

ETUDE PETROGRAPHIQUE ET GEOCHIMIQUE D'UNE STALAGMITE DE LA GROTTA DE JEITA (LIBAN)

Fadi H. Nader, Sophie Verheyden¹, Hai Cheng², Rudy Swennen³

IFP, 1 et 4 Avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex, France

¹Université Libre de Bruxelles, Département des Sciences de la Terre et de l'Environnement (DSTE), Avenue F.D. Roosevelt 50, 1050 Brussels, Fonds de la Recherche Scientifique (FNRS), Belgique

²Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota, 310 Pillsbury Drive, SE, Minneapolis, MN 55455, USA

³Afd. Fysico-chemische Geologie, Katholieke Universiteit Leuven, Celestijnenlaan 200E, B-3001 Heverlee, Leuven, Belgique
fadi-henri.nader@ifp.fr

(Received 17 August 2006 - Accepted 10 May 2007)

RESUME

La stalagmite JeG-stm-1 (Jeita, Liban central) montre des variations cristallographiques, de vitesse de croissance, ainsi que de composition isotopique qui sont synchrones. On peut donc supposer que ces variations reflètent des changements régionaux (changements climatiques et /ou environnementaux), potentiellement perturbés par des modifications locales sur une échelle de temps plus courte.

Trois périodes de croissance de la stalagmite étudiée sont proposées: 1) de 12 à 10ka BP, précipitation de la calcite proche des conditions d'équilibre isotopique – $\delta^{18}\text{O}$ aussi bien que $\delta^{13}\text{C}$ diminuent; 2) de 10 à 6ka BP, conditions généralement assez chaudes et assez humides pour maintenir une bonne activité du sol – croissance relativement rapide de la stalagmite; 3) à partir de 6ka BP, dégradation des conditions idéales de précipitation de la calcite, avec probablement un assèchement en surface et donc une diminution de l'activité végétale.

Des études semblables sur d'autres stalagmites ainsi que des juxtapositions d'autres modèles seraient nécessaires pour confirmer ou infirmer les réflexions préliminaires de cette étude.

Mots clés : spéléothème, holocène, paléoclimat, lamines, $\delta^{18}\text{O}$

ABSTRACT

The JeG-stm-1 stalagmite (Jeita, central Lebanon) shows petrographic variations tuned with different rates of growth and stable isotope composition. These may reflect regional variations (e.g. climatic and/or environmental changes) that were probably accentuated by local changes – on shorter periods of time.

Three distinct growth periods of the investigated stalagmite are proposed: 1) from 12 to 10ka BP, calcite precipitation close to isotopic equilibrium conditions – $\delta^{18}\text{O}$ as well as $\delta^{13}\text{C}$ values deplete along a parallel pattern; 2) from 10 to 6ka BP, humid and hot conditions

maintaining a significant soil activity – relative fast growth of the stalagmite; 3) from 6ka BP, dry climate probably prevailed – thus, depletion of soil and vegetation cover – leading to the deficiency of the previous ideal conditions for speleothem growth.

Similar studies on other stalagmites and the comparison with results from other proxies are necessary in order to confirm or reject the preliminary conclusions of this study.

Keywords : speleothem, holocene, paleoclimate, laminas, $\delta^{18}\text{O}$

INTRODUCTION

Le Liban occupe la côte Est de la Mer Méditerranée. La physiographie générale du pays consiste en deux chaînes montagneuses (le Mont Liban et l'Anti-Liban) qui s'allongent selon un axe SSO-NNE parallèlement à la côte, et sont séparées par la plaine de la Békaa (Figure 1). De larges superficies affectées par des phénomènes karstiques, caractérisent ces montagnes dont la lithologie est surtout calcaire (Figure 1). Le terrain karstique est estimé couvrir plus de 67% du territoire libanais (Edgell, 1997). Le point culminant du Mont Liban se trouve au nord (Qornet es Saouda, 3083m au-dessus de la mer) à moins de 40km de la côte. Les précipitations (pluies et neiges) au Liban, totalisent en général plus de 500mm par an (UNDP, 1970). Annuellement, les hauts plateaux du Mont Liban reçoivent plus de 1500mm de précipitation, principalement sous forme de neige. Environ 80% de ces pluies et neiges tombent sur le territoire libanais – surtout sur les chaînes montagneuses – entre les mois de novembre et février. La période allant de mai à octobre est caractérisée par un temps sec. Les flancs du Mont Liban sont sillonnés par onze rivières (la plupart ayant une direction ouest-est) dont les sources sont typiquement karstiques. Ces rivières drainent les aquifères ainsi que les eaux issues de la fonte des neiges surtout durant les mois de mars, avril et mai.

La grotte de Jeita, s'allonge parallèlement à l'une de ces rivières (Nahr el Kelb, ou Rivière du Chien) qui est encaissée dans une vallée en canyon. La grotte est la plus grande du Liban avec plus de 9km de galeries souterraines cartographiées. Sur toute sa longueur, cette grotte se développe dans des roches jurassiques (Formation de Kesrouane ; Lias – Oxfordien ; Figure 1). Les sédiments reconnus dans cette formation sont principalement du calcaire micritique relativement riche en macro- et microfaune et de la dolomie cristalline (Figure 1B).

Le but de cette étude, première en son genre au Liban, est de présenter les résultats préliminaires d'une stalagmite de la grotte de Jeita, dans le cadre de la reconstruction de l'évolution paléo-climatique et paléo-environnementale du Liban durant la période holocène. Ce projet est principalement financé par une bourse de recherche du Conseil National de la Recherche Scientifique du Liban (CNRS-L). La contribution internationale des différents auteurs – au niveau de leur institut – et le support de la direction de la grotte touristique ont joué un rôle primordial dans la réussite du projet.

Les changements climatiques terrestres des derniers cycles glaciaires/interglaciaires sont encore trop peu connus. Des discussions sont toujours en cours sur la chronologie des changements, sur leur simultanéité entre les hémisphères nord et sud et sur l'existence de seuils climatiques. Durant l'Holocène, des incertitudes persistent: les températures actuelles ont-elles déjà été atteintes durant l'optimum médiéval dans certaines régions ? Existe-t-il des seuils climatiques durant l'Holocène (cfr 8.2kyr BP)? A-t-on connu des périodes d'instabilités climatiques? Les comparaisons entre différents proxy restent limitées dû au manque de possibilités de datation. Les spéléothèmes sont des dépôts chimiques carbonatés karstiques.

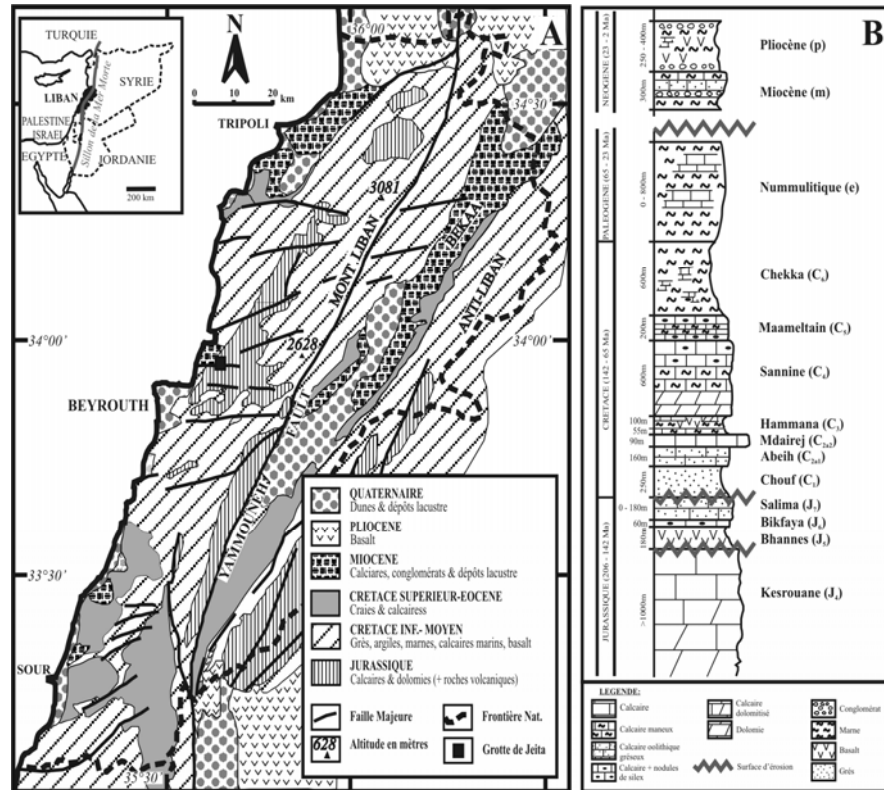


Figure 1. Carte géologique simplifiée du Liban (A) d'après Dubertret (1955) avec l'échelle stratigraphique correspondante (Dubertret, 1975).

Parmi eux, les stalagmites, croissant sur le sol, ont une structure claire et régulière, en ordre chronologique. Différentes caractéristiques de ces stalagmites (e.g. composition isotopique de l'oxygène et du carbone, contenu chimique – Sr, Mg, P, Ba) sont des indicateurs climatiques (température, pluviosité) ou environnementaux (activité du sol) (voir l'état des lieux sur la question par Fairchild *et al.*, 2006). Des indications sur le climat et l'environnement peuvent donc être extraites des stalagmites dans un cadre chronologique absolu grâce à la datation U/Th jusqu'à -400,000 ans. Jusqu'à présent, c'est le seul proxy terrestre qui combine une résolution des informations allant jusqu'à la saison dans certaines stalagmites laminées et une datation absolue avec une précision de 1% (Li *et al.*, 1989; Shen *et al.*, 2002) et plus lorsque des lamines sont présentes (comptage de lamines; Genty & Quinif, 1996).

Des courbes paléoclimatiques ont été élaborées à partir de spéléothèmes du Levant (e.g., Bar-Matthews *et al.*, 1991; 1999) mais elles concernent surtout le dernier glaciaire, mis

à part celui de Frumkin *et al.* (1999). Une récente étude de Robinson *et al.* (2006) fait le point sur les connaissances paléoclimatiques du Levant et démontre la relative bonne concordance entre les résultats obtenus de proxy terrestres et marins, le manque de données sur la période entre le maximum glaciaire et le pléni-Holocène, et le manque de cadre chronologique précis pour la plupart des données. Une meilleure connaissance de la réponse environnementale de la région méditerranéenne à la hausse de températures est particulièrement intéressante dans le cadre de la désertification actuelle (extension, seuils, particularités locales). La grotte de Jeita et ses innombrables spéléothèmes permettent une étude paléoclimatique dans un cadre chronologique précis du Liban et par extension du Moyen orient et de la région méditerranéenne. Les premiers résultats de l'étude cristallographique et géochimique sont présentés sur une stalagmite holocène de la Grotte de Jeita.

APERÇU GEOLOGIQUE

Dubertret (1955) indique que la structure actuelle du Liban pourrait être clairement lue à partir de la stratigraphie des roches affleurantes (Figure 1B). Une première phase orogénique – liée à un volcanisme intense, mais surtout local – a affecté les parties centrales et nord du Liban au Jurassique supérieur. Les massifs Jurassiques ont été soulevés, fracturés et karstifiés (Renouard, 1955) avant l'enfouissement résultant à la transgression globale crétacée. Les couches crétacées se sont alors déposées sur les anciens reliefs karstifiés du massif jurassique. Durant le Turonien (Crétacé supérieur), le commencement du soulèvement des structures Palmyridiennes (le Mont Liban en faisant partie) suite à la collision de la plaque Afro-arabe et des plaques Iraniennes et Turques a pris place (Dubertret, 1975; Brew *et al.*, 2001). Les reliefs actuels ont commencé à s'esquisser, d'abord discrètement (Turonien) et puis plus nettement à partir de l'Oligocène (Paléogène). La montagne libanaise est sujette alors depuis, au moins, le Paléogène à une karstification continue, de même que les roches jurassiques, crétacées et tertiaires ont été affectées d'une diagenèse météorique (dissolution, cimentation, *etc.* (Nader *et al.*, 2003).

La grotte de Jeita s'ouvre dans les calcaires jurassiques (Nader, 2004). Tout au long du développement de son axe principal (Figure 2A), cette fameuse grotte renferme une rivière souterraine avec un débit moyen de 2.3 m³/jour qui alimente la ville de Beyrouth (capitale du Liban) en eau potable (UNDP, 1970). Sur le plan hydrogéologique, la grotte joue le rôle d'un collecteur de l'aquifère karstique jurassique (Formation de Kesrouane). La position de son entrée naturelle est expliquée par la proximité de la flexure ouest du Liban, exprimée avec un pendage à peu près vertical, menant à la formation d'un obstacle stratigraphique/hydrogéologique. Les couches peu perméables du Jurassique Supérieur et Crétacé Inférieur (marnes, argiles, dépôts volcaniques ; Figure 1B ; Figure 2B) opposant l'écoulement latéral des eaux souterraines dans l'aquifère karstique de la Formation de Kesrouane. La rivière souterraine, qui jaillit d'un siphon terminal à l'extrémité Est de la grotte au-dessous d'une grande épaisseur de roches calcaires jurassiques (Figure 2C), coule vers l'ouest avec un léger dénivelé (Figure 2B), avant d'être forcée à parvenir à la surface au niveau de la flexure (Figure 2A) où se trouvent les 'sources de Jeita'. Ainsi, les résurgences du système karstique de Jeita alimentent la rivière de Nahr el Kelb. Au-delà des sources, dans le massif jurassique, les eaux souterraines ont taillé les salles les plus grandes de la grotte, souvent riches en spéléothèmes de toutes sortes.

LOCALISATION ET MESURES DANS LA GROTTES DE JEITA

La plupart des stalagmites dans la galerie supérieure de la grotte touristique sont de type « pile d’assiettes » dû à la hauteur du plafond (~20 m). La stalagmite étudiée (JeG-stm-1) de 1m de long, a été prélevée en 2005 à environ 200m de l’entrée dans la partie touristique de la Galerie Supérieure (Figure 3; Idriss *et al.*, 2006). A l’emplacement de la stalagmite, le plafond se situe à environ 16,5m du sol (altitude ~120 m ; Figure 3B). La température à cet endroit est constante à ±22°C (information venant de la station météo sommaire de la grotte touristique). La quantité d’eau de percolation est variable et généralement plus abondante en hiver-printemps dû à la fonte des neiges. Une épaisseur minimale d’environ 80 m de roches calcaires jurassiques sus-jacentes est estimée à partir des nouvelles mesures topographiques (Figure 3B).

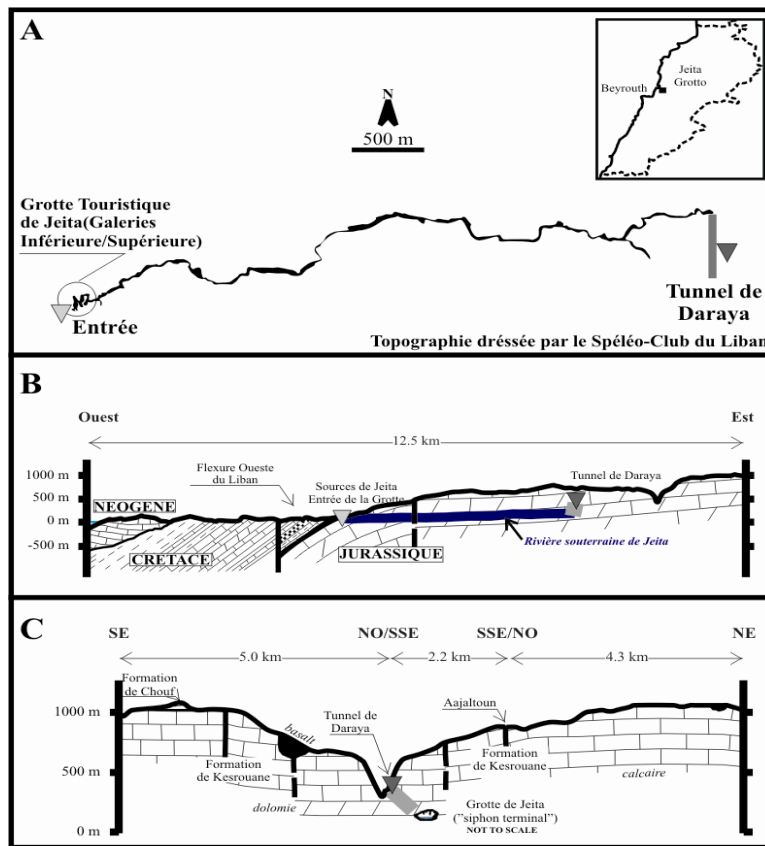


Figure 2. A. Plan topographique de la Grotte Jeita dressé par le Spéléo-Club du Liban (Karkabi, 1988); B. Coupe stratigraphique Ouest-Est figurant le développement de la Grotte de Jeita (Karkabi, 1988); C. Coupe stratigraphique Sud-Nord passant par le siphon terminal de la grotte.

Le 29 décembre 2005, la température était de 22°C à l'endroit de la stalagmite (JeG-stm-1). Le 25 avril, il faisait 23°C et 75% d'humidité relative de l'air. Le débit des gouttes d'eau qui tombent du toit de la grotte au dessus du site de la stalagmite prélevée était de 1 goutte par seconde. La pression partielle de CO₂ (pCO₂) de l'air (mesure à la pompe Dräger avec tube de réactif) était de 3500ppm.

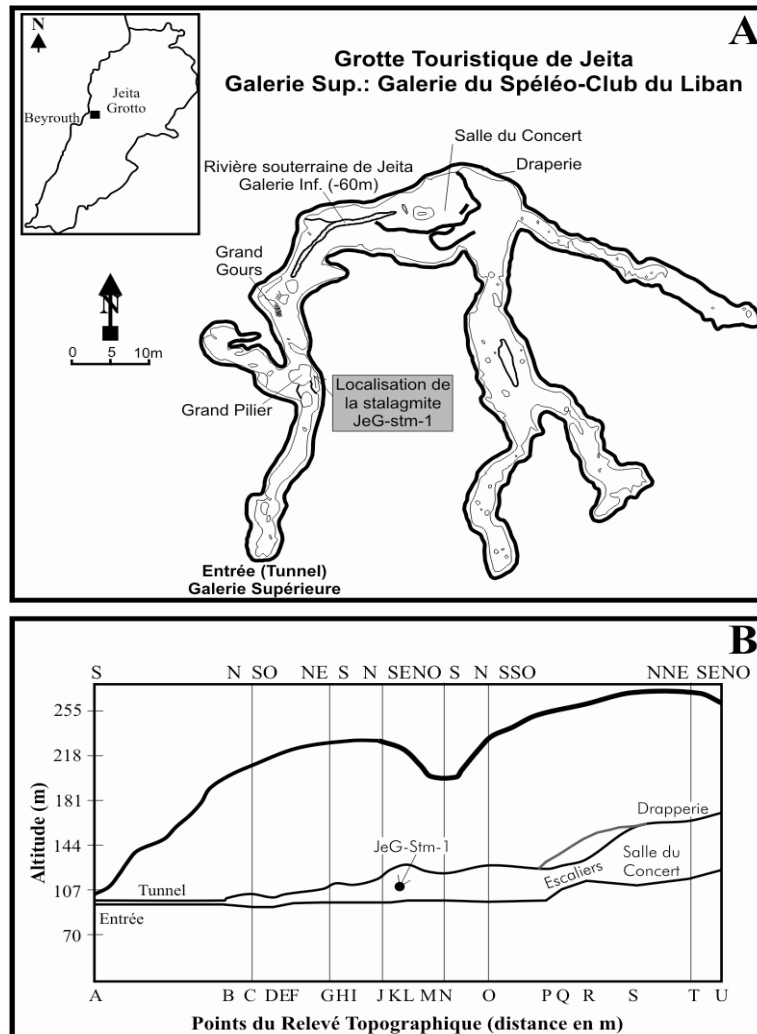


Figure 3. A. Plan topographique de la Galerie Supérieure (partie de la grotte touristique), avec l'emplacement de la stalagmite JeG-stm-1 (Karkabi, 1990); B. Coupe topographique figurant l'emplacement de la stalagmite et le toit de la Galerie Supérieure ainsi que la surface sus-jacente.

RESULTATS

Description de la stalagmite

La stalagmite est d'aspect blanc laiteux et jaune beige (Figure 5). Le cœur de la stalagmite est généralement composé de calcite compacte translucide, alors que les bords sont composés de calcite blanche laiteuse remontant en « pile d'assiettes ». De haut en bas on observe successivement:

-Segment 1 (0-18 cm du sommet) : Calcite gris-blanc avec une structure peu claire (pas de lamine évidente). Une rupture de la stalagmite, mise en évidence par une couche plus argileuse (de couleur marron) est observée à 17 cm du sommet.

-Segment 2 (18-23 cm du sommet) : Calcite blanc laiteux, correspondant à une diminution drastique du diamètre de la stalagmite.

-Segment 3 (23-34,8 cm du sommet) : Calcite grisâtre avec des lamines relativement nettes qui disparaissent en haut (vers le sommet de ce segment); la diminution du diamètre de la stalagmite est claire au niveau de ce segment en comparant les diamètres des segments sous-jacents.

-Segment 4 (34,8-53,5 cm du sommet) : Calcite compacte à lamination fine, avec une structure claire de type « pile d'assiettes ».

-Segment 5 (53,5-82 cm du sommet) : Calcite compacte à lamination fine. La stalagmite est nettement plus large sur cette partie avec une structure de « pile d'assiettes ». Le sommet de ce segment est caractérisé par un changement net de l'axe de croissance de la stalagmite.

-Segment 6 (82-89 cm du sommet) : Calcite gris blanc avec une structure peu claire (pas de lamines évidentes), correspondant à une diminution du diamètre de la stalagmite.

-Segment 7 (89-121.5 cm du sommet) : Lamines encore régulières mais moins franches dans de la calcite mi-compacte mi-poreuse.

Datations TIMS U/Th

La stalagmite s'est déposée durant la majeure partie de l'Holocène dès 12000 a BP. La croissance s'est interrompue vers 1200 a BP. Les résultats de la datation U/Th sont présentés dans le Tableau 1.

La croissance de la stalagmite (Figure 4) s'est faite de façon plus ou moins régulière de 0,50 à 2,62 cm par siècle avec la croissance la plus rapide de 50 à 35 cm du sommet (de 6500 à 5900 a BP ; Segment 4, Figure 4). Le sommet de la stalagmite (Segment 1) représente la croissance la moins rapide, avec 0,5 cm par siècle (Figure 4). Généralement, les parties blanc laiteux de la stalagmite ont une croissance plus lente, alors que les parties compactes translucides ont une croissance plus rapide (Figures 4, 5). La rupture de la stalagmite (Segment 1) n'affecte pas sa courbe de croissance.

TABLEAU 1

Datation U/Th de 11 Echantillons Prélevés sur l'Axe de Croissance de la Stalagmite JeG-stm-1 (Jeita, Liban). (Ces Mesures Ont Été Achevées par le Dr. Cheng à l' Université de Minnesota, aux Etats-Unis)

²³⁰Th dating results. The error is 2σ error.

| Sample Number | ²³⁸ U (ppb) | ²³² Th (ppt) | ²³⁰ Th/ ²³² Th (atomic) | δ ²³⁴ U* (measure) | ²³⁰ Th/ ²³⁸ U (activity) | ²³⁰ Th Age (yr) (uncorrected) | ²³⁰ Th Age (yr) (corrected) | δ ²³⁴ U _{initial} ** (corrected) |
|---------------|------------------------|-------------------------|---|-------------------------------|--|--|--|--|
| J1 | 158.9 ±0.3 | 265 ±7 | 1065 ±28 | 31.4 ±1.8 | 0.1074 ±0.0008 | 11996 ±98 | 11949 ±101 | 32.4 ±1.8 |
| J2 | 158.5 ±0.3 | 160 ±7 | 1471 ±69 | 29.0 ±1.9 | 0.089713 ±0.00081 | 9957 ±96 | 9929 ±97 | 29.8 ±2.0 |
| J3 | 172.6 ±0.3 | 117 ±7 | 2033 ±131 | 29.2 ±1.8 | 0.0834 ±0.0007 | 9226 ±84 | 9207 ±85 | 30.0 ±1.9 |
| J4 | 148.5 ±0.2 | 126 ±7 | 1387 ±79 | 30.2 ±1.8 | 0.0710 ±0.0007 | 7800 ±82 | 7776 ±83 | 30.9 ±1.9 |
| J5 | 171.4 ±0.3 | 157 ±8 | 1150 ±60 | 25.2 ±1.8 | 0.063669 ±0.00058 | 6999 ±67 | 6973 ±68 | 25.7 ±1.8 |
| J6 | 146.7 ±0.3 | 82 ±8 | 1763 ±173 | 28.3 ±1.9 | 0.0599 ±0.0009 | 6556 ±105 | 6540 ±106 | 28.8 ±2.0 |
| J7 | 183.1 ±0.3 | 168 ±7 | 981 ±43 | 23.3 ±1.7 | 0.0545 ±0.0005 | 5970 ±61 | 5944 ±63 | 23.7 ±1.8 |
| J8 | 126.2 ±0.2 | 410 ±8 | 194 ±5 | 23.5 ±2.0 | 0.0383 ±0.0007 | 4165 ±73 | 4073 ±86 | 23.7 ±2.0 |
| J9 | 114.6 ±0.2 | 352 ±8 | 185 ±5 | 23.9 ±1.9 | 0.0345 ±0.0006 | 3738 ±62 | 3651 ±76 | 24.2 ±1.9 |
| J10 | 129.0 ±0.2 | 146 ±7 | 402 ±21 | 19.9 ±1.9 | 0.0276 ±0.0004 | 2992 ±47 | 2960 ±50 | 20.0 ±1.9 |
| J11 | 177.9 ±0.3 | 1323 ±9 | 28 ±1 | 18.6 ±1.8 | 0.0128 ±0.0003 | 1384 ±37 | 1172 ±113 | 18.7 ±1.8 |

$\lambda_{230} = 9.1577 \times 10^{-6} \text{ y}^{-1}$, $\lambda_{234} = 2.8263 \times 10^{-6} \text{ y}^{-1}$, $\lambda_{238} = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ y}^{-1}$.

* $\delta^{234}\text{U} = ((^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{activity}} - 1) \times 1000$. ** $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}}$ was calculated based on ²³⁰Th age (T), i.e., $\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}} = \delta^{234}\text{U}_{\text{measured}} \times e^{2\lambda_{234}T}$.

Corrected ²³⁰Th ages assume the initial ²³⁰Th/²³²Th atomic ratio of $4.4 \pm 2.2 \times 10^{-6}$. Those are the values for a material at secular equilibrium, with the bulk earth ²³²Th/²³⁸U value of 3.8. The errors are arbitrarily assumed to be 50%.

Ages are relative to 2006 (or year before 2006)

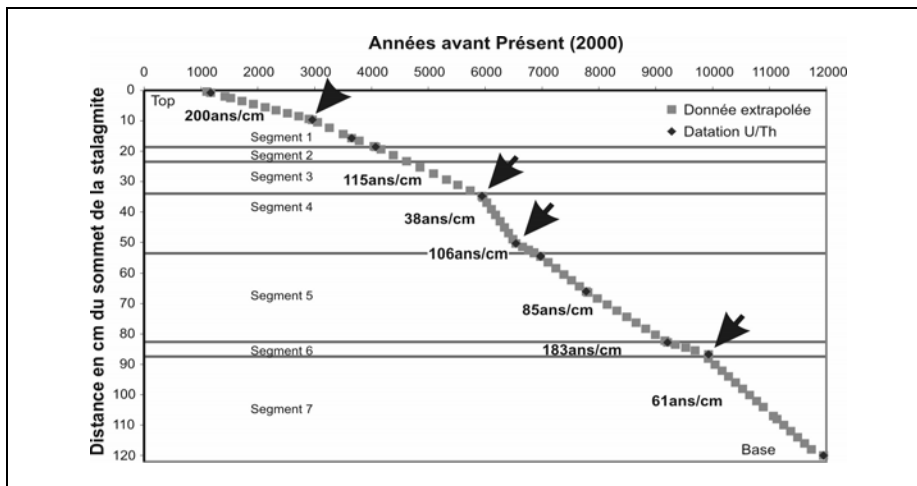


Figure 4. Courbe de croissance de la stalagmite JeG-stm-1 (à partir des résultats de datation U/Th et des données interpolées). Les flèches indiquent les niveaux où des changements de vitesse de croissance sont observés ; e.g. 10,1; 6,5; 5,9; 3,0 ka BP.

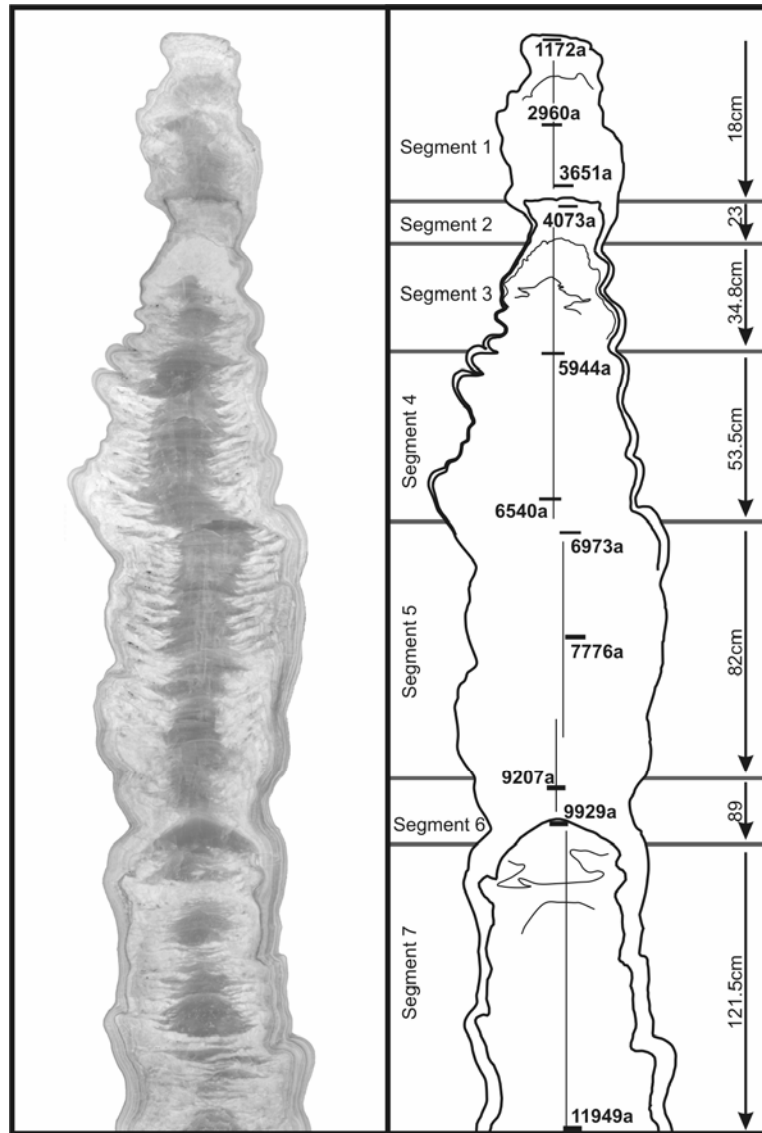


Figure 5. Balayage (« scanning ») à haute résolution d'une section en longueur de la stalagmite JeG-stm-1 avec un schéma correspondant figurant les points de datation U/Th. La stalagmite est divisée en sept segments de différentes caractéristiques de dimension et/ou cristallographiques.

Isotopes stables

Les résultats des mesures des isotopes stables (oxygène et carbone) sont présentés dans le Tableau 2. La composition isotopique du carbone de la stalagmite varie de -11,1 à -8,7‰ V-PDB (moyenne de -10,1‰). La composition isotopique de l'oxygène de la stalagmite varie de -6,1 à -3,9‰ V-PDB (moyenne de -5,1‰).

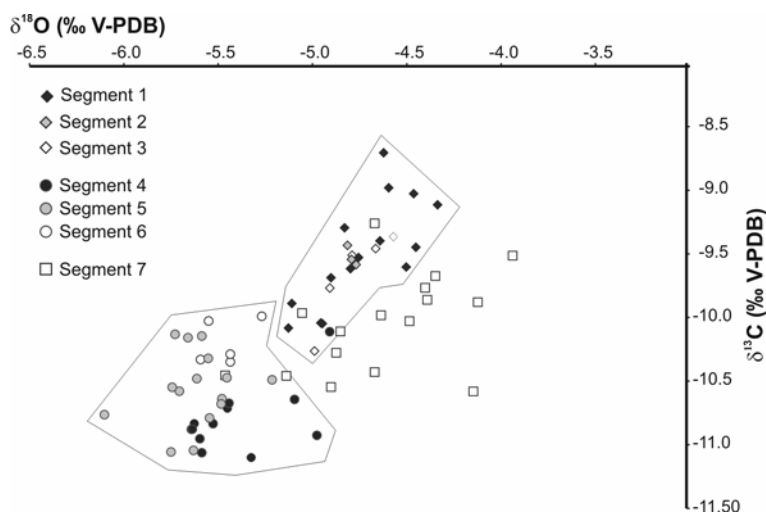


Figure 6. Graphique de $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^{13}\text{C}$ (en ‰ V-PDB) des échantillons pris le long de l'axe de croissance de la stalagmite JeG-stm-1 regroupés par segment (1 à 7). On observe que les segments 1, 2 et 3 montrent une signature isotopique similaire, ainsi que les segments 4, 5, et 6 qui possèdent les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ les plus négatives.

INTERPRETATION

Le graphique de $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^{13}\text{C}$ montre une tendance générale vers une précipitation de la calcite hors équilibre isotopique (Figure 6). Par exemple, l'évaporation de l'eau lors de la précipitation de la calcite augmentera fortement le $\delta^{18}\text{O}$ et le dégazage rapide de CO_2 augmentera fortement le $\delta^{13}\text{C}$. Liées au dégazage rapide, la sursaturation et la précipitation très rapide de la calcite peuvent donc se faire en dynamique cinétique (non-équilibre) et induire des variations de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ liées à la dynamique de précipitation (Verheyden *et al.*, 2006). On observe une signature isotopique légèrement différente selon les périodes avec des signatures isotopiques plus « lourdes » pour les périodes avant 10,1 ka et après 6 ka BP et une signature plus « légère » pour la période entre 10,1 ka et 6,0 ka BP. Les segments 1, 2 et 3 (du sommet; 1,2 – 6,0 ka BP) de la stalagmite sont caractérisés par des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et de $\delta^{18}\text{O}$ plus élevées en comparaison avec les segments 4, 5 et 6 qui possèdent les valeurs les moins élevées (6,0 – 10,1 ka BP). Le segment 7 (base de la stalagmite; 10,1 – 11,9 ka BP; Figure 6) est caractérisé par des valeurs $\delta^{13}\text{C}$ entre celles des deux groupes mentionnés ci-dessus (entre -10,6 et -9,2 ‰ V-PDB), et par des valeurs $\delta^{18}\text{O}$ semblables à celles des segments (1, 2, et 3) du sommet de la stalagmite (entre -5,5 et -3,9 ‰ V-PDB).

Le $\delta^{13}\text{C}$ de la stalagmite augmente quand l'activité du sol diminue (et donc l'apport en carbone végétal à signature très négative diminue) et que les conditions climatiques favorables à une végétation luxuriante se dégradent (Genty *et al.*, 2003). L'interprétation climatique des variations de $\delta^{18}\text{O}$ est plus délicate. Les variations en $\delta^{18}\text{O}$ sont liées aux variations du $\delta^{18}\text{O}$ de la pluie locale et de la température, ainsi, dans ce cas-ci, qu'aux variations de l'équilibre isotopique de précipitation (Verheyden, 2001; Fairchild *et al.*, 2006).

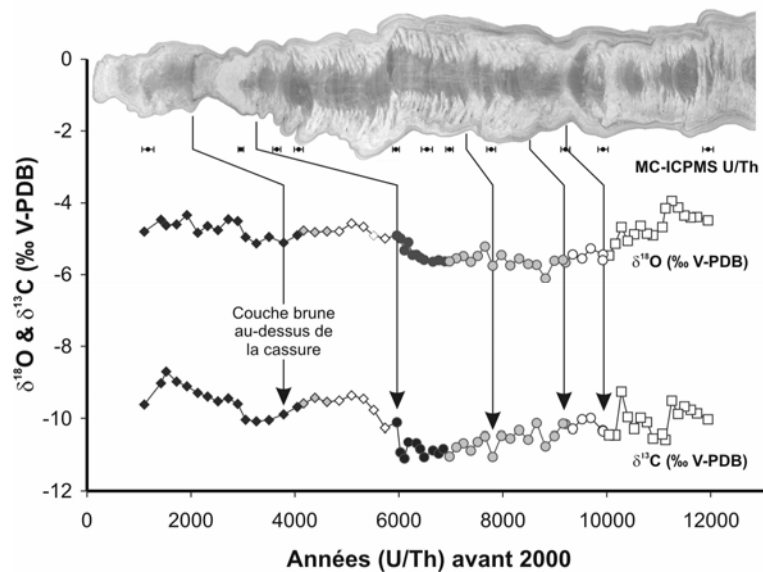


Figure 7. Schématique figurant la section polie de la stalagmite JeG-stm-1 ainsi que les profils correspondants aux résultats de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^{13}\text{C}$ (en ‰ V-PDB), et les points de datations U/Th. Les niveaux montrant des divergences isotopiques sont marqués avec des flèches.

Une interprétation préliminaire serait (Figure 7) :

- **De 12 ka à 10 ka BP (Segment 7):** amélioration des conditions de précipitation de la calcite avec une précipitation de la calcite plus près des conditions d'équilibre isotopique (car $\delta^{18}\text{O}$ aussi bien que $\delta^{13}\text{C}$ diminuent).
- **De 10 ka à 6 ka BP (Segments 4, 5 et 6):** bonnes conditions de précipitation de la calcite avec un sol actif, donc probablement des conditions généralement assez chaudes et assez humides pour maintenir une bonne activité du sol. Cette période est d'ailleurs marquée par une croissance relativement rapide de la stalagmite.
- **A partir de 6 ka BP (Segments 1, 2 et 3):** une dégradation des conditions idéales de précipitation de la calcite, donc avec une diminution de l'activité végétale probablement due à un assèchement généralisé.

Une étude plus détaillée et la comparaison avec des données climatiques d'autres proxy sont indispensables afin de confirmer ou infirmer ces réflexions préliminaires.

TABLEAU 2

Résultats des Analyses des Isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$; en ‰ V-PDB) des Echantillons Prélevés sur l'Axe de Croissance de la Stalagmite JeG-stm-1 (Jeita, Liban)

| Serial # | Echant. | Distance du top (cm) | Date Extrapolée (ans avant 2006) | $\delta^{18}\text{O}$ | | $\delta^{13}\text{C}$ | |
|----------|-----------|----------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| | | | | Mean ‰ V-PDB | Std. Dev. | Mean ‰ V-PDB | Std. Dev. |
| 1 | LR 10.10 | 0.4 | 1102 | -4.80 | 0.06 | -9.62 | 0.02 |
| 2 | J11 | 0.8 | 1172 | - | - | - | - |
| 3 | LR 10.9 | 2.0 | 1422 | -4.46 | 0.03 | -9.03 | 0.01 |
| 4 | LR 10.8 | 2.5 | 1522 | -4.62 | 0.04 | -8.71 | 0.01 |
| 5 | LR 10.7 | 3.5 | 1721 | -4.60 | 0.04 | -8.98 | 0.01 |
| 6 | LR 10.6 | 4.5 | 1921 | -4.34 | 0.02 | -9.11 | 0.01 |
| 7 | LR 10.5 | 5.6 | 2131 | -4.83 | 0.04 | -9.30 | 0.02 |
| 8 | LR 10.4 | 6.5 | 2321 | -4.64 | 0.04 | -9.40 | 0.03 |
| 9 | LR 10.3 | 7.5 | 2520 | -4.76 | 0.03 | -9.53 | 0.01 |
| 10 | LR 10.2 | 8.5 | 2720 | -4.45 | 0.03 | -9.45 | 0.01 |
| 11 | LR 10.1 | 9.4 | 2900 | -4.50 | 0.03 | -9.60 | 0.01 |
| 12 | J10 | 9.7 | 2960 | - | - | - | - |
| 13 | LR 9.3 | 10.5 | 3052 | -4.96 | 0.03 | -10.04 | 0.01 |
| 14 | LR 9.2 | 12.3 | 3259 | -5.13 | 0.04 | -10.08 | 0.01 |
| 15 | LR 9.1 | 14.4 | 3501 | -4.95 | 0.03 | -10.05 | 0.01 |
| 16 | J9 | 15.7 | 3651 | - | - | - | - |
| 17 | LR 8.3 | 16.6 | 3782 | -5.11 | 0.04 | -9.89 | 0.01 |
| 18 | LR 8.2 | 18.4 | 4044 | -4.90 | 0.04 | -9.69 | 0.02 |
| 19 | J8 | 18.6 | 4073 | - | - | - | - |
| 20 | LR 8.1 | 19.4 | 4165 | -4.77 | 0.05 | -9.59 | 0.03 |
| 21 | LR 7b.6 | 21.3 | 4385 | -4.82 | 0.06 | -9.43 | 0.02 |
| 22 | LR 7b.5 | 23.3 | 4616 | -4.79 | 0.03 | -9.54 | 0.01 |
| 23 | LR 7b.4 | 25.4 | 4853 | -4.79 | 0.04 | -9.51 | 0.01 |
| 24 | LR 7b.3 | 27.4 | 5089 | -4.57 | 0.03 | -9.37 | 0.02 |
| 25 | LR 7b.2 | 29.4 | 5320 | -4.67 | 0.05 | -9.46 | 0.01 |
| 26 | LR 7b.1 | 31.1 | 5517 | -4.91 | 0.03 | -9.77 | 0.03 |
| 27 | LR 7a.2 | 33.0 | 5736 | -4.99 | 0.02 | -10.26 | 0.01 |
| 28 | J7 | 34.8 | 5944 | - | - | - | - |
| 29 | LR 7a.1 | 35.3 | 5963 | -4.91 | 0.03 | -10.11 | 0.01 |
| 30 | LR 6.8 | 37.0 | 6028 | -4.98 | 0.04 | -10.93 | 0.02 |
| 31 | LR 6.7 | 39.1 | 6108 | -5.33 | 0.06 | -11.10 | 0.02 |
| 32 | LR 6.6 | 41.0 | 6181 | -5.10 | 0.02 | -10.64 | 0.01 |
| 33 | LR 6.5 | 43.1 | 6261 | -5.45 | 0.04 | -10.71 | 0.02 |
| 34 | LR 6.4 | 45.1 | 6336 | -5.44 | 0.05 | -10.67 | 0.02 |
| 35 | LR 6.3 | 47.0 | 6410 | -5.53 | 0.04 | -10.84 | 0.03 |
| 36 | LR 6.2 | 49.0 | 6487 | -5.59 | 0.03 | -11.06 | 0.02 |
| 37 | J6 | 50.4 | 6540 | - | - | - | - |
| 38 | LR 6.1 | 51.5 | 6656 | -5.64 | 0.01 | -10.88 | 0.02 |
| 39 | LR 5.4 | 52.5 | 6762 | -5.60 | 0.01 | -10.95 | 0.01 |
| 40 | LR 5.3 | 53.4 | 6857 | -5.63 | 0.03 | -10.83 | 0.01 |
| 41 | LR 5.2/J5 | 54.5 | 6973 | -5.63 | 0.05 | -11.04 | 0.02 |
| 42 | LR 5.1 | 56.4 | 7106 | -5.55 | 0.04 | -10.79 | 0.01 |
| 43 | LR 4.5 | 58.4 | 7242 | -5.48 | 0.03 | -10.68 | 0.02 |
| 44 | LR 4.4 | 60.4 | 7385 | -5.64 | 0.04 | -10.88 | 0.01 |
| 45 | LR 4.3 | 62.3 | 7518 | -5.48 | 0.06 | -10.64 | 0.01 |
| 46 | LR 4.2 | 64.3 | 7657 | -5.21 | 0.07 | -10.49 | 0.02 |
| 47 | J4 | 66.0 | 7776 | - | - | - | - |
| 48 | LR 4.1 | 66.4 | 7806 | -5.75 | 0.04 | -11.06 | 0.02 |
| 49 | LR 3.9 | 68.3 | 7972 | -5.45 | 0.02 | -10.47 | 0.01 |
| 50 | LR 3.8 | 70.3 | 8143 | -5.74 | 0.02 | -10.55 | 0.01 |
| 51 | LR 3.7 | 72.3 | 8314 | -5.55 | 0.03 | -10.32 | 0.01 |
| 52 | LR 3.6 | 74.4 | 8489 | -5.71 | 0.03 | -10.58 | 0.01 |
| 53 | LR 3.5 | 76.3 | 8652 | -5.73 | 0.02 | -10.13 | 0.00 |
| 54 | LR 3.4 | 78.3 | 8823 | -6.10 | 0.03 | -10.76 | 0.03 |
| 55 | LR 3.3 | 80.3 | 8993 | -5.61 | 0.04 | -10.48 | 0.01 |
| 56 | LR 3.2 | 82.2 | 9160 | -5.59 | 0.06 | -10.15 | 0.01 |
| 57 | LR 3.1/J3 | 82.8 | 9207 | -5.66 | 0.04 | -10.16 | 0.01 |
| 58 | LR 2.4 | 83.5 | 9344 | -5.44 | 0.02 | -10.29 | 0.02 |
| 59 | LR 2.3 | 84.5 | 9527 | -5.55 | 0.04 | -10.03 | 0.01 |
| 60 | LR 2.2 | 85.4 | 9691 | -5.27 | 0.03 | -9.99 | 0.04 |
| 61 | LR 2.1/J2 | 86.7 | 9929 | -5.44 | 0.04 | -10.35 | 0.02 |
| 62 | LR 1.17 | 88.1 | 9923 | -5.59 | 0.04 | -10.33 | 0.02 |
| 63 | LR 1.16 | 90.1 | 10044 | -5.46 | 0.04 | -10.46 | 0.02 |
| 64 | LR 1.15 | 92.1 | 10166 | -5.14 | 0.03 | -10.46 | 0.02 |
| 65 | LR 1.14 | 94.0 | 10281 | -4.67 | 0.04 | -9.26 | 0.02 |
| 66 | LR 1.13 | 96.0 | 10402 | -5.06 | 0.05 | -9.97 | 0.03 |
| 67 | LR 1.12 | 98.1 | 10527 | -4.87 | 0.04 | -10.28 | 0.01 |
| 68 | LR 1.11 | 100.1 | 10651 | -4.64 | 0.07 | -9.98 | 0.01 |
| 69 | LR 1.10 | 102.1 | 10772 | -4.85 | 0.03 | -10.11 | 0.03 |
| 70 | LR 1.9 | 104.1 | 10890 | -4.90 | 0.05 | -10.55 | 0.02 |
| 71 | LR 1.8 | 107.0 | 11069 | -4.67 | 0.02 | -10.43 | 0.02 |
| 72 | LR 1.7 | 108.0 | 11130 | -4.15 | 0.03 | -10.58 | 0.01 |
| 73 | LR 1.6 | 110.0 | 11251 | -3.94 | 0.02 | -9.51 | 0.01 |
| 74 | LR 1.5 | 112.0 | 11373 | -4.12 | 0.03 | -9.88 | 0.03 |
| 75 | LR 1.4 | 114.0 | 11494 | -4.35 | 0.02 | -9.67 | 0.01 |
| 76 | LR 1.3 | 116.0 | 11615 | -4.40 | 0.04 | -9.77 | 0.02 |
| 77 | LR 1.2 | 118.0 | 11737 | -4.39 | 0.03 | -9.86 | 0.02 |
| 78 | LR 1.1/J1 | 120.0 | 11949 | -4.49 | 0.03 | -10.03 | 0.02 |

CONCLUSIONS

La stalagmite JeG-stm-1 montre des variations cristallographiques, de vitesse de croissance, ainsi que de composition isotopique qui sont synchrones. On peut donc supposer que ces variations reflètent des variations régionales (changements climatiques et /ou environnementaux), potentiellement perturbées à une échelle de temps plus courte par des variations locales (tremblements de terre, variations dans l'alimentation en eau de la stalagmite, feux de forêt, défrichage, chute de blocs,...).

La stalagmite JeG-stm-1 suggère une amélioration des conditions climatiques depuis au moins 13000 ans BP. Un climat généralement propice à la croissance des stalagmites (chaud et humide) jusqu'à 6000 ans BP. A partir de 6000 ans BP, un assèchement généralisé semble affecté la stalagmite, dont la croissance s'arrête définitivement vers 1200 ans BP. Afin de confirmer le potentiel de la stalagmite pour la reconstitution climatique, une comparaison de la courbe en basse résolution avec des données climatiques d'autres *proxy* et des régions limitrophes est nécessaire.

Des études semblables sur d'autres stalagmites sont aussi nécessaires en guise de comparaison pour confirmer ou infirmer les réflexions préliminaires de cette étude.

REMERCIEMENTS

Cet article a été rédigé dans le cadre d'un projet de recherche subventionné par le Conseil National de la Recherche Scientifique (CNRS) du Liban. Le support technique a été assuré au Département de Géologie, AUB. Les analyses des isotopes stables ont été achevées à l'Université d'Erlangen (Allemagne). Les remerciements vont particulièrement au Spéléo-Club du Liban ainsi qu'à la direction de la grotte touristique de Jeita pour leur support et leur contribution, nécessaires à la réussite de ce projet.

REFERENCES

- Bar-Matthews, M., Matthews, A. & Ayalon, A. 1991. Environmental controls of speleothem mineralogy in karstic dolomitic terrain (Soreq Cave). *Journal of Geology*, 99: 189-207.
- Bar-Matthews, M., Ayalon, A., Kaufman, A. & Wasserburg, G.J. 1999. The Eastern Mediterranean palaeoclimate as a reflection of regional events: Soreq Cave. *Earth and Planetary Science Letters*, 166: 85-95.
- Brew, G., Barazangi, M., Al-Maleh, A.K. & Sawaf, T. 2001. Tectonic and geologic evolution of Syria. *GeoArabia*, 6: 573-615.
- Dubertret, L. 1955. *Carte géologique du Liban au 1/200000 avec notice explicative*. République Libanaise, Ministère des Travaux Publics, Beyrouth, 74 p.
- Dubertret, L. 1975. Introduction à la carte géologique au 1/50000 du Liban. *Notes et Mémoires sur le Moyen-Orient*, 23: 345-403.
- Edgell, H.S. 1997. Karst and hydrogeology of Lebanon. *Carbonates and Evaporites*, 12: 220-235.
- Fairchild, I.J., Smith, C.L., Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Matthey, D., McDermott, F. & E.I.M.F. 2006. Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth Science Reviews*, 75(1-4): 105-153.

- Frumkin, A., Carmi, I., Gopher, A., Ford, D.C., Schwarcz, H.P. & Tsuk, T. 1999. A Holocene millennial-scale climatic cycle from a speleothem in Nahal Qanah Cave. *The Holocene*, 9(6): 677-682.
- Genty, D. & Quinif, Y. 1996. Annually laminated sequences in the internal structure of some Belgian stalagmites - importance for palaeoclimatology. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1): 275-288.
- Genty, D., Blamart, D., Ouahdi, R., Gilmour, M., Baker, A., Jouzel, J. & Van-Exter, S. 2003. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data. *Nature*, 421: 833-837.
- Idriss, B., Nader, F.H., Verheyden, S. & Cheng, H. 2006. Preliminary work achieved for the petrographic and geochemical study on a stalagmite from the Jeita Cave (Lebanon). In Karkabi, S., Nader, F.H. & Metni, M., eds., *Proceedings of the 2nd Middle-East Speleology Symposium (MESS2) – Beirut, April 21-23, 2006*, Spéléo-Club du Liban, pp. 118-121.
- Karkabi, S. 1988. Al Ouat'Ouate (N° 3), 1988: special coloration. *Revue Libanaise de Spéléologie et de Karstologie*, Spéléo-Club du Liban, 80p.
- Karkabi, S. 1990. Al Ouat'Ouate (N° 5), 1990: cinquantenaire de la spéléologie libanaise. *Revue Libanaise de Spéléologie et de Karstologie*, Spéléo-Club du Liban, 136 p.
- Li, W., Lundberg, J., Dickin, A.P., Ford, D.C., Schwarcz, H.P., McNutt, R. & Williams, D. 1989. High precision mass-spectrometric uranium series dating of cave deposits and implications for palaeoclimate studies. *Nature*, 339: 534-536.
- Nader, F.H. 2004. The Jiita Cave (Lebanon). In Gunn, J., ed., *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Fitzroy Dearborn, New York-London, pp. 463-464.
- Nader, F., Swennen, R. & Ottenburgs, R. 2003. Karst-meteoric dedolomitization in Jurassic carbonates, Lebanon. *Geologica Belgica*, 6(1-2): 3-23.
- Renouard, G. 1955. Oil Prospects of Lebanon. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 39: 2125-2169.
- Robinson, S.A., Black, S., Sellwood, B.W. & Valdes, P.J. 2006. A review of palaeoclimates and palaeoenvironments in the Levant and Eastern Mediterranean from 25,000 to 5,000 years BP: setting the environmental background for the evolution of human civilization. *Quaternary Science Reviews*, 25: 1517-1541.
- Shen, C.-C., Edwards, R.L., Cheng, H., Dorale, J.A., Thomas, R.B., Moran, S.B., Weinstein, S. & Edmonds, H.N. 2002. Uranium and thorium isotopic and concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Chemical Geology*, 185 (3-4): 165-178.
- United Nations Development Program (UNDP) 1970. *Liban étude des eaux souterraines*. Beirut, Government of Lebanon.
- Verheyden, S. 2001. *Speleothems as palaeoclimatic archives. Isotopic and geochemical study of the cave environment and its Late Quaternary records*. Unpubl. PhD thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium. 132 p.
- Verheyden, S., Baele, J.M., Keppens, E., Genty, D., Cattani, O., Cheng, H., Lawrence, E., Zhang, H., Van Strijdonck, M. & Quinif, Y. 2006. The Proserpine stalagmite (Han-Sur-Lesse Cave, Belgium): preliminary environmental interpretation of the last 1000 years as recorded in a layered speleothem. *Geologica Belgica*, 9(3-4): 245-256.