

Phénomènes karstiques dans les évaporites et concrétions de sel en Belgique et ailleurs

Albert D *

RÉSUMÉ

Diverses formations et cavités dans le sel *s.l.*, ainsi que les concrétions qui s'y forment, sont décrites et passées en revue, tant en Belgique qu'à l'étranger. L'origine et l'évolution géologique des évaporites sont évoquées et des grottes dans le sel sont étudiées.

MOTS-CLÉS : Grottes, halites, spéléothèmes, Belgique, monde.

ABSTRACT

Different formations and cavities in the salt s.l. and concretions formed in discovered in Belgium and other countries are described and reviewed. The formation of caves in salt is studied, referring to the origin and the geological evolution of evaporites.

K : Caves, halites, speleothemes, Belgium, world.

1. Brefs rappels

Le terme « karst » provient de l'allemand et désigne un plateau calcaire subissant l'action de l'eau. À l'origine, ce mot dérive de « Kras », terme désignant une région de Slovénie. Le karst concerne donc d'abord les roches carbonatées, c'est-à-dire renfermant au moins 50 % de calcite et/ou de dolomie.

En Belgique, la quasi-totalité des roches carbonatées se situe en Wallonie. Certaines se sont formées au Paléozoïque (Dévonien et Carbonifère). Ces calcaires et ces dolomies occupent, chez nous, une superficie non négligeable; ils ont été redressés au cours de la phase varisque (plissement hercynien). Dans le Condroz, les calcaires alternent avec des grès, plus résistants, tandis que dans la Calestienne, ce sont des schistes, moins résistants, qui sont intercalés entre les bancs calcaires. Au Mésozoïque, pendant le Trias et le Jurassique, se sont formés les grès calcareux et les dolomies de la Lorraine belge, tandis qu'au Crétacé, ce sont d'épaisses couches de craie, calcaire très pur mais moins résistant et très poreux, qui se sont déposées. Au Cénozoïque, on trouve un calcaire grenu, blanc jaunâtre et peu cohérent, des calcaires plus grossiers et des calcaires lacustres. Liées à l'évolution karstique et dues à la silicification du calcaire dévonien, les « fagnolithes » sont dispersées sur certains plateaux calcaires de l'Entre-Sambre-et-Meuse.

À Comblain-au-Pont, on trouve également des fragments calcaires du Dinantien silicifiés dans le pourtour de la sablière de Géromont. Au Quaternaire enfin, se déposent encore actuellement des formations calcaires travertineuses au débouché de résurgences karstiques et dans le lit de certains ruisseaux alimentés par ces résurgences, comme par exemple dans la vallée du Hoyoux, où les nombreuses vasques forment des cascates. Pour plus de détails sur la géologie de la Belgique, on consultera Robaszynski & Dupuis (1983).

Les grottes classiques se forment dans les roches calcaires. Au départ, la roche doit être fissurée, afin que l'eau puisse y pénétrer (la pluviosité abondante de nos régions constitue en outre un facteur dynamique). Mais ce qui caractérise le mieux les roches carbonatées, c'est leur solubilité par le CO₂ dissous dans l'eau. Par contre, pour le gypse et le sel, la présence de CO₂ dissous dans l'eau n'a pas d'incidence sur leur dissolution. Ce CO₂ provient de l'atmosphère mais aussi de l'importante couverture végétale qui surmonte les calcaires (on parle alors de « karst couvert »). En dépit de la surface relativement restreinte du karst dans notre région, les phénomènes karstiques y sont néanmoins bien diversifiés. En surface, on observe des dolines, des pertes ou chantoirs, des douves, ... Sous la surface, se trouvent les grottes, dont certaines sont toujours parcourues par une rivière souterraine (Han, Hotton, Remouchamps, Sainte-Anne, ...), tandis que d'autres sont dites

* Club de Recherche Spéléologique Ourthe-Ambève (C.R.S.O.A.).

« fossiles », car complètement dépourvues de circulation d'eau (Abîme de Comblain-au-Pont, étages moyen et supérieur de Ramioul, ...). Certaines grottes sont issues de « fantômes de roche » : elles sont formées par l'altération incomplète du calcaire encaissant, sans évacuation de ces éléments. Suite à une baisse locale de la nappe phréatique, l'eau interstitielle de l'altérite s'évacue, entraînant un tassement qui peut, à son tour, provoquer des ondements en surface ou la formation de puits naturels, nombreux dans le Tournaisis. La grotte Quentin est une cavité de ce type, réactivée par l'abaissement de la nappe, lui-même engendré par l'approfondissement de la carrière voisine (Quinif, 2005). Citons enfin les nombreuses poches de dissolution (formées durant le Cénozoïque) ou paléokarsts. Les plus connues chez nous sont les « abannets » de la région de Nîmes. D'autres karsts sont plus anciens et sont associés, du moins en partie, à la dissolution des évaporites.

Mais, en Wallonie, il y a aussi des grottes dans d'autres roches que le calcaire. À la Montagne Saint-Pierre, l'extraction de la craie par un dédale de galeries souterraines, a recoupé à plusieurs reprises une galerie naturelle dans la craie (en dépit de sa porosité élevée) de plus de 100 m de long, découverte et étudiée par le C.R.S.O.A. (Willems *et al.*, 2007). Les galeries d'exploitation ont également recoupé des conduits parfaitement verticaux, longs de plusieurs dizaines de mètres et de section centimétrique constante, les « tuyaux d'orgue ». À Vechmael-Heers (province de Limbourg), des phénomènes karstiques de moindre ampleur ont aussi été recoupés par les galeries d'exploitation du tuf (Dusar *et al.*, 2005). En Gaume, dans les terrains triasiques et jurassiques, on trouve des bancs de grès calcaireux avec une importante proportion de silice non soluble. *A priori*, cette roche n'est guère propice à la karstification mais on y trouve néanmoins des résurgences incrustantes typiquement karstiques. Ces tufs sont souvent appelés « crons » en Lorraine belge. Dans les psammites parfois calcaireuses du Dévonien supérieur, on trouve également des sources étalées altimétriquement « à 30 m sous les plateaux, cette hauteur étant nécessaire à une mise en charge permettant à l'eau de circuler dans les fissures de la roche (Brioz, 1983). Ces sources sont nombreuses sur le pourtour du Condroz (Sprimont, Comblain-au-Pont). Enfin, il faut encore citer les grottes, comme le Trou Ozer, creusées dans les poudingues de Malmedy.

Cette roche est formée par un conglomérat principalement calcaire et une matrice argilo-sableuse rougeâtre, qui suggère un climat chaud et aride. Ces conglomérats ne sont pas en place. D'après les fossiles qu'on y a trouvés, ils proviendraient de massifs calcaires de la région de Prüm, en Allemagne. De là, ils ont été mobilisés au cours du Permien par un oued, qui les a déposés dans le fossé d'ondement allant de Malmedy à Trois-Ponts.

Dans le monde, il y a encore des grottes creusées dans d'autres roches, comme par exemple dans les gneiss et les quartzites (Willems *et al.*, 2001). Les détailler m'entraînerait trop loin du sujet.

2. Le « karst » dans les évaporites

2.1. Définition et formation des évaporites

Ainsi que le nom l'indique, les évaporites sont des roches qui se forment par évaporation, dans des conditions sédimentaires spécifiques et généralement sous un climat chaud et aride. Dans certains cas, l'alimentation en eau se fait au détriment de la porosité des sédiments meubles des cordons dunaires. Ce confinement favorise l'élévation de la température de l'eau, ce qui accélère l'évaporation et, de ce fait, la sursaturation des minéraux dissous. Périodiquement, les lagunes, séparées de la mer par des cordons littoraux ou des hauts fonds, sont réapprovisionnées en eau de mer (fortes marées, transgressions marines), créant ainsi un nouvel enrichissement en sel. Les couches de sel les plus anciennes remontent au Cambrien et ont été découvertes au Punjab, dans le « Salt Range » (U.S.A.) et en Sibérie. Si toute l'eau de mer s'évaporait, on pourrait recouvrir toute la planète d'une couche de sel de 37 m d'épaisseur.

La précipitation des minéraux dissous dans l'eau se fait dans l'ordre inverse de leur solubilité : la dolomie primaire (par précipitation directe de la dolomite, tandis que la dolomie secondaire, plus abondante, est due au remplacement total ou partiel de la calcite par de la dolomite), le gypse (sulfate de calcium hydraté, donne le plâtre après cuisson), le sel (ou halite, chlorure de sodium), la carnallite (chlorure hydraté de potassium et de magnésium), la sylvine (chlorure de potassium), etc. Par conséquent, les fluctuations entre le confinement et la réalimentation des lagunes en eau de mer

créée des alternances d'évaporites précipitées. Parfois, seule la dolomie précipite, quand l'eau de mer n'atteint pas une saturation suffisante pour permettre la précipitation du gypse ou du sel. On considère qu'il faut évaporer 85 m^3 d'eau de mer pour obtenir un m^3 de sel. On trouve donc, selon les régions, des épaisseurs variables de dolomie, de gypse, de sel, ... Parfois, une des évaporites manque. Ultérieurement, le gypse se transforme en anhydrite (CaSO_4) lorsqu'il est enfoui sous une épaisse couche de sédiments (de 200 à 450 m selon les auteurs) et à une température minimale de 90° . Inversement, si l'anhydrite est ramené vers la surface à une profondeur d'environ 30 m, il se transforme en gypse par hydratation, avec une augmentation de volume de 30 à 40 %.

Sous le poids des sédiments, le fond des grands bassins s'abaisse progressivement (phénomène de subsidence). Cet abaissement peut aussi être le résultat de la descente tectonique dans les marges passives continentales, nombreuses lors de la séparation de l'Europe et de l'Amérique, dès le Trias. Parfois, les deux phénomènes peuvent agir en même temps. L'estimation moyenne des vitesses de sédimentation donne des valeurs de 1 à 10 cm/an, ce qui est très supérieur à la vitesse de subsidence, qui est seulement de 0,1 à 2 mm/an. Les masses de sel ainsi déposées peuvent atteindre parfois 1 000 m d'épaisseur sur plusieurs kilomètres de longueur et de largeur.

On trouve aussi, sur les continents, des lacs d'eau salée d'importances diverses, avec ou sans subsidence, et dont certains sont encore actuellement le siège de dépôts en formation

d'évaporites. Ces lacs se trouvent dans des dépressions alimentées par des rivières, des sources ou par une nappe phréatique. Dans ce contexte continental, ce sont les sels contenus en faibles pourcentages dans l'eau des rivières qui constituent la source d'évaporites. Le climat aride et chaud (ou froid) de la région permet une évaporation plus rapide que les apports hydriques, ces derniers n'entraînant pas (ou que très rarement) le débordement du lac et son déversement dans la mer, ce qui crée les conditions de l'endoréisme. La mer Morte est un lac d'environ $1\,000 \text{ km}^2$ situé à 417 m sous le niveau de la mer et qui se trouve au fond d'un graben encore actif dont la disposition des failles crée un bassin de subsidence. Dans le monde, on connaît encore d'autres cas d'endoréisme :

- la mer Caspienne et plus particulièrement la lagune de Kara-Bogaz, où précipitent essentiellement du gypse, qui se transforme en anhydrite vers 40 m de profondeur (Shearman, cité par Truc, 1988) et de l'epsomite;
- le salar d'Uyuni, sur l'Altiplano bolivien (alt. 2653 m) est, avec ses $12\,000 \text{ km}^2$, le plus grand lac salé du monde, qui s'est évaporé en raison de la très grande sécheresse de l'air. On estime ses réserves en NaCl à 63 milliards de tonnes et en sels de lithium à neuf millions de tonnes, soit les $\frac{2}{3}$ des réserves mondiales. En outre, la présence de roches volcaniques entraîne un chimisme des eaux très variable d'un point à un autre, certains métaux (molybdène, lithium) pouvant atteindre des concentrations exceptionnelles. On peut voir, sur l'Altiplano bolivien, des cabanes construites à l'aide de dalles de sel (fig. 1);



FIG. 1. - Cabanes de sel sur l'Altiplano bolivien. Calendrier 1989 (novembre), publié par le Centre national de coopération au développement, Bruxelles.

- en Afrique du Nord, on trouve les *chotts*, alimentés par les nappes artésiennes. Bien que généralement de dimensions plus réduites, certains chotts peuvent atteindre et même dépasser 5 000 km² (chott Melghir en Algérie, chott El Djerid en Tunisie);
- les *sebkhas* sont d'anciennes lagunes déconnectées de la mer et alimentées actuellement par l'eau de crue des oueds et l'eau de ruissellement de leur bassin. En Tunisie, la sebkha El Melah de Zarzis, avec ses 200 km², était autrefois reliée à la Méditerranée. D'autres sebkhas sont continentales et résultent de mouvements tectoniques locaux;
- en Espagne, les *lagunas* de l'Aragon et de la Mancha sont des dépressions parfaitement endoréiques et sont semblables aux sebkhas (Truc, 1988). Dans les bassins de faible superficie, l'alimentation en eau de mer peut aussi se faire grâce à la porosité des sédiments meubles des cordons dunaires;
- parfois, sur des îles, on trouve des lacs salés transformés en salines dans les cratères de volcans éteints, l'alimentation en eau de mer se faisant à travers la roche poreuse du cône ou par des canaux souterrains. D'autres pensent que l'eau remonterait de nappes phréatiques et se chargerait en sels en traversant les roches, ce qui expliquerait un taux de salinité plus élevé que celui de l'eau de mer. De telles formations peuvent s'observer, par exemple, sur l'île Saint-Martin aux Antilles et sur celle de Sal, près du Cap-Vert.

Mais la formation des évaporites ne semble pas être l'apanage de notre planète. En 1999, au Maroc, on a trouvé, sur une météorite de 175 kg, un cristal de sel de 0,7 mm, de couleur bleue, ainsi que de la sylvine. La sonde Mars Express, de l'Agence spatiale européenne (E.S.A.), a été lancée le 2 juin 2003 avec, à son bord, « Omega » (Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité), qui a pour mission de rechercher les traces d'eau et de vie, passées ou actuelles, sur la planète rouge. Dès son entrée en fonction, Omega a pu montrer que, sous environ 10 m de glace carbonique, la calotte polaire permanente sud était formée d'un important glacier d'eau congelée mélangée à de la poussière. De plus, la sonde a survolé de vastes zones composées de gypse. La présence de sulfates témoigne du déroulement passé, sur Mars, de phénomènes géologiques en milieu aqueux. La mission Mars Exploration Rover

(NASA) a déposé en 2004, à la surface de Mars, deux véhicules télécommandés, Spirit et Opportunity. Ce dernier est parqué sur ce qui était, dans un très lointain passé, le rivage d'une mer salée. Il a aussi permis de comprendre que, si certains cratères sont bien dus à des impacts de météorites, d'autres résulteraient au contraire du soutirage dans des argiles évaporitiques. Le spectromètre à particules alpha du véhicule a également détecté des zones importantes de sulfates hydratés, comme par exemple le gypse, qui pourraient être la signature d'un grand lac salé. Il a enfin trouvé du soufre sous forme de sulfates (semblables aux sels d'Epsom) et peut-être même des carbonates. Mais de nouvelles analyses sont nécessaires pour déterminer la composition précise et véritable de ces gisements.

2.2. Les évaporites en Wallonie

Même si, chez nous, il n'y a pas de gisements salins aussi spectaculaires que ceux évoqués plus haut, notre pays est néanmoins bien pourvu en évaporites. Je vais brièvement les passer en revue, avec leurs principales localisations.

Les dolomies primaires

Au Dévonien supérieur, la Belgique était située à 20° de latitude sud. À Esneux par exemple, au Famennien supérieur (– 367 à – 362,5 millions d'années), il régnait un climat subaride, avec de courtes saisons des pluies (Thorez, 2005). Dans de vastes lagunes, ouvertes sur la mer, sédimentaient les psammites du Condroz (« grès » fins à granulométrie comprise entre 60 et 120 microns et contenant de 18 à 55 % de feldspaths et des grains de quartz). Grâce au climat de l'époque, l'eau, qui atteignait 29 °C, s'évaporait rapidement et favorisait la précipitation de la dolomie (1 mm par 100 ans environ). Seules les dolomies primaires ont subsisté jusqu'à nous, en particulier la dolomie ferrique ou ankérite (Ek, 1980).

Le gypse et le sel

Au Viséen (– 349,5 à – 332,9 millions d'années), notre pays était situé à 18° de latitude sud et il y régnait un climat subtropical semi-aride. Ces conditions climatiques ont été favorables aux constructions récifales et à la formation d'évaporites, lesquelles se sont déposées au fond d'un bassin soumis à des phases de subsidence qui ont permis des dépôts de parfois plusieurs

centaines de mètres d'épaisseur. Par la suite, des phases de sédimentation carbonatée ont fini par recouvrir ces évaporites. À Saint-Ghislain, près de Mons, un sondage profond (jusqu'à -5 403 m) a traversé les carbonates du Viséen et a atteint l'anhydrite entre -1 900 et -2 684 m de profondeur, soit sur une épaisseur de 784 m (Delmer, 1979). À Eelen, en Campine, un sondage a recoupé, dans le Muschelkalk (Trias), de petites cavités cubiques qui pourraient correspondre à des cristaux de sel dissous (Lohest, cité par Melon *et al.*, 1976). Des observations semblables ont été faites par sondage dans les marnes keupériennes à Neeroeteren et dans les schistes du Givétien (Melon *et al.*, 1976) tandis qu'en Lorraine belge, la formation d'Attert (Trias) recèle des nodules de gypse et des bancs de dolomie blanchâtre qui se sont déposés dans une lagune évaporitique.

Nappes aquifères salines

Deux nappes captives du nord du pays (provinces d'Anvers et du Limbourg) renferment du sel dilué (Gulinck, 1969). Au cours du Landénien (Éocène inférieur), cette région a été recouverte par un milieu saumâtre. Ensuite, lors de la transgression yprésienne, la nappe a été plus ou moins mise en contact avec les eaux marines, selon la perméabilité des roches la surmontant. À Loenhout, du gaz est stocké dans un aquifère salin à plus de 1 000 m de profondeur. Dans la roche calcaire qui sert ainsi de réservoir, la température s'élève à quelques 60 °C et la pression à plus de 100 bars. Lors de la restitution du gaz, il est nécessaire de le désulfurer. Ce sont les calcaires dinantiens qui ont été karstifiés à l'occasion d'une baisse du niveau de la mer, avant d'être à nouveau recouverts par les eaux. Les fissures et cavités ont été remplies par des sédiments, dont la matière organique a subi une attaque chimique, permettant donc la réouverture d'un paléokarst et créant ainsi un aquifère salin profond, entre -500 et -2 500 m. Ces roches carbonatées sont couvertes d'une épaisse couverture imperméable de marnes, de craies, d'argiles et de sables, datant du Crétacé au Quaternaire (Lagrou & Dusar, 2003).

Phénomènes karstiques dans le sel ou le gypse

Pour qu'il y ait formation de grottes au sens strict, c'est-à-dire de vides ou galeries naturelles pénétrables par l'homme, il eut fallu que la masse de sel soit exposée en surface, sous un climat

aride ou semi-aride. Dans nos régions, les évaporites viséennes, enfouies profondément, auraient pu être amenées en surface au cours des divers plissements. Mais sous notre climat tempéré et humide, leur grande solubilité les aurait rapidement fait disparaître. De ce fait, on ne trouve en surface, chez nous, aucune forme karstique, aucune grotte dans les évaporites. Par contre, la dissolution du sel et/ou du gypse enfouis à grande profondeur a entraîné la formation d'endokarsts qui sont loin d'être insignifiants, comme le sondage réalisé à Saint-Ghislain près de Mons, qui a traversé trois vides karstiques, dont un de 24 m entre 2 410 et 2 434 m de profondeur et un autre de 100 m entre 2 530 et 2 630 m de profondeur (Delmer, 1979). À l'heure actuelle, aucune recherche n'a encore été menée pour savoir si cette eau à 66 °C abritait une faune stygobie ou, du moins, une microflore bactérienne. En profondeur, sous des pressions élevées, le sel et le gypse acquièrent une certaine plasticité, ne permettant pas de fissurations, et se comportent comme une roche imperméable. Ils ne se dissolvent que peu ou pas lorsqu'ils sont en profondeur dans la nappe phréatique, où le déplacement de l'eau peut être pratiquement nul. Les phases d'exondation par abaissement du niveau des mers ou élévation du sol par la tectonique (ou de cycles d'exondations suivies d'immersions) conduisent au régime continental. Dès lors, le sel et le gypse peuvent être situés dans la zone vadose (ou de cycles de battement de niveau d'eau ennoyant ou dénoyant). Là, les écoulements hydriques sont plus importants et permettent alors leur dissolution. En raison de la haute solubilité du sel et au vu des sondages réalisés, il a été complètement dissous. Sous des climats tempérés, des massifs de sel peuvent cependant apparaître en surface grâce au diapirisme (*cf. infra*), qui les fait remonter plus vite qu'ils ne sont dissous par la pluviométrie. Pour fixer les idées, 13,1 mg de calcaire sont dissous dans un litre d'eau pure à 16 °C, le gypse est dissous dans des quantités 100 fois supérieures (2,4 g à 25 °C) et le sel (halite) dans des quantités 2 000 fois supérieures (360 g à 20 °C).

Puits naturels dans le bassin houiller de Mons

Au nord de ce bassin, les mines de charbon ont rencontré 119 puits naturels (appelés « crans » dans la région) creusés dans le Houiller. Certains ont été reconnus sur plusieurs centaines de mètres (jusqu'à 343 m) de profondeur et l'un d'eux a une section ovale de 260 sur 190 m.

Un puits de Bernissart est célèbre par ses iguanodons, dinosaures vivant il y a 120 millions d'années. La formation de ces puits s'explique par la dissolution, au cours de la phase continentale du Wealdien, du sel et, dans une moindre mesure, du gypse interstratifiés dans les calcaires viséens. Une partie de l'anhydrite est restée, car elle se dissout bien plus lentement.

Zones humides de la vallée de la Haine

De nombreux tassements ont affectés la région Haine-Scarpe, suite à la lente subsidence des terrains due au tassement des couches d'anhydrite des roches viséennes conjuguée à l'effondrement des galeries de mines abandonnées. Les pseudoséismes observés dans la vallée de la Haine pourraient être causés par des tassements en masse au sein des puits naturels (*cf. supra* et Delmer & Van Wichelen, 1985). Tous ces mouvements de terrain, survenant dans des vallées de pente très faible, ont entraîné la formation de vastes zones marécageuses.

Le « Grand Massif Superficiel »

Le « Grand Massif Superficiel » des bassins houillers du Hainaut et du Namurois regroupe en fait les massifs de Masse, de Chamborgneau, d'Ormont et de Malonne. Il a glissé gravitairement du massif du Brabant au nord dans l'auge du Flénu, puis a été recouvert à son tour et en partie par le massif du Midi, mis en mouvement vers le nord. Ce glissement dans l'auge du Flénu est dû, d'une part au relèvement du massif du Brabant et, d'autre part, à la dissolution en profondeur des évaporites du Dinantien, lesquelles devaient comporter du sel, puisque actuellement, l'anhydrite se trouve en brèche, indiquant un premier tassement ou collapse (Delmer, 2004).

Les brèches

Ce sont des roches formées, à au moins 50 %, par des éléments anguleux de dimension supérieure à 2 mm. Chez nous, deux sortes de brèches ont un rapport avec les évaporites. Les anhydrites intercalées dans les calcaires viséens, enfouies en profondeur, se dissolvent en zone vadose. Les bancs calcaires qui les surplombent se fracturent alors et forment des brèches. Dans la formation des « Grands-Malades » se trouve la célèbre grande brèche dont la genèse, encore controversée, trouve probablement son origine dans la dissolution d'évaporites interstratifiées

localement encore visibles sous forme de pseudomorphes (phénomène au cours duquel un minéral originel est remplacé par un autre, comme par exemple la pseudomorphose de l'anhydrite en calcite) dans la carrière Transcar à Maizeret, dans la vallée du Samson (Boulvain & Pingot, 2006). Dans la carrière de la Préalle à Chanxhe (Sprimont), la formation de Martinrive est constituée par une cinquantaine de mètres de calcaires foncés à cherts, avec localement des pseudomorphes d'anhydrites (fig. 2). La brèche

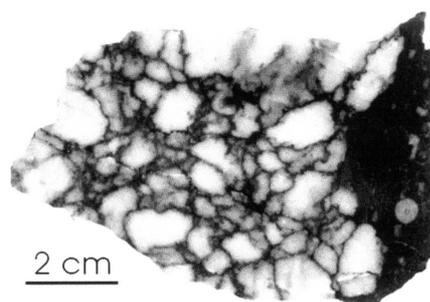


FIG. 2. - Calcaire à pseudomorphes d'anhydrite, formation de Martinrive, carrière de la Préalle à Chanxhe (Boulvain, 2007).

de l'Ourthe, épaisse d'environ 40 m, est composée de fragments anguleux centimétriques, décimétriques et parfois même métriques de roches calcaires, provenant de tassements causés par la dissolution de niveaux sous-jacents de roches évaporitiques. À Comblain-au-Pont, sur le quai du Vignoble, on peut voir, dans les calcaires viséens, un élément bréchiqye cyclopéen de plusieurs mètres de diamètre (Poty & Chevalier, 2004). D'autres brèches en relation avec les évaporites sont aussi visibles à Visé, dans la Basse Meuse. Là, il y a 367 millions d'années (fin du Frasnien, début du Famennien), suite à un rehaussement tectonique local, le calcaire frasnien fut exondé. L'érosion qui s'ensuivit généra des brèches sédimentaires cyclopéennes qui s'accumulèrent au pied des falaises en périphérie des reliefs émergés et sapa la base des mogotes (butte calcaire résiduelle). Pendant que les parties émergées se karstifiaient, plus en profondeur, dans la zone vadose, les évaporites frasniennes (présence de calcite pseudomorphe d'anhydrite) se dissolvèrent et causèrent une bréchification de 100 m d'épaisseur de la roche surplombante. Les karstifications se sont comblées durant le Viséen supérieur pour aboutir à un paléokarst. Dès le Tournaisien, on assiste au retour des conditions marines (six transgressions successives) et le relief est totalement submergé (Poty, 1982, fig. 3).

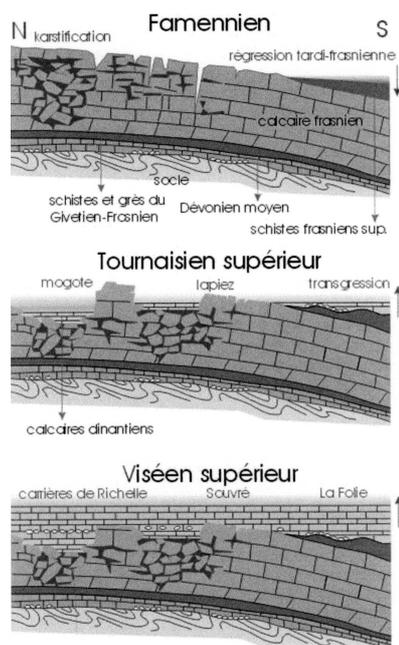


FIG. 3. – Reconstitution des événements géologiques (régression, karstification, transgression) dans la région de Visé, du Famennien au Viséen (tiré de Poty, 1982).

2.3. Le gypse de néoformation et le sel en Belgique

La solubilité élevée du sel (halite), du gypse ou de l'anhydrite a tôt fait de les faire disparaître de la surface de notre pays pluvieux. Néanmoins, contrairement au sel, on trouve du gypse ponctuellement, dans des lieux très divers, par néoformation due à l'altération de certains minéraux :

- avec des minerais marcssiteux, notamment à Heure et à Durbuy, ou encore à Visay (On) ;
- sur des terris brûlés de la région de Mons-Borinage et du Centre, sous forme amorphe la plupart du temps, mais cristallisée sur le terri de Tertre ;
- à Villers-aux-Tours, dans une galerie de captage d'eau dans du grès du Famennien inférieur, des nodules calcaires contenant de la pyrite dont la décomposition a permis la formation de cristaux aciculaires millimétriques de gypse (Dubois, 2004a) ;
- dans la carrière de Hourt, au nord de Vielsalm, le quartzite blanc verdâtre qui y est exploité est connu pour sa diversité minéralogique, en particulier en gypse, soufre et marcssite ;
- à Sclaigneau, dans la province de Namur, d'anciennes haldes de scories renferment un éventail de minéraux très diversifiés, dont des cristallisations aciculaires ;

- à Blaton (Hainaut), le Mont des Groseilliers (Viséen et Namurien) est entamé par le canal Nimy-Blaton-Péruwelz. Dans les diaclases et les microfissures, les phtanites (concrétions siliceuses) sont le support privilégié de cristallisations secondaires, principalement sulfatées et phosphatées, comme l'epsomite et le gypse, en fines lamelles transparentes ;
- à Tongres et à Bilzen, dans les sables ou les argiles du Tongrien supérieur (Oligocène), des cristaux de gypse ont été observés, provenant sans doute de concentrations à partir d'une présence diuse dans leur encaissant ;
- la présence de gypse a également été notée par sondage dans les marnes keupériennes (*cf. supra* et Melon *et al.*, 1976) à Neeroeteren et dans des schistes du Givétien ;
- dans les grottes, on trouve ponctuellement du gypse par néoformation. On l'observe habituellement sur les parois où subsistent des vestiges de sédiments meubles de remplissage, souvent sous forme de cristaux aciculaires. Les grottes suivantes abritent du gypse : grotte de Rochefort (Blondieau, 1995), réseau du bois de Waerimont à Éprave (fig. 4), salle du Prisonnier (formations aciculaires de 3 cm, Beyens & De Bie, 2006), grotte Veronika à Til (Dubois, 2004a).

Le sel proprement dit (halite, NaCl) est encore beaucoup plus rare. Notre pays ne possède pas des couches de sel d'une épaisseur susceptible de contenir un karst. Même les sondages profonds se sont avérés négatifs. Dans certaines régions du monde, avec une pluviosité comparable à la nôtre, des accumulations de sels subsistent dans des diapirs (*cf. infra*). Chez nous, seules quelques traces se rencontrent, parfois sous forme de concrétions alimentées par des concentrations de sel issues de l'encaissant ou apportées par des nappes d'eau salée (*cf. supra*) :

- dans des charbonnages, on a observé des concentrations de chlorure sodique, parfois sous forme de stalactites, sur les boisages des galeries ou sur la roche même (Lohest, cité par Melon *et al.*, 1976). J'ai moi-même observé de telles stalactites dans l'ancienne mine de Waterscheid en Campine, vers 800-900 m de profondeur, dans les années 1970 ;
- à Eelen, en Campine, un sondage a recoupé des cavités cubiques qui pourraient correspondre à des cristaux de halite (*cf. supra* et Lohest, cité par Melon *et al.*, 1976).



FIG. 4. – Dans la grotte du Réseau du Bois de Waerimont (Belgique), sur des blocs calcaires éboulés et se débitant en plaques, on peut voir des cristaux aciculaires de gypse de deux à trois centimètres de long (photo P. De Bie, S.C. Avalon).

2.4. L'homme et le sel

Très tôt, le sel revêt une énorme importance dans l'histoire de l'humanité. Il permet de conserver les aliments et sert de précieuse monnaie d'échange.

2.4.1. Brève histoire du sel en Europe

Le plus ancien témoignage connu de l'exploitation du sel sur notre continent a été découvert dans les Alpes-de-Haute-Provence et remonte à 5800-5500 ans avant J.-C. Des baguettes de bois, dont certaines présentaient d'indiscutables traces de taille, étaient enfoncées dans un sédiment marneux gorgé d'eau salée, à plus de neuf mètres de profondeur. Ces vestiges ligneux étaient associés à une structure circulaire, puisard ou puits-citerne, protégeant la source salée et dont les parois étaient constituées d'un clayonnage afin d'éviter le comblement de la source.

Dans la vallée de la Seille, en Moselle, on connaît un important site d'exploitation saline, vieux de 3 000 ans. On y a trouvé des bassins en terre cuite dans lesquels l'eau des sources salines était évaporée au feu de bois et des fragments de moules ayant servi à fabriquer des pains de sel. Les archéologues français prétendent qu'il s'agit là de la plus grande exploitation de sel

préhistorique du monde, mais il faudra encore du temps pour se faire une idée plus précise de l'importance de l'exploitation.

À Cardona, en Catalogne, un gisement déposé il y a 40 millions d'années est remonté des profondeurs par diapirisme. On y trouve aujourd'hui la plus longue grotte dans le sel en Europe, la Cova dels Meandres de Sal, avec ses 4 300 m de longueur (*cf. infra*). L'exploitation de ce gisement est très ancienne et Pline le Vieux (23 à 79 après J.-C.) en parle dans son Histoire Naturelle (Cardona & Viver, 2002).

Non loin de Hallstatt, la localité de Hallein abrite des gisements de sel gemme datant du Trias ou de l'Éocène, que les plissements alpins ont remonté vers la surface. Dès 600 ans avant notre ère, les Celtes exploitaient ces gisements par de longues galeries souterraines et faisaient le commerce du sel avec la Grèce et l'Étrurie. Mais dès le v^e siècle avant J.-C., le site décline. Les archéologues y ont découvert de nombreux instruments servant à l'exploitation et au transport du sel. Les noms de ces localités (Hallein, Hallstatt) dériveraient du celtique « hall », sel (comparez avec le grec « halos »).

Situé à 14 km de Cracovie, le site de Wieliczka-Bochnia est exploité depuis le xiii^e siècle. En

2003, il a encore produit 1,6 millions de tonnes de sel, mais la production actuelle est maintenue dans le seul but de protéger les anciens chantiers pour leur valeur historique et leur intérêt touristique. L'exploitation s'étend en e et sur neuf niveaux et sur plus de 350 km de galeries et on y trouve des salles de conférence, un musée, des endroits pour des compétitions sportives et même une imposante chapelle (fig. 5). À 200 m sous terre, on trouve encore un sanatorium !



FIG. 5. – La chapelle dans la mine de sel de Wieliczka-Bochnia, en Pologne (<http://cicg-iccg.org>).

Les sources salées de la région de Bex, à l'est de Monthey, en Suisse, sont connues depuis le xv^e siècle. Il s'agit d'un sel d'âge triasique (environ 210 millions d'années), de la même origine que celui de Lorraine (cf. *supra*). Ici, les dépôts d'évaporites ont subi des modifications dues au métamorphisme : le gypse s'est transformé en anhydrite et le sel, plus fluide, est venu combler les vides pour former une roche plus ou moins bréchique appelée « roc salé » ou « brèche salifère ». Aux débuts de l'exploitation, la saumure était acheminée jusqu'aux salines par des conduites en bois de mélèze et ensuite évaporée dans de grandes poêles en fer chauffées par des feux de bois. Il fallait alors 10 kg de bois pour obtenir un kilo de sel. Plus tard, on laissa couler la saumure à travers des empilements de fagots de branchettes pour évaporer l'eau jusqu'à une concentration de 200 g/l, ce qui permit d'obtenir un kilo de sel avec seulement 2 à 3 kg de bois.

En Belgique, on a découvert, en 1973, à Leuven près d'Ostende, des fours datant des III^e et II^e siècles avant notre ère. Des sauniers ménapiens produisaient des pains de sel en chauffant une saumure dans ces fours. Les fouilles ont permis de mettre au jour deux batteries de quinze fours, de forme ovale, de 1,20 sur 0,60 m, en argile mélangée à des

matières organiques et munis d'un petit alandier orienté vers le sud pour la première batterie, vers le nord pour la seconde. Le tout se présentait comme un vaste « Red Hill » (hyponyme d'une station de l'Essex, en Grande Bretagne). On a également trouvé d'innombrables tessons de moules et des analyses chimiques ont révélé une teneur de 10 % en NaCl dans les scories. Actuellement, les recherches se concentrent, en Belgique et en Hollande, sur les vases ayant servi à transporter le sel de la côte vers l'intérieur du pays (Thoen, 1999).

À l'ouest d'Anvers, aux Pays-Bas, le « Verdronken land van Saeftinghe » est un parc naturel de 3 500 hectares abritant de nombreuses espèces d'oiseaux. C'est un des plus grands espaces inondables par les marées en Europe. Au XII^e siècle, les habitants de la région commencèrent à construire des digues pour assécher graduellement le terrain, au point de modifier radicalement le paysage. Entre le XIII^e et le XVI^e siècle, le sel et la tourbe ont apporté à la région une légendaire prospérité : le premier était le seul conservateur connu à l'époque et la seconde un très bon combustible. Mais, entre 1584 et 1585, les habitants ayant eu vent du projet des Espagnols de conquérir Anvers, ils démolirent toutes les digues afin de barrer le chemin à leurs troupes. Il en résulta la plus grande inondation jamais connue, qui submergea les pays de Saeftinghe et de Waas (cf. site Internet).

2.4.2. Le sel aujourd'hui

Les salines du nord de la Belgique sont abandonnées depuis longtemps et notre pays est approvisionné par l'importation de sel provenant des côtes françaises de l'Atlantique ou par des exploitations de sel gemme, parfois situées à grande profondeur.

Les gisements de sel gemme des régions limitrophes de la Belgique ont trois origines principales :

- au début du Trias, la dislocation de la Pangée provoque de nombreuses failles distensives, elles-mêmes à l'origine de marges passives comme, par exemple, au Maroc. Certaines, peu profondes, sont propices à la genèse des évaporites. Par ces failles distensives, une certaine activité volcanique entraîne des remontées de roches basaltiques qui viennent s'intercaler dans les évaporites. Une sédimentation continentale ou lagunaire, en climat

aride, donne naissance à l'accumulation de masses de sel ;

- vers le milieu du Trias, la mer germanique submerge pratiquement tout l'est de la France sous une profondeur d'eau n'excédant pas quelques dizaines de mètres. Vers la fin du Trias, il y a environ 190 millions d'années, le climat redevient sec et la mer s'évapore, déposant ainsi de nouvelles couches de sel ;
- au Cénozoïque, il y a environ 33 millions d'années, l'Europe connaît une phase de distension qui produit un alignement de fossés d'ondement. Parmi ceux-ci, le graben rhénan est rapidement envahi par la mer, dans laquelle se déposent des couches de sel pouvant atteindre parfois un millier de mètres d'épaisseur. Certaines accumulations « en dôme » d'évaporites évoquent le diapirisme.

Les principaux sites d'exploitation alimentant notre pays en sel sont les suivants :

- la S.A. « Esco-European Salt Company » (Solvay avec 38 % des parts) occupe, avec une production de 5,1 millions de tonnes en 2003, une position de leader en Europe. Elle dispose de seize sites de production et de distribution dans sept pays européens, dont la plus importante mine de sel gemme au monde, située à Borth en Allemagne, atteignant 700 m de profondeur et exploitée selon la méthode dite des « chambres et pliers abandonnés » ;
- à Saint-Nicolas-Varangéville, près de Nancy, la mine de sel de potasse a atteint 160 m de profondeur et est d'âge triasique. La production, qui était de 300 000 t/an, s'est arrêtée en 1999, avec l'arrêt de l'exploitation des Mines de Potasse d'Alsace ;
- aujourd'hui, à Bex (*cf. supra*), les roches salifères sont traitées par de l'eau sous pression et la saumure est chauffée sous vide partiel. Ces progrès techniques permettent d'obtenir un kilo de sel raffiné propre à la consommation avec seulement 0,2 kWh ;
- la production des marais salants de la côte atlantique française (surtout ceux de la presqu'île de Guérande) est devenue marginale par rapport à celle des marais salants méditerranéens ;
- un « saumoduc » long de 286 km amène de la saumure depuis l'Allemagne jusqu'à Jemeppe-sur-Sambre, où la société Solvay l'utilise notamment pour la fabrication industrielle de PVC.

Dans les dépôts de sel, on a également procédé à des stockages souterrains de déchets industriels et nucléaires mais aussi de gaz liquide et autres hydrocarbures. Des couches de sel de plus de mille mètres d'épaisseur ont, en outre, une porosité pratiquement nulle par rapport à la pression. En Europe occidentale, on compte 26 sites de stockage en cavités salines (sur 84 installations au total ; voir aussi plus haut, l'exemple de Loenhout). Dans des cavités résultant du lessivage du sel, à Bernburg et à Peckensen (Allemagne) et à Tersanne (France), on stocke du gaz liquide. À Manosque (France), on stocke du pétrole brut. En Allemagne, deux installations à plus de 500 m de profondeur dans des mines de sel ont servi de dépôt à des déchets de faible et moyenne radioactivité.

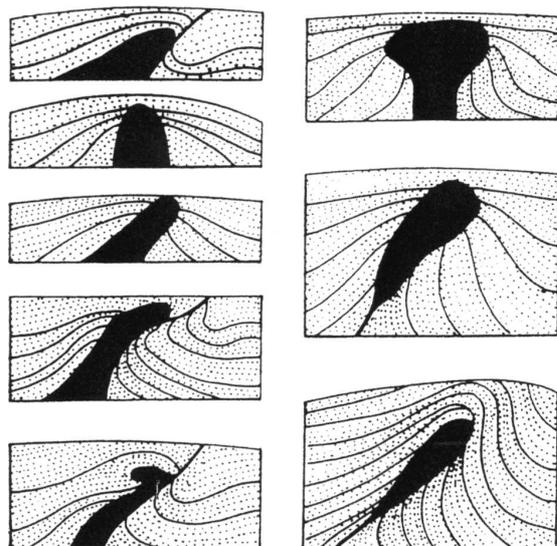
3. Genèse des diapirs : l'exemple de la Montagne de Tissa (Maroc)

3.1. Diapirs de sel et halocinèse

Diapirisme et halocinèse sont en fait synonymes. Le terme « diapir » (du grec « percer à travers ») a été défini par Mrazec (cité par Foucault & Raoult, 1995) au début du xx^e siècle et repris par Hallot (1999a et b). Deux propriétés particulières des séries salines sont la cause du diapirisme :

- la haute plasticité des séries sous pression et à température élevée (vers les 100 °C, mais mieux encore vers les 300 °C), pour un enfouissement important (de 5 à 10 km), rend possible le fluage ;
- leur faible densité par rapport aux sédiments couvrants qui favorise l'ascension à travers les couches supérieures plus denses (poussée d'Archimède). Le fluage se fait souvent à la faveur de failles ou d'une irrégularité topographique locale (Hallot, 1999a et b).

Le diapir est parfois aussi appelé « anticlinal à noyau disharmonique perçant », c'est-à-dire un anticlinal dont les couches ne sont pas parallèles, mais dans lequel les couches du noyau, redressées, pénètrent comme un coin dans la voûte, tandis que celles des flancs, glissant sur le noyau, perdent leur inclinaison au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'axe du pli. Par ce glissement, il se produit généralement un étranglement à la base du noyau, qui prend ainsi l'aspect d'un champignon ou d'un chou-fleur (Perthuisot, 1991). La figure 6, tirée de



Quelques types de diapirs, selon Mrazec, 1915

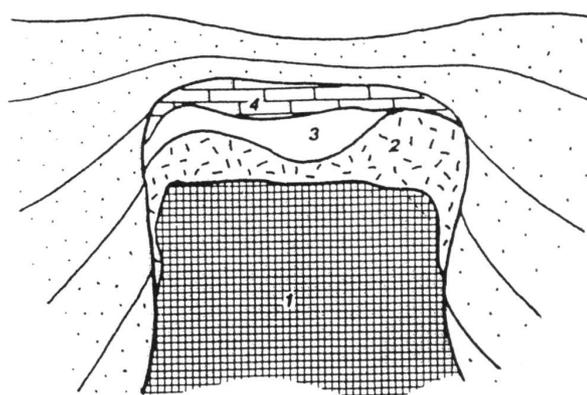


Schéma d'un cap rock (sans échelle) d'après Perthuisot, 1991

- 1 - Masse de sel
- 2 - Formation résiduelle sulfatée, en grande partie de l'anhydrite
- 3 - L'anhydrite est localement hydratée en gypse
- 4 - Des carbonates résultant de la réduction des sulfates, peuvent couronner le tout

FIG. 6.

Perthuisot (1991), montre ce phénomène. La vitesse d'ascension de la masse de sel d'un diapir est en moyenne d'un millimètre par an, soit un kilomètre par million d'années (Perthuisot, 1991). Le cap-rock, situé au sommet d'un diapir de sel, est constitué de résidus de dissolution. On y trouve généralement des argiles, du gypse, de l'anhydrite, ainsi que des roches remontées par le fluage, dolomie ou dolomite et, dans certaines régions, des roches magmatiques intrusives telle que l'ophite (roche éruptive, dolérite à éléments de feldspath).

La transformation de l'anhydrite en gypse permet d'obtenir une mixture parfaitement plastique, à une température beaucoup plus basse que celle requise pour la plasticité du sel de sodium, NaCl. C'est pourquoi les diapirs de séries gypseuses sont aussi communs et d'origine moins profonde que les diapirs de sel gemme (Heard & Ruby, cités par Hallot, 1999a).

3.2. La Montagne de sel de Tissa dans le Prérif au Maroc

La petite ville de Tissa (environ 7 000 habitants) est située à 40 km au nord de Fès, dans la province de Taounate. Ses habitants sont réputés pour leurs élevages de chevaux et leurs fantacias. À 1 500 m du centre urbanisé, se dresse la Montagne de Sel (fig. 7).

Il s'agit d'un diapir d'une hauteur de 130 m pour une longueur de 2 km et une largeur de



FIG. 7. - La Montagne de sel de Tissa, vue générale (photo A. Dubois)

800 m. Il est cerné, au sud, par l'oued Lebene (= « petit lait » car, en période de crue, l'oued charrie des argiles et des marnes blanches) et, au nord, par un de ses affluents. Les épais dépôts de sel, en raison du phénomène de diapirisme, ne sont donc plus inclus dans les couches géologiques en rapport avec la période de leur formation mais proviennent de zones profondes.

J'ai donné, ailleurs, une description détaillée du site (Dubois, 2004b, 2006). Je me limiterai donc ici à rappeler les points suivants :

- d'un point de vue géologique, la Montagne de Tissa appartient aux séries sédimentaires du Trias qui se sont déposées sous un climat chaud, dans une mer peu profonde et affectée de subsidence. Ces sédiments salifères se sont étalés sur des surfaces aplanies

par l'érosion post-hercynienne, lors de la transgression survenue au Trias supérieur, il y a 205 millions d'années. À Tissa, sous un cap-rock argilo-gypseux rougeâtre de 10 à 30 m d'épaisseur, la colonne diapirique a entraîné de l'ophite, un bloc de cipolins (marbre avec des impuretés argileuses) blancs recristallisés d'âge jurassique (Jaillard, 1984), de rares schistes primaires (Michard, 1976), un petit massif d'anhydrite et un autre de calcaire blanchâtre. La montagne actuelle n'est cependant que le témoin d'un massif de sel beaucoup plus vaste qui s'étendait sur cinq ou six kilomètres. De loin, ses versants de sel rouge vif et son plateau coiffé d'une végétation bien verte contrastent avec les coteaux blancs éocènes environnants (Lacoste, 1934) ;



FIG. 8. – Surface de la Montagne, percée de dolines (photo A. Dubois)

- avec 557 mm/an (période de 1925 à 1949), la pluviométrie est importante et la montagne est soumise à l'érosion (nombreuses dolines et ondements de parois, fig. 8). Or, la solubilité du sel dans l'eau peut atteindre 35 g/l à 20 °C (Nicod, 1962). Néanmoins, son cap-rock et sa végétation herbeuse au sommet la protègent en partie mais la montagne montre une régression, en particulier de ses versants sud, plus raides (fig. 9).

À titre de comparaison, le diapir karstifié de Meledic (Carpatés méridionales, Roumanie) reçoit 700 mm/an de pluie, tandis que celui du Mont Sedom (Israël) n'en reçoit que 32. Tous deux abritent de nombreuses grottes, certaines longues de plusieurs kilomètres. Avec ses 480 m de développement, la grotte de la Montagne de Tissa reste, cependant, la plus longue grotte dans le sel en Afrique. Au Maroc, on connaît au moins une vingtaine



FIG. 9. – Lapiez creusé par le ruissellement vertical des eaux (photo A. Dubois)

de formations diapiriques d'une certaine importance (Fedan, 1987) ;

- la saline appartient à la famille Mounir, de Fès. Elle produit du sel gemme, directement arraché du massif grâce à des jets d'eau, et du sel alimentaire (avec ajout d'iode) et industriel, dit d'évaporation. La production annuelle est d'environ 20 000 tonnes. Le front d'exploitation foisonne de splendides concrétions et de cristaux, créés par aspersion et dissolution du massif de sel et renouvelés chaque année.

3.3. Ghar el Melh, la grotte de sel

J'en ai déjà donné une description détaillée (Dubois, 2006) et je me contenterai ici de commenter brièvement la topographie de la figure 10.

La première allusion à cette cavité pourrait dater des années 1950. Elle est signalée, sans topographie, dans Camus & Lamouroux (1981), qui lui attribuent une longueur de 230 m. En 2003, 2004 et 2006, j'ai visité cette grotte à plusieurs reprises, en compagnie de collègues et d'amis marocains, et porté son développement, après désobstructions, à 480 m, ce qui en fait la plus longue grotte dans le sel d'Afrique.

La grotte s'ouvre sur le versant sud-est de la Montagne de Sel. Le porche d'entrée (fig. 11) est situé quelques mètres à l'aplomb de la résurgence. Soumise à l'érosion pluviale et aux variations d'humidité, l'entrée est la partie la plus instable de la grotte : d'une année à l'autre, elle peut parfois se reboucher. Un premier regard sur la rivière, en forme d'entonnoir et impénétrable, s'ouvre à six mètres de l'entrée. Le plafond est chargé de petites stalactites blanches

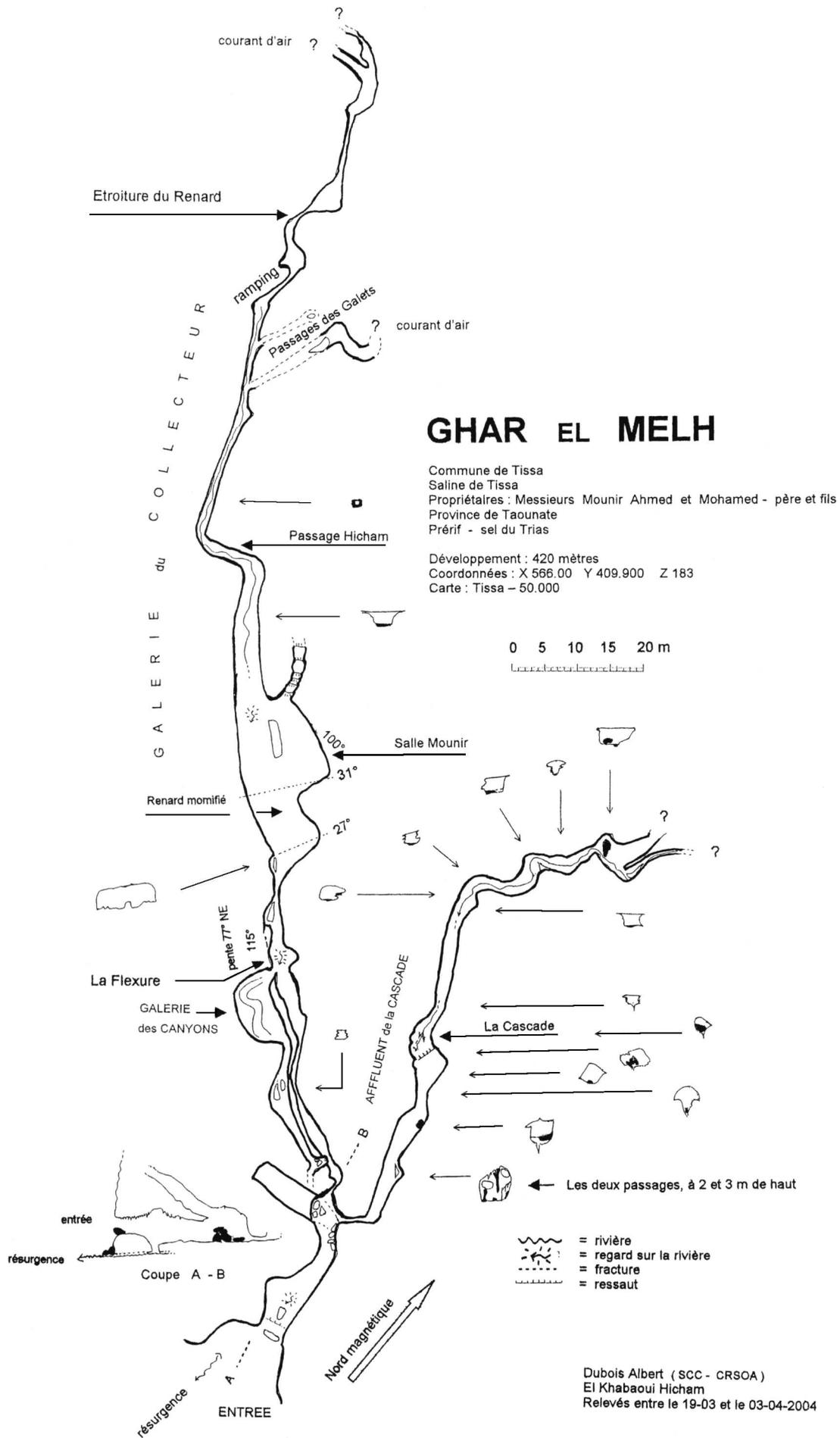
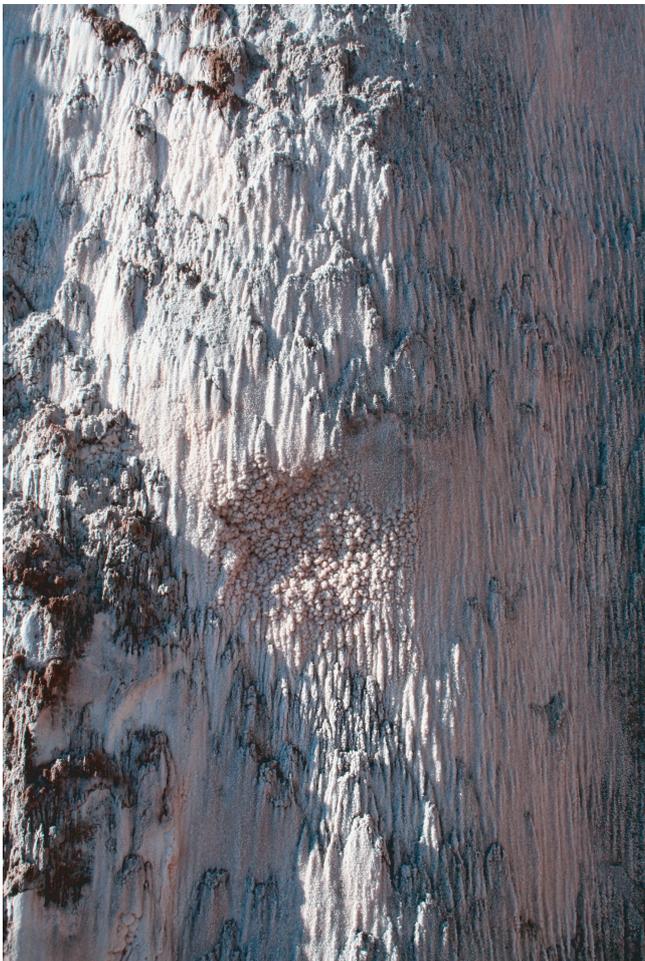


FIG. 10. - Topographie de la Ghar el Melh (Dubois, 2006)

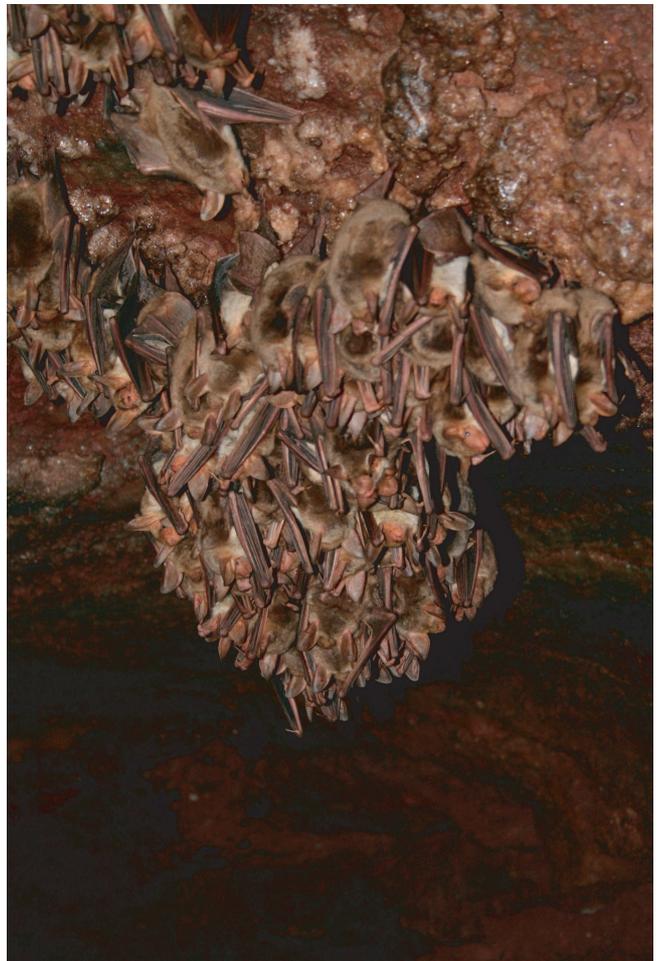


La Montagne de Sel (à gauche) et la saline qui s'étend dans la plaine alluviale de l'oued Lebene. Au passage le long du massif salin, il se charge de sel et son eau est impropre aux cultures.

Massif d'anhydrite recouvert de petits pinacles. Il a été entraîné par la remontée diapirique.



Colonie de chauves-souris (murins), avec des juvéniles issus de la dernière portée (photo prise le 9 mai 2006).





Galerie du Collecteur. Le plafond horizontal recoupe les couches verticales de sel. À gauche, un talus argileux; au sol, des galets allochtones.

Stalactite massive à reflets métalliques constituée d'un agrégat de cristaux colorés notamment par de l'oxyde de fer.



Stalactite prolongée par une fistuleuse.



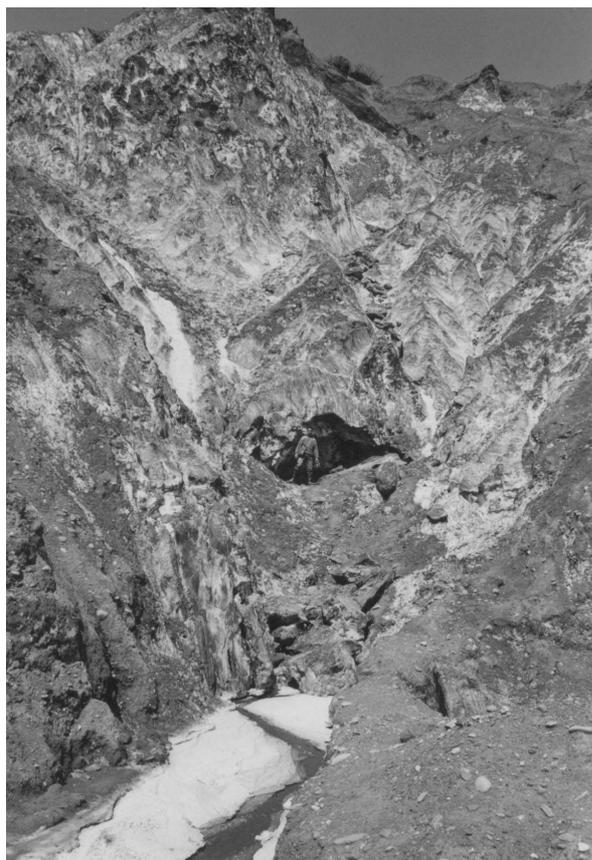


FIG. 11. – Entrée de la grotte et résurgence
(photo A. Dubois)

de sel, une colonie de chauves-souris (petits murins ?) a pu être observée au fond du porche. À 15 m de l'entrée, dans le plafond, il y a une petite galerie remontante d'une dizaine de mètres.

La galerie de l'Avant de la Cascade s'ouvre à droite et est d'abord fossile, avec, en son milieu, un étroit et profond sillon impénétrable (au fond duquel coule encore le ruisseau) et des banquettes de part et d'autre (cf. coupes sur la topographie). Plus loin, le ruisseau tombe de quelques mètres dans l'étage inférieur actif. En amont de cette cascade, le ruisseau coule dans un sillon de plus en plus large pour finalement s'étaler sur un fond plat, en larges méandres. Une petite salle, haute de quatre mètres, est due à un élargissement local.

La galerie des Canyons commence par un élargissement de la gorge et une salle basse, puis elle se divise en deux branches parallèles formant d'amples méandres. Il n'y a pas de circulation d'eau dans les parties basses de cette galerie, hormis quelques traces laissées par des crues brèves mais importantes. La galerie des Canyons se termine par deux passages : l'un

étroit et descendant, non visité à ce jour, l'autre montant et menant à la galerie du Collecteur.

La galerie du Collecteur est la plus longue de la cavité et son axe, comme celui de la galerie des Canyons, suit assez fidèlement l'orientation du fluage. Elle commence par une courte étroiture, puis s'élargit pour atteindre trois mètres sur 1,20 m de hauteur. Un nouveau regard en forme d'entonnoir permet d'apercevoir au fond un filet d'eau.

La salle Mounir, ainsi nommée en hommage aux propriétaires de la saline et de la grotte, s'ouvre à 20 m en amont de ce regard. Elle mesure environ 25 × 15 m et résulte de deux fractures, orientées respectivement à 27 et 31° N. De gros blocs détachés du plafond encombrant la salle et, au fond, un nouveau regard permet encore de voir le cours d'eau.

Le passage Hicham (prénom d'un de mes coéquipiers) fait suite à la salle Mounir ; il se rétrécit progressivement et est parcouru par le ruisseau. La galerie du Collecteur se poursuit ensuite en ligne droite sur environ 40 m.

Les passages des Galets s'ouvrent à droite de la galerie du Collecteur et amènent deux petits avants qui ont incisé verticalement la masse des galets allochtones provenant d'une ancienne terrasse de l'oued Lebene. Ces conduits sont étroits mais, dans le premier, un courant d'air est nettement perceptible et une désobstruction pourrait y être envisagée.

La galerie du Collecteur se poursuit au-delà des passages des Galets sur une bonne cinquantaine de mètres, avec un rétrécissement (dans lequel un renard a été aperçu !) et se termine par une petite salle, dans laquelle la rivière contourne un cône de sédiments par un minuscule boyau impénétrable. Un courant d'air autorise cependant des espoirs de suite ...

Le tableau 1 reprend la spéléométrie mondiale des grottes dans le sel.

3.4. Note sur la faune souterraine

Je me suis efforcé de capturer, en suivant les conseils de mon collègue Michel Dethier, la faune invertébrée vivant dans la grotte. Le succès n'a malheureusement pas été au rendez-vous. Une grosse araignée noire (non capturée !) a été aperçue dans la salle du Collecteur et les pièges et appâts recommandés par mon collègue biologiste n'ont permis la récolte que d'une maigre faune :

Tableau 1
Spéléométrie mondiale des grottes dans le sel (Dubois, 2006)

Situation		Cavités	Développement (m)	Références
Afrique	Algérie	Grotte S8 (Delfa)	282	Chabert & Courbon (1997)
	Maroc	Ghar El Melh (Tissa)	480	Dubois (2006)
	Tunisie	Une ou des grottes signalées	?	Bosak <i>et al.</i> (1990)
	Namibie	Une ou des grottes signalées	?	?
Amérique	États-Unis	En relation avec Mammoth Cave	?	Kliebhan (2003)
	Chili	Des grottes sont signalées	250 à 500	Bosak <i>et al.</i> (1990)
Asie	Israël	Grotte de Malham	5685, -135	Chabert & Courbon (1997)
		Grotte Sedom	1799	Chabert & Courbon (1997)
	Syrie	Des grottes sont signalées	?	Bosak <i>et al.</i> (1990)
	Iran	Grotte Tri Nahacu	5010	Bruthans <i>et al.</i> (2002)
	Tadjikistan	Diverses grottes	300 à 2500, -120	Bosak <i>et al.</i> (1990)
Europe	Espagne	Covas dels Meandres de Sal	4300, -187	Cardona & Viver (2002)
		Forat Mico	650	Ek (1998)
	Pologne	Deux grottes dans mine de Wieliczka	Quelques mètres	Dépliant touristique
	Roumanie	Grotte 6S de la Mindalesti	3234	Chabert & Courbon (1997) Giurgiu, 1985a et b

- des Acariens Mésostrongyloides (*Gamasida*), très abondants, semble-t-il, dans la grotte, en particulier à proximité des chauves-souris. Ces Acariens « parasitiformes » sont, en effet, phorétiques, c'est-à-dire qu'ils s'accrochent aux poils des chauves-souris, voire même à des insectes, pour se faire transporter d'une source de nourriture à l'autre. Ils sont détritivores et coprophages ;
- deux petits Diptères, l'un appartenant à la famille des Phoridae, l'autre à celle des Drosophilidae. Les larves des premiers se nourrissent de cadavres (on a trouvé dans la grotte de nombreux cadavres de chauves-souris et même d'autres Mammifères), ce qui leur a valu le nom de « mouches des cercueils ». Les seconds, appelés aussi « mouches du vinaigre », aspirent les liquides suintant des fruits en décomposition.

Tous ces animaux sont troglodytes, au mieux troglodytes et ne représentent donc pas des espèces très intéressantes. Cette grotte n'abriterait-elle aucune faune réellement cavernicole ?

La littérature concernant la présence de cavernicoles troglodytes ou stygobies dans les grottes de sel est particulièrement pauvre, surtout pour les espèces terrestres. Elle concerne essentiellement la faune des sources salées, parfois chaudes. C'est ainsi que des crevettes aveugles, de six centimètres, ont été trouvées dans les

sources thermales salées de Tabga, sur les rives du lac de Tibériade. D'autres découvertes ont été faites dans la source thermale de Hameï Zohar, au bord de la mer Morte, ces deux sites étant situés à grande distance de la ligne côtière actuelle. Ces eaux chaudes d'origine profonde et d'aire souterraine importante sont liées à des phénomènes géologiques de grande ampleur (rift) mis en place peut-être depuis le Cénozoïque et recouvertes ensuite par l'ancienne Tethys, dont les reliques subsistent en sous-sol depuis le Miocène (Delamare & Botosaneanu, 1970). La faune des eaux sursalées compte des espèces vraiment remarquables comme, par exemple, les Thermosbaenacés, petits Crustacés stygobies de 5 mm au maximum vivant dans les eaux chaudes et fortement chargées en sel. *Thermosbaena mirabilis* (fig. 12) vit en Tunisie, dans des sources à 45 °C et fortement minéralisées tandis que *Monodella relicta* se rencontre dans les sources sulfureuses des rivages de la mer Morte (31 °C, 56 g de sel/l). On en connaît une bonne trentaine d'espèces réparties un peu partout dans le monde, y compris dans les eaux continentales (Wagner, 1994).

Par ailleurs, des observations ont été faites dans des grottes pénétrables, proches des rivages marins, par des puits et ondres ou cenotes. Dans ces grottes anchihalines, les galeries sont envahies par l'eau de mer, au-dessus de laquelle

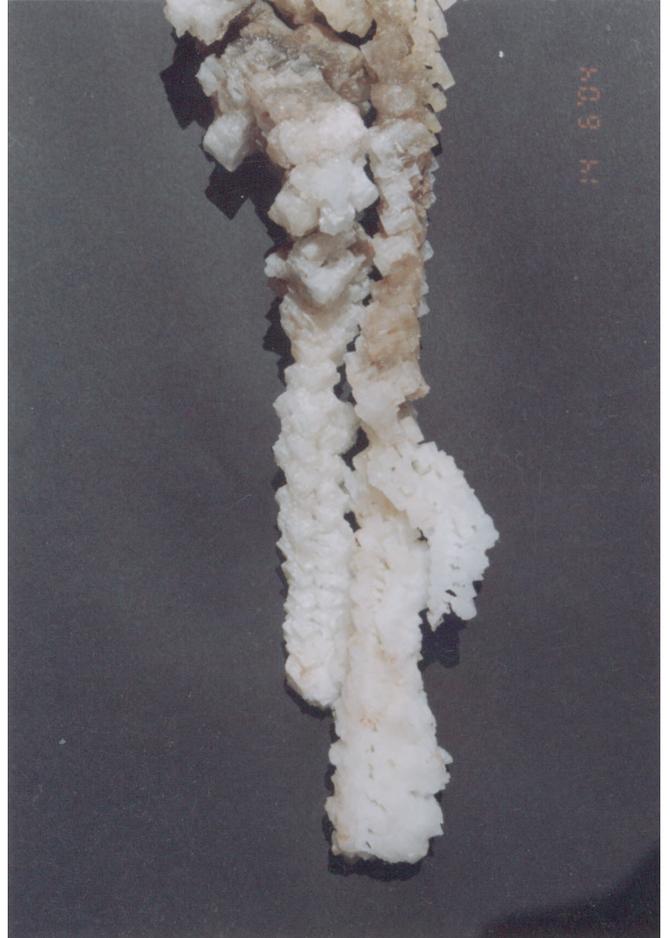


L'auteur, les pieds dans la saumure de la rivière souterraine, admire un bouquet de stalactites monocristallines.

Stalactites jumelles bifides : concrétions monocristallines couvertes de sel amorphe sur lesquelles se sont greffées de nouvelles stalactites monocristallines.



Stalactite verticale monocristalline : au milieu, à droite, un nouveau départ à 45°, suivi d'un second selon le même angle, réorientant cet empilement de cubes emboîtés à la verticale.





Sel fibreux : sur une paroi recouverte de sédiments argileux se développent des cristaux aciculaires de sel.

Stalactite monocristalline présentant, à son extrémité, des dendrites de croissance.



Stalactite massive à agrégats de cristaux colorés par de l'oxyde de fer et recouvert de cubiques de sel, blancs à translucides.



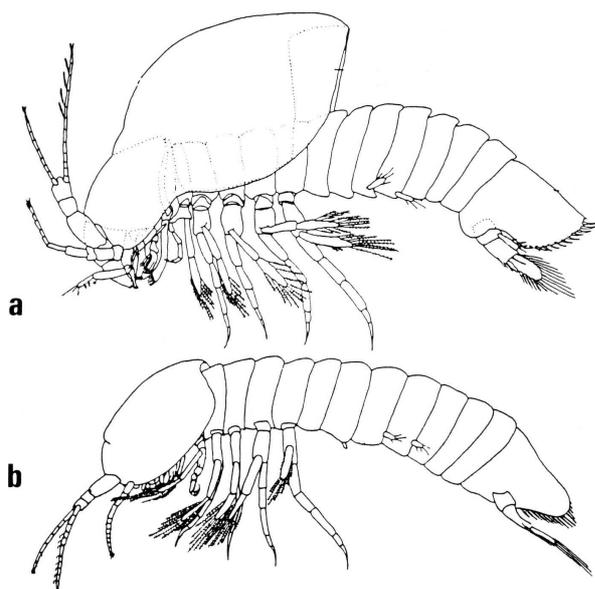


FIG. 12. – *Thermosbaena mirabilis* Monod, 1924 :
a) femelle, b) mâle. D'après Wagner (1994).

surnage l'eau douce des précipitations. Ce milieu particulier (halocline) abrite une faune très intéressante (Tercafs, 1998). C'est là qu'on a découvert, en 1975 les Rémipèdes, que l'on considère parfois comme des Crustacés extrêmement primitifs mais qui présentent un aspect de mille-pattes. Une douzaine d'espèces sont connues, des grottes du golfe du Mexique et des Canaries, et le plus ancien fossile connu remonte au Carbonifère inférieur (Yager, 1994).

Le cas du diapir de Tissa est complètement différent des exemples précités. Cette montagne de sel est isolée comme une île et ne couvre que quelques km². De plus, il n'y a pas d'arrivée d'eau profonde. Une faune stygobie (cavernicole aquatique) n'aurait pu s'y établir que par le biais d'une mer ou d'un lac. Or, rien n'indique que le diapir de Tissa ait percé la surface du sol avant la dernière exondation régionale et la plasticité du sel ne permet l'ouverture de fissures qu'après le percement de la surface par le diapir. La colonisation d'un tel milieu par la faune demande du temps et des adaptations importantes, qui déboucheraient sur une faune endémique. L'existence d'une telle faune à Ghar el Melh est donc peu probable. Il ne faut cependant pas perdre de vue deux autres éléments :

- la faune marocaine, en particulier celle des eaux douces souterraines, compte un pourcentage d'espèces endémiques assez élevé : 14 % d'endémiques chez les Amphipodes (en particulier les Niphargidæ), deux espèces de

Thermosbaenacés (*cf. supra*), 18 % chez les Hydracariens, ... (Boutin, 1993) ;

- la colonisation de nouveaux milieux souterrains et l'apparition de certaines espèces troglobies se sont parfois révélées très rapides, ainsi qu'on l'a constaté dans les tubes de lave (Howarth, 1987).

3.5. Les spéléothèmes de sel de Ghar el Melh

Le lecteur désireux d'en apprendre davantage sur les spéléothèmes d'encastants divers consultera les ouvrages de Hill & Forti (1997) et de Marteaud (1997). Dans pratiquement toutes les grottes, on observe des concrétions diversement colorées. Ici, la solution sursaturée (de calcite, de sel, ...) coulant sur les parois contient aussi d'autres substances, comme par exemple de l'argile (environ 7 % dans la masse saline de la Ghar el Melh). Or, si la cristallisation de la solution s'opère en éliminant la plupart des impuretés, le peu qui en reste donne parfois des couleurs extraordinaires aux spéléothèmes et a une influence sur la forme des cristaux. Outre l'argile, les « impuretés » les plus fréquentes dans les concrétions sont le fer, le gypse, le magnésium (abondant dans la carnallite), le manganèse et parfois des éléments organiques. L'air emprisonné dans l'édifice cristallin rend les concrétions d'un blanc laiteux opaque, tandis que l'absence d'air leur donne un aspect vitreux.

Dans la Ghar el Melh, on peut observer que certaines stalactites sont vivement colorées, passant du rouge orangé au noir puis, sur certaines au fur et à mesure que l'on descend, leur teinte passe progressivement au blanc, après que les oxydes de fer qui les coloraient se soient déposés. Celles qui restent fortement colorées jusqu'au bout sont plus massives et présentent à leur surface des pointements d'agrégats de cristaux. Dans la Galerie des Canyons, ces stalactites massives sont de teinte rouge orangé et sont toutes fortement inclinées vers l'aval, comme dans le passage Hicham. Dans l'Auent de la Cascade, une coulée est colorée de tons brunâtres par l'oxyde de fer dégagé par une tige métallique enfoncée dans la paroi.

Dans la grotte de sel, on peut distinguer *grosso modo* deux types de stalactites, qui semblent d'ailleurs assez courants dans d'autres grottes de sel que j'ai eu l'occasion de visiter, comme celles de la Meledic, en Roumanie.

3.5.1. Les anémolites

Parmi celles-ci, on peut distinguer les stalactites obliques, poussant dès le départ selon un angle quelconque par rapport à la verticale, et les stalactites arquées ou courbes. Les stalactites obliques sont assez fréquentes dans la grotte étudiée ici, en particulier dans l'entrée et dans l'A uent de la Cascade. On peut penser que ce phénomène est dû à une circulation d'air, comme c'est le cas pour les anémolites, concrétions de calcite courbées par un courant d'air. Les concrétions de sel sont alimentées par la percolation de la saumure sur la paroi et un courant d'air favorise la précipitation du sel sur le côté exposé à la circulation de l'air. Observée à l'œil nu, leur surface externe semble recouverte de sel amorphe.

3.5.2. Les monocristallines

Des stalactites verticales, coniques, très étirées et rectilignes sont construites par l'agencement de cubes de sel emboîtés, dont une pointe est dirigée vers le haut et l'autre vers le bas. Cet axe est la direction de croissance la plus rapide pour le sel gemme, qui cristallise le plus souvent dans le système cubique, mais qui peut parfois adopter des formes moins courantes (octaédriques) et se macler (Prinz, 1908 ; Cabrol & Mangin, 2000). L'allure conique de ces stalactites est due aux cristaux cubiques qui diminuent régulièrement de taille du haut vers le bas. Parfois, à l'extrémité de ces concrétions, on peut observer un ou plusieurs cristaux cubiques en formation ou dendrite de croissance de quelques millimètres.

Certaines de ces stalactites adoptent, dès leur base, un angle de 35 à 45° environ par rapport à la verticale, puis présentent un coude de $\pm 45^\circ$. D'autres qui, au départ, se développent comme les précédentes, deviennent « bifides » en développant latéralement une autre stalactite à environ 45°. On peut aussi rencontrer des stalactites du second groupe qui, à un moment de leur croissance, ont évolué comme celles du premier groupe et sont, en partie ou en totalité, recouvertes de sel amorphe.

Sur les parois du pourtour de la dépression de l'A uent de la Cascade, se trouvent de nombreuses stalactites à empilement monocristallin, brunes, blanches, opaques ou translucides. Parfois, sur le côté exposé à la chute d'eau, elles présentent une surface plane faite d'un agencement di érent de beaux cristaux de sel

emboîtés. L'une d'entre elles, longue d'une vingtaine de centimètres, est remarquable. Elle est formée d'au moins trois empilements, accolés et parallèles. Des interstices subsistent entre ces empilements verticaux.

Cet empilement à 90° par rapport à l'horizontale oriente les faces des cubes soit vers le haut, soit vers le bas, mais toujours selon un angle de $\pm 45^\circ$ par rapport à la verticale. Sur la face d'un cristal orientée vers le bas pousse un nouvel empilement de cubes s'écartant de la stalactite « mère » selon un angle d'environ 45° vers le bas. Un peu plus loin, sur cette branche secondaire, pousse une nouvelle bifurcation, un nouvel empilement, selon le même angle de 45°, ce qui réoriente la croissance à la verticale.

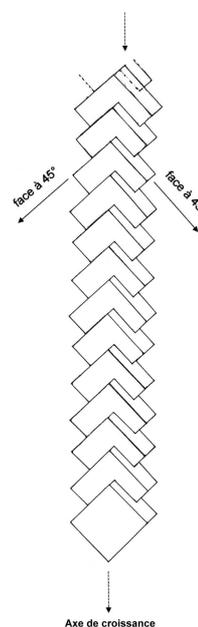


FIG. 13. – Schéma d'une stalactite à empilement monocristallin (Dubois, 2006).

Au vu de la constance des caractéristiques observées sur les stalactites monocristallines, on pourrait envisager que leur construction est dictée par la cristallographie cubique propre au sel, sans négliger pour autant l'influence de circulations d'air, lesquelles pourraient décider des inclinaisons des axes à plus ou moins 45°.

Dans la Galerie du Collecteur, on peut observer deux très fines stalactites, semblables à des fistuleuses de calcite et atteignant presque le sol. À proximité, on trouve deux petites stalagmites, les seules rencontrées dans cette grotte.

Dans la Galerie, on peut voir une succession ininterrompue de couches de sel argileux,

alternativement mates et brunes et vertes et vitreuses. Cette succession de coloris s'observe également un peu plus loin, dans un fluage plissoté. Dans la Galerie des Canyons, on traverse des zones tapissées de boursoufflures de sel immaculé d'aspect neigeux avec, non loin de là, des anémolites massives de teinte rouge orangé (*cf. supra*), tandis qu'au plafond, des bourgeonnements de sel rouge orangé sont prolongés par de nombreuses excentriques. Sur une paroi à droite, une inclusion d'environ 60 cm de diamètre, de teinte brun noirâtre et d'aspect granuleux, est constituée d'un bloc de dolomite, entraîné par le fluage du diapir. À une dizaine de centimètres de ce bloc, on aperçoit sur la paroi de fines strates subverticales de sel cristallisé de quelques millimètres d'épaisseur, bien mises en évidence par la différence de solubilité avec le sel amorphe.

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement mes amis et collègues marocains pour leur aide sur le terrain, en particulier Hicham El Khabaoui, fidèle compagnon dans la grotte de sel, Aziz Hayati, étudiant en géologie à l'Université de Kenitra, Mohamed Charroud, de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, ainsi qu'Ahmed et ses amis du Prérif de l'A.S.B.L. Anual de Droixhe (Liège, Belgique).

En Belgique, mes collègues et amis du C.R.S.O.A., Michel Dethier, Camille Ek, Luc Willems, Roger Vandenvinne et Albert Briffoz, m'ont apporté toute leur aide, leur savoir et leur soutien dans la préparation et la rédaction de cet article. Je leur suis redevable de leur disponibilité et de leurs conseils.

Toutes les photos sont de l'auteur et se rapportent à la Montagne de sel de Tissa et à la grotte de Ghar el Melh.

Bibliographie

- BEYENS J. & DE BIE P., 2006. « Réseau du Bois de Waerimont. Éprave, Rochefort », *Regards*, 64 : 4–11 (+ topographie).
- BLONDIEAU M., 1995. *Minéraux et fossiles de la région de Rochefort, Han-sur-Lesse et de ses environs*, édition à compte d'auteur, 23 p.
- BOSAK P., BRUTHANS J., FILIPPI M., SVOBODA T. & SMID J., 1990. « Karst and caves in salt diapirs SE of Zagros Mountains (Iran) », *Acta Carstologica*, 28 (2) : 41–75.
- BOULVAIN F., 2007. *Introduction à la géologie de la Wallonie*. <http://www.ulg.ac.be/geolsed/geolwal/geolwal.htm>.
- BOUTIN C., 1993. *Biogéographie historique des Crustacés Malacostracés stygobies du Maroc*, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon I, 263 p.
- BRIFFOZ A., 1983. *Sprimont : le sous-sol régional sous la loupe*, Fédération spéléologique francophone de Belgique, 55 p.
- BRUTHANS J., FILIPPI M., SMID J. & PALATINUS L., 2002. « Tri Nahacu and Ghar el Daneshyu (Iran) », *International Caver*, 2002 : 27–36.
- CABROL P. & MANGIN H., 2000. *Fleurs de pierre*, Lausanne, Delachaux & Niestlé, 191 p.
- CAMUS J. & LAMOUREUX C., 1981. *Inventaire spéléologique du Maroc*, Ministère de l'Équipement, Rabat, Maroc, 180 p.
- CARDONA F. & VIVER J., 2002. *Sota la sal de Cardona*, Espeleo Club de Gràcia, 128 p.
- CHABERT Cl. & COURBON P., 1997. *Atlas mondial des grottes en roche non calcaire*, Union internationale de Spéléologie, 109 p.
- DELAMARE C. & BOTOSANEANU L., 1970. *Formes primitives vivantes*, Hermann, 286 p.
- DELMER A., 1977. « Le Bassin du Hainaut et le sondage de St-Ghislain », *Service géologique de Belgique, Professional Paper*, 143 : 12 p. + figs.
- DELMER A., 1979. « Hydrodynamique de la nappe aquifère du calcaire carbonifère en Hainaut », *Annales de la société géologique de Belgique*, 102 : 259–254.
- DELMER A., 2004. « Tectonique du front varisque en Hainaut et dans le Namurois », *Mémoires et Annales de la Société géologique de Belgique*, 50 : 62 p. + figs.
- DELMER A. & VAN WICHELEN P., 1980. « Répertoire des puits naturels connus en terrain houiller du Hainaut », *Geological Survey of Belgium, Professional Paper*, 172 : 79 p.
- DETAILLE E., 1939. « L'extraction du minerai de fer à Géromont (Comblain-au-Pont), une industrie disparue », *Bulletin de la Société royale belge d'études géologiques et archéologiques « Les Chercheurs de la Wallonie »*, 13 : 69–79.
- DUBOIS A., 2004a. « Compte-rendu d'activité », *Spéleo Club les Calcaires*, non publié.
- DUBOIS A., 2004b. « Ghar el Melh, Prérif, record d'Afrique ? », *Regards*, 55 : 30–31.

- DUBOIS A., 2006. « Ghar el Melh – Karst du sel (Pré-riif – Maroc) », *Regards*, 63 : 17–26.
- DUSAR M., LAGROU D., WILLEMS L., FELDER P.J. & MATTHIJS J., 2005. *De mergelgrotten van Hinnisdael te Vechmaal (gemeente Heers, Limburgse Haspengouw): een geologische bijdrage tot de studie van het krijt*, Geological Survey of Belgium, Professional Paper, 301 : 89 p.
- EK C., 1963. « Mécanisme de la sédimentation de l'assise de Montfort entre Esneux et Tavier », *Annales de la Société géologique de Belgique*, 86 (5) : 273–284.
- EK C., 1998. *Les phénomènes karstiques*, Notes de cours, Université de Liège, cinquième édition, 47 p.
- FEDAN B., 1987. *Géologie des chaînes atlantiques marocaines*, in *Grande Encyclopédie du Maroc, Géographie physique et Géologie*, p. 172–189.
- FOUCAULT A. & RAOULT J.-F., 1995. *Dictionnaire de Géologie*, Paris, Masson, 930 p.
- GIURGIU I., 1985a. « Grottes de sel de Roumanie », *Spelunca*, 20 : 34–39.
- GIURGIU I., 1985b. « Pesteri in Sare din Subcarpații Vrancei, Institutul de Speleologie », *Buletinul clubului de Speleologie "Emil Racovitá"*, 9 : 1–37.
- GULINCK M., 1969. « Observations sur la salinité des eaux artésiennes de la Belgique », *Bulletin de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie*, 78 : 155–158.
- HALLOT E., 1999a. *Karst dans les évaporites : l'exemple du Mont Sedom (Israël)*, Mémoire de licence en Géographie, Université de Liège, 189 p.
- HALLOT E., 1999b. « Karst dans les évaporites : marqueur et cace des événements récents. L'exemple du Mont Sedom (Israël) », *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 37 (2) : 19–31.
- HILL C. & FORTI P., 1997. *Cave Minerals of the World*, National Speleological Society, Huntsville (USA), 463 p.
- HOWARTH F.G., 1987. « The evolution of non-relictual tropical troglobites », *International Journal of Speleology*, 16 : 1–16.
- KLIEBHAN B., 2003. « Einschrift von Edouard Alfred Martel aus dem Jahre 1912 in der Mammoth Cave (Kentucky) Entdeck », *Die Höhle*, 54 (4) : 98–104.
- JAILLARD L., 1984. *La Montagne de sel de Tissa : estimation à vue des réserves*, Rapport dactylographié, 7 p.
- LACOSTE J., 1934. *Études géologiques dans le Rif méridional. Tome 1*, Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc, 31 et 31bis (1-2), 575 p.
- LAGROU D. & DUSAR M., 2003. « Le calcaire dinantien en Campine (Nord de la Belgique) : un réservoir paléokarstique pour le stockage du gaz naturel », *Programme des Journées de Spéléologie scientifique 2003*, 2 p.
- MARTEAUD A., 1997. « Les concrétions des grottes », *Le Règne minéral*, 16 : 4–49.
- MELON J., BOURGUIGNON P. & FRANSOLET A.M., 1976. *Les minéraux de Belgique*, Dison, Lelotte, 280 p.
- MICHARD A., 1976. *Éléments de géologie marocaine*, Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc, n° 252, 408 p.
- NICOD J., 1962. « Recherches nouvelles sur les karsts des gypses et des évaporites associées. Première partie : processus et cavernement », *Karstologia*, 20 : 1–10.
- PERTHUISOT V., 1991. « Diapirs et halocinèse : comment les évaporites refont surface », *Géochronique*, 40 : 13–16.
- POTY E., 1982. « Paléokarsts et brèches d'ondrements dans le Frasnien moyen des environs de Visé. Leur influence dans la paléogéographie dinantienne », *Annales de la Société géologique de Belgique*, 105 : 315–337.
- POTY E. & CHEVALIER E., 2004. « L'activité extractive en Wallonie », *Région wallonne : Aménagement-Environnement* : 55.
- PRINZ W., 1908. *Les cristallisations des grottes de Belgique*, Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie, 90 p.
- QUINIF Y., 2005. *Les ondremments karstiques hennuyers : causes et résultats*, in *Actes du Colloque « Karst et aménagement du territoire »*, Ministère de la Région wallonne, p. 17–34.
- RÉSERVE NATURELLE DE SAEFTINGHE : <http://www.hetzeeuwselandschap.nl/saeftinghe/index.php>

- ROBASZYNSKI F. & DUPUIS C., 1983. *Belgique. Guides géologiques régionaux*, Paris, Masson, 204 p.
- TERCAFS R., 1998. « Introduction à la biospéologie. Les milieux souterrains et la biologie des espèces cavernicoles (2^e partie) », *Regards*, 34 : 18–23.
- THOEN H., 1999. « Recherches récentes dans le Nord de la France, en Belgique et aux Pays-Bas et, plus particulièrement, sur le Red Hill de Leinghe près d'Ostende », *Les Cahiers du Sel*, 12, n^o spécial « Table ronde du Comité des Salines de France ».
- THOREZ J., 2005. « Préhistoire de la Gombe. De – 370 millions d'années à nos jours », <http://users.skynet.be/clas/site/centre/prehistoire/prehistoire/html>
- TRUC G., 1988. *Formations et milieux évaporitiques anciens et actuels*, Séminaire donné à l'Université de Kenitra (Maroc) (Environnement et substances utiles). Université Claude Bernard, Lyon 1, 90 p.
- WAGNER H.P., 1994. « A monographic review of the Thermosbaenacea (Crustacea Peracarida). A study of their morphology, taxonomy, phylogeny and biogeography », *Zool. Verh. Nat. Natuur. Mus. Leiden*, 291 : 1–238.
- WILLEMS L., POUCKET A. & VICAT J.-P., 2001. « Problématique des karsts en roches silicatées non carbonatées. La grotte de Mfoula, un cas dans les gneiss du Sud Cameroun », *Geological Survey of Belgium, Professional Paper*, 295 : 133–134.
- WILLEMS L., RODET J., FOURNIER M., LAIGNEL B., DUSAR M., LAGROU D., POUCKET A., MASSEI N., DUSSART-BAPTISTA L., COMPÈRE Ph. & EK C. (2007). « Polyphase karst system in Cretaceous chalk and calcarenite of the Belgian-Dutch border », *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51 (3) : 361–376.
- YAGER J., 1994. *Remipedia*, in C. Juberthie & V. Decu (éd.), *Encyclopaedia Biospeologica*, 1, p. 87–90.

Adresse de l'auteur :

Albert DUBOIS
Rue de Xhygnez, 36
4140 Sprimont
BELGIQUE
duboisalbert@Gmail.com