

DOCUMENT PUBLIC

*Réseau accélérométrique du Fossé rhénan :
mesures H/V*

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2001-RIS-108

P. Sabourault
avec la collaboration de
P. Dominique, M. Imbault, B. Le Brun, G. Richalet

juin 2001
BRGM/RP-51015-FR



Mots clés : H/V, Réseau accélérométrique, Bruit de fond, Fossé rhénan, Effets de site.

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

Sabourault P., Dominique P., Imbault M., Le Brun B., Richalet G. (2001) – Réseau accélérométrique du Fossé rhénan supérieur : mesures H/V. BRGM/RP-51015-FR, 60 p., 33 fig., 4 tabl.

Synthèse

Dans le cadre d'un projet transfrontalier subventionné par la Communauté Européenne (programmes INTERREG RHIN SUPERIEUR CENTRE SUD et PAMINA), un réseau de stations est en cours d'installation dans le Fossé rhénan supérieur. Ce projet est piloté par les organismes chargés de la surveillance sismique (Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg EOST et le Geologisches Landesamt Baden-Wuerttemberg de Freiburg).

Pour aider à l'interprétation des données acquises par ces stations, il est important de savoir si les sols sur lesquels elles sont installées sont sujets ou non à des effets de site, c'est-à-dire à une modification du signal sismique par la géologie ou la topographie. En l'absence de données géotechniques précises disponibles au droit de chacune des stations, la méthode H/V permet d'estimer la réponse et plus particulièrement la fréquence propre des sites sur lesquels reposent les stations accélérométriques. Nous avons donc effectué des mesures de bruit de fond sismique permettant le calcul du rapport spectral H/V durant le printemps 2001 pour sept sites installés ou projetés.

Pour chacun des sites instrumentés, huit points de mesures ont été effectués autour de la station et un point complémentaire a été réalisé au droit de chaque station.

L'ensemble des données a été traité, analysé et rassemblé pour tenter d'estimer pour chacune des stations la fréquence propre correspondant à un effet de site. Nous avons essayé de corrélérer et de confronter ces résultats expérimentaux avec les données issues de la géologie, notamment celles issues du rapport de C. Robelin (1999).

Il est à noter que ces mesures sont issues d'une méthode qui met en évidence les différences de réponse entre les composantes horizontales et verticales du bruit de fond sismique dans le milieu traversé. Dans de nombreux cas où un effet de site est fortement suspecté, en raison d'une augmentation significative du rapport H/V et ceci sur tous les points de mesure autour et au droit d'une même station, il convient d'être prudent quant à l'interprétation de la fréquence mise en évidence. En effet, une source de bruit locale à proximité des points d'enregistrement peut perturber, voire complètement transformer les résultats.

Suite à cette expérience, la présence d'effets de sites lithologiques est fortement suspectée pour les stations de Bollwiller, Brunstatt, Hésingue, Soufflenheim et Strasbourg.

La station accélérométrique de Saint-Marie-aux-Mines, située en fond de galerie de mines, ne semble pas présenter les caractéristiques d'une station en champ libre. Le rapport des composantes spectrales horizontales entre les stations en surface (à l'aplomb de la station et à l'entrée de la galerie) et la station en fond de galerie est proche de 2 sur toute la bande fréquentielle étudiée (0,5 Hz - 30 Hz).

Les résultats fournis par les enregistrements réalisés aux Fournets (Doubs) et à Hésingue semblent difficilement exploitables suite à des problèmes techniques lors de l'enregistrement.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Principe et application de la méthode H/V.....	13
2.1. Notion sur les effets de site.....	13
2.2. Mise en œuvre de la méthode H/V	14
2.3. Application aux stations du Fossé rhénan	14
3. Application sur les stations RAP du Fossé rhénan.....	17
3.1. Bollwiller.....	17
3.1.1. Localisation	17
3.1.2. Contexte géologique.....	17
3.1.3. Mesures H/V.....	18
3.2. Brunstatt.....	25
3.2.1. Localisation	25
3.2.2. Contexte géologique.....	25
3.2.3. Mesures H/V.....	28
3.3. Fournets	30
3.3.1. Localisation	30
3.3.2. Contexte géologique.....	30
3.4. Hésingue.....	33
3.4.1. Localisation	33
3.4.2. Contexte géologique.....	33
3.4.3. Mesures H/V.....	33
3.5. Sainte-Marie-aux-Mines.....	37
3.5.1. Localisation	37
3.5.2. Contexte géologique.....	37
3.5.3. Mesures H/V.....	40

3.6. Soufflenheim	43
3.6.1. Localisation	43
3.6.2. Contexte géologique	43
3.6.3. Mesures H/V	48
3.7. Strasbourg.....	50
3.7.1. Localisation	50
3.7.2. Contexte géologique	50
3.7.3. Mesures H/V	54
4. Conclusion	57
Bibliographie.....	59

Liste des figures

Fig. 1 - Position des stations RAP du Fossé rhénan ayant fait l'objet de mesures de bruit de fond en avril 2001 (échelle 1/1 500 000)	10
Fig. 2 - Piégeage d'ondes dans une couverture sédimentaire meuble.	13
Fig. 3 - Localisation de la coupe de Bollwiller.	19
Fig. 4 - Coupe géologique W-E passant par Bollwiller.	20
Fig. 5 - Détail du Quaternaire au droit de la coupe géologique W-E passant par Bollwiller.	21
Fig. 6 - Localisation des mesures de bruit de fond sur la commune de Bollwiller.	22
Fig. 7 - Rapports H/V sur la commune de Bollwiller.	23
Fig. 8 - Localisation de la coupe de Brunstatt.	26
Fig. 9 - Coupe géologique W-E passant par Brunstatt.	27
Fig. 10 - Localisation des mesures de bruit de fond sur la commune de Brunstatt.	28
Fig. 11 - Rapports H/V sur la commune de Brunstatt.	29
Fig. 12 - Extrait de la carte géologique de Morteau, échelle 1/50 000.	30
Fig. 13 - Localisation des mesures de bruit de fond sur la commune des Fournets.	31
Fig. 14 - Rapports H/V sur la commune de Fournets.	32
Fig. 15 - Extrait de la carte géologique d'Hésinguen, échelle 1/50 000.	34
Fig. 16 - Localisation des mesures de bruit de fond sur la commune de Hésingue.	35
Fig. 17 - Rapports H/V sur la commune de Hésingue.	36
Fig. 18 - Localisation de la coupe de Sainte-Marie-aux-Mines.	38
Fig. 19 - Coupe géologique W-E passant par Sainte-Marie-aux-Mines.	39

Fig. 20 - Localisation des mesures de bruit de fond sur la commune de Sainte-Marie-aux-Mines.....	40
Fig. 21 - Rapports H/V sur la commune de Sainte-Marie-aux-Mines.....	41
Fig. 22 - Rapports spectraux horizontaux entre le point 2 (entrée de mines), le point 4 (à la verticale du point 1 en extérieur) et le point 1 (fond de galerie) de Sainte-Marie-aux-Mines.....	42
Fig. 23 - Localisation de la coupe de Soufflenheim.	45
Fig. 24 - Coupe géologique W-E passant par Soufflenheim.	46
Fig. 25 - Détail des terrains plio-quadernaires au droit de la coupe géologique W-E passant par Soufflenheim.....	47
Fig. 26 - Localisation des mesures de bruit de fond sur la commune de Soufflenheim.	48
Fig. 27 - Rapports H/V sur la commune de Soufflenheim.....	49
Fig. 28 - Localisation de la coupe de Strasbourg.....	51
Fig. 29 - Coupe géologique W-E passant par Strasbourg.....	52
Fig. 30 - Détail du Quaternaire au droit de la coupe géologique W-E passant par Strasbourg (IPG).	53
Fig. 31 - Localisation des mesures de bruit de fond sur la commune de Strasbourg.....	54
Fig. 32 - Rapport H/V au droit de l'actuelle station (pilier IPG) sur la commune de Strasbourg.....	55
Fig. 33 - Rapports H/V au musée sismologique de Strasbourg.....	56

Liste des tableaux

Tabl. 1 - V_s calculé à partir de f constaté sur les courbes H/V et H estimé à partir des données géologiques pour le site de Bollwiller	24
Tabl. 2 - V_s calculé à partir de f constaté sur les courbes H/V et H estimé à partir des données géologiques sur le site de Brunstatt.	29
Tabl. 3 - V_s calculé à partir de f constaté sur les courbes H/V et H estimé à partir des données géologiques sur le site de Soufflenheim	49
Tabl. 4 - V_s calculé à partir de f constaté sur les courbes H/V et H estimé à partir des données géologiques pour le site de Strasbourg	55

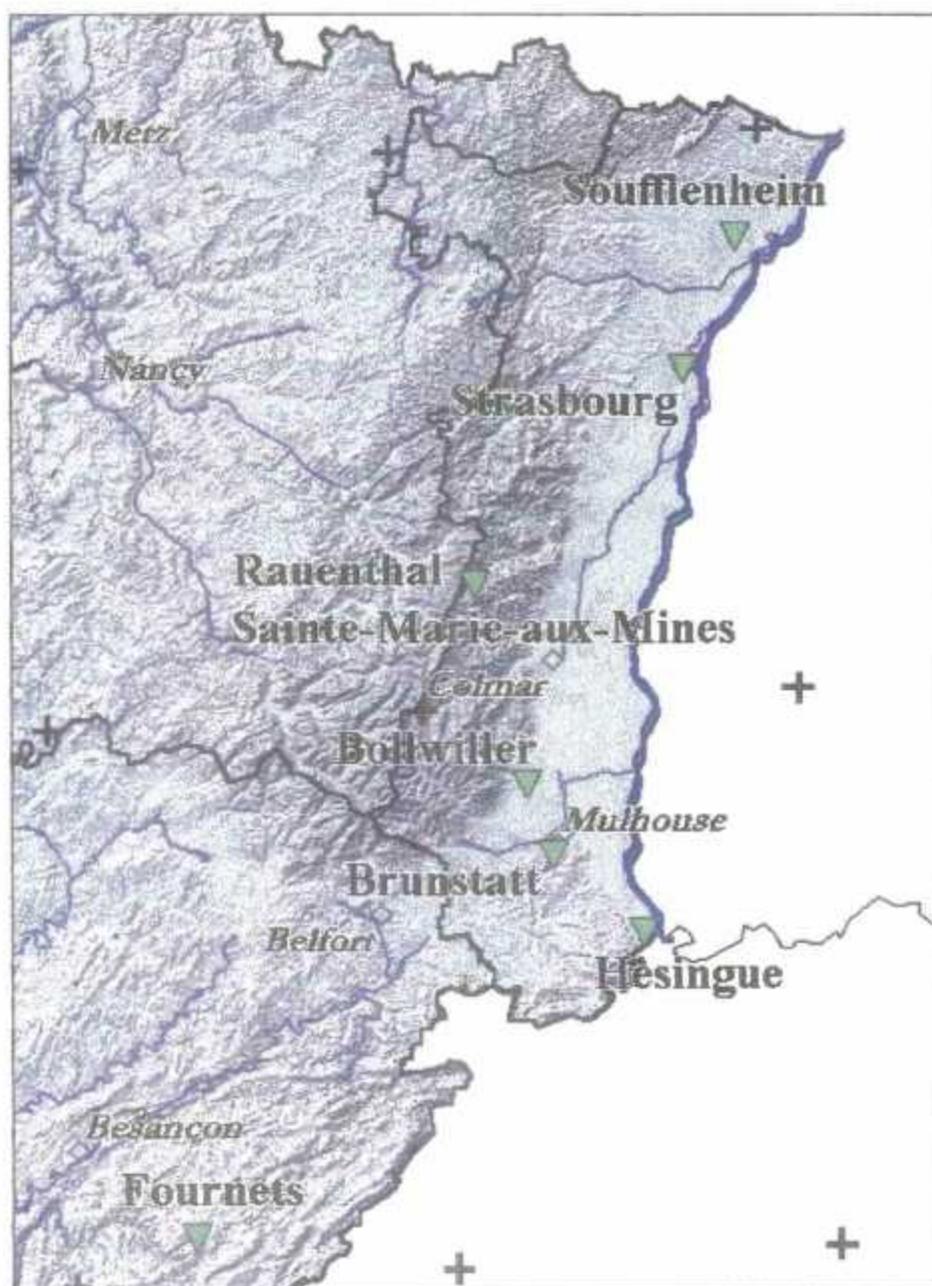


Fig. 1 - Position des stations RAP du Fossé rhénan ayant fait l'objet de mesures de bruit de fond en avril 2001 (échelle 1/1 500 000).

1. Introduction

Ce rapport a pour objectif la mise en évidence d'éventuels effets de site au droit des stations accélérométriques installées ou envisagées du réseau du Fossé rhénan supérieur, associé au RAP (Réseau Accélérométrique Permanent).

Au printemps 2001, sept sites de stations installées ou projetées étaient identifiés pour y mettre en place une campagne de mesures H/V afin d'estimer des effets de site lithologiques et/ou topographiques.

Parmi les sept stations, la plupart sont implantées dans le Fossé rhénan proprement dit (Bollwiller, Brunstatt, Soufflenheim, Strasbourg) ou à proximité de sa bordure méridionale (Hésingue).

D'autres stations intéressent la bordure vosgienne (Sainte-Marie-aux-Mines), voire plus au sud-ouest, le Jura (Fournets).

Les différentes stations sont présentées par ordre alphabétique, c'est-à-dire dans l'ordre suivant :

- station de Bollwiller,
- station de Brunstatt,
- station de Fournets,
- station de Hésingue,
- station de Sainte-Marie-aux-Mines,
- station de Soufflenheim,
- station de Strasbourg.

2. Principe et application de la méthode H/V

2.1. NOTION SUR LES EFFETS DE SITE

Les effets de site sont une modification du signal sismique par les conditions géologiques, géotechniques ou topographiques du sol. Idéalement, on caractérise les effets de site par la fonction de transfert de la couche de sol qui modifie le signal. En pratique, on les caractérise le plus souvent par la fréquence de résonance du sol et par l'amplification de la fonction de transfert à cette fréquence de résonance.

Nous allons utiliser les propriétés de la réponse d'une couche de sol, soumise à une sollicitation sismique, pour déterminer sa fréquence de résonance. En effet, la fréquence propre du sol est caractéristique d'une part de la nature du sol (elle est différente pour du rocher et pour des sols mous) et d'autre part de l'épaisseur du sol considéré. Schématiquement, un sol rocheux va avoir une fréquence de résonance très élevée, en dehors du domaine des fréquences habituellement rencontrées en génie parasismique (entre 0,5 et 15 Hz), un sol raide peu profond (épaisseur inférieure à 10 m) va avoir une fréquence de résonance supérieure à 10 Hz, un sol raide profond ou un sol mou peu profond vont avoir une fréquence de résonance comprise entre 1 et 10 Hz et, enfin, un sol mou profond va avoir une fréquence de résonance inférieure à 1 Hz.

Prenons l'exemple simple d'une couverture sédimentaire meuble surplombant un substratum rigide et soumise à une onde plane SH d'incidence verticale, stationnaire de pulsation $\omega=2\pi f$, et d'amplitude 1 (fig. 2).

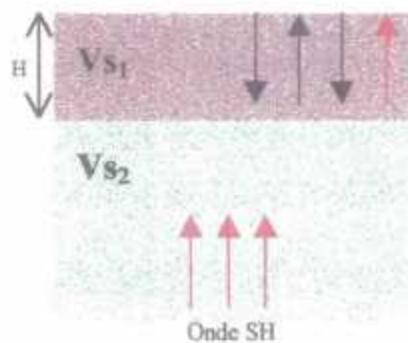


Fig. 2 - Piégeage d'ondes dans une couverture sédimentaire meuble. Les flèches rouges symbolisent l'onde incidente, les flèches noires l'onde piégée.

Dénomination : V_s : vitesse de propagation des ondes S dans chaque milieu (meuble : 1, substratum : 2) ; H : épaisseur de la couche meuble.

On peut, par une modélisation à une dimension du sous-sol, relier l'épaisseur d'une couche sédimentaire meuble (surplombant un substratum rocheux) à sa fréquence de résonance par la formule :

$$H = V_{s1}/(4.f)$$

H : épaisseur de la couche meuble,
V_{s1} : vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans la couche meuble,
f : fréquence de résonance de la couche meuble.

2.2. MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE H/V

La méthode choisie, qui utilise les rapports spectraux H/V sur des enregistrements de bruit de fond à l'aide d'une seule station, a été mise en œuvre pour la première fois au Japon en 1971. Son introduction dans la communauté internationale scientifique date de 1989 par Nakamura (Nakamura, 1989 et 1996). Après plusieurs années de discussions, il est maintenant admis que cette méthode permet de façon fiable le calcul de la fréquence de résonance du sol.

La méthode H/V consiste à enregistrer le bruit de fond sismique avec un capteur 3 composantes (deux horizontales et une verticale) pendant une durée d'une vingtaine de minutes (Sabourault, 1999). On découpe ensuite cet enregistrement en plusieurs fenêtres. Pour chacune de ces fenêtres, on calcule le spectre de Fourier des composantes horizontales du mouvement et celui de la composante verticale. On calcule ensuite la moyenne des spectres sur ces fenêtres. Cette moyenne permet d'éviter des artefacts dus à des bruits proches tels que le passage de camions. Enfin, on calcule le rapport spectral de la résultante horizontale divisée par la voie verticale, c'est-à-dire :

$$H/V = \frac{\sqrt{(\text{composante Nord sud})^2 + (\text{composante Est ouest})^2}}{\text{composante Verticale}}$$

La fréquence de résonance est obtenue en déterminant pour quelle fréquence le rapport H/V est très nettement supérieur à 1.

2.3. APPLICATION AUX STATIONS DU FOSSÉ RHÉNAN

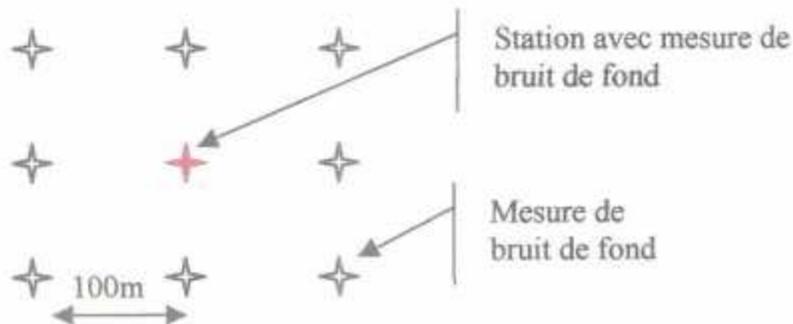
Les mesures ont été faites à l'aide d'enregistreur sismologique MARS88 (Lennartz) couplé à un capteur 3 composantes, un vélocimètre Lennartz LE-3D/5 s. Les stations RAP ayant fait l'objet de mesures de bruit de fond sont :

- Bollwiller (9 points de mesure, dont 8 exploitables) ;
- Brunstatt (9 points de mesure, tous exploitables) ;
- Fournets (9 points de mesure, aucun exploitable) ;
- Héisingue (9 points de mesure, aucun exploitable) ;
- Sainte-Marie-aux-Mines (5 points de mesure, tous exploitables) ;

- Soufflenheim (9 points de mesure, tous exploitables) ;
- Strasbourg (10 points de mesure dont 9 exploitables).

Certaines mesures sont considérées comme inexploitablees lorsque, après traitement, on observe un dysfonctionnement de la chaîne d'acquisition ou du système de sauvegarde de données.

Autour de chacune des stations du Fossé rhénan (sauf Sainte-Marie-aux-Mines, car la configuration topographique est particulière), le bruit de fond sismique a été enregistré sur 8 points distants entre eux de 100 m au plus comme indiqué sur le schéma suivant :



Il a donc été réalisé durant cette campagne une soixantaine de mesures représentant ainsi 180 fichiers (1 fichier par composante, donc 3 par point mesuré). Les mesures ont été faites du 18 au 24 avril 2001 par une équipe du BRGM.

Nous tenons à remercier la disponibilité de MM. Thibault PICQUET et Michel GRANET de l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg qui nous ont largement facilité les accès aux différentes stations accélérométriques.

Sur chacune des figures suivantes présentant les rapports H/V, l'emplacement de chaque graphe est positionné géographiquement par rapport à l'emplacement des différents points de mesure.

3. Application sur les stations RAP du Fossé rhénan

Nous allons essayer de déceler, d'après les courbes H/V présentées sur l'ensemble des sites, si les fréquences auxquelles il y a amplification correspondent à un effet de site lithologique. Pour ce faire, nous allons utiliser l'approximation d'un milieu tabulaire 1D dont la fréquence de résonance peut être estimée par la formule suivante :

$$V_s = 4.H.f$$

- H : épaisseur de la couche meuble,
V_s : vitesse de propagation des ondes S dans la couche meuble,
f : fréquence de résonance de la couche meuble.

Connaissant f par l'intermédiaire des courbes H/V et H par les données géologiques dont nous disposons, nous en déduisons un V_s théorique. L'attribution d'une fréquence de résonance à une couche sédimentaire meuble dépendra de la pertinence du V_s calculé.

Lorsque le rapport H/V est plat, on suppose généralement que la station n'est pas soumise à des effets de site et le site peut donc être considéré comme rocheux au sens où il ne modifie pas le signal sismique

3.1. BOLLWILLER

3.1.1. Localisation

Les coordonnées de la station sont :

- latitude : 47,86 °N ;
- longitude : 7,26 °E ;
- altitude : 240 m.

3.1.2. Contexte géologique

La configuration géologique du site est représentée par les figures 3, 4 et 5.

La coupe géologique W-E de Bollwiller débute près du domaine d'Ollwiller, à l'WNW d'Hartmannswiller, traverse Bollwiller et se termine dans la plaine alluviale de la Vieille Thur, au nord de Pulversheim.

Ses coordonnées sont les suivantes, exprimées dans le système Lambert II zone centrale :

- Extrémité nord : X = 964 - Y = 2329,5
Extrémité sud : X = 972 - Y = 2329,5

Lithologie des formations au droit de la coupe

Compte tenu de la couverture quaternaire, la coupe a été construite grâce aux profils sismiques interprétés de la campagne Bollwiller PREPA et aux coupes de quelques forages profonds proches.

Des compléments d'informations ont été extraits des documents suivants :

- la carte géologique à 1/50 000 de Mulhouse et sa notice,
- la synthèse géothermique du fossé rhénan supérieur.

Terrains à l'affleurement

Seules les formations alluviales quaternaires affleurent dans l'emprise de la coupe. Ce sont essentiellement les alluvions würmiennes de la basse terrasse würmienne, dont l'altitude s'abaisse doucement d'ouest (+250 m) en est (+225/+230 m), et parfois recouvertes par une pellicule de limons sableux.

On trouve les alluvions holocènes de la vieille Thur dans la partie ouest de la coupe, à une altitude moyenne de +225 mètres.

Les dépôts quaternaires

Dans le sondage Soultz 1, onze mètres d'alluvions sablo-graveleuses attribuées à la basse terrasse du Würm ont été traversés.

En fait, ces alluvions masquent une épaisse série d'alluvions plus anciennes, dont l'épaisseur augmente fortement d'ouest en est, jusqu'à atteindre 65 m au droit de l'extrémité est de la coupe.

3.1.3. Mesures H/V

Les mesures de bruit de fond ont été effectuées sur 9 points encadrant la station déjà en place. La répartition des points est représentée sur la figure 6.

Les résultats des mesures H/V sont sur la figure 7. Les données du point 3 n'ont pu être récupérées à cause d'une défaillance du matériel.

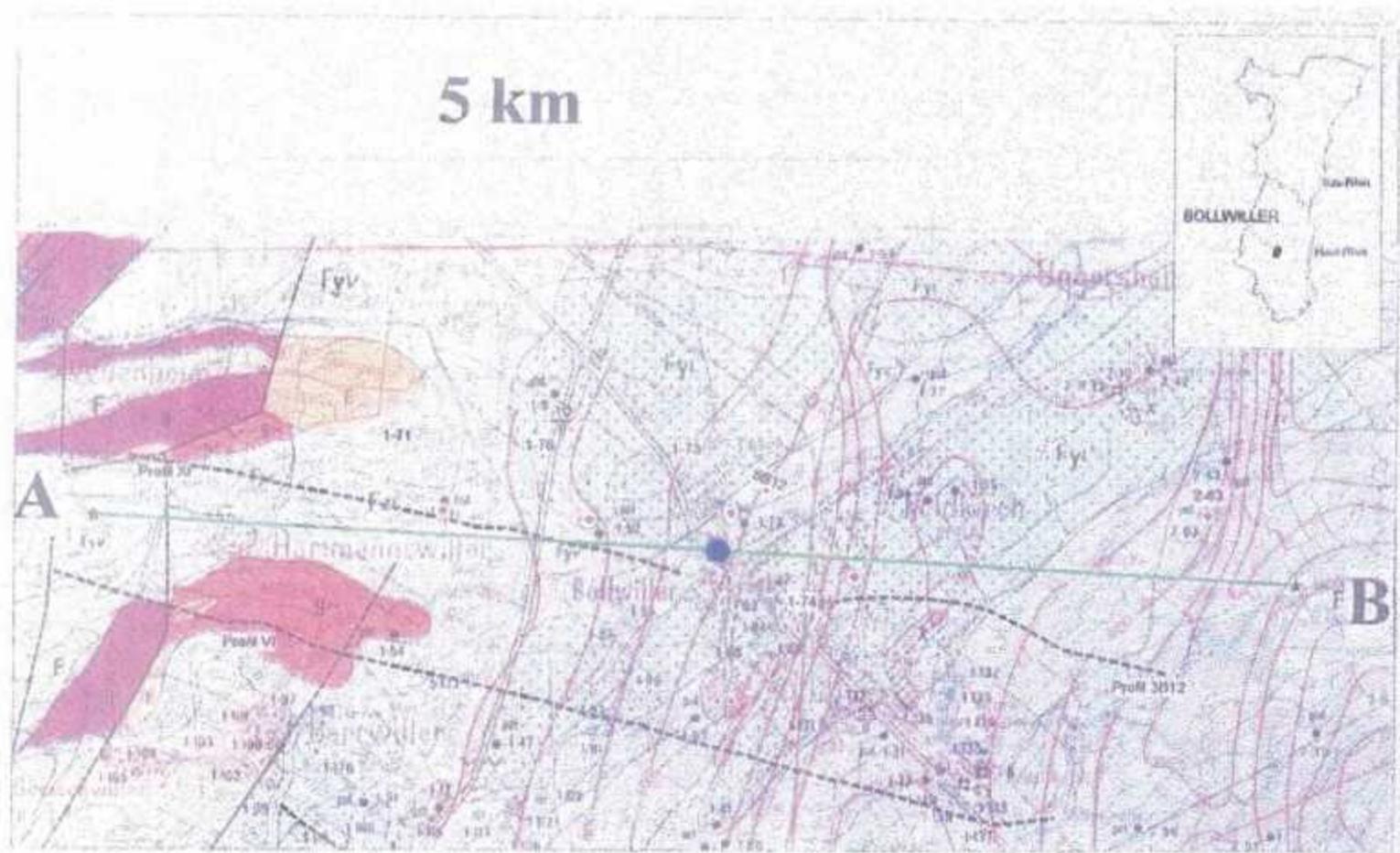


Fig. 3 - Localisation de la coupe de Bollwiller. La pastille bleue indique la position de la station (extrait du rapport BRGM R40744).

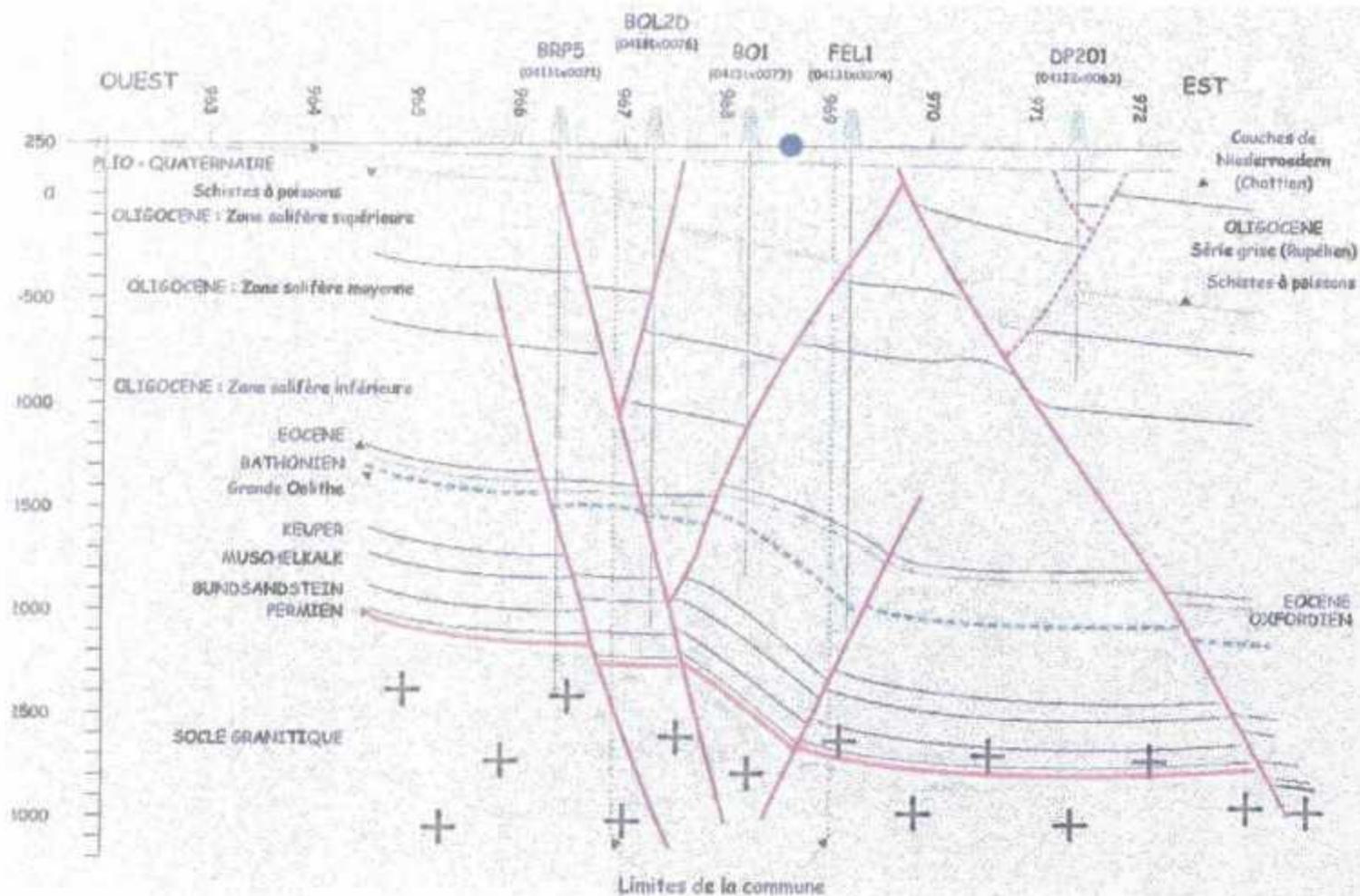


Fig. 4 - Coupe géologique W-E passant par Bollwiller. La pastille bleue indique la position de la station (extrait du rapport BRGM R40744).

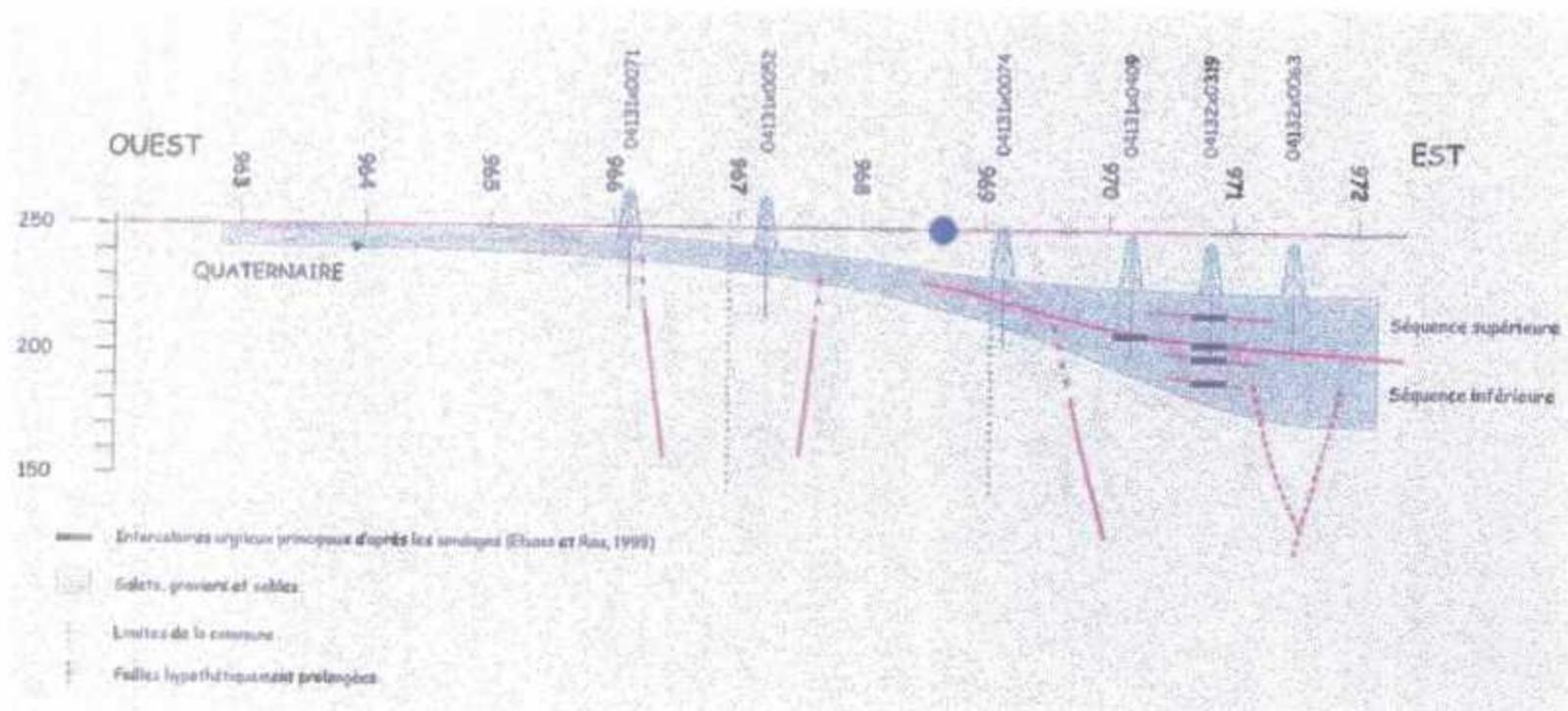
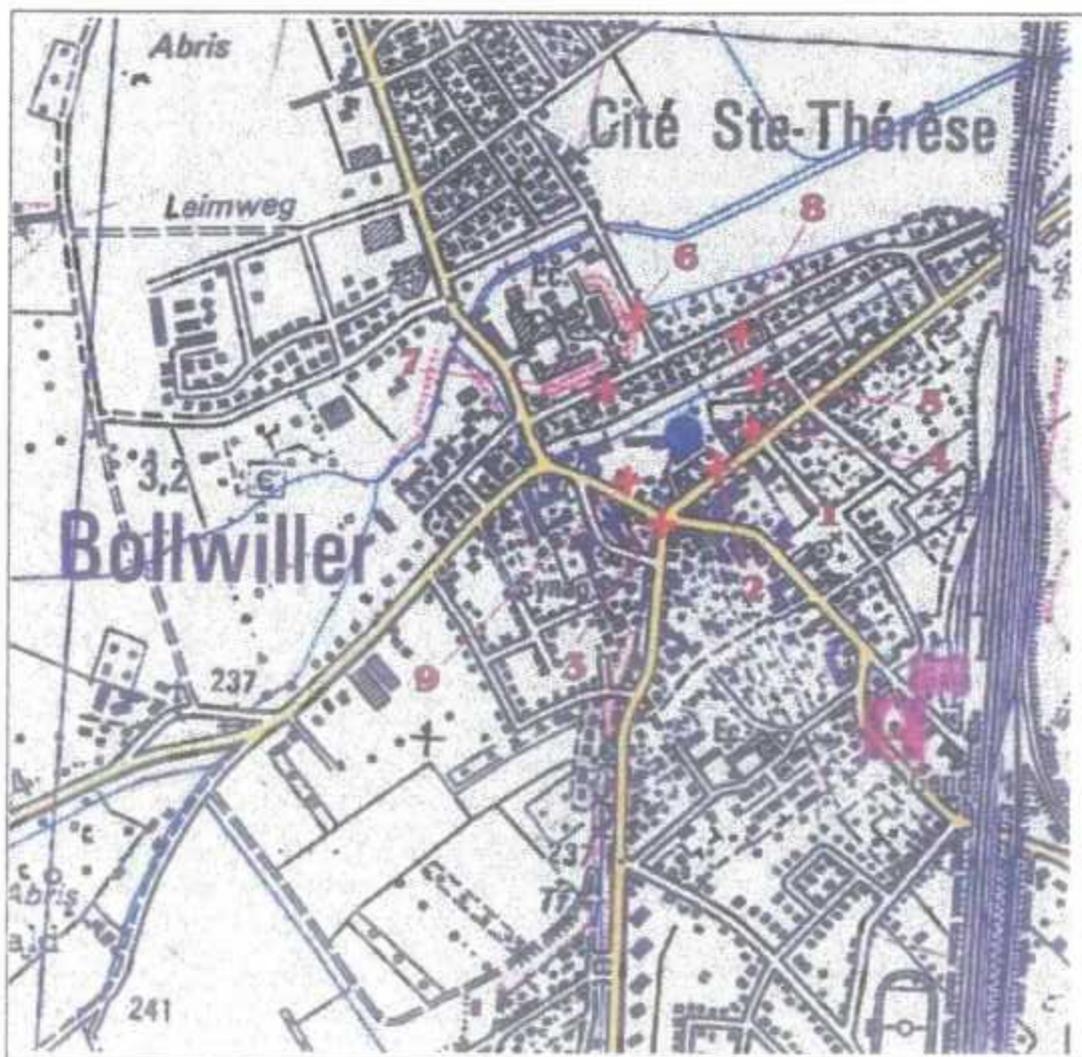


Fig. 5 - Détail du Quaternaire au droit de la coupe géologique W-E passant par Bollwiller. La pastille bleue indique la position de la station (extrait du rapport BRGM R40744).



250 m
↔

Fig. 6 - Localisation des mesures de bruit de fond sur la commune de Bollwiller. La pastille bleue indique la position de la station.

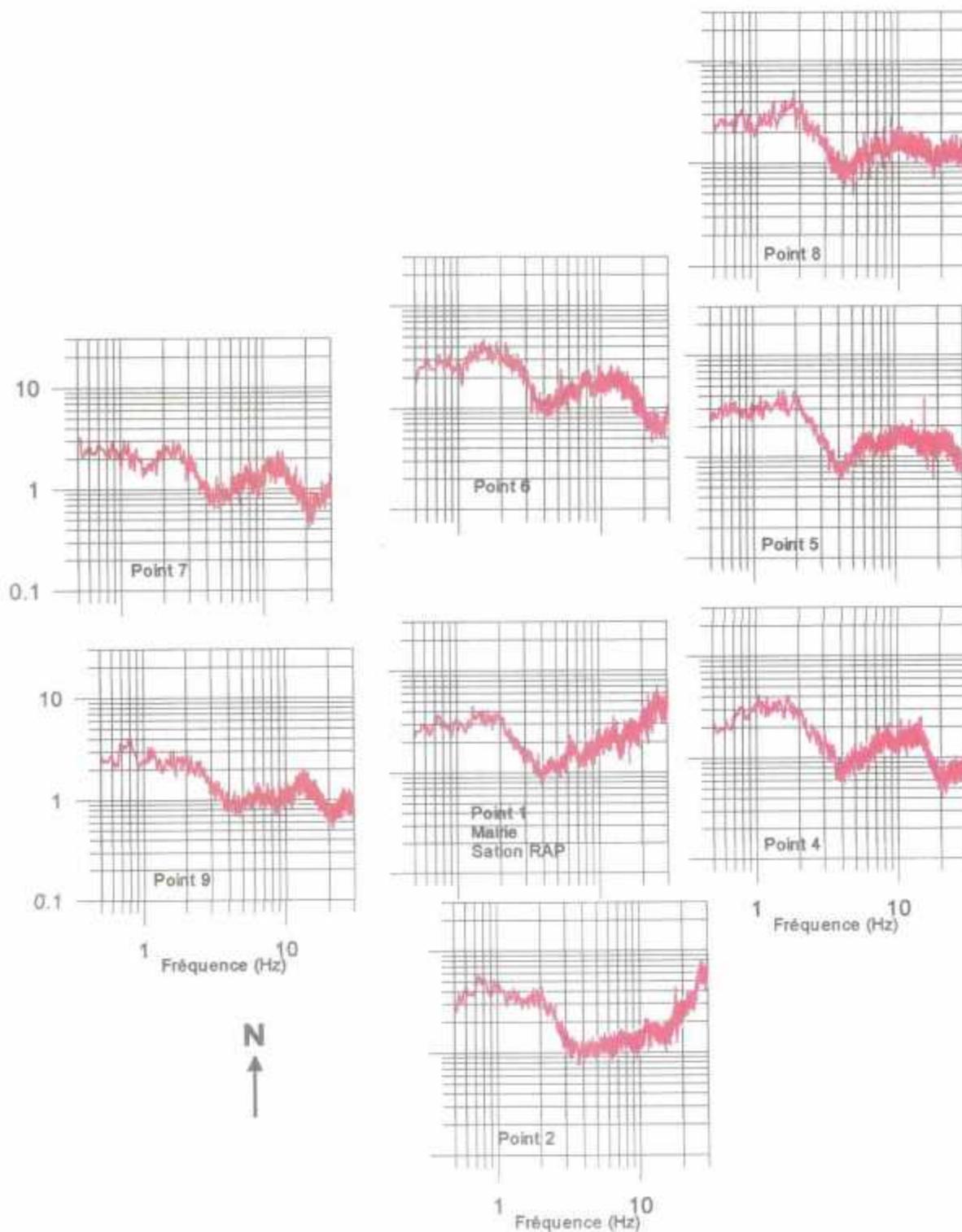


Fig. 7 - Rapports H/V sur la commune de Bollwiller. Le point 1 est à proximité de la station.

D'après les données géologiques, on peut s'attendre à ce que la couche meuble quaternaire, de 18 à 25 m d'épaisseur au droit des points de mesure, puisse engendrer un piégeage d'onde créant ainsi un effet de site lithologique.

D'autre part, les courbes H/V de la figure 7 indiquent deux fréquences où le rapport H/V est nettement supérieur à 1 : 1,5 à 2 Hz et vers 12 Hz.

Dans le tableau 1 ci-dessous, nous avons reporté les valeurs de Vs estimées pour chaque couple H et f.

	f=1,5 Hz	f=12 Hz
H = 18 m	108 m/s	864 m/s
H = 25 m	150 m/s	1200 m/s

Tabl. 1 - Vs calculé à partir de f constaté sur les courbes H/V et H estimé à partir des données géologiques pour le site de Bollwiller.

Les valeurs de Vs calculées n'indiquent pas clairement si c'est bien la couche de sol quaternaire qui résonne. En effet, les vitesses d'onde S de plus de 800 m/s ou de moins de 150 m/s semblent incompatibles avec les caractéristiques géotechniques moyennes des couches quaternaires. On ne peut donc pas, avec les données dont nous disposons, déterminer avec certitude l'origine des amplitudes observées sur les courbes H/V.

3.2. BRUNSTATT

3.2.1. Localisation

Les coordonnées de la station sont :

- latitude : 47,73 °N ;
- longitude : 7,32 °E ;
- altitude : 250 m.

3.2.2. Contexte géologique

La configuration géologique du site est représentée par les figures 8 et 9.

La coupe géologique WNW-ESE de Brunstatt débute à environ 2 km à l'WNW de Didenheim, passe immédiatement au sud du bourg de Brunstatt et se termine entre Bruebach et Eschentzwiller.

Ses coordonnées sont les suivantes, exprimées dans le système Lambert II zone centrale :

Extrémité nord : X = 970 - Y = 2314,5
Extrémité sud : X = 972 - Y = 2312,7

Lithologie des formations au droit de la coupe

La coupe a été construite grâce aux affleurements notés sur la carte géologique à 1/50 000 de Mulhouse, et surtout, compte tenu du recouvrement quaternaire, grâce à un profil sismique (profil SCH2) et à plusieurs forages profonds proches.

Terrains à l'affleurement

Les loëss et loehm anciens et récents recouvrent très largement les formations sédimentaires tertiaires. La long de la coupe, ces dernières n'affleurent que dans les versants de la vallée de l'Ill aux abords de Didenheim et au sud de Brunstatt.

Le fond de la vallée de l'Ill est occupé par les alluvions holocènes, et les petits cours d'eau adjacents sont essentiellement colmatés par des colluvions peu épaisses.

Les dépôts quaternaires

Dans la vallée de l'Ill, les alluvions holocènes, à galets, graviers et sables sont pelliculaires (quelques mètres).

Les loëss et loehm sont plus épais sur les versants exposés au nord-est. Plusieurs couches de loëss peuvent se superposer, séparées par des niveaux de loehm, sur une épaisseur totale pouvant atteindre 20 m.

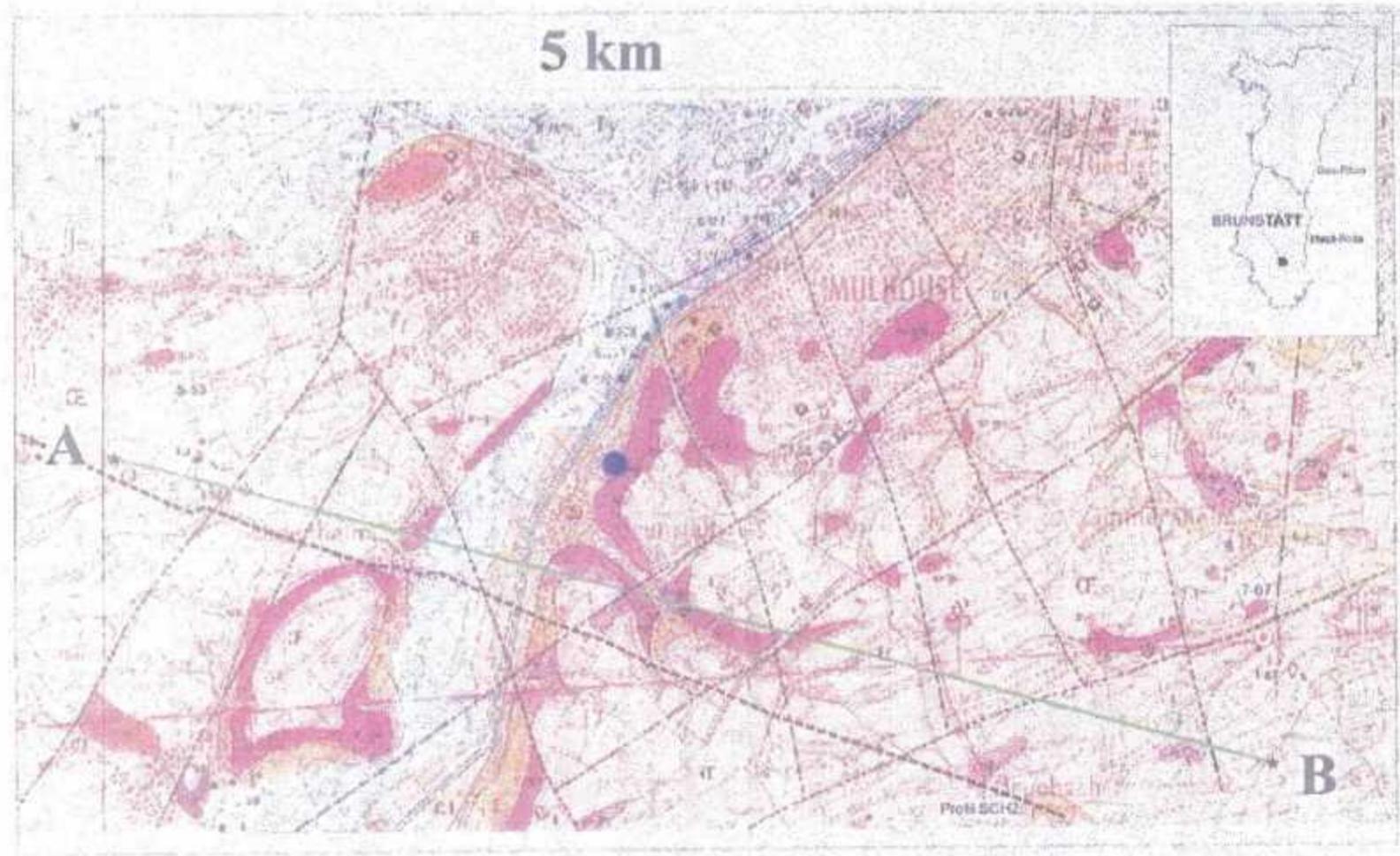


Fig. 8 - Localisation de la coupe de Brunstatt. La pastille bleue indique la position de la station (extrait du rapport BRGM R40744).

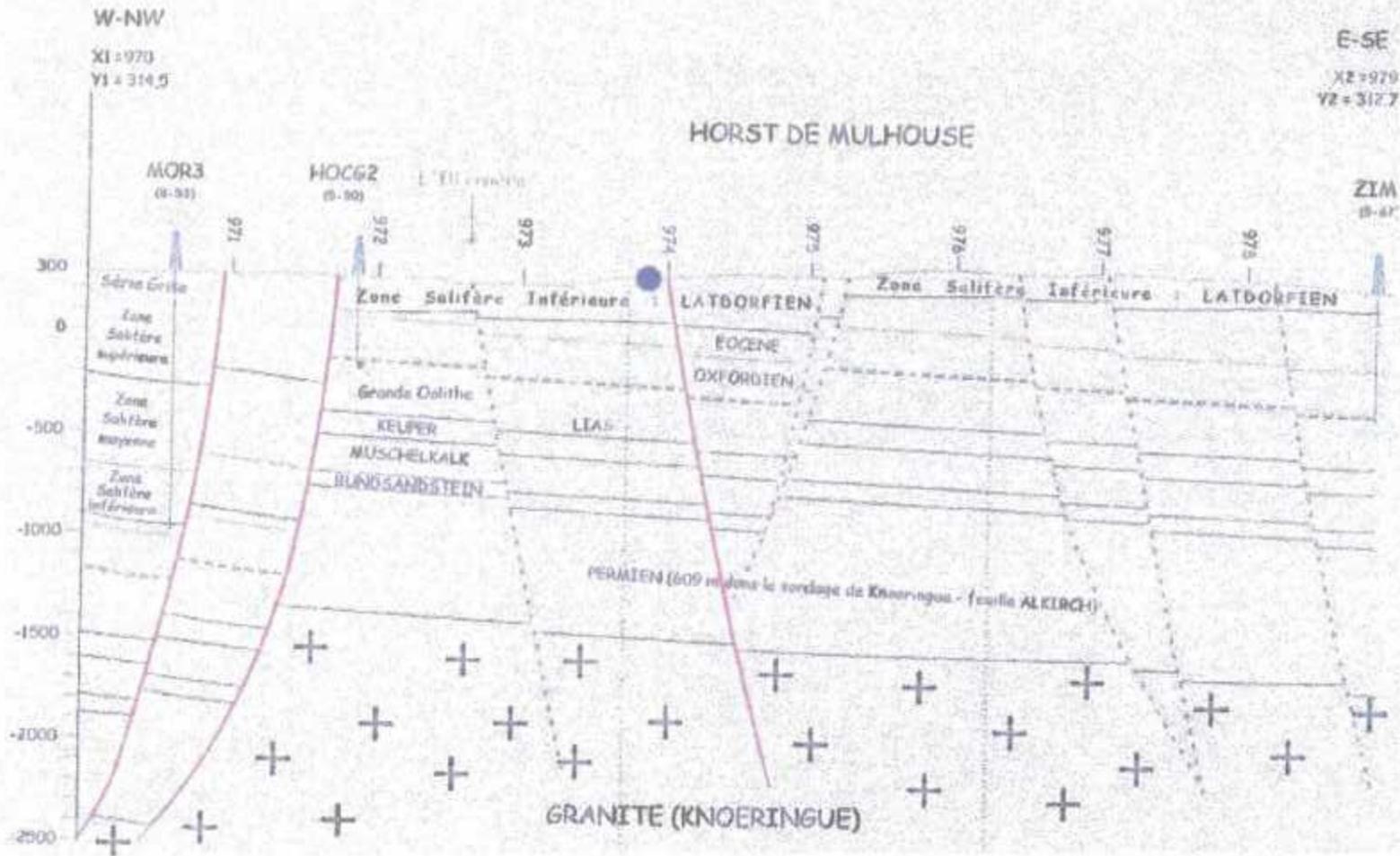


Fig. 9 - Coupe géologique W-E passant par Brunstatt. La pastille bleue indique la position de la station (extrait du rapport BRGM R40744).

3.2.3. Mesures H/V

Les mesures de bruit de fond ont été effectuées sur 9 points encadrant la station déjà en place. La répartition des points est représentée sur la figure 10.

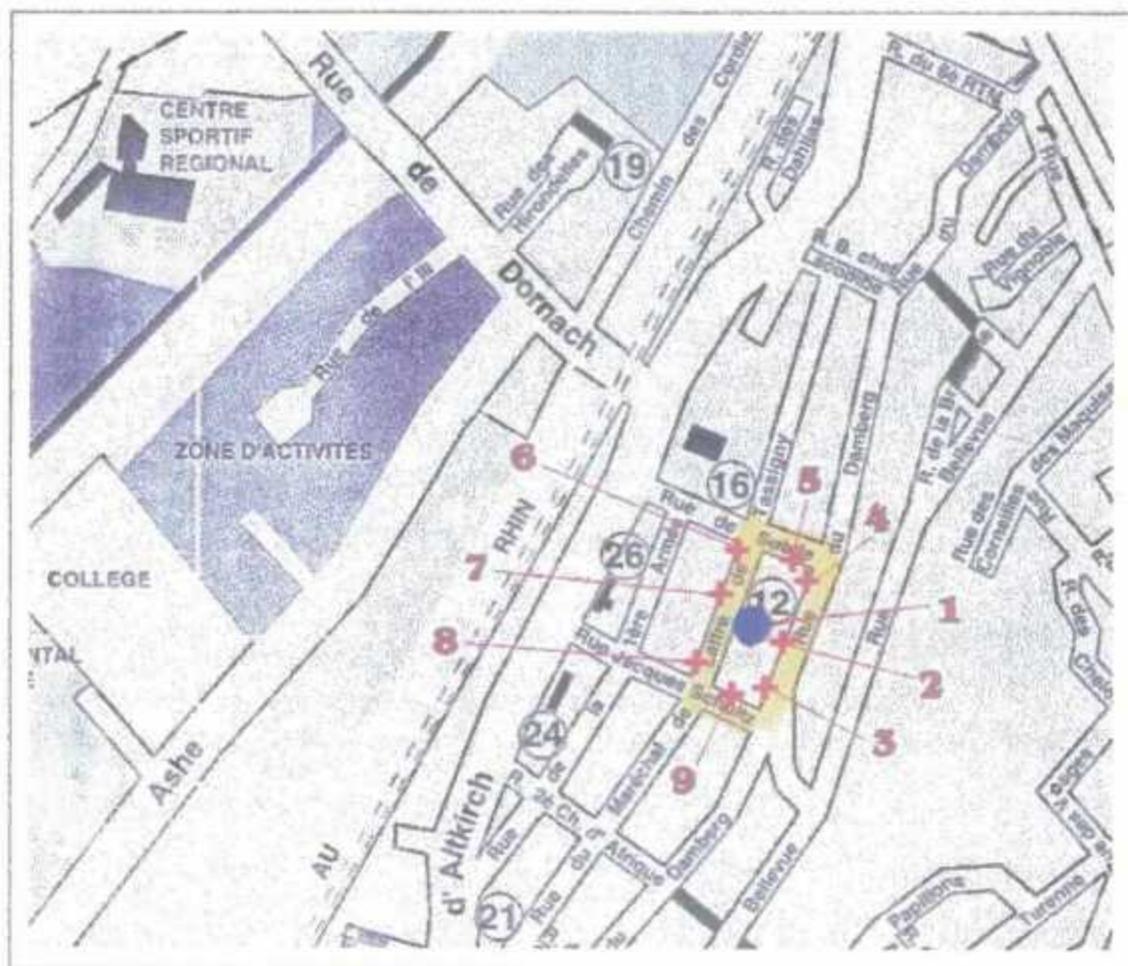


Fig. 10 - Localisation des mesures de bruit de fond sur la commune de Brunstatt. La pastille bleue indique la position de la station.

Les courbes H/V sont représentées sur la figure 11.

D'après les données géologiques, il est possible qu'une couche meuble quaternaire d'environ 20 m d'épaisseur au droit des points de mesure puissent créer un effet de site. D'autre part, les courbes H/V de la figure 11 indiquent une fréquence où le rapport H/V est nettement supérieur à 1 : 6 Hz.

Dans le tableau 2, nous avons reporté les valeurs de V_s estimé pour H et f.

	f=6 Hz
H = 20 m	480 m/s

Tabl. 2 - V_s calculé à partir de f constaté sur les courbes H/V et H estimé à partir des données géologiques pour le site de Brunstatt.

La valeur de V_s calculée semble indiquer que c'est bien la couche de sol quaternaire qui résonne à 6 Hz et qui engendre peut-être un effet de site.

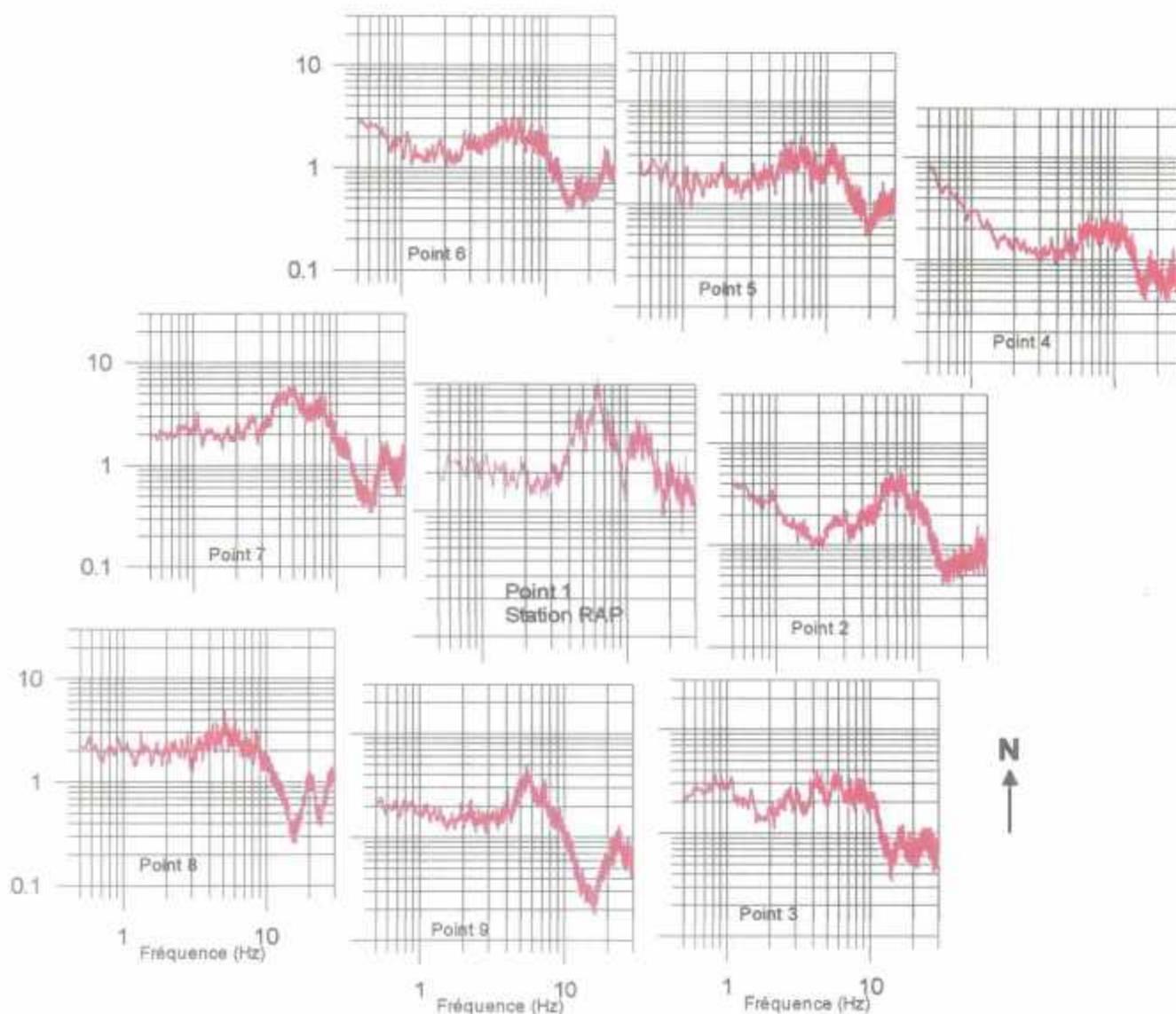


Fig. 11 - Rapports H/V sur la commune de Brunstatt.

3.3. FOURNETS

3.3.1. Localisation

Les coordonnées de la station sont :

- latitude : 47,08 °N ;
- longitude : 6,32 °E ;
- altitude : 910 m.

3.3.2. Contexte géologique

La configuration géologique du site est représentée par la figure 12. La station RAP est installée sur du rocher calcaire de type Rauracien (faciès coralligène de l'Argovien supérieur).

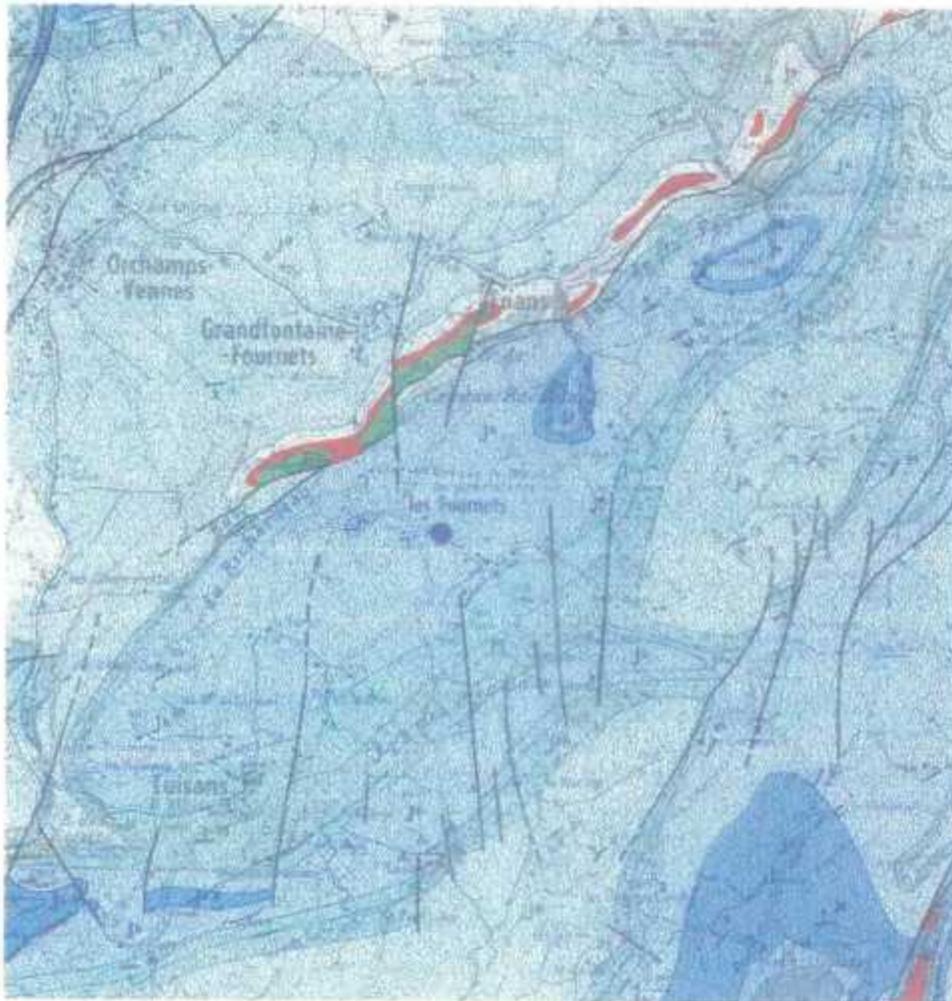
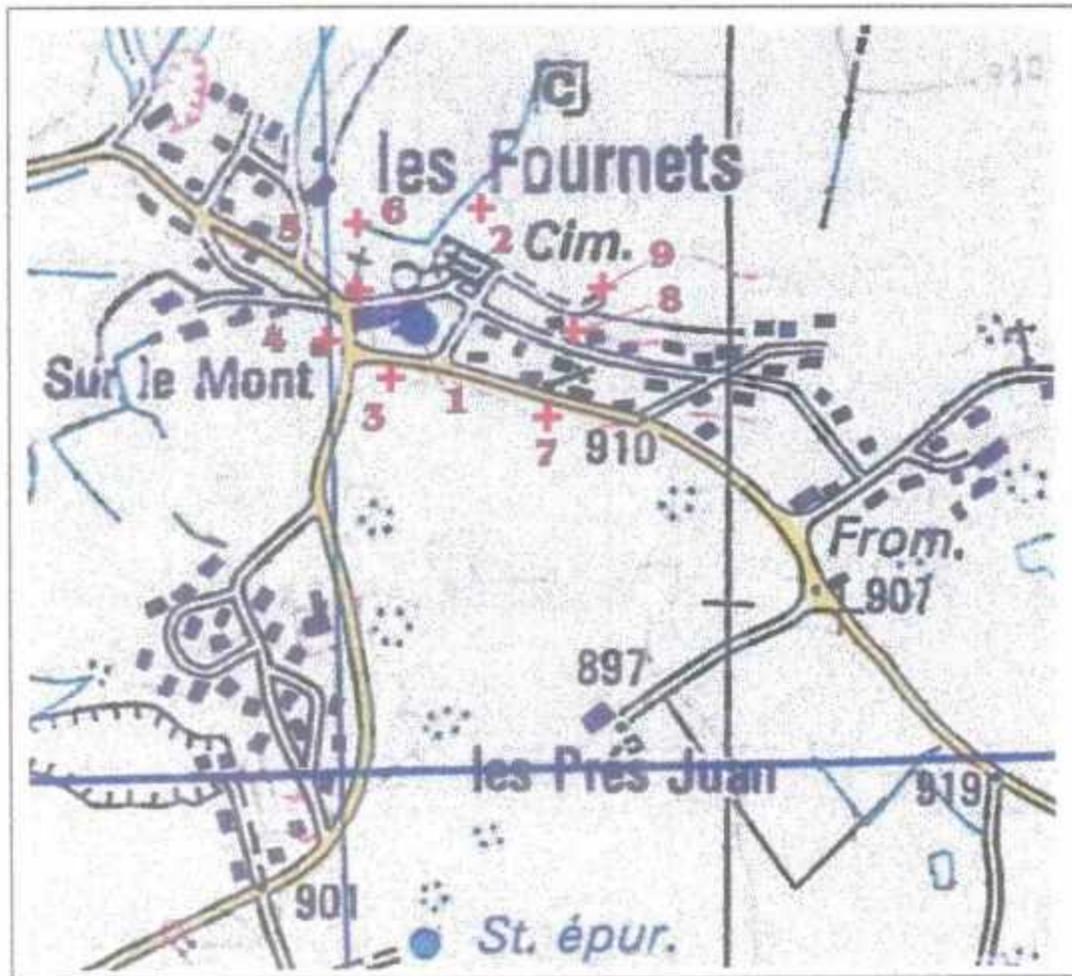


Fig. 12 - Extrait de la carte géologique de Morteau. Échelle 1/50 000. La pastille bleue indique la position de la station.

Les mesures de bruit de fond ont été effectuées sur 8 points encadrant la station déjà en place. La répartition des points est représentée sur la figure 13.



250 m

Fig. 13 - Localisation des mesures de bruit de fond sur la commune des Fournets. La pastille bleue indique la position de la station.

Les courbes H/V sont représentées sur la figure 14.

Lors du traitement des données, il est apparu que les mesures avaient une signature spectrale anormale qui semble relever d'un problème de matériel d'enregistrement. Il semble donc hasardeux d'accorder du crédit aux résultats présentés sur la figure 14. Dans ces conditions, nous ne pouvons pas émettre d'avis sur la présence ou non d'effets de site sur la commune de Fournets puisque nous ne disposons pas de résultats fiables.

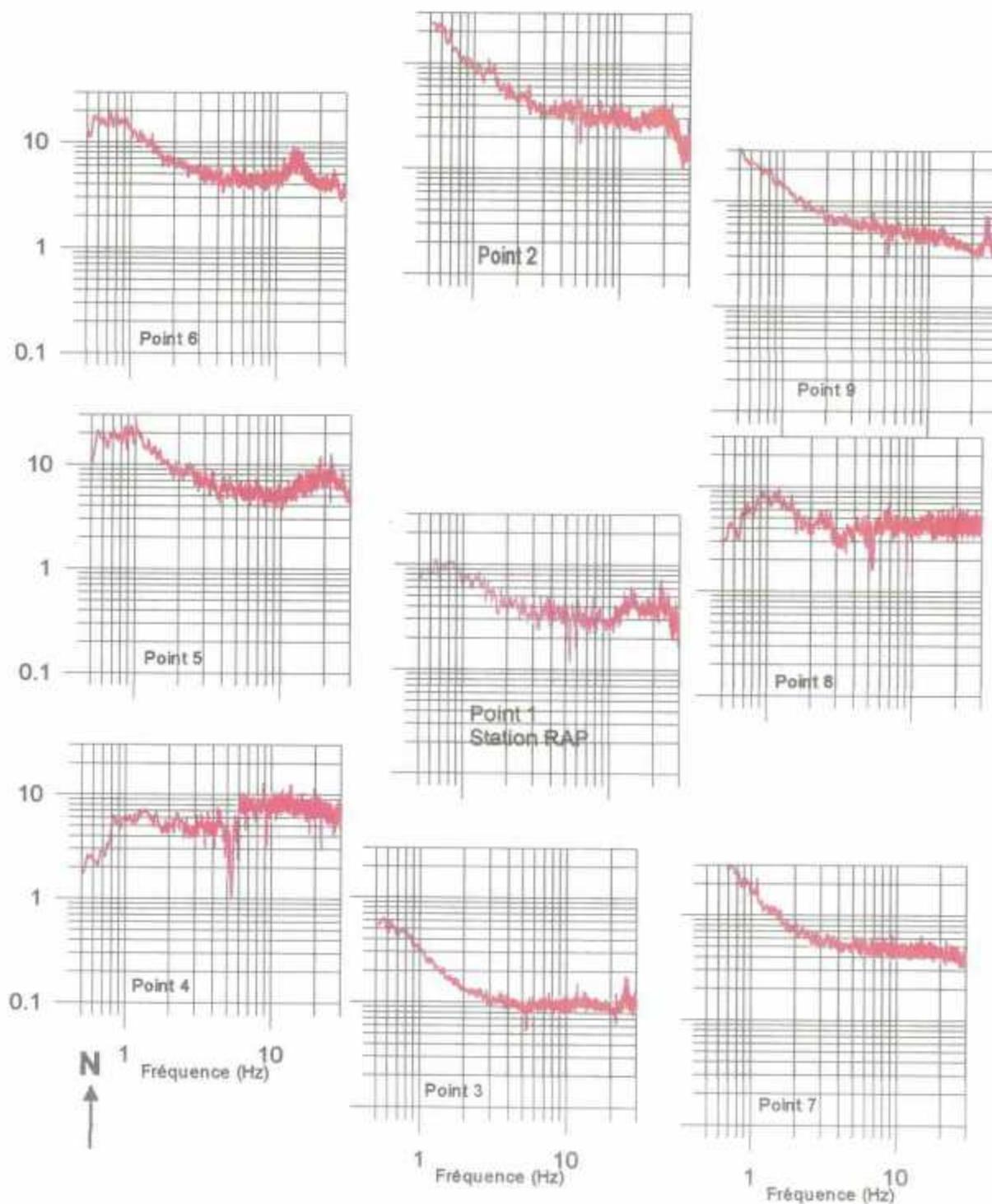


Fig. 14 - Rapports H/V sur la commune de Fournets.

3.4. HÉSINGUE

3.4.1. Localisation

Les coordonnées de la station sont :

- latitude : 47,58 °N ;
- longitude : 7,54 °E ;
- altitude : 275 m.

3.4.2. Contexte géologique

La configuration géologique du site est représentée par la figure 15.

La station semble être installée sur des alluvions anciennes de basse terrasse et à proximité d'alluvions récentes mais nous n'avons pas d'informations sur les épaisseurs de ces formations. Nous ne pouvons donc pas estimer, dans ces conditions, d'éventuels effets de site se rapportant à la géologie sous-jacente.

3.4.3. Mesures H/V

Les mesures de bruit de fond ont été effectuées sur 9 points encadrant la station déjà en place. La répartition des points est représentée sur la figure 16.

Les courbes H/V sont représentées sur la figure 17.

Si l'important contenu basse fréquence sur les composantes horizontales n'est pas lié à des problèmes purement instrumentaux de mesure, il semblerait que le site d'Hésingue soit sujet à des effets de site puisque nous pouvons observer, sur les rapports H/V, une nette amplification pour les fréquences inférieures à 1 Hz et ceci sur l'ensemble des points de mesures (fig. 17). Cependant, il conviendra de le confirmer par une série de mesures complémentaires.

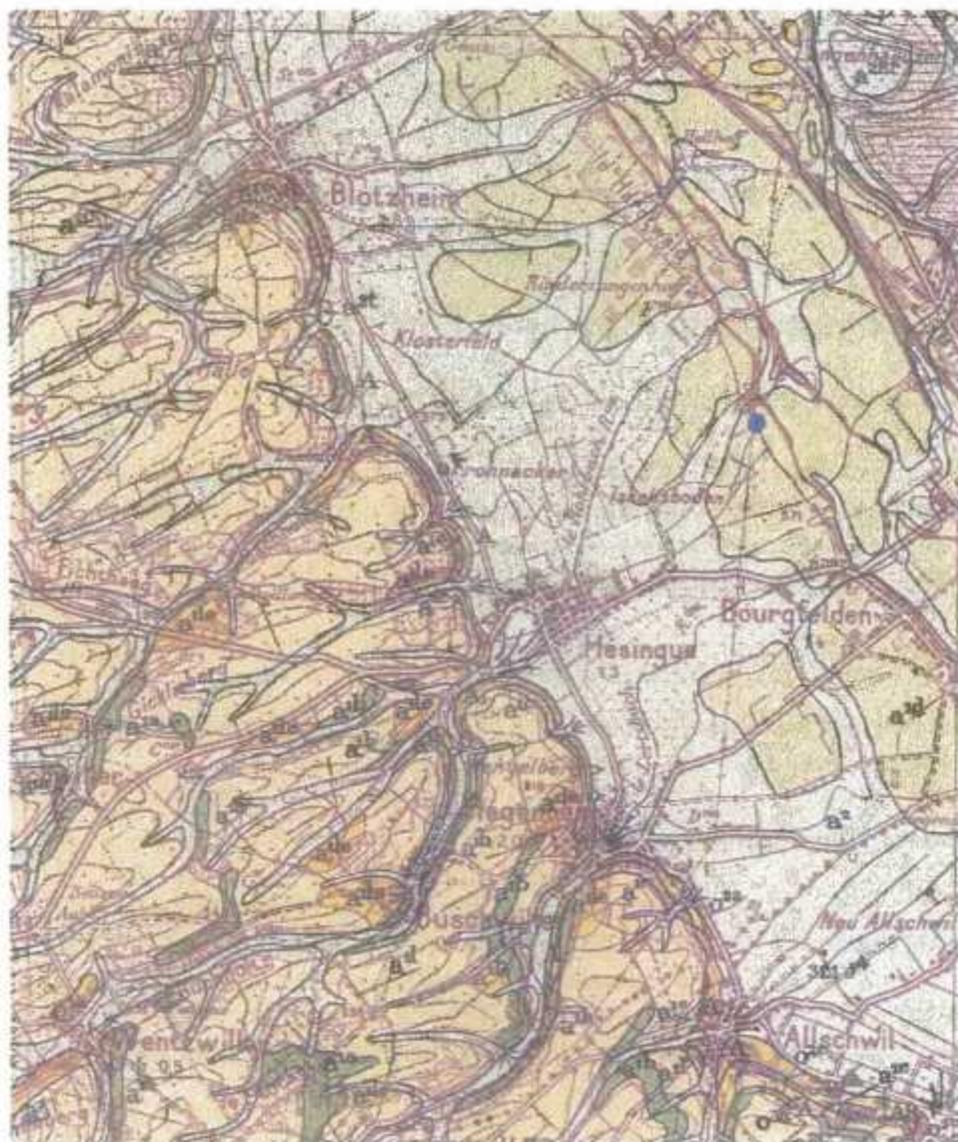


Fig. 15 - Extrait de la carte géologique d'Hésingue. Echelle 1/50 000. La pastille bleue indique la position de la station.

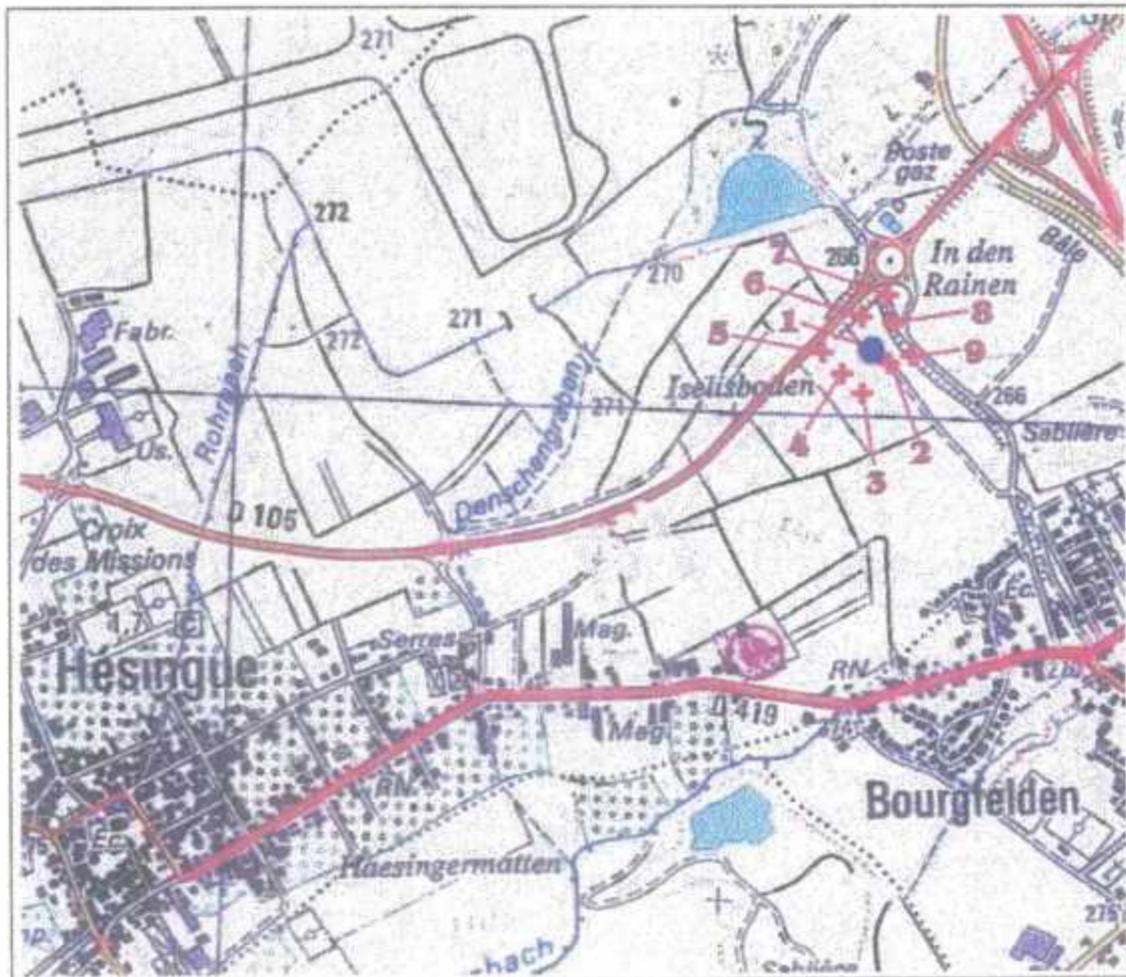


Fig. 16 - Localisation des mesures de bruit de fond sur la commune de Hésingue. La pastille bleue indique la position de la station.

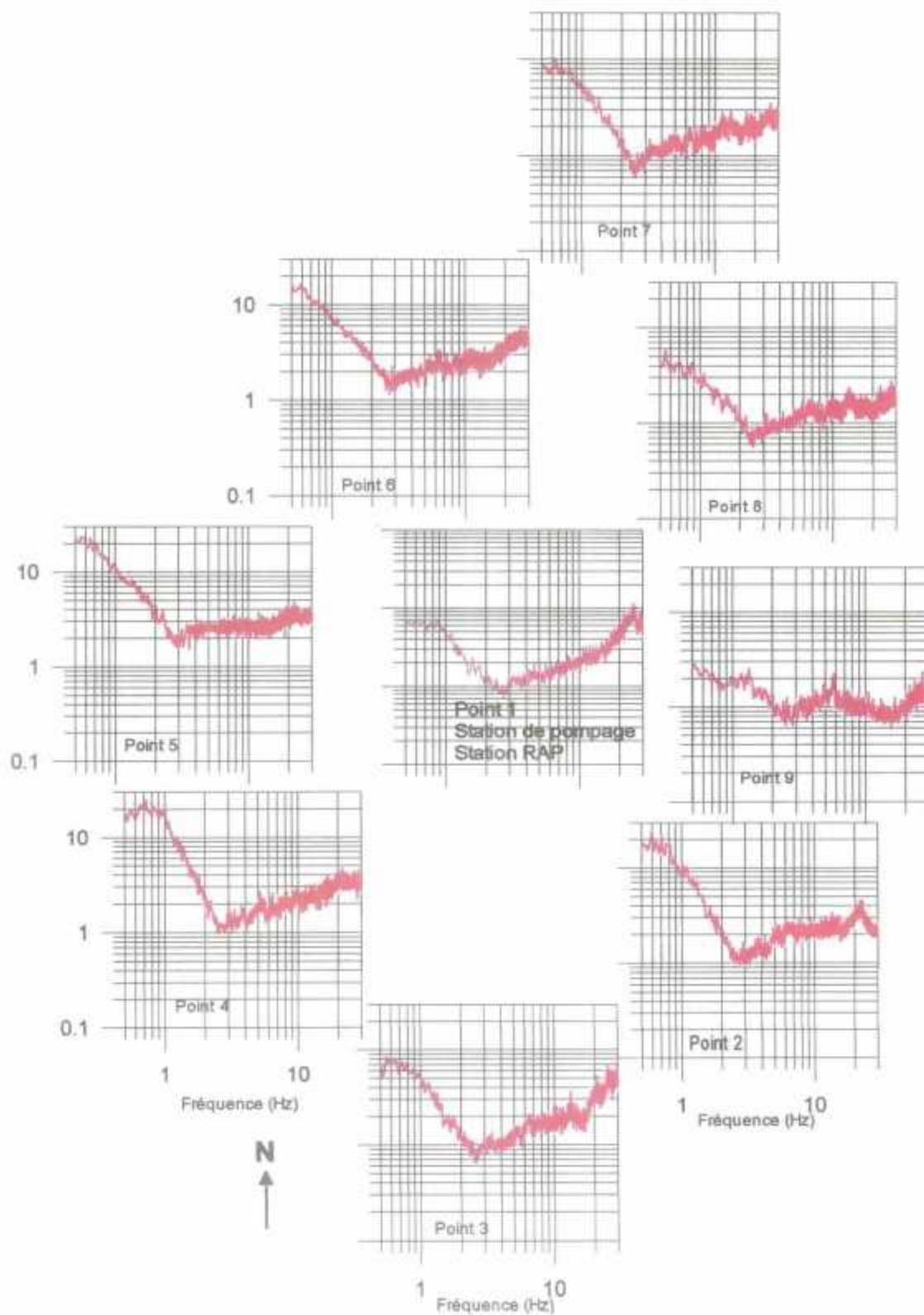


Fig. 17 - Rapports H/V sur la commune d'Hésingue.

3.5. SAINTE-MARIE-AUX-MINES

3.5.1. Localisation

Les coordonnées de la station sont :

- latitude : 48,22 °N ;
- longitude : 7,16 °E ;
- altitude : 580 m.

3.5.2. Contexte géologique

La configuration géologique du site est représentée par les figures 18 et 19.

La coupe géologique débute au lieu-dit Aubrygoutte, à l'ouest de Wisembach se poursuit vers le Sud-Est par Echery, puis au sud de Sainte-Marie à hauteur de Saint-Pierre-sur-l'Hate pour se terminer au Champ du diable.

Ses coordonnées selon le quadrillage kilométrique Lambert I zone nord sont :

Extrémité nord-ouest : X = 956,3 - Y = 73,1
Extrémité sud-est : X = 960,4 - Y = 68,2

Lithologie des formations au droit de la coupe

La coupe a été élaborée à partir des cartes géologique à 1/50 000ème de Gérardmer et de Saint-Dié et de leurs notices. Les travaux de P. Fluck et J.P. Von Eller (1971) ont été consultés en complément, et notamment la coupe dans les gneiss donnée pour la région de Saint-Pierre.

Terrains à l'affleurement

Deux compartiments se juxtaposent, séparés par la grande faille vosgienne de Sainte-Marie Retournermer.

A l'ouest de la faille affleure le granites des crêtes : granite à amphibole.

A l'est, on rencontre tout d'abord un prisme plissé et écaillé constituée de gneiss à lithologie variée du groupe des gneiss protérozoïques de Sainte-Marie-aux-Mines, en contact par faille avec le granite du Brézouard et son auréole de métamorphisme.

Les gneiss protérozoïques se retrouvent également à l'ouest du granit des crêtes, avec lequel ils sont en contact par faille.

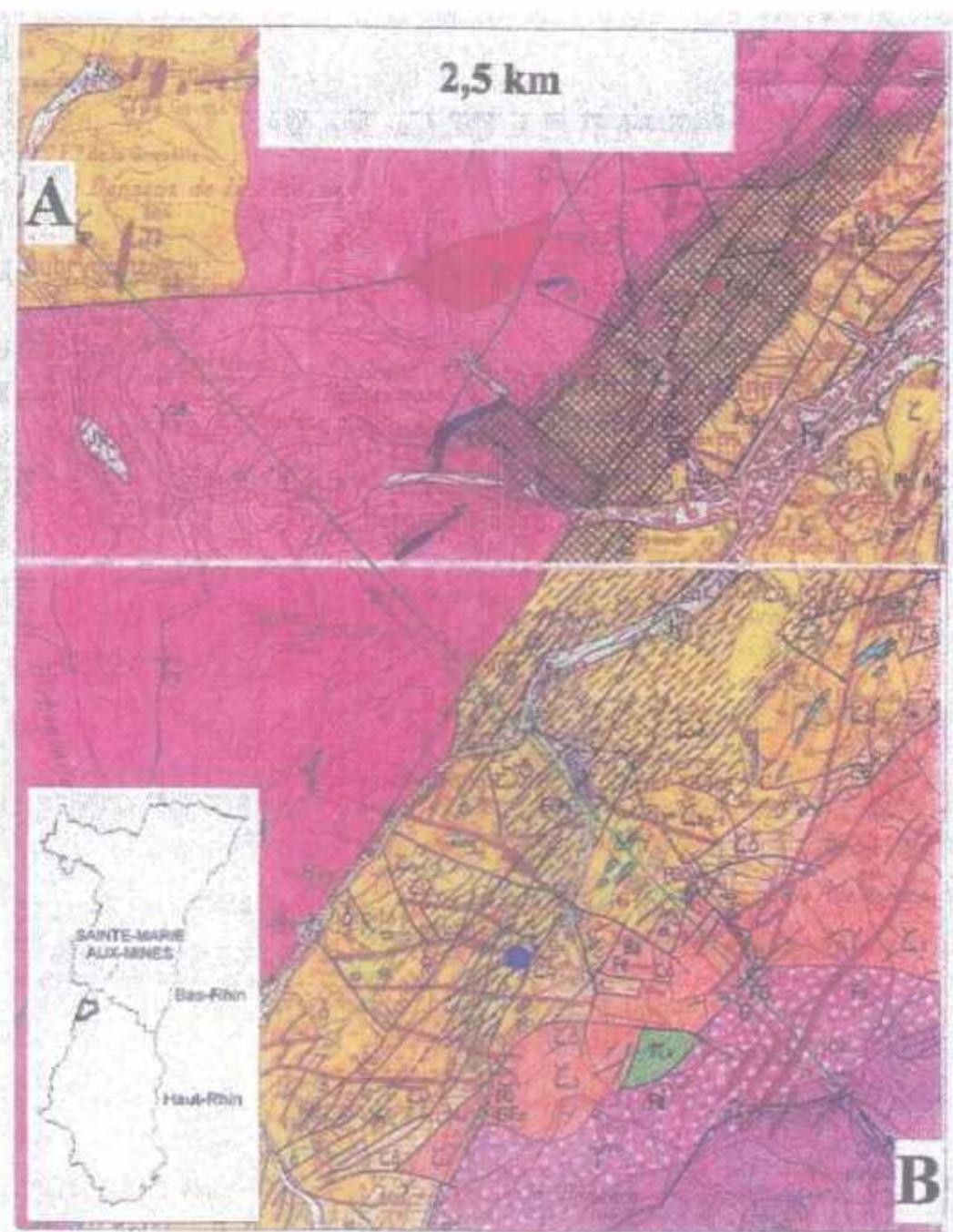


Fig. 18 - Localisation de la coupe de Sainte-Marie-aux-Mines. La pastille bleue indique la position de la station (extrait du rapport BRGM R40744).

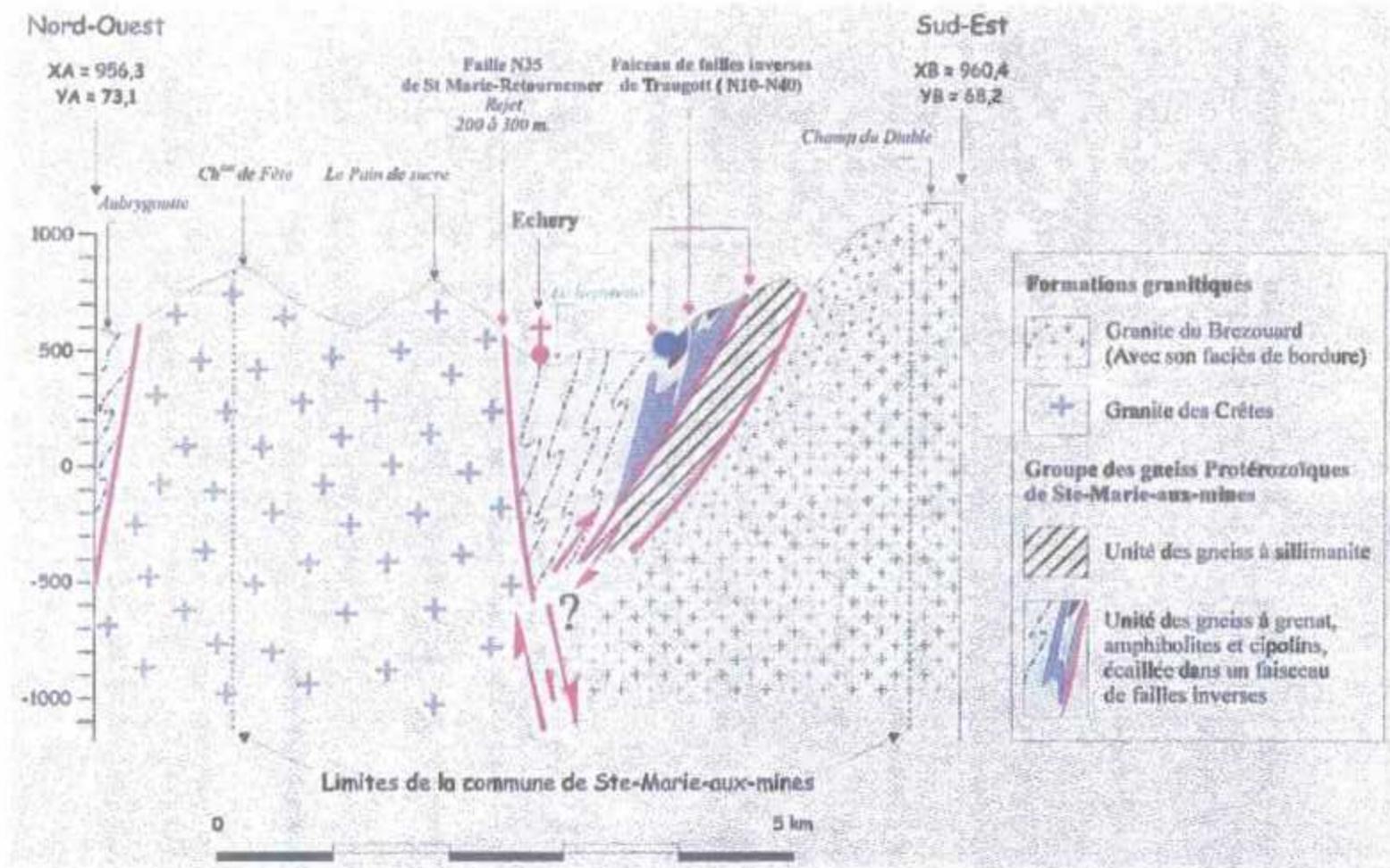
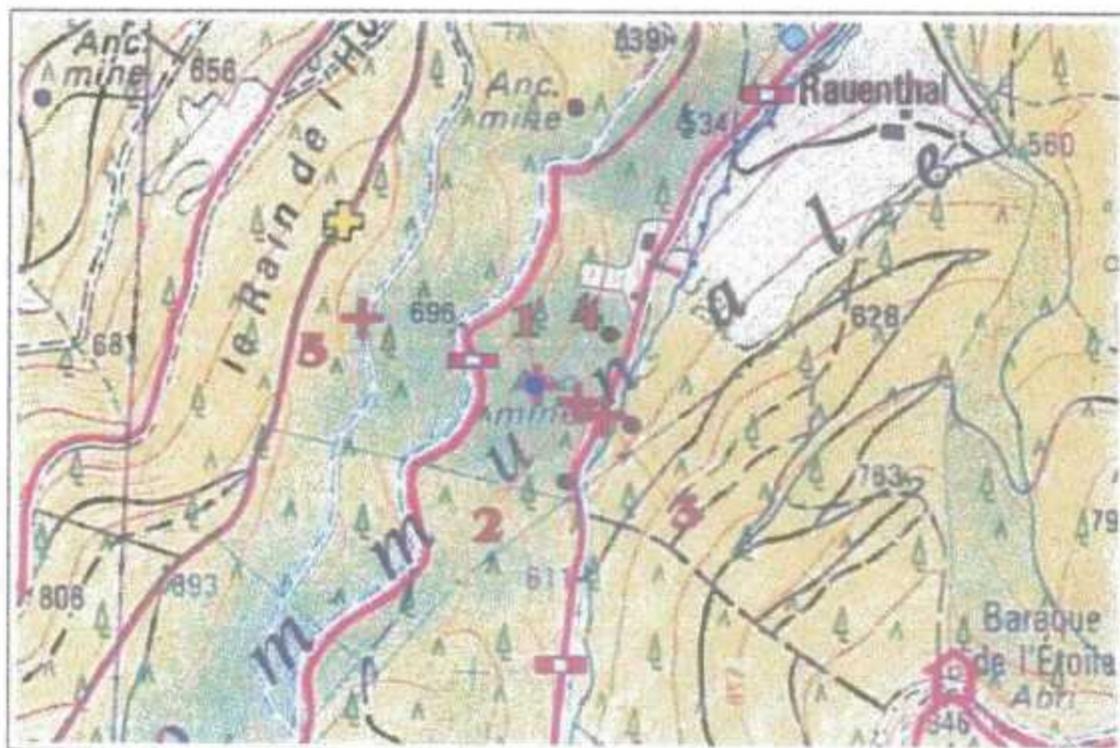


Fig. 19 - Coupe géologique W-E passant par Sainte-Marie-aux-Mines. La pastille bleue indique la position de la station (extrait du rapport BRGM R40744).

3.5.3. Mesures H/V

Les mesures de bruit de fond ont été effectuées sur 5 points encadrant la station déjà en place. La répartition des points est représentée sur la figure 20.



250 m

Fig. 20 - Localisation des mesures de bruit de fond sur la commune de Sainte-Marie-aux-Mines. La pastille bleue indique la position de la station. Le point 1 (station) est en fond de galerie, le point 4 est à la verticale au-dessus du point 1 mais à l'extérieur de la mine.

Le contexte géologique local semble indiquer que l'ensemble du site se trouve sur du rocher avec toutefois la présence ponctuelle de déblais miniers. Les résultats des mesures H/V sont présentés sur la figure 21. Les points 2 et 3 présentent de fortes amplitudes respectivement à 8 et 10 Hz pouvant être interprétées comme la résonance de déblais miniers. On peut remarquer sur tous les points de mesures, sauf pour le point 1, que le rapport H/V est relativement constant autour de 2 sur toute la bande fréquentielle.

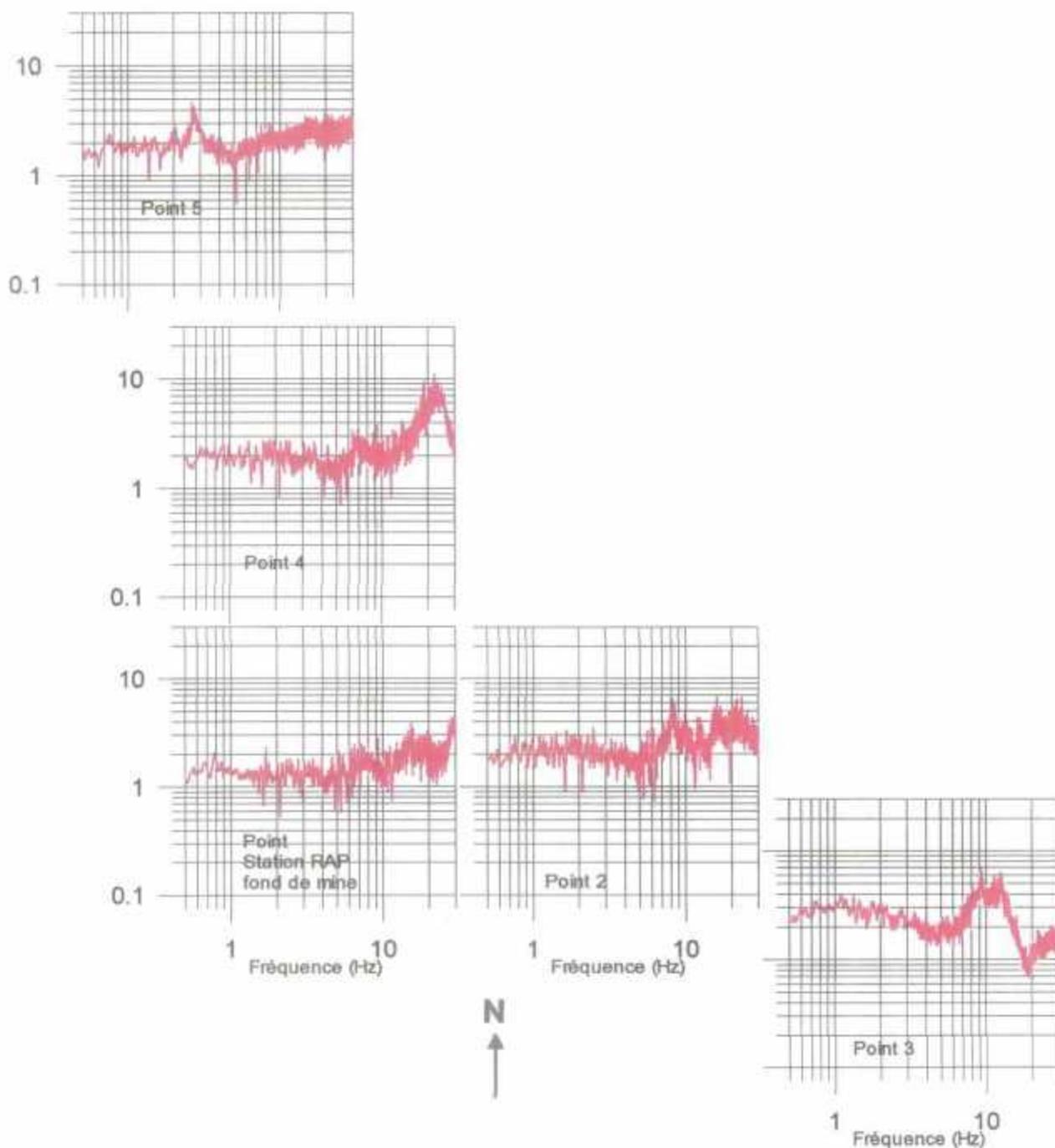


Fig. 21 - Rapports H/V sur la commune de Sainte-Marie-aux-Mines. Le point 1 est à proximité de la station.

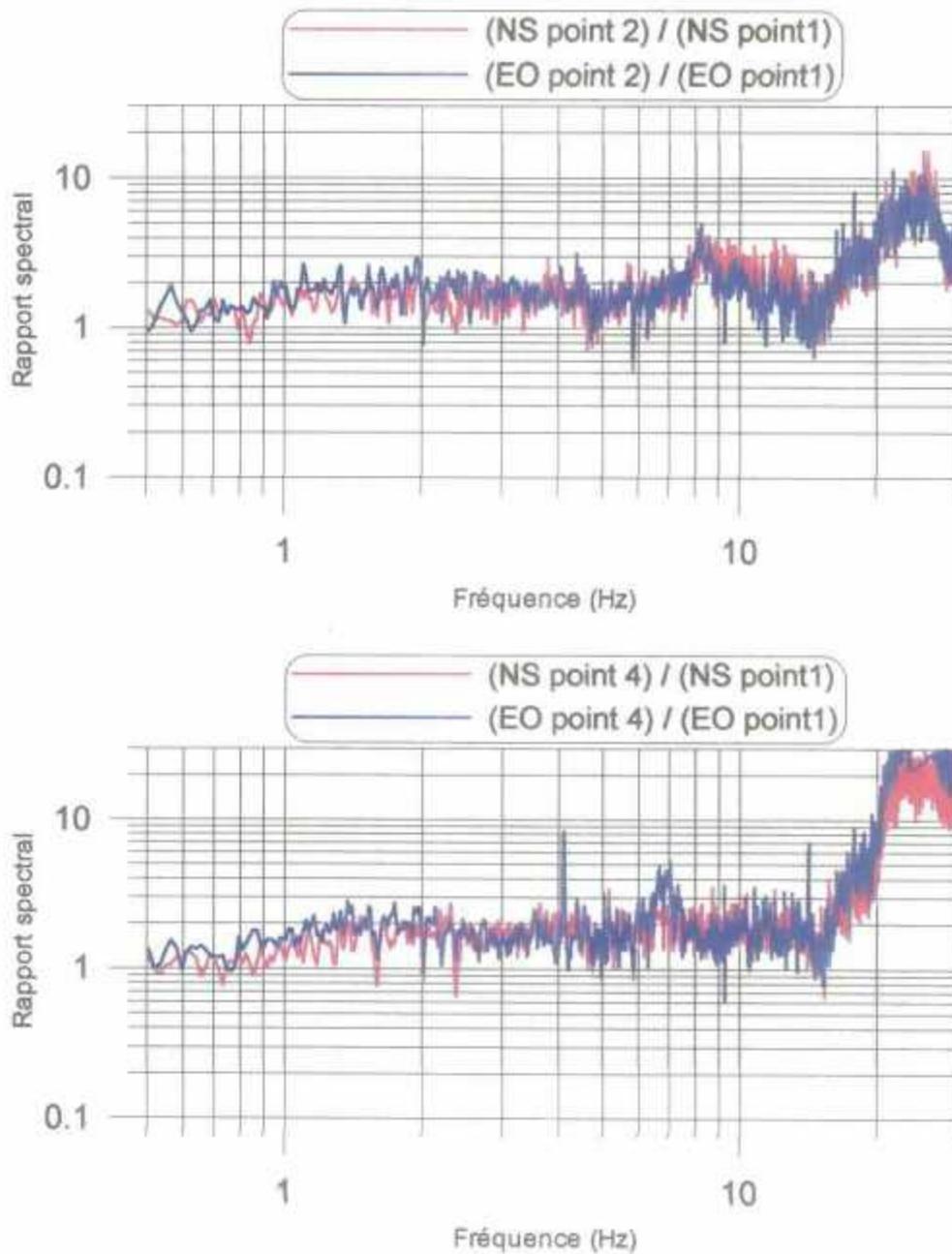


Fig. 22 - Rappports spectraux horizontaux entre le point 2 (entrée de mines), le point 4 (à la verticale du point 1 en extérieur) et le point 1 (fond de galerie) de Sainte-Marie-aux-Mines.

Pour vérifier si le point 1 en fond de galerie est en condition de surface libre ou non, il faudrait bénéficier d'enregistrements effectués simultanément aux points 1 et 2 ou 1 et 4, pour pouvoir effectuer le rapport spectral entre les deux stations. Nous ne bénéficions pas de tels enregistrements. Cependant, les mesures effectuées aux points 1, 2 et 4 ont été réalisées à moins d'une heure d'intervalle et, comme le site est très calme, nous formulons l'hypothèse forte que le bruit de fond est le même pour les différentes mesures. Nous avons donc calculé les rapports spectraux des voies horizontales entre les points 2 et 4 par rapport au point 1 (fig. 22).

On déduit de l'observation de la figure 22 que le point 1 en fond de mine ne se trouve vraisemblablement pas en condition de surface libre. En effet, les rapports spectraux horizontaux entre l'intérieur et l'extérieur (point 2/point 1 et point 4/point 1) de la mine indiquent un facteur proche de 2. Une validation par l'enregistrement simultané d'un séisme par exemple pourrait le confirmer ou l'infirmer.

3.6. SOUFFLENHEIM

3.6.1. Localisation

Les coordonnées de la station sont :

- latitude : 48,81 °N ;
- longitude : 7,92 °E ;
- altitude : 125 m.

3.6.2. Contexte géologique

La configuration géologique du site est représentée par les figures 23, 24 et 25.

La coupe géologique débute à environ 6 km à l'est d'Haguenau, passe immédiatement au sud de Soufflenheim puis par Rountzenheim et se termine à 1 km au sud de Roeschwoog. Ses coordonnées selon le quadrillage kilométrique Lambert I zone nord sont :

Extrémité ouest : $X = 1007 - Y = 140$
Extrémité est : $X = 1018 - Y = 140$

Lithologie des formations au droit de la coupe

La succession lithologique peut être reconstituée à l'aide des documents suivants :

- les cartes géologiques à 1/50 000 de Seltz-Wissembourg et de Haguenau et leurs notices ;
- la synthèse géothermique du Fossé rhénan supérieur ;
- la synthèse géologique du bassin de Paris ;
- les travaux de E. Papillon (traitement et interprétation des cartes d'anomalies magnétiques et gravimétriques du Fossé rhénan supérieur) ;

- les données sismiques Total (synthèses 1985 et 1987),
- les logs des forages profonds voisins de la coupe.

Terrains à l'affleurement

De l'extrémité ouest de la coupe jusqu'à Soufflenheim, le Pliocène affleure par place sur un vaste glacis, à une altitude de +135/+140 m. La carte géologique à 1/50 000 d'Haguenau, indique la présence d'alluvions quaternaires d'âge Riss à Würm, formant la terrasse dite "terrasse d'Haguenau", qui recouvrent le Pliocène partout le long de la coupe. Au contraire, sur la carte géologique de Seltz-Wissembourg, le Pliocène affleure en continu jusqu'à Soufflenheim, n'étant recouvert par les alluvions qu'en fond de vallées.

Au-delà de Soufflenheim vers l'est, s'étend la plaine des alluvions rhénanes récentes, à une altitude voisine de +115/+120 m.

A Soufflenheim, un talus de 15 à 20 m de commandement marque la limite entre le domaine des affleurements pliocènes et celui des alluvions récentes. Ce talus, de direction SW-NE, est occupé par une étroite bande d'alluvions anciennes d'âge Gunz à Würm formant la terrasse dite "terrasse de 10-15 m"

Les dépôts quaternaires

Les alluvions anciennes de la "terrasse d'Haguenau" (Fy ou Fx-y) sont essentiellement constituées de matériaux sableux et graveleux d'origine vosgienne. Leur épaisseur peut atteindre 8 mètres.

Les alluvions de la "terrasse de 10-15 m" (Fv-yR) sont formées d'alternances de graviers et de sables ravinant le Pliocène. Leur puissance est variable, excédant rarement 5 mètres.

Les alluvions de la plaine rhénane récente sont constituées de graviers sables et limons dont l'épaisseur cumulée n'atteint que très rarement 2 à 3 m.

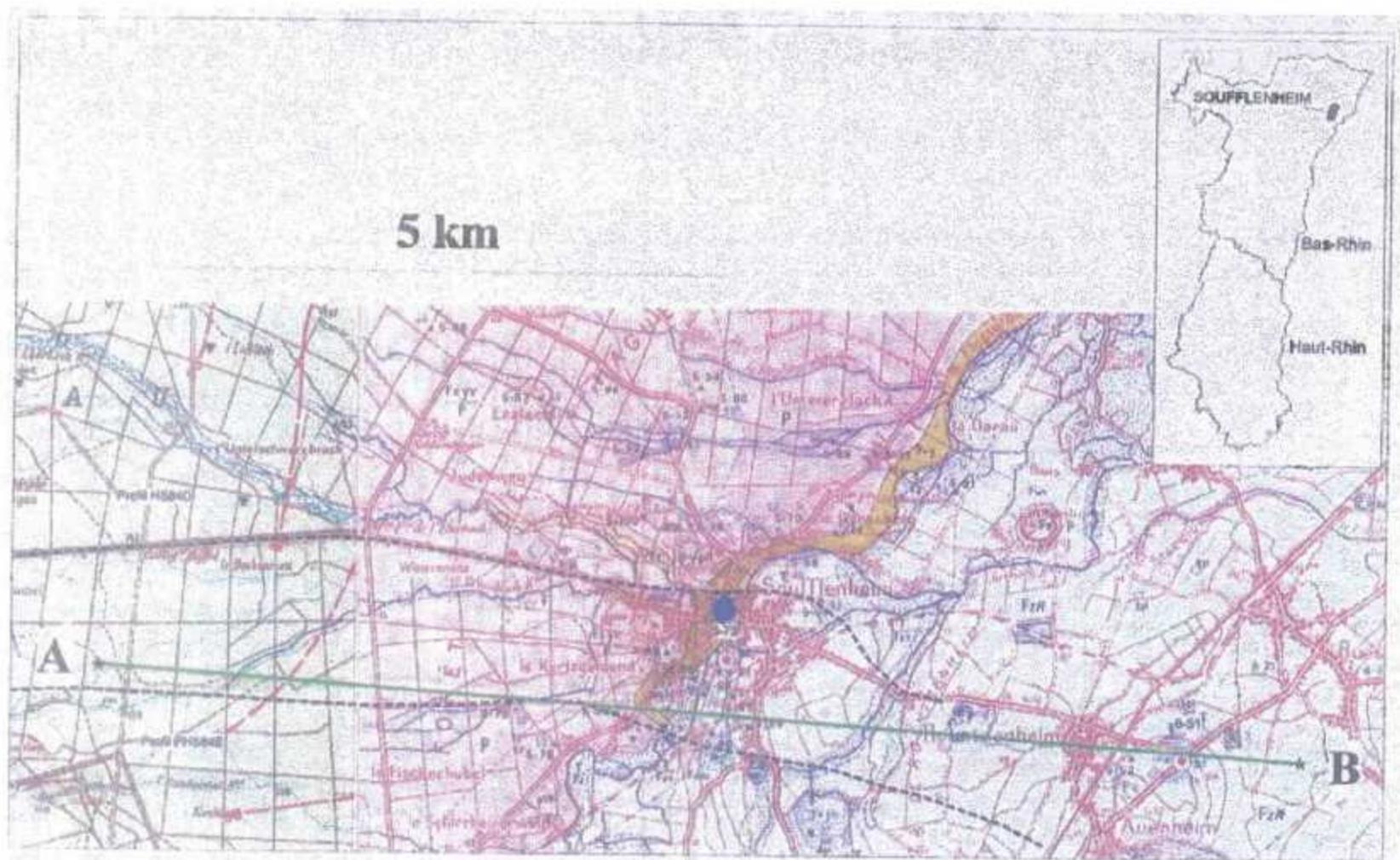


Fig. 23 - Localisation de la coupe de Soufflenheim. La pastille bleue indique la position de la station (extrait du rapport BRGM R40744).

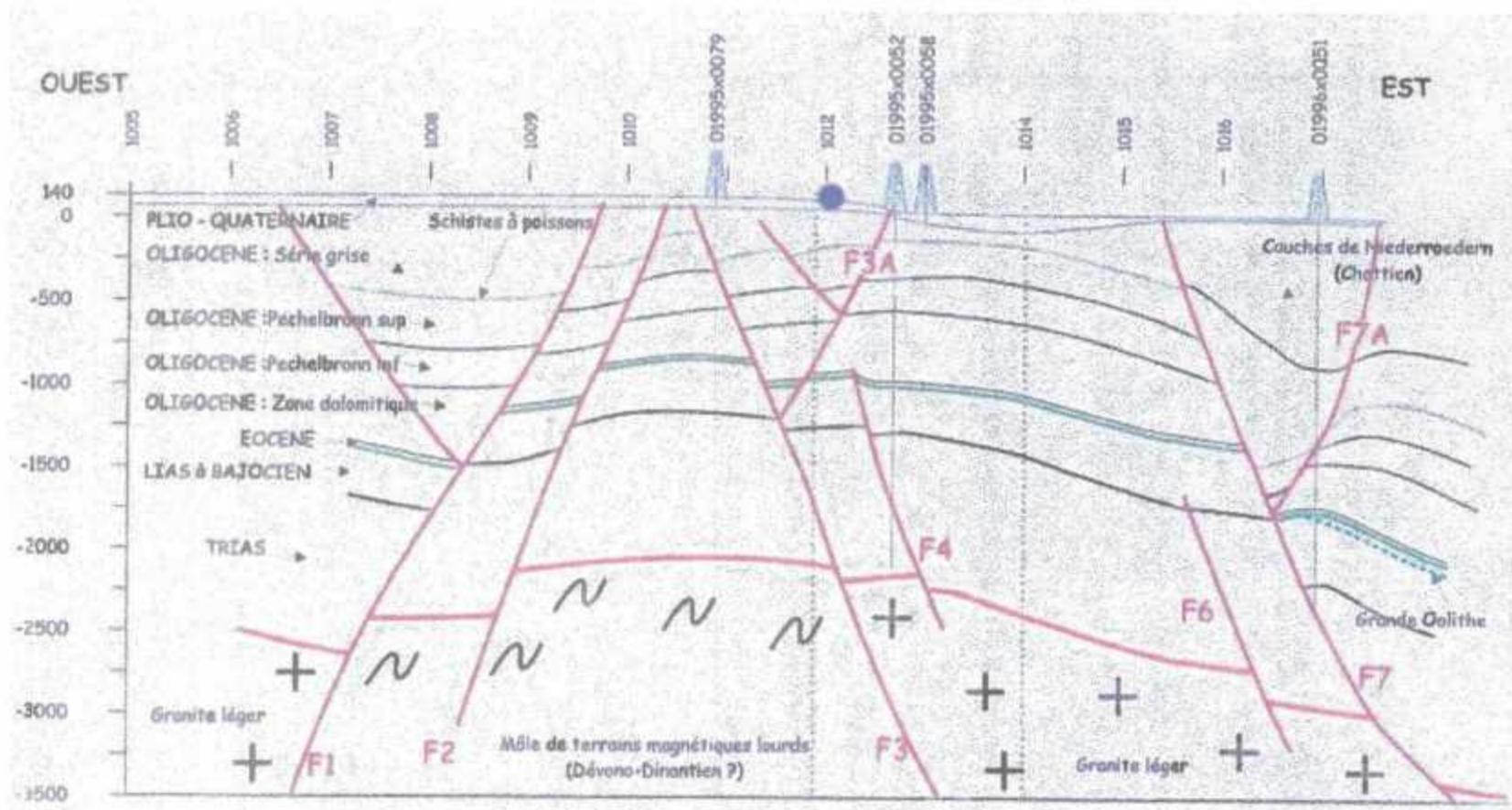


Fig. 24 - Coupe géologique W-E passant par Soufflenheim. La pastille bleue indique la position de la station (extrait du rapport BRGM R40744).

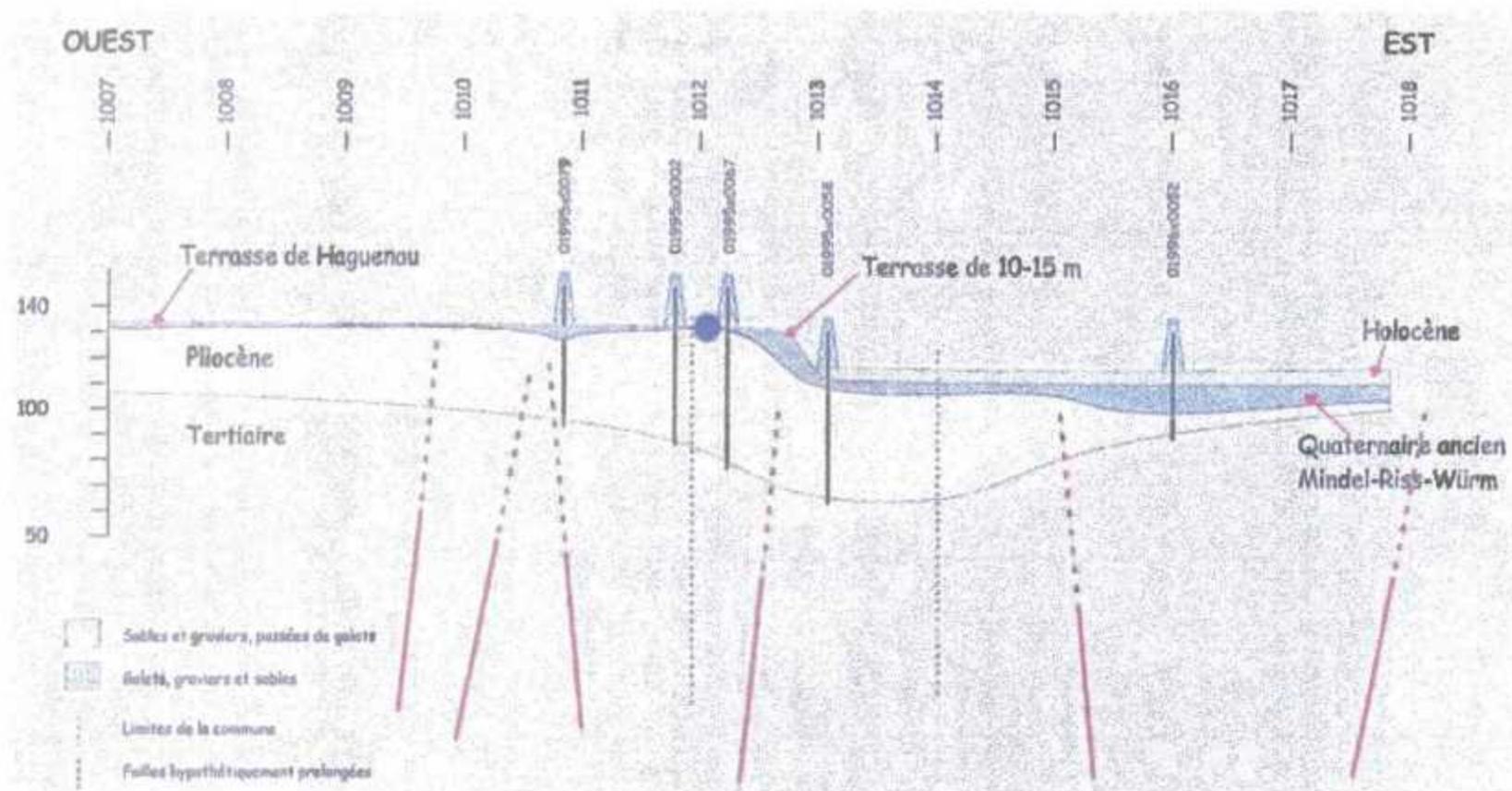
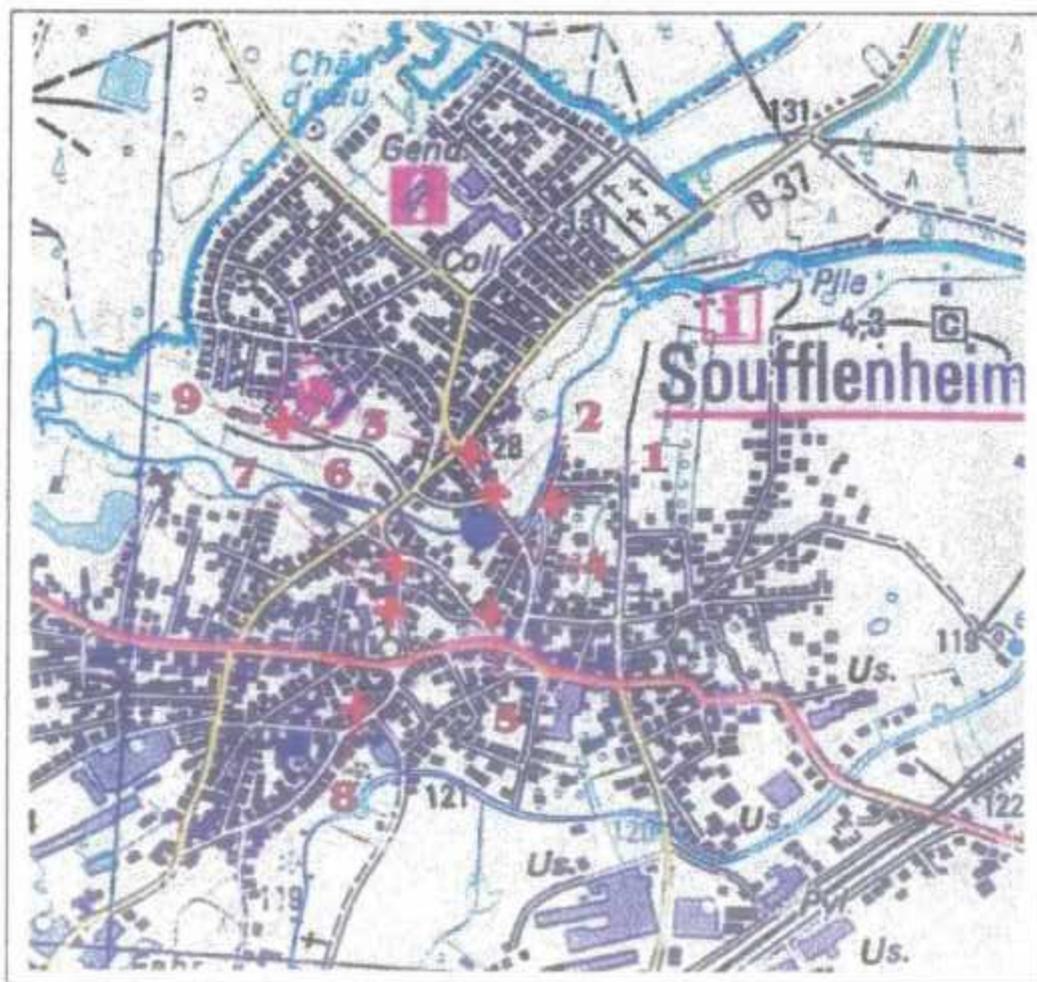


Fig 25 - Détail des terrains plio-quaternaires au droit de la coupe géologique W-E passant par Soufflenheim. La pastille bleue indique la position de la station (extrait du rapport BRGM R 40744).

3.6.3. Mesures H/V

Les mesures de bruit de fond ont été effectuées sur 8 points encadrant la station déjà en place et un point à l'emplacement de la station. La répartition des points est représentée sur la figure 26.



250 m

Fig. 26 - Localisation des mesures de bruit de fond sur la commune de Soufflenheim. La pastille bleue indique la position de la station.

Les courbes H/V des points sur Soufflenheim sont sur la figure 27.

D'après les données géologiques, on peut s'attendre à ce que la couche meuble quaternaire, d'une dizaine de mètres d'épaisseur au droit des points de mesure, engendre un effet de site.

D'autre part, les courbes H/V de la figure 27 indiquent deux fréquences où le rapport H/V est nettement supérieur à 1 : 1,2 Hz et vers 5 Hz.

Dans le tableau 3 ci-après, nous avons reporté les valeurs de V_s estimées pour chaque couple H et f.

	$f=1,2$ Hz	$f=5$ Hz
H = 10 m	48 m/s	200 m/s

Tabl. 3 - V_s calculé à partir de f constaté sur les courbes H/V et H estimé à partir des données géologiques pour le site de Soufflenheim.

La plus forte amplitude de H/V se rapporte au pic à 1,2 Hz, alors que la vitesse V_s calculée (48 m/s) n'a pas de sens. On ne peut donc pas, avec les données dont nous disposons, définir ce qui est à l'origine des amplitudes observées sur les courbes H/V.

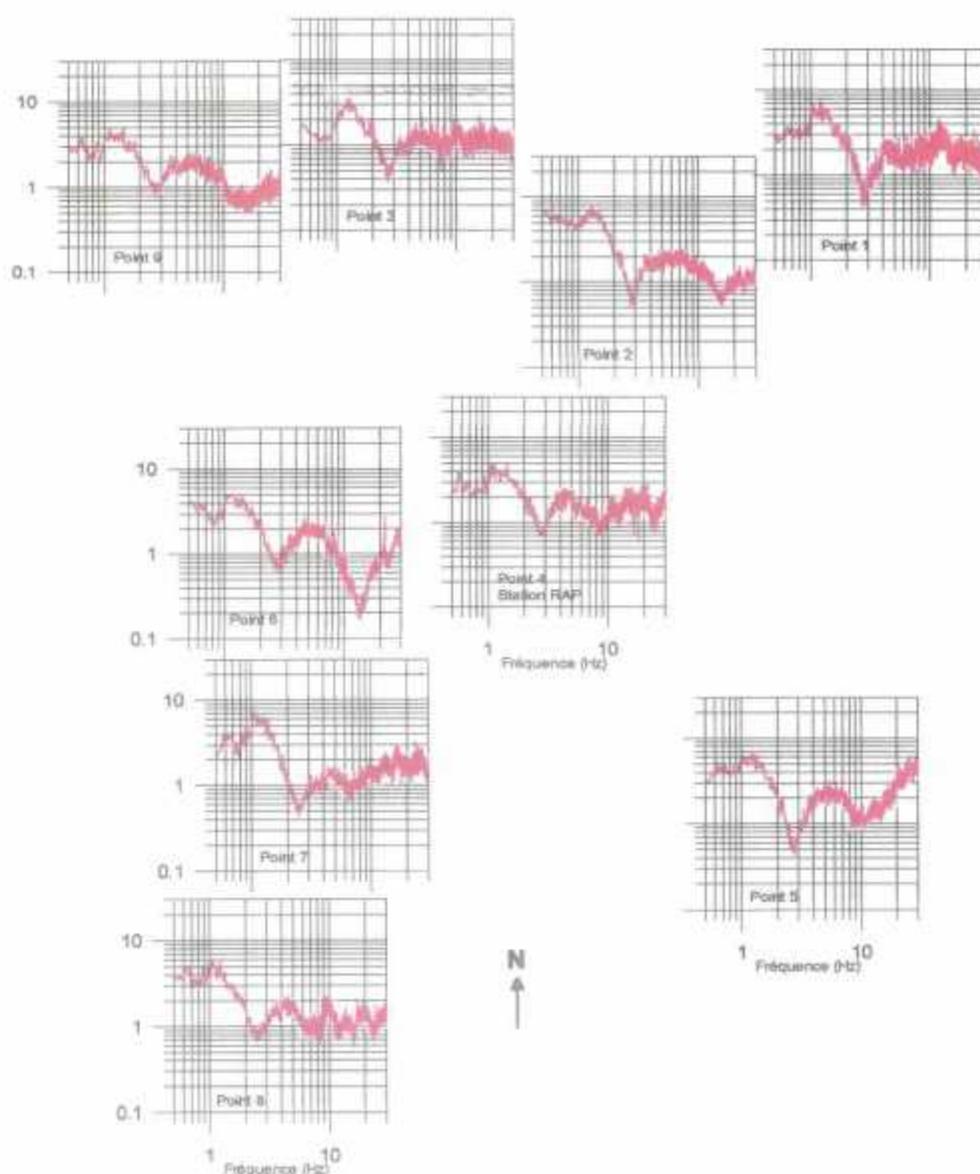


Fig. 27 - Rapports H/V sur la commune de Soufflenheim.

3.7. STRASBOURG

3.7.1. Localisation

Les coordonnées de la station sont :

- latitude : 48,58 °N ;
- longitude : 7,77 °E ;
- altitude : 135 m.

3.7.2. Contexte géologique

La configuration géologique du site est représentée par les figures 28, 29 et 30.

La coupe géologique de Strasbourg est localisée entre Eckbolsheim en périphérie ouest de Strasbourg et Neumul en Allemagne. Le trait de coupe est supposé passer au niveau des bâtiments de l'IPG.

Ses coordonnées selon le quadrillage kilométrique Lambert I zone nord sont :

Extrémité ouest : X = 994 - Y = 112
Extrémité est : X = 1006 - Y = 112

Lithologie des formations au droit de la coupe

La succession lithologique n'est connue que grâce à un forage profond (GCR1 6-100) implanté à 2 km au nord du trait de coupe. Le tracé de certaines failles et la profondeur du toit de la Grande Oolithe ont pu être estimés à partir de certains profils sismiques des campagnes PREPA n° 11, 15 et 28, localisés à 3 km au nord et à 3 km au sud de la coupe.

Des compléments d'informations ont été extraits des documents suivants :

- la carte géologique à 1/50 000 de Strasbourg et sa notice,
- la synthèse géothermique du fossé rhénan supérieur,
- les travaux de E. Papillon (traitement et interprétation des cartes d'anomalies magnétiques et gravimétriques du fossé rhénan supérieur).

Terrains à l'affleurement

La série géologique est partout masquée par les terrains quaternaires de la plaine rhénane.

Vers Eckbolsheim et l'ouest de la gare de Strasbourg, les limons würmiens affleurent, recouvrant un complexe d'alluvions de la Bruche et du Rhin à une altitude quasi constante de +145 m NGF. Puis, sous Strasbourg même et jusqu'à l'extrémité est de la coupe, affleurent les alluvions holocènes de l'Ill et du Rhin, à l'altitude moyenne de +140 m NGF.

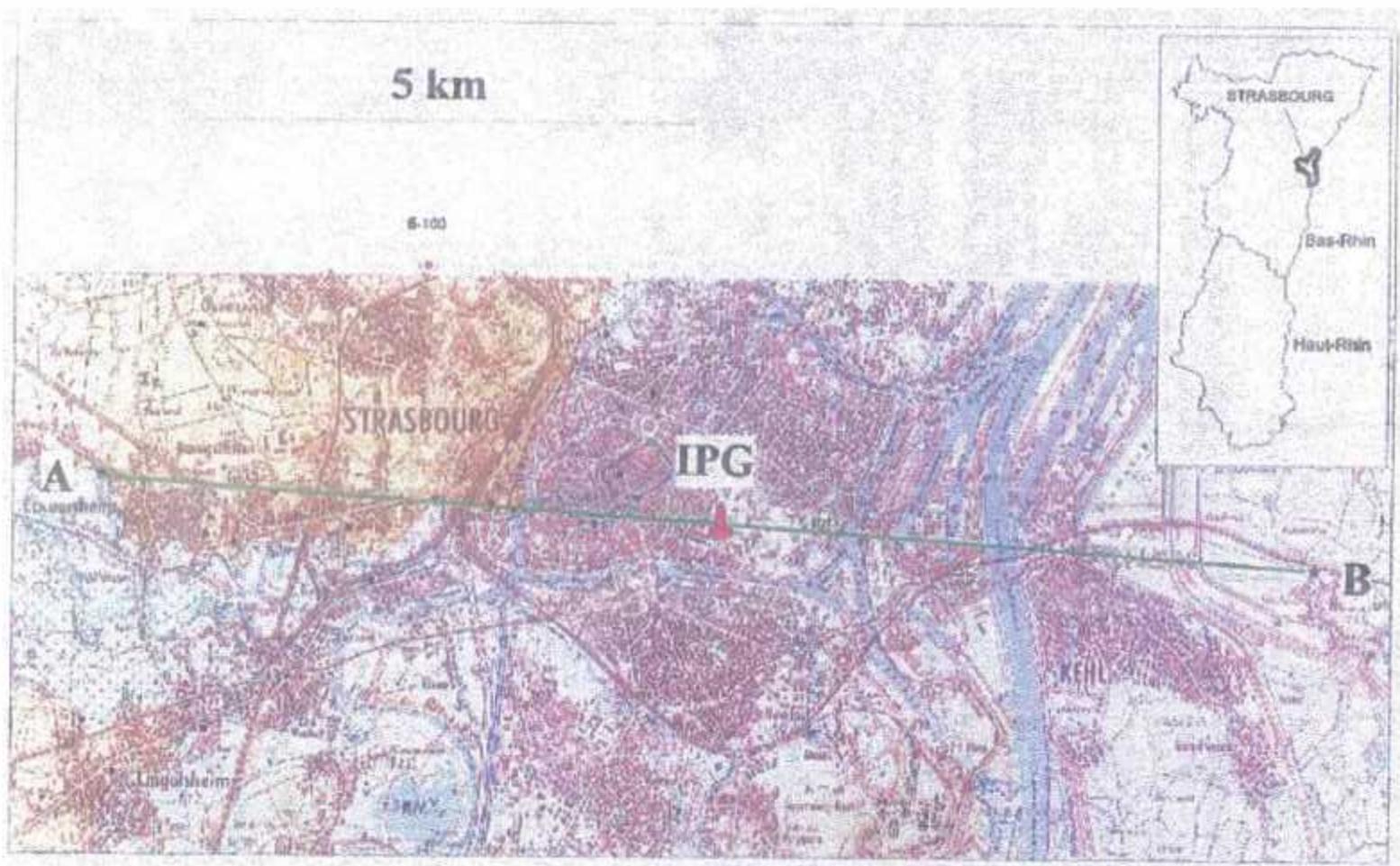


Fig. 28 - Localisation de la coupe de Strasbourg. Le cône rouge indique la position actuelle de la station (extrait du rapport BRGM R40744).

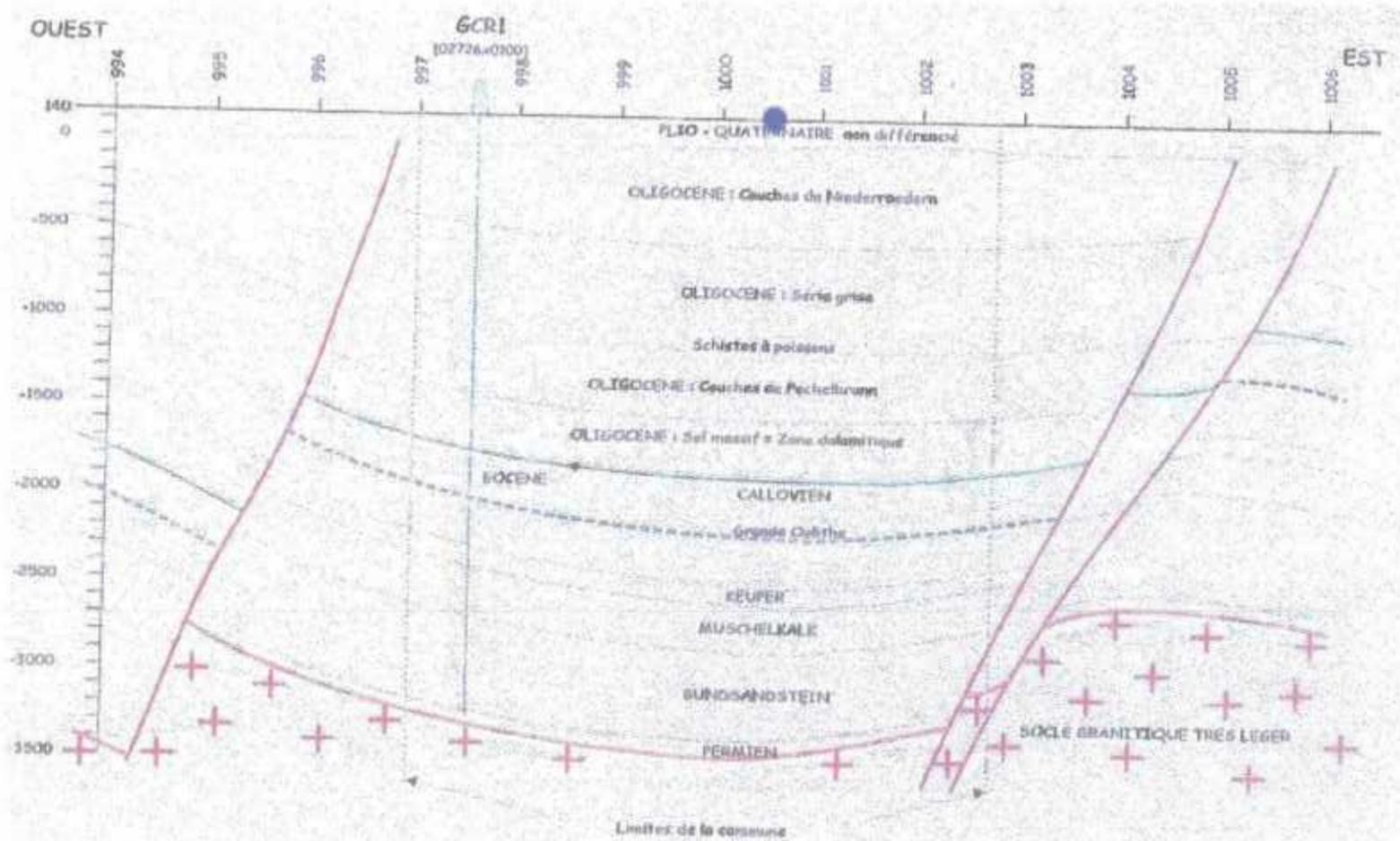


Fig. 29 - Coupe géologique W-E passant par Strasbourg. La pastille bleue indique la position de la station (extrait du rapport BRGM R40744).

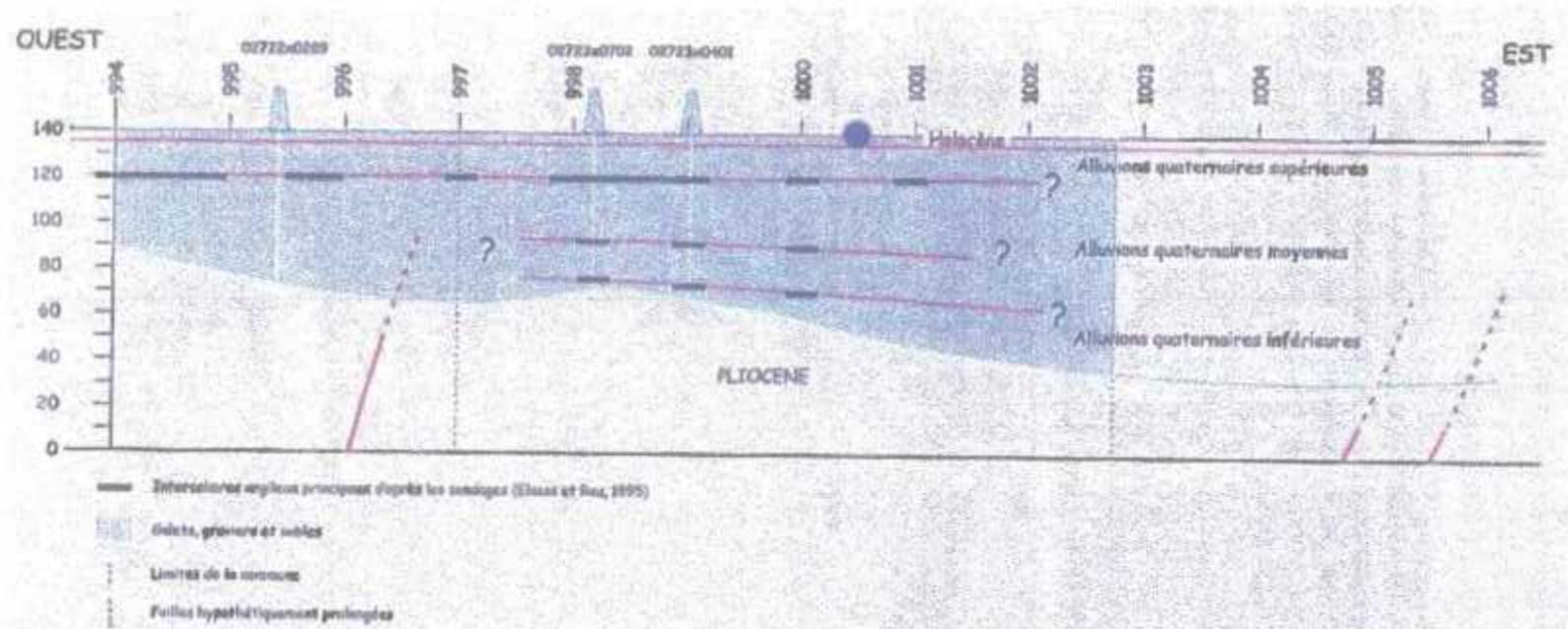


Fig. 30 - Détail du Quaternaire au droit de la coupe géologique W-E passant par Strasbourg (IPG). La pastille bleue indique la position de la station (extrait du rapport BRGM R40744).

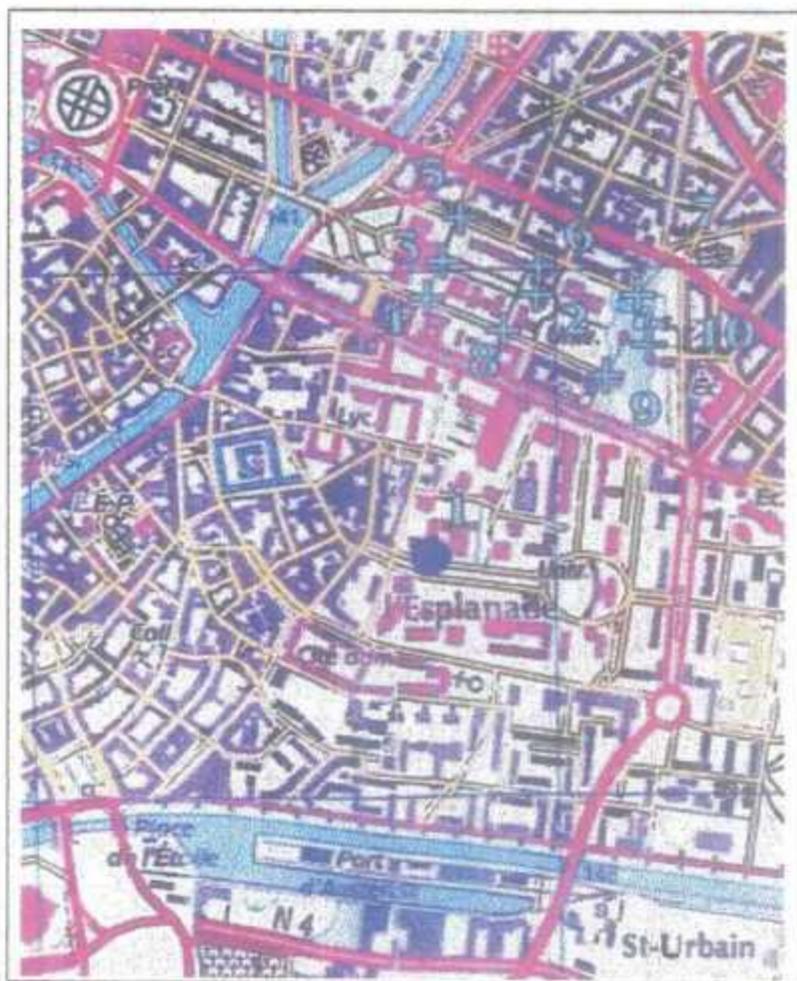
Les dépôts quaternaires

Cette série est recouverte en discordance par le remplissage alluvial de la plaine ello-rhénane, et dans lequel les terrains pliocènes et quaternaires n'ont généralement pas été différenciés dans les forages qui les ont traversés.

Dans le sondage GCR1, le Plio-Quaternaire est représenté par 80 m de dépôts. Son contact avec l'Oligocène supérieur (couches de Niederroedern) se situe à la cote +60 m. Un sondage, implanté près de l'hôpital civil de Strasbourg, a traversé 65 m de Quaternaire, représenté par des couches de graviers, sables et galets, interrompues par des niveaux argileux fossilifères. Le forage a été arrêté après avoir traversé 2,5 m de Pliocène.

3.7.3. Mesures H/V

La répartition des points est représentée sur la figure 31.



250 m
↔

Fig. 31 - Localisation des mesures de bruit de fond sur Strasbourg. La pastille bleue indique la position de la station déjà en place (pilier IPG).

Ayant connaissance d'un éventuel déplacement de la station strasbourgeoise (actuellement à l'IPG), nous avons instrumenté le futur lieu d'implantation (points 2 à 10), ainsi que l'ancien emplacement (point 1). La courbe H/V au point 1 (pilier IPG) est représentée sur la figure 32. Les courbes H/V des points 2 à 10 sur Strasbourg sont sur la figure 33. Le point 2 se trouve au droit du futur emplacement de la station.

D'après les données géologiques, on peut s'attendre à ce que la couche meuble Quaternaire de 65 à 80 m d'épaisseur au droit des points de mesure résonne.

D'autre part, les courbes H/V des figures 32 et 33 indiquent deux fréquences où le rapport H/V est nettement supérieur à 1 : 0,6 Hz et vers 5 Hz.

Dans le tableau 4, nous avons reporté les valeurs de V_s estimées pour chaque couple H et f.

	f=0,6 Hz	f=5 Hz
H = 65 m	156 m/s	1300 m/s
H = 80 m	192 m/s	1600 m/s

Tabl. 4 - V_s calculé à partir de f constaté sur les courbes H/V et H estimé à partir des données géologiques pour le site de Strasbourg.

Les valeurs de vitesses V_s calculées ne semblent pas être en accord avec les valeurs de vitesses d'ondes S que l'on peut rencontrer sur de telles épaisseurs pour des terrains quaternaires. On ne peut donc pas avec les données dont nous disposons déterminer ce qui est à l'origine des amplitudes observées sur les courbes H/V.

Les données du point 5 n'ont pu être récupérées à cause d'une défaillance du matériel.

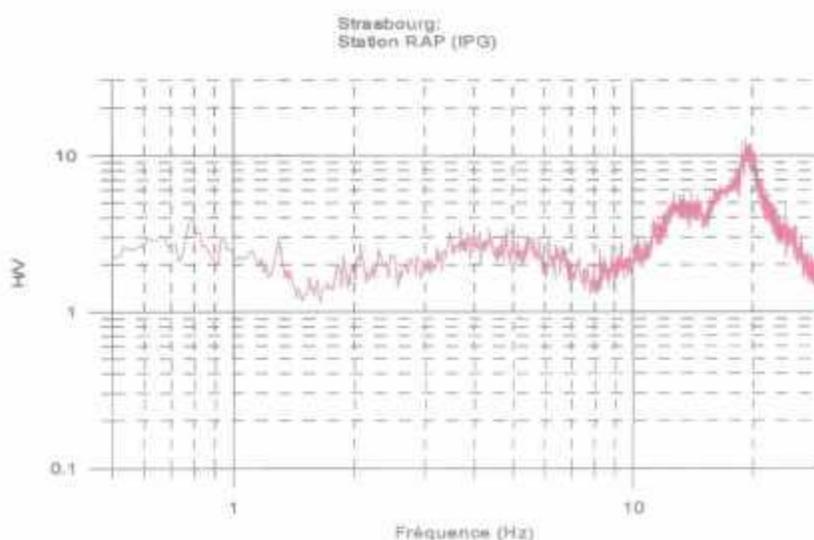


Fig. 32 - Rapport H/V au droit de l'actuelle station (pilier IPG) sur la commune de Strasbourg.

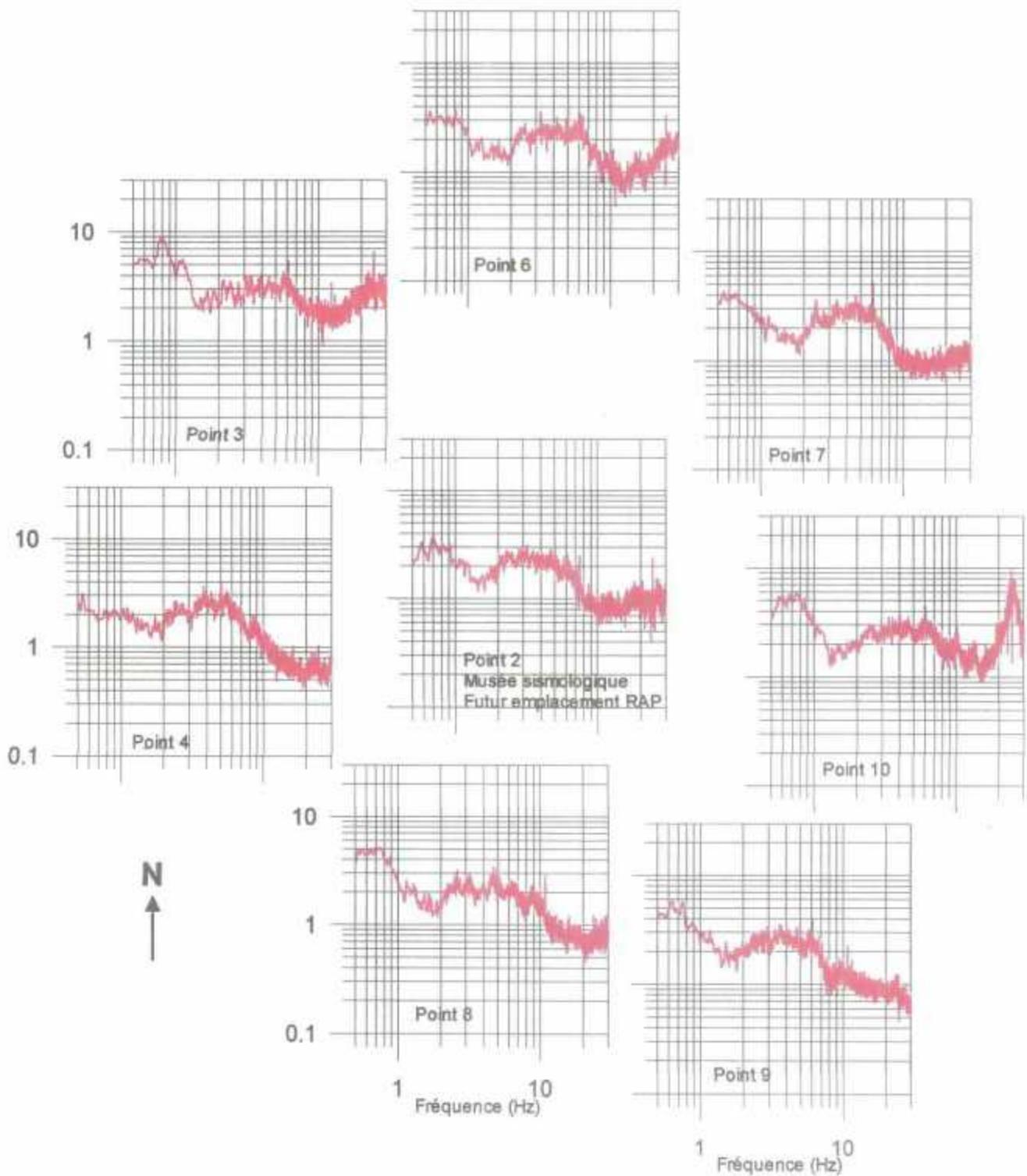


Fig. 33 - Rapports H/V au musée sismologique de Strasbourg.

4. Conclusion

Des mesures H/V ont été réalisées sur sept sites accueillant ou devant accueillir des stations du réseau accélérométrique du Fossé rhénan supérieur, associé au RAP (Réseau Accélérométrique Permanent).

Un dispositif de 9 points de mesure éloignés de quelques centaines de mètres les uns des autres et incluant un point au droit de la station a permis d'avoir une vision globale de la forme du rapport H/V et donc de vérifier la cohérence des résultats autour de la station.

Il en ressort que :

- la présence d'effets de sites lithologiques est fortement suspectée pour les stations de Bollwiller, Brunstatt, Soufflenheim, Strasbourg ;
- la station accélérométrique de Saint-Marie-aux-Mines située en fond de galerie de mines ne semble pas présenter les caractéristiques d'une station en champ libre. Le rapport des composantes spectrales horizontales entre les stations en surface (à l'aplomb de la station et à l'entrée de la galerie) et la station en fond de galerie est proche de 2 sur toute la bande fréquentielle étudiée (0,5 Hz - 30 Hz).

Une confrontation systématique avec la géologie locale et les terrains décrits à l'affleurement par Robelin (1999) ne suffisent pas à expliquer les fréquences observées.

Les résultats fournis par les enregistrements réalisés aux Fournets (Doubs) et à Hésingue semblent difficilement exploitables compte tenu de la dérive importante observée sur les spectres de Fourier des trois composantes à basse fréquence.

Ceci doit conduire à entreprendre un programme de reconnaissances géophysiques et géotechniques spécifique au droit des stations situées principalement sur le Fossé rhénan, afin d'apprécier les caractéristiques mécaniques des sols sous-jacents. Ce programme pourrait être complété par la mise en place d'études site sur référence, lorsque cela est possible, c'est-à-dire lorsque les stations sur "sols mous ou moyens" ne se trouvent pas trop éloignées d'affleurements rocheux ou de très bonnes caractéristiques mécaniques.

Bibliographie

- Fluck P, Von Eller J.P. (1971) - Contribution à l'étude tectonique des gneiss de Sainte-Marie-aux-Mines. *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 24, 2-3, p. 149-178.
- 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.
- Papillon E. (1995) - Traitements et interprétations des cartes d'anomalies magnétiques et gravimétriques du fossé rhénan supérieur. diplôme d'ingénieur de l'Ecole de Physique du Globe. *Document BRGM*.
- Robelin C. (1999) - Réseau accélérométrique du Fossé rhénan supérieur : coupes géologiques commentées au droit des nouvelles stations. Rap. BRGM R 40744, 89 p., 25 fig.
- 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.
- Synthèse géothermique du Fossé rhénan supérieur - BRGM, Geologisches landsamt Baden-Wurtemberg - Strasbourg, Freiburg . 51 p., 4 ann., 21 pl. hors texte.
- Synthèse géologique du bassin de Paris (1980). Mémoires du BRGM 101 et 102.

