

## KARST DANS LES ÉVAPORITES : MARQUEUR EFFICACE DES ÉVÉNEMENTS RÉCENTS. L'EXEMPLE DU MONT SÉDOM (ISRAËL)

Eric HALLOT

### Résumé

Les évaporites sont extrêmement solubles comparativement aux roches calcaires. Des roches évaporitiques fossiles sont présentes sur presque 25 % de la surface des continents. Dans certaines conditions d'aridité, ces roches subsistent en affleurement. Le Mont Sédom en Israël sur la rive ouest de la Mer Morte est constitué par la tête exposée d'un diapir de sel actif légèrement déformé, constitué principalement de couches de halite marine datant du Néogène, dans lesquelles sont intercalées de fines couches d'anhydrite, de gypse, de schistes et de grès. Un karst impressionnant s'y développe, donnant naissance à de très nombreux réseaux de grottes et de phénomènes karstiques en tout genre. Vu la haute solubilité de ces roches, ces phénomènes sont très rapides et peuvent atteindre des dimensions très importantes. Cela entraîne un renouvellement rapide des formes et, à l'échelle géologique, certains phénomènes peuvent s'avérer éphémères. Le karst dans les évaporites ne semble donc pas être un bon enregistreur pour des événements très anciens ou très lents. Par contre, il semble être un excellent outil pour étudier des phénomènes récents et rapides (Quaternaire y compris l'Holocène). La tectonique, la sismicité, les paléoclimats, les anciens niveaux aquifères et les paléo-drainages sont autant de questions pouvant trouver des réponses dans l'étude du karst dans les évaporites.

### Mots-clés

évaporites, karst, grottes de sel, Mont Sédom, Israël, Mer Morte

### Abstract

*The evaporitic rocks are highly soluble comparatively to calcareous rocks. Fossils evaporitic rocks are present under nearly 25 % of the continents surface. In arid climate, these rocks stay in outcrop. Mount Sedom in Israel on the west side of the Dead Sea is the exposed head of a light deformed salt diapir, constituted mainly of Neogene halite beds, in which are interbedded fine layers of anhydrite, gypsum, shale and sandstone. An impressive karst occurs with a lot of salt caves and diverse karstic phenomena. In regards the high solubility of these rocks, these phenomena are speedy and may reach important dimensions. That leads to a quick replacement of the forms and at the geologic scale, some phenomena may be ephemera. Karst in the evaporites seems to be a bad indicator for old or very slow events. But it seems to be a good tool to study recent and quick events (Quaternary and Holocene). Tectonic, seismicity, paleoclimate, old aquifers levels and paleodrainage are all questions the evaporitic karst may find the answers.*

### Key Words

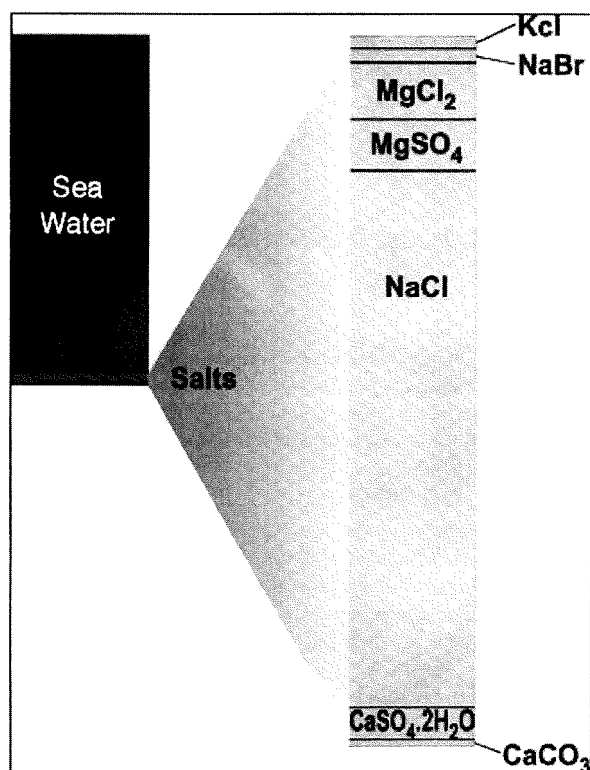
evaporites, karst, salt caves, Mount Sedom, Israel, Dead Sea

## INTRODUCTION

Les évaporites sont des roches formées par la précipitation chimique de sels à partir de solutions naturellement concentrées (Carozzi, 1953). Cette concentration est le résultat direct de phénomènes d'évaporation (Fig. 1). Les principaux représentants sont le gypse, l'anhydrite et la halite et précipitent dans l'ordre croissant de leur solubilité. Mais il existe en réalité une cinquantaine de combinaisons chimiques dont la plupart sont très rares. Ces roches sont entre 180 fois, pour le

gypse, et 26.000 fois, pour la halite, plus solubles que le calcaire (Tableau 1). Un karst peut donc s'y développer.

Communément, le terme karst s'applique implicitement et explicitement à un phénomène dans les roches carbonatées. Certains affirment que seuls les mécanismes de dissolution chimique, comme l'acide carbonique dissolvant les carbonates, peuvent être considérés comme produisant un vrai karst. Cigna (1985) suggère d'utiliser le terme *parakarst* pour désigner les phéno-



**Figure 1. Minéraux évaporitiques principaux**  
Proportions respectives des principaux minéraux évaporitiques dans l'eau de mer (d'après <http://www.science.ubc.ca>).

mènes où n'agissent que deux composantes en phase d'équilibre (eau + roche) par opposition au *vrai karst*, dans les roches carbonatées, où agissent trois composantes en phase d'équilibre (eau + roche +  $\text{CO}_2$ ). Cet usage a été adopté par l'UIS. Lowe (1996), quant à lui, préfère utiliser le terme de *karst évaporitique* (incluant le *karst salin*, *gypseux* et *anhydritique*).

Cependant, la définition d'un système naturel doit dériver de ses propriétés intrinsèques et non pas des propriétés de ses composantes. Les phénomènes karstiques appartiennent à un niveau d'organisation géologique et géographique de la matière et non pas à un niveau physico-chimique. Les caractéristiques spécifiques de régions développées par dissolution de leurs roches (comme la perméabilité, l'hydrographie, l'hydrogéologie et la géomorphologie) sont essentiellement les mêmes d'une région à l'autre, malgré leurs lithologies différentes, sans regarder les mécanismes exacts de dissolution et le nombre de composantes en phase d'équilibre (Klimchouk, 1996). Pour notre part, nous affirmons que le karst évaporitique est un vrai karst.

Tous les phénomènes que nous avons observés sont semblables à ceux rencontrés dans les roches carbonatées, du moins en ce qui concerne les phénomènes de grande taille. Cependant, vu la haute solubilité des évaporites, les phénomènes sont beaucoup plus rapides et peuvent atteindre des dimensions très importantes. Cela entraîne un renouvellement rapide des formes et, à l'échelle géologique, certains phénomènes peuvent s'avérer éphémères.

Le karst dans les évaporites ne semble donc pas être un bon enregistreur pour des événements très anciens ou très lents. Par contre, il semble être un excellent outil pour étudier des phénomènes récents et rapides (Quaternaire y compris l'Holocène). La tectonique, la sismicité, les paléoclimats, les anciens niveaux aquifères, les paléo-drainages,... sont autant de questions pouvant trouver des réponses dans l'étude du karst dans les évaporites.

Cependant, le karst dans les évaporites est victime de ses qualités. Les évaporites sont extrêmement solubles et, bien que les dépôts évaporitiques fossiles soient présents sur presque 25 % de la surface des continents, ceux-ci ne subsistent en affleurement que dans les régions arides, chaudes ou froides.

## I. LE MONT SÉDOM

Le Mont Sédوم se situe sur la rive ouest de la Mer Morte dans le graben du même nom en Israël (Fig. 2). Il est constitué par la tête exposée d'un diapir de sel activement détonné, constitué principalement de couches de halite marine datant du Néogène (formation de

**Tableau 1. La Solubilité des évaporites**

Minéral	Formule	Solubilité
Halite	NaCl	360 g/l à 20°C
Sylvine	KCl	340 g/l à 20°C
Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2.531 g/l à 20°C
Calcite	$\text{CaCO}_3$	14 mg/l à 25°C *

\* en l'absence totale de  $\text{CO}_2$  (Ek, 1993)



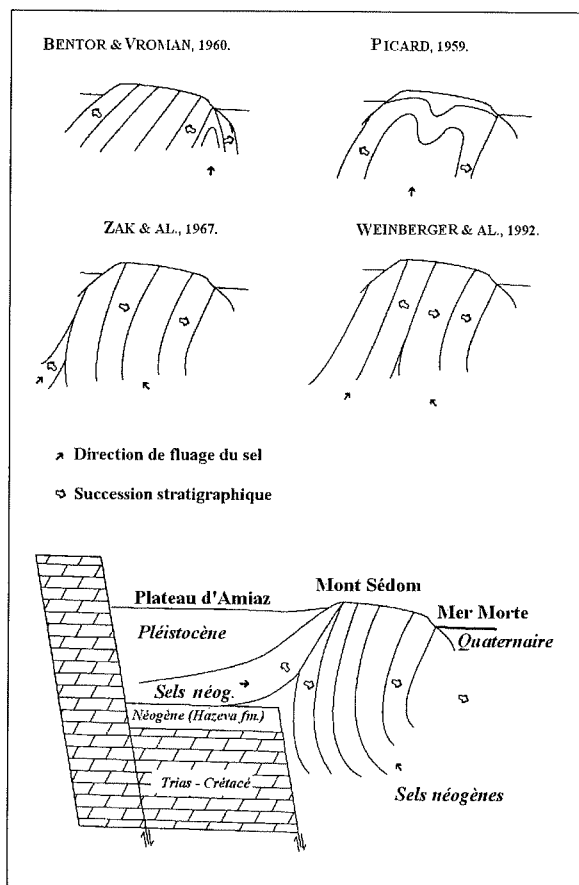
Figure 2. Localisation du Mont Sédom

(d'après <http://www.odci.gov/cia/publications/factbook/is.html>, modifié in Hallot, 1999).

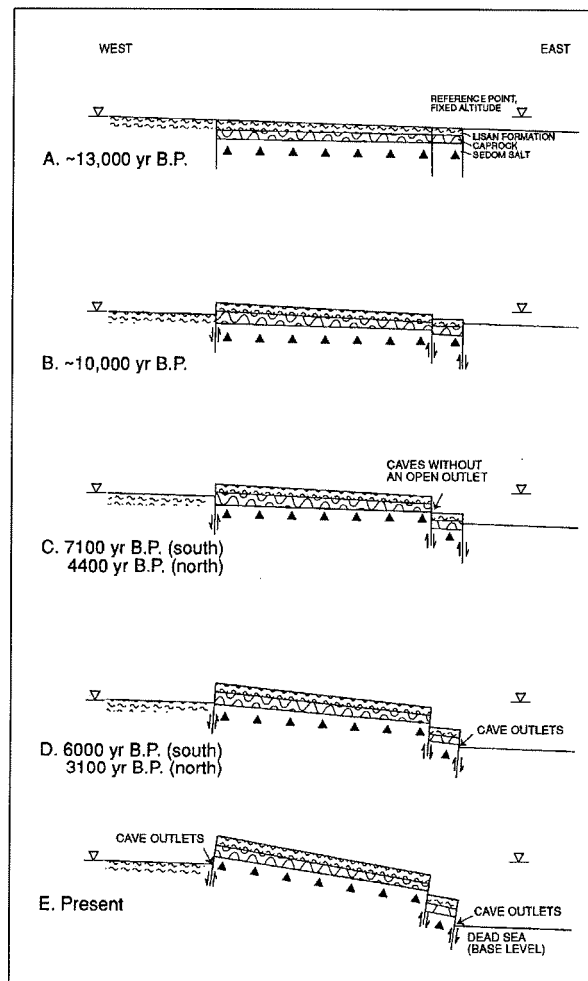
Sédom), dans lesquelles sont intercalées de fines couches d'anhydrite, de gypse, de schistes et de grès (Frumkin, 1993). Il s'élève actuellement à  $\pm 250$  m au-dessus du niveau de la Mer Morte. Ce diapir s'est introduit à travers les sédiments fluvio-lacustres des dépôts de Samra et du Lisan. Le Mont Sédom apparaît comme une « demi-cacahuète » de 11 km de long et de 1,5 km de large, sur la côte de la Mer Morte, bordant le plateau d'Amiaz, au pied de l'abrupt tectonique des monts d'Hatzera.

### A. Historique et modèle actuel

La plupart des connaissances sur la structure du Mont Sédom sont basées sur l'étude de son flanc est où affleurent les formations de sels néogènes. La structure de toute la largeur du Mont a été source de débats pendant plusieurs dizaines d'années (Fig. 3). Bentor et Vroman (1960) ont proposé une structure en anticlinal asymétrique avec un axe près du flanc oriental. Picard (1965) ajoute un petit synclinal au sommet de la même structure. Zak et Bentor (1968) suggèrent une structure constituée d'un « mur de sel » (expression provenant de l'an-



**Figure 3. Différents modèles de structure du Mont Sédom**  
Différents modèles schématiques de la structure du Mont Sédom. Pour chaque modèle, la structure du flanc oriental, où affleurent les formations de sels néogènes, est semblable (d'après Frumkin, 1996a, modifié).



**Figure 4. Evolution schématique du Mont Sédom**  
Modèle en cinq étapes de l'évolution du Mont Sédom entre 13.000 BP et actuellement. Ce modèle, le plus récent proposé à ce jour, est basé sur l'étude des grottes et du caprock (d'après Frumkin, 1996b).

glais « salt wall » correspondant à des couches de sels fortement relevées) s'élevant depuis l'est constituant le flanc est d'un pseudo-anticlinal, la lèvre occidentale de celui-ci étant enfouie sous le plateau d'Amiaz. Weinberger (1992) suggère que la lèvre occidentale de la structure est exposée dans la partie sud-ouest du Mont Sédom et, que dans la partie nord, seule l'épaisseur de la lèvre orientale est exposée. Enfin, Frumkin (1996b) propose une double structure, constituée de deux murs de sels : le plus épais à l'est, provenant du bassin Sud de la Mer Morte, s'élevant vers l'ouest, et le plus fin à l'ouest, provenant du plateau d'Amiaz, s'élevant vers l'est. Les deux murs constituent deux domaines structuraux séparés, avec des orientations et des pendages différents, séparés par une région de déformation intensive.

Un caprock résiduel d'une cinquantaine de mètres d'épaisseur recouvre en discordance les couches de sels. Cela indique que le sommet du diapir a subi une disso-

lution à grande échelle pendant sa surrection à travers un lac ou une nappe d'eau souterraine. Durant ce processus, le sel au sommet du diapir a été complètement dissous, laissant, d'une part, l'anhydrite et le gypse et, d'autre part, la dolomie, les marnes et autres éléments clastiques qui forment le caprock. Ce processus s'est apparemment déroulé pendant le Pléistocène supérieur. Le contact entre le sel et le caprock est pratiquement horizontal (ce contact entre le caprock et les formations de sels a été défini en Anglais sous le terme « *salt table* », Bentor et Vroman, 1960).

### B. Age et développement du Mont Sédom

L'âge du Mont Sédom a d'abord été estimé à 24.000 BP (Gerson, 1972, cité par Frumkin, 1996a). Mais une séquence de  $\pm 35$  m de sédiments du Lisan indique que le diapir a d'abord été recouvert par le lac qui a atteint une altitude de -180 à -150 mètres (l'altitude actuelle de la Mer Morte étant de  $\pm 395$  mètres sous le MSL). Des travaux plus récents, basés sur des datations de restes végétaux présents dans ce dépôt, indiquent que l'inondation a pu se dérouler à partir du maximum glaciaire de 17.900 BP ( $\pm 1.900$ ) obtenu par Th/U (Kaufman et al., 1992, cités par Frumkin, 1996a) jusqu'au début de la période sèche de l'Holocène : 14.600 BP ( $\pm 240$ ), obtenu par  $C_{14}$  (Druckman et al., 1987, cités par Frumkin, 1996a). Cette régression a mis fin au développement du caprock par arrêt de la dissolution des couches de sels, fixées à leur position stratigraphique actuelle. A partir de ce moment, le diapir peut s'élever sans être immédiatement dissous; le relief du sommet du diapir est faible et seuls quelques cours d'eau éphémères commencent à sculpter (A à la Fig. 4). Le flanc ouest du diapir s'élève lentement : un drainage local se développe sans créer de grotte, les roches salines étant encore enfouies sous le niveau de base (B à la Fig. 4); cette période s'étend entre 13.000 BP et 7.100 BP, âge de la plus ancienne grotte (Frumkin, 1996a). Par la suite, le sel s'élève au-dessus du niveau de base permettant la karstification. Des grottes commencent à se développer le long de l'escarpement de faille oriental du Mont. La petite dimension de ces grottes indique que les aires de drainage sont restreintes et qu'elles sont déjà individualisées, comme actuellement (C à la Fig. 4). Ces grottes n'ont pas encore de sortie au pied du Mont, ce qui indique qu'une partie du caprock le recouvre encore. L'écoulement se fait lentement à travers des fissures ouvertes dans celui-ci.

Le Mont Sédom n'a pas atteint le même stade d'évolution dans ses parties nord et sud. La différence d'élévation entre les deux parties peut être due soit à une élévation plus tardive de la partie nord ( $\pm 3.000$  ans), soit à une différence de vitesse d'élévation due à une plus grande largeur de la partie sud, ce qui diminue la viscosité et donc augmente la vitesse d'ascension (Lerche et O'Brien, 1987). Vers 7.100 BP pour la partie sud et vers

4.400 BP pour la partie nord, le sel commence à être en affleurement sur le flanc oriental du Mont. Des grottes avec sortie au pied du flanc se développent vers 6.000 BP pour la partie sud et vers 3.100 BP pour la partie nord (D à la Fig. 4). Le sel commence à affleurer à la base du flanc occidental et des grottes avec des sorties au pied du flanc se développent depuis l'Holocène supérieur et encore actuellement (E à la Fig. 4).

Durant l'Holocène, la majeure partie du corps de sel est restée intacte. L'écoulement sur le caprock est capturé à travers des puits vers des grottes, formant un système de drainage extensif souterrain.

### C. Morphologie

Le Mont Sédom est un « mur-diapir » assez allongé. Sa partie sud est plus large, mais ne possède pas de partie plane à son sommet contrairement à la partie nord (Photo 1). A l'est, on remarque clairement une faille interprétée comme une faille marginale du diapir qui s'élève considérablement à cet endroit. Cette faille est très active et produit un escarpement de 30 à 40 mètres exposant les formations salines à cet endroit. Le long du flanc ouest, on remarque aussi d'autres failles subparallèles. De ce côté, l'élévation du diapir a été moins intense et le caprock est plus épais. Le « dôme » a une forme allongée et est découpé par une série de failles radiales qui sont intersectées par un système de failles transversales. La partie centrale du dôme montre des fractures N-S, celles-ci sont intersectées par une autre série de fractures et de failles E-W, ENE-WSW et WNW-ESE. Celles-ci indiquent une zone de fortes contraintes qui laisse penser que le diapir est en fait constitué de deux têtes. L'âge différent des grottes dans l'une et l'autre partie tend à prouver cette hypothèse. Sur la partie nord, on remarque deux abrupts de chaque côté, découpés par de grands sillons d'érosion délimitant un sommet assez plat. Le sommet comporte deux grandes fractures N-S le long desquelles s'ouvrent un grand nombre de grottes d'origine tectonique et de puits atteignant parfois plus de 50 mètres de profondeur.

Le réseau hydrographique est constitué de petites unités et suit la structure N-S de cette partie du diapir. Il se perd dans les grottes ou crevasses. Ce n'est qu'au SE de cette partie que des ravines perpendiculaires capturent certaines parties du réseau. La partie sud du diapir est la plus grande et ne présente pas de zone plane à son sommet et la plupart des vallées sont disposées radialement par rapport au centre de cette partie. Le réseau hydrographique est plus étendu, mais en grande partie aveugle. En effet, une grande partie du réseau se perd dans des puits en connexion avec le niveau de base par le réseau karstique. Comme le diapir s'élève, la pression lithostatique est relâchée et cela tend à créer un nombre important de fissures dans la partie supérieure de la masse de sel, spécialement près des bords.

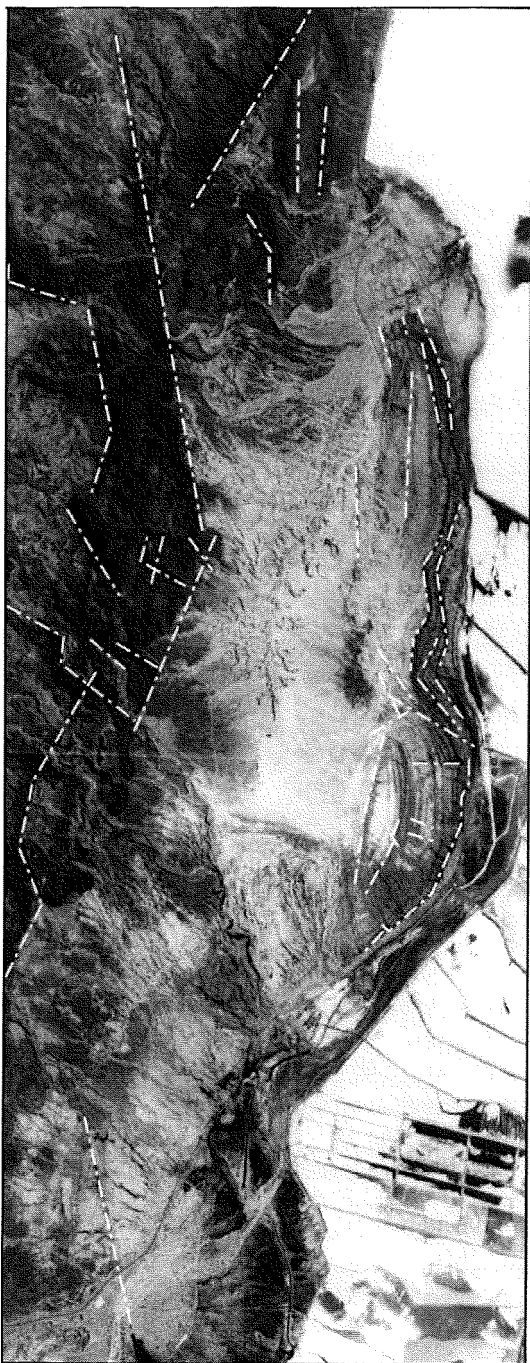


Photo 1. Failles et linéaments principaux

Le système de failles entre le plateau des Monts d' Hatzera et la bande côtière fait partie du système de failles du bord ouest du graben de la Mer Morte. Ce système est, entre autres, constitué d'un grand abrupt tectonique surplombant la Mer Morte. Le Mont Sédoum, quant à lui, est limité latéralement par un système de failles parallèles. Ces failles font aussi partie du système du graben : ce sont elles qui ont permis l'intrusion des couches de sels et la surrection du diapir. Au centre du diapir, on remarque une zone de fortes contraintes, matérialisées par un grand nombre de failles transverses. Cela laisse penser que le diapir est en fait constitué de deux têtes. L'âge différent des grottes dans l'une et l'autre partie tend à prouver cette hypothèse. Les failles et linéaments du plateau d' Amiaz et de Perazim Valley n'ont pas été représentés (Hallot,1999).

#### D. Hydrologie

La région est actuellement extrêmement aride avec à peine 50 mm de précipitations moyennes annuelles. Le déficit annuel précipitation-évaporation excède 2 m (Frumkin,1996b). Plusieurs types d'écoulements sont possibles : un écoulement non karstique, subaérien et un écoulement karstique drainant les eaux vers un système de grottes intégré, un système de grottes non-intégré ou à travers des pertes non explorables (Fig. 5).

Les événements pluvieux compris entre 1 et 2 mm par 10 minutes ne donnent aucun écoulement de surface, la totalité des précipitations est absorbée par le sol et évaporée par la suite. Seuls les événements de plus de 4 mm par 10 minutes produisent un écoulement de surface actif pour la formation des grottes. Les aires de drainage sont petites et les écoulements se perdent rapidement dans le système karstique.

Les éléments érodés du caprock constituent la charge de l'écoulement de crue (entre 10 et 80 % du poids, Frumkin, 1994b). La vitesse d'écoulement varie entre 0,5 et 2 m/s et permet la mise en mouvement de galets dans les passages de grottes. Des suspensions extrêmement chargées peuvent rendre le flux très dense et visqueux, ce qui confère un pouvoir érosif à l'écoulement en plus de son pouvoir de dissolution. D'un autre côté, le total solide dissous peut varier depuis  $\pm 10$  gr/l à l'entrée du puits jusqu'à 200 à 300 gr/là la sortie de la grotte. Cette charge est constituée principalement de halite. La plus grande partie du flux reste chimiquement agressive tout au long de son passage dans la grotte. Cependant, si le flux est stoppé ou considérablement ralenti, la saturation est approchée au bout de quelques heures ou de quelques jours.

Sur le flanc du Mont Sédoum, on trouve les résurgences des grottes, mais aussi d'autres exurgences sous forme de suintements. Celles-ci diffèrent chimiquement et hydrologiquement. Il émerge des suintements une saumure s'écoulant apparemment d'un aquifère souterrain. Cette saumure est saturée en sel avec de hautes concentrations en  $Me^+$ ,  $1(+$  et Br, en plus de Cl et de  $Na^+$  (Frumkin et Ford, 1995). Le taux de dissolution du sel est estimé à 0,5 à 0,75 mm/an ce qui est un à deux ordres de magnitude plus élevés que dans le calcaire dans un environnement humide (Frumkin, 1994b).

#### E. Spéléogénèse

Chaque grotte comporte une ou plusieurs pertes, chacune avec une aire de drainage distincte. Souvent plusieurs conduits se rejoignent sous terre pour former un réseau de grottes. La plupart des grottes anciennes possèdent plusieurs étages avec des conduits inactifs au-dessus ou à côté des conduits actifs plus récents. Le déplacement des pertes est un phénomène courant.

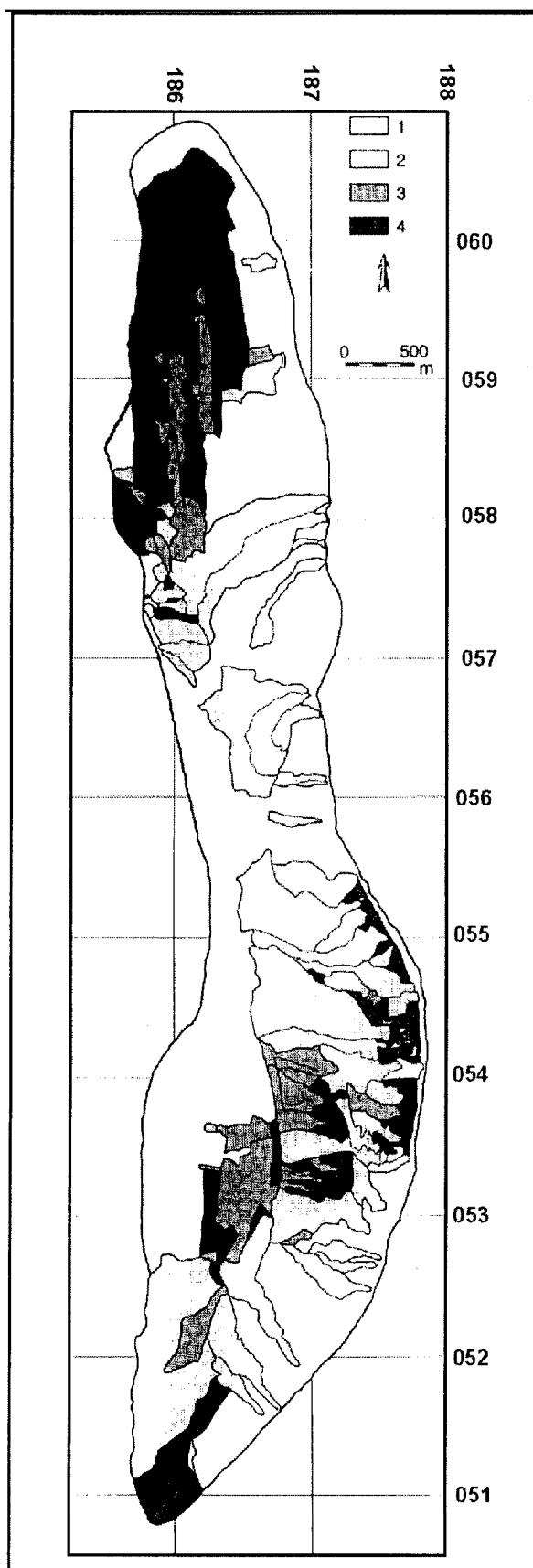


Figure 5. Type de drainage du Mont Sédom  
1 : écoulement subaérien, non karstique; 2 : drainage à travers le système de grottes intégré; 3 : drainage à travers le système de grottes non-intégré (inlet caves); 4 : drainage à travers des pertes non explorables (d'après Frumkin, 1994a, modifié).

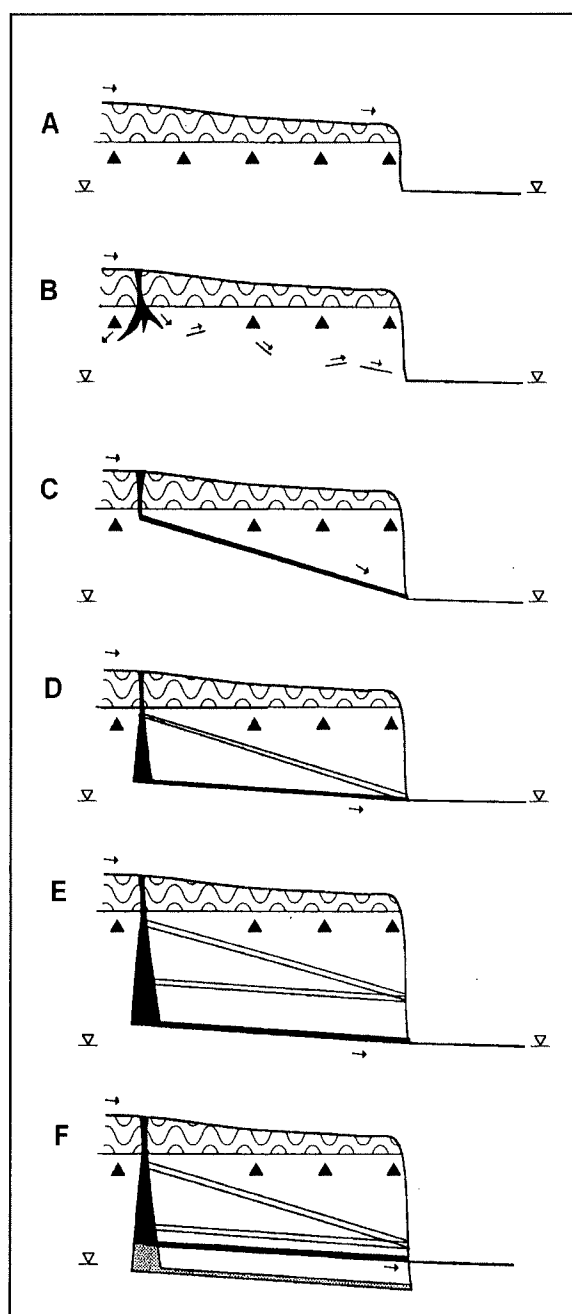


Figure 6. Evolution du profil d'une grotte  
A : écoulement subaérien; B : capture dans une fissure du caprock, évolution vers une « inlet caves »; C : établissement d'un système intégré, avec perte et résurgence; D : profil évoluant vers le niveau de base; E : abaissement du niveau de base par élévation du diapir ou variation du niveau de la Mer Morte; F : élévation du niveau de base par accumulation de sédiments au pied du Mont Sédom (d'après Frumkin, 1995).

Nous pouvons diviser les grottes du Mont Sédom en plusieurs parties (Fig. 6).

### *1. La partie amont*

Les écoulements de surfaces se concentrent à travers des fissures dans le caprock. Ces fissures s'élargissent et créent ainsi des pertes dont la dimension varie de quelques centimètres à plusieurs mètres. Certaines pertes drainent l'écoulement directement à travers d'énormes puits verticaux creusés dans le caprock et dans le sel, mais il s'agit d'un stade déjà plus évolué.

Des passages subhorizontaux se développent à travers le caprock suivant ces fissures et s'approfondissent lentement. Ces passages sont étroits (à peine quelques dizaines de centimètres de largeur). Plus en profondeur, à l'approche des couches de sels, le conduit devient de plus en plus vertical et forme la partie supérieure et étroite d'un puits vertical à travers les couches de sels. Les fissures dans le caprock ne s'étendent généralement pas plus bas à travers les couches de sels. Le puits est vertical et traverse le sel sans suivre de fissure ou le pendage des couches. Sa section s'élargit en s'enfonçant, certains atteignent plus de 15 mètres de diamètre pour plus de 60 mètres de haut (Frumkin, com. pers.). Le fond du puits est recouvert de sédiments alluviaux. La partie inférieure du puits est lisse ou cannelée. Par la suite, ces puits évoluent et par effondrement donnent naissance à des grandes dolines d'effondrement ou à d'immenses puits à ciel ouvert.

### *2. Les conduits subhorizontaux dans le sel*

Les puits se poursuivent par des conduits subhorizontaux. Ces conduits sont typiquement vadose (morphologie de grotte formée par une surface d'eau libre sous pression atmosphérique normale) et fortement incisés. Leur tracé suit généralement une faille, une fissure ou un joint de stratification. L'approfondissement moyen d'un jeune passage dans le sel est d'une dizaine de mm/an (Frumkin, 1998). Le sel affleure sur le fond des conduits : ceux-ci sont plus pentus (de 30° à 50°). Par contre, il se produit un alluvionnement dans ceux dont la pente est inférieure à une dizaine de degrés. Ces passages à faible gradient permettent une accumulation de sédiments fins à caillouteux, comprenant de l'anhydrite, de la dolomie et du quartz provenant de l'érosion de la surface du Mont Sédom, donc du caprock. Dans ce cas, on remarque un élargissement du conduit et parfois la dissolution du plafond qui adopte une forme relativement plane. Ceci est dû à un phénomène de protection du plancher par la couche de sédiments contre l'approfondissement par érosion ou dissolution. Par ailleurs, des canyons vadose peuvent se creuser à travers cette couche de sédiments et se réinciser dans la roche.

Au début du réseau, plus les passages sont élevés, et

donc anciens, plus ils sont pentus. Il n'est pas rare de passer de 30° pour le plus élevé à 5° pour le niveau actif inférieur. Cette tendance se perd à l'approche de la sortie de la grotte. Les passages les plus pentus suivent généralement une fissure et sont plus rectilignes tandis que les passages qui deviennent plus horizontaux sont plus sinueux et développent de larges méandres. Comme le diapir s'élève, les niveaux de grottes les plus bas se sont développés de façon continue, ajustant l'altitude de leur sortie avec le niveau de base. L'altitude de ce niveau de base change lui aussi dans le temps en fonction des variations du niveau de la Mer Morte. Certains passages comportent de grandes encoches latérales, étagées sur plusieurs niveaux, indiquant un période plus longue d'écoulement et un approfondissement moindre. Ces passages sont parfois déformés par la tectonique et on remarque des décalages entre les niveaux de ces encoches. Le développement karstique de ces grottes est aussi commandé par la présence de roches moins solubles comme de l'anhydrite, de la dolomie ou des schistes intercalés dans les couches de sels. Dans les grottes, on remarque que les joints de stratification sont verticaux ou fortement inclinés. Ils cèdent souvent sous la force de cisaillement induite par l'élévation du diapir et se présentent sous la forme de petits miroirs de failles.

### *3. Concrétions*

Tout comme dans les grottes carbonatées, on trouve aussi des concrétions en grand nombre. Cependant, leur variété est plus faible. On trouve surtout des stalactites et des stalagmites ainsi que le stade primitif de la stalactite, des fistuleuses ou macaronis. Le mode de formation est assez identique aux concrétions de calcite. Cependant, dans ce cas, la pression de CO<sub>2</sub> n'intervient pas dans la précipitation du sel. Celle-ci est contrôlée par la sursaturation de l'eau percolant à travers les fissures de la roche et par la présence d'éléments minéraux de quartz, de dolomie ou d'anhydrite, jouant un rôle de catalyseur.

### *4. Types de grottes*

On distingue deux types de grottes : les « systèmes intégrés » comprenant une sortie distincte au niveau de base et les « inlet caves » ne possédant pas de sortie distincte.

#### *a. Systèmes intégrés*

Les premières sont situées sur le bord du Mont Sédom et sont connectées soit directement à la Mer Morte à l'est, soit à des wadis éphémères à l'ouest. Certaines grottes, dont la totalité du passage n'est pas accessible, sont classées dans ce type, car elles drainent librement les eaux d'un bout à l'autre du système. Elles sont assez larges pour permettre un écoulement turbulent d'un bout à l'autre qui transporte la majorité de la charge en suspension. Le temps de résidence des eaux dans ce type



de grotte se compte en minutes. La répartition de ce type de grottes sur le pourtour du Mont Sédوم peut s'expliquer par le fait que c'est à cet endroit que la pression lithostatique se relâche le plus et donc que c'est là que l'on trouve le plus de fissures radiales dans la roche. Ces fissures sont importantes pour l'écoulement souterrain initial, car la porosité de la halite est négligeable. Des forages ont montré que ces fissures sont inexistantes ou refermées en dessous du niveau de base à cause de la pression et des propriétés plastiques du sel.

#### b. « *Inlet caves* »

Les « *inlet caves* » se situent dans la partie centrale du Mont Sédوم; elles sont seulement accessibles par leur perte. Ces grottes n'ont pas de sorties distinctes, mais se terminent plusieurs dizaines de mètres sous la « *salt table* ». La direction des conduits de ces caves ne dépend pas de la direction du niveau de base, mais est plutôt dictée par les fissures les plus ouvertes; c'est ainsi que certaines grottes se développent très près l'une de l'autre et ne se rencontrent pas. La partie aval de ces grottes contient des bancs de silt et d'argile qui marquent les différents niveaux d'inondations. Ces marques indiquent la présence de petits lacs souterrains dans lesquels des sédiments peuvent se déposer; ces lacs donnent lieu à une infiltration diffuse et on suppose que cette eau ressort par les suintements des saumures au pied du Mont Sédوم. Cependant, la composition chimique et isotopique, outre la saturation en sel, est assez différente entre l'eau contenue dans ces petits lacs et les saumures, ce qui indiquerait la présence d'un autre aquifère souterrain. Les conduits de certaines « *inlet caves* » deviennent de plus en plus petits, s'amenuisant jusqu'à être impénétrables. L'eau qui s'écoule reste agressive jusqu'au bout, ce qui indique que l'effilement du conduit résulte de la diminution de la quantité d'eau, à cause de l'infiltration graduelle le long du conduit.

#### 5. *Les salles*

Les salles sont plus répandues dans la partie nord du Mont Sédوم qui est structurellement moins déformée que la partie sud : la roche est donc plus homogène. Des encoches horizontales se développent et des cristaux secondaires se forment sur les parties inférieures des parois indiquant la présence d'anciens lacs souterrains asséchés. La roche apparaissant sur les parois et au plafond est massive sans couches moins solubles d'anhydrite. Certaines grandes dolines d'effondrement sont probablement les restes de tels types de salles.

#### 6. *Les résurgences*

Les résurgences actuelles s'alignent au pied du Mont Sédوم. Celles du flanc occidental se jettent dans des wadis éphémères coulant au pied du Mont Sédوم. La charge transportée lors des crues sédimente au pied du

versant et parfois ces accumulations font élever le niveau de base. Actuellement, le pied du flanc oriental est fortement modifié par une route nationale en saillie, par les différents accès aux salines et par la pose récente d'un pipe-line.

## II. KARST DANS LES ÉVAPORITES : MARQUEUR EFFICACE DES ÉVÉNEMENTS RÉCENTS

Nous avons étudié quatre phénomènes ou particularités du karst pour mettre en évidence son intérêt comme marqueur efficace des événements récents.

### A. Piège à sédiments et débris organiques

Nous avons vu que les grottes jouent un rôle de piège à sédiments. Bien que les sédiments proviennent exclusivement du caprock, leur répartition et leur localisation nous donnent un grand nombre d'informations. Les différents passages d'une grotte se sont étagés en fonction du temps et ont été datés. La quantité de sédiments, leur classement, les traces de paléocruces nous donnent des informations sur les anciens climats plus ou moins humides de la région.

Le contenu en matières organiques des sédiments et les débris végétaux accrochés dans les parois ont certes permis de dater l'âge des conduits par  $C_{14}$ . Mais l'analyse des ces débris permet aussi de retracer les paléo-environnements floristiques et faunistiques de la région et donc les paléoclimats de la région (Photo 2). Ces observations ne diffèrent pas de celles que l'on peut faire dans les karsts carbonatés qui jouent aussi très bien ce rôle. La rapidité d'évolution du karst développé dans les évaporites rend ce dernier particulièrement intéressant, car de nouveaux conduits s'individualisent et sont abandonnés en quelques milliers d'années. Les sédiments et les débris sont donc classés chronologiquement naturellement et ne sont quasi jamais remaniés.

### B. Morphologie des conduits

Le profil des conduits tend vers l'horizontale au fur et à mesure de leur régularisation. La pente de ces conduits, la présence ou non d'une ancienne résurgence, une cassure dans le profil,... nous donnent des informations quant à la position relative du niveau de base à cette époque. De plus, ces observations peuvent être mises en relation avec le taux d'élévation du diapir (actuellement 1 à 2 mm/an) et permettent de conclure à une accélération ou à un ralentissement de l'halocinèse.

La forme des conduits nous donne également des informations sur les paléoclimats. La superficie du Mont Sédوم n'a pratiquement pas évolué et les aires de drainages des grottes ont conservé le même ordre de

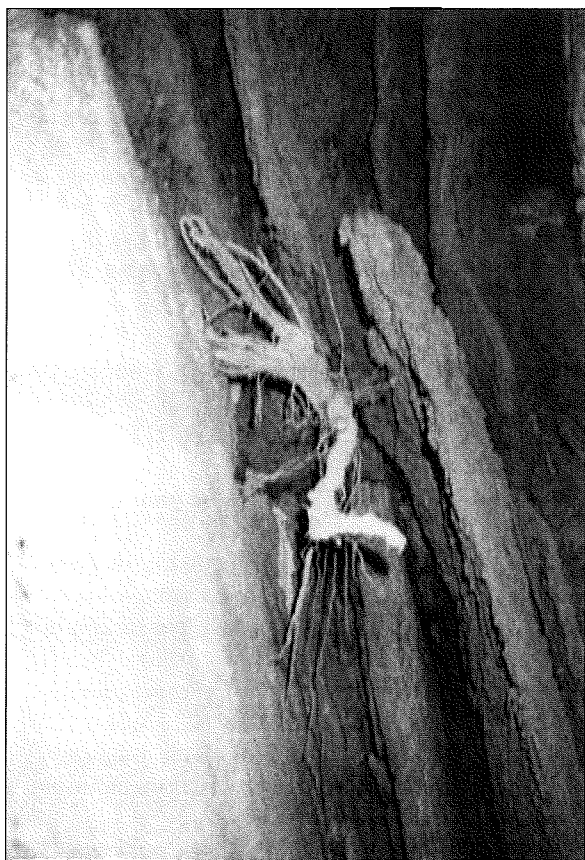


Photo 2. Débris organiques accrochés à la paroi  
Racine de chêne (*Quercus ilex*) (Lavi, com. pers.) accrochée à la paroi d'un conduit inactif. Cette racine est contemporaine du passage et permet la datation de celui-ci, mais cela permet aussi de décrire la paléoflore de la région (Photo Hallot, Malham Cave, 1999).

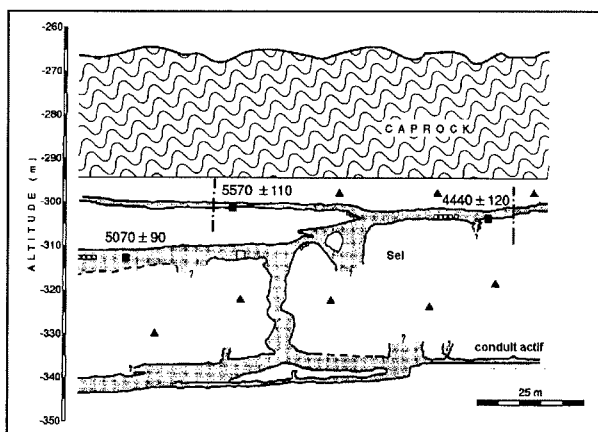


Figure 7. Morphologie des conduits

Les conduits étudiés sont tous les deux inactifs. Le conduit actif se trouve actuellement une quarantaine de mètres plus bas. La taille et le contenu en sédiments sont révélateurs du paléoclimat (Plan tiré de Frumkin, 1996b).

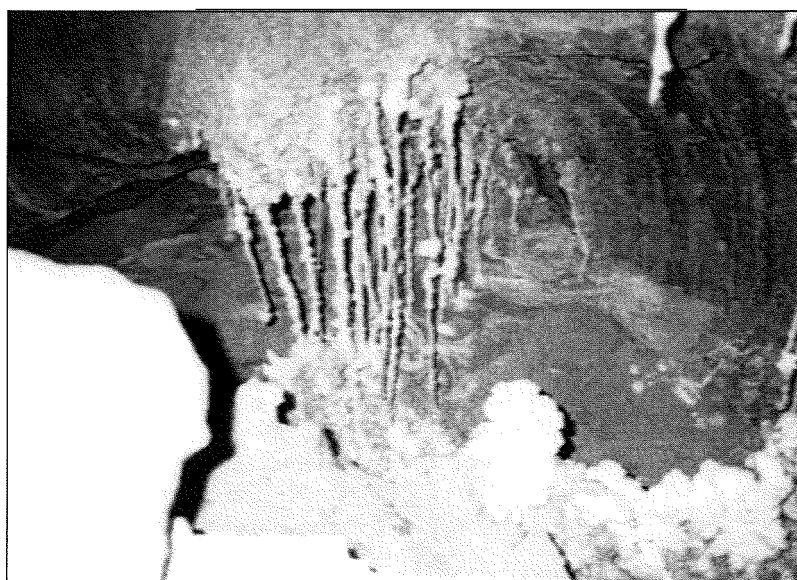


Photo 3. Concrétions dans un conduit actif

Ces stalactites se sont formées dans un passage actif tous les 5 à 7 ans. La croissance de ce genre de formation est très rapide. On remarque aussi des concrétions sur le plancher du passage (Photo Hallot, Sedom Cave, 1999).

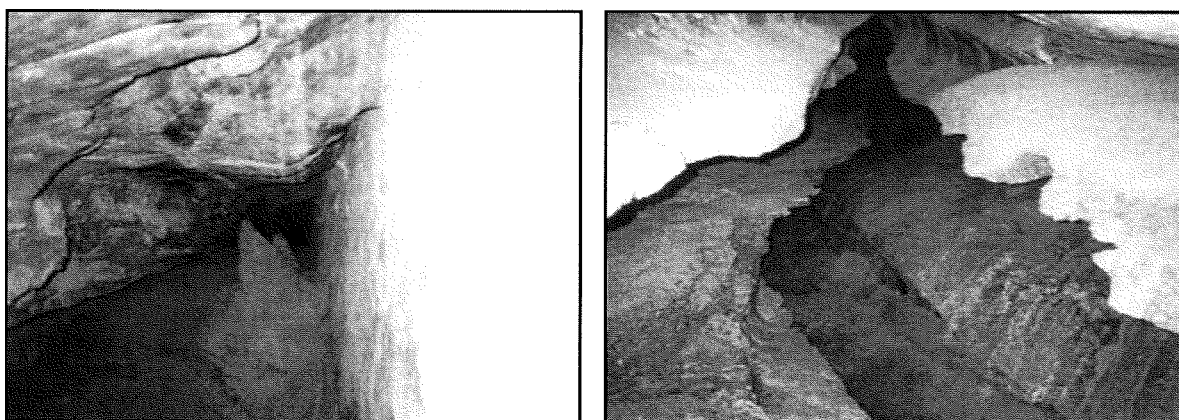


Photo 4. Effets tectoniques apparents dans les conduits (cf schéma de localisation à la figure 8)

Ces deux conduits de grottes se situent sur la même faille à deux hauteurs différentes. Sur la photo de gauche (4a), on aperçoit nettement le miroir de faille formant la paroi de droite; le décalage y est de plus de 10 mètres. Sur la photo de droite (4b), le décalage entre les encoches latérales est à peine de quelques dizaines de centimètres.

Sur la photo de gauche, on aperçoit un bloc de sel décroché du plafond de la grotte; cet effondrement a peut-être eu lieu lors d'un rejeu de la faille. La faille a joué différemment selon le temps et avec une intensité différente ; nous ne possédons pas de datation absolue de ces conduits, mais une chronologie des événements est aisée à réaliser (voir explications dans le texte) (Hallot, 1999).

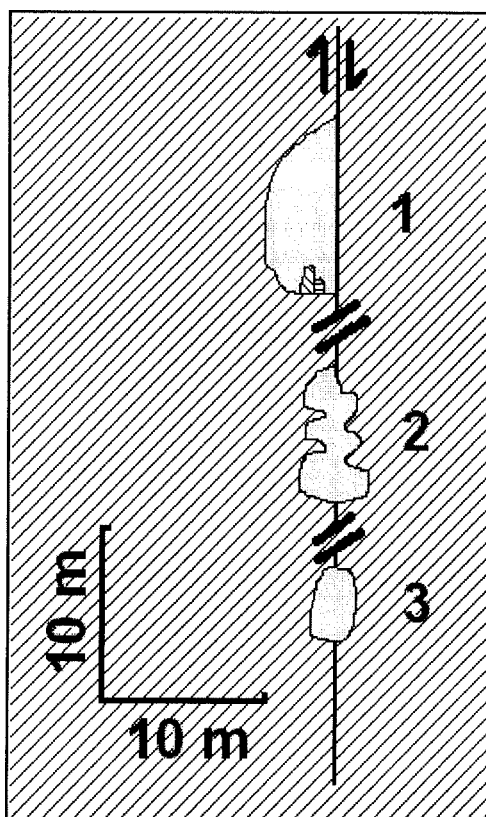


Figure 8. Schéma en coupe des trois conduits superposés  
Le conduit I se rapporte à la Photo 4a, le conduit 2 à la photo 4b.

grandeur. Un changement significatif de la taille d'un conduit est donc dû à un changement du régime des précipitations et donc du climat. Ce phénomène est observé dans les grottes carbonatées, mais, dans le sel, la réponse morphologique à une variation de conditions extérieures est beaucoup plus rapide. Nous avons d'abord comparé les sections des deux conduits inactifs étagés de *Malham Cave* (Fig. 7). Les débris végétaux datés par  $C_{14}$  ont permis de donner un âge à ces conduits :  $5.570 \pm 110$  BP pour le conduit supérieur et  $4.440 \pm 120$  BP pour l'inférieur (Frumkin, 1996a). Le conduit supérieur a un diamètre d'un à deux mètres et comporte peu de sédiments (20 à 30 cm). Par contre, le second a un diamètre de deux à quatre mètres et comporte plusieurs séries de couches de sédiments réincisées sur une hauteur totale de 1 à 1,5 mètre. Ce conduit comporte aussi de larges encoches latérales creusées par méandrage. La période d'activité du conduit supérieur correspond à une période interglaciaire, donc sèche, et celle du conduit inférieur à une sous-période humide, ce qui confirme nos observations.

### C. Concrétions

Nous pouvons obtenir de bonnes approximations sur le niveau atteint ou la récurrence de certaines crues par l'étude des concrétions. Les stalactites et les stalagmites de sel ont une croissance très rapide. Cette rapidité est d'ailleurs illustrée par la présence de ces formations sur les bords ou au sein même du conduit actif. De petites concrétions d'une vingtaine de centimètres de haut se sont formées dans une zone qui, selon Lavi (com. pers.), est susceptible d'être inondée par des crues d'une récurrence de 5 à 7 ans (Photo 3). En tout état de cause, ces formations sont détruites à chaque crue par le courant. Ceci donne une croissance moyenne estimée des concrétions de 4 à 5 cm/an (bien que des fistuleuses ayant grandi de plus d'un mètre en un an ont été observées).

### D. Tectonique

Au premier abord, la tectonique pourrait sembler se marquer de façon moins vive dans le sel, vu sa plasticité et sa capacité à fluer. Qu'elle soit d'origine régionale ou locale, la tectonique se marque de façon flagrante par la présence de failles ou de fractures que les premiers conduits empruntent. Tout comme dans les grottes tectoniques carbonatées, il est donc très courant qu'un conduit se développe directement sur une faille (Photo 4a). Les mouvements de la roche le long de cette faille apparaissent, entre autres, par des miroirs de failles ou des décalages dans les conduits.

Nous avons observé trois conduits étagés sur une même faille dans *Sedom Cave* (Fig. 8). Nous ne disposons pas de datation absolue concernant ces trois conduits, mais leur position relative permet de déduire qu'ils se sont formés entre 4.100 BP et 3.000 BP. Le conduit supé-

rieur (1 à la Fig. 8) présente un décalage de plus de 10 mètres; le conduit intermédiaire présente un décalage de 50 à 60 cm dans une grande partie supérieure et est en concordance dans une petite partie inférieure (2 à la Fig. 8). Le conduit inférieur, quant à lui, ne présente aucun décalage. Cette simple observation permet de poser l'hypothèse suivante : la faille a joué activement après que le conduit supérieur soit devenu inactif, mais le rejeu s'est arrêté avant l'apparition du second conduit. En effet, les encoches latérales présentes dans ce conduit ont été creusées dans un plan horizontal. Par contre, la faille s'est remise à jouer à la fin de la foison de ce conduit, la partie inférieure étant en concordance et la partie supérieure décalée. Ce rejeu fut de courte durée, car le dernier conduit, actif celui-ci, ne présente aucun décalage, et la partie inférieure du second conduit est toujours en concordance alors que ce conduit est devenu inactif. Nous n'avons pas trouvé de traces ou d'accès à la partie décalée du premier conduit, mais plusieurs blocs de sel se sont détachés du plafond du conduit; ces décrochements ont peut-être eu lieu lors du rejeu de la faille.

Une fois encore, ce type d'observation est réalisé dans les grottes carbonatées. Toutefois, dans les karst salins, la rapidité du développement des conduits et l'abandon, relativement rapide aussi, d'un passage au profit d'un autre, permet des mesures plus fines sur l'époque de jeu d'une faille, son intensité et sa durée.

## CONCLUSION

Ces exemples simples nous montrent l'intérêt du karst évaporitique comme marqueur des événements récents. Son intérêt réside dans sa rapidité de formation et d'individualisation. Ceci fait que son enregistrement des événements climatiques, environnementaux ou tectoniques est fin. Or plus un enregistrement est rapide plus sa précision pour un événement rapide est grande. Les marqueurs dont nous disposons dans le karst évaporitique sont donc plus précis. Néanmoins, une évolution rapide signifie aussi une disparition rapide et il est difficile, voire impossible, de trouver des karsts de ce type datant de plusieurs dizaines ou centaines de milliers d'années. Ces marqueurs sont donc uniquement disponibles pour l'Holocène.

## BIBLIOGRAPHIE

- BENTOR Y.K. & VROMAN A., 1960. *The Geological Map of Israel (on a 1:100.000 scale), series A - The Negev, Explanatory text of the sheet 16 : Mount Sdom, second edition*, Geological Survey of Israel, Ministry of Development, Jerusalem, 117 p.
- CAROZZI A., 1953. *Péetrographie des roches sédimentaires*, Lettres Sciences Techniques, Librairie de l'Université, Lausanne, 253 p.

- CIGNA A., 1985. Some remarks on phase equilibria of evaporites and other karstifiable rocks. *Le Grotte d'Italia*, 4(22), 201-208.
- EK C., 1993. *Les phénomènes Karstiques*, Notes de cours, Université de Liège, 45 p.
- FORD D. & WILLIAMS P., 1989. *Karst Geomorphology and Hydrology*, Unwin Hyman, London, 601 p.
- FRUMKIN A., 1993. Karst origin of the upper erosion surface in the northern Judean Mountains, Israel. *Israel Journal of Earth Sciences*, Jerusalem, 41, 169-176.
- FRUMKIN A., 1994a. Hydrology and denudation rates of halite karst. *J. Hydrology*, 162, 171-189.
- FRUMKIN A., 1994b. Operating an experimental catchment in an arid karst environment. *El Karst y los Acuíferos Kàrsticos*, Universidad de Granada, 269-278.
- FRUMKIN A., 1996a. Determining the exposure age of a karst landscape. *Quaternary Research*, 44, 99-106.
- FRUMKIN A., 1996b. Structure of northern Mount Sedom salt diapir (Israel) from cave evidence and surface morphology. *Israel Journal of Earth Sciences*, 45(2), 73-80.
- FRUMKIN A., 1998. Salt cave cross-sections and their paleoenvironmental implications. *Geomorphology*, 23, 183-191.
- FRUMKIN A. & FORD D., 1995. Rapid entrenchment of stream profiles in the salt caves of Mount Sedom, Israel. *Earth surface processes and landforms*, 20, 139-152.
- HALLOT E., 1999. *Karst dans les évaporites: l'exemple du Mont Sédom (Israël)*, *Mém. lic. Sci. Géogr.*, Univ. Liège, 149 p + annexes.
- KLATZMANN J., 1971. *Israël*, Coll. Magellan, La géographie et ses problèmes, Presses Universitaires de France, Paris, 164 p.
- KLIMCHOUCK A., LOWE D., COOPER A. & SAURO U., 1996. Gypsum Karst of the World, *International Journal of Speleology*, IUS, 25 (3-4), 307 p.
- LERCHE I. & O'BRIEN J.J., 1987. Modelling of buoyant salt diapirism. *Dynamical Geology of Salt and Related Structure (I. Lerche & J.J. O'Brien, Eds)*, Academic Press, Orlando, 129-162.
- PICARD L., 1965. The geological evolution of the Quaternary in the central-northern Jordan Graben. *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.*, 84, 339-366.
- WEINBERGER R., 1992. Paleomagnetic reconstruction of a diapir emplacement: a case study from Sedom Diapir, the dead sea rift. *Geophysics Journal*, s.p.
- ZAK I. & BENTOR Y.K., 1968. Some new data on the salt deposits of the Dead Sea area, Israel. *Symposium on the geology of saline deposits, 1968, Hannover*, UNESCO, Hannover, 137-146.

Adresse de l'auteur :

Eric HALLOT

Département de Géographie physique

Université de Liège

Allée du 6 août, 2 — Bât. B 11

B - 4000 Sart Tilman, Liège