

LES LAMINES DE CROISSANCE DES SPELEOTHEMES : ORIGINE ET INTERET PALEOCLIMATIQUE

Dominique GENTY¹, Guy DEFLANDRE², Yves QUINIF³ & Sophie VERHEYDEN⁴

RESUME. Les concrétions souterraines carbonatées, appelées aussi spéléothèmes, ont commencé à être utilisées pour reconstituer les paléoclimats il y a plus de vingt cinq ans. Malgré une chronologie performante, les signaux paléoclimatiques, essentiellement issus de l'analyse des isotopes stables (O, C), sont restés qualitatifs, principalement à cause de la méconnaissance de la composition isotopique de l'eau au moment de la précipitation de la calcite. Ceci explique, en partie, le développement restreint de leur étude jusqu'à récemment. Cependant, la mise en évidence de lamines de croissance annuelles, visibles et luminescentes, dans la structure interne de plusieurs concrétions de pays tempérés, semble avoir donné un regain d'intérêt à ce type de dépôt continental.

Le principal objectif de ce travail est de faire une mise au point des connaissances concernant les lamines de croissance des spéléothèmes et de montrer leur intérêt dans l'étude des paléoenvironnements. Après un rappel historique et bibliographique, nous décrivons les deux principaux types de lamine: des lamines blanches et poreuses (type BP) et des lamines sombre et compactes (type SC). L'origine de la lamination n'est pas encore clairement établi; elle pourrait être due à une variation de l'épaisseur du film d'eau recouvrant la surface de croissance, elle-même liée à une variation du débit ou à la variation saisonnière de la concentration en matière organique de l'eau de percolation. Les premières interprétations des mesures faites à partir d'une station souterraine automatisée (grotte du Père Noël, Belgique) mettent en évidence des cycles saisonniers dans le débit et dans la conductivité de l'eau qui s'écoule d'une stalactite: le débit augmente fortement à la fin de l'automne et est maximum en hiver; il décroît ensuite plus ou moins régulièrement; la conductivité semble suivre les mêmes variations. Des signaux paléoclimatiques peuvent être extraits des lamines de croissance: une bonne corrélation a été trouvée entre l'épaisseur des lamines de deux stalagmites modernes d'un tunnel (tunnel de Godarville, Belgique) et les données météorologiques d'une station située à 10km du site. L'analyse des isotopes stables (O, C) effectuée dans chaque lamine de croissance des stalagmites du même tunnel révèle un signal saisonnier lié à la variation de la température pour l'oxygène. Enfin l'origine des cyclicités observées dans la succession des lamines de croissance est discutée.

MOTS-CLES: spéléothème, paléoclimat, stalagmite, lamine.

ABSTRACT. Speleothem growth laminae: origin and paleoclimatic interest. Speleothems have been used for paleoclimatic reconstitutions for more than 25 years. Despite a high resolution chronology, climatic signals, principally from stable isotope analysis, have remained qualitative because of the difficulty to know the isotopic composition of the parent seepage water. However, recent studies focusing on the presence of annual growth laminae, visible or luminescent, in the internal structure of several speleothems from temperate countries, have stimulated interest in such deposits.

We will discuss recent data about speleothem growth laminae and show their interest for paleoclimatic studies. After a short bibliographic review, we describe the two main kinds of growth laminae: the white porous laminae (BP) and the dark compact laminae (SC). The cause of the lamination is still not clear; it could be due to a seasonal variation in

¹ Université de Paris-Sud, Laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique, URA 723, CNRS, Bâtiment 504 - F-91405 Orsay Cedex, France.

² Route de Resteigne 12 - 5580 Auffe.

³ Faculté Polytechnique de Mons, Service de Géologie, Rue de Houdain 9 - 7000 Mons.

⁴ Vrije Universiteit Brussel, Laboratorium voor Stabiele Isotopen Geochemie, Pleinlaan 2 - 1050 Brussel. «Aspirant du Fonds national belge de la Recherche scientifique (FWO)».

the water film thickness covering the growth surface, linked to the flow rate, or to the seasonal variation in the organic matter content of the seepage water. First results from an automatic underground meteorological station (Père Noël Cave, Belgium) show seasonal variations in the dripping flow rate and in the water conductivity: the flow rate increases at the end of Fall, stays high in Winter and progressively decreases in Spring and Summer; the conductivity follows the same evolution. Paleoclimatic signals can be extracted from the growth laminae: we found a good correlation between the growth laminae thickness of two modern stalagmites from a tunnel (Godarville, Belgium) and the pluviometry (and water excess) from a nearby meteorological station. Stable isotope (O, C) analysis of each growth laminae in samples from the same tunnel also reveal a seasonal signal which is linked to temperature variation. Finally, the cause of laminae cyclicity observed in several speleothems is discussed.

KEYWORDS: speleothem, paleoclimate, stalagmite, laminae.

1. INTRODUCTION - RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE

Peu d'auteurs se sont attachés à décrire les lamines des spéléothèmes et à tenter d'interpréter leur formation, voici quelques exemples présentés dans un ordre chronologique.

Allison (1926) explique la formation des alternances de bandes claires et sombres des stalagmites de deux façons. La première s'applique aux stalagmites isolées de l'atmosphère extérieur (loin des entrées) et dont le sol sus-jacent contient du fer. Durant la période sèche, le fer du sol s'oxyde. Ce n'est que lors de la période humide qu'il est transporté dans le karst par l'eau d'infiltration et qu'il s'incorpore dans la stalagmite sous la forme d'oxydes de fer. La bande colorée en rouge ou brun représente alors la période humide, la bande plus claire représente la période sèche (cas d'une stalagmite de «Bear's Cave», Pennsylvanie). La deuxième explication concerne les stalagmites exposées aux conditions extérieures, c'est-à-dire proches des entrées ou sous des abris. La bande sombre est alors liée à la saison sèche qui apporte des poussières sur la surface de croissance et la bande claire et liées à la période humide (cas d'une stalagmite de «Experimental Mine», Pennsylvanie). Dans les deux cas, une paire de bandes représente le dépôt d'une année. L'auteur applique cette dernière hypothèse à une stalagmite de «Jacob's Cavern» du Missouri. Il calcule ensuite l'épaisseur moyenne d'une alternance annuelle (0.8mm) et en déduit la durée de croissance de la stalagmite (1213 années). Même s'il est tout à fait discutable (une grande partie des stalagmites laminées se trouvent dans des grottes bien isolées des courants atmosphériques extérieurs et trouvent l'origine de leur lamination ailleurs), ce travail est l'un des premiers à proposer une interprétation à la formation des lamines des spéléothèmes.

En 1952, Orr étudie le dépôt de calcite sur plusieurs clous abandonnés dans une grotte de Californie 29 ans auparavant («Moaning Cave»). D'une épaisseur

moyenne de 1mm, la couche de calcite ayant recouvert un des clous est composée de 29 «anneaux» de croissance; ce qui correspond exactement à leur durée de séjour dans la grotte. D'autres clous, trouvés dans les mêmes conditions ne montrent que 14, 17 ou 20 anneaux de croissance. Par ailleurs, en comparant les épaisseurs de couches de croissance aux données pluviométriques, Orr attribue les couches de croissance les plus fines aux périodes les plus sèches. Cependant, il remarque que les épisodes très humides ne sont pas enregistrés ou alors n'ont laissé qu'une couche très mince; il explique que lorsque l'eau s'infiltré trop rapidement elle n'a pas le temps de se charger en carbonate de calcium et peut même être agressive vis à vis de la calcite lorsqu'elle arrive sur le spéléothème. Orr cherchait à dater des restes préhistoriques à partir des dépôts de calcite les recouvrant. Les différentes épaisseurs de calcite trouvées sur les clous de Moaning Cave lui ont permis d'évaluer des vitesses de croissance allant de 0.008mm/an à 0.03mm/an. Appliquant ces vitesses à un dépôt travertineux de 86mm d'épaisseur entourant un fémur humain, il calcule un âge minimum: $86\text{mm} \times 29$ (nombre d'années par mm) = 2494 années. Sur le même échantillon il compte 1406 «anneaux» de croissance.

C'est sur le même échantillon de Moaning Cave que Broecker et Olson (1960) comparent le nombre d'«anneaux» de croissance avec la durée de croissance calculée à partir de mesures ^{14}C faites au sommet et à la base du dépôt. Aux 1406 couches de croissance comptées par Orr (1952) correspond une durée de croissance d'environ 1400 ans; ceci démontre la nature annuelle des bandes de croissance du dépôt. Il est intéressant de noter aussi que les auteurs estiment l'activité du ^{14}C initiale à 0.915 ce qui signifie que le carbone mort dissous issu de la formation calcaire encaissante ne représente que 9 % du carbone précipité.

Notons, au début des années soixantes, les travaux de Kirchmayer (1962) sur des perles des cavernes provenant d'une mine désaffectée en Autriche. L'auteur a

dénombré et mesuré les lamines de croissance de pisolites et établi des relations avec les données climatiques; il attribue les lamines claires à l'été et les lamines sombres à l'hiver. Ces travaux ont été poursuivis quelques années plus tard en collaboration avec Hahne et Ottemann (1968).

Blanc (1972) pousse plus loin l'analyse des lamines des spéléothèmes et utilise le terme d'«analyse dendrochronologique», terme aussi utilisé par Gilly *et al.* (1971) concernant les incrustations de l'aqueduc romain de Nîmes. En observant les planchers stalagmitiques pliocènes des grottes du massif de Marseilleveyre (Bouches-du-Rhône, France), il définit trois unités: 1) les «varves» ou micro-lits de calcite dont l'épaisseur varie de 0.1 à 1 mm (on fait ici la supposition qu'il s'agit bien de dépôts annuels, c'est-à-dire deux micro-lits par an); 2) les «faisceaux» de 2 à 5 cm d'épaisseur et qui sont composés généralement de 9 à 12 varves, plus rarement de 20 à 30. L'auteur fait le parallèle entre ces faisceaux et le cycle solaire de 11 ans ou cycle de Schwabe; 3) les «zones» de quelques centimètres à 10 cm d'épaisseur englobent plusieurs faisceaux qui comprennent eux-mêmes entre 80 et 90 varves, ce qui suscite à l'auteur l'hypothèse d'un lien entre ces zones et le cycle solaire de Gleisberg. Ce même auteur approfondit plus tard son analyse des lamines de quelques spéléothèmes du sud-est de la France en dressant des «laminogrammes» (épaisseurs en fonction du nombre de lamines) et en calculant des spectres fréquentiels et des modèles prédictifs qu'il compare aux variations climatiques. Il établit notamment un lien entre les lamines épaisses (de 0,7 à 1,1mm) et blanches avec les périodes les plus humides et il reconnaît le cycle solaire de Gleisberg (entre 80 et 90 ans) ainsi que celui de la QBO (Quasi-Bienal Oscillation) (Blanc, 1992).

L'étude pétrographique détaillée d'une stalagmite de Drotzky's Cave au Botswana donne une autre explication de la formation des lamines en zone semi aride (Railsback *et al.*, 1994). Cette stalagmite est composée d'une alternance de lamines de calcite et d'aragonite. Une meilleure corrélation entre les épaisseurs des lamines de calcite avec les lamines d'aragonite sus-jacente qu'avec celles qui sont dessous permet dans un premier temps de supposer que le couple annuel est calcite et aragonite. Ce dernier se forme pendant la saison des pluies entre octobre et mai (où 99% des pluies tombent). Les épaisseurs des différents types de lamine sont comparées avec les données de station météorologiques situées à plus de 100 km du site. Une assez bonne corrélation est trouvée entre les épaisseurs des lamines de calcite et la pluviométrie en hiver ($r=0,53$) ainsi qu'entre les épaisseurs des lamines d'aragonite et la température d'été

et d'automne ($r=0.67$ et 0.57). Les auteurs expliquent donc la formation du couple annuel calcite-aragonite par une augmentation progressive du taux d'évaporation lorsque la température extérieure augmente, ce qui augmente le rapport Mg/Ca et provoque la précipitation de l'aragonite à la suite de la calcite. Une périodicité de 18 années est aussi mentionnée sur les épaisseurs des lamines de calcite et sur les données pluviométriques.

Récemment, la nature luminescente de la calcite a été mise à profit pour détecter des bandes de croissance luminescentes dans les spéléothèmes (Baker *et al.*, 1993; Shopov et Dermendjiev, 1990; Shopov *et al.*, 1991, 1994). La luminescence est liée à la présence de matière organique piégée dans la calcite et apportée par l'eau d'infiltration. Cette matière organique (acides humiques et fulviques) semble provenir de l'activité végétale et pédologique du sol sus-jacent. Dans un article à l'Académie des Sciences Bulgares, Shopov et Dermendjiev (1990) font un lien entre la densité de luminescence d'un plancher stalagmitique et l'activité solaire (nombre de Wolf qui reflète le nombre de tâches et leur groupement, activité ^{14}C); aux fortes luminescences correspond une forte activité solaire c'est-à-dire un nombre de tâches élevé et une faible activité ^{14}C . Les variations relatives de luminescence semblent suivre les cycles de 11 ans (cycle de Schwabe) et de 80-90 ans (cycle de Gleisberg).

Baker (1993) s'est attaché à démontrer que les bandes luminescentes d'une stalagmite de Grande Bretagne sont annuelles. Il a comparé la vitesse de croissance déduite du comptage des bandes luminescentes avec la vitesse de croissance calculée à partir des dates Uranium/Thorium faites en spectrométrie de masse.

2. DESCRIPTION DES DEUX GRANDS TYPES DE LAMINES, LIEN AVEC LES DEUX PRINCIPALES FABRIQUES CRYSTALLINES -CAS DU POINT D'IMPACT

L'observation de sections polies de nombreux spéléothèmes provenant de Belgique, de Grande Bretagne, de France et d'Amérique du Nord, entre autres, montre que l'on retrouve partout deux grands types de lamines: des **lamines blanches opaques et poreuses** (type BP pour blanches poreuses) et des **lamines sombres, compactes translucides** en lumière transmise (type SC pour sombres compactes) (Fig. 1A; Genty, 1992, 1993 et travaux non publiés). Ces lamines ont une épaisseur souvent comprise entre 0,1 et 1mm. Sont exclus ici les cas particuliers des lamines contaminées par des particules (argile, charbon) ou liées à une activité biologique (bactéries, champignons).

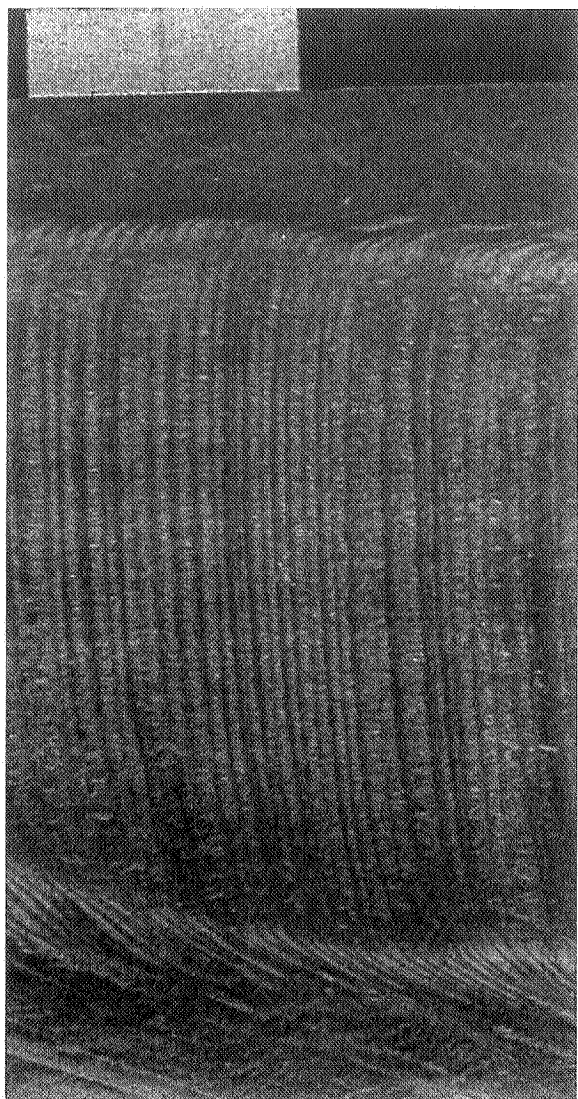


Figure 1-A. Section polie verticale d'une stalagmite holocène de la grotte du Père Noël (Belgique). Noter l'alternance très régulière entre les lamines blanches poreuses (type BP) et les lamines sombres compactes (type SC); une paire de lamines représente le dépôt d'une année (échelle centimétrique).

Figure 1-A. Vertical polished section of a holocene stalagmite from the Père Noël cave (Belgium). Note the very regular alternation of white porous (type BP) and dark compact laminae (type SC); a pair of these laminae developed in one year (centimetric scale).



Figure 1-B. Section polie verticale d'une stalagmite holocène de la grotte Véronika (Belgique). Noter le passage d'une fabrique cristalline blanche et poreuse sur les bords à une fabrique cristalline sombre et compacte au centre. On remarque aussi que les lamines s'incurvent au centre pour devenir tangentes à la grande vacuole, ce qui démontre que celle-ci est synsédimentaire (échelle centimétrique).

Figure 1-B. Figure 1-B. Vertical polished section of a holocene stalagmite from the Véronika cave (Belgium). Note the progressive change from a white porous crystalline fabric at the edge to a dark compact one at the center. Note also the bent shape of the laminae near the central vug which means that this vug was formed during stalagmite growth (centimetric scale).

Parallèlement, il existe aussi de nombreux spéléothèmes où aucune lamination n'est visible, et d'autres où les portions laminées et les portions non laminées alternent. Sur ces derniers, les zones de transition entre portions laminées et portions non laminées montrent une variation progressive de l'épaisseur d'un type de lamine; on observe ainsi la diminution du rapport (épaisseur lamines BP/épaisseur lamines SC) jusqu'à ne plus distinguer à l'oeil nu les alternances; on a alors une calcite homogène de **fabrique cristalline sombre et compacte**. Inversement, lorsque l'épaisseur des lamines SC diminue on aboutit à une calcite de **fabrique cristalline blanche opaque**. La zone de transition est parfois marquée par une diminution de la largeur des lamines BP, sans modification des épaisseurs. Enfin, il existe des lamines où les deux types de fabrique cristalline coexistent: la fabrique sombre compacte occupe alors la partie centrale de la stalagmite, autour du point d'impact de la goutte, et la fabrique blanche opaque constitue la périphérie. La partie centrale forme alors un plateau ou une dépression parfois entourant une vacuole (Fig. 1B).

3. ORIGINE DE LA LAMINATION DES SPELEOTHEMES

L'origine des lamines des spéléothèmes n'est pas encore totalement éclaircie. Les hypothèses de Allison (1926) et de Blanc (1972, 1992) ne s'appuient pas sur des mesures en continu des différents facteurs intervenant dans la précipitation de la calcite; ni même d'ailleurs les hypothèses de Railsback *et al.* (1994). De plus elles concernent des environnements différents où les causes de la lamination ne sont peut-être pas les mêmes. Il est donc nécessaire de connaître les variations in situ de ces facteurs, dont les principaux sont les suivants (Dreybrodt, 1980, 1981; Baker, 1993):

- la concentration en calcium de l'eau d'infiltration,
- les conditions hydrodynamiques: débit de percolation, épaisseur du film d'eau recouvrant la surface de croissance,
- la température de l'eau où s'effectue la précipitation,
- la pCO_2 de l'atmosphère de la grotte.

La nature annuelle des alternances des lamines BP et SC sur des stalagmites modernes et sur des stalagmites holocènes a déjà été démontrée (*les alternances de lamines observées dans les stalagmites de tunnels ouverts, souvent ne sont pas annuelles - données non encore publiées*). La lamination est donc la conséquence d'un phénomène saisonnier, mais lequel ?

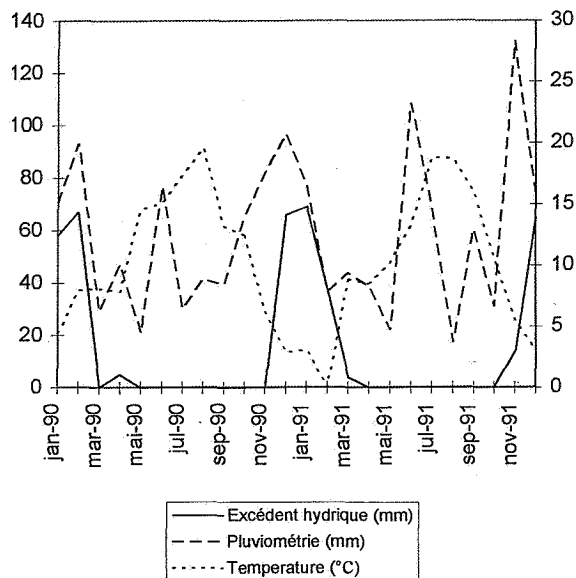


Figure 2. Données météorologiques de la station de Houdeng-Aimeries (à 10 km à l'ouest du tunnel de Godarville, Belgique); l'excédent hydrique a été calculé par la méthode de Thornthwaite. On remarque que la pluviométrie est irrégulière toute l'année et ne présente pas de variations saisonnières marquées; par contre on voit que l'excédent hydrique, qui reflète en grande partie l'eau qui s'infiltrate, montre une variation saisonnière très marquée: il est maximum en hiver (entre novembre et mars).

Figure 2. Meteorological data from the Houdeng-Aimeries station (10 km west from the Godarville tunnel, Belgium); water excess was calculated with the Thornthwaite method. Note the irregularity of the pluviometry and the well marked seasonal signal of the water excess, which is similar to the seepage water. The maximum occurs in Winter (between November and March).

3.1. LES VARIATIONS DU DEBIT

3.1.1. Les variations de l'excédent hydrique

Même dans les régions où la pluie est répartie tout au long de l'année, comme c'est le cas en Belgique, les calculs du bilan hydrique (par le modèle de Thornthwaite, 1954) montrent que l'intensité de l'évapotranspiration module le signal pluviométrique. Ainsi, l'excédent hydrique, qui représente l'eau qui s'infiltrate, calculé pour le site du tunnel de Godarville (Belgique), fait apparaître une saisonnalité bien marquée: le maximum d'excédent hydrique a lieu en hiver (entre novembre et mars), le minimum en été et il est parfois nul plusieurs mois d'été. (Fig. 2).

Cependant, les valeurs de l'excédent hydrique sont issues d'un modèle et ne reflètent pas forcément très bien les conditions réelles d'écoulement souterrain. La présence de réserves d'eau souterraine plus ou moins grandes peuvent pallier au déficit hydrique de l'été et

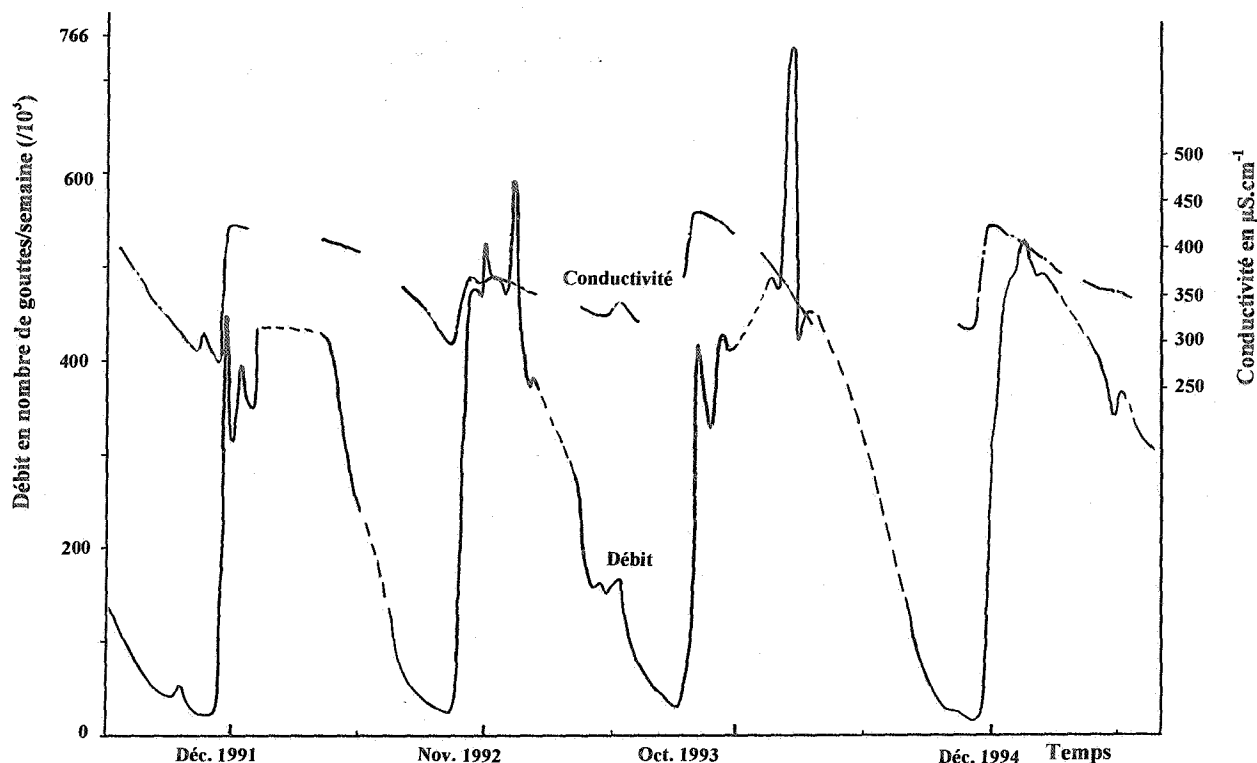


Figure 3. Variation du débit à la sortie d'une stalactite de la Grotte du Père Noël (Belgique). Le débit, mesuré par une station automatisée, présente une variation saisonnière bien marquée: il augmente brusquement à la fin de l'automne, reste élevé en hiver et une partie du printemps, puis décroît progressivement jusqu'à l'automne (les valeurs indiquées ici sont des moyennes hebdomadaires, les lacunes sont en tiretés). La conductivité suit une évolution semblable, avec cependant une décroissance plus précoce en hiver (les lacunes n'ont pas été interpolées pour plus de clarté dans le graphique).

Figure 3. Dripping flow rate variations under a stalactite from the Père Noël cave (Belgium). The flow rate, measured by an automatic station, shows a remarkable seasonal variation: it increases abruptly at the end of Fall, stays high during Winter and a part of Spring, then decreases progressively until Fall (averaged week data, dashed line = no data). Conductivity has a similar evolution except a slight early decrease in Winter.

assurer une alimentation continue au-dessus d'une stalagmite. Des mesures *in situ* faites dans la grotte du Père Noël apportent des informations complémentaires.

3.1.2. Les mesures du débit *in situ* (Grotte du Père Noël, Belgique)

Depuis 1991, Guy Deflandre et Bruno Bastin ont installé dans cette grotte du massif de Han-sur-Lesse (Belgique) une station de mesure automatique sous une stalactite active de la salle de la Chambre à Coucher (environ 60 m de profondeur). Cette station enregistre les paramètres suivants:

- débit en nombre de gouttes et en litres par unité de temps,
- conductivité,
- température de l'air,
- pH,
- pression atmosphérique.

Les mesures sont effectuées toutes les 10 minutes et stockées sur des mémoires ROM amovibles qui sont réutilisées plus tard sur micro-ordinateur. Le débit en nombre de gouttes par unité de temps est mesuré avec une cellule infrarouge positionnée juste cinq centimètres sous l'extrémité de la stalactite.

Malgré plusieurs lacunes d'observation liées à des problèmes techniques, il est possible de reconstituer les variations du débit de la stalactite de la Chambre à coucher sur presque quatre années.

Sur l'ensemble de la période étudiée, entre juillet 1991 et décembre 1994, la variation du débit en nombre de gouttes par unité de temps montre une cyclicité annuelle bien marquée par trois phases successives: 1) une augmentation forte et rapide qui se situe entre la mi-octobre et la mi-décembre; 2) une période de fort débit avec des irrégularités entre l'automne et mars-avril; 3) une lente décroissance entre mars-avril et l'automne (Fig. 3).

On peut définir le début d'un cycle hydrologique souterrain dès l'augmentation du débit en automne (phase 1). Cette phase, qui dure quelques jours (Tableau 1), voit le débit augmenter brusquement pour rester élevé durant tout l'hiver et une grande partie du printemps. Ainsi, entre le 20 et le 26 décembre 1991, le débit passe de 1 go/mn (goutte par minute) à 95 go/mn. A l'automne 1992, la montée est un peu plus lente mais tout aussi forte: le débit passe de 2,3 go/mn le 15 novembre à 39 go/mn le 27 novembre pour atteindre 78 go/mn le 29 décembre. L'année 1993 est caractérisée par une phase de montée précoce qui débute le 8 octobre avec 2,5 go/mn, atteint 11 go/mn le 9 octobre et 41 go/mn le 17 octobre. Le maximum du cycle 1993/1994 arrive plus tard, le 21 février 1994 avec 86 go/mn. Enfin, la montée du cycle 1994/1995 débute le 2 décembre avec 1,5 go/mn pour atteindre 45 go/mn le 30 décembre.

Le début de la phase de décroissance lente (phase 3) reste toujours imprécis du fait des lacunes d'observations; sur le cycle 1991/1992, le débit reste élevé jusqu'au 22 mai 1992 (42 go/mn) et décroît ensuite régulièrement jusqu'au 15 novembre (2,3 go/mn). La phase 3 semble déjà commencée en avril 1993 lorsque l'on observe un maximum le 22 (35 go/mn); l'année 1993 est d'ailleurs ponctuée de nombreuses augmentations du débit de courte durée jusqu'au mois d'août, le tout se trouvant sur une courbe globalement décroissante jusqu'au 8 octobre (2,5 go/mn). Pour les années 1994 et 1995, le début de la courbe de décroissance globale du débit semble arriver plus tôt: les derniers grands maxima arrivent le 21 février pour 1994 (86 go/mn) et le 24 janvier pour 1995 (55 go/mn), ce qui réduirait la phase 2. Cependant, les lacunes importantes du printemps ne permettent pas d'en être absolument sûr.

Les mesures in situ du débit d'une stalactite de la grotte du Père Noël sur quatre années consécutives montrent une variation saisonnière bien marquée. La forme générale de la courbe du débit est semblable à celle d'un hydrogramme de crue ou à celle des débits de certaines résurgences caractérisées par une brusque augmentation puis une lente décroissance correspondant au tarissement (Collignon, 1988).

Comme dans le cas du calcul de l'excédent hydrique au tunnel de Godarville, le débit est maximum en hiver et minimum à la fin de l'été et au début de l'automne. Dans le cas de la stalactite du Père Noël, le débit n'est jamais nul: le minimum de 1 go/mn reste un débit important par rapport à d'autres mesures faites sous terre (Baker, 1993). Le calcul de l'excédent hydrique du tunnel de Godarville pouvant s'appliquer sans trop de modification au site de la grotte du Père Noël (pluviométrie et température voisines), c'est donc une réserve d'eau souterraine qui alimente en continu les concrétions de la Chambre à Coucher. Enfin, il sera

utile de mesurer tout au long de l'année le volume d'une goutte d'eau pour voir si une éventuelle variation de ce volume ne changerait pas l'aspect des variations du débit en litre/unité de temps.

3.2. LES VARIATIONS DE LA CONDUCTIVITE

La conductivité est proportionnelle à la minéralisation: plus l'eau de percolation est chargée en ions, plus la conductivité est élevée. Sur les 4 années d'enregistrement, et malgré les lacunes d'observation, on remarque un comportement saisonnier de la conductivité parallèle à celui du débit: elle augmente fortement en automne puis décroît lentement durant le reste de l'année (Tableau 1).

Cette brusque augmentation de la conductivité est délicate à interpréter. En effet, si elle est proportionnelle à la minéralisation, cela signifie que la concentration en calcium (élément principal dissout dans le cas de la plupart des massifs karstiques) augmente brutalement à la fin de l'automne et au début de l'hiver, et qu'elle est minimum en été et au début de l'automne. Cette observation n'est pas en concordance avec la courbe de concentration du calcium dans l'eau d'un sol où le maximum se situe en été lorsque l'activité biopédologique est importante (Dever *et al.*, 1982). Cela ne correspond pas non plus avec les variations de la pCO_2 qui conditionnent la dissolution du calcaire dont les maxima se situent aussi en été (Ek, 1979; Renault et Brunet, 1981).

Si l'on suppose que les mesures de conductivité n'ont pas été trop perturbées par le dépôt de calcite qui recouvre par moments les électrodes (et tend à décroître la conductivité), alors deux hypothèses pourraient expliquer ces variations saisonnières. La première serait d'attribuer l'augmentation de conductivité à d'autres ions, par exemple issus de la décomposition des feuilles à cette période. La seconde hypothèse est d'expliquer cette augmentation de minéralisation par une «chasse» de l'eau stockée dans le karst; eau infiltrée durant le printemps et l'été et fortement minéralisée grâce à la pCO_2 élevée à cette période; des analyses chimiques complémentaires (par exemple: dosage de la matière organique par laser UV et spectrofluorimétrie; dosage des anions et cations par spectrométrie d'absorption atomique) sont alors nécessaires pour préciser la signification de la conductivité mesurée.

3.3. LES VARIATIONS D'APPORT DE MATIERES ORGANIQUES

Nous n'avons pas, pour l'instant, de mesures directes de la variation de la concentration en matières organiques (MO) des eaux de percolation (en dehors des va-

riations de conductivité présentées ci-dessus et en supposant que la MO les influence). Cependant, il est possible de considérer la variation de luminescence des lamines comme un indicateur de la variation du flot de matière organique au-dessus des concrétions puisque les centres de luminescence sont essentiellement les molécules de MO piégées dans la calcite (Shopov et Dermendjiev, 1990; Baker *et al.*, 1993). L'étude de plusieurs stalagmites, modernes et holocènes, montre que les lamines les plus luminescentes sont les lamines sombres et compactes (type SC) (Genty *et al.*, soumis). L'étude de la variation saisonnière de l'intensité de la luminescence de l'eau d'infiltration sur un site de Grande Bretagne montre qu'il y a un maximum entre les mois de novembre et avril (A. Baker *et al.*, 1996). Il existe donc, parallèlement au cycle d'infiltration, un cycle dans l'apport de la matière organique.

3.4. HYPOTHESES SUR L'ORIGINE DE LA LAMINATION

L'eau qui s'écoule au-dessus de la concrétion est un facteur limitant: lorsqu'elle s'arrête de couler, la croissance est stoppée. Mais est-ce bien la variation de l'intensité de l'écoulement seule qui produit la lamination? Rappelons que la principale différence entre les deux grands types de lamines est la porosité: les lamines blanches sont plus poreuses que les lamines brunes. La différence de porosité est liée à une plus ou moins bonne coalescence des cristaux de calcite (Kendal *et al.*, 1978). Or l'origine de la variation du degré de coalescence cristalline n'est pas élucidée; elle pourrait être liée à plusieurs facteurs intervenant dans la précipitation de la calcite:

- 1) une variation de la température (air et eau souterrains),
- 2) une variation de la $p\text{CO}_2$ atmosphérique,
- 3) une variation de la concentration en calcium,
- 4) une variation de l'hydrodynamisme: a) intensité du goutte-à-goutte; b) épaisseur du film d'eau à la surface de croissance du spéléothème,
- 5) une variation d'éléments susceptibles de perturber la cristallisation de la calcite, comme peut-être la MO.

Dans le cas de la grotte du Père Noël, la température de l'air est stable à 0.1°C près ($8,9^\circ\text{C}$) et les variations de la $p\text{CO}_2$ de l'atmosphère souterraine peuvent être considérées comme négligeables vis-à-vis de la précipitation de la calcite: l'écart entre la $p\text{CO}_2$ équilibrante de l'eau d'infiltration et la $p\text{CO}_2$ de l'air de la grotte est beaucoup plus grand que l'écart saisonnier éventuel de la $p\text{CO}_2$ de l'atmosphère souterraine (Baker, 1993). Les variations de la température et de la $p\text{CO}_2$ de l'air de la grotte sont donc à écarter dans la recherche de l'origine de la lamination. Par contre il existe peut-être des variations de la température de l'eau, si

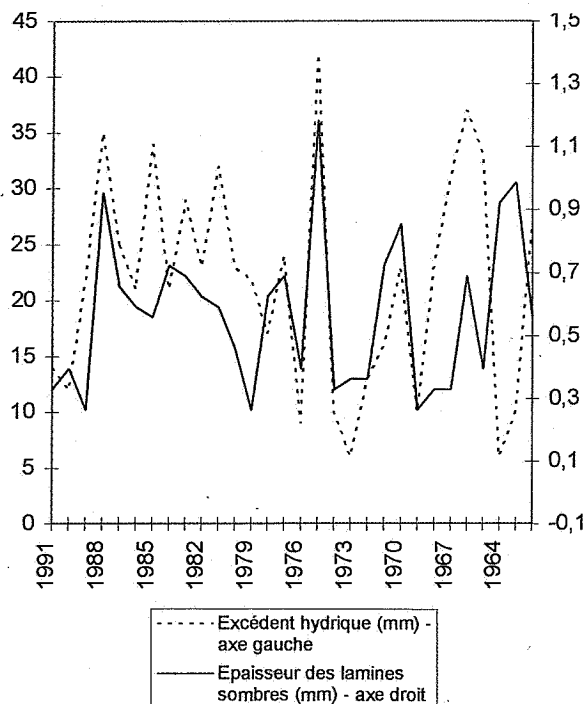


Figure 4. Comparaison entre les épaisseurs des lamines d'une stalagmite moderne (God-stm5, tunnel de Godarville, Belgique) et l'excédent hydrique d'une station météorologique voisine (10km à l'ouest). Sur cet échantillon, la meilleure corrélation se trouve avec les lamines sombres qui ont été distinguées des lamines claires par traitement numérique d'images (seuillage sur les niveaux de gris; Genty et Quinif, 1996).

Figure 4. Comparison between laminae thicknesses of a modern stalagmite (God-stm5, Godarville tunnel, Belgium) and water excess from a nearby meteorological station (10km west). On this sample, the best correlation occurs with the dark laminae which were defined by digital image processing (grey level threshold; Genty and Quinif, 1996).

celle-ci n'a pas eu le temps de se mettre en équilibre avec l'air, ce qui est peu vraisemblable ici vu la profondeur du site (environ 60m). On peut aussi supposer que la $p\text{CO}_2$ équilibrante de l'eau d'infiltration varie de façon saisonnière et provoque une variation dans l'intensité du dégazage du CO_2 , ce qui pourrait influencer la coalescence cristalline et donc produire une lamination. Des mesures in situ en continu des paramètres physico-chimiques de l'eau sont donc indispensables.

Les mesures de concentration en calcium des eaux de percolation sont rares et discontinues. Souvent comprises entre 0.5 et 4 mmol.l^{-1} , les teneurs en calcium sont liées à la pression partielle de CO_2 dans le sol, donc à l'activité végétale et biopédologique (Baker, 1993). Ne disposant d'aucune analyse chimique des eaux de la grotte du Père Noël, les variations saisonnières de la

conductivité ne peuvent pas être reliées de façon certaine aux concentrations en calcium (cf. infra). Si le maximum de conductivité, observé en hiver, correspond à une augmentation de la teneur en calcium, cela pourrait signifier que l'origine des lamines SC (qui, d'après l'étude de la luminescence, pourraient se développer en hiver) est une plus grande concentration en calcium.

Les variations saisonnières des conditions hydrodynamiques ont été démontrées par les enregistrements du débit effectués dans la grotte du Père Noël (cf. infra). Par ailleurs, l'observation de stalagmites modernes en formation suggère un lien entre l'épaisseur du film d'eau à la surface de croissance et la fabrique cristalline de la calcite qui y a précipité. Dans les microgours de la surface de croissance de plusieurs stalagmites du tunnel de Godarville (Belgique), les cristaux de calcite sont espacés et constituent une fabrique cristalline plus poreuse que sur les autres parties de la surface de croissance (Genty, 1992). Or dans ces microgours, le film d'eau est plus épais: 1 à 3mm contre environ 0.1mm ailleurs. Les variations saisonnières du débit modulent peut-être l'épaisseur du film d'eau à la surface de croissance des stalagmites. Cependant la relation entre le débit et l'épaisseur du film d'eau sur le sommet des stalagmites n'est pas prouvée (Dreybrot, 1980, 1988) bien qu'elle ait été vérifiée expérimentalement sur un plan incliné (Baker, 1993). Mais, jusqu'à présent, aucun suivi in situ de l'épaisseur du film d'eau à la surface d'une même stalagmite n'a été réalisé.

Enfin la présence d'éléments qui perturberaient la cristallisation de la calcite est toujours possible. Le flux de matière organique varie lui aussi saisonnièrement (cf. infra). Ce sont les lamines sombres et compactes qui sont les plus luminescentes donc, sans doute, les plus riches en MO. Les longues molécules que constitue la MO peuvent-elles modifier le mode de cristallisation ? Là aussi une expérimentation paraît nécessaire.

4. UN EXEMPLE DE SIGNAL CLIMATIQUE: L'ÉPAISSEUR DES LAMINES

Si la nature annuelle de la majorité des lamines visibles et luminescentes rencontrées dans les spéléothèmes ne semble pas faire de doute, l'extraction d'un signal climatique des caractères physico-chimiques de ces mêmes lamines n'en est qu'à ses débuts.

La mesure des épaisseurs de ces lamines donne directement la vitesse de croissance du spéléothème avec une précision inégalée jusque là (1/2 année, quel que soit l'âge du dépôt). La vitesse de croissance d'un

spéléothème peut être considérée comme un signal climatique complexe où plusieurs facteurs environnementaux, plus ou moins liés, interviennent: température, pluviométrie, activité végétale et pédologique, pCO₂ du sol et de l'atmosphère souterraine, régime hydrologique,.... L'exemple de la stalagmite de Drotsky's Cave du Botswana suggère qu'il existe un lien entre l'épaisseur des lamines de calcite et la pluviométrie, au moins pour les spéléothèmes qui se développent dans un environnement semi aride où la saison des pluies est très bien marquée (cf. infra). Mais même dans un climat tempéré, comme celui de la Belgique, il apparaît que l'épaisseur des lamines enregistre la quantité d'eau tombée sur les stalagmites (Genty, 1995; Genty et Quinif, 1996).

Les épaisseurs de deux stalagmites du tunnel de Godarville (Belgique) ont été mesurées par traitement numérique d'images. Ces deux concrétions, God-stm5 et God-stm10, ont été choisies car leur lamines sont plus épaisses, ce qui permet d'obtenir une meilleure précision dans leur mesure. Pour la stalagmite God-stm5, les coefficients de régression linéaire entre les épaisseurs des lamines (BP, SC et BP+SC) et des données météorologiques moyennes annuelles (température, pluviométrie et excédent hydrique) sont assez faibles, au moins pour l'ensemble de la durée de croissance de la stalagmite (30 ans). Les meilleurs coefficients (R=0,32 et 0,37) sont entre les épaisseurs des lamines SC et la pluviométrie et l'excédent hydrique respectivement. Cependant, un graphique montrant l'évolution de ces variables au cours du temps suggère un lien entre l'excédent hydrique et l'épaisseur des lamines SC (Fig. 4): aux trois maxima d'excédent hydrique, en 1969/70, 1974/75 et 1987/88, correspondent trois augmentations dans les épaisseurs des lamines sombres et compactes. Si la corrélation est effectuée à partir de 1971 seulement, soit sur les 21 dernières années de croissance, les coefficients de corrélation sont nettement meilleurs: R=0.72 et 0.67 entre les épaisseurs des lamines SC et l'excédent hydrique et la pluviométrie respectivement.

Une aussi bonne corrélation existe entre les épaisseurs des lamines de la stalagmite God-stm10 et l'excédent hydrique (R=0,84). Sur ce dernier exemple, un modèle linéaire simple (excédent hydrique = 0,077 x épaisseur + 0,491 en mm) permet de modéliser l'excédent hydrique à partir des épaisseurs des lamines. Cependant, l'aspect atypique de God-stm10 (structure concentrique, lamines blanches beaucoup plus fines que les lamines sombres et qui ne sont pas plus poreuses, aspect stromatolitique au microscope optique) rend prudente l'interprétation de son mode de croissance; la participation de bactéries dans le processus de croissance est ici envisageable.

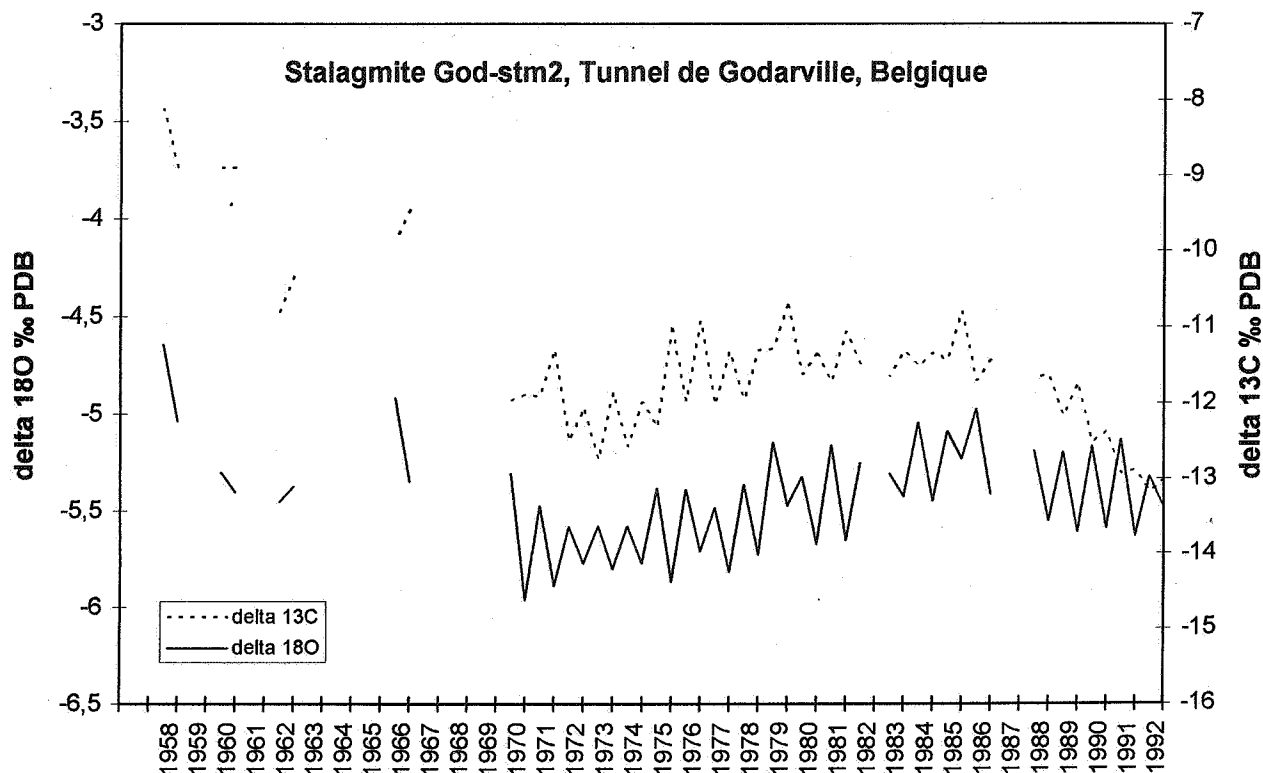


Figure 5. Isotopes de l'oxygène et du carbone ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ PDB) de chaque lamine de croissance d'une stalagmite moderne (God-stm2, tunnel de Godarville, Belgique). Les lamines blanches et poreuses ont un $\delta^{18}\text{O}$ systématiquement plus fort que celui des lamines sombres et compactes; inversement le $\delta^{13}\text{C}$ des lamines blanches est plus faible que celui des lamines sombres. Les lamines de la base de la stalagmite sont confuses et n'ont pas été échantillonnées.

Figure 5. Oxygen and carbon isotope values ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ PDB) of each growth laminae of a modern stalagmite (God-stm2, Godarville tunnel, Belgium). White porous laminae have a systematically higher $\delta^{18}\text{O}$ and lower $\delta^{13}\text{C}$. The laminae toward the base of the stalagmite are confused and were not sampled.

5. L'APPORT DES ISOTOPES STABLES

Rappelons que le dosage des isotopes stables de l'oxygène dans les concrétions est utilisé pour estimer les paléotempératures mais que son interprétation est très délicate. En effet, le $\delta^{18}\text{O}$ (de la calcite) est fonction de plusieurs facteurs:

1. la composition isotopique de la source d'évaporation $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ (l'océan); celle-ci peut être considérée comme stable sur l'échelle de temps qui concerne les échantillons du tunnel de Godarville (environ 30 ans), mais peut varier de -1,2 à -1,8 ‰ lors d'une transition entre une période glaciaire et interglaciaire (Shakelton, 1977).
2. la composition isotopique de l'eau de pluie ($\delta^{18}\text{O}_p$) au-dessus du site; elle dépend de la composition isotopique de l'océan, des chemins des dépressions (distance source d'évaporation et site, différence de latitude), de l'altitude et de la température à laquelle se forment les gouttes de pluie. Il est possible d'établir une relation entre la température at-

mosphérique et $\delta^{18}\text{O}_p$ en utilisant les mesures faites par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique sur les eaux de pluies. Par exemple, pour des sites maritimes, une relation a été établie par Dansgaard (1964): $d\delta^{18}\text{O}_p/dT = 0,7 \text{ ‰/}^\circ\text{C}$; pour la région parisienne elle est voisine de $0,26 \text{ ‰/}^\circ\text{C}$ (Fontes, 1976), etc.. Ce type de relation, souvent utilisé, doit être considéré avec précaution du fait de la très grande variabilité des $\delta^{18}\text{O}_p$ au cours d'une année et, souvent, du médiocre coefficient de corrélation reliant ces deux variables. D'une façon générale, lorsque la température augmente, le $\delta^{18}\text{O}_p$ augmente aussi.

3. la température à laquelle la calcite précipite; lorsque la température augmente, le $\delta^{18}\text{O}_{\text{c}}$ diminue ($-0,24 \text{ ‰/}^\circ\text{C}$; O'Neil *et al.*, 1975).

Selon le site étudié, les facteurs 2 et 3 vont conditionner le sens de la relation entre le $\delta^{18}\text{O}_{\text{c}}$ dosé sur le spéléothème et la température (Bakalowicz, 1982; Gascoyne *et al.*, 1980; Schwarcz, 1986).

Le problème majeur dans l'interprétation de la composition isotopique de la calcite des spéléothèmes vient du fait que la composition isotopique de l'eau n'est pas connue. Les quelques tentatives faites à partir des inclusions fluides se sont heurtées à des problèmes techniques (Schwarcz, 1986). D'autre part, on ne dose pas directement l'oxygène de l'inclusion fluide mais le deutérium ($\delta^2\text{H}$) car l'oxygène peut avoir interagit avec l'oxygène de la calcite. Il faut donc utiliser une relation linéaire de type «droite météorique mondiale» ($\delta^2\text{H}=8\times\delta^{18}\text{O}+10$) dont l'offset (l'excès en deutérium) a varié dans le temps et varie avec la situation géographique (in Gascoyne, 1992). Pour ces raisons, l'utilisation des inclusions fluides reste limitée et la plupart des interprétations paléoclimatiques se font à partir des variations relatives de la composition isotopique de la calcite seule (par exemple: Lauritzen 1995).

Mis à part les travaux faits sur des stalagmites du tunnel de Godarville (Belgique; Genty *et al.*, 1995C; Genty *et al.*, submitted), il n'existe pas, à notre connaissance, d'autres exemples de dosage d'isotopes stables dans les lamines de croissance des spéléothèmes. Pas plus que dans les études classiques de spéléothèmes, la reconstitution d'une température absolue, à partir des lamines, n'est possible. Cependant, les premiers résultats montrent qu'il existe un signal isotopique saisonnier porteur d'une information climatique potentielle infra-annuelle et interannuelle. Les résultats, qui font l'objet d'un article plus détaillé actuellement soumis, sont ici rappelés brièvement.

Environ 5mg de calcite ont été prélevés, à l'aide d'une microperceuse, dans chaque lamine de croissance d'une stalagmite du tunnel de Godarville (God-stm2). Les résultats du dosage des isotopes stables de l'oxygène et du carbone (effectué au laboratoire d'isotopes stables de la V.U.B., Bruxelles, par E. Keppens et P. Nielsen) montrent une remarquable alternance entre chaque type de lamine (Fig. 5). Sur l'ensemble des mesures le $\delta^{18}\text{O}$ est systématiquement plus faible dans les lamines sombres compactes que celui des lamines blanches poreuses. L'écart moyen est de 0.32 ‰ (écart-type = 0.16 ‰). Les mesures effectuées en double sur d'autres sections polies de la même stalagmite et sur la même lamine de croissance sont cohérentes et montrent des écarts nettement inférieurs à ceux trouvés entre lamines claires et lamines sombres; l'équilibre isotopique, nécessaire avant toute interprétation, est ici sans doute réalisé (Hendy, 1971). L'erreur instrumentale sur chaque mesure est inférieure à 0.05 ‰.

Les premières interprétations de l'analyse des isotopes stables de la stalagmite God-stm2 permettent de confirmer l'annualité des alternances de lamines de croissance qui avait été déduite du comptage des lamines (Genty, 1992).

6. LES MICROSEQUENCES DE LAMINES

L'un des aspects les plus frappants dans l'observation des sections polies des spéléothèmes et des dépôts travertineux est sans doute la présence de paquets de lamines se répétant sur plusieurs centimètres eux-mêmes parfois inclus dans des ensembles décimétriques. Les incrustations de l'aqueduc romain de Nîmes (France) présentent des ensembles d'environ 10 bandes de croissance, eux-mêmes faisant partie d'ensembles de 80 à 90 bandes (Gilly *et al.*, 1971). Ces auteurs n'hésitent pas à établir un lien de cause à effet entre ces périodicités et les cycles d'activité solaire (cycle de 11 ans ou cycle de Schwabe, et cycle de 80-90 ans ou cycle de Gleisberg). De même, Blanc (1972, 1992), identifie des cyclicités identiques dans les planchers stalagmitiques pliocènes des grottes du massif de Marseillevyre (cf. infra). Railsback *et al.* (1994) mentionnent la présence d'une variation des épaisseurs des lamines d'une stalagmite du Botswana d'environ 18 ans, parallèle aux variations de la pluviométrie (cf. infra). Enfin Shopov *et al.* (1990, 1991, 1994) utilise les variations de luminescence d'un plancher stalagmitique de Bulgarie comme index d'activité solaire (où l'on reconnaît les cycles de Schwabe et de Gleisberg). Tout aussi étonnant qu'ils soient, ces travaux manquent parfois de précision dans leur présentation (manque de tableaux de mesure de toutes les épaisseurs; signification statistique des cycles) et une réelle cyclicité n'est pas vraiment prouvée.

Cependant, une des stalagmites du massif de Han-sur-Lesse (Han-stm1) présente elle aussi des paquets de lamines remarquablement réguliers (Genty *et al.*, 1995; Genty *et al.*, 1996). Ces paquets regroupent en moyenne 11 alternances de lamines (moyenne=10,7; écart-type=2,3) et sont séparés par une (ou plusieurs ?) lamine sombre compacte plus épaisse. L'épaisseur moyenne des lamines est de 0,49mm ce qui est dans la gamme des épaisseurs de lamines annuelles trouvées sur d'autres stalagmites du même massif. S'agit-il ici de l'enregistrement du cycle undécennal de l'activité solaire? Aucune preuve n'existe pour l'instant. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées et discutées:

Première hypothèse : les paquets de lamines observés sont bien le reflet de l'activité solaire.

La périodicité de 11 ans semble relativement courante dans la nature (en tout cas elle a fait l'objet de nombreuses recherches): varves lacustres de l'Eocène (Ripepe *et al.*, 1991), schistes argileux du Carbonifère (Algeo *et al.*, 1994), cernes de croissance des arbres en Europe (Currie, 1991, 1992A), etc. Les données météorologiques montrent aussi, dans des cas très particuliers, la présence d'une cyclicité de 11 ans: pluviométrie des Etats-Unis (Currie, 1990, 1992B) et en

CYCLE	DATE	DEBIT gouttes/minutes	CONDUCTIVITE $\mu\text{S.cm}^{-1}$
1991-1992	20/12/91	1	294
	26/12/91	95	425
1992-1993	15/11/92	2,3	330
	27/11/92	39	388
	29/12/92	78	394
1993-1994	8/10/93	2,5	373
	9/10/93	11	400
	17/10/93	41	454
1994-1995	2/12/94	1,5	341
	30/12/94	45	442

Tableau 1. Variations du débit et de la conductivité de l'eau au début de 4 cycles hydrologiques (1991-1995) sous une stalactite de la grotte du Père Noël (Belgique).

Table 1. Dripping flow rate and water conductivity variations at the beginning of 4 hydrological cycles (1991-1995) under a stalactite from the Père Noël cave (Belgium).

Inde (Mitra *et al.*, 1991). Les variations de l'activité solaire, dont le cycle de 11 ans est bien connu, seraient à l'origine de ces périodicités. La relation entre l'activité solaire et la température stratosphérique et l'Oscillation Quasi Biennale (QBO), récemment mise en évidence, conforte l'hypothèse du lien possible entre le cycle solaire de 11 ans et les cycles similaires trouvés dans les données météorologiques (Labitzke *et al.*, 1987, 1989). Cependant, ce lien semble difficile à expliquer; en effet, la variation de l'irradiation solaire, mesurée par satellite entre deux extrêmes d'activité, est inférieure à 0.3%, ce qui paraît trop faible pour expliquer les variations climatiques (Tinsley *et al.*, 1989; Gizzatulina *et al.*, 1990; Dewan et Shapiro 1991; Hotzl *et al.*, 1991;).

Si le lien entre l'activité solaire et le climat reste hypothétique, le lien entre l'activité solaire et la précipitation de la calcite au fond d'une grotte paraît encore moins vraisemblable car le système karstique s'interpose en plus.

A côté de variations climatiques hypothétiques, un autre mécanisme pourrait donc être évoqué pour expliquer la cyclicité des lamines des spéléothèmes: celui de l'influence directe de l'activité solaire sur la production de matière organique de la couverture végétale. Cette influence pourrait se faire par l'intermédiaire de rayonnements hors du spectre visible, rayonnements du proche infra-rouge par exemple, qui influenceraient directement la productivité photosynthétique et donc la quantité de matière organique libérée dans le sol et/ou la production de feuilles. Ce serait alors les variations de concentration de matière organique dans les eaux de percolation qui provoqueraient : 1) les varia-

tions de luminescence; 2) les variations du rapport {épaisseur lamines claires poreuses/épaisseur lamines sombres compactes} puisque la matière organique semble concentrée surtout dans les lamines sombres et poreuses. Des mesures in situ du rayonnement solaire dans des longueurs d'ondes IR (ou UV ?) sur au moins un cycle solaire doivent donc être entreprises.

L'hypothèse climatique doit aussi être validée par la multiplication d'exemples tel que celui que présente la stalagmite Han-stm1: deux stalagmites voisines, se développant dans des conditions environnementales identiques (longueur des chemins d'alimentation en eau par les micro-fissures, végétation en surface, débit, température etc...), doivent alors présenter la même pétrographie et donc les mêmes périodicités dans leur lamines de croissance.

Deuxième hypothèse : les paquets de lamines ne sont que le reflet du fonctionnement hydrodynamique du karst.

Les fontaines intermittentes représentent aussi des cyclicités dans les écoulements souterrains. L'origine de l'intermittence est due à un fonctionnement en siphon de l'écoulement qui peut parfois être très complexe (Mangin, 1969). Même si elles ne concernent pas le même type d'écoulement (drains à très fortes perméabilités), ni les mêmes durées, on pourrait cependant supposer que des causes identiques puissent aussi provoquer des écoulements intermittents au-dessus des stalagmites. Ainsi un agencement particulier de micro-fissures et de petites cavités non pénétrables par l'homme pourrait alimenter des concrétions. Il est

concevable aussi que le temps pour enclencher un phénomène de siphonnage puisse prendre plusieurs années du fait de la moindre importance des écoulements d'infiltration sur une stalagmite. Ce phénomène pourrait expliquer la présence de cycles différents de 11 ans qui sont souvent observés mais non publiés car peut-être moins spectaculaires.

7. CONCLUSION

Les lamines de croissance des spéléothèmes sont essentiellement composées de deux types: les lamines blanches et poreuses (BP) et les lamines sombres et compactes (SC). Ces deux types alternent pour former un dépôt annuel et donnent ainsi un aspect laminé à de nombreux spéléothèmes. Les lamines SC sont aussi les plus lumineuses. Cette luminescence est due à la présence de matière organique, piégée dans le réseau cristallin, et apportée par l'eau d'infiltration, en hiver aussi semble-t-il.

La croissance des spéléothèmes est liée principalement à la concentration en calcium des eaux, aux conditions hydrodynamiques (débit, épaisseur du film d'eau) et à la température de l'eau. Une variation de ces facteurs entraîne une variation de la vitesse de croissance et donc une variation dans l'épaisseur des lamines. Une corrélation a été établie entre les épaisseurs des lamines de stalagmites modernes d'un tunnel et l'excédent hydrique (et la pluviométrie) d'une station météorologique voisine. Les bons coefficients de corrélation ($r=0,72$ et $r=0,84$) montrent que certaines stalagmites (celles qui ont des lamines épaisses) peuvent enregistrer la pluviométrie moyenne annuelle locale, ceci pour des conditions extérieures relativement stables (pas de changement dans la végétation et donc probablement peu de changement dans la concentration en calcium des eaux).

Le dosage des isotopes stables dans chaque lamine de croissance d'une stalagmite moderne montre qu'il y a, là aussi, une alternance saisonnière: les lamines blanches et poreuses sont systématiquement enrichies en oxygène 18 par rapport aux lamines sombres et compactes contiguës. Cette alternance saisonnière pourrait être due aux variations de température dans le site étudié et/ou à la variation saisonnière de la composition isotopique de l'eau de d'infiltration.

L'intérêt principal des lamines de croissance des spéléothèmes réside dans leur signification temporelle: une paire de lamine BP/SC représente une année, et ceci même pour des spéléothèmes âgés de plusieurs millions d'années. Elles apportent donc une chronologie très fine: une demi-année de façon absolue pour des spéléothèmes actifs, récents et bien laminés, ou de façon relative pour des spéléothèmes plus vieux. Les

méthodes de datation radiométriques (^{14}C et U/Th) peuvent être utilisées pour replacer les séquences de lamines dans un cadre chronologique absolu, avec parfois une précision voisine de 1%.

Les caractères physiques et chimiques des lamines de croissance apparaissent donc comme des signaux climatiques potentiels d'une grande finesse, mais seul un suivi continu in situ des facteurs régissant les équilibres calco-carboniques ainsi que des expérimentations permettront d'aboutir à une calibration.

8. REMERCIEMENTS

Nous remercions le Ministère des Voies Hydrauliques de Belgique ainsi que Monsieur Dambrain, ingénieur en chef à Godarville pour avoir mis à notre disposition le tunnel de Godarville. De même, nous remercions la société des grottes de Han qui nous autorise à effectuer des recherches au sein du massif de Han-sur-Lesse (Belgique). Nous remercions également A. Rorive, professeur à la Faculté Polytechnique de Mons (Belgique) pour avoir effectué les calculs de l'excédent hydrique ainsi que l'Institut Royal de Météorologie. Le texte en anglais a été corrigé par Madame Stéphanie Genty, nous la remercions chaleureusement.

9. BIBLIOGRAPHIE

- ALGEO, Th., WOODS, A.D., 1994. Microstratigraphy of the Lower Mississippian Sunbury Shale: A record of Solar-modulated climatic cyclicity. *Geology*, 22: 795-798.
- ALLISON, V.C., 1926. The antiquity of the deposit in Jacob's cavern. *American Museum of Natural History*, 19: 225-294.
- BAKALOWICZ, M., 1982. La géochimie isotopique de sédiments karstiques : apports, problèmes et perspectives. *Annales scientifiques de l'Université de Besançon - Géologie*, 1: 227-239.
- BAKER, A., 1993. Speleothem Growth Rate and Paleoclimate. Unpublished Ph.D. Thesis, Bristol Univ., 232 p.
- BAKER, A., SMART, P. L., EDWARDS, R. L., RICHARDS, D. A., 1993. Annual growth bandings in a cave stalagmite. *Nature*, 364: 518-520.
- BLANC, J.J., 1972. Recherches sur les planchers stalagmitiques et remplissages anciens des grottes du massif de Marseilleveyre (Marseille, B.-du-Rh.). *Bulletin du Muséum d'Anthropologie préhistorique, Monaco*, 18: 5-43.
- BLANC, J.J., 1992. Spéléothèmes zonés et signaux. *Bulletin du Muséum d'Anthropologie préhistorique, Monaco*, 35: 5-35.
- BROECKER, W.S., OLSON, E.A., 1960. Radiocarbon

Measurements and Annual Rings in Cave Formations. *Nature*, 185: 93-94

BUHMANN, D., DREYBRODT, W., 1985. The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas, 1. Open system. *Chemical Geology*, 48: 189-211.

BUHMANN, D., DREYBRODT, W., 1985. The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas, 2. Closed system. *Chemical Geology*, 53: 109-124.

COLLIGNON, B., 1988. Spéléologie - Approches scientifiques. Edisud - Aix-en-Provence, 236 p.

CURRIE, R.G., 1990. Deterministic signals in USA precipitation records: part 1. *International Journal of Climatology*, 10: 795-818.

CURRIE, R.G., 1991. Deterministic signals in tree-ring from North America. *International Journal of Climatology*, 11: 861-876.

CURRIE, R.G., 1992. Deterministic signals in tree-rings from Europe. *Annales Geophysicae*, 10: 241-253.

CURRIE, R.G., 1992B. Deterministic signals in USA precipitation records: part 2. *International Journal of Climatology*, 12: 281-304.

DANSGAARD, W., 1964. Stable isotopes in precipitations. *Tellus*, 16: 436-467.

DEVER, L., DURAND, R., FONTES, J.C., VACHIER, P., 1982. Géochimie et teneurs isotopiques des systèmes saisonniers de dissolution de la calcite dans un sol sur craie. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46: 1947-1956.

DEWAN, E.M., SHAPIRO, R., 1991. Are sunspot-weather correlations real? *Journal of Atmosphere and Terrestrial Physics*, 53: 171-174.

DREYBRODT, W., 1980. Deposition of calcite from thin films of natural calcareous solutions and the growth of speleothems. *Chemical Geology*, 29: 80-105.

DREYBRODT, W., 1981. The kinetics of calcite precipitation from thin films of calcareous solutions and the growth of speleothems: revisited. *Chemical Geology*, 32: 237-245.

DREYBRODT, W., 1988. Processes in Karst Systems. Springer Verlag, 288 p.

EK, C., 1979. Variations saisonnières des teneurs en CO₂ d'une grotte belge : le Trou Joney à Comblain-au-Pont. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 102: 71-75.

FONTES, J. C., 1976. Isotopes et cycle des eaux naturelles: quelques aspects. Thèse de Doctorat en Sciences Naturelles, Université Pierre et Marie Currie, Paris 6, 208 p.

GASCOYNE, M., SCHWARCZ, H. P., FORD, D. C., 1980. A paleotemperature record for the Mid-Wisconsin in Vancouver Island. *Nature*, 285: 474-476.

GASCOYNE, M., 1992. Paleoclimate determination from cave calcite deposits. *Quaternary Science Reviews*, 11: 609-632.

GENTY, D., 1992. Les spéléothèmes du tunnel de

Godarville (Belgique) - un exemple exceptionnel de concrétionnement moderne - intérêt pour l'étude de la cinétique de précipitation de la calcite et de sa relation avec les variations d'environnement. *Spéléochronos*, 4: 3-29.

GENTY, D., 1993. Mise en évidence d'alternances saisonnières dans la structure interne des stalagmites. Intérêt pour la reconstitution des paléoenvironnements continentaux. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, série II, 317: pp. 1229-1236.

GENTY, D., BASTIN, B., EK, C., 1995A. Nouvel exemple d'alternances de lamines annuelles dans une stalagmite (Grotte de Dinant «La Merveilleuse»), Belgique. *Spéleo-chronos*, 6: 3-8.

GENTY, D., QUINIF, Y., DEFLANDRE, G., 1995B. Microséquences de lamines annuelles dans deux stalagmites du massif de Han-sur-Lesse (Belgique). *Spéleo-chronos*, 6: 9-22.

GENTY, D., QUINIF, Y., KEPPENS, E., 1995C. Les variations saisonnières des lamines de croissance mises en évidence par le dosage des isotopes stables de l'oxygène et du carbone. *Spéleo-chronos*, 6: 32-34.

GENTY, D., 1995. Corrélation entre l'épaisseur des lamines de deux stalagmites modernes et les données météorologiques. *Spéleo-chronos*, 6: 35-40.

GENTY, D., QUINIF, Y., 1996. Annually laminated sequences in the internal structure of some Belgian stalagmites - Importance for paleoclimatology. *Journal of Sedimentary Research*, 66: 275-288.

GENTY, D., BAKER, A., BARNES, W., 1996. Comparaison entre les lamines luminescentes et les lamines visibles annuelles de stalagmites. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, soumis.

GILLY, J. C., PLEGAT, R., COUDRAY, J., 1971. Note préliminaire sur les incrustations calciques de l'aqueduc romain du pont du Gard, indicateurs paléoclimatique et paléochronologiques des cinq premiers siècles de notre ère. *Comptes Rendus de l'Académie de Sciences de Paris*, série D, 273: 1668-1670.

GIZZATULINA, S. M., RUKAVISHNIKOV, V. D., RUZMAKIN, A. A., TAVASTSHERNA, K. S., 1990. Radiocarbon evidence of the global stochasticity of solar activity. *Solar Physics*, 127: 281-288.

HAHNE, C., KIRCHMAYER, M., OTTEMANN, J., 1968. «Höhlenperlen» (cave pearls) besonders aus Bergwerken des Ruhrgebietes. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 130: 1-46.

HENDY, C.H., 1971. The isotopic geochemistry of speleothems-I. The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as paleoclimatic indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35: 801-824.

HOTZL, H., ROSNER, G., WINKLER, R., 1991. Correlation of ⁷Be Concentrations in Surface Air and Precipitation with Solar Cycle. *Naturwissenschaften*, 78: 215-217.

- KENDALL, A. C., BROUGHTON, P. L., 1978. Origin of fabrics in speleothems composed of columnar calcite crystals. *Journal of Sedimentary Petrology*, 48: 519-538.
- KIRCHMAYER, M., 1962. Zur Untersuchung rezenter Ooide. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 114: 245-272.
- LABITZKE, K., van LOON, H., 1989. The 11-year solar cycle in the stratosphere in the northern summer. *Ann. Geoph.*, 7: 595-598.
- LAURITZEN, S.E., 1995. High-Resolution Paleotemperature Proxy Record for the Last Interglaciation Based on Norwegian Speleothems. *Quaternary Research*, 43: 133-146.
- MANGIN, A., 1969. Etude hydraulique du mécanisme d'intermittence de Fontestorbes (Bélesta, Ariège). *Annales de Spéléologie*, 24: 253-298.
- MITRA, K., MUKHERJI, S., DUTTA, S. N., 1991. Some indications of 18.6 year Luni-Solar and 10-11 year Solar cycles in rainfall in North-West India, The plains of Uttar Pradesh and North-Central India. *International Journal of Climatology*, 11: 645-652.
- O'NEIL, J. R., ADAMI, L. H., EPSTEIN, S., 1975. Revised value for the ^{18}O fractionation factor between CO_2 and H_2O at 25°C . *U.S. Geological Survey Journal Research*, 3: 623-624.
- ORR, P. C., 1952. Excavations in Moaning cave. *Santa Barbara Museum of Natural History Bulletin*, 1: 1-19.
- RAILSBACK, L. B., BROOK, G. A., CHEN, J., KALIN, R., FLEISHER, C. J., 1994. Environmental controls on the petrology of a late Holocene speleothem from Botswana with annual layers of aragonite and calcite. *Journal of Sedimentary Research*, A64: 147-155.
- RENAULT, P., BRUNET, J., 1981. Les variations de la pCO_2 dans les grottes des Pyrénées centrales - Grottes de Moulis et de Niaux (Ariège). *Spelunca Mémoires*, 11: 5-18.
- RIPEPE, M., ROBERTS, L. T., FICHER, A. G., 1991. ENSO and Sunspot Cycles in varved Eocene oil shales from image analysis. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61: 1155-1163.
- SCHWARCZ, H. P., 1986. Geochronology and isotopic geochemistry of speleothems, in Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Ed. FRITZ P. and FONTES J. Ch., Vol.2-B, p. 271-303.
- SHAKELTON, N. J., 1977. The oxygen isotope stratigraphic record of the Late Pleistocene. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, London, B, 280: 169-179.
- SHOPOV, Y. Y., DERMENDJIEV, V., 1990. Microzonality of luminescence of cave flowstones as a new indirect index of solar activity. *Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences*, 43: 9-12.
- SHOPOV, Y. Y., DERMENDJIEV, V., BUYUKLIEV, G., 1991. A new method for dating of natural material with periodical macrostructure by autocalibration and its application for study of the Solar activity in the past. *Proceedings of the International Conference on Environmental Changes in Karst Areas*, I.G.U - U.I.S., Italy 15-27 Sept. 1991, Univ. di Padova, pp. 17-22.
- SHOPOV, Y.Y., FORD, D. C., SCHWARCZ, H. P., 1994. Luminescent microbanding in speleothems: High-resolution chronology and paleoclimate. *Geology*, 22: 407-410.
- THORNTHWAITE, C.W., 1954, The measurement of potential evapotranspiration: John P. Mather Seabrook, New Jersey, 225 p.
- TINSLEY, B. A., BROWN, G. N., SCHERRER, P. H., 1989. Solar Variability Influences on Weather and Climate: Possible Connections Through Cosmic Ray Fluxes and Storm Intensification. *Journal of Geophysical Research*, 94, n° D12: 14783-14792.

Manuscrit reçu le 12.02.1996 et accepté pour publication le 29.11.1996.