

resse). Pendant le Quaternaire, ils ont spécifiquement marqué les périodes froides ou glaciaires.

Le système cristallin reflète aussi les conditions du dépôt. Le carbonate de calcium cristallise selon deux systèmes minéralogiques : la calcite, forme la plus courante, et l'aragonite, beaucoup plus rare. L'aragonite se dépose préférentiellement lorsque l'alimentation en eau est réduite et en présence de magnésium existant dans certains types de roches carbonatées (dolomies, calcaires dolomitiques, calcaires minéralisés).

La présence d'aragonite est l'indice d'un confinement, par exemple une phase climatique sèche. Dans des cas favorables, on observe le passage aragonite-calcite plusieurs fois répété dans une même concrétion. Ces passages indiquent des fluctuations climatiques «humides-moins humides», intéressantes pour l'étude et l'identification des paléoclimats.

Les divers processus de formation des concrétions, leurs significations paléoclimatiques ainsi que l'interprétation des formes constituent une approche intéressante, mais qui ne permet d'aborder que la succession de diverses phases de concrétionnement ou de dépôts détritiques, c'est-à-dire une chronologie relative.

Les datations des concrétionnements

La datation absolue est obtenue par la mesure des concentrations en éléments radioactifs dont la demi-vie est connue. Dans les méthodes directes, on utilise la désintégration radioactive d'un élément dont on connaît par ailleurs la demi-vie. On mesure les concentrations de l'isotope radioactif et de ses produits de désintégration et on détermine ainsi la date de formation de la concrétion où l'isotope a été piégé. Le carbone 14 est utilisé jusqu'à 40 000 ans environ, l'uranium thorium jusqu'à 350 000 / 400 000 ans, l'oxygène 18 fournit essentiellement des datations concernant les paléotempératures.

Les méthodes indirectes mesurent des émissions par les objets étudiés après qu'ils ont été soit chauffés (thermoluminescence), soit soumis à un bombardement électromagnétique. Cette dernière méthode permet des datations dépassant largement les 500 000 ans, mais la fiabilité des résultats reste incertaine.

Les méthodes d'analyses naturelles mettent à profit les propriétés des sédiments. Ainsi la mesure de l'aimantation des particules de fer piégées dans les sédiments indique leur polarité magnétique lors de leur cristallisation, ce qui permet de les situer dans l'échelle paléomagnétique terrestre et d'approcher leur âge.

Une autre méthode est la datation par palynologie. L'eau de concrétionnement contient des spores et des pollens qui peuvent être piégés et conservés dans les concrétions. Leur détermination précise l'environnement climatique et l'âge du dépôt si l'on dispose d'une échelle palynologique calée pour la région étudiée. Cette méthode, développée par Bruno Bastin, est limitée par la difficulté d'extraction des pollens et par leur faible concentration dans les concrétions.

Dans certains types de concrétions (stalagmites, planchers stalagmitiques), on observe de fines lamines de dépôts successifs. Il se dépose deux

lamines par an, l'une au printemps et l'autre en automne ; elles se distinguent par la couleur qui caractérise la calcite formée : calcite compacte brune, calcite diffuse plus claire. Ces lamines, ainsi liées au cycle végétatif, rappellent les cercles de croissance des arbres. Le comptage des lamines apporte des datations précises sur les dernières centaines d'années, voire sur les derniers millénaires. Ces études, développées sous la direction de Dominique Genty (CNRS), complètent la panoplie analytique des moyens de datation.

Structure des concrétions et sismicité passée

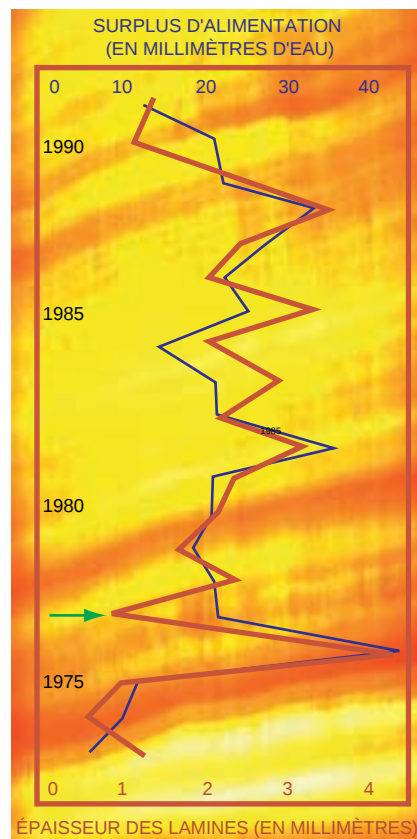
Les concrétions enregistrent, nous l'avons vu, les climats anciens, mais aussi les séismes passés.

Ces dernières années, les sismologues ont essentiellement utilisé les données de la sismicité historique ou instrumentale pour évaluer les dangers et la probabilité d'occurrence des tremblements de terre majeurs. Ils partent du principe que, d'une part, les séismes historiquement recensés dans une région sont représentatifs de son activité sismique au cours d'une période et que, d'autre part, les séismes majeurs surviennent là où ils se sont déjà produits.

Malheureusement pour les spécialistes des sciences de la Terre et heureusement pour les populations, dans les régions éloignées des limites des plaques tectoniques, les phénomènes géologiques sont lents. En Europe occidentale, la période couverte par les catalogues de sismicité historique (moins de 1 000 ans pour la France) ne constitue pas un laps de temps suffisamment représentatif de l'activité sismique d'une région. En effet, la mise en évidence récente de traces de paléoséismes majeurs ayant affecté l'Europe occidentale depuis moins de 100 000 ans montre que celle-ci n'est pas à l'abri de tremblements de terre, importants mais rares.

L'objectif des études de paléosismicité est d'identifier ces séismes majeurs et de quantifier leur magnitude et leur période de retour (récurrence). Pour ce faire, les géologues recherchent des évidences de mouvements récents le long des failles et les traces des effets de ces séismes sur le milieu naturel.

Protégées de l'érosion, les grottes sont des sanctuaires privilégiés qui



5. COMPARAISON DE L'ÉPAISSEUR des lamines et de l'excès d'alimentation en eau sur une stalagmite du tunnel de Godderville (Belgique). L'année de la sécheresse, 1976, apparaît clairement, et l'année précédente fut particulièrement pluvieuse. Sur 20 ans, la corrélation est bonne (mesures de Dominique Genty et Yves Quinif).

gardent la trace des déformations qui ont affecté une région. En effet, les anomalies dans le développement des spéléothèmes (draperies, coulées, planchers de calcite et surtout stalactites, stalagmites et colonnes) témoignent parfois d'événements tectoniques régionaux.

Toutefois, la difficulté de l'analyse provient du fait que les cavités endokarstiques et leurs spéléothèmes sont aussi soumis à des phénomènes uniquement liés à leur évolution naturelle (effondrements de galeries par sous-tirage, compaction des argiles, glissements de terrains...). De plus, les grottes ont souvent servi de refuge aux êtres vivants, dont l'homme, qui les ont modifiées. Tous ces paramètres doivent être pris en compte afin de décrypter avec certitude la lecture des effets uniquement liés aux phénomènes sismiques.

Effets d'un séisme sur les spéléothèmes

Les spéléothèmes, véritables sismographes naturels, sont sensibles aux ondes sismiques qui, en traversant le réseau karstique, provoquent des chutes de blocs et des bris de concrétions par ébranlement du substratum. Le processus continu de développement des spéléothèmes est quelquefois affecté de manière brutale. L'hypothèse de l'origine sismique des déformations observées n'est validée qu'à partir d'une analyse systématique des anomalies à l'échelle régionale. Les plus intéressants sont les stalactites, qui constituent naturellement des marqueurs de verticalité dont la croissance est gouvernée par la gravité, alors que les bordures des petits bassins (gours) indiquent l'horizontalité.

Les bris systématiques de concrétions dans les différentes cavités d'un même massif karstique peuvent être la conséquence d'un événement sismique.

Une étude récente menée par la Société *GEOTER* dans les grottes de la zone épicertrale du séisme destructeur de 1428 dans les Pyrénées-orientales a permis de répertorier un grand nombre de stalagmites sectionnées. Les segments brisés, tombés au sol, sont en partie reconcrétionnés dans le plancher stalagmitique, alors qu'une nouvelle stalagmite repousse au niveau de la cassure, sur la base restée en place.

SITUATION INITIALE

EFFET D'UN SÉISME

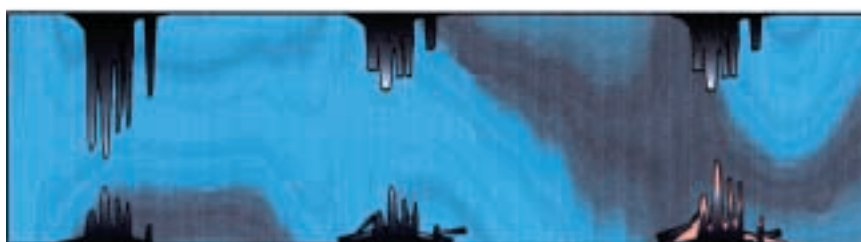
ANOMALIES OBSERVÉES



6a. Reprise du concrétionnement sur les stalactites et les stalagmites brisées par un séisme.



6b. Reprise du concrétionnement au niveau de la cassure des stalactites.



6c. Nouveau concrétionnement sur les stalactites brisées.



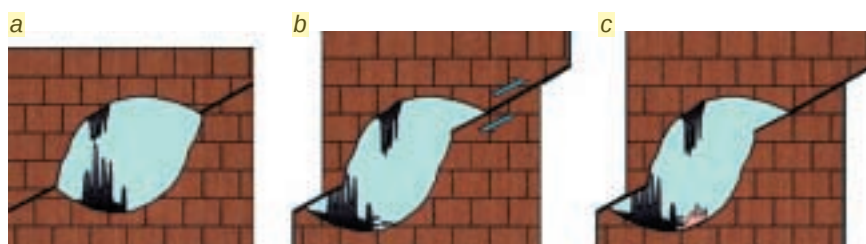
7a. Nouveau concrétionnement sur la partie brisée d'une stalagmite.



7b. Nouveau concrétionnement sur la base de la stalagmite.

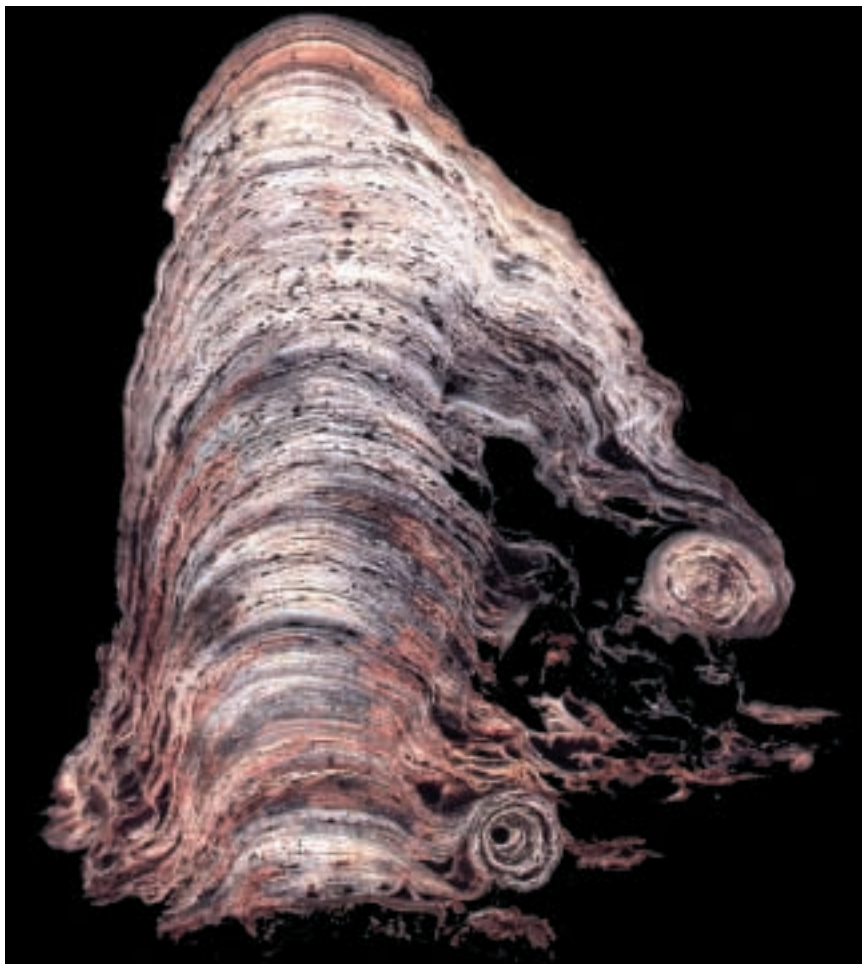


7c. Nouveau concrétionnement sur un bloc éboulé.



8. STALACTITES ET STALAGMITES dans une galerie recoupant une faille (a). Rejeu de la faille, décalage de la galerie et cassure des stalagmites le long du plan de faille (b). Nouveau concrétionnement stalagmitique décalé par rapport au concrétionnement initial (c).

CLAUDE - GEOTER



Clamouse - GEOTER

9. STALAGMITE (190 millimètres) incluant deux stalactites fossilisées. La structure interne révèle le développement rythmé, sur 1 500 ans environ, des lamines superposées claires et sombres. Le comptage des lamines permet de dater les chutes des stalactites.



Clamouse - GEOTER

10. STALACTITES DÉCAPITÉES avec deux niveaux de cassures successives, dans la petite salle de la grotte de Ribière (Rognes).

Dans la grotte du Père Noël, à Han-sur-Lesse, en Belgique, une colonne stalagmitique brisée, recimentée postérieurement à sa fracturation témoigne d'un séisme, ainsi que les nombreux spéléothèmes décapités sur lesquels repousse une concrétion plus petite dans la Grotta del Cervo, en Italie. Dans ce dernier cas, les géologues italiens P. Forti et D. Postpischl ont réalisé des datations au carbone 14 à la base de la nouvelle stalagmite. Les âges absolus obtenus correspondent au séisme dévastateur de décembre 1456, le plus fort recensé en Italie centrale.

Il arrive parfois qu'une stalagmite repousse sur la concrétion tombée à terre comme dans la Grotta del Frassinio, en Italie lombarde. De même, en Languedoc, sous des voûtes murées de l'aqueduc de Nîmes et à l'abri de toute intervention humaine, des fistuleuses et des stalactites sont tombées et ont été reconcrétionnées dans le plancher stalagmitique. Ces observations, associées aux preuves archéologiques

de destruction de l'édifice confortent l'hypothèse d'une origine sismique de ces chutes.

Les reprises de concrétionnement en terminaison de stalactites décapitées lors d'un séisme, cicatrisant les plans de cassures, correspondent à des anomalies aisément datables. Ces phénomènes, fréquents dans les cavités de la zone épacentrale du séisme de 1909, en Provence, ont été observés à Lambesc par P. Delange.

Quand un mouvement plus ou moins brutal des roches encaissantes déplace la stalagmite par rapport à la stalactite qui l'alimente, une nouvelle stalagmite se forme. Les exemples dans le réseau de Sieben Hengste, en Suisse et, en Italie, dans la Grotta del Cervo ou dans les grottes du Monte Campo del Fiori sont significatifs de mouvements sismiques qui ont modifié la morphologie des spéléothèmes. Une colonne statagmitique (stalactite et stalagmite soudées) peut également s'incliner ou se casser sous l'effet d'un mouvement tectonique.

Un séisme engendre parfois des variations de l'axe de croissance d'une stalagmite. L'exemple le plus spectaculaire se situe en Italie du Nord, dans la zone épacentrale du séisme de janvier 1117 qui a dévasté la région de Bologne. Les stalagmites analysées dans différentes cavités du secteur ont subi une brusque déviation de leur axe de croissance. L'âge de ce phénomène, daté par comptage de lamines, correspond exactement à la date du séisme.

Les colonnes joignant la voûte et le plancher d'une cavité peuvent se fracturer si leurs bords d'accroche sont soumis à des mouvements différentiels. Dans la grotte du Père Noël, Yves Quinif, de la Faculté polytechnique de Mons, en Belgique, a mis en évidence une compression à composante verticale sur des colonnes statagmitiques, qui se traduit par un écaillage de surface et des fractures verticales. Un décrochement peut aussi fracturer une croûte calcitique qui soude les parois d'un petit conduit.

Effets d'un séisme sur la morphologie des grottes

Le creusement du réseau de grottes s'effectue généralement selon des discontinuités sédimentaires (joints de stratification et hétérogénéités lithologiques) et des discontinuités tectoniques préexistantes (failles) par où s'écoulent les eaux.