

PRESERVATION DE STALACTITES FISTULEUSES EXPOSEES A DES TIRS DE MINE : CAS DES GROTTES DE CHORANCHE

PROTECTING SODA-STRAWS EXPOSED TO NEARBY ROCK BLASTING : A VIBRATION STUDY

Pierre BOTTELIN¹, Laurent BAILLET², Alexandre MATHY³, Laurent GARNIER⁴, Héroïse CADET¹, Ombeline BRENGUIER¹, Rémy ALLIER⁵, David CANTALUPI⁶

¹ *Association pour le Développement des Recherches sur les Glissements de Terrain (ADRGT), 2 rue de la Condamine, 38610 Gières, France.*

² *ISTerre, Université Grenoble Alpes, CNRS, F-38000 Grenoble, France.*

³ *SAGE Ingénierie, 2 rue de la Condamine, 38610 Gières, France.*

⁴ *SARL Site de la Grotte de Choranche, 2865 route des Grottes, BP7 38680 Choranche, France.*

⁵ *CAN-Travaux d'accès difficile, Relut, 26270 Mirmande, France.*

⁶ *Alpes Minages, 102 sentier de la salle, 74110 Morzine, France.*

RÉSUMÉ – Ce travail de recherche a été entrepris dans le cadre de la préservation des stalactites fistuleuses de la Grotte de Choranche (Vercors, France) exposées à des tirs de mine. La gamme fréquentielle excitée par les tirs d'explosif coïncidant avec les premières fréquences de résonance des stalactites, des amplifications dynamiques allant jusqu'à un facteur 7 ont été observées. Un seuil de vibration admissible de 2.4 mm/s en paroi de la grotte a été défini par simulation numérique pour les tirs avec micro-retards (8.6 mm/s pour un tir isolé). Les travaux de minage ont été conduits avec succès, sans endommager la population de stalactites.

ABSTRACT – This research study has been developed to preserve the Choranche cave remarkable soda straw population (Vercors, France) from nearby blasting vibrations. As the soda straws' first natural frequencies lie within the blasting frequency range, we found that they experience significant dynamic amplification (up to a factor 7). Simulations made on several blast tests yielded an admissible 2.4 mm/s peak particle velocity along the cave for shots with micro-delays (8.6 mm/s for single shot). Subsequent blasting works were carried out in compliance with this threshold with no harm done to the soda straw population.

1. Introduction

L'expansion, la rénovation et la densification urbaine que connaissent de nombreux pays ont pour conséquence le rapprochement d'activités géotechniques telles que l'exploitation de carrières, le creusement de tunnels, la construction d'ouvrages de génie civil par rapport à des avoisinants préexistants (Crispim 1999; Lacave et al. 2003). Les engins mécaniques vibrants puissants et/ou l'utilisation d'explosifs représentent des sources vibratoires potentiellement dommageables pour les enjeux environnants. Ces enjeux peuvent être des anthropiques (structures de génie civil, constructions, réseaux, monuments) ou naturels (géologie, faune, flore). Les grottes concrétionnées représentent un patrimoine géologique considérable dans de nombreuses régions sédimentaires. Leur préservation lors du déroulement de travaux de génie civil à proximité est une problématique émergente et particulièrement sensible, notamment au vu du caractère irréversible des éventuels dommages infligés (Gauchon et al. 2007).

Jusqu'à présent, l'effet des vibrations sur les stalactites a principalement été étudié dans le cadre d'études spéléosismologiques. Cette discipline consiste à étudier les séismes passés à travers la détection et la caractérisation d'anomalies de croissance, de déformations et/ou de rupture de spéléothèmes (Becker et al. 2006). La magnitude du séisme, son azimut, sa localisation, sa date, l'accélération maximale du sol *PGA* ou la vitesse maximale du sol *PGV* sont généralement recherchés (Bokelmann et Gribovszki 2015; Forti 2001; Gilli et al. 1999; Méjean et al. 2015). La précision et la robustesse de cette méthode sont cependant discutés car la plupart des spéléothèmes semblent peu sensibles aux séismes, à l'exception des spéléothèmes les plus élancés. D'autres phénomènes sont également susceptibles d'engendrer des désordres ou des ruptures de concrétions (Becker et al. 2006). La sensibilité des spéléothèmes aux vibrations est contrôlée au premier ordre par leur élancement. Les fistuleuses –stalactites creuses qui peuvent atteindre plusieurs mètres de longueur pour un diamètre d'environ 0.5 cm– sont ainsi particulièrement vulnérables aux vibrations.

Dans cet article, nous avons étudié les vibrations générées par l'excavation de rocher à l'explosif à quelques dizaines de mètres des stalactites fistuleuses de la grotte de Choranche (Vercors, France). Ces stalactites représentent un patrimoine géologique exceptionnel qu'il faut préserver. Dans un premier temps, nous avons caractérisé les propriétés vibratoires des stalactites à partir d'échantillons. Ensuite, une campagne de tirs d'essai in-situ nous a permis d'enregistrer des signaux représentatifs de tirs de mine. Des simulations numériques ont été conduites afin d'estimer les contraintes dans les fistuleuses et de déterminer une valeur limite de vitesse de vibration particulière admissible.

2. Contexte d'étude

2.1. Description du site

La grotte de Choranche se trouve dans la partie occidentale du massif sédimentaire du Vercors, sur les contreforts des gorges de la Bourne (Figure 1a). Le site est ouvert au public et représente une attraction majeure pour le territoire, avec environ 100 000 visiteurs par an. La cavité fait partie d'un réseau karstique de grande ampleur localisé à environ 350 m de profondeur sous la surface (Delannoy 1986). Le réseau s'étend à l'interface entre les calcaires Urgoniens et les marnes de l'Hauterivien (Delannoy et al. 2009). De nombreuses concrétions sont présentes dans la grotte de Choranche sous forme de stalactites, stalagmites, colonnes et draperies. La grotte présente notamment un nombre exceptionnel de fistuleuses (Figure 1b). Ces stalactites sont notamment présentes dans la salle du lac, située la plus proche de l'extérieur.

L'accès à la grotte est assuré par un sentier empruntant une vire rocheuse sur quelques centaines de mètres de longueur. Cette vire a fait l'objet de reconnaissances préliminaires par le passé. Deux sondages carottés ont révélé un calcaire Urgonien massif en profondeur (Rock Quality Designation RQD > 90 %) mais relativement fracturé sur les premiers mètres d'épaisseur. Ces observations ont été confirmées par deux campagnes de radar géologique *GPR* et par le levé structural de la zone.

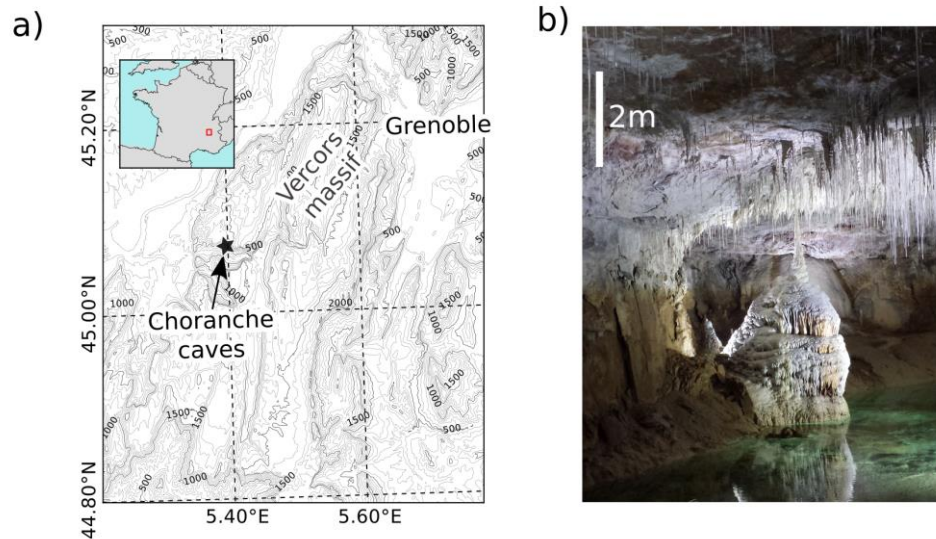


Figure 1. a) Plan de localisation de la Grotte de Choranche. b) Photographie de l'intérieur de la grotte. Les stalactites fistuleuses sont visibles en toit de cavité.

2.2. Problématique vibratoire

Une campagne importante de travaux de réfection et d'entretien du chemin d'accès visiteur ont eu lieu en 2018-2019, nécessitant l'excavation de rocher à l'explosif sur une longueur d'environ 100 m. Les tirs de mine nécessaires à l'abattage se situent à quelques dizaines de mètres des fistuleuses présentes dans la salle du lac. Afin de se prémunir contre tout endommagement des fistuleuses, la SARL Grotte de Choranche a mandaté le groupe SAGE-ADRGT afin de réaliser une étude vibratoire complète. Le laboratoire de recherche ISTERre a été associé à cette étude sur les aspects instrumentation et modélisation. Par la suite, la SAGE-ADRGT a supervisé le contrôle interne mis en place par les sociétés CAN et ALPES MINAGES en phase travaux.

3. Situation vibratoire

3.1. Caractérisation en laboratoire

Les caractéristiques géométriques, statiques et dynamiques des fistuleuses ont été mesurées en laboratoire sur des fragments de stalactites collectés dans la grotte. Les mesures réalisées montrent une géométrie pratiquement identique pour tous les échantillons. La section est de forme circulaire, d'environ 0.5 cm de diamètre pour une épaisseur de paroi de 0.5 mm. La masse volumique ρ des stalactites a été mesurée à environ 2500 kg.m^{-3} , en bon accord avec d'autres valeurs de la littérature (Lacave, Levret, et Koller 2000). La résistance à la traction de la calcite $\sigma_{u,t}$ varie entre 2.5 et 16.2 MPa lors des tests à la rupture menés en laboratoire (chargement de poutre encastree-libre et flexion sur deux appuis). Cette large gamme de valeurs peut découler –pour partie– de conditions aux limites difficilement reproductibles dans les essais de laboratoire sur des échantillons de petite taille. Des défauts de cristallisation ou l'endommagement des fragments de fistuleuses lors de leur chute peuvent également expliquer ces variations. Dans la suite de nos travaux, la valeur de design $\sigma_{u,t,d} = 1.25 \text{ MPa}$ a été retenue et associée à une faible probabilité de rupture. Cette valeur est en accord avec la littérature et correspond à une probabilité de rupture d'environ 5 % dans les travaux de Lacave et al. (2003a) sur une grotte similaire.

Les propriétés dynamiques des fistuleuses ont été mesurées à l'aide de vibromètres laser visant leur extrémité libre. Les fréquences de résonance mesurées sont extrêmement nettes et correspondent parfaitement avec les fréquences théoriques données pour une poutre d'Euler-Bernoulli. Le module d'Young a pu ainsi être estimé à 60 GPa. Cette valeur est relativement élevée par rapport à d'autres types de stalactites mais est typique des fistuleuses (Lacave, Levret, et Koller 2000). L'amortissement ξ est très faible, généralement autour de 0.5 % pour le mode fondamental. Les modes supérieurs fournissent des valeurs du même ordre voire inférieures. De façon sécuritaire, nous avons retenu un amortissement $\xi = 0.1\%$ dans la suite de cette étude. Ces caractéristiques ont été introduites par la suite dans les simulations numériques.

3.2. Mesures in situ

Trois tirs d'essai (tir A, tir B et tir C) ont été conduits sur le terrain, avec des charges maximales instantanées en explosif comprises entre 50 et 200 g. Les distances réduites par la racine carrée de la charge (D/\sqrt{Q}) sont comprises entre 65 et 174 m/ $\sqrt{\text{kg}}$. Les mesures ont été réalisées à l'aide de géophones trois composantes, permettant la mesure de la résultante du mouvement GP_{3C} . La résultante du tir A enregistrée au niveau de la paroi interne de la grotte est présentée à la Figure 2a. La vibration atteint une vitesse particulaire maximale PPV d'environ 1 mm/s pour une distance réduite de 123 kg/ $\sqrt{\text{m}}$. L'ensemble des tirs d'essai est majoré par un coefficient K d'environ 4000 dans la loi de Chapot (Chapot 1981). Ce coefficient peut sembler relativement élevé comparé à la valeur moyenne classique obtenue pour un rocher moyen en proche subsurface ($K = 2500$). Cela s'explique par la compacité globale du calcaire Urgonien, mais aussi par la faible fracturation du rocher en profondeur pour les trajets sismiques entre l'extérieur et l'intérieur de la grotte.

Le contenu spectral du tir A est présenté à la Figure 2c (courbe noire). La gamme de fréquence s'étend d'environ 10 à 500 Hz, ce qui est cohérent avec un tir à l'explosif au rocher enregistré à quelques dizaines de mètres de distances.

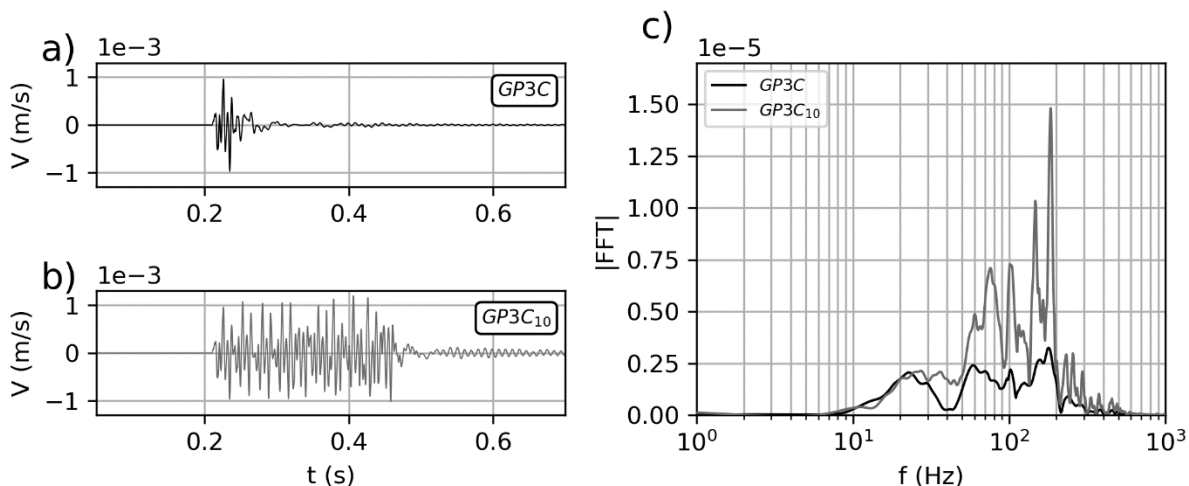


Figure 2. Forme d'ondes du tir d'explosif sans micro-retard (GP3C, a) et avec micro-retard (GP3C₁₀, b). c) Contenu spectral des signaux (a) et (b).

Afin de simuler l'influence de l'utilisation des micro-retards employés en phase chantier, un signal synthétique $GP3C_{10}$ a été créé par juxtaposition de $GP3C$ décalés d'un intervalle aléatoire compris entre 20 et 30 ms. La Figure 2b présente le $GP3C_{10}$ construit à partir du $GP3C$ du tir A (Figure 2a). Le contenu fréquentiel du signal est présenté à la Figure 2c

(courbe grise). On observe un contenu fréquentiel plus important que pour le tir unique à haute fréquence, dans la gamme 50-500 Hz. Les signaux $GP3C$ et $GP3C_{10}$ ont été établis également pour les tirs d'essai B et C et ont montré des caractéristiques similaires (non détaillées ici).

4. Modélisation dynamique

4.1. Code éléments finis

Un code aux éléments finis élasto-dynamique 2D développé en interne a été utilisé pour simuler le comportement dynamique de la population de fistuleuses soumise aux tirs d'essai. Le modèle consiste en des éléments finis poutre dans un plan de flexion, la section prise en compte correspondant à la section moyenne des fistuleuses (cf. section 3.1). L'analyse a été conduite dans le domaine temporel, permettant de retrouver les déplacements, vitesses, accélérations et contraintes en chaque nœud du modèle pour chaque pas de temps (Roux et al. 2014). La contrainte maximale $\sigma_{u,t,max}$ a été enregistrée pour chaque longueur de stalactite et pour chaque itération. La bonne convergence du solveur a été vérifiée en faisant varier le pas de temps et le nombre d'éléments finis. Un schéma de résolution de type Newmark a été retenu (Newmark 1959). Les caractéristiques géométriques, statiques et dynamiques des fistuleuses sont celle présentées en section 3.1. La vibration $GP3C$ ou $GP3C_{10}$ en paroi de la grotte (cf. exemple à la Figure 2a et b) a été appliqué horizontalement au niveau de l'encastrement des stalactites. La population de stalactite a été simulée en faisant varier la longueur des fistuleuses entre 0.025 m et 3.0 m avec un pas de 0.025 m. Les simulations numériques ont été validées grâce à des mesures in-situ au vibromètre laser sur stalactite durant un tir d'essai (non présenté ici).

4.2. Résultats

La contrainte maximale $\sigma_{u,t,max}$ générée dans les fistuleuses soumises au tir A monotir ($GP3C$) est présentée à la Figure 3 (courbe noire). On observe des pics de contrainte pour les fistuleuses de longueur 0.15, 0.38, 0.62, 0.68 et 0.86 m environ. Le maximum de contrainte est atteint pour des stalactites assez courtes (0.15 et 0.38 m), tandis que les stalactites plus longues connaissent des niveaux de contrainte généralement moindres. Les pics de contrainte observés correspondent à des fréquences de résonance (f_0-f_4) toutes voisines de 175 Hz (Figure 3, flèches verticales). Cette fréquence correspond au maximum spectral de la sollicitation ($GP3C$ du tir A, Figure 2c).

La simulation numérique permet donc de mettre en évidence une amplification dynamique marquée (les pics atteignant jusqu'à environ 5 fois la valeur du plateau environnant) lorsque les fréquences de résonance des fistuleuses coïncident avec la fréquence de la sollicitation vibratoire. Le maximum de contrainte n'est pas forcément observé pour le premier mode propre contrairement à l'hypothèse largement employée (e.g. Cadorn et al. 2001; Gribovszki et al. 2017). Les fistuleuses les plus exposées lors du tir de mine réalisé sont donc relativement courtes, de l'ordre de quelques dizaines de centimètres. Les mêmes observations ont été faites pour les deux autres tirs d'essais B et C (résultats non présentés ici).

Les contraintes maximales $\sigma_{u,t,max}$ générées par le signal multi-tir ($GP3C_{10}$ du tir A, courbe grise Figure 3) montrent une allure semblable. Les niveaux de contrainte atteints sont environ 3 fois plus élevés que pour le signal mono-tir $GP3C$. Cette observation est due au contenu fréquentiel plus élevé du signal d'entrée qui génère des niveaux

d'accélération plus importants. L'effet néfaste des microretards lorsqu'insuffisamment espacés par rapport à la durée d'amortissement de fistuleuses a déjà été observé et décrit par Lacave et al. (2003). La résonance dynamique génère des pics de contrainte atteignant jusqu'à un facteur 7 par rapport aux creux environnants.

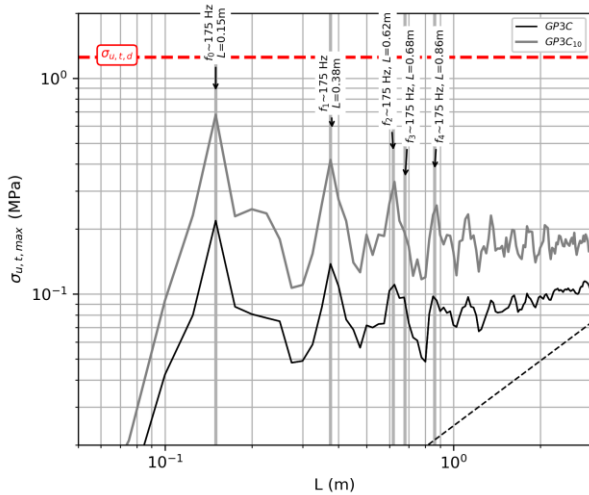


Figure 3. Contrainte maximale $\sigma_{u,t,max}$ dans les fistuleuses en fonction de leur longueur L . La contrainte due au poids-propre est indiquée en pointillés noirs. Les simulations ont été conduites pour le tir A, signal GP3C (noir) et GP3C₁₀ (gris), respectivement. La limite de résistance de la calcite à la rupture $\sigma_{u,t,d} = 1.25$ MPa est représentée en pointillés rouges.

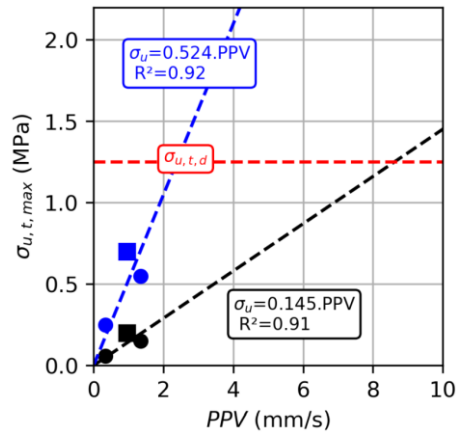


Figure 4. Contrainte maximale $\sigma_{u,t,max}$ dans les fistuleuses en fonction de la vitesse particulaire maximale PPV . Tir d'essai A (carrés), B et C (ronds). Signal mono-tir GP3C (noir) et multi-tir (GP3C₁₀ (bleu)).

Quelle que soit la sollicitation choisie (GP3C ou GP3C₁₀), les niveaux de contrainte modélisés dans les stalactites sont restés inférieurs à la limite de résistance retenue, atteignant environ 50 % du seuil de rupture. Cette observation est cohérente vu les faibles charges unitaires des tirs d'essai et les distances source-captur.

Les simulations ont été conduites de façon similaire pour les tirs B et C. La contrainte maximale $\sigma_{u,t,max}$ induite dans les stalactites pour chacun des tir d'essai est représentée à la Figure 4, en fonction de la vitesse particulaire maximale de la vibration (PPV). Les tirs d'essais montrent des PPV relativement faibles (< 2 mm/s) et de faibles contraintes induites (≤ 0.7 MPa). On remarque cependant une augmentation cohérente de $\sigma_{u,t,max}$ avec la valeur de PPV . Afin d'extrapoler les résultats des tirs d'essais, deux droites de régression aux moindres carrés ont été tracées (pointillés, Figure 4). La vitesse de vibration maximale admissible en paroi de la grotte (PPV_{adm}) est estimée à 8.6 mm/s pour un tir de mine isolé (GP3C) et à 2.4 mm/s pour un tir avec micro-retards (GP3C₁₀). Ces valeurs correspondent à des distances réduites de 23.7 et 48.5 m/ \sqrt{kg} , respectivement, en bon accord avec les limites données par Lacave et al. (2003), comprises entre 50 et 70 m/ \sqrt{kg} . L'ordre de grandeur de PPV_{adm} est cohérent avec les seuils généralement conseillés pour des structures sensibles à très sensibles aux vibrations.

5. Discussion

La méthodologie présentée dans cet article comporte un certain nombre de simplifications. Elle est notamment limitée aux fistuleuses, à l'exclusion des autres types de stalactites présents dans la Grotte de Choranche supposés moins vulnérables et/ou situés à plus grande distance des tirs de mine. Les caractéristiques mécaniques à la rupture des fistuleuses ont été estimées à partir de fragments collectés au sol. Il est

possible que ces échantillons aient subi un endommagement préalable avant essais, aboutissant à une sous-estimation de la résistance des fistuleuses. Les stalactites fistuleuses présentent parfois des excroissances ou irrégularités géométriques qui n'ont pas été prises en compte. Les tirs d'essais ont tous été réalisés en configuration de tir bloqué qui émettent plus de vibrations que les tirs d'abattage à charge explosive équivalente. Tous les phénomènes décrits ci-dessus influent dans le sens de la sécurité. Malgré ces limitations, nos travaux représentent la première étude modélisant de façon physique l'amplification dynamique subie par des stalactites. Les études antérieures faisaient généralement les hypothèses simplificatrices suivantes : amplification dynamique négligée, modélisation sous forme d'un système à 1 degré de liberté et/ou application d'un facteur arbitraire pour la résonance. Ces méthodes ne conviennent pas lorsque le contenu fréquentiel de la sollicitation coïncide avec les fréquences propres de la structure étudiée et peuvent conduire à une large sous-estimation des contraintes dynamiquement induites. La méthodologie détaillée dans cet article est applicable quel que soit la longueur de stalactite considérée et le contenu fréquentiel de la sollicitation.

6. Conclusions

Le travail mené dans le cadre de la protection des stalactites fistuleuses de la Grotte de Choranche a montré les points suivants :

- Une amplification dynamique très significative (jusqu'à un facteur 7) subie par les stalactites, car les premières fréquences de résonances des fistuleuses correspondent à la gamme fréquentielle des tirs de mine.
- De façon contre-intuitive, les stalactites les plus courtes ($L < 1$ m) subissent les niveaux de contrainte les plus élevés dus à l'amplification dynamique.
- Les études omettant ou simplifiant la résonance dynamique des fistuleuses peuvent conduire à une sous-estimation importante des contraintes induites.

Sur la base de modélisations numériques, d'expériences de laboratoire et de mesures in-situ, nous avons fixé des seuils de vitesse particulière admissibles en paroi de la grotte à 8.6 mm/s pour un tir isolé et 2.4 mm/s pour un tir avec micro-retard. Ces valeurs sont comparables aux seuils règlementaires applicables aux structures réputées sensibles à très sensibles aux vibrations.

Les travaux de minage ont été conduits en respectant la valeur seuil admissible ci-dessus, sans qu'aucun dommage ne soit recensé sur les fistuleuses.

Avec l'extension et la densification urbaines observés dans de nombreuses zones sédimentaires karstiques, nous pensons que l'approche développée ici est amenée à être réutilisée et étendue à d'autres cas d'étude lors de terrassements à l'explosif ou d'emploi d'engins mécaniques puissants à proximité de stalactites.

7. Remerciements

Ce travail a été mené à l'initiative et grâce au financement de la SARL Grotte de Choranche et soutenu par le projet VOR (Université Grenoble-Alpes). Les auteurs remercient R. Allier (CAN), D. Cantalupi (Alpes Minages), L. Pinet (SMED), la SARL Grotte de Choranche, G. Mantovani, D. Hantz, A. Pionchon, L. Fabre, C. Ribeyre, I. Douste-Bacqué, I. Pontdaven, S. Mercier, P. Roux et L. Moreau.

8. Références bibliographiques

Becker, Arnfried, Colin A. Davenport, Urs Eichenberger, Eric Gilli, Pierre-Yves Jeannin, et Corinne Lacave. 2006. « Speleoseismology: A Critical Perspective ». *Journal of Seismology* 10 (3): 371-88. <https://doi.org/10.1007/s10950-006-9017-z>.

- Bokelmann, Götz, et Katalin Gribovszki. 2015. « Constraints on Long-Term Seismic Hazard From Vulnerable Stalagmites ». In , 7. Eucentre Foundation, Pavia, Italy.
- Cadorin, Jean-François, Denis Jongmans, A. Plumier, T. Camelbeeck, S. Delaby, et Yves Quinif. 2001. « Modelling of speleothems failure in the Hotton cave (Belgium). Is the failure earthquake induced? » *Geologie en Mijnbouw* 80 (3/4): 315–322.
- Chapot, T. 1981. « Study of vibrations caused in rock masses by explosives. » *Rapport de Recherche LPC*, n° 105 (septembre). <https://trid.trb.org/view/180591>.
- Crispim, J. 1999. « Seismotectonic versus Man-Induced Morphological Changes in a Cave on the Arrabida Chain (Portugal) ». *Geodinamica Acta* 12 (3-4): 135-42. [https://doi.org/10.1016/S0985-3111\(00\)88653-2](https://doi.org/10.1016/S0985-3111(00)88653-2).
- Delannoy, Jean-Jacques. 1986. « Contribution à l'étude des circulations aquifères dans le géosystème Coulmes-Choranche; Présentation du site expérimental de la Grotte de Coufin ». *Revue de Géographie Alpine* 74 (1): 83-92. <https://doi.org/10.3406/rga.1986.2629>.
- Delannoy, Jean-Jacques, Christophe Gauchon, Fabien Hobléa, Stéphane Jaillet, Richard Maire, Yves Perrette, Anne-Sophie Perroux, Estelle Ployon, et Nathalie Vanara. 2009. « Karst: from palaeogeographic archives to environmental indicators ». *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 15 (2): 83-94. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7520>.
- Forti, Paolo. 2001. « Seismotectonic and paleoseismic studies from speleothems: the state of the art ». *Geologica belgica*.
- Gauchon, Christophe, Estelle Ployon, Jean-Jacques Delannoy, Sébastien Hacquard, Fabien Hobléa, Stéphane Jaillet, et Yves Perrette. 2007. « The concepts of heritage and heritage resource applied to karsts: protecting the Choranche caves (Vercors, France) ». *Acta carsologica* 35 (2-3).
- Gilli, Eric, Agnès Levret, Pierre Sollogoub, et Pierre Delange. 1999. « Research on the February 18, 1996 earthquake in the caves of Saint-Paul-de-Fenouillet area, (eastern Pyrenees, France) ». *Geodinamica Acta* 12 (3-4): 143–158.
- Gribovszki, K., K. Kovács, P. Mónus, G. Bokelmann, P. Konecny, Markéta Lednická, G. Moseley, C. Spötl, R. L. Edwards, et M. Bednárík. 2017. « Estimating the upper limit of prehistoric peak ground acceleration using an in situ, intact and vulnerable stalagmite from Plavecká priepast cave (Detrek\Hoi-zsomboly), Little Carpathians, Slovakia—first results ». *Journal of Seismology* 21 (5): 1111–1130.
- Lacave, Corinne, Martin Koller, Urs Eichenberger, et Pierre-Yves Jeannin. 2003. « Prevention of speleothem rupture during nearby construction ». *Environmental Geology* 43 (8): 892–900.
- Lacave, Corinne, Agnès Levret, et Martin Koller. 2000. « Measurements of natural frequencies and damping of speleothems ». In *Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New-Zealand, paper*. Vol. 2118. Citeseer.
- Méjean, Pauline, Victor-Hugo Garduño-Monroy, Daniele L. Pinti, Bassam Ghaleb, Laura Bouvier, Martha G. Gomez-Vasconcelos, et Alain Tremblay. 2015. « U–Th Dating of Broken Speleothems from Cacahuamilpa Cave, Mexico: Are They Recording Past Seismic Events? » *Journal of South American Earth Sciences* 57 (janvier): 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.11.002>.
- Newmark, Nathan Mortimore. 1959. « A method of computation for structural dynamics ». In . American Society of Civil Engineers.
- Roux, Philippe, Philippe Guéguen, Laurent Baillet, et Alaa Hamze. 2014. « Structural-change localization and monitoring through a perturbation-based inverse problem ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 136 (5): 2586–2597.