



# Microzonage sismique de la région du sud du Rhin Supérieur – Synthèse du travail réalisé par le **BRGM**

Rapport final  
**BRGM/RP-53712-FR**  
Août 2007



Programme INTERREG III A  
Rhin Supérieur Centre-Sud  
Oberrhein Mitte-Süd



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# Microzonage sismique de la région du sud du Rhin Supérieur – Synthèse du travail réalisé par le BRGM

Rapport final

**BRGM/RP-53712-FR**  
Août 2007

A. Roullé, A. Bitri, F. Mathieu, G. Richalet

**Vérificateur :**

Nom : P. Dominique

Date :

Signature :

(Ou Original signé par)

**Approbateur :**

Nom : H. Modaresi

Date : 01/10/2007

Signature :

(Ou Original signé par)

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Programme INTERREG III A  
Rhin Supérieur Centre-Sud  
*Oberrhein Mitte-Süd*



**Mots clés** : Fossé Rhéna, risque sismique, microzonage, Mulhouse, Bâle, géophysique, SASW.

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

Roullé A., Bitri A., Mathieu F., Richalet G. (2007) - Microzonage sismique de la région du sud du Rhin Supérieur – Synthèse du travail réalisé par le BRGM. Rapport BRGM/RP-53712-FR.

## Synthèse

Dans le cadre du projet Interreg III intitulé « Microzonage Sismique de la région du sud du Rhin Supérieur », le BRGM a été chargé de participer à l'élaboration d'un microzonage sismique couvrant l'agglomération de Mulhouse et la région des Trois Frontières (Saint Louis, Huningue, Bâle). Ce travail s'est fait en partenariat avec l'IPGS (Institut de Physique du Globe, Université Louis Pasteur, Strasbourg), le LIV (Laboratoire Image et Ville, Université Louis Pasteur, Strasbourg), le GGA-Hanovre (Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben Hannover), le LGRB-Fribourg (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau), le Service Simologique Suisse (ETH-Zürich) et l'Université de Bâle. Ce travail a bénéficié des fonds européens FEDER, suivant la convention n° 3c8. Il a été soutenu par le BRGM dans le cadre de ses activités de recherche (projet SEISMORISK) à hauteur 70%.

Ce rapport a pour but de compiler les données géophysiques et géologiques acquises par le BRGM lors de ce projet et détaille l'analyse suivie pour la réalisation du microzonage sismique de niveau A sur la ville de Mulhouse, ces deux thèmes n'étant pas approfondis dans le rapport final du projet. Il n'a pas pour vocation de présenter l'ensemble des résultats du projet, le rapport final ayant été rédigé par l'institution pilote de l'opération, à savoir l'IPGS (Granet et Boulanger, 2007). Ce rapport présente, dans un premier temps, le microzonage de niveau A (selon le guide méthodologique de réalisation des microzonages sismiques, 1993) réalisé sur l'agglomération mulhousienne suivant les normes parasismiques européennes (EC8) et, dans un deuxième temps, les études géophysiques réalisées sur la région des Trois Frontières.



# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Microzonage sismique de la ville de Mulhouse .....</b>	<b>13</b>
2.1. CONTEXTE.....	13
2.2. DONNÉES GÉOLOGIQUES DISPONIBLES.....	19
2.2.1. Formations superficielles.....	19
2.2.2. Modèle géologique.....	23
2.3. DONNÉES GÉOPHYSIQUES ACQUISES.....	25
2.3.1. Méthodes géophysiques .....	25
2.3.2. Données acquises.....	28
2.4. MICROZONAGE SELON LES RÈGLES PARASISMIQUES EC8 .....	31
2.5. PERSPECTIVES.....	32
<b>3. Etudes géophysiques réalisées dans la région des Trois Frontières (Bâle)....</b>	<b>35</b>
3.1. CONTEXTE.....	35
3.2. GÉOLOGIE .....	36
3.2.1. Formations superficielles.....	36
3.2.2. Modèle géologique.....	38
3.3. GÉOPHYSIQUE.....	42
3.4. ANALYSE DES DONNÉES GÉOPHYSIQUES.....	42
3.4.1. Côté français : microzonage.....	42
3.4.2. Comparaison des différentes méthodes géophysiques : sites pilotes suisses et allemands.....	44
3.5. PERSPECTIVES.....	46
<b>4. Conclusion .....</b>	<b>47</b>
<b>5. Bibliographie .....</b>	<b>49</b>

## Liste des illustrations

Figure 1 : Zone d'étude retenue sur l'agglomération mulhousienne. ....	14
Figure 2 : sismicité de la zone d'étude selon les règles parasismiques en vigueur.....	15
Figure 3 : Microzonage sismique de niveau A selon les règles parasismiques PS92 réalisé par Thierry et Mouroux (2003). ....	17
Figure 4 : géologie de la ville de Mulhouse (Carte géologique n°413 au 1/50 000, « Mulhouse », version vectorisée, BRGM). La légende est présentée sur la Figure 5. ....	21
Figure 5 : légende de la carte géologique présentée sur la Figure 4. ....	22
Figure 6 : Isoques des formations quaternaires superposées à la carte géologique. Les losanges bruns indiquent la position des sondages de la banque du sous-sol utilisés pour la détermination des isopaques et les chiffres indiquent la profondeur atteinte par les sondages.....	24
Figure 7 : Dispositif H/V utilisé par le BRGM à Mayotte (à gauche : la station d'acquisition et à droite : le sismomètre tridimensionnel 5 secondes). ....	26
Figure 8 : Dispositif SASW utilisé à Mayotte (à gauche : « flûte » de géophones, à droite : station d'acquisition). ....	27
Figure 9 : Implantation des mesures géophysiques et des données de la banque du sous-sol utilisées pour le microzonage de l'agglomération mulhousienne. ....	29
Figure 10 : résultats des interprétations des données géophysiques en termes de fréquence de résonance et de $V_{s,30}$ .....	30
Figure 11 : Zonage sismique selon les classifications des sols des règles parasismiques EC8 sur l'agglomération mulhousienne. ....	34
Figure 12 : zone d'étude IPGS-BRGM pour la région des Trois Frontières. ....	35
Figure 13 : géologie de la zone d'étude dans la région des Trois Frontières (cartes géologiques au 1/50 000 n°445 et 476, version vectorisée, BRGM). La légende est présentée sur la Figure 14. ....	37
Figure 14 : légende de la carte géologique présentée en Figure 13.....	38
Figure 15 : Emprise du modèle géologique réalisé par le BRGM (ligne brune) et localisation des sondages BSS (losanges bruns) utilisés pour élaborer ce modèle. Les nombres indiqués en gras et soulignés donnent les profondeurs (en m) atteintes par les sondages. ....	39
Figure 16 : localisation des coupes géologiques présentées sur la Figure 17.....	40
Figure 17 : coupes géologiques de la Figure 16. ....	41
Figure 18 : localisation des profils SASW réalisés par le BRGM et des mesures H/V réalisées par l'IPGS. ....	42
Figure 19 : Interprétation préliminaire des mesures géophysiques H/V (IPGS) et SASW (BRGM) réalisées dans le cadre du microzonage de la région des Trois Frontières. ....	44
Figure 20 : Localisation des profils SASW réalisés à Mulhouse par le BRGM. ....	53
Figure 21 : Interprétation du profil SASW 104. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	55

Figure 22 : Interprétation du profil SASW 107. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	56
Figure 23 : Interprétation du profil SASW 108. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	57
Figure 24 : Interprétation du profil SASW 111. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	58
Figure 25 : Interprétation du profil SASW 116. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	59
Figure 26 : Interprétation du profil SASW 118. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	60
Figure 27 : Interprétation du profil SASW 120. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	61
Figure 28 : Interprétation du profil SASW 123. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	62
Figure 29 : Interprétation du profil SASW 165. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	63
Figure 30 : Interprétation du profil SASW 168. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	64
Figure 31 : Interprétation du profil SASW 170. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	65
Figure 32 : Interprétation du profil SASW 171. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	66
Figure 33 : Interprétation du profil SASW 175. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	67
Figure 34 : Interprétation du profil SASW 178. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	68
Figure 35 : Interprétation du profil SASW 180. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	69
Figure 36 : Interprétation du profil SASW 182. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	70

Figure 37 : Interprétation du profil SASW 189. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	71
Figure 38 : Interprétation du profil SASW 210. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	72
Figure 39 : Interprétation du profil SASW 212. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	73
Figure 40 : Interprétation du profil SASW 216. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	74
Figure 41 : Localisation des profils SASW réalisés par le BRGM dans la région des Trois Frontières.....	75
Figure 42 : Interprétation du profil SASW 143. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	77
Figure 43 : Interprétation du profil SASW 146. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	78
Figure 44 : Interprétation du profil SASW 148. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	79
Figure 45 : Interprétation du profil SASW 152. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	80
Figure 46 : Interprétation du profil SASW 155. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	81
Figure 47 : Interprétation du profil SASW 158. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	82
Figure 48 : Interprétation du profil SASW 161. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	83
Figure 49 : Interprétation du profil SASW 163. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	84
Figure 50 : Interprétation du profil SASW 192. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	85
Figure 51 : Interprétation du profil SASW 191. Haut : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.....	86

Figure 52 : Interprétation du profil SASW 194. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	87
Figure 53 : comparaison des différents profils de Vs obtenus à Otterbach. ....	88
Figure 54 : Interprétation du profil SASW 200. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	89
Figure 55 : Interprétation du profil SASW 202. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	90
Figure 56 : Interprétation du profil SASW 205. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	91
Figure 57 : Interprétation du profil SASW 125. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	92
Figure 58 : Interprétation du profil SASW 128. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	93
Figure 59 : Interprétation du profil SASW 127. Haut : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	94
Figure 60 : comparaison des profils de Vs obtenus à Schutzenmattpark. ....	95
Figure 61 : Interprétation du profil SASW 130. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	96
Figure 62 : les points représentent la courbe de dispersion pointée et les lignes rouges représentent les courbes de dispersion calculées à partir du modèle final. ....	97
Figure 63 : profil de Vs obtenu à partir de l'inversion de la courbe de dispersion du mode fondamental uniquement. ....	97
Figure 64 : Interprétation du profil SASW 134 (inversion du mode fondamental et du premier mode supérieur). Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	98
Figure 65 : comparaison des profils Vs obtenus par inversion du mode fondamental (m0) uniquement et des deux premiers modes (m0 et m1). ....	99
Figure 66 : Interprétation du profil SASW 137. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	100
Figure 67 : Interprétation du profil SASW 142. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion. ....	101

## Liste des annexes

<b>Annexe 1 : Classification des sols selon les EC8.....</b>	<b>51</b>
<b>Annexe 2 : SASW – Mulhouse.....</b>	<b>53</b>
<b>Annexe 3 : SASW – Région des Trois Frontières .....</b>	<b>75</b>

# 1. Introduction

Le Fossé Rhénan Supérieur est considéré comme une zone à sismicité modérée mais reste particulièrement exposée au risque sismique. En 1356, un séisme d'intensité épicentrale IX a partiellement détruit la ville de Bâle. Il est maintenant établi que l'occurrence d'un séisme similaire engendrerait des pertes humaines et économiques importantes du fait notamment de la forte urbanisation de cette zone et de la présence d'effets de site importants tendant à amplifier les mouvements sismiques ressentis sur certaines zones. C'est ce qui a été montré notamment dans le cadre du projet SAFE par le BRGM à travers la réalisation d'un scénario sismique sur la ville de Mulhouse (Marçot et Arnal, 2004) ou le Service Sismologique Suisse sur la ville de Bâle (Opršal et al., 2005).

Il a donc été jugé prioritaire de réaliser un microzonage sismique couvrant l'ensemble du Fossé Rhénan Supérieur, depuis l'agglomération mulhousienne jusqu'à la ville de Bâle, avec pour objectif de tendre vers une harmonisation du microzonage sur les trois pays concernés (Suisse, Allemagne et France). C'est l'objectif du projet Interreg III mené en collaboration avec l'IPGS (Institut de Physique du Globe, Université Louis Pasteur, Strasbourg), le LIV (Laboratoire Image et Ville, Université Louis Pasteur, Strasbourg), le GGA-Hanovre (Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben Hannover), le LGRB-Fribourg (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau), le Service Simologique Suisse (ETH-Zürich) et l'Université de Bâle.

Ce rapport détaille les activités du BRGM réalisées dans le cadre du projet Interreg III à la fin du projet, en juin 2006, et complète les informations disponibles dans le rapport d'activité final du projet (Granet et Boulanger, 2007). L'étude s'est concentrée sur deux zones jugées prioritaires : l'agglomération mulhousienne et la région dite « des Trois Frontières » autour de Bâle. Elle a consisté pour le BRGM à participer à la réalisation et l'interprétation de données géophysiques (SASW et H/V) pour cartographier les effets de site géologiques, le but de ce projet restant la réalisation d'un microzonage sismique de niveau A (le plus sommaire) selon le guide méthodologique AFPS (1993) sur les deux zones concernées. A la fin du projet, ce microzonage a été finalisé sur l'agglomération mulhousienne mais reste à faire sur le sud de la zone d'étude, à savoir la région des Trois Frontières notamment en raison de problèmes d'harmonisation des normes parasismiques sur les trois pays frontaliers concernés (France, Allemagne et Suisse). Le rapport présente les étapes de réalisation du microzonage sur l'agglomération de Mulhouse et l'avancée des travaux géophysiques réalisés sur la région des Trois Frontières en collaboration avec l'ETH-Zürich et le GGA-Hanovre.

Ce travail a bénéficié des fonds européens FEDER, suivant la convention n° 3c8. Il a été soutenu par le BRGM dans le cadre de ses activités de recherche (projet SEISMORISK) à hauteur de 70%.



## 2. Microzonage sismique de la ville de Mulhouse

### 2.1. CONTEXTE

La première zone d'étude de ce projet Interreg (Figure 1) couvre une grande partie de l'agglomération mulhousienne. Cette zone urbaine, située en zones de sismicité Ib et II selon le décret n° 91-461 du 14 mai 1991 (Figure 2), est densément peuplée et présente de forts enjeux en termes de vulnérabilité. Elle a été utilisée ici comme zone pilote pour la réalisation d'un SIG par le LIV (Laboratoire Image et Ville, Strasbourg), ce SIG devant permettre l'intégration du risque technologique, du risque sismique et de l'urbanisation avec pour objectif final la réalisation d'outils d'aide à la décision pour les aménageurs et les intervenants en cas de crise. C'est dans ce cadre que s'est réalisé le microzonage sismique de la ville de Mulhouse en partenariat avec l'IPGS (Institut de Physique du Globe, Strasbourg).

Lors de ce projet, il était initialement prévu de créer un modèle géotechnique 3D permettant de calculer numériquement, en chaque point de la maille du modèle, les effets de site géologique et donc de réaliser un microzonage de niveau B ou C. Il a été décidé en comité de pilotage d'abandonner cet objectif (réunions du 6 mai 2004 et du 17 janvier 2005). Il a alors été demandé au BRGM de se concentrer sur la région des Trois Frontières afin de comparer l'interprétation des données provenant de profils SASW avec les résultats obtenus à Bâle, Weil et Lörrach par les partenaires allemands et suisses.

Nous avons donc réalisé, pour la région de Mulhouse, un microzonage sismique de niveau A basé sur la définition des colonnes de sol des normes parasismiques EC8 ou Eurocode 8 (2005).

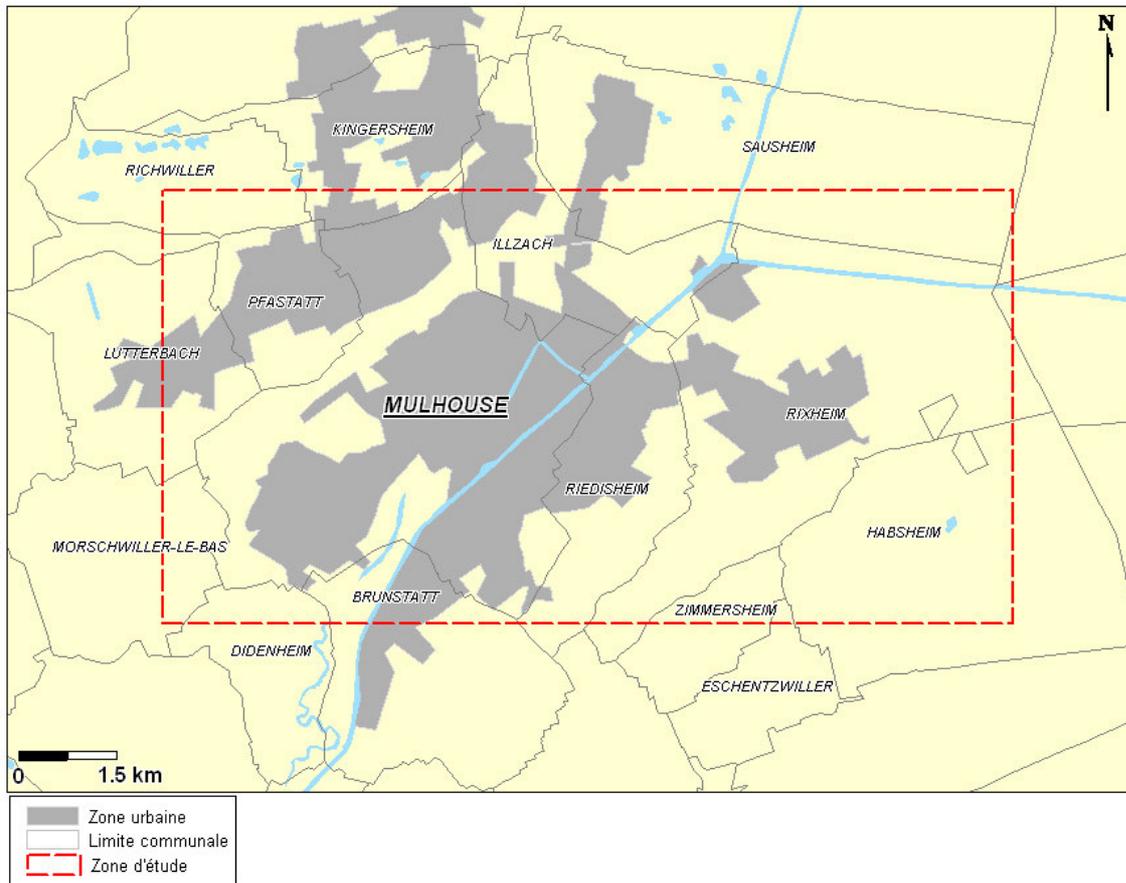


Figure 1 : Zone d'étude retenue sur l'agglomération mulhousienne.

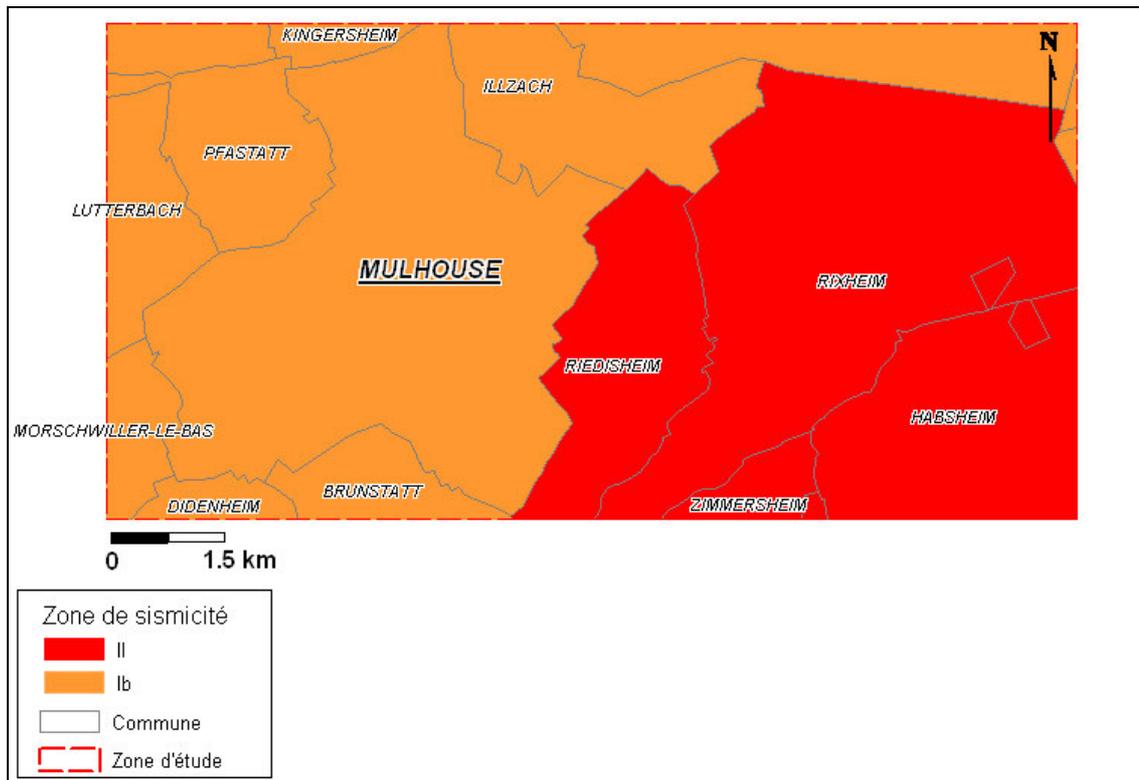


Figure 2 : sismicité de la zone d'étude selon les règles parasismiques en vigueur.

Dans le cadre du projet européen SAFE, une méthodologie de réalisation d'un scénario sismique sur la ville de Mulhouse a été présentée en 2004 (Marçot et Arnal, 2004). Ce travail a nécessité la réalisation préalable d'un modèle géologique 3D et d'un microzonage de niveau A sur l'agglomération mulhousienne (Thierry et Mouroux, 2003), c'est-à-dire le microzonage le plus sommaire selon le guide méthodologique de réalisation des microzonages sismiques (1993). Ces travaux sont repris dans ce rapport. Le microzonage sismique décrit dans le rapport de Mouroux et Thierry (2003) a été obtenu en utilisant les classifications des sols données par les règles parasismiques PS92 actuellement en vigueur (Figure 3).



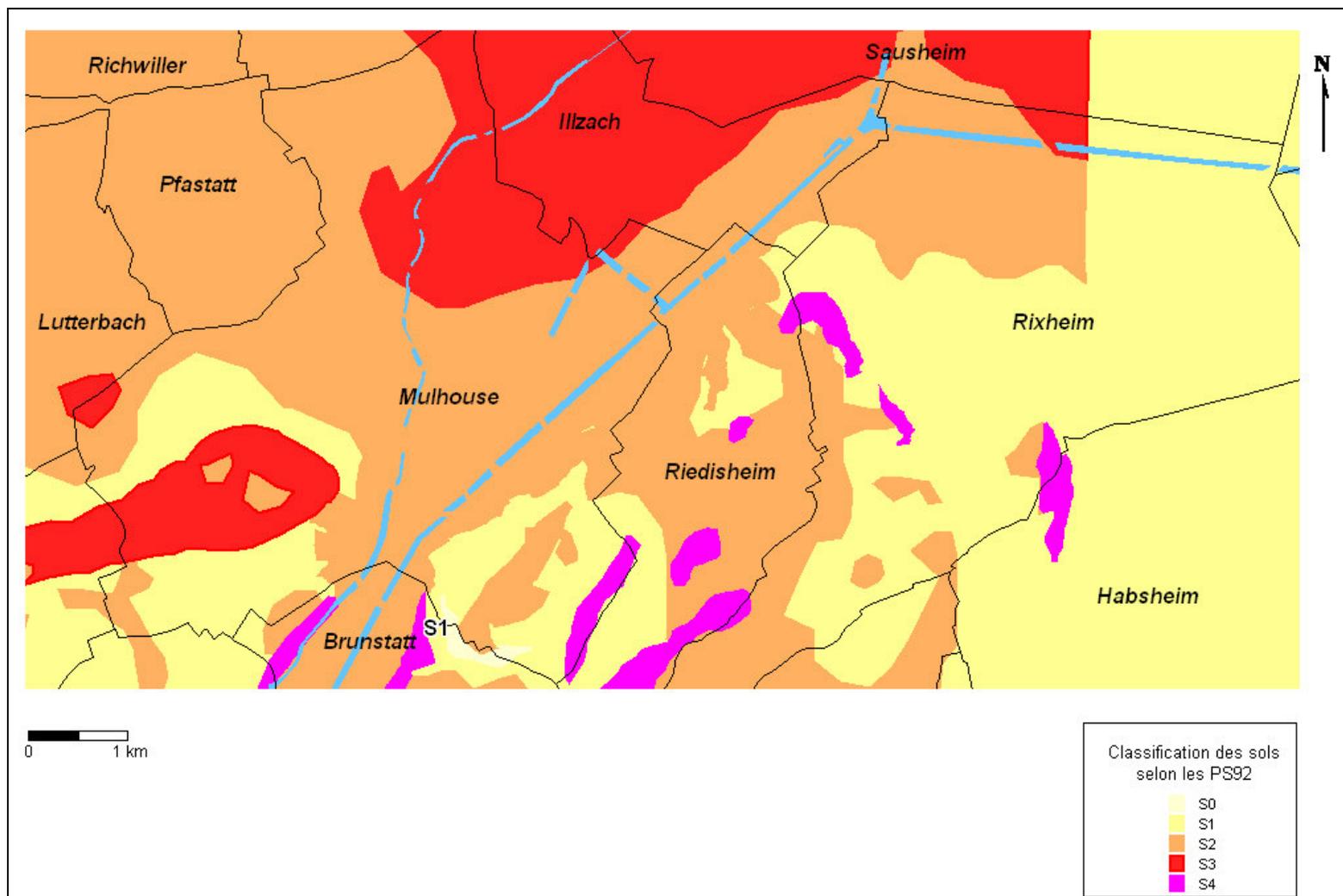


Figure 3 : Microzonage sismique de niveau A selon les règles parasismiques PS92 (Thierry et Mouroux, 2003).



Un changement de réglementation parasismique prévu en 2007, remplacera à terme les règles PS92 (AFNOR, 1995) par les règles européennes EuroCode8 (2005). Il a donc été décidé, dans une première étape de ce projet, de refaire un microzonage sismique, toujours de niveau A, sur la ville de Mulhouse en suivant cette fois-ci les futures règles EC8.

## **2.2. DONNÉES GÉOLOGIQUES DISPONIBLES**

### **2.2.1. Formations superficielles**

L'étude des données géologiques réalisée dans le cadre de ce projet est basée sur la carte géologique vectorisée au 1/50 000 (Figure 4). L'harmonisation des dalles géologiques adjacentes est en cours et n'était pas disponible avant la fin du projet. Nous avons donc utilisé la carte vectorisée non harmonisée pour ce projet.

Les caractéristiques des différentes formations superficielles identifiées sur le bassin de Mulhouse sont décrites dans le rapport Thierry et Mouroux (2003). On ne reprend dans ce rapport que les points principaux de cette description.

Les formations superficielles principales sont les suivantes :

- Remblais : d'épaisseur maximale au centre ville de Mulhouse (jusqu'à 9 m), ces terrains présentent des caractéristiques mécaniques variables, le plus souvent médiocres (La pression limite PI varie de 0.4 à 0.5 MPa).
- Limons de débordement et loess colluvionnés : ces sols présentent des caractéristiques mécaniques similaires, le plus souvent médiocres (PI de 0.3 à 0.8 MPa), et sont difficiles à séparer. Leur épaisseur peut dépasser la dizaine de mètres.
- Alluvions anciennes et modernes : elles présentent des caractéristiques mécaniques bonnes mais assez hétérogènes spatialement (PI=1.5 à 6 MPa). Elles peuvent atteindre 50 m d'épaisseur pour les alluvions modernes et jusqu'à 110 m d'épaisseur pour les alluvions anciennes.
- Loess et lehms récents ou anciens : ces terrains tapissent les reliefs du Sundgau. Ils présentent des caractéristiques variables mais le plus souvent médiocres avec une valeur moyenne de PI proche de 0.6 MPa. Ils peuvent atteindre 20 m d'épaisseur.
- Calcaires et marnes éocènes et oligocènes (substratum de bonne résistance mécanique).



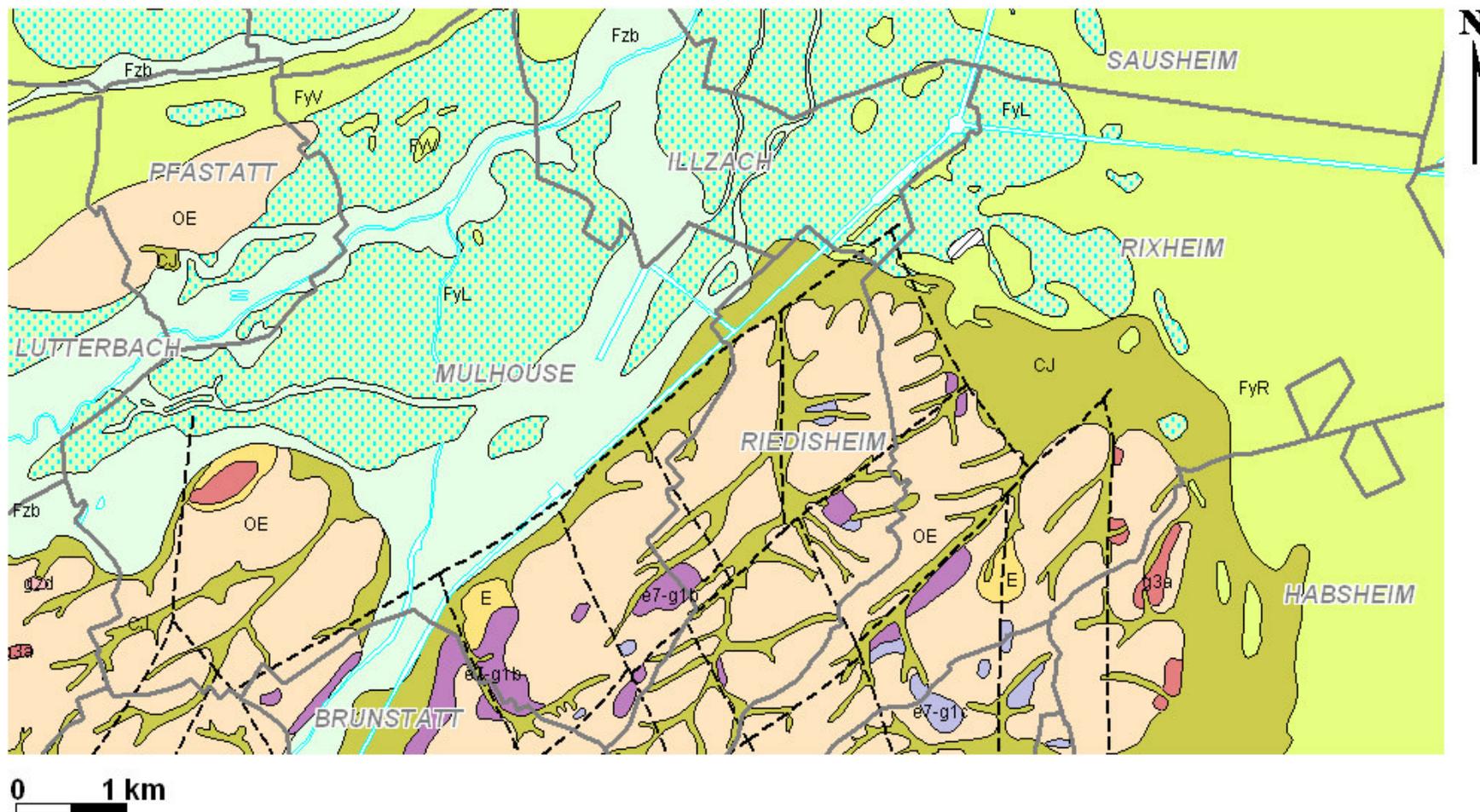


Figure 4 : géologie de la ville de Mulhouse (Carte géologique n°413 au 1/50 000, « Mulhouse », version vectorisée, BRGM, 2005). La légende est présentée sur la Figure 5.

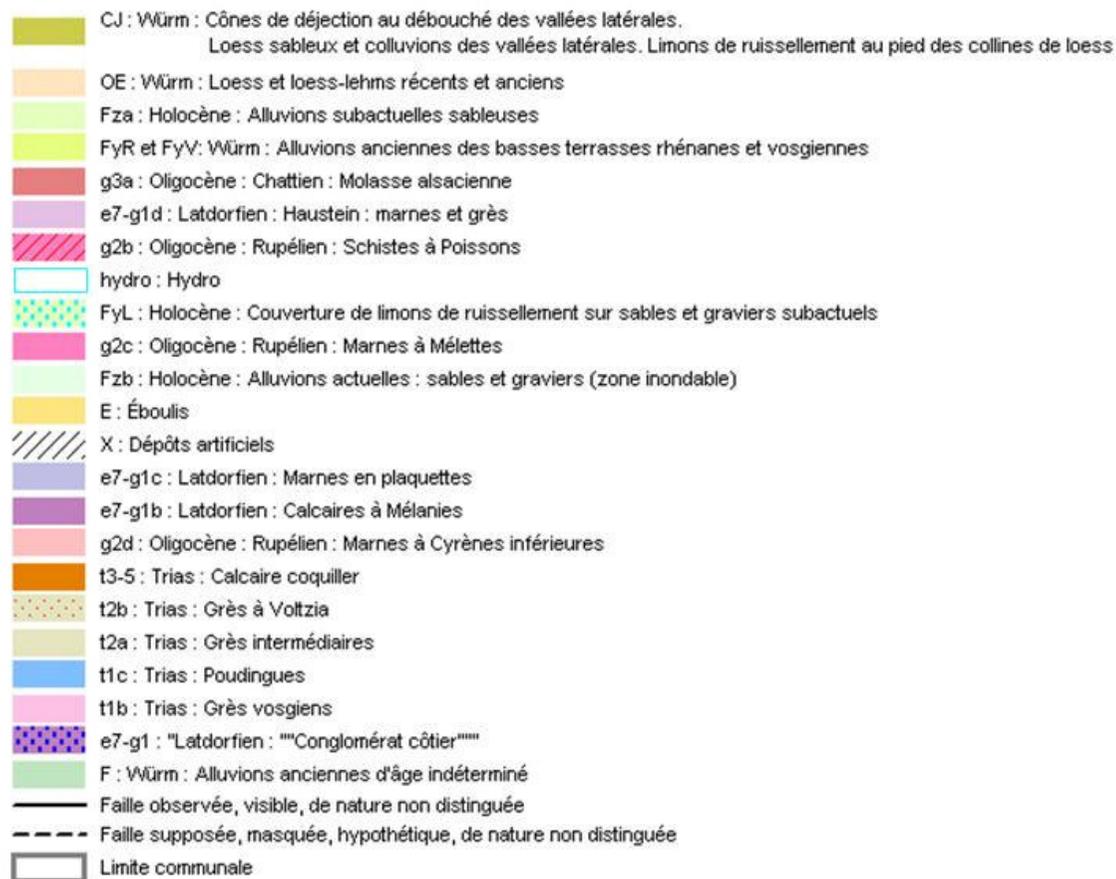


Figure 5 : légende de la carte géologique présentée sur la Figure 4.

### **2.2.2. Modèle géologique**

Un modèle géologique 3D du bassin mulhousien a été construit par Thierry et Mouroux (2003) à partir de la banque de données du sous-sol (BSS) disponible au BRGM. Les sondages utilisés pour la réalisation de ce modèle sont indiqués sur la Figure 6. Ce modèle a permis d'évaluer les courbes isopaques des formations Quaternaire sur la zone d'étude. Cette information a été utilisée par la suite pour la définition des zones sismiques homogènes.

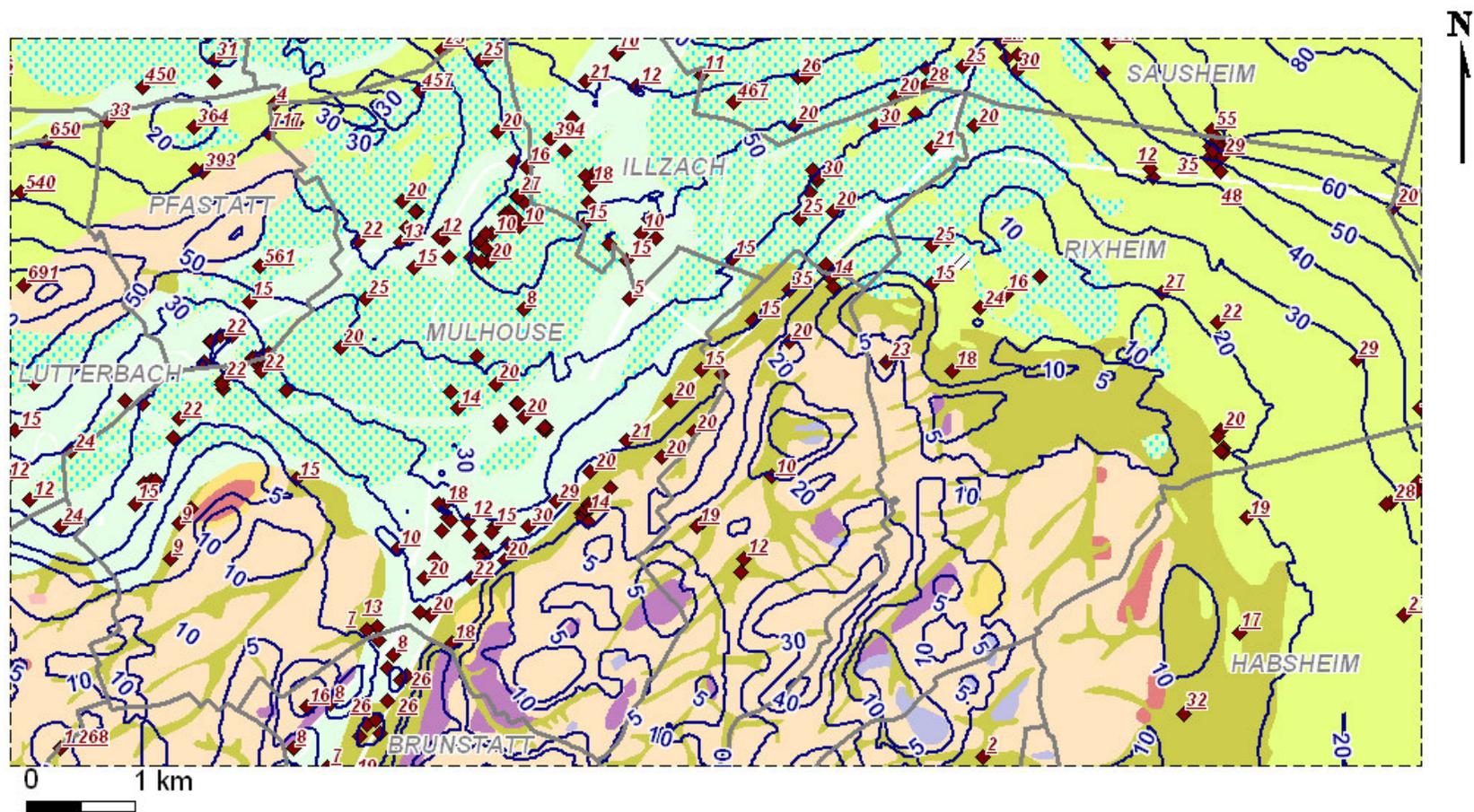


Figure 6 : Isopaques des formations quaternaires superposées à la carte géologique de la Figure 4. Les losanges bruns indiquent la position des sondages de la banque du sous-sol utilisés pour la détermination des isopaques et les chiffres indiquent la profondeur atteinte par les sondages (Source des données : BSS).

## 2.3. DONNÉES GÉOPHYSIQUES ACQUISES

### 2.3.1. Méthodes géophysiques

Pour la caractérisation des effets de site lithologiques, il est nécessaire de connaître en particulier l'épaisseur et la vitesse des ondes de cisaillement  $V_s$  des couches superficielles. Pour cela, deux méthodes géophysiques complémentaires sont utilisées :

- La méthode des rapports spectraux H/V qui permet de déterminer la fréquence de résonance du site (liée à l'épaisseur et à la vitesse  $V_s$  de la couche superficielle responsable de la résonance) à partir d'enregistrements tridimensionnels du bruit de fond sismique,
- La méthode SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), qui permet de déterminer le profil de vitesse  $V_s$  en fonction de la profondeur en un site donné.

Le principe de ces deux méthodes est brièvement décrit ci-dessous.

#### ***La méthode H/V***

De nombreuses techniques théoriques, numériques ou instrumentales ont été développées pour estimer les effets de site lithologiques (Sabourault, 1999). 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. 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 (Nogoshi, 1971, Nakamura, 1989 et 1996). Le dispositif expérimental est constitué d'un sismomètre trois composantes et d'une station d'acquisition (Figure 7).



Figure 7 : Dispositif H/V utilisé par le BRGM à Mayotte (à gauche : la station d'acquisition et à droite : le sismomètre tridimensionnel 5 secondes).

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. 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), mais également une amplification spectrale relative qui dépend notamment du mode de traitement du signal. Les différentes amplifications relatives peuvent être comparées entre elles à condition d'avoir été établies avec les mêmes traitements.

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.

La connaissance de deux paramètres permet donc d'estimer le troisième :  $V_s$  et  $f_0$  connues donnent  $H$  par exemple (Sabourault et Bitri, 2001).

### **La méthode SASW**

Cette méthode est basée sur la dispersion des ondes de surface pour la détermination des vitesses des ondes de cisaillement  $V_s$  dans les premières dizaines de mètres du sous sol (Bitri *et al.*, 1997). Elle permet d'obtenir un 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 ou de microzonage sismique.

Le matériel nécessaire pour effectuer des mesures sismiques des ondes de surface est composé d'une centrale d'acquisition sismique, de géophones (Figure 8) et d'une source impulsionnelle (ici une chute de marteau).



Figure 8 : Dispositif SASW utilisé à Mayotte (à gauche : « flûte » de géophones, à droite : station d'acquisition).

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.

### 2.3.2. Données acquises

En complément des données du sous-sol, des campagnes géophysiques comprenant 18 profils SASW et 565 points H/V ont été réalisées respectivement par le BGRM et l'IPGS. La localisation des points de mesure et des profils est indiquée sur la Figure 9. Concernant les mesures H/V, un maillage lâche a été effectué sur l'ensemble de la zone d'étude et un maillage plus fin a été réalisé sur quelques zones à forts enjeux, à savoir : la zone industrielle au Nord-Est, la caserne de pompiers au centre, la gare de marchandise et l'usine chimique à l'Ouest, le réservoir d'eau potable et l'hôpital au Sud. L'interprétation conjointe de ces données conduit aux valeurs de fréquence de résonance et de vitesse des ondes de cisaillement S sur les 30 premiers mètres (paramètre  $V_{S,30}$ <sup>1</sup> des EC8) représentées sur la Figure 10.

---


$${}^1 V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_i}} \text{ où } h_i \text{ est l'épaisseur de la couche } i, V_i \text{ la vitesse des ondes S dans la couche } i \text{ et } N$$

le nombre de couches apparaissant dans les 30 premiers mètres.

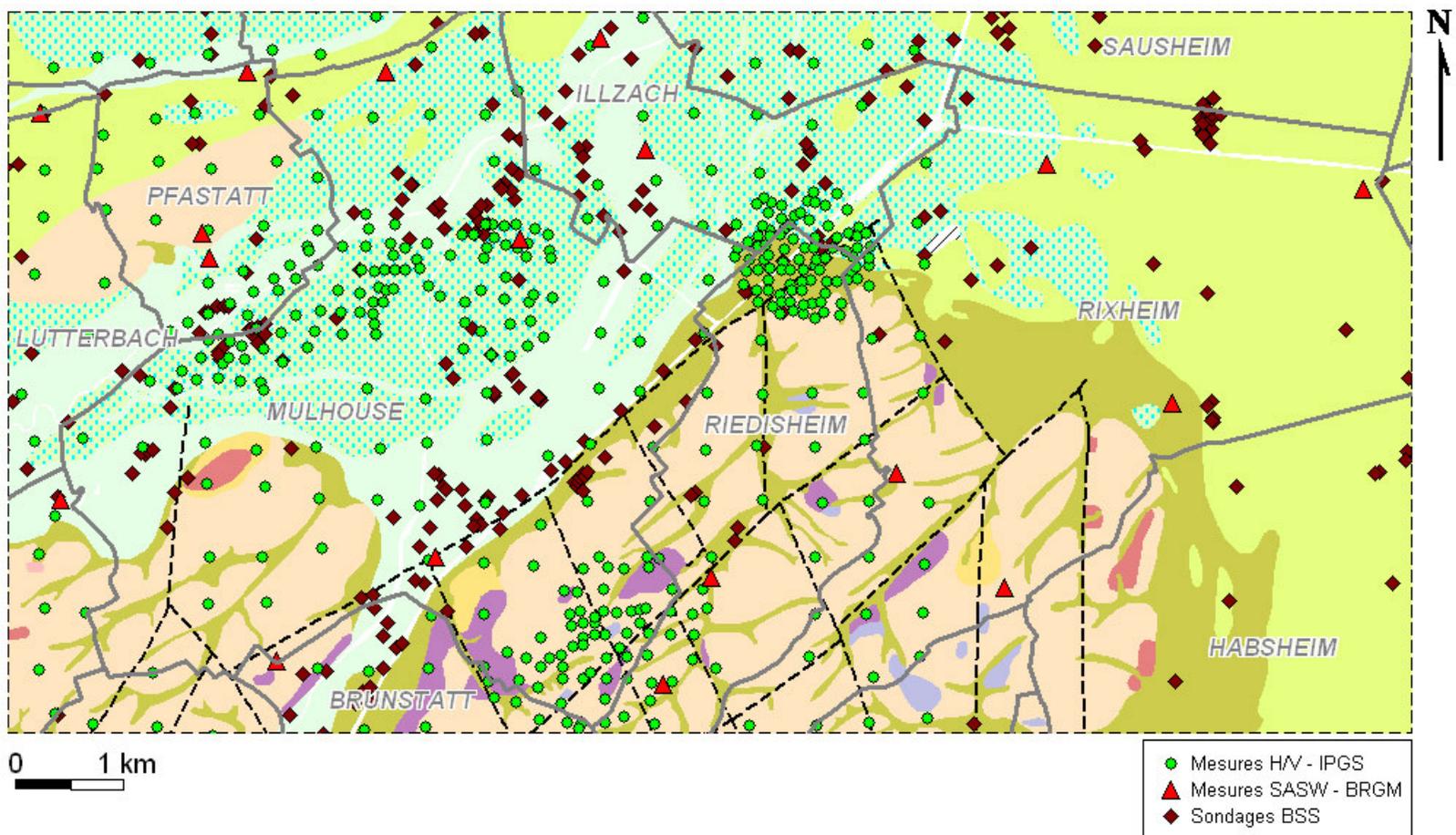


Figure 9 : Implantations des mesures géophysiques et des données de la banque du sous-sol superposées à la géologie de l'agglomération mulhousienne.

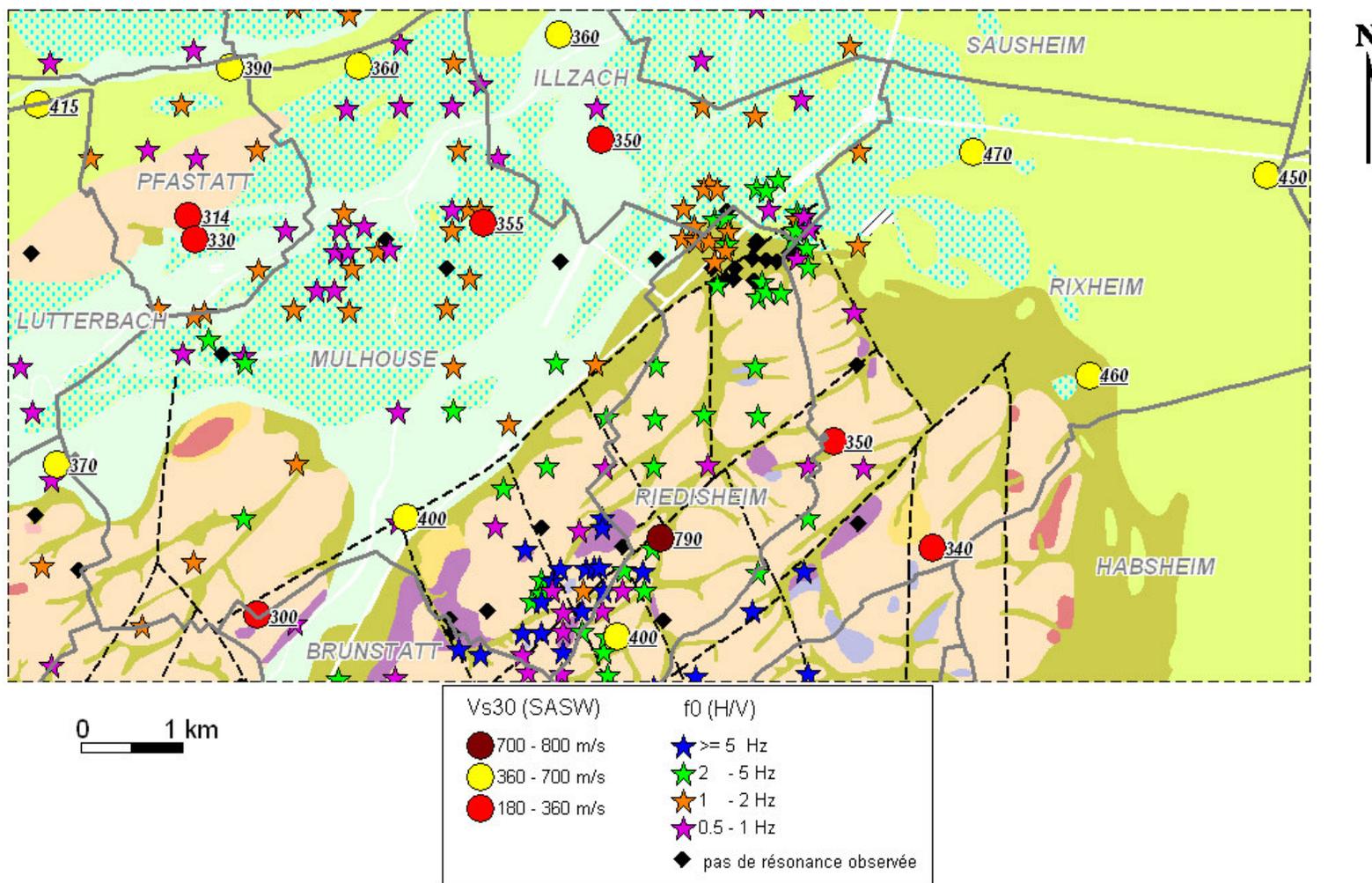


Figure 10 : résultats des interprétations des données géophysiques en termes de fréquence de résonance et de  $V_{s,30}$  superposées à la géologie de l'agglomération mulhousienne.

## 2.4. MICROZONAGE SELON LES RÈGLES PARASISMIQUES EC8

Après interprétation des données géophysiques, un zonage de niveau A a été réalisé sur l'agglomération mulhousienne en suivant les critères de classification des sols selon les règles parasismiques européennes EC8 (voir annexe 1 et Figure 11). Pour cela, nous avons combiné les informations suivantes :

- Géologie superficielle (carte géologique numérisée et données de la banque du sous-sol)
- Épaisseur des formations Quaternaire (modèle géologique 3D réalisé par Thierry et Mouroux, 2003)
- Fréquences de résonance (interprétation des mesures H/V de l'IPGS)
- Vitesse moyenne des ondes S dans les 30 premiers mètres  $V_{S,30}$  (interprétations des mesures SASW du BRGM)

Cela nous a permis de définir des zones ayant des caractéristiques géotechniques homogènes et, par conséquent, des réponses sismiques homogènes et de les classer selon les règles EC8. Ces zones sont les suivantes :

### ***Classe A : Rocher***

Il s'agit des zones identifiées comme affleurements du substratum (Oligocène) sur la carte géologique.

Le modèle géologique 3D a été utilisé en complément pour étendre ces zones, en retenant les points avec une couverture sur le substratum inférieure ou égale à 4 m, conformément à la classification des sols de l'EC8.

### ***Classe B : Alluvions du Rhin à l'est et des Vosges au nord-ouest***

Il s'agit d'alluvions sous forme de graviers, graves, sables, et plus localement lentilles argileuses.

Ces sols présentent des caractéristiques mécaniques bonnes à très bonnes ( $V_{S,30}$  supérieur à 450 m/s) et se caractérisent par une forte épaisseur de matériaux. La sélection s'est faite sur des formations de plus de 20 m d'épaisseur, pouvant aller jusqu'à une centaine de mètres d'épaisseur, avec des caractéristiques mécaniques qui augmentent avec la profondeur.

### **Classe C : Alluvions de l'III (centre de la zone d'étude)**

Il s'agit d'une forte épaisseur d'alluvions (de 40 à plus de 80 m d'épaisseur) moins raides que les alluvions du Rhin, caractérisée par la présence d'alluvions et de limons plus récents. Son paramètre  $V_{s,30}$  est de l'ordre de 350 m/s.

### **Classe D : Loess en forte épaisseur**

Il s'agit des zones identifiées comme présentant des épaisseurs importantes de loess et de limons (plus de 25 m), se situant dans les collines sud, ainsi que sur la colline de Pfastatt.

Ces zones ont été classées dans la classe D malgré des valeurs de  $V_{s,30}$  mesurées supérieures à 300 m/s (normalement  $V_{s,30} < 180$  m/s pour la classe D). Ce choix, proposé par le BRGM, est délibéré : d'une part, les profils SASW réalisés sur cette formation particulière présentent une forte hétérogénéité spatiale avec des vitesses  $V_s$  pouvant descendre jusqu'à 200 m/s (voir les profils 120 et 189 en annexe 2). D'autre part, ce classement permet en effet de les distinguer des alluvions de l'III classés en classe C car les loess présentent des caractéristiques mécaniques moindres. Pour valider leur classification, il serait nécessaire de connaître leurs propriétés mécaniques par la réalisation d'essais géotechniques et de laboratoire complémentaires.

### **Classe E : Loess**

Dans cette classe sont considérés les loess et limons superficiels (5 à 20 m d'épaisseur) reposant directement sur le substratum. Cela représente une grande partie des collines sud. Le paramètre  $V_{s,30}$  mesuré pour cette zone est de l'ordre de 350 m/s.

## **2.5. PERSPECTIVES**

La base de données géophysiques (H/V et SASW) récoltée lors de ce projet et actuellement sous-exploitée devrait permettre de réaliser un microzonage d'ordre supérieur (niveau B à C) sur l'agglomération mulhousienne moyennant l'obtention de données géotechniques complémentaires pour caractériser les formations superficielles. D'autres profils géophysiques de SASW devraient aussi être envisagés pour mieux contraindre la variation spatiale des caractéristiques de ces formations, apparemment très hétérogènes. Les formations superficielles loessiques devront également être examinées avec attention en raison de leur potentialité de liquéfaction. Une fois toutes ces données récoltées et analysées, il devrait être possible de définir des zones géotechniques plus précises caractérisées par une colonne de sol type, l'objectif étant alors de réaliser une simulation numérique 1D des effets de site afin de définir des spectres de réponse spécifiques à chaque zone.

Étant donné la structure complexe du bassin mulhousien, l'élaboration d'un modèle géologique 2D ou 3D devra également être envisagée afin de prendre en compte des

effets de propagation éventuels qui pourraient influencer de façon importante sur les niveaux d'accélération ressentis à Mulhouse.

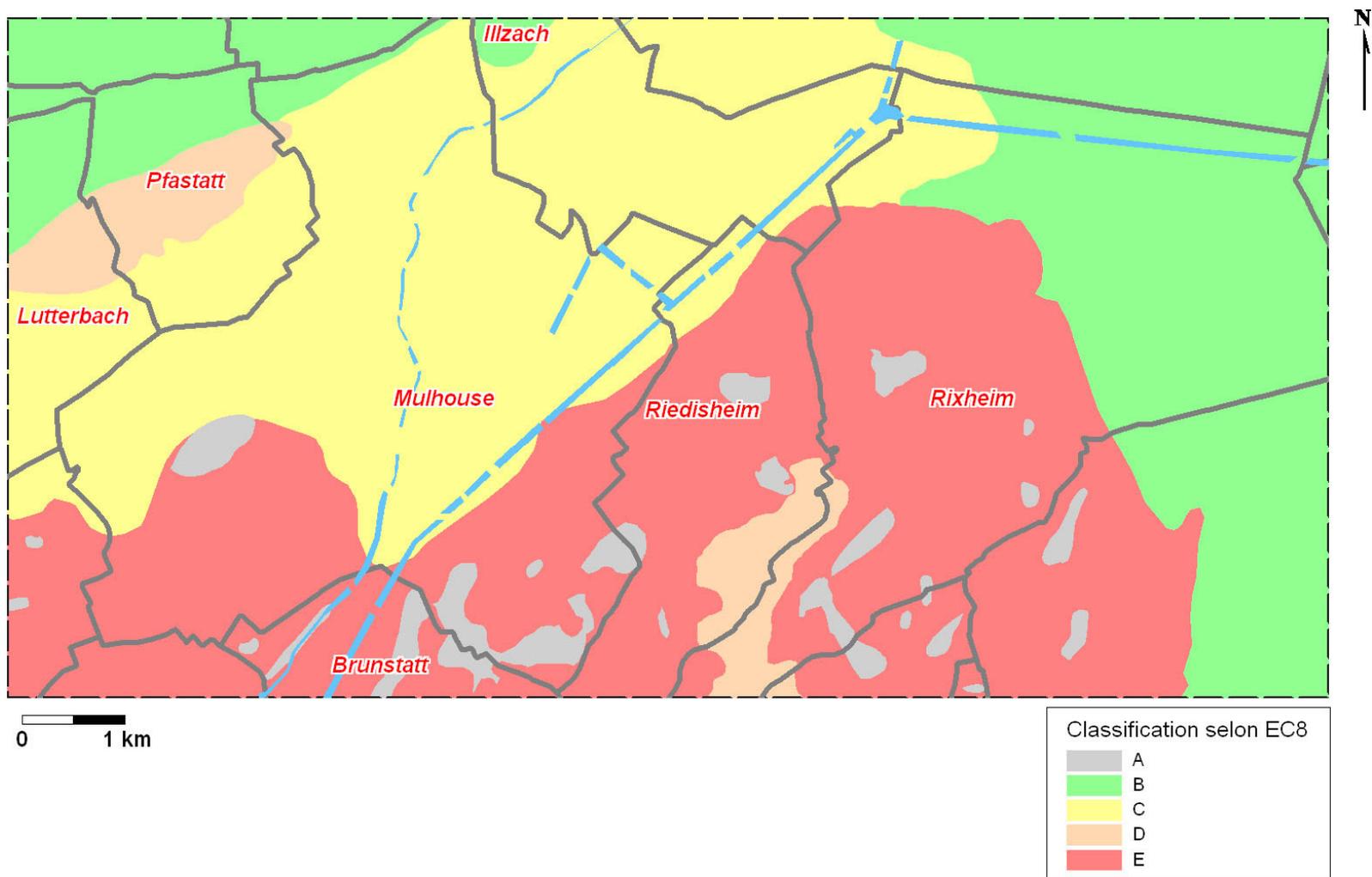


Figure 11 : Zonage sismique selon la classification des sols des règles parasismiques EC8 sur l'agglomération mulhousienne.

### 3. Etudes géophysiques réalisées dans la région des Trois Frontières (Bâle)

#### 3.1. CONTEXTE

La seconde zone pilote de ce projet Interreg est la région des Trois Frontières autour de la ville de Bâle (Bâle – Lörrach - Saint Louis - Huningue). Outre le fait que c'est une zone fortement urbanisée et fortement industrialisée, donc à forts enjeux, l'intérêt est de travailler sur cette zone frontalière afin d'harmoniser les microzonages sismiques existants (en Suisse) ou à venir (en Allemagne et en France) de part et d'autre des frontières.



Figure 12 : zone d'étude IPGS-BRGM pour la région des Trois Frontières.

Dans ce cadre, le BRGM a participé à une campagne de mesures SASW avec les partenaires suisses et allemands pour tester la résolution de différentes méthodes géophysiques (sismique, bruit de fond réseau <sup>2</sup> et SASW) sur des sites de référence. Le BRGM a également participé, en collaboration avec l'IPGS, au microzonage de la partie française de la zone d'étude, à savoir la zone allant de Rosenau au Nord à Hagenthal-le-Haut au Sud (Figure 12). Toute la zone d'étude est en zone de sismicité II selon les règles parasismiques françaises en vigueur (décret n°91-461 du 14 mai 1991).

## **3.2. GÉOLOGIE**

### **3.2.1. Formations superficielles**

Comme pour l'agglomération mulhousienne, nous disposons de la carte géologique vectorisée non harmonisée au 1/50 000 sur la zone d'étude (Figure 13 et Figure 14).

Les formations superficielles principales sur cette zone sont les suivantes :

- Alluvions récentes
- Alluvions anciennes des Hautes Terrasses,
- Loess et lehms déposés sur les reliefs du Sundgau,
- Calcaire et marnes éocène et oligocène (substratum).

---

<sup>2</sup> La méthode « bruit de fond réseau » consiste à enregistrer le bruit de fond sismique sur plusieurs stations sismologiques de façon synchrone. L'analyse des données peut se faire selon plusieurs méthodes (les méthodes f-k haute résolution (Capon, 1969), MUSIC (Schmidt, 1986), et SPAC (Aki, 1957) étant les plus connues) et permet d'obtenir une courbe de dispersion des ondes de surface. Cette courbe est ensuite inversée pour obtenir un profil de vitesse des ondes S en fonction de la profondeur.

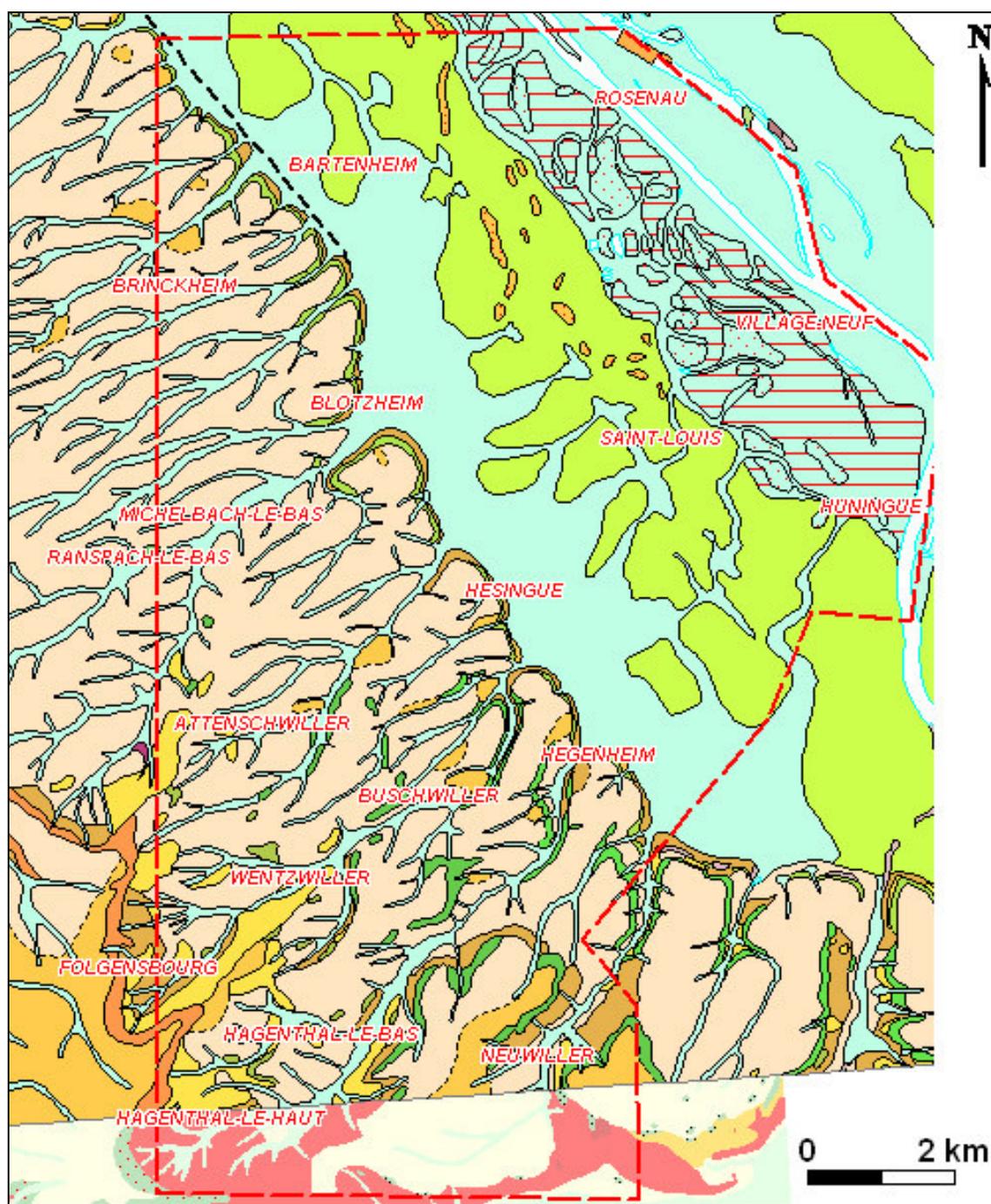


Figure 13 : géologie de la zone d'étude dans la région des Trois Frontières (cartes géologiques au 1/50 000 n°445 et 476, version vectorisée, BRGM, 2005). La légende est présentée sur la Figure 14.

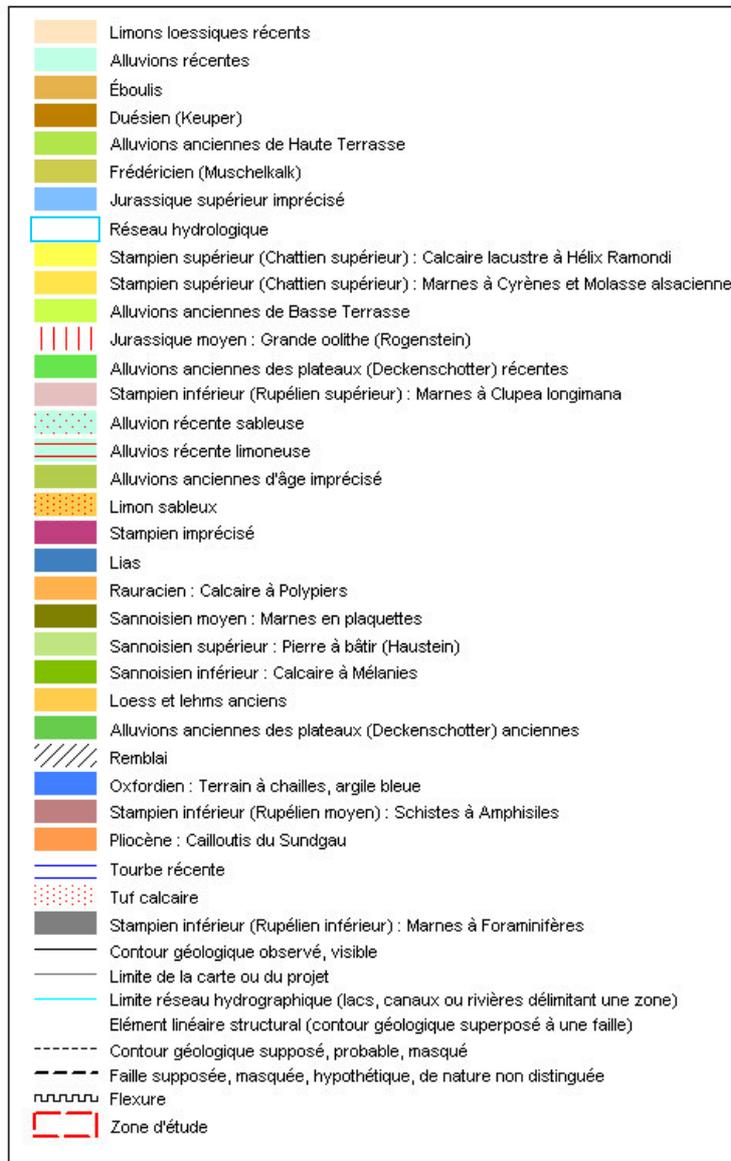


Figure 14 : légende de la carte géologique présentée en Figure 13.

### 3.2.2. Modèle géologique

Il était initialement envisagé de réaliser un modèle géologique 3D de la zone à partir des données de la BSS et de la carte géologique vectorisée. La distribution des sondages très irrégulière ne permet pas de caractériser correctement la structure des couches superficielles, en particulier celle des loess du Sundgau (seuls 3 sondages traversent cette formation).

Nous avons donc réalisé un modèle préliminaire sur une partie restreinte de la zone : la partie comprise entre les contreforts des Vosges et le Rhin (Figure 15). Ce modèle donne quelques indications sur la structure géologique superficielle de la zone.

La réalisation d'un modèle harmonisé interfrontalier nécessiterait la mise en commun des données de la BSS et des données disponibles côté suisse et allemand, ce qui n'a pu être réalisé dans ce projet.

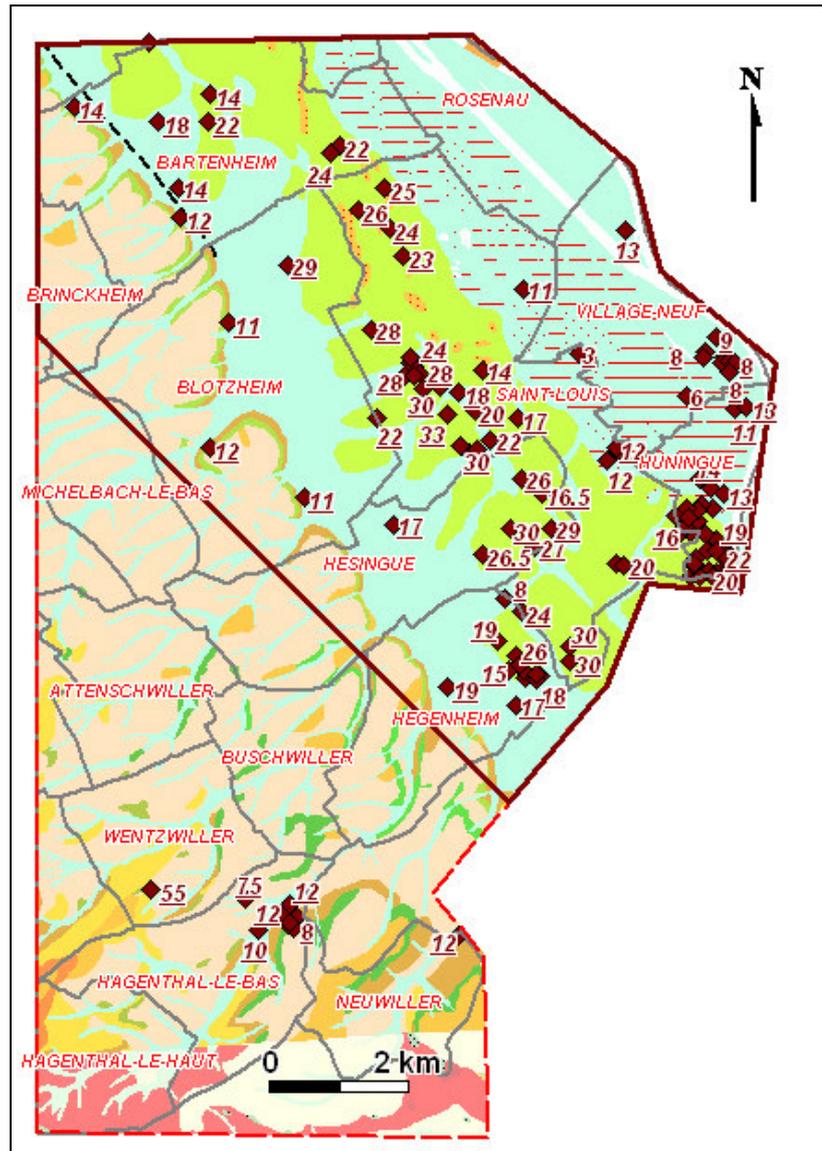


Figure 15 : Emprise du modèle géologique réalisé par le BRGM (ligne brune) et localisation des sondages BSS (losanges bruns) utilisés pour élaborer ce modèle. Les nombres indiqués en gras et soulignés donnent les profondeurs (en m) atteintes par les sondages.

Quelques coupes géologiques (présentées sur les Figure 16 et Figure 17) ont été réalisées sur la zone afin de mieux comprendre la géométrie des interfaces géologiques.

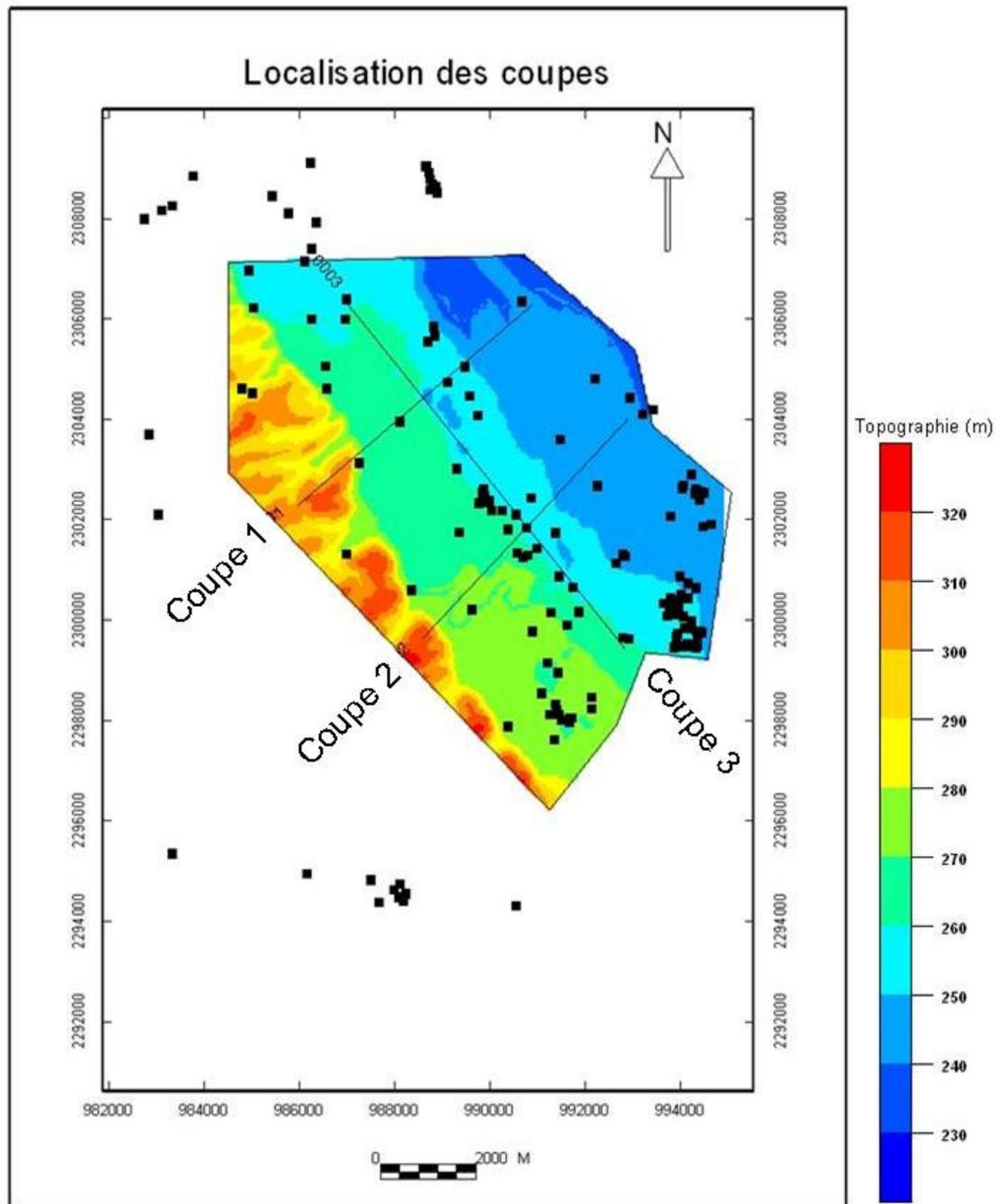


Figure 16 : localisation des coupes géologiques présentées sur la Figure 17.

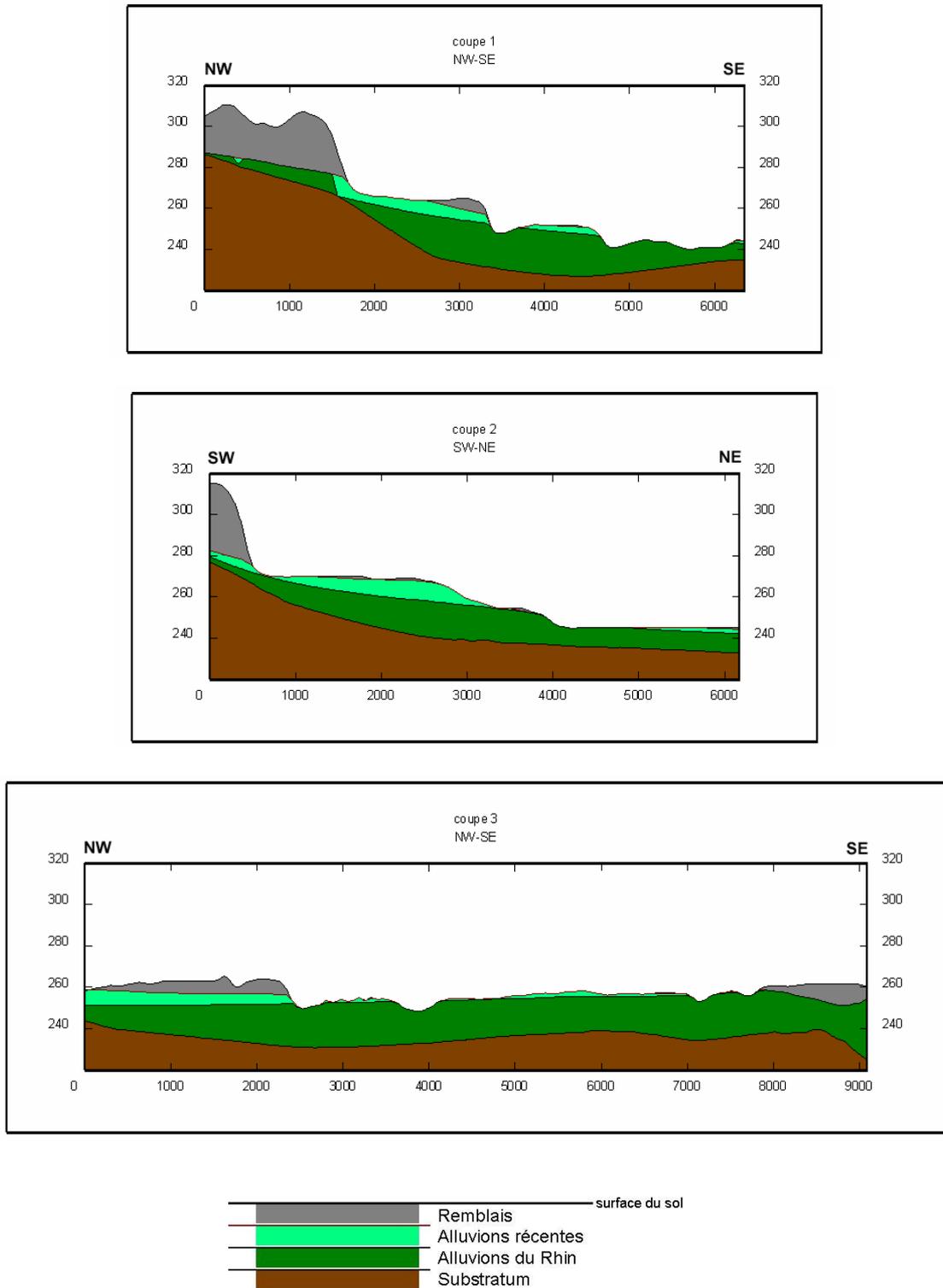


Figure 17 : coupes géologiques de la Figure 16.

### 3.3. GÉOPHYSIQUE

Pour compléter les informations géologiques disponibles sur la zone et caractériser les différentes formations géologiques en termes de vitesse d'ondes S et d'épaisseur, une campagne de mesures SASW a été réalisée par le BRGM. Cette campagne complète, côté français, les mesures H/V réalisées sur le bruit de fond sismique par l'IPGS. Côté suisse et allemand, des mesures de sismique réfraction et réflexion ont été réalisées par le GGA-Hanovre et des mesures de bruit de fond réseau par l'ETH sur les mêmes sites que la SASW. L'objectif était de comparer les trois méthodes géophysiques pour la caractérisation des formations superficielles nécessaire à la réalisation d'un microzonage sismique.

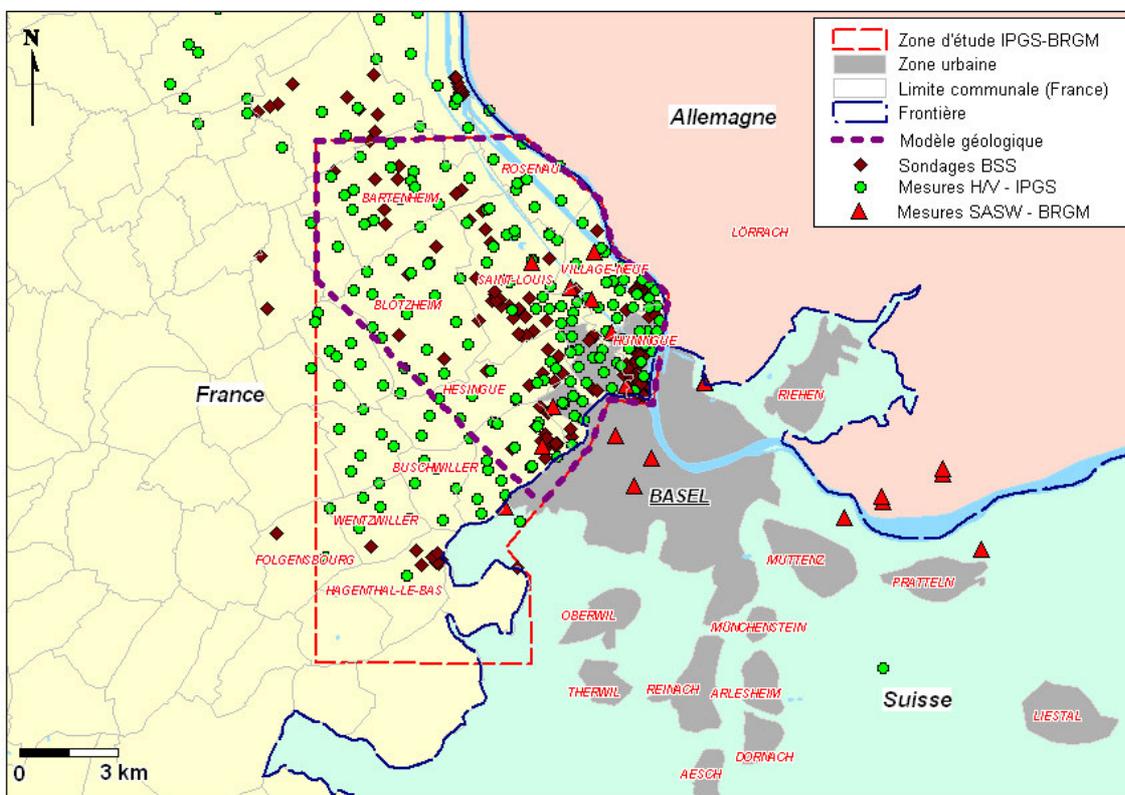


Figure 18 : localisation des profils SASW réalisés par le BRGM et des mesures H/V réalisées par l'IPGS.

### 3.4. ANALYSE DES DONNÉES GÉOPHYSIQUES

#### 3.4.1. Côté français : microzonage

L'ensemble des profils SASW sont présentés dans l'annexe 3. Comme on peut le voir sur la carte interprétative des données H/V et SASW présentée sur la Figure 19, la

grande majorité des rapports spectraux H/V indiquent une fréquence de résonance comprise entre 0.5 et 1 Hz au Sud de la zone et entre 1 et 2 Hz au Nord. Cela correspond à des couches très profondes, de l'ordre de 50 à 200 m de profondeur par exemple pour une vitesse  $V_s$  de l'ordre de 400 m/s en surface (valeur indicative déduite des mesures SASW). Ces résultats sont d'ailleurs cohérents avec les profils SASW obtenus puisque seul le profil STL01 (voir annexe 3, Figure 43) atteint le substratum sismique et que les autres profils ne présentent pas de contraste de vitesse net. Ce ne sont donc pas les couches sédimentaires superficielles, d'une épaisseur de l'ordre de 15 à 30 m, qui semblent entrer en résonance. Il s'agit peut-être du mur des schistes à melettes comme cela a été interprété côtés allemand et suisse où l'on retrouve des résultats similaires (communication personnelle, août 2005, Hans-Balder Havenith, ETH Zürich). Il est donc indispensable de mieux connaître la structure profonde du bassin avant de réaliser ce microzonage. On voit aussi ici la limite du paramètre  $V_{s,30}$  pour la caractérisation des sites puisque ce paramètre ne donne aucune indication sur le contraste de vitesse et la profondeur de l'interface induisant la résonance principale du site pour les couches d'épaisseur supérieure à 30 m.

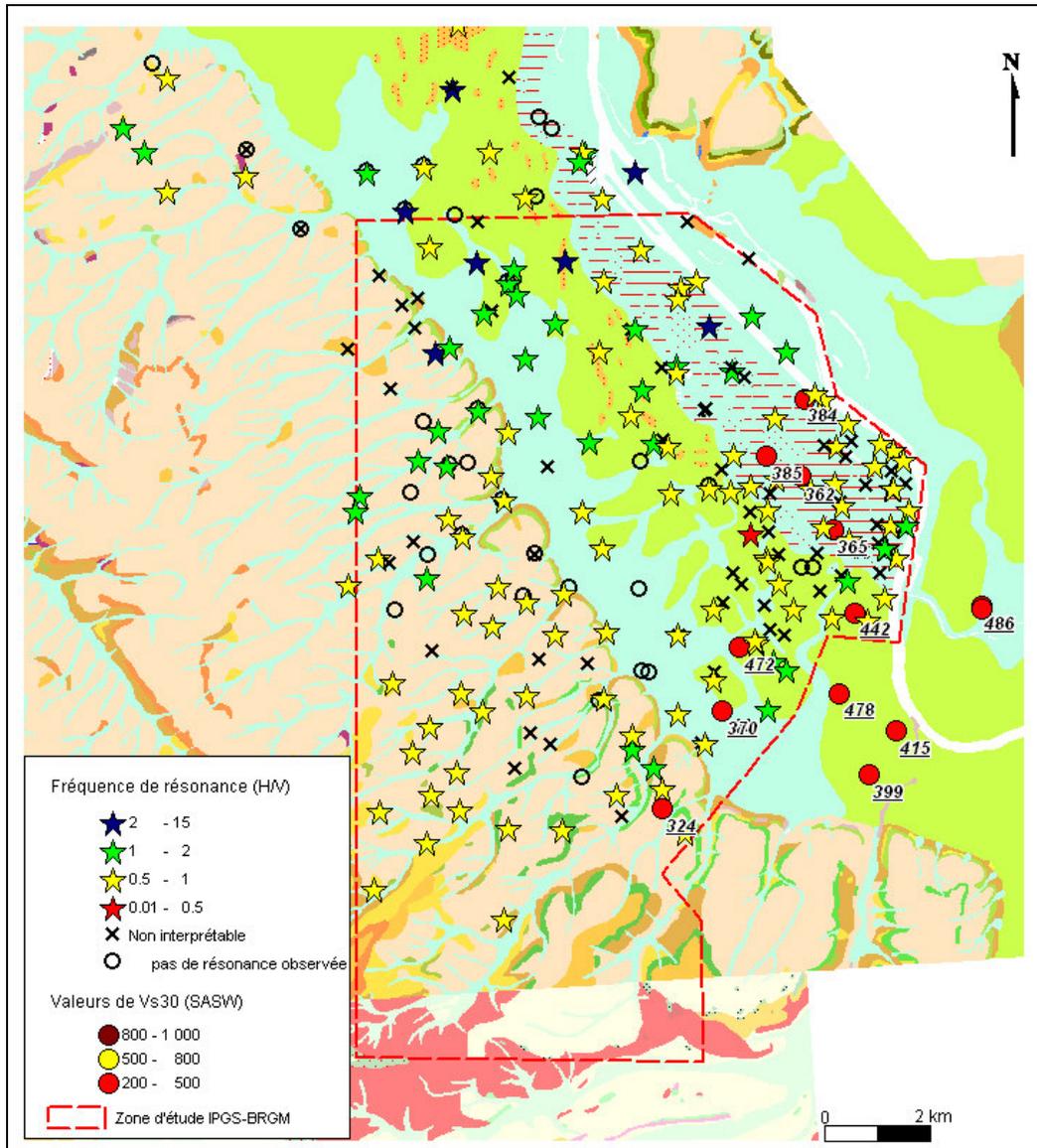


Figure 19 : Interprétation préliminaire des mesures géophysiques H/V (IPGS) et SASW (BRGM).

### 3.4.2. Comparaison des différentes méthodes géophysiques : sites pilotes suisses et allemands

Un travail fructueux de comparaison des mesures géophysiques sur 9 sites pilotes en Allemagne et en Suisse a été réalisé. Trois méthodes ont ainsi été comparées :

- Les mesures de bruit de fond réseau réalisées par l'ETH
- Les campagnes de sismique réflexion et réfraction réalisées par le GGA-Hanovre

- La SASW réalisée par le BRGM.

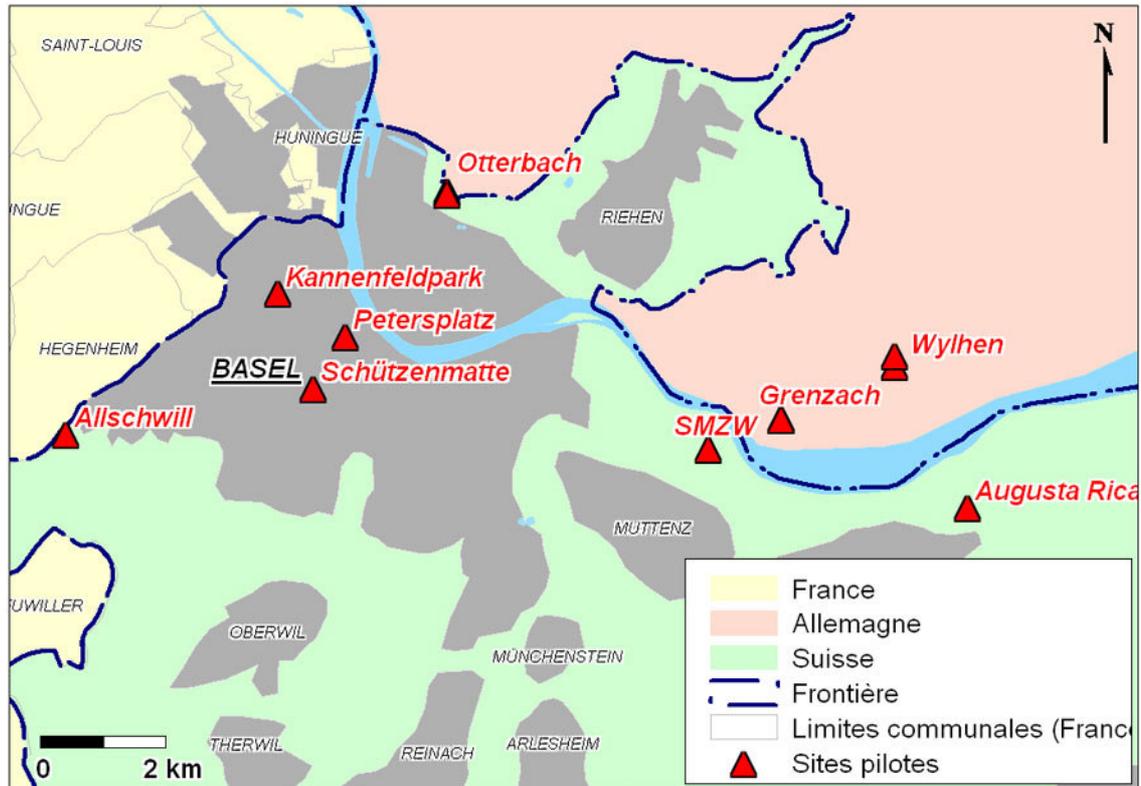


Figure 20 : Localisation des sites pilotes.

Dans un premier temps, les données provenant de chacune des trois méthodes ont été traitées séparément en utilisant les techniques de traitement habituelles. Les résultats ont montré la grande complémentarité des trois méthodes : la SASW résolvant avec précision des couches très superficielles sur les 30 premiers mètres, le bruit de fond réseau donnant une bonne résolution sur les profondeurs intermédiaires (quelques dizaines de mètres) et la sismique classique donnant des informations sur les couches plus profondes et sur la géométrie des structures (variations latérales de vitesse par exemple). Ces résultats ont été présentés au congrès de l'EAGE à Palerme (Polom *et al.*, 2005).

Il est notamment apparu une grande complémentarité entre la méthode SASW, très efficace en surface, et la méthode des réseaux de bruit de fond sismique qui permet de travailler à plus grande profondeur en jouant sur l'ouverture des réseaux installés. Dans un deuxième temps, il a donc été décidé de combiner les courbes de dispersion obtenues par ces deux méthodes et de les inverser conjointement par le logiciel Geopsy développé lors du projet européen SESAME ([www.geopsy.org](http://www.geopsy.org)). Le BRGM a fourni les courbes de dispersion numérisées à l'ETH pour réaliser ce travail d'inversion. Ce travail est maintenant publié (Havenith *et al.*, 2007).

### **3.5. PERSPECTIVES**

En l'absence d'une mise en commun des données de base (géologie, géophysique et géotechnique) sur les 3 pays et en raison de la grande disparité des zonages sismiques en termes de réglementation et de niveaux (le zonage allemand correspondant à un zonage de niveau A sans niveau d'accélération associé alors que celui réalisé par les suisses correspond à un zonage de niveau C avec spectres spécifiques), aucun zonage commun n'a pour l'instant été réalisé. Pour que cela soit possible, une réflexion sur l'homogénéisation des données d'entrée et des sorties possibles devra être menée.

En ce qui concerne la partie française, une meilleure connaissance de la structure profonde de la zone (au-delà des 30 à 40 premiers mètres couverts par les sondages de la BSS et par les reconnaissances géophysiques superficielles issues de la SASW) est nécessaire pour la réalisation d'un microzonage sismique.

## 4. Conclusion

Ce rapport détaille les travaux réalisés par le BRGM dans le cadre du projet Interreg III intitulé « Microzonage Sismique de la région du sud du Rhin Supérieur » à la fin du projet et complète le rapport synthétique final rédigé par l'IPGS, pilote de ce projet Interreg (Granet et Boulanger, 2007). Il s'agit en particulier de synthétiser l'ensemble des données géophysiques et géologiques analysées lors de ce projet par le BRGM.

Au niveau de l'agglomération mulhousienne, un microzonage sismique de niveau A a été réalisé en suivant les nouvelles règles parasismiques EC8 prochainement en vigueur en France.

Au niveau de la région de Saint-Louis et Huningue, le microzonage sismique n'est pas encore disponible faute de données suffisantes. Il serait tout d'abord nécessaire de mieux caractériser les loess du Sundgau, pour lesquels nous ne disposons d'aucune donnée géotechnique ou géophysique et de très peu de données géologiques. Par ailleurs, une meilleure connaissance de la structure géologique à moyenne échelle (de l'ordre de la centaine de mètres) de la zone est indispensable pour l'interprétation des fréquences de résonance (inférieures à 1 Hz) obtenues à partir des mesures de bruit de fond H/V réalisées par l'IPGS.

Parallèlement au microzonage sismique, le travail de comparaison des méthodes géophysiques SASW, bruit de fond réseau et de sismique réflexion et réfraction réalisé sur 9 sites pilotes suisses et allemands a montré la grande complémentarité de ces méthodes de surface pour l'estimation des profils de vitesse en profondeur (Havenith *et al.*, 2007).



## 5. Bibliographie

AFNOR (1995) - Règles de construction parasismique : règles PS applicables aux bâtiments, dites règles PS92. *AFNOR, Paris, norme française NF P 06-013.*

AFPS (1993) – Guide Méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique.

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

Bitri A., Le Bégat S., Baltassat J. M., Goury J.C. (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, vol. 57, P. 1408-1418.*

Eurocode 8 (2005) – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes. *AFNOR, Paris, norme européenne NF EN 1998.*

Granet M., Boulanger M.-O. (2007) – Microzonage de la région sud du Rhin Supérieur. *Rapport final d'activité, Contrat Interreg III n°3c.8, 204 p.*

Havenith H.-B., D. Fäh, U. Polom, A. Roullé (2007) - S-wave velocity measurements applied to the seismic microzonation of Basel, Upper Rhine Graben. *Geophys. J. Int., accepted.*

Marçot N., Arnal C. (2004) – Méthodologie de réalisation d'un scénario de séisme sur la ville de Mulhouse (68). *Rapport BRGM/RP52760.*

Nakamura Y. (1989) - A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QR of RTRI, 30, 1, p. 25-33.*

Nakamura Y. (1996) - Real-Time Information Systems for Seismic Hazards Mitigation UrEDAS, HERAS and PIC. *QR of RTRI, 37, 3, p. 112-127.*

Nogoshi M., and T. Igarashi (1971). On the propagation characteristics of microtremors. *Jour. Seism. Soc. Japan, Vol 23, p. 264-280.*

Opršal I., D. Fäh, P. Martin Mai, D. Giardini (2005) – Deterministic earthquake scenario for the Basel area: Simulating strong motions and site effects for Basel, Switzerland. *J. Geophys. Res., vol. 110, B04305, doi:10.1029/2004JB003188.*

Polom U., Fäh D., Havenith H.-B., Pohl C., Roullé A., Stange S., Steiner B. (2005) - Shear wave velocity-depth determination for the Upper Rhine Mid/South seismic risk

microzonation. *11<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics of the Near Surface Geoscience Division of the EAGE, Palerme, Italie, Septembre 2005.*

Sabourault P. (1999) - Du microzonage à la prédiction de mouvements forts : Confrontation de mesures de terrain, de simulations numériques et de modélisations sur modèles réduits centrifugés. *Thèse de doctorat de l'université de Marne la Vallée.*

Sabourault P., Bitri A. (2001) – Détermination de la géométrie des formations sédimentaires de la vallée du Grésivaudan autour du forage de Montbonnot (Isère) : utilisation des méthodes H/V et SASW. *Rapport BRGM RP-51161-FR.*

Schmidt R.O. (1986) – Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Trans. On Antennas and Propagation, vol. 34, p. 276-280.*

Thierry P., Mouroux P. (2003) – Microzonage sismique du bassin de Mulhouse. *Rapport BRGM/RP-52754-FR, 31 p., 13 Fig.*

## Annexe 1

## Classification des sols selon les EC8

Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres		
		$V_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (bl/30cm)	$c_u$ (kPa)
A	Rocher ou tout autre formation proche du rocher, incluant au plus 5 m de formation plus molle en surface.	> 800	–	–
B	Dépôts de sable très dense, de gravier ou d'argile très dure, au moins sur plusieurs dizaines de mètres, caractérisés par une augmentation graduelle des propriétés mécaniques avec la profondeur.	360 – 800	> 50	> 250
C	Dépôts profonds de sable dense ou moyennement dense, de gravier ou d'argiles dures avec des profondeurs de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres.	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Dépôts de sols de cohésion faible à moyenne (avec ou sans couches de sols mous cohérents) ou dépôts prédominants de sol cohérent mou à ferme.	< 180	< 15	< 70
E	Profil de sol consistant en une couche de surface d'alluvions avec une valeur de $V_{s,30}$ des classes C ou D et des épaisseurs variant entre 5 et 20 m, reposant sur du matériau plus ferme de $V_{s,30} > 800$ m/s			
$S_1$	Dépôts contenant (ou consistés de) des couches d'au moins 10 m d'épaisseur, d'argiles / limons avec une forte plasticité ( $PI > 40$ ) et une forte teneur en eau.	< 100 (indicative)	–	10 - 20
$S_2$	Dépôts de sols liquéfiables, d'argiles molles ou tout profil de sol non compris dans les classes A –E ou $S_1$			



## Annexe 2

### SASW Mulhouse

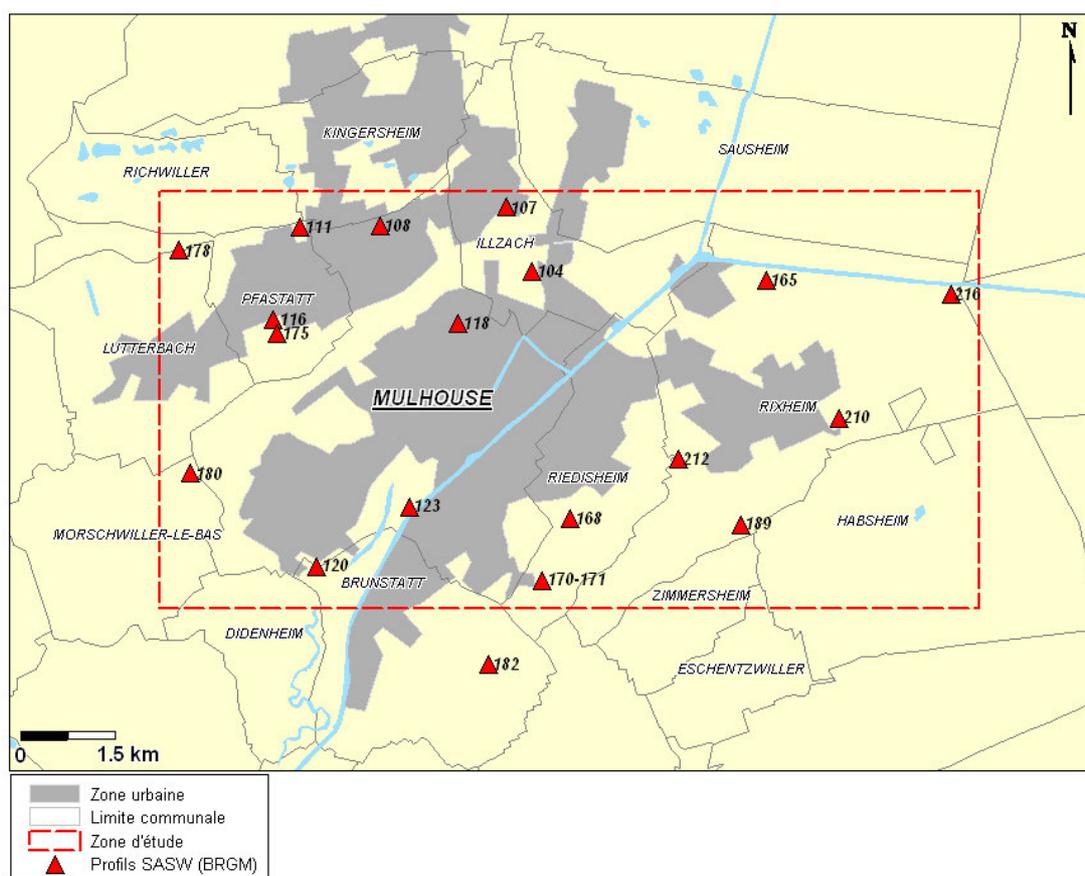


Figure 21 : Localisation des profils SASW réalisés à Mulhouse par le BRGM.

<b>Tir</b>	<b>X (Lambert II)</b>	<b>Y (Lambert II)</b>
104	975 980	2319680
107	975 570	2320690
108	973 610	2320390
111	972 360	2320380
116	971 950	2318930
118	974 830	2318870
120	972 620	2315060
123	974 070	2316000
165	979 620	2319550
168	976570	2315810
170-171	976140	2314850
175	972010	2318710
178	970480	2320020
180	970660	2316520
182	975300	2313530
189	979230	2315720
210	980760	2317390
212	978260	2316750

*Tableau 1 : Localisation des profils SASW réalisés par le BRGM à Mulhouse.*

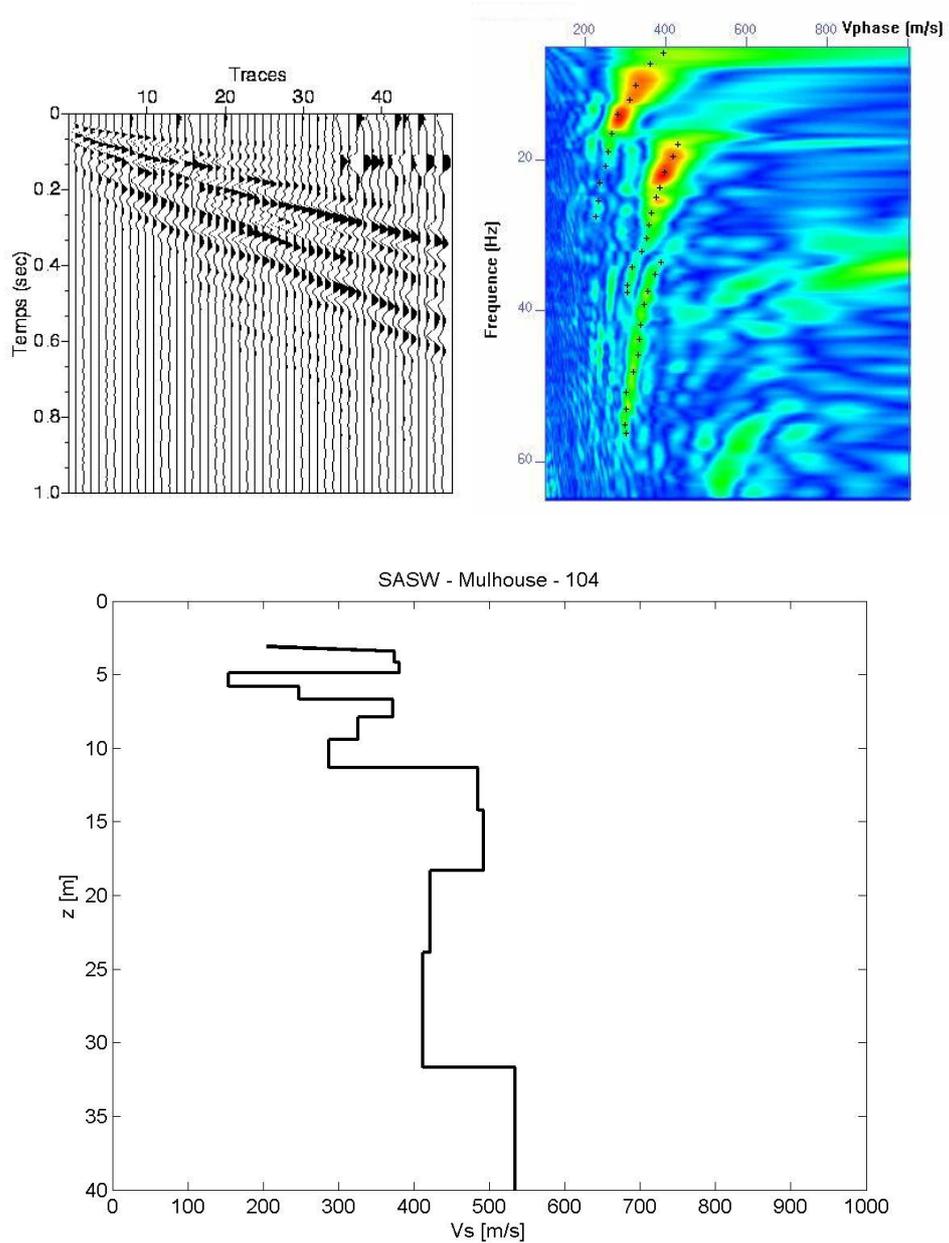


Figure 22 : Interprétation du profil SASW 104. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

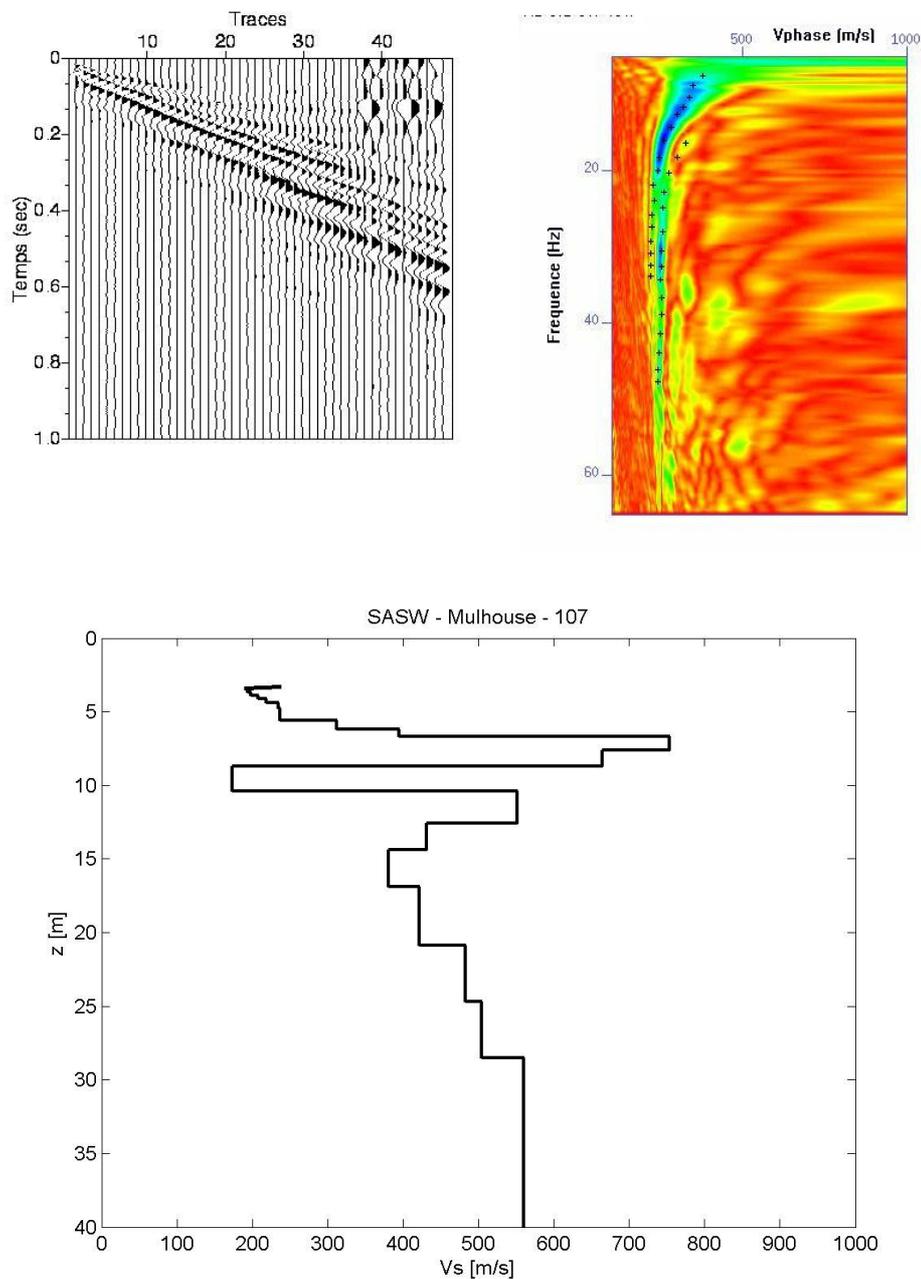


Figure 23 : Interprétation du profil SASW 107. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

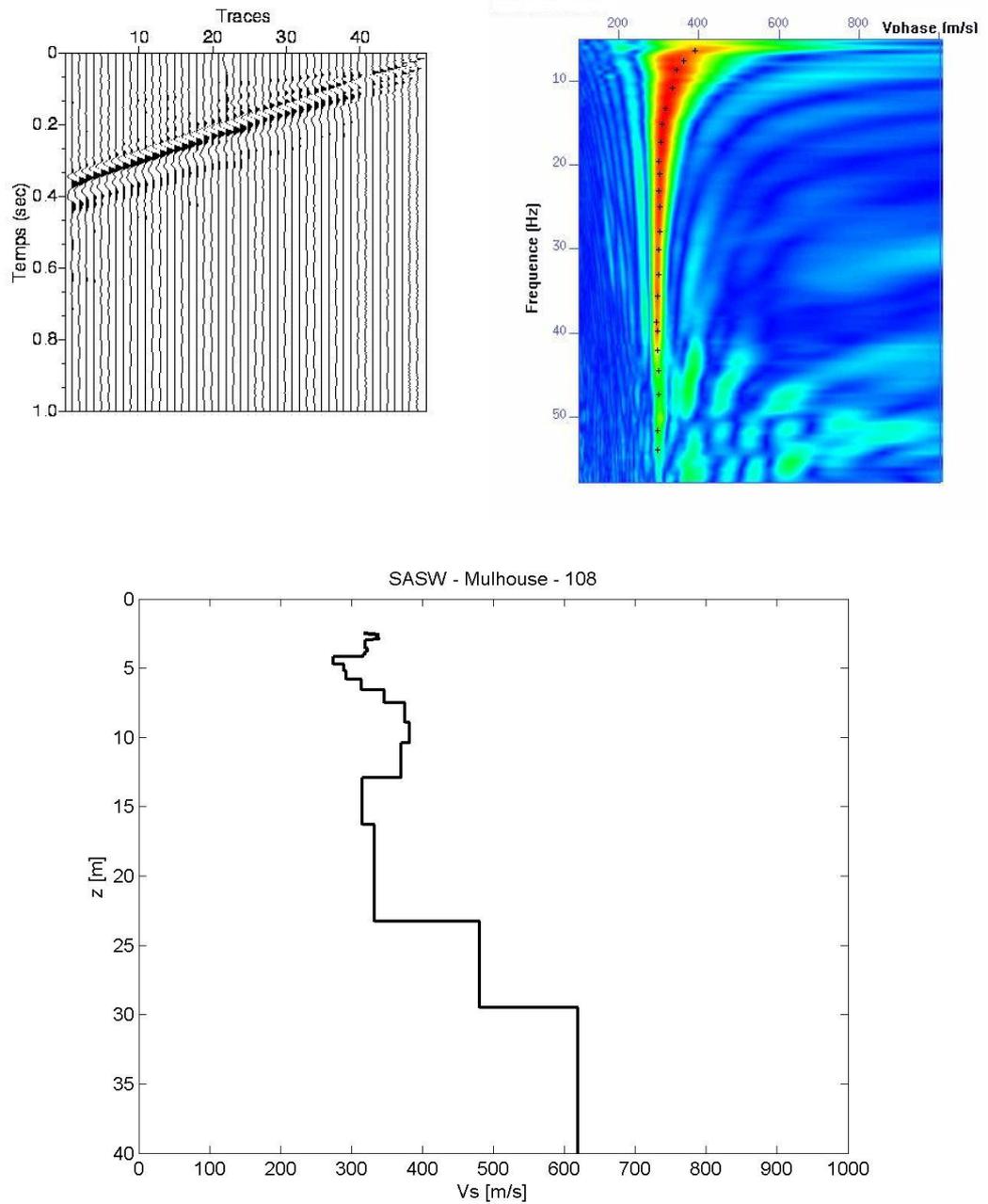


Figure 24 : Interprétation du profil SASW 108. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

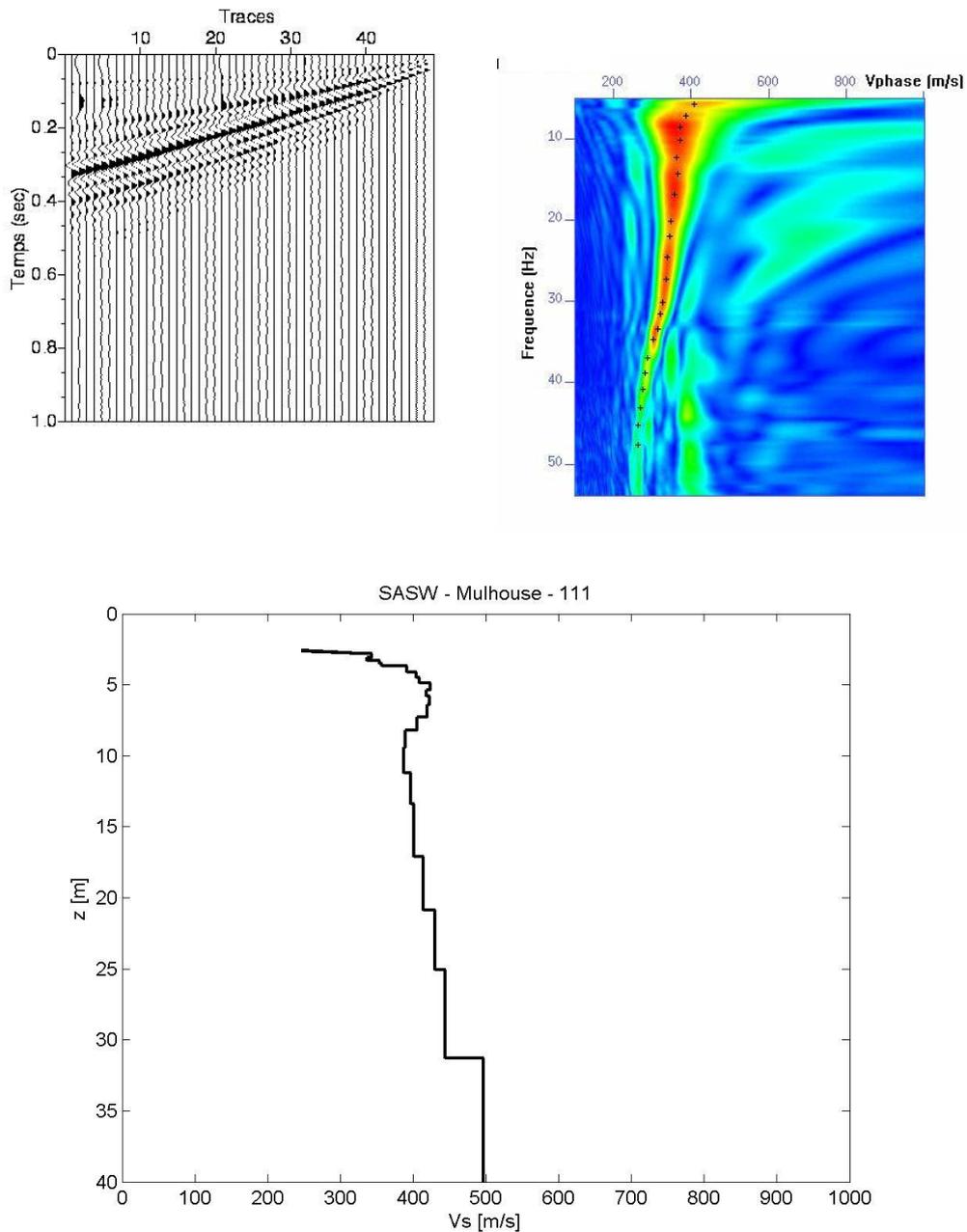


Figure 25 : Interprétation du profil SASW 111. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

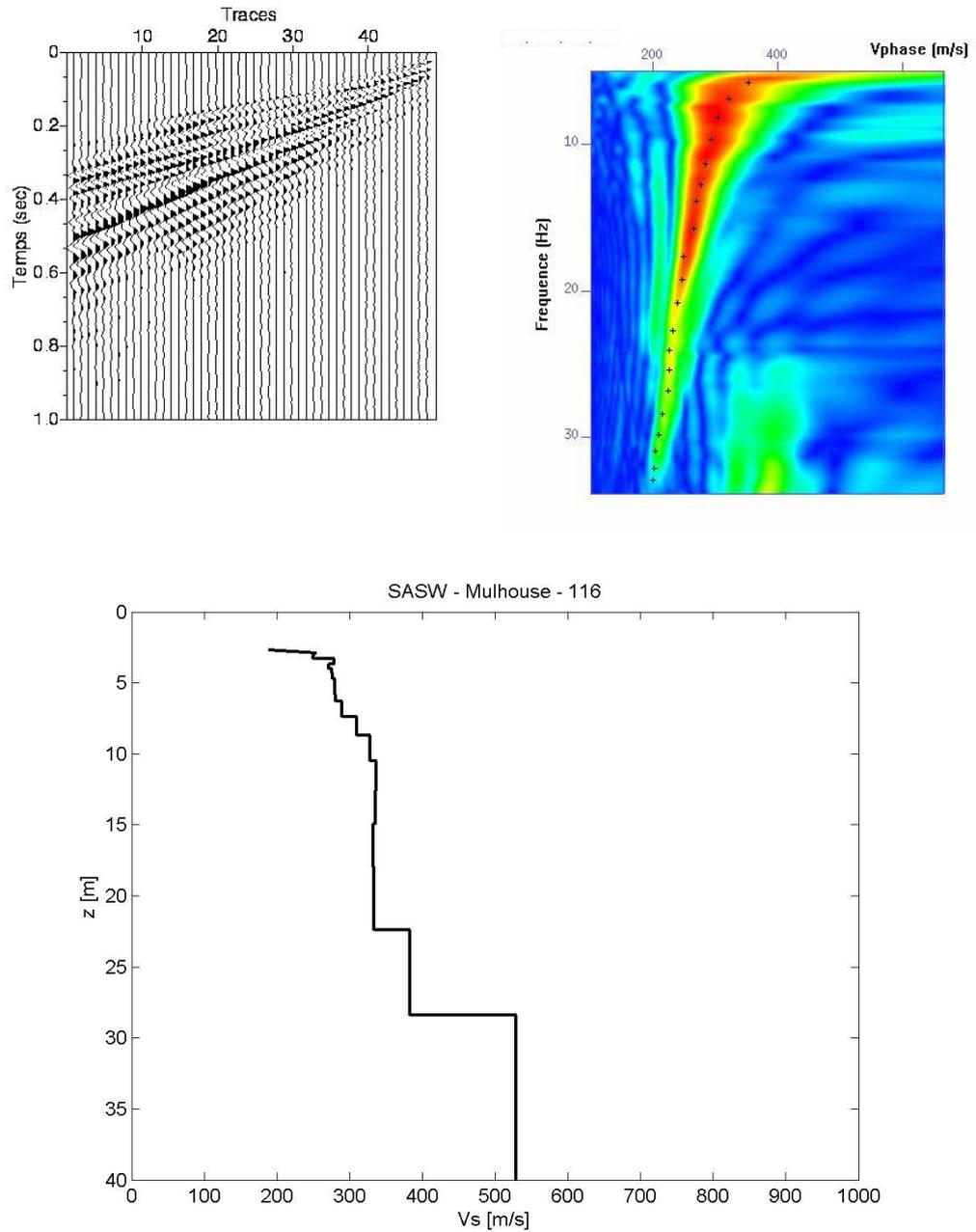


Figure 26 : Interprétation du profil SASW 116. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

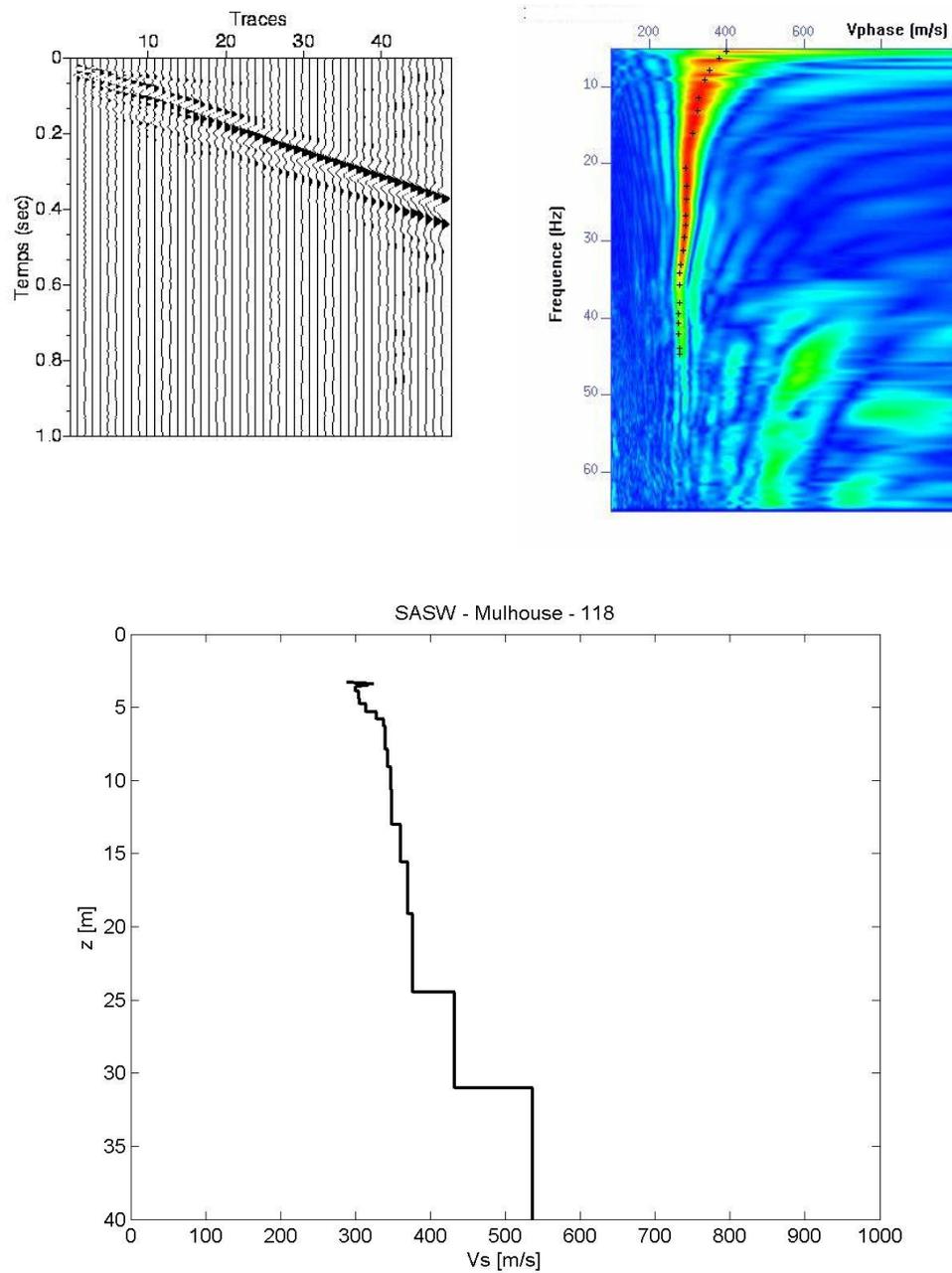


Figure 27 : Interprétation du profil SASW 118. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

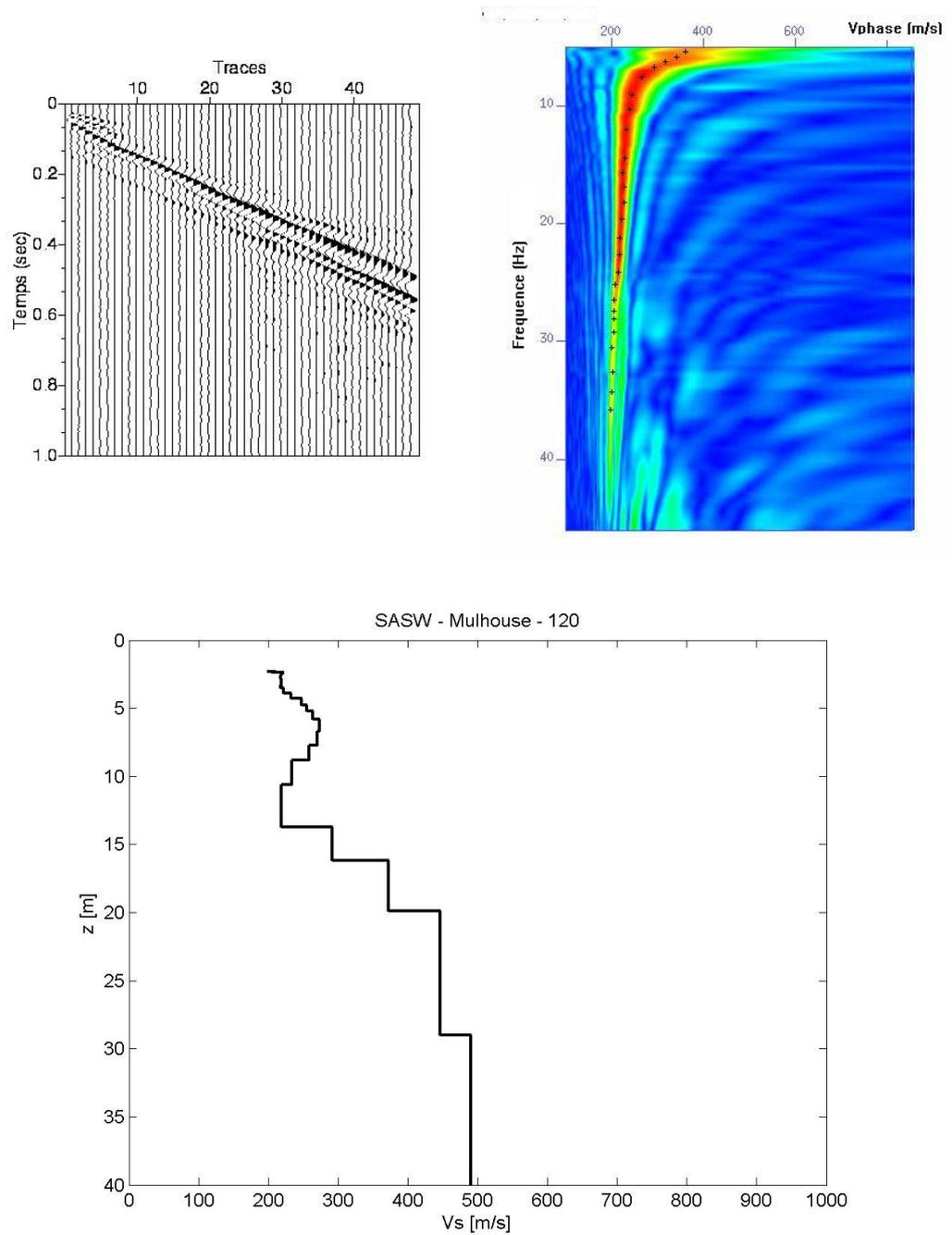


Figure 28 : Interprétation du profil SASW 120. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

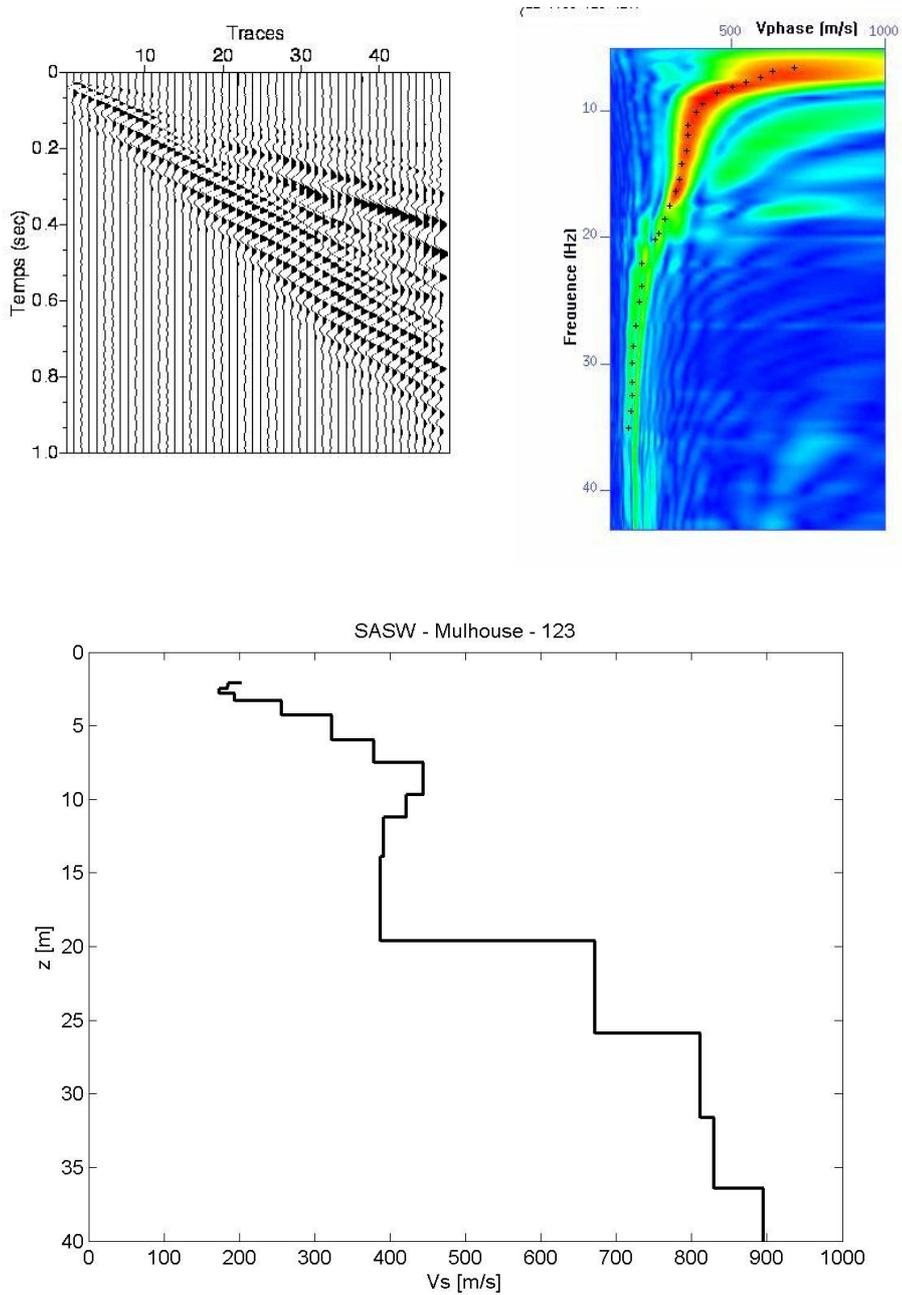


Figure 29 : Interprétation du profil SASW 123. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

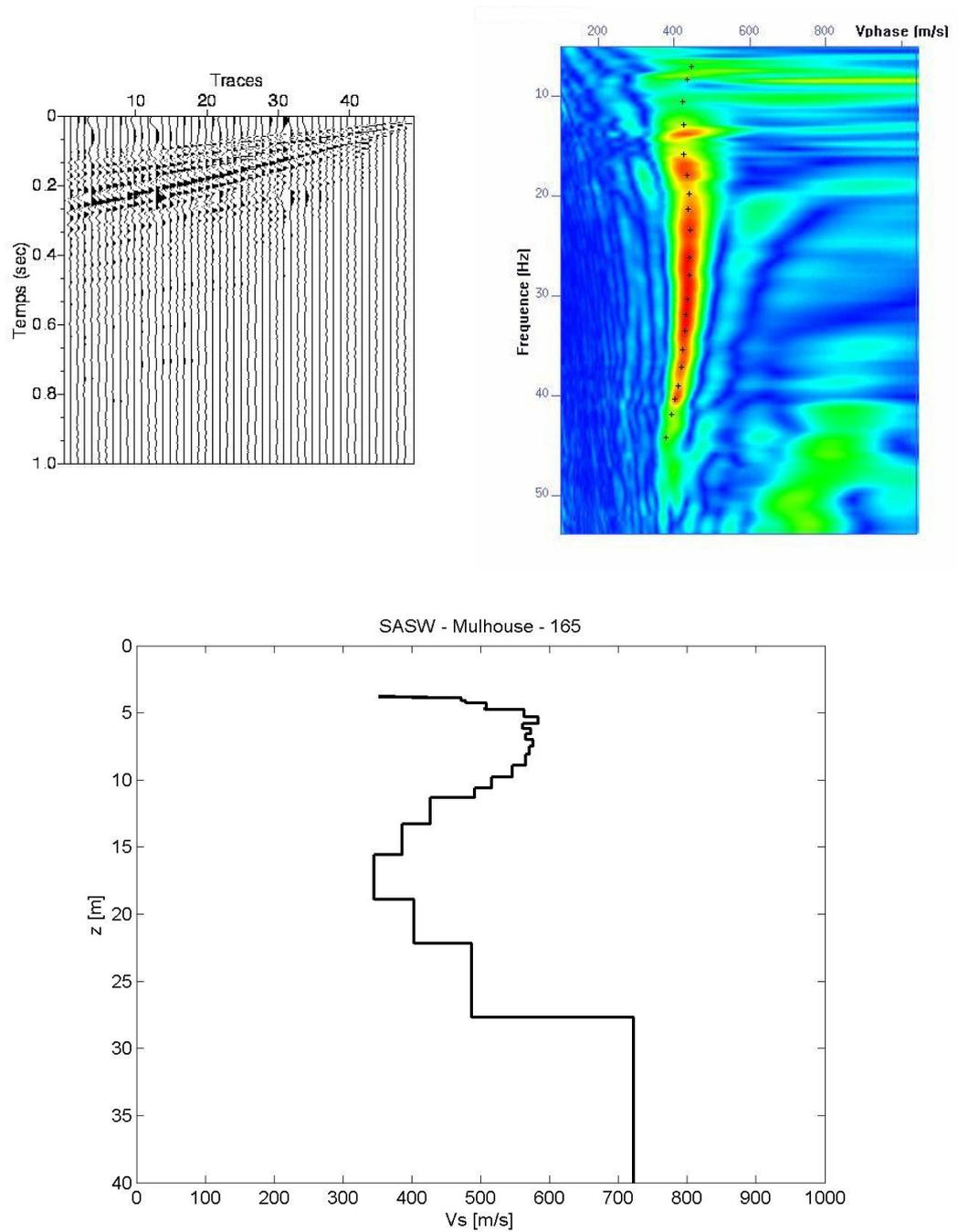


Figure 30 : Interprétation du profil SASW 165. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

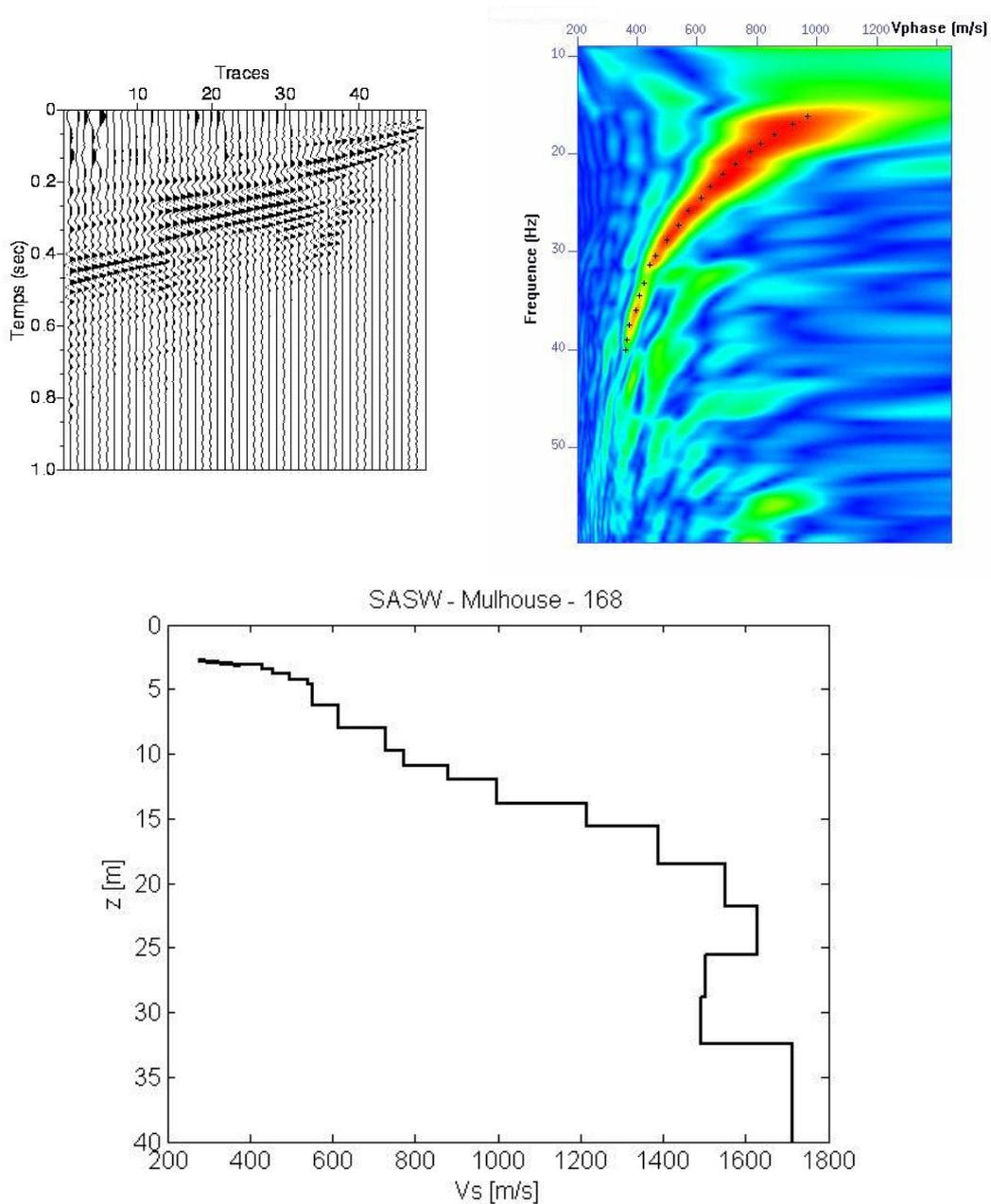


Figure 31 : Interprétation du profil SASW 168. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

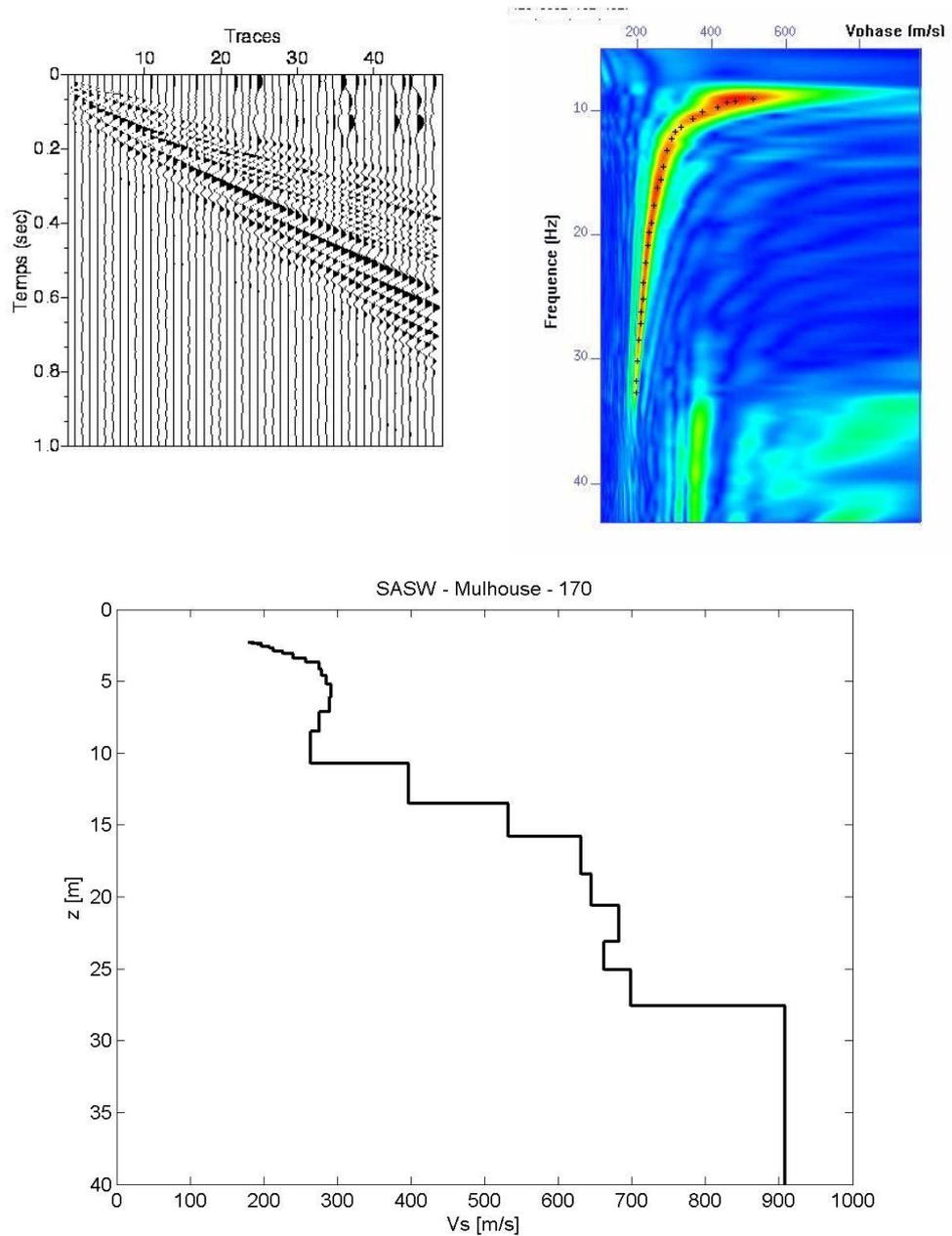


Figure 32 : Interprétation du profil SASW 170. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

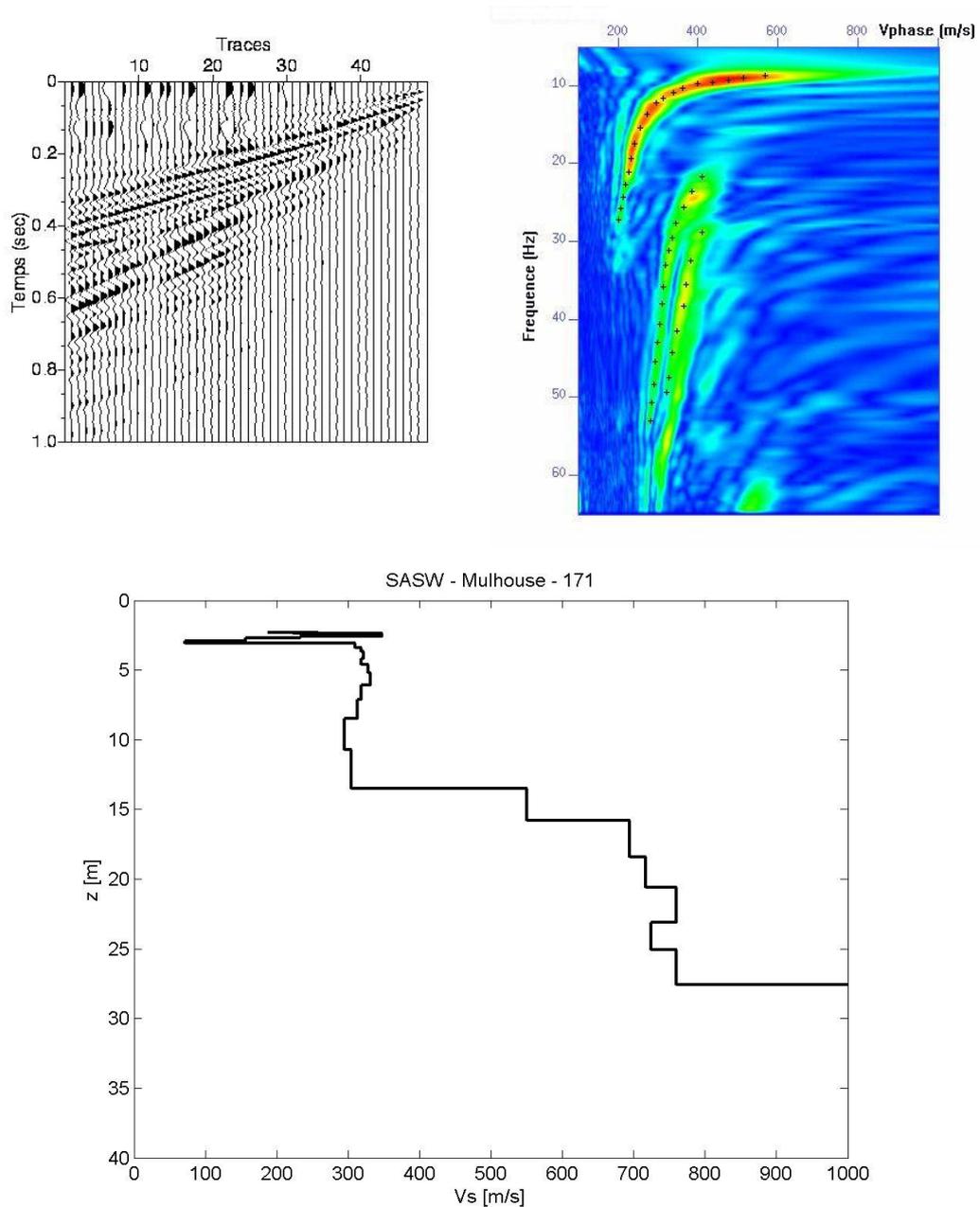


Figure 33 : Interprétation du profil SASW 171. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

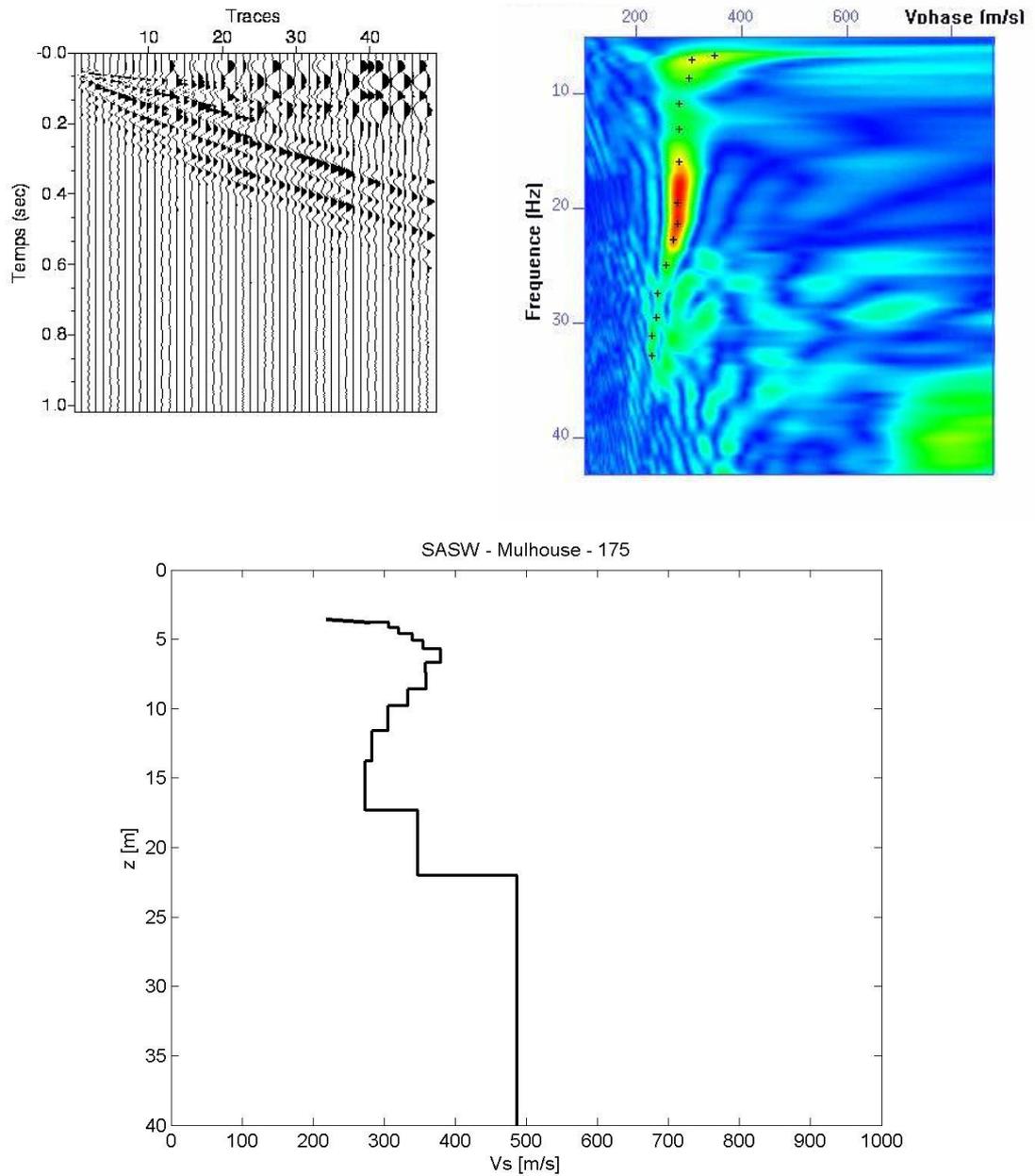


Figure 34 : Interprétation du profil SASW 175. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

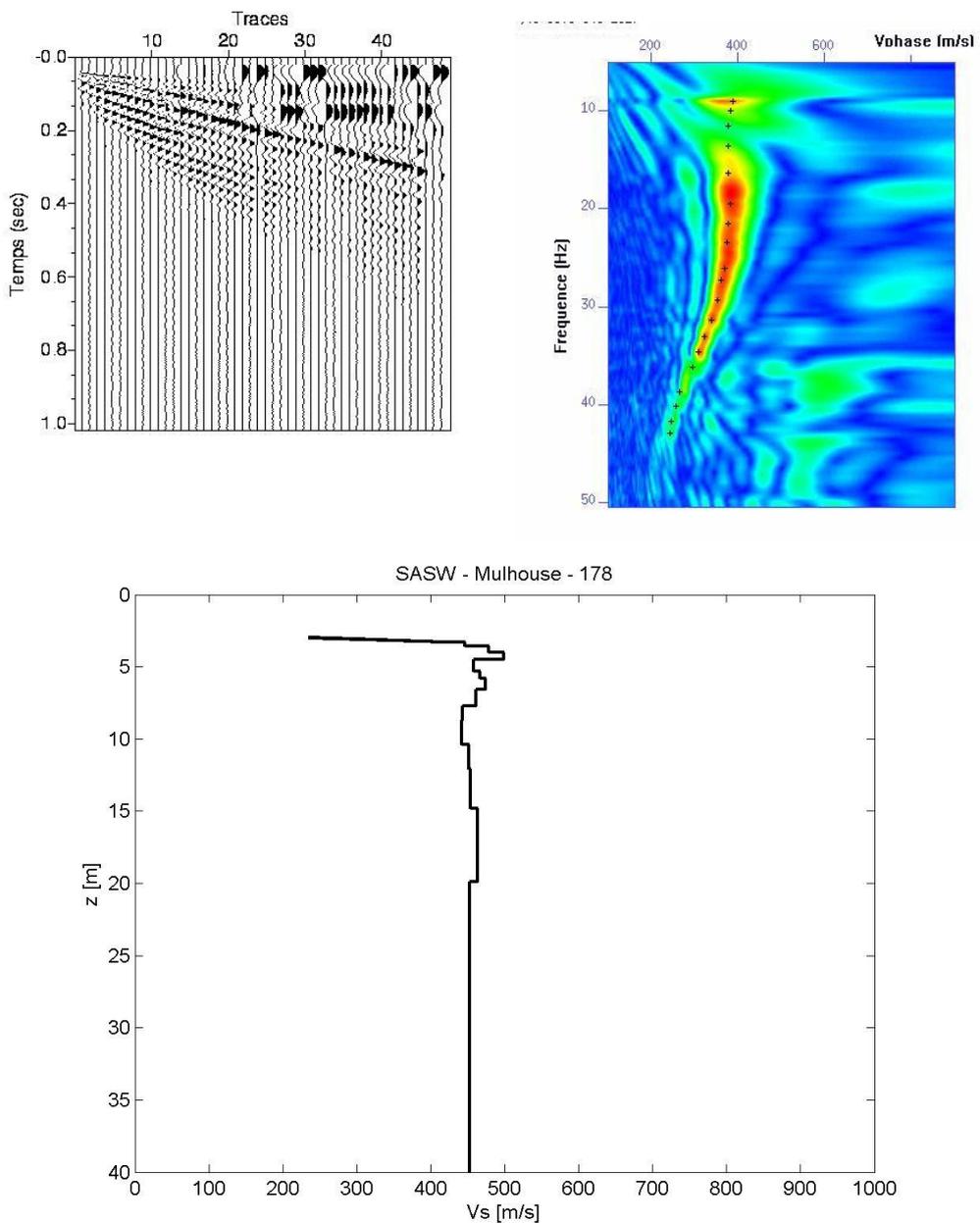


Figure 35 : Interprétation du profil SASW 178. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

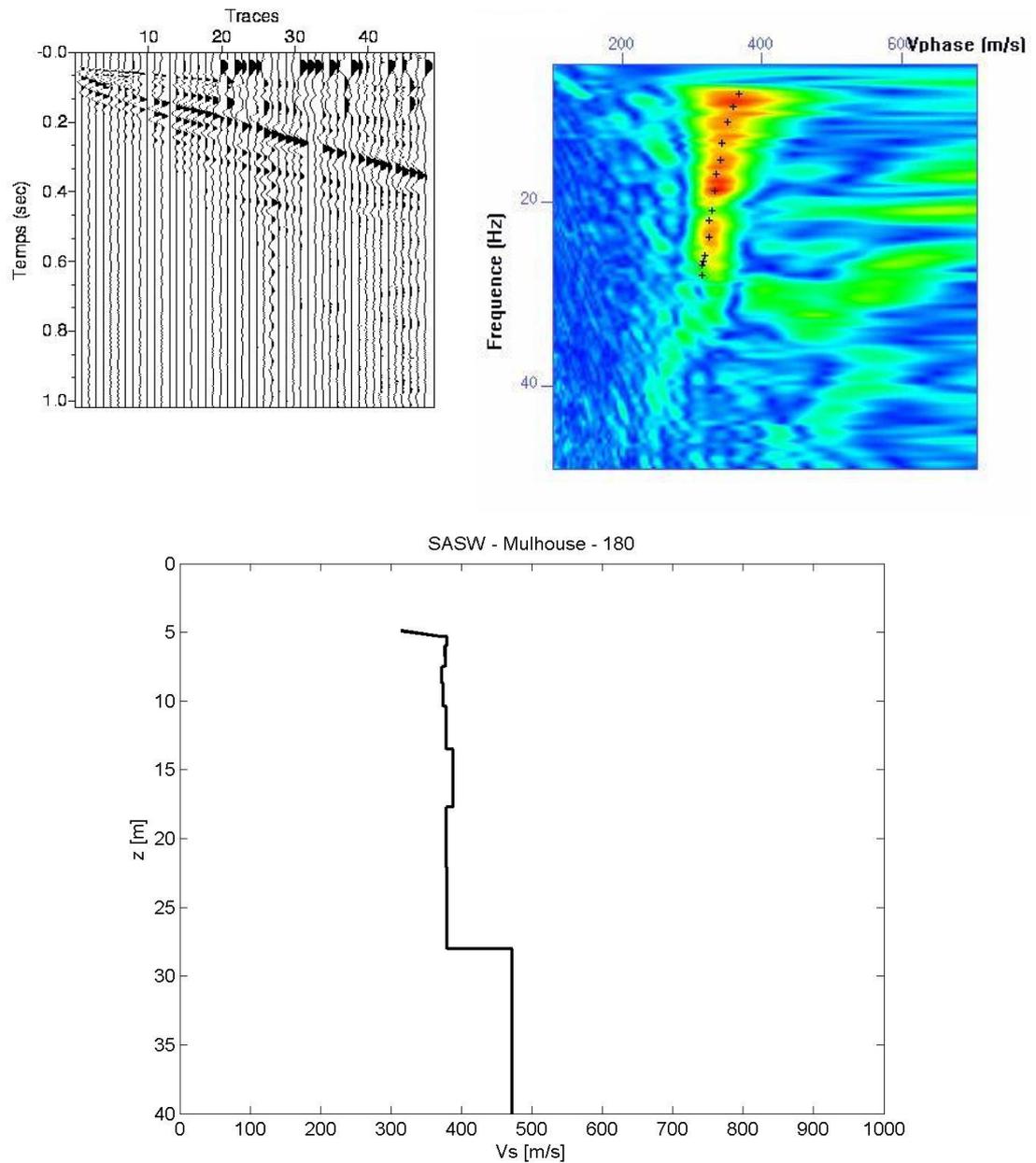


Figure 36 : Interprétation du profil SASW 180. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

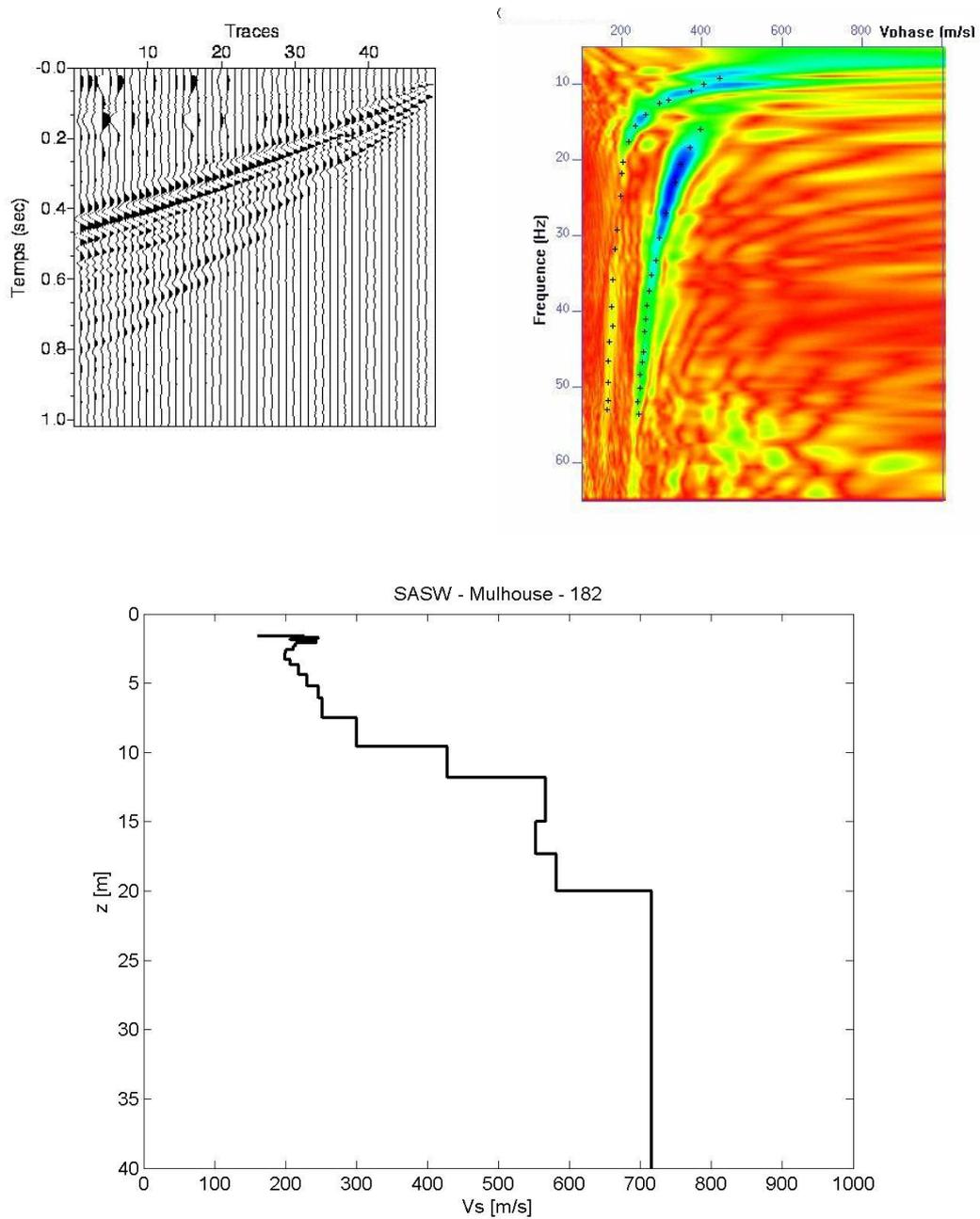


Figure 37 : Interprétation du profil SASW 182. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

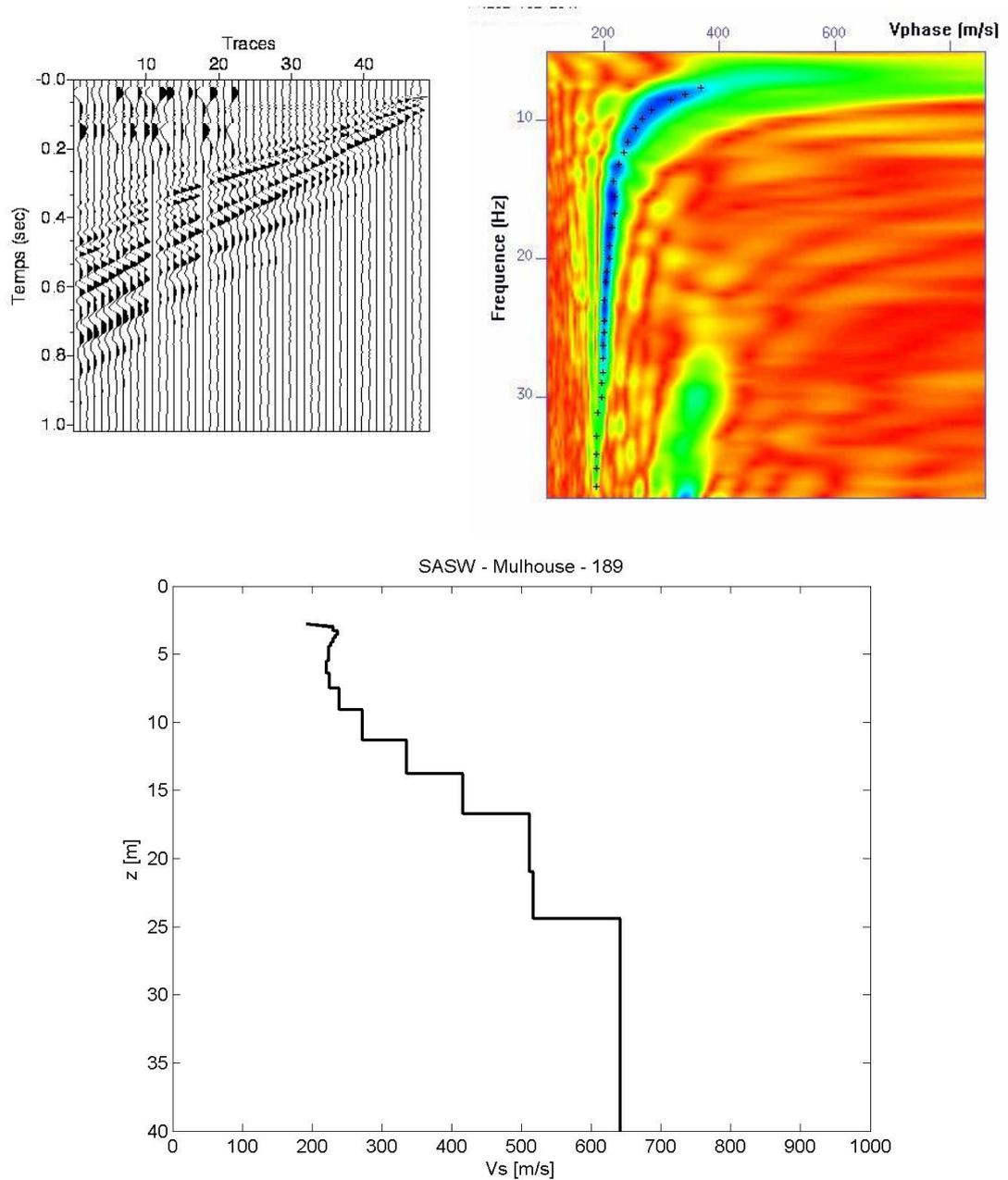


Figure 38 : Interprétation du profil SASW 189. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

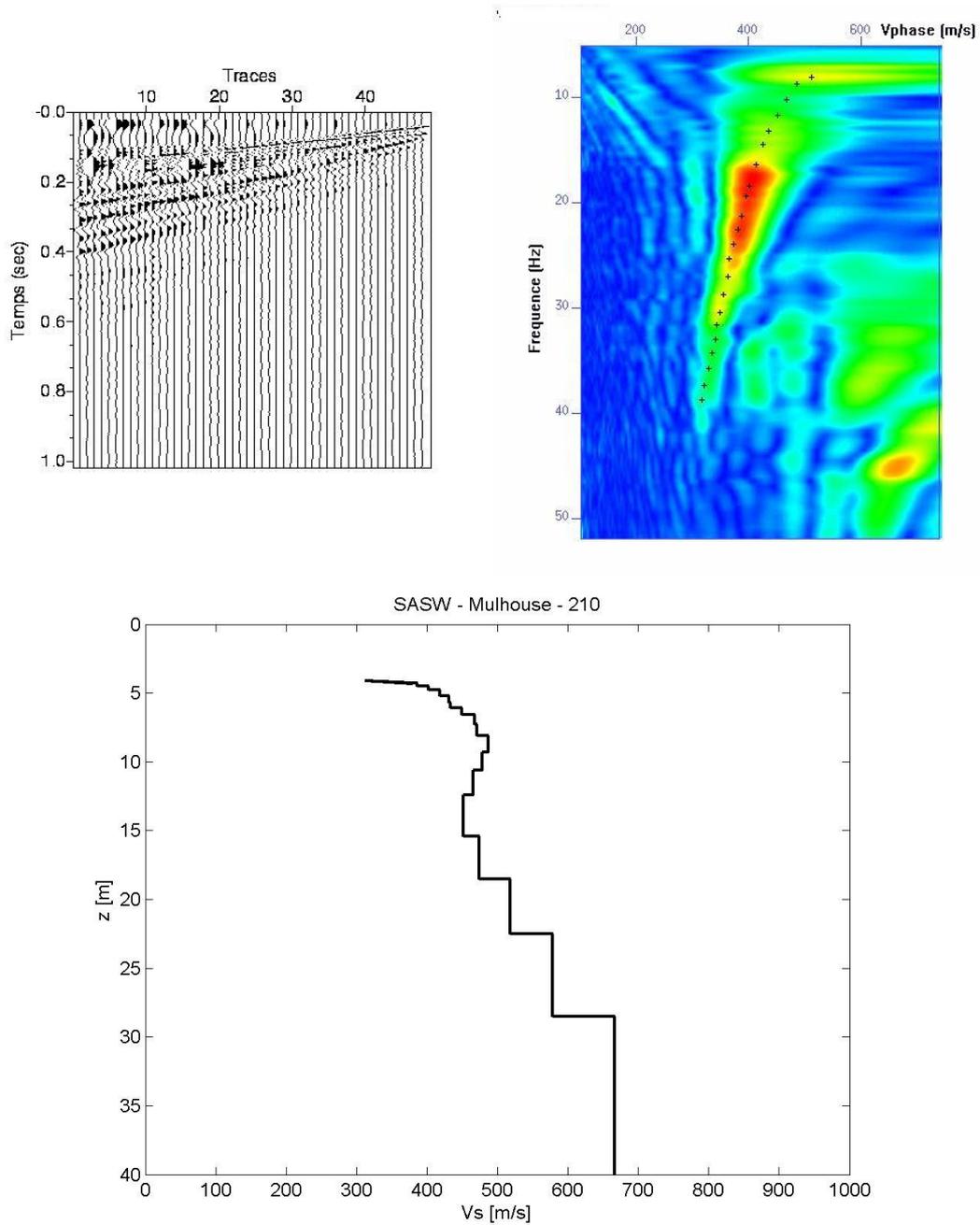


Figure 39 : Interprétation du profil SASW 210. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

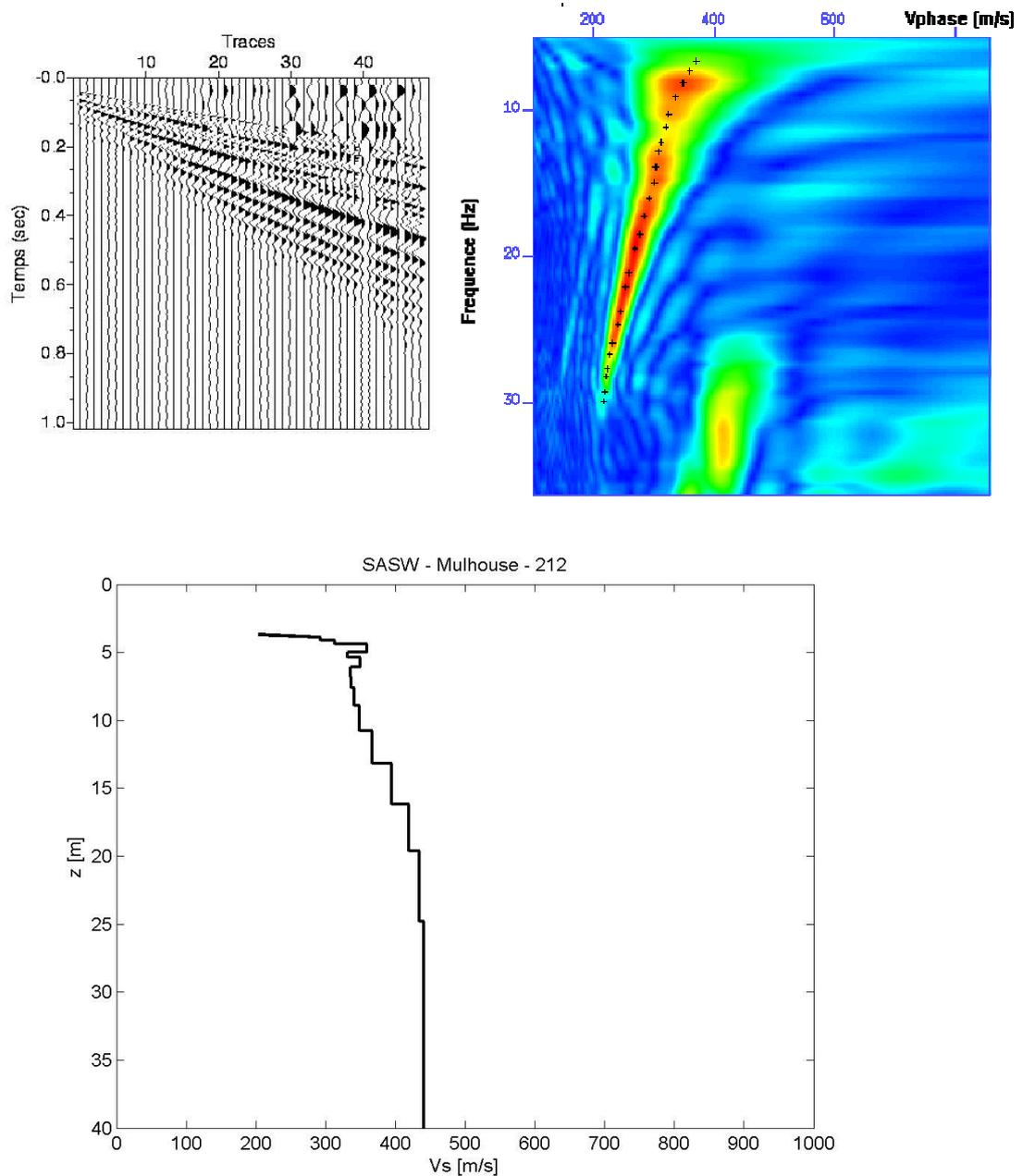


Figure 40 : Interprétation du profil SASW 212. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

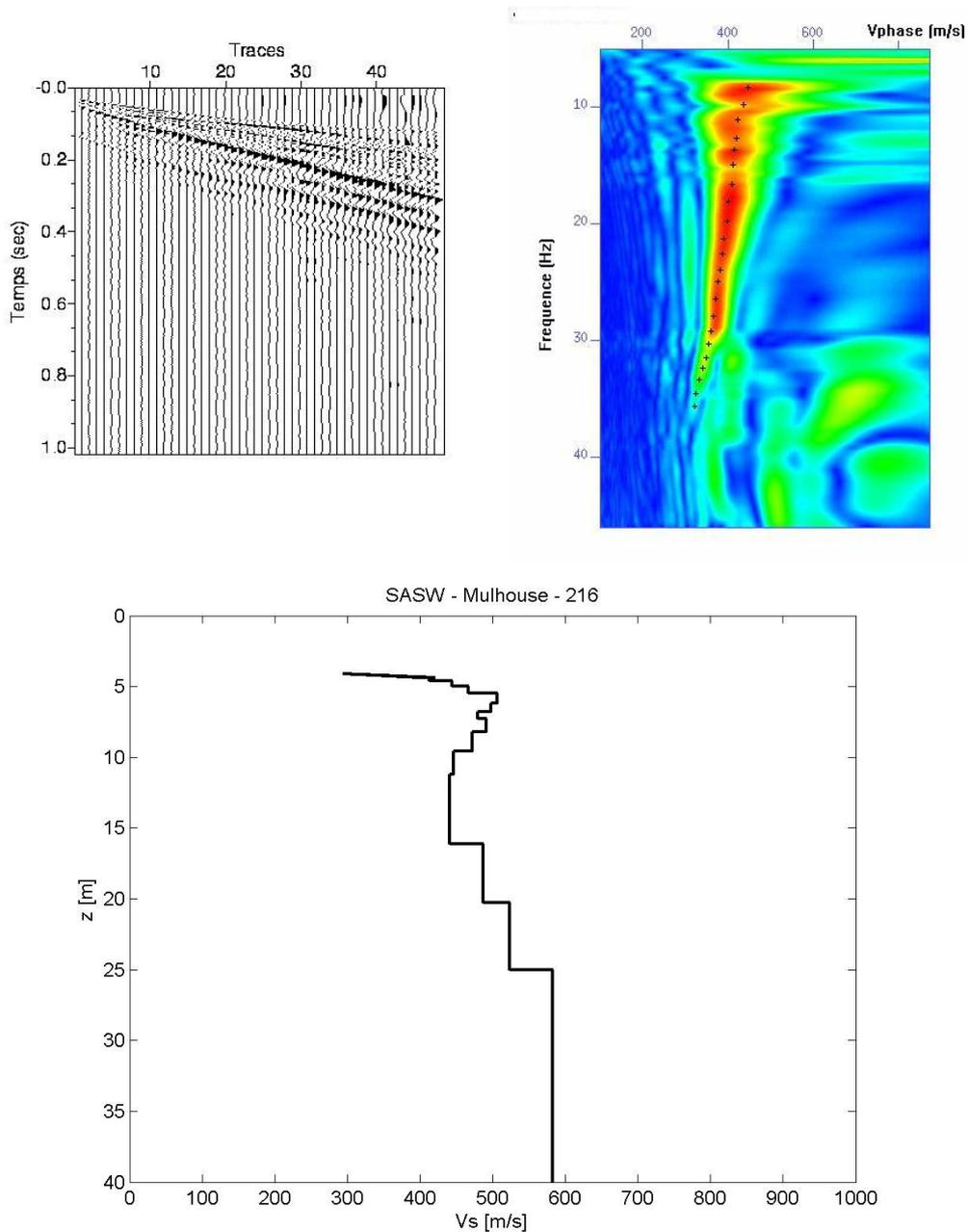


Figure 41 : Interprétation du profil SASW 216. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

## Annexe 3

### SASW – Région des Trois Frontières



Figure 42 : Localisation des profils SASW réalisés par le BRGM dans la région des Trois Frontières.

<b>Profil</b>	<b>X (Lambert II)</b>	<b>Y (Lambert II)</b>	<b>Tir direct</b>	<b>Tir inverse</b>
<b>STL01</b>	990940	2303500	143	144
<b>STL02</b>	993760	2299800	145	146
<b>STL03</b>	993360	2301360	148	150
<b>STL04</b>	992740	2302360	152	153
<b>STL05</b>	992820	2303800	154	155
<b>STL06</b>	992120	2302740	157	158
<b>STL07</b>	991610	2299150	160	161
<b>STL08</b>	991290	2297960	163	164
<b>BAS01</b>	994530	2297590	125	126
<b>BAS02</b>	994020	2296770	127	128
<b>BAS03</b>	993470	2298290	130	131
<b>BAS04</b>	990110	2296040	133	134
<b>BAS05</b>	1000289	2295794	136	137
<b>BAS06</b>	1004389	2294859	140	142
<b>BAA01EW</b>	996150	2299920	191	192
<b>BAA01NS</b>	996140	2299870	194	195
<b>BAA02EW</b>	1001442	2296268	198	200
<b>BAA02NS</b>	1001442	2296268	202	
<b>BAA03B1</b>	1003239	2297124	204	205
<b>BAA03B2</b>	1003245	2297282	206	207

*Tableau 2 : Localisation des profils SASW réalisés sur la région des Trois Frontières par le BRGM.*

## 1. France

### a. Profil STL01 (Haberhaeusen)

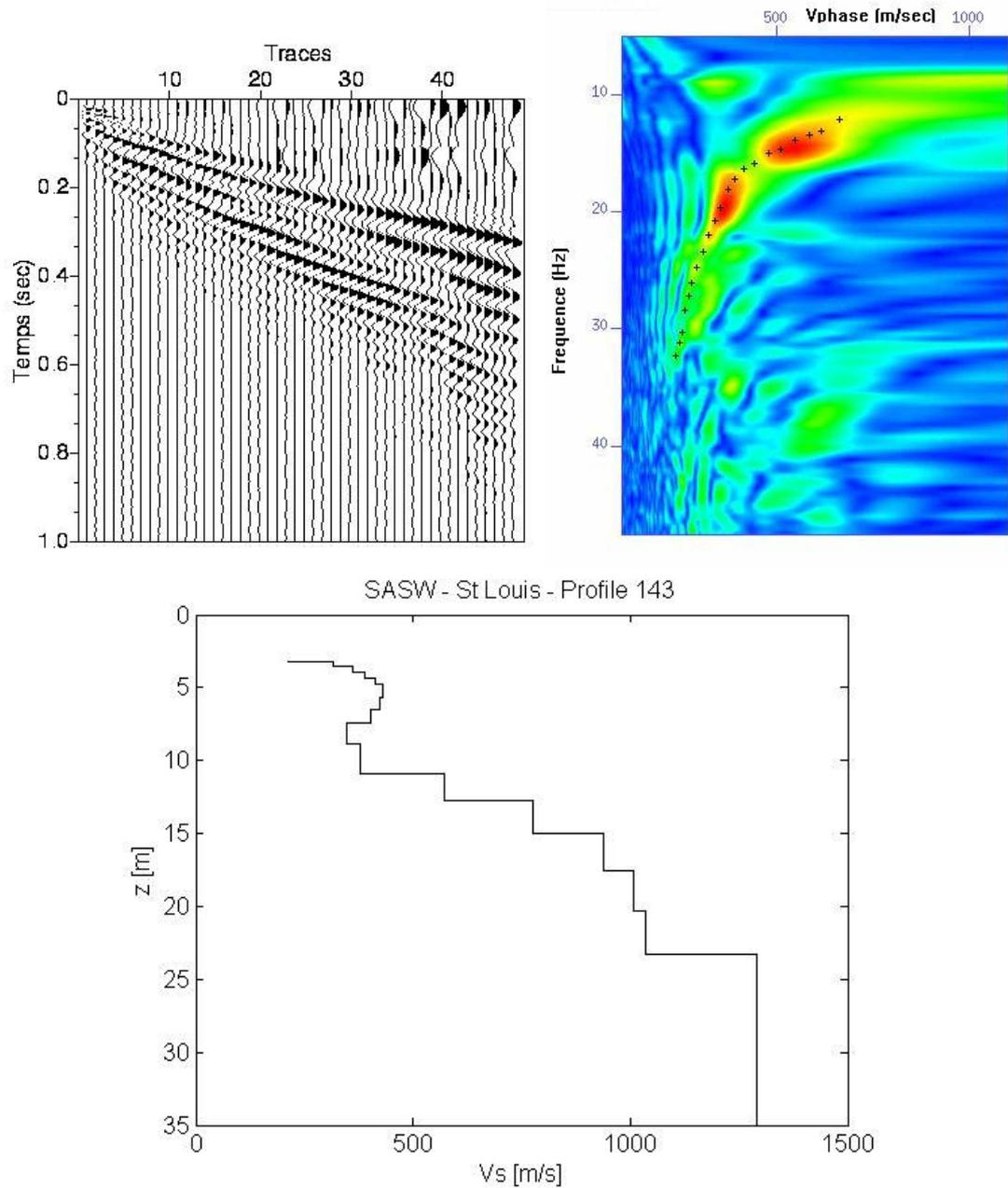


Figure 43 : Interprétation du profil SASW 143. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

**b. Profil STL02 (St Louis Stadium)**

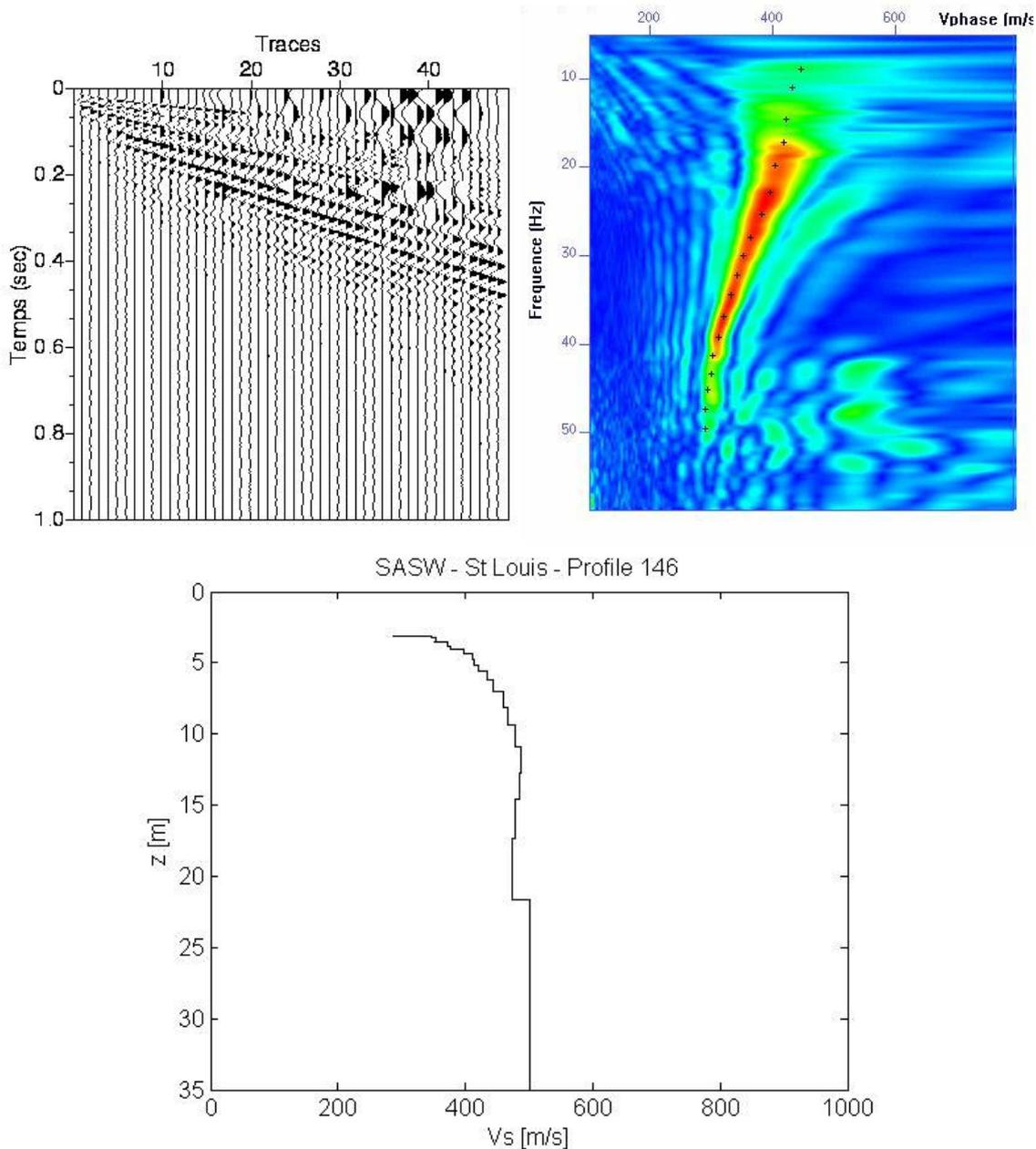


Figure 44 : Interprétation du profil SASW 146. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

**c. Profil STL03 (Huningue Stadium)**

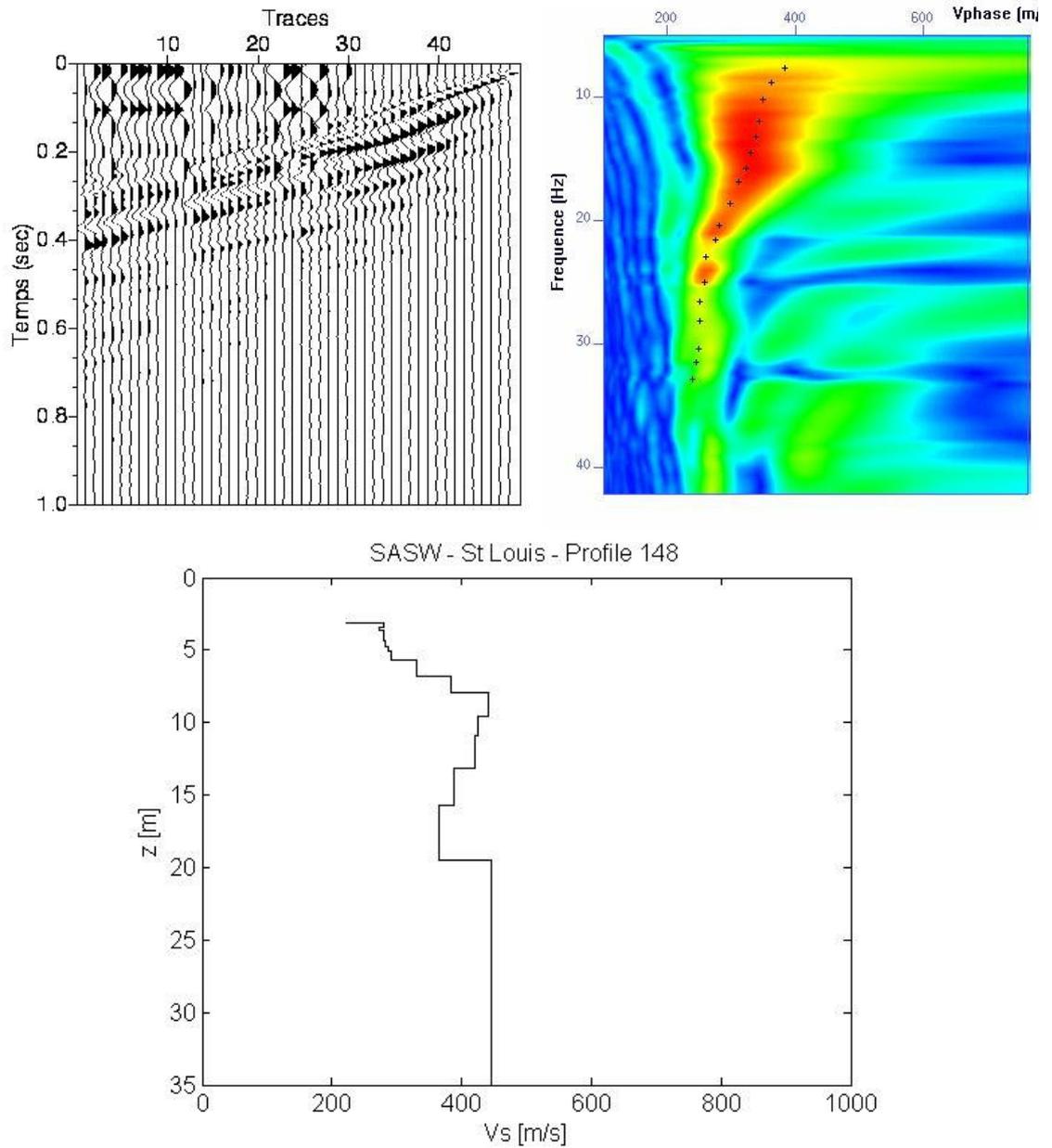


Figure 45 : Interprétation du profil SASW 148. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

**d. Profil STL04 (Village-Neuf)**

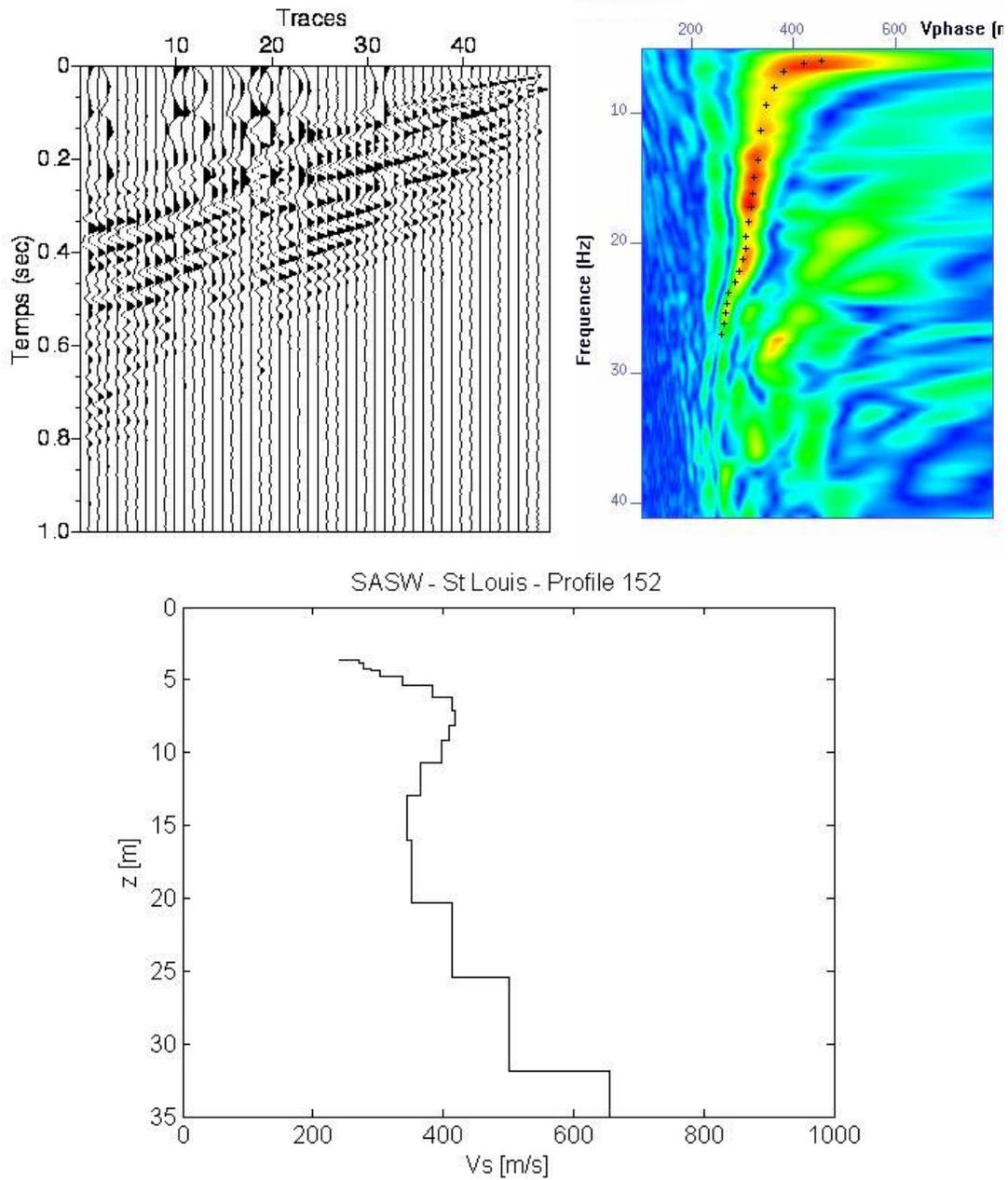


Figure 46 : Interprétation du profil SASW 152. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

**e. Profil STL05 (Kembs dam)**

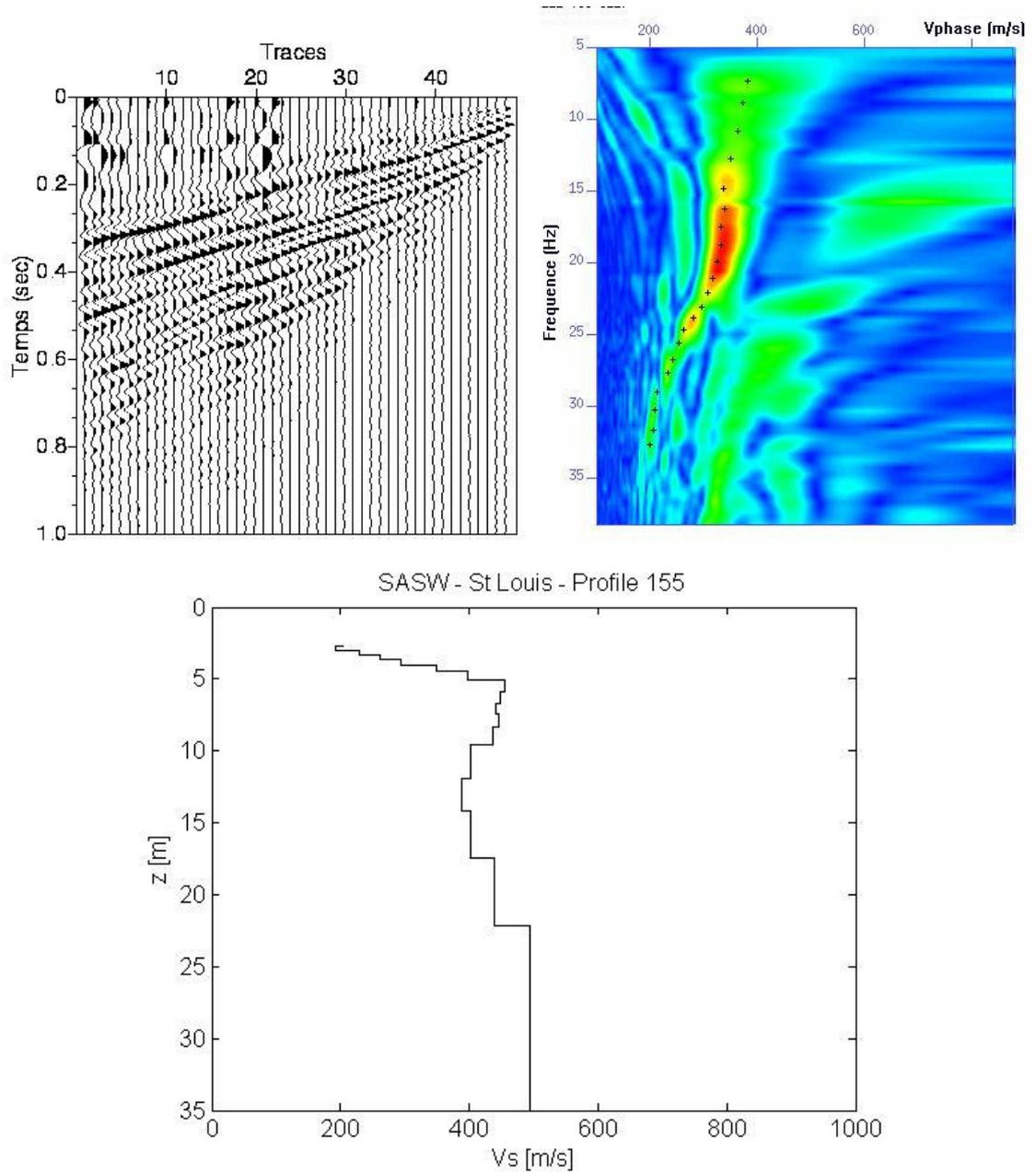


Figure 47 : Interprétation du profil SASW 155. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

**f. Profil STL06 (St Louis la Chaussée)**

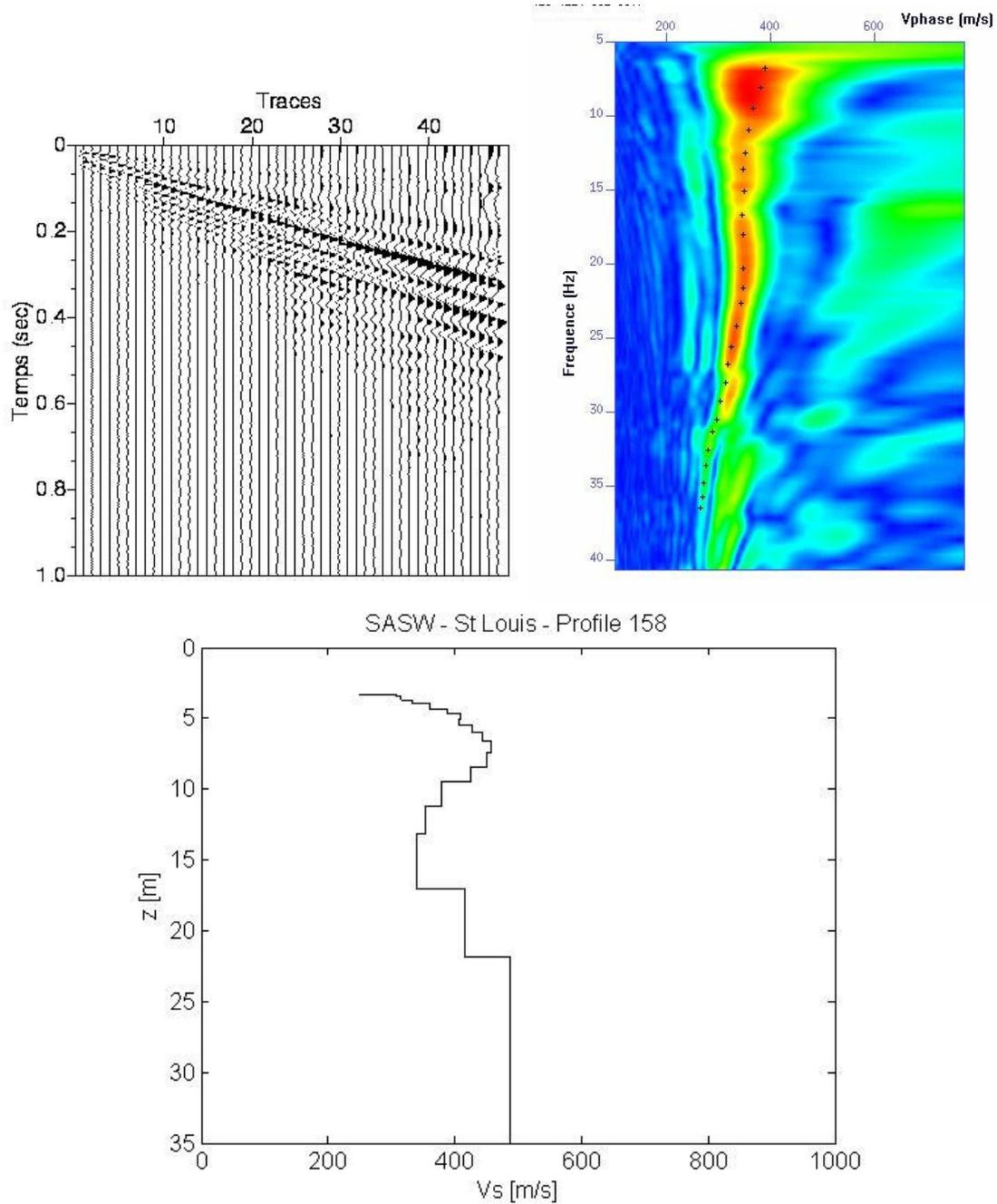


Figure 48 : Interprétation du profil SASW 158. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

**g. Profil STL07 (Bourgfelden)**

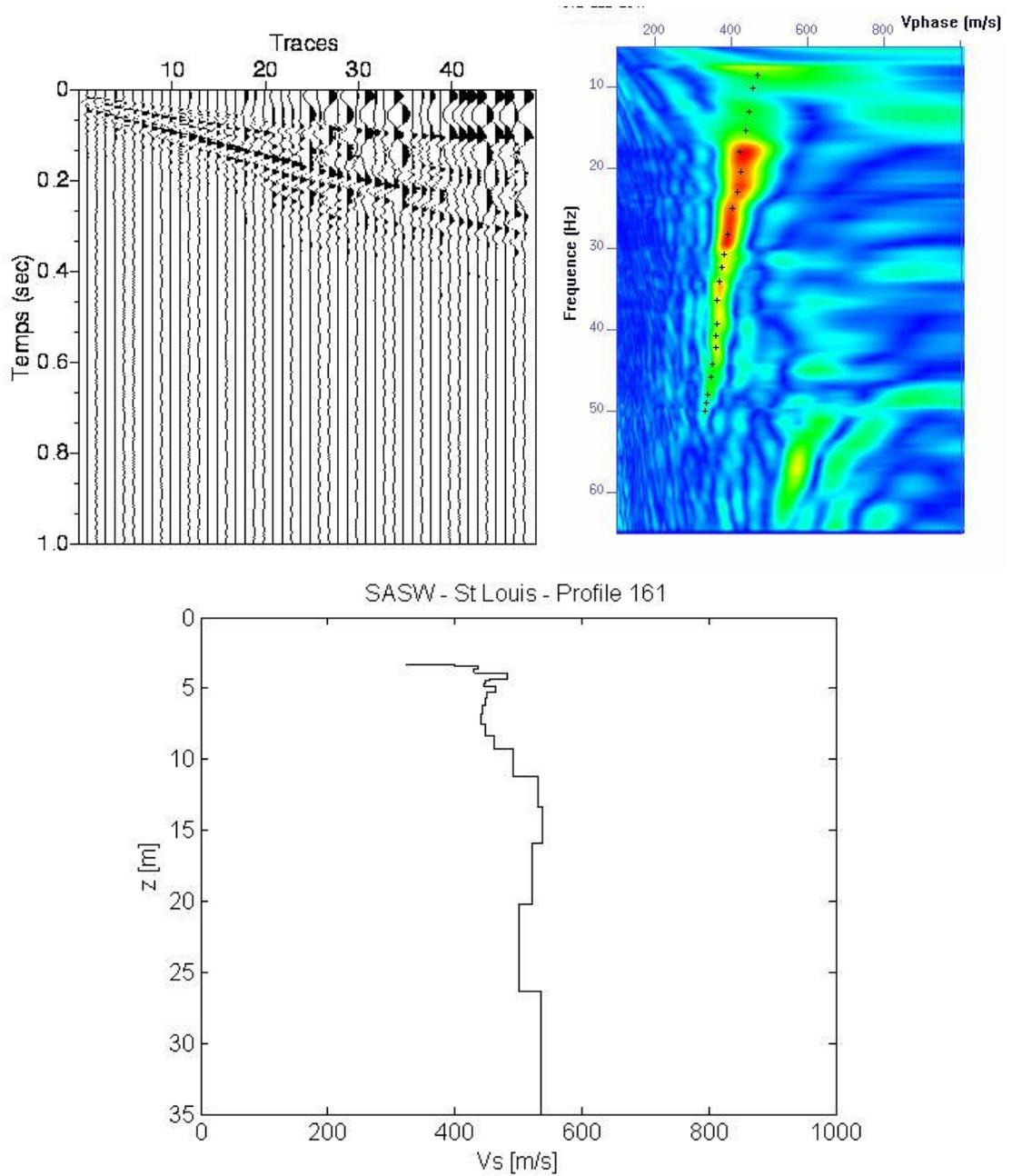
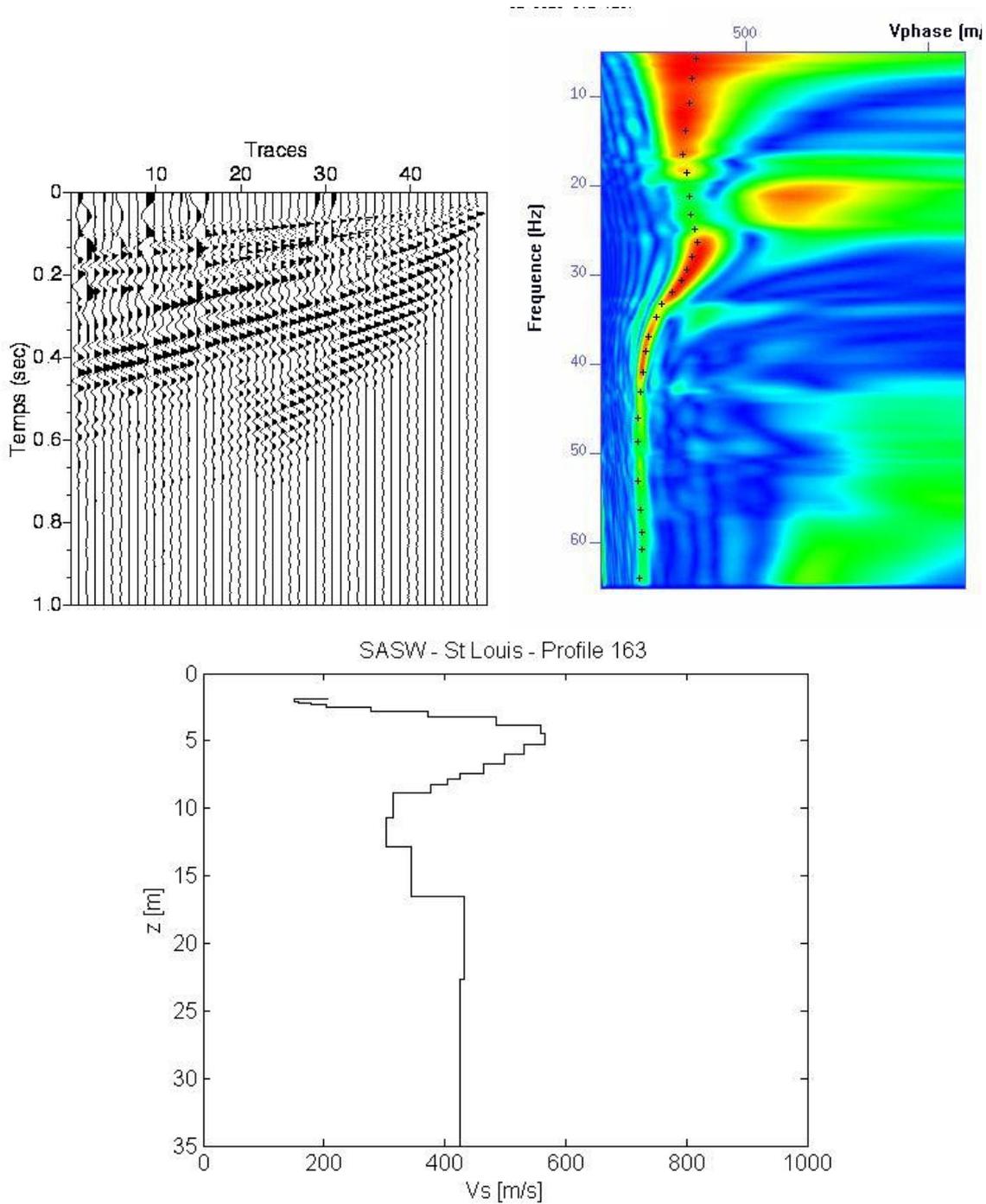


Figure 49 : Interprétation du profil SASW 161. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

***h. Profil STL08 (Hegenheim)***



*Figure 50 : Interprétation du profil SASW 163. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.*

## 2. Allemagne

### a. Otterbach : Profil BAA01EW – Tir 192

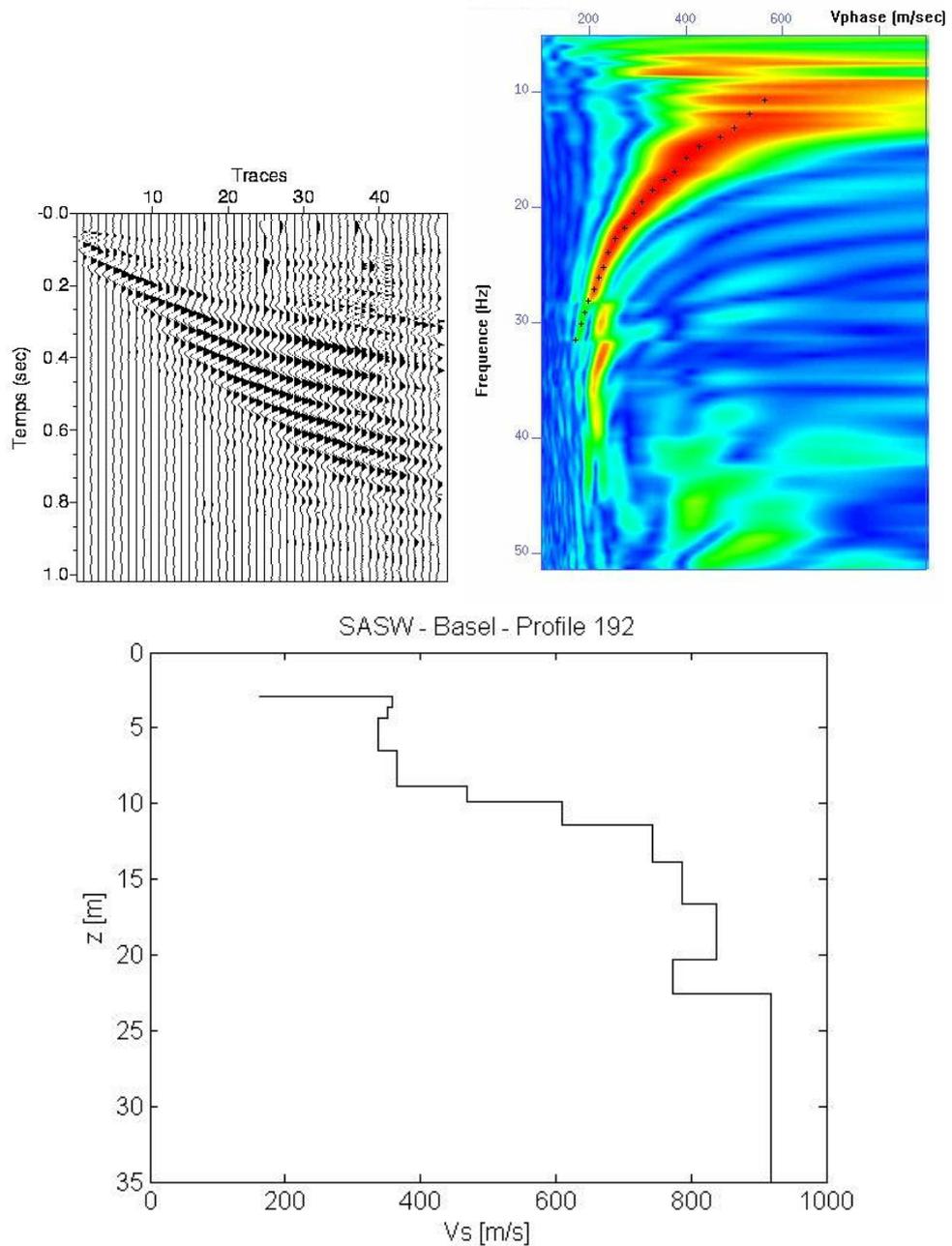


Figure 51 : Interprétation du profil SASW 192. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

**b. Otterbach : Profil BAA01EW – Tir 191**

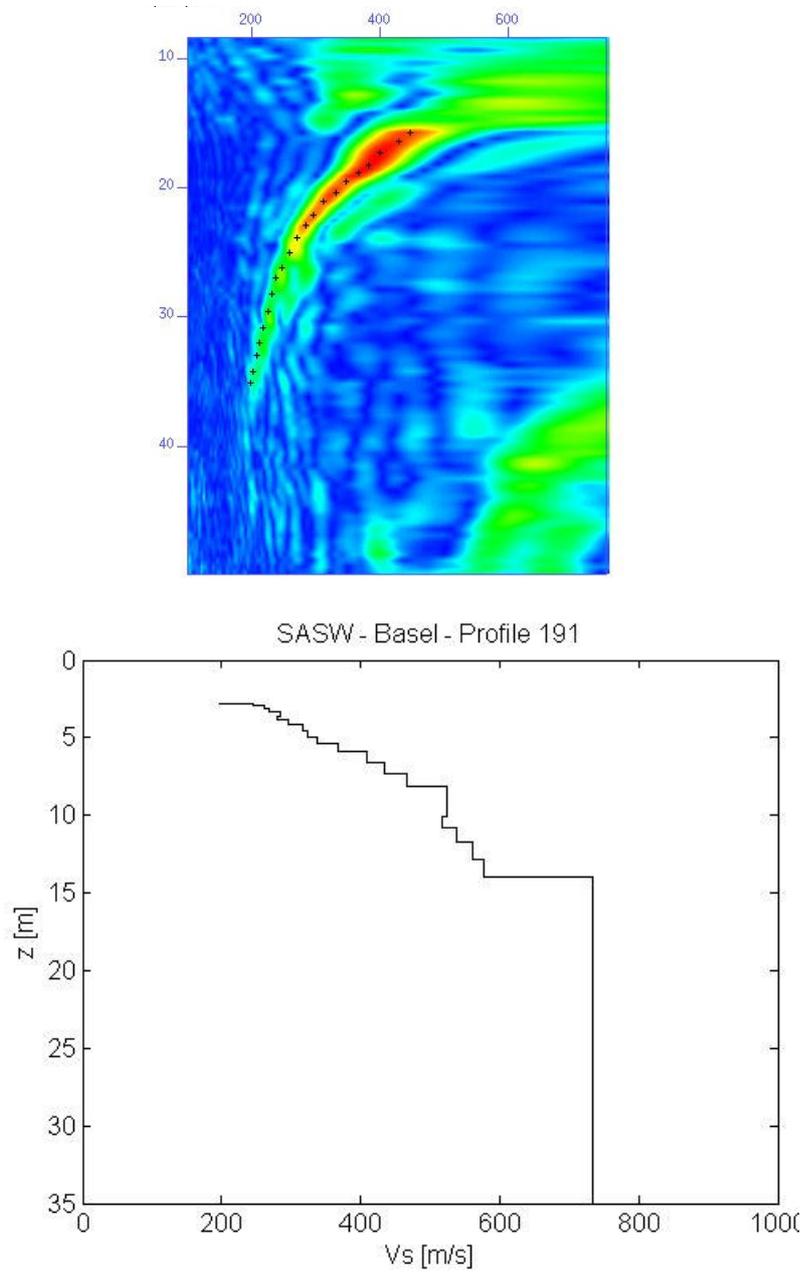


Figure 52 : Interprétation du profil SASW 191. Haut : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

**c. Otterbach : Profil BAA01NS – Tir 194**

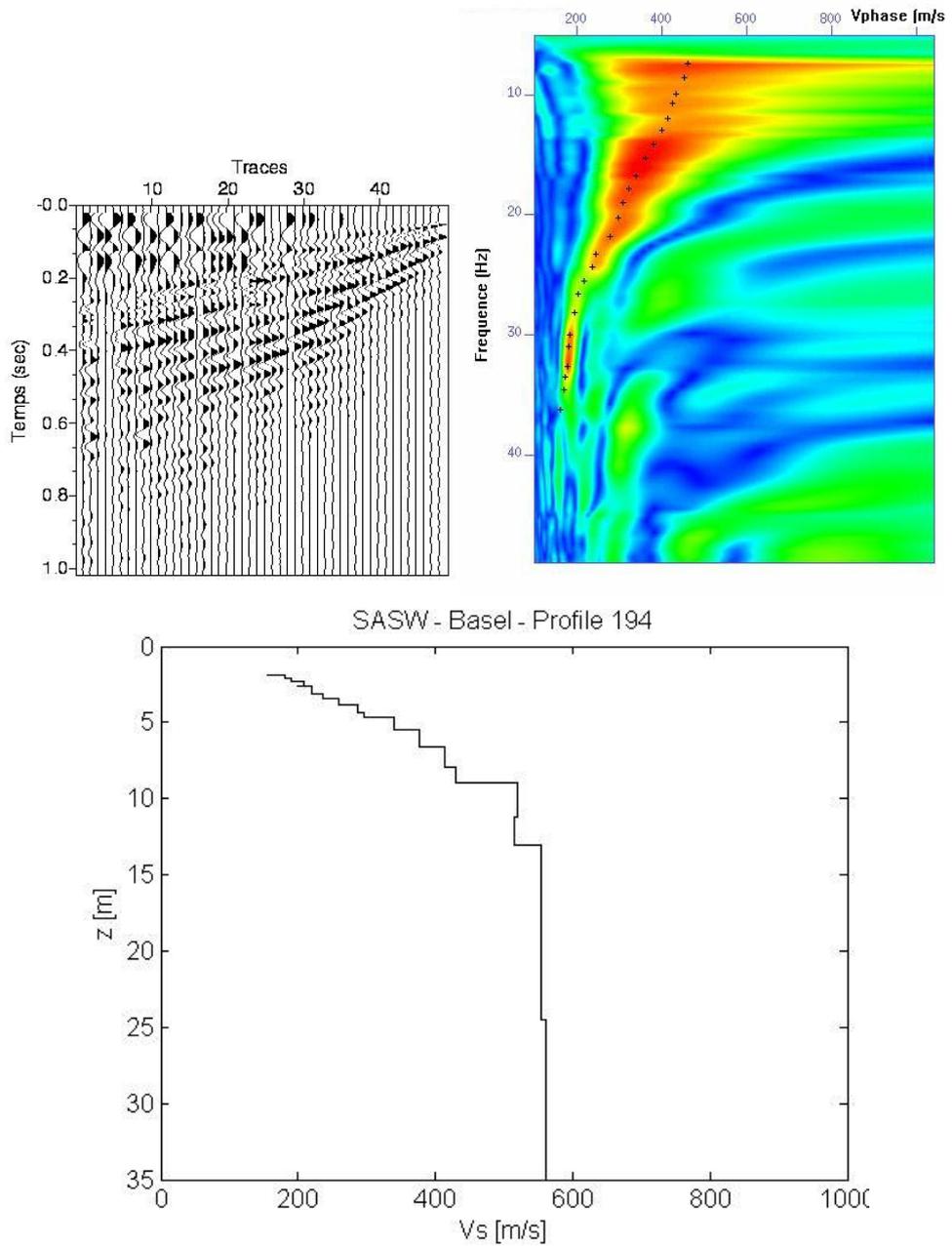


Figure 53 : Interprétation du profil SASW 194. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

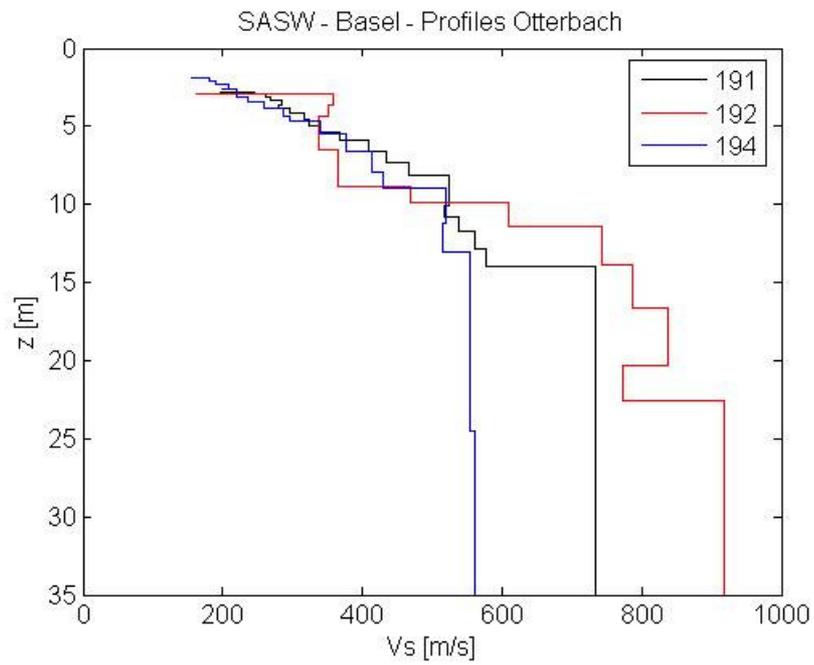


Figure 54 : comparaison des différents profils de Vs obtenus à Otterbach.

**d. Grenzach : Profil BAA02EW – Tir 200**

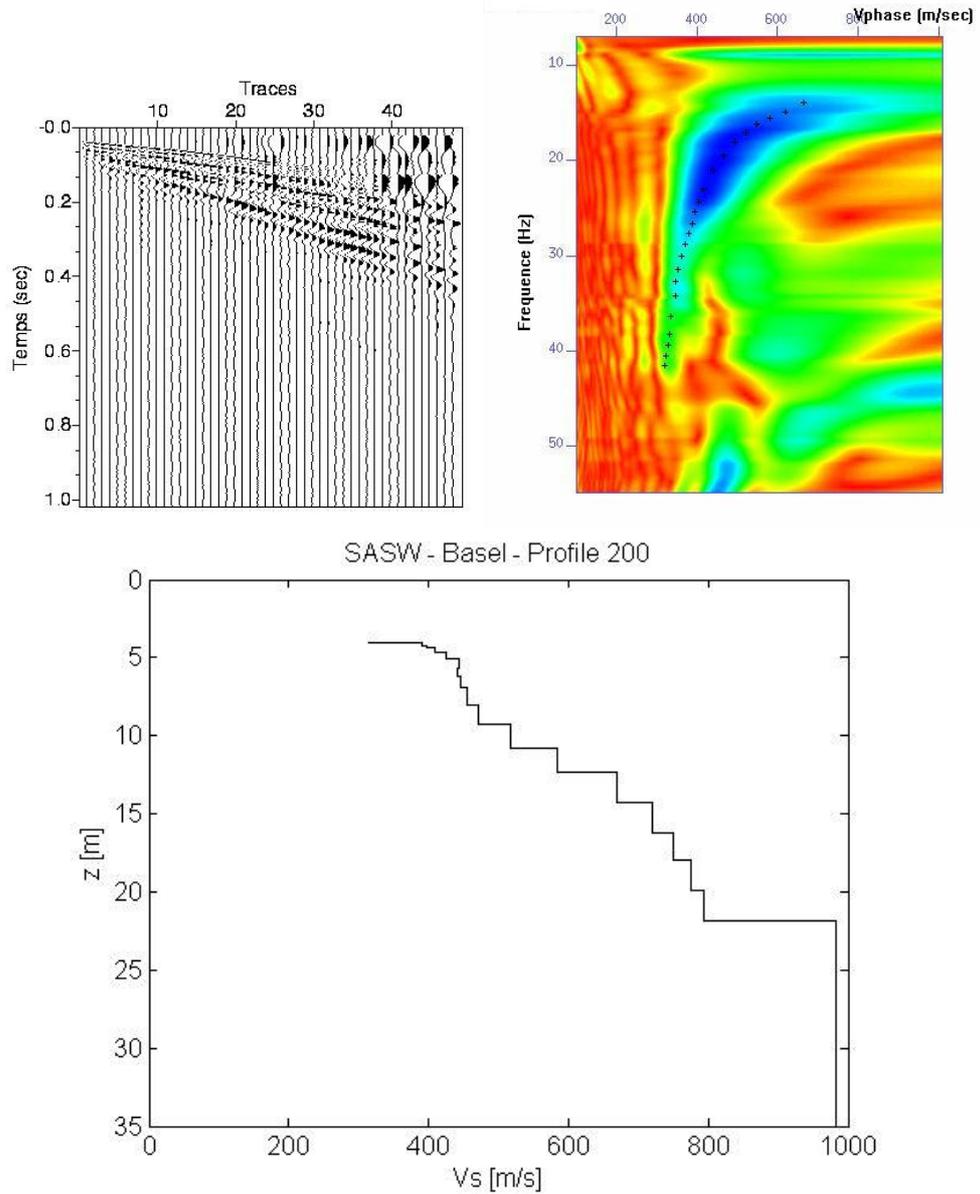


Figure 55 : Interprétation du profil SASW 200. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

**e. Grenzach : Profil BAA02NSW – Tir 202**

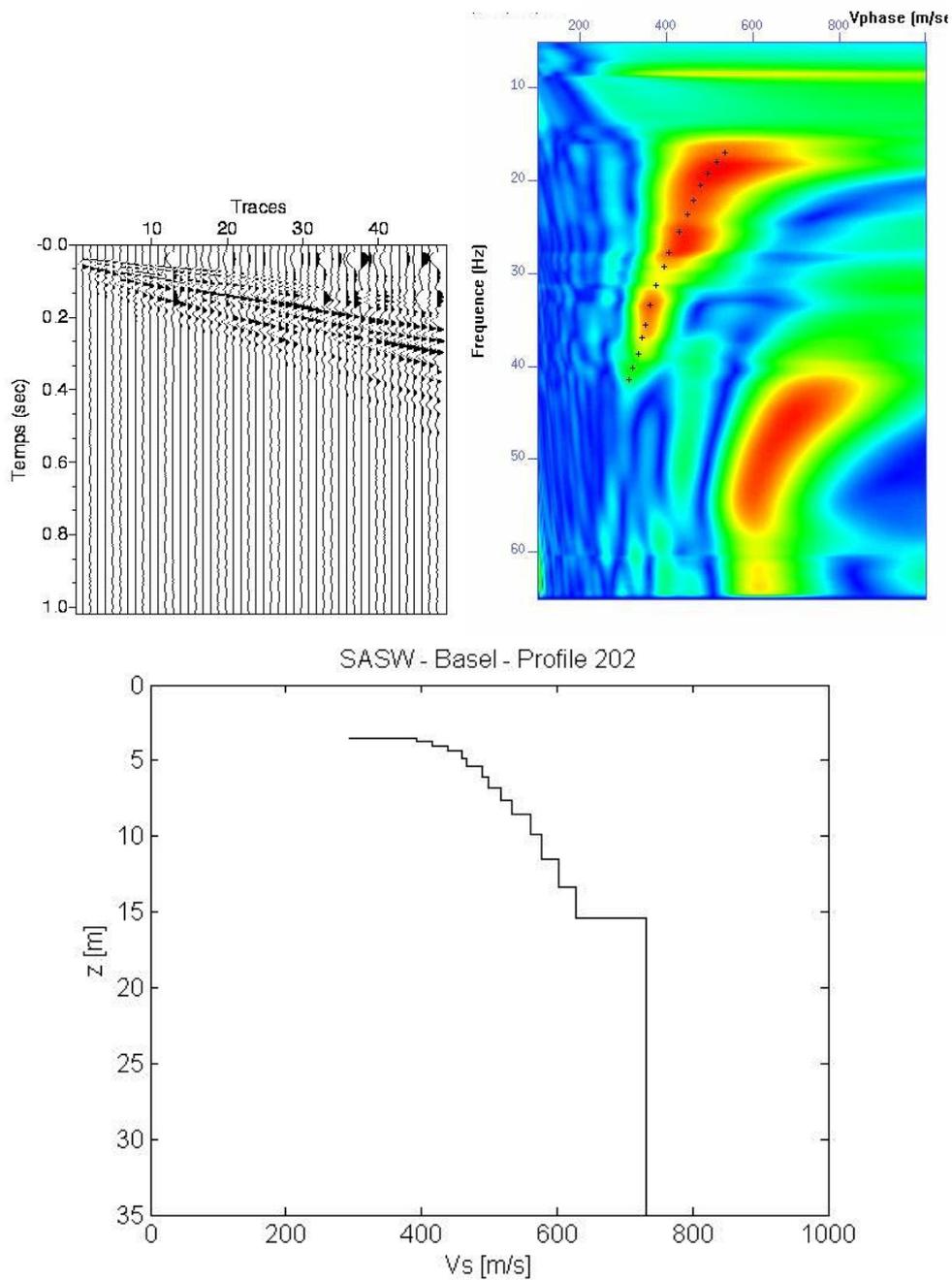


Figure 56 : Interprétation du profil SASW 202. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

**f. Wyhlen : Profil BAA03B1 – tir 205**

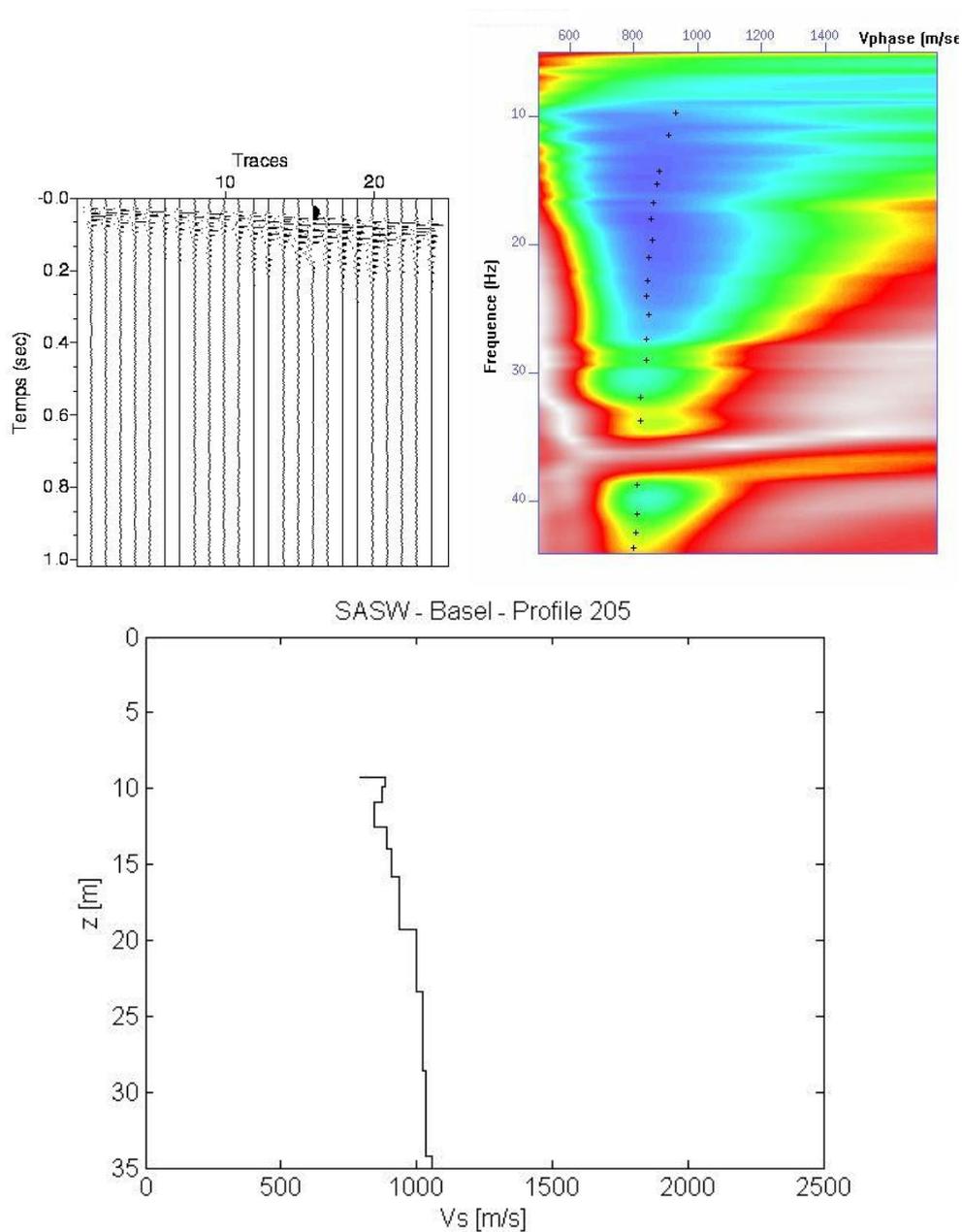


Figure 57 : Interprétation du profil SASW 205. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

### 3. Suisse

#### a. Petersplatz: profil BAS01 – Tir 125

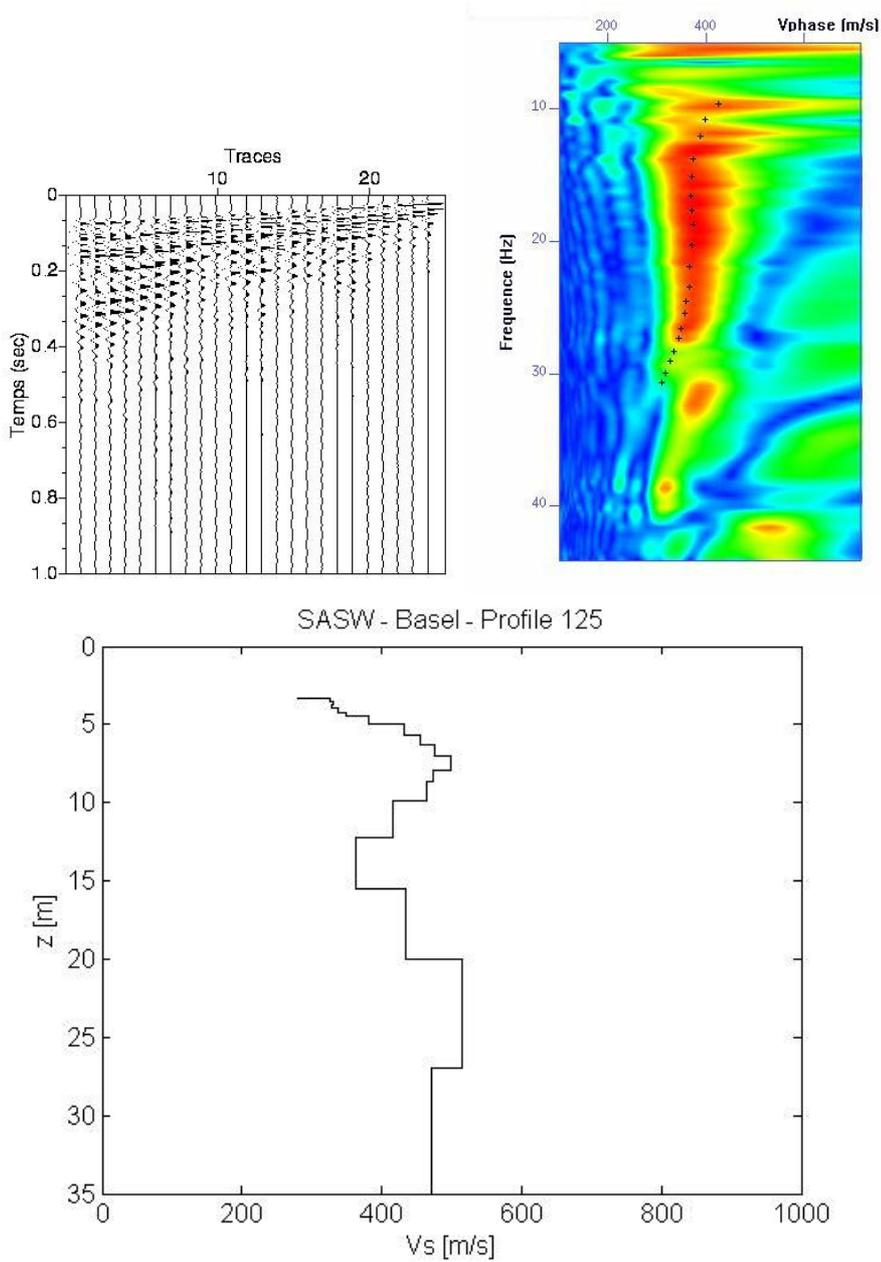
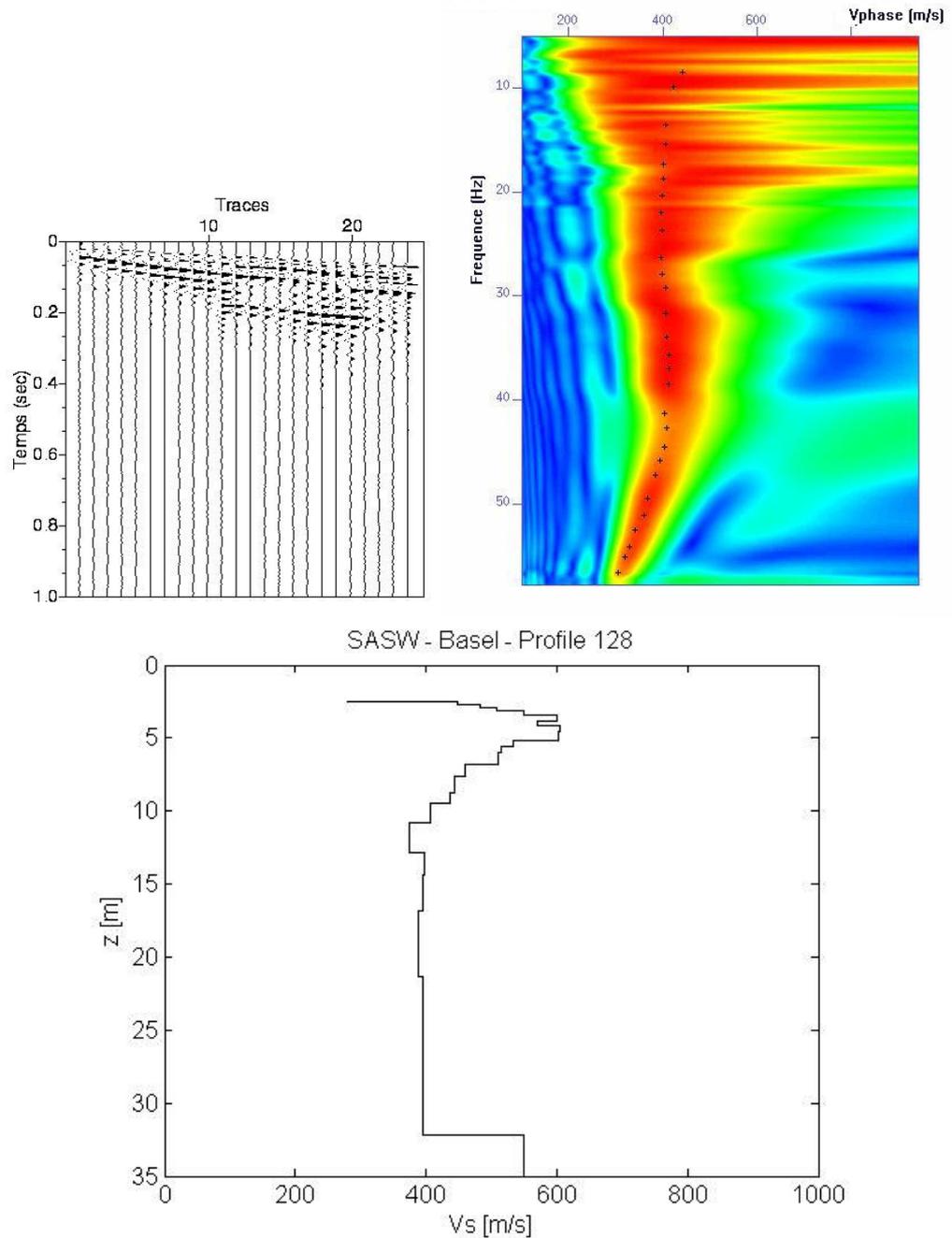


Figure 58 : Interprétation du profil SASW 125. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

***b. Schützenmattpark : Profil BAS02 – Tir 128***



*Figure 59 : Interprétation du profil SASW 128. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.*

**c. Schützenmattpark : Profil BAS02 – Tir 127**

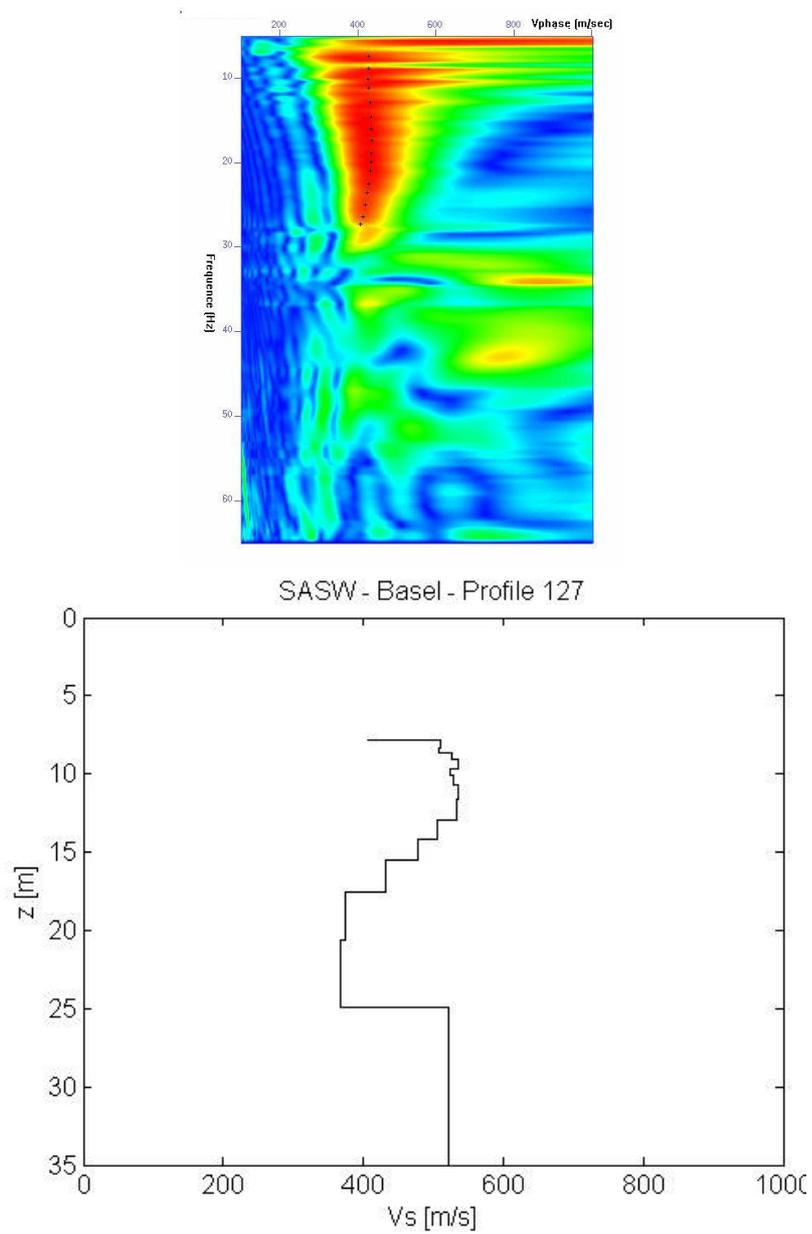


Figure 60 : Interprétation du profil SASW 127. Haut : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

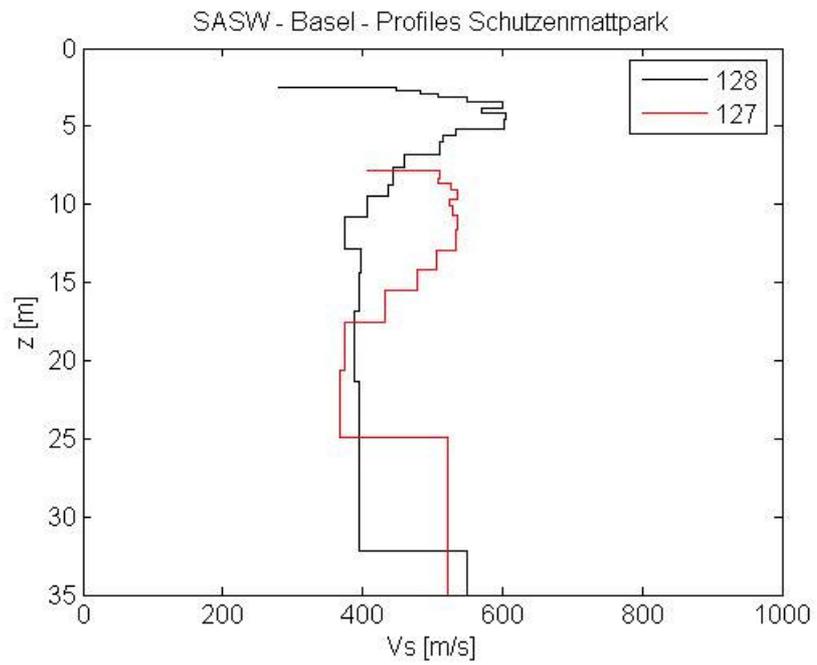


Figure 61 : comparaison des profils de Vs obtenus à Schutzenmattpark.

**d. Kannenfeldpark : Profil BAS03 – Tir 130**

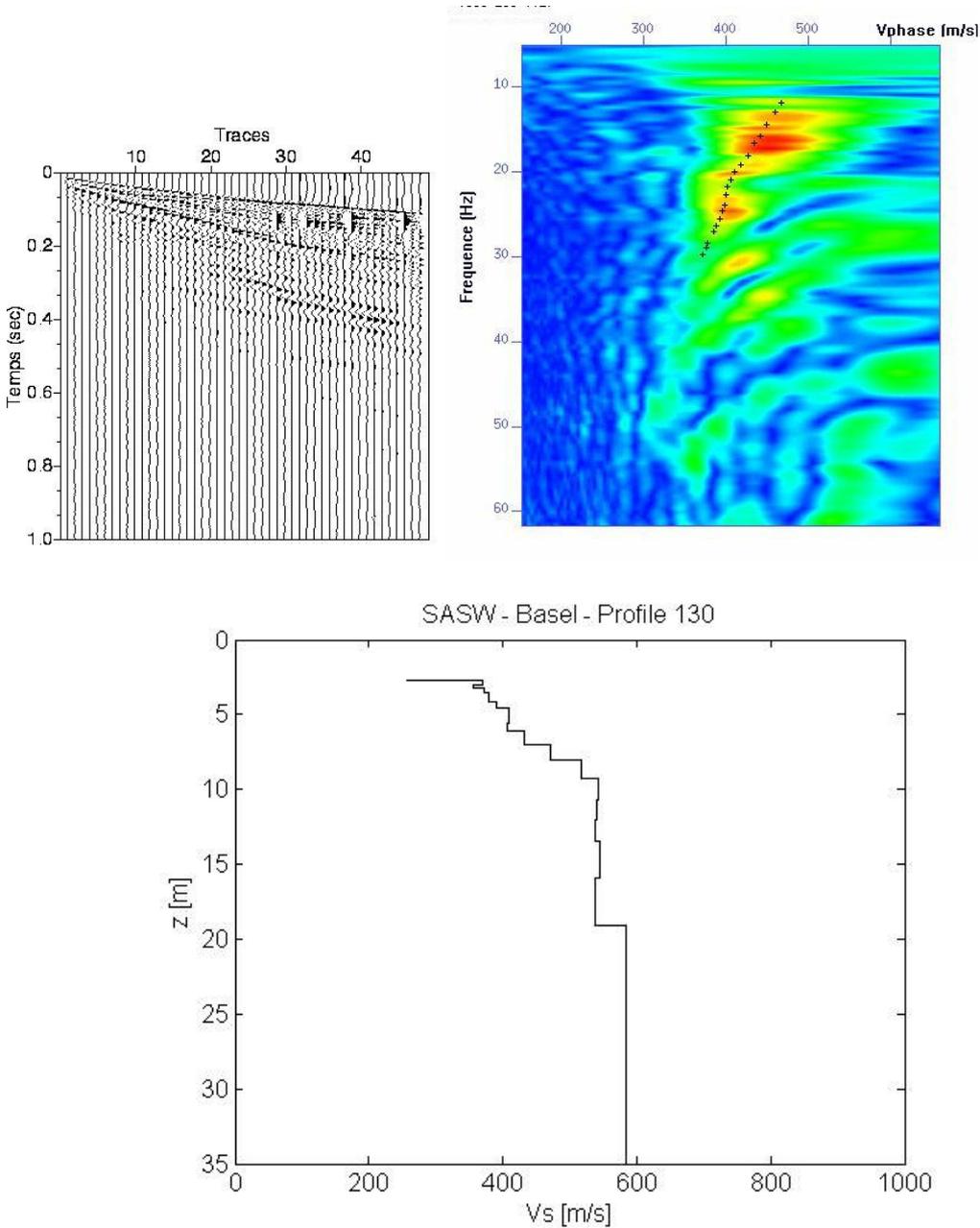


Figure 62 : Interprétation du profil SASW 130. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

**e. Allschwil : Profil BAS04 – Tir 134**

Tests réalisés :

- inversion du mode fondamental uniquement : le modèle obtenu est lisse mais on a une mauvaise résolution de la courbe de dispersion du 1er mode supérieur (voir Figure 63 et Figure 64)
- inversion multimode : meilleure résolution des deux courbes de dispersion mais le modèle final présente des variations de vitesse importantes (problèmes de stabilité). Les résultats sont présentés sur la Figure 65.
- inversion multimode avec moins de couches : résultats instables

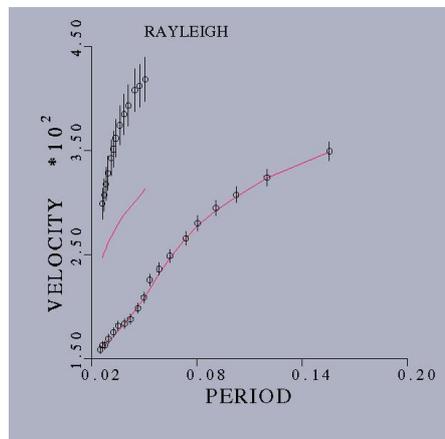


Figure 63 : les points représentent la courbe de dispersion pointée et les lignes rouges représentent les courbes de dispersion calculées à partir du modèle final.

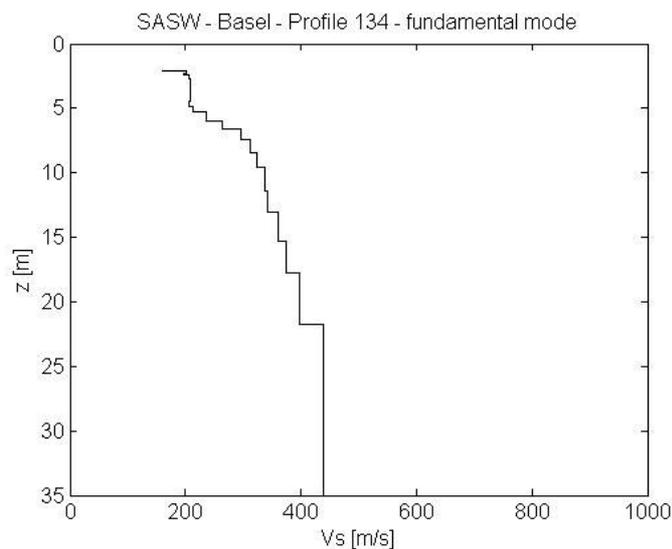


Figure 64 : profil de Vs obtenu à partir de l'inversion de la courbe de dispersion du mode fondamental uniquement.

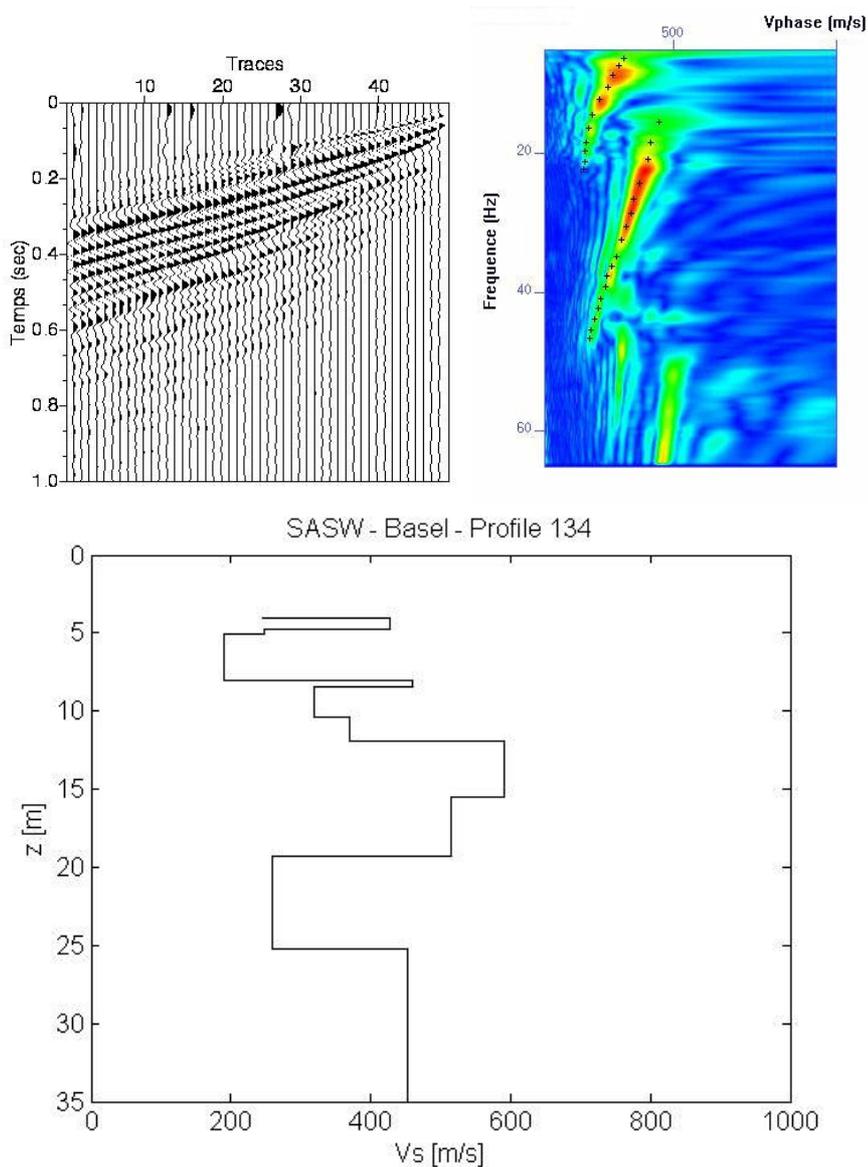


Figure 65 : Interprétation du profil SASW 134 (inversion du mode fondamental et du premier mode supérieur). Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

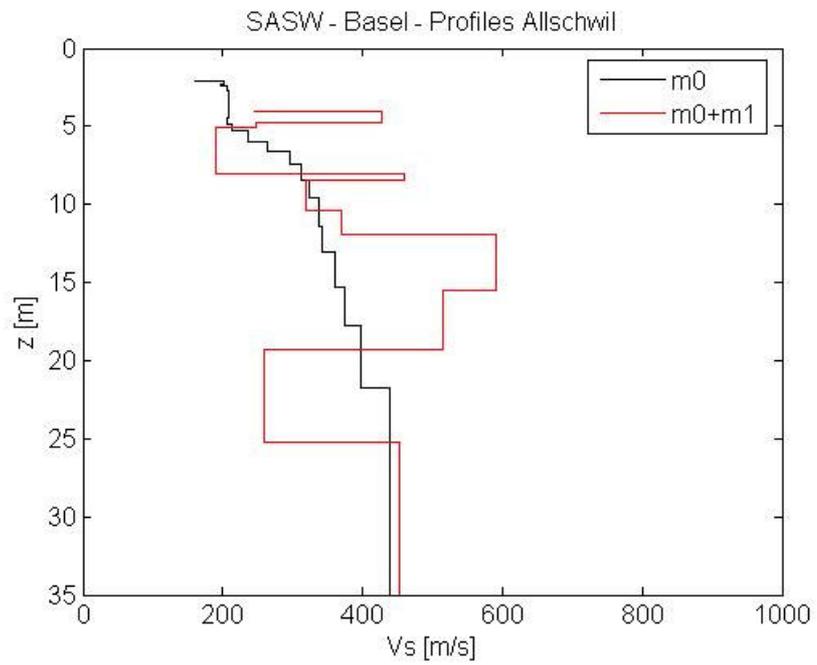


Figure 66 : comparaison des profils  $V_s$  obtenus par inversion du mode fondamental ( $m_0$ ) uniquement et des deux premiers modes ( $m_0$  et  $m_1$ ).

**f. SMZA (près de Waldhaus) : Profil BAS05 – Tir 137**

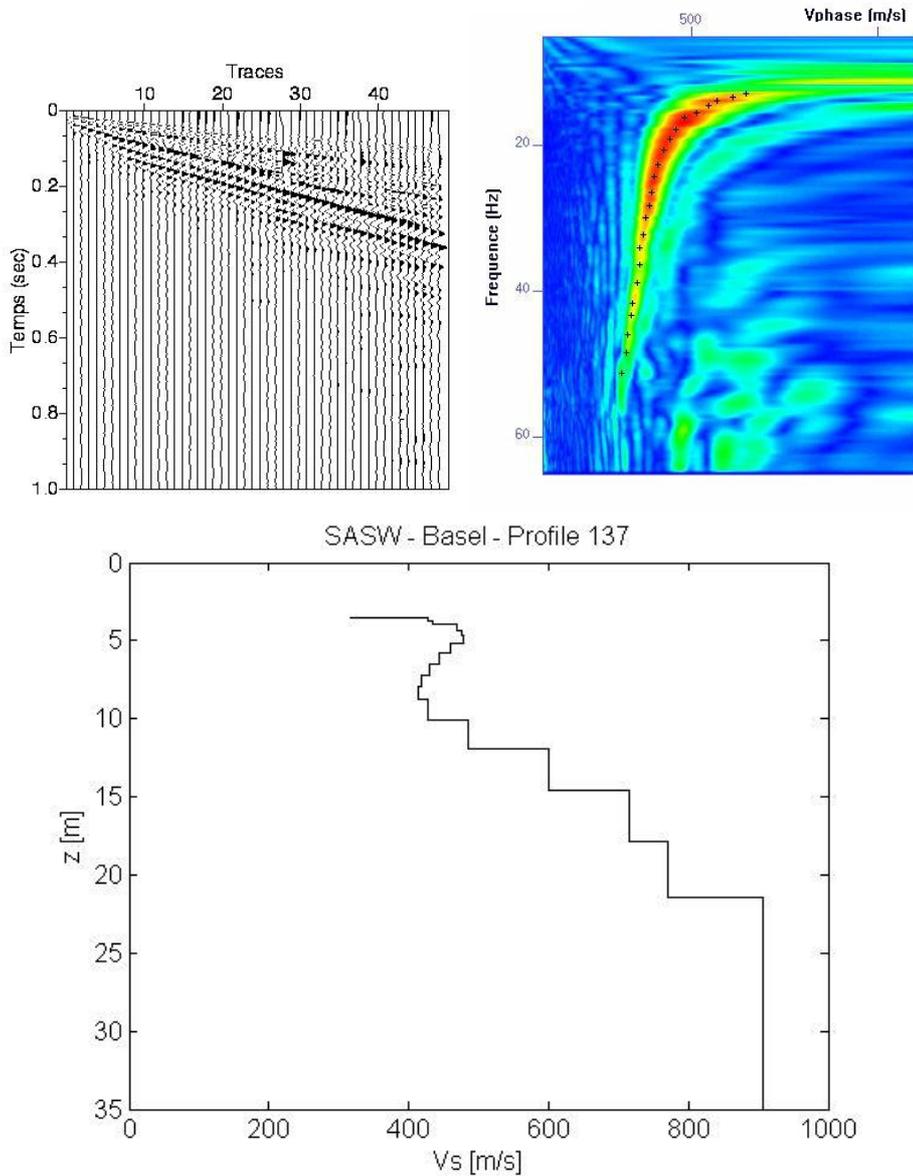
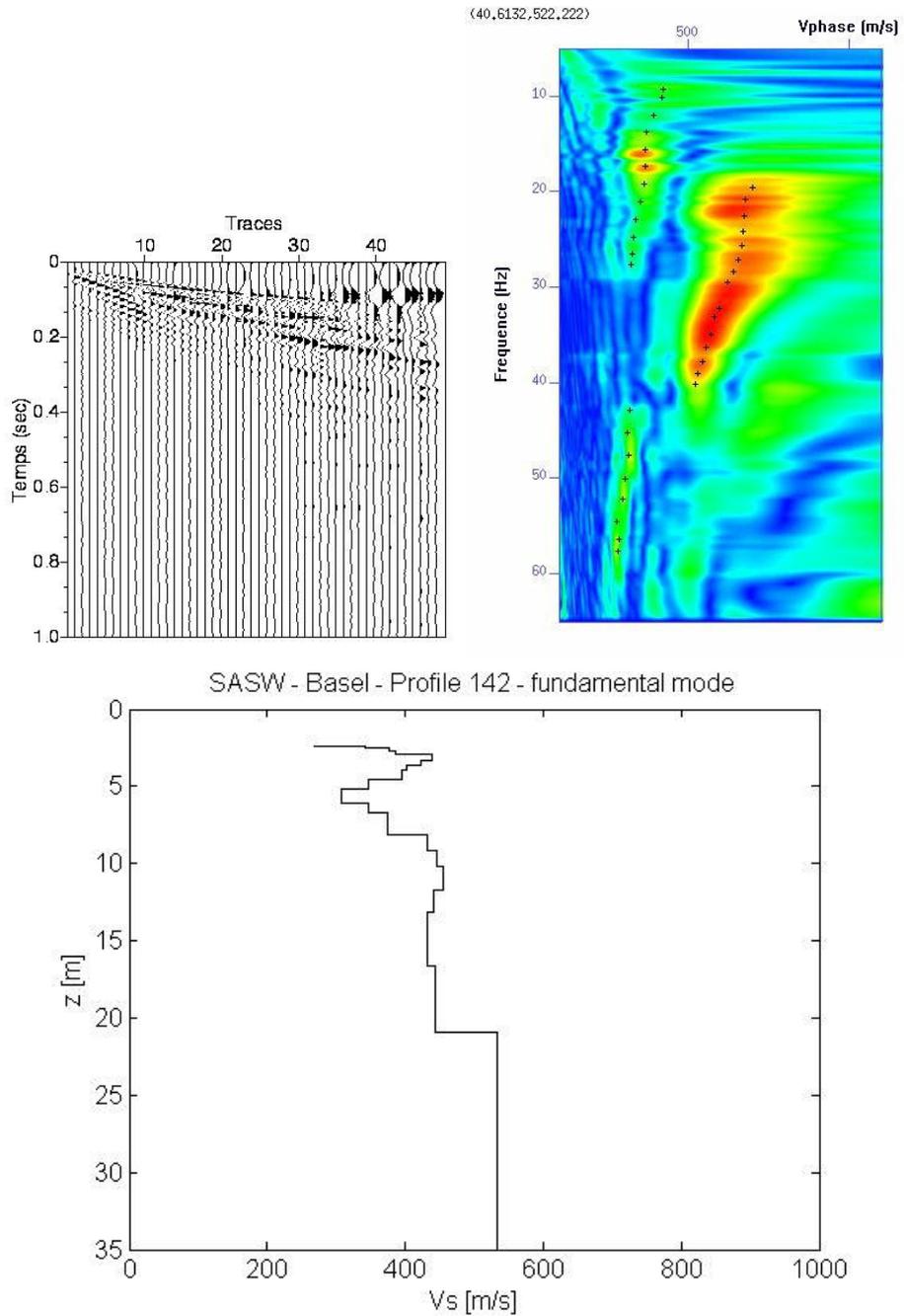


Figure 67 : Interprétation du profil SASW 137. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.

***g. Augusta Rica : Profil BAS06 – Tir 142***



*Figure 68 : Interprétation du profil SASW 142. Haut, gauche : traces. Haut, droite : diagramme de dispersion et courbe de dispersion pointée. Bas : profil obtenu après inversion.*



**Centre scientifique et technique  
Service ARN/RIS**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34