



Contribution à la Caractérisation de l'Aléa Sismique du Liban par l'Etude des Spéléothèmes

Corinne Lacave* — Benjamin Sadier** — Jean-Jacques Delannoy** — Juan-José Egozcue ***

* Résonance Ingénieurs-Conseils SA

21 rue Jacques Grosselin, 1227 Carouge, Suisse

corinne.lacave@resonance.ch

** Laboratoire EDYTEM

Bâtiment Pole Montagne, Campus scientifique, université, 73376 Le Bourget du Lac cedex, France

*** Dept. Applied Mathematics III

U. Politècnica de Catalunya (UPC), 08034 Barcelona, Espagne

RÉSUMÉ. Dans le cadre du projet LIBRIS (Contribution à l'étude du risque sismique au Liban), un volet "spéleo-sismicité" a pour objectif l'utilisation des informations apportées par les spéléothèmes (stalactites et stalagmites), cassés ou non, pour améliorer la caractérisation de l'aléa sismique d'une région donnée. Ce type d'étude permet notamment d'apporter une contribution dans le domaine des longues périodes de retour, non couvert par les études de sismicité historique. L'approche proposée se base sur une étude précédente menée par Lacave et al. (2004). Une mission de reconnaissance a permis de retenir deux cavités pilotes situées un peu au Nord de Beyrouth, sur ou dans le prolongement d'une faille majeure. Une seconde mission de terrain a eu pour objectif l'acquisition des données in situ au moyen d'un laser scan 3D. Le dépouillement des données recueillies permet un échantillonnage détaillé (nombre et forme précise) des populations de stalactites, cassées et non cassées, dans les deux cavités. Ces données servent de base pour le calcul statistique de la probabilité d'avoir atteint, ou non dépassé, un certain niveau d'accélération sismique dans la région d'étude.

ABSTRACT. In the framework of the LIBRIS project (Contribution to seismic risk assessment in Lebanon), a work package is devoted to the use of broken or unbroken speleothems (stalagmites and stalactites) to better characterize the local seismic hazard. This kind of study is particularly interesting in the long return period range, where historical information is far from being sufficient. The proposed approach is based on a previous study by Lacave et al. (2004). A first field trip was conducted in order to select two pilot caves located north of Beirut, along or close to a major fault. A second field trip made it possible to measure in situ the speleothems, using a 3D laser scan. The data processing then makes it possible to obtain a detailed sampling of the broken and unbroken speleothem population (number and precise shape), in the two pilot caves. These data are finally used to compute, in a statistical approach, the probability of exceeding, or non exceeding, of a certain level of seismic acceleration in the study area.

MOTS-CLÉS : spéléothèmes - accélération maximale - aléa sismique - longue période de retour.

KEYWORDS: speleothems – maximal acceleration – seismic hazard – long return period.

1. Introduction

Dans le cadre du projet ANR LIBRIS (Contribution à l'étude du risque sismique au Liban), un volet "spéléosismicité" a pour objectif l'utilisation des informations apportées par les spéléothèmes (stalactites et stalagmites), cassés ou non, pour améliorer la caractérisation de l'aléa sismique d'une région donnée. Ce type d'étude permet notamment d'apporter une contribution dans le domaine des longues périodes de retour, non couvert par les études de sismicité historique. Une revue critique de l'ensemble des études menées dans le domaine de la spéléosismicité peut être trouvée dans Becker et al. (2006).

2. Méthodologie

L'approche proposée se base sur une étude précédente menée par Lacave et al. (2004). Le comportement mécanique des spéléothèmes a été étudié au moyen de tests de flexion statique réalisés sur des échantillons de stalactites, donnant des indications sur la résistance moyenne à la flexion et sur sa variabilité. Cette étude a permis de déterminer des courbes de fragilité pour différentes classes de spéléothèmes, au moyen de simulations de type Monte Carlo, en tenant compte de l'amplification dynamique, ainsi que l'hétérogénéité de la résistance à la flexion, dans chaque spéléothème. Enfin, une approche statistique originale, valable pour les données de type floues et incomplètes, a été développée, permettant d'estimer la probabilité qu'une accélération donnée ait été atteinte, ou non dépassée, par le passé, dans la région d'étude.

Une mission de reconnaissance effectuée en février/mars 2010 a permis de retenir deux cavités pilotes. Une seconde mission de terrain, réalisée en octobre 2010, a permis l'acquisition des données in situ au moyen d'un laser scan 3D. Le dépouillement des données recueillies permet un échantillonnage détaillé (nombre et forme précise) des populations de stalactites, cassées et non cassées, dans les deux cavités. Ces données servent de base pour le calcul statistique de la probabilité d'avoir atteint, ou non dépassé, un certain niveau d'accélération sismique dans la région d'étude.

3. Cavités retenues

Les critères pour le choix de cavités pilotes pour l'étude ont été les suivants :

- Région sismique (selon les cartes de sismicité historique et instrumentale du Liban, comme celle de la figure 1, par exemple).
- Cavités contenant des spéléothèmes de forme plutôt élancée (longs et fins), et non pas seulement des stalagmites massives. Ces spéléothèmes (plutôt des stalactites) doivent être en quantité assez importante, l'idéal étant d'avoir des spéléothèmes cassés et des non cassés. L'utilisation des fistuleuses n'apporte rien à ce type d'étude car il est impossible de distinguer une fistuleuse ayant été cassée d'une fistuleuse intacte.
- Si des spéléothèmes cassés existent, il faut si possible avoir une estimation de leur longueur d'origine (reste des morceaux cassés à proximité, indices selon leur forme, etc.).
- Les secteurs d'étude contenant les populations de spéléothèmes doivent se trouver à faible profondeur sous terre, de manière à pouvoir considérer approximativement que l'accélération du sol y est similaire à celle du rocher en surface.

Sur la base de ces critères, les équipes de l'ALES (Association Libanaise d'Etudes Spéléologiques) et de l'USJ (Université St Joseph, Beyrouth) ont dressé une liste de cavités potentiellement intéressantes pour le projet. Ces cavités ont été visitées durant la mission de reconnaissance, afin d'établir un choix de quelques cavités pilotes.

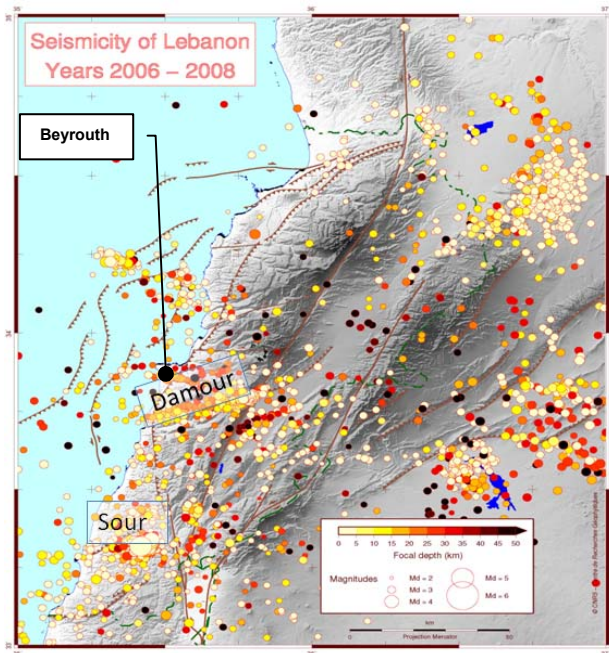


Figure 1. Sismicité du Liban entre 2006 et 2008.

Une remarque d'ordre général peut être faite ici, car elle concerne potentiellement l'ensemble des cavités visitées pour le projet. Il y a, en effet, lieu de faire attention à plusieurs facteurs potentiellement responsables de la cassure de spéléothèmes, en dehors du séisme. Peuvent être mentionnés en particulier :

- les tirs de carrières,
- les bombardements,
- les cassures d'origine humaines (pillages, vandalisme, etc.).

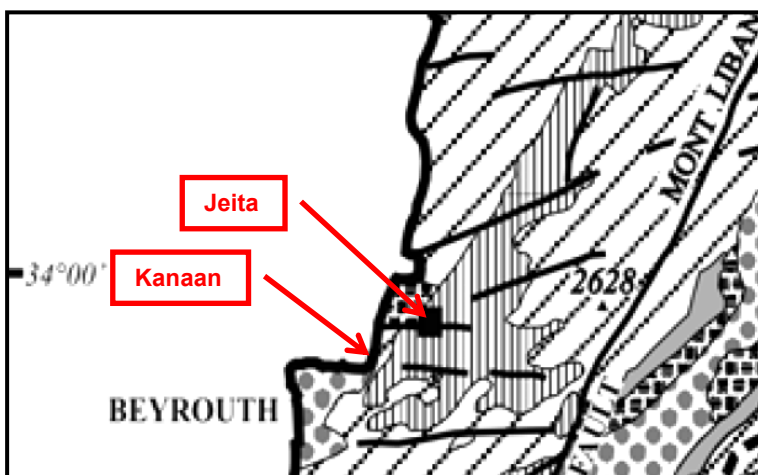


Figure 2. Position des deux grottes pilotes retenues, toutes deux situées sur ou dans le prolongement d'une faille majeure (extrait de la carte géologique simplifiée du Liban, Dubertret, 1955).

Ainsi, lors de la visite des cavités, ces différentes causes de cassures ont été sérieusement envisagées, afin de sélectionner comme cavités pilotes, celles qui présentaient le moins de potentiel de cassures d'origine humaine. Les deux cavités ainsi retenues sont les grottes de Jeita (Nahr El Kalb) et de Kanaan (Antelias), toutes deux situées près de la côte, un peu au Nord de Beyrouth, sur ou dans le prolongement d'une faille majeure, comme le montre la carte schématique de la figure 2. Les caractéristiques de ces deux cavités sont décrites ci-dessous.

3.1. Grotte de Jeita

La grotte de Jeita constitue l'une des cavités majeures du Liban, tant par son développement (plus de 10 km) que par l'immensité des volumes intérieurs et la richesse du concrétionnement. Elle est située sur les flancs de la vallée encaissée du Nahr el Kalb, au Nord de Beyrouth, le long d'une faille majeure (figure 2). Il s'agit d'une grotte qui constitue un enregistrement paléo-environnemental exceptionnel, comme en témoignent les datations effectuées par Nader et al. (2007), sur une stalagmite prélevée dans la grotte (figure 3), remontant jusqu'à des âges de début du concrétionnement d'environ 12000 ans avant la période actuelle.

Lors de la mission de reconnaissance, une partie de la grotte de Jeita a été visitée, notamment une galerie latérale située au-dessus de la partie aménagée au tourisme, ainsi qu'une autre galerie latérale, située en amont au-delà de la partie aménagée. Plusieurs spéléothèmes cassés (essentiellement des grandes stalactites) ont pu être observés dans la galerie au-dessus de la partie aménagée. Cette galerie a donc été retenue comme site d'étude pour la suite du projet.

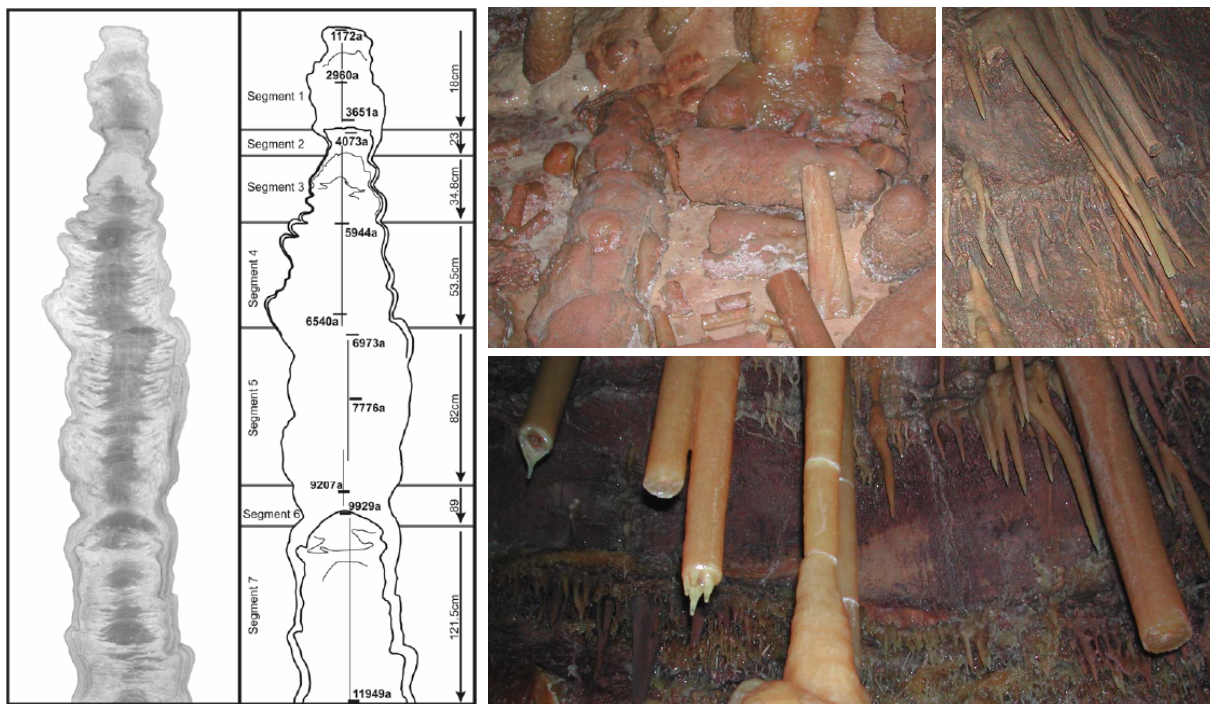


Figure 2. A gauche : résultats de l'étude d'une stalagmite de la grotte de Jeita menée par Nader et al. (2007). Une rupture apparaît nettement à environ -4000 ans. A droite : concrétions cassées dans la grotte de Kanaan. En bas, les cassures multiples le long des deux colonnes pourraient être associées à des phénomènes de soutirage du soubassement.

3.2. Grotte de Kanaan

La grotte de Kanaan se situe dans la carrière d'Antelias, son entrée s'ouvre en paroi par un porche assez grand. Cette grotte de Kanaan est également le siège d'un important concrétionnement, associé à une quantité d'éléments forts intéressants permettant de retracer l'histoire de son évolution, du point de vue karstologique (Nehme et al., 2009).

En ce qui concerne le présent projet, la grotte de Kanaan constitue un intéressant terrain d'étude, en raison de la quantité de spéléothèmes, de dimensions importantes, cassés pour les uns, intacts pour les autres (figure 3). Il est intéressant de noter ici que les spéléothèmes cassés, visibles sur la photo de la figure 3, le sont depuis plusieurs centaines d'années, au vu des repousses stalagmitiques à leurs extrémités.

4. Mesures de la population de spéléothèmes

4.1. Mesures in situ

L'acquisition des données a été réalisée à partir de modèles numériques de terrain à haute résolution acquis par relevé lasergrammétrique. La mission de terrain, réalisée en octobre 2010, a permis l'acquisition des données *in situ* nécessaires, au moyen d'un lidar Leica HDS 6000 (Figure 4), un dôme de 360° par 310°. Cet appareil porte à 70 m et mesure environ 500 000 points par seconde avec une résolution maximale de 1 mm à une distance 10 m, ce qui représente un pas angulaire de 127 microns entre chaque mesure. Cependant, la précision dans le positionnement de chaque point est annoncée à 2 mm en x, y, z jusqu'à 25 m. Le détail de la validation du procédé de mesures in situ est donné dans la publication de Sadier et al. (2011).



Figure 4. Mise en place et détail du scanner de numérisation à hautes vitesses et précisions, utilisé pour l'échantillonnage de la population de spéléothèmes.

Dans la grotte de Jeita, par exemple, 49 positions de scanner ont été nécessaires pour couvrir l'intégralité de la zone d'étude avec des densités de points choisies en fonction de la distance entre le scanner et les plafonds où se situent les stalactites. La consolidation des scènes repose sur la technique des sphères homologues permettant une fermeture topographique de 3 mm, restant ainsi dans la marge d'erreur du cahier des charges initial. L'horizontalité et l'orientation ont été assurées par un géo-référencement au compas électronique et un compensateur intégré au scanner.

4.2. Traitement des données

Le détail de la procédure de restitution des données, afin de procéder aux mesures des concrétions est développé dans la publication de Sadier et al. (2011). A l'issue de ce traitement, pour le cas de la grotte de Jeita, 37 scènes ont été sélectionnées, sur lesquelles la totalité des points a été gardée, ce qui représente des scènes constituées de 75 à 175 millions de points. Ainsi, le nuage de points global comporte, au total, plus de 3.3 milliards de points. Dès lors, il devient possible d'effectuer directement des mesures sur des images (figure 5) tout en naviguant aisément dans le modèle 3D.

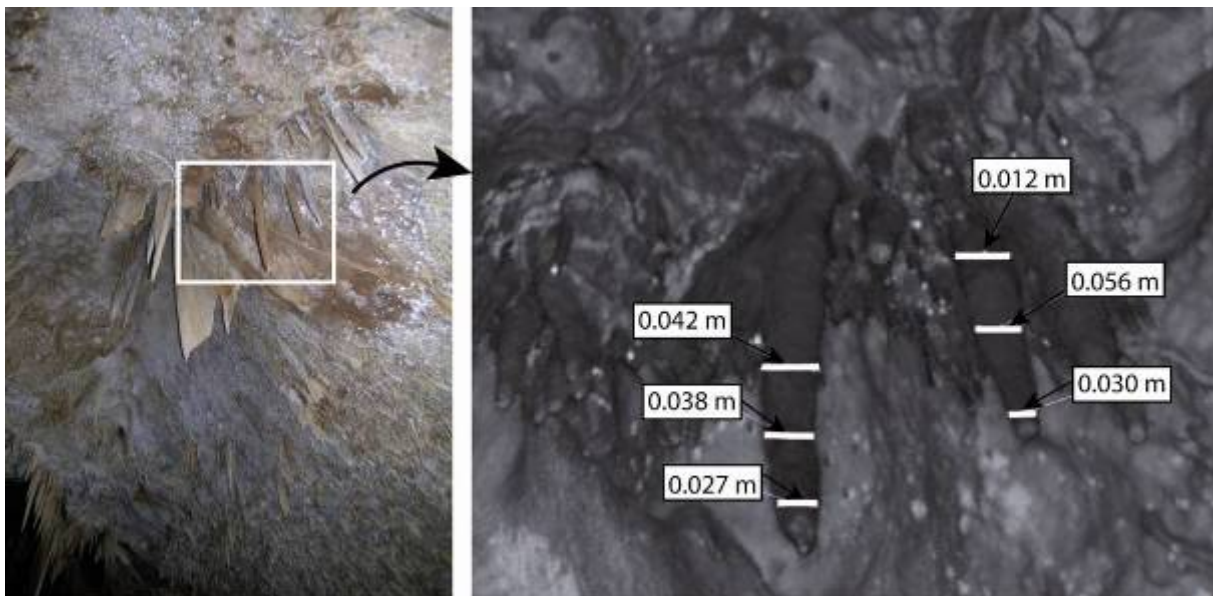


Figure 5. Extrait d'une image solide sur laquelle on effectue directement des mesures de gabarit (à droite). L'image de gauche est un cliché photographique du même secteur, pris directement sur le terrain (figure extraite de Sadier et al., 2011).

5. Analyse en termes de vulnérabilité

Une étude préalablement menée par Lacave et al. (2004) a permis le développement d'un modèle de comportement des spéléothèmes sous sollicitation sismique. Cette approche a également inclus la prise en compte des incertitudes liées à la géométrie du spéléothèmes, à l'hétérogénéité de sa structure interne, aux possibles effets d'amplification dynamique, etc. Les modélisations ainsi réalisées ont donné lieu à l'établissement de courbes de fragilité des spéléothèmes (figure 6), réparties en quatre classes de vulnérabilité allant de "très vulnérable" à "pas vulnérable", respectivement.

Une stalactite d'environ 80 cm de longueur et un diamètre compris entre 2 et 2.5 cm appartient à la classe de vulnérabilité 1, tandis qu'une stalactite d'environ 50 cm de longueur et un diamètre compris entre 1 et 2 cm appartient à la classe de vulnérabilité 2, par exemple. Les courbes de fragilité de la figure 6 montrent, par exemple, qu'avec une accélération de 3 m/s^2 , il y a environ 30 % de probabilité de casser une stalactite de classe 2, tandis qu'il y a environ 90 % de probabilité de casser une stalactite de classe 1.

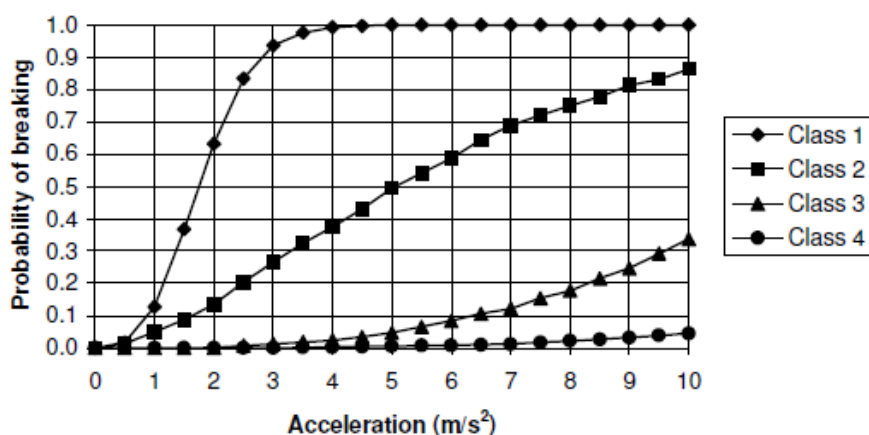


Figure 6. Courbes de fragilité (probabilité de cassure en fonction de l'accélération) pour quatre classes de stalactites (figure extraite de Lacave et al., 2004).

Ainsi, une fois la géométrie détaillée des spéléothèmes mesurée, il est possible de classer la population de spéléothèmes, cassés et non cassés, selon ces quatre classes de vulnérabilité. Ensuite, une approche statistique, appropriée au traitement des données floues et incomplètes, développée par le Prof. J.-J. Egozcue (Lacave et al., 2004) est appliquée à l'ensemble des données recueillies. Cette procédure prend en compte les incertitudes liées à l'attribution de chaque spéléothème à une classe de vulnérabilité ou une autre, au fait qu'un spéléothème soit réellement cassé ou non, aux différents types de causes possibles de cassure, etc. Finalement, cette approche permet de déterminer l'accélération probablement atteinte, ou non dépassée, dans la cavité étudiée. C'est ce résultat, pour plusieurs cavités, qui, combiné avec l'ensemble des résultats d'autres études de paléosismicité dans la région, permettra une meilleure détermination de l'aléa sismique du Liban dans le domaine des longues périodes de retour.

6. Conclusion

Les mesures in situ réalisées sur des spéléothèmes cassés et intacts, dans deux cavités situées au Nord de Beyrouth, ainsi que leur dépouillement, puis leur traitement en termes d'analyse statistique de leur vulnérabilité permettront de contribuer à une meilleure détermination de l'aléa sismique du Liban, dans le domaine des longues périodes de retour.

Remerciements

Le projet LIBRIS est financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche). L'ensemble des travaux présentés ici n'aurait pas pu être réalisé sans la participation active des membres de l'Université St Joseph, Beyrouth, Liban et de l'ALES (Association Libanaise d'Etudes Spéléologiques) que nous remercions ici chaleureusement.

7. Bibliographie

Becker A., C.A. Davenport, U. Eichenberger, E. Gilli, P.-Y. Jeannin and C. Lacave (2006). "Speleoseismology: A critical perspective". *Journal of Seismology*, vol. 10, pp. 371–388. DOI 10.1007/s10950-006-9017-z.

Dubertret L. (1955). Carte géologique du Liban au 1/200000 avec notice explicative. République Libanaise, Ministère des Travaux Publics, Beyrouth, 74 p.

Lacave C., M. G. Koller and J. J. Egozcue (2004). "What can be concluded about seismic history from broken and unbroken speleothems ?" *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 431-455.

Nader F. H., S. Verheyden, H. Cheng and R. Swennen (2007). "Etude pétrographique et géochimique d'une stalagmite de la grotte de Jeita (Liban)". *Lebanese Science Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 45-58.

Nehme C., Jabbour-Gédéon B., Gérard P.-C., Sadier B., Delannoy J.-J. (2009). "Reconstitution spéléogénique de la grotte de Kanaan (Antélias, Liban) : contribution à la morphogenèse du nahr Antelias". *Karstologia*, 54, pp. 21-36.

Sadier B., C. Lacave, J.- J. Delannoy et S. Jaillot (2011). "Relevés lasergrammétriques et calibration sur calcite de morphologies externes de spéléothèmes pour une étude paléo-sismologique du Liban". *Cahier de géographie et de géologie - collection EDYTEM n°12, Université de Savoie, (Images et modèles 3D en milieu naturels)*, pp. 79-98.