

SPÉLÉOGENÈSE HYDROTHERMALE DANS LES BIBANS (Atlas Tellien - Nord de l'Algérie)

Bernard COLLIGNON
Laboratoire d'hydrogéologie, U.S.T.L.
Place Bataillon
34 000 MONTPELLIER

RÉSUMÉ : les Azérous constituent deux petits pointements calcaires dominant les vastes étendues marneuses des nappes telliennes dans la région des Bibans. Bien que peu karstifiés en surface, ils recèlent d'innombrables cavités d'origine hydrothermale. La faiblesse des infiltrations a permis une véritable fossilisation de ces réseaux et l'on peut donc observer, in situ, d'anciens réservoirs géothermiques carbonatés. Leur étude met en évidence les caractéristiques morphologiques, structurales, sédimentologiques et minéralogiques essentielles de ce type de réseau. Elle permet d'esquisser un modèle d'évolution.

Mots-clés : Spéléogénèse - Thermalisme - Algérie - Coupes - Gypse.

ABSTRACT : HYDROTHERMAL SPELEOGENESIS IN THE BIBANS (ATLAS TELLIEU, NORTH ALGERIA).

The «Azérous» are two small limestone mountains jutting out from wide marl spaces (the «Tellien sheets») in the region of the Bibans. Their surface is not really a karst but they contain many caves which have been hollowed by thermal waters. The percolations are so weak that these caves have been very well preserved and so we can study old geothermal carbonate tanks. This study shows the main morphological, structural, sedimentological and mineralogical features of such caves.

Key-words : Speleogenesis - Thermal waters - Algeria - Cupolas - Gypsum.

I - CADRE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE

1. Localisation des cavités, climat et végétation (fig. 1).

Toutes les cavités étudiées se trouvent dans le massif des Azérous, au sud des Portes de Fer («El Biban»). Un inventaire des principales cavités est donné en annexe (tableau 3) et leurs entrées sont localisées sur la figure 1.

Par la suite, nous indiquerons chaque grotte simplement par son nom local, arabe (Rhar Es Skhoun) ou berbère (Rhar Zénédia).

D'altitude modérée (500 à 850m), le massif reçoit environ 600mm d'eau par an, mais l'irrégularité des précipitations (moins de 70 jours de pluie par an) accentue l'aridité du climat. Le couvert végétal est très réduit (pins d'Alep, genévriers, armoise, romarin, cystes) et le sol est très mince, quand il y en a.

2. Géologie du massif.

Les Azérous sont constituées par deux petites écaillés de Cénomani (subautochtone selon Caire, 1957) qui percent, en demi-horst, l'ensemble marno-calcaire des nappes telliennes (fig. 2, 3 et 4).

Au N et à l'W, ces écaillés sont partiellement enfouies sous les nappes de charriage telliennes. Le contact basal de ces nappes, de faible pendage, est jalonné de lentilles de Trias gypso-salin. Au S et à l'E, par contre, les Azérous sont délimités par une faille subverticale postérieure au charriage (Miocène inférieur). Cette faille détermine la grande paroi rocheuse où s'ouvrent la plupart des entrées de grotte. Cet accident constitue un drain majeur pour les eaux thermales (photo 1).

Les roches carbonatées qui forment les Azérous sont très massives. La tectonique, cassante, les a découpés en blocs diversement inclinés (fig. 2 et 3). La stratification est peu apparente, sauf dans les horizons supérieurs de l'Azérou Es Sghir.

Le massif carbonaté est localement dolomitisé, sans que cela soit déterminant pour la spéléogénèse (Rhar Es Skhoun se développe intégralement dans les calcaires et Rhar Medjraba dans les dolomies, mais ces deux cavités possèdent les mêmes caractéristiques.)

Il est difficile d'estimer l'extension latérale des écaillés sous les nappes. Il pourrait y exister d'importants réseaux noyés dont les cavités étudiées ne forment que la partie supérieure. Ces prolongements pourraient constituer un important réservoir géothermique.

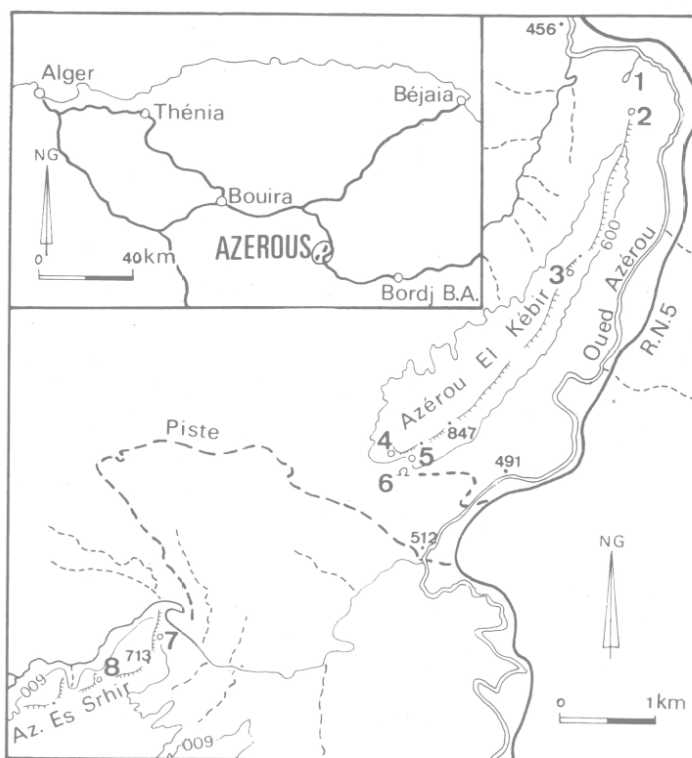


Fig. 1 - Localisation du massif étudié et des principales cavités : 1. sources de Hammam El Biban, 2. mines de Hammam El Biban, 3. Rhar Medjraba, 4. Rhar Sidi Bakou, 5. Rhar Es Skhoun, 6. carrière, 7. Rhar Amalou et Rhar Kab Sghir, 8. Rhar Zénédia.
Location of the concerned mountain and main cavities : 1. Hammam El Biban springs, 2. Hammam El Biban mines, ...6. quarry, ...



Photo 1 - Escarpement SE de l'Azérou El Kébir, taraudé de nombreux porches. Many caves hollowed the SE abruptness of the Azérou El Kébir.

3. Hydrogéologie.

A. CIRCULATIONS «FROIDES» :

Le versant NW du massif est une grande dalle inclinée de 20 à 50°. Elle est très peu karstifiée (aucune doline notamment). Les rares fissures sont colmatées par la calcite et les infiltrations sont si faibles qu'il n'y a aucun écoulement souterrain dans les grottes visitées. Les salles proches de la surface sont d'ailleurs souvent peu concrétionnées (Rhar Amœalou, Rhar Zénédia).

B. CIRCULATIONS HYDROTHERMALES :

A la pointe N de l'Azérou El Kébir (fig. 1), une source très chaude jaillit dans l'alignement de la grande faille bordière (Hammam El Biban). S. Guigue en a fait l'étude chimique (1940-1947). c'est une eau fortement minéralisée (16 g/l), hyperthermale (80° C), chlorurée sodique et sulfatée calcique. On note, en outre, un fort dégagement de CO₂ et H₂S. Cette minéralisation indique, sans équivoque, la traversée de couches gypso-salines (Trias).

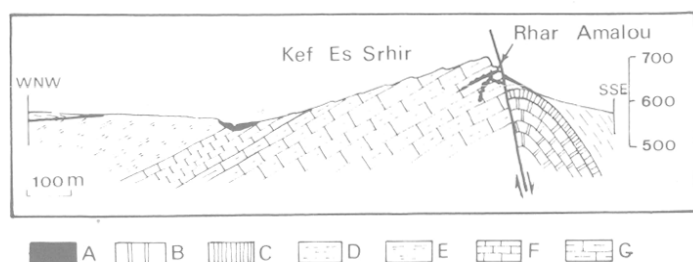
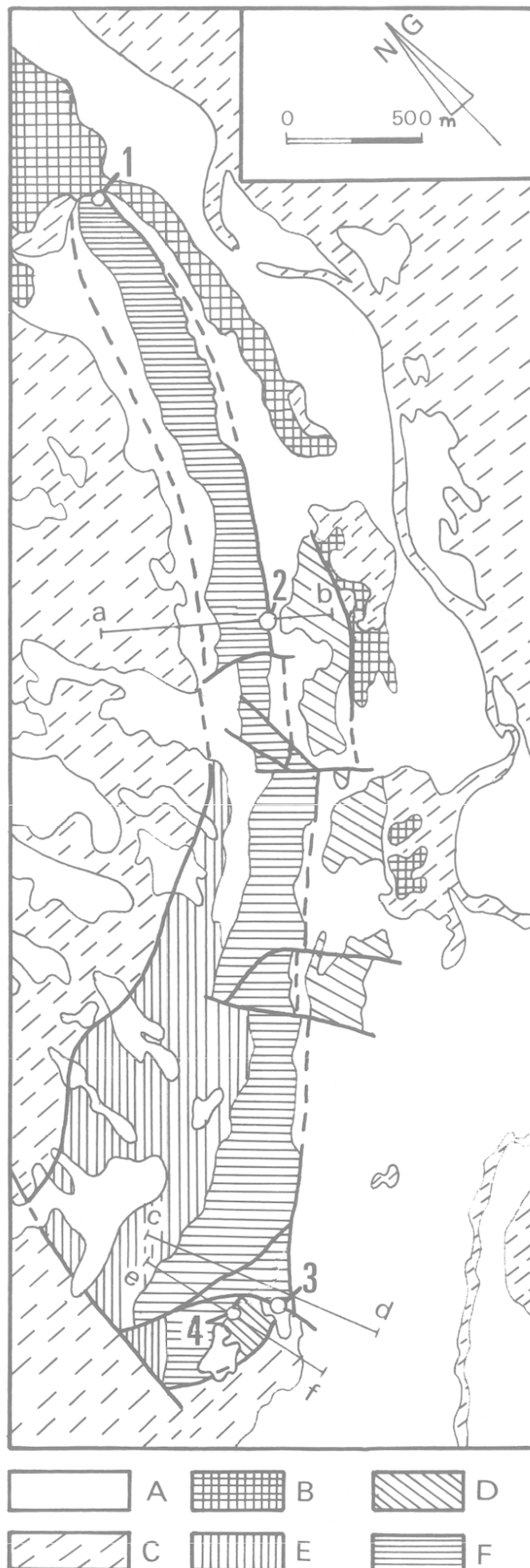


Fig. 4 - Coupe géologique à travers l'Azérou El Kébir : A. Quaternaire, B. Éocène : calcaires, C. Éocène inférieur, barre calcaire à silex, D. Sénonien supérieur et Dano-Montien : marnes grises et noires, F., F., G. Albien supérieur, Vraconien : E. marnes et calcaires, F. calcaires en plaquettes, G. calcaires lités.

Geologic section through the Azerou El Kébir : A. Quaternary, B. Eocene : limestone, C. Older Eocene : silex limestone bed, D. newer Senonian and Dano-Montian : grey and black marl, E., F., G. newer Albien, Vraconian : E., marl and limestone, F. limestone, G. bedded limestone.

Fig. 2 - Carte géologique de l'Azérou El Kébir (d'après Caire, 1957 et Coiffait et Vila, 1976). A. quaternaire indifférencié, B. travertins, C. Sénonien vaseux : marnes grises, D. Paléocène, Yprésien, Lutétien : marnes et calcaires lités, E. Albien, Vraconien : marnes et marno-calcaires, F. Cénomaniens : calcaire et dolomie massifs, 1. mines de Hammam El Biban, 2. Rhar Medjraba, 3. Rhar Es Skhoun, 4. Rhar Sidi Bakou.

Geologic map of the Azerou El Kébir (after Caire, 1957 and Coiffait et Vila, 1976) : A. undifferentiated Quaternary, B. Travertine, C. muddy Senonian : grey marl, D. Paleocene, Ypresian, Lutetian : bedded marl and limestone, E. Albien, Vraconian : marl and limestone, F. Cenomanian : limestone and dolomite, 1. Hammam El Biban mines,...



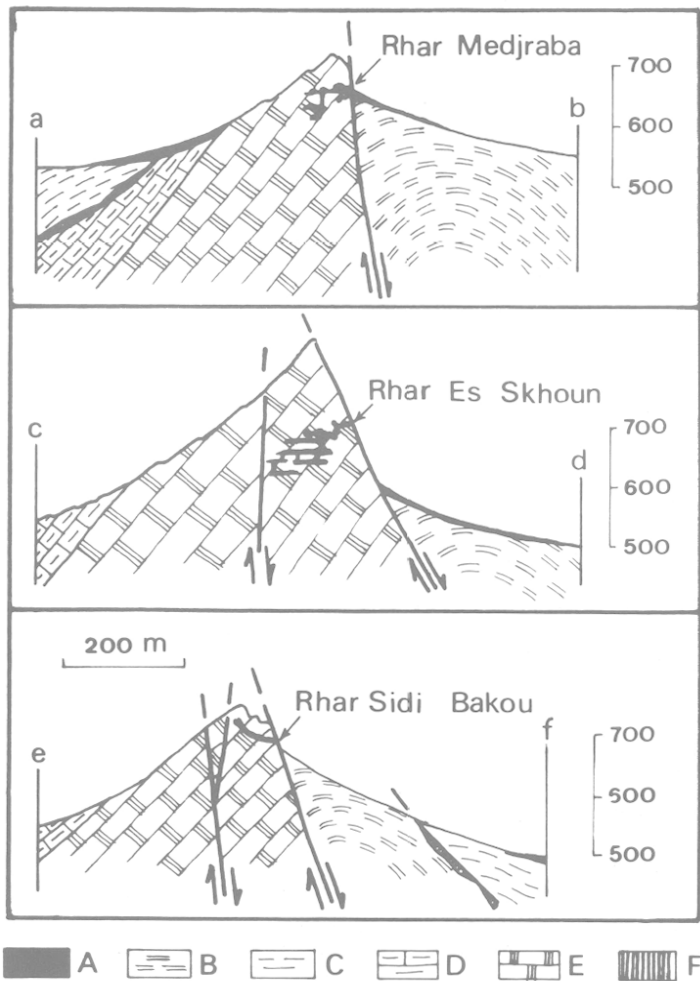


Fig. 3 - Coupes géologiques à travers l'Azérou El Kébir (les plans des coupes sont repérés sur la fig. 2) : A. Quaternaire indifférencié, B. Paléocène, Yprésien, Lutétien, C. Sénonien vaseux, D. Albien, Vraconien, E. Cénomanién, F. Trias gypso-salin.

Geologic sections through the Azérou El Kébir (as shown fig. 2) : A. undifferentiated Quaternary, B. Palaeocen, Ypresian, Lutetian, C. Muddy Senonian, D. Albien, Vraconian, E. Cenomanian, F. Triassic gypsum.

II - LE CREUSEMENT

1. Coupoles.

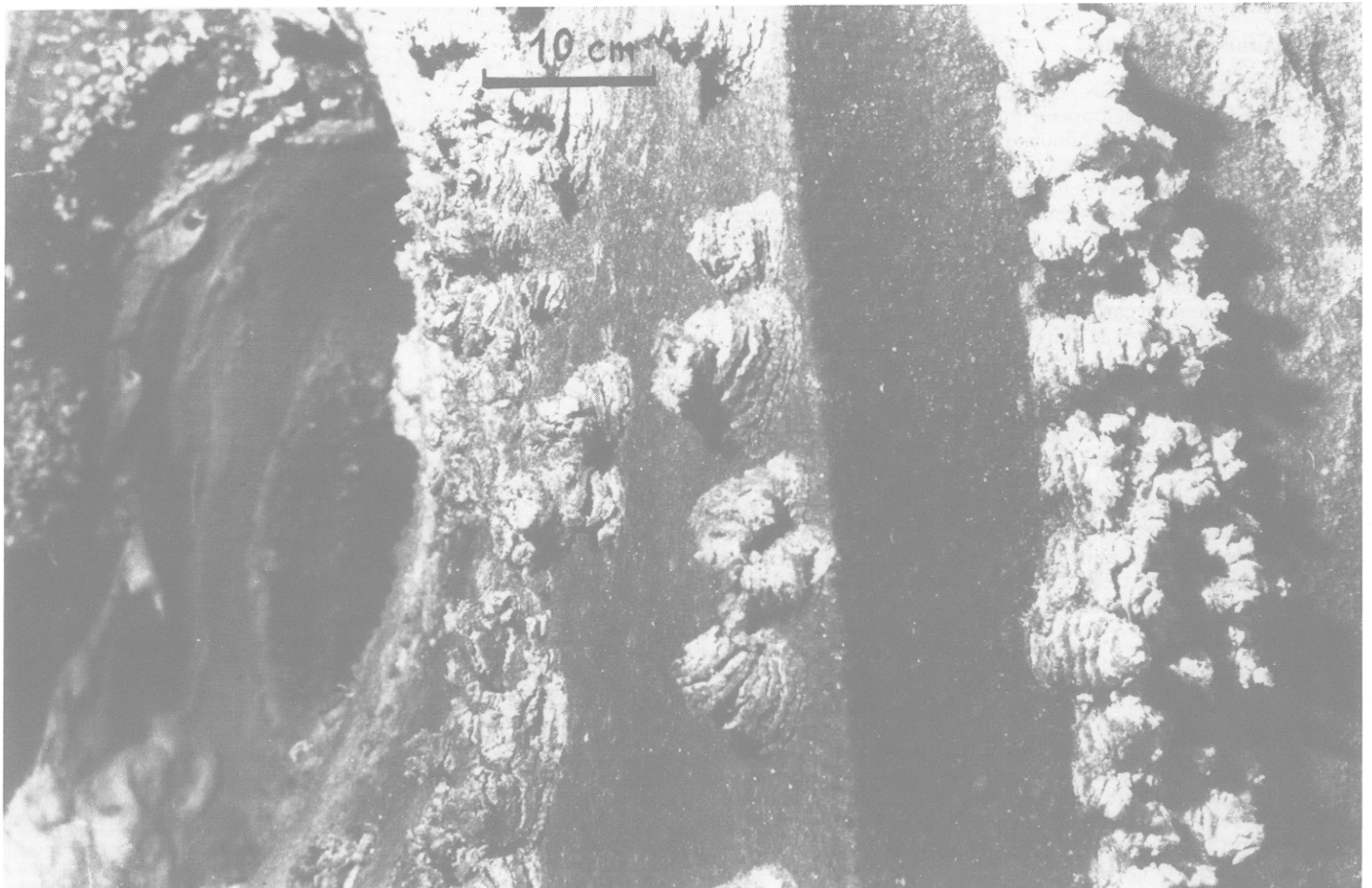
Les réseaux explorés dans les Azérous présentent une multitude de coupoles, subsphériques, de taille assez régulièrement métrique, creusées dans la roche massive, indépendamment de toute fissure (coupoles de type a dans l'étude de Y. Quinif, 1973).

Certaines zones (réseau supérieur de Rhar Es Skhoun, «Gruyère» de Rhar Amalou) ne sont formées que d'une suite de coupoles s'emboîtant les unes dans les autres de manière apparemment désordonnée. Elles se raccordent alors selon des arêtes souvent fort vives (photo 2). Ailleurs, par contre, les coupoles défoncent simplement les parois de conduits ou de salles alignés sur des joints (plafonds du réseau supérieur de Rhar Amalou, points 1 et 3) ou le long de failles (parois latérales et même sol des galeries principales de Rhar Es Skhoun et Rhar Medjraba, points 3 ou).

2. Développement tridimensionnel et influence de la fracturation.

Les conduits se développent dans toutes les directions de l'espace, taraudant la masse calcaire dans son ensemble, parfois sur une grande hauteur. A Rhar Es Skhoun, la partie principale du réseau est constituée par quatre larges galeries qui s'étagent sur 100m de dénivellation dans une grande faille et sur lesquelles viennent se brancher des conduits latéraux de section plus petite, formés de coupoles coalescentes.

Photo 2 - Deux coupoles se recoupent en formant un dièdre presque parfait. Leur surface est recouverte par une fine couche de gypse boursoufflée par des concrétions formées d'un empilement de disques de gypse. The intersection of two cupolas is a perfect dihedral. A thin gypsum crust covered their surface and is puffed up by gypsum concretions (Rhar Es Skhoun).



A Rhar Medjraba, le réseau principal est du type «network», dans un plan faiblement incliné (Coiffait et Quinif, 1976), mais il recoupe une faille exploitée par divers conduits à coupoles sur 60m de haut. Enfin, à Rhar Amalou, les salles surbaissées (qui suivent un joint de strates de pendage 22°) sont recoupées à l'emporte-pièce par le «Gruyère» dont le développement spatial semble échapper à toute règle (B. Collignon, 1982).

Face à cette non-linéarité des réseaux, il est intéressant de réaliser une étude statistique des directions des galeries (fig. 5). Les rosaces obtenues sont totalement différentes pour les trois grandes cavités des Azérous et même pour les deux réseaux de Rhar Es Skhoun.

Les galeries dont la section est subcirculaire (fig. 6) se développent souvent selon des directions parallèles à celle de la faille bordière (N50 à Rhar Medjraba, N55 à Rhar Es Skhoun, N70 à Rhar Amalou) tandis que les grandes galeries étagées sur des failles suivent plutôt des directions correspondant aux grands accidents transversaux qui ont découpé les Azérous (N132 à Rhar Medjraba, N170 à Rhar Es Skhoun, N5 à Rhar Amalou). Dans ce dernier cas, la fracture de direction N5 décale clairement une vaste galerie parallèle à la faille bordière (N70).

3. Communications avec l'extérieur.

Nous avons souligné l'absence de connection entre le karst de surface et les réseaux souterrains. Ceux-ci ne communiquent donc avec l'extérieur que par les entrées actuelles ouvertes le long de la grande faille par la surrection des Azérous (fig. 3 et 4). La seule exsurgence thermique actuelle se fait par une multitude de petits griffons à travers d'abondantes masses de travertins.

4. Morphologie liée au courant.

L'absence de tout signe de courant est frappante. il n'y a ni coups de gouge, ni marmites, ni rainures, ni surcreusements. Les puits n'ont pas la forme classique d'une bouteille. Ce sont simplement des diaclases ou des failles élargies et aux parois couvertes de coupoles. Les galeries ne prennent jamais la forme de tubes de section régulière ou de méandres de grande hauteur. Ce sont plutôt des juxtapositions de coupoles et la vivacité des arêtes avec lesquelles elles se raccordent souligne encore la lenteur des circulations passées.

5. Hypothèses génétiques.

A. CREUSEMENT EN ZONE NOYÉE PAR DES EAUX THERMALES. Le développement de réseaux labyrinthiques sur une telle dénivellation implique un creusement en zone noyée profonde. Le thermalisme est alors la simple conséquence du gradient géothermique normal. Les coupoles sont aussi des indices de thermalisme, ainsi que cela a été remarqué dans les karsts hongrois (L. Jakucs, 1977). Elles correspondent vraisemblablement à des cellules de convection dans des zones de fort gradient thermique (Muller et al., 1977). ce gradient n'a d'ailleurs pas nécessairement un caractère régional : le simple transit vertical de l'eau chaude suffit à le faire apparaître. Ces mouvements de convections expliquent le développement des coupoles vers le haut, jusqu'au sommet de certains conduits verticaux (Rhar Sidi Bakou), indépendamment de toute diaclase visible.

Malgré la haute température, l'eau est vraisemblablement chargée en CO₂ (comme à Hammam El Biban), peut-être d'origine profonde. Son agressivité est encore renforcée par sa forte charge en NaCl (H. Roques, 1964). La température élevée améliore la cinétique des réactions. Le long trajet effectué par l'eau entre les zones d'alimentation éloignées et les émergences thermales provoque de très fortes pertes de charge. Les débits sont donc réduits et le courant si faible qu'il n'influence pas la morphologie des parois.

B. LES MULTIPLES PHASES DE CREUSEMENT. L'organisation des réseaux s'intègre bien dans un modèle simple d'évolution tectonique (fig. 7) :

— **1ère phase** : alors que l'écaïlle calcaire est encore profondément enfouie sous les nappes marneuses, il se forme un grand accident à forte composante en décrochement. Les contraintes sont élevées et les conduits vont se développer dans une multitude de fissures de la zone broyée.

— **2ème phase** : la barre calcaire, délimitée au S et à l'E par ce grand décrochement, exécute un mouvement d'ascension diffé-

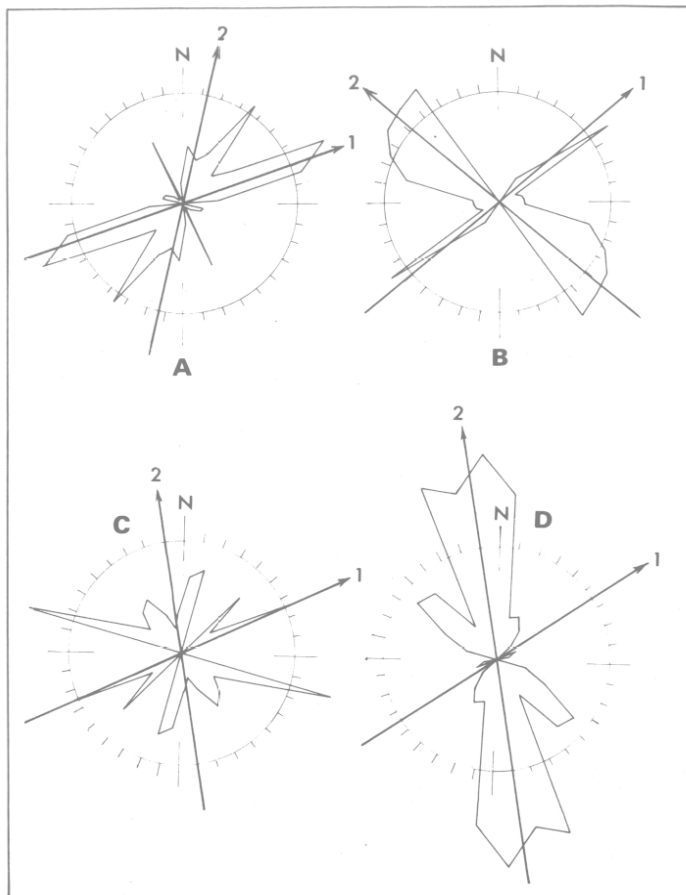


Fig. 5 Rosace des longueurs cumulées de galeries : A. Rhar Amalou, B. Rhar Medjraba, C. Rhar Es Skhoun, réseau supérieur, D. Rhar Es Skhoun, réseau inférieur, 1. faille bordière, 2. failles transversales. Rose of added passage lengths. C. Rhar Es Skhoun, upper series, D. Rhar Es Skhoun, lower series..., 1. side fault, 2. transverse faults.

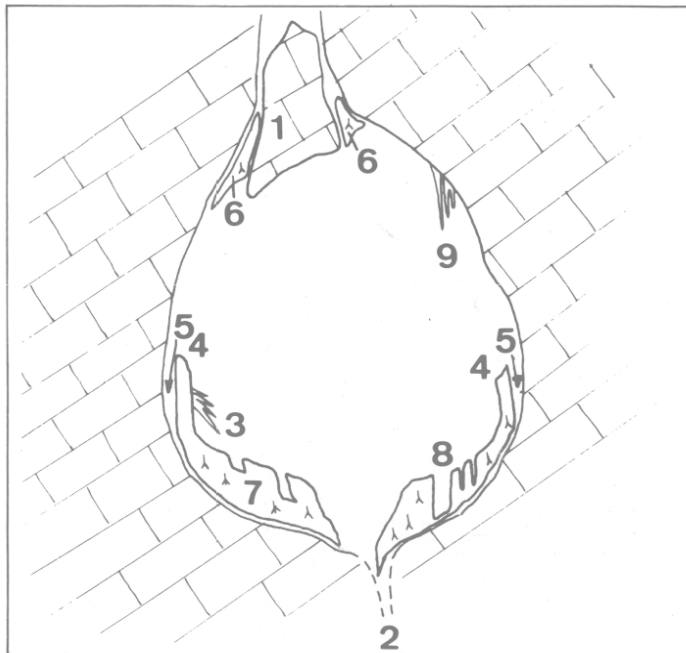


Fig. 6 - Coupe de la galerie du Gypse (Rhar Es Skhoun), regard tourné vers le nord : 1. clef de voûte descendue après le creusement de la galerie, 2. passage vers le niveau inférieur soutirant les éléments détritiques, 3. buissons de monocristaux de gypse, 4. croûte de gypse saccharoïde en place, 5. espace entre le gypse et la roche dégagée par la dissolution en phase vadose, 6. lambeaux de gypse restés accrochés dans les fissures du plafond, 7. accumulation secondaire de gypse éboulé, 8. marmites et cannelures formées par la chute de gouttes d'eau, 9. stalactites de calcite. Section across Gypsum passage (Rhar Es Skhoun), looking north. 1. keystone after passage formation, 2. passage to the lower levels drawing off the detritic elements, 3. «bushes» of gypsum monocrystals, 4. «crust» of saccharoid gypsum, 5. space between gypsum and rock originating in dissolving during the vadose phase, 6. gypsum remains in ceiling fissures, 7. Secondary accumulation of fallen gypsum, 8. Grooves and forms due to water drops, 9. calcite stalactite.

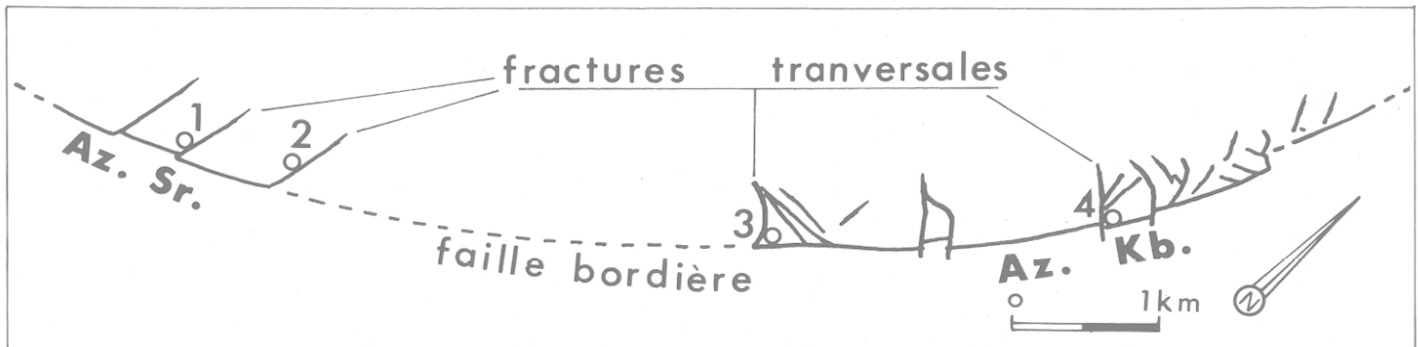


Fig. 7 - Interprétation de la fracturation.

Interpretation of fractures.

1. Rhar Zénédia, 2. Rhar Amalou, 3. Rhar Es Skhoun, 4. Rhar Medjaba.

rentielle (peut-être facilité par la poussée des masses gypso-salines peu denses du Trias sous-jacent). Une série de failles transversales la découpent en blocs plus ou moins indépendants et de nouveaux conduits s'y développent, recoupant parfois les anciens. La moindre profondeur facilite l'écartement des lèvres des failles et le creusement sur une assez grande hauteur.

— **3ème phase** : les Azérous affleurent et la détente résultante (notamment sur les joints de strates subhorizontaux) facilite la formation de salles surbaissées comme à Rhar Amalou (B. Collignon, 1982).

— **4ème phase** : petit à petit, les réseaux se vidangent et bientôt certains conduits apparaissent au jour, perchés dans les grands escarpements au SE du massif. Les diaclases parallèles à la faille bordière, soumises à une forte détente par appel au vide, s'ouvrent en créant quelques réseaux à la formation desquels l'eau n'a joué aucun rôle (Azérou Es Shrir, au N de Rhar Amalou).

C. ABSENCE DE CIRCULATIONS A SURFACE LIBRE. Comme les réseaux sont surmontés d'une dalle non karstifiée, quasiment étanche, ils n'ont jamais été réutilisés par des écoulements non-thermaux, et ils ont gardé un aspect remarquablement «frais» qui facilite les observations.

D. ALTÉRATION EN RÉGIME DÉNOYÉ. La roche de nombreuses parois est profondément altérée (sur 2 à 20cm de profondeur) et elle s'effrite sous les doigts. S. Egemeier (1981) a proposé un modèle de spéléogénèse qui expliquerait ce type d'altération.

Les sources thermales dégagent du H_2S qui s'oxyde au contact de l'air venu de l'extérieur (éventuellement dissous dans l'eau de condensation). Les solutions obtenues (sulfatées acides) ruissellent sur les parois et attaquent la roche carbonatée. Du gypse se substitue à la calcite et forme une croûte épaisse à travers laquelle l'altération peut se poursuivre (les eaux de condensation percolant à travers cette croûte poreuse). Ce modèle a permis d'expliquer la formation de résurgence horizontales observées dans le Wyoming (USA). Il ne rend cependant pas compte de la genèse de réseaux de grande dénivellation comme ceux des Azérous. Un mécanisme de ce type a simplement pu jouer un rôle tardif dans l'altération des parois et la formation de dépôts de gypse (cf. paragraphe ci-dessous).

III - LES MINÉRALISATIONS

Les grottes que nous avons étudiées contiennent des minéralisations peu courantes dans ce genre de milieu. Leur étude est loin d'être achevée, mais nous allons décrire brièvement celles qui sont directement liées au thermalisme.

1. Gypse.

A. GYPSE SACCHAROÏDE. Il forme une épaisse croûte blanche (de 10 à 30cm) qui tapisse intégralement certains conduits (Rhar Es Skhoun, points 3, 7, 8; Rhar Amalou, point 6). En de nombreux endroits, cette croûte friable s'est écroulée sous son

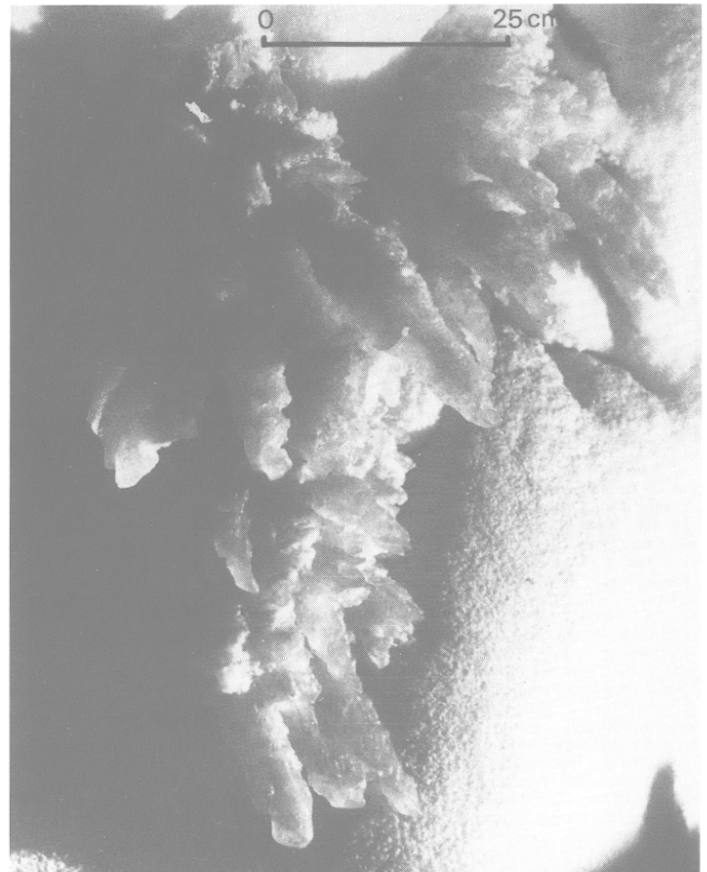


Photo 3 - Monocristaux de gypse sur une croûte de gypse saccharoïde (Rhar Es Skhoun). Big gypsum crystals on saccharoid gypsum crust.



Photo 4 - Cristaux de quartz bipyramidés au milieu de la calcite (Rhar Amalou). Quartz crystals among calcite crystals.

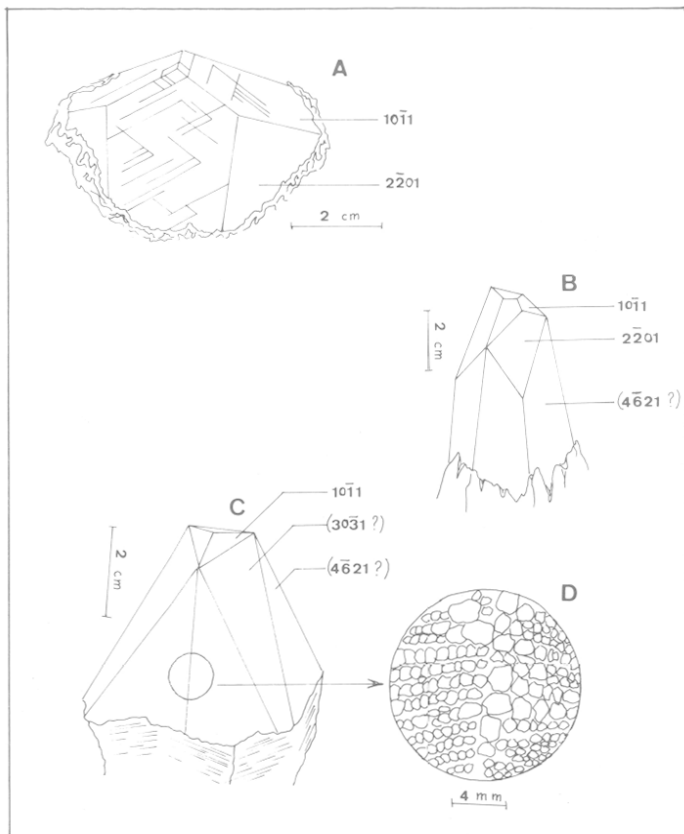


Fig. 9 - Cristaux de calcite de Rhar Sidi Bakou.

A. tête d'un gros cristal - teinte brune légère - arêtes vives dues à des clivages récents - c'est le type même de l'essentiel des cristaux de Rhar Sidi Bakou et de Rhar Kab Srrhir.

B. cristal isolé trouvé dans les éboulis en contrebas du porche - teinte vert pâle - légères traces de corrosion et d'usure mécanique - les plus grandes faces sont peu nettes.

C., D. même endroit que B - recrystallisation secondaire en petites sphérules millimétriques alignées grossièrement suivant le clivage 1011 et qui possèdent toutes exactement la même orientation que le cristal de base - cette recrystallisation masque les faces originelles qui ont été déterminées sans aucune précision.

Calcite crystals of Rhar Sidi Bakou :

A. top of a big crystal - light brown - typical of the crystals of Rhar Sidi Bakou and of Rhar Kab Srrhir.

B. isolated crystal found in boulder below the entrance - light green - small traces of corrosion and mechanical wear.

C., D. same place than B - secondary recrystallization in millimetric spherules roughly in line with cleavage 1011, with exactly the same orientation as the basic crystal - this recrystallization hides the initial faces which have been determined without accuracy.

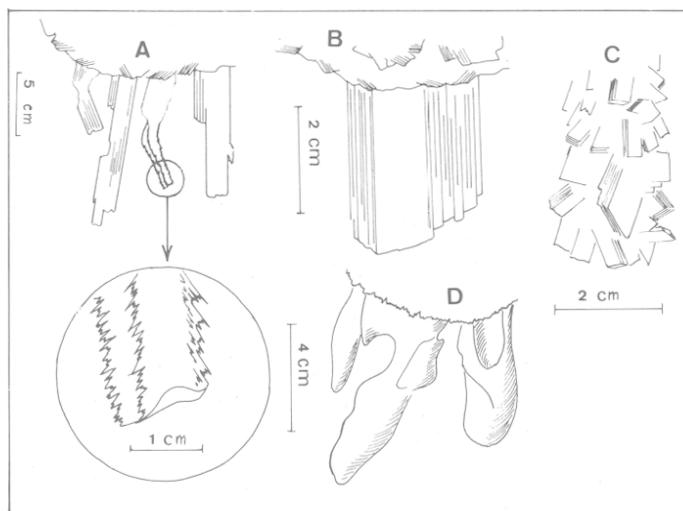


Fig. 8 - Cristaux de gypse du réseau inférieur de Rhar Es Skhoun :

A. stalactite de gypse polycristalline (monocristaux orientés vers le bas), B. monocrystal sur support gypseux. La surface plane correspond à une face 010, C. stalactite de calcite recouverte de cristaux de gypse, D. monocristaux montrant des traces de dissolution intense.

Gypsum crystals from the lower passages of Rhar Es Skhoun :

A. polycrystalline gypsum stalactite (monocrystals oriented downwards), B. monocrystal on gypsum support. The flat surface is a face 010, C. calcite stalactite with gypsum crystals, D. monocrystals showing evidences of severe dissolving action.

propre poids et ses débris se sont accumulés sur plusieurs mètres d'épaisseur (fig. 8).

Les rares suintements actuels dissolvent la croûte et y creusent de petits canaux tubulaires (1 cm de diamètre) ou de vastes entonnoirs (10 à 50 cm de diamètre).

B. MONOCRISTAUX. De gros monocristaux translucides, souvent de teinte brunâtre, s'enchâssent dans la croûte de gypse saccharoïde ou sont suspendus au bas de lames rocheuses ou de stalactites de calcite (fig. 8 et photo 3). Ils sont toujours orientés vers le bas (face 010 avec un pendage de 50° à 90°).

C. PILES DE DISQUES. Ces curieuses concrétions ne s'observent qu'en une seule station (Rhar Es Skhoun - entre les points 3 et 4), sur des parois de coupes recouvertes d'une fine couche de gypse brunâtre. Il s'agit d'un empilement conique où alternent des disques de gypse saccharoïde blanc (cristaux de 0,1 à 0,02 mm) et de gypse brunâtre cristallisé plus grossièrement (cristaux de 1 à 0,2 mm). A notre connaissance, de telles concrétions n'ont jamais été décrites ailleurs et leur genèse reste obscure.

On trouve encore beaucoup de gypse sous forme de fibres isolées assez longues (jusqu'à 20 cm) ou de fleurs très fines à croissance rapide (depuis l'abandon des mines). Ce sont des formes beaucoup plus classiques et qui ont été, à juste titre, souvent associées au thermalisme (G. Callandri, 1980).

2. Quartz.

C'est une minéralisation exceptionnelle en grotte. Il s'agit de cristaux bipyramidés, extrêmement purs (de quelques mm à 6 cm de long). On le trouve dans l'Azérou Es Srrhir (Rhar Amalou - points 2 et 7; et Rhar Zénédia). Ils sont dispersés dans des fissures remplies par ailleurs de calcite microcristalline ou dans de petites coupes du plafond, sortes de géodes où ils côtoient des monocristaux de calcite plus gros (photo 4).

3. Calcite et aragonite.

A. «DENTS DE COCHONS». D'énormes cristaux de calcite (jusqu'à 25 cm de longueur et une dizaine de kg) tapissent le plafond, le sol ou des niches dans la paroi (Rhar Sidi Bakou, Rhar Amalou - point 6). Les formes cristallines ne correspondent pas aux scalénoèdres plus classiques. Les pointes (dont la direction correspond à l'axe «c») sont toujours dirigées vers le centre des galeries (fig. 9).

A Rhar Amalou, la plupart de ces cristaux ont été fortement corrodés. Il est remarquable qu'alors, loin d'être laissés en relief par érosion différentielle, ils sont dissous comme la roche en place avec laquelle ils apparaissent en parfaite continuité. La calcite montre alors deux ou trois fins clivages, aspect plus traditionnel en lame mince (photo 5).

B. CRISTAUX ACIDULAIRES. Le plafond d'une salle très surbaissée de Rhar Amalou (points 5 et 4) est littéralement tapissé de buissons d'aiguilles (aragonite ?) Les concrétions, inactives, semblent avoir été épaissies secondairement (calcite ?) et se terminent parfois en petites massues.

C. AUTRES FORMES. La calcite forme encore bien des types de concrétions, dont certains sont très intéressants (touffes d'excentriques - photo 6; stalagmites épineuses - photo 7; disques; coulées concentriques à partir du sommet des coupes...) Elles feront l'objet de notes ultérieures.

4. Implications géologiques.

A. QUARTZ ET CALCITE EN GROS MONOCRISTAUX. Le quartz ne se forme habituellement qu'à température assez élevée et il est ici associé à de la calcite tapissant des galeries entières. Ces minéraux ont donc été déposés en phase noyée par des solutions hyperthermales. Le dépôt de la calcite peut s'expliquer par la détente des eaux ascendantes, détente qui provoque un dégagement de CO₂ et par conséquent une précipitation de carbonates. Lors de la formation de ces cristaux, les conduits se trouvaient donc à une profondeur limitée (phase 2 ou 3 du creusement). La taille et la pureté des cristaux soulignent la lenteur des circulations.

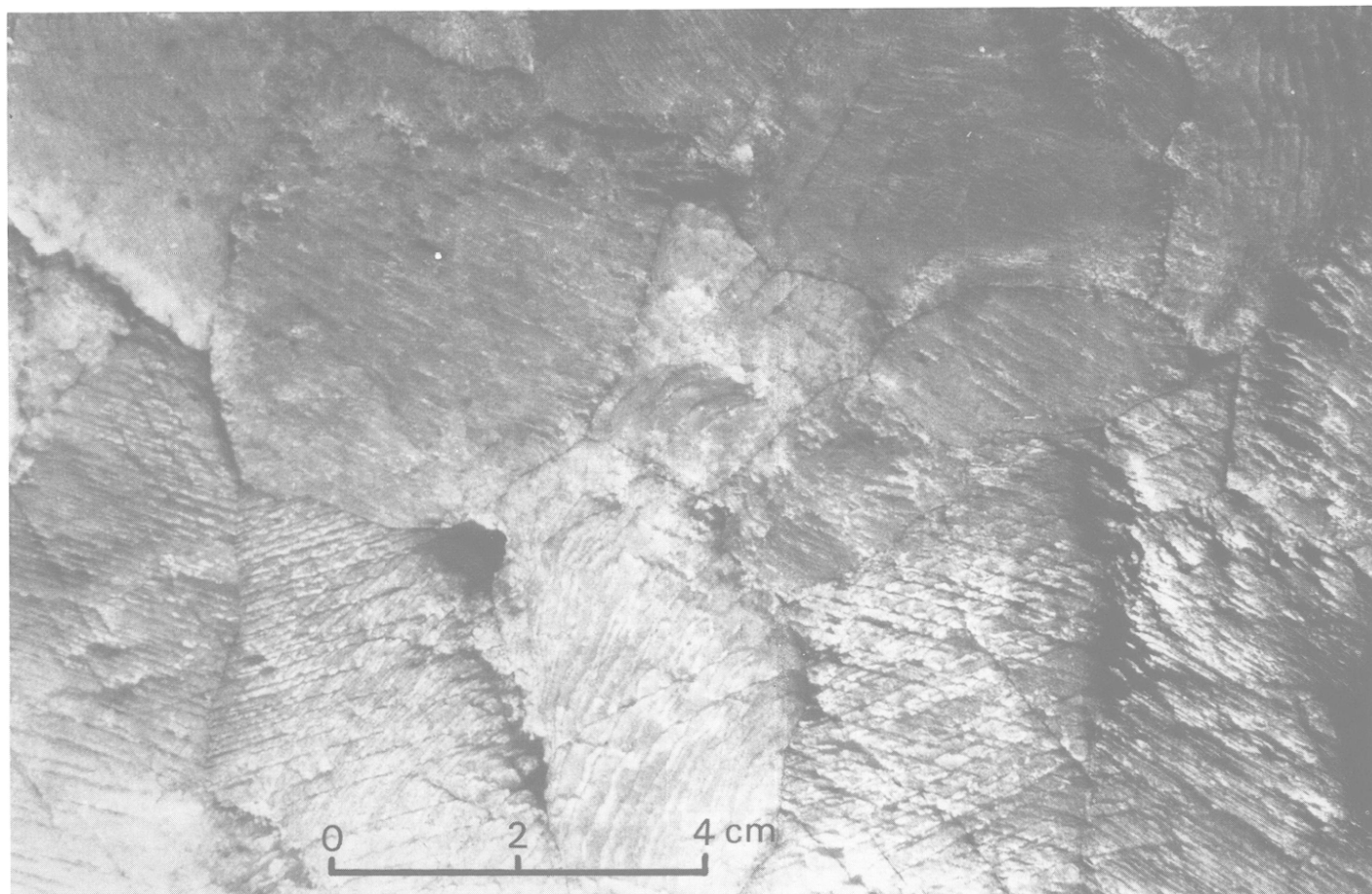


Photo 5 - L'érosion a mis en évidence les plans de clivage 1011 de ces cristaux de calcite (Rhar Kab Srhir). The erosion show the cleavage planes 1011 of calcite crystals.

On trouve des quartz bipyramidés dans d'autres formations de la région (marnes du Sénonien, gypse du Trias). Le mécanisme de leur formation est mal élucidé (A. Bonte - 1951; J. Becker et G. Dubois - 1953; A. Caire - 1957), mais leur habitus dans les Azérous rend probable une origine hydrothermale.

B. GYPSE. La formation du gypse implique un mécanisme plus complexe que celle de la calcite. En effet, au-delà de 40°C, la solubilité de $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_n$ décroît avec la température et on ne peut donc pas attribuer le dépôt à un simple refroidissement d'eaux saturées en profondeur au contact des dépôts gypso-salins du Trias (comme cela a été invoqué à Carlsbad cavern : J-M Good - 1957.)

C'est ici que le modèle d'Egmeier (1981) est le plus séduisant car il lie le dépôt à un dégagement de H_2S que nous constatons effectivement aux émergences actuelles. Ce dépôt serait donc postérieur à la vidange du réseau et à la formation de monocristaux de calcite. Effectivement, partout où ils sont en présence, le gypse recouvre la calcite corrodée.

Ce dépôt initial (gypse saccharoïde blanc), redissout par les eaux de condensation et de percolation, donnerait ensuite, par une suite de dissolution-recristallisations, toutes les autres formes minérales (monocristaux suspendus, piles de disques, fibres isolées, fleurs de gypse). Ces formes successives correspondent au refroidissement et à la dessiccation des cavités.

C. AUTRES MINÉRALISATIONS. Les autres formes minérales sont plus classiques et se sont formées plus récemment (leur croissance est parfois encore active). L'influence du thermalisme n'en est pas absente : aragonite (la cristallisation des carbonates sous forme d'aragonite plutôt que de calcite est favorisée par les hautes températures : H. Roques - 1964; P. Cabrol - 1978; B. Collignon - 1983b), coulées dans les coupoles (condensation de vapeurs très chargées de CO_2)...



Photo 6 - Buissons d'excentriques sur paroi rocheuse non concrétionnée (Rhar Kab Srhir). Bush of helictite on a rocky wall.

IV - REMPLISSAGES DÉTRITIQUES

Leur rareté est frappante. Les eaux thermales, après un long parcours souterrain et une ascension à faible vitesse dans de larges conduits, ne charrient plus ni argile, ni sable. Le remplissage des cavités est donc chimique ou correspond à la dégradation des parois en place (blocs éboulés ou arène dolomitique parfois abondante - Rhar Amalou). Les éléments détachés ne sont pas transportés.

V - CLIMATOLOGIE SOUTERRAINE

1. Température.

Elle est en général forte (23°C à 25°C à Rhar Medjraba, 30°C à 32°C à Rhar Es Skhoun), bien supérieure aux températures extérieures (16°C en moyenne annuelle). L'amplitude thermique est en général inférieure au degré. Le gradient thermique est surtout fort près des entrées (10°C à Rhar Es Skhoun).

CAVITÉ	VERTICALE	Δ Temp.	$\partial T / \partial x$ (°C/m)
Rhar Es Skhoun	P 19	1,1°C	0,04
Rhar Es Skhoun	P 47	0,5°C	0,01
Rhar Medjraba	P 55	4,5°C	0,08
Mine Hammam El Bib.	P 12	5,0°C	0,41

Tableau 1 - Mesure de gradient thermique.
Table 1 - Thermal gradient measurements.

Nous avons relevé (tableau 1) quelques valeurs du gradient vertical de température dans des puits dépourvus de courant d'air sensible. Les deux premières valeurs, très faibles, correspondent à une nette arrivée d'air chaud au niveau de ces stations qui uniformise les températures, soulignant le rôle de principal vecteur de chaleur que joue l'air, en l'absence d'écoulements notables. La troisième valeur du gradient, beaucoup plus forte, correspond à un puits dont le sommet n'est séparé de la surface que par quelques m de roche. Cette valeur du gradient est probablement significative à l'échelle du massif. La dernière valeur, extrêmement forte, s'explique par la proximité immédiate des circulations hydrothermales actuelles.

2. ventilation et hygrométrie.

Les cavités largement ouvertes sur l'extérieur (Rhar Medjraba, Rhar Amalou) ont une atmosphère très sèche (60% rH 90%). A Rhar Es Skhoun, par contre, l'air est presque saturé (98% à 100%) et l'étroit boyau d'entrée laisse échapper, tout au long de l'année, un fort courant d'air chaud et humide. Cette cavité fonctionne donc comme une chaudière réchauffant de l'air froid qui pénètre par des orifices inférieurs probablement masqués par les éboulis.

GAZ DOSÉ	SOLUTION FIXATRICE	POINT DE MESURE	CONCENTRATION
CO	KOH	Galerie du Gypse Salle de la Fournaise Sommet P19	<1% 0,6% 0,5%
SO	KMnO ₄ Solut. acide	Galerie du Gypse Bas P19	<0,1% <0,02%
H S	FeSO ₄ Na ₂ (Fe(CN) ₅ NO)	Bas P19 Bas P19	négatif (1) négatif (1)

(1) réaction purement qualitative

Tableau 2 - Dosage des composants de l'air de Rhar Es Skhoun.
Table 1 - Dosing air components at Rhar Es Skhoun.

3. Composition chimique de l'air.

Une légère odeur de H₂S est sensible aux sources de Hammam El Biban et dans les petites mines toutes proches. Il est probable que l'atmosphère des cavités est en partie composée d'exhalaisons thermales (ce qui expliquerait partiellement le caractère très pénible des explorations) mais les teneurs en gaz que nous avons mesurées sont faibles (tableau 2).

VI - DIAGNOSE DES RÉSEAUX HYDROTHERMAUX

Ph. Renault a déjà souligné le danger de toute généralisation à partir de l'étude d'un karst qui peut présenter des caractères très particuliers dus à la lithologie ou à l'histoire géologique récente de la région.

Nous allons cependant regrouper ici un ensemble d'observations qui nous semblent caractériser les réseaux d'origine hydrothermale.

Forme des conduits :

- omniprésence des coupoles;
- forte proportion de coupoles indépendantes de toute fissure;
- absence de signe de courant.

Structure du réseau :

- développement tri-dimensionnel;
- peu de structures dentritiques.

Minéralisation :

- minéraux exceptionnels en grotte, dont des indicateurs de haute température (quartz);

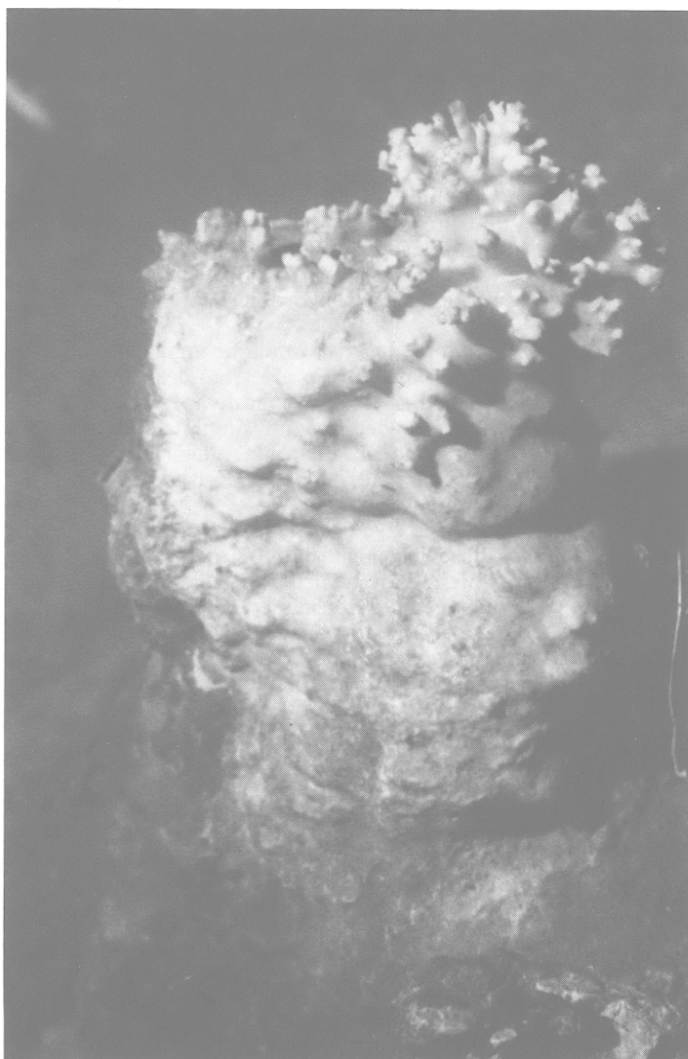
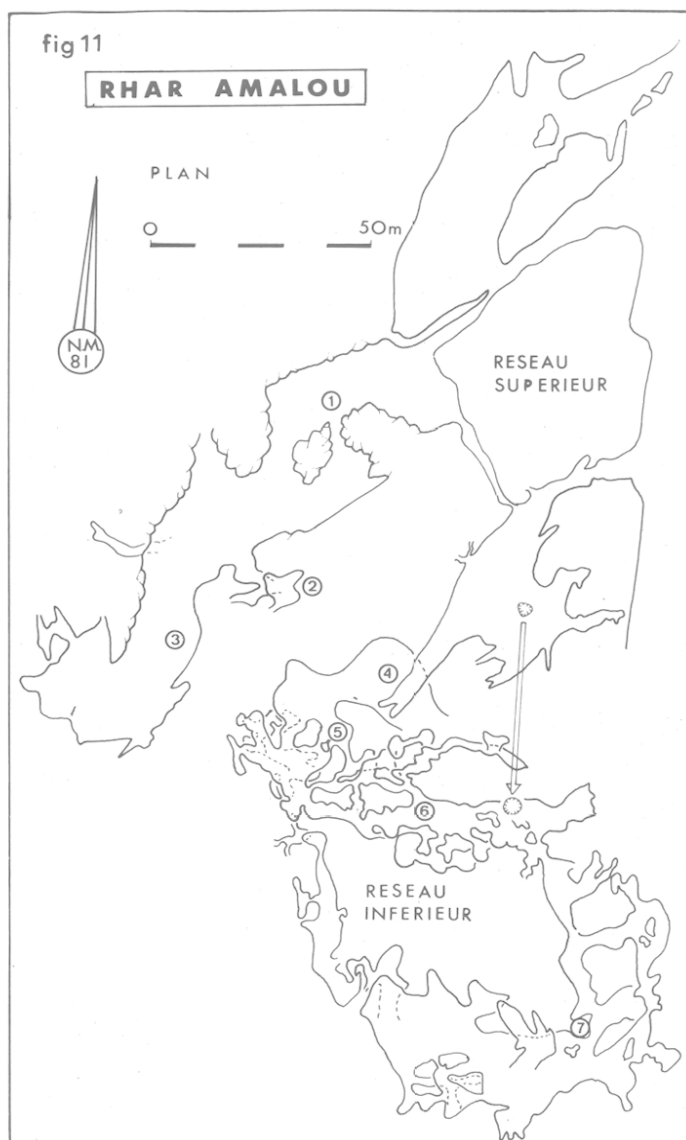


Photo 7 - Stalagmite épineuse (Rhar Amalou). Sprined stalagmite.

ANNEXES :

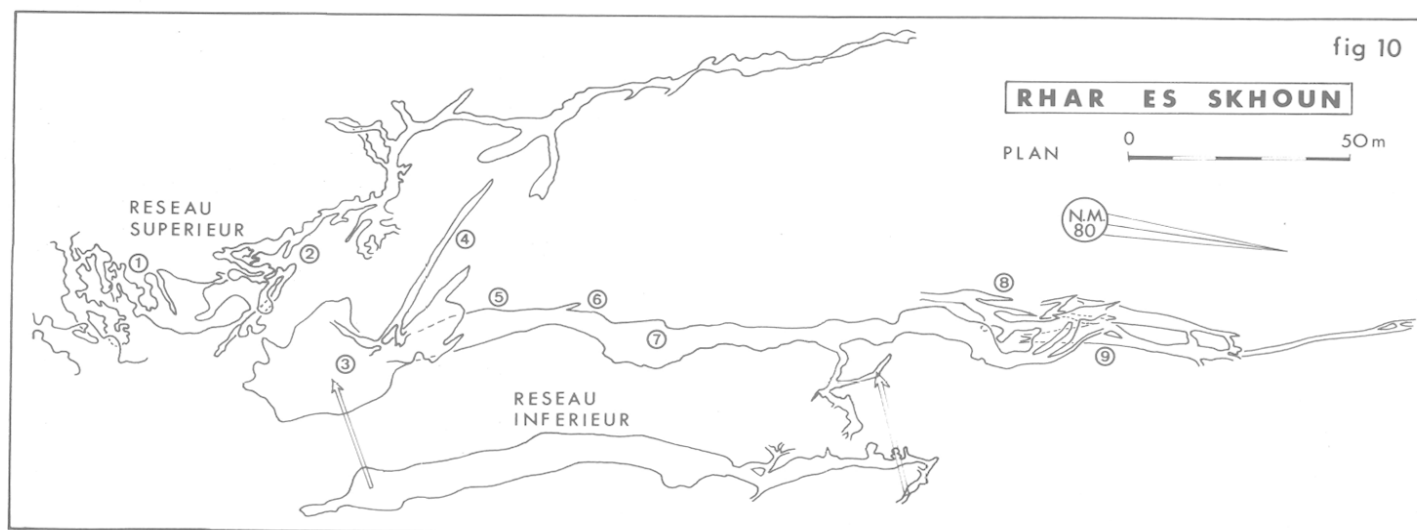
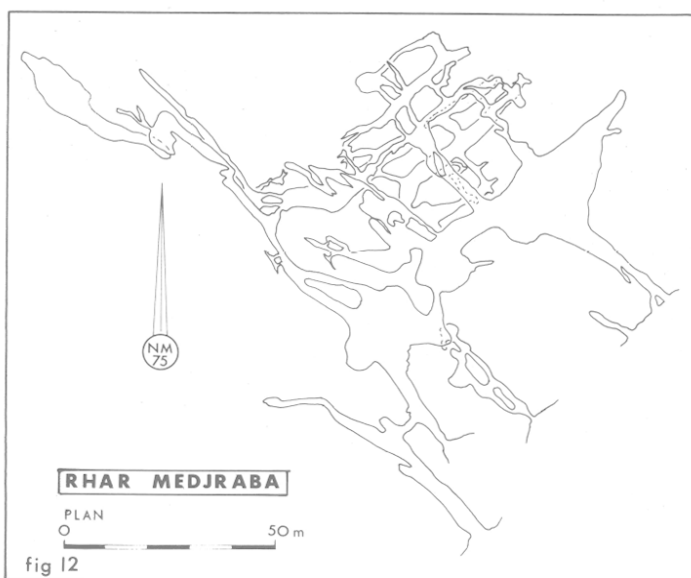
Topographies des grottes de Rhar Es Skhoun (fig. 10), Rhar Amalou (fig. 11), et Rhar Medjraba (fig. 12), Bibans, Algérie. Topographies B. Collignon.
Maps of Rhar Es Skhoun (fig. 10), Rhar Amalou (fig. 11) and Rhar Medjraba caves, Bibans, Algeria.



NOM DE LA CAVITÉ	COORDONNÉES LAMBERT, X-Y-Z	(1)	DÉV.	DÉNIV.
Rhar Es Skhoun	649,6-319,2-630	A	1750	+9/-122
Rhar Sidi Bakou	649,5-319,3-700	A	90	+35
Rhar Amalou Rhar Kab Srhir	647,2-317,3-680	A	2000	+9/-59
Rhar Zénédia	646,6-316,9-640	A	180	+10/-5
Rhar Medjraba (2)	651,5-321,2-700	B	1500	+28/-55
Mines de Hammam El Biban	652,1-323,0-540 652,1-322,9-560	B B		

(1) Carte au 1/50 000°. A : 114-Mansourah, B : 90 - Béni Mansour.
(2) Cette grotte a été décrite sous le nom de Grande grotte de l'Azérou el Kébir, par Coiffait et Quinif.

Tableau 3 - Inventaire spéléologique des Azérous.
Table 3 - Speleological inventory of the Azerous.



- abondance d'aragonite;
- concrétions calcitiques particulières (coulées dans les coupoles).

État de la roche.

- altération profonde, quelles que soient l'orientation des surfaces et la nature du calcaire;

Remplissages dentritiques :

- très peu abondants;
- pauvres en argile.

Climat souterrain :

- gradient thermique anormalement fort;
- présence de gaz particuliers (H_2S , SO_4);
- courant d'air dont le sens ne s'inverse jamais.

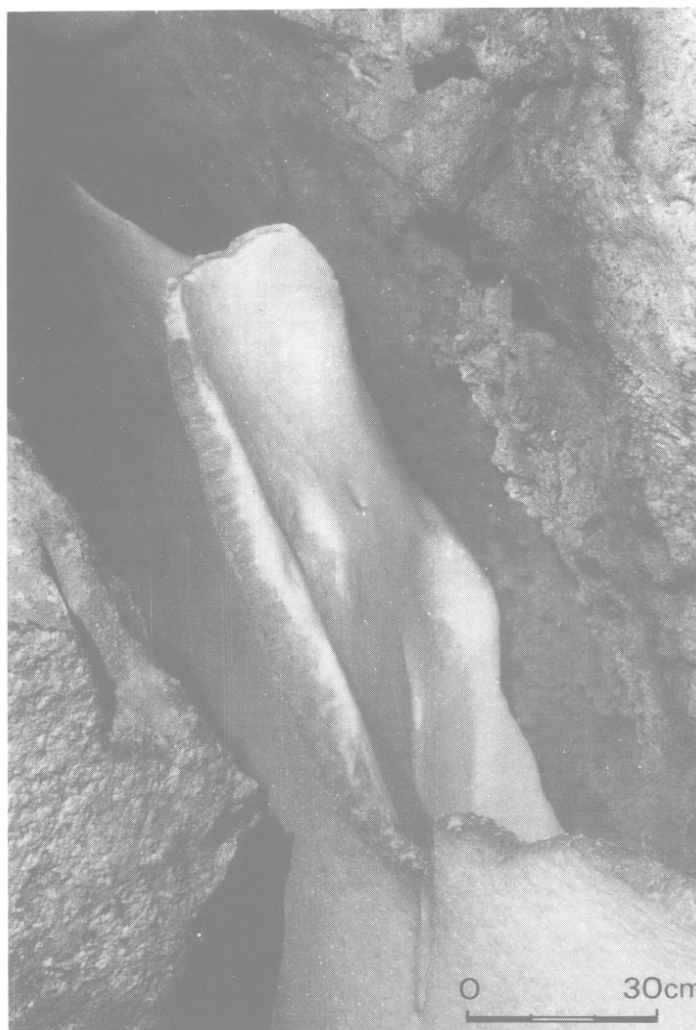
CONCLUSIONS

Les cavités des Azérous sont exceptionnelles à plus d'un titre. Elles permettent d'observer, dans un excellent état de conservation, d'anciens réseaux creusés à grande profondeur par des eaux thermales et donnent ainsi une image des réservoirs géothermiques en roche carbonatée.

Une étude quantitative et statistique des coupoles, des minéralisations, des sédiments... permettra de préciser le mécanisme et la chronologie des phases de creusement et de remplissage.

D'ores et déjà, l'étude qualitative permet de dégager un faciès des cavités d'origine hydrothermale qui permettra de reconnaître d'anciennes influences thermales dans des réseaux sans anomalie thermique actuelle.

Photo 8, ci-contre : croûte de gypse saccharoïde décollée de la paroi (galerie du Gypse).
Saccaroid gypsum crust detached from the wall («galerie du Gypse»).

**BIBLIOGRAPHIE**

BECKER (J) et DUBOIS (G) - 1953 - Genèse des quartz bipyramidés. *C.r.Soc. Géol. France*, p. 226.

BONTE (A) - 1953 - Sur la genèse des quartz bipyramidés, *C.R. Soc. Géol. France*, p. 253-254.

CABROL (P) - 1978 - Contribution à l'étude du concrétionnement carbonaté des grottes du Sud de la France, *CERGH*, Montpellier, 275 p.

CAIRE (A) - 1957 - Etude géologique de la région des Bibans, *Bull. serv. carte géol. Algérie*, n°16, 818 p.

CALLANDRI (G) - 1980 - The deposition of gypsum in caves. *Caving intern.* 9 : 44-46.

COIFFAIT (PE) et QUINIF (Y) - 1976 - La grande grotte de l'Azérou el Kébir, *Spelunca* 3 : 97-112.

COIFFAIT (P.E) et QUINIF (Y) - 1977 - La karstification de l'Azérou El Kébir : approche globale de la spéléogénèse d'un massif. *Bull. soc. hist. nat. Afr. Nord* t. 68 : 79-100.

COIFFAIT (P.E) - 1978 - Fracturation et karstification d'un massif : l'exemple de l'Azérou El Kébir, *Int. Journ. Spel.* 10 : 245-252.

COIFFAIT (P.E), FABRIOL (R) et GILLON (P) - 1978 - Une grotte thermale en Algérie. *Trav. Inst. Sc. Terre Constantine*, n°1 : 43-52.

COLLIGNON (B) - 1982 - Spéléologie à l'Azérou Es Srhir, in «Spéléologie algérienne 1981-1982», *GS INSA Toulouse*, 55-70.

COLLIGNON (B) - 1983a - Rhar Es Skhoun : étude d'une grotte thermale des Bibans, *Spelunca* n°12 : 19-24.

COLLIGNON (B) - 1983b - A propos de la répartition géographique des phénomènes hydrothermaux et de l'aragonite dans les karsts du Sud de la France, à paraître.

EGEMEIER (S) - 1981 - Cavern development by thermal waters. *N.S.S. Bulletin*, 43 : 31-51.

GOOD (J-M) - 1957 - Non carbonates deposits of Carlsbad cavern, *N.S.S. Bulletin*, 19, p. 19.

GUIGUE (S) - 1940/1947 - Les sources thermo-minérales de l'Algérie, *bull. serv. carte géol. Alg.* série 3, fasc. 5 et 9.

JAKUCS (L) - 1978 - Morphogenetics of karst regions, éd. Adam Hilger, Bristol.

JAKUCS (L) - 1977 - Genetic types of the hungarian karst - Karst és Barlang, special issue 1977, 3-18.

MOREHOUSE (D-F) - 1968 - Cave development via the sulfuric acid reaction, *N.S.S. Bulletin*, 30(1) : 1-10.

MULLER et SAVARY (I) - 1977 - Some aspects of developments in hungarian speleology theories during the last 10 years, Karst és Barlang, special issue 1977, 53-60.

QUINIF (Y) - 1973 - Contribution à l'étude morphologique des coupoles, *Ann. Spél.* 28 : 565-573.

ROQUES (H) - 1964 - Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes $CO_2-H_2O-CaCO_3$, Thèse, Toulouse.