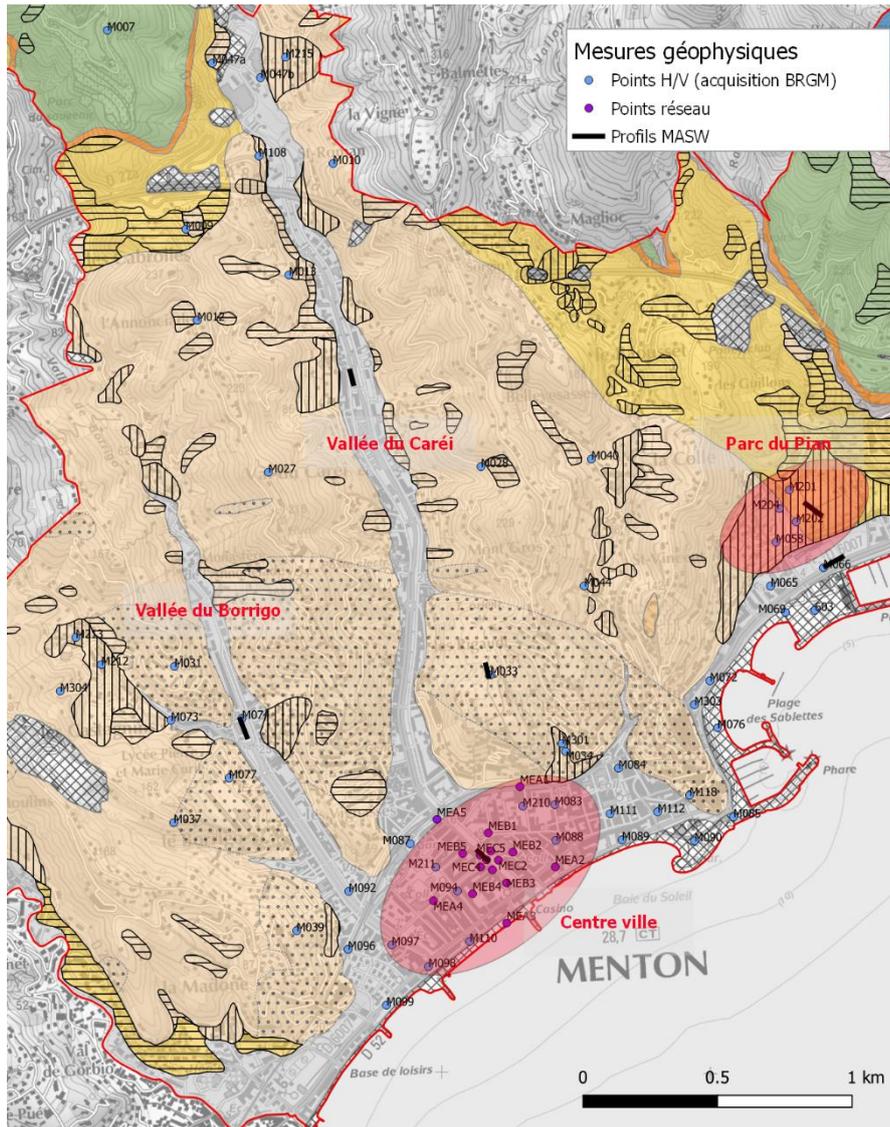


Figure 3 : Implantation des mesures H/V, MASW et réseau acquises par le BRGM dans le cadre du PPRS de Menton sur fond de carte géologique fournie par le CEREMA<sup>2</sup>. Les indications en rouge font référence à des noms de lieux utilisés dans le texte.

## 2.2.4. Traitement et interprétation des données

L'ensemble des données H/V a été traité à l'aide du logiciel Geopsy (Wathelet et al., 2020) (cf. annexe 1).

Une première interprétation des mesures réalisées conjointement par le BRGM et le CEREMA a montré (Figure 7) :

- Des effets de site assez homogènes sur les alluvions du centre-ville avec des fréquences de résonance globalement comprises entre 2.5 et 4 Hz (Figure 4) ;
- Des effets de site haute-fréquence sur les alluvions des vallées du Borrigo et du Caréi ainsi que sur la frange littorale à l'Est de la commune ;

<sup>2</sup> Carte réalisée pour le POS (1/5000 -1978) par le CETE-Méditerranée, complétée/modifiée dans le cadre de plusieurs projets notamment la Thèse M. Hernandez (2009 –UNSA/GeoAzur), et le Projet AD-VITAM (2020 - BRGM/GeoAzur).

- Des effets de site marqués entre 4 et 6 Hz au niveau du Parc du Pian (colluvions de pente) (Figure 5) ;
- Pas d'effet de site notable sur les marnes situées au Nord de la commune ;
- Des effets de site à analyser sur les flyschs, notamment à l'ouest de la commune, avec des fréquences de résonance peu marquées mais cohérentes autour de 3 Hz à l'Ouest de la vallée du Borrigo (Figure 6), et autour de 2 Hz entre les vallées du Borrigo et du Caréi, mais des rapports H/V sans fréquence de résonance marquée à l'Est de la vallée du Caréi. La nature de l'interface responsable de ces effets de site reste à identifier (interface liée au profil d'altération des flyschs ou au substrat présent sous la couche ?).

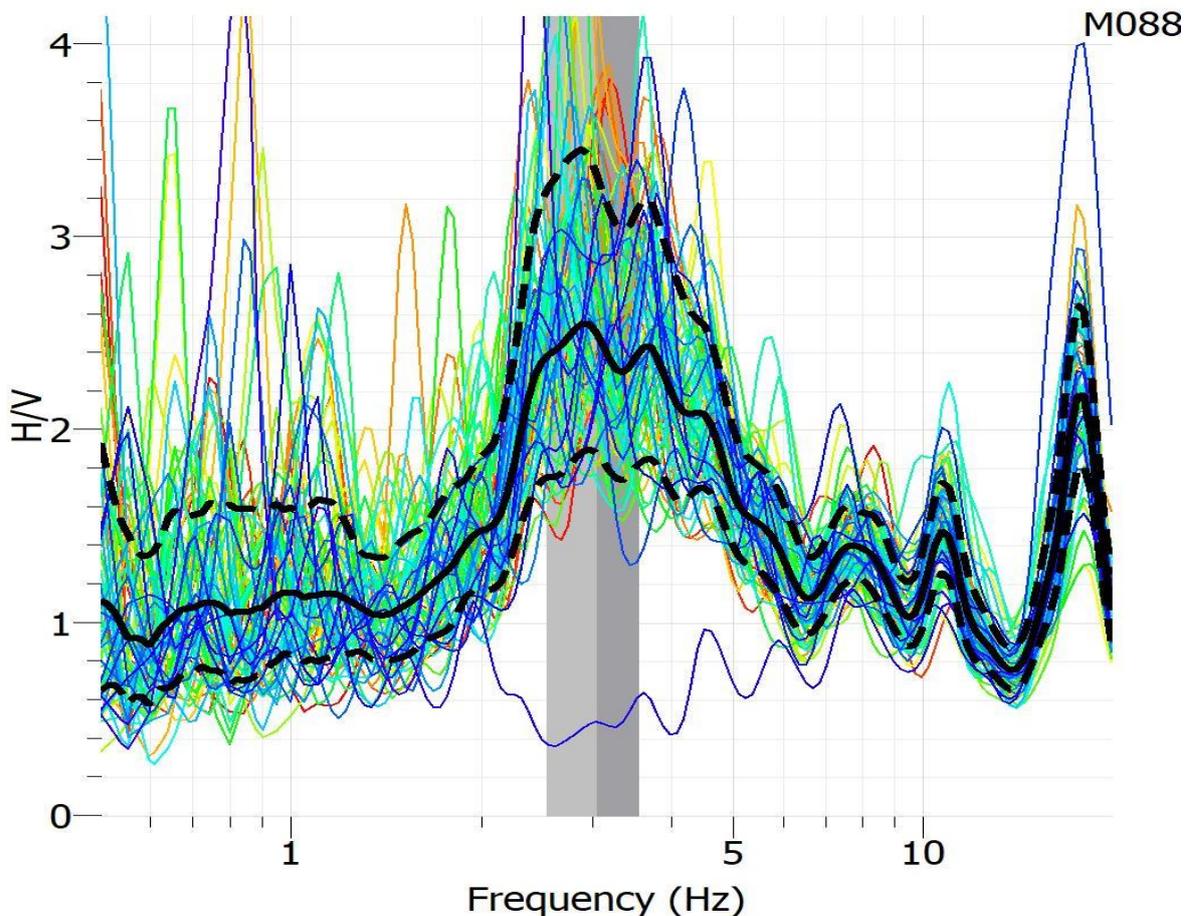


Figure 4 : Exemple de rapport H/V sur les alluvions du centre ville (point M088) avec une fréquence de résonance autour de 3 Hz.

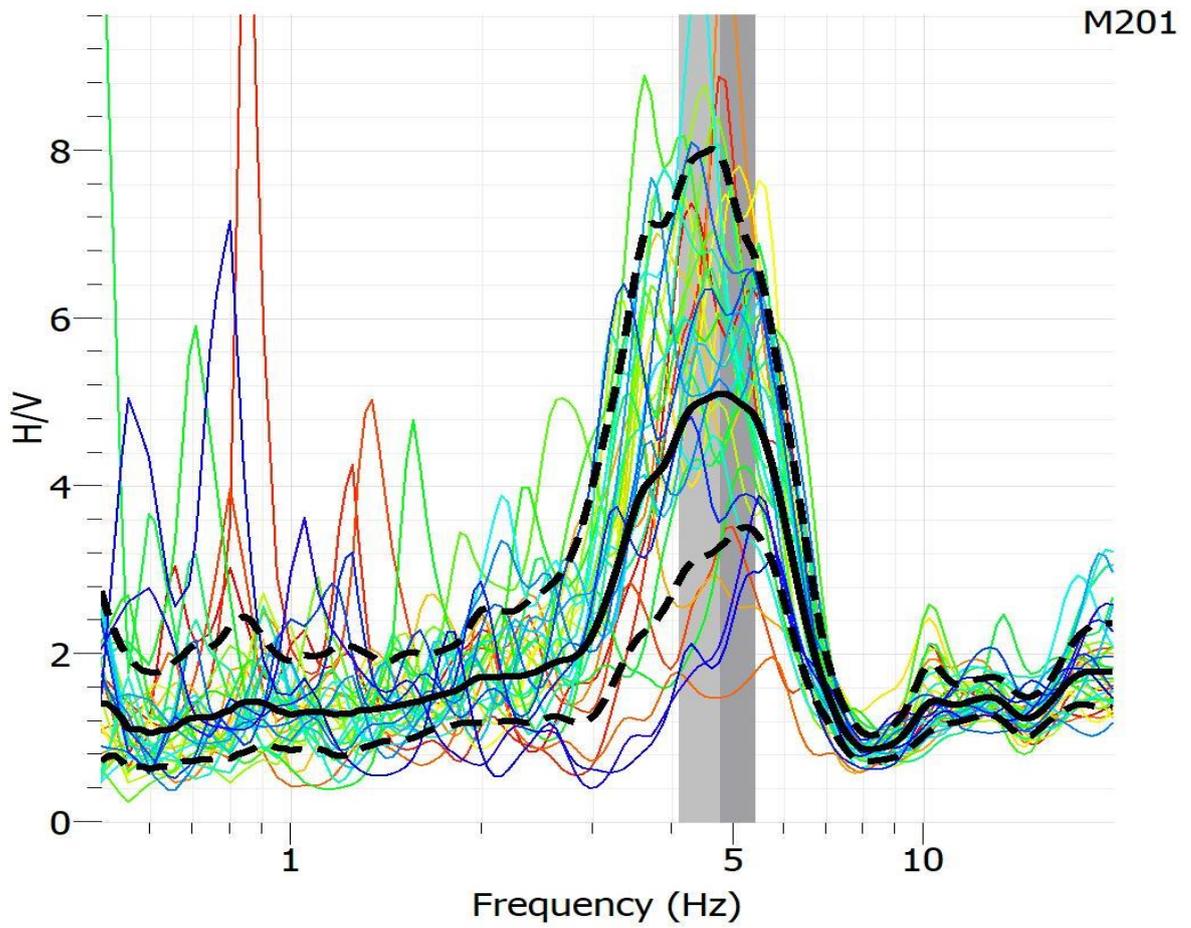


Figure 5 : Exemple de rapport H/V sur les colluvions de pente du Parc du Pian (point M201) avec une fréquence de résonance autour de 4.6 Hz.

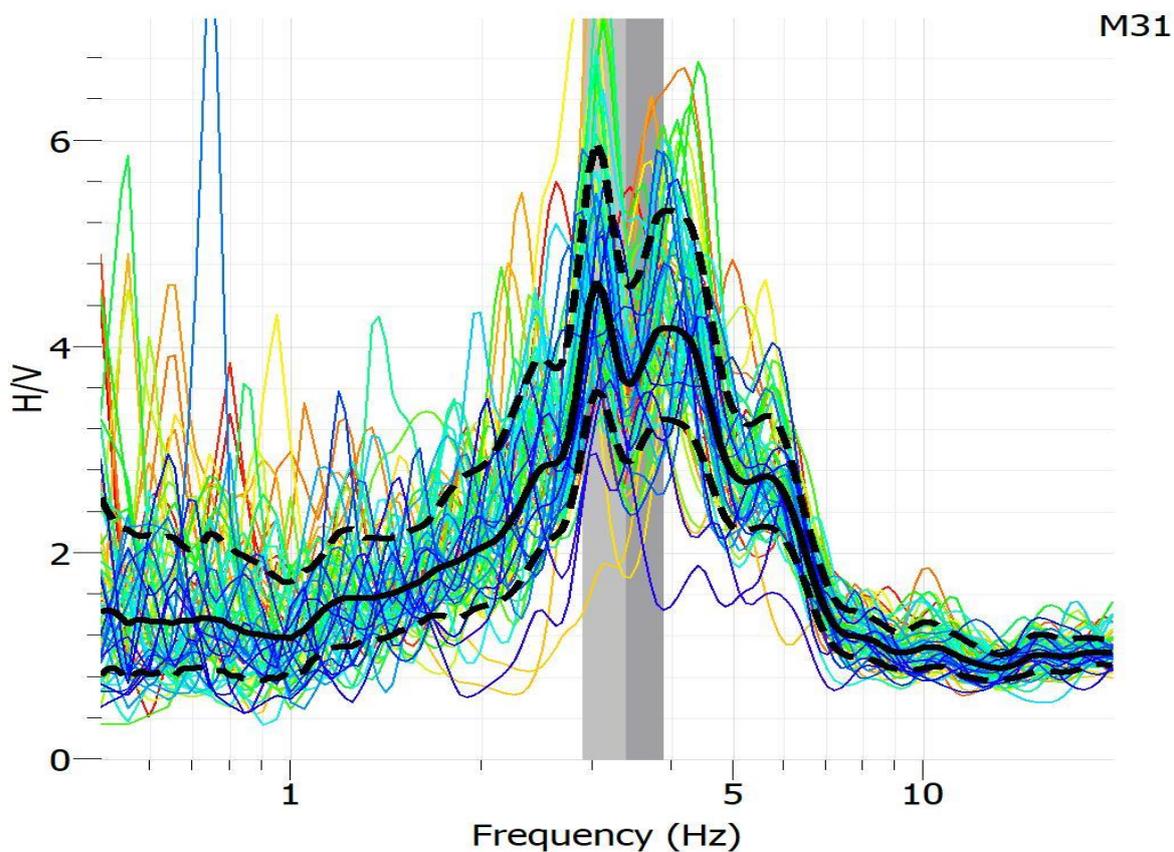


Figure 6 : Exemple de rapport H/V sur les flyschs oligocène (point M031) avec une fréquence de résonance autour de 3 Hz.

Lors d’une réunion de travail commune BRGM-CEREMA le 12/01/2021, il a été décidé de réaliser des mesures complémentaires pour analyser la réponse des flyschs, notamment en termes de variabilité spatiale et de compréhension du phénomène, et en particulier autred’identifier l’interface responsable des résonances observées. Elles seront réalisées au cours du premier trimestre 2021.

Une comparaison avec les résultats obtenus dans un contexte géologique similaire sur Nice et Saint Laurent du Var sera faite en phase 2 du projet.

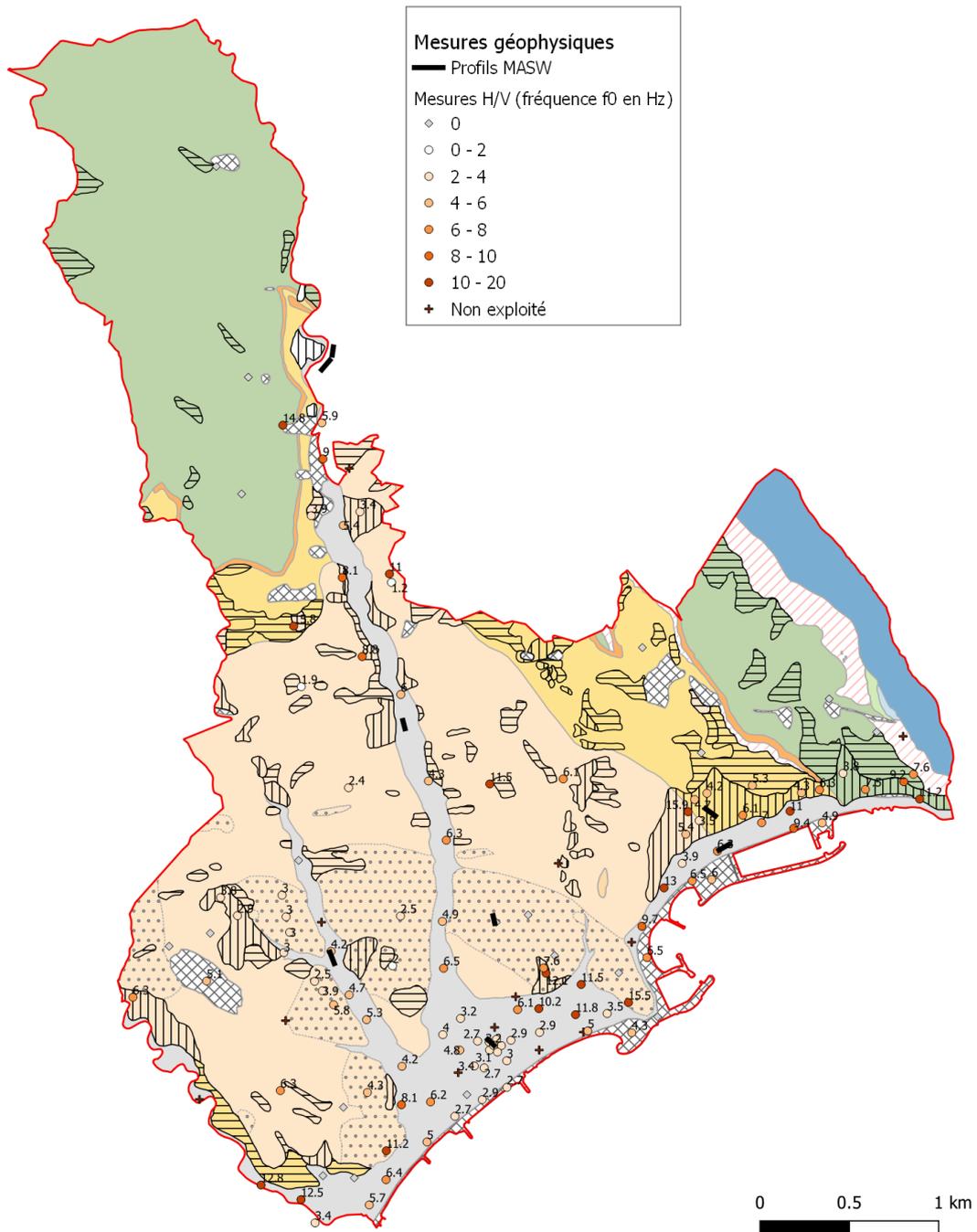


Figure 7 : Interprétation préliminaire des mesures H/V réalisées sur Menton en superposition de la carte géologique fournie par le CEREMA<sup>3</sup>. Cette carte synthétise les résultats de l'ensemble des mesures H/V (BRGM+CEREMA). La légende de la carte géologique est donnée sur la Figure 2.

<sup>3</sup> Carte réalisée pour le POS (1/5000 - 1978) par le CETE-Méditerranée, complétée/modifiée dans le cadre de plusieurs projets notamment la Thèse M. Hernandez (2009 –UNSA/GeoAzur), et le Projet AD-VITAM (2020 - BRGM/GeoAzur).

## 2.3. MESURES REFRACTION / MASW / REMI

Le BRGM a réalisé 8 profils sismiques MASW sur la commune de Menton. Un récapitulatif du principe de ces mesures ainsi que des localisations et interprétations de l'ensemble des mesures réalisées est disponible en annexe 2.

### 2.3.1. Acquisition des données

Nous avons utilisé pour cette étude une centrale d'acquisition Géode et nous enregistrons simultanément les signaux par 24 géophones. Ces derniers sont disposés suivant une ligne avec un espacement inter-géophones fixé tout le long du profil.

#### a) Matériel déployé

Le dispositif de mesure était constitué de :

- 1 flûte de 24 traces (intertrace maximale de 5 m) ;
- 24 capteurs sismiques verticaux de type géophones de 10 Hz (loués à Géoréva) ;
- Une Géode Geometrics (louée à Géoréva) ;
- Un câble trigger (loué à Géoréva) ;
- GPS différentiel Trimble Geo 7x avec antenne externe positionnée sur un mât à 2 m de hauteur.

Nous avons utilisé une masse comme source et une plaque de téflon pour répartir les forces de manière plus homogène sur la surface du sol (Figure 8).

#### b) Déroulement des mesures

La distance entre les capteurs était soit de 2 m soit de 3 m avec un déport de 1 m environ entre la position de la source et le capteur sismique. L'intertrace a été définie en fonction de la distance disponible sur le terrain pour faire l'acquisition. Les capteurs ont été placés à l'aide d'un décimètre. L'orientation de la ligne est précisée pour chaque dispositif, la règle générale étant de positionner le capteur #1 au Nord ou à l'Est selon l'orientation préférentielle de la ligne sismique ; le capteur #1 est référencé comme étant à la distance 0m sur le profil. Pour les dispositifs de 2m intertrace, la longueur totale de la ligne est de 46m ; pour les dispositifs 3m intertrace, la longueur totale de ligne est de 69 m.

Pour simuler la source, l'opérateur frappe sur la plaque en téflon avec la masse reliée à un accéléromètre, ce dernier permettant de déclencher l'enregistrement de la mesure sur le PC. Pour tous les profils sauf le profil réalisé au centre-ville près du Casino<sup>4</sup>, nous avons effectué les tirs suivants :

- Premier tir en offset en position -3m pour les profils intertrace 3m et -2m pour les profils intertrace 2m ;
- Tirs à la position des géophones suivants : #4, #8, #12, #16, #20, #24 ;
- Tir en offset à la position 48m pour les profils 2m intertrace ou la position 72m pour les profils 3m intertrace.

---

<sup>4</sup> difficultés d'acquisition liées au bruit anthropique



*Figure 8 : Photo illustrant le dispositif de mesures sismiques utilisé. Agathe Roullé contrôlant la Géode avec le PC au centre du dispositif de 24 traces (intertrace 3 m) et Mickael Delatre au tir n°4. Profil réalisé à l'école Anne Frank.*

La Géode a enregistré les mesures sismiques. Elle était contrôlée par un PC de terrain et le logiciel Geometrics Seismodule Controller. Les paramètres d'acquisition sont les suivant :

- Durée d'enregistrement : 1 s ;
- Pas d'échantillonnage : 1 ms ;
- Temps d'acquisition pré-trigger : 0.02 s ;
- Nombre de stacks par tir : 3.

Les fichiers de données brutes sont au format SEG2.

### 2.3.2. Traitement et interprétation des données

Au total, huit profils ont été réalisés sur l'ensemble de la commune de Menton. Le détail des positionnements des profils est décrit en annexe 2. Le premier profil réalisé au Castellar au niveau de remblais n'a pas été inversé, les agents départementaux sur place ayant indiqué que cet emplacement avait été remblayé sur plusieurs dizaines de mètres ce qui fait que ces mesures ne sont pas représentatives du milieu naturel ; le deuxième profil, implanté à proximité sur un secteur non remblayé a été inversé.

L'ensemble des profils inversés est disponible en annexe 2. Le tableau suivant récapitule les valeurs du paramètre  $V_{S,30}$  déduites des profils MASW inversés. Ce paramètre est utilisé dans le code parasismique EC8 pour définir les classes de sols forfaitaires de la réglementation française. Il sera utilisé dans la phase 2 du projet pour déterminer les spectres de réponse associés.

Nom du profil/tir	Casino	Castellar 2	Ecole Anne Frank	Parc du Pian	Parc Michel	Parking Caréi	Stade L. Rhein
tir 1	571	701	452	399	542	603	601
tir 2	547	651	477	402	560	578	589
tir 3		633	487	400	568	609	552
tir 4			459	397	473	634	572
tir 5		634	498	395	531	579	596
tir 6		614	467	405	571	595	616
tir 7		672	469	408	574	638	608
tir 8		639	476	407	573	593	612
rémi	539						
<b>VS30 moyen</b>	<b>553</b>	<b>649</b>	<b>473</b>	<b>402</b>	<b>549</b>	<b>604</b>	<b>593</b>
Ecart-type	14	27	14	4	32	21	20

Tableau 2 : Récapitulatif de valeurs de  $V_{S30}$  (m/s) calculées sur l'ensemble des profils sismiques inversés sur la commune de Menton.

Le profil indiqué « rémi » correspond à une acquisition de sismique passive spécifique réalisée en centre-ville au niveau du casino sur le dispositif déployé pour la MASW en raison des difficultés d'acquisition liées au bruit anthropique. Il est analysé de la même façon que les profils MASW classiques.

## **2.4. MESURES DE BRUIT DE FOND SISMIQUE EN RESEAU**

Le BRGM a réalisé deux antennes se composant de deux cercles consécutifs en plus de la station centrale. Un récapitulatif du principe de ces mesures ainsi que des localisations et interprétations de l'ensemble des mesures réalisées est disponible en annexe 3.

### **2.4.1. Installation des sismomètres**

Les sismomètres utilisés sont les Güralp CMG6-TD avec une bande passante de 0,1 Hz à 50 Hz. Un seul type de sismomètre a été déployé afin de minimiser les différences de réponse instrumentale entre les différents capteurs, ce qui a permis de simplifier les traitements subséquents en ignorant les corrections instrumentales uniquement nécessaires lorsque le parc de sismomètres est hétérogène.

Les capteurs ont été mis en place de la manière suivante :

- Positionné en orientation nord mesurée par boussole ou GPS main (précision de mesure  $\pm 5^\circ$ ) ;
- Mise à niveau ; étant donné que les CMG6-TD sont en capacité de se recalibrer pour optimiser la bande dynamique, la précision de la mise à niveau n'est pas fondamentale ;
- Vérification de la synchronisation de l'heure par l'antenne GPS avec la commande « fix » dans le terminal de commande du capteur ;
- Etant donnée la forte circulation de piétons en centre-ville en journée, les capteurs ont été installés sous des caisses lestées pour les protéger des éventuels chocs des passants et autres. Avec l'aide de l'équipe du CEREMA, chaque station déployée était surveillée pour éviter les vols et autres gestes de malveillance.

L'illustration suivante donne l'exemple d'un capteur installé.



Figure 9 : Photo d'un capteur installé « ME3 ».

**c) Description des cercles mis en place pour les campagnes de mesure**

Afin de respecter les contraintes exposées ci-dessus, nous avons choisi pour cette campagne de mesure de déployer les antennes selon le schéma suivant :

- 1 station centrale ;
- 5 stations réparties équitablement sur un cercle  $R_n$  ;
- 5 stations réparties équitablement sur un cercle  $R_{n+1}$ , non alignés sur les stations du cercle  $R_n$ .

L'équipe de mesures passe d'une antenne à la suivante en gardant en place la station centrale et le cercle  $R_{n+1}$  et en déplaçant les stations du cercle  $R_n$  vers le cercle  $R_{n+2}$ . Les rayons implémentés ont été les suivants :

Identifiant du cercle	A	B	C
Rayon (m)	250	100	40

Tableau 3 : Rayon des cercles implémentés pour les antennes des mesures réseau.

Chaque antenne se compose de deux cercles consécutifs en plus de la station centrale, ce qui donne les déploiements suivants :

- Dispositif A-B ;
- Dispositif B-C.

Ce déploiement en double cercle permet de faire des mesures sur une gamme de fréquences plus large dans le cas d'un simple cercle, tout en autorisant un placement plus simple sur le terrain.

La méthode nécessite un nombre suffisant d'ondes pour pouvoir par effet de cumul faire émerger les ondes traversant le réseau afin de mesurer leur vitesse. Il est estimé qu'il faut au moins 20 fenêtres temporelles ; pour les mesures réseau chaque fenêtre doit avoir 200 cycles, soit 4000 cycles au total. Afin de déterminer la période de cycle à considérer pour chaque dispositif, nous calculons la fréquence associée à la longueur d'onde maximale mesurable par ledit dispositif ; cette longueur d'onde maximale est reliée directement à la taille maximale du réseau par la relation  $\lambda = d_{max}$ . Pour passer à la fréquence associée, on utilise la formule  $\lambda = c/f$  avec  $c$  la vitesse des ondes dans le milieu qu'il faut donc supposer en prenant une hypothèse raisonnable ; cette fréquence (et donc la période de cycle) nous permet enfin de déterminer la fenêtre minimale de temps nécessaire pour faire les mesures. Avec une hypothèse maximisante  $c=200$  m/s, on détermine une durée supérieure à 1h pour le dispositif 250m et d'environ 40 minutes pour le dispositif 100m.

Etant donné que les mesures sont effectuées en milieu urbain, il a été jugé prudent de prendre une marge de sécurité pour les mesures. Nous avons adopté les durées suivantes lors des mesures de terrain :

Antenne (rayons)	250-100 m	100-40 m
Durée d'enregistrement	2h	1h

Tableau 4 : Durée d'acquisition des données des antennes réseau.

#### **d) Nomenclature des données réseau acquises sur le terrain**

Afin de faciliter le déploiement sur le terrain et leur identification, les stations ont été nommées de la façon suivante : MEXY, avec X le caractère correspondant au cercle de déploiement et Y le chiffre permettant d'identifier sur le cercle la station correspondante. Par exemple, la deuxième station sur le cercle B sera identifiée comme étant MEB2. La station centrale est identifiée comme étant ME00.

#### **2.4.2. Configuration des sismomètres**

Chaque capteur a été configuré de la manière suivante :

- Nom du sismomètre (nomenclature définie paragraphe ci-dessous) ;
- Fréquence d'échantillonnage 200 Hz ;
- Variation de la configuration du mode en « duplicate » ;
- Coordonnées GPS acquises avec un GPS Garmin62s et/ou GPS du sismomètre.

### 2.4.3. Acquisition des données

Au final, le dispositif double-cercle A-B a été déployé en premier selon le plan présenté dans l'illustration ci-dessous.



Figure 10 : Orthophotographie (source : IGN) de la ville de Menton avec le dispositif A-B.

Une fois les mesures effectuées, le cercle A a été démonté et les sismomètres ont été repositionnés sur le cercle C, selon le plan présenté dans l'illustration ci-dessous.

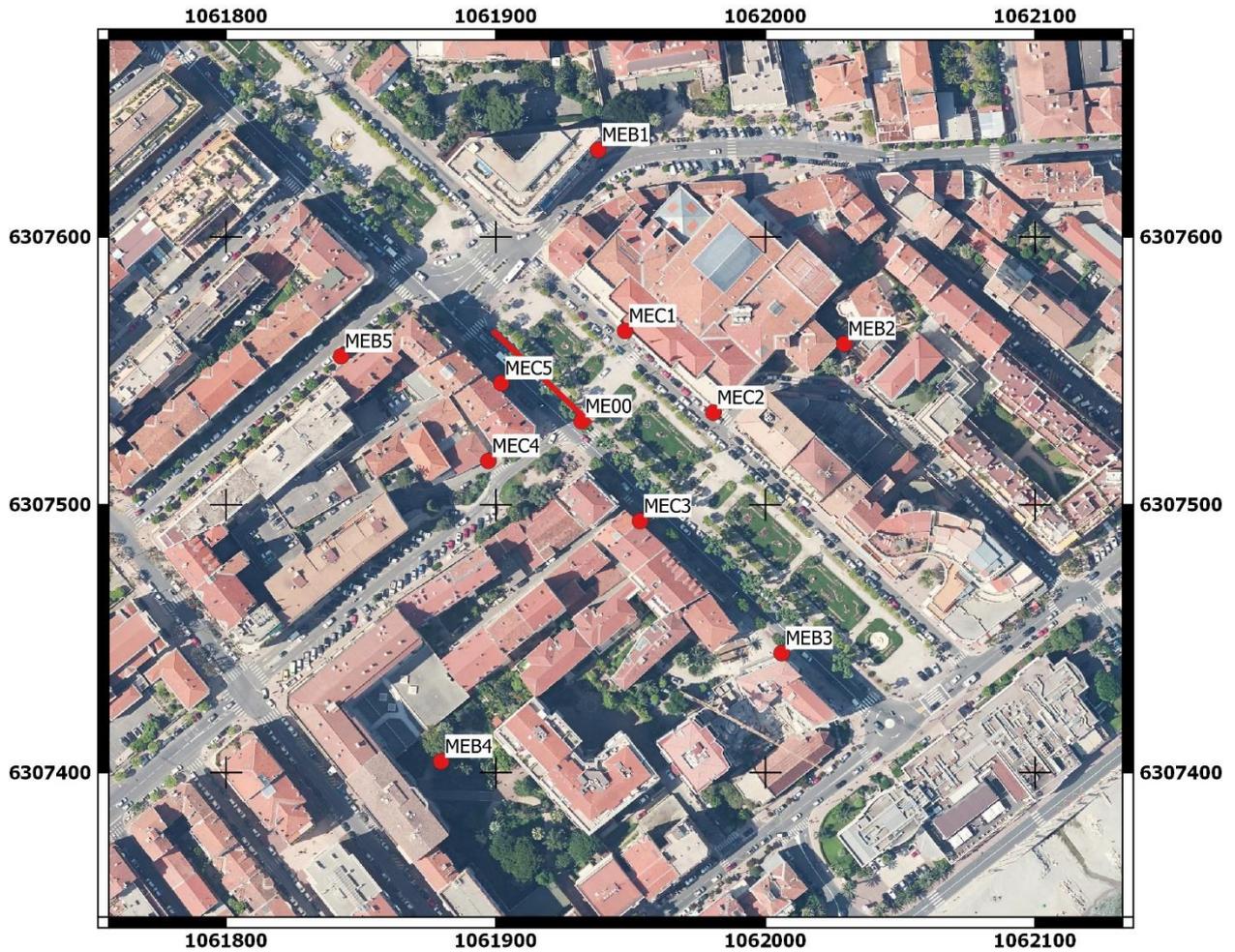


Figure 11 : Orthophotographie (source : IGN) de la ville de Menton avec le dispositif B-C. La ligne rouge représente la ligne MASW casino.

#### 2.4.4. Traitement et interprétation des données

##### a) Analyse des données réseau

Pour chaque antenne, la procédure suivante a été suivie :

- Calcul de la réponse théorique de l'antenne dans l'espace vitesse-fréquence par le module WARANGPS de GEOPSY : cette réponse permet de contraindre la bande de fréquence à analyser pour l'antenne ;
- Filtrage spectral des traces dans la bande de fréquence définie à la première étape.

Une fois ces étapes passées, l'analyse FK proprement dite peut commencer. Comme pour l'analyse H/V, des fenêtres temporelles sont choisies de telle sorte à ne pas contenir d'événements locaux anthropiques. Ces fenêtres sont traitées d'abord par l'algorithme FK (Capon 1969) entre  $k_{min}$  et  $k_{max}$  ; à partir de cette première analyse, nous pouvons vérifier la distribution azimutale des sources de bruit et donc choisir la méthode la plus adaptée comme discuté en annexe 3.

La dispersion des ondes est ensuite pointée de plusieurs manières :

- Lorsque la courbe de dispersion déterminée par méthode FK/HRFK montre une distribution statistique unimodale claire, l'outil statistique fourni avec MAX2CURVE (module GEOPSY) permet de déterminer la distribution statistique de vitesse obtenue et donc évaluer la dispersion et l'erreur associée ;
- Dans le cas contraire, une dizaine de courbes a été pointée manuellement sur les résultats de MAX2CURVE en sélectionnant les dispersions jugées correctes ; la moyenne et l'écart-type des courbes est ensuite calculée. Cette méthode par la multiplication des pointés permet d'estimer un écart-type correct des mesures.

La procédure d'inversion est décrite en annexe 3.

### **b) Présentations des résultats**

Les résultats HRFK sont présentés ci-dessous. Tous les résultats sont présentés en vitesse-fréquence. Pour chaque figure, les limites  $k_{min}$  et  $k_{max}$  sont représentées en trait noir plein, les limites  $k_{min}/2$  et  $2 k_{max}$  en trait noir pointillé. Pour chaque antenne, le pointé des ondes de Rayleigh sur cette antenne est en noir et le pointé des ondes de Rayleigh sur les autres antennes et l'analyse MASW est en vert.

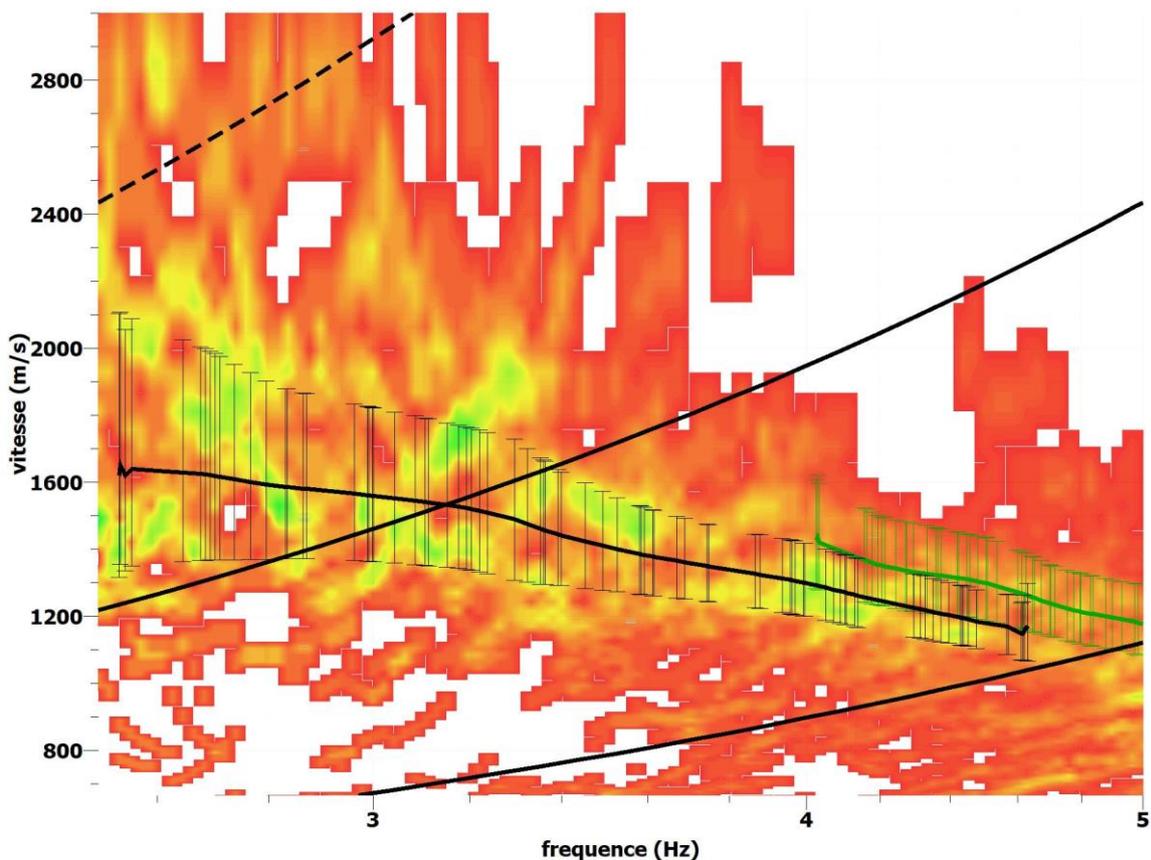


Figure 12 : Dispersion mesurée sur le dispositif A-B. En noir : courbe de dispersion pointée par l'opérateur avec barres d'erreurs sur le dispositif A-B ; en vert : courbe de dispersion pointée par l'opérateur avec barres d'erreurs sur le dispositif B-C.

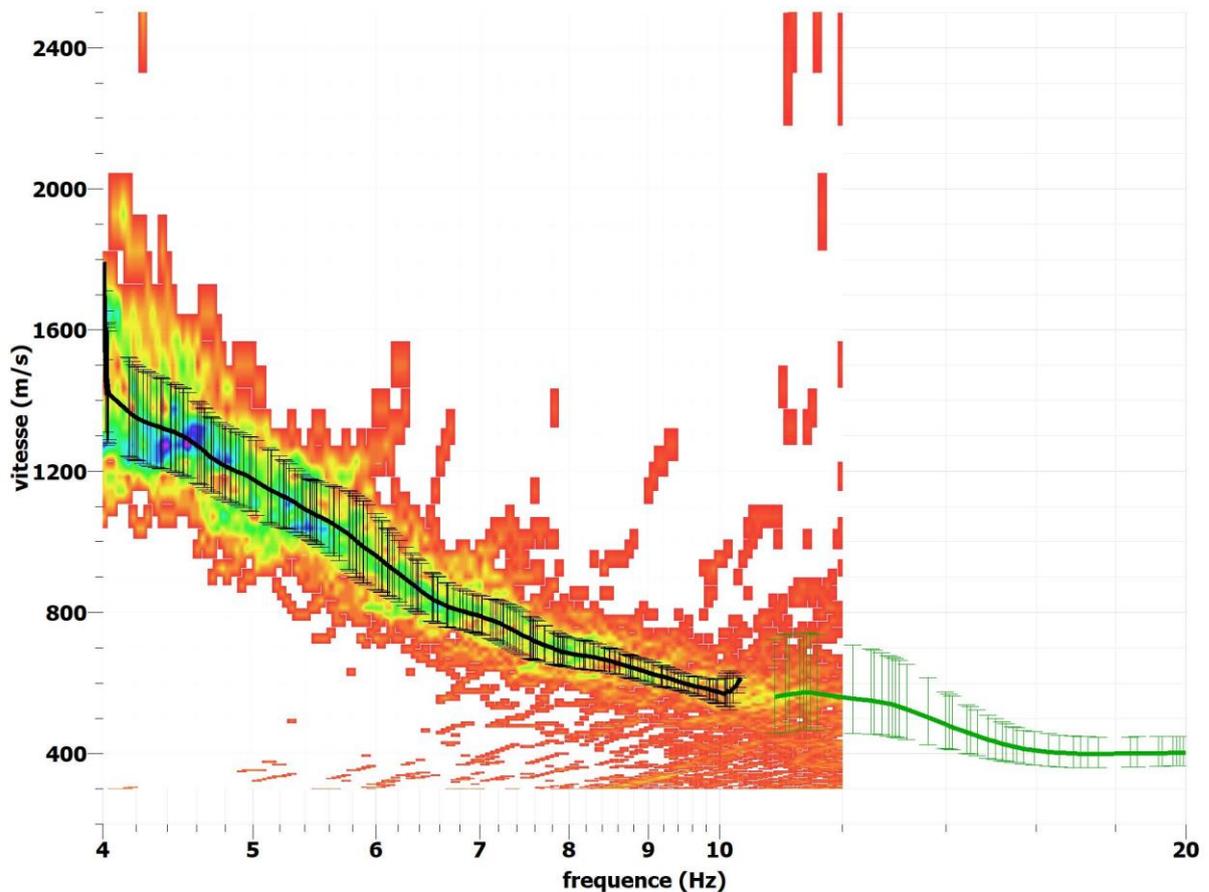


Figure 13 : Dispersion mesurée sur le dispositif B-C. En noir : courbe de dispersion pointée par l'opérateur avec barres d'erreurs sur le dispositif B-C ; en vert : courbe de dispersion pointée par l'opérateur avec barres d'erreurs sur le dispositif MASW casino.

On peut noter que les résultats sur le dispositif A-B ont une précision moins grande, ce malgré l'utilisation de la méthode HRFK. Les données du dispositif A-B analysées en FK simple montrent un aliasing spatial très important rendant impossible le pointé d'un vecteur d'ondes ; cet aliasing se manifeste malgré la suppression de stations au hasard, ce qui exclut une origine liée au dispositif lui-même. Les hypothèses possibles pour expliquer la mauvaise qualité des données sont les suivantes :

- L'analyse FK suppose que les sources générant les trains d'ondes sont situées loin du réseau, ce qui valide l'approximation en ondes planes. L'ampleur du trafic urbain à Menton peut invalider ce préalable, avec des sources situées à l'intérieur du réseau. Cette hypothèse est cependant peu probable : le dispositif B-C a très bien marché, et le dispositif A-B est sensible à des fréquences basses par rapport au spectre de bruit du trafic routier ;
- L'analyse FK fait l'hypothèse d'un milieu tabulaire. Le centre-ville de Menton a une structure géologique 3D complexe, avec une couche sédimentaire dont l'épaisseur varie fortement selon l'endroit considéré. Peuvent intervenir aussi l'effet sur la propagation des ondes de propriétés mécaniques variables avec une échelle de fluctuation de l'ordre de grandeur du réseau, étudiée pour de plus grandes échelles par modélisation par Iwaki et al. en 2018 ; cette hétérogénéité des propriétés mécaniques est une possibilité pour un bassin ayant connu même dans l'histoire géologique récente de nombreux épisodes d'éboulis, alluvions, recouvrements par la mer et transgressions.

Cette hypothèse est la plus probable pour expliquer les difficultés à analyser les signaux issus du dispositif le plus grand, alors que le dispositif le plus petit permet plus facilement de faire l'hypothèse d'un milieu tabulaire.

Après discussion avec le CEREMA le 12/01/2021, il a été décidé de réaliser deux types d'inversions des données réseau :

- une inversion avec un milieu tabulaire à 3 couches homogènes pour reproduire la séquence alluvions/flyschs/substrat attendue au vue de la géologie de Menton ;
- une inversion avec un milieu présentant un gradient de vitesse pour tenir compte des résultats obtenus avec les profils MASW et qui semblent indiquer un gradient de vitesse en profondeur, en cohérence avec notre connaissance de la géologie de la zone (présence de flyschs potentiellement altéré sous la couche alluvionnaire).

### **c) Algorithme d'inversion et règles d'évaluation des modèles par rapport aux données**

L'algorithme d'inversion utilisé est celui développé par Wathelet (2005), basé sur la méthode des plus proches voisins : un premier ensemble de modèles est généré explorant l'espace des paramètres proposés, ces modèles sont évalués par rapport aux données acquises ; les meilleurs modèles sont ensuite utilisés pour définir un nouvel espace de paramètres au voisinage de ces derniers et le processus est itéré selon les besoins de l'opérateur.

Pour évaluer les modèles se rapprochant le plus des observations, nous utilisons la définition suivante implémentée par Wathelet (2005).

$$M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n A_i} \text{ avec } A_i = \begin{cases} 1 & \text{si } (s_i^m - s_i^d)^2 < \sigma_i^2 \\ \frac{(s_i^m - s_i^d)^2}{\sigma_i^2} & \text{si } (s_i^m - s_i^d)^2 > \sigma_i^2 \end{cases}$$

Avec n le nombre de mesures,  $s_i^m$  la valeur de lenteur donnée par le modèle à la fréquence i,  $s_i^d$  la valeur de lenteur observée à la fréquence i, et  $\sigma_i$  l'erreur de mesure sur l'observation à la fréquence i. La valeur M est à minimiser pour approcher la courbe de dispersion associée au modèle considéré de la courbe de dispersion observée. Lorsque M=1, la courbe de dispersion associée au modèle considéré se trouve en tout point dans l'intervalle d'incertitude de la courbe de dispersion observée, cela qui signifie que le modèle « explique » les données aux erreurs de mesure près.

Cette définition conduit l'algorithme d'inversion à tenter de faire passer le modèle par toutes les barres d'erreur pour minimiser le misfit. Il suffit qu'un nombre suffisant de modèles ait été déterminés avec la valeur M=1 pour produire un ensemble de modèles « expliquant » les données.

#### d) Résultats de l'inversion avec le milieu tabulaire à trois couches homogènes

Parmi tous les modèles déterminés, seuls les modèles au misfit égal à 1 ont été retenus. Nous obtenons 9000 modèles, exposés ci-dessous :

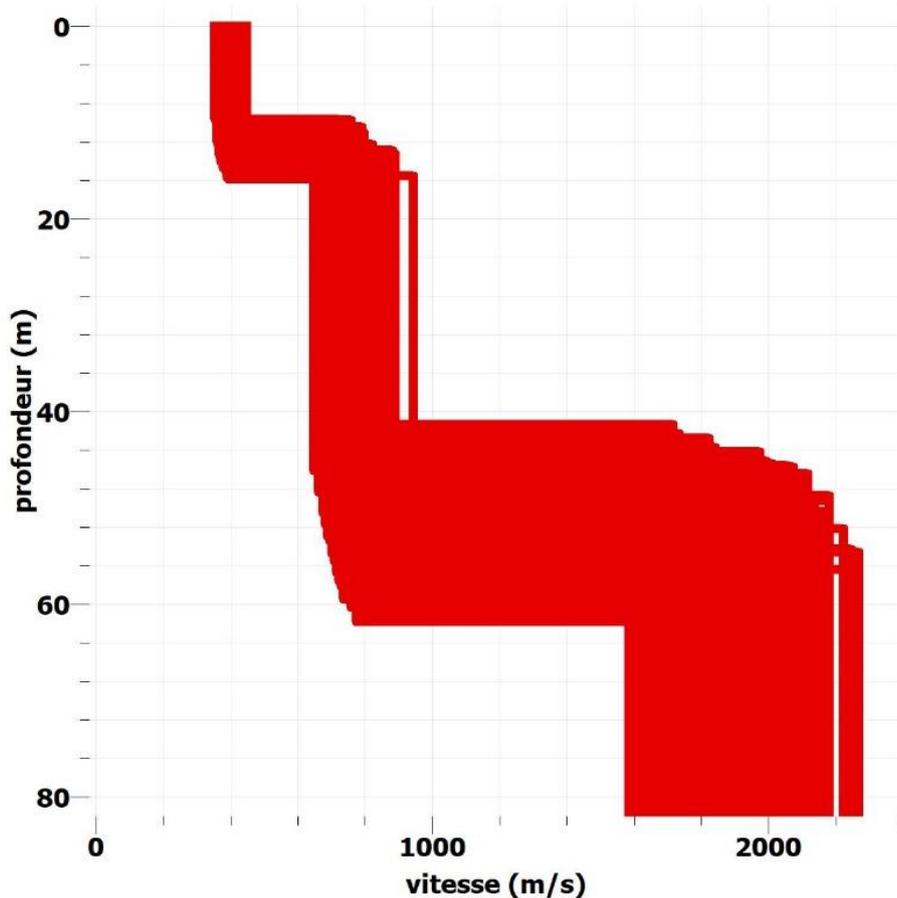


Figure 14 : Modèles issus de l'inversion des courbes de dispersion, misfit=1, profil Vs.

Tous les modèles prennent en compte un demi-espace homogène inférieur ayant un rôle de socle sismologique pour les calculs de dispersion ; par définition des modèles, le toit du demi-espace représente la profondeur au-delà de laquelle nous ne pouvons plus avoir d'information pertinente et donc marque la limite de profondeur d'investigation du dispositif. Cette profondeur est reliée aux points de mesure à plus basse fréquence. Dans le cas de ce déploiement, les modélisations montrent qu'on a une profondeur d'investigation qui est inférieure à 70 mètres.

A partir des modèles déterminés ci-dessus, il est possible de modéliser la dispersion de la vitesse des ondes de Rayleigh, afin de vérifier le fit des modélisations par rapport aux observations. Le résultat est montré ci-dessous :

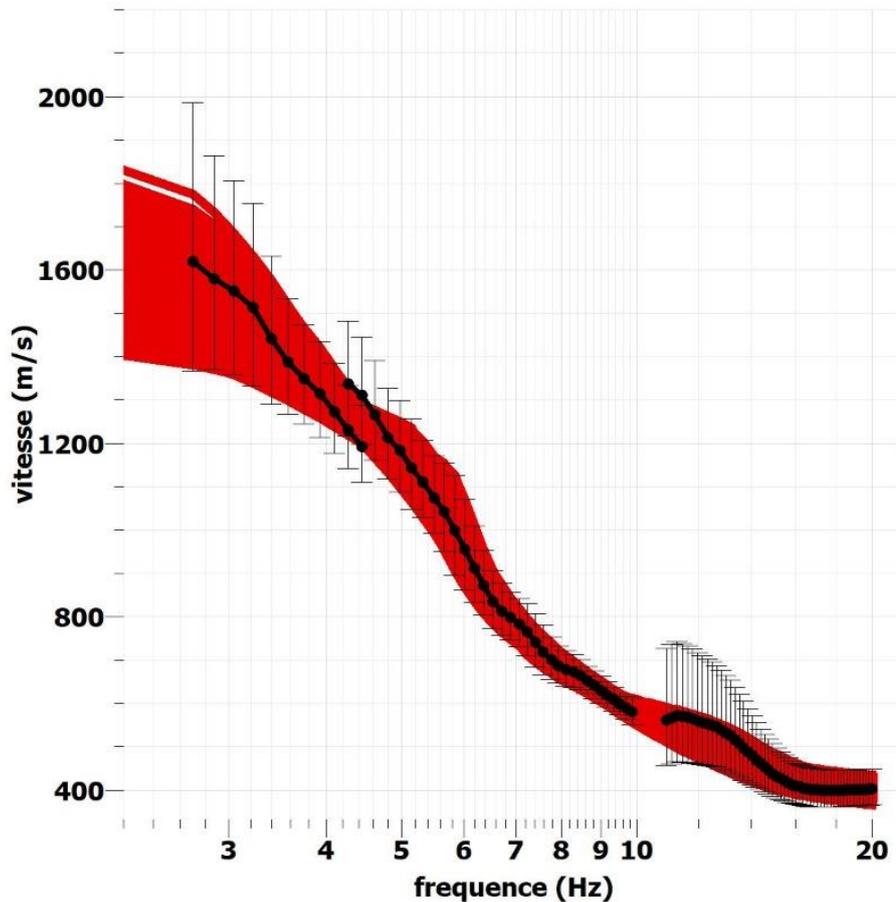


Figure 15 : Dispersion vitesse-fréquence de la vitesse des ondes de Rayleigh des modèles ajustés par l'inversion au misfit =1, comparée en mesures. En rouge : le mode fondamental de Rayleigh modélisé à partir des profils précédents, en noir : les observations.

Le modèle moyen issu de tous ces modèles est le suivant :

Numéro couche	Epaisseur (m)	Delta épaisseur (m)	Vs (m/s)	Ecart-type vs (m/s)
1	14,4	0,9	399	14
2	37	2	724	24
3	demi-espace		1774	92

Tableau 5 : Modèle moyen de vitesse Vs et incertitudes.

Le calcul de la Vs30 moyenne à partir de l'ensemble des modèles retenus donne **Vs30 = 520 m/s avec 13 m/s d'incertitude. La classe de sol EC8 correspondante est B.**

A partir des modèles de vitesse, il est possible de calculer les réponses SH des colonnes de sol modélisées. Ces réponses SH modélisées ne correspondent pas en amplitude aux mesures H/V, ceci étant les pics d'amplitude maximale en réponse SH et en H/V sont considérées comme usuellement concordants.

Les réponses SH modélisées apparaissent dans le graphique ci-dessous :

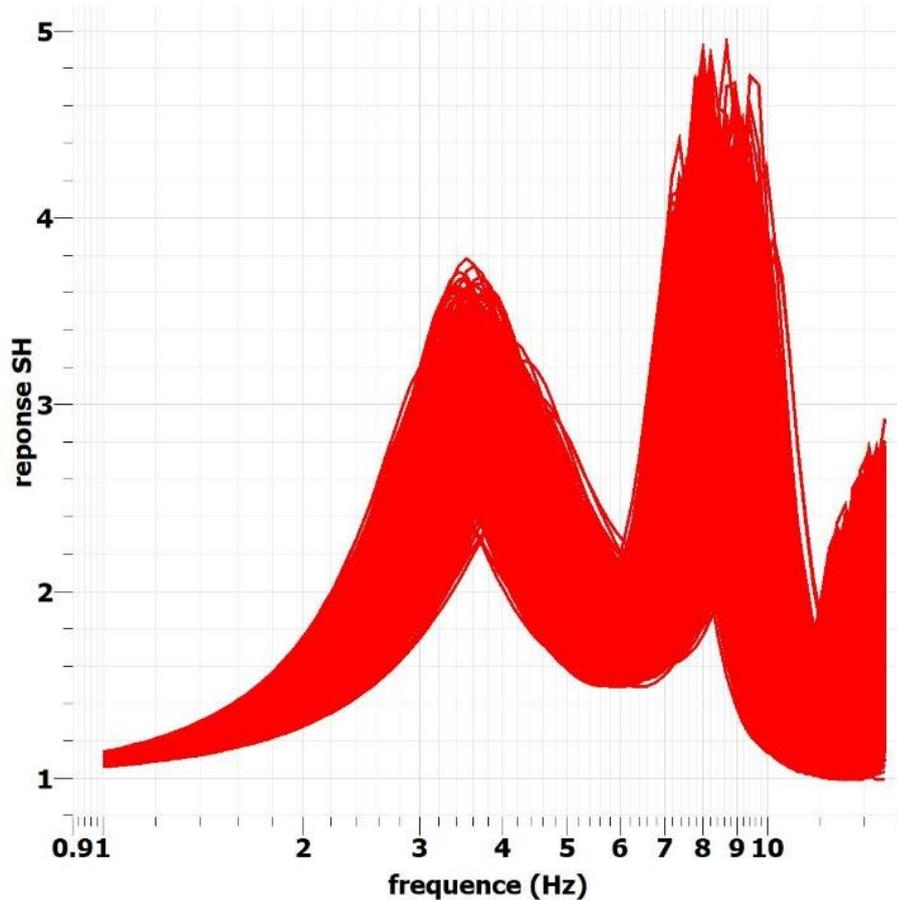


Figure 16 : Réponse SH des modèles 3 couches inversées à partir des courbes de dispersion,  $q_p=200$  et  $q_s=100$ .

On distingue un pic à 7-9 Hz lié à une colonne superficielle s'arrêtant à la première interface, et un pic à 3-4 Hz lié à l'ensemble de la colonne au-dessus du demi-espace modélisé. Si on compare aux mesures H/V sur la station centrale ME00, qui montre un pic H/V à 3 Hz, **on peut en déduire que la résonance H/V observée est bien liée à la colonne de sédiments entière au-dessus du soubassement rocheux à 60 mètres.**

### e) Résultats de l'inversion avec le milieu à couche de gradient de vitesse

Nous obtenons pour ce type d'inversions 16841 modèles, exposés ci-dessous :

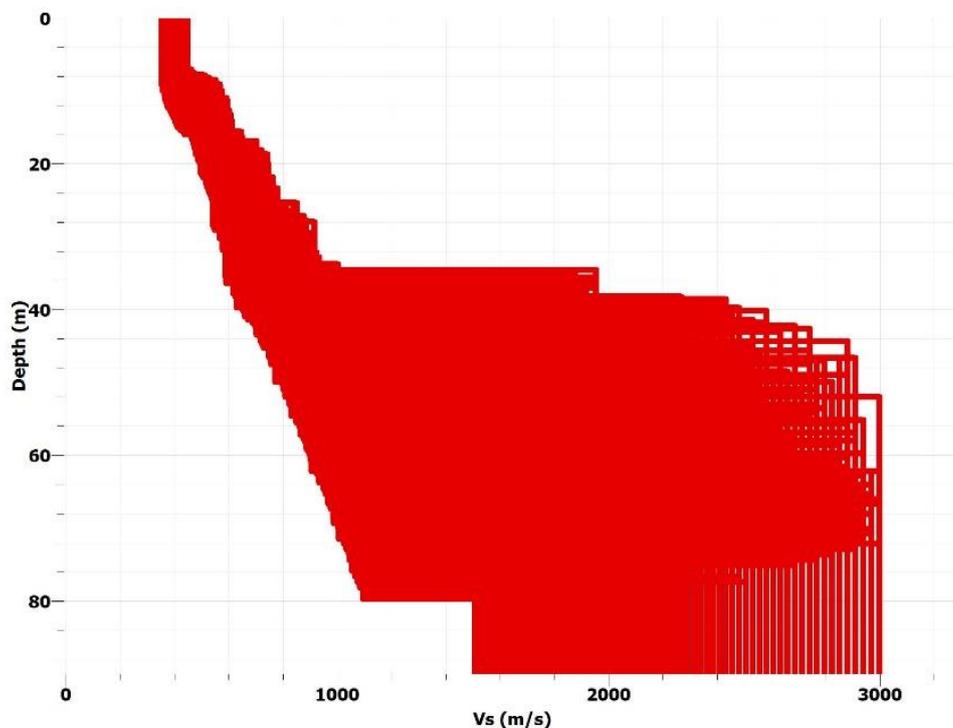


Figure 17 : Modèles issus de l'inversion des courbes de dispersion,  $\text{misfit}=1$ , profil Vs.

La profondeur de l'interface principale est peu contrainte, mais elle se trouve à 40 mètres minimum. L'inversion fait un compromis entre la profondeur et la vitesse du soubassement rocheux, avec une vitesse minimale à 1650 m/s et une vitesse maximale à 3000 m/s.

A partir des modèles déterminés ci-dessus, il est possible de modéliser la dispersion de la vitesse des ondes de Rayleigh, afin de vérifier le fit des modélisations par rapport aux observations. Le résultat est montré ci-dessous :

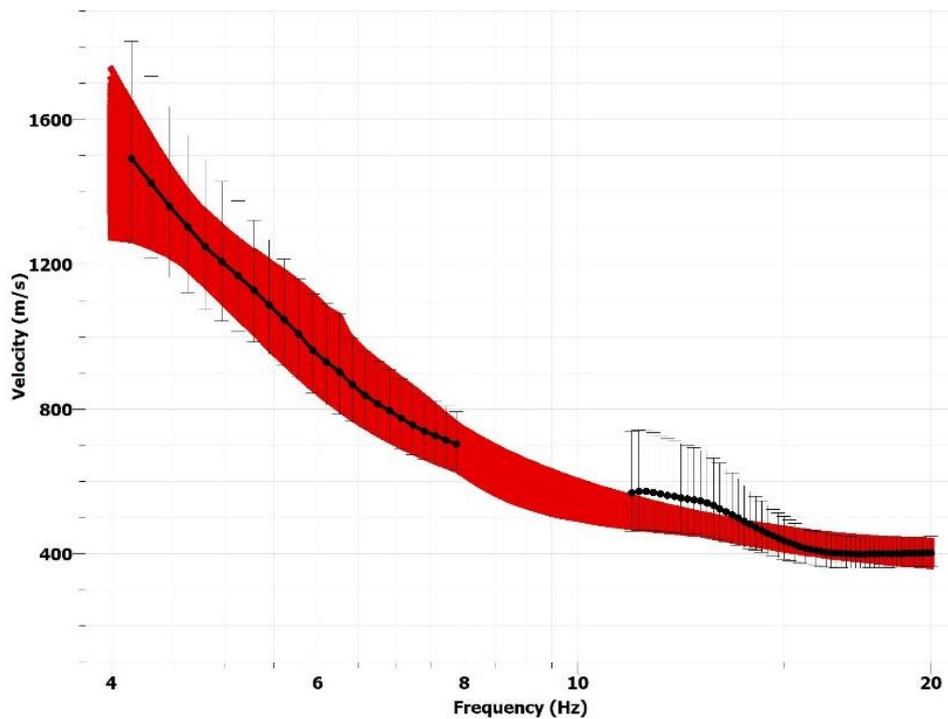


Figure 18 : Dispersion vitesse-fréquence de la vitesse des ondes de Rayleigh des modèles ajustés par l'inversion au misfit =1, comparée en mesures. En rouge : le mode fondamental de Rayleigh modélisé à partir des profils précédents, en noir : les observations.

Le modèle moyen issu de tous ces modèles est le suivant :

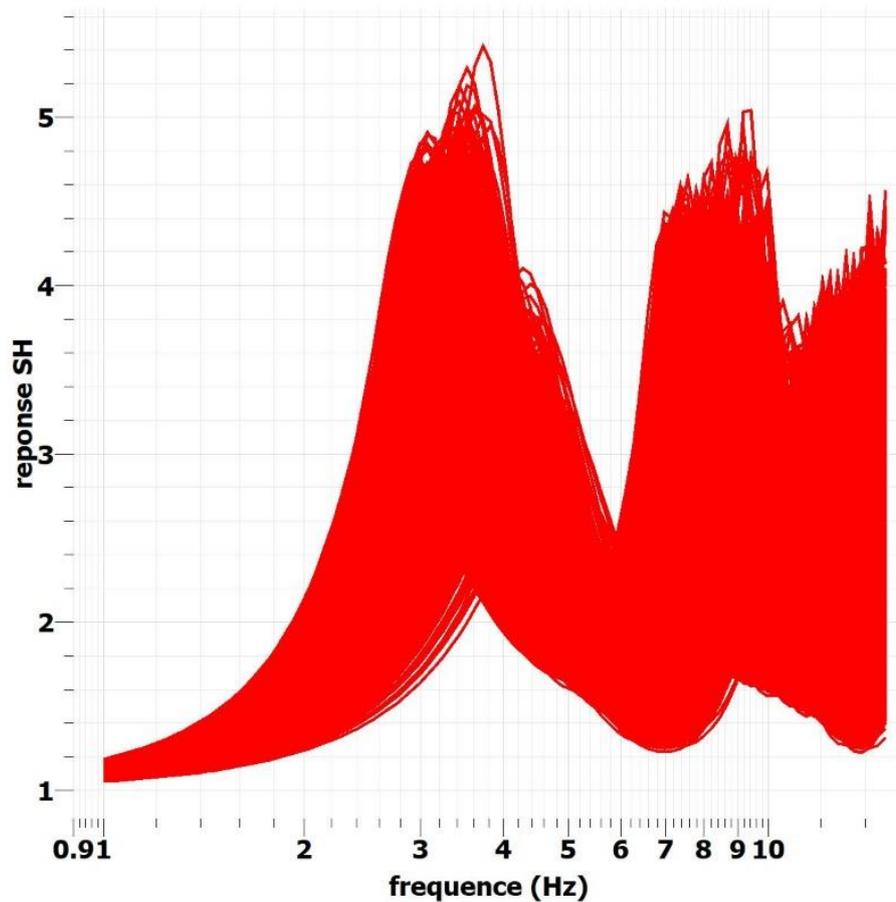
Numéro couche	Épaisseur (m)	écart-type épaisseur (m)	Vs (m/s)	écart-type vs (m/s)
1 (gradient)	12.9	1.3	413	13.
	12.9	1.3	566	25
	12.9	1.3	719	42
	12.9	1.3	870	60
	12.9	1.3	1025	77
2	Demi-espace		1950	276

Tableau 6 : Modèle moyen de vitesse Vs et écart-type.

Le calcul de la Vs30 moyenne à partir de l'ensemble des modèles retenus donne **Vs30 = 501 m/s avec 9 m/s d'incertitude. La classe de sol EC8 correspondante est B.**

A partir des modèles de vitesse, il est possible de calculer les réponses SH comme précédemment.

Les réponses SH modélisées apparaissent dans le graphique ci-dessous :



*Figure 19 : Réponse SH des modèles 3 couches inversées à partir des courbes de dispersion,  $q_p=200$  et  $q_s=100$ .*

On observe sur les réponses modélisées les mêmes pics de réponse SH, nous pouvons en déduire que la fréquence de 3 Hz est bien associée à l'interface des sédiments et du soubassement rocheux.

### 3. Conclusions

Dans le cadre de la phase 1 du PPRS de Menton (2020), réalisé en collaboration avec le CEREMA, une campagne de mesures géophysique a été réalisée afin d'aider à caractériser la réponse des différentes formations géologiques présentes sur la commune sous sollicitation sismique.

Trois types de mesures ont ainsi été menées :

- Mesures ponctuelles H/V pour caractériser la fréquence de résonance des formations géologiques superficielles considérées ;
- Profils sismiques MASW pour caractériser les profils de vitesse d'ondes S -avec la profondeur ;
- Mesures de bruit de fond en réseau pour caractériser les profils de vitesse d'ondes S - avec la profondeur. Cette méthode est complémentaire des mesures MASW et permet d'atteindre des profondeurs de pénétration supérieures à celles des profils MASW.

Au total, 72 mesures H/V, 8 profils MASW et 2 séries de mesures en réseau ont été réalisées par le BRGM avec l'appui du CEREMA sur les formations géologiques suivantes :

- Alluvions du centre-ville et des vallées du Borrigo et du Caréi ;
- Colluvions de pente sous lesquelles se trouvent les marnes éocènes du Parc du Pian ;
- Grès d'Annot et Flyschs oligocènes présents de part et d'autre des vallées du Borrigo et du Caréi ;
- Formations marno-calcaires présentes au Nord de la commune.

Une première interprétation conjointe de ces mesures a montré :

- Des effets de site assez homogènes sur les alluvions du centre-ville avec des fréquences de résonance globalement comprises entre 2.5 et 4 Hz et une valeur de Vs30 autour de 550 m/s ;
- Des effets de site haute-fréquence sur les alluvions des vallées du Borrigo et du Caréi ainsi que sur la frange littorale à l'Est de la commune. Les valeurs de Vs30 sont variables d'une zone à l'autre en raison notamment de la variabilité de l'épaisseur de sédiments rencontrée : autour de 473 m/s pour la vallée de Borrigo, autour de 604 m/s pour la vallée du Caréi et de 593 m/s pour la frange littorale à l'Est ;
- Des effets de site marqués entre 4 et 6 Hz au niveau du Parc du Pian (colluvions de pente) avec une valeur de Vs30 de l'ordre de 402 m/s ;
- Pas d'effet de site notable sur les marnes situées au Nord de la commune et une valeur de Vs30 mesurée à 640 m/s au niveau du Castellar et un rocher atteint dès 8 m de profondeur ;
- Des effets de site plus variables sur les flyschs, avec des fréquences de résonance peu marquées mais cohérentes autour de 3 Hz à l'Ouest de la vallée du Borrigo et autour de 2 Hz entre les vallées du Borrigo et du Caréi. Par contre, les rapports H/V ne montrent pas de fréquence de résonance marquée à l'Est de la vallée du Caréi. La nature de l'interface responsable de ces effets de site reste à identifier. Pour ces flyschs, la valeur de Vs30 est de l'ordre de 549 m/s.

L'ensemble de ces mesures serviront de données d'entrée pour la phase 2 du projet qui vise à aboutir à un microzonage de la commune de Menton, étude préalable à un PPR sismique.



## 4. Bibliographie

**Aki K.** (1957) - Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 415–457.

**Aki K., Richards P.** (1980) - Quantitative seismology 2<sup>nd</sup> Edition (2002), University Science Books - Bettig, B., P.-Y. Bard, F. Scherbaum, J. Riepl, F. Cotton, C. Cornou and D. Hatzfeld (2001).

Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC). Application to the Grenoble area., *Bolletino di Geosica Teorica ed Applicata* 42, 281-304.

**Bonnefoy-Claudet S., Cotton F. and Bard P-Y** (2006) - The nature of noise wavefield and its application for site effects studies – a literature review, *Earth Sc. Rev.*, 79, 205-227, doi:10.1016/j.earscrev.2006.07.004.

**Borcherdt, R.D.** (1970) - Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 60, 29-61.

**Bitri A., Le Bégat S., Baltassat J. M. et al.** (1997) - Détermination des vitesses de cisaillement des sols à partir de la dispersion des ondes de Rayleigh, Rapport BRGM R39877, 49 p., 24 fig., 7 tabl.

**Capon, J.** (1969) - High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis, Proceedings of the IEEE, 57, No. 8, 1408-1419.

**Field, E.H., and K.H. Jacob** (1995) - A comparison and test of various site-response estimation techniques, including that are not reference-site dependent, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 1127-1143.

**Iwaki, A., Maeda, T., Morikawa, N. et al.** (2018) - Effects of random 3D upper crustal heterogeneity on long-period ( $\geq 1$  s) ground-motion simulations. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 1-15.

**Konno K. and Ohmachi T.** (1998) - Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 88, n. 1, pp 228-241.

**Lachet, C., and Bard P.Y** (1994) - Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *J. Phys. Earth*, 42, 377-397.

**Lermo, J., and F.J. Chávez-García** (1993) - Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1574-1594.

**Matsushima S., Kosaka H., Kawase H.** (2017) - Directionally dependent horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors at Onahama, Fukushima, Japan, *Earth, Planets and Space* 69(96) Jul 2017.

**Nakamura, Y.** (1989) - A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, *Quarterly Report of RTRI*, 30:1, 25-33.

**Nogoshi, M. and Igarashi, T.** (1970) - On the propagation characteristics of microtremors. *J. Seism. Soc. Japan* 23, 264-280.

**Okada H.** (2004) - The Microtremor Survey Method, Geophysical Monograph Series vol 12., ISBN 1-56080-120-4.

**SESAME consortium** (2005) - Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation, project No. EVGT1-CT-2000-00026 SESAME, deliverable D23.12, 62 p.

**Sánchez-Sesma, F. J., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U. et al.** (2011) - A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. *Geophysical Journal International*, 186(1), 221-225.

**Wathelet, M., D. Jongmans, and M. Ohrnberger** (2004) - Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements, *Near Surface Geophysics* 2, 211—221.

**Wathelet M.** (2005) - Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion. PhD Thesis, Liège University (Belgium), 2005, 177 pages.

**Wathelet, M., Chatelain, J. L., Cornou, C. et al.** (2020) - Geopsy: A user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1878-1889.

## **Annexe 1**

### **Mesures H/V**



### a) Principe des mesures H/V

De nombreuses techniques théoriques, numériques ou instrumentales ont été développées pour estimer les effets de site lithologiques (par ex. Borchardt, 1970). Les techniques expérimentales font généralement appel à un site de référence, c'est-à-dire un site rocheux n'amplifiant pas le mouvement sismique. Ce site rocheux n'est pas toujours présent sur les zones d'études, ce qui peut engendrer des erreurs dans les estimations des effets de site. C'est pourquoi des techniques plus récentes, ne faisant pas intervenir de site de référence, ont été mises au point (Lermo et Chávez-García, 1993). L'une de ces techniques consiste, à partir de l'enregistrement du bruit de fond ambiant, à calculer le rapport spectral entre les composantes horizontales et la composante verticale : c'est la méthode appelée couramment H/V (Nakamura, 1989). Le dispositif expérimental est constitué d'un sismomètre trois composantes et d'une station d'acquisition.

Les principes physiques sous-tendus par cette méthode ne sont actuellement pas tous bien cernés. Cependant, de nombreuses expériences ont comparé cette méthode avec des méthodes classiques et ont montré sa capacité à évaluer la fréquence propre du site puis, en conjonction avec d'autres éléments, les effets de site proprement dits (Lachet et Bard, 1994 ; Field et Jacob, 1995). L'explication la plus communément admise est la suivante : soit un modèle très simple constitué d'une couche meuble (souvent sédimentaire) surmontant un demi-espace homogène. Le bruit de fond est engendré par des sources proches comme le trafic urbain et donc composé d'ondes de surface. Seules les composantes horizontales sont amplifiées par les réflexions sur les interfaces des couches sous-jacentes. La composante verticale du bruit de fond contient, elle, la signature des sources de bruit. On suppose également que la base de la couche sédimentaire n'est pas affectée par les ondes de surface.

Pour obtenir une pseudo-fonction de transfert à l'aide du bruit de fond, en s'affranchissant de l'effet de source, on divise donc le spectre d'une composante horizontale par le spectre de la composante verticale (d'où l'appellation H/V). Ce rapport donne avec une bonne précision la fréquence de résonance fondamentale du site (ou fréquence propre).

En définitive, la réalisation d'une campagne de mesures ponctuelles H/V permet, en première approche, de déterminer en chaque point de mesure la fréquence propre du sol.

Lorsque la géométrie du site peut être assimilée à un milieu mono-dimensionnel, On peut relier l'épaisseur d'une couche sédimentaire meuble (ayant un fort contraste d'impédance avec le substratum rocheux) à sa fréquence de résonance fondamentale  $f_0$  par l'expression :

$$H = \frac{V_s}{4f_0}$$

Avec :

$H$  : épaisseur moyenne de la couche meuble,

$V_s$  : vitesse moyenne de propagation des ondes S dans la couche meuble,

$f_0$  : fréquence de résonance fondamentale de la couche meuble.

Les données H/V acquises dans le cadre de cette étude ont été traitées à l'aide du logiciel Geopsy ([www.geopsy.org](http://www.geopsy.org)) en suivant les critères préconisés dans les documents de référence du projet européen SESAME (2014).

**b) Exemple de fiche de terrain complétée pour chaque mesures H/V**

FICHE DE TERRAIN

DATE	10/10	HEURE (TU)	12h10	LIEU	Menton	OPERATION	PPRS
OPERATEUR	AC			GPS TYPE and #	Garmin 62s		
LATITUDE	43.78051 N			LONGITUDE	7.47790 E		
TYPE DE STATION	T6986			TYPE DE CAPTEUR			
STATION#				CAPTEUR#	CARTE#		
NOM DU FICHIER				POINT#	M304V		
GAIN				FREQ. D'ECH	200	DUREE D'ENR.	20 minutes secondes
CONDITIONS	VENT	<input type="checkbox"/> absent <input checked="" type="checkbox"/> faible <input type="checkbox"/> modéré <input type="checkbox"/> fort			Mesures (si disponible) : _____		
METEO	PLUIE	<input checked="" type="checkbox"/> absente <input type="checkbox"/> faible <input type="checkbox"/> modérée <input type="checkbox"/> forte			Mesures (si disponible) : _____		
Température (approx): 21 Remarques _____							
TYPE DE SOL	<input type="checkbox"/> terre dure <input type="checkbox"/> terre molle <input type="checkbox"/> gravier <input type="checkbox"/> sable <input type="checkbox"/> roche <input type="checkbox"/> herbe basse <input type="checkbox"/> herbe haute <input type="checkbox"/> asphalte/bitume <input type="checkbox"/> ciment <input checked="" type="checkbox"/> béton <input type="checkbox"/> pavés <input type="checkbox"/> autres _____ <input checked="" type="checkbox"/> sol sec <input type="checkbox"/> sol humide Remarques : _____						
COUPLAGE CAPTEUR/SOL	<input type="checkbox"/> non <input type="checkbox"/> oui, type _____						
URBANISATION	<input type="checkbox"/> non <input checked="" type="checkbox"/> dispersée <input type="checkbox"/> dense <input type="checkbox"/> autre, type _____ petite zone industrielle						
TRANSITOIRES	Aucune	Peu - rare	Quelques	Plusieurs	Très dense	distance	
Voitures		<input checked="" type="checkbox"/>				5m	
Camions		<input checked="" type="checkbox"/>				1	
Piétons		<input checked="" type="checkbox"/>				1	
Autres							
SOURCES DE BRUIT CONTINU (usines, travaux, pompes, rivières,...)							
<input checked="" type="checkbox"/> non <input type="checkbox"/> oui, type _____							
STRUCTURES SIGNIFICATIVES PROCHES (arbres, immeubles, ponts, structures souterraines,...)							
(description, hauteur, distance) <i>trouage au loin muraille</i>							
OBSERVATIONS						FREQUENCE : (si traité sur le terrain)	

Figure 20 : Exemple de fiche terrain pour les mesures H/V réalisées à Menton.

c) Localisation des mesures H/V réalisées par le BRGM à Menton

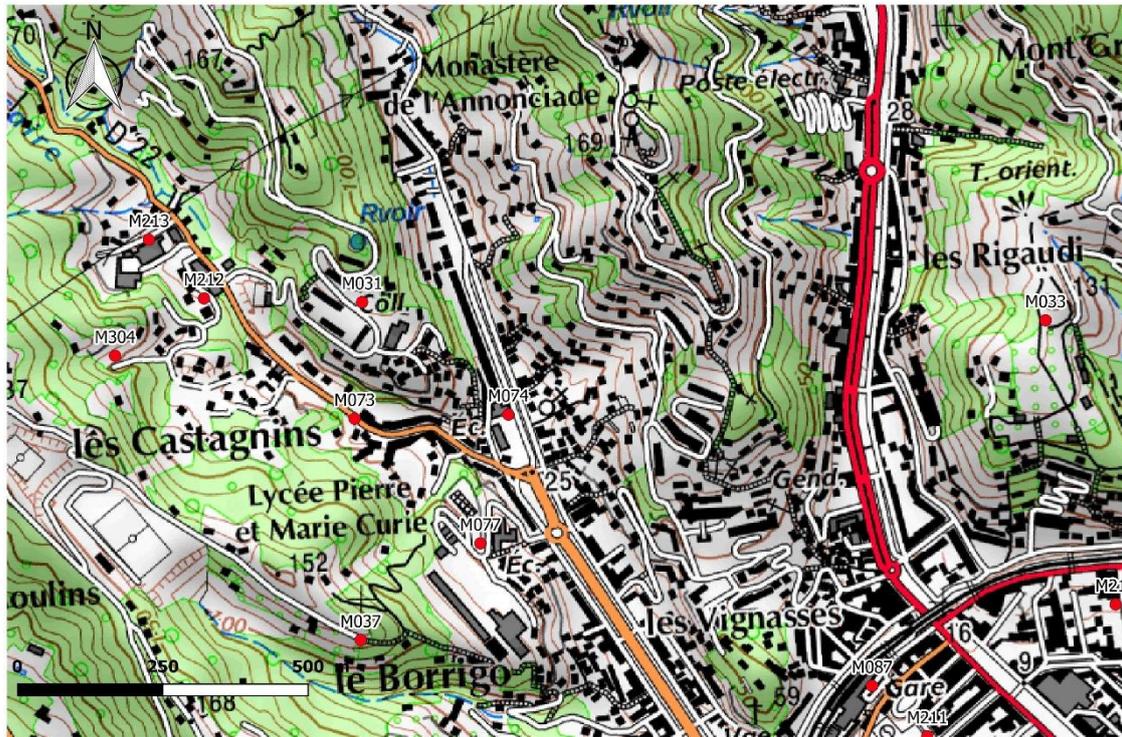


Figure 21 : Plan des points H/V réalisés 1/6 (Le Borrigo).



Figure 22 : Plan des points H/V réalisés 2/6 (Castellar Nord).

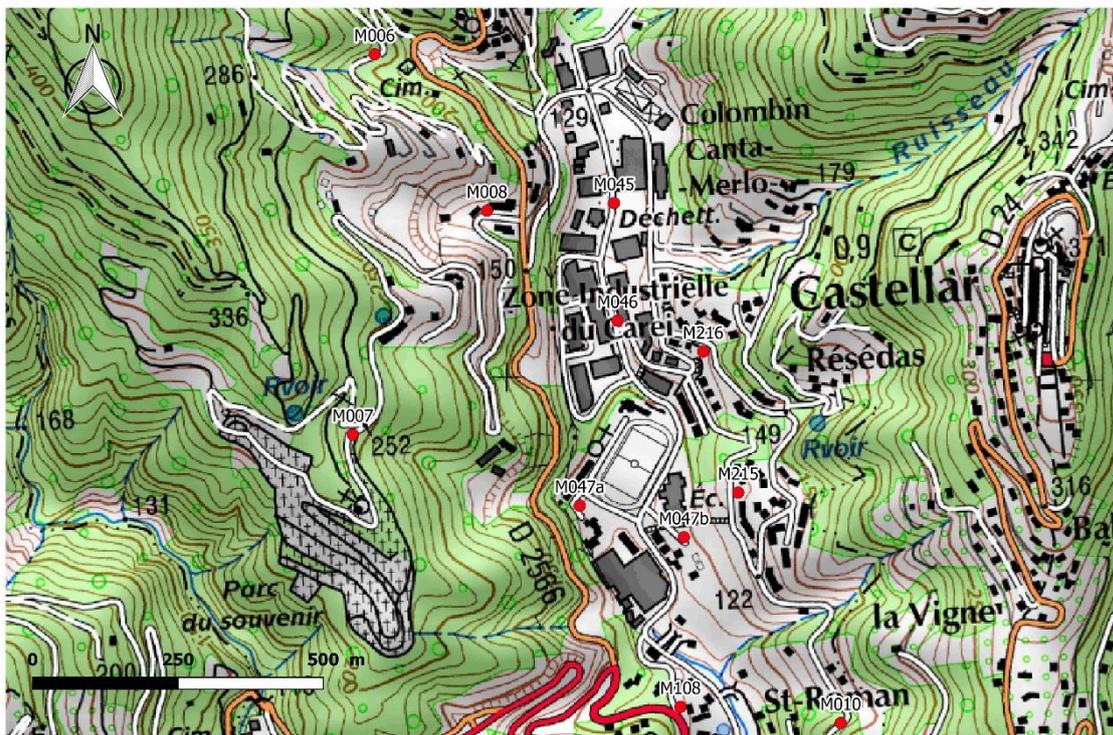


Figure 23 : Plan des points H/V réalisés 3/6 (Castellar).

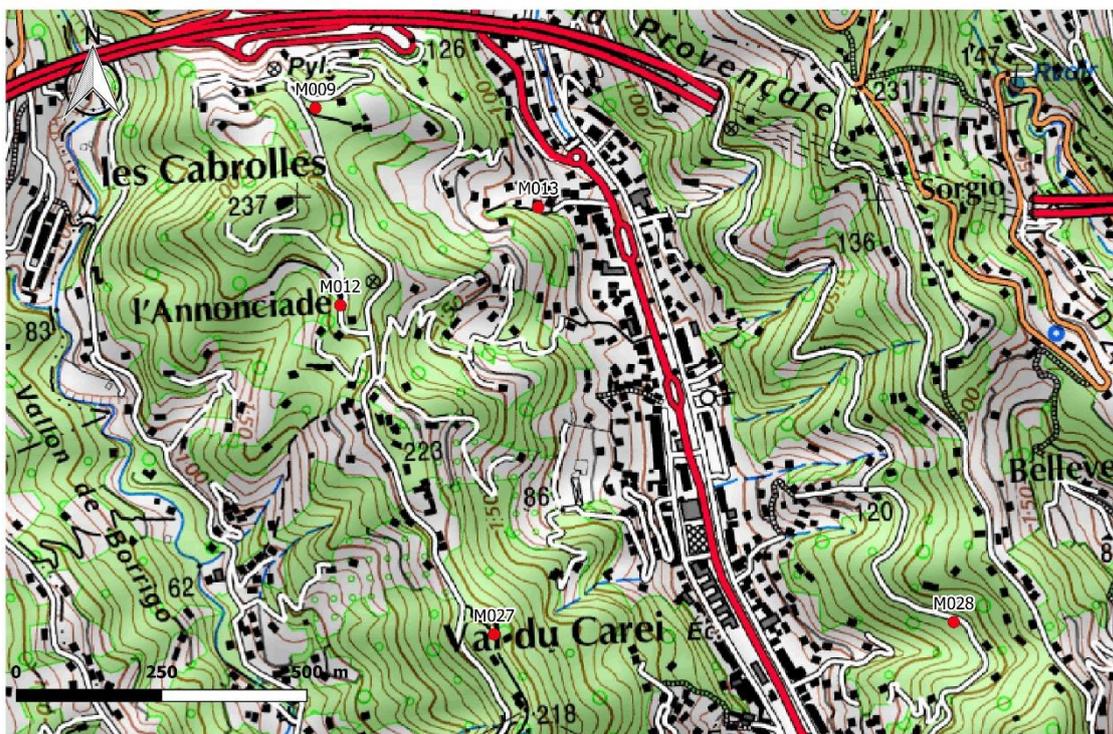


Figure 24 : Plan des points H/V réalisés 4/6 (Vallée du Caréi).



Figure 25 : Plan des points H/V réalisés 5/6 (centre).

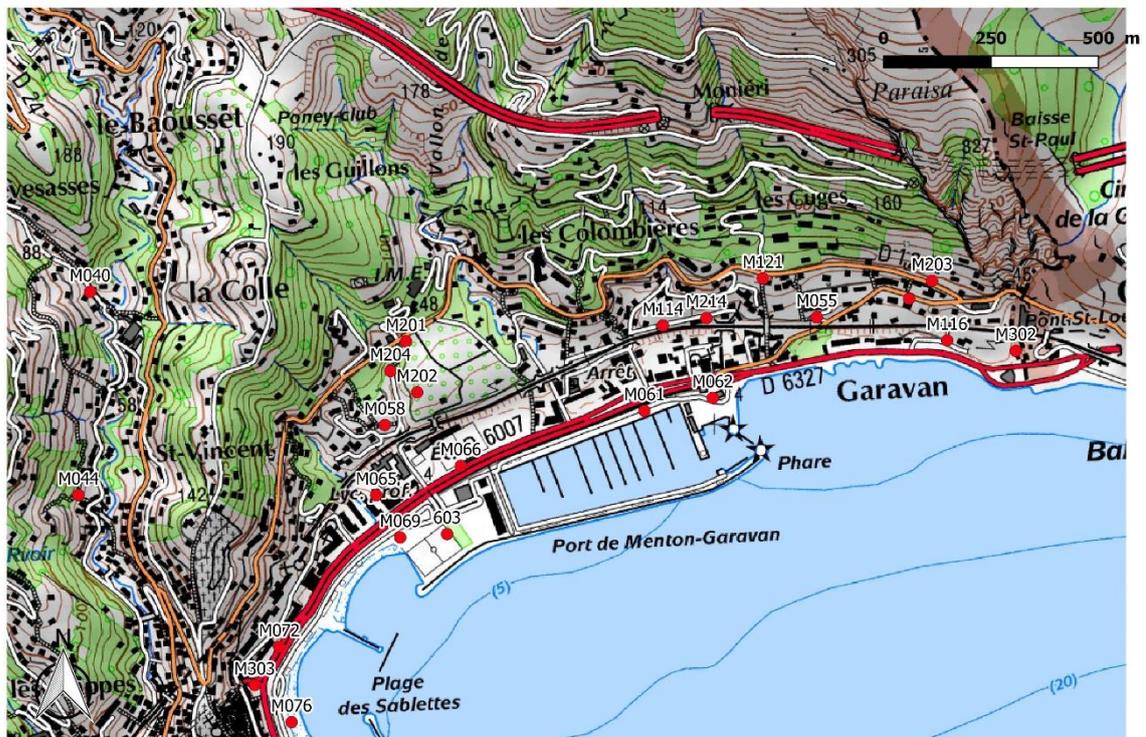


Figure 26 : Plan des points H/V réalisés 6/6 (Est).

L'ensemble des coordonnées des mesures H/V réalisées dans le cadre de cette étude sont indiquées dans le tableau suivant.

Identifiant (ID-terrain) ; coordonnées géographiques (Latitude et Longitude en WGS84) ; nom du fichier de données brut correspondant ; fréquence de résonance interprétée (f0 en Hz) et amplitude du rapport H/V moyen à la fréquence de résonance f0 (d'après les calculs réalisés sur geopsy).

ID_terrain	Longitude	Latitude	Fichier brut correspondant	f0	A0
603	7.5129345000	43.7817978000	0016_200915_1527.txt	6	3.98
M002	7.4813766000	43.8193567000	m002_m002e0_20200916_1328e.sac	0	
M006	7.4827609000	43.8085848000	m006_m006e0_20200916_1422e.sac	0	
M007	7.4818310000	43.8026880000	m007e0_20201009_1232.gcf	0	
M008	7.4849670000	43.8060530000	m008e0_20201009_1222.gcf	14.8	3.02
M009	7.4849200000	43.7958370000	m009e0_20201006_1406.gcf	15.8	3.99
M010	7.4918900000	43.7977720000	m010e0_m010e0_20201009_1400.gcf	1.2	2.18
M012	7.4852090000	43.7927470000	m012e0_20201006_1400.gcf	1.9	2.44
M013	7.4895550000	43.7940990000	m013e0_20201006_1519.gcf	8.8	2.52
M027	7.4880900000	43.7874910000	m027e0_20201006_1300.gcf	2.4	3.31
M028	7.4979107000	43.7872770000	m028_m028e0_20200916_1135e.sac	11.5	2.12
M031	7.4832400000	43.7811290000	m31e0_20201008_1206_#18.gcf	3	3.66
M033	7.4977980000	43.7802445000	m033_m033e0_20200916_1034e.sac	0	
M034	7.5010570000	43.7775220000	m034e0_20201006_0849.gcf	12.1	1.88
M037	7.4827940000	43.7758670000	m037z0_20201008_1413_#17.gcf	9999	
M039	7.4881840000	43.7719910000	m039e0_20201010_1335.gcf	4.3	2.72
M040	7.5030260000	43.7873208000	m040_m040e0_20200916_0737e.sac	6.1	1.91
M044	7.5023546000	43.7830589000	m044_m044e0_20200916_0905e.sac	9999	
M045	7.4876880000	43.8060600000	m045e0_20201009_1131.gcf	5.9	4.74
M046	7.487619088	43.80422738	m046e0_20201009_0923.gcf	9	3.13
M047a	7.4865857000	43.8013832000	m047_m047e0_20200916_1227e.sac	3.9	2.98
M047b	7.4887700000	43.8008000000	m046e0_20201009_1101.gcf	5.4	2.63
M055	7.5239700000	43.7859200000	m055e0_m055e0_20200918_1000.gcf	7.5	4.87
M056	7.5266660000	43.7861990000	m056e0_20201007_1000.gcf	9.2	3.91
M058	7.5113170000	43.7841680000	m058e0_20200918_1434_#07.gcf	5.4	3.89
M061	7.5188373977	43.7841554129	m061e0_20200915_0924.gcf	9.4	6.77
M062	7.5208330000	43.7843450000	m062e0_20200915_0934_#09.gcf	4.9	3.98
M065	7.5109520000	43.7827000000	m065e0_20201007_1330.gcf	3.9	2.87
M066	7.5134440000	43.7832180000	m066_m066e0_20200915_0700e.sac	6.3	2.9
M069	7.5115750000	43.7817820000	m069e0_20201007_1315.gcf	6.5	6.63
M072	7.5079040000	43.7796240000	m072e0_20201010_1000.gcf	9.7	4.17
M073	7.4829370000	43.7793200000	m073e0_20201008_1302.gcf	3	2.17
M074	7.4862215000	43.7792495000	m074_m074e0_20200916_1700e.sac	4.2	2.63
M076	7.508132	43.778026	m076e0_20201010_1100.gcf	6.5	6.82
M077	7.4854680000	43.7772680000	m077e0_20201008_1500.gcf	3.9	7.15
M083	7.5004190000	43.7757490000	m083e0_20201009_2211.gcf	10.2	2.72
M084	7.5034534673	43.7768531740	m084e0_20201009_2131.gcf	11.5	2.89
M085	7.5086280000	43.7749920000	m085e0_20200919_0533_#12.gcf	0	

M087	7.4936490000	43.7747050000	m087e0_20201007_0533.gcf	4	4.73
M088	7.5003740000	43.7745430000	m088e0_m088e0_20201005_2000.gcf	2.9	2.5
M089	7.5034262000	43.7744327000	m089_m089e0_20200918_0621e.sac	9999	
M090	7.5067690000	43.7742610000	m090e0_20200919_0619_#23.gcf	4.3	4.29
M092	7.4906850000	43.7732180000	m092e0_m092e0_20201008_0400.gcf	4.2	2.8
M094	7.4957040000	43.7730260000	m094e0_m094e0_20201006_0500.gcf	3.4	2.87
M096	7.4904970000	43.7712690000	m096e0_20201008_0600.gcf	8.1	1.64
M097	7.4925280000	43.7713340000	m097e0_20201008_0500.gcf	6.2	4.53
M098	7.4941640000	43.7705320000	m098e0_20201009_0500.gcf	2.7	5.6
M099	7.4921250000	43.7693120000	m099e0_20201009_0500.gcf	5	6.93
M108	7.4884910000	43.7981640000	m108e0_20201009_1328_#17.gcf	8.1	4.31
M110	7.4961300000	43.7712990000	m110e0_20201007_0436.gcf	2.9	2.93
M111	7.5029460000	43.7753370000	m111e0_20201008_1900.gcf	11.8	3.23
M112	7.5051450000	43.7753060000	m112e0_20201008_2028.gcf	3.5	2.57
M114	7.5195150000	43.7859310000	m114e0_20201007_1018.gcf	4.3	3.84
M116	7.5276980000	43.7852740000	m116e0_20201007_0832.gcf	11.2	6.96
M118	7.5066640000	43.7758010000	m118e0_20200919_0500.gcf	15.5	2.16
M121	7.5224800000	43.7868000000	m121e0_m121e0_20200918_0900.gcf	3.8	4.35
M201	7.5120700000	43.7859000000	m2010_m201z0_20200918_0800.gcf	4.7	5.1
M202	7.5123035000	43.7848167000	m202_m202e0_20200918_0831e.sac	3.5	7.94
M203	7.5273596000	43.7865452000	m203_m203e0_20200918_0938e.sac	7.6	1.65
M204	7.5115680000	43.7852960000	m204e0_20200918_1319.gcf	15.9	2.62
M210	7.4989430000	43.7757580000	m210e0_20201005_2000.gcf	6.1	4.84
M211	7.4947630000	43.7738700000	m211e0_m211e0_20201006_0400.gcf	4.8	3.71
M212	7.4798700000	43.7813260000	m212e0_20201008_1111.gcf	2.9	5.17
M213	7.4787670000	43.7822890000	m213e0_20201008_1000.gcf	3.8	5.2
M214	7.5207820000	43.7860330000	m214e0_20201007_1000.gcf	6.3	4.2
M215	7.4899840000	43.8014470000	m215e0_20201009_1028_#27.gcf	3.4	5.29
M216	7.4894090000	43.8036720000	m216e0_20201009_0900.gcf	9999	
M301	7.5009122868	43.7777978255	m301e0_20201006_0810.gcf	7.6	2.72
M302	7.5296620000	43.7849720000	m302e0_20201007_0809.gcf	21.7	3.08
M303	7.5071260000	43.7788490000	m303e0_20201010_1100.gcf	9999	
M304	7.4779040000	43.7805110000	m304e0_20201010_1204.gcf	0	

Tableau 7 : Récapitulatif des mesures H/V acquises par le BRGM sur la commune de Menton.



## **Annexe 2**

### **Mesures réfraction / MASW / REMI**



### **a) Principe de la mesure**

Cette méthode est fondée sur le principe de dispersion des ondes de surface (Bitri et al., 1997) pour la détermination des vitesses des ondes de cisaillement  $V_s$  dans les premières dizaines de mètres du sous-sol. Elle permet d'obtenir ce profil de vitesse, en plusieurs points, pour un coût largement inférieur aux méthodes destructives habituellement utilisées en géotechnique (cross-hole). La vitesse des ondes de cisaillement  $V_s$  intervient dans l'évaluation des modifications du signal sismique à la surface par rapport au mouvement au rocher (effets de site). C'est donc un paramètre déterminant dans une étude d'aléa sismique local.

Le matériel nécessaire pour effectuer des mesures sismiques des ondes de surface est composé d'une centrale d'acquisition sismique, de géophones et d'une source impulsionnelle (ici une chute de marteau). Les ondes de surface se propagent parallèlement à la surface de la terre. Dans le cas d'un milieu dont les propriétés élastiques varient avec la profondeur, la vitesse des ondes de surface varie avec la longueur d'onde, et donc avec la fréquence. Cet effet est appelé dispersion. Suivant la fréquence considérée, les ondes de surface contiennent de l'information sur les milieux traversés entre la surface et la profondeur maximale de pénétration des différents modes. En analysant la dispersion de ces ondes, il est donc possible d'obtenir des informations sur les valeurs des paramètres physiques à différentes profondeurs. Le maximum d'énergie dans le diagramme de dispersion donne les courbes de dispersion. Ces courbes, ainsi que les barres d'erreurs associées, sont ensuite inversées à partir d'un modèle de vitesse a priori dans le but de retrouver le profil vertical de vitesse des ondes S.

La méthode expérimentale MASW, permet ainsi de mesurer les profils de vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol et par conséquent de déterminer le type de sol en fonction des paramètres d'identification donnés dans les Eurocode 8.

Pour les profils n'atteignant pas les 30 mètres de profondeur, nous avons extrapolé la dernière valeur de  $V_s$  disponible jusqu'à 30 m de profondeur afin de pouvoir calculer le paramètre  $V_{s,30}$ . Ce choix peut induire une sous-évaluation du paramètre  $V_{s,30}$  (Boore, 2004) et, par conséquent, une classe de sol EC8 plus pénalisante, notamment pour les profils peu résolus en profondeur. Dans notre cas, les profils de  $V_s$  étaient suffisamment résolus en profondeur (la plupart des profils descendent au-delà de 25 m de profondeur) pour éviter cet écueil. Nous avons néanmoins vérifié, pour chaque profil, que notre méthode d'extrapolation ne modifiait pas la classe de sol EC8 correspondante pour éviter de pénaliser le site.

**b) Localisation des profils MASW/REMI réalisées par le BRGM à Menton**

Il est à noter que les positions relevées au DGPS ont été traitées avec la base RGP, 1h, 1s, EXAGONE, Eze. Les fichiers exportés contenant les positions corrigées sont nommés "Point\_generic.pos" (en format texte).

Les investigations sismiques se déroulèrent comme suivant :

1/ Profil « stade » réalisé sur le Stade Lucien Rhein, orientation E-O, 8 positions, 69 m, intertrace 3 m



*Figure 27 : Photo du profil MASW « stade » réalisé au Stade Lucien Rhein le 15/09/2020.*

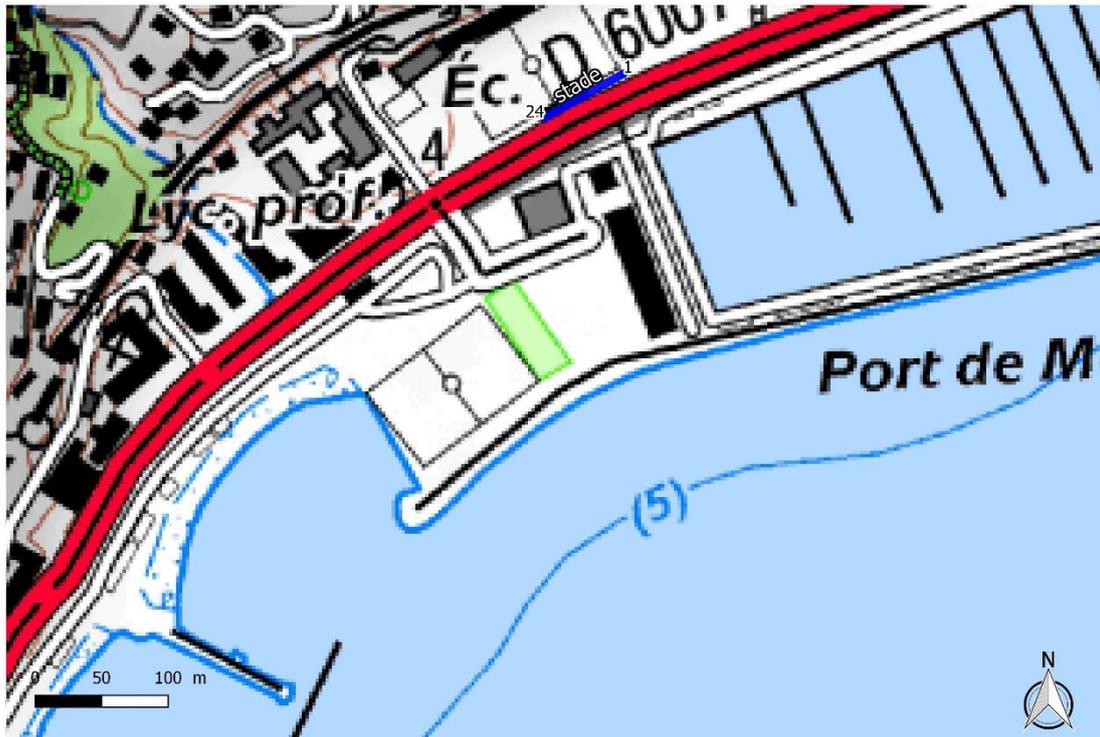


Figure 28 : Plan du profil MASW « stade » réalisé au Stade Lucien Rhein le 15/09/2020.

Coordonnées géographiques (Latitude et Longitude en WGS84, positionnées après la mission avec les orthophotos) :

Géophone #1 : 43.783530 ; 7.514297

Géophone #24 : 43.783255 ; 7.513531

Tirs : offset – 3 m, géophones (#4-#8-#12-#16-#20-#24), offset + 3 m (72 m).

2/ Profil « parc » réalisé dans le parc départemental du Pian, orientation N-S, 8 positions, 69 m, intertrace 3 m



Figure 29 : Photo du profil MASW « parc » réalisé au Parc départemental du Pian le 15/09/2020.



Figure 30 : Plan du profil MASW « parc » réalisé au Parc départemental du Pian le 15/09/2020.

Lat*	Long*	Alt (NMM)	Nom caractéristique		Distance/m	Précision verticale/m	Précision horizontale/m
43,78501	7,513443	80,235	parc	24	69	0,022	0,010
43,78503	7,513415	80,407	parc	23	66	0,017	0,010
43,78504	7,513386	80,615	parc	22	63	0,026	0,015
43,78506	7,513356	80,859	parc	21	60	0,016	0,010
43,78507	7,513327	81,529	parc	20	57	0,013	0,010
43,78512	7,513239	82,28	parc	17	48	0,013	0,010
43,78516	7,513181	82,758	parc	15	42	0,015	0,010
43,78517	7,513152	83,076	parc	14	39	0,014	0,010
43,78521	7,513095	83,524	parc	12	33	0,018	0,010
43,78523	7,513068	83,867	parc	11	30	0,014	0,010
43,78526	7,513014	84,301	parc	9	24	0,014	0,010
43,7853	7,512959	84,809	parc	7	18	0,015	0,010
43,78532	7,512931	85,069	parc	6	15	0,226	0,135
43,78535	7,512873	85,626	parc	4	9	0,022	0,014
43,78539	7,51281	86,391	parc	2	3	0,032	0,020

Tableau 8 : Coordonnées des géophones #2-#4-#6-#7-#9-#11-#12-#14-#15-#17-#20-#21-#22-#23-#24 prises au GPS différentiel Trimble Geo 7x.

\*Latitude et Longitude en WGS84

Tirs : offset – 3 m, géophones (#4-#8-#12-#16-#20-#24), offset + 3 m (72 m).

3/ Profil « parking caréi » réalisé à moins d'un kilomètre au sud de A8 le long de la Promenade Val de Caréi à proximité du bureau de la police municipale, orientation N-S, 8 position, 46 m, intertrace 2 m.



*Figure 31 : Photo du profil MASW « parkingcaréi » réalisé sur un parking dans la vallée du Caréi le 15/09/2020.*

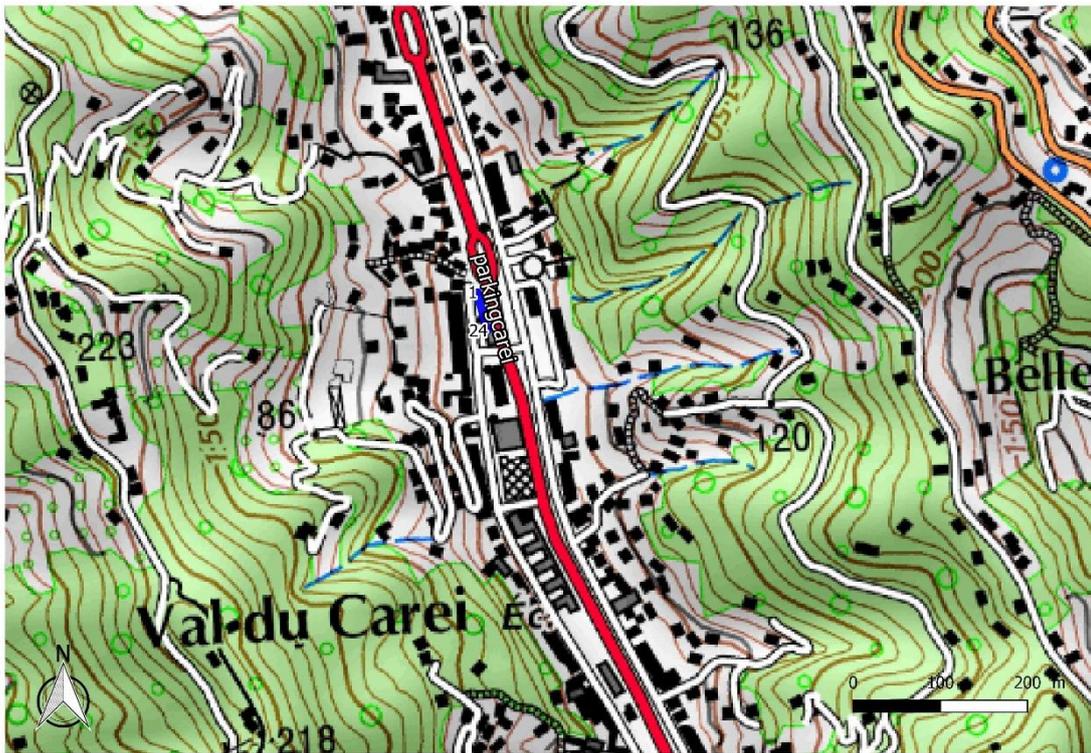


Figure 32 : Plan du profil MASW « parkingcaréi » réalisé sur un parking dans la vallée du Caréi le 15/09/2020.

Coordonnées géographiques (Latitude et Longitude en WGS84, positionnées après la mission avec les orthophotos) :

Géophone #1 : 43.790747 ; 7.492124

Géophone #24 : 43.790342 ; 7.492238

Tirs : offset – 2 m, géophones (#4-#8-#12-#16-#20-#24), offset + 2 m (48 m).

4/ Profil « Castellar » réalisé sur le parking des services techniques de Castellar, orientation N-S, 7 positions, 69 m, intertrace 3 m

D'après les indications des employés du ST et nos observations sur place, le parking sur lequel est placé le profil est constitué uniquement de remblais et ne représente donc absolument pas les milieux naturels. Nous avons donc vu avec les propriétaires du chemin qui continue après le parking pour faire des mesures à l'entrée de leur chemin. Nous avons réalisé le profil « Castellar2 », qui sera utilisé à la place du profil « Castellar ».



*Figure 33 : Photo du profil MASW « castellar » réalisé sur le parking des services techniques le 16/09/2020.*

Coordonnées géographiques (Latitude et Longitude en WGS84, positionnées après la mission avec les orthophotos) :

Géophone #1 : 43.809207 ; 7.488488

Géophone #24 : 43.808757 ; 7.487897

Tirs : offset – 3 m, géophones (#4-#8-#12-#16-#20-#24).

5/ Profil « castellar2 » réalisé sur le chemin derrière le parking de Castellar (services techniques), orientation N-S, 8 positions, 46 m, intertrace 2 m



*Figure 34 : Photo du profil MASW « castellar2 » réalisé sur le chemin privé après le parking des services techniques le 16/09/2020.*



Figure 35 : Plan du profil MASW « castellar2 » réalisé sur le chemin privé après le parking des services techniques le 16/09/2020.

Lat*	Long*	Alt (NMM)	Nom caractéristique		Distance/m	Précision verticale/m	Précision horizontale/m
43,809471	7,488674	180,210	castellar2	24	46	0,016	0,010
43,809875	7,488786	182,472	castellar2	1	0	0,027	0,018

Tableau 9 : Coordonnées des géophones #1-#24 prises au GPS différentiel Trimble Geo 7x, profil « castellar2 ».

\*Latitude et Longitude en WGS84

Tirs : offset – 2 m, géophones (#4-#8-#12-#16-#20-#24), offset + 2 m (48 m).

6/ Profil « parcMichel » réalisé dans le Parc Saint Michel, orientation N-S, 8 positions, 46 m, intertrace 2 m



Figure 36 : Photo du profil MASW « parc Michel » réalisé dans le parc Saint Michel le 16/09/2020.

Lat*	Long*	Alt (NMM)	Nom caractéristique		Distance/m	Précision verticale/m	Précision horizontale/m
43,780199	7,497701	173,266	michel	24	46	0,011	0,010
43,780587	7,497610	175,888	michel	1	0	0,019	0,011

Tableau 10 : Coordonnées des géophones #1-#24 prises au GPS différentiel Trimble Geo 7x, profil « parc-Michel ».

\*Latitude et Longitude en WGS84

Tirs : offset – 2 m, géophones (#4-#8-#12-#16-#20-#24), offset + 2 m (48 m).

7/ Profil « école » réalisé dans la cours de l'école primaire Anne Franck, orientation N-S, 8 positions, 69 m, intertrace 3 m



Figure 37 : Photo du profil MASW « ecole » réalisé dans l'école primaire d'Anne Franck le 16/09/2020.

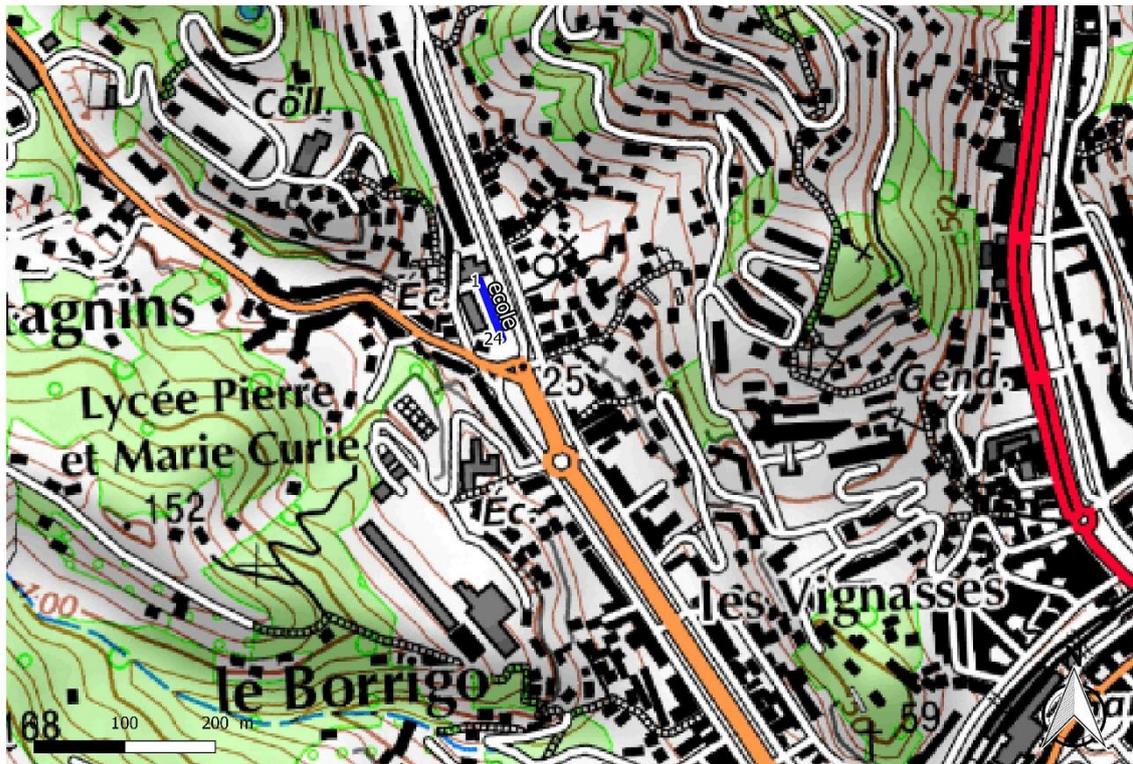


Figure 38 : Plan du profil MASW « ecole » réalisé dans l'école primaire d'Anne Franck le 16/09/2020.

Coordonnées géographiques (Latitude et Longitude en WGS84, positionnées après la mission avec les orthophotos) :

Géophone #1 : 43.779213 ; 7.486135

Géophone #24 : 43.778621 ; 7.486397

Tirs : offset – 3 m, géophones (#4-#8-#12-#16-#20-#24), offset + 3 m (72 m).

8/ Profil « casino » réalisé sur la place des Jardins de Biovès, orientation N-S, 2 positions + 1 REML, 46 m, intertrace 2 m.



*Figure 39 : Photo du profil MASW profil « casino » réalisé sur la place des Jardins de Biovès 17/09/2020.*



Figure 40 : Plan du profil MASW profil « casino » réalisé sur la place des Jardins de Biovès 17/09/2020.

Coordonnées géographiques (Latitude et Longitude en WGS84, positionnées après la mission avec les orthophotos) :

Géophone #1 : 43.774330 ; 7.496752  
 Géophone #24 : 43.774028 ; 7.497142

Tirs : offset – 2 m, offset + 2 m (48 m)

Ce profil a été réalisé sur une place très passante et le long d'un boulevard (piétons, voitures, camions, etc). Il a été jugé qu'une acquisition avec la source marteau n'était pas possible sur l'ensemble des tirs, et seuls les tirs en bout ont été effectués.

En complément des tirs actifs, nous avons réalisé un profil REMI en utilisant les bruits ambiants :

- 40 enregistrements de 16 s ;
- Fréquence d'échantillonnage de 2 ms ;

Pour ce profil, nous avons procédé à un déclenchement manuel synchronisé sur le passage des véhicules lourds.

c) Localisation des profils MASW réalisés par le BRGM à Menton.

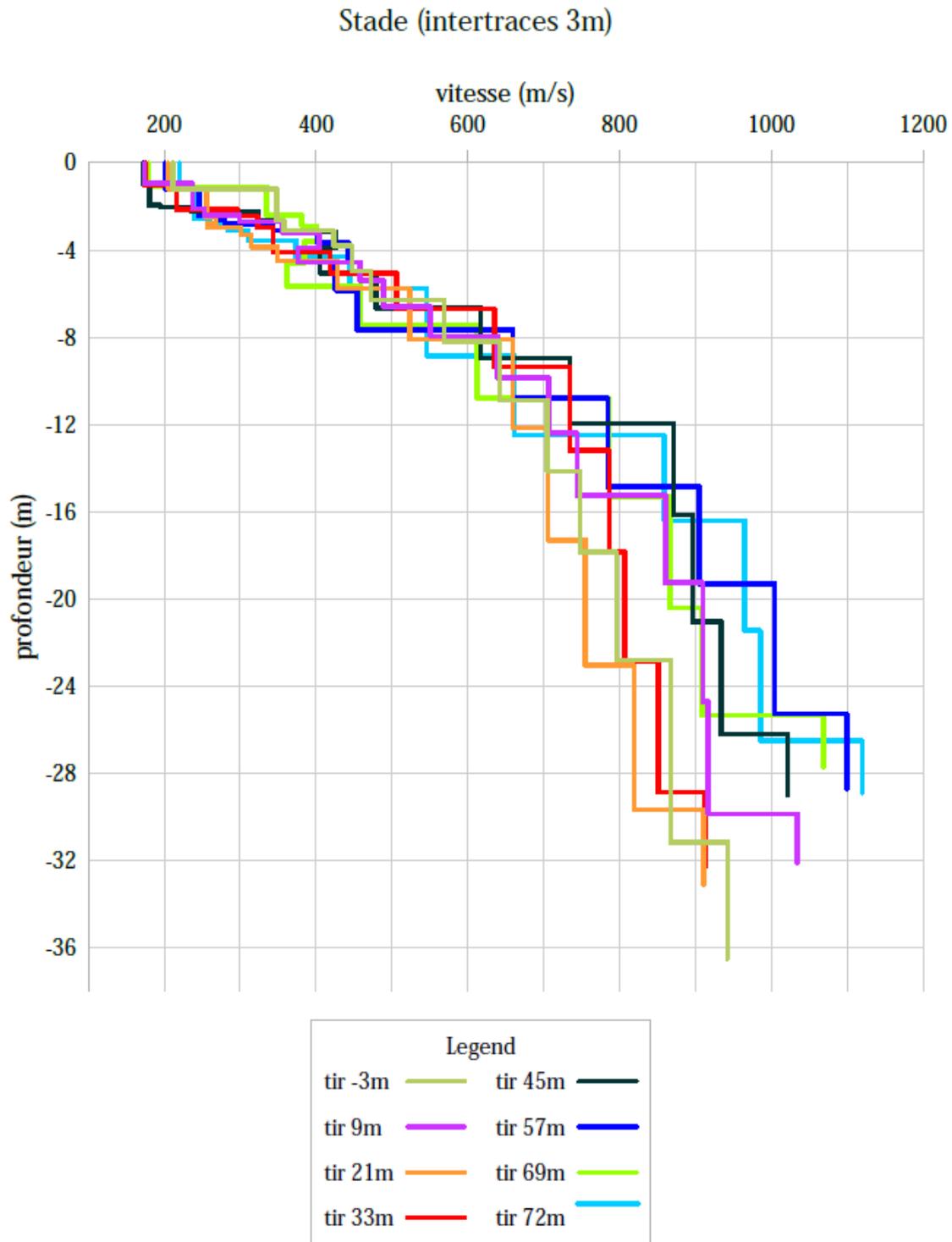


Figure 41 : Profil MASW inversé du Stade Louis Rhein.

Parc Pian (intertraces 3m)

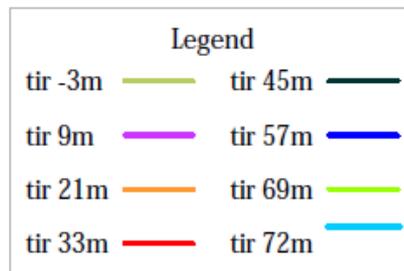
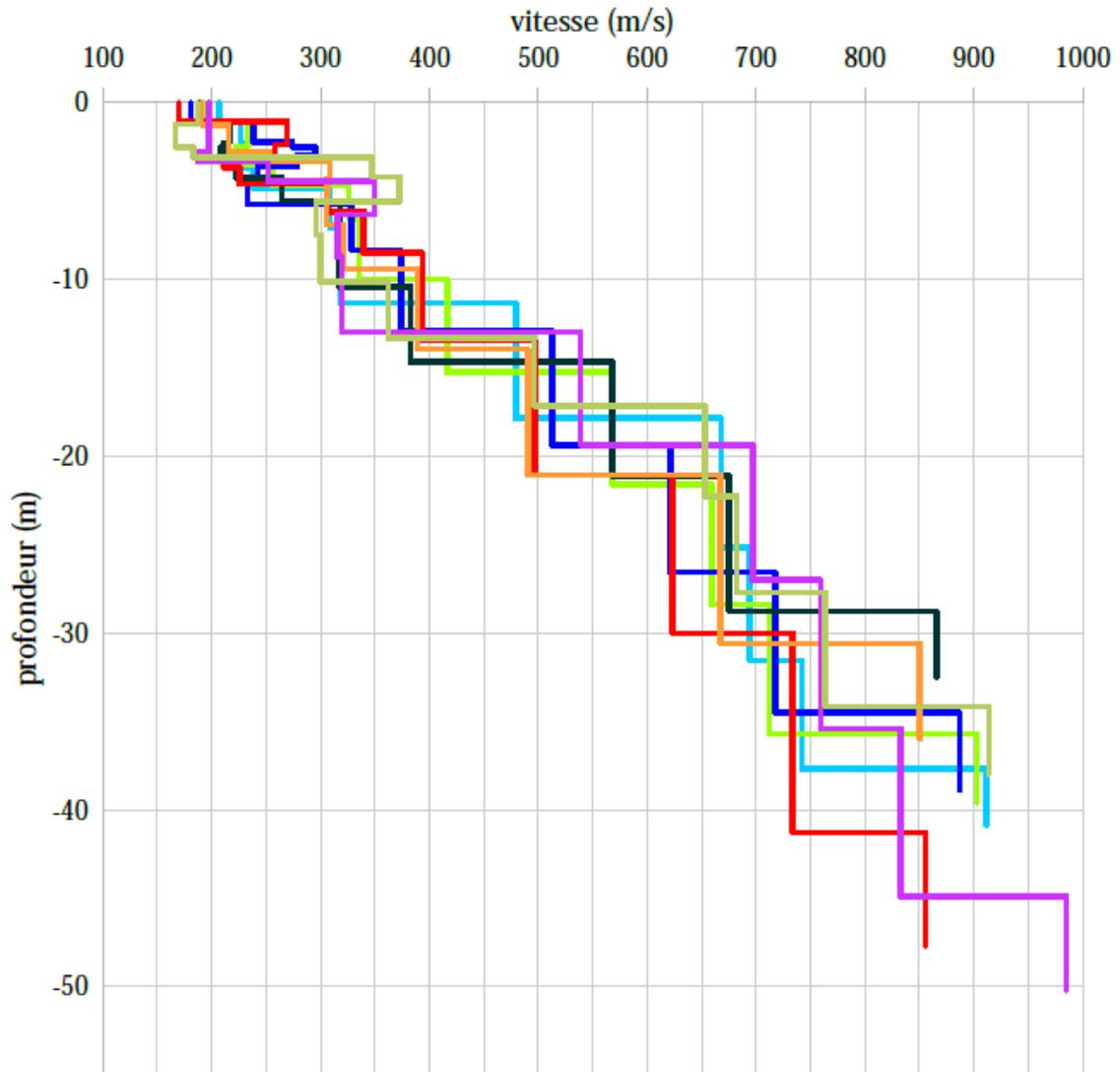


Figure 42 : Profil MASW inversé du Parc du Pian.

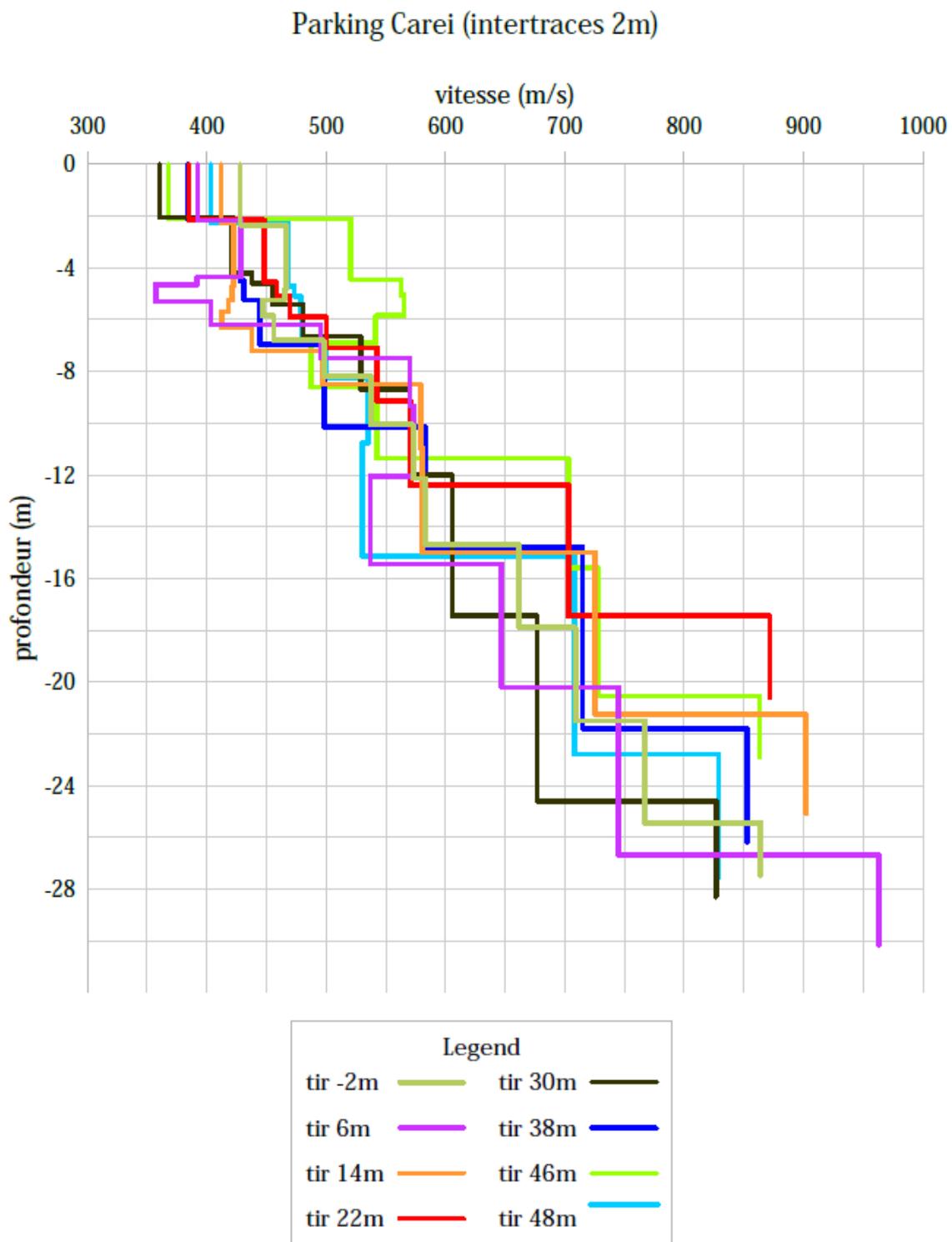


Figure 43 : Profil MASW inversé du Parking de Caréi.

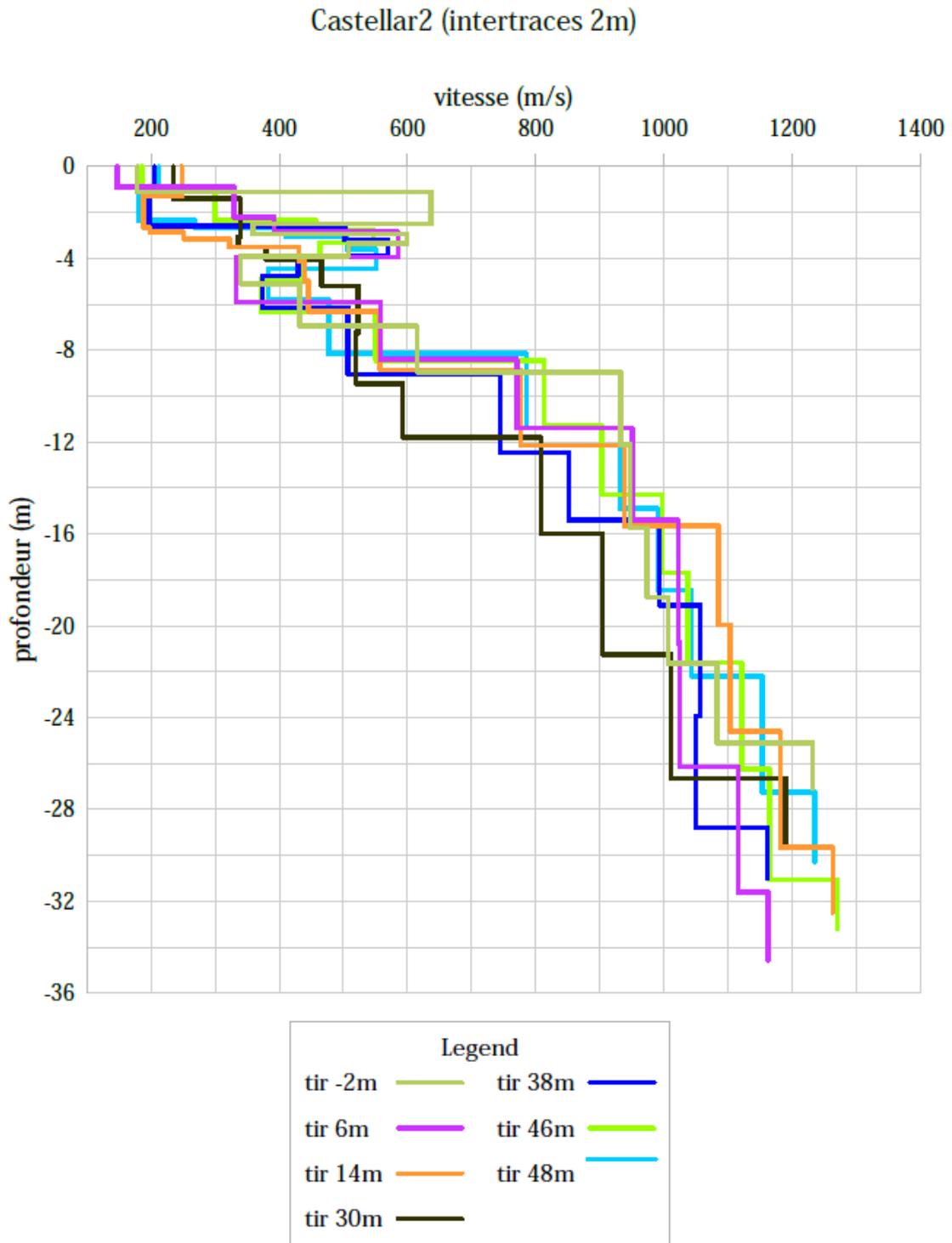


Figure 44 : Profil MASW inversé de Castellar.

### Parc Michel (intertraces 2m)

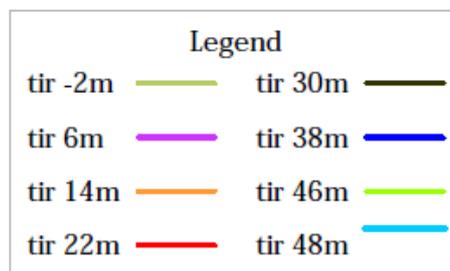
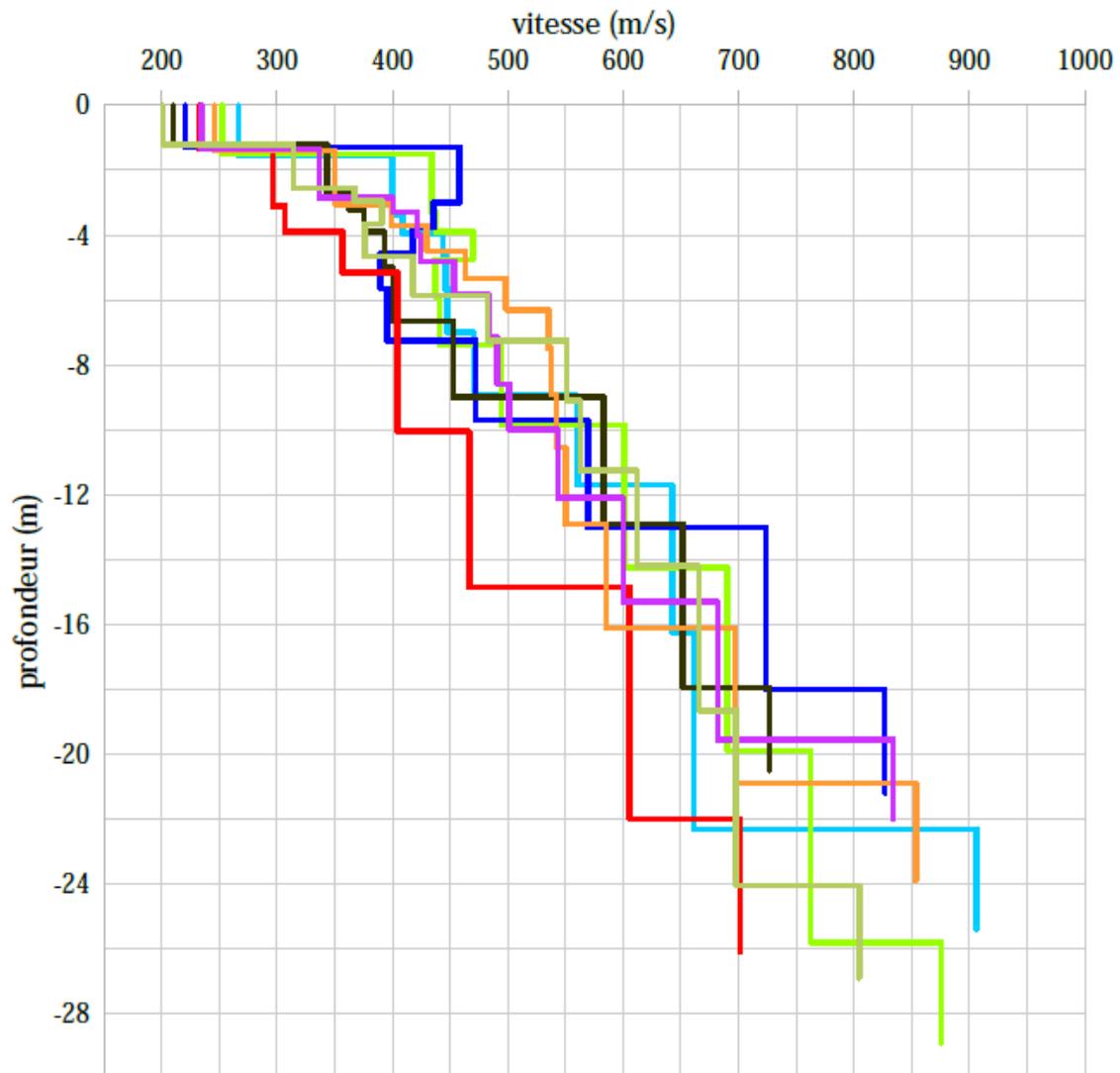


Figure 45 : Profil MASW inversé du Parc Michel.

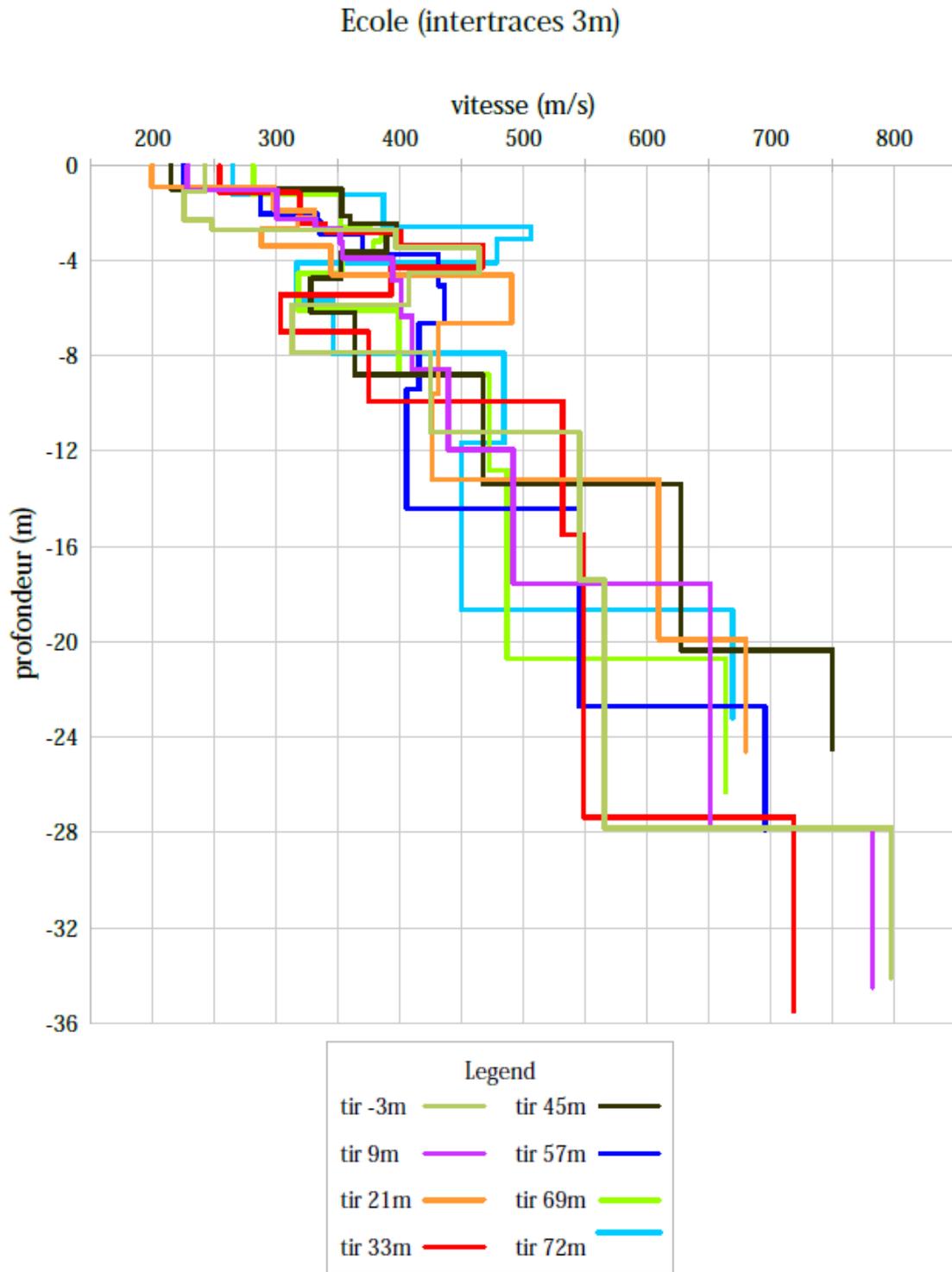


Figure 46 : Profil MASW inversé de l'Ecole primaire d'Anne Frank.

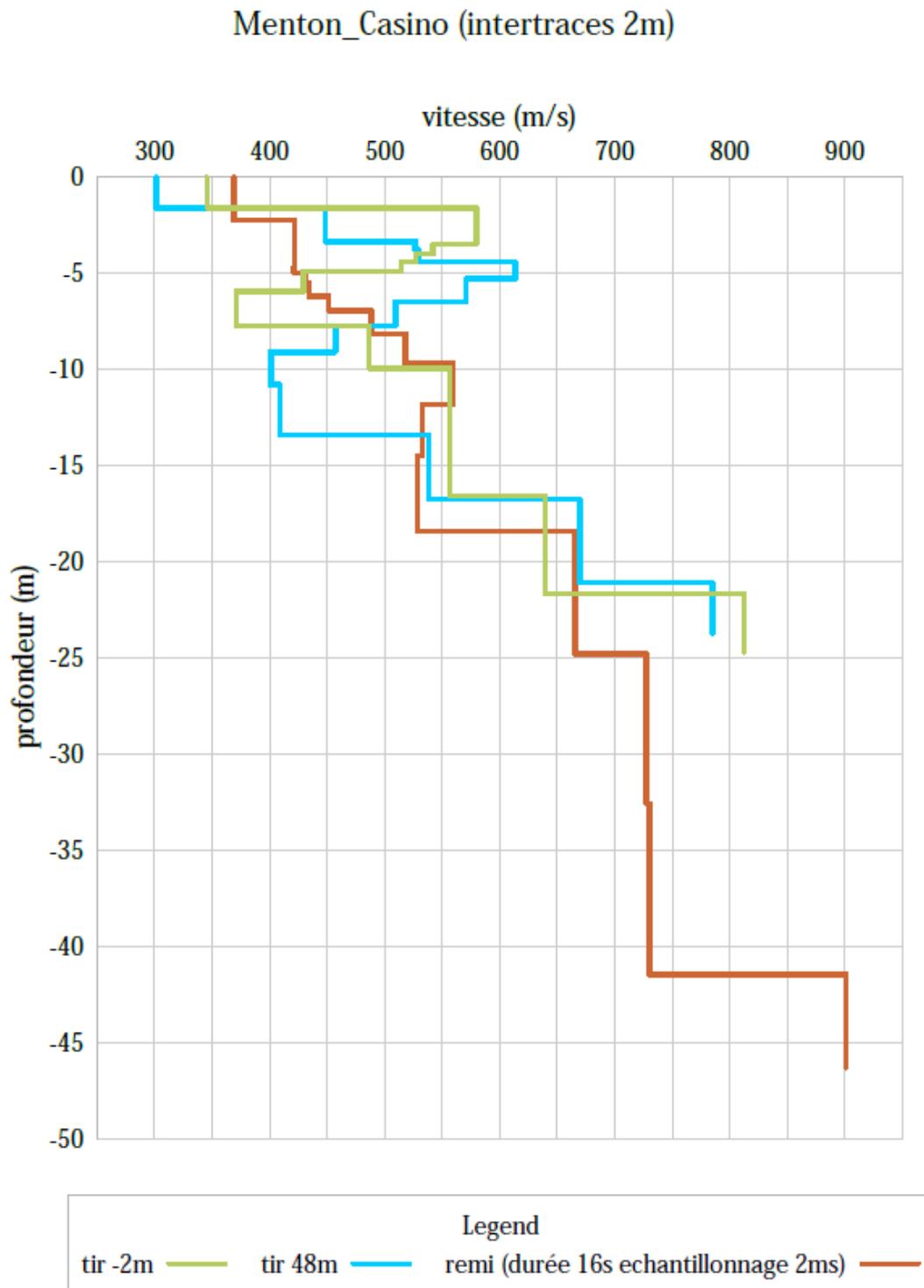


Figure 47 : Profil MASW inversé du Casino.

ID profil	Nom profil	Nom caractéristique	Source	Lat*	Long*	Alt (NMM)	Distance/m
1	Menton_Stade	geophone#1	Ortho	43.783530	7.514297	-	0
		geophone#24		43.783255	7.513531	-	69
2	Menton_parc	parc 2	DGPS	43.78539	7.51281	86.391	0
		parc 24		43.78501	7.513443	80.235	69
3	Menton_parkingcaréi	geophone#1	Ortho	43.790747	7.492124	-	0
		geophone#24		43.790342	7.492238	-	46
4	Menton_Castellar	geophone#1	Ortho	43.809207	7.488488	-	0
		geophone#24		43.808757	7.487897	-	69
5	Menton_Castellar2	castellar1	DGPS	43.809875	7.488786	182.472	0
		castellar24		43.809471	7.488674	180.210	46
6	Menton_ParcMichel	michel 1	DGPS	43.780587	7.497610	175.888	0
		michel 24		43.780199	7.497701	173.266	46
7	menton_ecole	geophone#1	Ortho	43.779213	7.486135	-	0
		geophone#24		43.778621	7.486397	-	69
8	menton_casino menton_remi_1	geophone#1	Ortho	43.774330	7.496752	-	0
		geophone#24		43.774028	7.497142	-	46

Tableau 11 : Récapitulatif des coordonnées géographiques des profils MASW.

\*Latitude et Longitude en WGS84

ID profil	Nom profil	Nom des fichiers brutes	Nom fichiers traités	Remarques
1	Menton_Stade	#1:#8.dat	#1:#8.txt	
2	Menton_parc	#1:#8.dat	#1:#8.txt	
3	Menton_parkingcaréi	#1:#8.dat	#1:#8.txt	
4	Menton_Castellar	#1:#7.dat	Pas d'inversion	Pas de tir #8 car passé au profil Castellar2
5	Menton_Castellar2	#1:#8.dat	#1:#3- #5:#8.txt	4.txt pas d'interprétation du diagramme de dispersion donc pas d'inversion
6	Menton_ParcMichel	#1:#8.dat	#1:#8.txt	
7	menton_ecole	#1:#8.dat	#1:#8.txt	
8	menton_casino	#1-#2.dat	#1-#2.txt	Beaucoup de bruit anthropique cf rémi
8	menton_remi_1	#101#141.dat	remi.txt	fichiers de durée de 16 s et échantillonnage 2 ms

Tableau 12 : Recapitulatif des fichiers brutes et traités des profils MASW.



## **Annexe 3**

### **Mesures de bruit de fond sismique en réseau**



### **a) Principe des mesures de bruit de fond sismologique en réseau**

Le bruit de fond sismologique ambiant est caractérisé pour une large part par des ondes de surface générées selon la fréquence par diverses sources de vibration anthropiques ou naturelles (Bonnefoy et al. 2006). Il est possible de mesurer la vitesse de phase de ces ondes de surface par les méthodes de transformée temps-espace FK et HRFK (Aki 1957, Capon 1969) et les méthodes SPAC et MSPAC (Aki 1957, Bettig et al. 2001) qui utilisent les données acquises par des antennes sismologiques composées de plusieurs sismomètres enregistrant en même temps le champ d'ondes. L'ensemble des antennes forme un réseau qui permettra d'étudier le sous-sol.

Les méthodes FK et HRFK s'appuient sur le décalage et la sommation des signaux enregistrés à chaque station selon un vecteur nombre d'onde test  $\vec{k}$ , afin de voir pour quelle valeur de ce vecteur nous avons une sommation constructive et donc une mesure correcte du nombre d'onde des ondes traversant réellement le réseau. Pour une utilisation optimale, elles supposent donc une source prédominante de bruit sismique dans une direction donnée ou peu de sources dominantes bien séparées en azimut, afin de ne pas mélanger leurs nombres d'onde et donc fausser la mesure.

La méthode MSPAC mesure elle la corrélation spectrale entre les différentes stations ; la méthode de calcul utilisée (voir Aki 1957) implique que les meilleures conditions sont rencontrées lorsque les sources de bruit sont bien distribuées (azimut de 0 à 360°).

Les deux méthodes dans des conditions de bruit inconnues nécessitent par précaution une bonne distribution azimutale, la méthode FK ne nécessitant pas de forme particulière de dispositif tandis que la méthode MSPAC nécessitant des stations disposées en cercle pour simplifier les calculs. Les méthodes sont compatibles entre elles si les stations sont déployées en cercle (avec une station centrale si besoin), et il est donc possible d'implémenter un dispositif sur le terrain et analyser les données acquises par les différentes méthodes ; il est même possible, en analysant les back-azimuts déterminés par la mesure des vecteurs d'ondes par la méthode FK, de déterminer quelle méthode est préférable en fonction de la distribution azimutale d'énergie observée sur le terrain.

Par ailleurs, à chaque antenne va être associé un intervalle de nombre d'onde  $[k_{min} \ k_{max}]$  en-dehors duquel les mesures ne seront plus fiables, ce qui limitera le couple (vitesse de phase, fréquence) mesurable avec un réseau. Il est donc nécessaire pour balayer une large gamme de fréquences d'effectuer plusieurs mesures successives en faisant varier le diamètre des cercles. Ces exigences vont influencer sur la conception des dispositifs réseau de l'étude.

### **b) Contraintes pour les mesures réseau**

- **Taille minimale de l'antenne**

Afin de pouvoir combiner ces données avec celles des mesures MASW qui ont une profondeur de pénétration faible, il est nécessaire d'avoir au moins une antenne dont l'extension latérale est inférieure à 50 mètres. Cette première antenne permet de faire des mesures de vitesse de phase aux mêmes fréquences que celles vues par la méthode MASW, ce qui permet de comparer les mesures obtenues par les différentes méthodes et faire une analyse conjointe.

- **Durée d'acquisition minimale**

Contrairement aux mesures H/V, il n'existe pas encore de guide méthodologique publié précisant les durées d'acquisition minimales en fonction de l'ouverture de l'antenne (définie par la taille caractéristique de l'antenne, ici le rayon du cercle). Cependant, il existe plusieurs cas d'étude (par exemple Okada 2004) qui permettent d'estimer une durée d'acquisition satisfaisante. On peut par ailleurs faire un raisonnement simple similaire au raisonnement adopté pour les mesures H/V sur le nombre de cycles minimal à acquérir : GEOPSY recommande des fenêtres de longueur 200 fois la période maximale mesurable par l'antenne, et il est nécessaire d'acquérir assez de fenêtres afin de pouvoir estimer les écarts des mesures (le retour d'expérience montre que 10 fenêtres sont suffisantes).

**c) Localisation des mesures réseau réalisées par le BRGM à Menton**

Les mesures réseaux ont été réalisées le 17/09/2020 avec des capteurs sismologiques large bande (10s-60 Hz) 3 composantes de modèle Guralp CMG6-TD.

Lat*	Long*	NOM	Remarques
43,774022	7,497141	ME00	SN#T6U66
43,774021	7,497741	MEC2	SN#T6994
43,774315	7,497360	MEC1	SN#T6993
43,773625	7,497428	MEC3	
43,773911	7,496693	MEC4	
43,774152	7,496797	MEC5	
43,776420	7,498860	MEA1	
43,775477	7,494946	MEA5	
43,774924	7,497275	MEB1	
43,774280	7,496038	MEB5	SN#T6U73
43,774226	7,498356	MEB2	
43,774016	7,497127	ME00	
43,773649	7,500277	MEA2	SN#T6U65
43,773200	7,497986	MEB3	
43,772901	7,496391	MEB4	
43,772738	7,494567	MEA4	
43,771850	7,497890	MEA3	SN#T6993

Tableau 13 : Récapitulatif des coordonnées GPS et noms des capteurs pour les mesures réseau.

\* Latitude et Longitude en WGS84

#### d) **Traitement des données réseau**

- **Données et logiciel utilisé**

Les courbes de dispersion issues des mesures MASW et réseau passif sont regroupées par mode de Love et Rayleigh en un ensemble unique de courbes de dispersion. Une des stations utilisées pour les mesures réseau passif est analysée selon la méthode H/V ; si le pic principal H/V est significatif (aux termes du guide SESAME), sa fréquence et l'erreur associée sont incorporées aux données précédentes.

L'algorithme utilisé pour l'inversion est celui de Wathelet et al. (2004) qui combine un tirage aléatoire de premiers modèles couplée avec une recherche par voisinage pour densifier les zones les plus intéressantes de l'espace des paramètres ; cet algorithme est implémenté dans le programme DINVER de la suite logiciel GEOPSY développé Wathelet et al. (2004).

- **Sélection des modèles satisfaisant aux observations**

Chaque modèle généré par DINVER est associé à un misfit, calculé par rapport aux observations. Il existe deux définitions du misfit qui peuvent être choisies dans DINVER (Wathelet 2005) :

$$M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n \frac{(s_i^m - s_i^d)^2}{\sigma_i^2}}$$

$$M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n A_i} \text{ avec } A_i = \begin{cases} 1 & \text{si } (s_i^m - s_i^d)^2 < \sigma_i^2 \\ \frac{(s_i^m - s_i^d)^2}{\sigma_i^2} & \text{si } (s_i^m - s_i^d)^2 > \sigma_i^2 \end{cases}$$

Avec  $n$  le nombre de mesures,  $s_i^m$  la valeur de vitesse donnée par le modèle à la fréquence  $i$ ,  $s_i^d$  la valeur de vitesse observée à la fréquence  $i$ , et  $\sigma_i$  l'erreur de mesure sur l'observation à la fréquence  $i$ . La deuxième définition conduit l'algorithme d'inversion à tenter de faire passer le modèle par toutes les barres d'erreur pour minimiser le misfit, contrairement à la norme L2 de la première définition qui se contente de pénaliser les modèles s'écartant trop des mesures.

Nous procédons donc en deux temps :

- Dans un premier temps, nous utilisons la norme L2 (première définition) afin d'adapter la paramétrisation à partir des données géologiques ;
- Dans le deuxième temps, nous utilisons la deuxième définition pour nous approcher au maximum des observations. Nous sélectionnons ensuite l'ensemble des modèles avec un misfit égal à 1 qui expliquent donc correctement toutes les données observées. Dans le cas où le maximum des misfits ne descend sous 1, ce qui peut arriver dans le cas de mauvais pointés, l'ensemble des courbes correspondant à un misfit inférieur ou égal à une valeur fixe la plus proche possible du misfit minimal est extrait et analysé.

- **Calcul des statistiques associées à l'ensemble des modèles et de Vs30**

A partir de l'ensemble des modèles au misfit définis précédemment, nous calculons :

- Le modèle moyen, qui fait la moyenne des épaisseurs et des vitesses ;
- La déviation standard par rapport au profil moyen pour Vs et pour l'épaisseur de chaque couche.

$V_S^H$  est défini de la manière suivante :

$$V_S^H = \frac{H}{\sum_i \frac{h^i}{V_S^i}}$$

Avec l'indice i identifiant la couche considérée dans la colonne d'épaisseur H,  $h^i$  l'épaisseur de cette couche et  $V_S^i$  la vitesse des ondes de cisaillement associée, soit du meilleur modèle soit du modèle moyen  $V_S^H$ , représente l'inverse de la lenteur moyenne sur la colonne de H mètres ; pour H=30 m, nous avons la définition de Vs30 comme demandé p.10 du cahier des charges.

- **Espace des données pour la procédure d'inversion**

Pour l'inversion, les choix suivants ont été effectués :

- Les mesures ont été ré-échantillonnées en fréquence de manière homogène sur la bande 3 à 20 Hz ;
- Pour analyser les résultats, nous avons considéré que la dispersion pointée sur les tirs actifs de la MASW et les dispositifs A-B et B-C correspondent au mode fondamental de Rayleigh. ;
- Le pic H/V de la station centrale n'a pas été inclus : ce pic est peu marqué avec une incertitude grande, et n'aurait pas apporté d'information intéressante au processus d'inversion.

Deux hypothèses de colonne de vitesse ont été explorées :

- Un milieu tabulaire à trois couches homogènes, avec la dernière couche formant un demi-espace ;
- Un milieu tabulaire à deux couches, une couche supérieure avec un gradient de vitesse linéaire, et un demi-espace homogène représentant le soubassement rocheux.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009

45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

***Direction régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur***

117 av de Luminy  
BP 168

13009 MARSEILLE France

Tél. : 04.91.17.74.77