

Géologie/Geology
(Paléoclimatologie/Paleoclimatology)

Mise en évidence d'alternances saisonnières dans la structure interne des stalagmites. Intérêt pour la reconstitution des paléoenvironnements continentaux

Dominique GENTY

Résumé – L'analyse pétrographique de la structure interne de plusieurs stalagmites met en évidence l'alternance de deux types de lamines de fabriques cristallines différentes. Ce sont les changements des conditions de précipitation de la calcite qui sont à l'origine de cette alternance, eux-mêmes liés à une variation saisonnière. Cette hypothèse, issue des observations pétrographiques, est vérifiée par dénombrement des alternances de lamines sur des concrétions modernes et holocènes dont on connaît la durée de croissance.

Seasonal alternations in the internal structure of stalagmites: importance for the reconstitution of continental palaeoenvironments

Abstract – Petrographic analysis of the internal structure of several stalagmites shows the alternation of two types of laminae having different crystalline fabrics. Changes in calcite precipitation conditions cause this alternation, which depends on seasonal variations. This hypothesis, resulting from petrographic observations, is confirmed by the enumeration of laminae alternations on modern and Holocene stalagmites of known growth duration.

Abridged English Version – INTRODUCTION. – Speleothems have been used for many years in the reconstitution of palaeoenvironments. Trapped pollen is analysed (Bastin, 1978), volcanic material is extracted (Gewelt, 1987), oxygen and carbon isotopes are determined (Harmon, 1978; Schwarcz, 1974; Winograd, 1992). Generally, speleothems are dated by ^{14}C (Bakalowicz, 1982; Gewelt, 1985) or, more commonly, by $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$ methods (Atkinson, 1978; Ford, 1976; Harmon, 1975; Quinif, 1989). Petrographic studies are rare (Grafeille, 1980; Maire, 1990; Mills, 1965; Cabrol, 1978; Hill, 1986), however it appears that such studies can disclose new clues for palaeoenvironmental reconstitutions. The internal structure of most speleothems is built up of laminae; these laminae are the object of our study. We first analyse six modern stalagmites taken from a closed tunnel and deduce the environmental and temporal significations of the laminae. Our hypotheses are then applied to dated Holocene stalagmites.

ENVIRONMENTAL AND TEMPORAL SIGNIFICATIONS OF MODERN STALAGMITE LAMINAE. – The modern speleothems used, observed in a Belgian tunnel, are exceptional in their diversity and size (Genty, 1992). We studied six stalagmites having a clear laminated structure (*photo. 1*).

Microscopical description. – Microscopical observation of vertical thin sections shows two crystalline fabrics which correspond to the two types of laminae. The brown translucent laminae are composed of compact palisadic calcite. The crystals are perpendicular to the stratification and the intercrystalline porosity is low (*photo. 2*). The white opaque laminae are also formed of palisadic calcite, but the porosity is higher. There is, in this type of lamina, a diffuse brown layer which appears to be organic matter (*photo. 2*).

Environmental signification of laminae. – Many authors have studied the kinetics of calcite precipitation (Gonzalez, 1992; Folk, 1974; Folk, 1976; Kendall, 1977; Kendall, 1978; Dreybrodt, 1980; Dreybrodt, 1981). Their results indicate that porous palisadic-fabric calcite corresponds

Note présentée par Jean DERCOURT.

to a more rapid growth than for the compact palisadic-fabric calcite. These petrographic differences are linked to differences in environmental conditions, themselves depending on climatic variations. This would imply that the rapid-growth laminae developed during periods of high drip rate or high mineralization. The enumeration of laminae in relation to the history of the tunnel allows us to define a time unit for each opaque/translucent laminae alternation.

Laminae enumeration. – The six stalagmites studied share the same number of laminae alternations (table I). Since the date of the last laminae is known, the date of the beginning of the stalagmite growth can be deduced (about 1950 – *fig.*). It is precisely at this time that a large cutting was dug parallel to the tunnel, completely modifying the underground water flow and triggering the dripping into the tunnel. A few years later (1960) the tunnel was closed and the drainage system abandoned, provoking a massive arrival of water towards the tunnel.

APPLICATION TO SOME HOLOCENE STALAGMITES. – We have counted the laminae alternations of two Holocene stalagmites dated by ^{14}C (Gewelt, 1985). The results indicate that there is a good correspondence between the number of alternations and the duration of the growth, taking measurement errors and hiatus into consideration (table II).

CONCLUSION. – Most of the speleothems possess fine laminae. It is highly probable that the opaque/translucent laminae alternations are annual, as have thought a few authors (Broecker, 1960; Pielsticker, 1970; Blanc, 1972). Studies of sequence and frequency of these laminae, in conjunction with work on luminescent laminae (Shopov, 1990; Shopov, 1991; Baker, 1993) on old speleothems, will allow detailed reconstitution of palaeoenvironments and climatic cycles.

INTRODUCTION. – Les concrétions souterraines (ou spéléothèmes) constituent un matériau privilégié pour la reconstitution des paléoenvironnements. Préservées des agressions superficielles naturelles ou anthropiques, elles ont enregistré des informations précieuses que l'on peut extraire par des méthodes variées, telles que la palynologie (Bastin, 1978), la téphrochronologie (Gewelt, 1987), le dosage des isotopes stables de l'oxygène et du carbone (Harmon, 1978; Schwarcz, 1974; Winograd, 1992) et parfois le paléomagnétisme (Latham, 1979). Les méthodes de datation par dosage des isotopes radioactifs du ^{14}C (Bakalowicz, 1982; Gewelt, 1985) et surtout du rapport $^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$ sont utilisées depuis de nombreuses années (Atkinson, 1978; Ford, 1976; Harmon, 1975; Quinif, 1989).

Cependant, l'étude pétrographique des concrétions souterraines n'a été abordée en détail que rarement (Grafeille, 1980; Maire, 1990; Mills, 1965) et elle s'est souvent limitée à la description morphologique et minéralogique (Cabrol, 1978; Hill, 1986).

Nous constatons que la plupart des spéléothèmes ont une structure laminée, c'est-à-dire qu'ils sont composés de bandes plus ou moins parallèles, perpendiculaires à l'axe de croissance de la concrétion, de fabrique cristalline et d'épaisseur variables. Ceci est particulièrement visible dans les stalagmites et les planchers stalagmitiques.

C'est tout d'abord en étudiant le concrétionnement moderne d'un ouvrage d'art (tunnel fermé destiné au passage d'un canal où se sont développées de nombreuses concrétions sur le chemin de halage), que nous établissons un lien entre les différentes fabriques cristallines qui constituent les lames et les facteurs environnementaux influençant la précipitation de la calcite. La relation entre le dénombrement des alternances et l'histoire du tunnel nous permet de définir la signification temporelle de ces lames. Enfin, nous confirmons nos hypothèses sur des stalagmites holocènes déjà datées par les méthodes isotopiques.

DÉTERMINATION DE LA SIGNIFICATION ENVIRONNEMENTALE ET TEMPORELLE DES LAMINES PAR L'ÉTUDE D'UN CONCRÉTIONNEMENT MODERNE. – Des concrétions exceptionnelles tant au niveau de leur diversité que de leur dimension ont été trouvées dans un tunnel en Belgique (Genty, 1992). Parmi celles-ci, six stalagmites ont été étudiées.

Aspect macroscopique. – D'une hauteur comprise entre 2 et 5 cm, toutes les stalagmites prélevées possèdent une structure interne laminée, composée d'une alternance de bandes claires et opaques et de bandes brunes et translucides (*photo. 1*). La stratification montre des discontinuités qui se retrouvent d'une stalagmite à l'autre.

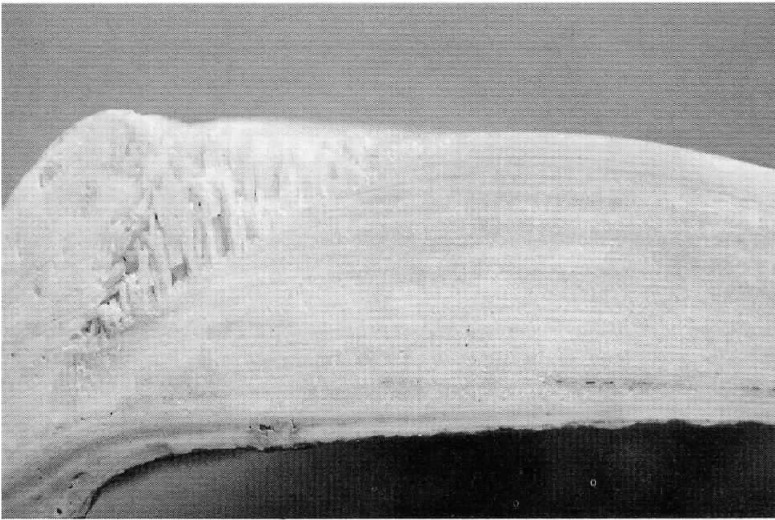


Photo. 1. – Section verticale polie d'une stalagmite à structure interne laminée (GOD-STM4). On remarque bien l'alternance de lamines claires opaques et de lamines brunes translucides (hauteur de l'échantillon = 23 mm).

Photo. 1. – Vertical section of a laminated stalagmite (GOD-STM4). Note the alternation of opaque laminae (white) and translucent laminae (brown) (height of the sample = 23 mm).

Aspect microscopique. – L'examen de lames minces verticales et de surfaces polies au microscope optique et au microscope électronique à balayage nous a permis de caractériser les deux types de lamines par deux fabriques cristallines distinctes.

– *Lamines brunes et translucides.* – Elles sont composées de calcite de fabrique palissadique compacte et peu poreuse. Les cristaux de 0,3 à 0,7 mm de large et jusqu'à 1 mm de haut sont orientés perpendiculairement à la stratification. On remarque une continuité optique d'une lamine à l'autre (*photo. 2*).

– *Lamines claires et opaques.* – Vues au microscope optique, elles ont un aspect assez confus. Les cristaux, comme précédemment, sont palissadiques, mais ici la porosité intercristalline est plus grande. Vue à la loupe binoculaire, elles ont un aspect fibreux d'où le qualificatif de fabrique palissadique fibreuse et poreuse. L'un des principaux caractères de ces lamines est la présence d'un niveau brun et diffus qui présente les caractères optiques de la matière organique (*photo. 2*). Des observations au MEB et à la microsonde mettent en évidence la différence de porosité intercristalline entre les deux fabriques; la matière organique, quant à elle, n'est pas visible.

Signification environnementale des lamines. – Des alternances de lamines claires et sombres ont été observées dans des dépôts travertineux et sont liées à la succession d'étapes physiologiques d'algues incrustantes associées à une intervention bactérienne

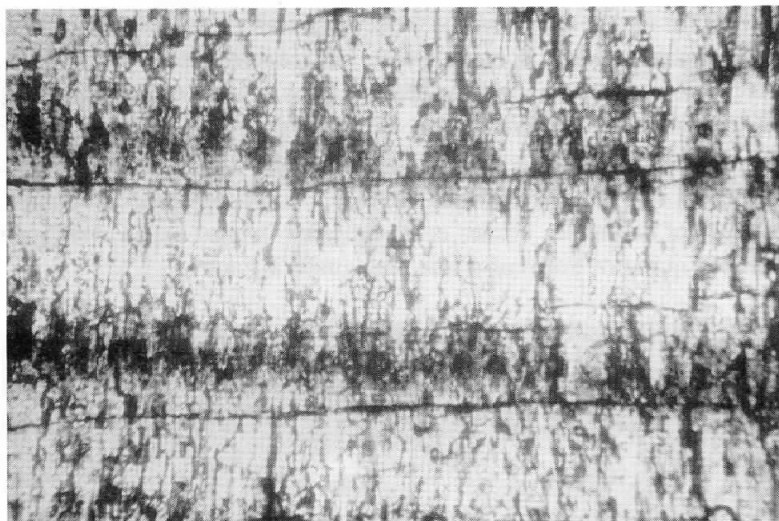


Photo. 2. – Vue microscopique d'alternances de lamines de fabrique palissadique compacte (translucides) et de lamines de fabrique palissadique poreuse (là où se trouvent les niveaux bruns de matière organique) (largeur du champ = 4 mm, GOD-STM1).

Photo. 2. – Microscopic view of alternations of compact palisadic fabric (translucent) and porous palisadic fabric laminae (where the brown levels of organic matter are located) (width of the field = 4 mm, GOD-STM1).

(Adolphe, 1987). Cependant, les faciès que nous décrivons (représentant ceux du tunnel et ceux de deux grottes belges), mise à part une stalagmite au faciès très particulier (présence de soufre en grande quantité et de filaments blancs), ne montrent aucune participation bactérienne et sont directement dépendants des conditions physico-chimiques de la précipitation de la calcite.

L'observation et l'expérimentation de quelques auteurs sur la cinétique de la précipitation de la calcite montrent l'influence de divers paramètres environnementaux sur les fabriques cristallines des spéléothèmes. Ainsi, le degré de minéralisation de l'eau de percolation et la présence plus ou moins grande de l'ion Mg^{2+} jouent sur l'habitus cristallin et sur la vitesse de croissance des spéléothèmes (Gonzalez, 1992; Folk, 1974). La calcite palissadique est souvent associée à une croissance rapide, alors que la calcite où les cristaux ont diverses orientations est associée à une croissance plus lente [calcite « length fast » et « length slow » (Folk, 1976)]. Certaines fabriques cristallines ont été classées selon la densité et la répartition de leurs pores intercristallins et de leurs inclusions (Mills, 1965). Leur origine est liée à une différence de degré de coalescence, lui-même dépendant des conditions environnementales (Kendall, 1977; Kendall, 1978). Ainsi, lorsque la croissance est lente (débit et/ou minéralisation plus faible), la coalescence cristalline latérale est plus poussée et génère une calcite plus compacte. Inversement, lorsque les conditions pour une croissance rapide sont réunies, la coalescence latérale est moins développée et le faciès pétrographique de la calcite est plus poreux. La morphologie de la surface de croissance est aussi un facteur qui influence la fabrique cristalline d'une concrétion. En effet, celle-là conditionne l'épaisseur du film d'eau à partir duquel a lieu la précipitation. Or ce dernier influe sur la dimension et la forme des cristaux de calcite et sur la vitesse de croissance (Dreybrodt, 1980; Dreybrodt, 1981; Genty, 1992). Des vitesses de croissance verticale ont été calculées sur plusieurs concrétions à partir des résultats de datations uranium-thorium et à partir du comptage des lamines. Les résultats montrent que les vitesses sont maximales (5 à 10 cm/100 ans), là où les lamines de calcite claires et poreuses

sont dominantes (épaisseurs plus grandes que celles des lamines compactes). Inversement, lorsque les lamines translucides et compactes dominent, les vitesses de croissance sont plus faibles (1 à 2 cm/100 ans – travaux en cours). Ainsi, le déficit hydrique de l'hiver 1975 et de la première moitié de 1976, en Belgique, semble avoir été enregistré dans les stalagmites étudiées sous la forme d'une lamine sombre translucide beaucoup plus épaisse que la lamine claire et poreuse (fig.).

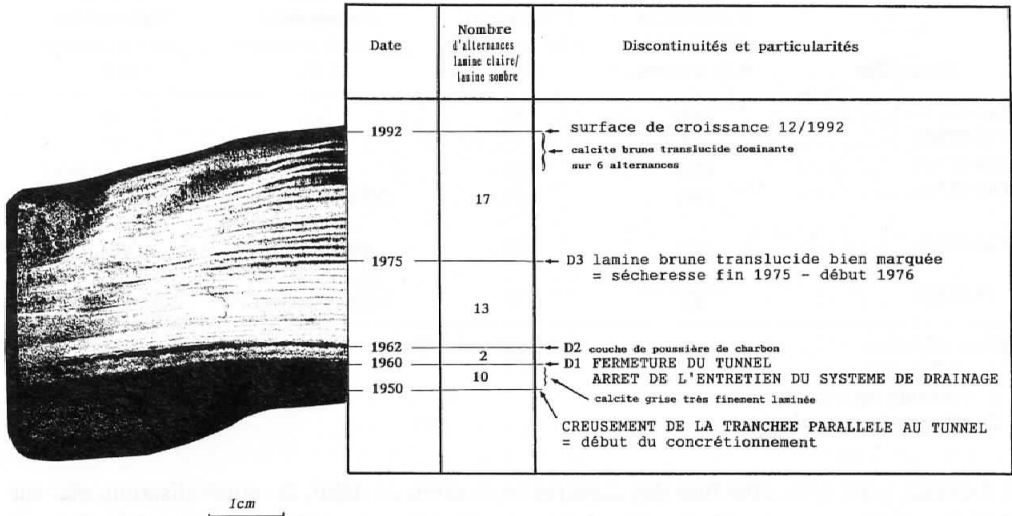


Fig. – Comptage des lamines de la stalagmite GOD-STM2 et interprétation en relation avec l'histoire du tunnel.
Fig. – Laminae enumeration of the GOD-STM2 stalagmite and interpretation in relation to the tunnel's history.

Toutes ces observations montrent que les lamines de fabrique palissadique fibreuse et poreuse correspondraient à une croissance cristalline plus rapide que celle des lamines de fabrique palissadique compacte.

La température, le pH, la pression partielle de CO₂ dans l'eau et dans l'air, le débit, l'épaisseur du film d'eau sur la surface de croissance, la concentration des divers ions, la présence d'éléments trace, etc., sont autant de facteurs à prendre en compte pour comprendre la cinétique de croissance des spéléothèmes. Même si l'on ne connaît pas tous ces paramètres pour les stalagmites étudiées, il apparaît nettement que les alternances de lamines sont liées à des alternances de facteurs environnementaux, eux-mêmes dépendants plus ou moins directement des variations climatiques.

Ces variations pétrographiques sont-elles le reflet de changements climatiques pluriannuels (changements globaux du climat), ponctuels (orages...) ou saisonniers ?

Comptage des lamines. – C'est en dénombrant les alternances de lamines opaques et translucides sur les six stalagmites du tunnel que nous montrons qu'il s'agit, ici, d'alternances saisonnières. Les comptages entre les principales discontinuités montrent tous un nombre d'alternances très voisin (tableau I). Prélevées en décembre 1992, on peut ainsi déterminer la date du début du concrétionnement qui se situe aux environs de 1950 (fig.). Or, c'est à cette époque que le creusement d'une tranchée parallèle au tunnel, destinée à faire passer un canal plus grand, a totalement modifié les écoulements d'eau souterrains. Quelques années plus tard (1960), le tunnel a été fermé et le système de drainage abandonné provoqua une arrivée d'eau massive vers le tunnel.

Si le caractère annuel d'une alternance lamine opaque/lamine translucide paraît probable, il semble délicat, pour l'instant, d'attribuer une saison particulière à chaque type de lamine

TABLEAU I

Comptage du nombre d'alternances de lamines de six stalagmites entre les principales discontinuités (D1, D2, D3, voir fig.).

Enumeration of laminae alternations of six stalagmites between the principal discontinuities (D1, D2, D3, see fig.).

Échantillon	Nombre d'alternances entre la base et le sommet	Nombre d'alternances entre le sommet et D1	Nombre d'alternances entre le sommet et D2	Nombre d'alternances entre le sommet et D3
GOD-STM1	(40)	32	30	17
GOD-STM2	42	32	30	17
GOD-STM4	(39)	32	30	D3 non observé
GOD-STM6	(44)	(34)	D2 non observé	plusieurs D3 12, 17
GOD-STM8	(44)	34	plusieurs D2 26, 28, 30, 32	17
GOD-STM9	42	32	D2 non observé	D3 non observé
Valeurs moyennes	42	32	30	17

() Valeurs approximatives.

() *Approximated values.*

(il faudrait, pour cela, effectuer des mesures en continu de débit, de minéralisation, etc. sur plusieurs années; de plus, la dernière lamine, active lors du prélèvement, est difficilement identifiable). Cependant, la signification environnementale des lamines opaques poreuses suggère que ces dernières se sont formées pendant une période de débit d'eau élevé et de forte minéralisation. Le calcul du bilan hydrique de la région montre que l'excédent hydrique est maximum en hiver et pratiquement nul en été (le tunnel étant au maximum à 30 m de profondeur, les variations de l'excédent hydrique influent probablement sur le débit de percolation). La minéralisation de l'eau est maximum au printemps, lorsque l'activité biopédologique est la plus élevée (la forte $p\text{CO}_2$ produite par l'activité biologique rend les eaux plus agressives vis-à-vis du carbonate de calcium). Ce type de lamine se serait donc développé en hiver et/ou au printemps. Des marquages, en cours, permettront de le vérifier.

MISE EN ÉVIDENCE D'ALTERNANCES ANNUELLES DANS DES STALAGMITES HOLOCÈNES. – Deux stalagmites datées au ^{14}C ont été mises à notre disposition. Les résultats des datations ^{14}C effectuées sur les concrétions ont dû être corrigés à cause du carbone mort des formations calcaires encaissantes (facteur de correction $q = 0,85$; Gewalt, 1985 et inédits: M. Gewalt, B. Bastin). La première concrétion est une stalagmite cierge de plus de 2 m de haut (PNST4, grotte du Père-Noël – Belgique). Elle présente une structure interne laminée en plateau (lamines horizontales parallèles). Le nombre d'alternances de lamines opaques et translucides, compté entre les trois datations, est cohérent avec les durées calculées d'après les dates ^{14}C . Pour 1 200 ans, nous comptons 994 alternances et pour 2 300 ans, nous avons 1 756 alternances (tableau II). Les lacunes dues au sciage de la concrétion en dix morceaux ainsi que les ralentissements de croissance (lamines non visibles) et les hiatus expliquent les différences observées.

La deuxième stalagmite (VKSM1, grotte Véronika, Belgique), plus trapue (30 cm de haut et 10 cm de large) présente de fines lamines ondulées, bien visibles sur les bordures. Entre les deux dates ^{14}C mesurant une durée de 660 ans, nous avons compté 515 alternances. Là

TABLEAU II

Comptage du nombre d'alternances lamines opaques/lamines translucides de deux stalagmites holocènes.
Comparaison avec leur durée de croissance calculée à partir des dates ^{14}C .

*Enumeration of opaque/translucent laminae alternations of two Holocene stalagmites.
Comparison with their growth duration calculated with ^{14}C .*

Échantillon	Ages ^{14}C corrigés ans BP (M. Gewalt, 1985)	Durée calculée d'après ^{14}C années	Nombre d'alternances de lamines
PNST4	5 210 $\pm$ 110		
		1 200	994
	6 410 $\pm$ 110	2 300	1 756
	8 710 $\pm$ 115		
VKSM1	470 $\pm$ 50		
		660	515
	1 130 $\pm$ 50		

aussi, il y a une bonne adéquation entre le nombre de lamines et la durée de croissance. Deux hiatus marqués par la présence de fins éléments détritiques piégés dans la calcite peuvent expliquer les différences.

CONCLUSION. – Le caractère annuel d'un couple lamine opaque/lamine translucide semble probable. Des travaux, déjà anciens, l'avaient évoqué (Broecker, 1960 ; Pielsticker, 1970 ; Blanc, 1972). Deux travaux, en cours, permettront de confirmer cette hypothèse. Le premier consiste à marquer les concrétions et à les prélever quelques années plus tard. Le second est de doser les isotopes de l'oxygène et du carbone pour détecter une éventuelle signature saisonnière (variation de température et d'activité biologique dans le sol). Les premiers résultats concernant les mesures isotopiques confirment l'alternance saisonnière des lamines de croissance (travaux en cours de publication). Ces résultats devraient permettre des reconstitutions de paléoenvironnements continentaux très précises. On peut envisager de faire des études séquentielles comme dans les varves, avec l'avantage, ici, de pouvoir remonter plus loin dans le passé, car les dépôts endokarstiques sont souvent mieux préservés des agents érosifs extérieurs. De plus, il est possible de les caler stratigraphiquement jusqu'à 350 000 ans grâce à la datation uranium-thorium. L'étude fréquentielle des lamines (sur leur épaisseur et sur leur coloration) par des méthodes adaptées, telles que le traitement numérique d'images, pourrait faire ressortir des cycles de précipitation eux-mêmes liés aux cycles climatiques (des travaux en cours montrent qu'une stalagmite holocène de la grotte de Han-sur-Lesse a enregistré les cycles solaires). Des travaux récents ont mis en évidence la présence de bandes de luminescence annuelles au sein des concrétions stalagmitiques (Shopov, 1990 ; Shopov, 1991 ; Baker, 1993). Ces résultats, joints aux nôtres, montrent tout l'intérêt des concrétions endokarstiques pour l'étude des paléoclimats.

Les marqueurs de paléoclimats continentaux sont rares. Parmi eux, les spéléothèmes s'avèrent être des enregistreurs de paléoenvironnements d'une grande finesse.

Ces recherches ont été effectuées, sous l'impulsion de R. Maire (GEGET/CNRS, 33405 Talence), à la Faculté Polytechnique de Mons (Belgique), au Centre d'Etudes et de Recherches Appliquées au Karst (CERAK, Dr Y. Quinif) avec la participation du laboratoire de Géologie (Pr J. M. Charlet) et du Service d'Instrumentation (Pr A. Blave). Certains échantillons nous ont été procurés par B. Bastin, G. Deflandre, C. Ek et M. Gewalt. Je remercie toutes ces personnes pour leur aide.

Note remise le 28 juin 1993, acceptée après révision le 30 septembre 1993.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- J. P. ADOLPHE, Formations carbonatées continentales, in *Géologie de la Préhistoire, GéoPré*, 1987, p. 197-224.
- T. C. ATKINSON, R. S. HARMON, P. M. SMART et A. C. WALTHAM, Paleoclimatic and geomorphic implications of $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ on speleothems from Britain, 272, n° 5648, 1978, p. 24-28.
- M. BAKALOWICZ, T. C. ATKINSON, R. S. HARMON, P. M. SMART et A. C. WALTHAM, La géochimie isotopique de sédiments karstiques : apports, problèmes et perspectives, *Annales Scient. de l'Univ. de Besançon - Géologie*, Mémoire n° 1, 1982, p. 227-239.
- A. BAKER, P. L. SMART, R. L. EDWARDS et D. A. RICHARDS, Annual growth banding in a cave stalagmite, *Nature*, 364, 1993, p. 518-520.
- B. BASTIN, L'analyse pollinique des stalagmites : une nouvelle possibilité d'approche des fluctuations climatiques du Quaternaire, *Annales de la Soc. Géol. de Belgique*, 101, 1978, p. 13-19.
- J. BLANC, Recherches sur les planchers stalagmitiques et les remplissages anciens des grottes du massif de Marseilleveyre, *Bull. du Musée d'Anthropologie préhistorique de Monaco*, n° 18, 1972, p. 5-41.
- W. S. BROECKER et E. A. OLSON, Radiocarbon Measurements and Annual Rings in Cave Formations, *Nature*, 185, 1960, p. 93-94.
- P. CABROL, Contribution à l'étude du concrétionnement carbonaté des grottes du sud de la France - Morphologie genèse diagenèse, *Thèse*, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, CERGA Montpellier 1987, 275 p.
- W. DREYBRODT, Deposition of calcite from thin films of natural calcareous solutions and the growth of speleothems, *Chemical Geology*, 29, 1980, p. 80-105.
- W. DREYDRODT, The kinetics of calcite precipitation from thin films of calcareous solutions and the growth of speleothems: revisited, *Chemical Geology*, 32, 1981, p. 237-245.
- R. L. FOLK, The natural history of crystalline calcium carbonate: effect of magnesium content and salinity, *J. of Sed. Pet.*, 44, n° 1, 1974, p. 40-53.
- R. L. FOLK et R. ASSERETO, Comparative fabrics of Length-slow and Length-fast calcite and calcitized aragonite in a Holocene speleothem, Carlsbad cavern, New-Mexico, *J. of Sed. Pet.*, 46, n° 3, 1976, p. 486-496.
- D. C. FORD et R. S. HARMON, Uranium-series dating of speleothems: reply, *Bull. National Speleological Soc.*, 38, n° 2, 1976, p. 38.
- D. GENTY, Les spéléothèmes du tunnel de Godarville (Belgique) - Un exemple exceptionnel de concrétionnement moderne - Intérêt pour l'étude de la cinétique de la précipitation de la calcite et de sa relation avec les variations d'environnement, *Spéléochronos*, n° 4, CERAK, Faculté Polytechnique de Mons, Belgique, 1992, 27 p.
- M. GEWELT, Cinétique du concrétionnement dans quelques grottes belges : apport des datations ^{14}C et $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, *Annales Soc. Géol. de Belgique*, 108, 1985, p. 267-273.
- M. GEWELT et E. JUVIGNE, Les « téphra de Remouchamps », un nouveau marqueur stratigraphique dans le Pléistocène supérieur daté par $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dans des concrétions stalagmitiques, *Annales Soc. géol. de Belgique*, 109, 1987, p. 489-497.
- L. A. GONZALEZ, S. J. CARPENTER et K. C. LOHMANN, Inorganic calcite morphology: roles of fluid chemistry and fluid flow, *J. of Sed. Pet.*, 62, n° 3, 1992, p. 383-399.
- J. M. GRAFELLE, L'homme et le milieu souterrain, *Mémoire d'écologie humaine*, Université de Bordeaux-I, 1980, 194 p.
- R. S. HARMON, P. THOMPSON, H. P. SCHWARCZ et D. C. FORD, Uranium-series dating of speleothems, *Bull. National Speleological Soc.*, 37, n° 2, 1975, p. 21-33.
- R. S. HARMON, H. P. SCHWARCZ et D. FORD, Stable isotope geochemistry of speleothems and cave water from the flint ridge-mammoth cave system Kentucky: implications for terrestrial climate change during the period 230,000 to 100,000 years BP, *J. of Geology*, 86, 1978, p. 373-394.
- C. A. HILL et P. FORTI, *Cave minerals of the world*, National Speleological Society, Huntsville, Ala., USA, 1986, 238 p.
- A. C. KENDALL et P. L. BROUGHTON, Discussion: calcite and aragonite fabrics, Carlsbad cavern: in R. L. FOLK et R. ASSERETO éd., *Jour. Sed. Petrology*, 46, p. 486-496, *J. of Sed. Pet.*, 47, n° 3, 1977, p. 1397-1400.
- A. C. KENDALL et P. L. BROUGHTON, Origin of fabrics in speleothems composed of columnar calcite crystals, *J. of Sed. Pet.*, 48, n° 2, 1978, p. 519-538.
- A. G. LATHAM, H. P. SCHWARCZ et D. C. FORD, Paleomagnetism of stalagmite deposit, *Nature*, 280, n° 5721, 1979, p. 383-385.
- R. MAIRE, La haute montagne calcaire, *Thèse d'État*, Karstologia, Mémoire n° 3, 1990, 731 p.
- J. P. MILLS, Petrography of selected speleothems of carbonate caverns, *Thèse*, Brigham Young University, University of Kansas USA, 1965, 47 p.
- K. H. PIELSTICKER, Jahresschichten in Anschliffproben von Höhlensinter, *Aufschluss*, 21, 1970, p. 211.
- Y. QUINIF, La datation Uranium-Thorium, *Spéléochronos*, n° 1, 1989, p. 3-22.
- H. P. SCHWARCZ et D. C. FORD, Continental Pleistocene climatic variations from speleotherm age and isotopic data, *Science*, 184, 1974, p. 893-895.
- Y. Y. SHOPOV et V. DERMENDJIEV, Microzonality of luminescence of cave flowstones as a new indirect index of solar activity, *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 43, 1990, p. 8-11.
- Y. Y. SHOPOV, L. GREGORIEV, L. TSANKOV, V. DERMENDJIEV et G. BUYUKLIEV, Methods for research of luminescence of cave minerals and speleothem records of the paleoclimate and solar activity in the past, *Newsletter IUGS*, Institute of karst geology, Guilin, China, Project 299, 1991, p. 52-63.
- I. J. WINOGRAD, T. B. COPLEN, J. M. LANDWEHR, A. C. RIGGS, K. R. LUDWIG, B. J. SZABO, P. T. KOLESAR et K. M. REVESZ, Continuous 500,000 Year Climate Record from Vein Calcite in Devils Hole, Nevada, *Science*, 258, 1992, p. 255-258.