

Rupture de spéléothèmes par fluage d'un remplissage endokarstique. L'exemple de la grotte de Ribière (Bouches-du-Rhône)

*Breaking of speleothems by creeping of a karstic filling.
The example of the Ribière cave (Bouches-du-Rhône)*

Eric Gilli*

Centre d'étude du karst (CEK), 13, rue Masséna, 06000 Nice, France

(Reçu le 1^{er} août 1999, accepté après révision le 4 octobre 1999)

Abstract — Natural caves could be good recorders for paleoearthquakes if it was possible to know precisely the underground damage caused by a seismic event. The researched effects are breakings of speleothems. Therefore, several non-coseismic mechanisms may be involved. A recent study of the Ribière cave shows that the creeping of a karstic filling explains most of the cave breakings that are attributed to earthquakes. (© 1999 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS.)

earthquake / ice / karstic filling / karst / paleoseismicity / speleothem

Résumé — Les cavités karstiques pourraient être des enregistreurs de paléoséismes, sous réserve de connaître de façon précise l'impact d'une secousse sismique sur les grottes. Les effets recherchés sont essentiellement des cassures de stalactites et stalagmites, plusieurs mécanismes autres que cosismiques pouvant cependant être invoqués pour expliquer ces ruptures. Or, de récentes observations sur la grotte de Ribière montrent qu'un fluage de sédiment endokarstique peut expliquer la plupart des ruptures de concrétions attribuées à des séismes. (© 1999 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS.)

glace / karst / paléosismicité / sédiment / séisme / spéléothème

Abrided version

Recording of palaeoearthquakes in the endokarst

Historic

For several authors caves could be good natural recorders of palaeoearthquakes. Broken speleothems attributed to seismic activity, were described in several caves (Becker, 1929;

Schillat, 1977; Moser and Geyer 1979; Forti et Postpichl, 1979; Postpichl et al., 1991; Agostini et al., 1994). By studying the broken speleothems, it seems possible not only to detect the existence of palaeoearthquakes, but also to obtain data on the ground motion (Gospodaric, 1972 et 1997; Moser et Geyer, 1979; Forti et al., 1983; Quinif, 1996; Davenport, 1998; Forti, 1998).

Note présentée par Jean Aubouin.

* Correspondance et tirés à part.
gilli@worldnet.fr

Limit of the method

In a synthesis paper, Forti (1997) indicates that it is difficult to separate the coseismic effects from effects caused by other mechanisms. We have tried to correlate recent underground damage with present seismic activity. In the very active areas of Costa Rica, fault movements have broken speleothems, but historical earthquakes ($M_s > 7$) have not broken the stalactites of the ceilings in the visited caves (Gilli, 1995).

In French Pyrenees, after the February 18, 1996 earthquake ($M_s = 5.2$), the only effects observed in caves were breakings of soda straws (Gilli et al., 1998). After the Kobe event (1995, $M_s = 7.2$), no damage was observed in Nojima-do cave on the Awaji-shima Island (Yano, oral communication).

A recent in situ study made it possible to show that most of the speleothems do not undergo dynamic amplification phenomena of the seismic motion, since their fundamental natural frequencies are higher than the range of seismic excitation (Lacave et al., 1999). It seems, in fact, that unless soda straws or long cylindrical stalagmites, speleothems do not break during an earthquake and other causes have to be investigated to explain most of the breakings.

Non coseismic breakings of speleothems

Classical observations

Clay subsidence easily explains the breaking of speleothems, but other non-coseismic causes exist:

- ice filling in the karstic galleries (Kempe, in Forti, 1997);
- collapses of rocks or ice from the ceiling of a cave;
- human causes (works, bombing, underground vandalism), even during prehistoric ages (Rouzaud et al., 1995);
- underground bears.

Sediment creeping

Most of the caves are filled with karstic sediment at a density higher than 2; observations in the Ribière cave made it possible to see that the creeping of the karstic filling may break stalactites. This mechanism could explain some speleothem damage.

Example of the Ribière cave (figures 1 and 2)

Description and previous studies

A great number of coseismic broken speleothems were observed in the Ribière cave (Bouches-du-Rhône) (Delange et al., 1998). The recent breaks were attributed to the 1909

Lambesc earthquake and two older ones were dated using the U/Th method. The following ages were obtained: 285 000 and 391 000 years BP for the breaks, 189 000 and 171 000 years for the new calcite that fossilizes the breaks; therefore a gap close to 200 000 years exists between the breaking and the scarring. These ages indicate that the stalactites were not broken at the same time, they were protected from new calcite deposit for 200 000 years, and they were scarred with new calcite at the same time.

This history is not compatible with an earthquake.

Evidence of a karstic filling creeping

The cave was filled totally with karstic filling (figure 2) and then partially emptied by subsidence. In the upper part a great number of broken speleothem can be observed. This is the place where the former samples were collected. In the lower part of the second room the sediment reaches the ceiling and its stalactites. We excavated the sediment and observed several broken stalactites included into the clay. The orientation of the broken fragments into the sediment indicates that the stalactites were broken by a movement of the sediment and not by an earthquake (figure 3). In the upper part of the cave, the sediment was washed away and the speleothems were covered with new calcite (figure 4).

Incidence of the karstic filling on the stalactites aspect

The observation of the speleothems aspect in situ and on polished sections shows that, even after a 200 000 years inclusion in the sediment, the stalactites surfaces were not affected and nothing indicates a rupture in the growth mechanism, unless for the broken ones where new calcite scars the breaks. This makes it possible to observe broken speleothems without evidence of a previous filling if the sediment was totally washed away.

Ice filling

If the cave is filled with ice, the same mechanism is possible and leaves no trace at all. Figure 5 shows a possible explanation for stalagmite breakings or horizontal displacement of a ceiling flagstone attributed to an earthquake in alpine cave (Lemeille et al., 1998).

Conclusion

The creeping of a karstic filling may explain generalised and oriented speleothem breakings. For previous descriptions of oriented damage in caves, it could be interesting to check if the orientation is different from the direction of a creeping caused by a movement of the sediment toward the down slope of the gallery.

1. Enregistrement des paléoséismes dans l'endokarst

1.1. Historique

Pour de nombreux auteurs, les vibrations d'un séisme peuvent rompre des stalactites et des stalagmites dont les débris, une fois tombés au sol, constituent des indices susceptibles d'apporter des renseignements d'ordres qualitatif et quantitatif sur les paléoséismes. Becker (1929) signale des concrétions brisées par des séismes en Allemagne dans Bing Cave et en Belgique dans la grotte de Han-sur-Lesse. Moser et Geyer (1979) indiquent que dans Gaislochhöhle (Allemagne), 70 % des concrétions sont brisées. Des études statistiques effectuées en Italie par Postpichl et al. (1991) et Agostini et al. (1994) dans la Grotta del Cervo (Petrasecca), située dans une zone à forte sismicité, ont montré que les débris se répartissent en 4 classes de dates comprises entre -500 et -350 000 ans. Les variations de la verticalité de l'axe de croissance des stalagmites ont été attribuées à des épisodes sismiques (Schillat, 1977 ; Forti et Postpichl, 1979). Dans des grottes de gypse près de Bologne, l'histoire sismique locale a pu être retracée sur 1 200 ans, avec une précision de 11 ans, à partir de l'étude des variations dans la couleur des lamines d'accroissement et dans l'axe des stalagmites (Postpichl et al., 1991).

Il apparaît donc possible, à partir de l'examen des stalagmites, d'identifier des paléoséismes, mais il semble aussi possible de déterminer leurs caractéristiques : orientation de la secousse, position de l'épicentre et magnitude (Gospodaric, 1972 et 1997 ; Moser et Geyer, 1979 ; Forti et al., 1983 ; Quinif, 1996 ; Davenport, 1998 ; Forti, 1998).

1.2. Limite de la méthode

Une synthèse a été réalisée par Forti (1997), qui souligne, cependant, qu'il est difficile de faire la différence entre les concrétions dont la croissance a été modifiée par des séismes et celles qui ont été affectées par d'autres causes et qu'il est nécessaire, avant d'attribuer des ruptures de concrétions à des causes sismiques, d'éliminer toutes les autres causes possibles. Or, ces autres causes n'ont peut-être pas toutes été identifiées.

Nous avons tenté une approche naturaliste de ce sujet, en recherchant les effets de séismes historiques bien décrits ou actuels sur les concrétions des cavités. Au Costa Rica, une corrélation existe entre l'état de fracturation des cavités et l'activité tectonique (Gilli, 1995), mais peu d'indices trahissent une vulnérabilité des spéléothèmes aux secousses. Ainsi, dans les régions très actives, si les discontinuités des cavités ont joué, brisant effectivement certaines concrétions recouvrant les parois, des séismes historiques importants ($M_s > 7$) n'ont cependant pas brisé les stalactites des voûtes de ces cavités. Seuls ont pu être observés des basculements de longues stalagmites cylindriques dans le gouffre Terziopelo.

Dans les Pyrénées, à la suite du séisme du 18 février 1996 ($M_s = 5,2$), toutes les cavités situées dans un rayon de 10 km autour de l'épicentre ont été visitées. Les seuls effets observés ont été des chutes de fistuleuses, fines stalactites tubulaires (Gilli et al., 1998). À la suite du séisme de Kobe (1995, $M_s 7,2$), une visite dans la grotte de Nojima-do sur l'île d'Awaji-shima à quelques kilomètres de l'épicentre n'a pas permis de constater de dégâts (Yano, communication orale).

Une enquête sur Internet auprès de la population spéléologique internationale n'a, à ce jour, apporté aucun témoignage de chute de stalactites durant un séisme. De récentes mesures de vibrations sur des spéléothèmes montrent que, hormis pour les fistuleuses, les fréquences propres des spéléothèmes se placent en dehors du spectre sismique (Lacave et al., 1999).

De l'ensemble de ces observations, il ressort donc que les effets les plus probables des séismes sont des chutes de fistuleuses ou des bris de longues stalagmites cylindriques. Les courtes stalagmites ou les stalactites coniques semblent suffisamment solides pour résister à des secousses importantes.

2. Causes non cosismiques de rupture des spéléothèmes

2.1. Observations classiques

Dans la grande majorité des cas, les phénomènes de tassement ou de soutirage affectant le substratum des spéléothèmes expliquent bien les dégâts observés sur les stalagmites ou les planchers de calcite, mais d'autres causes, moins évidentes, peuvent exister :

- l'intrusion de la glace dans les réseaux peut cisailier des concrétions (Kempe, *in* Forti, 1997) ;
- des chutes d'objets lourds près de stalagmites peuvent les briser (ainsi, à la grotte des Caranques [Alpes-Maritimes], un coup de marteau appliqué sur le sol à une dizaine de centimètres d'une stalagmite cierge, d'environ 1 m de long et de 7 à 8 cm de diamètre, a provoqué sa rupture à sa base ; il est donc tout à fait possible que la chute d'un bloc ou d'un amas de glace du plafond d'une grotte puisse provoquer des dégâts équivalents et briser les cierges d'une salle) ;
- des causes anthropiques peuvent être externes à la cavité (terrassements, tirs de mines, guerres...) ou internes (vandalisme, exploration spéléologique, travaux d'aménagement...). Rouzaud et al. (1995) décrivent ainsi un campement préhistorique souterrain, où des concrétions brisées ont servi de cales pour des huttes ;
- enfin, les animaux troglodiles peuvent aussi provoquer des dégâts dans les grottes ; dans le TM 71, cavité située dans la haute vallée de l'Aude, quelques concrétions sont brisées le long des axes de déplacement des ours.

2.2. Fluage de sédiment

La plupart des grottes appartiennent à des systèmes karstiques polyphasés et ont donc subi une multitude d'événements, parmi lesquels des phases successives, plus ou moins complètes, de remplissages et de vidanges de sédiments variés (argile, sable, cailloutis, galets, blocs). Remplissages et vidanges ont pu être totaux ou partiels.

Il s'agit de matériaux d'une densité généralement supérieure à 2. Les sédiments peuvent fluer à l'intérieur des cavités sous l'effet d'un soutirage profond durant les phases de vidange, qui peuvent s'étaler sur des milliers d'années.

Des observations dans la grotte de Ribière nous ont montré que ce fluage de sédiments endokarstiques peut s'accompagner de ruptures de stalactites. Ce mécanisme pourrait être étendu à de nombreuses grottes.

3. Exemple de la grotte de Ribière

3.1. Description et étude précédentes

De très nombreuses stalactites et stalagmites brisées ont été observées dans la grotte de Ribière (Bouches-du-Rhône) (figures 1 et 2). Compte tenu de sa position à

proximité de la faille de la Durance et de l'épicentre du séisme de Lambesc en 1909, l'origine des ruptures a été attribuée à des séismes. Les fractures récentes, non recouvertes de calcite moderne, ont été arbitrairement attribuées au séisme de 1909 et deux cassures plus anciennes, datées à l'U/Th à Oxford, ont été attribuées à un séisme d'âge Pléistocène moyen (Delange et al., 1998).

Pour chaque concrétion, les âges suivants ont en effet été obtenus (âges BP en années), respectivement pour la calcite située au-dessus des ruptures cicatrisées, et pour la calcite cicatrisant les ruptures :

- échantillon A : 390 860 ($\pm 13\ 000$) et 170 900 ($\pm 1\ 900$) ans,
- échantillon B : 285 160 ($\pm 10\ 000$) et 189 750 ($\pm 3\ 500$) ans.

L'éventuel séisme a donc été daté d'environ 200 000 ans.

L'interprétation sismique pose cependant quelques problèmes, pour les raisons suivantes :

- les concrétions ne se sont pas brisées en même temps ;
- une lacune de temps importante existe entre cassure et cicatrisation ;

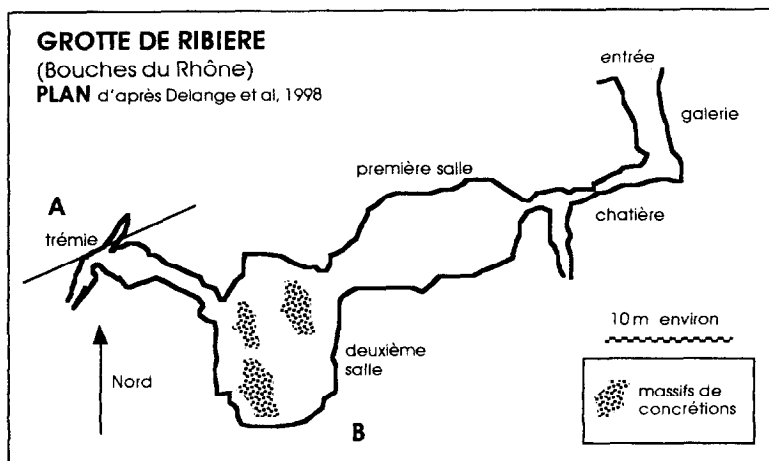


Figure 1. Plan de la grotte de Ribière (d'après Delange et al., 1998).

Map of the Ribière cave (from Delange et al., 1998).

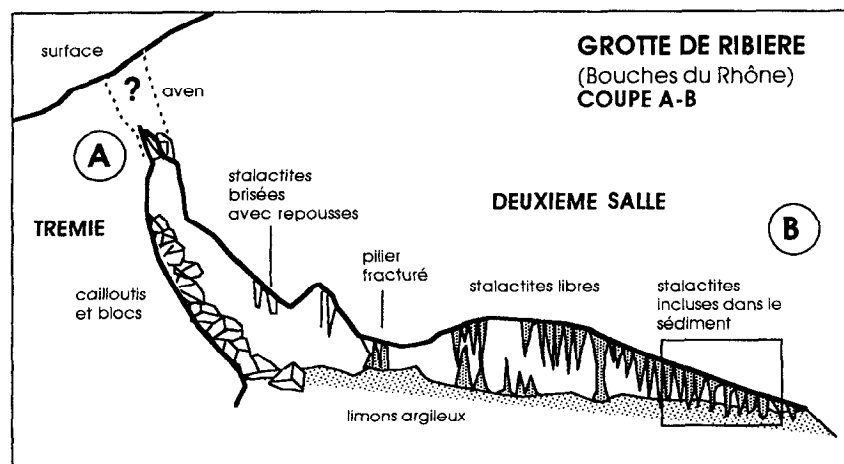


Figure 2. Coupe A-B de la Grotte de Ribière.

A-B cross section of the Ribière cave.

- les cassures ont été non fonctionnelles pendant 200 000 ans pour A et 100 000 ans pour B ;
- elles se sont réactivées à peu près en même temps.

L'hypothèse sismique nous a donc paru peu probable et nous avons effectué une inspection de la cavité et de ses sédiments pour rechercher une autre cause à ces ruptures.

3.2. Mise en évidence d'un fluage du remplissage

La grotte est une cavité ancienne, qui a été entièrement comblée de sédiments variés (figure 2) ; au niveau de la trémie par des blocs et des cailloutis provenant de la surface, au niveau de la deuxième salle par un limon argileux gris, sec et perméable. En partie haute de la salle, les stalactites sont dégagées et présentent de nombreuses cassures attribuées à des effets cosismiques.

En partie basse de cette salle, le plafond rejoint le sol et les stalactites sont noyées dans le sédiment. Ce dernier a été dégagé en plusieurs endroits. L'examen des fouilles révèle la présence de nombreuses stalactites brisées. L'orientation des débris inclus dans le limon traduit un mouvement général du remplissage karstique du haut vers le bas de la salle (figure 3).

Les extrémités des stalactites ont donc été brisées par fluage du sédiment et non par un séisme. Ce mouvement a provoqué une orientation des débris vers le bas de la salle. La cavité s'est ensuite partiellement vidée de son sédiment, les concrétions ont été lessivées, puis de la calcite récente a recouvert les anciennes stalactites, fossilisant les cassures (figure 4).

D'autres observations corroborent ce mouvement :

- les stalactites situées en aval de stalagmites ou de grosses stalactites et, de ce fait, protégées du mouvement de fluage, ne sont pas brisées ;
- les plus importantes cassures s'observent au centre de la salle, où le soutirage a été le plus important ;
- des débris de stalactites ou des cailloux, inclus dans le sédiments, sont horizontalement plaqués contre la partie amont des stalactites ;
- certaines extrémités brisées sont à peine inclinées et encore raccordables à leur racine.

On peut proposer la chronologie suivante :

- fin du Miocène ? : creusement de la cavité ;
- Pliocène et Pléistocène inférieur : succession de phases de colmatage et de décolmatage ;
- Mindel-Riss : concrétionnement ;

Figure 3. Indices observés dans les fouilles du sédiment en partie basse de la deuxième salle.

Signs observed in the excavations at southeastern part of the second room.

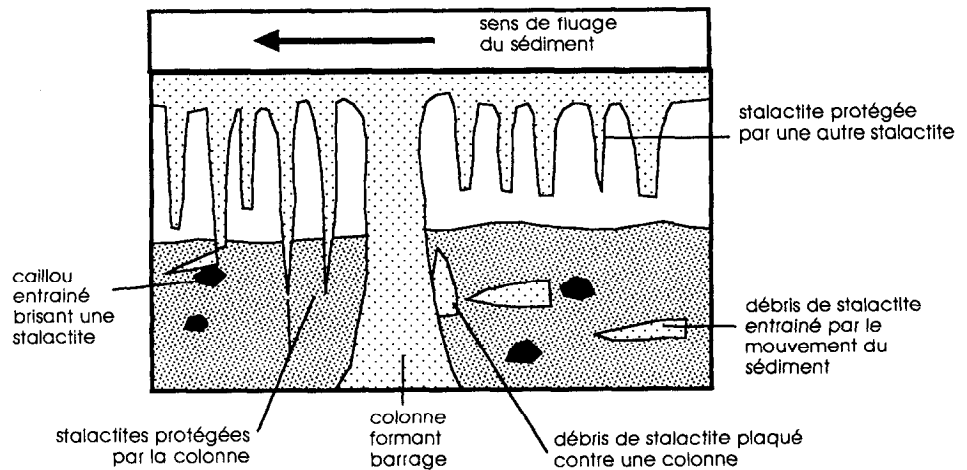
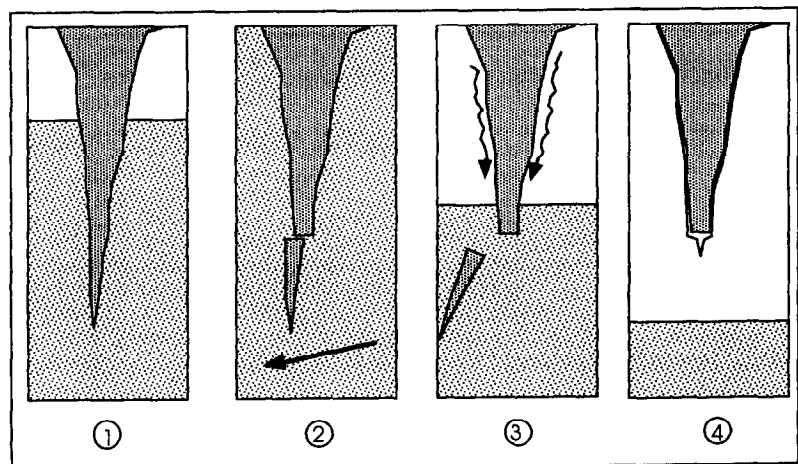


Figure 4. Mécanisme de la rupture des stalactites par fluage. 1 : ennoyage de la concrétion dans le sédiment ; 2 : fluage et cassure ; 3 : migration des débris et lessivage de la concrétion ; 4 : dépôt de calcite récente et fossilisation de la cassure.

Mechanism of the breaking of a stalactite by the creeping of an endokarstic filling: 1: burial of the speleothem into the endokarstic filling; 2: creeping and breaking; 3: migration of the remains and wasing of the stalactite body; 4: deposit of new calcite and fossilization of the breaking.



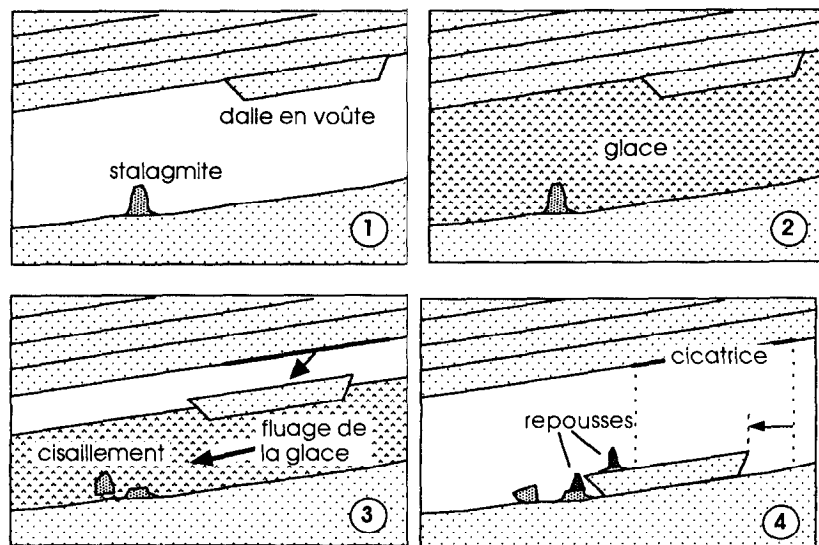


Figure 5. Fluage d'un glacier souterrain. 1 : état initial ; 2 : remplissage par la glace ; 3 : fonte et fluage de la glace, chute d'une dalle en voûte, bris d'une stalagmite et migration vers l'aval des éléments ; 4 : état final, fossilisation par de la calcite moderne.

Creeping of an underground glacier. 1: initial state; 2: ice filling; 3: smelting and creeping of the glacier, collapse of a flagstone from the ceiling, breaking of a stalagmite and migration towards the downstream of the elements; 4: final state, fossilization of the signs by modern calcite.

- début du Riss : colmatage, avec rupture de concrétions, lors du remplissage de la trémie (âge : 285 et 300 ka) ;
- fin du Riss : lessivage des remplissages, descente des blocs de la trémie et fluage des limons, provoquant des ruptures de concrétions, suivies de cicatrifications (âge : 170 et 180 ka) ;
- Würm : arrêt du lessivage et du fluage ;
- Holocène : nouveau lessivage des remplissages, fluage et nouvelles ruptures des concrétions, avec reprise du concrétionnement.

3.3. Incidence du remplissage sur la morphologie des stalactites

Un autre enseignement de cette cavité est que, malgré leur inclusion dans des limons pendant de très longues périodes (200 000 ans), les stalactites ne montrent, ni en surface, ni même en section, de forme traduisant un arrêt dans leur fonctionnement. L'inclusion a provoqué une protection totale de la concrétion.

Lorsque l'on examine la deuxième salle, depuis la base vers le haut, c'est-à-dire depuis le sud vers le nord, les concrétions apparaissent successivement et progressivement :

- noyées dans le sédiment,
- à peine dégagées et encore couvertes de sédiment,
- légèrement poussiéreuses,
- totalement nettoyées avec une surface d'aspect moderne,
- recouvertes de calcite moderne.

La transition est régulière et il ne reste aucune trace du sédiment, ni sur les concrétions, ni au plafond. L'examen des sections polies ne permet pas non plus d'observer de hiatus. Les datations indiquent pourtant que l'arrêt a pu atteindre 200 000 ans. Cela montre donc qu'il est possible qu'une cavité actuelle ait été entièrement remplie, puis vidée de sédiments, sans que cela soit visible aujourd'hui.

3.4. Cas de la glace

Si le remplissage de la cavité n'est composé que de glace, cela est bien sûr encore moins décelable. Ainsi, dans des grottes de la région épiscopale du séisme de Bâle de 1326, des ruptures de concrétions et la chute d'une dalle rocheuse, avec une composante horizontale, ont été attribuées à des séismes (Lemeille et al., 1998).

Or, concernant la dalle rocheuse, l'hypothèse sismique repose sur l'observation d'un déplacement horizontal de 1,5 m pour une chute verticale de 0,5 m. Cela impliquerait donc une secousse d'une amplitude peu commune. Il nous semble plus plausible d'avancer l'hypothèse suivante (figure 5) :

- remplissage de la cavité par de la glace enrobant les stalagmites ;
- effondrement d'une dalle rocheuse sur la glace ;
- fonte de la glace et fluage, provoquant la rupture des stalagmites et le déplacement vers l'aval de la dalle.

4. Conclusion

Le fluage de sédiments endokarstiques ou de glace peut donc expliquer des ruptures généralisées et orientées de stalactites et stalagmites. Lorsque que la composante horizontale du fluage est réduite, cela peut induire, pour les stalagmites, des formes comparables à celles théoriquement provoquées par des séismes : des colonnes segmentées avec des décalages.

Il serait intéressant de comparer la géométrie des débris étudiés dans les cavités où une direction préférentielle a été décrite, pour vérifier si cette direction peut s'expliquer par le fluage de paléosédiments ou de glace, selon la ligne de plus grande pente de la zone d'observation.

5. Références

- Agostini S., Forti P. et Postpichl D. 1994. Gli studi sismotettonici e paleosismici effettuati nelle grotte del Cervo di Petrasecca nel periodo 1987-1991, *Mem. Ist. Ital. Speleol.*, serie 2, 5, 97-104
- Becker H.K. 1929. Höhle und Erdbeben, *Mitt. über Höhlen - u. Karstf.*, 1-4, 130-133
- Bini A., Quinif Y., Sules O. et Uggeri A. 1992. Les mouvements tectoniques récents dans les grottes du Monte Campo dei Fiori (Lombardie, Italie), *Karstologia*, 19, 23-30
- Camelbeek T. 1998. Speleothems as palaeoseismic indicators: the point of view of a seismologist, in: *Speleochronos h.s. Coll. Han 98, Karst & Tectonics 1998*, Centre belg. Étud. karstol. et AFK, 4 p.
- Davenport C.A. 1998. Karst as a record of Palaeoseismicity, in: *Speleochronos h.s., Coll. Han 98, Karst & Tectonics 1998*, Centre belg. Étud. karstol. et AFK, 41-44
- Delange P. et Guendon J.-L. 1998. Mise en évidence d'un séisme au Pleistocène dans la grotte de Ribière (Bouches-du-Rhône), in: *Speleochronos h.s., Coll. Han 98, Karst & Tectonics*, Centre belg. Étud. karstol. et AFK, 4 p.
- Forti P. 1997. Speleothems and Earthquakes, in: Hill C. et Forti P. (éds), *Cave minerals of the world*, Nat. Speleol. Soc., 284-285
- Forti P. 1998. Seismotectonic and paleosismic studies from speleothems, *Speleochronos h.s., Coll. Han 98, Karst & Tectonics*, Centre belg. Étud. karstol. et AFK, 79-81
- Gilli E. 1995. Recording of Earth movements in karst, in: *5th Int. Conf. Seism. Zonation, Nice, AFPS EERI*, Ouest Edit. Nantes, 1305-1314
- Gilli E., Levret A., Sollogoub P. et Delange P. 1999. Research on the February 18, 1996 earthquake in the caves of St-Paul-de-Fenouillet area (Pyrénées-Orientales, France), in: *Proceedings Coll. Han 98, Geodinamica Acta*, 12 (3-4), 143-158
- Gospodaric P. 1972. Prvi podatki o absolutni starosti sige v Postojnski jami na podlagi ^{14}C , *Nase jame*, 13 (1971), 91-98
- Gospodaric P. 1977. Collapsing of speleothems in Postojna cave system, in: *Proc. 7th Int. Speleol. Congr., Sheffield*, 223-240
- Lacave C., Koller M. et Levret A. 1999. Measurement of natural frequencies and damping of speleothems, in: *Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand*
- Lemeille F., Cushing M., Carbon D., Grellet B., Bitterli T., Flehoc C. et Innocent C. 1999. Co-seismic ruptures and deformations recorded by speleothems in the epicentral zone of the Basel earthquake, *Geodin. Acta*, 12 (3-4), 179-191
- Moser M. et Geyer M. 1979. Seismospeläologie-Erdbebenzerstörungen in Höhlen am Beispiel des Gailoches bei Oberfellendorf (Oberfranken, Bayern), *Die Höhle*, 30 (4), 89-102
- Postpichl D., Agostini S., Forti P. et Quinif Y. 1991. Paleoseismicity from karst sediments: the Grotta del Cervo cave case study (Central Italy), *Tectonophysics*, 193, 33-34
- Quinif Y. 1996. Enregistrement et datation des effets sismotectoniques par l'étude des spéléothèmes, *Ann. Soc. Geol. Belg.*, 119, 1-13
- Rouzaud F., Soulier M. et Lignerreux Y. 1995. La grotte de Bruniquel, *Spelunca, Bull. Féd. fr. Spéleo.*, 60, 27-34
- Schillat B. 1977. Conservation of tectonic waves in the axes of stalagmites over long periods, in: *Proc. 7th Int. Speleol. Congr., Sheffield*, 377-379