

# APPORT DES DÉPÔTS ENDOKARSTIQUES À LA RECONSTITUTION DES PALÉO-MORPHOLOGIES D'UN ENDO-KARST ÉPIGÈNE : L'EXEMPLE DE LA GROTTÉ DE LA MINE DE JBEL ES SERJ (TUNISIE CENTRALE)

## CONTRIBUTION OF ENDOKARSTIC DEPOSITS TO THE RECONSTRUCTION OF THE PALEO-MORPHOLOGIES OF AN EPIGENIC ENDO-KARST: THE EXAMPLE OF LA MINE CAVE OF JBEL ES SERJ (CENTRAL TUNISIA)

Emna SBEI, Hédi Ben OUEZDOU, Mahjoor LONE, Yun-Chuan CHUNG, Chuan-Chou SHEN

### Résumé

Le karst de la région centrale de la Tunisie est bien connu par la présence de nombreuses cavités souterraines actives ou fossiles. Ces cavités n'ont fait l'objet que de peu d'études géomorphologiques, principalement en raison des équipements spécialisés nécessaires pour les explorer. La grotte de la Mine située à Jbel Es Serj représente l'un des exemples les plus spectaculaires de paysages karstiques souterrains dans cette région. Elle constitue un bel exemple d'une « grotte épigène » particulièrement creusée par la percolation des eaux à partir de la surface. La « spéléogénèse épigénétique » dans les niveaux intermédiaires et inférieurs de la grotte de la Mine a ensuite laissé place à quatre générations de concrétionnement qui correspondent vraisemblablement à des périodes climatiques humides : La première phase de concrétionnement (C1) (Pléistocène inférieur), la deuxième phase de concrétionnement (C2) (Pléistocène moyen), la troisième phase de concrétionnement (C3) (fin Pléistocène moyen/Holocène récent) et la quatrième phase de concrétionnement (C4) (historique à subactuelle). Ainsi, ces phases de concrétionnement sont intercalées par des phases d'effondrement ; à savoir : la première phase d'effondrement (e1), la deuxième phase d'effondrement (e2) et la troisième phase d'effondrement (e3). Ces phases témoignent de modalités d'effondrement spécifiques, liées au réajustement mécanique des plafonds et des parois de la grotte.

### Mots-clés

grotte épigène, spéléogénèse, datations (U-Th), concrétions, effondrement

### Abstract

The karst of central region of Tunisia is well known by the presence of many active or fossil underground caves. However, these caves are poorly studied from a geomorphological perspective, mainly because of the requirement of specific equipment for their exploration. La Mine cave located at Jbel Es Serj represents one of the most spectacular examples of underground karst landscapes in this region. It serves as a good example of an « epigenic cave » formed through water percolation from the surface. « Epigenic speleogenesis » in the middle and lower levels of la Mine cave has resulted in four phases of carbonate deposition (speleothem), which probably correspond to humid climatic periods. The first speleothem generation (C1) dates back to the lower Pleistocene, the second speleothem generation (C2) corresponds to the middle Pleistocene, the third speleothem generation (C3) is associated with the late middle Pleistocene/ recent Holocene, and the fourth speleothem generation (C4) relates to the historical to subrecent phase. Thus, the successive phases of speleothem' deposition interspersed by several collapse generations, namely the first generation of collapsed blocks (e1), the second generation (e2), and the third generation (e3). These phases of collapse are associated with significant collapse processes related to mechanical readjustment of the cave's ceilings and walls.

### Keywords

epigene cave, speleogenesis, dating (U-Th), carbonate deposition, collapse

## INTRODUCTION

Le karst souterrain, où se situe la grotte de la Mine sur le versant sud-est du Jbel Es Serj, présente l'un des paysages endokarstiques les plus exceptionnels de la région centrale de la Dorsale tunisienne.

Cette grotte constitue un exemple remarquable d'un endokarst épigène formé principalement par l'infiltration des eaux de surface, illustrant ainsi de manière exemplaire les caractéristiques de formations des vides souterrains par dissolution. La grotte de la Mine a fait, il y a quelques années,

l'objet de nombreuses recherches qui ont beaucoup contribué à la compréhension des caractéristiques de cet environnement souterrain. Il convient de souligner d'abord, les travaux des géologues (Marzougui *et al.*, 2003, 2004 et 2005 ; Marzougui *et al.*, 2003, 2004 et 2005 ; Mansoura *et al.*, 2003 ; Ouaja *et al.*, 2003) qui ont été les premiers à attirer l'attention sur l'importance de la géologie dans la formation de la grotte de la Mine. De plus, cette grotte a également fait l'objet d'une étude archéologique menée par Ben Nasr *et al.* (2017) qui a souligné son importance préhistorique. Au cours des dernières années, la grotte de la Mine a suscité l'intérêt des paléoclimatologues tels que Genty *et al.* (2006) ; Chuan Chou *et al.*, (2023). Les chercheurs ont considéré la grotte comme l'un des meilleurs enregistreurs des variations paléoclimatiques en raison des dépôts de calcite et des lamines de croissance, qui peuvent être analysés à l'aide de la méthode isotopique.

En revanche, la grotte de la Mine n'a jusqu'à présent pas fait l'objet de recherches géomorphologiques détaillées, à l'exception des études par Lhopiteau (1980) et Karray (2007), qui sert toujours de référence. Dans cet article, notre attention se porte sur une nouvelle approche basée une lecture géomorphologique des dépôts endokarstiques, en particulier dans les niveaux intermédiaires et inférieurs de la grotte de la Mine. Cela permettra tout d'abord d'établir un cadre chrono-stratigraphique cohérent et approprié pour ces dépôts, puis de reconstituer les principales phases de l'évolution spéléogénétique de la grotte étudiée.

## I. SITUATION GÉOGRAPHIQUE, CADRE GÉOLOGIQUE ET CONTEXTE CLIMATIQUE

La grotte de la Mine est localisée dans la partie centrale de la Dorsale tunisienne, plus précisément à une altitude de 930 m dans un vallon descendant le long du versant sud-est du massif de Jbel es Serj (Marzougui *et al.*, 2003) (Figure 1). Ce massif s'étend sur une longueur de 40 km et une largeur de 10 km, selon une orientation SW-NE. Il est caractérisé par un sommet d'une altitude de 1357 m, ainsi que par deux versants profondément découpés par des ravins et des sources karstiques.

La grotte de la Mine de Jbel Es Serj est creusée dans les puissantes couches calcaires aptiens de type

récifal de plus de 200 m d'épaisseur qui donnent à la région ses spécificités karstiques. L'armature de Jbel Es Serj, relativement simple, est constituée d'une épaisse série sédimentaire, allant du l'Aptien supérieur à l'Albien inférieur (Marzougui *et al.*, 2003, cité par Burollet, 1956), connue localement sous le nom de « Formation Serj » (Figure 2). Ces formations calcaires sont plissées et fortement affectées par de nombreuses failles multidirectionnelles (Frémont, 1969 ; Turki, 1975 ; Karray, 2007). Ces fractures présentent des zones de faiblesses potentielles qui favorisent l'infiltration et permettent la circulation des eaux de surface vers les couches profondes. (Marzougui *et al.*, 2003 ; Karray, 2007). Il est plausible que l'essentiel du façonnement karstique dans ce massif s'est effectué sur une période qui s'étale depuis le Mio-Pliocène, période considérée comme la plus humide et la plus favorable pour une intense karstification des substrats carbonatés (Frémont, 1969 ; Ben Ayed, 1993 ; Sghari, 2011).

Le développement de l'exo et l'endokarst de Jbel Es Serj, comme partout dans la Dorsale tunisienne, a été largement influencé par les paléoclimats para ou périglaciaire comme en témoignent les formes nivo-karstiques (Fournet, 1969 ; Bourgou, 1993 ; karray, 2007). Les surfaces entre 1300 et 900 m affichent une considérable extension de formes nivo-karstiques marquée des modelés de kamenitzas, des lapiés en forme de champignon et des dalles ébréchées (Photo 1a et 1b), ainsi que des niches et des pavages niveaux (Photo 1c).

Le climat de la région étudiée est de type méditerranéen semi-aride avec une moyenne annuelle de précipitations d'environ 400 mm (1982-2012) au sud-est de Jbel es Serj (station Ousseltia), pouvant atteindre 610 mm (1994-2004), au nord-ouest de ce massif (station Ain Bou Saâdia). Il est évident que le versant occidental tellien est exposé régulièrement aux importantes dépressions provenant de l'ouest et du nord-ouest, tandis que le versant steppique, qui abrite la grotte de la Mine, est à l'abri de ces courants humides. Les températures moyennes annuelles s'élèvent à 17°C dans le versant steppique, avec une température maximale mensuelle moyenne de 27,3°C et une température minimale mensuelle moyenne de 8,3°C (Sbei, 2021). Les caractéristiques steppiques du climat ont un impact significatif sur la végétation, qui se traduit par la présence de pins d'Alep, d'arbustes bas et hauts,

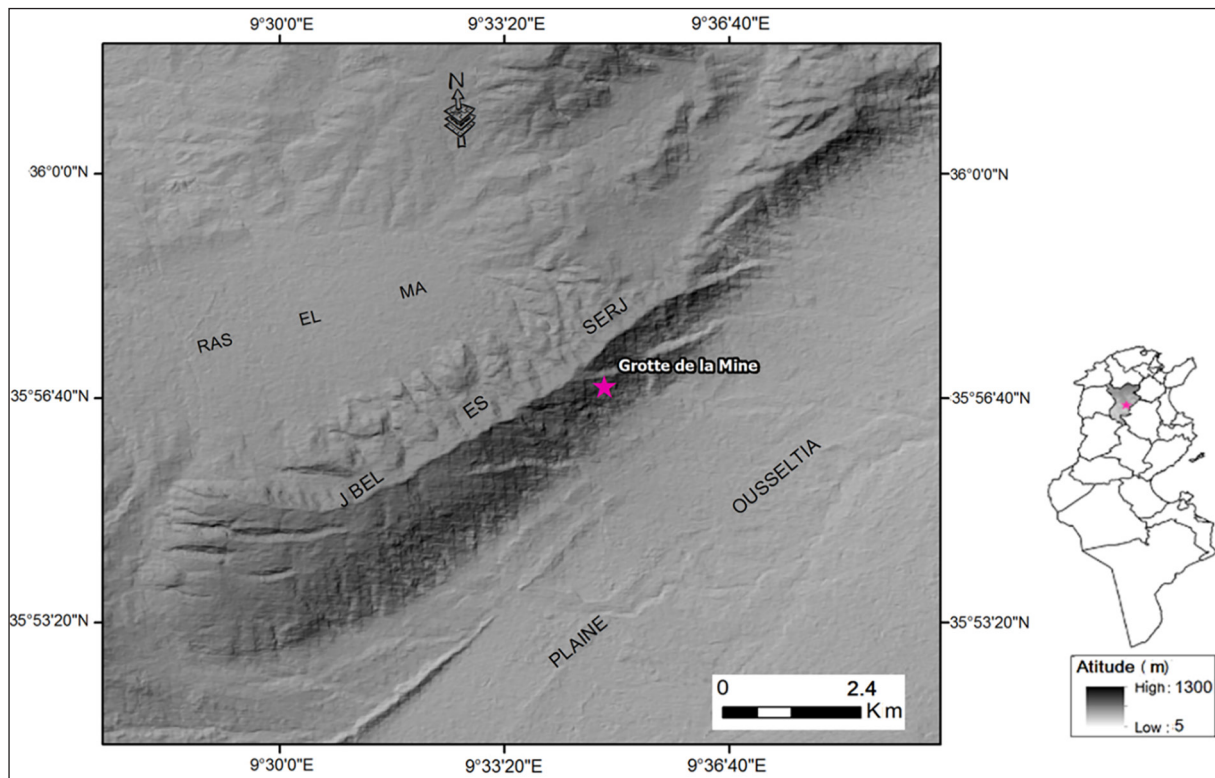


Figure 1. Localisation de la grotte de la Mine dans le massif de Jbel Es Serj, Tunisie centrale

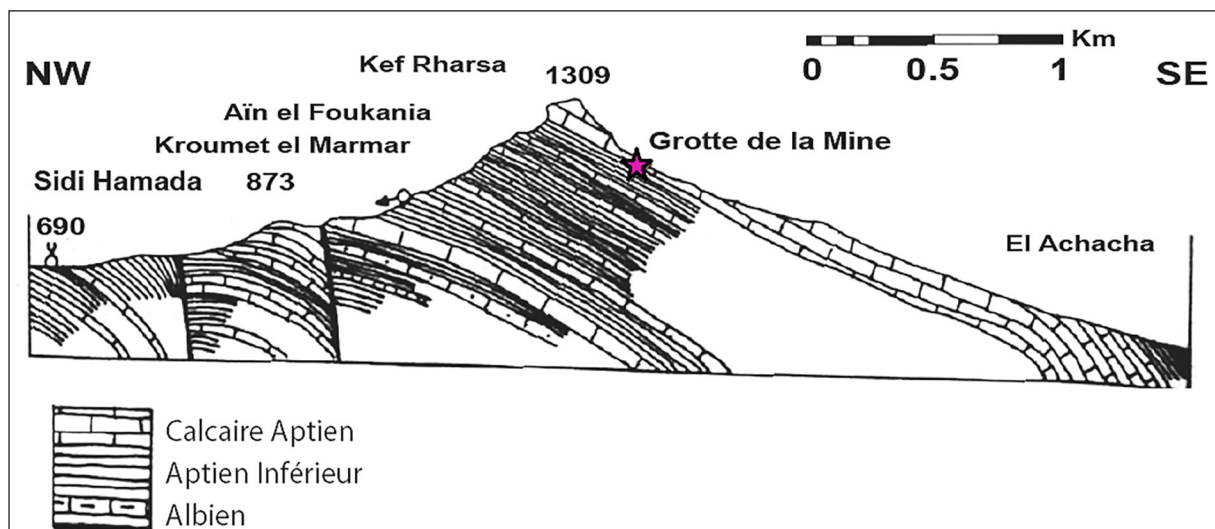


Figure 2. Coupe géologique simplifiée montrant la position de la grotte de la Mine Jbel Es Serj, Tunisie centrale (d'après Castany, 1955, modifié)

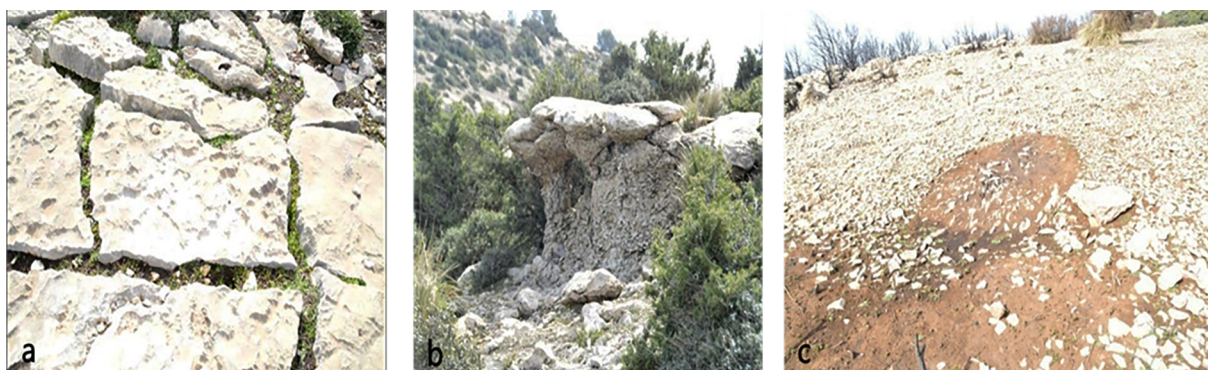
parsemés d'oléastres qui poussent partout sur le flanc sud-est de Jbel Es Serj (Frémont, 1969).

## II. SPÉLEOGENÈSE DE LA GROTTTE DE LA MINE

### A. Description de la grotte étudiée

La grotte de la Mine (coordonnées géographiques : 9°34' 49,83"E /34°56' 50,49"N) a été découverte au

début du XX<sup>e</sup> siècle. Cette cavité correspondante à une ancienne mine de zinc, s'étend sur environ 4100 m de longueur et présente un dénivelé de 395 m. La grotte s'ouvre sur deux entrées : la première connue sous le nom de « l'entrée artificielle » se situe à une altitude de 930 m, et la deuxième sous le nom de « l'entrée naturelle » se situe à 1044 m, les deux conduisent à une suite de réseaux de galeries et de salles étagées, réparties sur trois niveaux distincts : inférieur, intermédiaire et supérieur (Figure 3).



**Photo 1.** Le lapiez de diaclase (a), le méga lapiez en forme de champignon de Jbel Es Serj (b) et la niche de nivation (c) (cliché : Abichou A.)

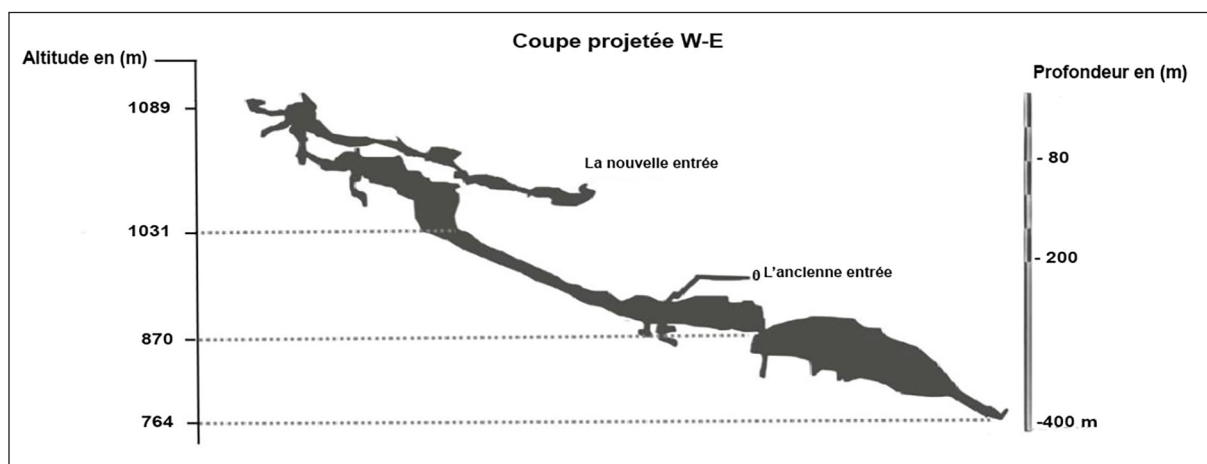
Le niveau inférieur, situé entre 764 et 842 m d'altitude, abrite la salle Présidentielle « Habib Bourguiba ». Il comprend diverses formations de concrétions (stalactites, draperies, excentriques) et présente un plancher stalagmitique irrégulier en raison des blocs effondrés.

Le niveau intermédiaire, situé entre 870 et 1031 m, est relié au niveau inférieur par des puits et au niveau supérieur par le « Puits de deux colonnes ». Cette partie intermédiaire se divise en une partie orientale riche en concrétions et une partie occidentale marquée plus par des effondrements.

Le niveau supérieur, appelé aussi le « nouveau réseau » (plus de 1031 m), et a été découvert en 2012 (Marzougui *et al.*, 2004 ; Ben Nasr, 2017). La présence de structures de combustion et de zones de cendres à 50 mètres de « l'entrée naturelle » de la grotte, notamment dans la « salle préhistorique », indique une occupation humaine ancienne remontant à environ 3 845 +/- 40 BP (Ben Nasr, 2017).

### B. Spéléogénèse polyphasée d'origine épigénétique

L'organisation de galeries et de salles de la grotte de la Mine en trois niveaux étagés, suscite une interrogation quant à son origine. L'hypothèse la plus plausible suggère que cette grotte s'est formée sous l'action des eaux météoriques ou des eaux chargées en acides provenant du dioxyde de carbone. Ce type de grotte est connu sous le nom de « grotte épigénétique » (Mangin, 1975 ; Audra et Palmer, 2011). Les études effectuées sur la genèse des grottes épigénétiques ont montré l'importance primordiale du gaz carbonique dans le processus de karstification. En effet, c'est le CO<sub>2</sub> dissous ou acide carbonique, principalement dérivé de processus biologiques dans le sol ou de l'atmosphère, qui est à l'origine de la dissolution des roches calcaires. Ces eaux superficielles suffisamment acides, s'infiltrent à travers les fractures de la roche et dissolvent rapidement le calcaire jusqu'à ce qu'il atteigne une saturation en carbonates dissous. Cependant, une fois cette saturation atteinte, les taux de dissolution diminuent considérablement.



**Figure 3.** Coupe schématique de trois niveaux de la grotte de la Mine (d'après Cacciardi et Van den Broeck, 2013)

Cela signifie que l'eau reste légèrement sous-saturée lorsqu'elle pénètre dans les fractures profondes, ce qui ralentit le processus de karstification. Toutefois, à mesure que les fissures s'élargissent et que le débit d'eau augmente, la dissolution de la roche s'intensifie, créant ainsi un réseau de fractures hydrauliquement connectées qui se développent au fil du temps pour former des conduits et des cavités organisés (Jouves, 2018).

L'étagement de la grotte de la Mine en trois niveaux révèle une karstification polyphasée due à des phases de réajustements fortement influencées par les variations successives du niveau de base hydrologique. Ces mouvements ont fossilisé certains réseaux souterrains et par la même occasion, ils ont créé de nouveaux réseaux karstiques. Les bas niveaux d'eau et les vidanges résultant de l'abaissement des niveaux de base hydrologique ont favorisé la formation de concrétions. Par cet argument, on explique l'abondance de concrétions massivement développées dans la grotte. La description de l'ornement du plafond, des parois et des planchers de la grotte montre de volumineuses concrétions variées dont la formation est liée à l'égouttement issu principalement de l'eau infiltrée à travers l'épikarst fissuré. La variété des concrétions s'exprime par une abondance de coulées de calcite, de draperies, des stalactites et des colonnes sur les parois et les plafonds. De plus, plusieurs générations de stalagmites se succèdent sur les planchers, indication renvoyant de cette « spéléogénèse épigénétique ». En revanche, la présence d'accumulations de limon sableux contenant des altérites de roche calcaire, ainsi que des sédiments d'huîtres et de rudistes attachés aux banquettes dans le niveau supérieur, en particulier dans la galerie de l'Escargotière, est interprétée comme étant le résultat du processus de corrosion. Ce processus se produit lorsque les blocs qui se sont effondrés se dissolvent lentement à mesure que le niveau d'eau à l'intérieur de la galerie remonte, sous l'effet des mouvements ascensionnels de la phase paragénétique (Van den Broeck *et al.*, travail en cours).

### III. CHRONOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS CARBONATÉES ET DES BLOCS D'EFFONDREMENT ET SA SIGNIFICATION SPÉLEOGÉNIQUE

La grotte a préservé plusieurs accumulations morphologiques et sédimentaires qui indiquent son origine épigénétique. Les données morphologiques,

couplées aux datations (U-Th), permettent d'établir un cadre chrono-stratigraphique relatif à ces accumulations et d'estimer leur contribution à la reconstitution de l'endo-paysage de cette grotte.

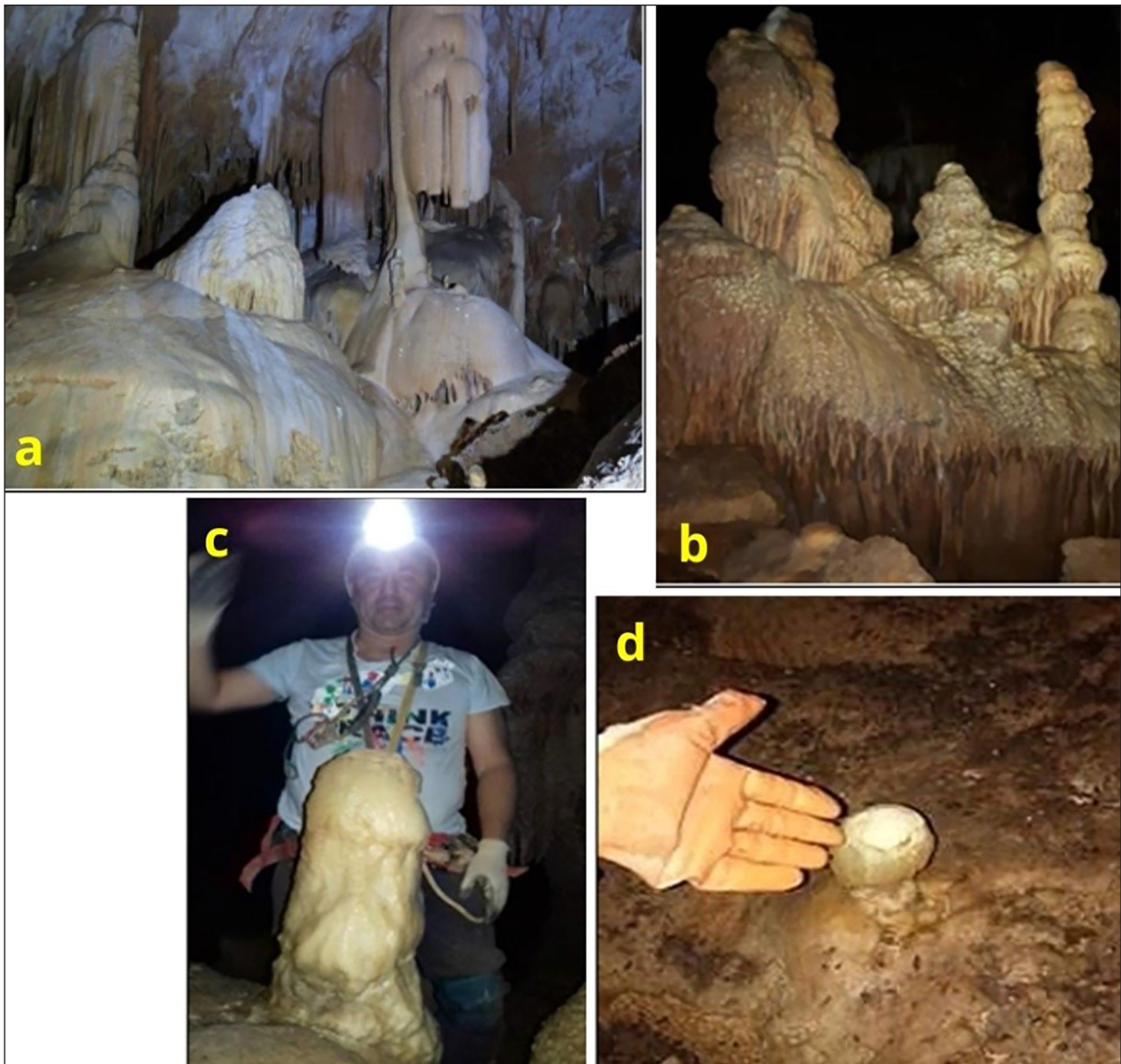
#### A. Caractères généraux des dépôts endokarstiques dans les niveaux intermédiaires et inférieurs

Les observations des dépôts endokarstiques, situés dans les niveaux intermédiaires et inférieurs de la grotte de la Mine ont révélé la présence de deux types, résultant de processus variés. Les dépôts clastiques et les formations chimiques. Les dépôts clastiques sont principalement constitués de blocs effondrés, tandis que les formations chimiques se limitent aux concrétions carbonatées.

##### 1. Les formations carbonatées

Les stalagmites sont définies comme des formations chimiques qui s'élèvent du sol de la grotte. Elles se forment parallèlement à la stalactite suspendue. La formation des stalagmites commence par l'eau de surface qui s'infiltré à travers le sol et la roche au-dessus de la grotte. En traversant les couches de calcaire, l'eau se charge en carbonate de calcium. Lorsque cette eau atteint le plafond de la grotte, elle tombe goutte à goutte de la stalactite et s'écrase au sol, ce qu'on appelle « l'effet splash ». À chaque éclaboussement, une fine couche de carbonate se forme et se cristallise progressivement, au fur et à mesure que ces gouttes d'eau se dégazent (Couchoud, 2005 ; Salomon, 2006). Au fil du temps, ces couches de carbonate s'accumulent pour former une structure stratifiée en forme de cône inversé. Les stalagmites sont abondantes sur les planchers des niveaux intermédiaires et inférieurs. Elles se divisent en quatre catégories (Photo 2).

L'examen de la morphologie des formations carbonatées révèle également la présence de stalagmites brisées dans les niveaux inférieurs et intermédiaires (Photo 3). Cela témoigne de l'instabilité du système karstique épigénétique causée par différents facteurs (Quinif, 1996 ; Delannoy *et al.*, 2009 ; Marzougui *et al.*, 2003 ; Perroux, 2005), tels que : i) la succession d'événements instantanés dans la grotte, qui peuvent par exemple être liés à l'activité tectonique et sismique, ii) les effondrements causés par le poids des stalagmites, iii) l'intervention humaine et le vandalisme dans la grotte.



**Photo 2.** Différentes catégories de dépôts stalagmitiques dans la grotte de la Mine. a- Les dômes stalagmitiques : ces accumulations carbonatées de forme elliptiques et de taille plurimétrique sont compactes, de couleur rubéfiée, parfois jaunâtres ou orangées. b- Les stalagmites en forme de piliers ou de stalagmite cierge : pouvant atteindre une hauteur de 1 à 2 m. Ces stalagmites se déposent de manière isolée ou regroupée, sur des gros blocs effondrés. c- Les stalagmites blanches d'environ 0,2 à 0,4 m de hauteur. Elles se déposent également sur des effondrements de plafonds. d- Les stalagmites naissantes en forme de petits dômes blancs de 3 à 5 cm de hauteur. Elles se forment sur les effondrements de plafonds. (cliché : Ghaleb H. pour la photo a ; Fourati S. pour les photos b et c ; Sbei E. pour la photo d)

En outre, des stalagmites translattées ont été relevées lors de l'observation des formations stalagmitiques dans les niveaux inférieurs et intermédiaires (Photo 4). Elles se distinguent par leur forme inclinée et leur axe de croissance qui est translatté par rapport à leur point d'alimentation initial. Cette observation peut être expliquée par deux possibilités : soit un déplacement de l'alimentation, soit un basculement du massif stalagmitique. Dans les deux cas, on obtient un déplacement de l'axe de croissance des stalagmites par rapport à leur point d'alimentation initial (Ouaja *et al.*, 2003).

## 2. Les dépôts clastiques

Les deux niveaux intermédiaires et inférieurs de la grotte de la Mine sont principalement couverts de dépôts clastiques constitués de gros blocs anguleux à subanguleux de taille métrique. Ces blocs sont formés suite à l'effondrement des plafonds et l'écaillage des parois de la grotte (Figure 4). À cet égard, deux hypothèses ont été proposées pour expliquer sa genèse.

La première hypothèse suggère un effondrement successif des plafonds et des parois. Dans cette

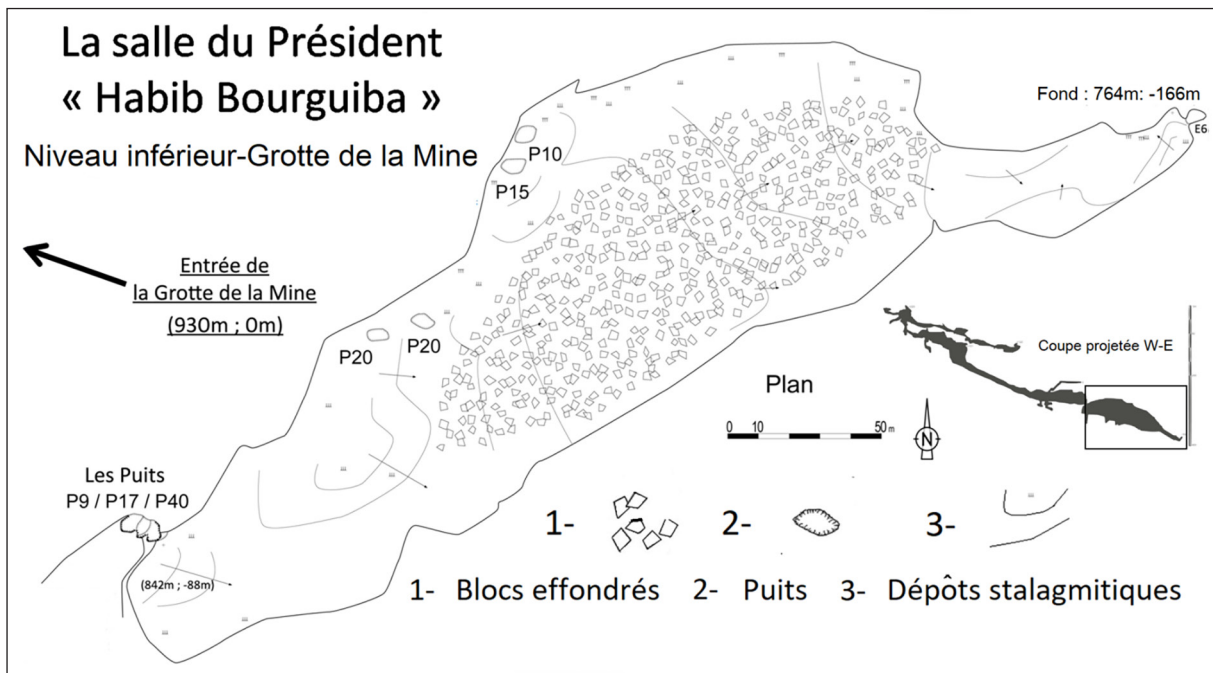


**Photo 3.** Édifices stalagmitiques brisés (à droite) et des stalagmites translattées (à gauche) (cliché : Sbei E.)

hypothèse, la présence de grandes quantités non négligeables de blocs effondrés ainsi que leur position sous des concrétions stalagmitiques, suggère un phénomène d'effondrement polyphasé. Il est probable que ces effondrements soient en grande partie influencés par des climats froids, la fissuration, ainsi que les mouvements tectoniques et sismotectoniques, qui ont déjà été prouvés dans certaines études comme étant responsables de la fragilisation des parois et favorisant leur détachement (Blanc, 1985 ; Perroux, 2005).

L'effondrement des plafonds et des parois de la grotte est également expliqué par l'évolution mor-

phologique externe du massif de Jbel Es Serj. Cette hypothèse, avancée par Karray (2007), relie l'effondrement des plafonds et des parois de la grotte de la Mine au façonnement morphologique cryonival en surface, en particulier avec la formation des « serjas » ou des « ensellements », qui donnent à Jbel Es Serj son allure actuelle et lui ont donné son nom. De nombreuses questions subsistent quant à la relation entre la formation des « serjas » en tant que formes d'érosion cryonivales, influencées par le froid et la neige (Frémont, 1969), et l'effondrement des plafonds et des parois souterraines. Par conséquent, une étude approfondie sera nécessaire pour comprendre la dynamique morphologique



**Figure 4.** Répartition des formations carbonatées (stalagmites) et des blocs effondrés dans la salle du Président «Habib Bourguiba» (extrait de plan de la grotte de la Mine d'après Cacciardi et Van den Broeck, 2013)

souterraine et les mécanismes responsables des effondrements souterrains.

**B. Succession chronologique des générations des concrétions et d’effondrement dans la salle de « Grand Interstrate »**

L’observation de la salle de «Grand Interstrate», dans le niveau intermédiaire de la grotte de la Mine, révèle la présence de deux générations d’effondrement (e2) et (e3), séparées par une génération de concrétionnement (Figure 5). La génération de concrétionnement (C3) qui sépare les effondrements (e2) et (e3) est, quant à elle, caractérisée par la présence de petites stalagmites translucides. Les datations (U-Th) effectuées sur deux stalagmites situées à différentes positions sur les éboulis dans la salle «Grand Interstrate», indiquent qu’ils se sont formés entre  $96\,225 \pm 550$  ans à  $1\,696 \pm 43$  ans et entre  $140\,833 \pm 749$  ans à  $3\,186 \pm 15$  ans, soit à la fin du Pléistocène moyen jusqu’à l’Holocène.

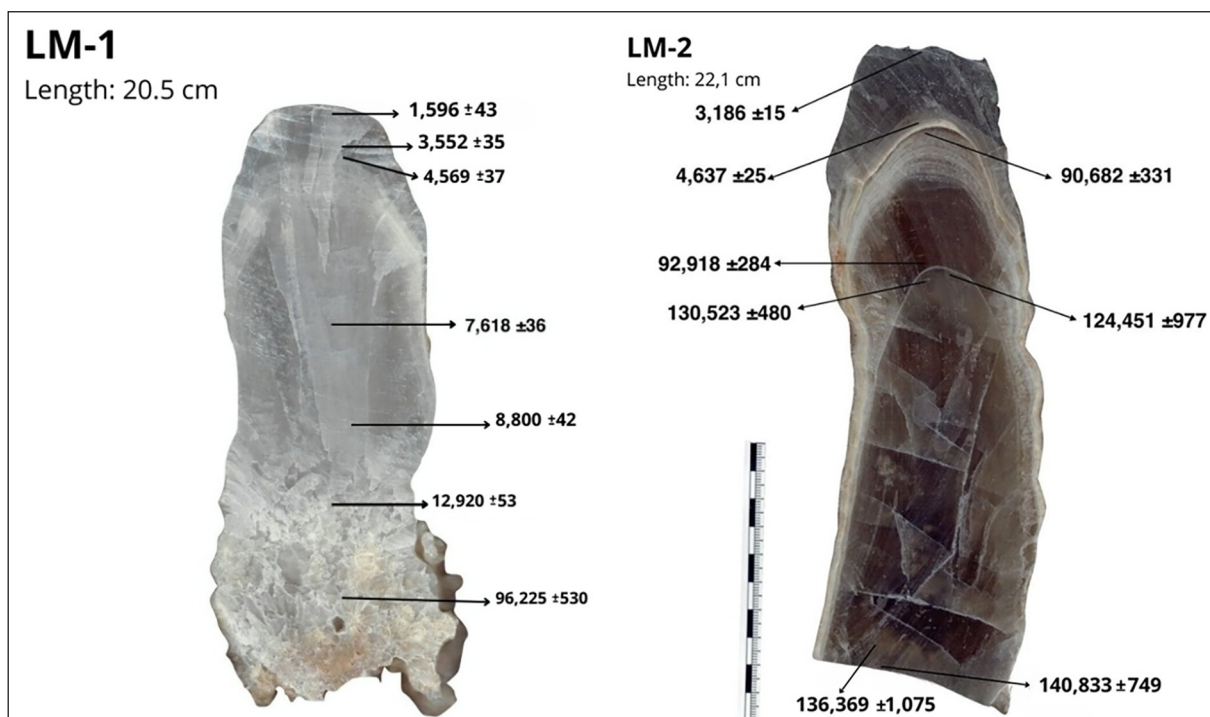
Les différentes générations d’effondrement ne contiennent pas de matériaux datables. Cependant, leur position morpho-stratigraphique nous a permis de les calibrer chronologiquement de manière relative après chaque génération de stalagmites. Il semble que la deuxième génération d’effondrement (e2) se soit produite avant  $140\,833 \pm 749$  ans, pendant laquelle de grandes quantités de blocs an-

guleux provenant des plafonds et des parois se sont accumulés, suggérant que cette phase est la plus importante. En revanche, la troisième génération d’effondrement (e3) est plus récente, car elle s’est produite après  $1\,696 \pm 43$  ans jusqu’à aujourd’hui, mais avec une intensité moindre par rapport à la deuxième génération (Photo 4).

L’absence de la première génération de stalagmites (C1) et la deuxième génération de stalagmites (C2) dans la salle de « Grande Interstrate », suggère deux hypothèses possibles soit, les deux générations de stalagmites ont été totalement colmatées par des blocs qui se sont effondrés du plafond et ont laissé leur empreinte sur le sol de la salle de « Grande Interstrate », soit, l’instabilité et l’effondrement successif du plafond de cette salle ne permettent ni aux processus d’égouttement de fonctionner convenablement au niveau du plafond, ni aux dépôts stalagmitiques de se former sur le plancher couvert d’éboulis .

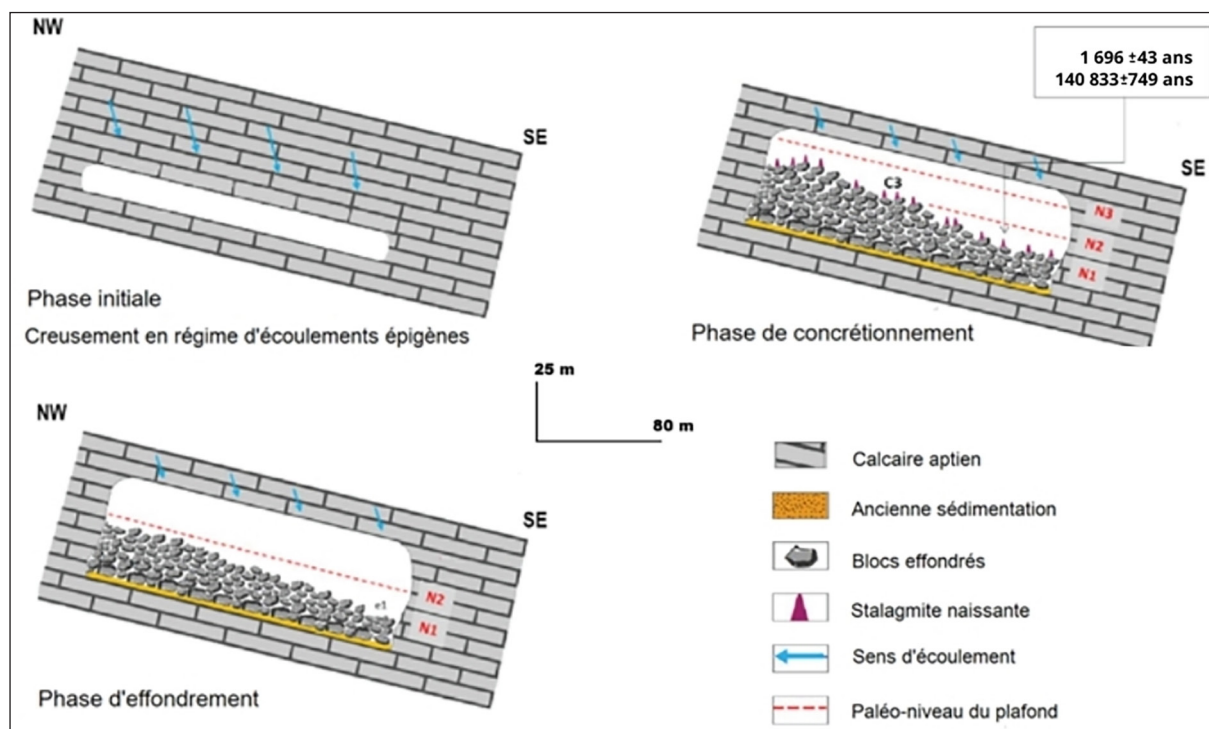
**C. Succession chronologique des générations des stalagmites et d’effondrement dans la salle du Président « Habib Bourguiba »**

L’observation de la répartition des formations carbonatées à l’intérieur de la salle du président « Habib Bourguiba » dans le niveau inférieur révèle une grande variété de stalagmites, réparties en quatre



**Photo 4.** Section polie verticale de la stalagmite LM-1 et LM-2 avec les âges U/Th





**Figure 5.** Les étapes spéléogéniques proposées de la mise en place de dépôts stalagmitiques et des effondrements dans la partie occidentale de la salle de « Grand Interstrate »

générations distinctes, allant des plus anciennes aux plus récentes (Figure 6) :

- La première génération de stalagmites (C1) se compose de puissants édifices stalagmitiques de la première catégorie, qui ont été précédemment décrits et datés par Fournet (1974, cité par Karray 2007), au Pléistocène inférieur.
- La deuxième génération de stalagmites (C2) est formée par les dépôts stalagmitiques de la deuxième catégorie qui se sont accumulés au cours du Pléistocène moyen, selon la chronologie proposée par Fournet, (1974, cité par Karray 2007).
- La troisième génération de stalagmites (C3) est formée des stalagmites situées à la surface du sol ou ont poussé, à quelques mètres de la deuxième génération de stalagmites. Deux stalagmites « LM-3 » et « LM-4 » ont été prélevés et finement broyés avant d'être soumises à des datations U-Th. La préparation du matériel et la datation carbonatée a été réalisée au laboratoire HISPEC de l'Université de Taiwan. Les datations U-Th effectuées sur ces deux morceaux de stalagmite présentent des incertitudes relativement élevées en raison des fortes teneurs en éléments détritiques. Les âges obtenus par cette méthode situent la formation de la stalagmite LM-3 entre  $112\,693 \pm 2\,110$  ans pour la base et  $2\,973 \pm 131$  ans pour le sommet, tandis que pour la stalagmite LM-4, les âges varient entre

$9\,460 \pm 71$  pour le sommet et  $104\,174 \pm 579$  ans pour la base. Les enregistrements fournis par les lamines de croissance de ces échantillons couvrent la période correspondant à la fin du Pléistocène moyen/Holocène (Photo 5).

- La quatrième génération de stalagmites (C4) est constituée par des stalagmites récentes de petite taille, ce qui suggère que leur croissance remonte à l'âge historique jusqu'à subactuel.

La succession de différentes générations de concrétions et d'effondrements dans la grotte de la Mine semble indiquer des évolutions karstologiques et paléogéographiques au cours du Quaternaire. De tels changements sont étroitement liés aux variations climatiques. En effet, les quatre générations de concrétions identifiées dans la salle du président Habib Bourguiba correspondent vraisemblablement à des conditions climatiques plus humides que celles observées actuellement, caractérisées par des précipitations et un apport d'eau important, qui ont favorisé leur croissance (Genty *et al.*, 2005).

Chacune de ces phases de concrétionnement a été suivie d'une phase d'effondrement. Trois générations d'effondrements ont été identifiées dans ce niveau. Les blocs effondrés peuvent être considérés stratigraphiquement comme étant situés sous les stalagmites, car ils ont été accumulés à la même sur-

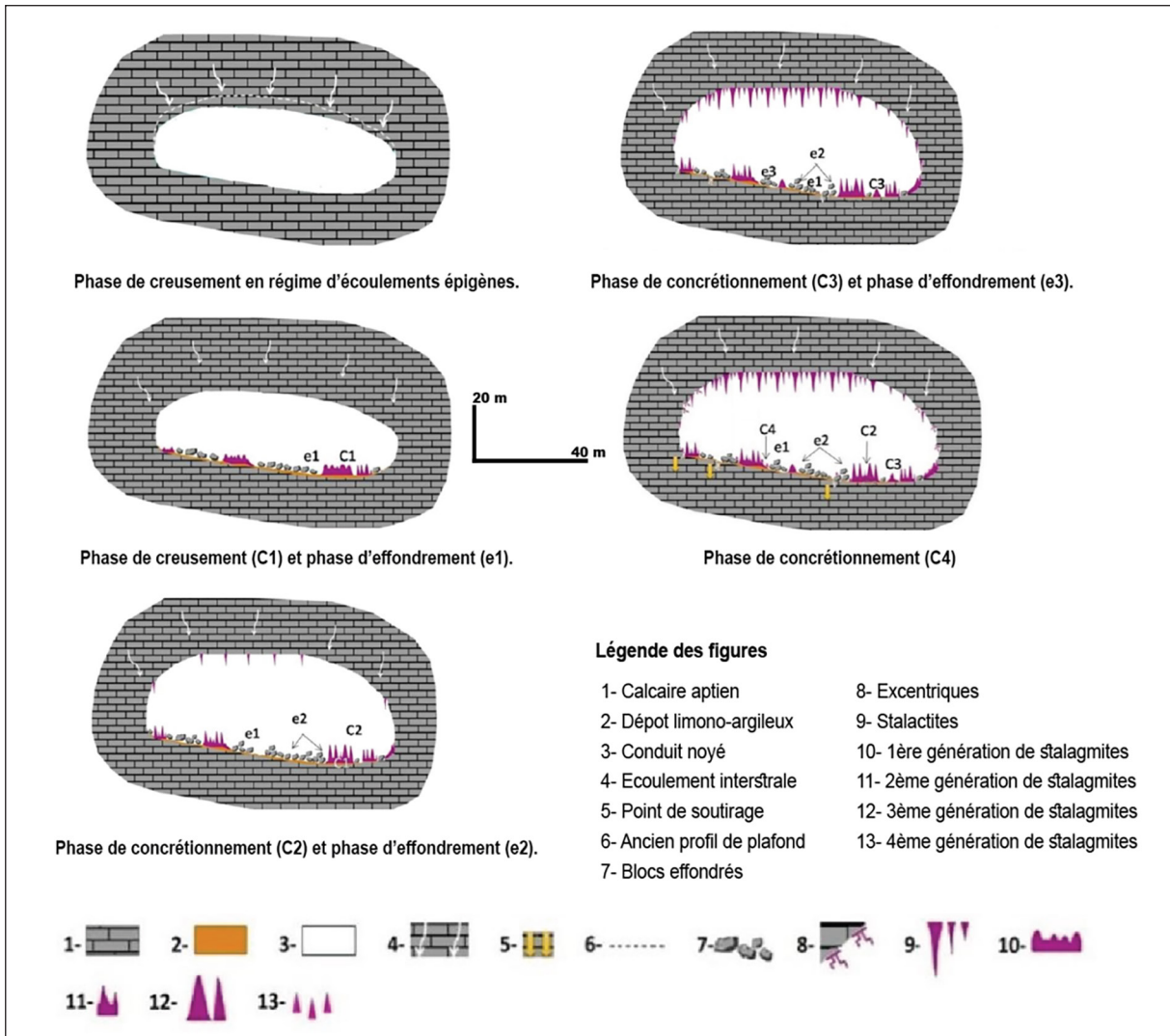


Figure 6. Schéma synthétique montrant les étapes spéléogéniques de la mise en place de dépôts stalagmitiques et des effondrements dans la partie centrale de la salle du Président « Habib Bourguiba »

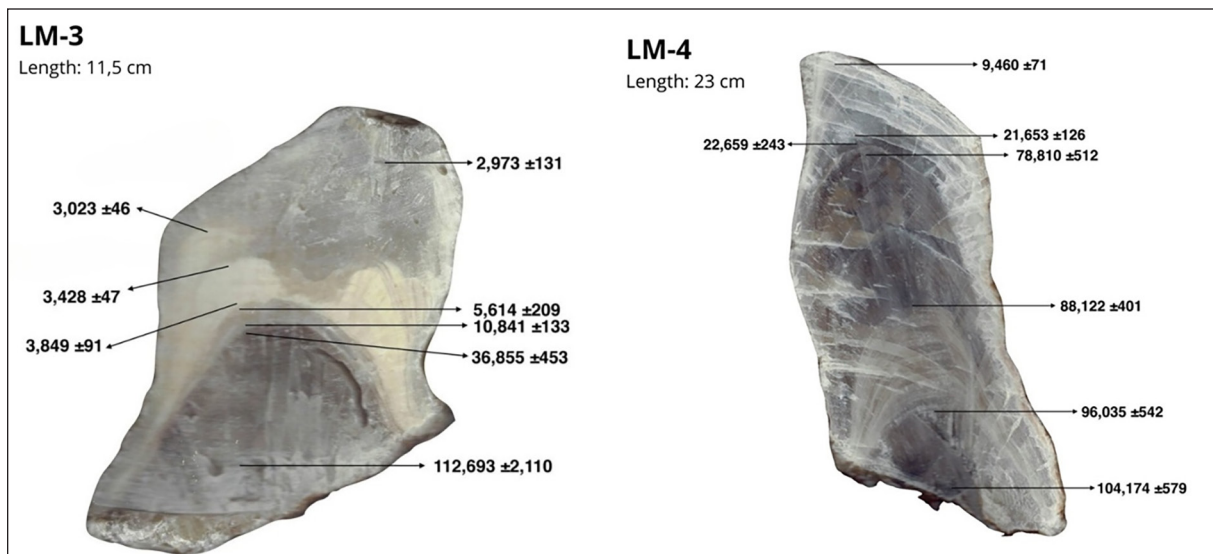


Photo 5. Section polie verticale de la stalagmite LM-3 et LM-4 avec les âges U/Th

face du sol où celles-ci ont poussé. Par conséquent, il est important de les dater chronologiquement de manière relative après chaque génération de stalagmites. En particulier, il est nécessaire de prendre en compte le fait que la base de la stalagmite recouvre la phase d'effondrement qui a été antérieure :

- La première génération d'effondrement (e1) est caractérisée par d'épaisses accumulations de blocs effondrés au fond de la grotte, qui se sont probablement formés après de la mise en place de la première génération de concrétionnement.
- La deuxième génération d'effondrement (e2) se dépose dans la grotte après la genèse de la deuxième génération de stalagmites.
- La troisième génération d'effondrement (e3) se met en place après la troisième génération de stalagmites vers la fin de l'holocène.

Les trois phases d'effondrement enregistrées pendant la morphogenèse de la grotte sont probablement synchrones des périodes climatiques froides, périodes considérées comme les plus propices à une érosion intense des plafonds et des parois de la grotte. Cette relation entre les dépôts détritiques et les phases froides a été établie dans de nombreuses études antérieures dont celles menées par Blanc (1985), Losson *et al.* (2006), Quinif (1991), Quinif et Maire (1998), Delannoy *et al.* (2009), Genty *et al.* (1997). Ces effondrements peuvent également être provoqués par des mouvements tectoniques qui ont fragilisé les plafonds et les parois calcaires. Cela a permis à l'eau de s'infiltrer à travers les fissures et les diaclases, fragilisant davantage les plafonds et les parois de la grotte et provoquant leur détachement.

## CONCLUSION

À l'issue de cette étude, il apparaît que l'évolution morphogénique de l'endokarst épigène de la grotte de la Mine est considérablement plus complexe qu'il n'y apparaît à première vue. Cette complexité morphogénique se manifeste à travers une diversité remarquable des dépôts endokarstiques, illustrée par une variété de formations de concrétion (des stalagmites, des stalactites, des draperies et des excentriques), et une grande quantité de blocs effondrés. L'analyse morphologique des différentes générations de stalagmites et d'éboulis effondrés dans les niveaux intermédiaires et inférieures de la grotte indiquent plusieurs changements morphogéniques et spéléogéniques au cours du

Quaternaire. De tels changements sont étroitement liés à la variation des conditions hydrogéologiques et paléoclimatiques externes qui ont influencé le fonctionnement des processus de concrétionnement et d'effondrement à l'intérieur de la grotte. En se basant sur ces critères, deux générations d'effondrements (e3 et e2) séparées par une génération de concrétions (C3) sont identifiées dans la salle du « Grand Interstrate » (niveau inter-médiaire). Quant à la salle du président « Habib Bourguiba » (niveau inférieur), elle présente une diversité encore plus marquée, avec une large gamme de stalagmites réparties en quatre générations de concrétions (C4, C3, C2 et C1) et trois d'effondrements (e3, e2 et e1). Les datations par (U-Th), combinées aux études chronologiques antérieures (Fournet, 1974), ont permis de construire un cadre chronostratigraphique relatif pour les dépôts endokarstiques de la cavité. Ce cadre a permis de déterminer, de manière relativement cohérente, l'âge absolu ou relatif de chaque génération de dépôts identifiée précédemment dans les deux salles. Le Tableau 1 récapitule ces résultats.

## REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent tout d'abord à H. Ghaleb, M. Tanoubi, S. Fourati, M. Mellouhia, et tous les membres de l'Association de Spéléologie et d'Escalade de Zaghouan (ASEZ) pour leur accompagnement précieux sur le terrain, parfois dans des conditions difficiles. Leur assistance a été essentielle pour la collecte des données et la réalisation des analyses. Nous remercions également Dr Abdelhakim Abichou pour ses remarques constructives et ses conseils éclairés. Son expertise et ses suggestions ont permis d'améliorer considérablement la qualité de cet article. Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance aux deux relecteurs anonymes dont la relecture attentive et constructive a contribué de manière significative à améliorer la clarté et la précision du manuscrit. Leurs commentaires et suggestions ont été très appréciés.

## BIBLIOGRAPHIE

- Audra, P. & Palmer, A.N. (2011). Structure des réseaux karstiques : les contrôles de la spéléogenèse épigène. *Géomorphologie*, 17(4), 359-378.
- Ben Ayed, N. (1993). L'évolution tectonique de l'avant-pays de la chaîne alpine de Tunisie du début du Mésozoïque à l'Actuel. *Annales des Mines et de la géologie*, 32, 33-257.

Stratigraphie de dépôts endokarstiques	Chronologie de dépôts (datation U-Th)		Conditions morphoclimatiques déduites	Chronologie antérieure
	Salle de «Grand Interstrate»	Salle du Président «Habib Bourguiba»		
4 <sup>e</sup> génération de stalagmites (C4)	Non identifiée	Historique à subactuel	Climat humide	/
3 <sup>e</sup> génération d'effondrement (e3)	Postérieure à 1 696 ± 43 ans	Postérieure à 2 973 ± 131 ans	Climat froid Activité tectonique	/
3 <sup>e</sup> génération de stalagmites (C3)	Fin du Pléistocène moyen/Holocène : 96 225 ± 550 ans à 1 696 ± 43 ans 140 883 ± 749 ans à 3 186 ± 15 ans	112 693 ± 2 110 ans à 2 973 ± 131 ans 104 174 ± 579 ans à 9 460 ± 71 ans	Climat humide	22 580 ± 249 ans 5 363 ± 37 ans (Genty <i>et al.</i> , 2006)
2 <sup>e</sup> génération d'effondrement (e2)	Antérieure à 140 833 ± 749 ans	Antérieure à 112 693 ± 2 110 ans	Climat froid Activité tectonique	
2 <sup>e</sup> génération de stalagmites (C2)	Non identifiée	Pléistocène moyen ou supérieur	Climat humide	Pléistocène inférieur (Fournet, 1974)
1 <sup>e</sup> génération d'effondrement (e1)	/	/	Climat froid Activité tectonique	/
1 <sup>e</sup> génération de stalagmites (C1)	Non identifiée	Pléistocène inférieur	Climat humide	(Fournet, 1974)

**Tableau 1.** Tableau chrono-stratigraphique synthétique des dépôts endokarstiques dans la salle de « Grand Interstrate » (niveau intermédiaire) et la salle du Président « Habib Bourguiba » (niveau inférieur)

- Ben Nasr, J. (2017). *Les structures archéologiques de la grotte karstique de « la Mine » (Jebel Serj - Tunisie Centrale)* - Note préliminaire. Actes du sixième colloque international du Département d'Archéologie : Campagnes et archéologie rurale au Maghreb et en Méditerranée, avril 2016, F.L.S.H, Kairouan, Tunisie, pp. 187-194.
- Blanc, J.J. (1985). Les phases d'effondrements aux grottes préhistoriques : du Würm à l'Holocène dans le midi de la France. *Karstologia*, 6, 21-28.
- Boulaouidat, H. (2014). *Caractérisation, structure et évolution de l'aquifère carbonaté du Bouverzoug (Constantine)*. Mémoire de Master, Université Constantine 1, 63-70 p.
- Bourgou, M. (1993). *Le bassin versant du Kébir Miliane : Étude géomorphologique*. Publication de la Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, Série 2, Géographie, v. 33, 345 p.
- Bousnina, A. (1986). *La variabilité des pluies en Tunisie*. Publications de l'Université de Tunis, Faculté des sciences humaines et sociales, 2<sup>e</sup> série, géographie, v. 22, 308 p.
- Chuan-Chung, Y., Dhaouidi, H., Lone, M., Sbei, E., Ben Ouezdou, H. & Shen, C.H. (2023). *Stalagmite inferred prolonged droughts in northern Africa during Heinrich events*. Actes du XXI Inqua Congress, Rome, Italie.
- Couchoud, I. (2006). *Étude pétrographique et isotopique des spéléothèmes du sud-ouest de la France formés en contexte archéologique : contribution à la connaissance des paléoclimats régionaux du stade isotopique 5*. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, 341 p.
- Delannoy, J.J., Gauchon, C., Hobkea, F., Jaillet, S., Maire, R., Perette, Y., Perroux, A.S., Ployon, E. & Vanara, N. (2009). Karst: from palaeogeographic archives to environmental indicators. *Geomorphologie*, 15(2), 83-94.
- Dumontier, P., Courtaud, P., Ferrier, C., Armand, D., Convertini, B., Girard, M., Solo Sebastien., A. & Valdeyron, N. (2022). La grotte de Laà 2 à Arudy (64) : les occupations du Mésolithique et du Néolithique final dans leurs contextes chronoculturels. *Gallia préhistoire*, 62, 7-72.
- Fremont, A. (1969). Dans la région du Djebel Serdj (Dorsale Tunisienne). *Méditerranée*, 10<sup>e</sup> année(1), 56-78.
- Genty, D., Blamart, D., Ghaleb, B., Plagnes, V., Causse, C.H. & Bourges, F. (2006). Timing and dynamics

- of the last deglaciation from European and North African isotope  $^{13}\text{C}$  stalagmite profiles comparison with Chinese and south Hemisphere stalagmites. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2118-2142.
- Genty, D., Blamart, D. & Ghaleb, B. (2005). Apport des stalagmites pour l'étude de la grotte Chauvet : datations absolues U/Th (TIMS) et reconstitution paléoclimatique par les isotopes stables de la calcite. *Bulletin de la Société préhistorique française*, 102(1), 45-62.
- Genty, D., Baker, A. & Barnes, W.S. (1997). *Comparaison entre les lamines luminescentes et les lamines visibles annuelles de stalagmites*. Comptes-rendus de l'Académie des Sciences - Serie IIA- Earth and Planetary Science, Paris, vol 325, Issue III, pp.193-200.
- Guillien, Y & Rondeau. (1966). Le modelé cryonival de la Tunisie centrale et septentrionale. *Annales de géographie*, n° 409, pp.257-267.
- Hlaoui, Z. (2017). *Évolution de la température et de la pluie au nord-ouest de la Tunisie dans le cadre des changements climatiques : cas de la région de Seliana*. Séminaire International de l'UR BiCade, FLAH Manouba, Tunisie (en cours).
- Jouves, J. (2018). *Spéléogenèse et structure de réseaux karstiques : état de l'Art*. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, 27-61 p.
- Karray, M.R. (2007). *Étude géomorphologique de Sahel et Kairounais septentrionaux et leurs abords montagneux*. Thèse de doctorat d'État, Université de Tunis, 2 tomes, 322-414 p.
- Lhopiteau, J.J. (1980). La Tunisie spéléologique. *Bulletin de Spéleo-Drack*, 14, Edit groupe spéléologique de Havre, pp.184.
- Losson, B., Corbonnois, J., Argant, J., Brulhet, J., Pons-Branchu, E. & Quinif, Y. (2006). Interprétation paléoclimatique des remplissages endokarstiques de la vallée de la Moselle à Pierre-la-Treiche (Lorraine, France). *Géomorphologie*, 12, 37-48.
- Mansoura, M., Srarfi, D., Marzougui, W., Ouaja, M. & Ben Haj Ali, M. (2006). *Les grottes du Jbel Serj : Étude et aménagement*. Acte du 3<sup>ème</sup> congrès international du patrimoine géologique : La Basilique, El Kef, Tunisie, pp.35-45.
- Marzougui, W., Mansoura, M. & Ouaja, M. (2005). *Les spéléothèmes : archives de l'instabilité de la grotte de la Mine*. Acte du 5<sup>ème</sup> Colloque National du Patrimoine Géologique, pp.47.
- Marzougui, W., Ouaja, M., Ouakad, M. & Zargouni, F. (2004). *Rôle de la tectonique dans la genèse et l'évolution des systèmes karstiques*. Actes du 2<sup>ème</sup> Colloque National du Patrimoine Géologique, Tunis. *Annales des Mines et de la Géologie*, 41, pp.119-131.
- Marzougui, W., Ouaja, M. & Zargouni, F. (2003). *Les grottes karstiques ; un patrimoine géologique à préserver et une richesse naturelle à valoriser*. Actes du 3<sup>ème</sup> congrès International Environnement et Identité en Méditerranée, Hammamet, Tunisie.
- Nehme, C., Jabbour-Gedeon, B., Sadier, B., Delannoy, J.J. & Gerard, C.H. (2009). Reconstitution spéléogénique de la grotte de Kanaan (Antélias, Liban). Contribution à la morphogenèse du Nahr Antelias. *Karstologia*, 54, 21-36.
- Ouaja, M., Vermorel, G., Martin Luz, H., Mansoura, M. & El Koundi, M. (2003). *Étude de l'aménagement de la grotte de la Mine*. Actes du 2<sup>ème</sup> Colloque National du Patrimoine Géologique, Tunis. *Annales des Mines et de la Géologie*, 93-118.
- Perroux, A.S. (2005). *Les remplissages détritiques endokarstiques contribution méthodologique à la lecture des mémoires paléogéographiques et environnementales : application aux systèmes karstiques de Choranche (Vercors) et d'Ornac (Bas-Vivarais)*. Thèse de doctorat, Université de Savoie, 413 p.
- Quinif, Y. (1996). Annually laminated sequences in the internal structure of some Belgian stalagmites. Importance for paleoclimatology. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1), 275-288.
- Quinif, Y & Maire, R. (1998). Pleistocene deposits in Pierre Saint-Martin cave, French Pyrenees. *Quaternary Research*, 49(1), 37-50.
- Salomon, J.N. (2006). *Précis de Karstologie*. Presses Universitaires de Bordeaux, Pessac, 2<sup>ème</sup> édition, 289 p.
- Sbei, E. (2021). *Genèse et évolution géomorphologique des grottes karstiques en Tunisie : le cas de la grotte de la Mine (Tunisie centrale) et la Grotte de Ghar kriz (Tunisie Tellienne)*. Thèse de doctorat, Université de Tunis, 55-86 p.
- Sgharbi, A.B. (2011). Observations de karsts pliocènes fossilisés par des limons éoliens quaternaires dans les monts de Matmata (Sud-est tunisien). *Karstologia*, 57, 1er semestre, 1-12.
- Turki, M.M. (1975). *Étude géologique du massif Serdj-Bargou (Atlas tunisien central)*. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Université Paris VI, 108 p.
- Zerai, K. (2006). *Les environnements holocènes et actuels dans le bassin versant de l'oued Sbeïtla (Tunisie centrale)*. Thèse de doctorat, Université Denis-Diderot (Paris 7), Université de Paris 7, 333p.

***Coordonnées des auteurs :***

Emna SBEI  
Université de Jendouba  
Institut Supérieur des Sciences Humaines de  
Jendouba 8189  
Tunisie  
[sbeiemna@gmail.com](mailto:sbeiemna@gmail.com)

Hédi BEN OUEZDOU  
Université de Tunis  
Faculté des Sciences Humaines et Sociales de  
Tunis (FSHST)  
Laboratoire de Cartographie Géomorphologique  
des Milieux, des Environnements et des  
Dynamiques (CGMED)  
Tunisie

Mahjoor LONE  
Université Nationale de Taiwan  
Laboratoire de Spectrométrie de Masse de Haute  
Précision et de Changement Environnemental  
(HISPEC)  
Taipei, Taiwan

Yun-Chuan CHUNG  
Université Nationale de Taiwan  
Laboratoire de Spectrométrie de Masse de Haute  
Précision et de Changement Environnemental  
(HISPEC)  
Taipei, Taiwan

Chuan-Chou SHEN  
Université Nationale de Taiwan  
Laboratoire de Spectrométrie de Masse de Haute  
Précision et de Changement Environnemental  
(HISPEC)  
Taipei, Taiwan