

INVESTIGATIONS GÉOPHYSIQUES DU PLANCHER DE CALCITE ET DU REMPLISSAGE SÉDIMENTAIRE DE LA SALLE DE LA STRUCTURE DE BRUNIQUEL

KOEN VAN NOTEN^{1,2}

CHRISTIAN BURLET¹

SERGE DELABY³

THOMAS LECOCQ²

SOPHIE VERHEYDEN^{1,4}

1 *Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, Service géologique de Belgique, Bruxelles, Belgique, cburlet@naturalsciences.be*

2 *Observatoire royal de Belgique, Bruxelles, Belgique, koen.vannoten@seismology.be, thomas.lecocq@oma.be*

3 *Géoparc Famenne-Ardenne, Belgique, serge.delaby@geoparkfamenneardenne.be*

4 *Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (IRSNB), actuellement au SPP BELSPO, Belgique, veso@belspo.be*

1. INTRODUCTION

■ L'objectif de cette étude est d'investiguer le sous-sol de la Salle de la Structure (l'épaisseur du plancher stalagmitique et du remplissage sédimentaire) jusqu'à l'encaissant calcaire (forme de la grotte) au moyen de deux techniques de géophysique non-invasives : la tomographie électrique et la sismique passive (méthode HVSR). Ces méthodes ont été décrites dans les perspectives ou compte-rendu des rapports précédents (Delaby *et al.*, 2016 ; Van Noten *et al.*, 2017).

1.1 RAPPEL DES RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE 2017

■ Les résultats des mesures HVSR menées en 2017 pendant deux jours dans la cavité (mesures ponctuelles de 15 minutes avec réplicas et une mesure nocturne de 3h) montraient un pic de résonance autour de 13.5 Hz au droit des structures. Cette fréquence suggérait la présence d'un contraste de vitesse sismique à 3 - 5 m sous le plancher stalagmitique, et donc d'un substrat rocheux à cette profondeur. Étant donné les résultats encourageants de la campagne 2017, des mesures complémentaires ont été planifiées pour la campagne de mai 2018.

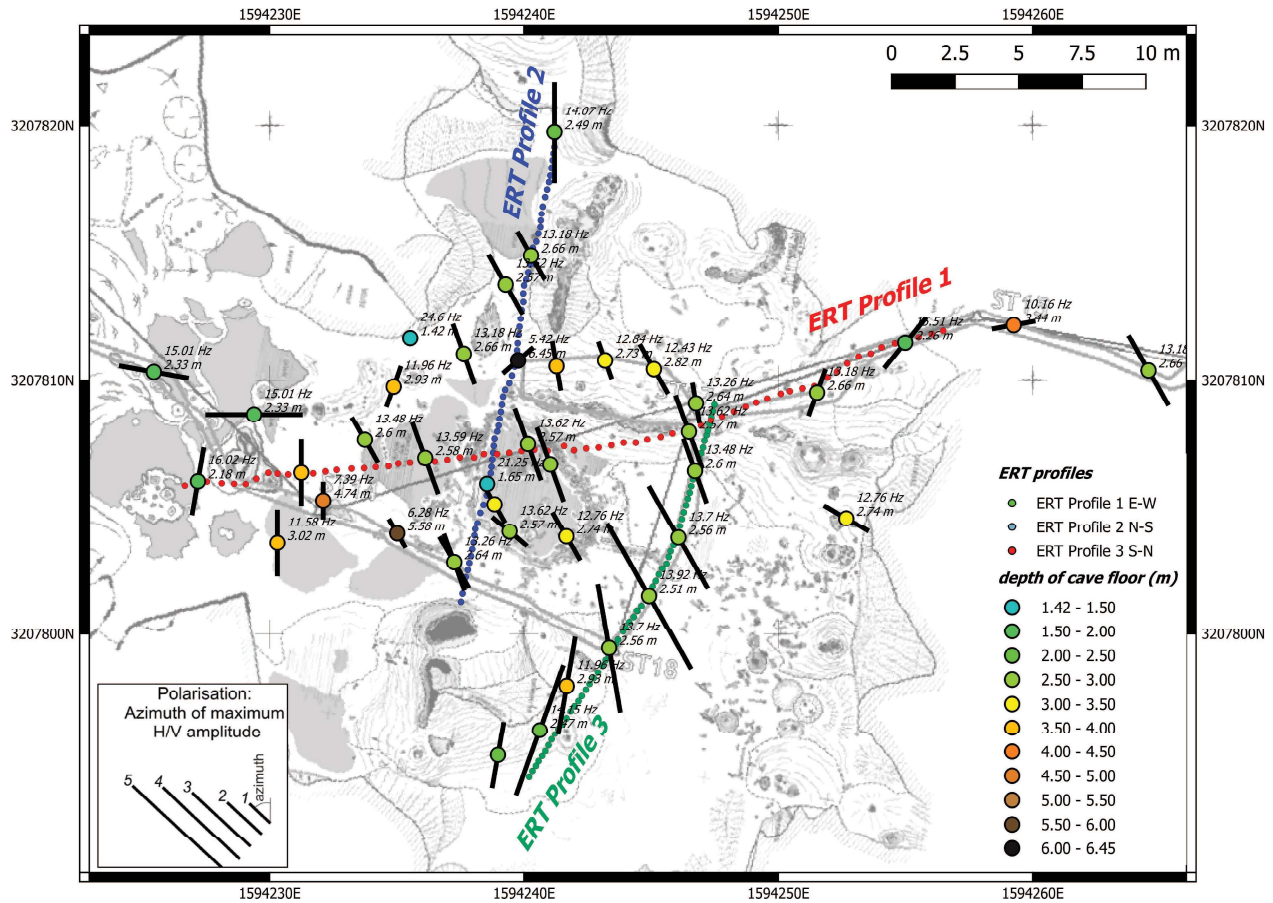


Fig. 63 ■ Grotte de Bruniquel. Plan synthétique de l'implantation des mesures géophysiques et résultats synthétique des mesures HVSR. Les Ligne noires autour des mesures sismiques indiquent la direction de l'amplitude maximale du signal H/V.

2. IMPLANTATION DES MESURES DE LA CAMPAGNE 2018

2.1 IMPLANTATION DES MESURES DE SISMOLOGIE PASSIVE (HVSR)

■ Les mesures HVSR ont été réalisées au moyen de 3 Cityshark II portables (firme LEAS) connectés à trois sismomètres LE-3Dlite 1s. 42 mesures ont été réalisées dans la Salle de la Structure (dans et autour des structures) sur une période de deux jours. Ces mesures, combinées à celles de 2017, couvrent 38 emplacements localisés à la *fig. 63*. L'utilisation des trois sismomètres a permis de réaliser des mesures simultanées, d'une durée de 20 minutes pour la plupart, avec des répliques occasionnels d'1,5 h (pause de midi) et 9 h (mesures nocturnes). La fréquence de résonance à chaque station a été déterminée à partir d'une analyse HVSR du bruit ambiant et a ensuite été convertie en profondeur pour étudier le remplissage en cavité.

Les Citysharks n'étant pas synchronisés (absence de réception GPS), les 3 instruments ont tous été lancés simultanément manuellement. Les petits décalages temporels ont été corrigés avant d'inverser les mesures en profils profondeur-vitesse. Étant donné que cette méthode est totalement passive, et qu'une attention particulière a été apportée au placement du sismomètre (placé dans le cheminement, ou bien sur le plancher de calcite) ces mesures non invasives n'ont par ailleurs laissé aucune trace sur le site.

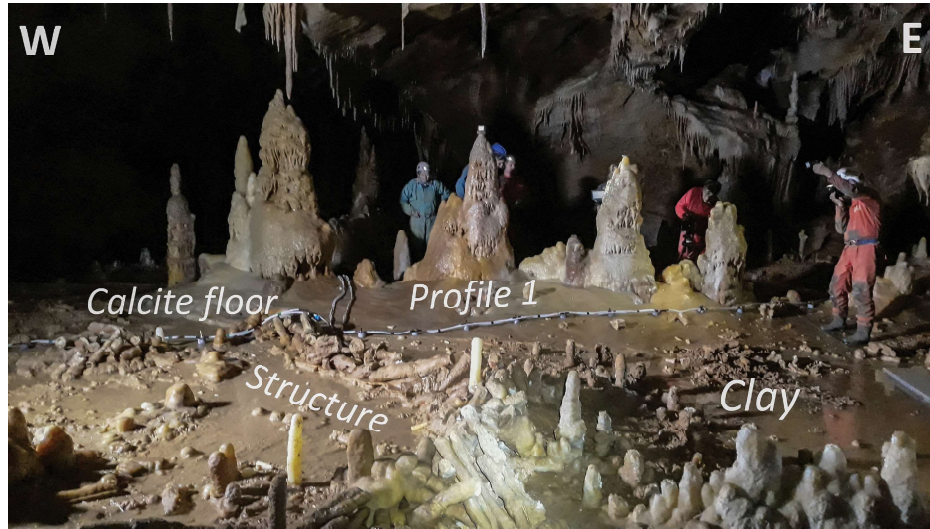


Fig. 64 ■ Grotte de Bruniquel. Déploiement du dispositif de tomographie électrique dans la salle de la Structure.

Les points de mesure ont été replacés sur le plan de la Salle de la Structure en se basant sur les points topographiques présents aux abords des structures et en mesurant leurs directions et leurs niveaux relatifs au moyen d'un Leica Disto « X » (*fig. 63*).

2.2 IMPLANTATION DES PROFILS DE TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE (ERT)

■ Trois profils de tomographie électriques ont été réalisés dans la Salle de la Structure, en profitant des plus longues distances disponibles suivant la configuration du site (*fig. 63*) : un profil E-W (31,5 m) le long de l'axe longitudinal de la grotte principale et deux profils N-S (20 m et 17 m de long) perpendiculaires à la structure de la grotte. Pour l'ERT, les protocoles « gradient » et « dipôle-dipôle » ont été utilisés.

Les profils ont été réalisés au moyen d'un ABEM Terrameter LS et de 64 électrodes de contacts (pads en caoutchouc conducteur : 28 cm² de surface, résistance de contact de 80 à 100 ohms, avec quelques-uns – identifiés sur les profils – à 200 ohms) montées sur des câbles réalisés spécialement pour la campagne de Bruniquel (espacement d'électrodes maximal de 50 cm) (voir exemple de placement en *fig. 64*). Dans un environnement argileux, les différences de résistance de contact entre des pads peuvent générer de petits artefacts de mesures (constatés lors de tests réalisés dans la grotte de Han-sur-Lesse en Belgique) ; cependant, en raison de la résistivité élevée du plancher stalagmitique à Bruniquel, ces différences sont négligeables.

3. RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

■ Les modélisations par inversion des profils de tomographies électriques ont été réalisées avec une version du logiciel RES2DINV adaptée par l'Observatoire royal de Belgique. Les profils inversés montrent l'épaisseur très variable du plancher stalagmitique (entre 0 et 1,5 m) (*fig. 65*) et à certains endroits, l'encaissant rocheux (présent à 2,5 m de profondeur sur le profil 3).

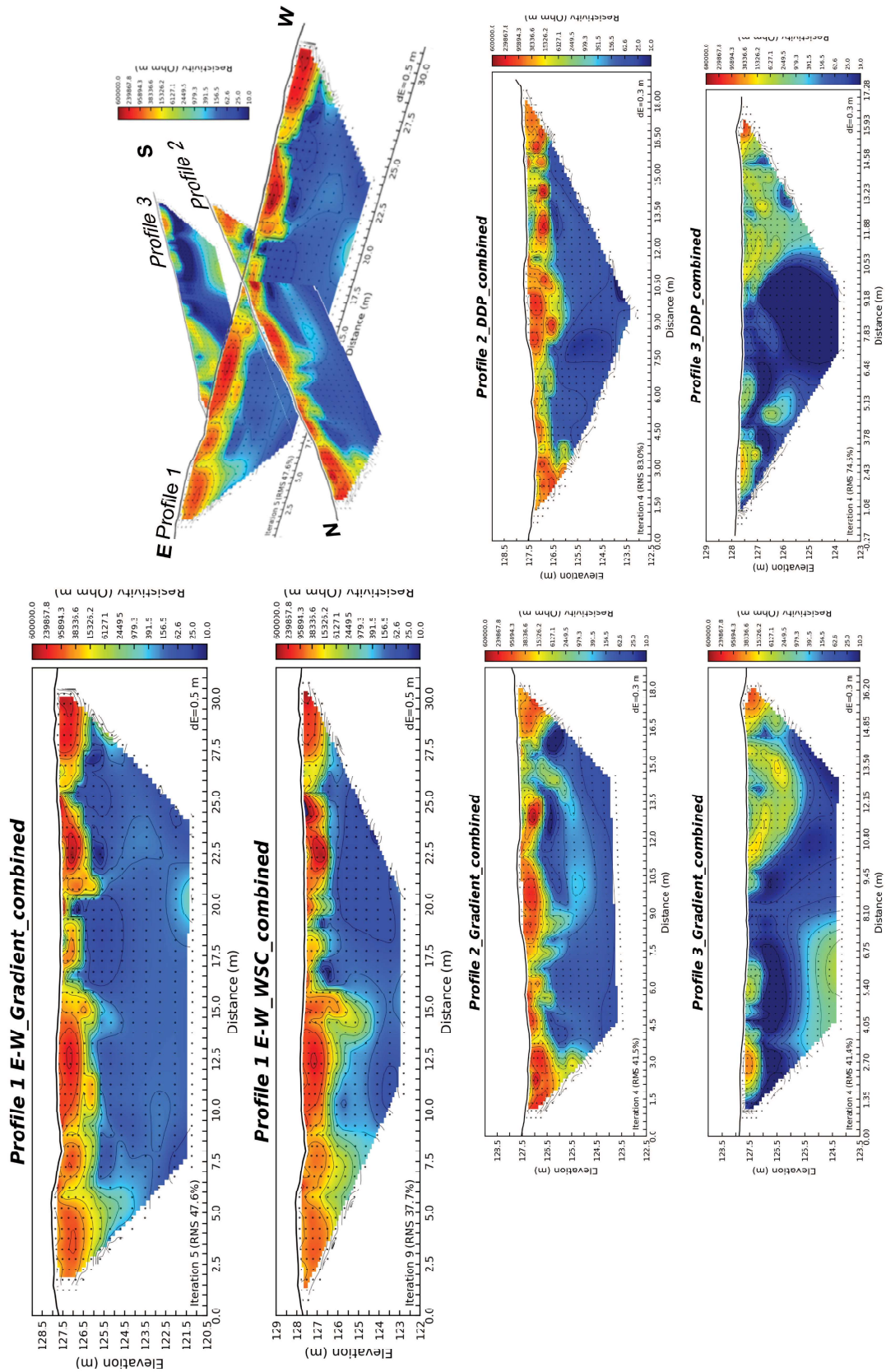


Fig. 65 ■ Grotte de Bruniquel. Résultats préliminaires des inversions des profils de tomographie électrique réalisés dans la Salle de la Structure.

La haute résistivité du plancher stalagmitique ($> 100\text{k ohm.m}$) empêche l'investigation de l'encaissant rocheux au niveau des profils 1 et 2 (les faibles courants injectés ne circulant que dans l'argile sous-jacente). La tomographie électrique a donné d'assez bons résultats dans les zones où les électrodes étaient placées directement sur le remplissage argileux (profil 3, réalisé sur le cheminement). L'analyse de l'ERT suggère pour ces endroits une profondeur du substrat rocheux à une profondeur d'environ 2,5 m. Un traitement approfondi des profils ERT doit encore être entrepris pour éliminer les artefacts de mesures (ex : court-circuit, haut taux d'erreurs) dus à la présence d'eau au niveau des structures notamment.

La partie supérieure des profils montrant la forme du plancher stalagmitique (profils 1 (E-W) et 2 (N-S) recoupant les structures) méritera une interprétation plus approfondie, notamment au droit de la grande structure A, où les profils se croisent et où l'on constate un profil de résistivité différent pour les premières dizaines de centimètres.

Les traces sismiques ont été analysées dans GEOPSY, un logiciel open-source, permettant de calculer la f_0 (fréquence propre) de chaque mesure (exemple en *fig. 66*). L'analyse HVSR des stations placées directement sur le remplissage argileux indique des pics de fréquence de résonance clairs autour de ~ 13 Hz. La conversion de cette fréquence de résonance et de cette profondeur en vitesse sismique indique une vitesse d'onde de cisaillement de l'argile (V_s) assez lente d'environ 140 m/s. L'utilisation de ce V_s permet, à titre expérimental, d'inverser en profondeur les autres mesures effectuées, ce qui entraîne des variations de profondeur du substrat rocheux comprises entre 1,5 et 3 m dans la partie centrale de la Salle de la Structure. Cette V_s devrait cependant être confirmée par des mesures réalisées au moyen de sismomètres synchronisés (voir perspectives 2019).

Une analyse sismique complémentaire a été réalisée pour déduire la direction azimutale dans laquelle le pic de résonance H / V a son amplitude maximale. Dans la partie centrale de la galerie, la polarisation est principalement orientée de N150°E à NS, oblique par rapport à l'orientation principale (N100E) de la grotte (*fig. 63*). Cette polarisation dominante est en cours de discussion et peut être liée à (i) la géométrie et la forme du sol de la grotte érodé / d'origine en dessous du remplissage argileux, (ii) l'orientation des principales failles géologiques de la région, (iii) l'orientation conjointe ou (iv) le pendage de la roche hôte dans laquelle la grotte s'est développée. Une meilleure compréhension de la structure du substrat rocheux et de l'origine du bruit sismique devrait permettre de recueillir des informations supplémentaires en faveur d'une de ces hypothèses.

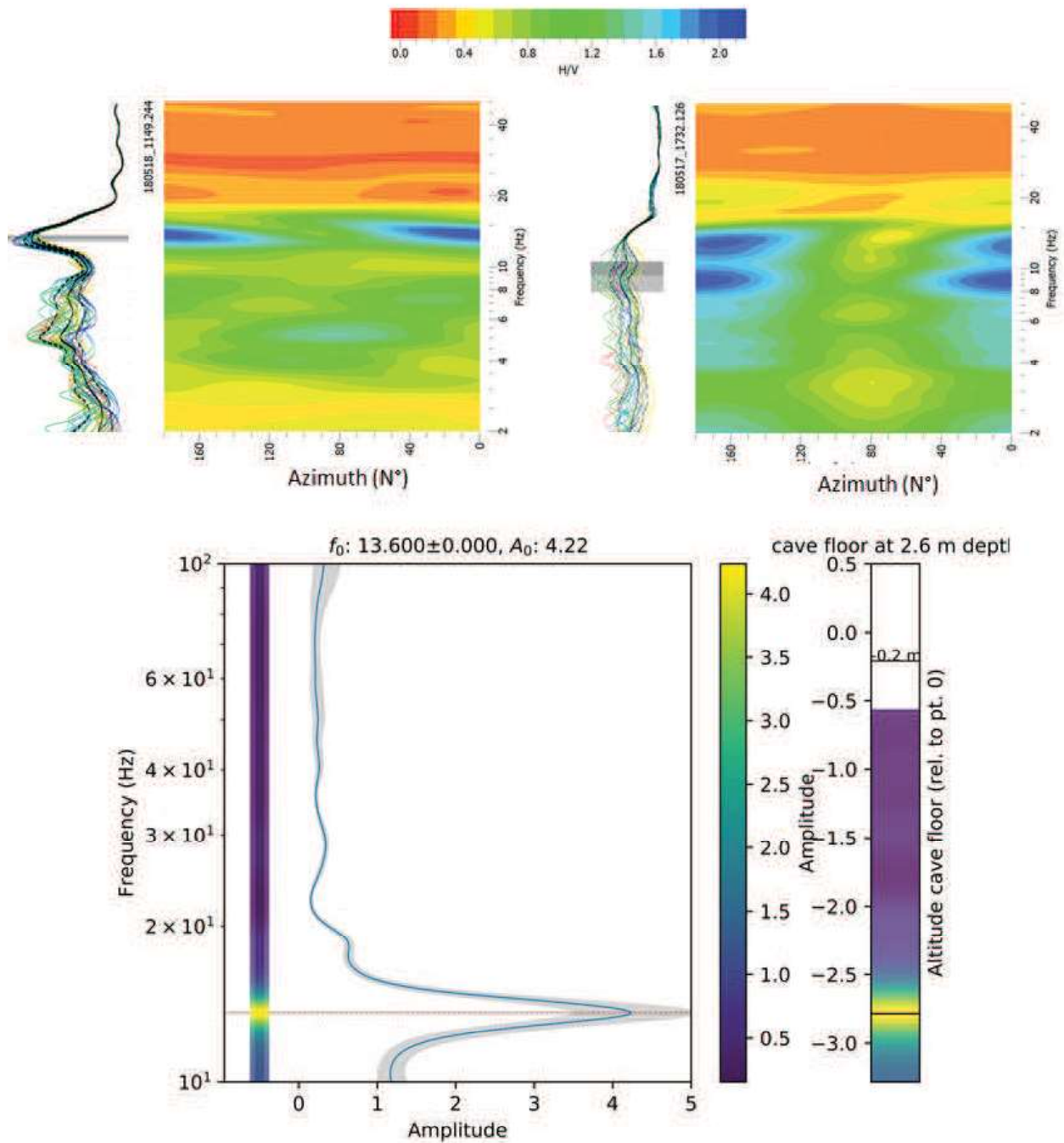


Fig. 66 ■ Grotte de Bruniquel. Exemple de résultat de la sismique passive (haut : analyse directionnelle de l'intensité des fréquences sismiques pour des mesures sur deux stations. À gauche : emplacement avec un seul pic de résonance, à droite : emplacement avec deux pics de résonance, potentiellement liés à un remplissage sédimentaire de nature différente ; bas : stratigraphie « virtuelle » et position calculée du substrat rocheux pour la station 6).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Burlet, C., Van Noten, K., Delaby, S., Lecocq, T., Verheyden, S., Genty, D. and Jaubert, J. 2018. Passive geophysics inside underground cavities: examples of HVSR surveys in the caves of Han-sur-Lesse, Belgium and Bruniquel, France. Poster, *Geophysical Research Abstracts* 18, EGU2018-16600, session SM4.02, 8-13 avril 2018, Vienne.
- Delaby S., Lecocq T., , Van Noten K., Burlet Ch., Verheyden S., 2016. Grotte de Bruniquel 2017. Investigations géophysiques. In Jaubert J. et Verheyden S., dir., *Grotte de Bruniquel (Bruniquel, Tarn-et-Garonne). Rapport d'opération archéologique programmée 2016. Demande d'opération archéologique annuelle 2017*, p. 209–212.
- Van Noten K., Burlet Ch., Delaby S., Verheyden S., Lecocq T., 2017. Investigations géophysiques du remplissage sédimentaire de la salle de la Structure. In Jaubert J. et Verheyden S., dir., *Grotte de Bruniquel (Bruniquel, Tarn-et-Garonne). Rapport d'opération archéologique programmée 2017. Demande d'opération archéologique triennale 2018–20*, p. 135–143.
- Van Noten K., Burlet Ch. Delaby S., Lecocq T. Jaubert J., Verheyden S. and the Bruniquel Team, 2018. Electric and passive seismic geophysical survey in a protected cave environment: the Bruniquel cave (France). Poster présenté au 6^e colloque international *Geologica Belgica*. 12-14 Septembre 2018. KU Leuven, Belgique.