

COLORATIONS DES GOUFFRES DE BALOUAA BAATARA ET BALOUAA BALAA (CAZA DE BATROUN) 1985 - 1988

TABLE DES MATIERES

Colorations des gouffres de Baatara et Balaa

Résumés (français, anglais, arabe)

Introduction

I-Le gouffre de Balouaa Baatara

I.1-Spéléogénèse

I.1.1-Topographie

I.1.2-Le «trou de l'ermite»

I.2-Coloration de Baatara

I.2.1-Méthodologie

I.2.2- Opération de laboratoire

I.2.3-Etablissement de la courbe d'étalonnage et mesure des concentrations

I.2.4-Interprétation

II-Le gouffre de Balouaa Balaa

II.1-Description générale

II.1.1-La perte-gouffre de Balouaa Balaa

II.1.2-Observations

II.2-Mesures de débit - Calcul et report

II.2.1-Mesures effectuées au moulinet

II.2.2-Mesures de débit sur le Ouadi Tannourine par la méthode chimique

II.2.3-Conclusions

II.3-La coloration du gouffre de Balouaa Balaa

II.4-Interprétation de l'essai de traçage des eaux dans le gouffre de balaa

-Conclusions

-Bibliographie

III-Le gouffre de Jouret el Aabed

III.1-Situation

III.2-Topographie

IV-La grotte de Ghaouaouit

IV.1-Situation

IV.1.1-Topographie et morphologie

IV.2-Mode d'écoulement de l'eau dans la grotte

IV.3-Aperçu hydrogéologique et problèmes que pose l'aquifère du bassin versant de Kfar Hilda

V-Etude géologique

V.1-Echelle stratigraphique

V.2-La structure

RESUME:

Trois grands gouffres de la région de Tannourine ont fait l'objet de la campagne d'exploration et d'étude de l'année en cours (1988).

Balouaa Baatara (-255 mètres) et Balouaa Balaa (-158 mètres) sont des pertes temporaires. Le premier a fait l'objet d'une coloration au mois de mars 1985 par M. MAJDALANI. Le second par le S.C.LIBAN au mois de mai 1988.

Le traceur apparaissant 13 heures plus tard à Nabaa Dalli pour Baatara et 18 heures pour Balaa.

Le troisième gouffre: Jouret el Aabed (-240 mètres) restant un gouffre sec.

Nous livrons ci-dessous le résultat des travaux spéléologiques, géologiques et hydrogéologiques les concernant.

ABSTRACT:

Three important pot-holes in the Tannourine region formed the subject of the exploration and study campaign of the current year (1988).

Balouaa Baatara (-255 meters) and Balouaa (-158 meters) are temporary losses. The first one formed the subject of a colouring done in march 1985, by M. MAJDALANI, the second in may 1988, by the S.C.LIBAN.

The third pot-hole: Jouret el Aabed (-240 meters) is a dry one.

The following is the result of the speleological, geological and hydrogeological works concerning the three pot-holes mentioned above.

ملخص

تركزت أبحاث النادي اللبناني للتنقيب عن المغاور سنة ١٩٨٨ على منطقة بلعه - تنورين حيث تنفتح ثلاث هوات كبرى (تسمى «البوالبع»).

هذه الهوات هي بالوع بعناره الشهير بجسوره الطبيعية الثلاث (عمقه ٢٥٥ م)، بالوع بلعه (١٥٨ م) وهوة جورة العبد (٢٤٤ م). بعناره وبلعه تشكل مهابر مؤقتة للمياه خاصة أوقات ذوبان الثلوج، أما جورة العبد فهي هوة جافة.

المقال الحالي يعرض مجمل الأعمال الجيولوجية والهيدروولوجية وكذلك نتائج التنقيب والبحث داخل هذه الهوات إضافة الى عرض مراحل ونتائج التلوين بالفلوريسين التي جرت مطلع أيار ١٩٨٨ والتي أظهرت اتصالاً مباشراً وسريعاً بين بالوع بلعه ونبع دلّه - كفرخلدا لم يتعد الثمانية عشر ساعة.

INTRODUCTION

Le SPELEO-CLUB DU LIBAN a pratiqué les 30 avril et le 1^{er} mai la coloration de la perte superficielle du gouffre de Balouaa Balaa par 25 kilogrammes de fluorescéine (urantine). Quatre sources (fig.30) ont été gardées en observation durant les 30 heures suivant l'injection, et des échantillons en ont été prélevés, de façon à apprécier la quantité de fluorescéine restituée à la résurgence.

Nabaa Dalli (fig.30) était le point surveillé le plus attentivement après la coloration, et c'est effectivement en ce point que le colorant a réapparu 18 heures après qu'il fut déversé à Balouaa Balaa.

Deux opérations successives ont accompagné la coloration; le 29 avril des mesures de débit ont été pratiquées au moulinet à Baatara Balaa et Dalli, ce paramètre étant nécessaire à la détermination de la quantité de colorant récupérée. Le 8 mai, 2 mesures de débit en 2 points du Ouadi Tannourine ont été effectuées, en amont et en aval d'une zone très accidentée du fleuve, de manière à éliminer l'existence d'une perte ou d'un apport d'eau important dans cette section difficile à explorer (fig.31). En raison de l'irrégularité du lit du torrent qui rendait difficile l'emploi du moulinet, ces mesures de

débit ont été réalisées par jaugeage chimique (méthode de dilution).

Les résultats obtenus démontraient que l'on était en face d'un même système karstique dont les deux principaux collecteurs, Baatara (voir rapport M. Majdalani) et Balaa, resurgissaient au même point.

Une campagne spéléologique s'imposait, ayant pour but de reprendre les travaux d'exploration du S.C.L. réalisés précédemment et d'établir des relevés topographiques tant sous terre qu'à l'extérieur tendant à implanter précisément le développement des trois grands gouffres voisins de Laqlouq: Balaa, Baatara et Jouret el Aabed.

Il était évident dès lors qu'une visite minutieuse à la grotte de **GHAOUAOUIT** (émissaire de Nabaa Dalli, source principale du Nahr el Jaouz) devenait impérieuse clôturant ainsi le cycle de recherche de cette année.

Ces travaux ont été effectués par l'ensemble des membres du Spéléo-Club du Liban, qui ont participé aux opérations de jaugeage, de coloration et de surveillance des points d'eau ainsi que de l'exploration et de la topographie des quatre cavités susmentionnées.

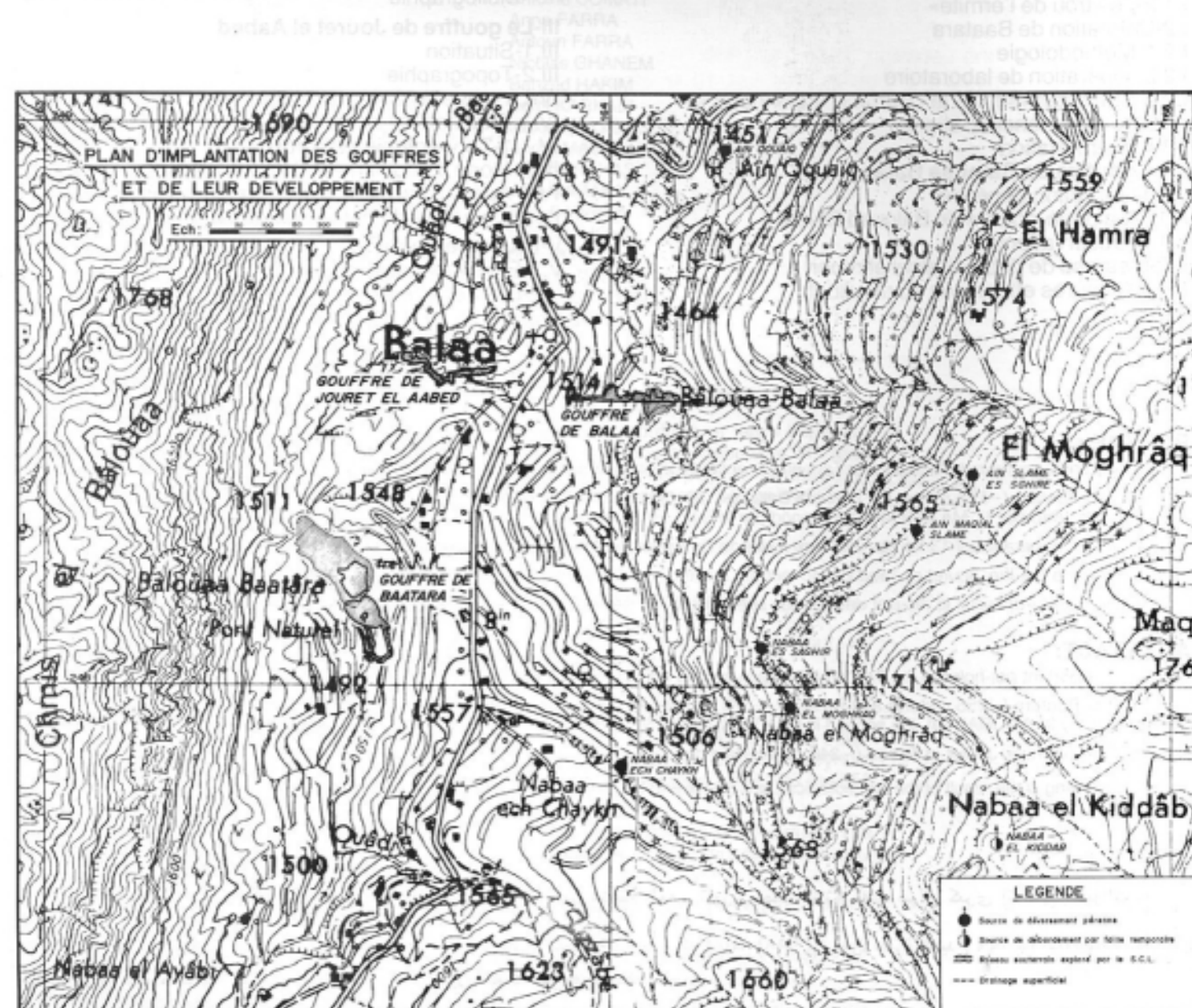


Figure 14: Carte de situation au 1/5.000 localisant les mesures effectuées sur le terrain, les sources obser-

vées, les pertes de Balouaa Balaa et Balouaa Baatara et le gouffre de Jouret el Aabed (M.Majdalani).

I — LE GOUFFRE DE BALOUAA BAATARA

Sami KARKABI

Coordonnées Lambert:

X = 163,570 km

Y = 248,140 km

Z = 1480 m

Carte au 1/20.000 feuille de Douma 0-6.

Profondeur: -255. Développement 268m.

SITUATION

Le gouffre de Baatara est aussi connu sous le nom de «gouffre aux trois ponts»; c'est la perte temporaire du Ouadi Baatara. Il collecte les eaux des sources de Ain Daaouq (1665 m) et de Ain Aarbit (1655 m). En période humide et à la fonte des neiges, il est alimenté par les eaux de ruissellement de petits ouadis (sensiblement parallèles et de direction E-SE) qui prennent naissance à une altitude moyenne de 1735 mètres en entaillant profondément le J5 (fig.14 bis et 30).

En période de crue, des matériaux d'origine basaltique sont entraînés vers le Ouadi Baatara et de là vers le réseau souterrain de la perte où on les retrouve sous forme d'argile et de tufs calcifiés dans la partie exposée au jour et de galets dans le réseau temporairement noyé (fig.15a et 15b).

A l'ouest, l'escarpement de Aârid Baatara (1700m) et Chmis el Balouaa (1650m), soumis à une érosion de surface très intense, laissent à découvert une lecture assez complexe de failles de directions variées (fig.30) où il n'est pas exclu de retrouver des infiltrations pro-

fondes, rejoignant le système souterrain de Baatara-Dalli. Dans ce paysage extrêmement chahuté, où le drainage superficiel des eaux vers le Ouadi Baatara semble négligeable, deux accidents tectoniques retiennent notre attention.

Le premier est une faille de direction 290° N (inclinaison 90°) qui prend naissance au nord du gouffre et dans le périmètre génésiaque du complexe Balouaa Baatara. Le second est une micro-faille également transverse de direction 300° N (inclinaison 90°) au niveau du deuxième pont du gouffre de Baatara (fig.15a et 15b).

Le creusement du gouffre de Balouaa Baatara apparaît dès lors lié à ces deux phénomènes géologiques. Avant de se constituer en vallée aveugle, le Ouadi Baatara, alimenté exclusivement par les couches imperméables du J5, s'étendait jusqu'au périmètre du gouffre de Jouret el Aabed ou plus loin encore.

Nous n'avons aucune donnée précise qui nous permette d'affirmer que les eaux du Ouadi Baatara se perdaient intégralement dans ce réseau souterrain, mais il est fort probable qu'il absorbait les eaux du torrent pour vraisemblablement réapparaître à Nabaa Dalli.

I.1 — SPELEOGENESE (références photographiques 28,29,30).

Ces eaux subaériennes, avant de totalement détruire et éliminer le J5 pour entrer en contact intime avec le J4b, devaient, lors de leurs cheminement vers Jouret el Aabed, profiter pour s'infiltrer le long des failles trans-

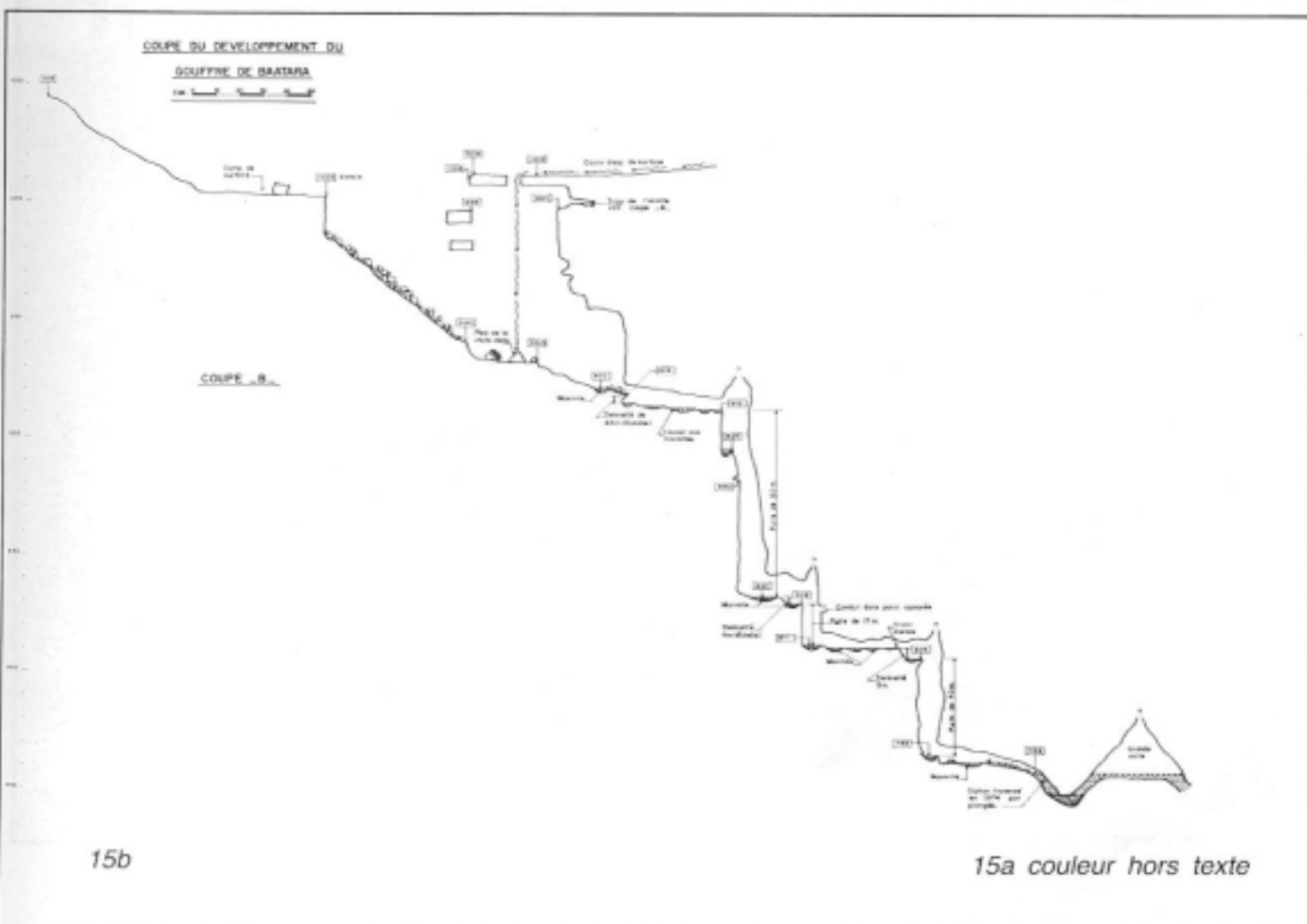


Figure 15: coupe du gouffre de Balouaa Baatara (15a et 15b).

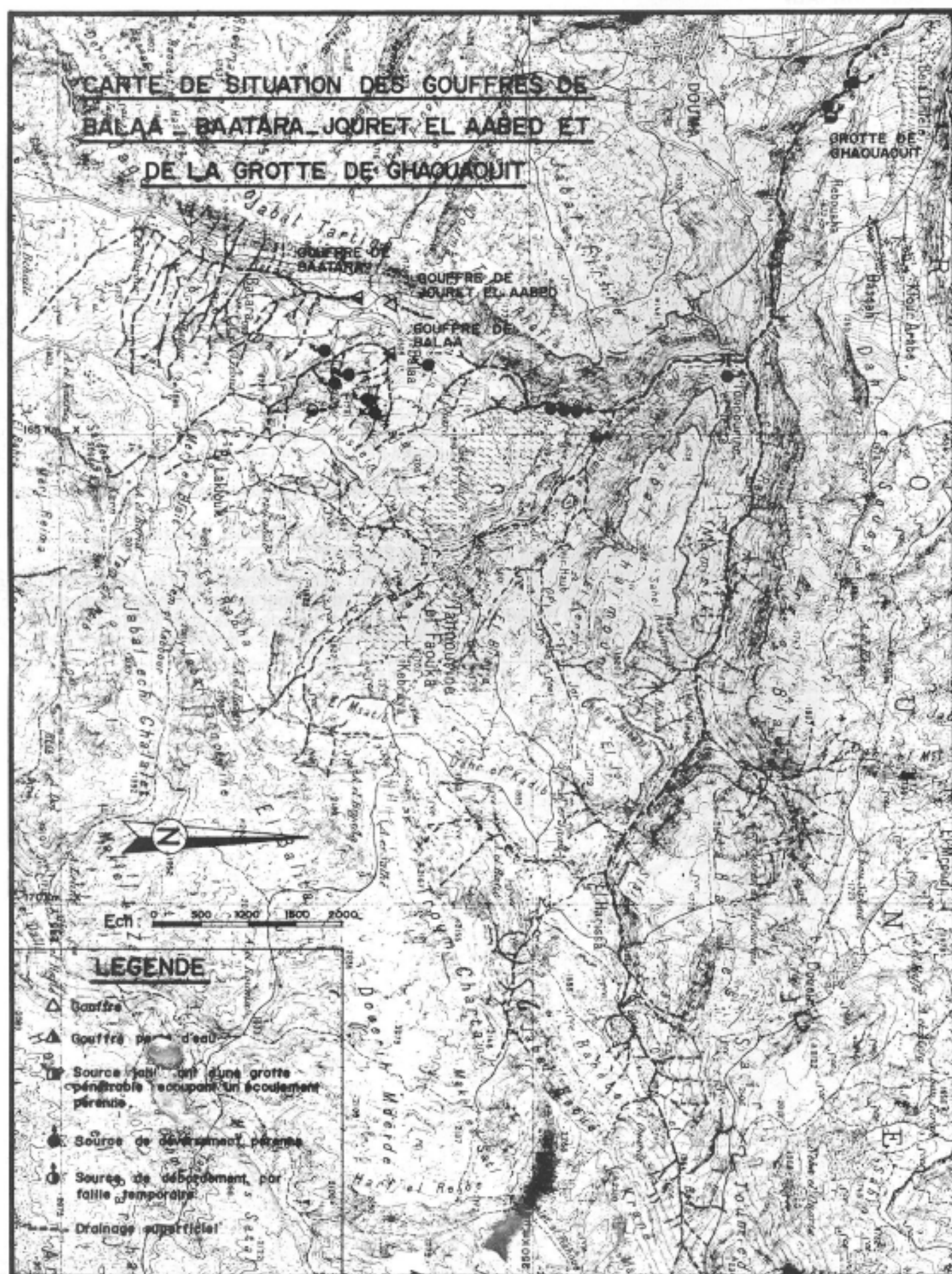


Figure 14 (bis): Carte de situation générale.

verses et rejoindre le réseau préexistant et fortement karstifié de Balouaa Baatara pour réapparaître à leur tour comme prouvé par traçage à Nabaa Dalli.

On pourrait imaginer le processus suivant, suite aux observations faites sur le terrain:

Phase I: Le torrent de Ouadi Baatara coule librement en direction du nord, mettant à découvert le J4b tout en s'infiltrant le long des failles transverses et en s'engouffrant partiellement ou totalement dans le gouffre de Jouret el Aabed.

Phase II: Le surcreusement du lit du torrent de Ouadi Baatara qui vient buter de front contre la faille transverse et l'action simultanée de l'attaque des eaux et de la gélifraction élargissent rapidement joints et fissures et provoquent l'absorption totale du cours subaérien de Ouadi Baatara.

Cette action rapide érosive du système souterrain qui suit l'inclinaison naturelle des pendages laisse de part et d'autre des parois les traces de creusements successifs de l'écoulement des eaux dont l'écartement latéral dépasse en certains points soixante mètres.

Phase III: La dégration qui se fait en surface dans cette dépression devenue aveugle, combinée au travail de l'eau en profondeur, provoque l'effondrement partiel de la voûte (peu épaisse par ailleurs) et le recul de Ouadi Baatara.

Les pendages inclinés jusque-là reprennent une position horizontale, et c'est au niveau de ce changement topographique que se jette le torrent. Dans ce trajet vertical l'érosion se fait sous forme tourbillonnaire créant une marmite géante dont les traces sont visibles jus-

qu'à nos jours.

Phase IV: Entre-temps, les infiltrations au niveau de la micro-faille se font plus pressantes, élargissent les fissures existantes et provoquent un nouveau recul de Ouadi Baatara. Il apparaît une nouvelle marmite dans une stratigraphie toujours horizontale, et les eaux tourbillonnaires attaquent au sud un joint de stratification qui donne naissance au «trou de l'ermite» (voir par ailleurs), et au nord la paroi amincie par les phases II et III. Cette façade ne résiste pas, s'effondre et apparaît une large fenêtre ouverte sur les premières traces de la perte de Balouaa Baatara.

Le même processus d'érosion: creusement, effondrement, se poursuit en milieu tourbillonnaire, crée une succession verticale de marmites, attaque à nouveau la paroi nord en laissant pour témoin une strate horizontale qui sera le pont 2.

Le fond de cette dernière marmite crève à son tour et la trombe d'eau se précipitant de plus de quatre-vingts mètres de haut s'écrase dans le réseau souterrain déjà existant, sculptant en ce point une super-marmite (ph.25) et par la même occasion donnant naissance au pont 3.

Le torrent, libéré de toute contrainte physique, dévale un toboggan lisse de toute anfractuosités pour se jeter dans le couloir aux marmites et retrouver le cours souterrain actuel.

Une nouvelle intrusion du cours subaérien du Ouadi Baatara à travers des fissures permet un nouveau recul de la vallée et la création du pont 1.



Photo 26: Dernière marmite au pied des -90m (Ph. Gérard TOHMÉ).

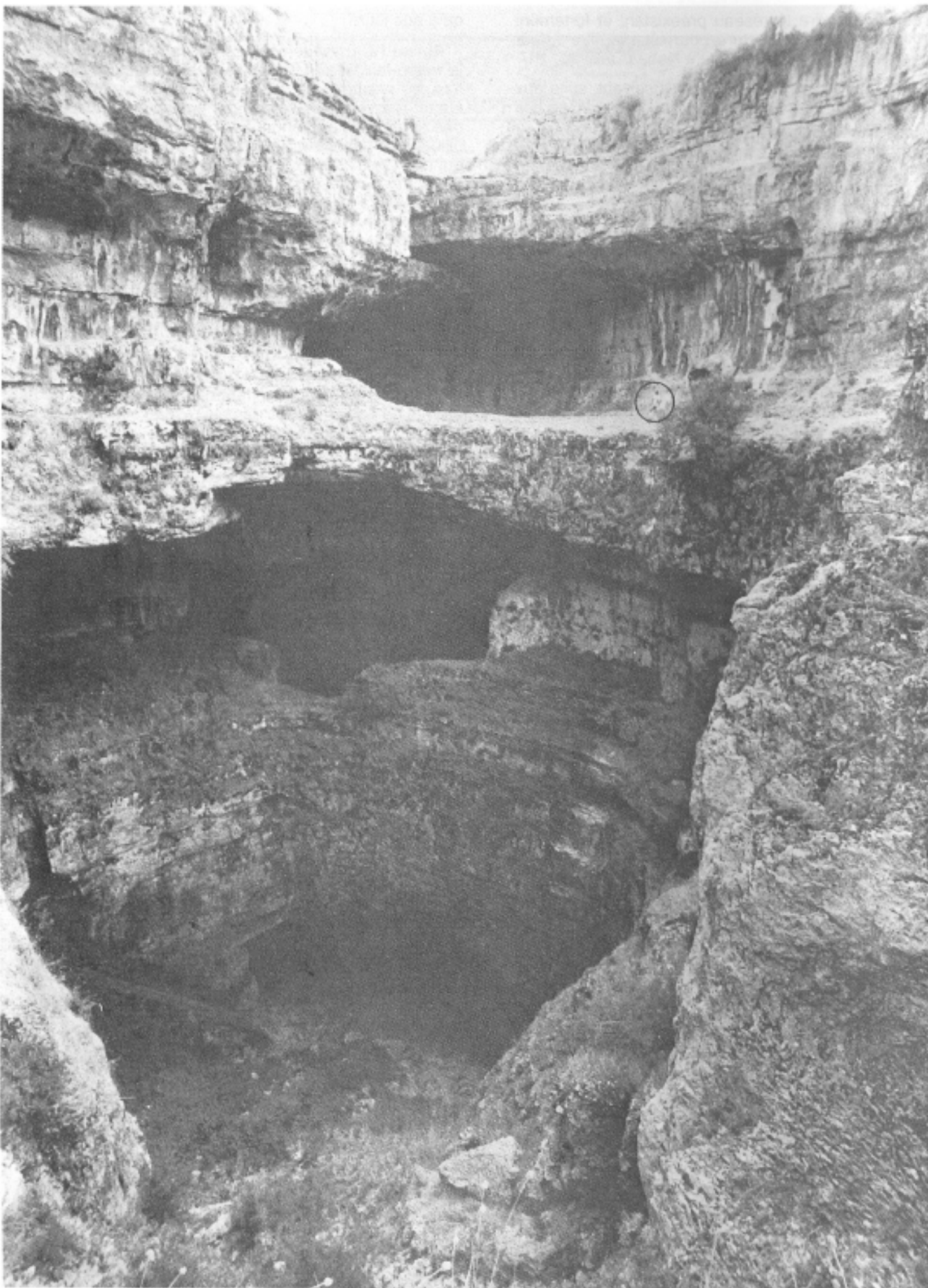


Photo 24: Balouaa Baatara (vue prise de l'entrée nord du gouffre). (Ph. Gérard TOHMÉ).

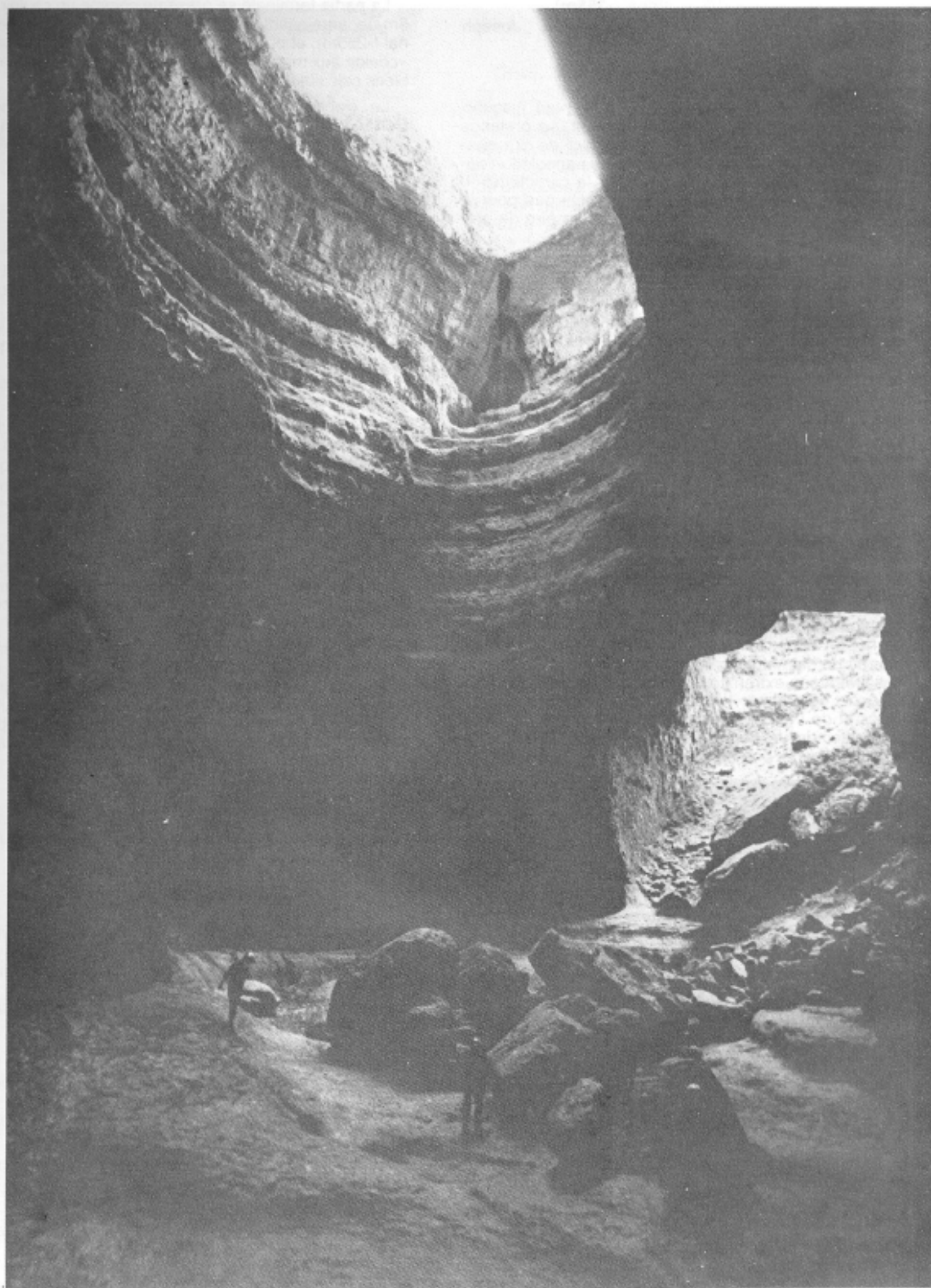


Photo 25: Balouaa Baatara (vue prise du fond vers le pont C) (Ph. Gérard TOHMÉ).

I.1.1 — TOPOGRAPHIE (-90m à -255m)

Hugues **BADAOUI**, André **BECHARA**, Joseph **ZGHEIB**.

(fig. 15a et 15b)

Le gouffre de Baatara qui se présentait jusqu'ici comme un large entonnoir à ciel ouvert se prolonge dans sa partie terminale par un ressaut de 5m suivi d'une galerie aux dimensions modestes appelée «couloir aux marmites». Cinq plans d'eau le caractérisent. L'usage du canot pneumatique n'est utile que pour le premier, les autres ne dépassant pas le mètre de profondeur.

Le profil en soucoupe de ce couloir, les marmites qui se succèdent, les parois lisses et propres indiquent que ce conduit subit un écoulement sous pression. Il s'arrête brutalement au bout de 40m sur un puits hélicoïdal de 80m interrompu par une marmite profonde (-17m) que l'on ne peut éviter que par un mouvement pendulaire.

Le réseau souterrain accuse alors un changement de direction très net à 90° entrecoupé de deux puits, respectivement de 5 et 17m, au pied desquels se développent les marmites d'usage.

Au départ du P17 on distingue sur la paroi opposée une large ouverture dont l'accès n'est possible qu'en escalade artificielle. La fig. 15a nous indique qu'une jonction pourrait être possible entre Baatara et le «trou de l'ermite». La verticale à franchir serait de -109m, et la distance en ligne droite estimée à moins de 15 mètres.

La galerie au pied du P17 se rétrécit et la progression se fait en opposition pour rejoindre une salle de cinq mètres de diamètre dont le sol est jonché de galets de basalte. A son extrémité, un tronc d'arbre dont il est difficile de déterminer l'espèce permet l'amarrage des agrès et de franchir un toboggan de 5m de dénivelé pour atteindre le départ du P40 (nouvelle marmite et emploi du canot pneumatique).

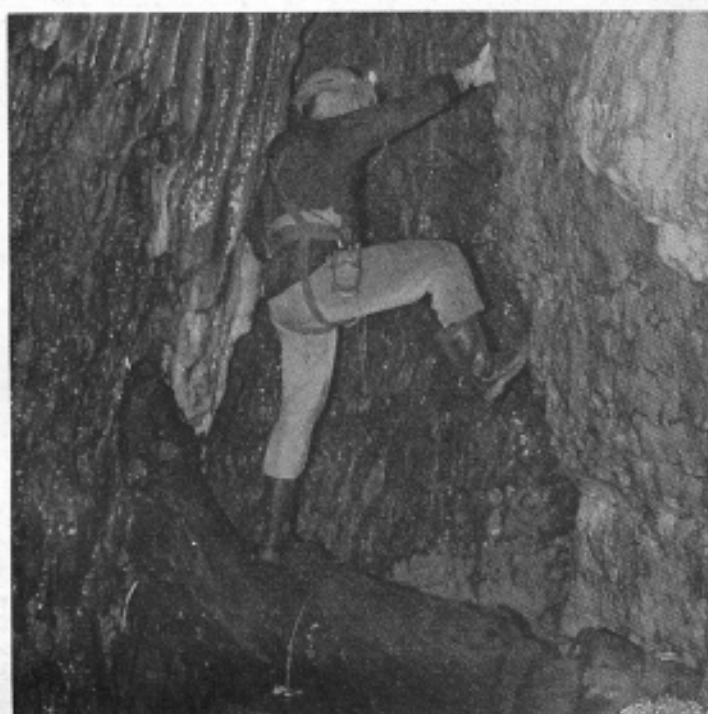


Photo 27: Le tronc d'arbre a déjà été signalé lors de la première exploration du gouffre en 1953. A ses pieds, des galets d'origine basaltique et face au personnage le départ du P40 dans une diaclase élargie (Ph. Hugues BADAOUI).

La partie terminale se présente comme un couloir de 5m de large allant se rétrécissant vers le siphon terminal (-255m), et présentant la même morphologie que le «couloir aux marmites». Par contre, le sol est jonché de blocs calcaires et de galets de basalte.

Le siphon a été franchi en 1972 par **Antoine COMATI** qui a pris pied sur un talus d'argile dans une salle de près de 50m de diamètre bloquée à son extrémité par un deuxième siphon.

OBSERVATIONS

La mise à jour de la topographie de Baatara et du «trou de l'ermite» nous porte à émettre sous toutes réserves les réflexions suivantes:

— La présence des marmites de géants qui échelonnent le parcours topographique du gouffre jusqu'à -90m laissent supposer que:

a— la masse d'eau qui déferlait dans la perte était beaucoup plus importante qu'aujourd'hui;

b— que les exutoires latéraux ou verticaux (infiltrations, fissures ou conduits de faibles dimensions) ne permettaient pas l'absorption rapide du liquide, et qu'à l'instar de Balouaa Balaa, le gouffre devait se remplir certaines années pour déborder et couler vers Jouret el Aabad.

— Le «couloir aux marmites» (fig.15a) aurait pu soit être un conduit de faible dimension, soit ne pas avoir encore existé. Ceci expliquerait la présence nombreuse le long de la fissure qui remonte en ce point des coupes de corrosions.

Enfin, dans la phase transitoire où l'eau se déversait dans le «trou de l'ermite», il est à espérer qu'en désobstruant le fond, on pourrait rejoindre le réseau actuel actif. Nous insistons sur le fait que le P9 de ce gouffre débouche sur un couloir étroit et qu'il est dès lors probable qu'il s'engorgeait à l'instar de Balaa ou de Baatara dans le passé.

Légende photo 24 - Document pris de l'entrée nord du gouffre en direction sud.

A: le pont supérieur.

a: la perte actuelle de Ouadi Baatara.

a₁: le «trou de l'ermite».

a₂: micro-faille de direction 300° N et de 90° d'inclinaison.

B: le pont intermédiaire strate témoin de couches horizontales.

b: marmite de géant de traces sur les parois des différentes phases d'érosion.

C: le pont inférieur.

c: la marmite géante au pied des ponts.

c₁: éboulis et caillasse qui cachent la morphologie originelle du gouffre.

D: départ actuel de l'exploration du gouffre de Balouaa Baatara.

Légende photo 25 - Document pris du pied de la marmite inférieure en direction nord.

E: micro-faille en bordure occidentale du pont B.

F: les différentes phases de l'érosion tourbillonnaire de la perte de Baatara.

G: éboulis d'accès.

H: tufs concrétionnés.

I: gros éboulis au centre de la marmite géant

J: vers la «galerie aux marmites».

I.1.2 — TOPOGRAPHIE ET MORPHOLOGIE DU TROU DE L'ERMITE (BALOUAA BAATARA). (S. KARKABI)

Le «trou de l'ermite» est une grotte-gouffre qui fait partie du complexe du gouffre de Balouaa Baatara (fig.15a). Il s'ouvre par un porche parfaitement elliptique au-dessous et en retrait de la perte (front sud). Ses axes symétriques font quatre mètres de haut pour deux de large.

L'accès sans être difficile reste exposé en raison de l'étroite corniche et d'une courte escalade surplombant l'abîme. La roche en cet endroit est très corrodée par gélifraction.

Les chèvres semblent fréquenter les lieux, témoin les crottes qui jonchent l'entrée mais aussi les nombreux squelettes retrouvés au fond des puits et jusqu'à - 57 mètres.

Le couloir d'entrée, sinueux sur environ 15 mètres, a toutes les caractéristiques d'une ancienne conduite forcée qui s'interrompt brutalement sur un P5. Il faut s'attacher pour les amarrages sur une paroi dont la qualité du calcaire très altéré laisse à désirer. Le P5 est une ancienne marmite de déversement brisée à sa base et qui communique sans transition avec le P35,5 qui lui fait suite. Une fissure part du point d'amarrage pour disparaître à la base du P35,5. Elle est de direction S.E.-N.W. et le sol en cet endroit (9m x 5.50m) est couvert d'argile de décalcification. En N-W une barrière de calcite (ancien gour) de 0m30 de haut sur 3m de large joint les parois et transforme les lieux en une vaste marmite sèche.

On aperçoit dans un coin une admirable construction de rongeurs réalisée à partir d'argile et de cailloutis. Elle a la forme d'un cône appuyé sur la paroi et elle est méthodiquement recouverte de petits ossements prélevés à un squelette de chèvre gisant à quelques mètres de là. Le sommet du cône est soigneusement quadrillé de brindilles de bois et la petite dépression qui se trouve en son milieu sert de nid. Elle est tapissée de feuilles d'arbre reposant sur l'enveloppe cellophanée d'une boîte de cigarettes. Nous n'avons vu ni les rongeurs ni aperçu leurs déchets alimentaires. Il serait intéressant lors d'une prochaine incursion de les piéger afin de les identifier. Notons qu'il y a une similitude entre ce nid et celui de Mgharet Abou Ali (Al Ouat' Ouate - nouvelle série N° 2 p. 18), ce dernier étant tapissé de feuilles d'arbre et construit au sein d'un cône d'argile appuyé contre la paroi.

Le gour franchi, un court toboggan recouvert de **mondmilk** donne naissance au P7 qui présente au sol la même morphologie que le précédent. Le troisième puits (P9) a les parois parfaitement lisses et mène à un couloir étroit dont le sol dans la partie décline est entièrement calcifié.

Quelques colonnettes de faibles dimensions ponctuent cette zone jusqu'à - 61 m. Le plafond s'abaisse brutalement et laisse entrevoir au-delà et par une impénétrable étroiture agrémentée de stalagmites une rupture de pente d'où émerge une colonnette reposant sur une plate-forme calcifiée.

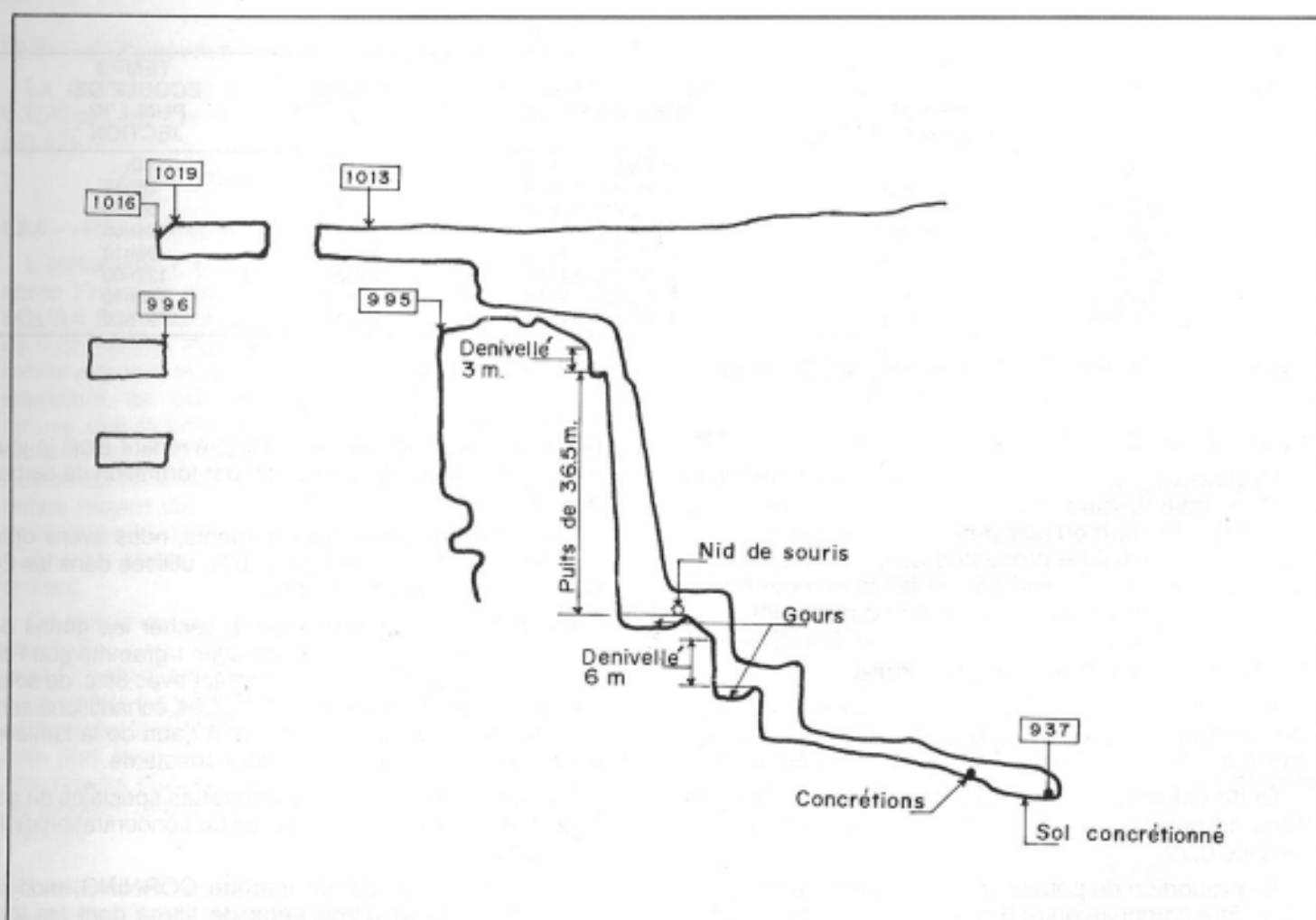


Figure 16: coupe du «trou de l'ermite»

OBSERVATIONS

Ce gouffre, ancienne perte temporaire (partielle ou totale (?)) du Ouadi Baatara, présente aujourd'hui les particularités suivantes:

- L'ouverture caractéristique de l'entrée en ellipse annonce la mise en charge directe de la galerie qui la suit et qui grossièrement garde ce profil jusqu'au P5. Une marmite de 2 m 20 × 1 m 80 × 0 m 50 interrompt le couloir d'accès (fig.15a). C'est sans doute la présence étrange de cette fosse en ce lieu qui a fait supposer qu'un ermite y séjournait.

- La série de puits indiquent bien le fonctionnement synégétique de la perte: parois lisses et propres, marmites présentes en rupture de pente et absence totale de sédimentation.

- Si l'abandon du «trou de l'ermite» par la perte du Ouadi Baatara a été brutal, il n'en reste pas moins que les gours du P35.5 et du P7 indiquent que le réseau souterrain jusque - 58 mètres a subi une longue période d'écoulement en tranche faible (B. GEZE), provoquant ces barrières de calcite. L'absence totale de tout dépôt calcaire le long des parois porterait à croire que ce lent écoulement proviendrait de la base (élargie en ce point) de la fissure signalée ci-dessus.

- Le sol des gours est recouvert uniformément d'argile de décalcification tout à fait sèche. La présence des squelettes de chèvres, d'oiseaux, le nid de rongeurs, du mondmilch et l'absence de suintements* porteraient aussi à croire que l'écoulement lent supérieur a émigré vers les parties inférieures participant à l'édification du plancher stalagmitique et des concrétions décorant ces lieux.

- Il est évident qu'une désobstruction s'impose, ce

qui permettrait de mieux comprendre le fonctionnement de la perte de Baatara.

1.2 — Coloration du gouffre de Baloûaa Baatâra (dit gouffre des 3 ponts) — Michel MAJDALANI: hydrogéologue

Le 19 mars 1985, à 12h10' nous avons déversé à 150 mètres en amont de la perte de BALOUAA BAATARA 25kg de fluorescéine longuement dilués dans 125 litres d'eau prélevés du torrent, 25 litres d'alcool dénaturé et 12,50 litres d'ammoniaque.

La source observée étant celle de DALLI dans la vallée de Kfar Hilda (fig.30 et 14 bis), la détection du traceur s'est faite par l'intermédiaire de fluocapteurs. Nous avons le même jour procédé à la mise en place de sachets contenant le charbon actif à DALLI; prélevés avant l'injection, ils ont servi de «blanc» pour le réglage du «zéro» du colorimètre.

Le programme de prélèvements consistait par la suite à immerger un seul fluocapteur à la fois pour une durée déterminée et à le remplacer immédiatement par un autre.

Les lieux d'immersion dans la source ont été choisis à l'abri de la lumière, dépourvus de végétation aquatique et d'écoulement rapide.

Le 19 mars 1985 à minuit fut prélevé un échantillon d'eau, destiné à vérifier un éventuel passage du colorant. Le programme d'immersion et de prélèvement des fluocapteurs est résumé dans le tabl.7.

* Nous n'avons malheureusement pu relever des températures correctes le long du réseau souterrain (variables entre 13.5°C et 16°C), ni relever le degré hygrométrique, l'atmosphère en certains points nous ayant semblé particulièrement sèche.

N°	DATE	HEURE DE MISE EN PLACE DU FLUOCAPTEUR	DATE ET HEURE DE PRÉLEVEMENT	TEMPS ECOULE	TEMPS ECOULE DEPUIS L'INJECTION
1	19/03/85	14h00	20/03/85 - 2h10	12h10084	14h
2	20/03/85	2h10	20/03/85 - 13h25	11h15'	25h15'
3	20/03/85	13h25	21/03/85 - 14h10	24h45'	50h00'
4	21/03/85	14h10	22/03/85 - 14h16	24h06'	74h06'
5	22/03/85	14h16	23/03/85 - 14h20	24h04'	98h10'
6	23/03/85	14h20	24/03/85 - 14h10	23h04'	122h00'
7	24/03/85	14h10	25/03/85 - 15h00	24h50'	146h50'
8	25/03/85	15h00	26/03/85 - 11h30	20h30'	167h20'

Tableau 7: Programme d'immersion et de prélèvements des fluocapteurs.

1.2.1 — Méthodologie

La détection du traceur s'est faite par l'intermédiaire de fluocapteurs, qui consiste à utiliser les propriétés absorbantes du charbon actif pour fixer et retenir les molécules de fluorescéine présentes dans l'eau. Le lavage ultérieur du charbon actif par un faible volume de potasse alcoolique permet la restitution du colorant.

1.2.2 — Les opérations de laboratoire

Nous avons utilisé à cet effet une solution alcoolique de potasse en raison de la bonne solubilité de la fluorescéine, aussi bien dans l'alcool qu'en milieu alcalin.

Cette solution a été préparée en dissolvant les pastilles de potasse caustique dans de l'alcool absolu de densité 0,79.

La proportion de potasse dans l'alcool doit théoriquement être comprise entre 5% et 10% en poids la restitution de la fluorescéine étant d'autant plus rapide que la concentration de potasse est plus forte. Elle ne doit ce-

pendant pas dépasser les 10% prévenant ainsi le jaunissement rapide de la solution par formation de carbonates.

Après de nombreux tâtonnements, nous avons opté pour une solution alcoolique à 8%, utilisée dans les 24 heures qui suit sa préparation.

La technique consiste alors à sécher les grains de charbon à l'étuve puis à en prélever 1 gramme que l'on met dans un tube à essai en contact avec 8c.c. de solution alcoolique de potasse à 8%. Les échantillons sont ensuite placés durant 48 heures à l'abri de la lumière, dans une enceinte à température constante.

L'éluat est mis dans les éprouvettes spéciales du colorimètre destinées aux mesures de concentration de la fluorescéine.

L'appareil utilisé est de marque CORNING, modèle 253. Il est équipé d'une série de filtres dont les longueurs d'ondes varient entre 400 et 700 nanomètres. La solution de fluorescéine étant de couleur verte, les

filtres adéquats doivent avoir des longueurs d'onde variant entre 485 et 620nm.

Les mesures colorimétriques sont basées sur la loi de «**BEER LAMBERT**» où:

D.O. = $\log 1/\%T$

D.O. = densité optique

% T = pourcentage de «transmittance»

Nous avons sélectionné la longueur d'onde adéquate en mesurant la D.O. de l'échantillon le plus concentré avec plusieurs longueurs d'onde. Il s'est avéré dans tous les essais que le filtre le plus adéquat est celui dont la longueur d'onde est à 510nm.

Mesure des concentrations

La mesure absolue de la concentration en fluorescéine de la solution a été faite en mesurant d'abord la densité optique (D.O.) au colorimètre et en calculant ensuite la concentration correspondante.

A partir d'un échantillon prélevé de la solution mère, dont la concentration est connue, on obtient des solutions de moins en moins concentrées par dilutions volumétriques successives, dont on mesure leur D.O. Les valeurs obtenues sont reportées sur un papier graphique portant en abscisses les concentrations et en ordonnées les D.O. La droite passant au mieux par tous les points (appelée courbe d'étalonnage) est caractérisée par une équation de la forme $y = ax + b$ à partir de laquelle on obtient les concentrations correspondantes des solutions.

Les dilutions successives réalisées et la courbe d'étalonnage obtenue sont indiquées dans les tabl. 8 et 9 et la fig. 17.

1.2.3 — Etablissement de la courbe d'étalonnage

La concentration ($C = 25\text{kg}/125 + 25 + 12.5 = 0.154\text{kg/l}$) est liée à la D.O. par l'équation suivante (fig.17).

$$D.O. = 98549.291 [C] \text{ kg/l}$$

1.2.4 — Interprétation

L'échantillon d'eau prélevé à minuit, soit 12 heures après l'injection du colorant dans le gouffre de **BALOUAA BAATARA**, a indiqué une concentration nulle de fluorescéine. Par contre, le 1^{er} fluocapteur placé au même moment et retiré 2 heures plus tard a donné le maximum de concentration de fluorescéine. Cela prouve que le colorant a atteint la source de **DALLI** entre minuit et 2 heures du matin, soit entre 12 et 14 heures après l'injection. Nous admettrons qu'il a mis un temps moyen de 13 heures pour franchir la distance entre la perte et la source estimée en ligne droite à 6.3km. La vitesse moyenne du parcours serait de 13.5 cm/sec.

De plus, il est certain que le colorant a continué à se manifester jusqu'au 20 mars 1985, à 13h25, soit pendant 12 heures environ après qu'il ait atteint la source. Il se peut que ce temps soit plus long, le troisième prélèvement du fluocapteur (voir tabl.9) ayant été effectué bien plus tard. Les concentrations mesurées donnent des valeurs cumulées et il n'est pas possible dès lors de préciser exactement le temps du passage total du colorant.

Il est cependant certain qu'il s'est manifesté à la source de **DALLI** 13 heures après son injection dans la perte de **BAATARA** et qu'il a continué par la suite à se manifester durant au moins douze heures.

[C] kg/l	D.O.
$9.84 \times 1E - 6$	0.96
$4.92 \times 1E - 6$	0.495
$3.28 \times 1E - 6$	0.331
$2.46 \times 1E - 6$	0.245
$1.64 \times 1E - 6$	0.17
$9.84 \times 1E - 7$	0.087
$4.92 \times 1E - 7$	0.049
$9.84 \times 1E - 8$	0.01

Tableau 8: Densités optiques des différentes dilutions effectuées.

N° DES ECHANTILLONS	D.O.	[C] (kg/l)
1	0.575	$5.83 \times 1E - 6$
2	0.155	$1.57 \times 1E - 6$
3	0.025	$2.53 \times 1E - 7$
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
ECHANTILLON D'EAU	0	0

Tableau 9: Densités optiques des échantillons prélevés et leurs concentrations correspondantes.

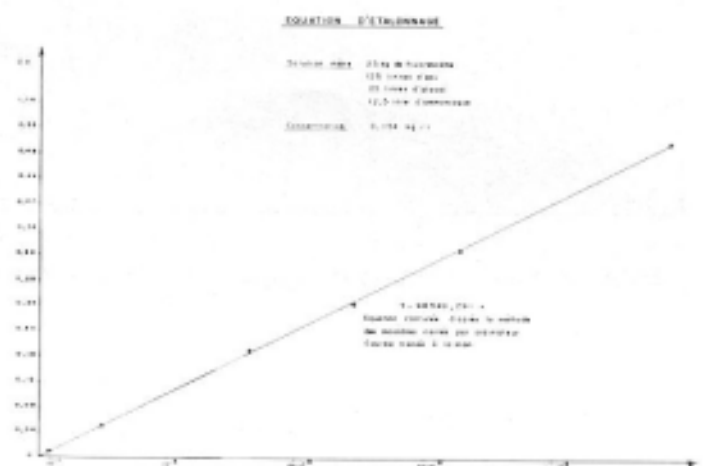


Figure 17: Equation d'étalonnage (gouffre de Baatara -1985).

Le résumé de cette coloration figure dans le tableau 10).

II — EXPLORATION SPELEOLOGIQUE ET COLORATION DE BALOUAA BALAA

BALOUAA BALAA⁽¹⁾: (fig.18a et 18b)

Coordonnées:

X = 164,040 km Feuille de Qartaba D-5 au 1/50.000

Y = 248,500 km Feuille de Hasroun O-7 au 1/20.000

Z = 1475 m

Développement 250m: profondeur: -152m

II — TOPOGRAPHIE ET MORPHOLOGIE

par A. BECHARA et S.KARKABI.

II.1 — Description générale (fig.18a et 18b)

Deux cours d'eau semi-permanents s'y précipitent en période de pluie et à la fonte des neiges.

(1) Balaa: en arabe signifie «perte» ou «gouffre profond». (Toponymie des villes et villages du Liban- par Amine FREIHA, aux éditions de l'Université américaine de Beyrouth, p.63). Il a donné son nom à la région où il se trouve.

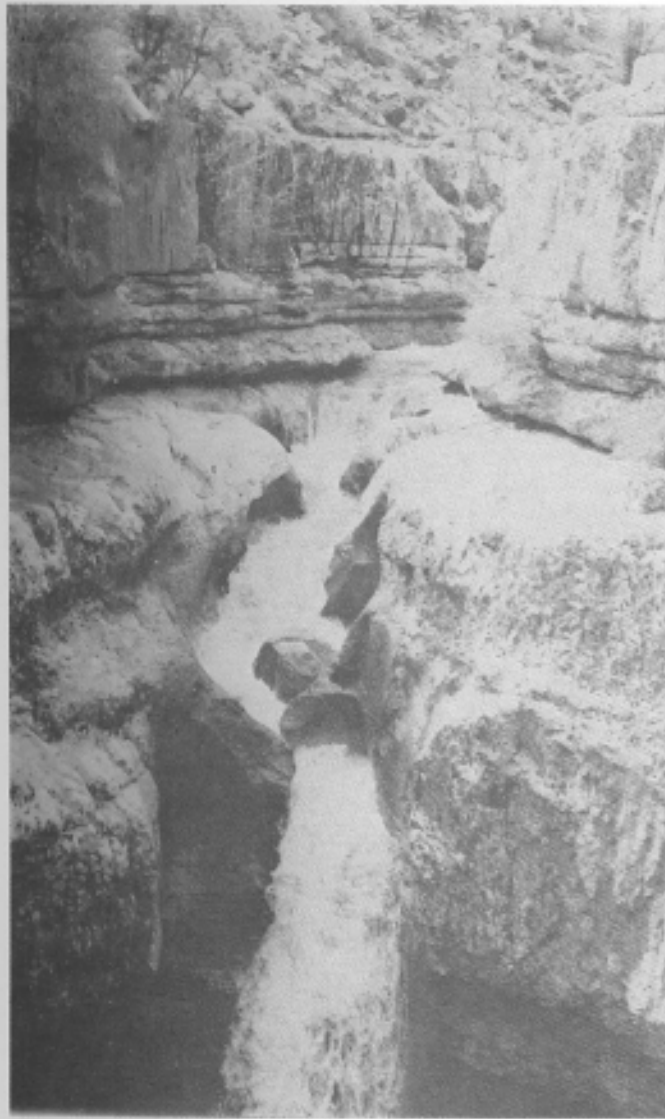


Photo 28: Balouaa Balaa. On devine au haut de la photo le sapement du J5 et le surcreusement du Ouadi Ghabyé dans le J4b.

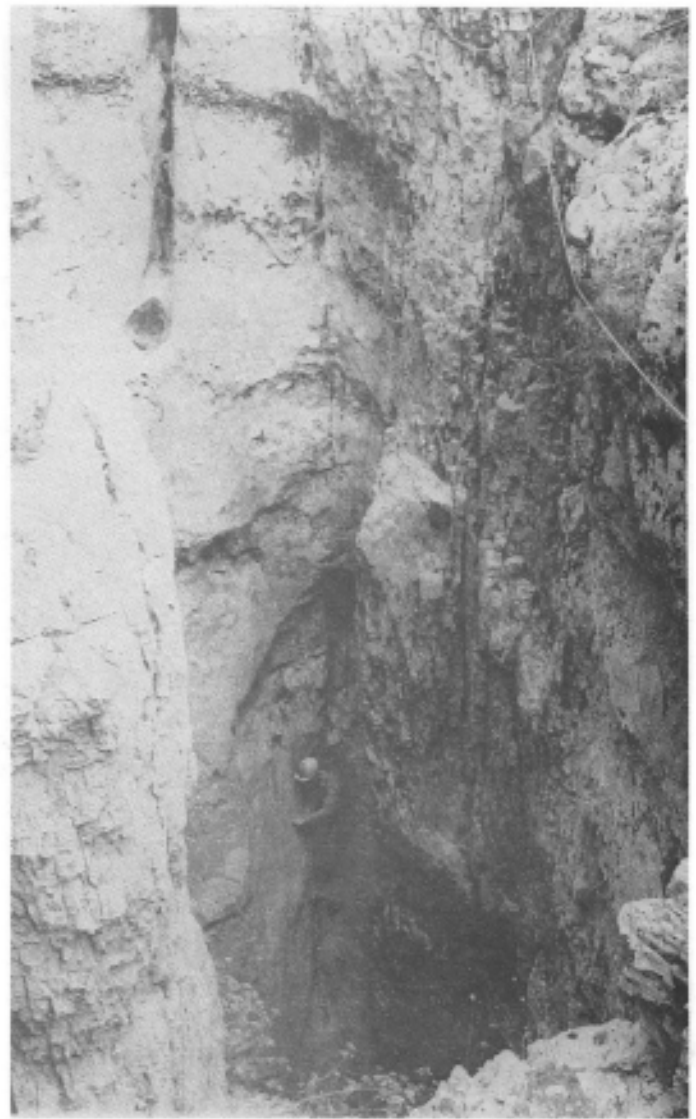


Photo 29: En contact intime avec la faille, le départ du P55.

Le premier est un torrent (Ouadi Ghabyé) qui débite en période de crue plusieurs mètres cubes/ seconde. Il est alimenté principalement par Nabaa Moghraq, Nabaa ech Chaikh, Nabaa el Kiddab, Nabaa ech Chaouiyé, et par le massif du Moghraq (1760m) et ses sources satellites: Aïn Slamé ez Zghiré, Aïn Maqial Slamé, Nabaa es Seghir au sud-est et à l'est⁽²⁾.

Le second est un ruisseau qui naît du massif du Moghraq et qui se précipite à l'est dans le gouffre de Balouaa Balaa (fig.14 et 14 bis).

L'ouverture du gouffre longiforme suit intimement la faille de direction est-ouest (fig.30 et 18a). Elle se présente comme une vaste entaille de 80 mètres de long sur 34 de large. La surface extérieure de l'ouverture est d'environ 700m².

Le torrent qui coule dans le Ouadi Ghabyé rejoignait le ruisseau à la commissure est de la perte pour s'enfoncer le long d'une diaclase en contact avec la faille (ph.29). Il s'en est suivi par élargissement puis par soutirage l'effondrement du sol recouvrant les galeries souterraines drainant les eaux superficielles et une transformation géographique des lieux.

Le même phénomène se répétant plusieurs fois permit l'échancrure de la lèvre sud jusqu'à la position d'engouffrement actuel du torrent (ph.30).

(2) Informations données par B. HAKIM;

A l'aval du Ouadi Ghabyé, c'est-à-dire au nord de la perte, la vallée conserve un profil adouci dont la contre-pente (nord-est) aux abords du gouffre est parsemée de chicots du J4, alors que le sol aménagé en terrasses pour l'agriculture est recouvert d'argile, de tufs et de blocs basaltiques non en place.

Signalons d'autre part que les murs de soutènement des terrasses agricoles qui délimitent en est et nord la lèvre du gouffre ont pour appareillage des blocs non équarris de basalte.

II.1.1 — La perte-gouffre de Balouaa Balaa

Exploré depuis 1952 par le Spéléo-Club du Liban, ce gouffre a été descendu en différents points de la face nord et est. En 1988, il a été jugé plus confortable de l'entreprendre par sa partie la moins exposée aux chutes de pierres, à savoir au sud-est de la perte du ruisseau (fig.18a).

Ce puits apparaît comme étant la première intrusion de la perte subaérienne. Les parois sont très corrodées au sud et à l'est. Le nord qui accuse le rejet du J4 est extrêmement lapiazé et est percé d'ouvertures en conduites forcées qui rejoignent un système complexe de ressauts, plates-formes et éboulis aboutissant au pied du P55.

Le gouffre reste largement ouvert et éclairé jusqu'à

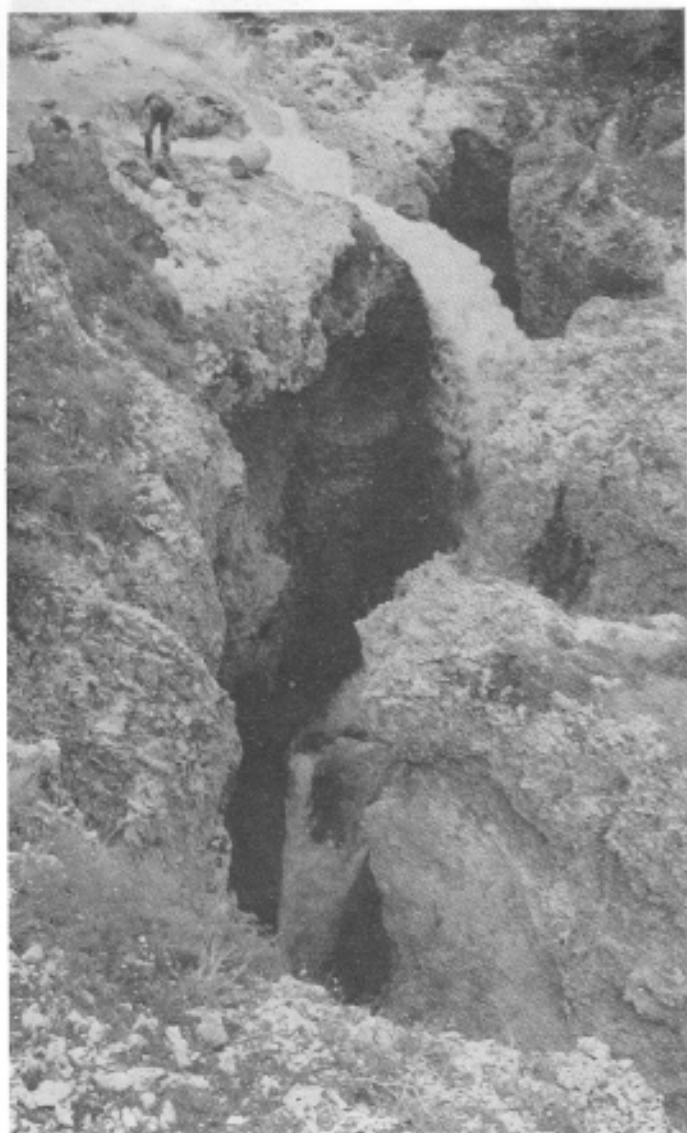
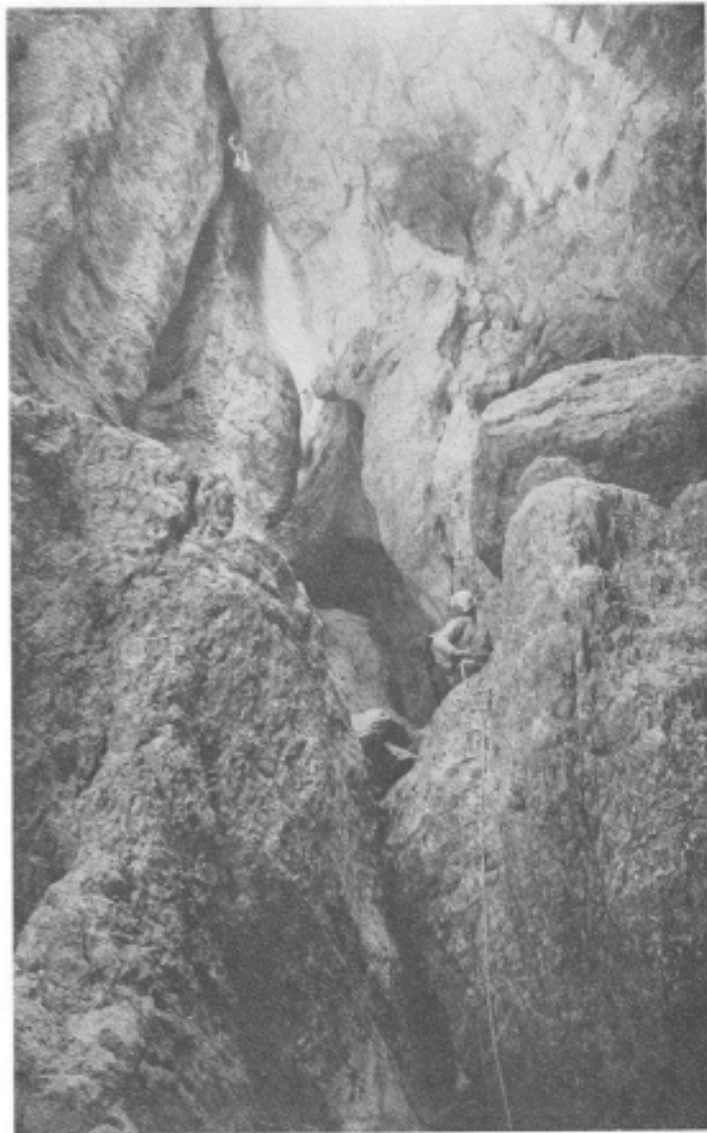


Photo 30: Les différentes phases d'érosions superficielles et le recul progressif du Ouadi Ghabiyé. Face au torrent qui se déverse dans le gouffre on distingue l'entaille au pied de laquelle s'ouvre la cheminée remontante (Ph. Gérard TOHME).



Photos 31: Succession de ressauts et de marmites qui longent la faille.

—108 mètres. Une suite de petits ressauts de 5 à 10 mètres (ph.31-32) jalonnent ce parcours jusqu'à atteindre un grand porche abritant la suite du réseau.

En période de crue, au point d'impact où s'écrase la trombe d'eau (—82m) une cheminée (accessible en escalade) apparaît avoir été provoquée par le choc des terribles coups de bélier dus à la remontée rapide des eaux dans ce conduit aveugle. L'érosion et la corrosion qui suivirent, provoquèrent l'effondrement de la voûte, témoin les éboulis accumulés à sa base.

Jusqu'à profondeur de 108m, le gouffre garde une morphologie de réseau à circulation rapide: marmites plus ou moins profondes au niveau des ruptures de pentes, coupoles de corrosion karstiques échelonnées le long des fissures, parois lisses, vagues d'érosion...

A—108m, un large porche domine un puits de —25m et annonce la partie du réseau qui s'enfonce sous terre. La paroi sud qui n'est autre que le miroir de faille se prolonge d'est en ouest. Elle est percée de nombreux trous inaccessibles alors que celle exposée au nord présente à son flanc une coulée d'argile et de boue dont l'origine n'a pu être précisée et qui est restée imparfaitement explorée.

Au pied du P25, une grande salle dont le sol est cou-

vert de boue et de caillasse de toutes sortes se poursuit en une galerie étroite et haute suivant fidèlement la faille.

A droite du P25 s'ouvre une cavité circulaire d'une douzaine de mètres de diamètre, dans laquelle s'est accumulée une très grande et épaisse couche d'argile. Elle est partagée en deux par un profond sillon témoin d'une circulation d'eau récente également de direction est-ouest.

Le sol de la galerie en contact avec la faille est recouvert de boue et de fins gravillons. Une cheminée aveugle l'interrompt et a été remontée sur 10 mètres. Elle offre à son extrémité une cloche sans issue.

Au-delà, la galerie se rétrécit et une tentative de désobstruction s'est avérée négative en raison de la difficulté à se mouvoir dans ce boyau étroit et du temps qu'il aurait fallu consacrer à un travail dont le résultat semblait hypothétique.

Ce déblayage sur six mètres de long a fourni un matériau composé de sables, d'argiles et de gravillons, alors que les parois des parties découvertes étaient enduites jusqu'aux plus petits interstices d'une épaisse couche de boue.

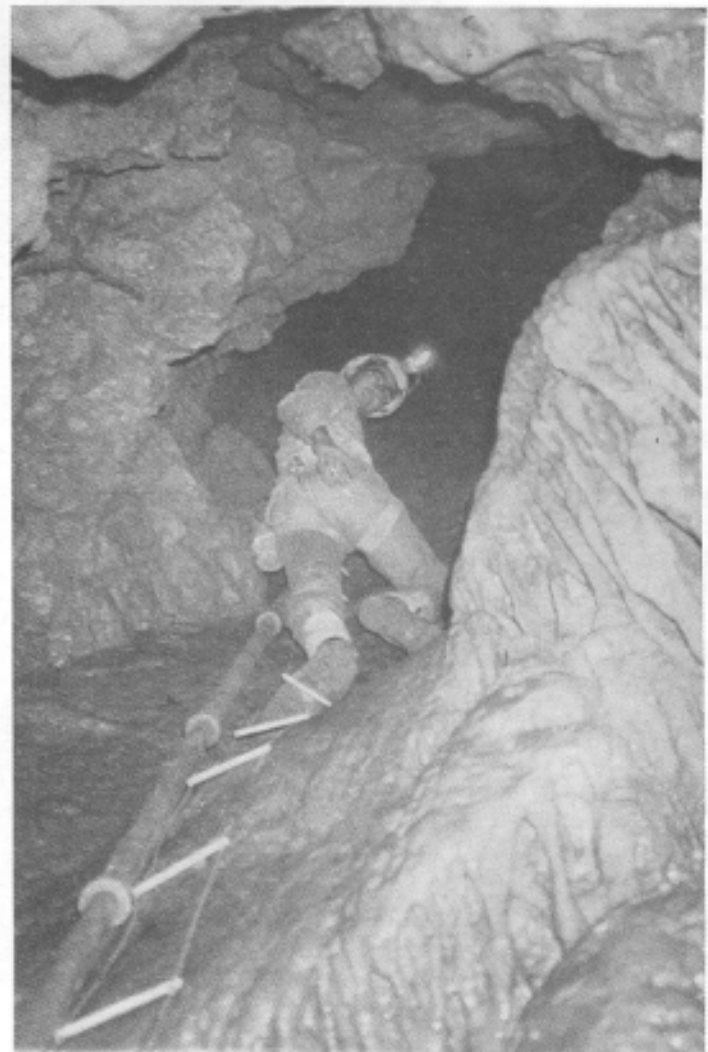
La morphologie de cette seconde partie du gouffre (à partir de -108m mètres tout au moins) apparaît subir de longue date les conséquences d'un régime noyé à circulation lente. Les réseaux colmatés du fond semblent le prouver clairement.

II.1.2 — OBSERVATIONS

— Ce gouffre a subi des transformations majeures depuis 1987 (exploration effectuée par H.BADAoui, M.MAJDALANI, A.SAïD, E.ZAYEK). Un remplissage estimé à plus de 7 mètres d'épaisseur a comblé les galeries du fond (le P25 faisait -30m). Ce phénomène malheureusement assez fréquent au Liban est dû à de nombreuses raisons dont, entre autres, l'aménagement de terrasses agricoles, éliminant la couverture végétale naturelle et favorisant l'émigration des terres vers les vallées qu'elles dominent. C'est le cas du **gouffre de Mechmiché** (premier puits de -30) et de **Tarchich** (premier puits de -95).

— Lors de la coloration du 30 avril 1988, se formait à -60 mètres un plan d'eau, qui malgré un apport de plus d'un m³/s ne modifiait pas son niveau. Le reste du réseau compris entre cette cote et le fond étant noyé. Se trouverait-il en ce point un réseau secondaire servant de trop-plein et pénétrable?

— Lorsque le débit est plus important, en période de crue exceptionnelle par exemple, le gouffre peut se remplir et même déborder. Les paysans de Balaa nous ont affirmé l'avoir vu noyé un certain nombre de fois. Nous avons pu nous-mêmes constater que suite à l'hiver particulièrement humide de 1987-88, le gouffre, ayant largement débordé, a déposé sur les terrasses avoisnantes (au nord et à l'est) une épaisse couche de limon et de brindilles de toutes sortes. Les anfractuosités et les petites plates-formes du lapiès en bordure étaient aussi entièrement recouvertes de sable et d'argile (ph.33).



La cheminée remontée au mât dans le gouffre de Balaa.



Mesures de débit de la perte de Ouadi Baatara le 30 avril 1988.

II.2 — Mesures de débit: calcul et report

(au moulinet par Michel **MAJDALANI**)

(Par La méthode chimique de dilution par Jacques **LOI-SELET**).

Des mesures de débit ont accompagné la coloration. Deux buts principaux étaient recherchés par ces opérations de jaugeage. Le premier consistait à déterminer le débit total de l'eau qui se perd dans les gouffres de **BALOUAA BALAA** et **BALOUAA BAATARA**, afin de les comparer au débit de la source de **DALLI** (fig.14 bis), ces paramètres étant nécessaires à la détermination de la quantité de colorant récupéré. Le second consistait à détecter l'existence de pertes ou d'apports d'eau dans un tronçon de la vallée de **OUADI TANNOURINE** situé à l'amont de la source de **DALLI**. Les premières mesures ont été effectuées au moulinet (voir annexe I) et les secondes par la méthode chimique de dilution (voir annexe II)

Enfin, une troisième mesure effectuée au moulinet consistait à déterminer le débit total de la source de **DALLI**.

II.2.1 — Mesures effectuées au moulinet (M.MAJDALANI).

A - BALOUAA BALAA: Débits des deux arrivées d'eau alimentant la perte de ce gouffre:

Lors de la réalisation des mesures (29/05/88), deux cours d'eau superficiels se déversaient dans le gouffre de **BALAA**. Le plus important était celui qui coulait en S.E. - N.W. Le second de moindre importance coulait en E.W. Son débit a été mesuré volumétriquement (fig.14).

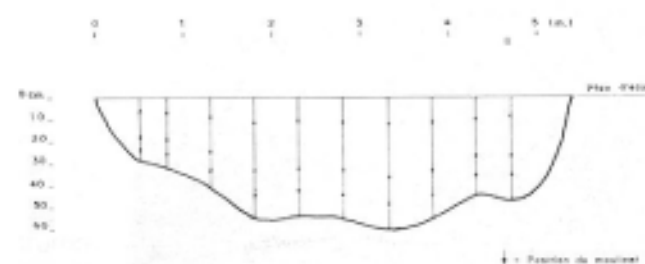


Figure 19: Coupe de la section de Ouadi Ghabiyé (Balouaa Balaa).

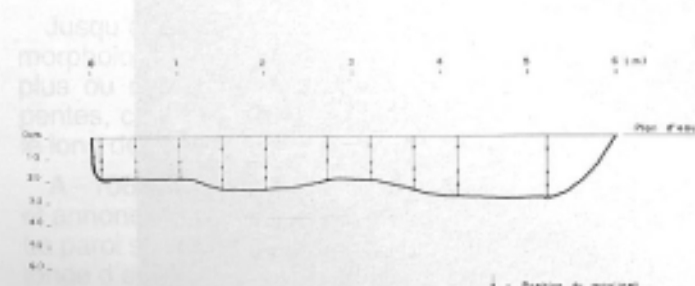


Figure 20: Coupe de la section de Ouadi Baatara.



Photos 32: Succession de ressauts et de marmites qui longent la faille.

Débit de la perte principale:

Largeur de la section: 5.4 mètres.

Le débit calculé est de: $Q_1 = 1.04567 \text{ m}^3/\text{sec}$; soit 1045.67 l/sec. (fig. 19).

Débit de la perte secondaire:

Temps moyen pour remplir un volume de 4.12 litres: 4.76 sec.

Le débit calculé: $Q_2 = V/t = 4.12/4.76 = 0.87 \text{ l/sec}$.

Débit total des deux ruisseaux:

$Q = Q_1 + Q_2 = 1045.67 + 0.87 = 1046.54 \text{ l/sec}$.

B - Débit du cours d'eau superficiel qui se perd dans le gouffre de BAATARA (trois ponts)

Largeur la section: 5.8 mètres.

Le débit calculé est de: $Q_3 = 0.73108 \text{ m}^3/\text{sec}$; soit 731.08 l/sec. (fig. 20).

C - Débit total de l'eau qui se perd dans les deux gouffres

$Q = 1046.54 + 731.08 = 1777.62 \text{ l/sec}$.



Photo 33: Les chicots à l'entrée du gouffre sont fraîchement recouverts de limon, traces du débordement de l'hiver 1988.

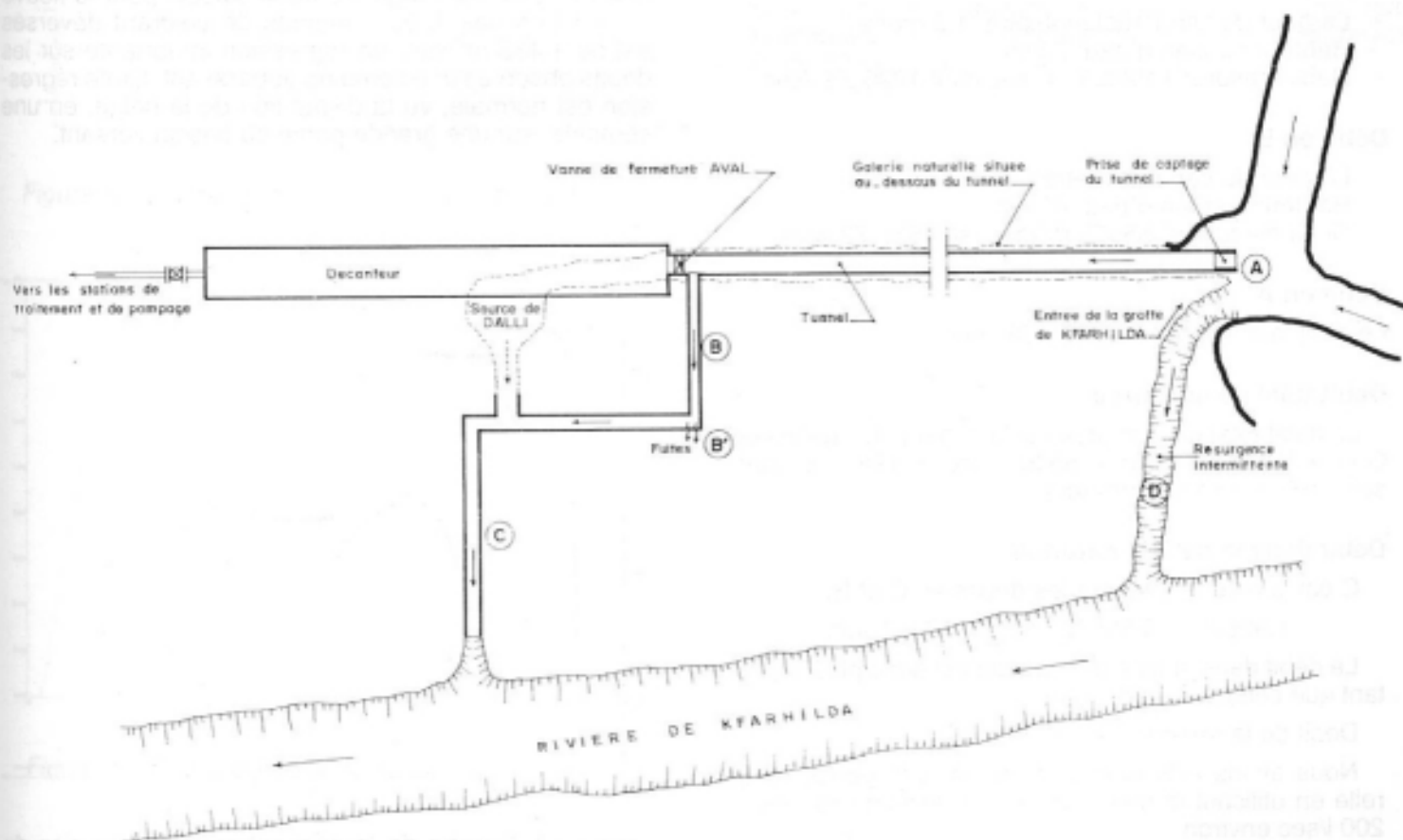


Figure 21: Plan de situation des prélèvements à Dalli-Ghaouaouit.

Source de DALLI

Le débit total de la source de DALLI est la somme de 3 écoulements (fig.21).

- L'écoulement dans le canal souterrain dont la fermeture de la vanne murale à l'aval coupe l'alimentation des stations de traitement et de pompage et dévie toute l'eau dans la canalisation de trop-plein, ce qui permet de mesurer son débit; soit Q_1 .

- L'écoulement dans la galerie naturelle qui débouche à la source de DALLI et dont l'eau, captée dans un canal, peut être facilement jaugée; soit Q_2 .

- L'écoulement de l'eau qui jaillit de la grotte naturelle (GHAOUAOUIT) et qui se déverse dans la rivière de KFAR HILDA. Or, cet écoulement est intermittent et ne fonctionne qu'en période de hautes crues quand le débit total de la rivière ne peut plus passer entièrement dans le canal souterrain et la galerie naturelle; soit Q_3 . Les observations que nous avons effectuées nous ont montré que ce système a fonctionné, entre 15h et 19h, le 21/04/88. Nous attribuons ce phénomène à l'effet de la fonte des neiges.

Par conséquent, en fermant la vanne aval du canal et en mesurant le débit en C, nous obtenons le débit total de la source à condition que la résurgence intermittente (A) ne fonctionne pas.

Les mesures effectuées sont les suivantes:

- Jaugeage en C pour obtenir le débit total.
- Jaugeage en B pour obtenir le débit du canal.
- La différence des débits mesurés en B et C donne le débit d'eau dans la galerie naturelle.
- Débit en B' pour mesurer les fuites du canal.
- Débit en D pour estimer le débit de la résurgence intermittente qui semble très variable durant les 4 heures où il a fonctionné.

Débit en C

- Largeur du canal rectangulaire: 1.3 mètre.
- Hauteur du plan d'eau: 73 cm.
- Débit mesuré: $1.92625 \text{ m}^3/\text{sec}$; soit 1926.25 l/sec .

Débit en B

- Largeur du canal: 1 mètre.
- Hauteur du plan d'eau: 42 cm.
- Débit mesuré: $0.55572 \text{ m}^3/\text{sec}$; soit 555.72 l/sec .

Débit en A

Le débit des fuites est de: 55.33 l/sec .

Débit total de la source

Le débit total de la source est la somme des débits en C et A ($1926.25 \text{ l/sec} + 55.33 \text{ l/sec} = 1981.58 \text{ l/sec}$; soit $1.98 \text{ m}^3/\text{sec}$ ou $2 \text{ m}^3/\text{sec}$).

Débit dans la galerie naturelle

C'est la différence entre les débits en C et B.

$$1.92625 - 0.55572 = 1.37053 \text{ m}^3/\text{sec}.$$

Le débit dans la galerie naturelle est donc plus important que celui du canal.

Débit de la résurgence naturelle: (D)

Nous avons estimé le débit de la résurgence naturelle en utilisant la méthode des vitesses moyennes à 200 l/sec environ.

Par conséquent, le débit total de la source de DALLI était le 29 mai 1988 de $2.2 \text{ m}^3/\text{sec}$.

N.B.:

3 autres sources ont été observées lors de la réalisation de la coloration: ce sont les sources de **LEFTAH**, **TANNOURINE** et **BOU NASR**, dont les débits étaient les suivants:

Source LEFTAH	: 308.82 l/sec .
Source TANNOURINE	: 15.76 l/sec .
Source BOU NASR	: 14.3 l/sec . (méthode volumétrique).

Celles de **TANNOURINE** et de **BOU NASR** sont complètement indépendantes du système karstique de la source de **DALLI**, mais représentent plutôt des exutoires de nappes perchées au sein de la masse dolomitique du Jurassique. La source de **LEFTAH**, par contre, représente l'exutoire de l'aquifère Cénomani.

Nous n'avons pas été autorisés à vérifier le jour de l'injection les sources de l'usine d'embouteillage de **TANNOURINE**.

II.2.2 — Mesures de débit sur le OUADI TANNOURINE par la méthode chimique (Jacques LOISELET)

La coloration «AMONT» a été effectuée au pied du village de **HAI EL KARM** au point nommé **TAHOUN BASSA**.

$$\begin{aligned} X &= 163.75 \\ Y &= 252.53 \\ Z &= 890 \text{ m (fig.30)} \end{aligned}$$

La distance entre le point de déversement du colorant et le point de prélèvement est de 150 mètres environ. La quantité de colorant déversée, 1 kilogramme de fluorescéine, a été mise en solution dans 15 litres d'eau, additionnés de 0.5 litre d'alcool dénaturé et 0.5 litre d'ammoniaque. Les prélèvements ont été effectués de 30 en 30 secondes. La courbe d'évolution de la fluorescéine est régulière (fig.22) et la concentration maximum élevée: 6.25 mg/l . Le débit calculé pour le fleuve en fonction des 1000 grammes de colorant déversés est de $1.435 \text{ m}^3/\text{sec}$, en régression importante sur les débits observés une semaine auparavant. Cette régression est normale, vu la disparition de la neige, en une semaine, sur une grande partie du bassin versant.

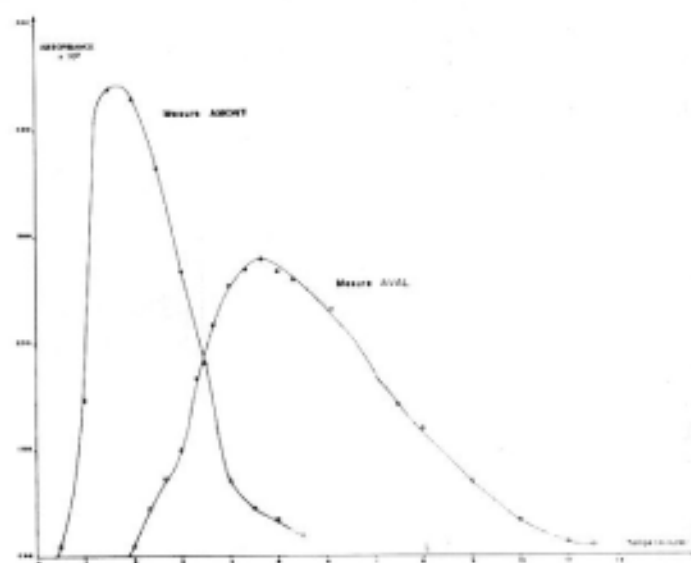


Figure 22: Courbe de la concentration en fonction du temps (mesures de débit aval et amont du Ouadi Tannourine).

La coloration «AVAL» a été effectuée au niveau de la grotte de KFAR HILDA et du dispositif de prise d'eau.

X = 160.88
Y = 253.61
Z = 600 m

La distance entre le point d'injection du colorant (100 mètres environ en amont de l'émissaire naturel de la grotte) et le point de prélèvement des échantillons (sous le pont situé au niveau du réservoir) est d'environ 300 mètres. La courbe obtenue est régulière, plus étalée que la courbe d'AMONT, et culmine à 2.57 mg/l.

Le débit calculé à partir des 1000 grammes de fluorescéine utilisés est de 1.478 m³/seconde. La différence avec le débit d'AMONT pourrait bien être attribuée à l'erreur expérimentale, mais n'en a pas besoin: le débit d'un trop-plein de canal d'irrigation, situé entre les points d'injection et de prélèvement, y correspond à peu près.

II.2.3 — CONCLUSIONS

On peut donc en conclure qu'il n'existe ni perte, ni apport d'eau dans la zone accidentée encadrée par les mesures AMONT et AVAL.

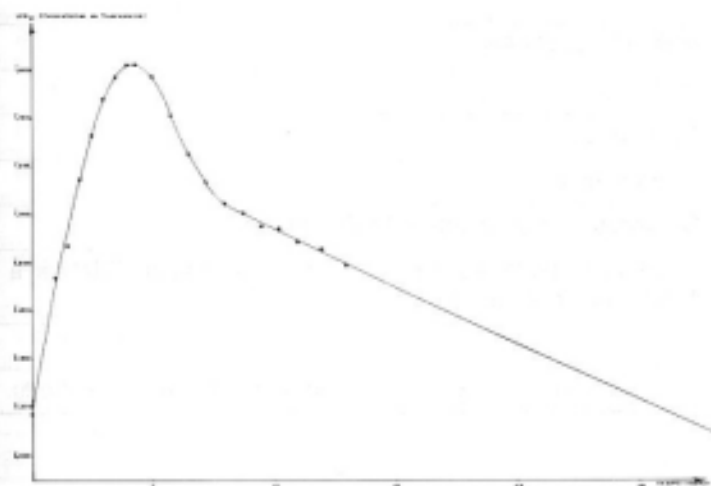


Figure 23: Evolution de la fluorescéine (point A).

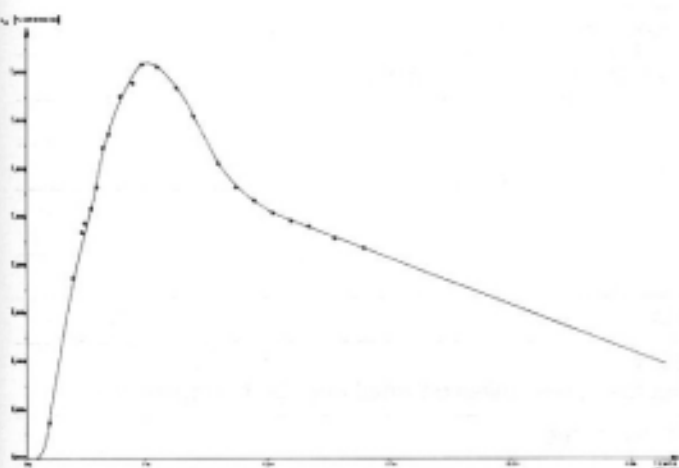


Figure 24: Evolution de la fluorescéine (point B).

II.3 — La coloration du gouffre de BALAA

Jacques LOISELET S.J.

Prof. à la Faculté de médecine (U.S.J.)

25 kilogrammes de fluorescéine (sel de sodium) ont été dissous dans 2 tonneaux contenant chacun 30 litres de l'eau du torrent, additionnés chacun de 15 litres d'alcool dénaturé et 7.5 litres d'ammoniaque concentré. A 10 heures du matin le 29 avril, les 2 tonneaux ont été renversés dans le torrent immédiatement en amont de la série de cascades par lesquelles il se précipite dans le gouffre.

La fluorescéine est apparue en un seul des points surveillés: la source émissaire de la grotte de GHAOUAOUIT. Trois points de prélèvement ont été utilisés sur cette source et le système par lequel une partie du débit en est prélevée pour être distribuée dans la région (fig.21). Le point A, dans la grotte même, est situé au voisinage du puisard de prélèvement. Le 1^{er} mai 1988, l'émissaire naturel de la grotte vers le torrent du NAHR EL JAOUZ (nommé OUADI TANNOURINE dans cette portion amont de son cours) était tari, et tout le débit de la grotte passait dans la conduite de prélèvement. Le point B est situé sur le trop-plein situé immédiatement en amont du déversement de la conduite dans le réservoir. Le point C est situé dans le canal d'évacuation qui conduit au NAHR EL JAOUZ l'eau provenant de la conduite mentionnée plus haut, et de la galerie naturelle de la grotte (fig.21).

Les premières traces de colorant ont été repérées dans l'eau prélevée à 3 heures du matin (soit 17 heures après la coloration) aux points A et B. Le taux de colorant s'est élevé régulièrement jusqu'à un maximum situé à 7h10 du matin, puis a décliné régulièrement (fig.23 et 24). Les courbes obtenues aux points A et B sont synchrones, et les concentrations obtenues pratiquement égales en chacun des 2 points. A partir de 12h le 1^{er} mai 1988, la décroissance est devenue exponentielle, comme le montre, en coordonnées semi-logarithmiques, la droite obtenue par les 5 points observés entre 12h et 16h.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le «Centre de Recherches Marines» du CNRS qui nous a très aimablement accueillis pour les dosages effectués sur son spectrofluorimètre et la maison ELECTRA qui nous a gracieusement prêté un stabilisateur de courant.

Tableau 10 - Fiche signalétique de la coloration de Baatara-Dalli.

INJECTION

LIEU	Dénomination	Gouffre Baatara
	Carte au 1/20.000e	Douma 06
	Coordonnées Lambert	X = 163,570 km Y = 248,140 km Z = 1480 m
Auteurs	Michel MAJDALANI	
Date	19/03/1985	
Heure	12 h 10'	
Nom du traceur	Fluorescéine	
Géologie	Calcaires de Kesrouane - Jurassique J4.	
Conditions d'injection	Injection instantanée dans le torrent de Ouadi Baatara à 150 m à l'amont de la perte.	
Débit d'eau en l/s	—	
Quantité du traceur	25 kg dilués dans 18 l d'alcool dénaturé et 144 litres d'eau.	

RÉAPPARITION

LIEU	Dénomination	Sources Nabaâ Dalli
	Carte au 1/20.000 ^e	Douma 06
	Coordonnées Lambert	X = 161,250 km Y = 253,320 Z = 620 m
Date et heure de la première réapparition	20/03/1985 à 1 heure du matin	
Débit en l/s	—	
Géologie	Calcaires de Kesrouane - J4	

RÉSULTATS

Distance théorique en m.	6300 m.
Dénivellation théorique en m.	860 m.
Pente théorique en %	13,65%
Temps d'apparition en h.	13 heures après l'injection (méthode de fluocapteurs)
Vitesse théorique d'apparition en m/h	484,6 m/heures
Durée approximative de la restitution du traceur en h.	12 heures
Temps modal en h.	—
Vitesse théorique modale en m/h	—
Temps moyen en h.	—
Vitesse théorique moyenne en m/h	—

Tableau 11 - Fiche signalétique de la coloration Balaa-Dalli.

INJECTION

LIEU	Dénomination	Gouffre Balaa
	Carte au 1/20.000e	Hasroun 07
	Coordonnées Lambert	X = 164,040 km Y = 248,500 km Z = 1475 m
Auteurs	Membres du S.C. LIBAN	
Date	1/05/1988	
Heure	10 heures	
Nom du traceur	Fluorescéine	
Géologie	Calcaires de Kesrouane J4 - Jurassique	
Conditions d'injection	Injection instantanée dans torrent Ouadi' Ghabiyé (perte temporaire)	
Débits d'eau en l/s	1046,54 l/sec	
Quantité du traceur	25 kg. dilués dans 60 litres d'eau, 15 litres ammoniacque et 30 litres d'alcool dénaturé.	

RÉAPPARITION

LIEU	Dénomination	Sources Nabaa Dalli et Grotte Ghaouaouit.
	Carte au 1/20.000 ^e	Douma 06
	Coordonnées Lambert	X = 161,250 km Y = 253,320 Z = 620 m
Date et heure de la première réapparition	20/05/1988 à 3 heures du matin	
Débit en l/s	2200 l/sec.	
Géologie	Calcaires de Kesrouane -J4- Jurassique	

RÉSULTATS

Distance théorique en m.	6200 m.
Dénivellation théorique en m.	860 m.
Pente théorique en %	13,65%
Temps d'apparition en h.	17 heures après l'injection (premières apparitions)
Vitesse théorique d'apparition en m/h	364,7 m/h.
Durée approximative de la restitution du traceur en h.	34 heures (par extrapolation)
Temps modal en h.	21,16 heures (concentration maximale)
Vitesse théorique modale en m/h	292,9 m/h
Temps moyen en h.	22,27 heures (centre de gravité)
Vitesse théorique moyenne en m/h	278,3 m/h.

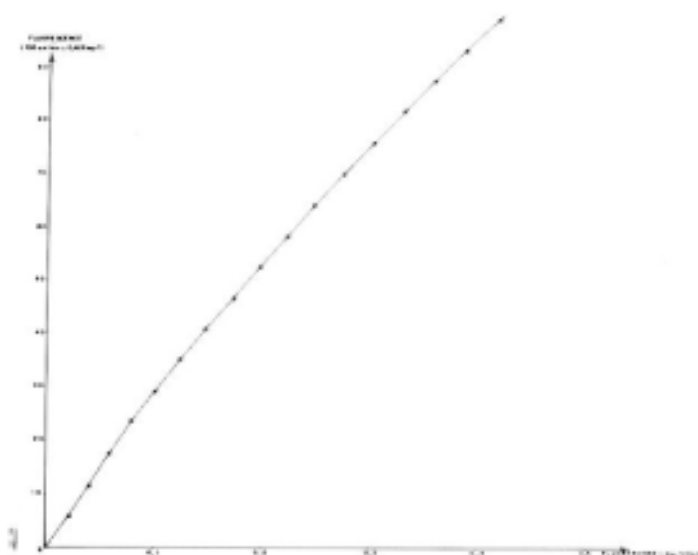


Figure 25: Photométrie de la fluorescéine (493 nm).

II.3.1 — Matériel et méthodes

Le colorant employé a été le sel de sodium de la fluorescéine. Pour tous les dosages, une seule solution étalon à 100 mg/litre de fluorescéine a été utilisée. Pour la réaliser, quelques grammes de fluorescéine ont été prélevés au moment même de la coloration; 100 mg de cette poudre ont été pesés exactement, et dissous dans un volume total de 1000 ml d'eau distillée. Toutes les dilutions suivantes et les gammes d'étalonnage ont été réalisées à partir de l'eau de la source de DALLI employée telle quelle.

Les prélèvements effectués lors de la coloration du gouffre de BALAA ont été dosés par fluorescéine (gamme de concentration observée: de 0.01=0.50 mg/litre). Le spectrofluorimètre (TURNER modèle 430) était réglé sur 493 nm pour l'excitation, et 525 nanomètres pour l'émission. La cuve utilisée, de section carrée, avait 1 centimètre de côté.

La gamme d'étalonnage a été réalisée à partir d'une solution au centième de la solution-étalon dans l'eau de la grotte. La courbe obtenue est proche d'une droite (fig.25). Les échantillons ont été dosés tels quels, sans filtration ni alcalinisation. La fluorescéine était assez intense pour ne pas nécessiter une sensibilité élevée de l'appareil (gammes de sensibilité $\times 3$ et $\times 10$, les gammes disponibles allant de $\times 1$ à $\times 1000$).

Les colorations effectuées dans le torrent pour en mesurer le débit ont fourni des échantillons trop concentrés (jusqu'à 6.25 mg/litre) pour pouvoir être dosés par fluorescence du fait de l'auto-absorption par le colorant. Les dosages ont été réalisés par spectrophotométrie à 493nm, dans un tube cylindrique de 22mm de diamètre intérieur. La solution-étalon a été diluée au 1/16e dans l'eau de DALLI, de façon à construire une courbe d'étalonnage allant de 0 à 6.25 mg/l. La courbe obtenue (fig.26) est assez loin d'une droite, sans doute du fait de l'addition de la lumière fluorescée à la lumière non absorbée, mais elle est assez régulière pour être utilisable sur toute l'étendue de la gamme.

Les observations ont dû être interrompues à 16 heures. La concentration de fluorescéine était alors de 0.06 mg/l au point A, de 0.08 mg au point B. Pour apprécier la masse de fluorescéine passée après la fin des observations, la droite obtenue sur les derniers

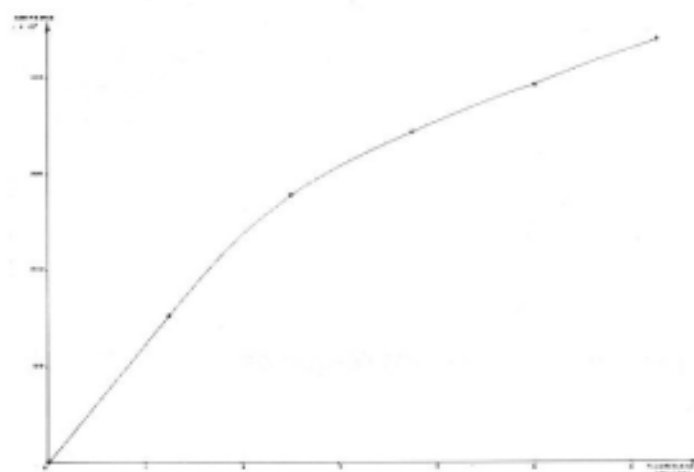


Figure 26: Gamme n°3 de fluorescéine (recalculée).

points a été extrapolée sur les 10 aux 12^h heures suivantes.

La mesure de débit nécessaire au calcul de la masse de fluorescéine écoulee a été pratiquée au moulinet, le 29 avril, dans le canal d'écoulement des trop-pleins (point C) qui présente une section rectangulaire en béton propice à une mesure précise. Préalablement à la mesure, l'écoulement de la conduite dans le réservoir a été observé, de façon que le débit total de la source passe directement par le trop-plein de la conduite au point B et de là au point C (détails de la mesure de débit en annexe I).

Avec le débit observé de 2,2 m³/sec, la masse de fluorescéine calculée au point A est de 20.100 grammes jusqu'à 2 heures du matin, et au point B de 23.100 grammes jusqu'à 4 heures du matin. Cette différence de 0.02 mg/l entre les taux observés aux points A et B sur les derniers prélèvements est minime et reste de l'ordre de l'erreur expérimentale. Elle se traduit par une différence de masse importante, étant donné la durée sur laquelle elle porte puisqu'elle provient surtout de la partie extrapolée de la courbe; elle ne peut avoir de signification précise. Au moins, les 4/5es de la fluorescéine employée pour la coloration, et probablement la quasi-totalité en est donc réapparue à NABAA DALLI.

Des dosages effectués sur les prélèvements faits au point C, il résulte que la courbe de concentration de la fluorescéine est décalée de 25 minutes sur les courbes obtenues aux points A et B, et que les concentrations observées sont inférieures (maximum à 0.37 g/l au lieu de 0.53 g/l). Ces résultats sont tout à fait cohérents avec l'effet tampon de la galerie naturelle reliant la grotte à la source (fig.21). La quantité de colorant passée au point C, d'après les calculs, est de 16.600 grammes. La différence avec la masse calculée en A et B est la fluorescéine diluée dans la galerie naturelle.

II.3.2 — Conclusions

1) L'eau engouffrée à BALLAA resurgit à la source de NABAA DALLI après une durée de parcours de 18 heures à l'arrivée des premières traces, et de 21 heures pour le sommet du pic de coloration. La distance entre le gouffre et la source est de 5,2 kilomètres en ligne droite, et de 6,2 kilomètres en suivant les talwegs. La dénivellation est de 865 mètres.

2) Les eaux engouffrées à BALAA et à BAATARA

semblent se rejoindre rapidement pour resurgir à NABAA DALLI.

3) Les gouffres de BALAA et des trois ponts fournissent à la fin du printemps une fraction importante du débit de NABAA DALLI.

II.4 — INTERPRETATION DE L'ESSAI DE TRAÇAGE DES EAUX DANS LE GOUFFRE DE BALAA (MICHEL MAJDALANI)

L'injection instantanée du traceur que nous avons effectuée dans le gouffre de BALAA et l'observation de sa réapparition à la source de DALLI (Grotte de GHAOUAOUIT), située à une distance de 5-200 mètres à vol d'oiseau ou à 7-000 mètres si on suit le tracé des failles maîtresses, a permis de tracer la courbe de la concentration en fonction du temps (fig.27).

L'observation de cette courbe montre qu'elle a une forme dissymétrique. La concentration croît rapidement, atteint un maximum, puis décroît plus lentement avec une longue «trainée». Elle comporte deux points remarquables: la première apparition du traceur (t_A), le maximum de la concentration (T_M) et le centre de gravi-

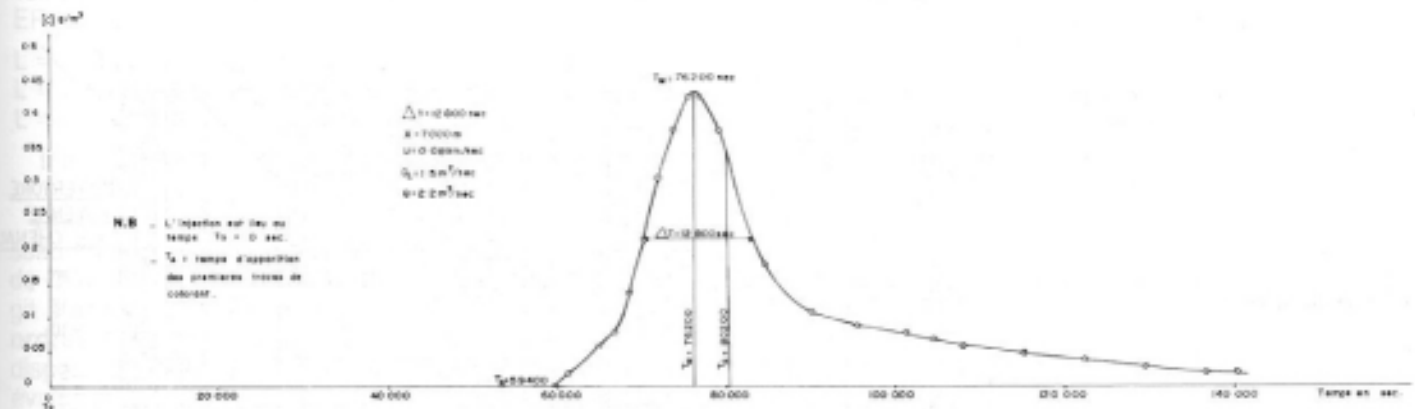
té du nuage correspondant au 50% du poids du traceur (t_G). Donc:

- $t_A = 61200$ sec. après l'injection, soit 17 heures.
- $t_M = 76200$ sec. (temps au bout duquel la concentration a atteint son maximum).
- $t_G = 80200$ sec. (temps au centre de gravité).

De plus, nous avons constaté par calcul que la quantité de colorant restituée est de 20098 grammes (la quantité injectée étant de 25000 g). Le taux de restitution est donc de 80% environ, ce qui est acceptable. Les pertes pourraient être dues au temps de contact avec la roche, à la nature minéralogique de la roche, à l'absorption elle-même fonction de la surface spécifique du matériau, à la destruction avec le temps, aux réactions chimiques et au temps de transfert.

L'analyse de la restitution des concentrations, dans l'eau, du traceur, en fonction du temps, à la résurgence, permet de calculer la vitesse moyenne du transfert, le coefficient de dispersion longitudinale et donne une idée de l'ouverture moyenne du conduit karstique.

Figure 27: Coupe de restitution du colorant (Balaa).



Etant donné que la décroissance des concentrations avec le temps est exponentielle ($C_t = C_0 e^{-at}$), on peut affirmer que le transfert s'effectue en majorité par un chenal (Drogue, C., 1971). La courbe de décroissance obtenue a pour équation: $C_t = 0,123e^{-1t}$.

L'équation du transfert d'un traceur dans une direction «X» correspondant à celle d'un chenal karstique sans dispersion transversale notable, est: (1)

$$D_1 \times \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - U \times \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

D_1 = dispersion longitudinale m^2/sec .
 C = concentration du traceur kg/m^3 .
 U = vitesse moyenne en m/sec .

Pour une injection instantanée, les conditions initiales sont:

- Injection d'une masse M de traceur au temps = 0

$$\int_0^T Q(x) C(x, t) dt = M \text{ si } Q(x) = \text{cste: } M = Ql.$$

- $x \neq 0$: $C(x, 0) = 0$
- $x = 0$: $C(x, 0) \neq 0$

Solution

$$C(x, t) = \frac{q}{(4 \pi D_1 t)^{0.5}} \exp \left[-\frac{(x - Ut)^2}{4 D_1 t} \right] \quad (2)$$

Avec:

- X = distance du point d'injection et le lieu de prélèvement.
- q = masse injectée par unité de surface d'écoulement (kg/m^2).
- $Q(x)$ = débit m^3/sec .
- l = intégrale de la courbe de restitution ($kg/sec m^{-3}$).

ERIKSSON et AI (1963) calculent q avec la relation suivante: $q = UI$

Ces mêmes auteurs, remarquent que la vitesse moyenne correspond sans erreur notable au mode (C_{max} au temps modal t_M), calculent la dispersion longitudinale comme suit:

$$D_1 = q^2 / (4 \pi t_M C_{max}^2)$$

En 1954, TAYLOR G.I. propose d'utiliser le temps Δt pendant lequel la concentration est supérieure à la moitié de la concentration maximale C_{max} :

$$A = U \cdot \Delta t / 2 \text{ et } D_1 = A^2 / 4 t_M \ln 2 \quad (4)$$

La résolution des équations mentionnées en (4) donne:

$$D_1 = U^2 \Delta t^2 / 16 t_M \ln 2 \quad (5)$$

$$D_1 / U = U \Delta t^2 / 16 t_M \ln 2 \quad (6)$$

Or, la position du point de la courbe correspondant à la vitesse moyenne du transfert est souvent discutée: le

centre de gravité (50% de restitution) est fréquemment choisi (SCHOELLER, 1959); d'autres considèrent t_M et le temps du centre de gravité t_G .

Si l'on admet l'analogie entre l'écoulement en canaux ou conduits, et l'écoulement dans les drains du calcaire, l'apparition des premières traces du colorant traduit le transfert par les filets d'eau les plus rapides, et non la vitesse moyenne du fluide. Il faudrait donc considérer la vitesse prise à mi-distance entre le centre de gravité et la concentration maximale du nuage. Or, la différence entre les deux est de 3500 sec et l'erreur qu'on commet sur l'évaluation de U en prenant t_M ou t_G est très faible.

En effet:

$$U = \frac{X + D/U}{t_G} = \frac{X - D/U}{t_M}$$

En considérant que $U = \frac{X - D/U}{t_M}$, on obtient:

$$U t_M = X - U^2 \Delta t^2 / 16 t_M \ln 2$$

$$U t_M = X - \frac{U \Delta t^2}{16 t_M \ln 2}$$

$$U [t_M + \Delta t^2 / 16 t_M \ln 2] = X$$

$$U = \frac{X}{[t_M + \frac{\Delta t^2}{16 t_M \ln 2}]}$$

Nous obtenons;

$$U = 0.068 \text{ m/sec pour } X = 5200 \text{ m et}$$

$$U = 0.091 \text{ m/sec pour } X = 7000 \text{ m}$$

En considérant que $U = \frac{X + D/U}{t_G}$, on obtient:

$$X + D/U = U t_G$$

$$X + U \Delta t^2 / 16 t_M \ln 2 = U t_G; U (t_G - \Delta t^2 / 16 t_M \ln 2) = X$$

$$U = \frac{X}{[t_G - \frac{\Delta t^2}{16 t_M \ln 2}]}$$

$$U = 0.065 \text{ m/sec pour } X = 5200 \text{ m et}$$

$$U = 0.0875 \text{ m/sec pour } X = 7000 \text{ m}$$

La différence entre 0.068 et 0.065 étant faible, nous considérons que la vitesse moyenne du transfert est la moyenne des deux valeurs obtenues, soit 0.665 m/sec ou 239.4 m/h pour $X = 5200$ m et $U = 0.089$ pour $X = 7000$ m.

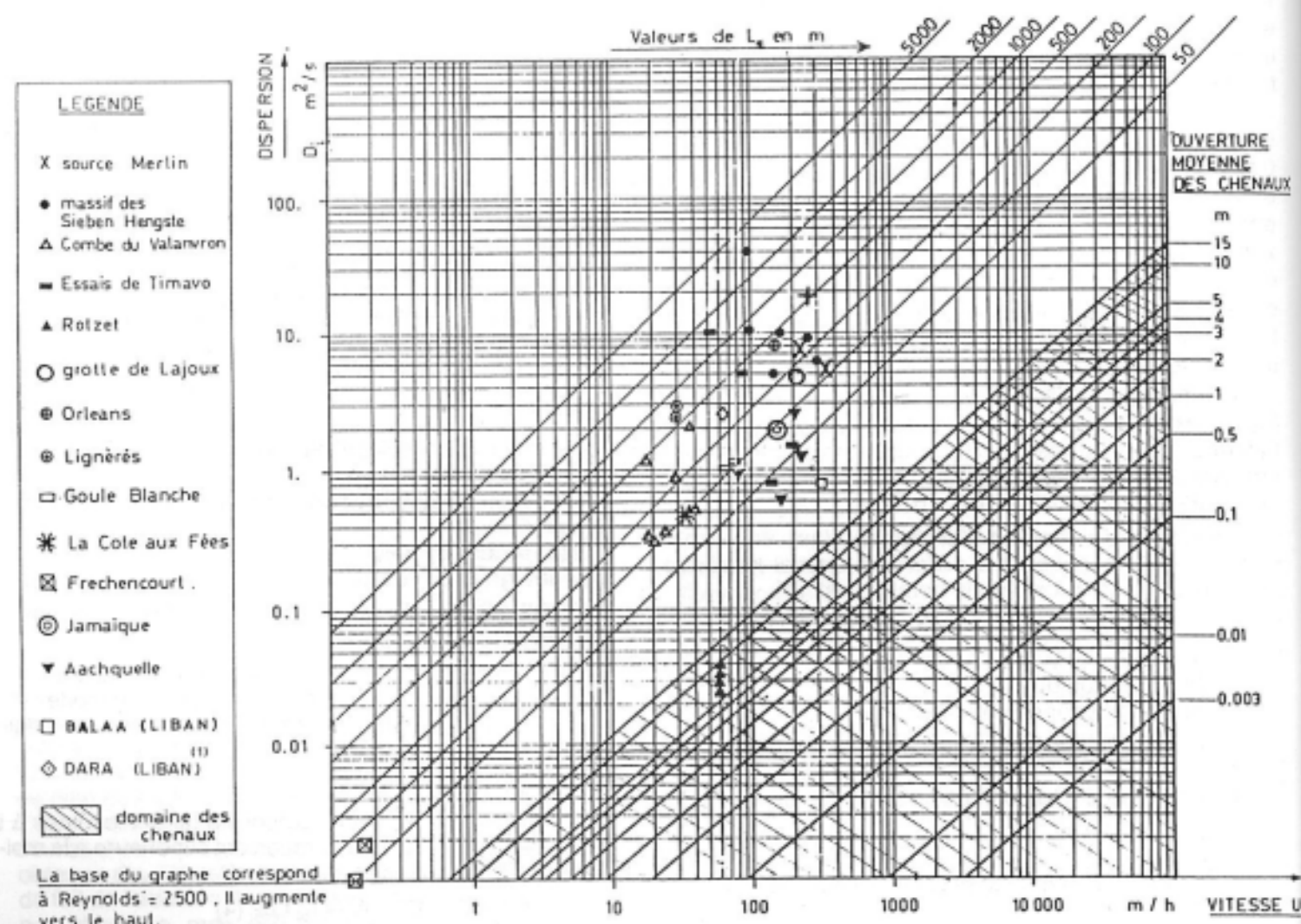


Figure 28: Relation entre la dispersion et la vitesse moyenne de transfert dans le karst d'après des essais de coloration (JAMIER D. -1976).

Les signes □ ◇ indiquent la valeur de l'ouverture des chenaux des gouffres de BALAA et de DARA (Liban).

Etant donné qu'il est peu probable (V. levé géologique) que le transfert se fasse le long d'une ligne droite joignant la perte et la résurgence, nous sommes plus enclins à considérer que la distance séparant les 2 points est de 7000 mètres. Par conséquent, la vitesse moyenne de transfert est de 0.089 m/sec.

La dispersion longitudinale sera donc égale à:

$$D_l = U^2 \Delta t^2 / 16 t_M \ln 2 = 1.53 \text{ m}^2/\text{sec.}$$

Il est bien entendu dans ce qui précède, que des erreurs sont commises sur U et D_l car le «chenal» n'est pas un tube rectiligne à section constante, et il peut traverser une zone faillée ou un lac souterrain.

Le fait que la dispersion longitudinale D_l soit supérieure à 0.1 m²/sec signifie que la liaison est hautement perméable. En effet, d'après JAMIER, les tracages effectués dans les zones peu perméables ou dans les blocs karstiques (perméabilité de fissures ou de micro-chenaux) - 10⁻⁴ à 10⁻⁶ m/sec présentent des dispersions comprises entre 10⁻⁴ et 10⁻² m²/sec.

Le report sur l'abaque ci-dessous (fig.28) de la valeur de la dispersion longitudinale en fonction de la vitesse U, permet de vérifier si l'écoulement se fait dans un chenal, ou de constater si la géométrie du milieu est plus complexe. Le degré de complexité, appelé «pouvoir filtrant», est évalué d'après le paramètre L (d'après ERIKSSON et AL., 1963):

$$L = 2 D_l / U$$

$$L = 2 \times 1.53 / 0.089$$

$$L = 34.38 \text{ mètres, soit } 34 \text{ mètres.}$$

L'écoulement se fait donc dans un chenal unique.

Une tentative pour déterminer la section fictive du réseau karstique fut effectuée en appliquant la méthode de DREYFUSS (V. bibliographie). Rappelons qu'il s'agit d'aboutir, non à des valeurs exactes, **mais à des ordres de grandeur**. D'autre part, les données dont on dispose ne sont pas homogènes: les longueurs sont évaluées en ligne droite, donc en général sous-estimées: on sait que les mesures de débit sont entachées d'erreurs inévitables et les vitesses de transfert sont approchées, quelles que soient les précautions prises pour leur détermination (cf. Drogue, 1971).

Le système est donc constitué d'une perte et d'une résurgence. La distance les séparant est de 7000 mètres et la différence de leur altitude (h) est de 1000 mètres. Lors de la coloration, le débit était de 2.2 m³/sec et la vitesse de transfert U (calculée précédemment) est de 0.089 m/sec ou 320.4 m/h.

Les formules classiques des conduites sous pression permettant le calcul d'un écoulement fictif équivalent s'effectuant dans des conduits prismatiques ou cylindriques rectilignes correspondant au débit Q. (En supposant que le réseau est en charge).

Par conséquent, pour un débit Q, et pour une vitesse de transfert U, on peut calculer la perte de charge linéaire moyenne J et la section Ω . D'autre part, en admettant que les galeries souterraines ont une section carrée, on peut évaluer la longueur «a» (fig.29).

$$\Omega = Q U^{-1} \text{ (cf. DREYFUSS).}$$

$$a = Q^{0.5} U^{-0.5} \text{ (cf. DREYFUSS).}$$

$$J = 0.0016 U^2 a^{-1} \text{ (cf. DREYFUSS).}$$

Après calcul:

$$1) \Omega = 2.2 \times 0.089^{-1} \\ \Omega = 24.7 \text{ m}^2$$

$$2) a = (2.2)^{0.5} (0.089)^{-0.5} \\ a = 4.97, \text{ soit } 5 \text{ m}$$

$$3) J = 0.0016 U^2 a^{-1} \\ J = 2.55 \times 10^{-6}$$

DREYFUSS admet à titre d'hypothèse interprétative que J représente les pertes de charge unitaires linéaires, correspondant à une circulation permettant d'acheminer le débit Q dans une conduite prismatique et rectiligne de section Ω .

La perte de charge totale du réseau, qui a pour valeur h, serait la somme des pertes de charge linéaires J.x et des pertes de charge singulières, venant de représenter ces dernières par ΣJ , on a:

$$h = \Sigma J + J.x$$

Les conséquences de cette interprétation permettent de dégager les conclusions suivantes:

- La section fictive d'écoulement (Ω) obtenue à partir du débit et de la vitesse moyenne de transfert semble être compatible avec les sections réelles, observées dans la grotte de KFAR HILDA, et les gouffres de BALAA et BAATARA.
- La valeur de la vitesse de transfert U est de 0.089 m/sec. Elle est très faible par comparaison avec les dimensions des galeries et la perte de charge totale h du réseau.
- A cette faible valeur de transfert correspond donc une faible valeur de perte de charge unitaire (J) et une faible valeur de perte de charge totale J.x qui est négligeable par rapport à h.

On peut donc négliger J.x dans le calcul des pertes de charge singulières et écrire:

$$h = \Sigma j$$

Cela signifie que h correspond à l'énergie totale absorbée par les pertes de charge singulières liées aux irrégularités des conduits souterrains.

CONCLUSIONS

L'essai de coloration dans le gouffre de BALAA a permis d'obtenir les résultats suivants:

1- L'écoulement se fait dans un chenal unique sans conduits secondaires. En effet, la courbe de décroissance régulière (de forme exponentielle) est la conséquence de l'écoulement en un seul conduit. De plus, la courbe de restitution du colorant est caractérisée par un pic unique et non par plusieurs pics de concentration qui caractérisent des arrivées successives du colorant ayant emprunté des trajets secondaires à des vitesses plus lentes.

2- La vitesse moyenne de transfert varie entre 0.0665 m/sec et 0.089 m/sec. La première valeur est calculée en supposant que le transfert se fait le long d'une ligne droite joignant la perte à la résurgence. La deuxième caractérise la vitesse moyenne du transfert le long d'un parcours suivant les directions des failles maîtresses.

3- Le fait que le coefficient de dispersion longitudinale soit supérieur à 0.1 m²/sec (1.53) signifie que la liaison est hautement perméable.

4- Lors de la réalisation de la coloration, le gouffre de BALAA était inondé et le plan d'eau se trouvait à une profondeur de 60 mètres du sol. La grotte de KFAR HILDA était partiellement en charge. En se référant aux travaux de DREYFUSS (V. bibliographie), à défaut de connaissance du régime d'écoulement dans tout le système, on peut connaître si l'écoulement s'effectue en-

tièrement en charge ou partiellement à surface libre, en calculant pour un débit donné (Q) et en fonction de la perte de charge $J_a = h/x$, le coefficient K représentatif des pertes de charge singulières. D'après DREYFUSS, les valeurs de K inférieures à 0.03 témoignent d'une mise en charge du réseau.

Or, $\bar{K} = 2 g J_a U^{-2}$;

$U_a = (0.0016)^{-0.4} Q^{0.2} J_a^{0.4}$; $J_a = h/x$

Après calcul, on obtient: (Réf. DREYFUSS)

$J_a = 0.142$

$U_a = 7.06$ m/sec

$K = 0.056$

Etant donné que $\bar{K}$ est > 0.03 , il semble que l'écou-

ment s'effectue à surface libre et en charge.

5- La section fictive d'écoulement (25 m^2) est compatible avec les sections réelles observées dans la grotte de GHAOUAQUIT et les gouffres de BALAA et BAATARA.

6- Le calcul de la capacité de dispersion ou le pouvoir filtrant du parcours souterrain, d'après L ($L = 34$ m), implique que l'écoulement s'effectue plutôt dans un milieu filtrant que dans un chenal (Ref. Abaque), à la limite entre les deux. Ceci ne contredit pas notre hypothèse que l'écoulement se fait uniquement dans un chenal, mais la valeur de L trouvée indique plutôt que l'écoulement est tortueux, qu'il existe des variations des sections, qu'il existe un transit dans des zones saturées et un écoulement à surface libre.

Principe du calcul des pertes de charges singulières ΣJ dans un réseau sous pression (en tirets) aboutissant à une résurgence noyée.
(d'après DREYFUS)

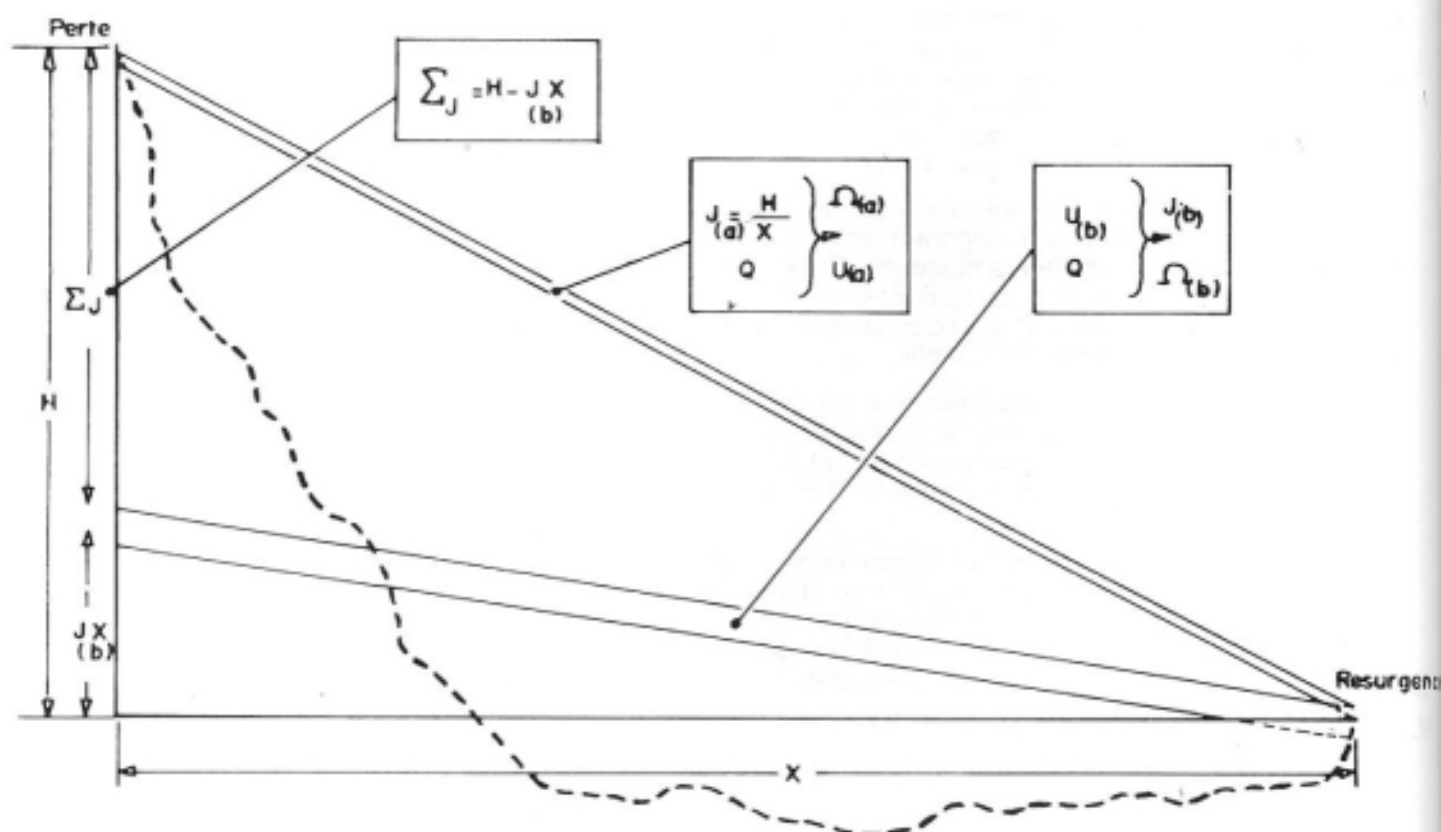


Figure 29

BIBLIOGRAPHIE

- D.JAMIER**
«Interprétation des essais de traçage des eaux karstiques» Annales Scientifiques de l'Université de Besançon, Deuxième colloque d'hydrologie en pays calcaire, géologie, Fasc. 25, 3e série, 1976.
- ERIKSSON, E., MOSETTI, F. MODOSCEK, K., OSTANEK, L., 1963.**
Some new results on the karstic hydrology with the employ of tritiated water as tracer. Boll. di Geofisica Teorica ed Applicata, V, 17.
- ATKINSON, T.C.M SMITH, D.I., LAVIS, J.J., WHITAKER, R.J., 1973.**
Experiments in tracing underground in limestones. Journal of Hydrology, 19, 323-349.
- TAYLOR, G.I., 1954.**
The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. PROC. ROY. SOC. of London, 223 - A, 420.
- SMEONI, G.P., 1976.**
Utilisation des traceurs fluorescents dans l'étude du mouvement des eaux souterraines karstiques. Note du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel.
- PEREZ, R., 1963.**
Contribution à l'étude de la diffusion saline en régime en canal. Application à la mesure des débits. Bull. Centre Rech. Essais Château E.D.F., suppl. N° 3, 145 p.
- DROGUE, C., 1971**
Réflexions sur les possibilités offertes par les traceurs pour la mesure de la vitesse d'écoulement dans les roches calcaires fissurées. Bull. B.R.G.M., III, 4,21-31.
- LALLEMAND, A, PALOC, H., 1967.**
L'intérêt de la «méthode au charbon actif» dans les traçages à la fluorescéine en hydrogéologie: quelques exemples. Assoc. int. Hydrogéol., Mém., 7, «Congr. HANNOVER, 1965», p.p. 220 - 226, 5 fig.
- DREYFUSS, M, 1973**
Essai d'évaluation de quelques caractéristiques hydrauliques des réseaux karstiques. Annales Scientifiques de l'Université de Besançon. Géologie, 3e série, Fasc. 19 bis, 1973.
- SAUTY, J.P., 1977.**
Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçage.
Thèse. Docteur-Ingénieur.
- LALLEMAND, PALOC**
La méthode de détection au charbon actif pour les opérations de traçage à la fluorescéine.
B.R.G.M. DS 64.A.47 - 1964.
- ANDRE, H. et Al.**
Hydrométrie pratique des cours d'eau. Collection de la direction des études et recherches d'Electricité, de France.
EYROLLES, 1976.