

vulcanologues avaient prévu que le flot subglaciaire s'écoulerait dès que le niveau de la mer souterraine aurait atteint 1 450 mètres au-dessus du niveau de la mer. On en était à 1 510 mètres, le 27 octobre. Comme l'activité volcanique faiblissait, on commençait à espérer que les trombes n'auraient pas lieu. Puis, après quelques petites secousses sismiques, le 4 novembre, le débit de la rivière qui s'échappe de la mer subglaciaire passa, en deux heures, de 70 à 6 000 mètres cubes par seconde. L'eau était noire de sédiments et sentait le soufre. Des icebergs de 200

tonnes ont été arrachés du glacier. Le débit maximal atteignit 45 000 mètres cubes par seconde. Le flot se calma en quelques jours. Trois mille milliards de litres d'eau de fonte ont ainsi été déversés. Des portions de route et des ponts ont été arrachés, ainsi que des lignes électriques et téléphoniques situées sur le passage des flots.

Cet événement serait le signe d'une activité croissante sur la frontière entre l'Europe et l'Amérique du Nord, et d'autres éruptions devraient suivre, où le feu et la glace se mêleront.

Christoph ROLOFF, Berlin

Lune, les zones froides comme la région polaire Sud ne sont pas directement visibles de la Terre, aussi, les astronomes ont utilisé une sonde lunaire.

La sonde *Clementine* ne possédant pas de radar, les planétologues américains ont détourné de sa fonction principale l'antenne de communication de la sonde. Au lieu d'envoyer le signal de communication directement vers la Terre, le signal était émis vers la Lune, diffusé par la surface lunaire, puis reçu sur Terre. Lors d'un survol de la dépression polaire Sud en avril 1994, les planétologues ont noté un pic dans le rapport entre deux ondes polarisées qu'ils interprètent comme une diffusion par une surface réfléchissante d'une centaine de kilomètres carrés. Cette surface pourrait être de la glace.

S'il s'agit effectivement d'eau, quelle est son origine ? Elle a vraisemblablement été apportée par des impacts cométaires. Il y a quatre milliards d'années, la Lune, récemment formée, se refroidit. Selon Yves Langevin, de l'Institut d'astrophysique spatiale, elle est constamment bombardée de météorites et de comètes qui contiennent beaucoup d'eau. Les molécules d'eau contenues dans ces corps qui tombent sur la Lune suivent des destins divers. Une partie rebondit tellement vite qu'elle échappe à l'attraction lunaire. D'autres molécules moins rapides, telles des millions de balles, rebondissent de cratère en cratère au gré de leur trajectoire balistique. En trois mois de rebondissements, nombres de molécules d'eau sont ionisées et emportées par le vent solaire. Si, au cours de ces trois mois, des molécules d'eau alunissent dans des zones froides, elles peuvent être adsorbées par la surface lunaire.

Au total, dans ces zones froides, on trouverait une succession de couches de glace et de régolite (la poussière lunaire accumulée après des impacts de météorites) dont l'épaisseur totale ne dépasserait pas une dizaine de mètres. Dans ces couches, quatre milliards d'années d'histoire de bombardement de la Lune par les comètes seraient préservés.

Cette découverte, qui doit être confirmée, suscite un intérêt scientifique considérable, non pour fournir de l'eau à d'éventuelles bases lunaires (la quantité serait insuffisante), mais surtout parce que les scientifiques auraient à « portée de fusée » un témoignage unique de l'histoire passée du Système solaire. À l'heure où des missions spatiales s'envolent pour Mars à la recherche de la vie, cette quête d'eau lunaire pourrait relancer l'intérêt de missions moins coûteuses vers le satellite de la Terre.

Lune glacée

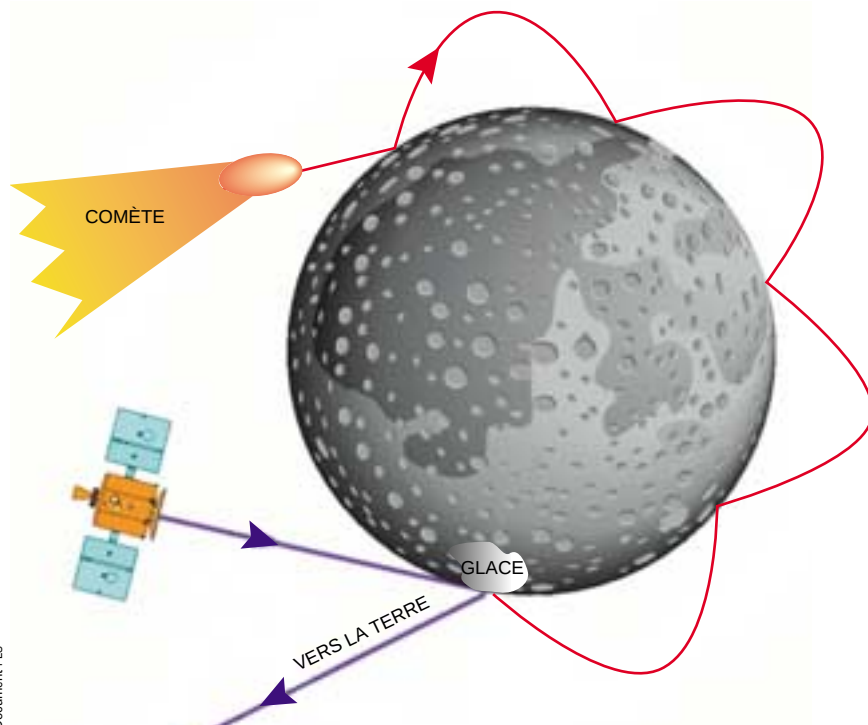
Un lac gelé sur la Lune?

Les glaces du Groenland recèlent l'histoire de l'atmosphère terrestre depuis quelques centaines de milliers d'années. La sonde *Clementine*, placée en orbite lunaire au printemps 1994, aurait détecté de la glace près du pôle Sud de la Lune : quatre milliards d'années d'histoire du Système solaire seraient conservés dans cette glace apportée par des comètes.

Dès les années 1960, les astronomes pensaient qu'il existait de l'eau sur la Lune. Les missions automatiques et habitées

qui s'y sont succédé n'ont rien trouvé, sans doute parce que les lieux d'alunissage n'étaient pas adéquats : les zones éclairées par le Soleil sont trop chaudes (130 °C) pour conserver la glace. La région du pôle Sud de la Lune, située dans une dépression, est le plus souvent à l'ombre. Des cratères jamais éclairés y existent : à une température de -173 °C ces « congélateurs » piègent la glace.

L'eau est commune dans le Système solaire : outre la Terre et les calottes polaires martiennes, toutes les planètes gazeuses contiennent de l'eau. Début 1994, à l'aide du radiotélescope d'Arecibo, les astronomes avaient décelé sur Mercure une zone réfléchissante, vraisemblablement de la glace. Sur la



La chute d'une comète sur la Lune libère des molécules d'eau dont certaines sont piégées, après plusieurs rebonds, dans des « congélateurs » (des régions toujours dans l'ombre du Soleil). La sonde *Clementine* aurait détecté une telle zone gelée près du pôle Sud lunaire.

Les concrétions des grottes enregistrent climats et séismes

PAUL DUBOIS • BERTRAND GRELLET

Dans les grottes, les variations du climat et les séismes se traduisent par des modifications de structure des concrétions, identifiables et datables.

Les concrétions calcaires des grottes, stalactites et stalagmites, enregistrent les caractéristiques de l'écoulement d'eau qui les a créées, et donc des événements qui ont

modifié la vitesse et la nature de leur formation.

Dans un milieu souterrain relativement protégé de l'érosion et des dégradations humaines, ces dépôts

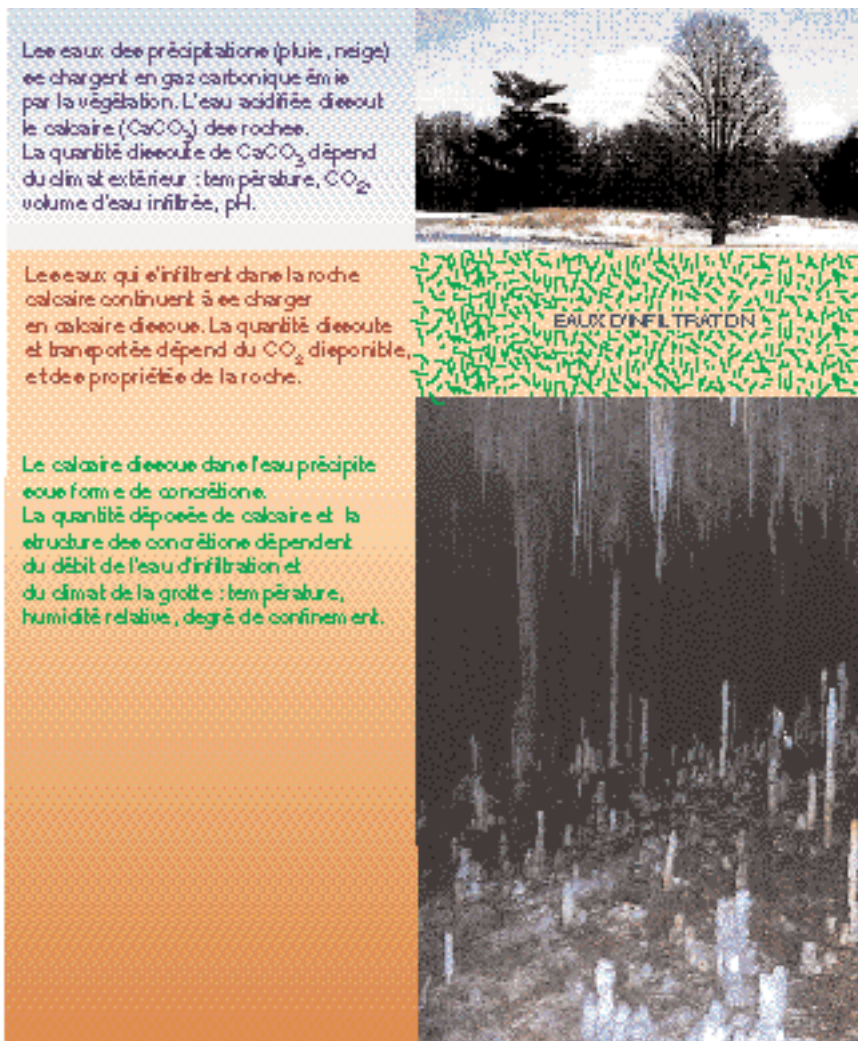
sédimentaires, nouvellement désignés sous le nom de «spéléothèmes», sont datés par les moyens classiques de la datation géologique. Le décryptage de ces «archives géologiques» qui nous renseignent sur l'histoire climatique et géologique locale a beaucoup progressé ces dernières années.

La vie de la grotte

Une grotte, comme tout système géologique, a une histoire : elle naît, vit et se développe, puis vieillit et disparaît lentement. La grotte apparaît et grandit quand un courant d'eau chargé de gaz carbonique creuse une roche calcaire. Les galeries de certains réseaux de grottes s'étendent sur des centaines de kilomètres (plus de 500 kilomètres à Mammoth Cave, aux États-Unis) et les dénivélés verticaux peuvent dépasser le kilomètre (1 602 mètres au gouffre Jean Bernard, en Savoie). Le vieillissement est lié au tarissement des courants et des eaux de creusement, et au comblement de la grotte par les sédiments et les concrétions.

Les dépôts détritiques des grottes résultent de l'accumulation des sédiments. Les dépôts endogènes, éboulements des parois et des plafonds, renseignent, quand on sait les dater, sur l'évolution de la grotte et, éventuellement, sur l'origine sismique de son comblement.

Les dépôts exogènes proviennent de l'extérieur de la grotte. L'agent de transport, le plus souvent l'eau, dépose des sédiments semblables à ceux trouvés dans les terrasses des rivières de surface. Leur étude met en évidence des séquences de dépôts liées à des crues avec conglomérats, grès et sables



Clamouse - GEOTER

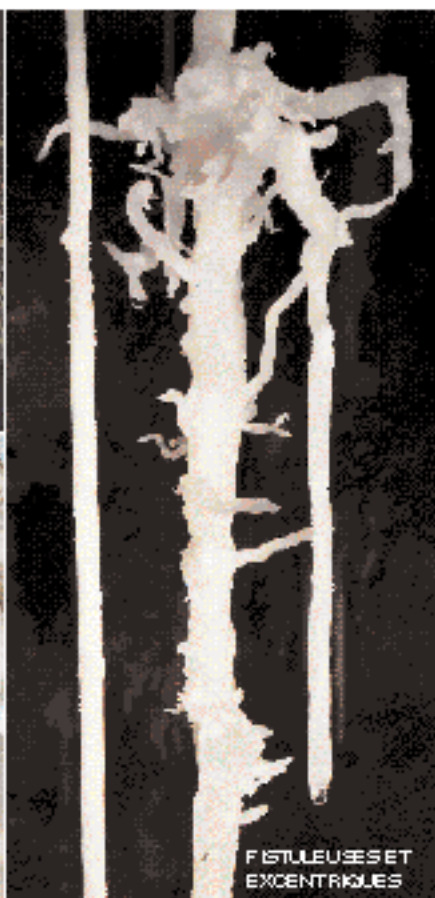
1. LES CONCRÉTIONS sont formées par précipitation du carbonate de calcium dissous dans l'eau qui transite de la surface jusqu'au vide de la grotte.



CONCRÉTIONS
ÉTOILÉES



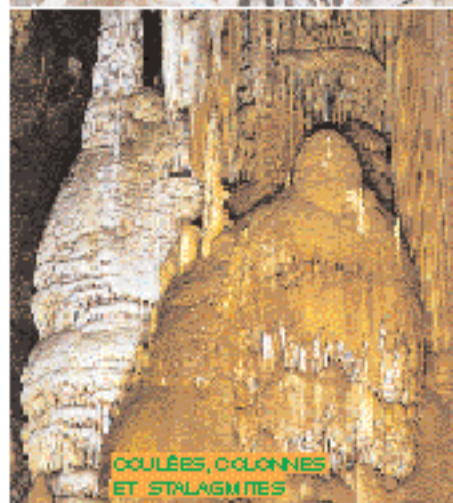
CRISTAUX D'ARAGONITES
EN AIGUILLES



FISTULEUSES ET
EXCENTRIQUES



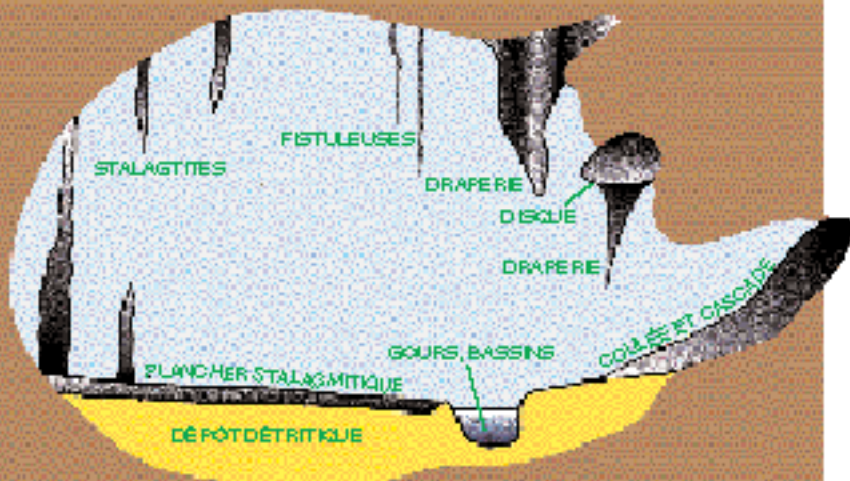
DISQUE ET DRAPERIE



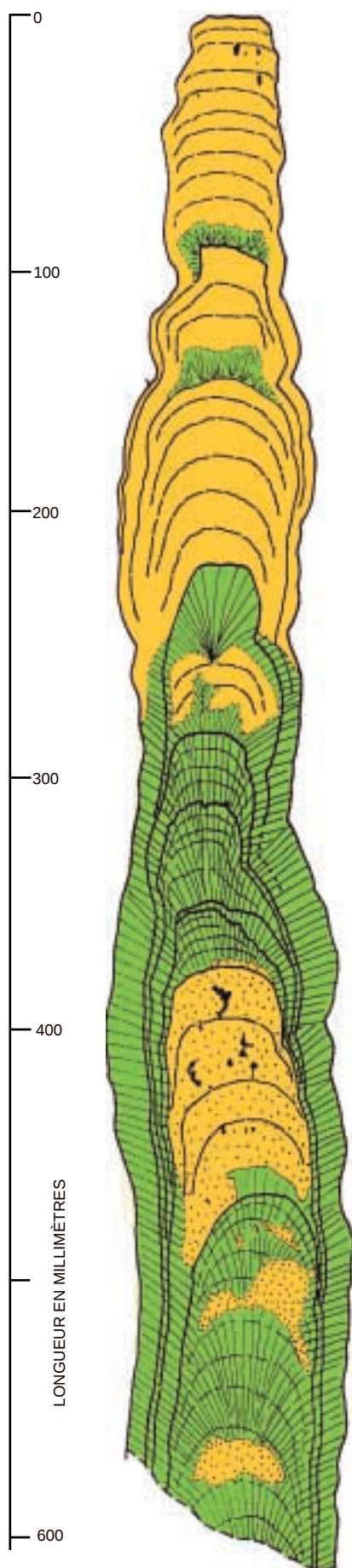
COULÉES, COLONNES
ET STALAGMITES



CONCRÉTIONNEMENT DE BASSIN

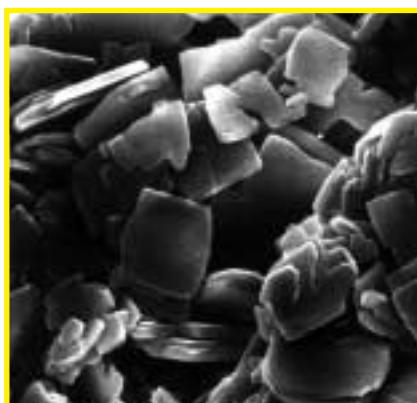


2. LA FORME ET L'IMPORTANCE des concrétions dépendent du débit d'eau qui les alimente : écoulement gravitaire ou écoulement capillaire. Le premier, soumis aux forces de gravité, met en place le concrétionnement «habituel» qui dépend du point de percolation de l'eau dans la grotte. L'écoulement capillaire, à très faible débit d'eau, entraîne un concrétionnement très limité en volume. Échappant à la gravité, le concrétionnement se ramifie dans toutes les directions, sous forme de cristaux isolés ou en touffes d'aiguilles, d'efflorescences, d'excentriques plus ou moins ramifiées. Son apparition dans une grotte est l'indice d'un «confinement», c'est-à-dire d'un faible renouvellement de l'air et de l'eau.

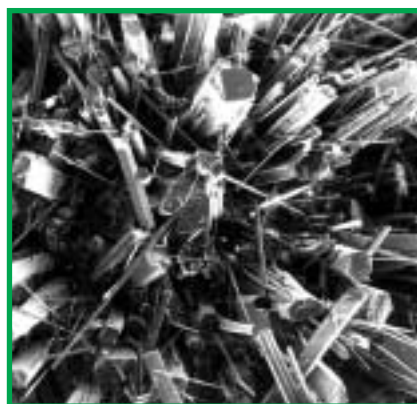


à la base, et argile fine au sommet. Le vent accumule aussi d'importants dépôts de sable fin et surtout de loess, indices d'un climat steppique lié à des phases climatiques froides péri-glaciaires ; ces dépôts détritiques exogènes renseignent sur l'environnement climatique externe à la grotte.

À partir des analyses de ces sédiments (granulométrie, morphoscopie, palynologie, etc.), on a reconstitué les diverses étapes, notamment climatiques et culturelles, qui se sont succédé au cours des derniers millions d'années. On a ainsi reconstitué, dans la grotte de Caune de l'Arago (Pyrénées-orientales), le cadre climatique



CALCITE



ARAGONITE

3. COUPE D'UNE STALAGMITE de la grotte de Clamouse, près de Montpellier : c'est un exemple rare et spectaculaire d'alternance de concrétionnements d'aragonite et de calcite. Dans la partie inférieure, essentiellement en aragonite, les plages de calcite apparaissent sur l'apex de la concrétion, partie qui reçoit la goutte d'eau et qui est la plus arrosée. Le passage aragonite-calcite dans la partie moyenne indique une variation climatique dont l'âge sera précisé par les études de datations (travaux de Silvia Frisia et Andréa Borsato, du Musée Trentin de sciences naturelles, Trente, Italie). Les deux photographies de calcite et d'aragonite ont été prises au microscope électronique à balayage.

et le mode de vie de l'Homme de Tautavel, le plus vieux fossile humain européen, qui vivait il y a environ 450 000 ans.

De plus, une grande partie des objets et outils préhistoriques ont été découverts dans les fouilles de dépôts détritiques, fouilles qui ont précisé les alternances climatiques durant lesquelles s'est développée la lignée humaine.

Au Quaternaire, les dépôts détritiques des grottes ont été souvent perturbés par des éboulements, des coulées de boue et des glissements de terrains. Ces phénomènes ont été causés par les longues périodes de dégel qui ont succédé aux phases péri-glaciaires et glaciaires, où le sol était fixé par le gel. Ces processus ont particulièrement affecté les grottes du Sud de l'Europe, lors de la phase de dégel progressif qui a suivi la période glaciaire du Würm, entre -20 000 ans et -8000 à -6000 ans, suivant la position des sites.

Les écroulements de falaises et ces glissements de pente ont alors obturé des porches de grottes fréquentées par les hommes préhistoriques au cours de la dernière glaciation, et assuré leur conservation et leur intégrité. La découverte de la grotte Chauvet, dans l'Ar-dèche, illustre cette préservation.

Les concrétions

Les dépôts chimiques des grottes, les concrétions, sont spécifiques du milieu souterrain. Ces concrétions se forment en présence de trois composants : l'eau, le gaz carbonique (ou dioxyde de carbone) et le calcaire. Quand l'eau de surface est acidifiée par la dissolution de gaz carbonique provenant des végétaux, le calcaire de la roche de surface est dissous sous forme de bicarbonate de calcium : cette dissolution du calcaire creuse les vides souterrains que sont les grottes. Le bicarbonate de calcium dissous est un composant en équilibre : quand la température de l'eau ou la pression partielle de gaz carbonique diminuent, l'équilibre chimique évolue dans le sens de la précipitation, avec dépôt de concrétions de carbonate de calcium.

Ainsi, en fonction des conditions du milieu, l'eau a une double action : soit elle creuse les conduits souterrains que sont les grottes, en dissolvant le calcaire, soit elle dépose le calcaire sous forme de concrétions et remplit les

vides qu'elle avait précédemment creusés sous terre.

Les variations de la température, la pression partielle du dioxyde de carbone, la solubilité de la roche, la teneur de la roche en carbonates, le débit de l'eau, déplacent l'équilibre dans le sens de la précipitation du calcaire, provoquant alors le dépôt de concrétions.

Les formes des concrétions

On est toujours surpris par la profusion et le polymorphisme des concrétions des grottes. Le concrétionnement n'est qu'une précipitation de carbonate de calcium, mais une précipitation au sein d'une eau circulante. Aussi le concrétionnement est-il un phénomène dynamique, et ses formes multiples sont contrôlées par un ensemble de facteurs : (1) la position dans la cavité souterraine du point de percolation de l'eau : plafond, sol, parois, bassins immergés, etc. ; (2) le débit de l'eau de concrétionnement : circulation capillaire en film d'eau, écoulement en goutte à goutte, ruissellement en cascade, etc. ; (3) les paramètres de porosité-perméabilité de la roche, qui influent sur les modes de circulation de l'eau de concrétionnement et sur la vitesse de percolation.

Parmi ces facteurs, le critère «débit et mode de circulation de l'eau» est majeur et sert de base à une première classification des concrétions. On distingue ainsi deux grands types de concrétionnements : (1) le concrétionnement à débit d'eau contrôlé par les forces de gravité, d'organisation essentiellement verticale, horizontale ou oblique, en fonction du profil des parois de la grotte. C'est le concrétionnement classique des grottes. La forme et l'importance des concrétions sont principalement déterminées par le débit d'eau qui les alimente (voir la figure 2).

Ainsi, un débit goutte à goutte lent favorise la formation de stalactites au plafond, un goutte à goutte rapide ne permettra que la formation de stalagmites au sol, avec un faible dépôt au plafond. Cette cinétique du concrétionnement détermine les formes des concrétions en écoulement : draperies, coulées et cascades stalagmitiques, planchers stalagmitiques, stalagmites, colonnes, disques, etc.

Le concrétionnement à débit d'eau très réduit, soumis à des forces capillaires et de tension superficielle, se

développe dans toutes les directions de l'espace. Ce type est désigné sous le terme général d'«excentrique», lequel traduit l'anormalité des concrétions. Il présente de très nombreuses formes cristallines, en général très belles : cristaux en aiguilles, coralloïdes, touffes, efflorescences, etc.

En climat humide, le concrétionnement de pesanteur à grand débit d'eau est favorisé, alors qu'en climat sec et confiné, le concrétionnement capillaire se développe. Les formes de concrétionnement sont ainsi une première approximation des alternances climatiques.

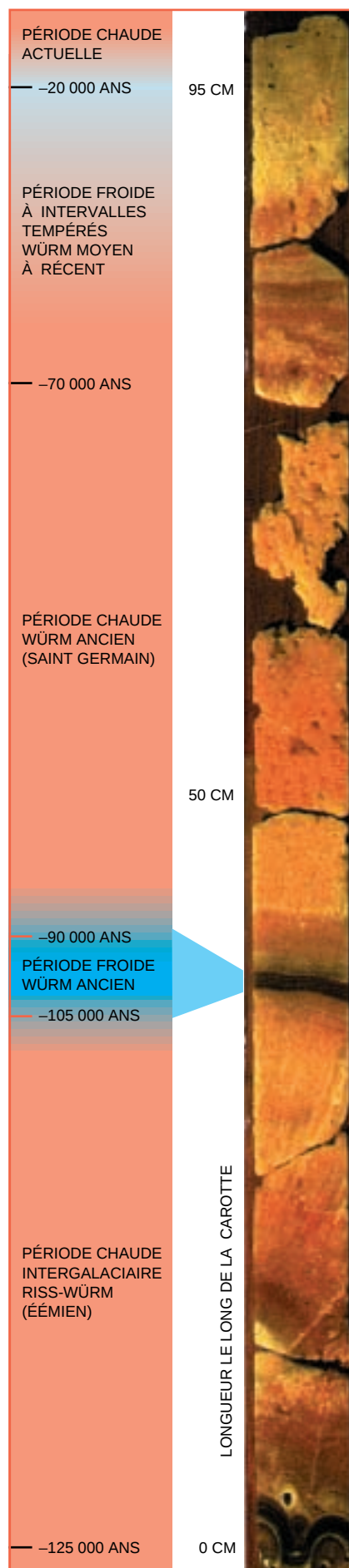
Concrétions et paléoclimats

La nature, la composition chimique et la texture de la roche calcaire d'un site ne changent guère avec le temps, mais tous les autres facteurs (température, débit de l'eau, CO_2 , etc.) sont liés et dépendent du climat qui règne sur le massif calcaire où se situe la grotte. Aussi les structures des concrétions retracent-elles les variations climatiques et permettent-elles de les identifier.

Pendant une même phase climatique qui dure parfois plusieurs dizaines de milliers d'années, le concrétionnement reste continu, homogène, avec développement des mêmes types de concrétions. Lorsque les conditions climatiques sont telles que l'apport d'eau est réduit, la vitesse du concrétionnement diminue et le dépôt peut même s'arrêter complètement pendant de très longues périodes. Cet arrêt des dépôts se marque généralement dans les concrétions par des couches de coloration brune dues à des oxydations et à des corrosions de la surface des concrétions.

Les périodes de non-concrétionnement sont souvent plus longues que celles pendant lesquelles les concrétions se développent. Les arrêts de concrétionnement indiquent des dégradations climatiques (froid ou sèche-

4. TROIS PÉRIODES DE CONCRÉTIONNEMENT apparaissent sur cette carotte prélevée dans un plancher stalagmitique. Elles sont séparées par des arrêts de concrétionnement soulignés par de petits niveaux brunâtres. On repère ainsi la succession des alternances climatiques au cours des derniers 120 000 ans. Remarquons que le temps de non-concrétionnement est supérieur au temps de concrétionnement (grotte de Clamouse, travaux d'Yves Quinif, Faculté de Mons, Belgique).



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

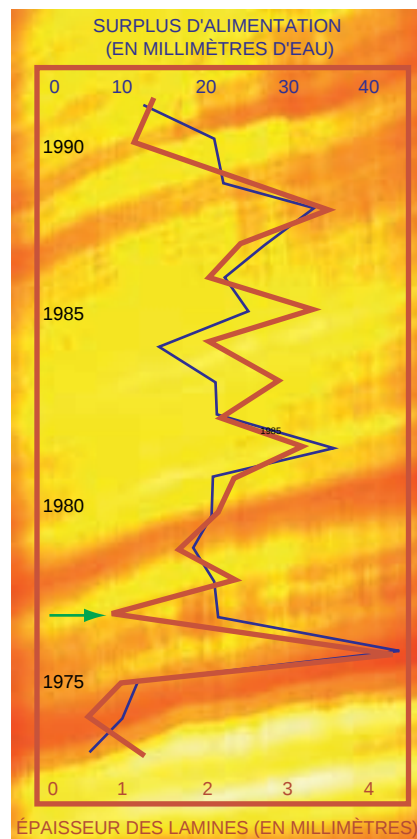
Les concrétions enregistrent, nous l'avons vu, les climats anciens, mais aussi les séismes passés.

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 épiscopale 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

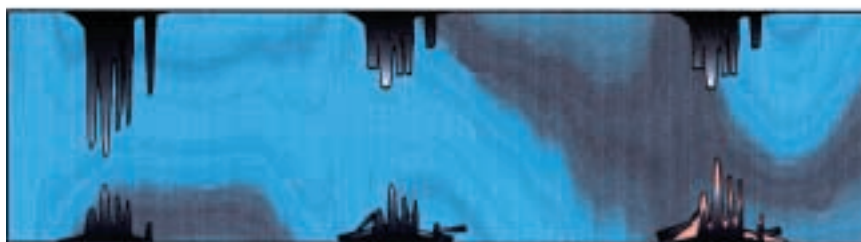
ANOMALIES OBSERVÉES



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.



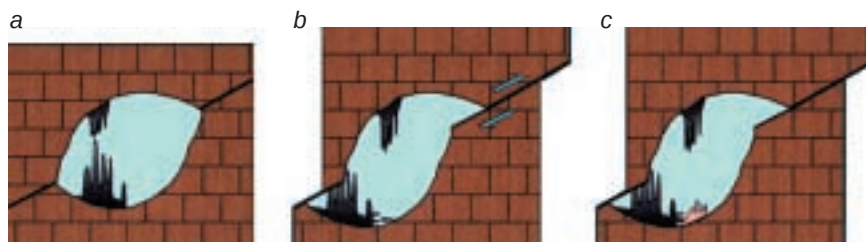
7a. Nouveau concrétionnement sur la partie brisée d'une stalagmite.



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

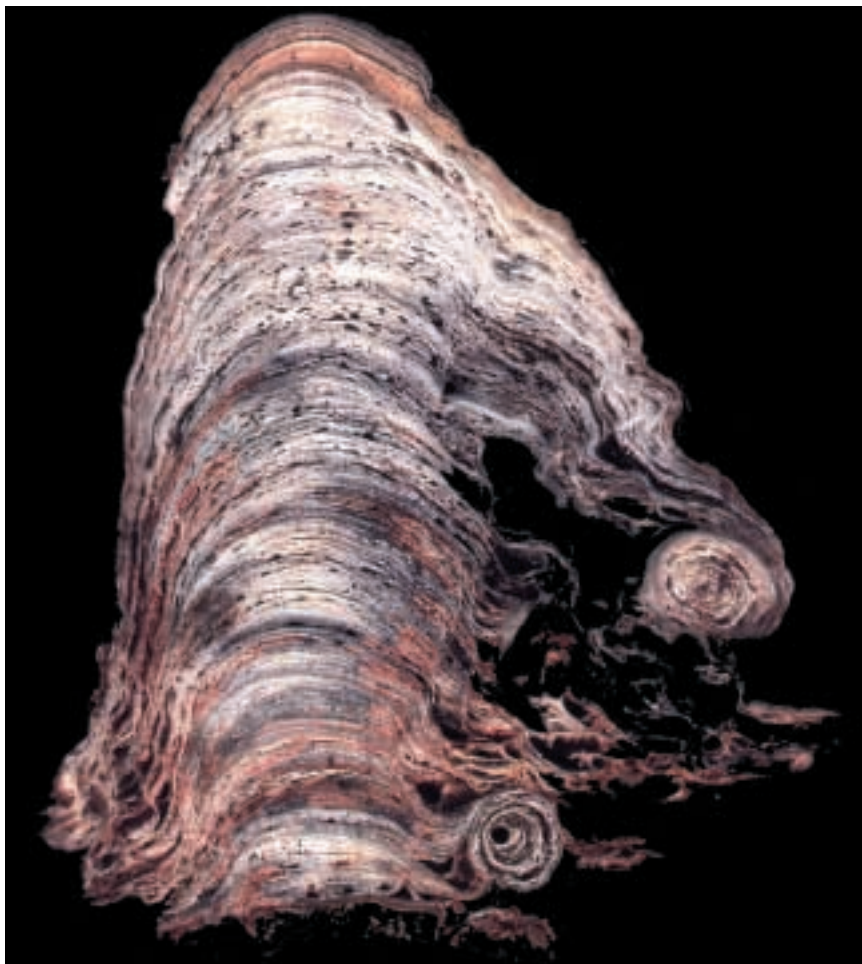


7c. Nouveau concrétionnement sur un bloc éboulé.



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).

Clamouse - 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.



11. REPRISE DU CONCRÉTIONNEMENT sur le plan de cassure d'une stalagmite de la grotte de Rialb. La grotte est située dans la zone épiscopale du séisme de 1428 en Catalogne. Les géologues tentent de dater l'âge de la cassure.

Les perturbations engendrées dans le karst par des événements sismiques affectent une structure à géométrie connue à un moment donné de l'évolution karstique. Le cas le plus favorable à ce type d'étude est une galerie fossile, horizontale, riches de dépôts divers, dont le concrétionnement est encore actif. Le rejeu brutal le long d'une faille recoupée par le réseau peut provoquer un décalage de la section de la galerie, comme dans la grotte de Tavel, en Languedoc.

En Lombardie, dans le réseau de Virginia Macchi, c'est un joint de stratification, remobilisé en faille inverse par un séisme postérieurement à la genèse de la conduite forcée, qui décale la galerie. Le rejet de la faille est visible dans le vide karstique, associé à un écaillage frais de la paroi. À Trieste, la «Grotta del guano» a enregistré des mouvements néotectoniques compressifs qui ont décalé la voûte de la galerie et les cupules de corrosion.

Le rejeu tectonique en décrochement à composante verticale peut décaler la discontinuité initialement empruntée par la karstification. Le rejet est alors

visible le long de la galerie. Ce type de mouvement a été signalé dans le massif karstique suisse de Sieben Hengste par P.-Y. Jeannin (Université de Neuchâtel) ou dans la grotte d'Arphilia, dans les Pyrénées-atlantiques (Pierre-Saint-Martin), où une faille recoupe postérieurement une galerie sèche sans respecter les orientations préalables des vides karstiques.

Les mouvements sismiques de failles et les ondes sismiques associées déplacent les masses au sein de la cavité. Dans la grotte du Père Noël, en Belgique, apparaissent des effondrements de blocs de la voûte, des chutes de colonnes stalagmitiques et de blocs en équilibre critique, des cônes d'éboulis frais non stabilisés et des écaillages sur les discontinuités tectoniques remobilisées.

La plupart de ces observations ont été réalisées dans des zones où se sont produits des séismes déjà connus et référencés dans les catalogues historiques. Les datations précises des anomalies ont validé la méthode. L'objectif des géologues est maintenant d'appliquer cette approche de la paléosismicité à des régions où aucun séisme historique n'est recensé.

Les concrétions des grottes sont un sujet d'analyse subtil : les découvertes de grottes, dont la fréquence est amplifiée par le développement de la spéléologie, amènent une matière nouvelle qu'il est passionnant – et utile d'étudier.

Paul DUBOIS est ingénieur géologue, ancien Directeur de l'Exploration à Elf-Aquitaine, membre associé du comité des applications de l'Académie des Sciences. Bertrand GRELLET est docteur en géologie, responsable du secteur Recherche et Développement de la Société GEOTER, à Montpellier. L'identification des paléoséismes à travers l'analyse des déformations en grottes est une des techniques développées au sein de cette société en collaboration avec le Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations nucléaires de l'IPSN et le Laboratoire des sciences géographiques et de l'aménagement de l'Université de Provence (J.-L. Guendon et P. Ambert).

L'essentiel des données et documents photographiques présentés dans cet article a été acquis à la grotte de Clamouse, près de Montpellier. Clamouse, qui présente une extraordinaire richesse et une diversité de concrétions de calcite et d'aragonite est actuellement la cavité souterraine de France la plus étudiée par carottage, datations et prélèvements automatiques d'eau de percolation. Sont associées à ces recherches des équipes de chercheurs français et étrangers, parmi lesquels Y. Quinif (Faculté polytechnique de Mons, Belgique), S. Frisia et A. Borsato (Musée Trentin de sciences naturelles, Trente, Italie), A. Bini (Département de sédimentologie, Fac. des sciences, Milan, Italie), F. Mc Dermott (Univ. de Dublin), P. Audra (Département de géographie, Univ. de Nice), J.-J. Delannoy (Département de géographie, Univ. de Grenoble).

A. BINI, Y. QUINIF, O. SULES et A. UGGERI, *Les mouvements tectoniques récents dans les grottes du Monte Campo dei Fiori (Lombardie, Italie)*, in *Karstologia*, n° 19, pp. 23-30, 1992.

P. DELANGE, *Étude de la néotectonique dans l'endokarst : exemple de la moyenne Durance*, DEA Univ. de Provence, 1995.

P. FORTI et D. POSTPISCHL, *Seismotectonics and Radiometric Dating of Karst Sediment*, in *Proceedings of the Workshop on Historical Seismicity of Central Eastern Mediterranean Region*, Enea Cre Casaccia, pp. 320-333, 1998.

D. GENTY, *Mise en évidence d'alternances saisonnières dans la structure interne des stalagmites*, in *C.R. Acad. Sci.*, tome 317, série II, pp. 1229-1239, 1993, Paris.

A. LEVRET, Ph. COMBES et Th. GRANIER, *Sismicité et archéologie : une approche pluridisciplinaire*, Actes du colloque Génie parasismique et aspects vibratoires dans le génie civil, AFPS, pp. 19-27, 1996.

Y. QUINIF, D. GENTY et R. MAIRE, *Les spéleoéthèmes : un outil performant pour les études paléoclimatiques*, in *Soc. Géol.*, tome 165, n° 6, pp. 603-612, 1994, France.