

INVESTIGATIONS GÉOPHYSIQUES DU REMPLISSAGE SÉDIMENTAIRE DE LA SALLE DE LA STRUCTURE

KOEN VAN NOTEN¹

CHRISTIAN BURLET¹

SERGE DELABY¹

SOPHIE VERHEYDEN^{1,2}

THOMAS LECOCQ³

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

² *Politique scientifique fédérale Belgique*

³ *Observatoire royal de Belgique, Avenue de circulaire 3, 1080 Bruxelles, Belgique*

1. INTRODUCTION

■ L'objectif de cette étude est d'appréhender l'épaisseur du remplissage sédimentaire présent entre le plancher stalagmitique et l'encaissant calcaire au niveau de la Salle de la structure. Des informations supplémentaires comme la nature des dépôts et leur distribution spatiale seront également recherchés. Dans les perspectives du dernier rapport d'opération programmée, pages 209 à 212 (Jaubert & Verheyden dir., 2016), nous avons proposé deux méthodes d'investigation géophysique pour cette étude, la tomographie électrique et la méthode HVSR (exemple d'application de ces méthodes en milieu karstique: [Nehme *et al.*, 2013]). Durant la campagne 2017, la méthode HVSR pour le calcul de la profondeur du substrat rocheux a été utilisée pour la première fois.

2. TECHNIQUE HVSR

■ Lors de cette première campagne de mesures géophysiques, la méthode sismique passive H/V spectral ratio «(HVSR) analysis» a été appliquée sur le sol de la Salle de la structure. Cette méthode d'investigation consiste à estimer la fréquence fondamentale d'un site en effectuant le rapport (moyenne des composantes horizontales sur composantes verticales) des amplitudes spectrales du bruit sismique enregistré. La fréquence fondamentale est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche de sédiments sous l'instrument. Dans le cas le plus simple d'une couche homogène de sédiments relativement meubles déposés sur un socle rocheux plus rigide, la fréquence (f_0) d'une couche d'épaisseur (h) avec une vitesse d'ondes de cisaillement (V_s) surmontant un substratum rocheux est relié par l'équation $f_0 = V_s/4h$ (Ibs-von Seht et Wollenberg, 1999).

La méthode HVSR mesure le bruit sismique ambiant en utilisant un ou plusieurs sismomètres à 3 composantes. Les signaux mesurés pendant une période minimale de 15 minutes sont enregistrés et analysés à l'aide du programme GEOPSY (Wathelet *et al.*, 2004). Pour chaque composante (deux horizontales et une verticale), la trace sismique est découpée en plusieurs fenêtres pour lesquelles une transformation de Fourier individuelle est appliquée. La moyenne de toutes les fenêtres donne une valeur de f_0 statistiquement valide au droit du point analysé. Puisque f_0 est proportionnelle à l'épaisseur des sédiments, cette technique se révèle excellente pour estimer la profondeur de l'encaissant calcaire sous les dépôts sédimentaires et cela même au travers d'un plancher stalagmitique. Elle est sensible au bruit ambiant, ce qui impose un environnement de travail particulièrement calme.

Pour convertir les valeurs mesurées de f_0 en profondeur, une estimation de la vitesse de l'onde de cisaillement (V_s) du remplissage de la grotte est nécessaire. En l'absence de méthode géophysique d'imagerie du substratum rocheux en profondeur (voir perspectives pour 2018), la V_s de l'argile est encore inconnue et ne peut être estimée que par des valeurs publiées dans la littérature.

3. IMPLANTATION DES MESURES DE LA CAMPAGNE 2017

■ Les mesures HVSR ont été réalisées au moyen d'un Cityshark II portable (firme LEAS) connecté à un sismomètre 1s Lennartz LE-3Dlite. Des mesures de 15 minutes ont été réalisées à 15 endroits différents dans la Salle de la structure (dans et autour des structures) sur une période de deux jours. Dans certains cas, le gain du Cityshark a été fixé à une valeur exceptionnellement élevée (4096), liée à l'environnement très calme de la grotte. Une mesure (pt 11, 3 h) a été effectuée de nuit pour comparer les mesures de bruit nocturnes à celles effectuées pendant la journée, lorsque du bruit artificiel lié à l'activité humaine (carrière active, trafic routier) est présent dans la caverne. 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 sur le plancher de calcite) ces mesures n'ont laissé aucune trace sur le site.

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. 40*).

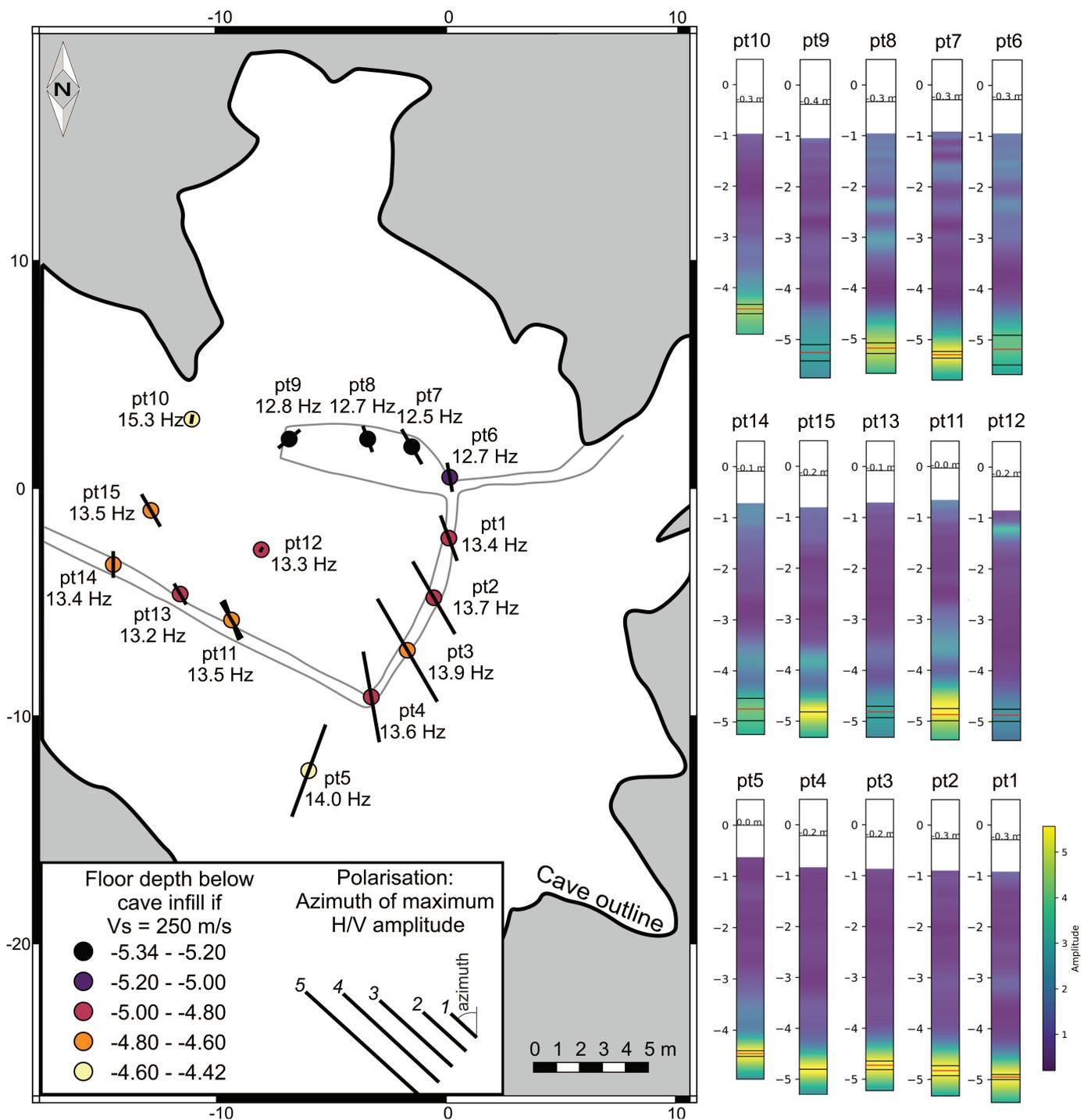


Fig. 40 ■ Localisation des mesures HVSR dans la grotte de Bruniquet. Les couleurs représentent la profondeur de la base rocheuse de la grotte sous le remplissage argileux. Une vitesse moyenne de l'onde de cisaillement de l'argile de 250 m/s est considérée. La polarisation principale (lignes noires) est orientée N150 ° E, correspondant à la direction dans laquelle le pic H/V présente son amplitude maximale. La longueur des lignes noires est mise à l'échelle de l'amplitude du pic de résonance.

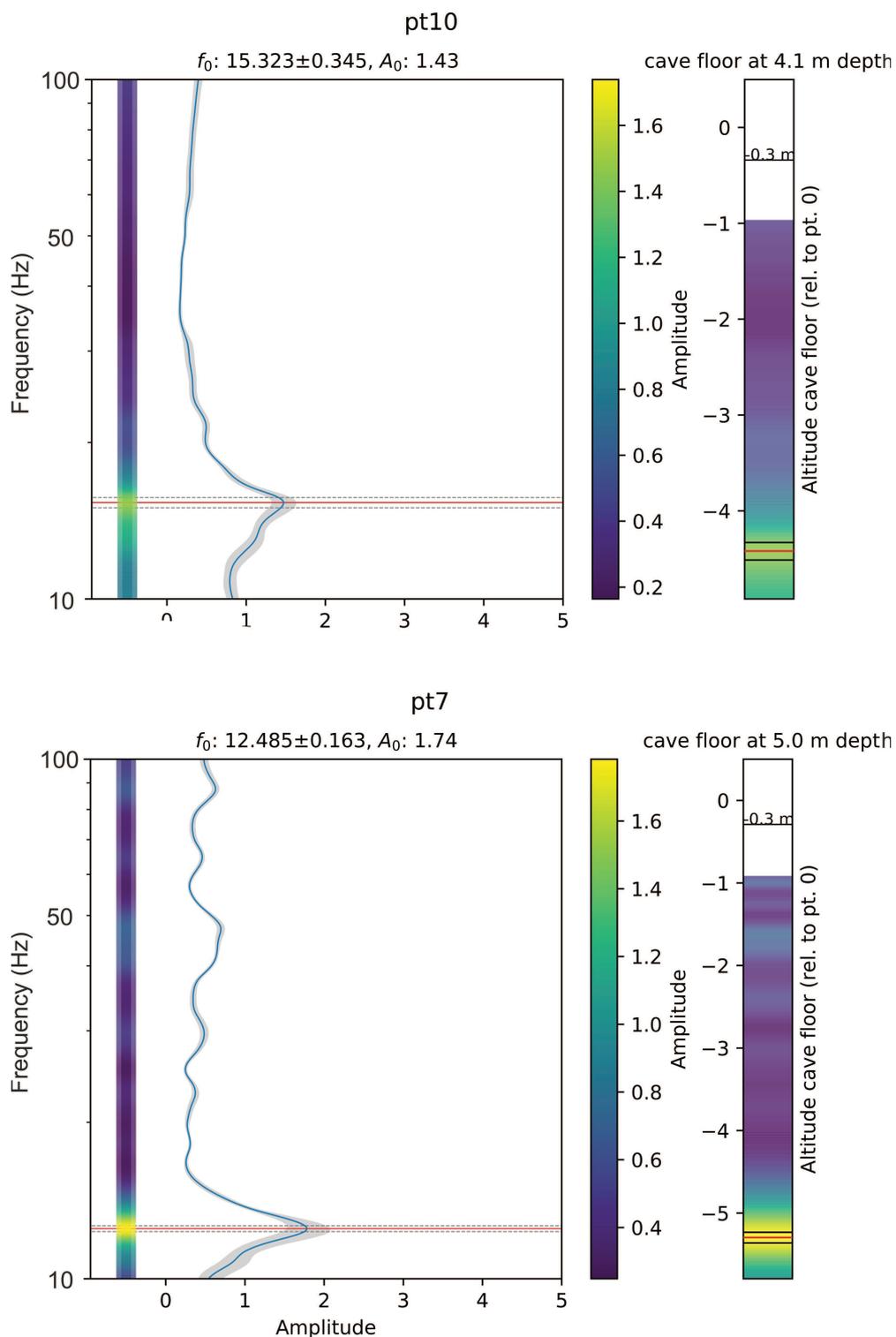


Fig. 41 ■ Deux diagrammes représentatifs présentant la fréquence fondamentale d'une des mesures HVSR dans la Salle de la structure de la grotte de Bruniquel. La profondeur du substrat rocheux est calculée en utilisant une vitesse de cisaillement théorique du remplissage argileux de 250 m/s. Les mesures choisies ici représentent le remplissage le plus épais (point 7) et le moins épais (point 10).

4. RÉSULTATS

■ Les 15 points de mesures montrent une variation de la fréquence de résonance f_0 comprise entre 12,5 Hz et 15,3 Hz (**fig. 40** et **41**), hormis au point 9, où le pic de résonance n'est pas bien défini. Pour la campagne 2017, la vitesse de l'onde de cisaillement V_s reste non mesurée et seuls des standards de la littérature peuvent être utilisés. Une conversion des fréquences en profondeur a été réalisée en considérant une V_s de 250 m / s, ce qui donne une estimation de la profondeur du niveau de base calcaire de la Salle de la structure comprise entre 4,4 m (pt10, 15,3 Hz) et 5,3 m (pt 7, 12,4 Hz) (**fig. 40**). Une V_s légèrement inférieure de 180 m/s entraînerait une variation de profondeur entre 3,6 m (pt10) et 2,9 m (pt7).

Une analyse complémentaire des signaux enregistrés permet de déduire la direction azimutale dans laquelle le pic H / V a son amplitude de crête maximale. Pour la majorité des points, la carte de polarisation (**fig. 42**) montre une orientation dominante au N150° E, qui est oblique par rapport à l'orientation globalement E-W de la galerie. À ce stade de l'étude, on peut spéculer que cette polarisation dominante est liée à la géométrie locale du substrat rocheux de la grotte sous le remplissage argileux. En effet, outre la Salle de la structure, d'autres espaces de la grotte de Bruniquel développent un léger allongement local dans la direction \sim N150° E, ce qui correspond vraisemblablement à l'orientation des principales failles géologiques de la zone (couloir de déformation ouest-quercynois, **fig. 43**) [Astruc, *et al.*, 1998] qui pourraient avoir favorisé l'érosion.

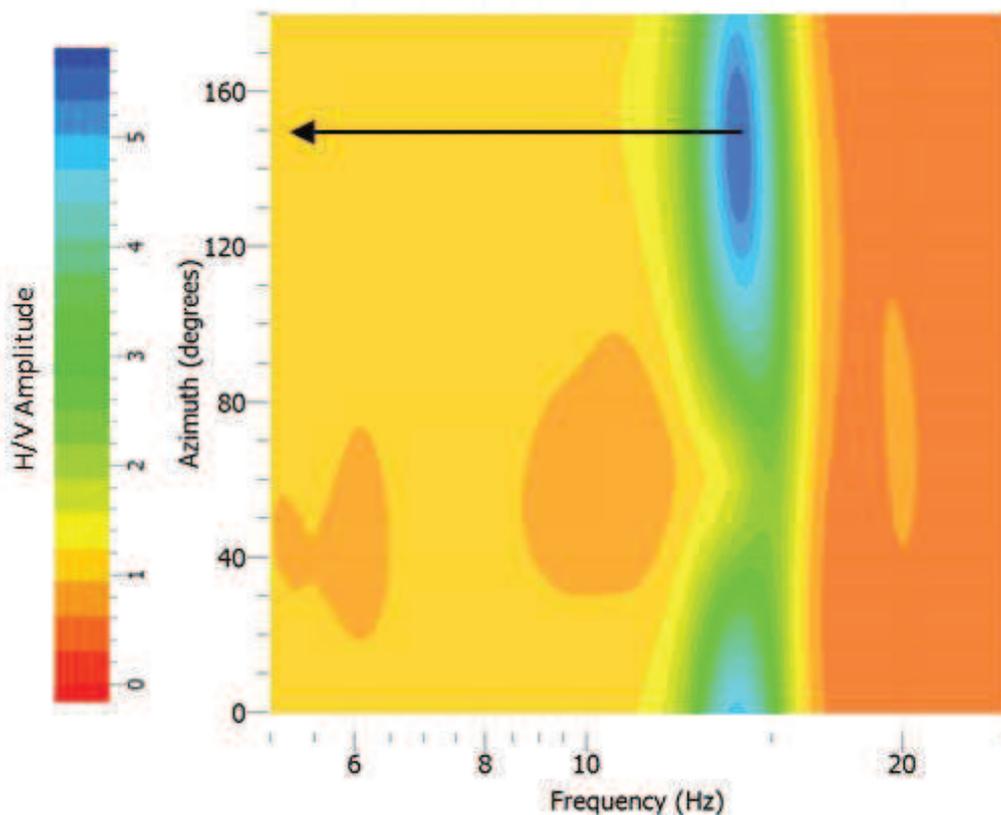
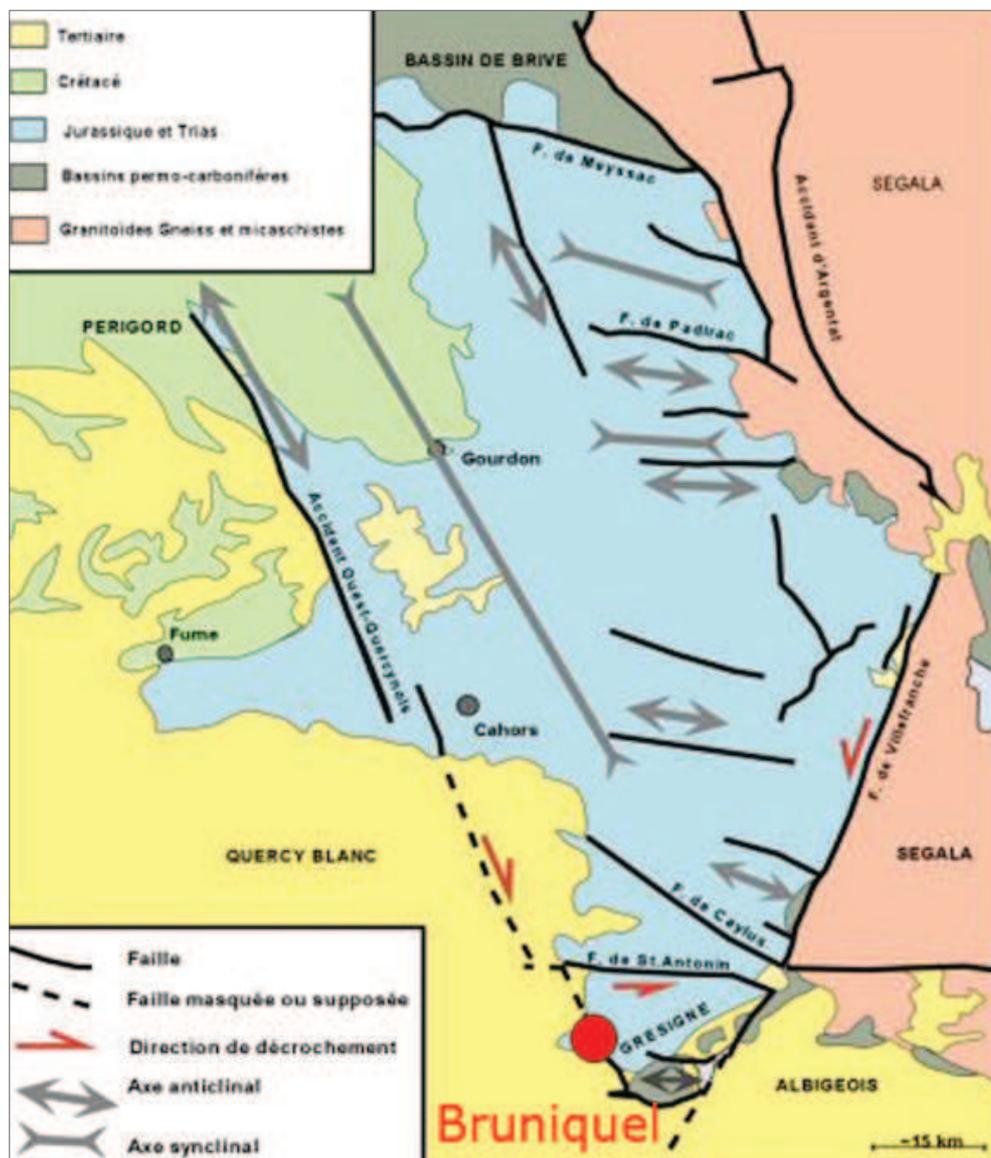


Fig. 42 ■ Analyse de polarisation de l'enregistrement des vibrations ambiantes du point 1. L'amplitude la plus élevée (couleur bleue) est détectée à une fréquence de résonance de 13,5 Hz et dans une direction N150° E (axe vertical).

Fig. 43 ■ Carte géologique structurale régionale
(source : Astruc et al.,
www.quercy.net)



5. PERSPECTIVES POUR LA CAMPAGNE 2018

5.1 COMPLÉMENTS AUX MESURES HVSR

■ Étant donné les bons résultats de la campagne 2017, de nouvelles mesures HVSR sont prévues en 2018 pour réaliser un essai de cartographie du substrat rocheux sous le remplissage de la grotte. La vitesse de cisaillement (V_s), grande inconnue jusqu'à présent, sera mesurée en utilisant plusieurs sismomètres miniatures, synchronisés et sans fils¹. Pour confronter les hypothèses découlant de l'analyse de la polarisation du signal sismique, un relevé de l'orientation des fractures visibles dans la galerie de la grotte doit également être effectué.

¹ Équipement prêté par l'Observatoire Royal de Belgique.

5.2 APPLICATION DE LA MÉTHODE DE TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE (ERT)

■ Dans le rapport 2016 Jaubert & Verheyden, dir. (p. 209 à 212), la tomographie électrique avait également été proposée pour confirmer les mesures de sismique passive. La comparaison de deux méthodes géophysiques différentes est en effet d'usage pour valider scientifiquement les mesures. L'ERT apporterait en outre des informations plus détaillées sur la nature du remplissage (argiles seules ou mélange blocs calcaires et argiles).

Pour rappel, la tomographie électrique est une méthode non invasive d'exploration du sous-sol qui repose sur la mesure de sa résistivité électrique. Un profil de mesures de la résistivité du sol basé sur un set d'électrodes (typiquement de 32 à 64 électrodes par profil) permet d'obtenir une image 2D des contrastes de résistivité en profondeur. Cette méthode devrait donc permettre de confirmer la profondeur des sédiments au droit du profil. Afin d'éviter toute dégradation du sol de la Salle de la structure, la tomographie électrique se fera au moyen de pads conducteurs posés au sol (6 cm de diamètre, poids < 300 g) (*fig. 44*) spécialement conçus pour cette étude ainsi que de câbles adaptés à l'espacement des pads. (*in* Jaubert & Verheyden dir. 2016 p. 209–212 pour plus de détails).

Lors de la campagne de 2017, les câbles adaptés à l'espacement des électrodes (branchement tous les 50 cm) n'étaient malheureusement pas encore disponibles. Après diverses recherches infructueuses chez les fournisseurs de matériel de tomographie électrique, il a été décidé de fabriquer ces câbles sur mesure durant le premier trimestre 2018.

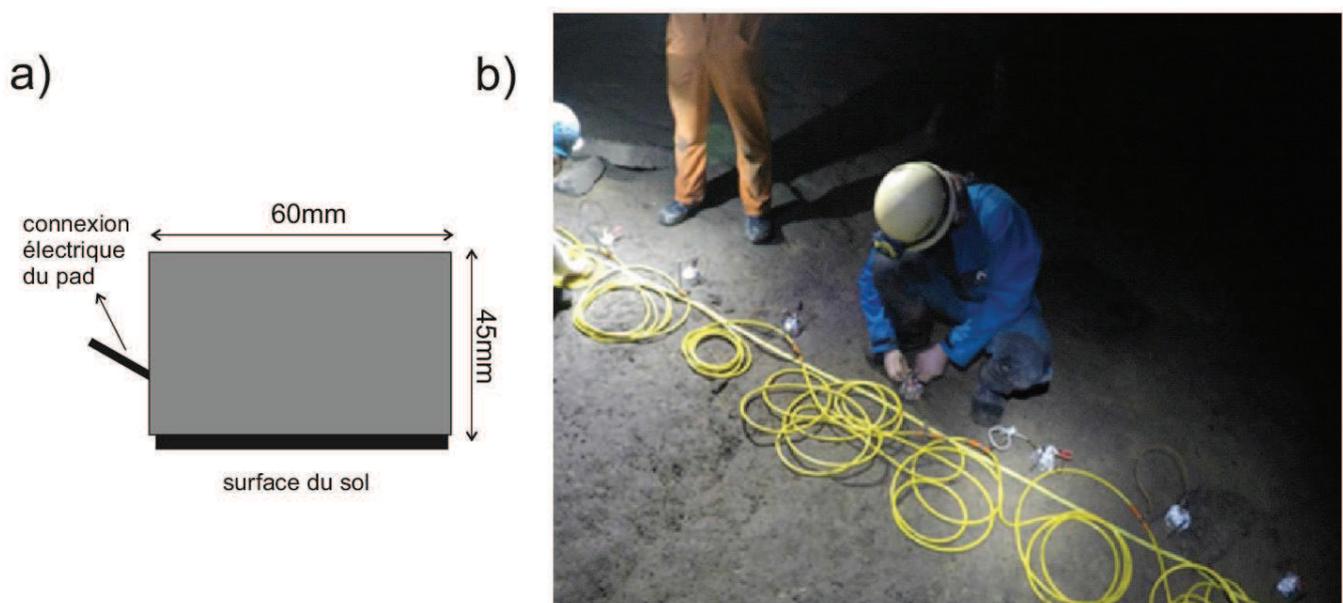


Fig. 44 ■ a) vue en coupe d'une électrode de type pad conducteur. b) exemple d'installation de tomographie électrique dans la grotte de han (Belgique) (les câbles utilisés dans la Salle de la structure seront plus courts que lors de ce test).

L'indication de l'épaisseur du remplissage argileux obtenue lors de la campagne 2017 permet également de mieux définir le profil de tomographie électrique idéal à réaliser. Un profil de 31 m de long (60 électrodes espacées de 50 cm) est donc prévu en utilisant au maximum le tracé du cheminement existant, mais passant tout de même au milieu des structures, uniquement là où le plancher stalagmitique est présent (*fig. 45*). La profondeur d'investigation effective d'un tel profil sera d'environ 7–8 m.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASTRUC, J.-G., *et al.*, 1998. Notice explicative de la feuille Caussade à 1/50 000. *Carte géologique de France*, BRGM.
- IBS-VON SEHT, M., WOLLENBERG, U., 1999. Microtremor Measurements Used to Map Thickness of Soft Sediments. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 89, 250–259.
- NEHME C., *et al.*, 2013. The use of passive seismological imaging in speleogenetic studies : an example from Kanaan Cave, Lebanon. *International journal of Speleology*, 42 (2013): 97–108.
- WATHELET, M., *et al.*, 2004. Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements, *Near Surface Geophysics*, 2004, 211–221.

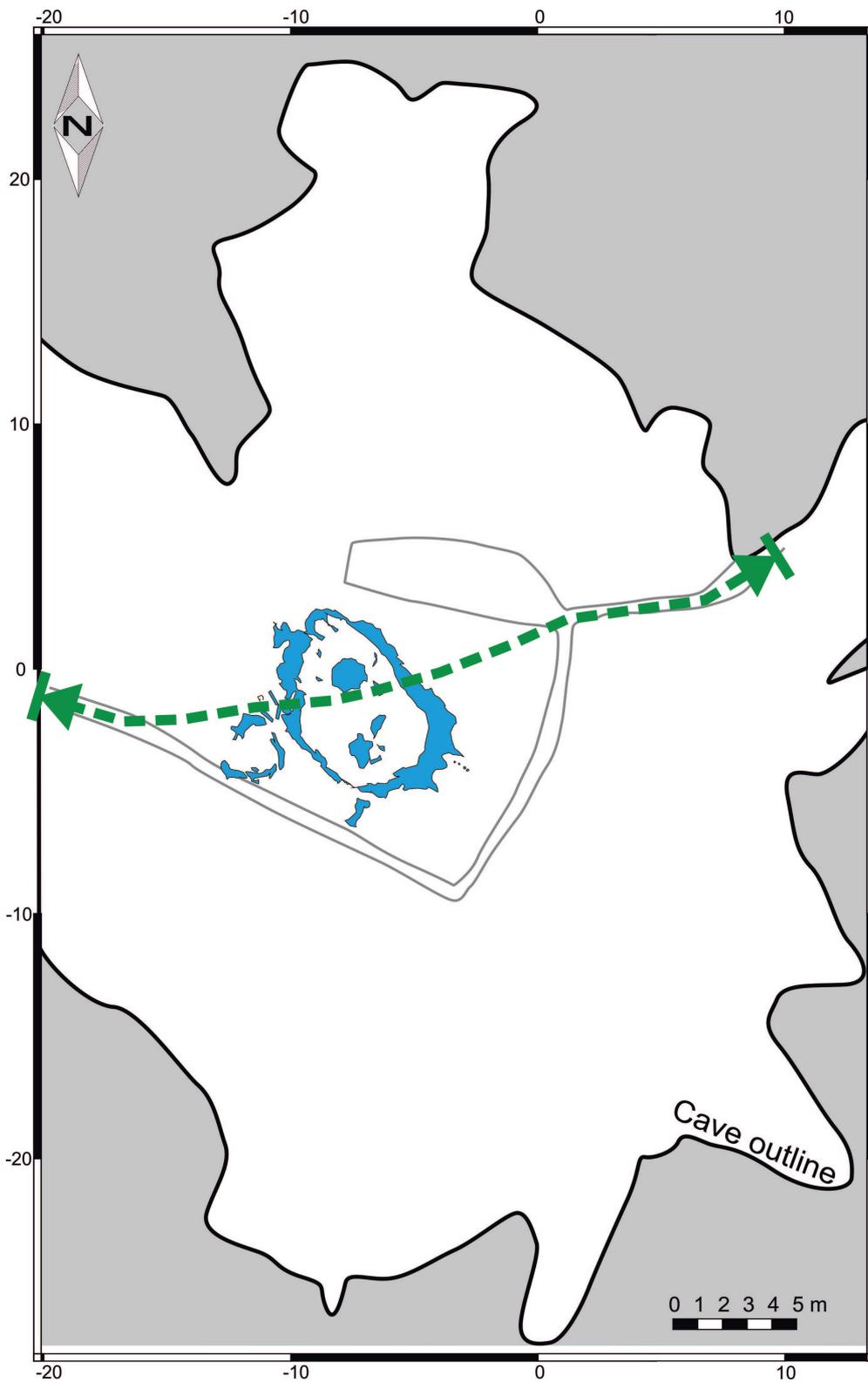


Fig. 45 ■ proposition de profil de tomographie électrique dans la Salle de la structure.