

ENREGISTREMENT ET DATATION DES EFFETS SISMO-TECTONIQUES PAR L'ETUDE DES SPELEOTHEMES

Yves QUINIF¹

(14 figures et 2 tableaux)

*1. Centre d'Etudes et de Recherches Appliquées au Karst, (CERAK), Faculté Polytechnique de Mons,
Rue de Houdain, 9, B-7000 MONS.*

RESUME. Les événements tectoniques comme les décrochements ou les secousses sismiques perturbent la morphologie endokarstique, et en particulier les remplissages. Parmi ceux-ci, les spéléothèmes se brisent, basculent, se déplacent sous l'effet de ces événements. L'étude de la géométrie de ces modifications apportent des données utilisables en sismo-tectonique. De plus, leur potentialité chronologique par la datation uranium-thorium permet de dater ces événements dans le Pléistocène moyen et récent. Quelques exemples traités ici tendent à prouver une activité sismique importante en Belgique depuis au moins quelques centaines de milliers d'années.

MOTS-CLES: tectonique, séismes, karst, spéléothèmes, datation uranium/thorium.

ABSTRACT. Recording and dating of seismo-tectonic effects by the study of speleothems. Tectonic events such as strike-slip faulting or earthquakes modify endokarstic morphology, and in particular, the fillings. Earthquakes can break, throw down or displace the speleothems. Studying the geometry of these modifications gives data of use in seismo-tectonic studies. Moreover, the utilization of the uranium series disequilibrium method applied to the modified speleothems allows the dating of seismo-tectonic events in the Middle and Upper Pleistocene. In this paper, we describe the principal morphological and sedimentological consequences in the karstic cavities of tectonic events. Dating by the uranium/thorium method of a stalagmitic series in the cave «Grotte du Père Noël», in Belgium, suggests the possibility of approaching the dating of tectonic events during the Middle and Upper Pleistocene. Some examples demonstrate important seismic activity in Belgium some hundred thousand years ago.

KEYWORDS: tectonic, earthquakes, karst, speleothems, uranium disequilibrium series dating.

1. INTRODUCTION

Les manifestations des mouvements tectoniques sont constamment présentes dans la morphologie. L'enfoncement des cours d'eau nécessite un abaissement du niveau de base, lequel est souvent sous la dépendance d'une surrection générale de la région; une rivière, un versant, une terrasse fluviale sont coupés et déplacés de part et d'autre du tracé d'une faille active.

Ces morphologies dues aux mouvements tectoniques sont généralement oblitérées par l'érosion qui suit leur genèse. Seuls, d'une manière générale, les

mouvements récents de grande ampleur créent des ensembles morphologiques interprétables (déplacements relatifs des terrasses fluviales de part et d'autre de la faille responsable du séisme d'Arménie, des talwegs de part et d'autre de la faille de San Andreas). Des événements sismo-tectoniques de faible ampleur ou séparés par de longues périodes tranquilles peuvent ainsi être difficilement détectables, surtout dans des régions réputées tectoniquement calmes. De plus, la datation de ces phénomènes est quasiment impossible. Or, la connaissance de la chronologie d'une séquence de mouvements sismiques revêt une importance capi-

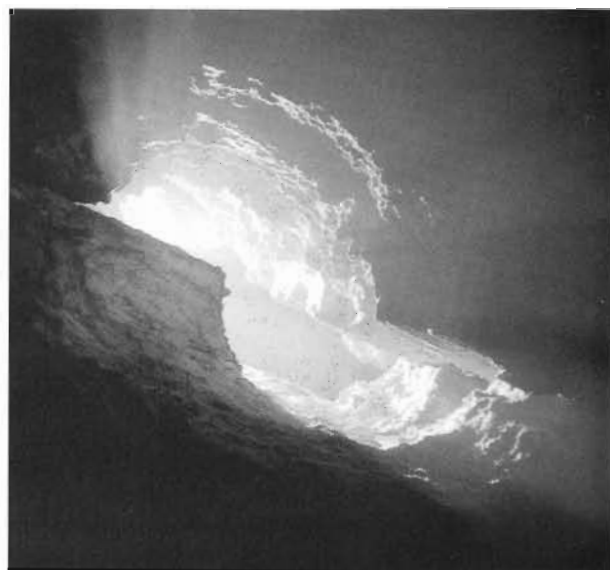
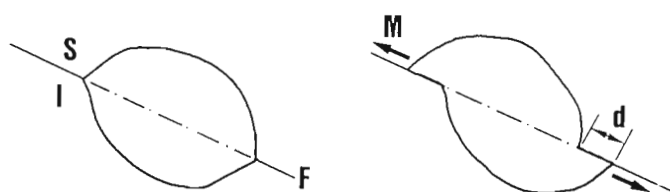


Figure 1. Photographie et figure interprétative du décalage d'une galerie en conduite forcée suite à un mouvement de décrochement (Grotta del Frassino, Campo dei Fiori, Varese).

tale dans l'interprétation synthétique à l'échelle régionale d'une activité sismique.

Pour l'enregistrement géologique des phénomènes sismo-tectoniques, le domaine endokarstique joue dans ce tableau un rôle déterminant grâce à trois faits fondamentaux.

a) Les vides endokarstiques sont creusés suivant des discontinuités qui ont pour cause soit la sédimentation (joints de stratification, strates plus solubles, plus tendres), soit des cassures qui résultent de contraintes mécaniques, elles-mêmes à l'origine des mouvements tectoniques.

b) Les modifications d'une morphologie souterraine dues à des mouvements tectoniques sont protégées des influences extérieures. Dans les vides abandonnés par les circulations fluviales, les structures résultantes sont donc permanentes jusqu'à ce que le massif karstifié soit lui-même complètement érodé. Ces modifications affectent une morphologie très bien typée, mesurable dans les trois dimensions de l'espace ce qui conduit ainsi à une morphométrie rigoureuse.

c) Les mouvements tectoniques affectent les dépôts endokarstiques, plus particulièrement les spéléothèmes, structures rigides dont la morphologie est aussi très bien connue. Le potentiel géochronologique des spéléothèmes grâce à la datation U/Th

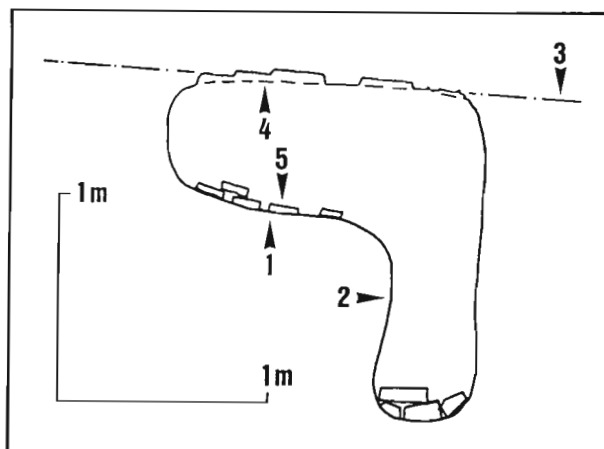


Figure 2. Cisaillement de la voûte d'une galerie suite à un mouvement de décrochement (Abisso dei Perdus, Marguareis). 1, banquette latérale (section initiale en conduite forcée). 2, surcreusement postérieur en écoulement libre. 3, trace de la faille de cisaillement. 4, tracé de la voûte avant la rupture. 5, blocs tombés suite au cisaillement.

permet l'approche d'une datation des séquences sismo-tectoniques. C'est cet aspect fondamental que je me propose de mettre en évidence dans cet article. Néanmoins, examinons d'abord sommairement les effets morphologiques majeurs des événements sismo-tectoniques dans l'endokarst.

Des exemples de conséquences morphologiques et sédimentologiques dans l'endokarst de mouvements tectoniques ont été décrits par d'autres auteurs (Bogli, 1969 ; Jeannin, 1990 ; Gilli, 1986). Une place importante est à réserver aux travaux de Forti et Postpischl (1979, 1980, 1984, 1986, 1998a, 1988b) qui abordent des considérations quantitatives et chronologiques de l'effet de déformations tectoniques sur les stalagmites. Des études pluridisciplinaires ultérieures associent les aspects morphologiques, sédimentologiques, tectoniques et radiocronologiques (Postpischl *et al.*, 1991 ; Bini *et al.*, 1992).

2. LES EFFETS MORPHOLOGIQUES DES EVENEMENTS SIMO-TECTONIQUE DANS L'ENDOKARST

2.1. PRESENTATION DU PROBLEME

Lorsqu'un réseau est structuré, les mouvements tectoniques continuent à le modifier. Ce réseau karstique structuré implique l'existence de cavités de toutes dimensions, galeries, salles, etc..., hydrologiquement actives ou non, vides ou renfermant des sédiments. Les contraintes tectoniques agissent donc sur une morphologie karstique préexistante et évolutive. Si la cavité est exempte de circulations

fluviales (les infiltrations ne jouant pas un rôle érosif suffisant), ces conséquences morphologiques ne sont plus modifiées par les processus érosifs. C'est donc le cas idéal pour les étudier en détail.

2.2. EFFETS MORPHOLOGIQUES

Une morphologie endokarstique donnée (galerie de tel ou tel type, paroi, etc...) peut être transformée par un mouvement tectonique. On passe ainsi d'une morphologie purement érosive à une morphologie complexe.

L'exemple de la Grotta del Frassino sur le Campo dei Fiori (Varese, Lombardia) illustre le cas d'un joint de stratification qui a joué en faille inverse après la spéléogénèse du réseau (Bini *et al.*, 1992). Le décalage du profil d'une conduite forcée creusée au détriment de ce joint est très exemplatif (fig. 1). On constate que la morphologie endokarstique permet de déterminer tous les paramètres du mouvement: géométrie du plan de faille, direction, sens et amplitude.

Une galerie dans l'Abisso dei Perdus (massif du Marguareis, frontière franco-italienne) montre une section en «trou de serrure», tout-à-fait classique dans l'endokarst (Bajo *et al.*, 1983; fig 2). Elle résulte d'une première phase de creusement en conduite forcée qui est responsable de la partie elliptique supérieure suivie d'une seconde phase érosive en écoulement libre à laquelle on doit le surcreusement de type canyon. Ensuite, le mouvement d'une faille de décrochement a cisailé la voûte.

Parfois, la fracturation recoupe les vides, comme si ces derniers étaient ignorés par la contrainte. La conséquence est une fracturation des parois, analogue qui ressemble aux résultats de l'explosion de charges en carrière. Les fissures sont ouvertes et lacèrent une paroi, en recoupant les joints de stratification et les diaclases préexistantes. En cela, elles se distinguent bien du déchaussement de blocs avant leur éboulement sous l'unique effet de la gravitation. Dans ce cas, le bloc se désolidarise de l'encaissant suivant un réseau de fissures constitué souvent de l'intersection de joints de stratification et de diaclases. C'est pourquoi les blocs éboulés possèdent des faces planes qui se recoupent à angle droit, visualisation des fissures. Les blocs qui résultent de la fracturation tectonique post-génétique sont informes, aux bords déchiquetés.

Une galerie de la grotte d'Arphidia illustre un effet d'événement sismo-tectonique qui recoupe les vides préexistants. Une faille est nettement visible sur une des parois qu'elle découpe sans respecter

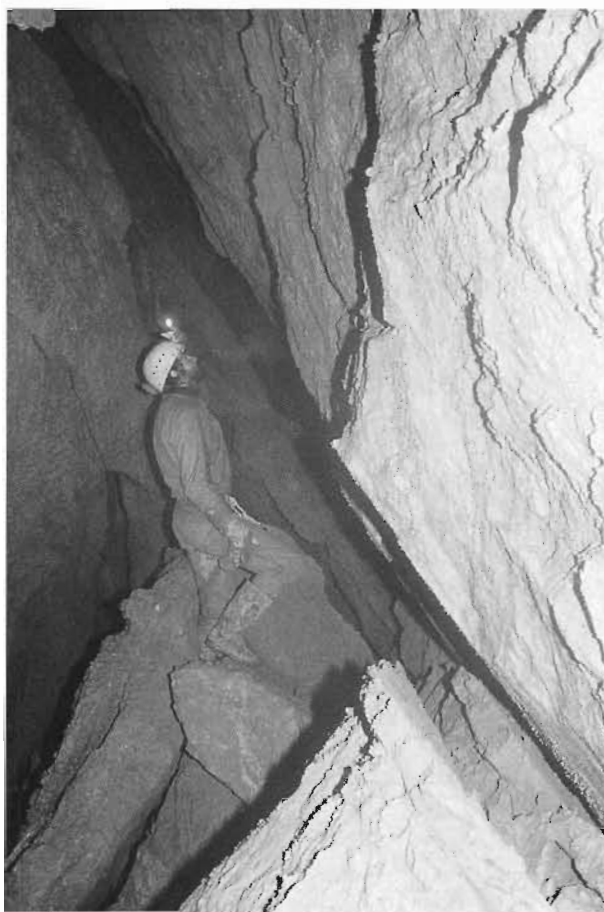


Figure 3. Faille recoupant une galerie sèche de la Grotte d'Arphidia amont (massif de la Pierre Saint-Martin, Pyrénées Atlantiques, France). Alors que les parois de la galerie sont sculptées de microformes de corrosion, les faces de la faille en sont dépourvues, témoignage de sa formation après le creusement de la galerie.

les orientations préalables des vides (fig 3). Cette galerie, à présent abandonnée par les écoulements fluviales, est garnie de microformes de corrosion (coupes, coups de gouge,...), tandis que les parois ouvertes de la faille sont totalement exemptes de ces microformes : les mouvements de cette faille sont tout-à-fait postérieurs aux écoulements fluviaux.

2.3. EFFETS SUR LES SEDIMENTS

Les cavités karstiques sont en général colmatées partiellement ou totalement par des sédiments variés (Ek & Quinif, 1988; Gewalt & Ek, 1988; Quinif, 1990). Par rapport aux effets morphologiques, ceux-ci présentent l'avantage de pouvoir être mieux fixés dans le temps, de façon relative ou absolue.

L'effet des modifications sur les dépôts détritiques est habituellement peu visible. Dans les karsts "spéléologiques", presque toujours néogènes et

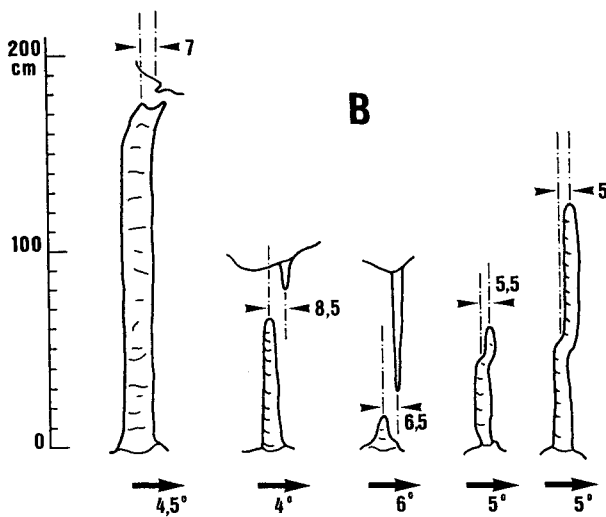
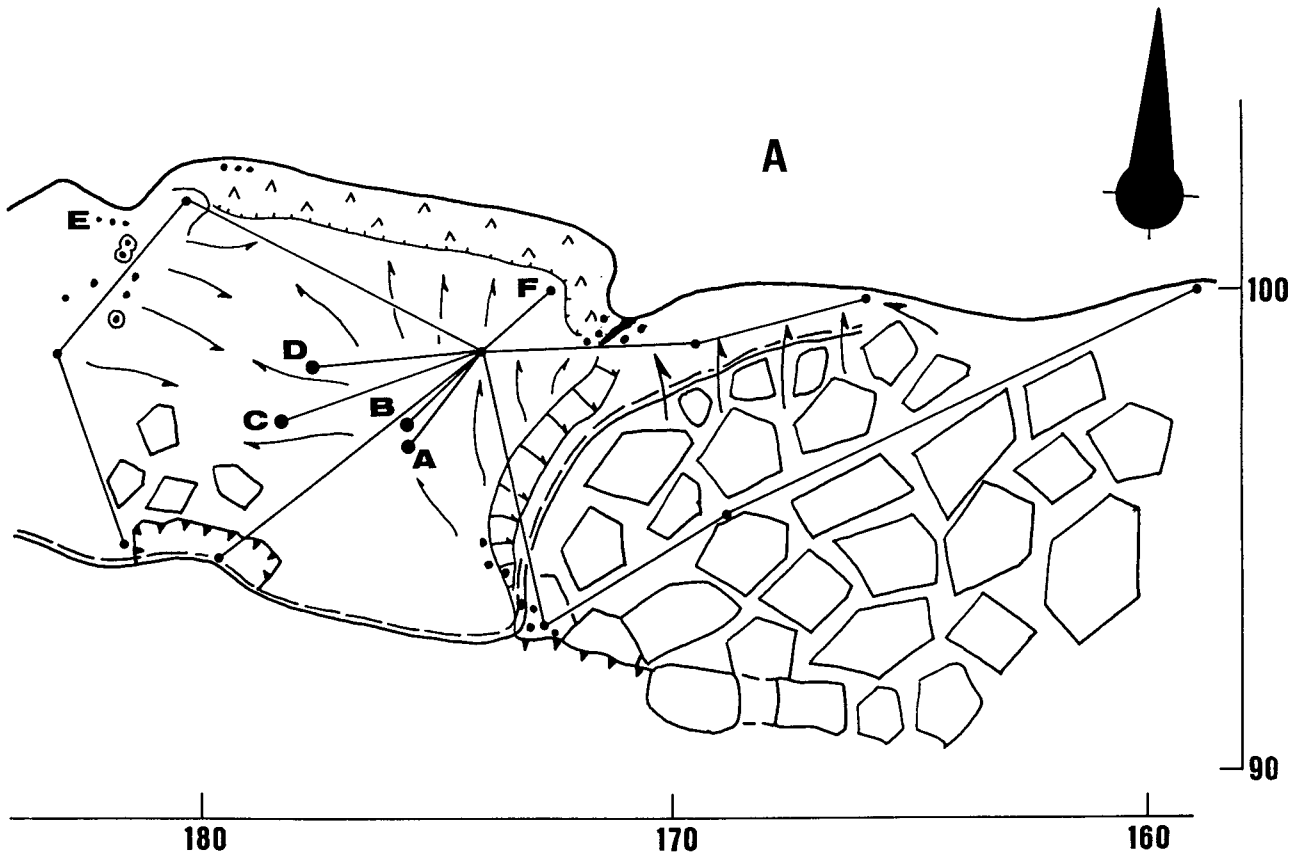


Figure 4 A et B. Salle des stalagmites coudées, Grotte du Père Noël (Han-sur-Lesse, Belgique). Le plan 4A localise les stalagmites dessinées à la figure 4B où on remarque que les décalages sont tous situés dans un plan vertical d'orientation N4°E à N6°E. Ces décalages se manifestent soit par une rupture entre la stalagmite et son attache à la voûte (1), soit par une disharmonie entre la stalactite et la stalagmite couplée (2, 3), soit par un coude (4, 5). Il est important de noter que ces stalagmites sont scellées sur le bed-rock et non sur des éboulis. La position des stalagmites sur le plan 4a conduit à interpréter des décalages comme la trace d'un coulissement de la voûte par rapport au sol.

quaternaires, ces dépôts sont souvent meubles et absorbent les contraintes de façon plastique. Néanmoins, certains exemples d'études actuelles décèlent des effets structuraux de déformations de dépôts détritiques (Schluchter, 1991, communication orale). Il y a certes là une voie à développer.

Les spéléothèmes constituent des corps sédimentaires qui réagissent de façon cassante aux contraintes, parfois comme s'ils faisaient partie de l'encaissant. Ils enregistrent ainsi de façon souvent précise les déformations mécaniques, qu'elles soient de réajustement mécanique intra-sédimentaire (affaissement d'un plancher d'éboulis, tassement du substratum argileux) ou d'origine sismo-tectonique. Elles offrent alors la possibilité d'étudier la géométrie des déplacements et de les dater par le déséquilibre radioactif dans la famille de l'uranium.

3. MODIFICATIONS MORPHOLOGIQUES DES SPELEOTHEMES

3.1. MISE EN PLACE DES SPELEOTHEMES

Les spéléothèmes résultent de la précipitation de carbonate de calcium à partir des eaux d'infiltration qui filtrent à la voûte des conduits ou s'écoulent sur des surfaces inclinées, et d'eaux courantes (Hill & Forti, 1986). D'une façon générale, c'est la gravité

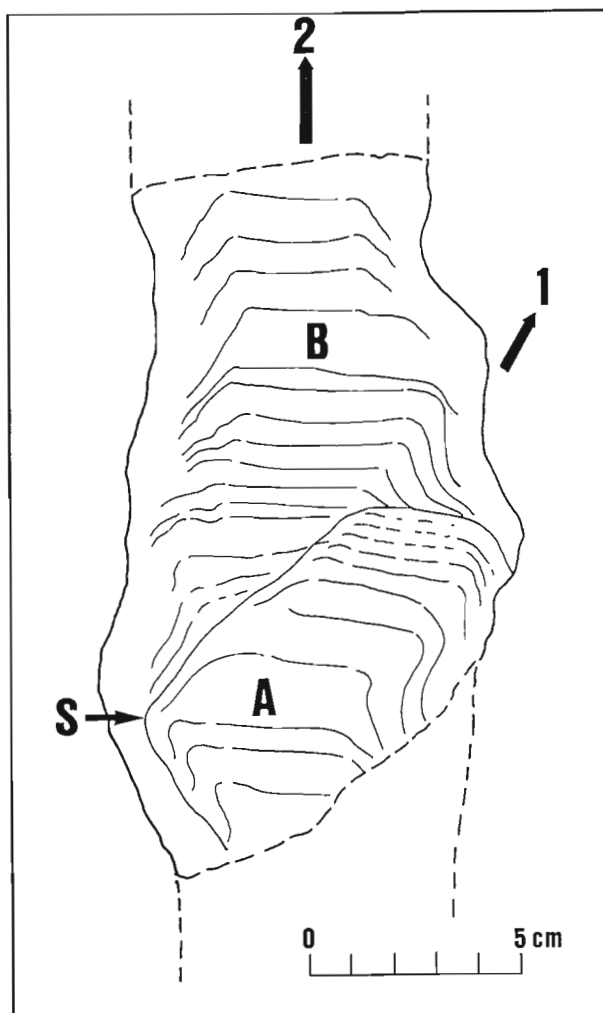


Figure 5. Coupe de la base d'une stalagmite cierge (Grotte du Père Noël, Han-sur-Lesse, Belgique) montrant un accident de croissance en forme de bourelet. L'axe de croissance 2 de la sous-série B repose par une surface discordante S sur la sous-série A basculée dont l'axe de croissance 1 fait un angle de 30° avec l'axe 2.

qui gouverne la morphologie de mise en place: une stalactite, une stalagmite sont verticales. D'autres forces entrent aussi en jeu (forces de capillarité par exemple), mais les spéléothèmes qui en résultent sont quantitativement accessoires: bourrelets, plateaux, piles d'assiettes, excentriques. Les colonnes stalagmitiques qui sont issues de la réunion d'une stalactite et d'une stalagmite sont aussi verticales, avec parfois une asymétrie résultant d'une croissance plus rapide d'une côté que de l'autre, mais l'axe général est facilement reconnaissable. Enfin, des spéléothèmes résultent de ruissellements sur une surface horizontale ou inclinée. Les planchers stalagmitiques scellent souvent un remplissage détritique dans le cadre d'une série sédimentaire où ils constituent fréquemment la fin d'une séquence d'assèchement (Sorriaux, 1982). Ils se situent dans ce



Figure 6. La stalagmite décapitée, dans la Grotte du Père Noël (Han-sur-Lesse, Belgique). Cette stalagmite s'enracine dans un ensemble rigide et ne repose pas contre la paroi. Sa rupture est donc due à une secousse sismique de forte intensité.

cas généralement en continuité de sédimentation avec toute la série détritique. Ils sont la plupart du temps alimentés par des stalagmites à la base desquelles un film d'eau incrustante continue de ruisseler. Une coulée stalagmitique est un terme attaché à une variété de plancher très incliné qui s'est édifié sur une surface pentue, surface taillée en roche vive ou onstituée de blocs et cailloux éboulés. L'origine de l'eau est une fissure hydrologiquement active.

3.2. MODIFICATION DE LA POSITION DES SPELEOTHEMES

Certains spéléothèmes se sont écartés de leur position initiale: une stalagmite est penchée, une colonne est brisée, une stalactite et sa stalagmite jumelle sont décalées l'une de l'autre. Ces modifications résultent soit d'une cause morphologique, soit d'une cause tectonique.

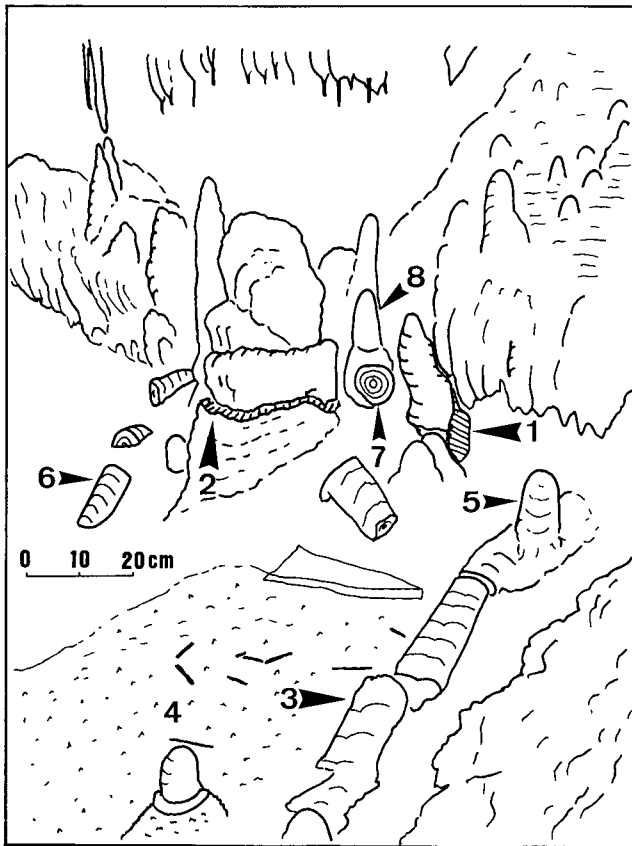


Figure 7. Paysage dans une galerie supérieure de la Grotte de Hotton (Belgique). On y voit une stalagmite (1) partiellement brisée par l'avancée de la paroi vers la gauche. En (2), une grosse stalagmite est brisée perpendiculairement à son axe de croissance mais est restée en place. Sa forme trapue et son diamètre font penser à une secousse violente car son inertie est faible. En (3), une stalagmite cierge a été brisée et s'est écroulée dans un gour (4). Une stalagmite (5) a crû sur un des fragments après la chute. En 6, une autre stalagmite cierge tombée est partiellement enfouie sous la calcite d'un autre gour. En (7), on voit la section d'une stalagmite couchée après sa chute et brisée, une autre stalagmite (8) pousse dessus.

3.2.1. Ecart à la position verticale d'une stalagmite

L'écart à la position verticale vient soit d'un basculement du support, soit d'un déplacement de l'alimentation à la voûte. Les deux se distinguent facilement à l'examen de la morphologie de la stalagmite. Parfois néanmoins, ce cas peut être litigieux. La modification du support peut résulter simplement du basculement du bloc sur lequel la stalagmite croît, ou du tassement du sédiment argileux ou sableux sous-jacent. Il se peut aussi que le point de détachement de la goutte à la voûte se déplace latéralement, à la suite par exemple de la croissance d'une draperie.

La variation de l'alimentation d'une stalagmite n'interrompt pas nécessairement la croissance. Dans ce cas, on distingue une suite de coudes le long de la stalagmite, particulièrement bien visibles dans le cas de stalagmites cierge (fig. 4), ou encore des bourrelets. Dans ce dernier cas, seule la section longitudinale de la stalagmite élucide le problème (fig. 5).

3.2.2. Stalagmites brisées

La stalagmite est brisée en deux ou plusieurs morceaux. Si cette rupture ne résulte pas de la chute d'un bloc de la voûte (ce que l'on identifie facilement par les impacts) ou d'une cause anthropique (explosion dans une carrière voisine ou choc accidentel lors d'un passage des visiteurs), elle est due à une vibration sismique. Le cas le plus remarquable est la stalagmite brisée dont la partie supérieure est restée en place, décalée par rapport à son axe primitif et recimentée postérieurement à la rupture (fig. 6). Dans la majorité des cas, la partie supérieure de la stalagmite est tombée, souvent recimentée, avec une nouvelle stalagmite plus petite qui croît sur la cicatrice (figs 7 et 8).

Il est difficile d'imaginer d'autres causes que sismiques à ces ruptures. Des mesures quantitatives peuvent apporter des informations: direction des segments tombés, hauteur de la cicatrice. La direction peut indiquer le sens des vibrations sismiques qui ont provoqué la rupture. La hauteur de la cicatrice est une variable fonction de la fréquence des vibrations. Dans la Grotta di Cervo, dans le Appennins centraux (Postpischl *et al.*, 1991), les stalagmites cierge brisées le sont toutes à une même hauteur au dessus de la racine du spéléothème.

3.2.3. Cisaillement

Un pilier ou un gros massif est fracturé. Cette fracturation peut résulter d'un mécanisme en détente ou d'un mécanisme en compression (fig. 9). Dans le premier cas, une fente est béante dans un massif stalagmitique. Elle résulte soit d'un affaissement d'une partie du support sous-jacent, soit d'une secousse sismique. Dans le second cas, ils s'agit forcément d'un mécanisme sismo-tectonique en compression, comme par exemple le rapprochement de la voûte et du plancher ou l'écrasement entre deux parois. Notons néanmoins qu'il se pourrait qu'une colonne soit écrasée par la descente gravitaire d'un gros bloc de la voûte. L'observation décisive reste le grand nombre de spéléothèmes affectés par le phénomène, ce qui exclut alors une cause strictement locale (fig. 10).

4. DATATION DES EVENEMENTS SISMO-TECTONIQUES

4.1. LA CONCRETION DITE "GIBRALTAR", GROTTTE DU PERE NOEL

4.1.1. Situation du spéléothème

La grotte du Père Noël renferme une grande abondance de spéléothèmes dont beaucoup sont brisés, basculés, écrasés, témoignant de l'importance d'événements sismo-tectoniques passés. Cette grotte constitue ainsi un terrain idéal pour étudier ces phénomènes.

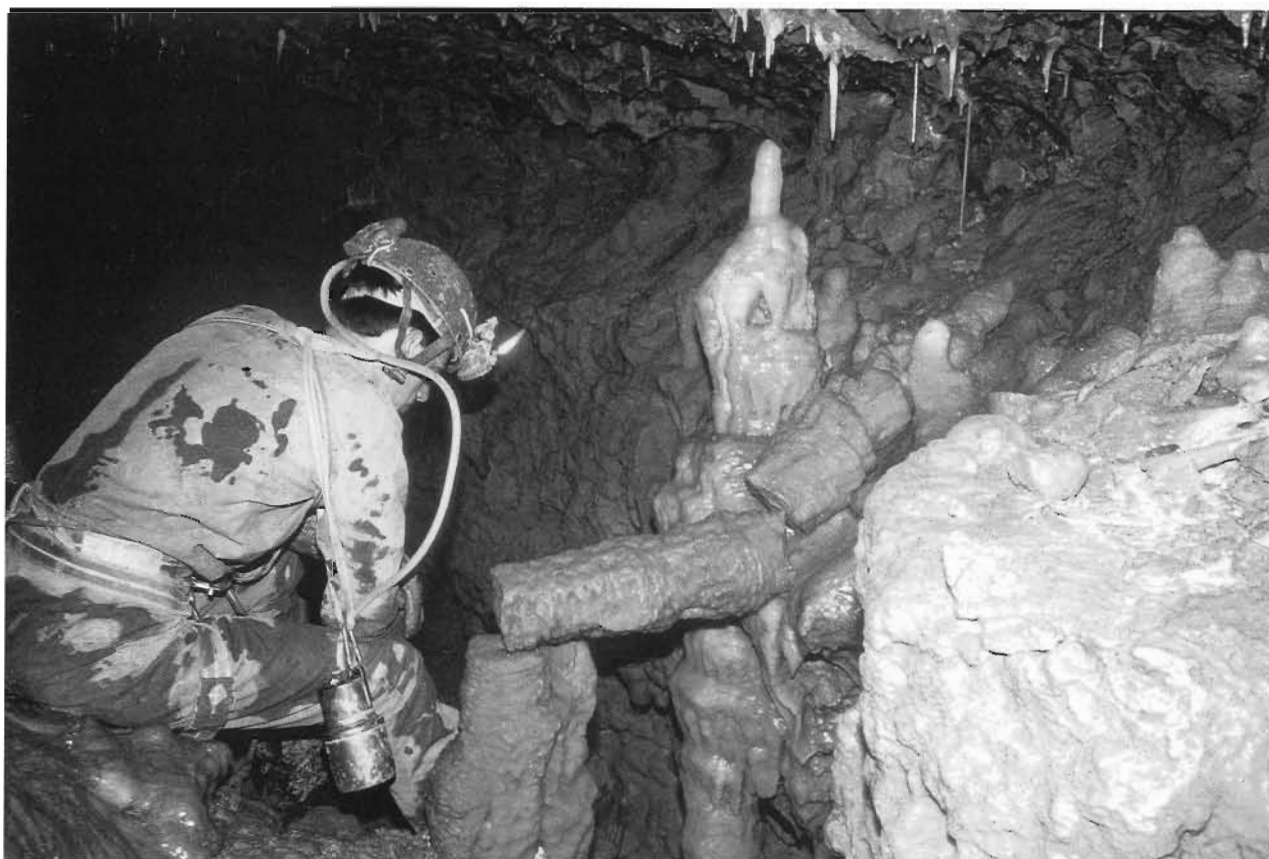


Figure 8. Galerie supérieure dans la Grotte de Hotton. Une stalagmite cierge s'est écroulée suite à une secousse sismique. Les fragments sont scellés par le concrétionnement ultérieur.

Situés dans le haut de la Salle du Bivouac (fig. 11), Gibraltar est un grand promontoir stalagmitique d'un diamètre d'une dizaine de mètres et d'une hauteur analogue; il est traversé complètement par une fracture béante, profonde de plusieurs mètres, laissant deviner une grande épaisseur utilisable de calcite.

Pour des raisons de faisabilité technique lors de cette première investigation, j'ai choisi un replat incliné sur le bord ouest du massif. Le carottage a atteint la profondeur de 105 cm. Des difficultés ont surgi, dues à des fractures internes obliques à l'axe du carottage. Cette fracturation est une conséquence des événements sismiques qui constituent l'objet de cet article. Bien-sûr, l'interprétation strictement géométrique et mécanique de ces fractures doit être menée avec prudence : les forces induites par le carottage peuvent perturber ces cassures naturelles, par exemple briser une cassure soudée par le concrétionnement postérieurement à sa naissance.

4.1.2. Lithostratigraphie

La lithostratigraphie est homogène. Le faciès prédominant est une calcite stratifiée, blanche, laiteu-

se, opaque. Suivant les cas, la stratification est plus ou moins bien marquée. Le sommet est très microstratifié. La plage qui s'étend des importantes discordances à 33 cm jusqu'à la zone de cassures à 58 cm est plus massive, avec des cavités et une stratification à la fois plus diffuse et lâche. Cette zone apparaît caractérisée par une croissance rapide et par un faciès d'altération. Il est sûr que cette zone est plus perméable que les autres et doit être interprétée avec beaucoup de prudence sur le plan chronologique.

A plusieurs endroits le long de la colonne lithostratigraphique, des cassures ou des discordances indiquent l'existence de dislocations. Vu le contexte de la concrétion, ces accidents stratigraphiques sont imputables à des événements sismiques : cassures simples (à 58 cm), cassures avec discordance angulaire (à 85 cm), discordance angulaire sans cassure (entre 31 et 32 cm).

4.1.3. Résultats isotopiques

Les résultats du tableau 1 montrent des âges isotopiquement fiables, avec des rapports isotopiques $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ élevés, sauf ceux des échantillons 1, 2, 3, 5 qui sont moyens et celui de l'échantillon 24 qui

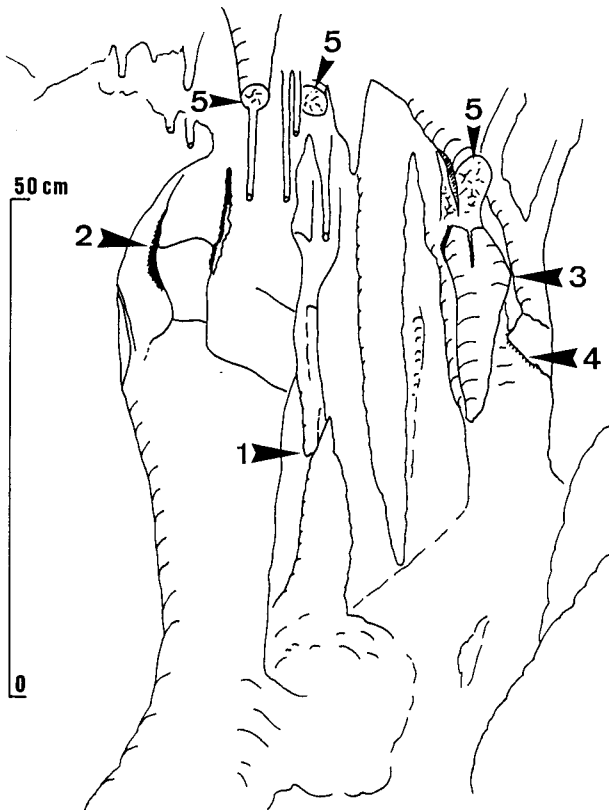


Figure 9. Paysage dans une galerie de la Grotte du Père Noël, Han-sur-Lesse, Belgique. Une colonne (1) montre une petite faille inverse due à une compression à composante verticale. Cette compression a également joué sur la colonne voisine, plus massive, dans laquelle elle a déterminé un bombement avec écaillage superficiel (2). En 3 et 4, on distingue aussi des fractures témoignant de cette compression verticale. Enfin, de nombreuses stalactites brisées (5) indiquent que cette zone a connu d'intenses et violentes perturbations.

est très bas ce qui handicape son interprétation chronologique.

Les âges sont difficiles à interpréter finement. Dans l'ensemble (tab. 1), on reconnaît une grande phase de croissance dans le stade isotopique 5 et, dans le sommet, une phase de croissance située entre les stades 3 et 4 (fig. 12).

L'examen de la variation des teneurs en uranium en fonction de la profondeur (fig. 13) permet de diviser la série en trois zones. La première est caractérisée par une grande fluctuation des teneurs (de 1 à 8). Une deuxième zone comprend les échantillons à faibles teneurs (10, 11, 12, 13, 14, 15, 16) ; ils correspondent tous à la zone altérée suspecte. Les derniers échantillons (de 18 à 27) définissent une troisième zone divisée elle-même en deux sous-groupes séparées par l'importante cassure des 85 cm. Remarquons dès maintenant que les ruptures définies dans la distribution de l'uranium correspondent toutes à des cassures dans la colonne stratigraphique.

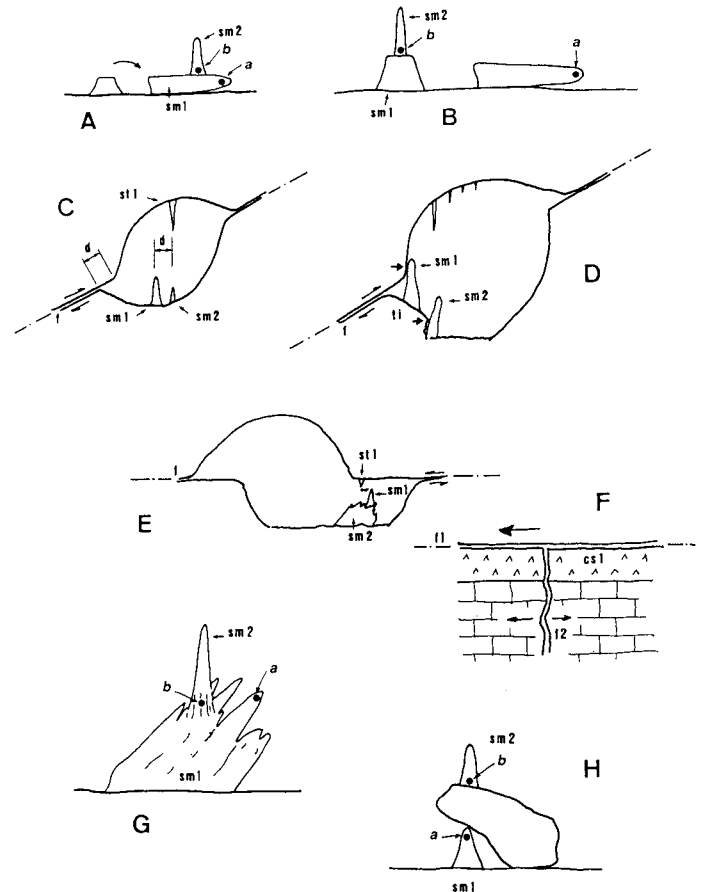


Figure 10. Synthèse des différentes modifications morphologiques des spéléothèmes dues à des causes tectoniques. A: chute d'une stalagmite (sm1) avec croissance d'une nouvelle stalagmite (sm2) sur le fragment tombé. B: chute d'une stalagmite (sm1) avec continuation de la croissance de la stalagmite sur le moignon resté en place (sm2). Les points a et b indiquent les prélèvements qui, datés par la méthode U/Th, donneront la fourchette d'âge situant chronologiquement la secousse sismique (étude faite dans la Grotta del Frassino, par Bini *et al.*, 1992). C: décrochement d'une galerie en conduite forcée avec deux stalagmites (sm1 et sm2) correspondant aux positions de la stalactite nourricière (st1) avant et après le décalage qui, dans ce cas de figure, est instantané. D: décrochement d'une galerie en conduite forcée avec décalage des stalactite et stalagmite conjuguées (sm1). Une deuxième stalagmite (sm2) est poussée par le mouvement du bloc inférieur (ti). E: décrochement horizontal d'une galerie suivant une faille f provoquant le décalage (d) d'une stalactite (st1) avec sa stalagmite (sm1) qui croissait elle-même sur un massif stalagmitique plus vieux (sm2) précédemment basculé par un séisme. F: fracture de détente (f2) suite au mouvement en décrochement suivant une faille f1. Cette détente affecte à la fois le bed-rock et une croûte stalagmitique (cs1). G: gros massif stalagmitique basculé (sm1) et stalagmite postérieure (sm2). H: bloc tombé sur une stalagmite (sm1) et croissance d'une deuxième stalagmite (sm2) sur le bloc. Les points a et b indiquent les prélèvements faits pour la datation de l'événement sismique (études faites dans la Grotta dei Cervo, Postpischl *et al.*, 1991).

4.1.4. Interprétation chronologique

La figure 12 donne la courbe des âges les plus fiables. Quelques remarques sont à mettre en exergue.

Tableau 1. Analyses isotopiques de PNG. Première colonne, noms des échantillons. Deuxième colonne, teneur en uranium exprimée en ppm (parties par millions, soit le nombre de milligrammes d'uranium par kilogramme de stalagmite). Troisième colonne, rapport isotopique entre l'uranium-234 et l'uranium-238. Quatrième colonne, rapport isotopique entre le thorium-230 et l'uranium-234. Cinquième colonne, rapport isotopique entre le thorium-230 et le thorium-232. Sixième colonne, rapport isotopique entre l'uranium-234 et l'uranium-238 à l'instant initial. Septième colonne, âge de l'échantillon.

Echantillon	[U] _{ppm}	²³⁴ U/ ²³⁸ U	²³⁰ Th/ ²³⁴ U	²³⁰ Th/ ²³² Th	[²³⁴ U/ ²³⁸ U] _{t=0}	Age (ma)
PNG-1/1	0,055(±0,001)	1,614(±0,042)	0,435(±0,015)	13(±1)	1,725	59,5[+2,8/-2,7]
PNG-1/2	0,060(±0,001)	1,595(±0,027)	0,428(±0,010)	15(±1)	1,701	58,4[±1,7]
PNG-1/3	0,058(±0,001)	1,593(±0,041)	0,477(±0,018)	13(±2)	1,716	67,2[+3,6/-3,5]
PNG-1/4	0,073(±0,001)	1,473(±0,033)	0,453(±0,014)	22(±3)	1,565	63,2[±2,7]
PNG-1/5	0,065(±0,001)	1,547(±0,033)	0,199(±0,010)	16(±4)	1,585	23,8[+1,4/-1,3]
PNG-1/6	0,056(±0,002)	1,676(±0,075)	0,525(±0,023)	40(±9)	1,836	76,1[+5,1/-4,7]
PNG-1/7	0,082(±0,006)	1,414(±0,099)	0,417(±0,047)	grand	1,485	56,8[+8,8/-8,1]
PNG-1/8	0,066(±0,001)	1,585(±0,034)	0,600(±0,021)	36(±6)	1,759	92,7[+5,2/-4,9]
PNG-1/10	0,052(±0,001)	1,566(±0,029)	0,653(±0,027)	35(±9)	1,762	105,5[+7,4/-6,9]
PNG-1/11	0,051(±0,001)	1,627(±0,033)	0,730(±0,051)	grand	1,894	126,4[+16,7/-14,7]
PNG-1/12	0,058(±0,001)	1,593(±0,033)	0,666(±0,028)	62(±21)	1,804	108,7[+7,8/-7,3]
PNG-1/13	0,059(±0,001)	1,638(±0,032)	0,576(±0,018)	50(±10)	1,814	86,9[+4,1/-3,9]
PNG-1/14	0,059(±0,001)	1,590(±0,035)	0,694(±0,022)	37(±6)	1,818	116,4[+6,6/-6,2]
PNG-1/15	0,051(±0,001)	1,589(±0,042)	0,504(±0,020)	37(±10)	1,722	72,3[+4,1/-4,0]
PNG-1/16	0,052(±0,002)	1,624(±0,047)	0,629(±0,047)	18(±7)	1,824	99,3[+12,4/-11,1]
PNG-1/18	0,068(±0,001)	1,630(±0,024)	0,642(±0,017)	34(±5)	1,840	102,3[+4,5/-4,3]
PNG-1/19	0,064(±0,001)	1,645(±0,033)	0,571(±0,024)	37(±11)	1,821	85,9[+5,4/-5,1]
PNG-1/21	0,070(±0,001)	1,669(±0,025)	0,663(±0,022)	61(±14)	1,905	107,4[+5,9/-5,7]
PNG-1/22	0,065(±0,002)	1,642(±0,044)	0,688(±0,021)	67(±14)	1,884	114,0[+6,3/-5,9]
PNG-1/24	0,080(±0,002)	1,613(±0,044)	0,632(±0,230)	5(±5)	1,811	100,1[+75,2/-46,4]
PNG-1/25	0,081(±0,002)	1,628(±0,036)	0,742(±0,023)	49(±8)	1,904	129,9[+7,7/-7,2]
PNG-1/26	0,088(±0,001)	1,653(±0,030)	0,736(±0,020)	69(±16)	1,934	127,8[+6,7/-6,3]
PNG-1/27	0,072(±0,001)	1,589(±0,035)	0,769(±0,025)	73(±15)	1,870	139,0[+9,1/-8,4]

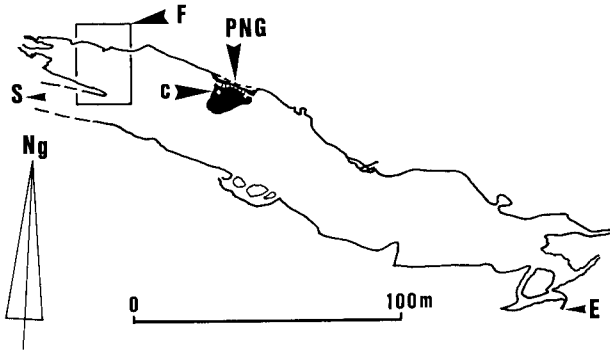


Figure 11. Grotte du Père-Noël, localisation du massif stalagmitique «Gibraltar».

a) L'absence dans cette série de coupure lithologique vraiment marquée. Par exemple, le stade isotopique 4 ne se retrouve pas de façon évidente "quelque part" entre les échantillons 7 et 8.

b) La croissance n'a pas continué durant le stade isotopique 3 alors qu'il est très bien représenté dans cette grotte (PN-ST-3 dans la Galerie Gillet par exemple, Quinif, 1989). Il faut faire intervenir le tarissement accidentel de certaines sources d'alimentation, ce qui peut être une conséquence d'événements sismo-tectoniques : nous allons y revenir.

c) C'est le sous-stade 5.3 qui est le plus représenté. Il est situé entre 25 et 87 cm. Deux échantillons tests préliminaires (PN-3917[1] et PN-3917[2]) appartiennent aussi à ce sous-stade isotopique. La figure 12 donne la courbe de croissance interpolée (Quinif, 1991a) qui définit du sous-stade 5.3. Son équation est

$$[\text{âge}] = 343 * [\text{longueur}] + 81 \quad r^2 = 0,88.$$

d) Les échantillons 25 et 26 se situent au maximum de l'Eemien, c'est-à-dire du sous-stade isotopique 5.5 qui se retrouve, une fois de plus, sous représenté par rapport aux suivants. Le dernier échantillon date peut-être du stade 6 mais ce résultat seul n'est pas convainquant : il faudrait le confirmer par d'autres datations.

4.1.5. Croissance et séismes

La croissance d'un spéléothème est d'abord sous la dépendance des climats. La relation entre l'abondance de la précipitation carbonatée endokarstique et les paramètres climatiques est bien comprise (Atkinson *et al.*, 1978; Bastin, 1978; Gewalt, 1985; Gordon *et al.*, 1989; Maire & Quinif, 1991; Quinif, 1990;

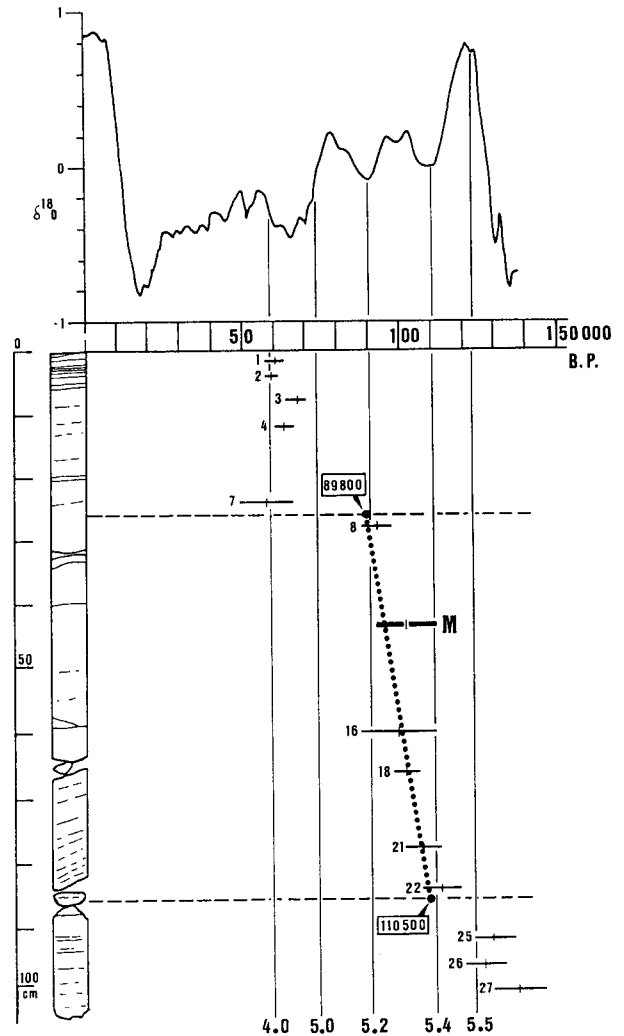


Figure 12. Chronostratigraphie de la série PNG-1 en tenant compte des âges les plus fiables et relation avec la courbe de Martinson *et al.* (1987). Nous avons, en abscisse, les âges en milliers d'années et en ordonnée la profondeur. La série stalagmitique est esquissée à gauche. La droite en gros points est la courbe de croissance interpolée entre les échantillons 8 et 22, délimitée par deux arrêts de croissance. Les âges limites (89 800 et 110 500) sont en excellente concordance avec les âges de Martinson *et al.* (1987). L'âge noté M est la moyenne arithmétique des âges qui ont été éliminés sur base géochimique. Cette moyenne se replace bien sur la courbe de croissance interpolée.

Quinif, 1992; Uggeri *et al.*, 1991). C'est pourquoi la première démarche consiste à comparer la courbe de croissance d'un spéléothème avec la courbe climatique de forçage astronomique (Martinson *et al.*, 1987). Qu'indique la figure 12? Les ruptures climatiques ne se marquent guère dans la lithostratigraphie. Par exemple, le sous-stade isotopique 5.1 se localise dans une zone mince vers 25cm. Par contre, nous voyons que des accidents stratigraphiques ne sont pas interprétables en terme de climat mais en terme d'événements sismo-tectoniques, comme les cassures et les discordances.

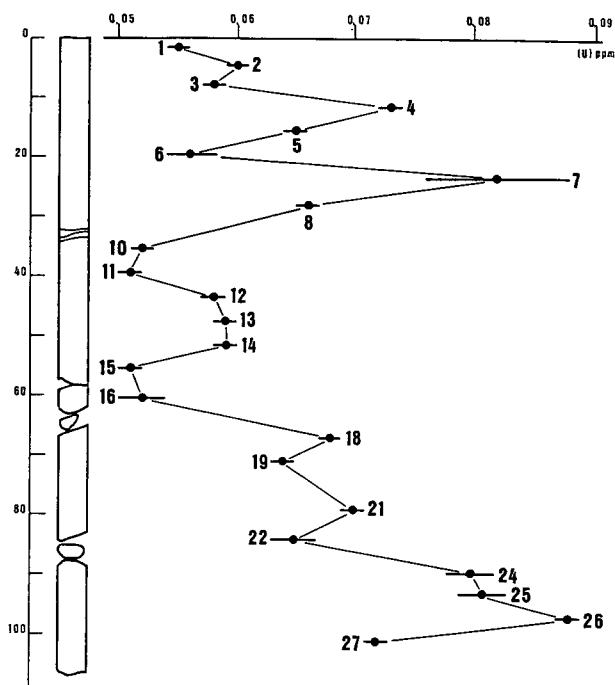


Figure 13. Variation des teneurs en uranium avec la profondeur dans le carottage PNG-1.

On en arrive ainsi à pouvoir dater des événements. En partant du bas, le premier d'entr'eux, le plus important par la modification induite dans la croissance, est celui des 85 cm. La cassure nette s'accompagne d'une discordance angulaire qui confirme l'idée que cet événement est syngénétique et non postérieur. Il se situe donc entre 122.000 et 110.500 ans. L'accident des 65 cm est moins certainement syngénétique : il aurait pu survenir après la croissance du massif. Néanmoins, une discordance angulaire existe, bien qu'elle soit moins nette que la précédente. Cet accident se situe alors vers 100.000 ans. La cassure des 60cm ne peut être datée car elle est simple et peut s'être produite après la croissance de la partie supérieure de la concrétion. Entre 32 et 34 cm, les cassures sont soudées et il existe des discordances angulaires. C'est le cas le moins douteux : il est contemporain de la croissance. Cet événement se situe à 90.000 ans.

Il reste à analyser la principale fracture, subverticale, qui découpe Gibraltar. Elle est bien sûr postérieure à la dernière couche datée dans cette série, mais de combien? Elle n'est pas scellée par le concrétionnement, mais il faut remarquer que toute cette partie du massif n'est plus active depuis 60.000 ans environ. Une hypothèse tout-à-fait vraisemblable est que la secousse sismique qui a brisé Gibraltar (secousse qui a dû être très forte) a modifié les conduits d'alimentation du spéléothème. Dans ce cas, l'événement sismique se situe tout-de-suite après la dernière couche datée, c'est-à-dire à 60.000 ans.

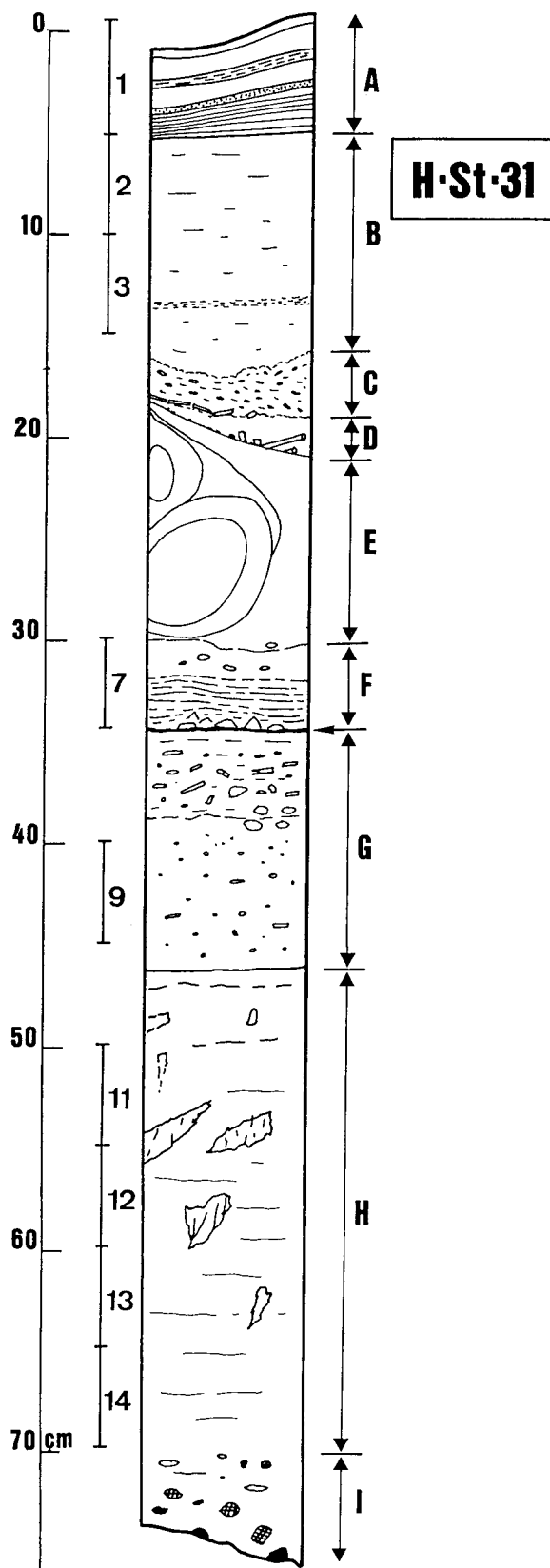


Figure 14. Chronostratigraphie de la série H-St-31 (la série H-St-30 est semblable). A: alternance de strates serrées et colorées. B: calcite blanche à stratification plus diffuse. C: calcite peu compacte, vacuolaire. D: géode tapissée de stalactites fistuleuses scellées par des cristaux de calcite. E: stalagmites tombées. F: calcite avec quelques fistuleuses brisées. G: brèche de fistuleuses brisées. H: calcite sombre, à stratification diffuse, avec géodes. I: brèche de galets mous argileux et durs ferrifères. Les chiffres 1, 2, 3, etc indiquent les prélèvements pour les datations U/Th.

Tableau 2. Analyses isotopiques des carottages 30 et 31 du plancher stalagmitique de la Galerie des Verviétois. Légende, voir tableau 1.

Echantillon	[U] _{ppm}	²³⁴ U/ ²³⁸ U	²³⁰ Th/ ²³⁴ U	²³⁰ Th/ ²³² Th	[²³⁴ U/ ²³⁸ U] _{t=0}	Age (ma)
H-St-30(9)	0,070(±0,001)	1,541(±0,032)	0,858(±0,022)	37,0(±4,7)	1,883	174,2[+11,1/-10,0]
H-St-30(11)	0,215(±0,004)	1,797(±0,034)	1,009(±0,027)	13,7(±0,8)	2,604	249,2[+24,2/-20,2]
H-St-30(12)	0,232(±0,003)	1,837(±0,023)	0,977(±0,069)	25,7(±9,2)	2,576	225,7[+53,3/-37,7]
H-St-30(13)	0,255(±0,005)	1,932(±0,043)	1,076(±0,086)	38,9(±21)	3,156	298,9[+158/-70,5]

Echantillon	[U] _{ppm}	²³⁴ U/ ²³⁸ U	²³⁰ Th/ ²³⁴ U	²³⁰ Th/ ²³² Th	[²³⁴ U/ ²³⁸ U] _{t=0}	Age (ma)
H-St-31(1)	0,120(±0,003)	1,915(±0,047)	0,149(±0,019)	1,9(±0,4)	1,960	17,2[+2,4/-2,2]
H-St-31(2)	0,126(±0,006)	2,236(±0,127)	0,236(±0,042)	4,0(±1,5)	2,339	28,5[+5,9/-5,6]
H-St-31(3)	0,125(±0,003)	2,110(±0,048)	0,197(±0,023)	11,3(±7)	2,185	23,3[+3,1/-2,9]
H-St-31(7)	0,060(±0,002)	1,821(±0,082)	1,115(±0,094)	9,4(±2,6)	3,275	363,1[+inf/-111]
H-St-31(9)	0,073(±0,002)	1,476(±0,047)	1,551(±0,089)	24,3(±7)	1,476	-----
H-St-31(11)	0,180(±0,003)	1,723(±0,033)	0,980(±0,034)	8,7(±0,7)	2,390	232,8[+27,1/-22,1]
H-St-31(12)	0,192(±0,002)	1,778(±0,022)	0,922(±0,015)	14,0(±0,6)	2,351	196,8[+8,5/-7,8]
H-St-31(13)	0,248(±0,004)	1,792(±0,035)	0,948(±0,133)	6,6(±2)	2,428	210,1[+111,9/-59,2]

4.1.6. Synthèse

L'analyse chronologique de la série stalagmitique de Gibraltar a prouvé la puissance de cette méthode pour dater des événements sismo-tectoniques anciens. Nous mettons ici en évidence une phase complexe de séismes importants qui se situe dans le stade isotopique 5, plus particulièrement à 110.000, 100.000 et 90.000 ans. Un autre séisme puissant est survenu postérieurement vers 60.000 ans. Peut-être le fort ralentissement de croissance correspondant au sous-stade isotopique 5.1 est-il dû aussi à des événements tectoniques mais cette assertion est hautement hypothétique: aucune trace n'est décelable.

4.2. LE PLANCHER STALAGMITIQUE DE LA GALERIE DESVERVIÉTOIS (GROTTE DE HANSUR-LESSE)

Ce plancher a fait l'objet de très nombreux carottages dont une dizaine ont été étudiés (Quinif, 1991b). La croissance de la presque totalité du plancher se situe durant le stade isotopique 5, avec des variations latérales qui peuvent être importantes. Néanmoins, deux carottages voisins ont mis en évidence l'existence d'une croissance antérieure située dans le stade isotopique 7. L'intérêt dans l'analyse

des anciens événements tectoniques se situe dans l'existence au sein de ces deux séries d'accidents lithostratigraphiques remarquables (fig. 14). Les âges montrent un arrêt de croissance entre les stades isotopiques 7 et 3, ce qui est énorme (tab. 2). Plus exactement, cette absence est matérialisée par une zone complexe dans laquelle on trouve un «cimetière» de stalactites fistuleuses, de stalagmites tombées, de géodes accidentées par d'autres stalactites fistuleuses. Cette zone perturbée marque sans aucun doute un ou, plus probablement, plusieurs événements sismiques. Il est difficile d'en dire plus dans ces séries mais il est très important de noter que ces événements se localisent dans le stade 5 et qu'ils ont, en plus de la destruction de spéléothèmes, provoqué des arrêts de croissance : nous retrouvons les caractères mis en évidence dans l'étude du massif stalagmitique «Gibraltar» dans la Grotte du Père Noël.

5. CONCLUSIONS

Ces exemples démontrent l'intérêt des recherches en sédimentologie endokarstique pour étudier les événements sismo-tectoniques du passé. Ceux-ci perturbent la géométrie et la structure des dépôts souterrains, plus spécialement des spéléothèmes : ruptures de spéléothèmes, chutes et reprise de

croissance de stalagmites, déplacements, modifications stratigraphiques comme les discordances angulaires. Ces perturbations peuvent être datées par le déséquilibre dans la série de l'uranium.

Autre conclusion importante, les cas étudiés ici démontrent l'existence d'événements sismo-tectoniques de forte intensité dans le passé récent de la Belgique. Les séismes responsables de ces modifications sont beaucoup plus forts que ceux connus historiquement. Ces derniers n'ont en effet laissé aucun effet observable dans notre endokarst. Bien que cela en soit encore à l'état d'hypothèse, il semble qu'une suite de périodes de calme tectonique longues de 10.000 ans ait existé notamment dans le stade isotopique 5. D'autres secousses majeures ont suivi: il y a là matière à réflexion sur la soi-disant passivité sismo-tectonique de notre région.

Ce travail est préliminaire: il doit maintenant être suivi par des études morphométriques quantitatives sur les spéléothèmes et par la comparaison avec des relevés purement structuraux.

6. REMERCIEMENTS

Les travaux de carottage n'ont pu être possibles que grâce à l'autorisation de la S.A. des Grottes de Han et la bienveillance de G. Deflandre. Ils n'auraient pu se réaliser sans l'aide indispensable des amis spéléologues de l'ESCM qui se sont succédé pour prêter leur courage au transport du matériel. Merci aussi à Bruno Bastin avec qui je travaille sur ces sujets depuis tant d'années.

7. BIBLIOGRAPHIE

- ATKINSON, T.C., HARMON, R.S., SMART, P.L. & WALTHAM, A.M., 1978. Paleoclimatic and geomorphic implications of Th²³⁰/U²³⁴ dates on speleothems from Britain. *Nature*, 272: 24-28.
- BAJO, E., BALBIANO, C., BINI, A. & QUINIF, Y., 1983. Note su alcune cavità della zona Conca delle Carsene-Pian Ambrogi (Marguareis): Abisso dei Perdus, Abisso Cappa e Gouffre des Trois. *Atti Convegno Internazionale sul Carso di Alta Montagna, Imperia, 1983*, II: 1-19.
- BASTIN, B., 1978. L'analyse pollinique des stalagmites: une nouvelle possibilité d'approche des fluctuations climatiques du Quaternaire. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 101: 13-19.
- BINI, A., QUINIF, Y., SULES, O. & UGGERI, A., 1992. Evidences de tectonique récente dans les grottes du M. Campo de Fiori (Lombardie, Italie). *Karstologia*, 19: 23-30.
- BOGLI, A., 1969. Neue Anschauungen über die Rolle von Schichtfugen und Kluften in der Karsthydrographischen Entwicklungen. *Geol. Rundschau*, 58: 395-408.
- EK, C. & QUINIF, Y., 1988. Les sédiments détritiques de grottes: aperçu synthétique. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 111 (1): 1-8.
- FORTI, P. & POSTPISCHL, D., 1979. Derivazione di dati neotettonici da analisi di concrezioni alabastrine, 1° contributo. *Analisi statistica delle stalagmiti del sistema carsico Fiume-Vento (S. Vittore Genga - Ancona)*. CNR - Progetto Finalizzato Geodinamica, 251.
- FORTI, P. & POSTPISCHL, D., 1980. Neotectonic data from stalagmites: sampling and analysis techniques. *European Regional Conference on Speleology, Sofia, CNR - Progetto Finalizzato Geodinamica (Sofia)*, 351, 2: 34-39.
- FORTI, P. & POSTPISCHL, D., 1984. Seismotectonic and paleoseismic analysis using karst sediments. *Marine Geology*, 55: 145-161.
- FORTI, P. & POSTPISCHL, D., 1986. May the growth axis of stalagmites be considered as recorders of historic and prehistoric earthquakes? Preliminary results from the Bologna karst area (Italy). *Int. Symp. Engineering Geology Problems in Seismic area (Bari 1)*, 1: 183-193.
- FORTI, P. & POSTPISCHL, D., 1988a. Datazione radiometrica di eventi palaeosismici. *In: M. Unguendoli Ed., Studi e Ricerche, CUSL, Bologna*.
- FORTI, P. & POSTPISCHL, D., 1988b. Seismotectonics and radiometric dating of karst sediments. *Proc. Hist. Seismol. Central Eastern Mediterranean Region. ENEA, Roma*: 321-332.
- GEWELT, M., 1985. Cinétique du concrétionnement dans quelques grottes belges. Apport de datations ¹⁴C et ²³⁰Th/²³⁴U. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 108: 267-273.
- GEWELT, M. & EK, C., 1988. Les concrétions carbonatées des grottes: aperçu synthétique. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 111, 1: 9-20.
- GILLI, E., 1986. Néotectonique dans les massifs karstiques, un exemple dans les Préalpes de Nice: la grotte des Deux Gourdes. *Karstologia*, 8: 50-52.
- GORDON, D., SMART, P.L., FORD, D.C., ANDREWS, J.N., ATKINSON, T.C., ROWE, P. & CHRISTOPHER, N.S.J., 1989. Dating of late Pleistocene Interglacial and Interstadial Periods in the United Kingdom from Speleothems Growth Frequency. *Quat. Res.*, 31: 14-26.
- HILL, C.A. & FORTI, R., 1986. Cave minerals in the world. *Ed. Nat. Speol. Soc., Huntsville, USA*, 238p.
- JEANNIN, P.-Y., 1990. Néotectonique dans le karst du Nord du lac de Thoune (Suisse). *Karstologia*, 15: 41-54.
- MAIRE, R. & QUINIF, Y., 1991. Mise en évidence des deux derniers interglaciaires (stades 5 et 7) dans les Alpes françaises. *Speleochronos*, 3: 3-10.
- MARTINSON, D.G., PISIAS, N.G., HAYS, J.D., IMBRIE, J., MOORE, T.C. & SHACKELTON, N.J., 1987. Age dating and the orbital theory of ices ages: development of a high resolution 0 to 300 000-years chronostratigraphy. *Quat. Res.*, 27: 1-29.
- POSTPISCHL, D., AGOSTINI, S., FORTI, P. & QUINIF, Y., 1991. Palaeoseismicity from karst sediments: the "Grotta del Cervo" cave case study (Central Italy). *Tectonophysics*, 193: 33-44.
- QUINIF, Y., 1989. Datation d'un interstade au sein de la dernière glaciation. *Speleochronos: revue du Centre d'Etudes et de Recherches Appliquées au Karst (CERAK)*, 1: 23-28.
- QUINIF, Y., 1990. La datation des spéléothèmes (U/Th) appliquée aux séquences sédimentaires souterraines pour une mise en évidence des ruptures paléoclimatiques. *Actes du colloque. "Remplissages karstiques et paléoclimats"*. *Karstologia Mémoires*, 2: 23-32.
- QUINIF, Y., 1991a. Origine et signification des remplissages souterrains. *Actes des Journées Chevalier, Grenoble*: 229-247.
- QUINIF, Y., 1991b. La courbe de croissance interpolée. *Speleochronos*, 3: 11-16.
- QUINIF, Y., 1991. La série stalagmitique de la Galerie des Verviétols (Han-sur-Lesse, Belgique). *Speleochronos*, 3: 29-42.
- QUINIF, Y., 1992. Datation uranium/thorium d'une séquence stalagmitique du Pléistocène supérieur du Languedoc (Le couloir blanc-Grotte de Clamouse). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 314, série 11: 1035-1042.
- SORRIAUX, P., 1982. Contribution à l'étude de la sédimentation en milieu karstique. Le système de Niaux-Lombrives-Sabart (Pyrénées ariégeoises). Thèse de troisième cycle, Laboratoire souterrain du CNRS, Moulis, 255p.
- UGGERI, A., BINI, A. & QUINIF, Y., 1991. Contribution of isotopes geochemistry to the study of climatic and environmental evolution of Monte Campo dei Fiori (Lombardy, Italy). *Speleochronos*, 3: 17-28.