

POLARISATION DE LA FRÉQUENCE DE RÉSONANCE DANS LA SALLE DE LA STRUCTURE À L'AIDE DE CAPTEURS SISMQUES À 3 COMPOSANTES

KOEN VAN NOTEN¹

CHRISTIAN BURLET²

THOMAS LECOCQ¹

SERGE DELABY³

DENISE SOULIER⁴

SOPHIE VERHEYDEN⁵

1 Observatoire royal de Belgique, Avenue de circulaire 3, 1080 Bruxelles, Belgique koen.vannoten@seismology.be Thomas.lecocq@seismology.be

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

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

4 SSAC, France

5 Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (IRSNB), actuellement à la Politique scientifique fédérale (BELSPO), Sophie.Verheyden@belspo.be

1. INTRODUCTION ET MÉTHODOLOGIE

■ L'objectif de l'investigation géophysique de 2019 dans la grotte Bruniquel était d'étudier la structure de vitesse des ondes de cisaillement (Vs) du remplissage de la Salle de la Structure. Un Vs précis permettra à terme de finaliser notre modèle de profondeur de la Salle de la Structure (l'épaisseur du remplissage sédimentaire), objectif ultime de tous les travaux géophysiques menés depuis 2016. En 2019, de nouveaux équipements ont été utilisés pour effectuer l'analyse géophysique non invasive, soit trois capteurs sismiques SmartSolo à trois composantes (3C) et 20 à composante verticale (1C). Les capteurs SmartSolo sont des dispositifs autonomes qui comprennent une batterie (d'une autonomie d'un mois), un dispositif GPS (pour régler l'heure des géophones synchrone) et un géophone 4,5 Hz (c'est-à-dire le sismomètre). Pour éviter d'endommager le remplissage de la grotte, des trépieds de fabrication artisanale ont été fixés à la base des capteurs 1C et des pieds réglables en hauteur d'un sismomètre Lennartz ont été installés sous les capteurs 3C. De cette manière, les mesures n'ont laissé aucune trace sur le site.

Pour synchroniser le chronométrage des capteurs, tous les dispositifs ont été démarrés bien à l'avance (2 h) à l'extérieur de la grotte. Par la suite, les capteurs ont été acheminés vers la Salle de la Structure dans des sacs de sécurité alors qu'ils étaient déjà en service. Après la campagne géophysique, les capteurs ont été transportés hors de la grotte et placés à l'extérieur afin qu'ils puissent à nouveau se synchroniser avec le GPS. Cela permettra de contrôler la dérive temporelle de chaque capteur pendant la campagne souterraine.

Pour déterminer un profil approprié de Vs en fonction de la profondeur, il était nécessaire de placer les capteurs dans différentes configurations pour étudier différentes profondeurs. Deux stratégies ont été suivies. Les capteurs 3C ont toujours été installés en forme de triangle avec la structure de la Salle de la Structure au centre de la configuration. Douze configurations ont été réalisées en 2,5 jours avec des ouvertures comprises entre 1 m et 15 m (= distance au centre des structures). Chacun de ces réseaux nous indiquera les différentes parties de la structure de vitesse du remplissage de la grotte. Vingt 1C ont été placés tout autour de la Salle de la Structure (voir capteurs bleus sur la *fig. 23*) et n'ont pas été déplacés pendant les 2,5 jours de terrain. Ce réseau de 20 capteurs 1C permis d'enregistrer le champ des ondes sismiques pendant la période où les 3C ont été remplacés dans différentes configurations. 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 (*fig. 24*). Les positions des capteurs ont été mesurées par X. Muth avec un théodolite pour assurer la précision de leur localisation.

Fig. 23 ■ Installation de capteurs sismiques 1C (bleu) et 3C (gris) dans la Salle de la Structure.



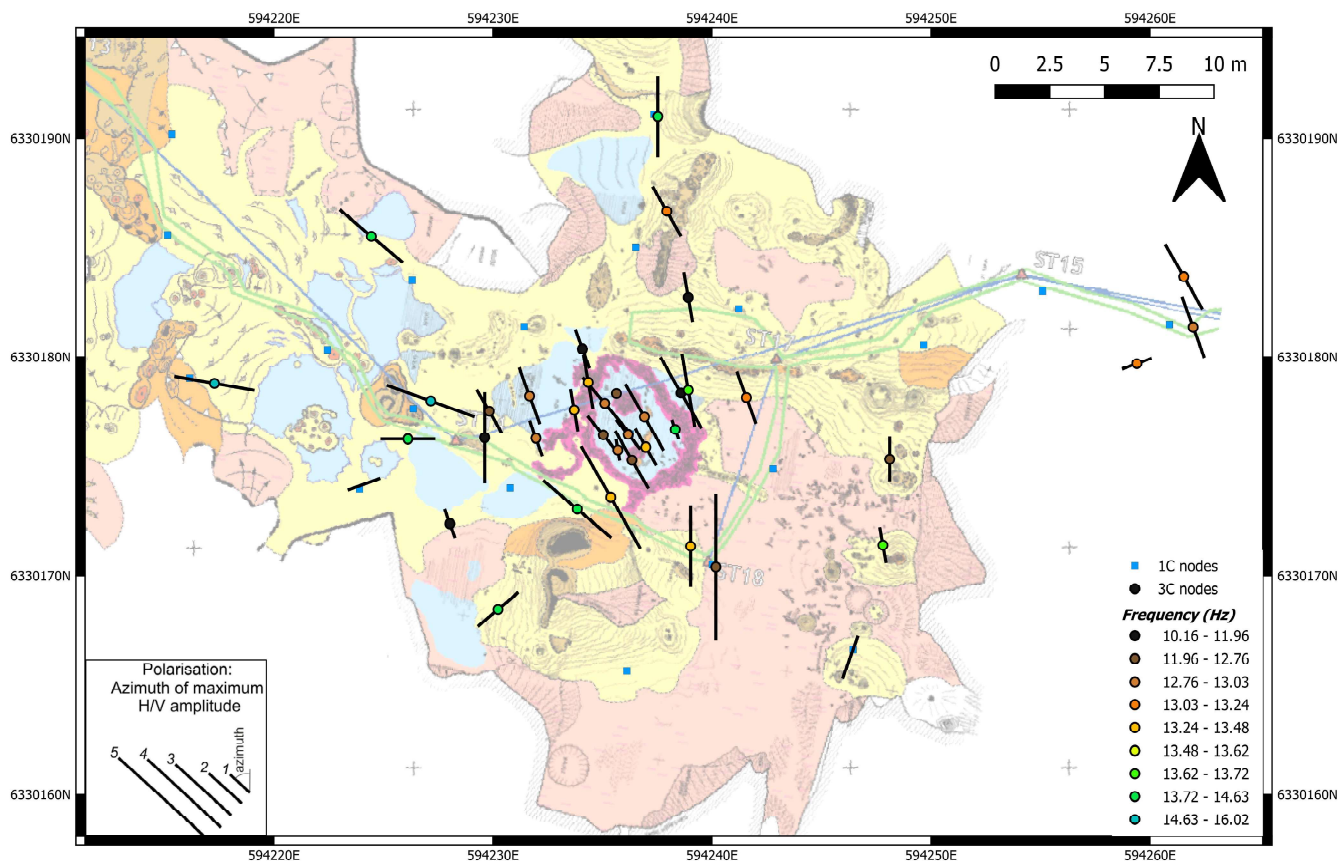


Fig. 24 ■ Salle de la Structure. Résultats de l'analyse de la campagne sismique passive de 2019. Les résultats montrent la fréquence de résonance de chaque mesure. L'orientation des lignes noires montre la polarisation préférentielle de l'amplitude H/V.

Une expérience sismique active a été réalisée à la fin de la troisième journée. Nous avons placé tous les capteurs sismiques autour de la structure dans la Salle de la Structure et avons doucement frappé le sol en calcite avec un bâton de bois aux quatre coins de la Salle. Cet essai supplémentaire a été effectué pour vérifier le Vs.

2. RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE 2019

■ La fréquence de résonance à chaque 3C a été déterminée à partir d'une analyse H/V Spectral Ratio (HVSr) du bruit ambiant. Cette analyse est similaire à la méthodologie suivie les années précédentes (Delaby *et al.*, 2016 ; Van Noten *et al.*, 2017, 2018). 39 mesures 3C ont été effectuées. Avec les 42 et 18 mesures de la campagne de 2018 et 2017, respectivement, nous disposons maintenant de 99 points individuels pour lesquels une épaisseur de remplissage de la Salle de la Structure peut être calculée. La **fig. 24** donne un aperçu de toutes les valeurs de fréquence de résonance (f_0) obtenues après analyse HVSr des données de 2019 en utilisant dans Geopsy, un logiciel open-source.

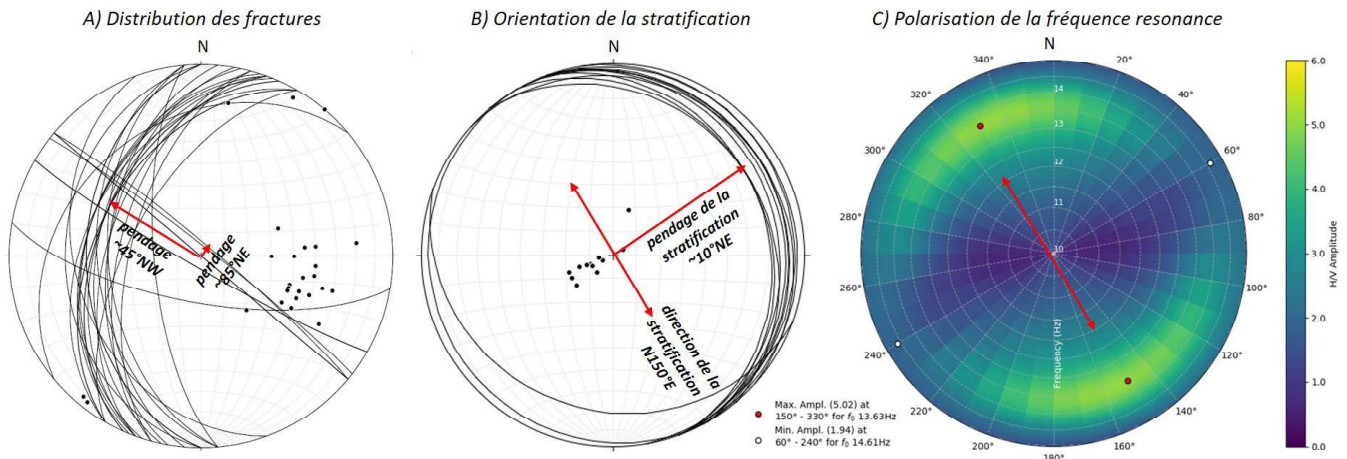


Fig. 25 ■ A) Distribution des fractures. B) Orientation et pendage de la stratification dans la Salle de la Structure. C) Polarisation de la fréquence de résonance (f_0) sous la structure dans la Salle de la Structure. Cette polarisation est liée au fait que les transferts d'énergie sismique se font le long de la stratification.

L'analyse du rapport spectral H/V du bruit sismique montre que, dans la Salle de la Structure, f_0 varie entre 10 et 16 Hz. Plus f_0 est élevé, plus le socle rocheux est bas. Une analyse sismique complémentaire a été réalisée pour déduire la direction azimutale dans laquelle le pic de résonance H/V a son amplitude maximale (**fig. 25C**). Dans la partie centrale de la galerie, la polarisation est principalement orientée de N150°E, oblique par rapport à l'orientation principale (N100°E) de la grotte (**fig. 24**). Dans le couloir en direction de la galerie, la polarisation est parallèle à l'orientation du couloir.

Pour étudier l'importance de cette polarisation, une étude géologique structurale préliminaire a été effectuée dans toute la grotte Bruniquel afin de relier les éléments structuraux à cette orientation. À l'aide d'une boussole géologique de Freiberg, l'orientation de la stratification et les fractures dominantes autour de la Salle de la Structure ont été mesurées. Les fractures de la Salle de la Structure présentent deux distributions : l'une modérément inclinée vers le NW et l'autre fortement inclinée vers le NE (**fig. 25A**). Les grandes stalagmites au centre de la salle de la structure suivent ces orientations de fracture. La stratification dans la Salle de la Structure est légèrement inclinée (~10°) vers le NE (**fig. 25B**).

Alors que l'orientation de la polarisation H/V était encore débattue dans Van Noten *et al.* (2018), l'analyse structurale offre maintenant clairement une solution puisque la direction de la stratification s'aligne avec la dépendance azimutale du pic de résonance H/V. Cette corrélation s'applique à la partie centrale de la Salle de la Structure qui est comblée de sédiments meubles. Dans les couloirs / raccordements aux salles voisines, où il n'y a pas de remplissage sédimentaire, cette polarisation est différente (voir **fig. 24**) et suit l'orientation principale de la galerie et ne peut être reliée aux lits locaux. À partir de cette analyse de 2019, nous pouvons donc démontrer que les ondes sismiques du bruit ambiant se déplacent le long des épais bancs de calcaire. Ainsi, dans la recherche spéléologique, l'orientation des lits enterrés stratifiés dans une salle souterraine peut être détectée à l'aide d'une technique de polarisation HVSR.

3. PERSPECTIVES

■ Dans les mois à venir, des courbes de dispersion seront calculées à partir des enregistrements simultanés des capteurs 3C et un profil de vitesse final sera construit. Ceci permettra de finaliser le modèle de profondeur du remplissage de la Salle de la Structure. L'étude préliminaire de géologie structurale indique qu'il faudrait effectuer d'autres mesures de la stratification, des fractures et des failles pour comprendre la forme, la déformation et la karstogenèse de la grotte Bruniquel.

RÉFÉRENCES

■ Delaby S., Lecocq T., Van Noten K., Burlet Chr., Verheyden S. 2016. Grotte de Bruniquel 2017. Investigations Géophysiques. In : Jaubert J. et Verheyden (dir.), *Grotte de Bruniquel (Bruniquel, Tarn-et-Garonne). Rapport d'opération archéologique programmée 2016*, p. 209–212.

■ Van Noten K., Burlet Chr., Delaby S., Verheyden S., Lecocq T., 2017. Investigations géophysiques du remplissage sédimentaire de la Salle de la structure. In : Jaubert J. et Verheyden (dir.), *Grotte de Bruniquel (Bruniquel, Tarn-et-Garonne). Rapport d'opération archéologique programmée 2017. Demande d'opération archéologique triennale 2018–20. SRA Occitanie*, p. 135–143.

■ Van Noten K., Burlet Chr., Delaby S., Verheyden S., Lecocq T., 2018. Investigations géophysiques du plancher calcite et du remplissage sédimentaire de la Salle de la structure de Bruniquel. In : Jaubert J., Verheyden S. & Soulier M. (dir.), *Grotte de Bruniquel (Bruniquel, Tarn-et-Garonne). Rapport Intermédiaire 2018 d'opération archéologique programmée Triennale 2018–20. SRA Occitanie*, p. 99–105.