



HAL
open science

Etudes géologiques pour l'aménagement du Litani - Liban

Pierre Antoine

► **To cite this version:**

Pierre Antoine. Etudes géologiques pour l'aménagement du Litani - Liban. Géologie appliquée. Université de Grenoble, 1964. Français. NNT: . tel-00820528

HAL Id: tel-00820528

<https://theses.hal.science/tel-00820528>

Submitted on 6 May 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

T H E S E

présentée

A la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble
pour obtenir
le grade de Docteur de Troisième Cycle.

Spécialité : GEOLOGIE et MINERALOGIE APPLIQUEES,

par Pierre ANTOINE.

ETUDES GEOLOGIQUES
POUR
L'AMENAGEMENT HYDROELECTRIQUE DU LITANI.

Soutenue le juillet 1964, devant la Commission d'Examen:
MM.



10143948



T H E S E

présentée

A la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble
pour obtenir
le grade de Docteur de Troisième Cycle.

Spécialité : GEOLOGIE et MINERALOGIE APPLIQUEES,

par Pierre ANTOINE.

ETUDES GEOLOGIQUES
POUR
L'AMENAGEMENT HYDROELECTRIQUE DU LITANI.



Soutenue le 1 juillet 1964, devant la Commission d'Examen:

MM. BARBIER
DEBELMAS
MICHEL

BIBLIOTHÈQUE DE
L'UNIVERSITÉ DE SAVOIE
Inv. : NS 34 467
DEWEY : TB 1091.1964/1

A Monsieur le Professeur BARBIER
qui m'a permis d'accomplir ce travail et qui m'a
guidé de ses conseils.

A mes professeurs de la Faculté des Sciences de
Grenoble,

Monsieur le Doyen MORET,
Monsieur MICHEL
Monsieur DEBELMAS.

Je remercie tous ceux qui m'ont encouragé et con-
seillé lors de mes études ou de la rédaction de ce tra-
vail et spécialement Messieurs SARROT-REYNAULD et
LATREILLE.

Mes remerciements vont également à la S O G R E A H
grâce à laquelle ma mission au Liban s'est effectuée dans
de bonnes conditions ;

- au Groupe Français du Litani à Beyrouth, en la per-
sonne de son directeur Monsieur ABERLEN, pour la compréhen-
sion et l'aide qui m'ont été prodiguées par ses ingénieurs
(je pense plus spécialement à Monsieur DUPLAN, ingénieur
des Mines, qui m'a guidé amicalement lors de mon travail
en souterrain) ;

- au personnel du Laboratoire de Géologie de Grenoble
qui a collaboré à la présentation de mon travail.

Que tous et toutes trouvent ici l'expression de ma
gratitude.



TABLE DES MATIERES

1ère PARTIE : LE BARRAGE DE KARAOUN.

CHAPITRE I.-

GENERALITES.

1°- Aperçu géographique et économique.....	1
2°- Géologie et Morphologie.....	1
a) Le Mont Liban.....	2
b) La plaine de la Bekaa.....	3
c) Le Massif de l'Anti-Liban.....	3
3°- Climatologie, Hydrographie, Hydrogéologie.	3
a) Climatologie.....	3
b) Hydrographie.....	4
c) Hydrogéologie.....	5
4°- L'aménagement du Litani.....	6
a) Le barrage de Karaoun.....	7
b) La galerie de Markabi.....	7
c) La Centrale de Markabi.....	8
d) La galerie d'Awali.....	8
e) Le Bassin de Kanane.....	8
f) L'Usine d'Awali.....	8

CHAPITRE II.-

ETUDES GEOLOGIQUES RELATIVES AU BARRAGE DE KARAOUN.

Préliminaire.....	9
I. <u>Etude stratigraphique et lithologique de</u> <u>la série sédimentaire de Karaoun :</u>	

L'Eocène moyen et supérieur.....	9
L'Eocène inférieur.....	10
Le Paléocène.....	10
Le Sénonien.....	12
Le Turonien.....	13
Le Cénomaniens.....	13

II. Etude tectonique

1°- Préliminaire.....	15
2°- 'Etude tectonique.....	16
a) Les failles principales.....	16
b) Les failles secondaires.....	19
c) Autres types de failles.....	19
d) Les plis.....	20
e) Conclusion et synthèse.....	21

III. Synthèse hydrogéologique

1°- Préliminaire	25
2°- Rappel des principaux résultats antérieurs à 1958.....	25
3°- Utilisation des forages de reconnaissance en Hydrogéologie.....	27
a) Les essais d'eau.....	27
b) Etude d'une nappe aquifère.....	28
4°- Etude de la nappe dans les collines "au large" en rive droite.....	29
a) Sondages RB.....	29
b) Forme de la nappe suivant le profil RB.....	32
c) Série RA.....	35
d) Forme de la nappe d'après le profil RA.....	36
5° Conclusions relatives à l'Hydrogéologie de la rive droite.....	36

IV. Conclusions générales.

a) Fuites au large vers le Nahr Hasbanyi..	41
b) Fuites au large en rive droite.....	42
a' A travers le Jebel Niha.....	42
b' Par le Cénomanién.....	42

2e PARTIE : LES TRAVAUX SOUTERRAINS

CHAPITRE I.-

GENERALITES.

I. Intérêt géologique des travaux souterrains.....	45
II. Travail effectué.....	45
III. Divisions de la deuxième partie.....	46

CHAPITRE II.-

ETUDE GEOLOGIQUE DE LA GALERIE DE MARKABI.

I. Implantation de l'ouvrage.....	47
II. Stratigraphie.....	47
III. Propriétés lithologiques et techniques du ter- rain.....	47
IV. Structure géologique.....	48
V. Hydrologie - Venues d'eau.....	48
VI. Inconvénients à redouter. Les points délicats du tracé.....	49
VII. Conclusions.....	50

CHAPITRE III.-

LA GALERIE D'AWALI.

Préliminaire.....	50
A - La galerie d'Awali (Lot I). Description des travaux.....	51
I. Rappel des rapports préliminaires.....	51
II. Tableau stratigraphique.....	
III. Observations réalisés au cours de l'avancement.....	52
1°- Attaque de Markabi :	
a) La fenêtre.....	52
b) Influence du terrain sur les travaux..	52
- Eocène moyen.....	52
- Eocène inférieur, Paléocène, Sénonien	53
- Turonien.....	54
- Cénomanién.....	55
- Traversée de la faille de Yamounch..	57
2°- Attaque de Jezzine amont.....	58
a) Coupe géologique relevée en galerie...	58
b) Influence du terrain sur les travaux..	59
- Roches d'origine volcanique.....	59
- Grès du Crétacé inférieur.....	60
- Aptien inférieur.....	61
- Albien.....	61
- Cénomanién.....	62
3°- Attaque de Jezzine aval.....	63
a) Coupe géologique sommaire.....	63
b) Influence du terrain sur les travaux..	63
- Roches d'origine volcanique.....	63
- Grès de base.....	63

galerie d'Awali (Lot 2).-	
Etude géologique préliminaire.....	61
Particularités.....	65
Etude géologique de la colline de Bkassine....	65
Stratigraphie sommaire.....	65
1°- Description générale de la colline de Bkassine.....	65
2°- But de l'Etude.....	66
3°- Etude géologique de détail.....	67
a) Difficultés dues au terrain.....	67
b) Coupe stratigraphique.....	67
4°- Etude tectonique.....	69
a) Epaisseur du grès de base.....	70
b) Recherche des failles.....	70
c) Le problème des formations volcaniques	71
- Série de Bkassine.....	71
- Série de la fenêtre de Jezzinz.....	72
d) Résultats de cette étude.....	72
e) Conclusions générales.....	73
Etude géologique préliminaire sur le tracé Azzour aval.....	76
1°- Structure géologique suivant l'axe du tunnel.....	77
2°- Conséquence pour les travaux.....	77
3°- Hydrogéologie.....	79
CONCLUSION.....	81

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Planche n°

1ère PARTIE

Carte générale du Liban.....	1
Pluviométrie comparée entre Beyrouth et Karaoun....	2
Répartition des climats.....	3
Log stratigraphique schématique.....	4
Schéma tectonique et géologique au 1/5 000.....	6
Coupes sériées dans la colline Arid el Rass.....	7
Coupes sériées dans la colline au-dessus du vieux pont de Karaoun.....	8
Carte de la nappe.....	9 bis
Diagrammes d'absorption des sondages RB1, RB2, RB3	9
Variation de la nappe dans les sondages RB.....	10
Diagrammes d'absorption des sondages RB4, RB5.....	11
Profil en long géologique suivant les sondages RB..	12
Profil en long géologique suivant les sondages RA..	13
Variation de la nappe dans les sondages RA.....	14

2e PARTIE

Carte de l'aménagement.....	15
Coupe de la galerie de Markabi.....	16
Franchissement du Nahr ech Chita.....	17
Tableau stratigraphique.....	18
Coupes détaillées du tunnel à Makabi.....	19-20
Coupes détaillées du tunnel à Jezzine amont... 21-22-23	21-22-23
Coupe du tunnel d'Awali au 1/10 000.....	24
Coupes stratigraphiques du grès de base (colline de Bkassine.....	26
Carte géologique au 1/20 000 de la colline de Bkassine	27
Coupes sériées de la colline de Bkassine.....	28
Carte géologique à la cote 630 dans la colline	29
Esquisse géologique des environs d'Azzour.....	30

PREMIERE PARTIE

LE BARRAGE DE KARAOUN.

FACULTÉ des SCIENCES
LABORATOIRE
de GÉOLOGIE
de GRENOBLE

CHAPITRE I.

GENERALITES.

1° - Aperçu géographique et économique.

En marge des grands déserts moyen-orientaux, une frange montagneuse privilégiée domine la Méditerranée depuis la Palestine jusqu'aux chaînes de Turquie orientale.

Le Liban niche sa superficie minuscule de 10 170 km² au sein de ces montagnes dont il retire de nombreux bienfaits.

Le relief accusé et la proximité de la mer assurent une pluviosité importante sur le versant méditerranéen. Les variations d'altitude compensent en outre, certains excès climatiques dus à la latitude.

L'heureuse combinaison de ces différents facteurs fait de l'agriculture une partie non négligeable (exportations de grumes) de l'économie libanaise. Bien que la richesse fondamentale du pays résulte de sa situation de premier ordre pour le commerce, le gouvernement s'efforce de développer, dans une certaine mesure, l'industrialisation. Les ressources géologiques, si l'on met à part le pétrole amené d'Irak et distribué par deux pipe-lines, sont inexistantes. Dans le but de les accroître, le gouvernement libanais a entrepris de tirer parti des ressources hydrauliques du territoire national, et particulièrement du fleuve Litani, cours d'eau principal du pays.

2° - Géologie et morphologie.

La géologie du Liban, prise dans son ensemble, est simple. Les travaux de M. DUBERTRET ont précisé et mis au point les divisions stratigraphiques ainsi que la structure générale.

Le pays est tabulaire, entièrement constitué de terrains sédimentaires dont l'âge varie du Jurassique inférieur jusqu'aux terrains actuels ou subactuels, que l'on peut rencontrer en certains points de la zone côtière. Les terrains volcaniques qui présentent un grand développement en Syrie, ne sont pas rares au Liban et nous en décrirons dans cette étude.

La Tectonique est cassante et procède par des failles verticales ou obliques, certaines atteignant des rejets très importants.

Deux grands accidents donnent au Liban sa morphologie particulière : d'une part la faille de Yamouneh et, d'autre part, la faille de Serrhaya. Entre les deux, le compartiment affaissé de la Bekaa constitue un graben. De part et d'autre de ce fossé, deux horsts correspondent à deux massifs montagneux.

Du point de vue morphologique, on est donc tout naturellement conduit à adopter les subdivisions suivantes d'Ouest en Est (voir pl. 1) :

- le Mont Liban ;
- la plaine de la Bekaa ;
- l'Antiliban.

a) Le Mont Liban : Il correspond au horst occidental situé entre la mer et la faille de Yamouneh. Les sommets les plus élevés jalonnent le rebord occidental. Nous rencontrons du Nord au Sud :

- le Qornet Saouda (3 083) point culminant du Liban ;
- le Jebel Mnaitri (2 702) ;
- le Sanine (2 628) ;
- le Jebel Barouk (1 840) ;
- le Jebel Niha (1 809).

Le massif s'infléchit légèrement vers la mer et se raccorde à la zone des plateaux côtiers par une ligne de flexures sensiblement parallèle au littoral.

b) La plaine de la Bekaa : Cette plaine intérieure représente le graben et son altitude moyenne est relativement élevée (1 200 m au Nord, vers Baalbek 800 m au Sud au site du barrage de Karaoun).

c) Le massif de l'Antiliban : il constitue le horst oriental. Son altitude générale est moins élevée que celle du Liban. Il est formé par un bombement calcaire ne présentant pas le même caractère d'unité (du point de vue structural) que le Liban.

3° - Climatologie - Hydrographie - Hydrogéologie.

a) Climatologie. Le Liban présente un climat méditerranéen typique sur la chaîne côtière, avec des pluies abondantes concentrées sur une courte période de l'année et un été long, très chaud et très sec.

Certains points de la zone côtière présentent même un climat subtropical (plantations de bananiers).

Par contre, l'aridité augmente progressivement lorsque l'on s'éloigne de la chaîne montagneuse formant barrière aux influences marines. Le climat méditerranéen passe ainsi par une série de transitions à un climat subdésertique, puis désertique. Ainsi la plaine de la Bekaa est nettement plus sèche que le versant méditerranéen.

Pluviométrie.

L'hiver est court et très violent et les pluies sont pratiquement concentrées sur 4 mois de l'année (voir pl. 2).

La montagne dominant très rapidement la mer reçoit de très abondantes précipitations. Tandis que Beyrouth reçoit en trois ou quatre mois fréquemment 800 à 900 mm de pluie, certaines stations de montagne comme Jezzine ou même Machghara peuvent en recevoir 400 mm pour le seul mois de février.

L'hiver est donc excessif par l'intensité et la violence des averses.

Températures.

Le tableau des températures relevées au cours de l'année 1956 à l'Observatoire de Ksara, dans la Bekaa, fait ressortir un contraste important entre les minima d'hiver et les maxima d'été. Ces températures sont des moyennes obtenues de la façon suivante : $\text{Température} = (\text{Température maximum du mois} + \text{température minimum du mois}) : 2$

Janvier	7°1	Juillet	24°5
Février	9°	Août	26°4
Mars	8°5	Septembre	21°9
Avril	14°1	Octobre	17°5
Mai	16°8	Novembre	13°4
Juin	21°8	Décembre	7°

Répartition des climats :

L'Américain E. FOSTER, d'après les pluviosités et les températures relevées à l'Observatoire de Ksara, a tenté de synthétiser en un tableau les diverses nuances climatiques au cours d'une année (voir fig. 3 ~~tableau~~).

Le tableau montre bien le développement de l'aridité pendant les mois de la fin du printemps, de l'été et du début de l'automne, et celle des précipitations durant 3 mois principaux d'hiver.

Ce tableau montre parfaitement la place très réduite des intersaisons au Liban.

b) Hydrographie : A la suite de Ibrahim Abd-el-Al, nous pouvons distinguer dans le réseau hydrographique libanais deux catégories :

1 - Une zone exoreïque, à écoulement dirigé vers la Méditerranée et dont les principaux torrents ne tarissent jamais (Nahr-Abou Ali, Kadisha, Nahr Ibrahim, Nahr-el-Leben, etc.).

Ce sont tous des torrents côtiers au profil très en pente, dévalant^{vers} la côte au travers de profondes gorges entaillées dans les plateaux calcaires.

2 - Une zone où le relief décide en faveur du drainage exoreïque (Oronte, Litani) ou endoreïque (Jourdain). Il s'agit du sillon de la Bekaa séparant le Liban de l'Antiliban. Le Litani et l'Oronte s'écoulent en sens inverse, le premier vers le Sud, le second vers le Nord. Tous deux quittent brusquement leur direction axiale par un crochet imprévu qui les amène à la Méditerranée.

Le massif du Liban alimente 13 cours d'eau permanents, et l'Antiliban en alimente 2 (à écoulement endoreïque du reste, en direction de la Syrie). Or, ce n'est pas le ruissellement qui assure durant 9 mois de sécheresse totale la pérennité des cours d'eau. Ce sont les nombreuses et souvent très abondantes sources jaillissant à la base des plateaux calcaires qui alimentent les torrents en été. L'abondance des eaux souterraines est la grande richesse du pays.

c) Hydrogéologie : Le Liban, pays essentiellement montagneux, comprend deux grands ensembles calcaires jouant un rôle primordial en hydrogéologie :

- les calcaires compacts jurassiques, présentant une surface karstifiée de 1 160 km² pour 1 000 m de puissance ;

- les calcaires dolomitiques intercalés de calcaires marneux et de marnes du Cénomanién offrant aux agents météoriques 5 130 km² de superficie pour 700 m de puissance.

Nous avons vu plus haut que, durant les mois d'hiver, la montagne recevait de grandes quantités d'eau et même fréquemment d'abondantes chutes de neige. Une partie seulement de ces eaux ruisselle et rejoint la mer. Le restant s'infiltré dans les cavités des massifs karstiques et y constitue d'énormes réserves souterraines susceptibles d'alimenter tout au long de l'année de très puissantes sources.

Les deux séries calcaires perméables "en grand" sont séparées hydrologiquement par des assises épaisses constituées de grès, d'argiles et de marnes formant écran pour les circulations.

En fait, nous rencontrons les types de sources suivants :

- Sources jaillissant à la base du plateau cénomanién ;
- sources alimentées par le Jurassique.

Le type le plus général des sources issues du Cénomanién est constitué par un massif réservoir reposant sur un substratum imperméable.

Le type des sources jurassiques, par contre, est fréquemment dit de "trop-plein". Le massif jurassique s'enracine plus profondément que le niveau des plaines ou des vallées et les eaux ne trouvant pas d'exutoire en profondeur viennent sourdre en surface par le point topographique le plus bas possible.

4° - L'aménagement du Litani.

Le projet d'aménagement du fleuve Litani est déjà ancien. La délégation générale de France au Levant en avait entrevu la possibilité et M. DUBERTRET et M. ABD-el-AL avaient attiré l'attention sur la possibilité de créer une retenue sur le fleuve Litani, au voisinage de la localité de Karaoun.

Le Nahr Litani est en effet le plus long fleuve libanais et le plus important. Connue sous le nom de Leantes par les Anciens, il prend sa source aux environs de Baalbek, dans le Nord de la Bekaa et se dirige vers le Sud. A la hauteur de Rayak, soit après 35 kilomètres environ, il ne représente encore qu'un maigre ruisseau que la végétation des rives masque presque totalement.

Cependant, il reçoit bientôt l'apport de très grosses résurgences issues de l'Antiliban, les sources de Chamsine et d'Anjar, qui alimentent le Nahr Gazayel et dont l'apport donne au Litani son allure presque définitive.

Il serpente ensuite à travers la Bekaa sud, recevant au passage le tribut de nombreuses petites résurgences issues des calcaires de ses rives.

A partir du seuil de Qaraoun, il abandonne son allure paisible de fleuve de plaine pour s'encaisser brusquement dans de profondes gorges qui le conduiront, après un coude brusque, autour de l'éperon sauvage du Qalaat ech Chaqif (le Château de Beaufort des Croisés), jusqu'à la mer.

L'aménagement en voie de réalisation est le suivant :

a) Le barrage de Karaoun. Partiellement réalisé, l'ouvrage est établi sur le seuil de Karaoun, à la rupture de pente du profil du Litani, avant son entrée dans les gorges.

Primitivement, ce barrage devait avoir une hauteur maximum de 60 m pour une longueur de 1 025 m et être constitué de 75 voûtes minces de béton armé. La capacité de la retenue s'élevait alors à 200 millions de mètres cubes. Postérieurement à notre départ, le type d'ouvrage fut modifié et les voûtes minces remplacées par une digue en enrochements.

b) Première galerie d'amenée (Galerie de Markabi).

Elle suit la vallée du Litani dans le versant rive droite des gorges. Sa section est circulaire et de diamètre 3,10 m.

Sa longueur totale 6 500 m et le débit dérivé 22 m³.

c) Centrale de Markabi. Entièrement souterraine, cette Centrale, située un peu à l'amont du confluent du Litani - Wadi - Markabi est alimentée par la galerie précédente.

La chute nette maximum est de 197 m.

Le débit équipé est de 22 m³/s.

L'ensemble des trois ouvrages précédents est désigné sous le nom de chute de Markabi.

Les ouvrages suivants font partie de l'équipement de la chute d'Awali.

d) Deuxième galerie d'amenée (Galerie d'Awali).

A la sortie de l'usine de Markabi (restituant l'eau turbinée au Litani) un barrage de prise d'eau de 10 m de haut sur le fleuve détournera les eaux dans le souterrain d'Awali.

La section de ce tunnel présente la forme d'un fer à cheval de hauteur 3,25 m.

La longueur totale de l'ouvrage est de 16,400 m dont 9 800 m entre Markabi et Jezzine.

Ce tunnel traversera le Mont Liban et amènera l'eau sur le versant méditerranéen au-dessus de la vallée du Nahr Awali.

e) Bassin de Kanane. Ce bassin artificiel, construit au débouché de la galerie d'Awali, servira de prise d'eau à la conduite forcée de l'usine d'Awali située en contrebas dans la vallée du Nahr Awali. Sa capacité est faible : 150 000 m³.

f) Usine d'Awali. Elle sera construite à l'air libre, sur une petite plaine alluviale du fleuve et recevra les eaux du bassin de Kanane par l'intermédiaire d'une conduite forcée assurant une chute maximum de 406 m. Le débit équipé est de 22 m³/s.

CHAPITRE II.

ETUDES GEOLOGIQUES RELATIVES AU BARRAGE DE KARAOUN.

Préliminaire.

L'établissement d'un important barrage de retenue sur le Litani au site de Karaoun pose 3 problèmes :

- le choix de l'emplacement ;
- les fondations ;
- l'étanchéité de la cuvette

Différents experts se sont penchés sur les problèmes géologiques de Karaoun depuis longtemps et, notamment, par ordre chronologique, M^{rs}. DUBERTRET, GOGUEL, BARBIER.

Les résultats de ces études ont été consignés dans une série de rapports (voir la notice bibliographique) qui ont dégagé peu à peu les points importants de la structure géologique et de l'hydrogéologie de la région de l'ouvrage.

La nécessité d'une étude approfondie de la géologie du site s'imposa finalement. L'étude ci-après est surtout orientée vers les problèmes d'étanchéité de la retenue.

I. Etude stratigraphique et lithologique de la série sédimentaire de Karaoun. (Voir pl. 4).

EOCENE MOYEN et SUPERIEUR.

Le calcaire de l'Eocène moyen et supérieur forme une série unique. C'est une roche de teinte claire, à pâte sublithographique, très dure, donnant des éclats esquilleux. Localement, la texture de la roche peut varier et devenir plus cristalline et plus rugueuse.

Les niveaux plus supérieurs renferment une faune de Numulites très importante suivant les couches. Les principales espèces que l'on rencontre sont, d'après M. DUBERTRET :

- Numulites gizehensis
- Numulites curvispira
- Alveolina oblongua

EOCENE INFÉRIEUR

Série de calcaires marneux, blanchâtres par altération, gris-bleuté très clair lorsqu'ils sont sains. Le teneur en calcaire va en diminuant du sommet vers la base. Les bancs sont en général minces (15 à 20 cm), bien marqués et s'intercalent de passées plus marneuses vers la base. Les derniers bancs calcaires, à la limite inférieure de l'étage, renferment de très gros nodules (en forme de boules) de silex noirs, très caractéristiques.

Du point de vue microfaune, les variétés de Numulites les plus répandues dans les niveaux calcaires du sommet de l'étage sont :

- Numulites irregularis ;
- Numulites subirregularis.

L'épaisseur de l'Eocène inférieur reconnue dans les sondages est de l'ordre de 90 m dans la région du barrage. La puissance totale de l'Eocène peut atteindre 8 à 900 m [L. DU. BERTRET].

Le PALEOCENE

Immédiatement sous l'Eocène inférieur vient un niveau de marnes grises d'une quinzaine de mètres d'épaisseur.

Du point de vue des travaux, cette couche marneuse présente un grand intérêt car elle constitue une couche imperméable à laquelle il sera possible de raccorder le voile d'étanchéité. Du point de vue purement géologique elle pose un petit problème de chronologie. Ce niveau marneux, bien visible dans le paysage, marque en effet la transition entre le Crétacé supérieur et l'Eocène inférieur.

Au voisinage du coude du Litani, immédiatement à l'amont de l'axe B, la séquence lithologique est la suivante de haut en bas :

- calcaires argilo-crayeux à rognons de silex noirs (Eocène inférieur) ;
- série de marnes grises qualifiées de Paléocène ;
- niveaux glauconieux et phosphatés du Sénonien.

Des lames minces ont été taillées à cinq niveaux différents dans la série de marnes grises, numérotées M1 à M5 depuis la base de l'Eocène.

L'étude de ces lames minces (orientée vers la répartition statistique de certaines formes typiques : Globigérines à test denticulé, Globigérinelles, Gumbelines, Globorotalia etc.) a donné les résultats suivants (voir log. ci-contre) :

Lame M1 : Eocène inférieur

Lame M2 : Extrême base de l'Eocène inférieur

Lame M3 : Paléocène

Lame M45 : Crétacé supérieur, vraisemblablement Maestrichtien.

La lame M4, très mauvaise, n'a pas pu être interprétée convenablement.

Nos interprétations se sont appuyées sur les travaux de divers auteurs ayant étudié le même problème :

S.W. TROMP en Egypte et en Anatolie ;

Z. REISS, en Palestine ;

M.B. CITA en Italie du Nord.

CONCLUSIONS.

Le passage du Crétacé supérieur à l'Eocène inférieur dans la région de Karaoun se fait très progressivement, au sein d'une série essentiellement marneuse.

Le vocable "marne paléocène" que nous conserverons pour plus de commodité, est en fait trop vaste. Seul le tiers central de l'affleurement mérite d'être ainsi dénommé.

Le SENONIEN

SENONIEN SUPERIEUR : Il s'agit d'un niveau de calcaire détritique assez grossier, riche en glauconie, très reconnaissable aux affleurements par sa teinte verdâtre. Ce niveau renferme des nodules phosphatés, des dents de squales et une variété de Lamellibranches, Ostrea vesicularis.

En lame mince (~~microscopique~~), on voit de très nombreuses Globigérines à tests minces, des grains abondants de glauconie qui parfois pseudomorphosent des rhomboèdres de dolomie. La pâte du calcaire est détritique et renferme de nombreux débris de Globigérines.

SENONIEN PROPREMENT DIT : En dessous de ce niveau débute la masse de l'étage sénonien. Il s'agit d'une épaisse série de marnocalcaires crayeux de teinte blanche, assez tendres. Les macrofossiles y sont rares, indéterminables en général à cause de l'usure de leurs formes.

Les microfaunes ont été étudiées par différents auteurs et M. DUBERTRET cite principalement :

Globotruncana sp.

Flabellina sp.

Heterohelicidae

La puissance de cet étage, dans les environs de Karaoun, varie entre 110 et 150 mètres.

TURONIEN

L'étage Turonien se divise lithologiquement en deux parties très inégales :

TURONIEN CALCAIRE : Il constitue la masse principale de l'étage. C'est un calcaire blanc, parfois crémeux et sublithographique, parfois roux et à pâte légèrement plus cristalline. Ce calcaire, extrêmement pur et très dur, est profondément karstifié. Il est assez peu fossilifère dans la région de Karaoun. Il renferme quelques Rudistes silicifiés (Hippurites) ainsi que des silex bruns.

La base de ce niveau calcaire est marquée par un banc de 5 m d'épaisseur environ, renfermant de très nombreuses coquilles de petits Lamellibranches. Ce niveau est très caractéristique et se retrouve dans tout le périmètre de Karaoun et jusque dans le tunnel d'Awali à Markabi.

L'épaisseur de Turonien calcaire est d'environ 45 mètres.

Couche marneuse à Ammonites. La base du Turonien est marquée par une couche de calcaires marnoux feuilletés, granuleux, de teinte rousse. On y trouve assez fréquemment des Ammonites usées qui appartiennent aux espèces suivantes :

Leoniceras sp.

Thomasites rollandi

La dureté moindre de ce niveau le fait en général ressortir nettement dans la topographie et il constitue un repère intéressant pour les études de structure.

Le CENOMANIEN

Il est utile de distinguer dans la série cénomanienne les différents niveaux. Cette distinction, uniquement basée sur des caractères lithologiques facilite l'interprétation tectonique dans certains secteurs. En descendant la série, les termes suivants sont rencontrés :

- Calcaire cristallin karstique : Calcaire franc, dur, à cassure cristalline, intensément corrodé par les phénomènes de dissolution karstique. A la base, la teinte est roussâtre et elle s'éclaircit vers le sommet. L'épaisseur de ce niveau est d'environ 120 m.

- Lame mince A6 :

Cette coupe mince nous montre un calcaire entièrement formé de calcite cristalline, ainsi que d'un peu de dolomie. Il n'y a pas trace de Foraminifères.

- Calcaire à silex : C'est un niveau-repère très important. Il s'agit d'un calcaire dur, de teinte jaune roux, granuleux, renfermant de très nombreux rognons de silex bruns. Epaisseur : 8 à 10 m.

- Lame mince A5 :

En lame mince, ce calcaire montre une pâte amorphe renfermant des rhomboèdres de dolomie ainsi que des grains de limonite. Quelques grosses Globigérines à test mince ainsi que des débris indéterminables sont les seuls témoins d'une microfaune.

- Marnocalcaires à "choux-fleurs" : C'est une couche de calcaires marneux bien lités, de teinte blanchâtre, renfermant des concrétions siliceuses à allure de choux-fleurs. Les macrofossiles y sont très rares ; nous n'avons ramassé qu'un fragment d'Acanthoceras sp. Epaisseur : 55 à 60 m.

- Lame mince A4 :

En lame mince, nous décelons une pâte marnocalcaire renfermant quelques cristaux de dolomie rhomboédriques. Des traces de limonite (provenant vraisemblablement d'oxydation de la pyrite) épigénisent parfois ces rhomboèdres.

Les microfossiles sont des Globigérines, des formes rappelant les Lagénidés, des spicules d'Eponges calcaires.

- Calcaire dolomitique : Il s'agit d'une série de bancs épais de teinte gris clair. Leur faible duraté est cause de leurs formes arrondies. Ils sont reconnaissables de loin.

- Lame mince A3 :

Un examen en lame mince révèle que ce calcaire, malgré son apparence, n'est que légèrement dolomitique. On reconnaît la forme de quelques Foraminifères, surtout quelques Globigérines assez effacées.

- Calcaire dolomitique corrodé : Il se présente aux affleurements sous forme d'une roche grise très ruiniforme, très karstifiée. La stratification n'y est guère visible. La cassure est finement cristalline.

Lame mince A2 :

Elle montre une roche entièrement cristallisée, avec une majorité de formes rhomboédriques. Il est toutefois impossible de préciser, sans préparation spéciale, dans quelle proportion la roche est dolomitisée.

- Dolomies sableuses : Il s'agit du dernier niveau céno-manien visible aux abords du site du Karaoun. Cette couche ne joue pas de rôle au barrage, mais elle a été traversée en tunnel. Elle est composée de grains assez ténus de dolomie agglomérés qui s'effritent facilement et donnent avec l'eau une pâte gluante.

II.- Etude tectonique.

1° - Préliminaire.

La plaine centrale du Liban, la Bekaa, située entre le massif du Liban et celui de l'Antiliban, correspond à un vaste synclinal effondré. Ce synclinal est limité vers l'Ouest par une très importante fracture : la faille de Yamounch.

M. DUBERTRET évalue le rejet de cet accident, au Liban, entre 1 000 et 2 000 m. Pour en situer l'importance, il convient de remarquer que nous sommes en présence de la terminaison vers le Nord d'une ligne importante de fracture de l'écorce terrestre, débutant avec les grands fossés africains, se poursuivant par la Mer Rouge, le Golfe d'Akaba, la dépression

de la Mer Morte, la faille de Yamouneh et se terminant en Turquie.

On conçoit que la zone marginale ouest de la Bekaa soit très fracturée au voisinage d'un tel accident.

L'étude géologique de détail de la bordure ouest de la retenue de Karaoun met en évidence un grand nombre de failles et de petits plis subordonnés à l'effondrement de la Bekaa. Le sous-sol de la retenue se trouve ainsi fragmenté en plusieurs compartiments au sein desquels les conditions hydrologiques diffèrent.

Le principal problème posé par l'établissement de la retenue étant celui des circulations souterraines, il faut, avant d'entreprendre une étude hydrologique, "débrouiller" la tectonique assez complexe du secteur.

2° - Etude tectonique. (Voir schéma tectonique pl. 6 et carte géologique au 1/5 000),

Cette étude a été facilitée par l'existence d'un certain nombre de bancs repères présents sur toute la surface étudiée:

- la lumachelle de la base du Turonien calcaire ;
- la couche de calcaire marneux à Ammonites du Turonien inférieur ;
- la couche de calcaire à silex du Cénomanién.

L'observation des séquences de bancs, notamment dans le Cénomanién, a permis la compréhension de certaines structures spécialement dans la colline dominant le Litani entre le nouveau et l'ancien pont de Karaoun.

a) Les FAILLES PRINCIPALES.

Les premières études géologiques ne faisaient état que d'une "flexure" empruntant à peu près le faite de la colline Arid el Rass et des collines suivantes vers le Sud Ouest, en direction de Machgara.

a') Failles F2 et F'2.

M. le Professeur BARBIER a montré (rapport de 1956 -

rapport de 1958) qu'en réalité plusieurs failles découpaient la colline Arid el Rass en diagonale, notamment les failles F2 et F'2.

En se basant sur les discontinuités dans les bancs repères, nous avons pu prolonger ces accidents vers le Sud Ouest et vers le Nord Est en observant des anomalies dans le pendage des couches de l'Eocène inférieur, dans le petit vallon situé immédiatement à l'arrière de l'axe B du barrage (en rive droite).

b') Failles F1 et F'1.

Un certain nombre d'indices et l'observation des photographies aériennes ont laissé présager l'existence d'autres accidents difficilement perceptibles sur le terrain, soit à cause de la couverture cultivée, soit à cause de la karstification intense des affleurements calcaires qui brouille les pendages et les directions des couches.

Le plus important de ces accidents est constitué par la faille F1. Son existence est matérialisée par l'interruption du banc-repère de calcaires à silex. Le tracé en surface est difficile à suivre "a priori", mais la photo aérienne, en révélant une torsion nette des couches de terrain, indique une direction générale NNW-SSE.

Une remarque faite sur le terrain dès les premières visites a permis de préciser l'extension vers le SSE de l'accident :

La petite colline formant vers l'Ouest le contrefort d'Arid el Rass est formée de bancs alternativement calcaires et marnocalcaires. Or ces bancs s'interrompent au pied de la colline dominant le Litani, entre l'ancien et le nouveau pont, avec une disposition différente marquant une discontinuité de structure (comparer les coupes sériées, pl. 7 et 8).

Cette discontinuité est due à l'existence de la faille F1 qui longe le pied nord du contrefort ouest d'Arid el Rass et lui donne son orientation.

De fait, une trace très nette (fragment du miroir de faille) a été retrouvée, marquant le dernier affleure-

ment calcaire de ce secteur.

Au delà, le tracé est impossible à suivre sur le terrain. La faille vient certainement se raccorder à la zone marginale d'effondrement de la Bekaa, vers la sortie sud d'Aitanit, au delà de l'école.

Un examen approfondi du terrain a montré que selon toute vraisemblance, cette faille F1 se ramifiait en une faille F'1 au niveau de la couche de calcaire à silex, provoquant de notables déformations dans l'espace compris entre F1 et F'1 (portion de voûte anticlinale pincée entre les deux failles, bien visible dans la topographie).

Vers l'Ouest, par contre, l'accident franchit le Litani environ 200 m à l'amont du vieux pont et se poursuit en direction du camp de Karaoun.

c') Faille F3

Elle provoque une légère torsion des couches en une faible voûte anticlinale au pied de la colline Arid el Rass, vers le Sud Ouest. Sa direction s'écarte alors notablement de celle des accidents cités précédemment.

d') Faille F4.

Elle a été citée par tous les experts ayant examiné le site de Karaoun. Passant à proximité de l'axe prévu pour le barrage, elle a attiré tout de suite l'attention. Elle est décrite en détail dans les rapports de M. DUBERTRET et nous n'y reviendrons pas.

e') Remarques générales sur les failles principales.

La direction générale des failles principales est ENE-WSW.

Ces failles sont des décrochements, leur rejet vertical est en général très faible. Le rejet horizontal est bien visible sur la carte géologique lorsque l'on considère un horizon-repère particulier (calcaire à silex par exemple).

La connaissance exacte de ces décrochements permettra, lors de l'étude hydrologique, d'éliminer ou de conserver certaines possibilités de circulations souterraines.

Dans un terrain formé d'alternances de bancs de perméabilités différentes, on conçoit que des perturbations d'ordre tectonique dans la disposition des couches annulent certaines circulations, ou, au contraire, risquent d'en créer de nouvelles. Il y a donc intérêt à connaître l'amplitude, la direction des accidents ainsi que la nature et les propriétés exactes des diverses couches en présence. Cela justifie l'obligation de mener conjointement, pour certains secteurs douteux, une étude tectonique et une étude stratigraphique détaillées.

b) LES FAILLES SECONDAIRES (en trait mince sur le schéma tectonique).

Ce sont des accidents résultant des contraintes subies par les terrains lors du déplacement dans le sens horizontal le long des failles principales. On peut les considérer comme des réajustements soit en cours de mouvement, soit un peu postérieurs (les éléments manquent dans le secteur pour apprécier la chronologie de ces phénomènes).

Les rejets horizontaux sont en général faibles, alors que les rejets verticaux peuvent être localement plus importants. Par exemple, le compartiment situé au Nord de f1 présente une extension beaucoup plus importante des dolomies friables que dans le compartiment f1, f2, due à une surélévation importante du premier compartiment cité.

Quoiqu'il en soit, ces accidents peu importants dans l'ensemble n'influent pas notablement sur les conditions hydrologiques.

c) AUTRES TYPES DE FAILLES

a') Failles anciennes.

Cette dénomination concerne les failles antérieures aux deux premières catégories énumérées et qui sont affectées par celle-ci.

Ainsi, dans la colline nord dominant le Litani, deux failles semblables, parallèles, ont pu être mises en évidence. Elles sont recoupées par les accidents secondaires liés aux failles principales.

L'examen des affleurements ne permet pas de conclusion chronologique plus précise.

b') Faille chevauchante.

Le Jabal Saal au Sud de la colline Arid-el-Rass est tronqué par une faille très oblique, chevauchante (bien visible par l'interruption de la barre karstique du Cénomanién-Turonien).

Ce fait est très important, car la continuité de cette bande de terrains très perméables - surtout - est interrompue par un matelas d'Eocène inférieur marnocalcaire moins perméable.

d) Les PLIS

La plupart des plis observés affectent un volume de terrain peu important, présentant un faible rayon de courbure, et ont tous une direction sensiblement parallèle NNE-SSW.

En général, ils sont une conséquence directe du jeu de failles. Dans un premier stade, le terrain se fracture, puis dans chaque compartiment ainsi délimité, des poussées latérales postérieures engendrent la formation de plis par tendance au resserrement de la zone comprise entre deux failles (failles-plis) [L. GLANGEAUD, 1944].

Suivant la direction et l'intensité de ces effets, la nature des roches affectées, les déformations prennent des aspects différents : le pli peut se pincer et passer progressivement à une faille (c'est le cas des plissements les plus proches de la faille de Yamouneh, dans les collines sous Aïtanit (voir pl. 7)).

Quand une série plastique se trouve englobée dans le plissement d'une couche sous-jacente rigide, elle se plisse en disharmonie avec son substratum et cela donne naissance à une série de plissements très aigus (Synclinal de calcaire dolomitique pinçant à sa charnière les marnocal-

caires à choux-fleurs (v. pl. 7, coupes 1,2,3).

e) CONCLUSION ET SYNTHESE.

a') Structure de la retenue.

Les relevés géologiques détaillés au 1/2 000, transcrits sur la carte au 1/5 000, montrent que la structure de la rive droite du Litani au voisinage de l'axe B est complexe.

L'élément nouveau et important qui se dégage de cette étude est la mise en évidence d'une famille de failles parallèles qui découpent la retenue en un certain nombre de compartiments. Toutes ces failles de même direction sont vraisemblablement contemporaines.

Il est possible, à la lumière de ces données nouvelles, de distinguer trois compartiments situés respectivement : au Nord de F1 et F2, au Sud de F2 et numérotés I, II, III.

La comparaison de I et II fait ressortir une identité structurale très nette : voir coupes 1 et 2, pl. 8 et coupes 1,2,3, pl. 7.

La séquence des bancs s'étage du Turonien calcaire à la base visible du Cénomaniens.

D'Est en Ouest, nous rencontrons d'abord des couches plongeant vers l'Est, régulièrement :

Un premier anticlinal (Axe A₁ de la pl. 6) ; enfin une zone plissée et faillée secondairement qui disparaît vers l'Ouest sous les éboulis au pied du Jebel Niha.

Localement, ces deux compartiments sont affectés d'autres accidents, mais le schéma général de la structure reste le même.

Au contraire, si l'on franchit vers le Sud la faille F2, le compartiment III se montre bien différent des deux premiers.

Le style tectonique en grands décrochements obliques parallèles s'estompe pour faire place à un réseau anarchique de failles disloquant le terrain en tous sens.

Deux éléments principaux sont à considérer : la faille oblique de la colline Jebel Saal, au Sud du Wadi Belié-té, et la grande faille F3.

La première interrompt brutalement la bande du Cénomani-nien-Turonien redoutée pour sa perméabilité et provoque un chevauchement des deux tronçons, intercalant entre eux un matelas continu d'Eocène inférieur marnocalcaire. De plus, elle dévie la direction primitive des couches vers l'Est et les amène à buter presque normalement à l'accident F3.

Ce dernier délimite avec F2 un gradin intermédiaire auquel sont rattachés les terrains du centre de la colline 1 029. Ce gradin s'apparente encore, par sa structure, aux compartiments I et II, bien que très étiré en oblique au centre de la colline Arid el Rass. En particulier, on ne re-trouve pas l'axe anticlinal A1. Mais à partir de la faille F3 sur laquelle vient buter la faille chevauchante du Jebel Saal, et, grâce à elle, les couches de terrain conservent la direction générale observée en I et II.

De l'exposé précédent, il ressort que les différents problèmes tectoniques viennent "s'articuler" sur un accident majeur : la faille F2 suivie de son gradin intermédiaire limité par F2 et F3.

Un regard sur le schéma tectonique (pl. #6) montre que les bancs calcaires du Turonien et du Cénomani-nien supérieur (en rouge) redoutés à juste titre pour leur perméabilité, sont relativement continus jusqu'au Nord de F3.

Au delà, vers le Sud, une discontinuité très importante interrompt ces bancs calcaires au niveau de la faille che-vauchante du Jebel Saal.

b') Structure de la colline Arid el-Rass (cote 1029).

En dépit des études tectoniques détaillées, un certain nombre d'inconnues subsistent sur la structu-re intime de la colline.

Il apparaît que la flexure du "camp de Karaoun" n'est qu'un aspect de la question et non pas le point

essentiel. Tout d'abord il faudrait limiter l'appellation, car la flexure bien réelle et visible dans la topographie est arrêtée en direction du camp de Karaoun par la faille F2.

La colline Arid-el-Rass est découpée en tranches (ou en biseaux car il est difficile d'apprécier l'inclinaison des failles) au sein desquels la série des couches stratigraphiques est très redressée et se décroche de proche en proche vers le Sud Ouest.

Que deviennent, dans tous ces accidents, les couches imperméables séparant les niveaux calcaires karstiques ?

L'inclinaison parfois très importante, 70 à 80°, de couches calcaires reposant sur des couches plus marneuses plastiques a favorisé des glissements banc sur banc, donnant naissance à la "flexure". Le déplacement relatif des masses rigides, notamment de l'Eocène moyen, a entraîné un laminage des séries de calcaires marneux et de marnes sous-jacentes. Ceci se traduit par des diminutions d'épaisseur, voire par la disparition de certains niveaux (marnes grises) dans l'ensemble de la colline, et du Sénonien au sommet de Arid-el-Rass. A ce sujet il faut noter qu'à la faveur d'une excavation (vers la cote 1020), on a pu noter que l'Eocène inférieur était présent au sommet même de la colline, entre la masse de l'Eocène moyen et les bancs du Turonien.

La forme des affleurements marnocalcaires sur le flanc sud ouest de la colline montre qu'en profondeur l'épaisseur de la série marnocalcaire de l'Eocène inférieur - Sénonien, va en augmentant vers le bas.

En d'autres termes, le laminage de la série des marnocalcaires est maximum vers le sommet de la colline. Cette épaisseur minimum des terrains plus marneux se tient à une cote bien supérieure à celle de la retenue et ne tire pas à conséquence.

En conclusion il semble bien acquis :

Qu'il y a continuité par des surfaces sensiblement verticales et plus ou moins vastes, entre les différents tronçons de la série karstique du Cénomaniens-Turonien (en rouge sur le schéma tectonique) figurant dans les compartiments qui cloisonnent Arid-el-Rass;

qu'une épaisseur variable, augmentant vers le bas, de marnocalcaires et peut-être de marnes grises (à la partie la plus basse de la colline) subsiste toujours entre les calcaires Eocène moyen de l'aval du barrage et la bande karstique cénomano-turonienne.

Les inconnues subsistantes sont les suivantes :

La présence, l'étendue et la cote maximum atteinte par les marnes grises au coeur même de la colline 1029.

Le degré de perméabilité des marnocalcaires Eocène inférieur, toujours présents entre les deux séries calcaires karstiques et la mesure dans laquelle on peut considérer cette couche comme un élément étanche.

L'existence d'accidents secondaires dus soit à la flexure, soit à une tectonique postérieure (difficiles à mettre en évidence dans la surface structurale chaotique de l'Eocène moyen sur le versant sud est d'Arid el Rass). Certains indices (brèches et ressauts soudains dans la topographie des calcaires) tendent à accréditer l'idée de tels accidents. Ceux-ci, par des zones bréchiques perméables, peuvent constituer des voies de circulations entre le Cénomanien - Turonien et l'Eocène moyen.

Il n'y a pas lieu de s'obnubiler exclusivement sur la cluse de l'Wadi Béliété. En fait, le problème posé par ce passage peut être posé pour toute la traversée de la colline. Un voile d'étanchéité limité au travers de l'Wadi Béliété risque d'être inefficace, des fuites étant susceptibles de se produire entre l'appui en rive droite du barrage et l'Wadi Béliété.

La seule solution raisonnable est d'empêcher l'eau d'entrer dans le Cénomano-Turonien de la colline Arid el Rass, par des injections soignées au pied du versant nord de ladite colline.

III.- Synthèse hydrogéologique.

1° - Préliminaire.

Les problèmes hydrogéologiques concernant la retenue de Karaoun sont complexes et ont été étudiés en détail. La réalisation du barrage dépendant en effet, pour une grande partie, de leur résolution.

Pour l'hydrogéologue, le sous-sol de la retenue peut être divisé en deux parties très dissemblables :

D'une part la rive gauche et le sous-sol même de l'ouvrage, correspondant en gros à la moitié orientale ; d'autre part la rive droite correspondant à la moitié occidentale.

La structure géologique de la première partie citée est simple (voir carte géologique au 1/5 000). Les marnes grises affleurant au coude du Litani s'enfoncent sous le calcaire marneux de l'Eocène inférieur qui forme le substratum du barrage. Cette disposition est la même pour la rive gauche et sous l'ouvrage. La présence de ces marnes grises forme un écran imperméable auquel peuvent être raccordés le voile d'étanchéité normal, ainsi que le voile au large en rive gauche. Cette disposition permet d'espérer intercepter, sans trop de difficultés, les circulations dans l'Eocène inférieur (normalment, à l'axe du barrage, l'écran de marnes grises se tient à une profondeur d'environ 90 m).

La moitié occidentale de la retenue, par contre, présente une structure géologique beaucoup plus compliquée. Les propriétés lithologiques des divers bancs varient beaucoup, ce qui influe directement sur le comportement de la nappe. D'autre part, la forme de celle-ci est sous la dépendance étroite de la structure.

2° Rappel des principaux résultats antérieurs à 1958.

L'organisation américaine du Point IV a effectué une première campagne de reconnaissance à l'aide de sondages. Ceux-ci sont placés sur trois axes envisagés comme emplacements possibles de l'ouvrage. Ces fo-

rages ont permis d'obtenir une première représentation de la nappe phréatique.

L'Office du Litani a procédé à l'exécution d'une série de sondages achevée en majeure partie en 1956. Ces sondages sont équipés de tubes piézométriques permettant de relever fréquemment les niveaux d'eau et, par conséquent, de suivre les variations de la nappe dans le temps.

Quelques forages complémentaires ont été demandés par la suite, notamment RE2 et RE4.

Monsieur le Professeur BARBIER a étudié de près le comportement de la nappe et attiré l'attention sur le fait que les points les plus dangereux pour les fuites se trouvaient en rive droite. Afin de préciser le problème, il a réclamé les trois sondages S1, S2, S3.

Les points incriminés sont la zone de la faille F5 qui limite le petit repli synclinal de l'Eocène moyen au pied oriental de la colline 1029, ainsi que la bande de calcaires karstiques du Cénomanién supérieur - Turonien qui traverse la colline Arid el Rass.

En conclusion, la forme de la nappe phréatique est la suivante :

(voir pl. n° 9bis)

Elle est très plate et située à une cote légèrement inférieure au niveau du Litani (cote 800 à l'axe B) dans toute la partie comprise entre le coude du fleuve et l'axe du barrage. Ceci indique que le Litani a colmaté son lit par des alluvions fines et imperméables.

A partir de l'ancien pont de Karaoun, donc en amont des marnes grises, la cote de la nappe est légèrement supérieure à celle du fleuve. Ceci se traduit par des sources jaillissant dans le lit même du Litani. Le banc de marnes forme bien un écran qui freine l'écoulement de la nappe vers l'aval.

En rive gauche, la nappe se relève rapidement dans le versant et atteint une cote supérieure à celle prévue pour la retenue. Ce relèvement est en rapport avec la remontée du substratum imperméable.

A l'aval de l'axe B, la présence de calcaires karstiques de l'Eocène moyen et supérieur crée une succion et la cote de la nappe décroît rapidement.

Enfin, en rive droite, la nappe présente une dépression très nette au niveau de la faille F5 indiquant une communication facile avec les calcaires karstiques de l'aval.

Une autre dépression est marquée plus à l'Est, entre les sondages RB1 et RB2, due à la présence des calcaires karstiques du Cénomano-Turonien.

Enfin, au delà, la nappe remonte dans le versant approvisionnée par les sources jaillissant le long de la faille de Yancouneh à une cote variant entre 1000 et 1100 m (cote maximum prévue pour la reynue : 856 m).

L'étude hydrogéologique qui suit portera spécialement sur le problème des fuites au large en rive droite. Au-paravant, nous donnerons quelques indications concernant les moyens d'étude employés et, en particulier, quels genres de renseignements on peut obtenir à partir des sondages équipés de piézomètres.

3° - Utilisation des forages de reconnaissance en hydrogéologie.

Les forages de reconnaissance permettent deux sortes de mesures :

a) Essais d'eau : Si l'on considère un échantillon de roche prélevé dans un forage, on peut mesurer au laboratoire la perméabilité de ce fragment. Elle correspond en effet à la facilité plus ou moins grande de l'eau à circuler dans les pores de la roche échantillon. C'est ce que l'on désigne par perméabilité "en petit".

Si l'on veut avoir une idée de la perméabilité générale de la roche en place sur une grande longueur, il faut faire des mesures "in situ". C'est le rôle des essais d'eau. La perméabilité ainsi mesurée ou perméabilité "en grand" est due aux fissurations diverses, aux diaclases, aux cavités karstiques.

Pour effectuer de telles mesures, on injecte de l'eau sous pression dans le forage, en isolant la tranche de terrain à étudier et l'on mesure les absorptions d'eau. Les résultats de tels essais sont transcrits, pour tout un forage, sur un diagramme dont la lecture renseigne sur la perméabilité "en grand" du terrain resté.

En pratique, dans les roches compactes à faible perméabilité en petit, mais très fissurées, on utilise

les essais de LUGEON. Les pressions d'injection sont fortes (jusqu'à 15 ou 20 kg/cm²) et on les applique en croissant, puis en décroissant. La dissymétrie des courbes obtenues indique s'il y a colmatage ou délavage des fissures.

Pour des mesures relatives de perméabilité il y a lieu d'exprimer, d'après LUGEON, les résultats en litres par minute par mètre de forage sous 10 kg/m². Cette unité chiffrant la perméabilité est souvent appelée le Lugeon.

Cette règle transcrite en unités cohérentes signifie que le coefficient de perméabilité varie entre 1 et 2 x 10⁻⁷ m/s pour un lugeon.

Pour que ces essais soient valables, il faut prendre un certain nombre de précautions :

Éviter les fuites au niveau du packer (cela dépend de la fissuration du rocher, de sa dureté, et du mode de forage. L'utilisation des diamants donne les meilleurs résultats).

- Attendre, avant de faire les mesures, que s'établisse après chaque variation de pression, un régime permanent.

- Adapter le débit de la pompe et le diamètre du forage à la fissuration.

- Enfin, effectuer les corrections en fonction des pertes de charge, donc du diamètre des tubages de la profondeur atteinte, de l'existence et du niveau d'une nappe phréatique.

b) Étude d'une nappe aquifère. Un sondage de reconnaissance une fois achevé, les essais d'eau terminés, peut être équipé d'un tube piézométrique. Il s'agit d'un tube métallique descendu jusqu'au fond du forage et équipé d'une crépine ou d'une toile métallique à son extrémité inférieure. L'eau monte ainsi dans le tube et se stabilise au niveau de la nappe. A l'aide d'un dispositif simple, en général électrique, on peut mesurer ce niveau.

Du point de vue pratique, il y a intérêt à effectuer fréquemment de telles mesures (deux fois par mois par exemple) sur une longue période de temps, pour étudier les variations de la nappe en fonction de divers facteurs notamment la pluviométrie, la perméabilité du terrain. Des cartes de la nappe à diverses époques (étiage et crue par exemple) ainsi que des courbes de gonflement donnent d'utiles renseignements sur les circulations souterraines.

De plus, dans le cas d'un barrage de retenue, si l'on dispose de suffisamment de tubes piézométriques et de renseignements nombreux sur la nappe, avant la mise en eau, on peut suivre plus facilement les effets de celle-ci sur les eaux souterraines.

4° - Etude de la nappe dans les collines "au large" en rive droite.

Les variations de la nappe dans ce secteur sont étudiées par une série de piézomètres situés au pied nord est de la colline Arid-el-Rass (série RB avec les forages RB3, RB2, RB1, RB4 et RB5, ainsi que la série RE avec RE2 et RE4 et les sondages récents S1, S2, S3.

Une deuxième série de forages s'aligne au Sud-Sud Ouest dans l'Wadi Béliété, il s'agit des forages de la série RA : RA1, RA2, RA3, RA4, RA5.

a) Série RB.

Sondage RB1. Toute la longueur forée traverse le calcaire karstique du Cénomanién supérieur très perméable. Le diagramme des essais d'eau montre des perméabilités importantes jusque vers 51 m (les absorptions varient de 22 à 30 litres par mètre et par minute sous 10 kg/cm²). Celles-ci diminuent ensuite pour atteindre 2 l/m/mn à 62 m de profondeur. Une zone imperméable est atteinte à 74 m. Profondeur atteinte 76 m (v. pl. 9).

L'amplitude maximum des variations de la nappe pour la durée de temps considérée atteint 6,70 m, ce qui est faible (v. pl. 10). Cela est en accord avec la perméabilité importante de ces sondages (ces résultats sont comparables avec ceux de RC3 et RC1 situés dans le même terrain).

Sondage RB2. Il est entièrement situé dans le banc calcaire karstique du sommet du Turonien à proximité de la faille F'2, dans le coin très étiré et redressé compris entre F2 et F'2. Les perméabilités sont dans l'ensemble fortes à très fortes, variant de 7 l/m/mn à 60 l/m/mn; sous 10 kg/cm² dans les zones superficielles.

L'amplitude des variations de la nappe est un peu plus grande qu'au sondage précédent (v. pl. 9 et 10).

Sondage RB3. Il est implanté dans les marnocalcaires de l'Eocène inférieur. Le diagramme des absorptions est assez typique d'un calcaire marneux.

Les perméabilités, importantes dans la tranche supérieure, jusqu'à 30 m de profondeur, dépassent 40 l/m/mn sous 10 kg/cm². Elles décroissent pour s'annuler de 44 à 52 m, puis de 57 m à 61 m et à partir de 75 m. La profondeur atteinte est 77 m.

La perméabilité d'ensemble de ce calcaire marneux de l'Eocène inférieur apparaît peu importante à partir d'une certaine profondeur. L'amplitude des oscillations de la nappe augmente. Enfin la cote de la nappe est supérieure à celle des sondages voisins. Une zone plus étanche provoque un bombement de la surface des eaux souterraines (v. pl. 9 et 10).

Sondage RB4. Il débute dans les couches altérées d'un calcaire gris dolomitique corrodé. La couche située sous ce calcaire a été reconnue au sondage RE2 ; elle est beaucoup plus dolomitique.

Les perméabilités importantes dans les premiers mètres du forage (allant jusqu'à 64 l/m/mn sous 5 kg/cm²) diminuent beaucoup avec la profondeur et s'annulent sur d'assez longs tronçons. La perméabilité de ce banc apparaît comme faible dans l'ensemble et très irrégulièrement répartie. A partir de 81 m de profondeur la roche est imperméable. Le fond du forage est à 93 m.

Les fluctuations de la nappe font preuve d'une grande amplitude : 18,50 m pour la période considérée (v. pl. 11 et 10).

Sondage RB5. Il est implanté assez loin de la rive de la future retenue. Par rapport au sondage RB4, situé en un

point plus bas dans la topographie, il donne des niveaux d'eau inférieurs.

BU
BOURGET

Ce fait a été signalé notamment par M. DUBERTRET, sans que l'on puisse en donner une interprétation. Cette anomalie se trouve maintenant expliquée par le voisinage de la grande faille F1.

L'importance de ce drain est limitée et le relevé des niveaux d'eau dans les sondages voisins et notamment RE4 fait ressortir un écoulement en direction de la retenue.

Le diagramme des absorptions montre une grande perméabilité d'ensemble allant jusqu'à 40 l/m/mn sous 5 kg de pression.

Or, la courbe de variation de la nappe (pl. 11 et 10) montre une amplitude très importante (29,50 m).

Il y a là une contradiction. Celle-ci peut s'expliquer en considérant qu'au sein de terrains relativement peu perméables, comme l'ont montré les sondages voisins, la faille a créé un drain de faible volume et dans lequel les apports d'eau se traduisent par des augmentations rapides de niveau. On constate que le niveau maximum de l'eau dans RB5 est atteint après celui des sondages voisins, et notamment du RB4.

Les eaux de la zone RB4, RE2, RE4 sont sans doute légèrement drainées par cette faille. De toute façon, l'écoulement se fait en direction de la retenue, ce qui est rassurant.

En outre, dans la zone RB4, RE2, RE4, nous sommes déjà assez éloignés du bord même de la retenue. La tranche d'eau en bordure du futur lac sera peu épaisse et, à ce moment, on peut penser que les colmatages argileux de surface augmenteront les pertes de charge dans ce secteur, réduisant les fuites à peu de chose.

La partie occidentale des collines au large rive droite présente donc moins d'importance du point de vue hydrogéologique que le pied même de la colline 1029.

b) Forme de la nappe suivant le profil RB.

1) Secteur central.

L'allure de la nappe suivant la série de piézomètres RB met en évidence (rapports de MM. DUBERTRET, Mars 1957 et BARBIER, Avril 1957) des dénivellations nettes (pl. 12).

Un premier thalweg se dessine entre RB1 et RB2 et il correspond à la bande de calcaires karstiques du Cénomano-Turonien. Cette dépression qui ne se prolonge pas à l'amont vers RC1 indique un écoulement vers l'aval.

Les sondages S1, S2, S3, bien que plus rarement relevés, donnent quelques informations complémentaires.

Cote du terrain	S1	S2	S3
	856,60	918,70	886,20
Cotes de la nappe			
19.3.58	806,55	-	-
26.3.58	806,93	-	-
18.4.58	805,60	808,43	-
19.11.58	802,84	805,12	848,22
10.3.59	812,76	831,68	869,38
17.10.59	804,66	-	850,12
20.10.59	804,25	854,04	850,00
23.10.59	805,12	-	-
27.10.59	804,19	-	849,88
5.11.59	804,55	-	-
9.11.59	804,37	-	-
12.11.59	803,91	-	849,78

Le sondage S, donne des niveaux comparables en ordre de grandeur à ceux relevés dans RB2. L'amplitude des variations qui ne doit pas excéder 7 à 8 m d'après les écarts relevés sur le tableau ci-dessus (les hautes eaux n'y sont pas repérables avec exactitude). Il témoigne d'une perméabilité im-

portante, confirmée du reste par les essais d'eau qui ont mis en évidence de fortes absorptions jusqu'au fond du forage.

Des niveaux d'eau nettement plus élevés sont fournis par S2 et surtout S3 sous l'influence sans doute du banc de marnes à "choux-fleurs" sous-jacentes. Du fait des cotes d'eau atteintes, un écoulement vers la retenue d'une partie de ces eaux est probable.

L'écoulement par l'aval d'eaux infiltrées dans les calcaires karstiques céno-mano-turonien semble donc se localiser (au niveau des sondages RB) au Turonien et à la partie tout à fait supérieure du Cénomaniens.

Il y a donc là une zone à soigner tout particulièrement lors de la réalisation du voile au large.

Le problème s'est montré plus compliqué lors d'essais d'injections dans cette zone, au voisinage de S1 (Octobre-Novembre 1959). En effet, tous les sondages ont décelé, dans les quarante premiers mètres environ, une zone très perméable avec de fortes absorptions. Puis, chose curieuse, prouvant une fois de plus que la perméabilité en grand des calcaires karstiques est très irrégulièrement répartie, de 40 à 60 m environ une zone pratiquement imperméable. En dessous de 60 m les absorptions deviennent énormes.

Ce fait est évidemment très inquiétant. La zone pratiquement imperméable s'étend donc (verticalement) de la cote 800 à la cote 320. On ne connaît rien de son extension dans le sens horizontal, ni de sa continuité. Dans les sondages, cette zone semble bien plus réduite et, en tout cas, plus profonde (entre 60 et 80 m) et rien ne prouve que ce soit la même, du reste.

La décision a été prise de descendre le voile jusqu'à cette zone moins perméable et de l'y raccorder. Ensuite, on attendra la mise en eau de la retenue pour juger de ce qui se passe. On espère que les pertes de charges provenant de l'allongement des circulations à cause du voile, seront suffisantes pour réduire notablement les fuites.

Cette solution ressemble à un coup de dés, mais dans la circonstance il paraît difficile de faire autrement. Les

absorptions révélées en dessous de 60 m sont telles, qu'il serait vain de tenter une injection.

2. Extrémité occidentale du profil.

Des renseignements intéressants complétant ceux fournis par RB4 sont donnés dans les deux sondages RE2 et RE4. Malheureusement, les niveaux n'étant pas relevés régulièrement, les résultats sont très partiels et ne donnent qu'une idée approximative des variations de la nappe dans ce secteur.

Le tableau suivant donne les niveaux relevés entre mars 1957 et Novembre 1959.

Dates	RE2	RE4
23 mars 1957	848,16	851,27
13 mai "	835,96	840,03
22 mai	834,92	838,16
31 mai	833,08	836,07
6 juin	831,88	834,27
12 juin	835,72	833,85
20 juin	827,60	830,37
2 juillet	825,41	828,05
12 juillet	823,41	826,33
26 juillet	822,12	824,91
16 août	819,66	823,27
29 août	820,25	832,34
16 septembre	819,33	821,11
19 mars 1958	843,87	847,55
26 mars	842,45	846,16
10 avril	839,56	843,44
18 avril	838,13	841,47
24 avril	837,37	840,49
19 novembre	816,76	817,94
10 mars 1959	840,72	842,95
20 octobre 1959		818,85
23 octobre		818,87
27 octobre		818,47
12 novembre		818,19

En comptant une cote d'étiage d'environ 816 m pour le RE2 et de 818 m pour le RE4, les amplitudes sont respectivement en 1957 de l'ordre de 32 m pour RE2 et 33 m pour RE4.

On peut alors tirer deux conclusions :

- la nappe se comporte de la même façon à RE2 qu'à RE4 ;
- l'allure des variations est tout à fait analogue à celle notée pour RB4 et RB5.

c) Série RA : (Wadi Beliéte). Voir planches 13 et 14.

La ligne de piézomètres installés dans l'Wadi Beliéte indique le comportement de la nappe phréatique sur le versant aval sud (par rapport à l'axe B) de la colline Arid el Rass. Il est intéressant de comparer ces variations avec celles de la série RB en ne perdant pas de vue la tectonique exposée précédemment (II, 2°, e).

Sondage RA3. Il a été implanté sur la retombée ouest d'un petit mouvement anticlinal affectant le calcaire karstifié du Cénomanién supérieur. Les essais d'eau effectués lors de la perforation de ce sondage ont montré, sous 10 kg de pression, une perméabilité assez forte allant jusqu'à 30 l/m/mn dans la partie inférieure du sondage. Le diagramme des absorptions présente deux étranglements correspondant à des perméabilités réduites sur de courts tronçons. La courbe de variation de la nappe confirme bien la perméabilité générale assez importante dans le calcaire du Cénomanién qui occupe la partie haute de l'Wadi Beliéte.

L'amplitude des variations ne dépasse pas en effet 6,50 m. A titre indicatif, rappelons que le sondage RC, situé dans le même calcaire, mais à l'amont de l'axe du barrage, dans la zone considérée comme la plus perméable de la retenue, donne des variations pour la même période de 4,30 m environ. Il y a donc similitude de comportement pour ce terrain de part et d'autre des accidents qui affecte en diagonale la colline Arid-el-Rass.

Sondage RA1. Il est implanté dans le calcaire blanc Karstique de l'Eocène moyen qu'il traverse sur 22 m. Il recoupe ensuite la série des calcaires marneux de l'Eocène

inférieur et du Sénonien, laminée et remaniée par la flexure de la colline 1029. Les perméabilités sont énormes dans le calcaire et restent très fortes dans la série des calcaires marneux.

Sondage RA2. Il recoupe les calcaires blancs de l'Eocène moyen et s'arrête dans les niveaux marneux sous-jacents. Les essais d'eau, partiels dans le calcaire, ont indiqué des perméabilités très fortes. Dès que l'on passe dans le calcaire marneux, ces perméabilités diminuent notablement.

Les variations de la nappe se font dans la zone de transition entre le substratum peu perméable et le calcaire qui l'est davantage, ce qui explique les amplitudes assez fortes des différences de niveaux.

Il en est de même pour le sondage RA5. Cependant il faut remarquer que, dans ce sondage, la zone de transition se place en plein Eocène moyen et paraît indiquer ainsi une diminution locale de perméabilité à partir de 85 m dans ce calcaire.

d) Forme de la nappe d'après le profil RA.

Le sondage RA4 présente de faibles amplitudes de variations dénotant une perméabilité assez forte des calcaires du Cénomaniens supérieur de la partie haute du Wadi Beliéti. La nappe doit être assez plate dans ce secteur.

Puis, en se déplaçant vers l'Est, la nappe se creuse, aspirée par les calcaires de l'Eocène moyen à l'aval. La dénivellation assez faible dans la cluse de l'Wadi Beliéti prouve que l'écran des marnocalcaires freine légèrement l'écoulement de la nappe vers l'aval.

5° - Conclusions relatives à l'hydrogéologie de la rive droite.

La comparaison des variations du niveau de la nappe suivant les profils RB et RA montre une dissymétrie qui reflète la discontinuité géologique due à la tectonique (Faille F2).

Nous avons vu plus haut (Etude tectonique, § 5, Conclusion et Synthèse) que cette faille F2 était l'accident majeur sur lequel venait "s'articuler" la structure de la colline Arid el Rass.

Les variations de la portion de nappe étudiée par RB4, RB5, RE2 et RE4, au Nord de F2, sont très différentes de celles enregistrées à RA3, dans le compartiment sud :

D'une part des amplitudes importantes, de même ordre de grandeur dans les 4 forages, d'autre part des variations de faible amplitude dans le compartiment sud, au niveau de RA3.

M. DUBERTRET (rapport du 8 mars 1957, p. 55) s'était montré surpris par les variations notées au sondage RB4. Il avait émis l'idée que la nappe, dans ce secteur, devait se comporter d'une façon différente des nappes voisines. Il est possible de compléter et d'élargir cette vue.

Dans la partie occidentale (colline au large, rive droite) du compartiment tectonique limité par F1 et F2, une portion de nappe phréatique s'individualise par rapport aux parties voisines et en diffère beaucoup par ses variations.

Les cotes maxima connues en 1957 de cette portion de nappe dans les sondages RE2 et RE4 sont :

RE2 = 848,16 m	}	23 mars 1957
RE4 = 851,27 m		

Ces cotes ne présentent pas les vrais maxima, puisque, pour l'année 1957, les plus hautes eaux se situaient en février. En extrapolant les variations données précédemment par ces deux sondages, il est raisonnable d'admettre que la nappe en crue avoisine la cote 856 ou même la dépasse dans le secteur RE2-RE4. Les risques de fuites sont donc limités de ce côté-là.

Le problème se restreint donc aux possibilités de circulations à travers la colline Arid-el-Rass. La conclusion de l'étude tectonique a montré que l'on pourrait craindre des

communications entre niveaux perméables au sein de la colline à cause des nombreuses failles décollées.

L'étude d'hydrologie souterraine précédente confirme cette possibilité (thalweg dans la nappe entre RB1 et RB2 en rapport avec les failles F2 et F'2) de circulation entre les calcaires karstiques de l'amont et de l'aval entre l'appui du barrage et l'Wadi Beliéti.

Un voile d'étanchéité placé en travers de l'Wadi Beliéti, comme cela avait été proposé, risque d'être inefficace.

Le seul moyen de prévenir les fuites est d'empêcher à l'eau l'accès au centre de la colline. Le voile d'étanchéité doit être placé au pied nord de Arid-el-Rass et recouper tous les bancs perpendiculairement.

IV.- Les fondations de l'ouvrage.

La zone de fondation de l'ouvrage correspond uniquement aux calcaires marneux de l'Eocène inférieur. Ce terrain présente-t-il toutes garanties pour la stabilité de l'ouvrage?

Tout d'abord il faut signaler que le rocher, d'après les calculs de l'ouvrage, devait travailler au maximum à 20 kg/cm², dans l'hypothèse d'un barrage à voûtes minces multiples.

Des essais d'écrasement effectués sur des carottes retirées de l'Eocène inférieur ont donné des résistances à l'écrasement très notablement supérieures, variant il est vrai avec le degré d'altération du calcaire marneux.

Cependant, de tels essais n'ont pas grande signification exprimés de la sorte. Il faut les replacer dans le cadre même de la fondation. La résistance d'un échantillon à la compression (en l'absence de fissures, de diaclases, d'altération) est une propriété mécanique caractéristique de la roche. En place, cette résistance peut être très notablement modifiée par un grand nombre de facteurs: répartition des zones altérées, inclinaison et direction du pendage, directions principales de diaclases et leur inclinaison, sens et répartition des ef-

forts, homogénéité de la roche de fondation etc...

Il faut donc se livrer à un examen approfondi des conditions de gisement du marnocalcaire de la fondation avant de conclure.

La connaissance de la nature exacte du terrain en place a été favorisée par l'exécution de tranchées de reconnaissance d'un plot d'essai d'injection et enfin par le début des fouilles elles-mêmes.

Le pendage, dans l'ensemble, est de 10° aval. Cette disposition, en général peu favorable, ne tire pas ici à conséquence. La valeur du pendage est en effet très faible et, d'autre part, si la valeur moyenne est de 10° , dans le détail, les bancs se montrent légèrement ondulés et de petites diaclases en font varier la direction à l'échelle d'une voûte ou d'un contrefort.

La teinte blanchâtre que la roche présente en surface résulte d'une altération par décalcification. Le rocher sain est gris bleuté. L'altération se manifeste également par l'élargissement par dissolution de fissures en général verticales.

Ceci se traduit par la présence, dans les fouilles ou dans les tranchées de reconnaissance, de poches verticales communiquant avec la surface et remplies d'argiles rouges de décalcification. De telles poches argileuses descendent parfois très profondément et peuvent atteindre cinq à six mètres de profondeur. On en a même mis une à jour, dans les fouilles de la prise d'eau, qui fut décapée jusqu'à 10 m de profondeur et qui, à cette cote, n'était pas encore vidée. Elle fut remplie de béton et laissée telle quelle.

La présence de ces cavités détruit évidemment l'homogénéité de la roche. Cependant ces fissures ne communiquent pas entre elles en général.

Un autre système de fissuration a été mis en évidence par des sondages effectués dans la partie centrale de l'ouvrage, à proximité du Litani. Ces fissures avaient échappé aux premiers sondages de reconnaissance effectués rapidement, au carottier simple au carbure. Les sondages effectués durant l'été 1959, pour des essais d'injection,

au carottier double avec couronne à diamants, donnèrent des résultats excellents qui furent les suivants :

Après avoir traversé une épaisseur de terre argileuse épaisse de 3 à 4 m suivant les points, les sondages rencontrèrent à une profondeur variant entre 7 et 9 m une fissure au sein du marnocalcaire altéré. La disposition des sondages étant réalisée en trois rangées parallèles espacées de 2 m, lorsque la fissure fut rencontrée dans tous les forages, on put se rendre compte qu'elle était inclinée d'une valeur sensiblement égale au pendage des couches.

La nature de son remplissage était curieuse. Il variait de l'argile résiduelle très pure, amenée en solution colloïdale par les eaux percolant très lentement dans le marnocalcaire, aux argiles grossières de surface, voire aux limons du Litani.

De très nombreuses petites coquilles de Gastéropodes d'eau douce, exactement semblables à celles que l'on peut trouver actuellement dans le Litani, étaient englobées dans ce limon. Elles ne pouvaient qu'avoir été apportées avec la vase : la fissure communiquait donc avec la surface du marnocalcaire quelque part sous la couverture de terra rossa. (Ce fait fut confirmé lors de l'injection par d'abondantes résurgences de coulis en surface).

Par endroit, cette fissure était très importante (1 m d'épaisseur au forage n° 7 avec les 35 cm supérieurs complètement vides).

Une deuxième fissure plus profonde fut découverte grâce au double carottage vers 11 m.

Cependant, la première fissure compromettant la stabilité de la partie centrale de l'ouvrage, il fut décidé de pousser la fouille de ce secteur jusqu'à enlever complètement la fissure.

La seconde, plus ténue, a été injectée et le traitement a donné satisfaction.

Néanmoins, ce système de fissuration dirigé dans le sens des couches n'a été rencontré que dans le fond de la vallée et il n'a plus été retrouvé dans les fouilles des versants ou du plateau.

Il subsistait une certaine inquiétude due à la possibilité d'existence de poches argileuses un peu en dessous du niveau définitive des fouilles. Profitant du fait que l'argile rouge (terra rossa) remplissant ces poches a une résistivité très différente de celle du marnocalcaire, des mesures électriques sont faites systématiquement dans le fond des fouilles en vue de déceler

un tel accident.

En conclusion, le substratum de l'ouvrage se montre relativement hétérogène malgré l'"homogénéité" stratigraphique. La solution du barrage à voûtes multiples était peut-être élégante, techniquement, mais la décision de réaliser en définitive un ouvrage en enrochements va dans le sens de la sécurité.

De plus, d'importants travaux d'étanchement (voile normal) ont été effectués sous l'ouvrage, consistant essentiellement en un voile normal qui, théoriquement, doit descendre jusqu'aux marnes grises. En fait, les sondages ont montré que le terrain devenait imperméable à partir de 70 m environ, soit 20 m au-dessus des marnes.

Les essais effectués ont montré que les coulis étudiés en laboratoire et adaptés aux chantiers étaient au point ainsi que la méthode d'injections, et que l'étanchéité pouvait être obtenue. Il semble donc peu probable que des circulations d'eau dangereuses puissent prendre naissance sous l'ouvrage.

IV. CONCLUSIONS GENERALES.

L'étude générale n'a porté que sur la question complexe des fuites au large en rive droite. Afin de présenter une récapitulation synthétique des problèmes posés par le barrage de Karaoun, nous citerons cependant dans les conclusions déjà connues avant 1958 :

Etanchéité de la cuvette.

a) Fuites au large vers le Nahr Hasbany (vallée du Jourdain, au Sud Est du barrage).

Monsieur le Professeur BARBIER, dans son rapport de mai 1958, exclut cette possibilité. Il remarque que, dans un sondage pétrolier effectué à Yohmor (sur un petit repli anticlinal affectant le grand synclinal de la Bekaa sud) le toit du Cénomaniens-Turonien karstique apparaît à 100 m environ sous la surface de la mer (coupes et cotes fournies par M. J.O. HAAS, Géologue-Conseil).

L'hypothèse de fuites ressortant dans la vallée du Nahr Hasbanyi (cote 550 m aux sources du Nahr Hasbanyi) impliquerait un siphonage énorme depuis la cote 850 (plan d'eau à Karaoun), jusqu'à la cote 550, en passant par un point situé au minimum à 100 m au-dessous du niveau de la mer. Les pertes de charge sur ce tracé excluent pratiquement toute circulation dans ce sens.

b) Fuites au large en rive droite.

a' - A travers le Jebel Niha : les rapports antérieurs ont établi que, sur ce point, il n'y avait pas de risques. La cote de la nappe dans le Jebel Niha est, en effet, bien supérieure au niveau maximum de la retenue.

b' - Par le Cénomanién (vers l'Ouest) : dans le rapport de synthèse de 1958, M. BARBIER montre que ce risque est relativement réduit à cause de la perméabilité bien moindre des terrains périphériques de la retenue (calcaires marneux et dolomitiques) ainsi que de la faible tranche d'eau les recouvrant à la mise en eau. De plus, les distances de percolations que de telles circulations impliqueraient dans ces terrains, provoqueraient des pertes de charges telles, que des fuites importantes sont improbables.

c) Fuites rapprochées.

a' - En rive gauche : ce problème peut être résolu par un voile étanche augmentant les distances de circulation et créant des pertes de charge.

La remontée du terrain imperméable vers l'amont permet, en infléchissant le tracé du voile dans cette direction, de diminuer la hauteur de terrains à injecter.

De toute façon, les sondages de reconnaissance ont prouvé qu'il n'était pas nécessaire de raccorder le voile au niveau

des marnes paléocènes. L'Eocène inférieur calcaire marnoux devient imperméable vers la base, cela économisera une certaine hauteur de voile.

b' - Sous l'ouvrage : le problème sera résolu par l'exécution d'un voile normal se raccordant à la zone imperméable de l'Eocène inférieur (aux environs de 50 m de profondeur).

La zone superficielle nécessitera des soins particuliers par suite des phénomènes d'altération qui se développent sur de vastes surfaces.

Les résultats du plot d'essai n° 1 prouvent que l'étanchement peut être obtenu de façon satisfaisante.

c' - En rive droite : deux points délicats sont à considérer : l'appui rive droite du barrage (la nappe est aspirée vers l'aval dans ce secteur ;

la bande calcaire karstique cénomano-turonienne.

L'exposé précédent sur la Géologie et l'Hydrologie de la colline Arid-el-Rass et de ses contreforts a montré que la meilleure solution était un voile au large, au pied nord ouest de la colline. Ce voile recoupera les couches de terrains perpendiculairement et devra sans doute être descendu assez profondément pour augmenter les distances de percolation.

Il convient de l'étendre vers l'Ouest, jusqu'aux environs de la couche de dolomies friables formant le dernier affleurement visible de Cénomaniens sous l'Aïtanit.

DEUXIEME PARTIE

LES TRAVAUX SOUTERRAINS.

CHAPITRE I,

GENERALITES.

I.- Intérêt géologique des travaux souterrains.

Le plan d'aménagement du Litani comporte, nous l'avons vu, deux tunnels :

- le tunnel de Markabi
- le tunnel d'Awali.

Le premier, joignant le barrage à la Centrale de Markabi, est situé dans la Bekaa sud et traverse, sur toute sa longueur, des calcaires de l'Eocène moyen.

Le second, long de 17 km environ, est très intéressant car il franchit en "travers-bancs" le Mont Liban au niveau du Jabal Niha. Il recoupe la majeure partie de la série stratigraphique libanaise, ainsi qu'un certain nombre d'accidents tectoniques importants. Il présente donc, pour la connaissance de la géologie du pays, un intérêt évident.

II.- Travail effectué.

A notre arrivée au Liban, l'état des travaux était le suivant :

- 1° - la galerie de Markabi était à étudier ;
- 2° - le tunnel d'Awali était juste attaché aux fenêtres de Jezzine et de Markabi. L'étude géologique de ce tronçon avait été faite par M. DUBERTRET. Nous ne l'avons pas reprise.

Le tronçon Jezzine Kanane, par contre, restait à étudier dans sa totalité.

Pour la partie de souterrain en cours d'exécution nous nous sommes efforcés de rassembler le maximum de données afin

de mettre en évidence l'influence du terrain sur le déroulement des travaux.

III.- Divisions de la deuxième partie.

Le chapitre II est constitué par un résumé de l'étude préliminaire de la galerie de Markabi.

Le chapitre III traitera de la galerie d'Awali ; il comprendra deux grandes divisions.

La première (A) donnera les principaux renseignements fournis par l'exécution des travaux qu'il nous a été donné de suivre.

La deuxième (B) consiste en une étude préliminaire du tracé Jezzine Kanane.

La place nous étant malgré tout limitée, nous n'exposerons dans l'ensemble que les faits saillants, le détail de la documentation étant déposé au Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Grenoble.

ETUDE GEOLOGIQUE DE LA GALERIE DE
MARKABI.

(Avant le début des travaux).

=====

I.- Implantation de l'ouvrage (voir carte générale de l'aménagement, planche n° 15) :

La galerie de Markabi débute à la prise d'eau du barrage de Karaoun (cote 800 environ), et se termine à la cheminée d'équilibre de la Centrale d'Awai, située dans la gorge du Litani 6,500 km à l'aval. Deux fenêtres sont prévues, dénommées F_1 et F_2 . La fenêtre F_1 est implantée dans le vallon du wadi Mourha ; la fenêtre F_2 dans le dernier vallon affluent du Litani avant la Centrale de Markabi.

II.- Stratigraphie.

Le tunnel est implanté, pour sa presque totalité, dans les calcaires de l'Eocène moyen formant plateau à l'aval du barrage. Seule l'entrée amont effleure le marnocalcaire de l'Eocène inférieur.

III.- Propriétés lithologiques et techniques du terrain.

Le calcaire lutétien a déjà été décrit plus haut lors de l'étude du barrage. Nous insisterons davantage ici sur ses qualités techniques.

La dureté de ce calcaire est appréciable. Il se débite au choc en éclats esquilleux et en fine poussière (il y a intérêt à éviter les charges d'explosifs trop fortes). Les débaïs, quand

ils sont propres, peuvent fournir les agrégats nécessaires à la confection du béton de revêtement.

La pureté de ce calcaire le rend sujet aux phénomènes de karstification. Ceux-ci donnent localement des fissures profondes, remplies de terra rossa de décalcification. La galerie risque d'en rencontrer assez fréquemment.

La perforation de ce calcaire est aisée, le rendement aux explosifs est bon, sauf dans les zones trop fissurées. La tenue est en général bonne et ne nécessite de soutènement que dans les zones faillées.

IV.- Structure géologique (voir coupe pl.16 et 17).

Le plateau de calcaire éocène moyen qui débute à l'aval du barrage présente d'abord des pendages faibles (10° vers l'aval en moyenne), puis il se pince progressivement en un synclinal devenant très aigu vers Markabi.

Ce synclinal est affecté d'un grand nombre de cassures (liées, là encore, à la présence à proximité de la grande faille de Yamouneh). Ces cassures n'apportent pas de modifications à la coupe géologique du tunnel, mais donnent des zones broyées plus ou moins importantes.

V.- Hydrologie - Venues d'eau.

Les études de la nappe effectuées au barrage ont montré une très forte aspiration des eaux vers l'Eocène moyen karstique. La nappe descend donc très rapidement à l'aval du barrage. La galerie restant assez proche de la surface, ne rencontrera pas de venues d'eau, car elle se maintient au-dessus du niveau phréatique.

A l'occasion de pluies, quelques petites infiltrations peuvent atteindre le tunnel par les zones fissurées, mais le problème d'évacuation de l'eau ne se pose pas.

D'une manière générale, les seuls ennuis que l'on peut attendre sont dus à la présence de failles en assez grand nombre. Celles-ci se traduisent par des zones bréchiques plus ou moins infiltrées de "terra rossa" de décalcification. De telles zones sont propices aux éboulements (surtout après des pluies, car les eaux d'infiltrations humectent l'emballage argileux des brèches). Nous n'avons indiqué sur la coupe générale que les cassures les plus visibles, mais il en existe d'autres difficiles à déceler en surface (monotonie du plateau, terres cultivées ou coulées basaltiques).

Les seuls points délicats seront le franchissement des trois vallons suivants :

Vallon du Nahr ech Chita : Sous le fond du ruisseau, l'épaisseur de terrain n'est que de 6 m au-dessus de la calotte de la galerie. Sur ces 6 m, 2 m au moins sont formés d'alluvions du torrent. D'autre part, les fouilles du pont de la nouvelle route de Karaoun ont montré que, dans ce secteur, l'altération peut descendre jusqu'à quatre ou cinq mètres de profondeur dans le rocher. Il y a donc ici un risque de détourner le ruisseau dans la galerie (voir pl. 17, fig. 1).

Le vallon au Sud de la Fenêtre F₁. Ce vallon est orienté par une faille (zone broyée). La galerie passe à 15 m sous le fond du thalweg qui est sec en temps normal.

Le vallon de la Fenêtre F₂. Ce vallon emprunte l'axe d'un pli brusque du calcaire lutétien. La charnière du pli est cassée et la partie centrale est bréchique et en mauvais état.

Sur une centaine de mètres, il y a là une zone délicate à traverser qui nécessitera des soutènements par cadres métalliques. Cependant le vallon est également sec en temps normal.

VII.- Conclusion.

D'après l'étude du terrain, il apparaît que la galerie de Markabi se présente dans des conditions favorables. Certains avantages se trouvent réunis :

- homogénéité du terrain ;
- qualité de la roche ;
- absence de nappe phréatique dans la zone des travaux.

Seules les failles entraînent localement la dislocation du terrain. De petits éboulements peuvent ainsi se produire un peu partout dans le tunnel sans conséquence grave. Ils seront toujours contenus par des soutènements appropriés.

CHAPITRE III.-

LA GALERIE D'AWALI.

Préliminaire : La galerie d'Awali amènera les eaux dérivées du cours du Litani, à l'usine d'Awali sur le versant méditerranéen du Mont Liban. Etant donné sa longueur ce tunnel comporte 2 fenêtres^{es} intermédiaires : une à Jezzine (vallée du Nahr Array, l'autre à Azzour (vallon du Ouadi el Frengé).

Vu l'importance des travaux, ceux-ci, pour l'adjudication ont été divisés en deux tranches :

le lot I qui comprend le barrage de prise de Markabi et le tunnel d'Awali, entre Markabi et le PK 1000 de Jezzine aval ;

le lot II comprend le reste du tunnel plus le bassin et la digue de Kanane.

Description des travaux

I.- Rappel des rapports préliminaires.

L. DUBERTRET, dans une série de rapports préliminaires, a étudié la géologie du tunnel et fourni une coupe tirée de sa carte géologique au 1/50 000. Cette coupe a servi de base aux premières estimations techniques du projet. L'auteur insiste sur trois points particulièrement importants : le franchissement de la faille de Yamouneh ;
la traversée du massif jurassique ;
la traversée du synclinal cénomanien de Niha.

Ces deux derniers points sont spécialement étudiés du point de vue hydrologique.

Ces problèmes hydrologiques furent également abordés par M. J. GOGUEL [Juin 1956].

M. R. BARBIER avait étudié une variante nord du projet, aboutissant à Bater Chouf. Les problèmes géologiques y étaient analogues à ceux du tracé finalement choisi, plus au Sud.

Lithologie

Fossiles caractéristiques

TERTIAIRE

EOCENE MOYEN :

Grande épaisseur de calcaires blancs très purs, très durs et profondément karstifiés.

Grandes mmmulites

EOCENE INFÉRIEUR :

Alternance de marnes et de calcaires, comportant des silex vers la base. Le sommet est plus calcaire.

Petites mmmulites.

PALEOCENE :

Marnes grises feuilletées.

Globigérinidés - Globorotalidés.

CRETACE

SENONIEN :

Grès glauconieux au sommet. Marnes et calcaires crayeux blanchâtres.

Lamellibranches - Ammonites - Dents de squalo - Ostreidés.

TURONIEN :

Calcaire blanc très pur en général karstifié. Calcaire lumachellique.

Lamellibranches. Rudistes (Hippurites resectus)

Couche marneuse à Ammonites.

Thomasites Rollandi - Leonicerus species.

CENOMANIEN :

Calcaire récifal dur karstique. Calcaire à silex. Calcaires dolomitiques. Alternance de calcaires dolomitiques de calcaires, de dolomies et de marnes.

Acanthoceras species. Rudistes - Nérinées. Exogyra flabellata.

ALBIEN :

Banc calcaire à cardium à la base. Ensuite alternance de marnes vertes et de calcaires.

Heteraster Delgadoi - Knemiceras - Lamellibranches - Gastéropodes.

STRATIGRAPHIQUE

Lithologie .	Fossiles caractéristiques
<p><u>APTIEN SUPERIEUR</u> :</p> <p>Alternance de calcaires et de marnes. Falaise de Blanche.</p> <p><u>APTIEN INFERIEUR</u> :</p> <p>Alternance de marnes, de grès de bancs calcaires, de marnes à pisolithes.</p> <p><u>GRES DE BASE</u> :</p> <p>(Neocomien). Grès de faible cohésion, à lignite, et intercalations marneuses.</p>	<p>Orbitolines. Cardium et lamellibranches divers. Toxaster Dieneri.</p> <p>Heteraster oblongus Lamellibranches.</p> <p>Empreintes de végétaux. Pyrite, lignite, ambre.</p>
<h2>JURASSIQUE</h2>	
<p><u>PARTIE SUPERIEURE</u></p> <p>Couches jaunes supérieures. Falaise de Bickfaya. Marnes "chocolat" du complexe volcanique</p> <p><u>PARTIE MOYENNE</u> :</p> <p>Dolomies grises. Calcaire franc clair.</p> <p><u>PARTIE INFERIEURE</u> :</p> <p>Alternance de marnes verdâtres et de bancs dolomitiques</p>	<p>Polypiers, Ammonites, lamellibranches.</p>

1° - Attaque de Markabi : L'attaque du tunnel s'est effectuée dans les calcaires blancs de l'Eocène moyen.

a) Fenêtre.

La longueur de la fenêtre est de 764 m jusqu'au point A (origine du tunnel). Cet ouvrage est entièrement excavé dans le calcaire lutétien. Seul le passage sous l'Ouedi Markabi (lequel suit une faille) a nécessité des soutènements (brèche argileuse avec infiltrations d'eau en provenance du wadi).

b) Influence du terrain sur les travaux (voir coupes Planche 19-20)

Les terrains suivants ont été rencontrés dans l'ordre :

EOCENE MOYEN : longueur traversée 385 m (à partir du point A).

Les pondages, de l'ordre de 50° au début, se relèvent progressivement et atteignent 75° au PK 350.

Nature lithologique : Calcaire très pur, de dureté appréciable. Il se brise en éclats anguleux et rend bien aux explosifs.

Tenue : Très bonne dans l'ensemble. Les hors-profils sont peu nombreux, il n'a en général pas fallu de soutènements.

Venues d'eau : Ce calcaire très pur est karstifié dans la masse et sujet à des circulations souterraines. Les sondages équipés de piézomètres installés au site du barrage de prise de Markabi ont montré que la nappe oscillait entre les cotes 648 et 645 m. Or, le point A (origine du tunnel) est à la cote 645,200. La traversée de l'Eocène moyen s'est effectuée dans la zone de variation de la nappe, ce qui a produit des infiltrations (sans pression), en saison humide.

La proximité de la surface entraînait également une notable sensibilité aux précipitations atmosphériques (augmentation de débit 24 h après une forte pluie).

Débits. (Jaugés au déversoir triangulaire à 150 m du front de taille). Ils variaient entre 40 et 60 l/s avec une pointe à 100 l/s entre les PK 79 et 177.

Vitesse d'avancement : Dans tout ce qui suivra, les vitesses données seront des vitesses moyennes globales, compte tenu des temps morts d'origine diverse.

La vitesse d'avancement moyenne, dans l'Eocène moyen, a été de 9,78 m par jour. A titre indicatif, les vitesses journalières allaient de 12 à 18 m par jour.

Conclusion : Le calcaire lutétien s'est donc montré (conformément aux prévisions) favorable aux travaux souterrains. Cependant on doit noter qu'aucune circulation d'eau souterraine n'a été interceptée, ce qui aurait pu se produire. La source d'Aïn Zarka, voisine du tunnel, donne en effet un débit de 2 m³/s, alimenté par ce même Lutétien.

EOCENE INFÉRIEUR, PALEOCENE, SENONIEN : Ces trois étages

restent groupés car ils montrèrent dans le tunnel des propriétés très voisines. Il s'agit d'une série de marnes grises à brunes, tantôt plus calcaires, tantôt plus argileuses.

Les pendages sont très redressés (voisins de 80°). La galerie est en travers-bancs.

Des actions tectoniques intenses se traduisent pas des failles responsables de venues d'eau, au sein d'un ensemble peu perméable.

Longueur traversée (pour les trois étages : 520 m).

Nature lithologique : Il s'agit de marnes, passant à des calcaires vers la base du Sémonien. Parfois on y trouve des dépôts bitumineux.

Tenue : A l'état sec, ces terrains ont une bonne tenue. En présence d'eau, ils ont tendance à gonfler. Entre les PK 592 et 642, notamment, une zone faillée avec venue d'eau a nécessité la pose de cintres métalliques.

Une observation intéressante a été faite également à la suite d'un arrêt de la ventilation pendant une huitaine de jours. Des écaillages très importants se sont produits dans ces séries marneuses par suite de leur gonflement au contact de l'air devenu très humide dans le souterrain.

Venues d'eau : Ces terrains contenant une certaine quantité d'argile sont bien moins perméables qu'un calcaire pur.

Trois fortes venues d'eau ont cependant été notées en relation avec des zones faillées ou avec le Sénonien, beaucoup plus calcaire.

Débits : Ils varient entre 20 et 60 l/s en moyenne.

Vitesse d'avancement : 11,20 m par jour en moyenne.

Conclusion : Cette série de marnes se prête très bien aux travaux souterrains en l'absence des venues d'eau. Les vitesses d'avancement, toutes choses égales par ailleurs, sont supérieures à celles réalisées dans les calcaires purs, du fait de la dureté moindre. La présence de venues d'eau ralentit sensiblement le travail (7,80 m par jour en moyenne dans une zone aquifère traversée en une semaine).

TURONIEN :

Nature lithologique : Le Turonien comprend : (voir tableau stratigraphique p. 18) de haut en bas :

- des calcaires récifaux à Rudistes, karstifiés ;
- une couche marneuse de base à Ammonites.

Le calcaire karstique est blanc, dur, de texture voisine de celle du calcaire éocène moyen. Sa base est nettement soulignée par un banc de lumachelle, qui constitue un excellent repère.

La couche marneuse à Ammonites s'est révélée très écrasée par la tectonique, là où le tunnel l'a rencontrée.

Longueur traversée : 100 m entre les PK 905 et 1 005.

Tenue : Lorsqu'il est sain, ce calcaire présente la même tenue excellente que l'Eocène moyen.

A partir du PK 975, le Turonien calcaire est affecté par une série de cassures. Des zones broyées colmatées d'argile ont donné des éboulements.

La couche marneuse, laminée tectoniquement et provoquant, du fait de sa moindre perméabilité d'abondantes résurgences, a obligé à un soutènement soigné, ainsi qu'à un changement de section entre les P.K. 980 et 1 000.

Venues d'eau : Le Turonien karstique constitue un réservoir. Il communique sans doute localement avec les calcaires karstiques cénomaniens dont il n'est séparé que par la mince couche à Ammonites. Les venues les plus abondantes se sont concentrées au niveau de cet horizon moins perméable.

Débits : Ils tournent autour de 60 l/s avec pointe à 100 l/s au niveau de la couche à Ammonites.

Vitesse d'avancement : Dans le Turonien sain : moyenne
9,60 m/j ;
Dans le Turonien ébouleux : 6,25 m/j.

LE CENOMANIEN

Le Cénomaniens a été rencontré au PK 1 005. Il débute par un contact anormal, marqué par un changement complet des directions et des valeurs angulaires des pendages. La galerie devient brusquement "en direction" après avoir été en "travers-bancs" jusqu'au PK 1 005.

Nature lithologique : Au début, nous avons rencontré un calcaire dur, parfois légèrement dolomitique, avec de nombreuses traces de dissolutions karstiques. Ensuite nous avons retrouvé les alternances des terrains décrits au barrage.

Tenue : dans toute la partie franchement calcaire, les bancs compacts et épais eurent une tenue excellente. Après le PK 1147 (grosse venue d'eau), les circulations d'eau plus nombreuses modifièrent un peu les conditions de stabilité. Des cintres métalliques furent nécessaires par endroits.

Venues d'eau : Le Cénomancien karstique est un des niveaux les plus aquifères du Liban. On attendait donc son franchissement avec quelque anxiété. Dès l'entrée dans cette formation, le tunnel recoupa une série de petites circulations sous légère pression.

Le plus gros incident eut lieu au PK 1147. Une volée ouvrit en cet endroit un conduit naturel débitant au début 400 l/s. On craignit pendant quelques temps que la ponction énorme réalisée par ce drain n'ait un retentissement sur le débit des sources de surface. Il n'en fut heureusement rien, grâce aux réserves considérables emmagasinées dans ce terrain.

Débits : Peu après l'ouverture du conduit : 360 l/s ;
6 semaines après 150 à 180 l/s ;
6 mois après 100 l/s.

Vitesse d'avancement : Les vitesses moyennes données ici ne sont pas comparables avec celles données pour d'autres niveaux pour deux raisons :

- Evènements extérieurs de l'été 1958 suspendant fréquemment les travaux ;

- Abondance un peu exceptionnelle des venues d'eau.

Pour juillet 1958, moyenne : 7,10 m par jour.

Au delà du PK 1147 (janvier 1959, donc après interruption de 6 mois), moyenne : 4,90 m par jour.

Traversée de la faille de Yamounch

Après le franchissement de l'obstacle du PK 1147, le tunnel s'approcha rapidement de la zone tectonisée bordant la grande faille de Yamounch.

Dès le PK 1230, les effets de cet accident deviennent de plus en plus visibles : failles, diaclases, passages broyés, glissements, torsion de couches etc.

Entre les PK 1230 et 1397, un compartiment pincé entre deux failles s'est bombé en anticlinal.

Au delà du PK 1397, le tunnel pénètre dans la série des marnes et dolomies de la base du Cénomanién.

Les dolomies furent particulièrement difficiles à franchir. Encore litées et généralement calcaires au PK 1397, elles se transformèrent bientôt en une masse monotone de dolomies sableuses formant, avec les venues d'eau très abondantes de ce secteur, une pâte gluante dans laquelle le travail était particulièrement pénible.

Zone de la faille de Yamounch. Au niveau du petit village d'Aïn Tiné, la faille de Yamounch se diverticule par des accidents secondaires et cela provoque la tectonisation d'une vaste zone. Le tunnel franchit précisément ce secteur où la géologie, extrêmement complexe, échappe à toute étude logique.

Les seuls faits positifs à retenir de cette traversée sont les suivants :

- au PK 1715 furent trouvées quelques Orbitolines (Aptien supérieur) ;

- entre les PK 1720 et 1850, le tunnel a traversé une série de marnes sombres, vraisemblablement albiennes.

Ailleurs les remarques générales suivantes ont été faites.

1/ On ne distingue plus les pendages ;

2/ les bancs calcaires sont éclatés en fragments de taille variable entre lesquels les masses marneuses sont injectées, en prenant un aspect tourbillonnaire ;

3/ des diaclases hachent littéralement la roche qui se présente comme un amas de blocs empilés et disposés suivant des plans de glissement à surface striées ;

4/ les zones calcaires sont parfois réduites à l'état de graviers (PK 1750, côté droit du tunnel) ;

5/ des masses entières de roche disloquée sont entièrement cicatrisées par de la calcite secondaire.

Ce désordre géologique laissait planer une menace constante sur les travaux : celle de la rencontre inopinée des grès du Crétacé inférieur transformés en sable par la tectonique et éventuellement aquifères. Une telle rencontre aurait pu être catastrophique et causer des victimes parmi le personnel travaillant en galerie. Durant toute la traversée de la zone suspecte, l'avancement fut reconnu par des sondages de 50 à 100 m de long. Ces sondages furent effectués sous la direction et le contrôle permanent du géologue.

Tout se passa du reste fort bien et les craintes se révélèrent heureusement vaines.

Tenue : La majeure partie du tunnel dans ce passage délicat fut excavée en une section permettant d'armer suffisamment le revêtement. Le bétonnage suivit également de près la perforation afin d'assurer le maximum de sécurité.

Venues d'eau : Contrairement à certaines prévisions, le franchissement de la faille de Yamouneh n'a pas occasionné de fortes venues d'eau. La raison en est que les séries marneuses de l'Aptien supérieur et de l'Albien se sont trouvés injectés entre les blocs broyés des séries calcaires, assurant l'étanchéité d'une telle mylonite. En outre, de très importants dépôts de calcite secondaire cicatrisaient totalement certains passages.

Débit : La moyenne des débits mesurés à 150 m en arrière du front de taille s'établit aux environs de 40 l/s. Certains passages (PK 1348 à 1448 et 1591 à 1750) ne connurent même aucune venue d'eau.

2° - Attaque de Jezzine amont.

a) Coupe géologique relevée en galerie.

Nous ne donnerons pas ici la coupe détaillée du tunnel telle que nous l'avons relevée jusqu'au PK 2300. Une coupe sché-

matique, dessinée d'après ce relevé, est jointe en annexe (Pl. 21, 22, 23).

REMARQUE : Malgré la tranquillité apparente de la structure, les prévisions se sont trouvées en défaut sur un point important ; le tunnel n'a pas rencontré la falaise de Blanche (Aptien moyen) sur le flanc ouest du synclinal de Niha. Longtemps après le point prévu pour la rencontre du niveau calcaire aptien moyen (entre les PK 700 et 800), le tunnel traversa subitement, au PK 1431, les petits bancs de marnes à Orbitolines qui se trouvent au sommet du niveau en question. Une zone faillée importante avait tout d'abord amené les pendages presque à l'horizontale, puis un accident plus important avait rejeté vers le bas les calcaires de l'Aptien moyen. Le tunnel, par hasard, passa entre les deux tronçons de la barre calcaire, décalés par la faille (v. planche n°). En surface, cette série d'accidents relativement importants n'était pas visible sur le plateau de calcaires cénomaniens, particulièrement corrodés à cet endroit.

b) Influence du terrain sur les travaux.

Roches d'origine volcanique :

Nature lithologique. Nous groupons sous cette dénomination les roches volcaniques saines (diabases) et leurs produits d'altération. L'origine de ces produits peut être double :

- action des agents météoriques sur les affleurements de diabases. Ceux-ci donnent un processus d'altération en houles qui peut descendre à quelques mètres sous la surface du sol (Entrée de la fenêtre de Jezzine) ;

- Origine synsédimentaire par arrivée des coulées dans la mer. Les produits d'altération argileux et grumeleux se trouvent alors mêlés à la sédimentation gréseuse ambiante. On observe ainsi le passage de tufs volcaniques, ou de pépérites à des grès à ciment très argileux.

Tenue : Les diabases saines n'ont posé aucun problème de soutènement. Leur cohésion est en général excellente en dépit de leur aspect divisé.

Les tufs ont montré également une très bonne tenue, doublée d'une facilité plus grande pour le percement. Les diabases saines sont en effet extrêmement dures.

Venues d'eau : A une certaine profondeur, et en tout cas au niveau du tunnel, les diabases saines présentent une masse compacte, imperméable. Seuls quelques légers suintements, impossibles à jauger, apparaissent le long de certaines fissures.

Les zones altérées, riches en argile, sont rigoureusement imperméables.

Vitesses d'avancement : Ces divers terrains volcaniques furent traversés, en début de chantier, alors que les installations et les méthodes étaient encore en rodage. Le chiffre avancé : 5,90 m/jour de travail n'est donc pas comparable avec les autres.

Grès du Crétacé inférieur :

Nous reviendrons plus loin (3° - b)) sur la nature et l'aspect de cette roche.

Dans les niveaux traversés à Jezzine amont (partie supérieure de la formation) il s'agissait d'un sable tassé plutôt que d'un grès ; il renfermait de la pyrite associée à du lignite et à de l'ambre, ainsi que des bancs interstratifiés de marnes de teinte foncée (plus ou moins ligniteuses).

Tenue : Voir plus loin (3° - b)).

Venues d'eau : pratiquement nulles.

Vitesse d'avancement : en moyenne 5,57 m/j.

Aptien inférieur

Nature lithologique : Elle est très variée dans le détail : marnes à pisolithes, marnes argiluses, calcaires, calcaires oolithiques, marnes gréseuses etc... Nous ne considérerons que l'incidence de l'ensemble de ces terrains, pris comme un tout, sur les travaux.

Tenue : Les principales observations furent les suivantes :

- Les alternances de bancs calcaires et de bancs marneux se comportent assez mal en présence d'eau ; l'eau circule entre les joints, provoque le gonflement des marnes et cela déchausse les bancs calcaires.

- Les calcaires marneux sont secs et sains juste après la perforation. Avec le temps, si on ne les revêt pas rapidement, ils sont le siège d'écaillages divers par action de l'humidité de l'air. Cela peut conduire, dans certains cas extrêmes, à un réajustement des sections.

- Les zones tectonisées, dans de telles séries hétérogènes, se traduisent par des injections argileuses. Celles-ci sont à l'origine de multiples ennuis : gonflements, glissements, chute de blocs.

Vitesse d'avancement : En moyenne, 7,30 m.

Albien

Nature lithologique : Lithologiquement, l'Albien comprend à la base un banc de calcaire dur à cardium (Banc de Zumoffen), puis une épaisse série de marnes formant le talus des falaises cénomaniennes.

Tenue : Au niveau du tunnel, le "banc à cardium" débute par une faille. Les premiers mètres sont de tenue médiocre (venue d'eau et grand nombre de diaclases).

La série de marnes a permis les observations suivantes :

- dans l'ensemble, absence de venues d'eau ;
- dureté moyenne, la roche se met très bien au profil de la galerie et ne nécessite apparemment aucun soutènement ;
- avec le temps, l'humidité du souterrain provoque l'écaillage des parois. Ce phénomène fut d'une importance telle qu'il fallut poser des cadres dans des sections ayant paru de très bonne tenue à l'avancement.

Vitesses d'avancement : Banc à cardium (calcaire dur)

6,80 m/jour

Série des marnes: 8,30 m/jour.

Cénomaniien

Nature lithologique : La limite entre l'Albien et le Cénomaniien n'est pas nette en surface ; elle l'est encore moins dans le souterrain. En effet la sédimentation marneuse de l'Albien se poursuit avec un enrichissement progressif en calcaire. Le tunnel n'a pas atteint les niveaux franchement calcaires (Fond du synclinal de Niha de L. DUBERTRET).

Tenue : Elle s'est montrée variable en raison de la teneur en argile des différents niveaux rencontrés. Dans l'ensemble, la tenue de la base du Cénomaniien s'est révélée médiocre et la direction des travaux dut adopter fréquemment des sections renforcées.

Venues d'eau : Elles furent, dans l'ensemble, très peu nombreuses et en tout cas fort peu abondantes. Le tunnel ne traversa pas la série cénomaniienne aussi haut que le laissaient prévoir certaines études préliminaires. Le synclinal de Niha présente en effet un fond extrêmement plat, au lieu de la forme profonde en V indiquée dans les rapports de L. DUBERTRET en particulier. Ainsi les niveaux de calcaires karstiques fortement aquifères ne furent pas rencontrés. L'un des problèmes les plus inquiétants se trouva donc esquivé.

Vitesses d'avancement.

Moyenne journalière en section normale : 9,30 m

en section renforcée : 8,34 m.

3° - Attaque de Jezzine aval.

Le lot I des travaux s'étend sur 1000 mètres à l'aval du T de Jezzine. Du point de vue technique il s'agit d'une attaque descendante. Un pompage est donc nécessaire pour l'évacuation des eaux d'unfiltration. Ceci peut être très ennuyeux en cas de grosse venue d'eau inopinée.

a) Coupe géologique sommaire.

Du PK 0 au PK 315, le tunnel a rencontré les mêmes formations volcaniques que celles de l'attaque amont.

Au delà du PK 315, le tunnel a pénétré (brutalement, par faille) dans la formation dite du grès de base (Néocomien), formant la masse principale de la colline de Bkassine (dont il sera question au chapitre suivant).

b) Influence du terrain sur les travaux.

Roches d'origine volcanique

Les observations furent analogues à celles de l'attaque amont. Il faut simplement remarquer que le passage du type lave cristallisée à l'air libre au type épanchement dans la mer, avec mélange à la sédimentation gréseuse ambiante se fait le long de cette attaque aval.

Grès de base

Nature lithologique. La nature lithologique de cet ensemble est variable, nous y reviendrons plus loin (B,II, 4°, B,1) lors de l'étude de la colline de Bkrassine.

L'attaque aval de Jezzine fournit la première occasion

de se rendre compte (à nos dépens) des propriétés, bien spéciales, de certaines zones de ce terrain.

A Jezzine aval (donc dans la partie supérieure de cette formation massive), le grès se présentait plutôt sous forme d'un sable tassé que d'un grès véritable. Le ciment limonitique observable en surface n'existait plus en profondeur. Le fer se rencontrait sous forme de pyrite diffuse dans la formation.

La stratification était en général lenticulaire et entrecroisée, les épaisseurs de ces lentilles étant de l'ordre de la dizaine de centimètre. Les joints entre ces lentilles étaient soulignés par une matière noire, ligniteuse, avec de fréquents restes de branches, bien conservés. Ces parties végétales voyaient systématiquement une condensation de la pyrite. Elles étaient en outre accompagnées assez souvent d'ambre (résine fossile).

Tenuc : Tant que ce terrain est simplement humide, les forces de capillarité suffisent à assurer la cohésion entre les grains de quartz. Dans ce cas, les parois tiennent assez bien, à condition de les revêtir très rapidement.

Lorsque, pour une raison ou pour une autre (zone faillée, variation de granulométrie) des circulations d'eau se font jour dans la roche, de catastrophiques phénomènes de bouillonnement peuvent prendre naissance. Cela fut mis en évidence lors du premier accident sérieux survenu dans ce terrain (au PK 315). En ce point, le tunnel recoupe une faille (invisible en surface à cause des cultures en terrasse) qui affronte directement les tufs volcaniques et le grès. Le tunnel passa ainsi, sans transition et à pleine section, des tufs volcaniques à un grès disloqué par la faille. 600 m³ de sable mêlé d'eau envahirent ainsi le tunnel.

Au PK 397, le même phénomène se reproduisit avec plus d'ampleur au sein du grès, cette fois-ci (et le long d'un plan de faille, selon toute vraisemblance). Le tunnel fut comblé totalement sur une centaine de mètres, puis sur une hauteur décroissante pendant 300 mètres.

Après déblaiement, il fut nécessaire pour bétonner à l'abri de surprises désagréables, de fermer le front de taille par un masque blindé et bétonné.

Vitesse d'avancement : la vitesse moyenne entre le PK 315 et le PK 317 s'établit à 1,33 m/jour.

B - LA GALERIE D'AWALI - LOT n° II.

Etude géologique préliminaire

I.- Généralités.

A notre arrivée au Liban, aucune étude détaillée n'avait été entreprise sur le tracé du lot II. L'étude au 1/50 000 figurant dans les rapports de L. DUBERTRET montrait que le tunnel devait traverser une longueur très importante de "grès de base", sous la colline dite de Bkrassine, du nom d'un village établi sur son versant est.

Le percement de la galerie, à l'aval de Jezzine, ayant mis en évidence le type de difficultés qui pouvaient surgir au franchissement du grès, une étude préliminaire détaillée fut entreprise.

II. Etude géologique de la colline de Bkassine.

1° - Stratigraphie sommaire : Voir le tableau stratigraphique figurant planche 18.

2° - Description générale de la colline de Bkrassine. La colline de Bkrassine est délimitée à l'Ouest par la vallée du Wadi el Frengé et à l'Est par celle du Nahr Aray. Elle est cons-

tituée par un substratum de calcaires jurassiques sur lequel repose l'importante masse du Crétacé inférieur (voir pl. n°24).

3° - But de l'étude.

Les divers incidents survenus à l'attaque de Jezzine avall mirent en évidence les faits suivants :

a) La nature du grès en profondeur peut parfois différer notablement de son aspect de surface.

b) Les failles, en créant des zones à cohésion nulle et perméabilité plus grande, peuvent favoriser l'établissement d'un phénomène de boulangerie dans les zones aquifères.

En conclusion, la traversée d'une longueur importante de grès de base, telle qu'elle était prévisible, ne laissait pas d'être inquiétante.

Trois solutions furent envisagées pour résoudre ce problème délicat :

a) Ne rien changer à la direction du tunnel et passer coûte que coûte par des moyens techniques appropriés (injections de ciment ou de silicates, congélation, etc.) ;

b) sortir à l'air libre à la fenêtre de Jezzine, et contourner la colline en canal. Ce projet examiné rapidement montra de telles difficultés dues à la topographie et à la nature du terrain, qu'il fut abandonné;

c) étudier une possibilité de déviation de la galerie, à la recherche d'un terrain de meilleure qualité (en jouant notamment sur l'existence de formations volcaniques au sein de la masse du grès.

Cette dernière solution, la plus raisonnable, nécessitait tout d'abord une étude géologique détaillée de la colline incriminée. Une étude géophysique et des sondages profonds devaient, en principe, la compléter afin de rassembler le maximum de renseignements permettant de choisir entre la première et la troisième solution.

4° - Etude géologique de détail.

a) Difficultés dues au terrain.

Au premier abord, la masse de grès néocomien constituant la majeure partie de la colline apparaît très monotone.

De nombreuses failles sont bien visibles dans le substratum calcaire (bordure occidentale) ou dans la couverture (bordure orientale). Le problème est de les retrouver dans la masse de la colline.

Nous avons tenté de le résoudre de deux façons :

- Par une étude stratigraphique détaillée ;
- par une étude tectonique appuyée sur des constructions graphiques.

b) Coupes stratigraphiques (Voir pl. n° 26, colonne 1).

Coupe n° 1. Cette coupe a été prise sur le versant ouest de la colline, entre le village de Beït-ed-Dine et la colline 1108, à proximité de Nebi Miché (feuille Djezzine au 1/50 000).

Elle montre le passage vers le haut du faciès détritique grès de base, aux faciès calcaires et marneux de l'Aptien inférieur.

On constate que, vers le haut, la sédimentation gréseuse se charge progressivement en argile. Ensuite apparaît brusquement un banc de calcaire blanc, rognoneux, à Nérinées, que nous avons pris comme base de l'Aptien inférieur (lithologiquement). Au-dessous de ce banc, apparaissent des marnes grises à gros pisolithes calcaires constituant un excellent repère, avec lesquelles L. DUBERTRET fait débiter l'Aptien inférieur.

Coupe n° 2. - (Pl. n° 26, colonne 3). Cette coupe a été prise le long d'un petit thalweg descendant sur le versant ouest de la colline depuis le point 1025 (carrefour des routes de Jezzine et de Deïr Machmouché). La base de cette coupe montre, au voisinage du Jurassique, un petit affleurement d'une coulée volcanique bien cristallisée, interstratifiée dans la base des grès.

La suite de la coupe vers le haut a été prise en rive gauche du thalweg, au delà de la faille F1 (voir plus loin l'étude tectonique).

Cette coupe montre la stratigraphie du sommet du grès de base, jusqu'au niveau de grès argileux marquant la fin de ce faciès grès de base.

La colonne n° 2 montre le passage du Jurassique supérieur (couches jaunes supérieures) au grès de base en l'absence de coulées volcaniques.

Conclusion de l'étude stratigraphique :

Les coupes précédentes nous ont permis de dégager un certain nombre de bancs-repères.

Aptien inférieur :

- La lumachelle à grandes Ostrées ;
- les marnes à pisolithes ;
- le banc de calcaires tendres à Nérinées.

Grès de base : Les seuls niveaux valables sont les niveaux coquilliers du tiers supérieur de la formation. Leurs affleurements sont malheureusement trop disparates et peu raccordables entre eux pour qu'ils soient utiles.

En résumé, le faciès grès de base, dans le secteur qui nous intéresse, est compris entre deux séries marines stratigraphiquement et lithologiquement bien définies. Dans la masse du grès, il est malheureusement impossible de faire des coupures valables. Les niveaux de marnes noires ligniteuses en particulier sont lenticulaires, du fait même de la nature du dépôt.

La Stratigraphie n'apportera donc aucune lumière à l'étude tectonique.

REMARQUE : Le grès, qui renferme beaucoup de pyrite ainsi que les travaux l'ont montré, est très ferrugineux en surface.

En effet, à la saison des pluies, ce grès s'imbibe d'eau qui oxyde les pyrites et, à la saison sèche, ces eaux chargées de sels de fer sont aspirées vers la surface par l'évaporation. Sur quelques décimètres, il se forme à la surface du grès une carapace ferrugineuse très dure qui peut induire en erreur quant à la nature véritable de ce terrain. Ce phénomène est d'autant plus sensible que la pente topographique est plus faible (versant E de la colline).

Le versant W, par contre, présente une pente plus forte. L'érosion y est plus intense et la formation de la croûte ferrugineuse y est plus faible.

Malgré cela, les bancs gréseux paraissent plus compacts, mieux consolidés, pour tout dire d'une tenue meilleure que ceux traversés à Jezzine aval, par exemple. Il semble donc que la qualité du grès ne soit médiocre que dans sa partie supérieure.

5° - Etude tectonique.

L'importance du rôle joué par la tectonique complexe de la région est mise en évidence sur une coupe (suivant l'axe du tunnel par exemple), destinée à apprécier l'épaisseur du grès.

En prenant pour limite inférieure la base du grès au Chir Beït ed Dine par exemple, et comme limite le sommet du grès sous la falaise de Jezzine, on trouve, avec un pendage moyen de 10°, une épaisseur aberrante (7 à 800 m).

Ceci est dû à l'existence d'une tectonique cassante au sein même de la colline, qui a pour effet d'augmenter les surfaces d'affleurement par le jeu des failles.

Par conséquent, le substratum de calcaires jurassiques est peut-être situé moins profondément qu'on ne le pensait primitivement.

Le premier travail sur le terrain fut de rechercher les failles.

Ensuite, la synthèse de l'étude tectonique nous a conduit à tenter une reconstitution de la carte géologique dans un plan

de cote 630 (cote approximative de la galerie). Une telle représentation, bien que très hypothétique, pouvait être utile à l'époque en vue d'orienter les recherches futures pour une éventuelle déviation de la galerie.

a) Détermination de l'épaisseur du grès de base.

Une coupe effectuée dans un secteur dépourvu de tectonique nous a donné une épaisseur de 400 m environ pour l'ensemble de la formation dite du "grès de base".

b) Recherche des failles dans la colline de Bkassine.

A priori, il peut paraître illusoire de chercher des failles dans la série des grès sableux. Les accidents sont cependant bien visibles à l'Ouest, dans le substratum jurassique calcaire, et à l'Est, aux environs de Jezzine, dans la falaise de Blanche. Il est évident que certains d'entre eux affectent la colline de Bkassine. Des recherches minutieuses ont montré que les failles pouvaient donner localement dans le grès, des miroirs rubéfiés très nets. D'autre part, les miroirs sont en général bien visibles dans la couverture (falaise de Blanche).

Pour guider nos recherches, nous avons utilisé une méthode de construction graphique des lignes de faille, en partant de mesures de direction et d'inclinaison du miroir [voir A. BONTE, Introduction à la lecture des cartes géologiques].

Avant d'entreprendre cette étude, nous avons d'abord "éta- lonné" la méthode sur un exemple particulièrement net. (faille F4 pl. n°27). Cette faille, inclinée, met en contact, dans la vallée du Nahr Array, sous Bkassine, des formations volcaniques avec le grès. Le contact, en chevron, est très visible et facile à cartographier.

Le levé de terrain et la construction graphique effectuée à partir d'une mesure de pendage, coïncident d'une façon remarquable.

En combinant les observations de terrain (essentiellement recherche de miroirs de faille) et les constructions graphiques, nous avons pu préciser le tracé d'un certain nombre de failles

au travers de la colline de Bkassine (failles n° 1,2,3,4,5 ; pl. n° 27).

En partant des données géométriques ainsi obtenues, nous avons tenté, à l'aide de coupes sériées (pl. n° 28) précises, d'esquisser une carte géologique à la cote 630 (pl. n° 29).

c) Le problème des formations volcaniques :

En rive droite du Nahr Array, entre la; fenêtre de Jezzine et Bkassine, apparaissent des affleurements très importants de terrains d'origine volcanique. Ils ne sont pas portés sur la carte géologique au 1/50 000 (feuille Jezzine). Il s'agit principalement d'épaisses séries de tufs volcaniques de pépérites, ainsi que quelques coulées non altérées (diabases).

Série de Bkassine.

L'épaisseur de cette série est très importante. Sur le terrain, les affleurements visibles s'étendent de la cote 300 m à Bkassine, à la cote 540 m dans le thalweg du Nahr Array (lequel coule encore sur les diabases).

Cette série est constituée en majeure partie de produits volcaniques très altérés (pépérites), emballant fréquemment des galets calcaires jurassiques et des brèches à éléments de diabases bien cristallisées, emballés dans un ciment argileux. Le sommet de la série (juste sous Bkassine) est formé par une coulée bien cristallisée, très saine.

L'épaisseur de cet ensemble est, nous l'avons dit, très importante. Cependant, il peut y avoir là un effet de la tectonique (redoublement par faille, par exemple). En outre, la formation volcanique est sans doute interstratifiée dans le grès, tout en restant hétéromorphe (vaste lentille par exemple) et ne pouvant, de toute façon, être considérée, a priori, comme une couche stratigraphique. Nous ne nous sommes donc pas risqué à évaluer son épaisseur.

Série de la fenêtre de Jezzine.

La série de terrains volcaniques traversés à Jezzine est évidemment la prolongation vers le Sud de la série précédente.

Nous constatons (en surface et dans le tunnel) que ces terrains volcaniques n'atteignent pas l'Aptien inférieur, une couche terminale de grès s'intercalant avant la base de cet Aptien.

D'autre part, si l'on admet une épaisseur voisine de 400 m pour l'ensemble du grès de base, nous constatons sur les coupes (pl. 28) que les terrains volcaniques occupent, au niveau de la vallée du Nahr Array, une grande partie de la formation du "grès de base". Ils doivent donc descendre assez près du Jurassique. Ce point est important et sera développé par la suite.

Les formations volcaniques du versant ouest de la colline de Bkassine.

A la base du versant ouest de la colline, nous avons relevé la présence d'affleurements volcaniques en deux points :

- en rive droite, du vallon du Wadi el Rharab (affleurement sud de la planche n°27) ;
- au débouché du vallon de El Bebi (affleurement nord de la planche n°27).

Il convient de remarquer que la position stratigraphique de ces deux affleurements est très voisine du Jurassique supérieur.

Dans le vallon de El Bebi, la coulée est saine, bien cristallisée en prismes. L'affleurement est apparemment lenticulaire.

Dans le vallon du Wadi Rharab, par contre, nous retrouvons des caractères analogues à ceux de la série de Bkassine (forte altération de la formation).

d) Résultats de cette étude :

Comme nous l'avons mentionné plus haut (II, 5°), les résultats de cette étude préliminaire ont été consignés dans ceux documents :

1) des coupes s riees (planche n  28) au nombre de 8, s'échelonnant sur 1 km de part et d'autre du tracé prévu de la galerie ;

2) une carte géologique hypothétique dans un plan de cote 630 (planche n  29).

e) Conclusions générales.

Nous avons exposé plus haut (II, 3 ) que deux solutions étaient envisagées pour franchir la colline de Bkassine :

- d'une part conserver le tracé prévu, et alors il ne restait qu'un problème technique ardu   résoudre ;

- d'autre part, rechercher un tracé voisin éliminant au maximum les grès.

Première solution : Ne rien changer au tracé.

D'après la coupe géologique suivant l'axe prévu initialement pour le tunnel, on peut s'attendre à rencontrer 1600 à 1800 m de grès.

Tout d'abord, ce serait simplifier le problème au pire que de se représenter les grès comme une masse inconsistante gorgée d'eau sur toute la longueur à franchir.

Nous avons noté qu'a priori, la partie inférieure du grès de base paraît de bien meilleure tenue que la partie supérieure.

Ensuite, l'examen du terrain, en cours d'avancement à Jezzine aval, a montré que dans la partie supérieure nous avons un sable très tassé qui, humide, tient parfaitement en parois verticales. Il doit cependant être revêtu très vite afin d'éviter un risque d'éboulement.

Ce qui est à redouter dans ce terrain c'est la rétention d'eau dans certaines zones. Lors du percement de la galerie dans de telles zones, l'existence d'un gradient hydraulique risque d'amorcer un "renard" qui peut devenir catastrophique.

Comme le signalait M. BARBIER dans une note du 6 mai 1959, il suffit d'une petite faille, ou même d'une variation dans la

granulométrie du sable, pour provoquer, en présence d'eau, de grands éboulements capables de se propager au loin (entonnoir en surface à Wadi Jezzine).

Si l'on désire continuer, sans rien changer au tracé prévu, l'étude géologique attire l'attention sur un certain nombre de points délicats, en particulier la rencontre des failles.

La carte géologique, dans le plan de cote 630, met en évidence les principales failles que le tunnel devra recouper. On peut donc s'attendre, dans ces zones, à avoir un sable peu cohérent.

Pour prévoir la possibilité de rencontrer l'eau dans la masse de la colline, ainsi que sa répartition, il faut faire intervenir plusieurs facteurs :

1 - L'alimentation de la nappe ou des nappes est saisonnière. Elle ne s'effectue qu'en hiver, par les eaux de pluie et de fonte des neiges. Il n'y a pas de "massif-réservoir" situé au-dessus du grès, susceptible d'alimenter des infiltrations tout le long de l'année;

2 - L'étude stratigraphique a montré que dans la moitié supérieure du grès, on rencontre des bancs de marnes ligniteuses imperméables, qui peuvent concentrer les circulations très lentes de l'eau dans le grès ou la retenir stagnante en quantité notable, à leur voisinage;

3 - L'allure dissymétrique des versants est et ouest de la colline, ainsi que la direction du pendage, laissent penser que le versant ouest risque d'être moins aquifère (le ruissellement étant plus important sur le versant ouest qui est plus abrupt).

Il ressort de ces considérations que le point le plus délicat sera le franchissement du vallon parallèle à la faille F3, situé environ 650 m à l'aval du T de Jezzine.

La nature du terrain est mauvaise dans ce secteur, en grande partie à cause de la faille F3.

Le torrent coulant au fond de ce vallon constitue un drain qui collecte les eaux d'irrigation du plateau de Wadi Jezzine,

ainsi qu'une partie des eaux du versant est de la colline. La couverture au-dessus de la galerie, dans le fond du ravin, n'atteint que 60 à 70 m et, instruits par l'expérience, on peut redouter la formation d'un entonnoir dans le lit même du ruisseau détournant peut-être une partie des eaux de celui-ci dans le tunnel.

Une fois ce point très délicat franchi, on peut s'attendre à une amélioration relative des conditions. Cependant, la rencontre des failles peut encore donner lieu à des incidents et, il est recommandé à l'entreprise de procéder à des reconnaissances constantes par sondages à l'avancement et surtout de revêtir très rapidement et le plus près possible du front de taille.

Deuxième solution : Recherche d'une déviation.

L'intérêt d'une telle déviation du trajet de la galerie ne subsiste qu'autant que l'on puisse découvrir, relativement près de l'axe initial, des terrains de meilleure qualité.

D'après l'étude précédente, il ressort que ces terrains peuvent être, soit le calcaire jurassique, soit les formations volcaniques.

L'examen de la carte géologique à la cote 630 montre que les décrochements et les failles qui affectent la masse sédimentaire ne sont pas suffisamment importants pour que le simple fait de passer d'un compartiment à un autre, au prix d'une légère déviation de tracé, suffise à remplacer une très longue portion de traversée de grès par du calcaire.

Bien plus intéressante pourrait être l'utilisation des terrains volcaniques. Nous avons montré qu'il en existe des affleurements très importants sur le versant est de la colline, et d'autres, beaucoup plus réduits, au pied du versant ouest. Il est possible de se demander si les affleurements ouest ne sont pas les derniers témoins occidentaux des coulées importantes présentes à l'Est de la colline. S'il en était ainsi, cela signifierait qu'il y a continuité, sous la colline et au sein du "grès de base", entre les deux séries d'affleurements.

On pourrait dès lors espérer maintenir le tunnel le plus longtemps possible dans les terrains volcaniques, de bien meilleure tenue que le grès.

Il faut cependant remarquer que le sommet du Jurassique est une période d'activité volcanique du Liban (Liban nord et central essentiellement). Au Liban sud, et dans les environs de Jezzine-Aazzour, à défaut de coulées visibles, l'existence d'un volcanisme est attesté par les marnes chocolat rencontrées à Aazzour, entre la falaise de Djisr el Qadi (falaise de Bickfaya) et les couches jaunes inférieures. Ces marnes, très argileuses, se sont formées au détriment de matériaux volcaniques. Dans ces conditions les minuscules témoins volcaniques du versant ouest de la colline représentent peut-être les dernières manifestations du volcanisme fini-jurassique dans ce secteur. Il devient alors difficile de raccorder ces témoins volcaniques aux coulées de Bkassine, lesquelles sont plutôt cantonnées dans la partie supérieure du grès de base, ainsi que cela est manifeste plus au Sud, vers Haïtoura.

Dès lors, la possibilité d'une continuité des diabases et tufs, sous la colline de Bkassine, est remise en question.

De toutes façons, pour trancher ce problème, il fallait envisager la mise en oeuvre de moyens bien plus considérables qu'une étude de terrain (géophysique et sondages profonds). Dans un premier temps (1959) il fut décidé de conserver le tracé primitif et de ne pas engager les frais d'une prospection approfondie. Nous croyons cependant savoir qu'après notre départ et avec des directives nouvelles, une telle prospection fut entreprise et qu'elle aboutit à des résultats positifs, puisque le tunnel fut, paraît-il, maintenu très longtemps dans les terrains volcaniques.

III.- ETUDE GEOLOGIQUE PRELIMINAIRE SUR LE TRACE AZZOUR AVAL.

Les terrains intéressés par cette section du tunnel vont du Cénomaniens au Jurassique supérieur (couches jaunes inférieures - voir tableau stratigraphique, pl. 18 et 30)



1° - Structure géologique suivant l'axe du tunnel.

La région d'Azzour est caractérisée par l'existence d'une très importante zone de flexure (flexure de Roum). C'est à la traversée de cet accident que des problèmes techniques ardu se sont posés, problèmes qui avaient été prévus lors de l'étude préliminaire que nous résumons ici.

Le vallon d'Azzour, dans lequel est implantée la fenêtre d'Azzour, est creusé dans une structure anticlinale très dissymétrique marquant l'amorce de la flexure. Les couches du Jurassique, horizontales dans le lit du torrent, plongent doucement vers l'Est, jusqu'à atteindre un pendage de 10 à 12° dans la colline de Bkassine.

A l'Ouest, par contre, les couches s'infléchissent brusquement le long de la flexure et les pendages du Jurassique atteignent 40 à 45°.

Les séries comprises entre les deux blocs massifs que représentent le plateau cénomanien de l'aval et le massif jurassique d'Azzour, ont été très laminées lors de la flexure.

La conséquence, capitale pour les travaux, est que les séries allant du grès de base à l'Albien ont été amincies, profondément remaniées, et leur cohésion risque d'être très faible.

En effet, au niveau du tunnel, entre le Jurassique d'Azzour et le Cénomanien, nous n'avons qu'une distance horizontale de 350 m. Cette distance correspond à l'ensemble : grès de base, Aptien, Albien, dont la puissance, en gisement normal, avoisine 600 à 650 m.

2° - Conséquence pour les travaux :

Tenue probable des terrains.

a) Azzour amont : le tunnel, dans cette direction, ne rencontrera et n'a du reste rencontré aucune difficulté. Nous ne reviendrons pas sur les prévisions (consignées dans des rapports G.F.L.) qui ont été faites pour cette attaque.

b) Azzour aval :

Jurassique :

Couches jaunes inférieures : Traversée probable : 140 m.

Il s'agit de calcaires détritiques bicolores très durs, d'excellente tenue, dont le pendage varie entre 45 et 65°.

Marnes chocolat : Traversée probable : 50 m.

Ces marnes ne présenteront aucune difficulté de percement. Etant donné leur nature très argileuse d'une part et leur position structurellement haute d'autre part, elles se trouvent en dehors de toute zone aquifère. Leur tenue sera donc très bonne, mais il faudra se méfier des écaillages avec le temps.

Falaise de Djisr el Qadi (ou de Bickfaya). Traversée probable : 50 à 60 m.

Calcaire dur, karstique, de tenue excellente. Nous reviendrons plus loin sur les propriétés hydrologiques.

Couches jaunes supérieures : les effets de la flexure de Roum commencent déjà à se faire sentir. Nous avons estimé la longueur à traverser à une cinquantaine de mètres, sous toutes réserves. L'existence de bancs argileux à la partie supérieure de ce niveau, ainsi que la tectonique intense de ce secteur, laissent planer des craintes sérieuses quant à la tenue des derniers mètres à traverser. Le tunnel s'engage là dans une zone très délicate.

Grès de base : Le grès de base, sur la nature duquel nous ne reviendrons pas, est extrêmement laminé et redressé à la verticale. Au niveau du tunnel, la longueur à traverser dans cette formation est de 150 m environ, ce qui donne une idée de la réduction considérable d'épaisseur due à la tectonique (de 400 à 150 m). La cohésion de ce terrain doit être nulle, au moins pour certaines couches vraisemblablement transformées en un sable pulvérulent. L'étude hydrologique achèvera de prouver qu'il s'agit là du point le plus difficile à franchir, sur ce tracé.

Aptien inférieur : Ce niveau a pratiquement disparu en surface, par suite du laminage. Selon toute probabilité, il se con-

fondra plus ou moins dans le tunnel avec la partie terminale du grès.

Aptien moyen : Falaise de Blanche.

Cet épais niveau calcaire est réduit en surface à quelques chicots rocheux, disloqués et écaillés dans la flexure. Etant donné la nature des couches encaissantes (marnes et grès sans cohésion) des éboulements sont à craindre dans ce niveau.

Aptien supérieur :

Il a pratiquement disparu, laminé entre le banc calcaire de la base de l'Albien et la falaise de Blanche. En cas de venue d'eau des éboulements ou des glissements de couches sont à redouter. Tout ce secteur nécessitera une traversée en section renforcée.

Albien : (traversée probable : 150 m).

Banc de Zumoffen : Ce banc, qui marque la base de l'Albien, a encore beaucoup souffert de la tectonique. Il se comportera comme les vestiges de la falaise de Blanche et cela risque de provoquer des éboulements.

Série marneuse : Les effets de la tectonique s'amortissent dans ce niveau plus plastique. La masse principale de ces marnes est un terrain en général favorable pour les travaux souterrains. Seule la partie terminale, au contact du Cénomaniens (vraisemblablement un peu aquifère) risque de donner quelques ennuis (gonflement avec poussée sur les cadres de soutènement).

3° - Hydrogéologie :

Un étude de l'influence réciproque de l'Hydrogéologie et des travaux du tunnel doit considérer deux aspects :

a) - influence sur les travaux de la présence de l'eau dans les terrains rencontrés ;

b) - conséquence du percement du tunnel sur le régime des eaux souterraines (alimentation du village d'Azzour entre autres).

a) Influence de l'hydrologie souterraine sur les travaux.

Jurassique : les couches jaunes inférieures sont en contact avec la masse karstique du Jurassique. La cote de la galerie est

bien supérieure au niveau de base représenté ici par le cours de l'Awali, par conséquent il n'y a aucun risque de rencontrer une nappe dans ces calcaires.

Le niveau calcaire appelé ici falaise de Djisr el Qadi est légèrement aquifère sous Azzour. En effet, au point d'affleurement le plus bas de cette couche, existe une source pérenne (S₁, pl.). Le débit de cette source est faible. Elle est d'autre part unique. La quantité d'eau emmagasinée dans ce banc calcaire karstique est sans doute faible et ne gênera pas les travaux.

Grès de base et série aptienne : Dans l'ensemble, nous avons affaire à une série peu perméable. Cependant, du fait des contraintes subies, localement des zones beaucoup plus perméables ont pu prendre naissance, au sein des grès en particulier.

Le fait que cet ensemble de terrains soit plus tendre a donné une petite combe qui descend sous Azzour, parallèlement au vallon du Wadi el Frengé. Il y a là une situation défavorable. Cette petite combe, limitée à l'Est par les couches jaunes supérieures avec marnes, et à l'Ouest par les marnes albiennes, collecte les ruissellements et, en particulier, les exutoires de quelques petites sources de la limite Cénomaniens-Albiens. Il y a donc un risque certain et très grave de rencontrer, au niveau du tunnel, des couches verticales de grès sans cohésion, gorgées d'eau, qui provoqueront inévitablement un phénomène de boulangerie catastrophique, si aucune précaution s'est prise.

b) Alimentation en eau d'Azzour :

La source qui alimente le village d'Azzour se place à la limite Cénomaniens-Albiens. En ce cas, il s'agit d'eau retenue dans le plateau cénomaniens fissuré qui domine le village. Ce même plateau sera traversé plus à l'aval sur une longueur importante, par le tunnel. Il y aura lieu de prendre des précautions au voisinage de la limite inférieure, afin de ne pas créer un drain trop important qui risquerait de priver d'eau le village d'Azzour.

En conclusion, le percement du tunnel ne pose aucun problème à l'attaque amont. (Cela fut vérifié lors des travaux où des avancements records furent réalisés).

A l'attaque aval, il y a par contre un point extrêmement délicat, le franchissement de la petite combe d'Azzour, où le grès risque d'être incohérent et gorgé d'eau. Les plus grandes précautions devront être prises lors de l'avancement (sondages de reconnaissance) afin de prévenir, si possible, un éboulement catastrophique.

REMARQUE : Ces prévisions se trouvèrent confirmées en tous points par les travaux. L'Entreprise, arrivée à une vingtaine de mètres de la limite dangereuse, effectua des sondages de reconnaissance en gros diamètre (sondages équipés d'obturateurs et de manomètres). Lors de l'ouverture d'un des obturateurs, une quantité énorme de sable et d'eau sous 8 kg/cm² de pression fit irruption dans la galerie. Cette venue créa en surface, une centaine de mètres plus haut, une cavité cylindrique d'une dizaine de mètres de diamètre sur 10 à 12 m de profondeur, à la verticale du tunnel et dans l'axe de la petite combe d'Azzour.

Le franchissement par le tunnel de ce secteur délicat se fit très difficilement, par injection de silicates et après de nombreux déboires.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

I - OUVRAGES GENERAUX.

- ABD el AL (I.) 1948.- Le Litani, Etude hydrologique.
Beyrouth, 166 p.
- ABD el AL (I.) 1949.- L'originalité de l'écoulement, dans les
massifs calcaires libanosyriens.
2e Cong. Tech. Internat., Le Caire, 21 p.
- ABD el AL (I.) 1952.- Statique et dynamique des eaux dans les
massifs calcaires libano-syriens. Beyrouth.
- BONTE (A.) 1958.- Introduction à la lecture des cartes géolo-
giques, 3e éd., Masson, Paris, 277 p.
- CAMBEFORT (M.) 1957.- Forages et sondages. Leur emploi dans
les travaux publics, 2e éd., Eyrolles, Paris,
420 p.
- CITA (M.B.) 1955.- The Cretaceous Eocene boundary in Italy.
Ist. di Geol. Pal. e Geogr. fisica della Univer-
sita di Milano, Série G, n° 89, pp. 427-452.
- DUBERTRET (L.) 1933a.- La carte géologique au millionième de
la Syrie et du Liban.
Rev. Géogr. phys. Géol. dyn., vol. 6, fasc. 4,
pp. 267-318.
- DUBERTRET (L.) 1933b.- L'Hydrologie et Aperçu sur l'Hydrogra-
phie de la Syrie et du Liban dans leurs rela-
tions avec la Géologie (Ibid. pp. 347-452).
- DUBERTRET R. et DUBERTRET (L.) 1940.- Sur l'existence d'un
golfe sur la Bekaa sud (Liban) au Lutétien.
C.R.A.S., t. 210, pp. 574-576.
- DUBERTRET (L.) 1941.- Carte géologique de la Syrie et du Li-
ban à l'échelle du millionième, 2e éd.
- DUBERTRET (L.) 1950.- Géologie et Hydraulique au Liban. Etude
géologique préliminaire d'une retenue sur le
Litani. Beyrouth, 30 p.
- GOGUEL (J.) 1952.- Traité de Tectonique (1ère éd.).
Masson, Paris, 383 p.

GLANGEAUD (L.) 1944.- Le rôle des failles dans la structure du Jura externe. Bull. Soc. Hist. Nat. Doubs, n° 51, p. 17.

HEYBROEK (F.) 1942.- La géologie d'une partie du Liban sud. Thèse, Leidische geol. Me de Deelingen t. 12, pp. 251-470.

FOURMARIER (P.) 1958.- Hydrogéologie, 2e éd., Masson, Paris, 294 p.

GIGNOUX (M.) et BARBIER (R.) 1955.- Géologie des Barroges. 1ère éd., Masson, Paris.

REISS (Z.) 1957.- Notes on Foraminifera from Israel. Geol. Survey, Israel.

REISS (Z.) 1958.- Classification of lamellae Foraminifera Geol. Survey Israel - Micropal. Vol. 4, n° 1, pp. 51-70.

TROMP (S.W.) 1949.- The determination of the Cretaceous Eocene boundary by means of quantitative, generic, microfaunal determination and the conception of the "Danian" in the Near East. Journ. of Paleontology, vol. 23, n° 6.

TROMP (S.W.) 1949.- The value of Globigerinidae ratios in Stratigraphy. Journ. of Paleontology, vol. 23, n° 3.

II - RAPPORTS INEDITS

SUR L'AMENAGEMENT DU LITANI.

DUBERTRET (L.) 1950.- Etudes géologiques concernant l'aménagement du Litani : 1ère partie - Discussion de la possibilité de créer une retenue à Karaoun. Beyrouth, août.

POINT IV (U.S.A.) 1953.- Development plant for Litani and Bisri riverbassin. Appendix to section IV and VII, Beyrouth, sept.

GOGUEL (J.) 1955.- Rapport sur l'étude géologique du projet de barrage sur le Litani. Paris, 20 décembre.

- DUBERTRET (L.) 1957.- Problèmes hydrogéologiques posés par l'équipement du Litani. Beyrouth, 15 janvier.
- BARBIER (R.) 1956.- Rapport général sur l'aménagement du Litani Grenoble, 28 mars.
- DUBERTRET (L.) 1956.- Problèmes géologiques posés par l'aménagement du Litani et programme de recherches. Beyrouth, Juin.
- PAVLIN (B.) 1956.- Rapport préliminaire sur les travaux de reconnaissance pour le bassin d'accumulation de Karaoun. Beyrouth, décembre.
- S.E.F.E. 1956.- Prospection géophysique.
- DUBERTRET (L.) 1957.- Rapport géologique. Conclusion de la campagne de forages entrepris dans la vallée du Litani en 1956. Beyrouth, mars.
- PAVLIN (B.) 1957.- Aménagement du Litani. Etude des résultats des travaux de reconnaissance. Zagreb, mars.
- ELEKTROSON et ELEKTROPROJEKT 1957.- Rideau d'injection du barrage de Karaoun (Zagreb).
- BARBIER (R.) 1957a.- Rapport géologique sur la nouvelle campagne de sondages de reconnaissance (1956-57). Grenoble, avril.
- BARBIER (R.) 1957b.- Note sur les barrages de Karaoun et de Markabi. Grenoble, mai.
- BARBIER (R?) 1958.- Compte rendu de mission. Mai.
- ANTOINE (P.) 1958a.- Galerie d'Awali (Lot II), Reconnaissance géologique du tracé. Beyrouth, octobre.
- ANTOINE (P.) 1958b.- Galerie de Markabi. Reconnaissance géologique. Beyrouth, novembre.
- BARBIER (R.) 1959.- Compte-rendu de mission, mars.
- ANTOINE (P.) 1959a.- Etude géologique sur la colline de Bkassine. Beyrouth, mai.
- ANTOINR (P.) 1959b.- Rapport provisoire sur les travaux souterrains. Beyrouth, juin.
- BARBIER (R.) et ANTOINE (P.) 1959.- Aménagement du Litani. Chute de Markabi. Barrage de Karaoun. Rapport géologique définitif. Grenoble, novembre.

VU

Grenoble, le juillet 1964

Le Président du Jury :

R. BARBIER

VU

Grenoble le Juillet 1964

Le Doyen de la Faculté des Sciences :

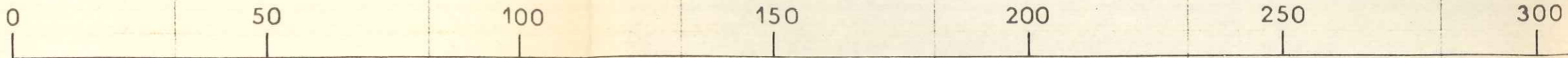
L. WEIL

VU et PERMIS d'IMPRIMER

Le Recteur de l'Académie de
Grenoble

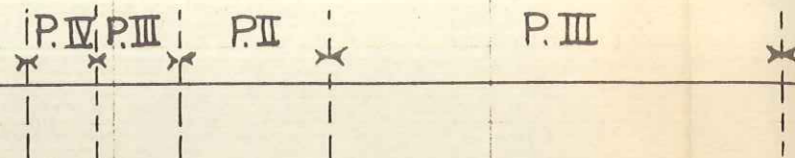
R. TREHIN

PK 0



PROFILS

Profil II



GRES DE BASE DU CRETACE

NATURE DU TERRAIN

Tufs Volcaniques

Diabases saines

Zone noduleuse

marnes

FENETRE DE J

PLANCHE N° 21

P. Antoine

0 350 400 450 500 550 600 650 700

P.IV

P.II

P.IV

P.II

A C E I N F E R I E U R

Grès sableux du "grès de base"

Marnes sablo-argileuses

Marnes à gros pisolithes

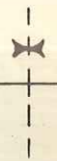
Grès sab

Bétonné durant l'été 1958

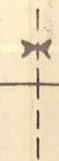
DE JEZZINE ATTAQUE AMONT OBSERVATIONS GEOLOGIQUES

650 700 750 800 850 900 950 1000

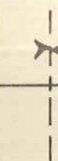
I



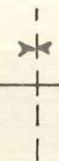
P.IV



P.II



P.III



P.IV

A P T I E N I N F E R I E U R

ileuses

Marnes à gros pisolithes

Grès sableux, marnes gréseuses, marnes

Calcaires détritiques

← Bétonné pendant l'été 1958 →

P K 1000

0 50 100 150 200 250 300

PROFILS

P IV

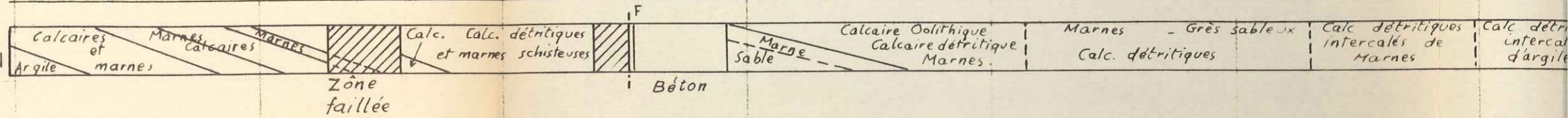
P III

P IV

P III

APTIEN INFÉRIEUR

NATURE DU TERRAIN



FENETRE DE JEZZINE ATTAQUE AMONT

PLANCHE N° 22

P. Antoine

300

350

400

450

500

550

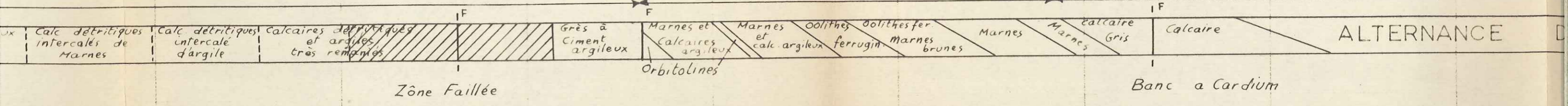
600

650

P III

P IV

APTIEN SUPERIEUR



MONT

650

700

750

800

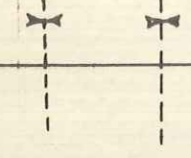
850

900

950

2000

P^{III}



ALBIEN

Cénomannien

ERNANCE

DE

MARNES

CHOCOLAT

ET

CALCAIRES

ARGILEUX

P K 2000

0 50 100 150 200 250 300

PROFILS

C E N O M A N I E N

NATURE DU
TERRAIN

Alternance de marnes et de calcaires

F E N E T R E D E J E Z Z I N E A T T A Q U E A M O N T

PLANCHE N°23

P. Antoine

250

300

350

400

450

500

550

600

650

N I E N

A L B I E N

calcaires

dolomitiques.

Marnes

Chocolat

NT

650

700

750

800

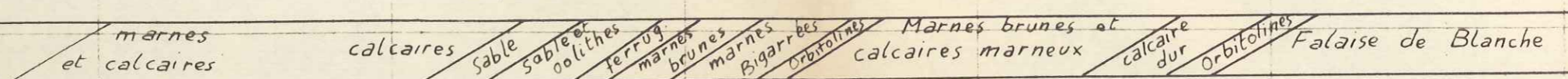
850

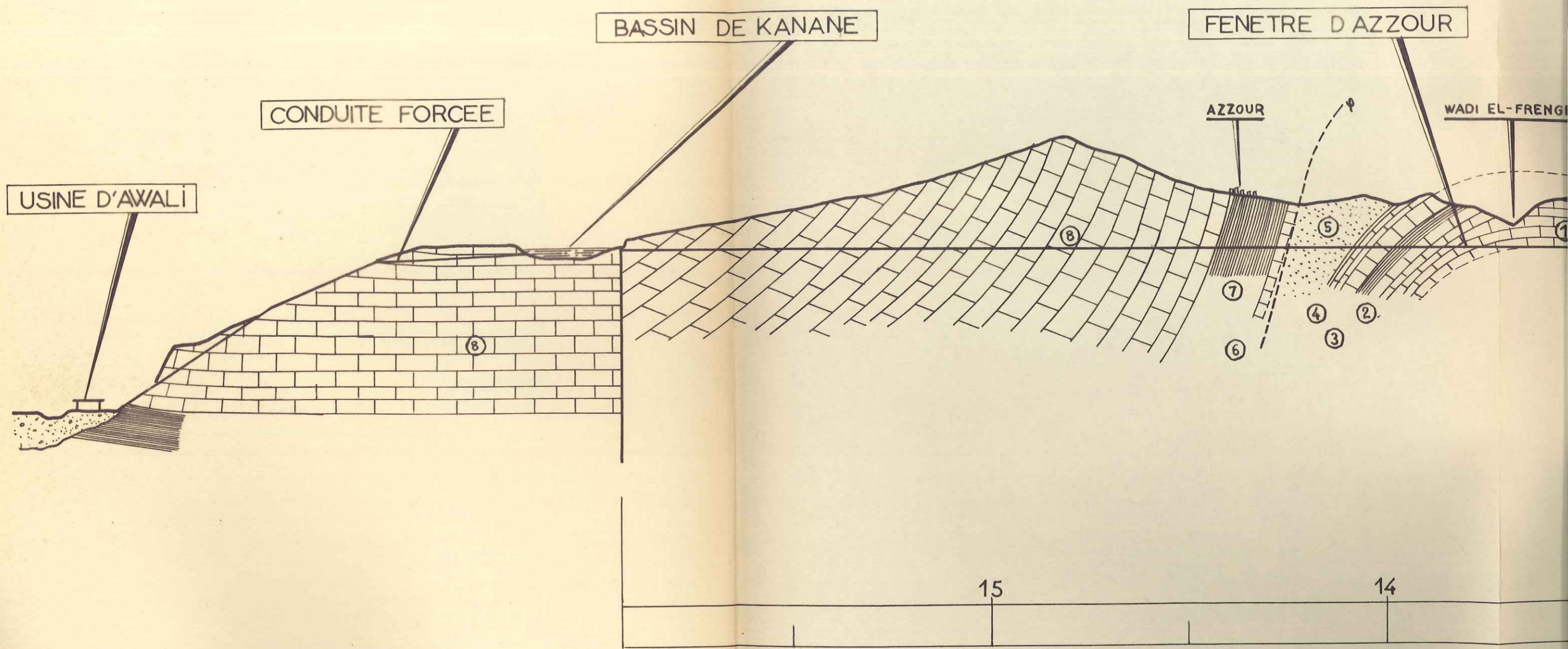
900

950

3000

A P T I E N S U P E R I E U R





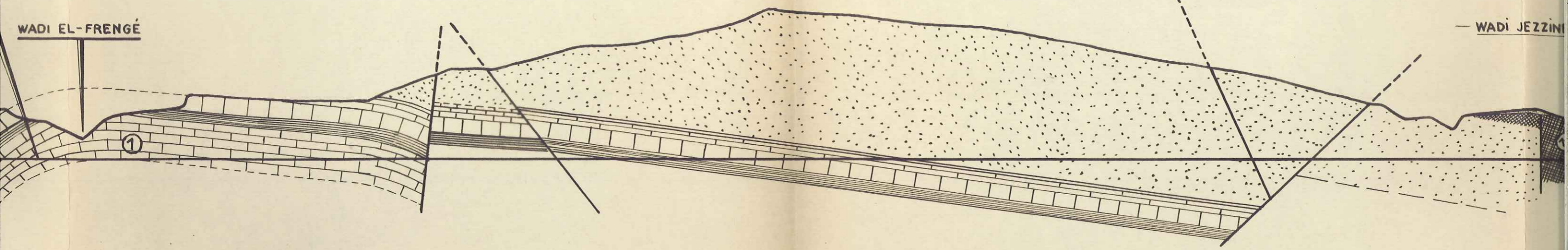
JR

FENETRE DE

— COLLINE DE BKASSINE —

WADI EL-FRENGÉ

— WADI JEZZINI —

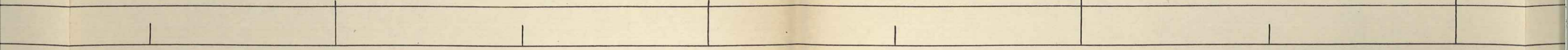


13

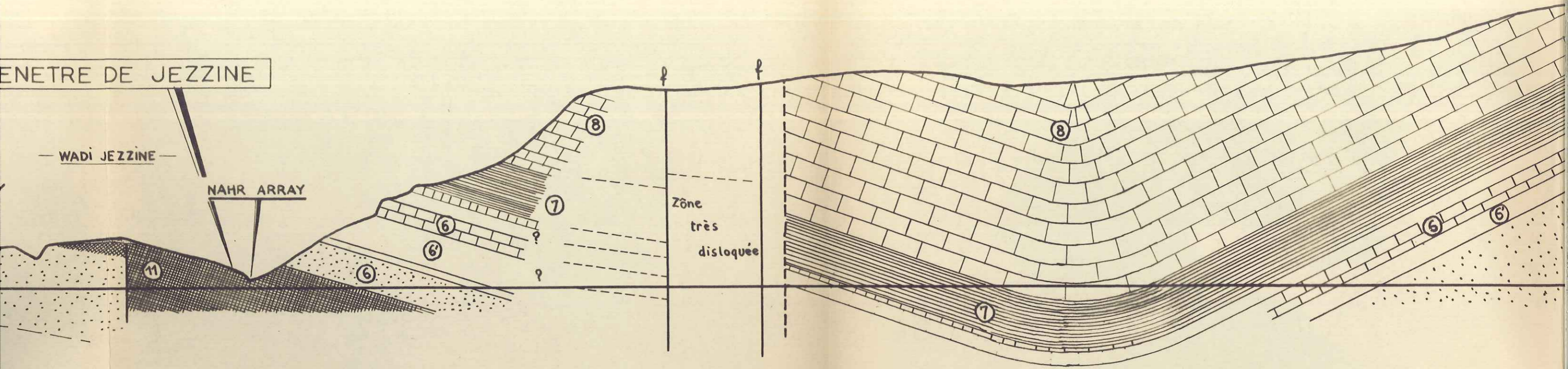
12

11

10



— WADI JEZZINE —
— NAHR ARRAY —
WENETRE DE JEZZINE



10

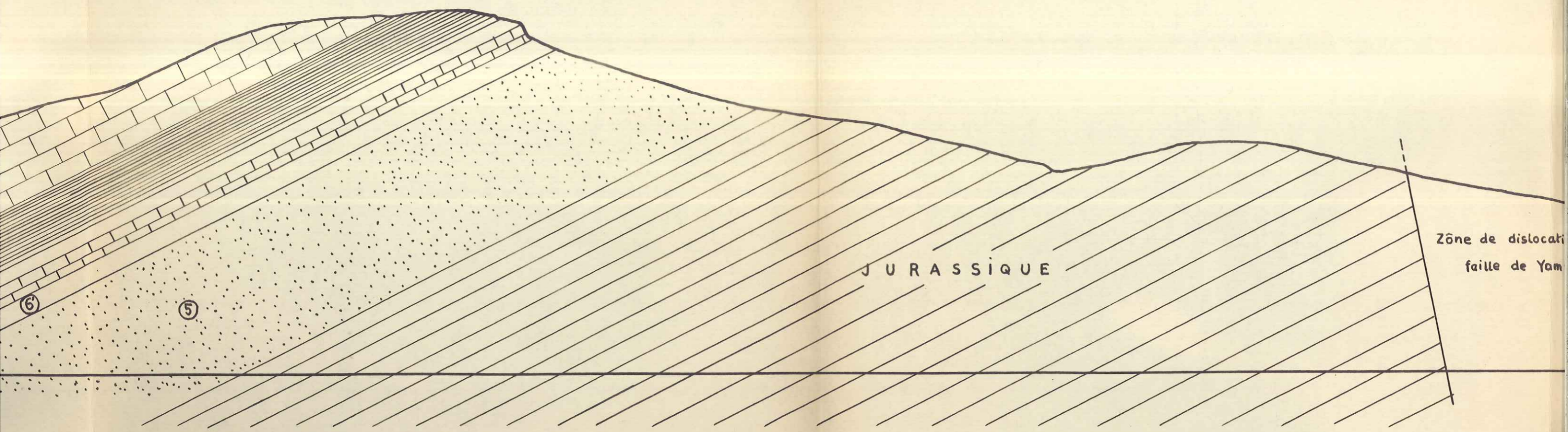
9

8

7

6

— MASSIF DU TOUMAT JEZZINE —



6

5

4

3

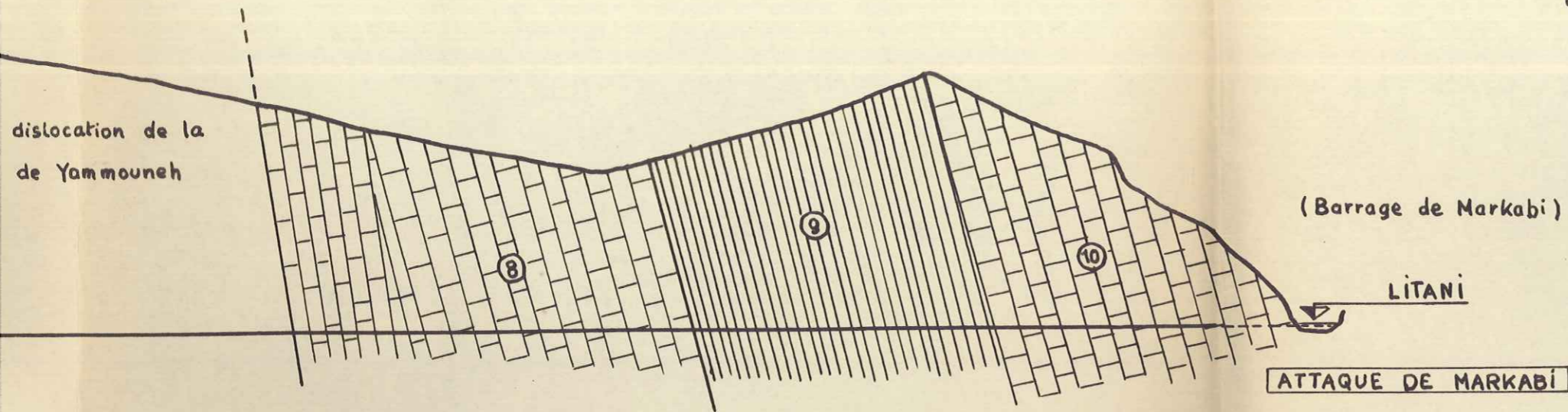
2

GALERIE D'AWALI

COUPE GEOLOGIQUE

PLANCHE N° 24

Echelle



LEGENDE

- 11 Formations volcaniques.
- 10 Calcaire blanc dur : Eocène moyen.
- 9 Série de calcaires marneux et marnes : Sénonien - Paléocène - Eocène
- 8 Calcaire dolomitique, gris, karstique : Cénomano Turonien.
- 7 Marnes brunes : Albien
- 6' Calcaires et marno calcaires : Aptien inférieur.
- 6 Calcaires gris - Falaise de Blanche : Aptien supérieur.
- 5 Grès sableux : Grès de base du crétacé inférieur.
- 4 Calcaire gris à patine jaune : Couches jaunes supérieures.
- 3 Calcaire gris : Falaise de Djisir et Qadi
- 2 Marnes chocolat
- 1 Calcaire gris bleu à patine jaune : Couches jaunes inférieures

0km

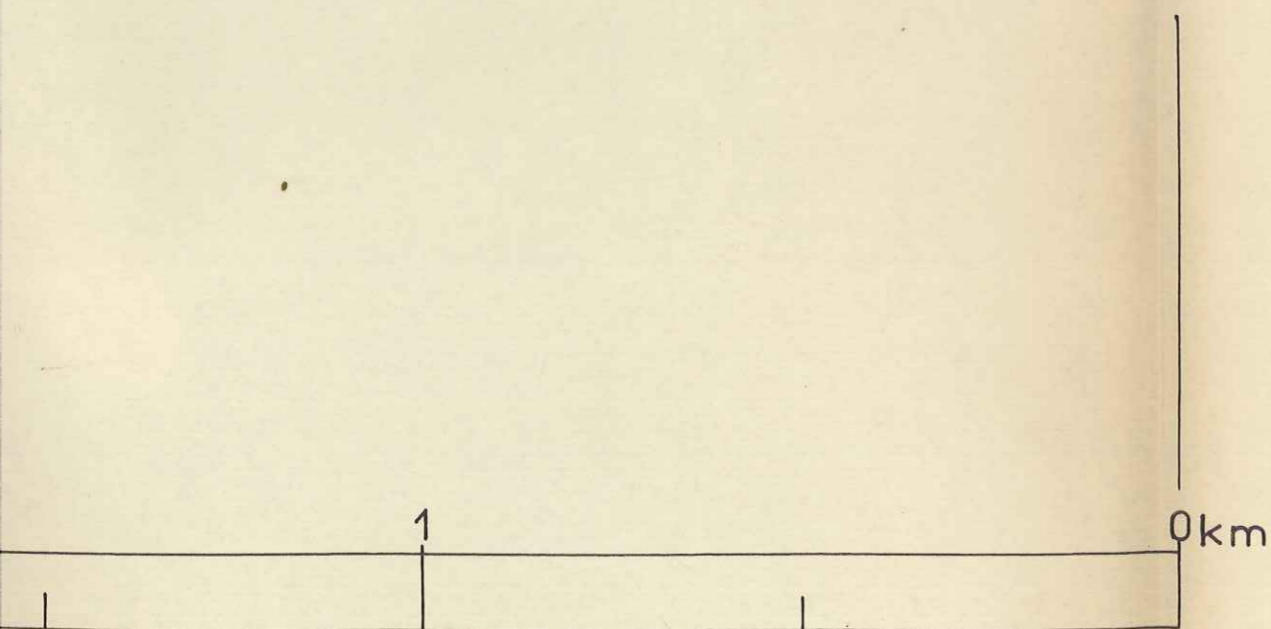
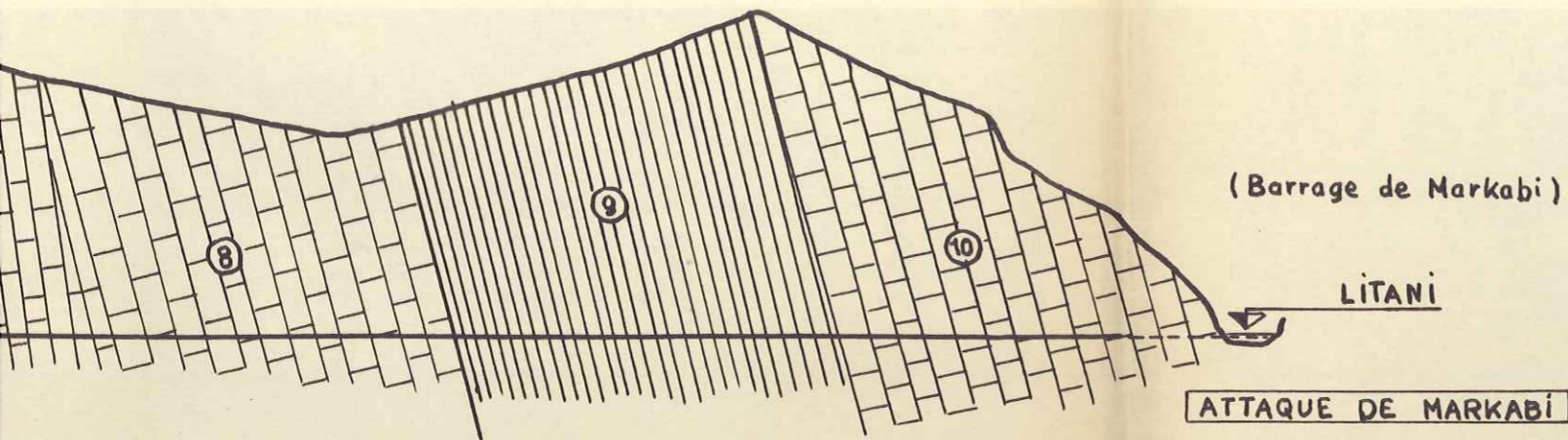
JU

GALERIE D'AWALI

COUPE GEOLOGIQUE

PLANCHE N° 24

Echelle 1/10 000



LEGENDE

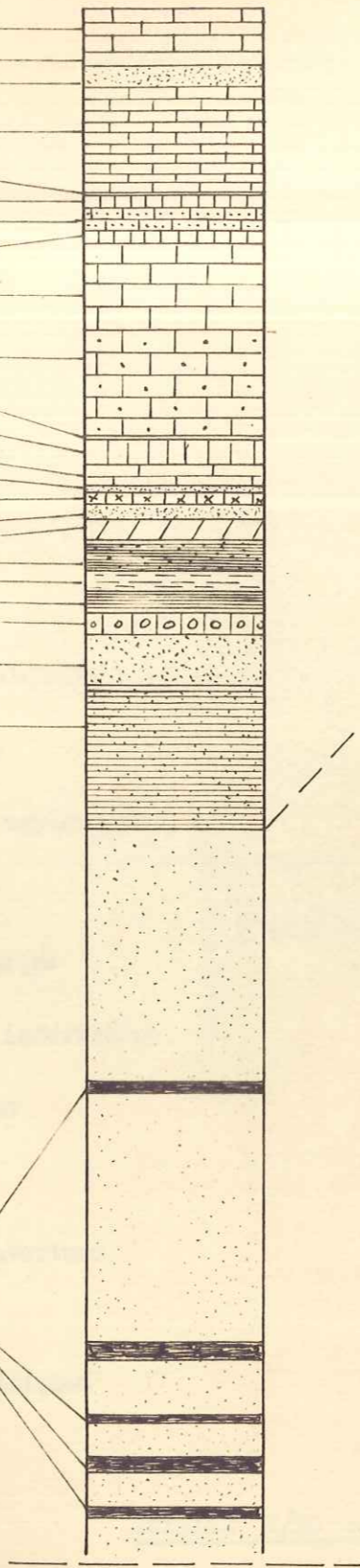
- | | | |
|----|---|--------------|
| 11 | Formations volcaniques. | |
| 10 | Calcaire blanc dur : Eocene moyen. | |
| 9 | Serie de calcaires marneux et marnes : Senonien - Paleocene - Eocene inferieur. | |
| 8 | Calcaire dolomitique, gris, karstique : Cenomano Turonien. | |
| 7 | Marnes brunes : Albien | |
| 6' | Calcaires et marno calcaires : Aptien inferieur. | |
| 6 | Calcaires gris - Falaise de Blanche : Aptien superieur. | |
| 5 | Grès sableux : Grès de base du cretace inferieur. | |
| 4 | Calcaire gris à patine jaune : Couches jaunes superieures. | } JURASSIQUE |
| 3 | Calcaire gris : Falaise de Djisr et Qadi | |
| 2 | Marnes chocolat | |
| 1 | Calcaire gris bleu à patine jaune : Couches jaunes inferieures | |

INFERIEUR

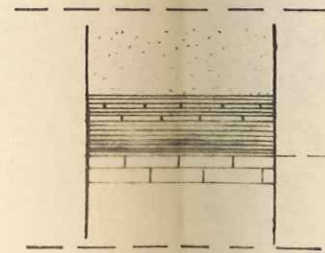
APTIEN

- Calcaire fin gris jaune
- Calcaire détritique ocre
- Grès rubéfié
- Calcaire détritique ocre
- Couche marneuse F
- Calcaire tendre
- Calcaire oolithique
- Calcaire tendre
- Calcaire grossièrement détritique.
- Calcaires oolithiques et détritiques.
- Calcaire gris clair.
- Calcaire ocre, fin.
- Calcaire gréseux rougeâtre.
- Grès ocre à ciment calcaireux.
- Lumachelle à grande Ostrées.
- Récurrence du faciès Grès de base.
- Dolomies vacuolaires à oolithes ferrugineux.
- Marnes grises à petits pisolithes.
- Calcaire argileux à gros pisolithes
- Marnes grises
- Calcaire blanc, tendre, rognoneux à Nérinées.
- Grès ferrugineux à nodules pyriteux.
- Grès très argileux

- Grès
- Grès
- Marnes ligniteuses
- Grès
- Grès
- Grès
- Grès.

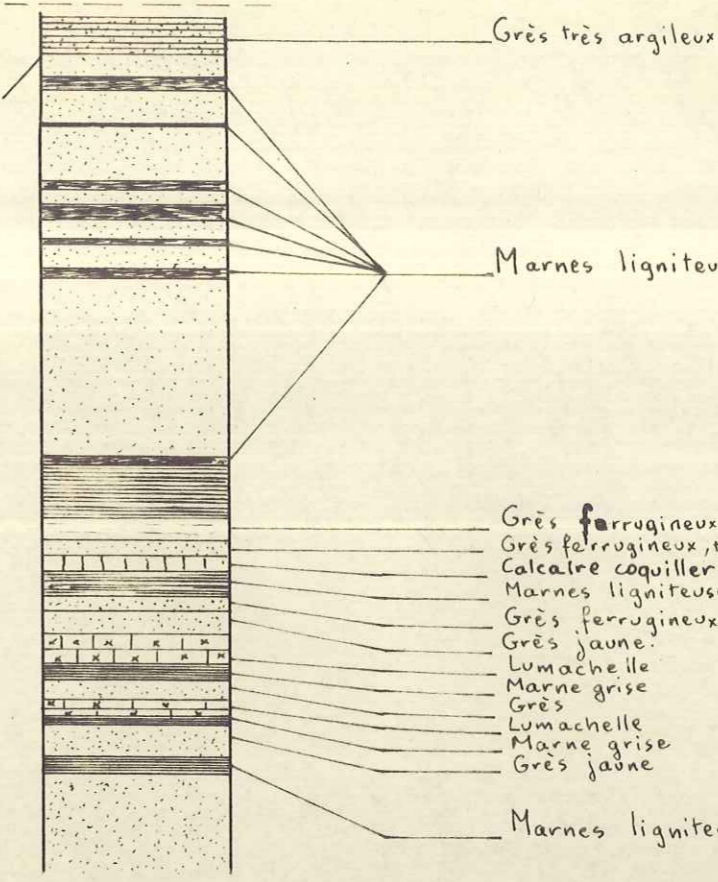


1



2

JUR. SUP.



3

- Grès très argileux
- Marnes ligniteuses
- Grès ferrugineux dur
- Grès ferrugineux, tendre, coquiller.
- Calcaire coquiller
- Marnes ligniteuses
- Grès ferrugineux feuilleté
- Grès jaune.
- Lumachelle
- Marne grise
- Grès
- Lumachelle
- Marne grise
- Grès jaune
- Marnes ligniteuses

- Zône supérieure de la coulée altérée.
- Diabase (Coulée à prismes)
- Grès argileux gris à débris végétaux.
- Laves altérées et tufs.
- Grès ocre à passées argileuses
- Marnes chocolat
- Couches jaunes supérieures.















COUPES STRATIGRAPHIQUES DU GRES DE BASE

PRISES A NABI MICHE

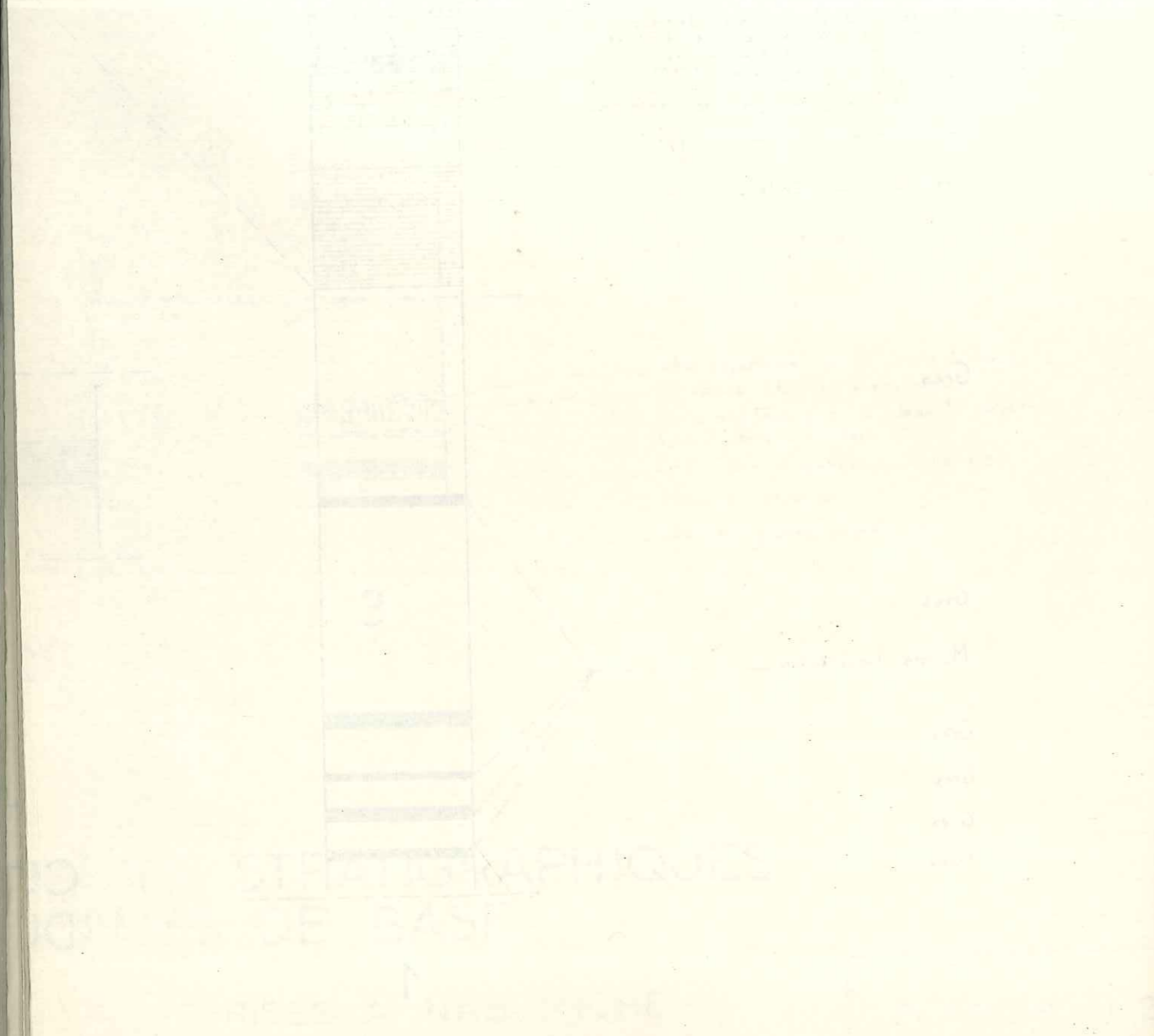
PLANCHE N 26

CARTE GEOLOGIQUE DE LA COLLINE DE BKASSINE

LEGENDE

-  Aptien supérieur
 -  Aptien inférieur
 -  Grès de base
 -  Niveau marneux du sommet du grès de base
 -  Coulée de sable
 -  Couches jaunes supérieures
 -  Calcaire gris
 -  Complexe volcanique
 -  Couches jaunes inférieures
 -  Tufs volcaniques
 -  Diabases
 -  Terrains de couverture
 -  Failles
 -  Failles hypothétiques
- } JURASSIQUE SUPERIEUR

ECHELLE 1/20 000



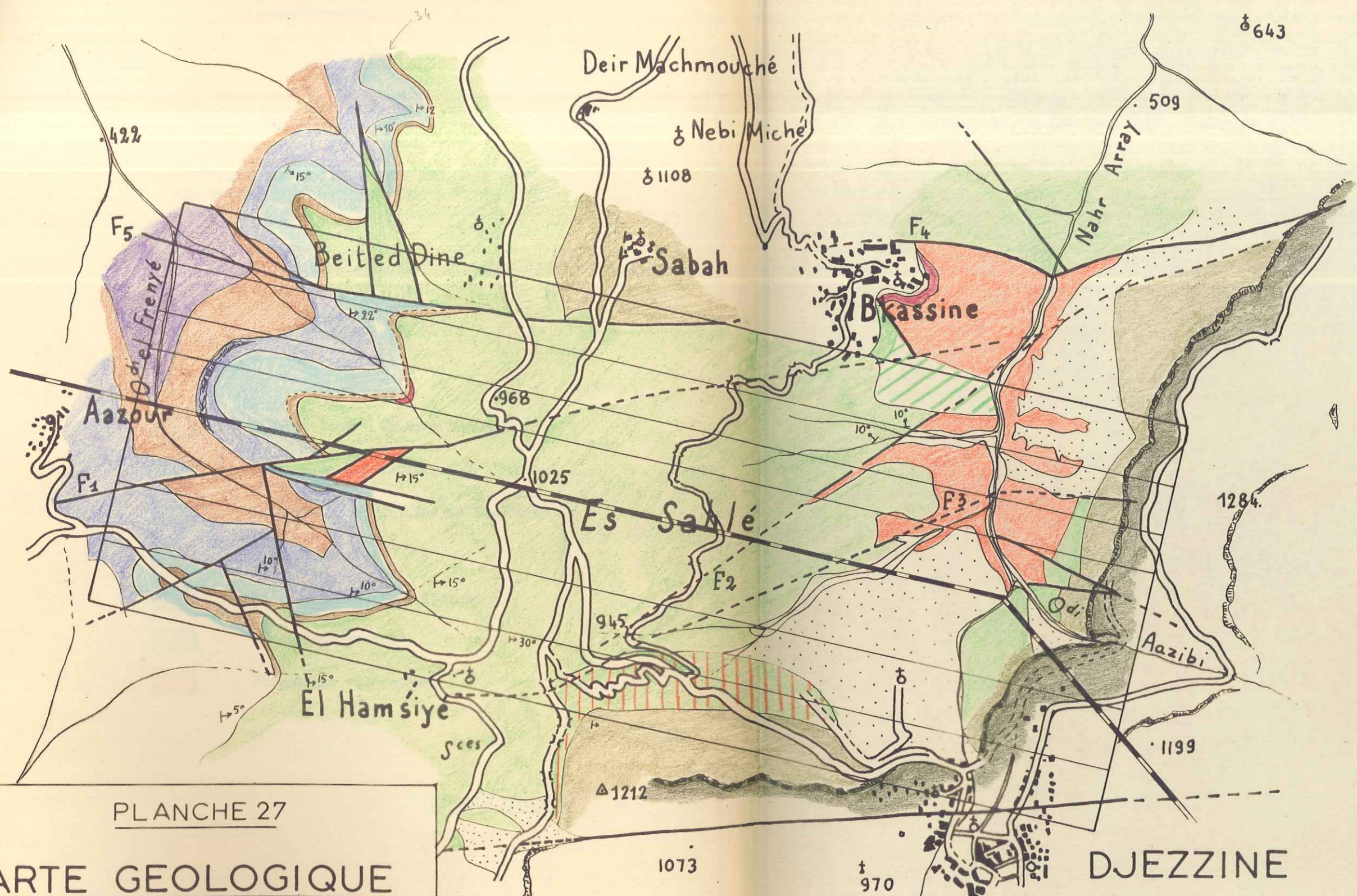









PLANCHE 27

CARTE GEOLOGIQUE
DE LA COLLINE
DE BKASSINE

DJEZZINE

COUPES SÉRIÉES DANS LA COLLINE DE BKASSINE

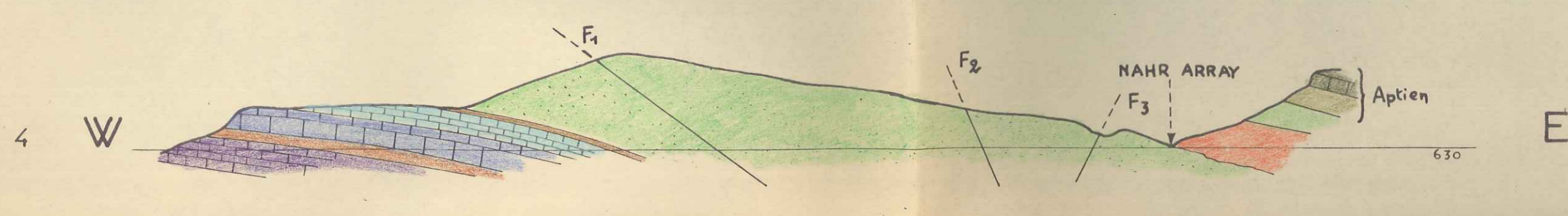
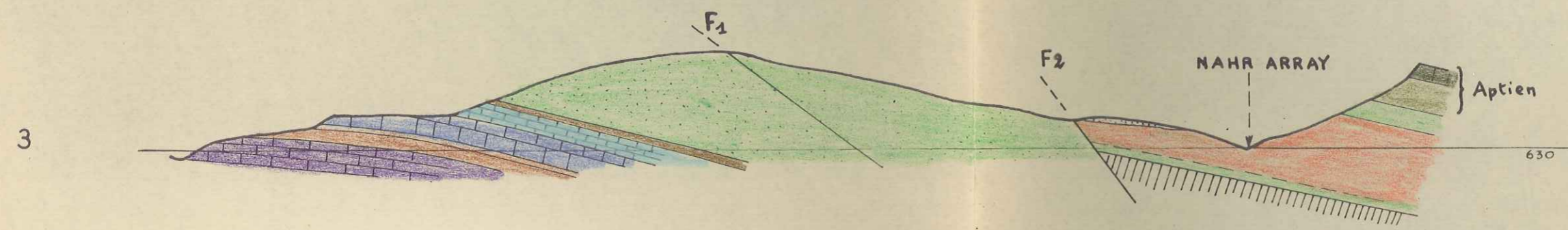
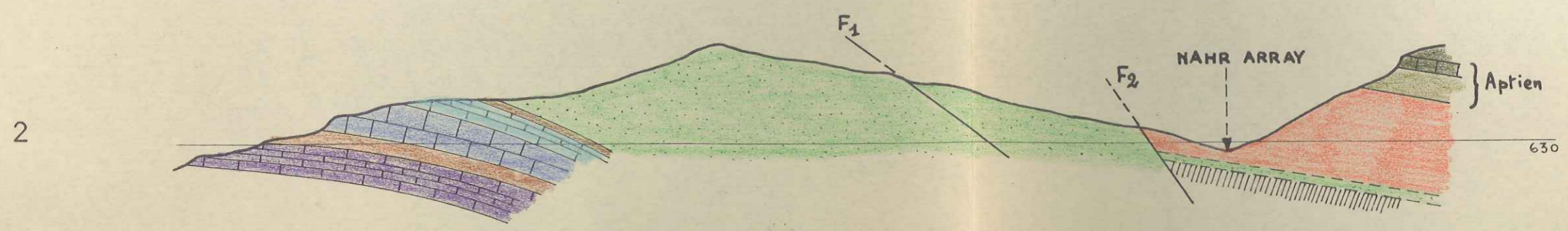
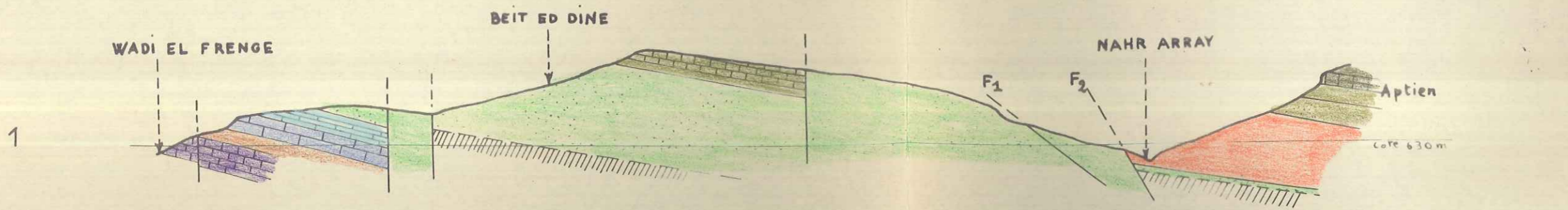
LEGENDE

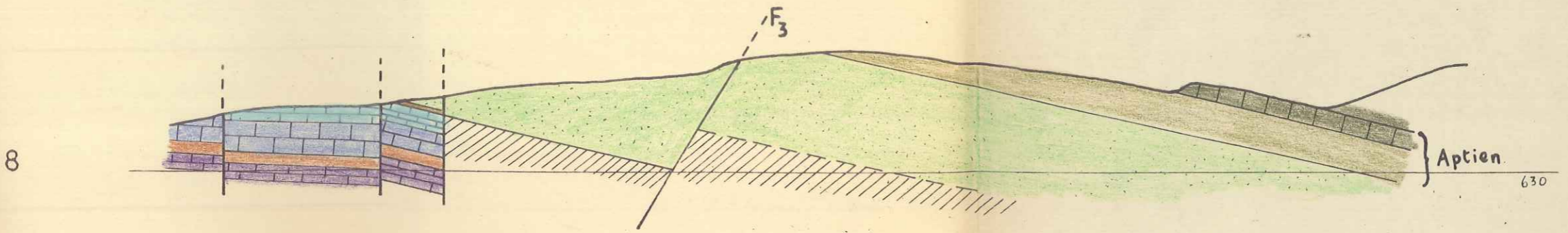
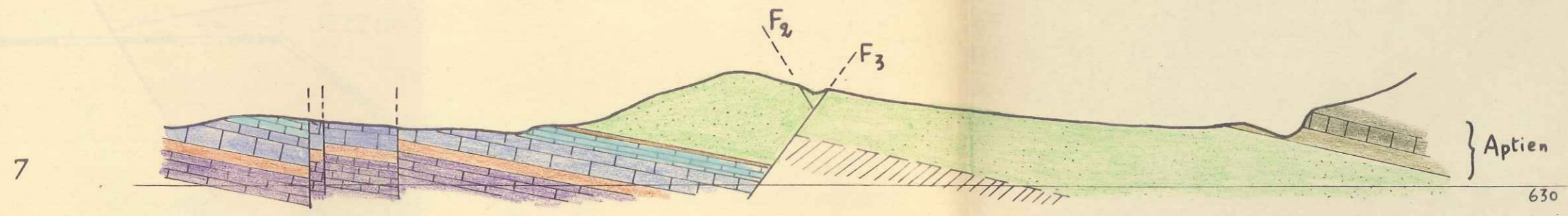
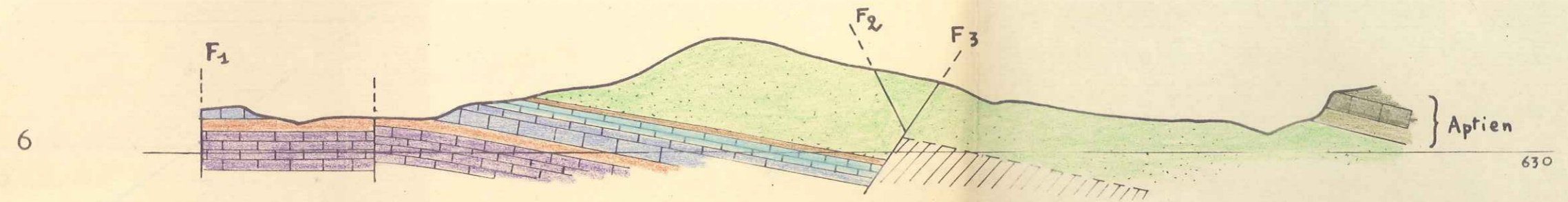
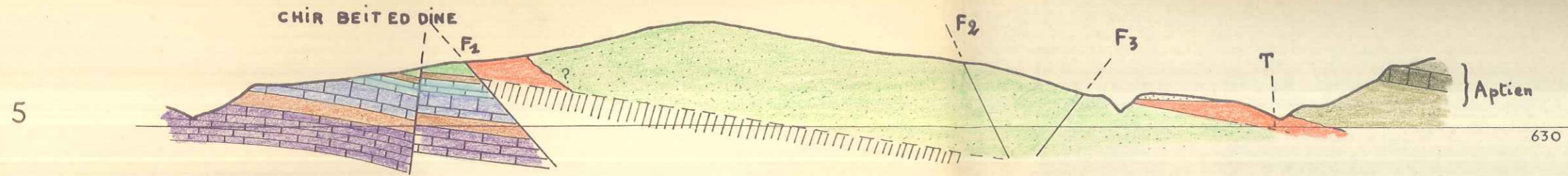
- | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------|
|  | Grès de base - Crétacé inférieur. | |
|  | Couches jaunes supérieures | |
|  | Calcaire gris (Falaise de Bickfaya) | } JURASSIQUE SUP. |
|  | Marnes chocolat | |
|  | Couches jaunes inférieures | |
|  | Jurassique présumé | |
|  | Formations volcaniques | |

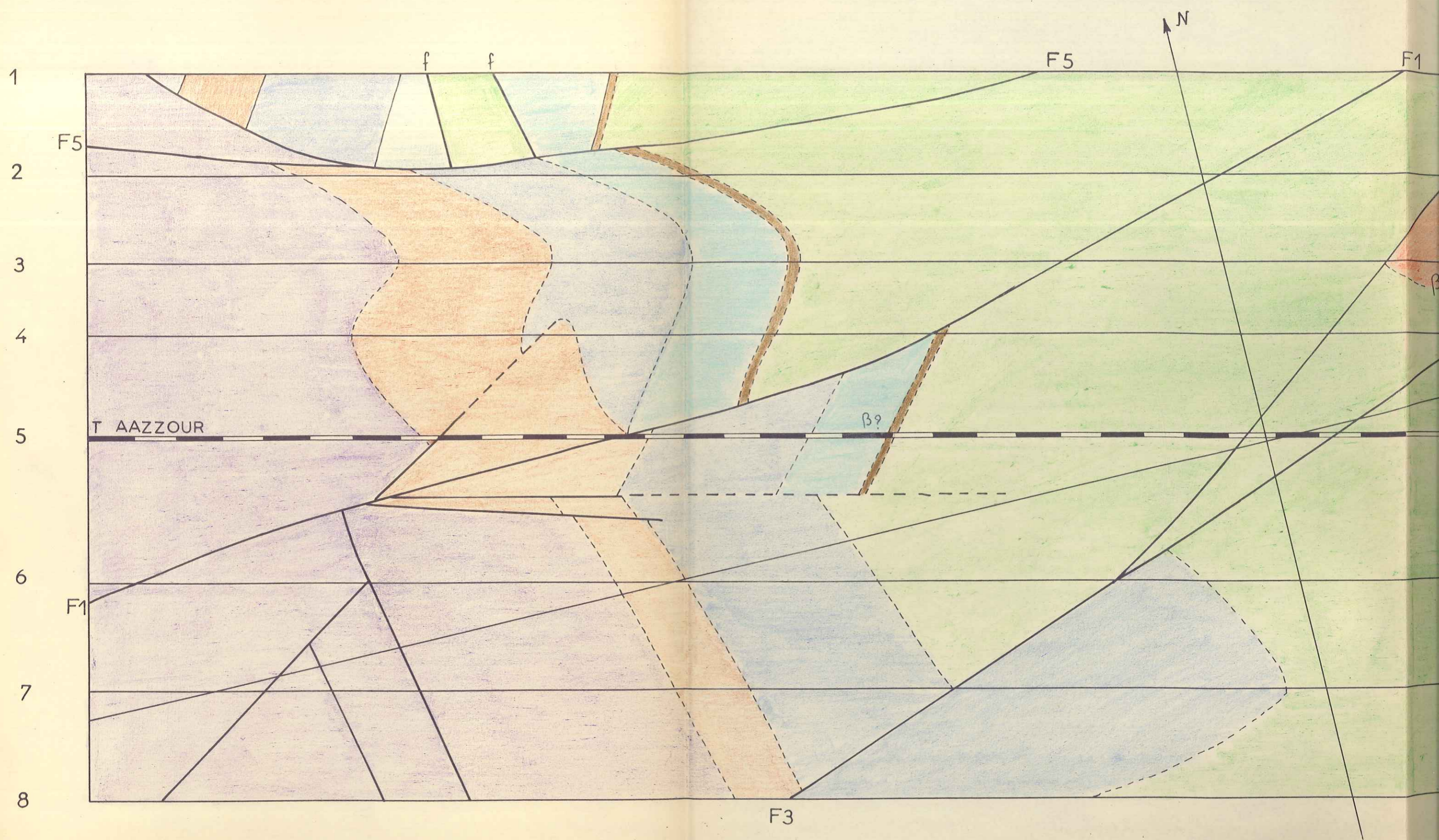
ECHELLE 1/20 000

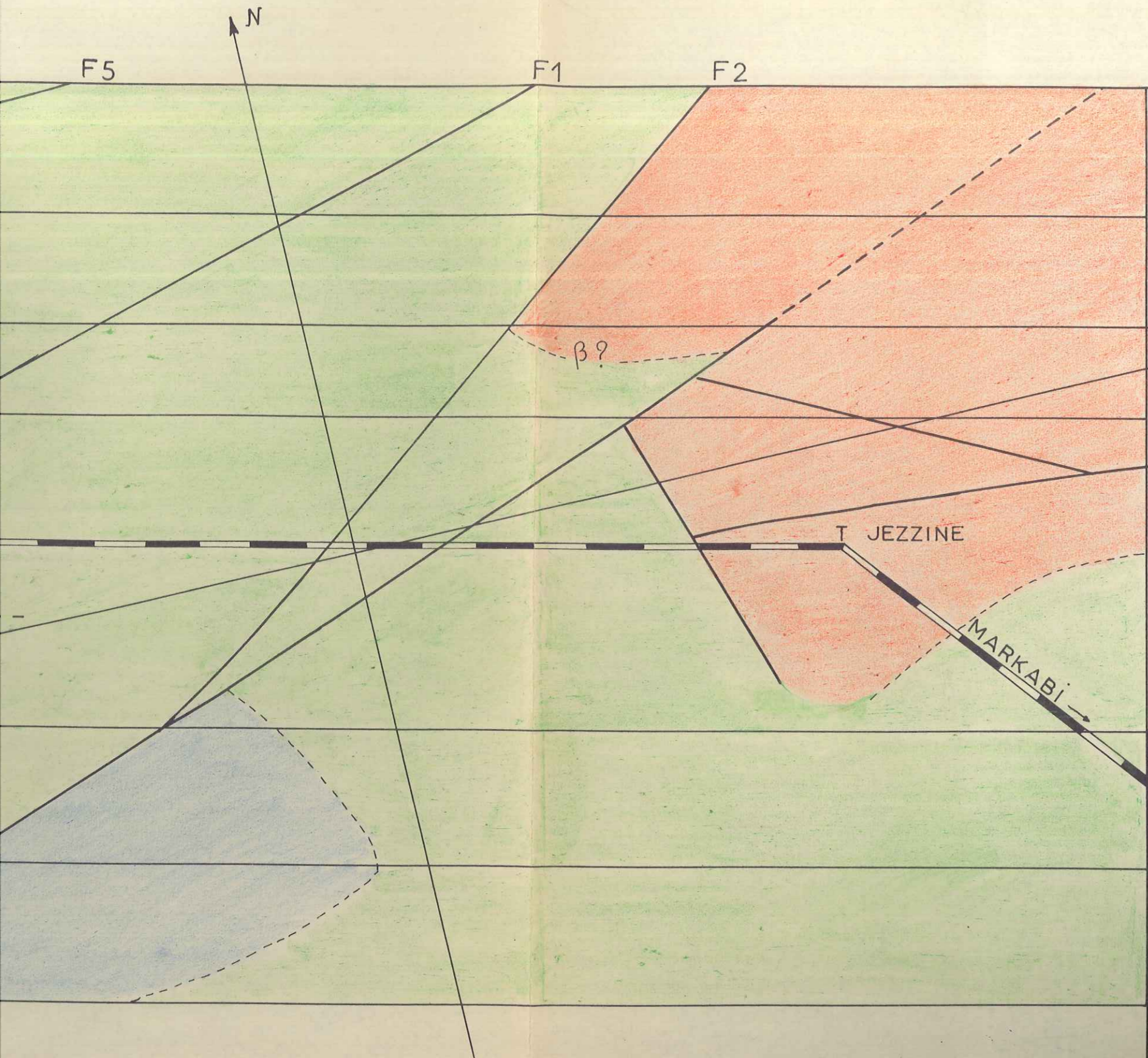


PLANCHE N° 28
CARTE GÉOLOGIQUE
DE LA COLLINE
DE BKASSINE


















-  Gres de base
-  Couche marneuse superieure
-  Couches jaunes superieures
-  Calcaire gris
-  Couche marneuse inferieure
-  Couches jaunes inferieures
-  Formations volcaniques
-  Failles
-  Limites de couches

PLANCHE N 29

GALERIE D'AWALI

CARTE GEOLOGIQUE HYPOTHETIQUE

DANS LE PLAN DE COTE 630

ENTRE T JEZZINE ET T AAZOUR

ESQUISSE GEOLOGIQUE
DES ENVIRONS D AZZOUR









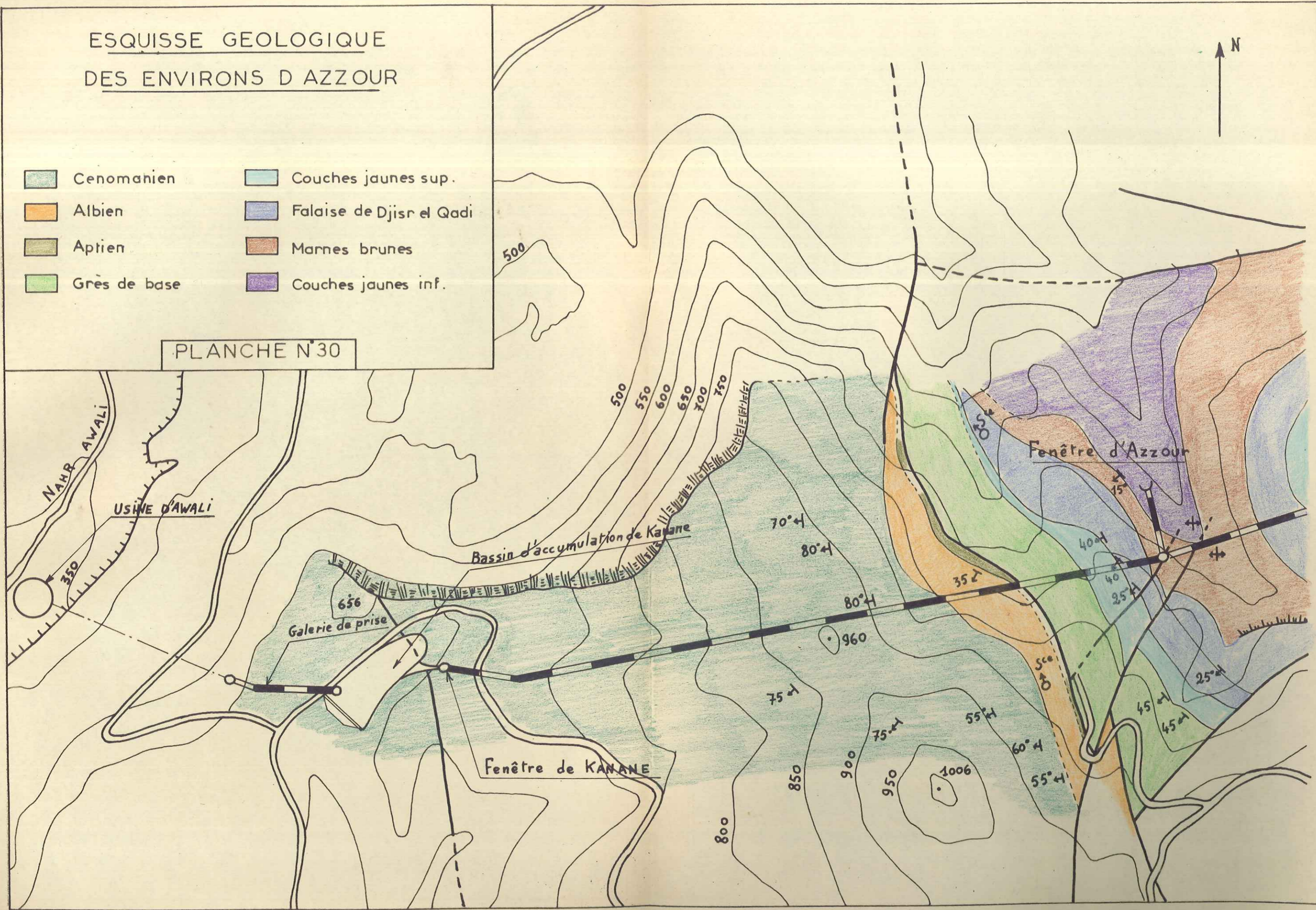
- | | |
|--|---|
|  Cenomanien |  Couches jaunes sup. |
|  Albien |  Falaise de Djisir el Qadi |
|  Aptien |  Marnes brunes |
|  Grès de base |  Couches jaunes inf. |

PLANCHE N°30



Cotes de la nappe

820

815

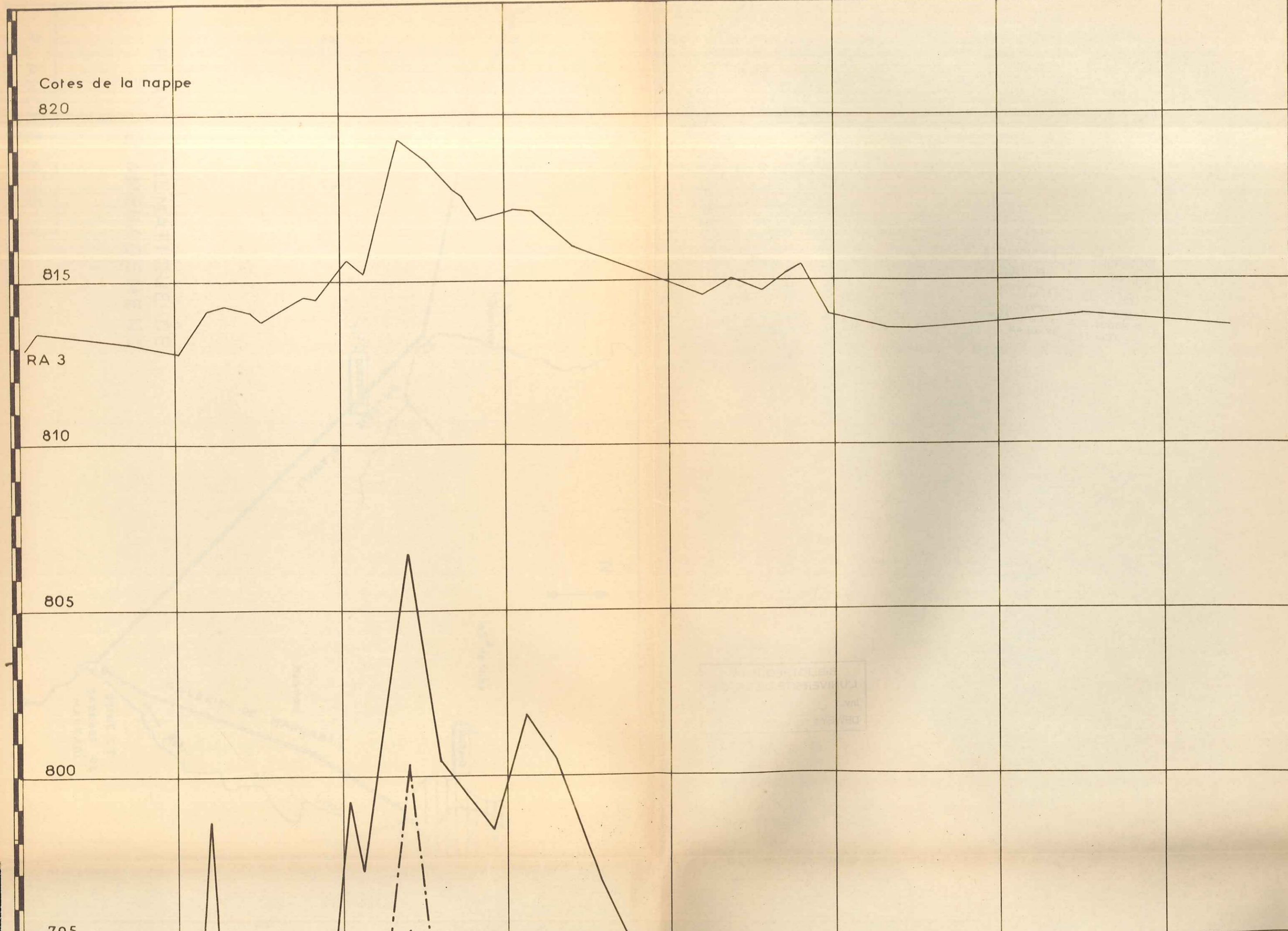
RA 3

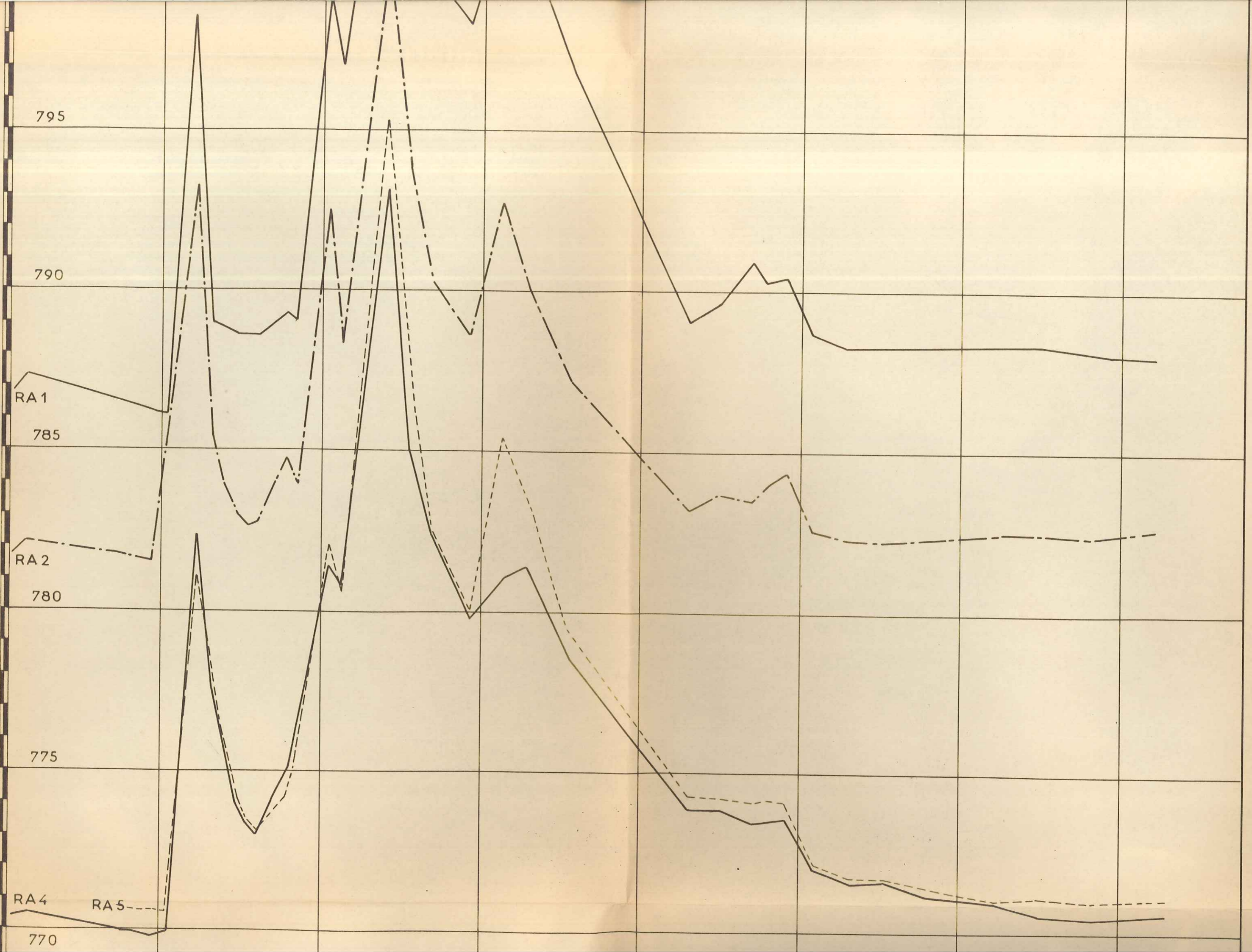
810

805

800

795





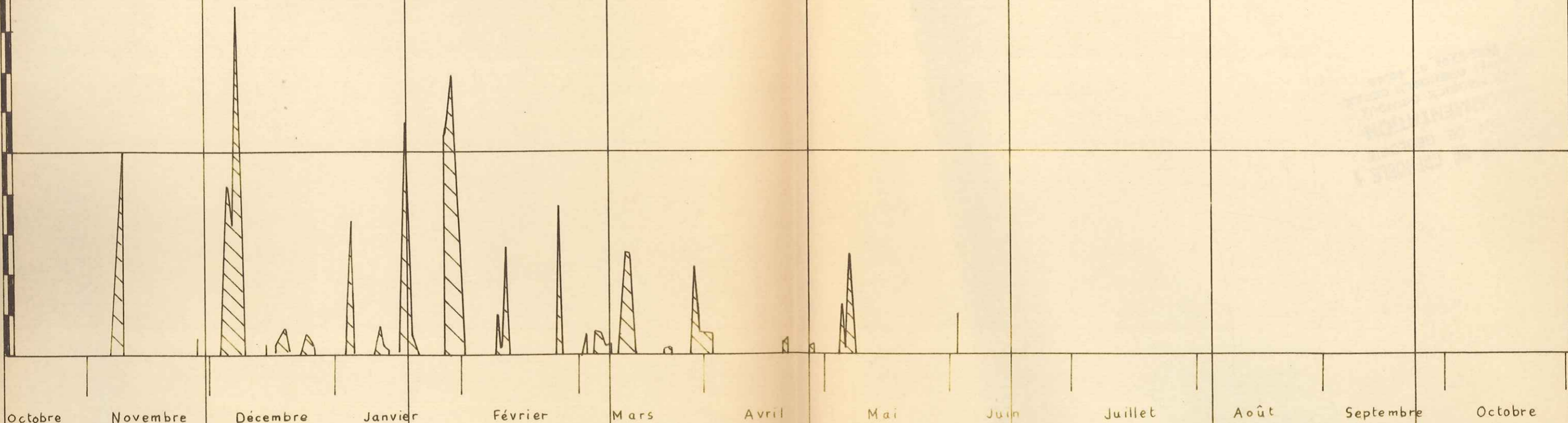
RA 4

RA 5

770

Pluviométrie

1 mm = 1 mm

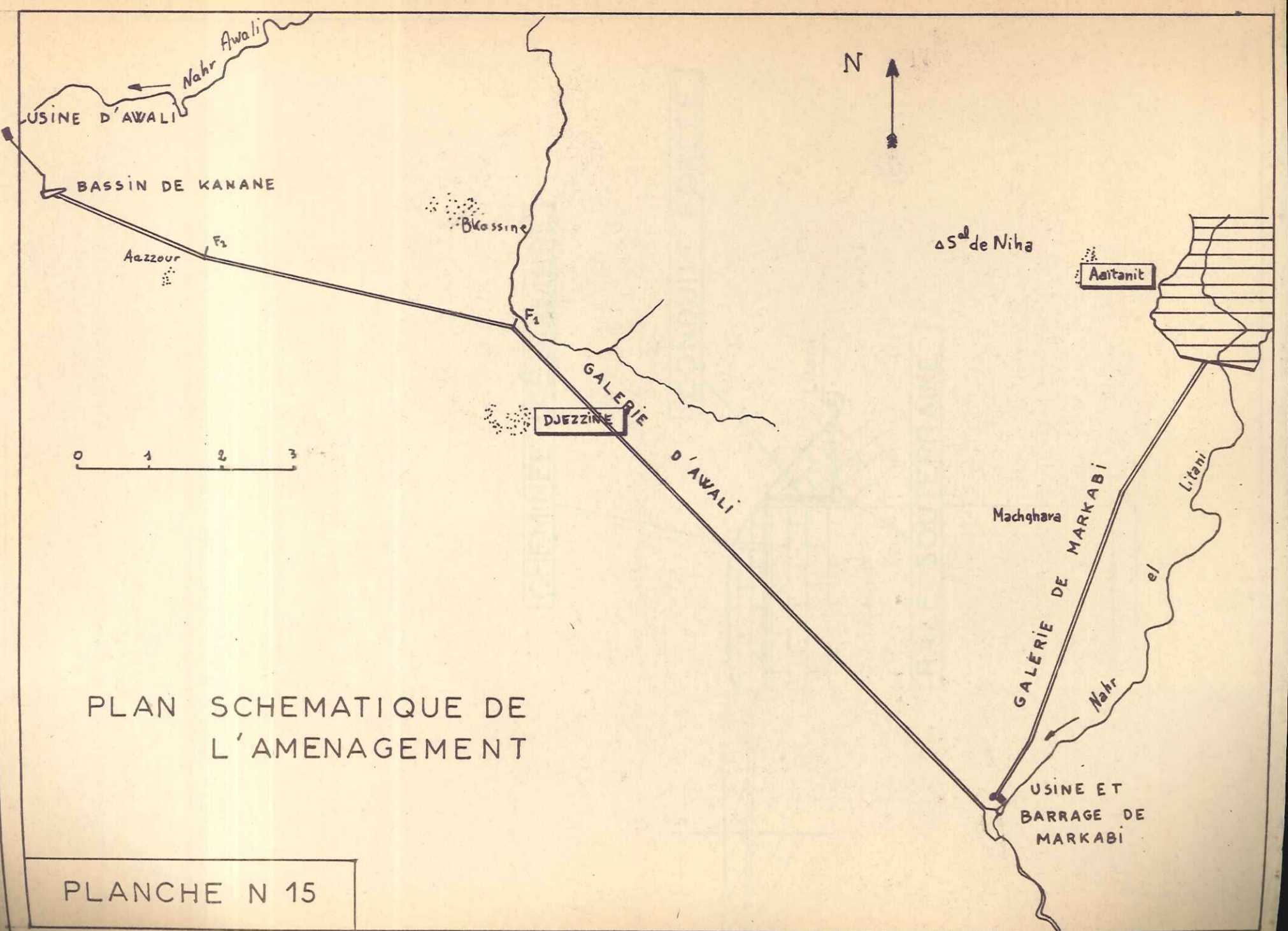


Octobre Novembre Décembre Janvier Février Mars Avril Mai Juin Juillet Août Septembre Octobre

1956

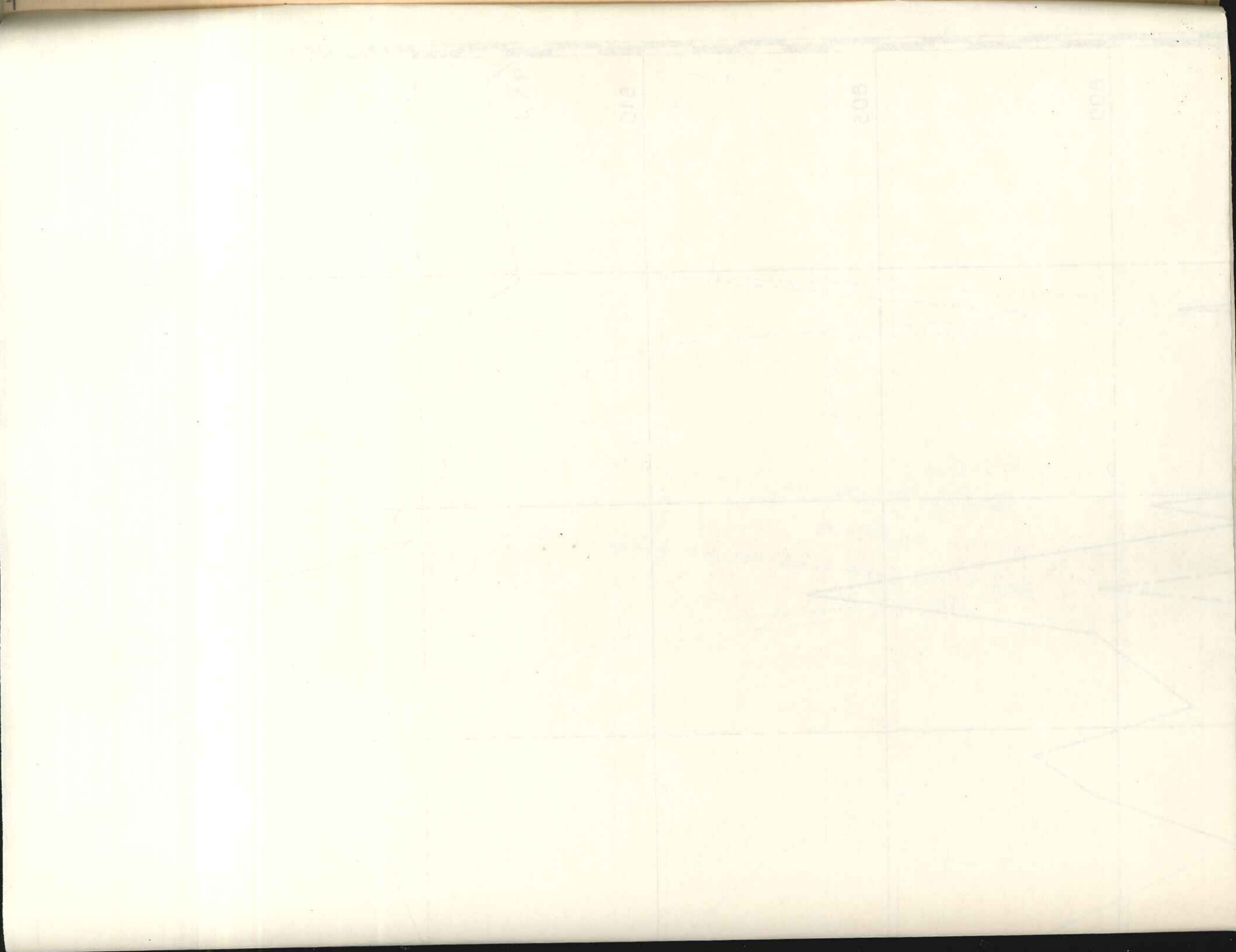
PLANCHE N 14

BARRAGE DE KARAOUN
 SONDAGES RA
 VARIATIONS DU NIVEAU DE
 LA NAPPE



PLAN SCHEMATIQUE DE L'AMENAGEMENT

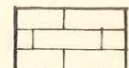
PLANCHE N 15



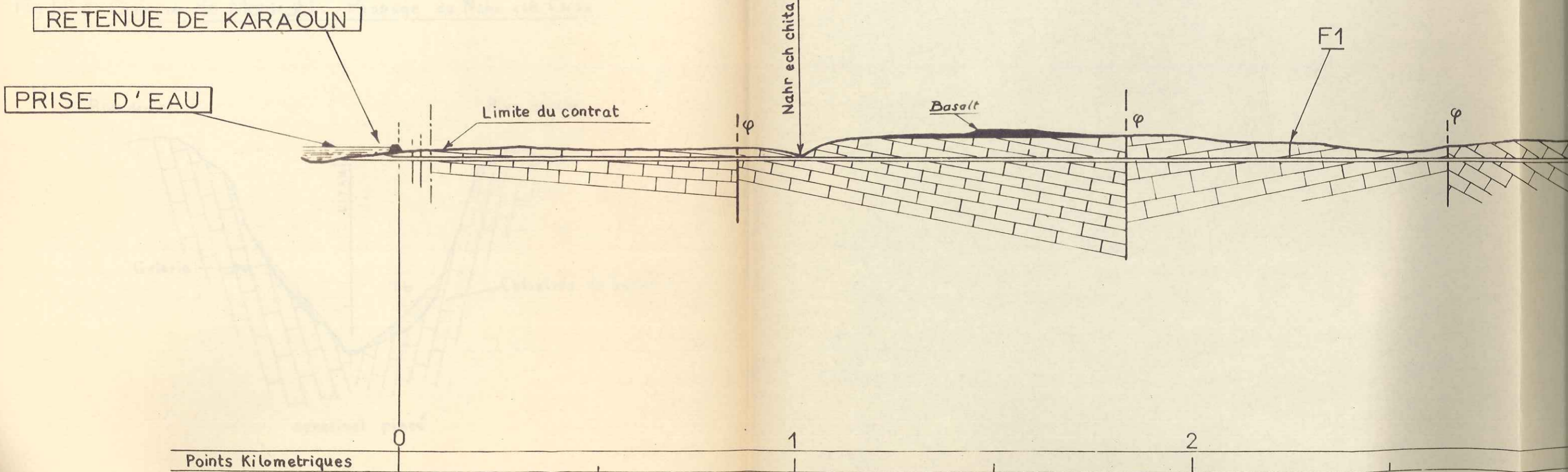
COUPE GEOLOGIQUE DE LA GALERIE DE MARKABI

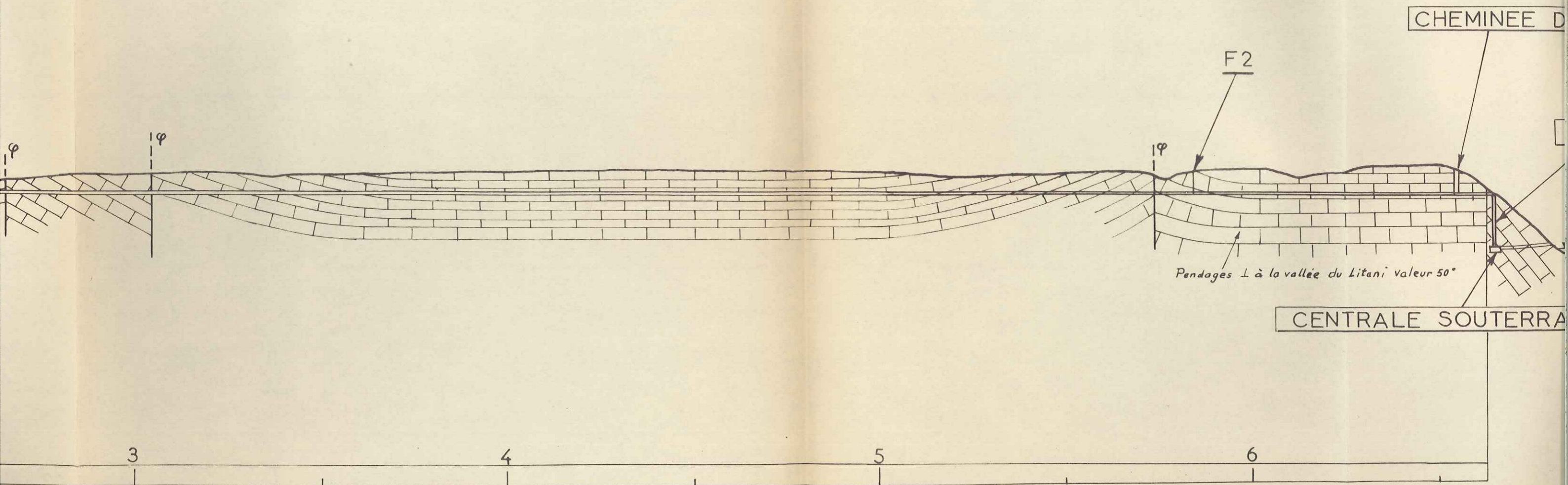
Echelle 1 10000

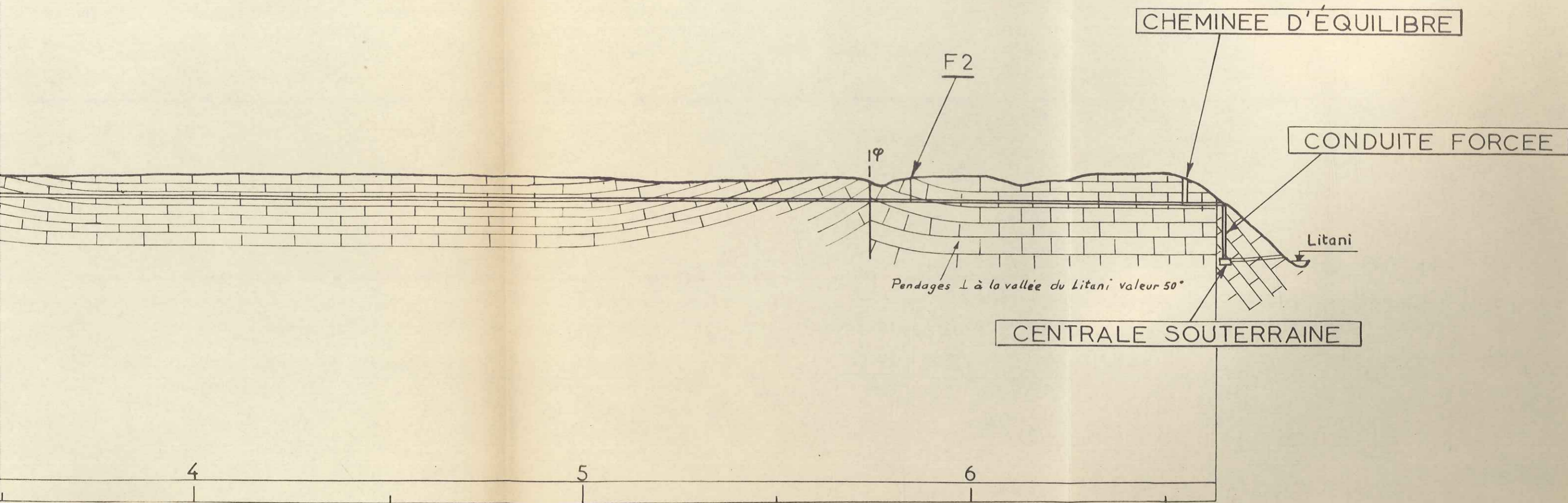
Legende :



Eocene moyen







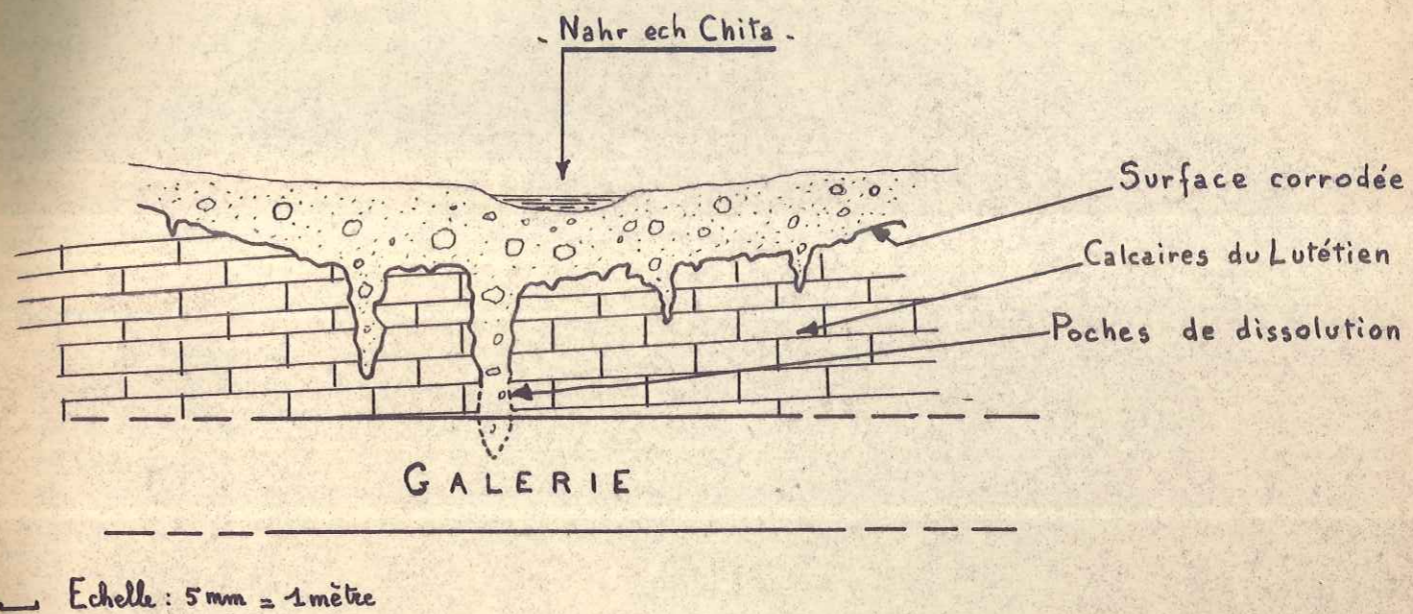


Fig. N° 1 Galerie de Markabi : Passage du Nahr ech Chita

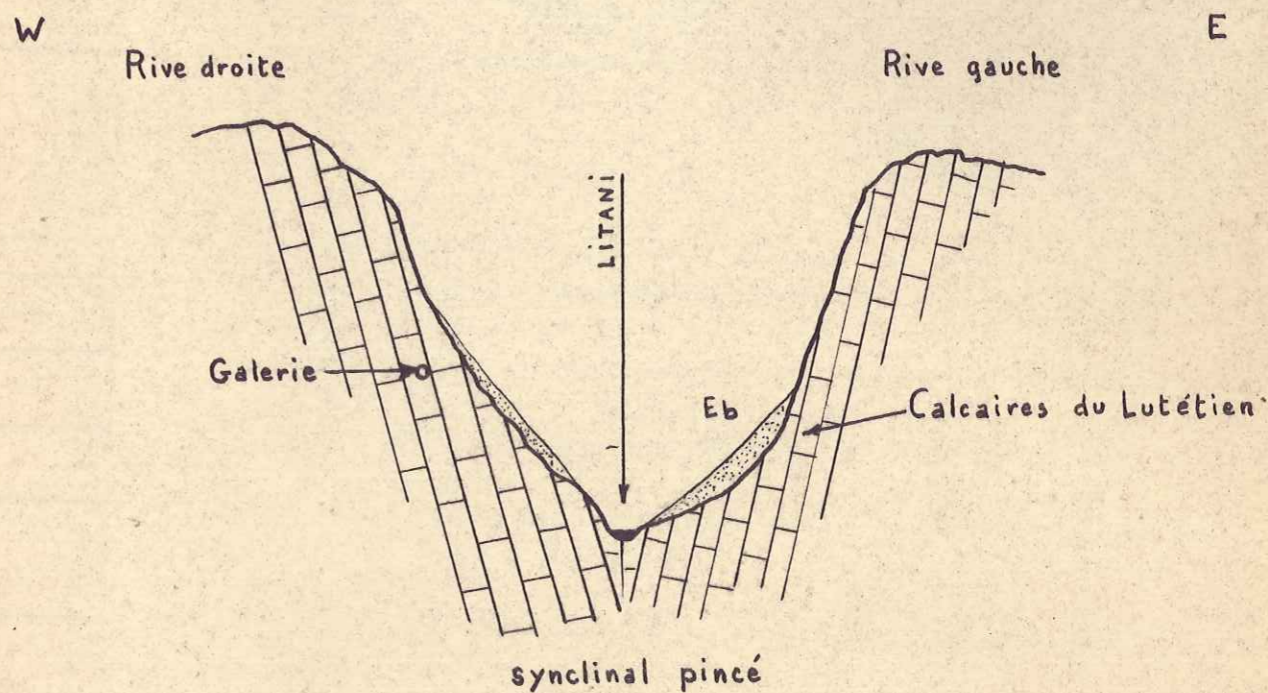


Fig. N° 2 Galerie de Markabi : Coupe schématique de la vallée du Litani à l'amont de Markabi

FENETRE DE MARKABI

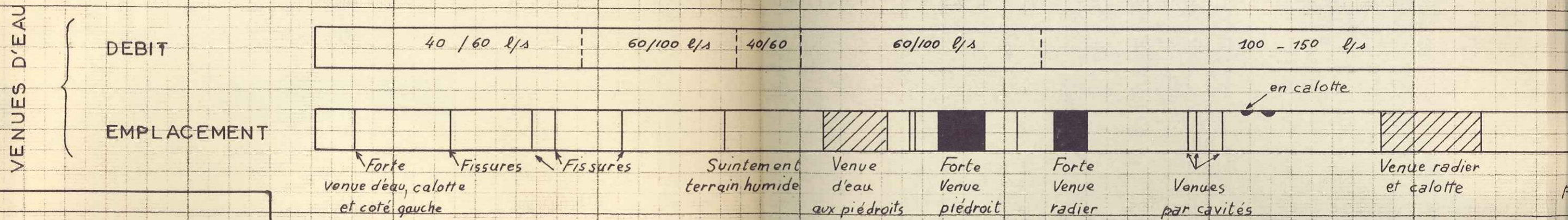
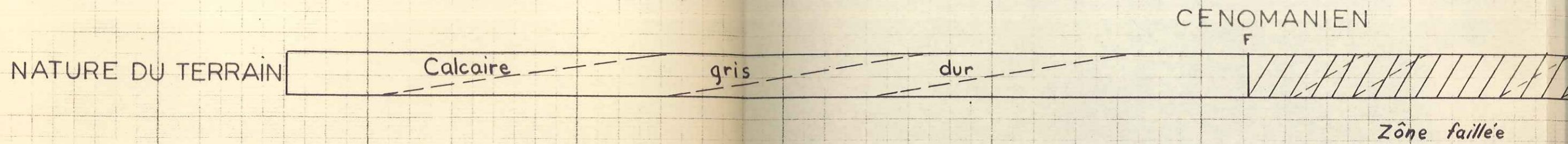
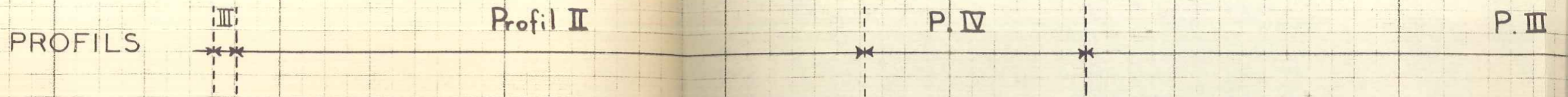
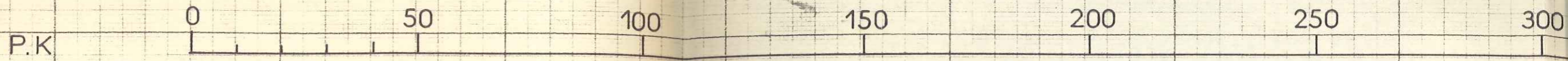


PLANCHE N°19

300

350

400

450

500

550

600

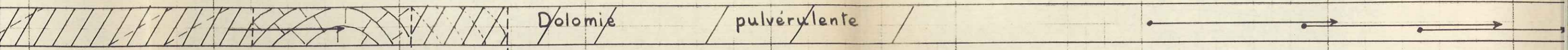
650

P. III

P. IV

P. III

P. IV



Zône faillée Sondage Zône faillée Dolomie pulvérulente Sondage Sondage Sondage

60/100 | 40/60 | 20/40

Rien

40/60

20/40 l/s

Rien



Venue radier et calotte



Venue par faille et cavité



Venue par fissure



Venues par fissures et cavernes

650

700

750

800

850

900

950

2000

P. IV

Quelques
Orbitolines

ZONE FAILLEE

calcaires
broyés

Marnes

Calcaires et marnes

F:

F:

Calcaire
Gris à
débris

blocs calcaires
emballés d'argile

Rocher

Sondage

Sondage

Sondage

Zône
Calcaire faillée
à Orbitolines

Rien

20-40

Rien

PK 0 50 100 150 200 250 300

PROFIL ← Profil II ← Profil III

EOCENE MOYEN

NATURE DU TERRAIN Calcaire blanc / $\downarrow 50^\circ$ dur / $\downarrow 50^\circ$ peu karstifié

VENUES D'EAU

DEBIT: Litres/sec.

20	20	20	20	20/40	20/40	20/40	40/60	40/60	60/100	60/100	60/100	60/100	60/100	60/100	60/100	40/60	40/60	40/50	40/60	20/40	20/40	10/20	10/20	10/20	20/40	20/40	20/40	20/40
----	----	----	----	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

EMPLACEMENT

Calotte Calotte

PLANCHE N° 20

FENETRE DE MARKABI

DETAIL DES OBSERVATIONS

300 350 400 450 500 550 600 650

Profil II

P. III P. IV P. II

EOCENE INFÉRIEUR + PALÉOCÈNE + SÉNONIEN

karstifié / Rognons de silex / T 75° / Calcaire marneux gris foncé / Calcaire marneux noir / Calcaire + marnes disloqué / Calcaire gris noir / Bords à silex

10/80 20/40 20/40 20/40 20/40 20/40 20/40 20/40 20/40 20/40 20/40 20/40 20/40 20/40 20/40 20/40

Calotte Calotte Calotte et radier Infiltrations en calotte Terrain Humide Calotte Fissure

Forte venue côté gauche

ES OBSERVATIONS EFFECTUEES A L'AVANCEMENT

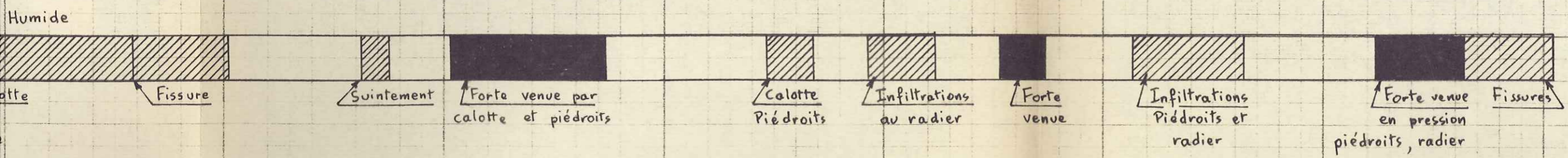
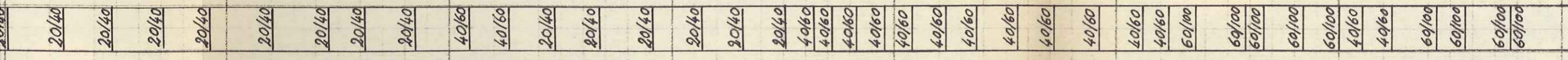


P. II P. IV P. II P. III P. II P. III P. II P. III P. II P. III P. IV

SÉNONIEN

TURONIEN

Calcaire gris noir / Bancs à silex / Calcaire gris foncé / Marne grise schisteuse / Calcaire blanc / Silex / Calcaire à silex / Calcaire grisâtre / Calcaire blanc dur fissuré / Lumachelle / Marne à ammonites



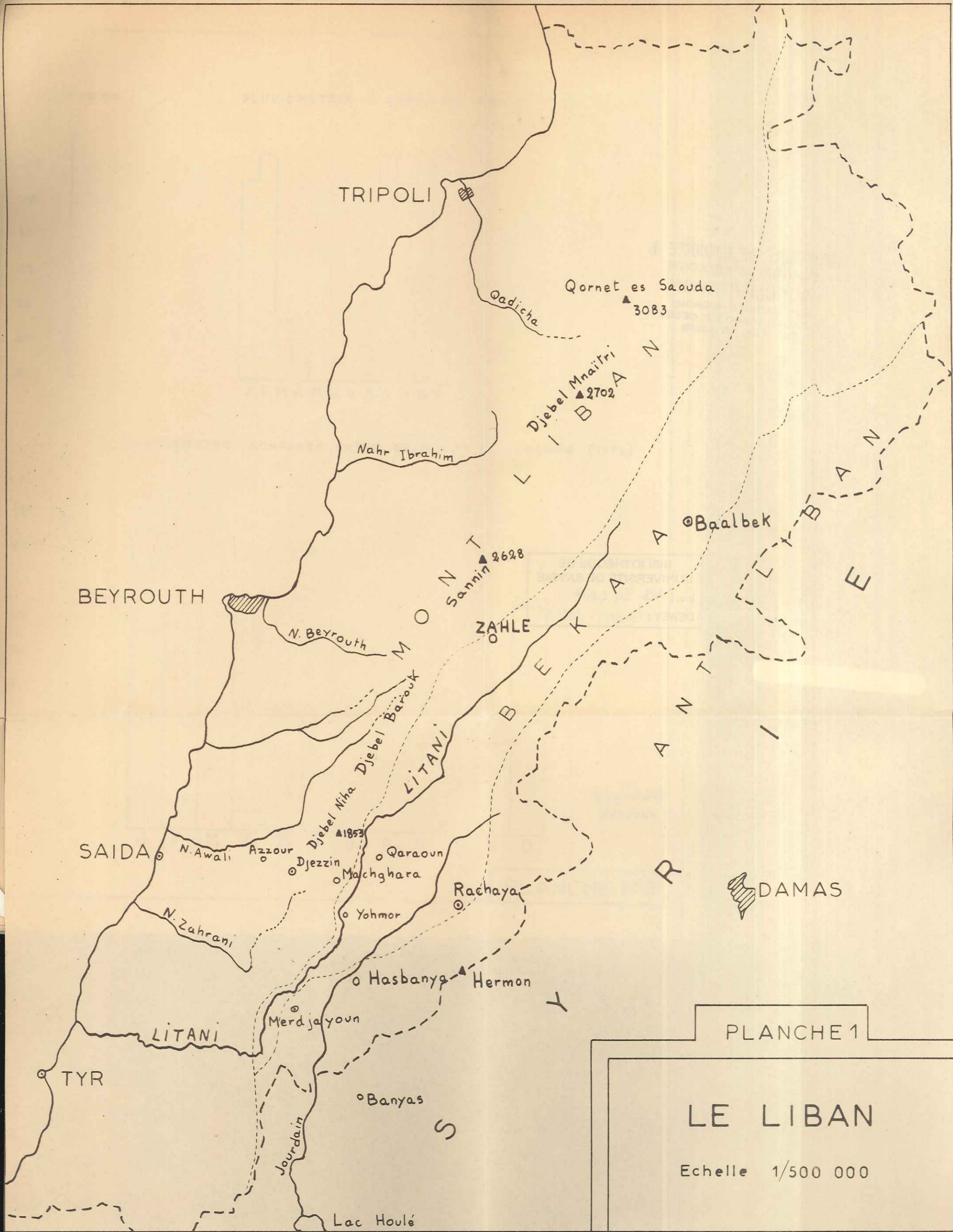


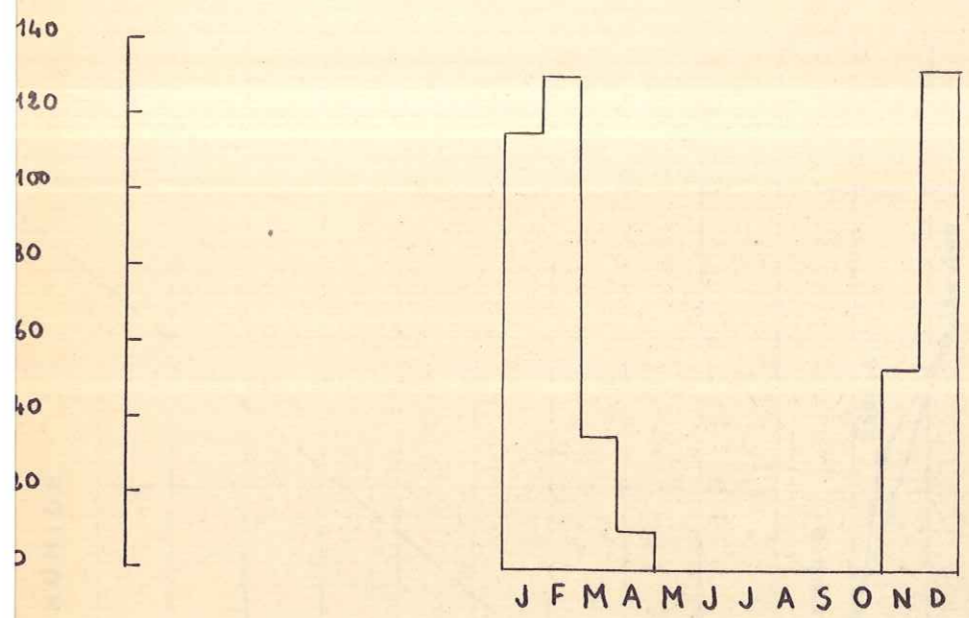
PLANCHE 1

LE LIBAN

Echelle 1/500 000

Hauteur en mm

PLUVIOMETRIE A KARAOUN BEKAA (1956)



PLUVIOMETRIE. COMPAREE ENTRE BEYROUTH ET KARAOUN (1956)

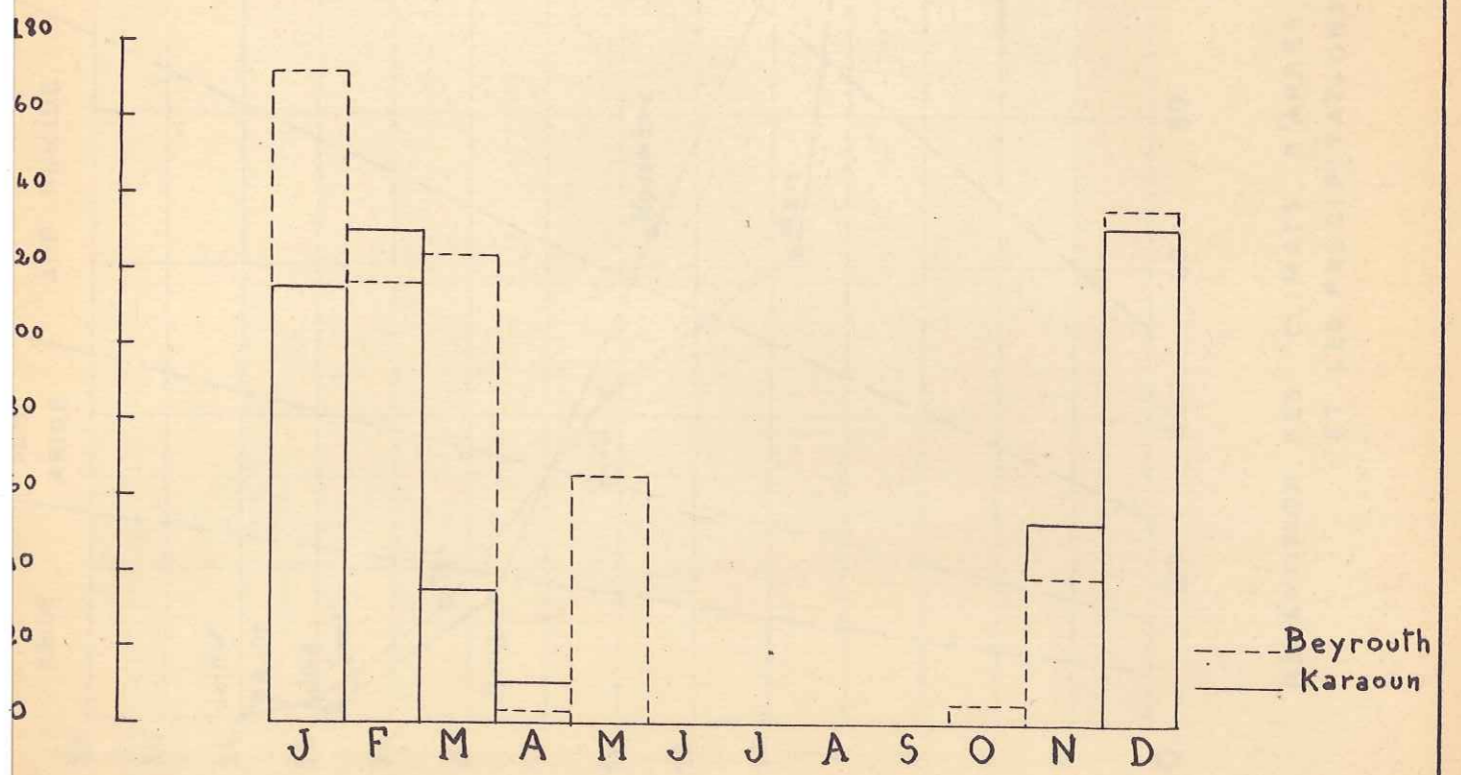
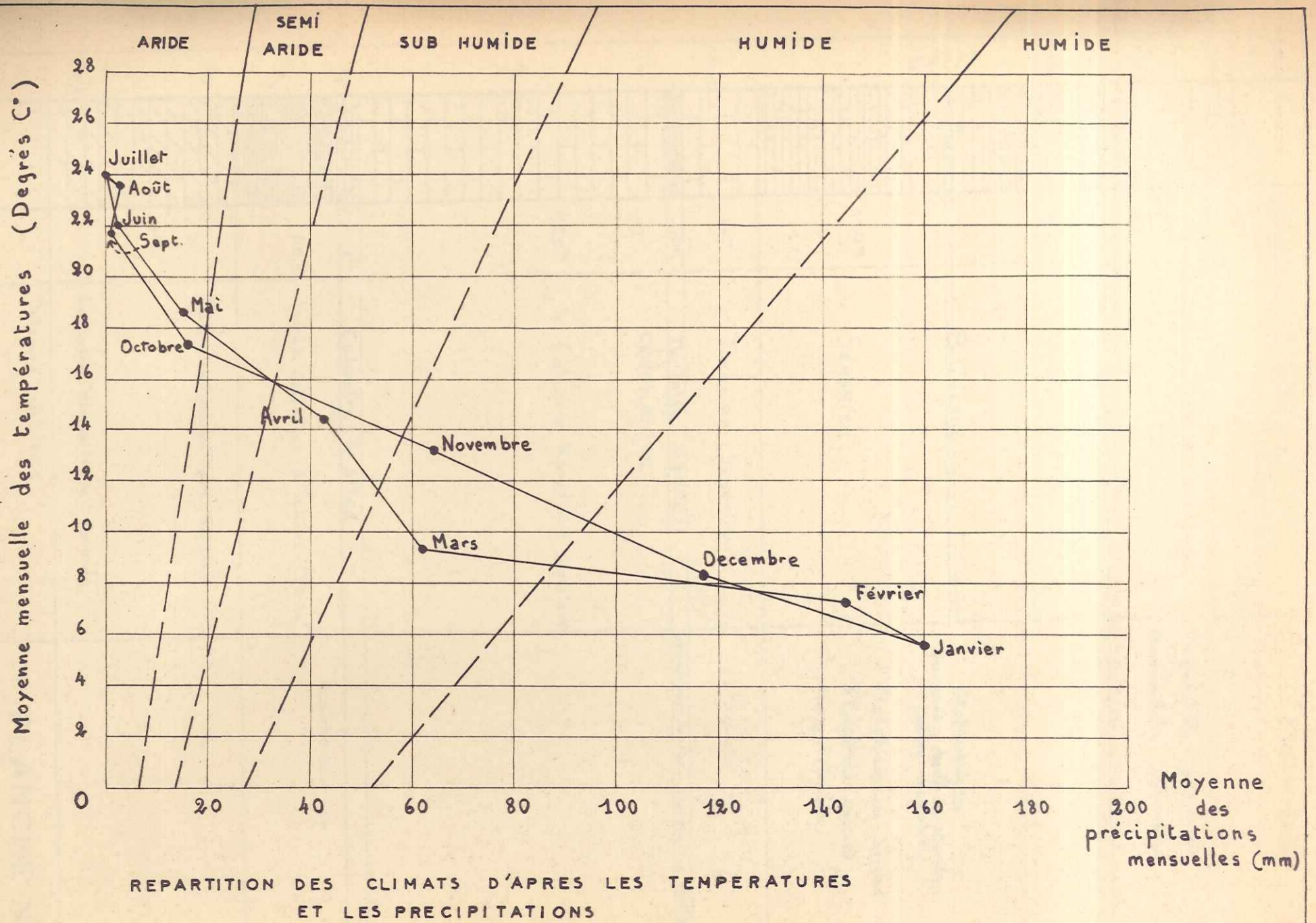










PLANCHE N°2



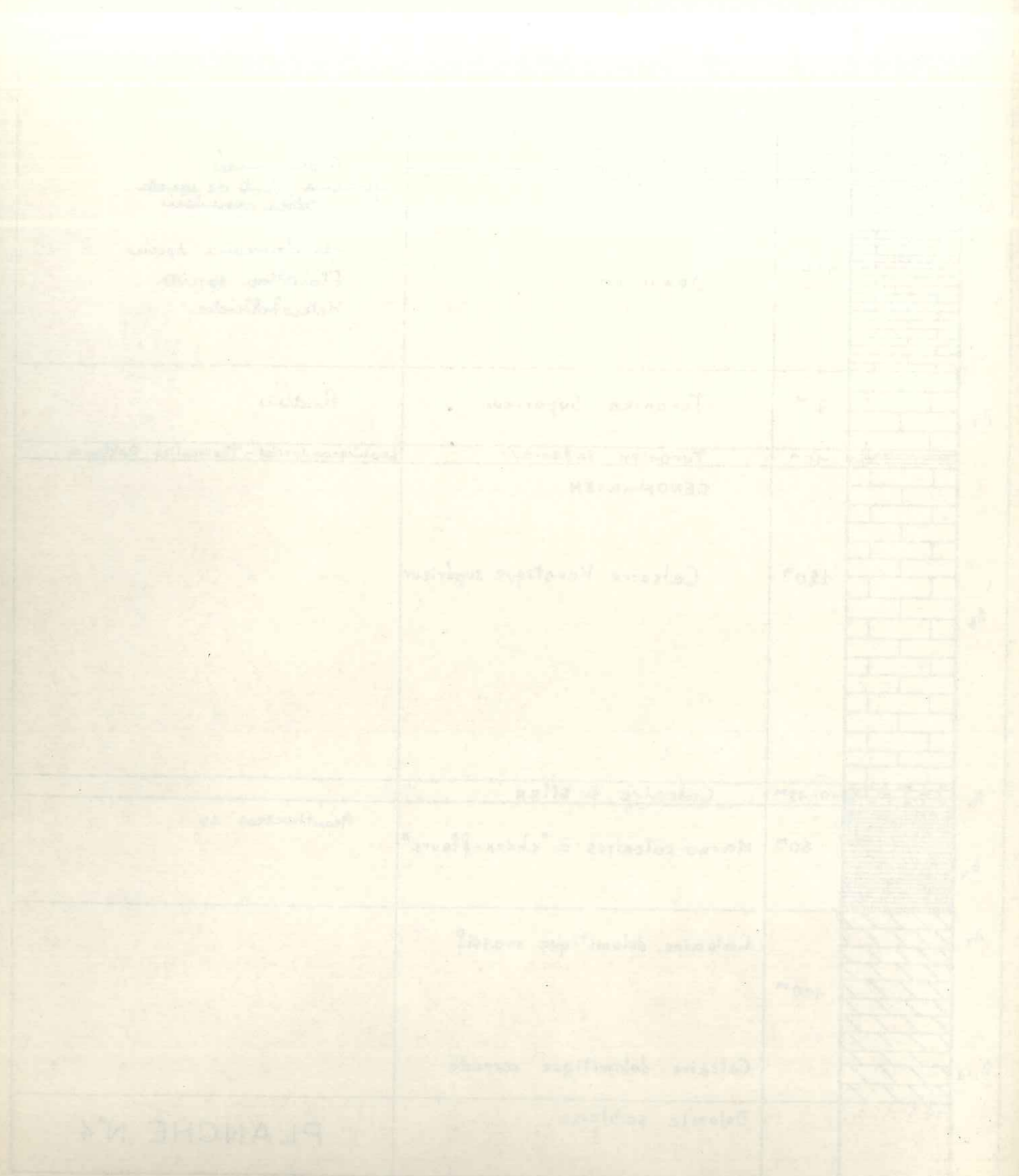
Ech.	Coupe	Epaisseur	ETAGE	FOSSILES
		environ	Eocène moyen et supérieur	Nummulites gizehensis Nummulites curvispira
A ₉		800 ^m		
		90 ^m	Eocène inférieur	
M ₁ M ₂ M ₃ M ₄ A ₈			Paléocène	Globotulidés Glaucome, dents de squalo Ostrea vesicularis
		110 ^m	Sénonien	Globotruncana species Flabellina species Heterohelicidae
A ₇		45 ^m	Turonien Supérieur	Rudistes
		10 ^m	Turonien inférieur	Leoniaceras species - Thomasites Rollandi
		120 ^m	CENOMANIEN Calcaire Karstique supérieur	
A ₆				
A ₅		10-12 ^m	Calcaire à silex	
A ₄		60 ^m	Marno calcaires à "choux-fleurs"	Acanthoceras sp.
A ₃		110 ^m	Calcaire dolomitique massif	
A ₂₋₁			Calcaire dolomitique corrodé	
			Dolomie sableuse	

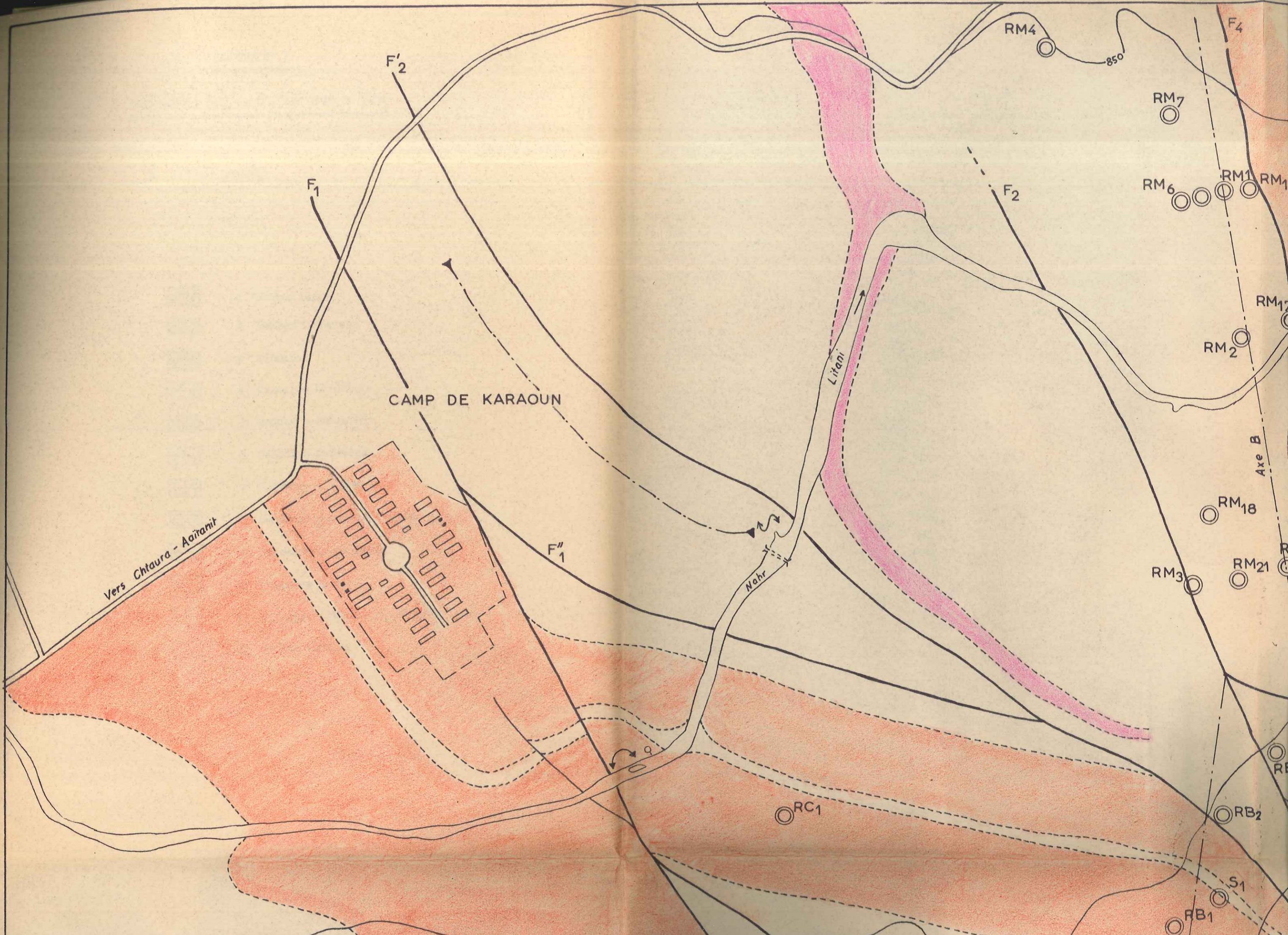
SCHEMA GEOLOGIQUE ET TECTONIQUE

LEGENDE

-  Faille principale
-  Faille secondaire
-  Faille primitive
-  Axe anticlinal
-  Axe synclinal
-  Sondage O.N.L.
-  Terrain très perméable
-  Terrain imperméable

ECHELLE 1/5000









Nahr Litani

Nahr

Nahr ech Chita

Pont sur Nahr ech Chita

Vers Markabi

RM13

RM17

M21

RM22

RM23

B2

RB3

RB9

RB10

RA4

Route d'accès au barrage

F5

Deredi Béllétre

850

850

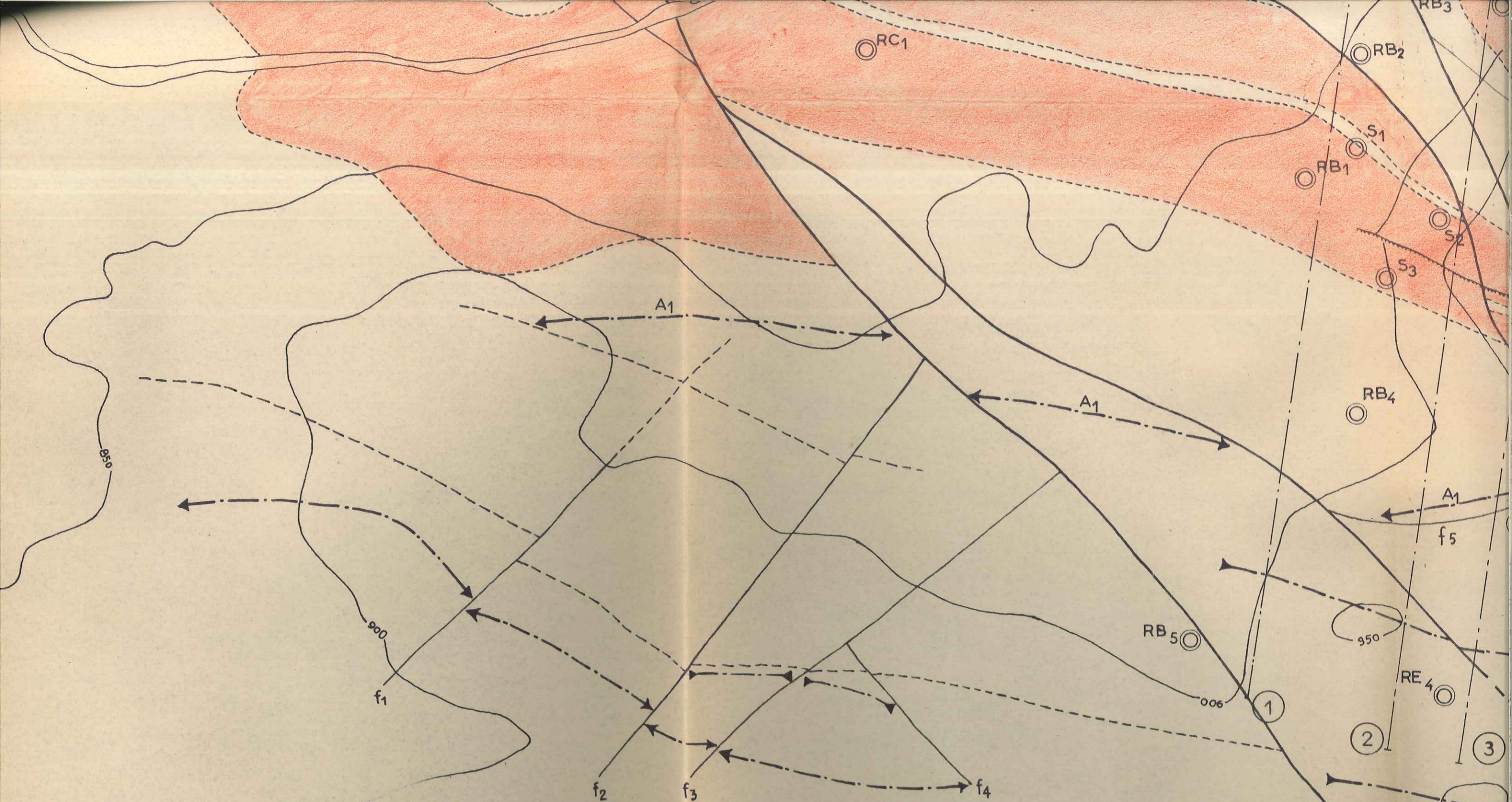
058

006

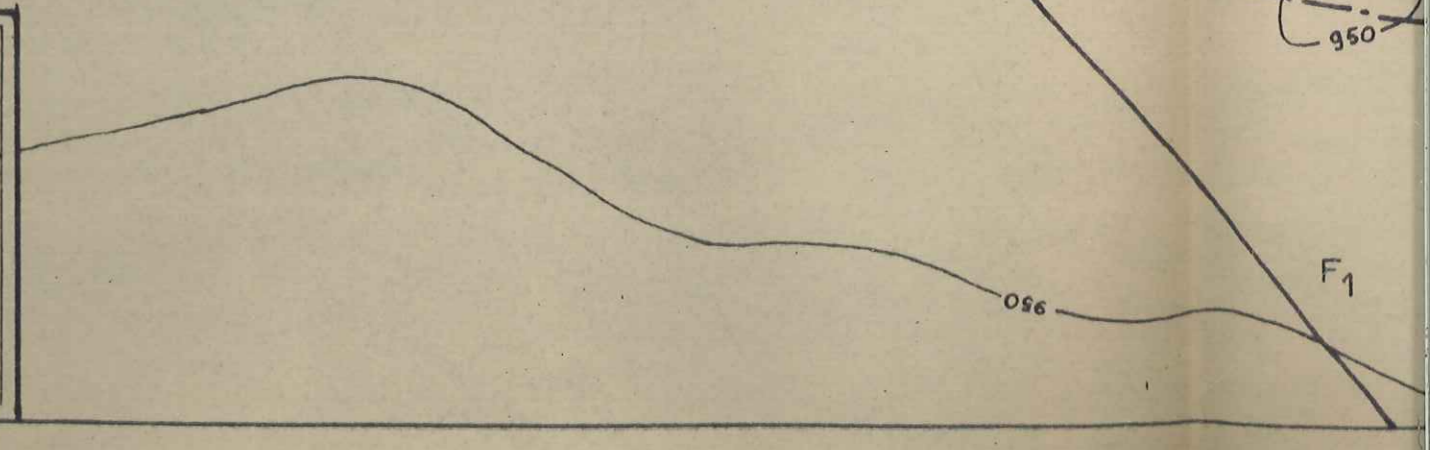
056

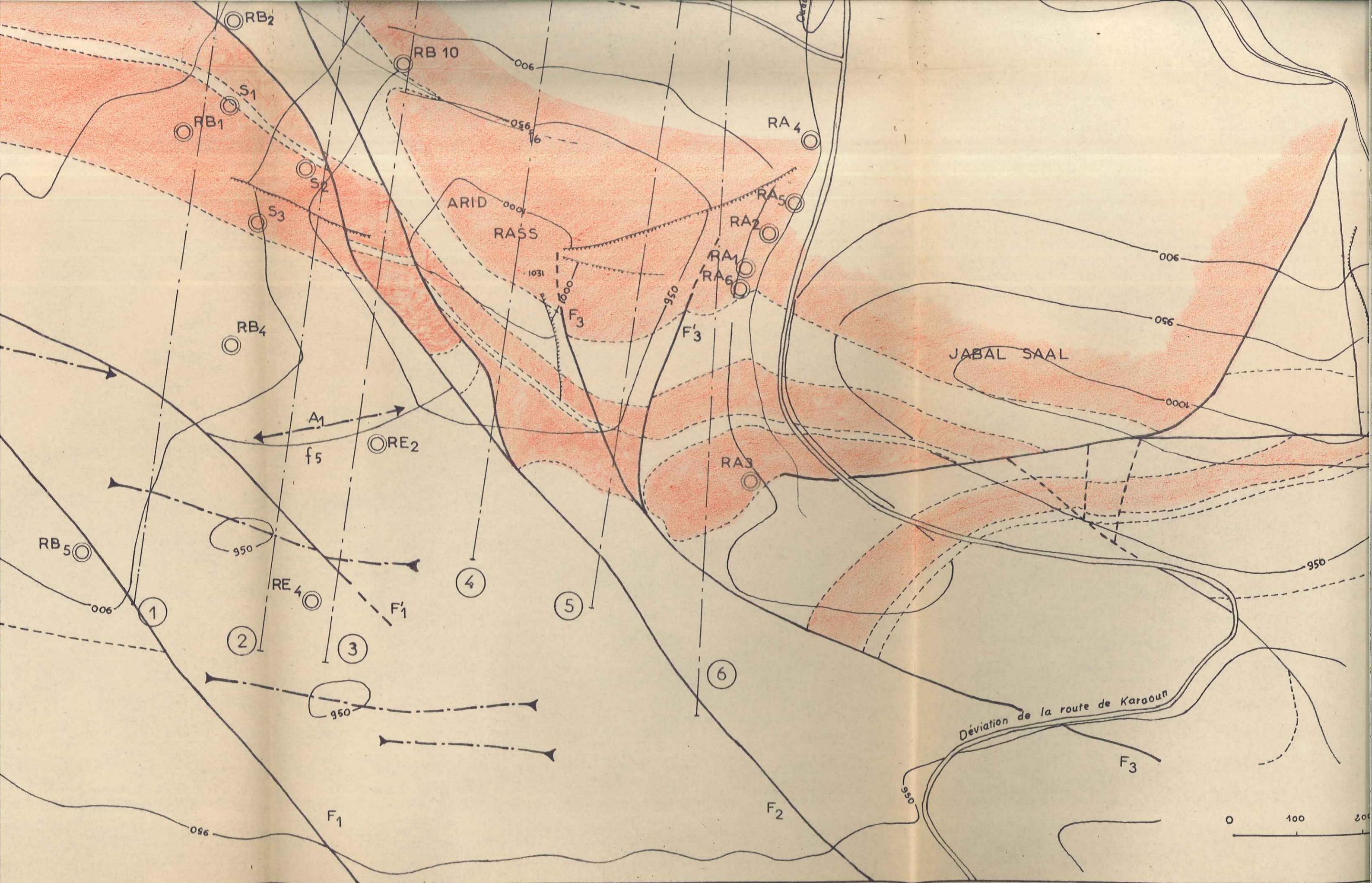
Axe B

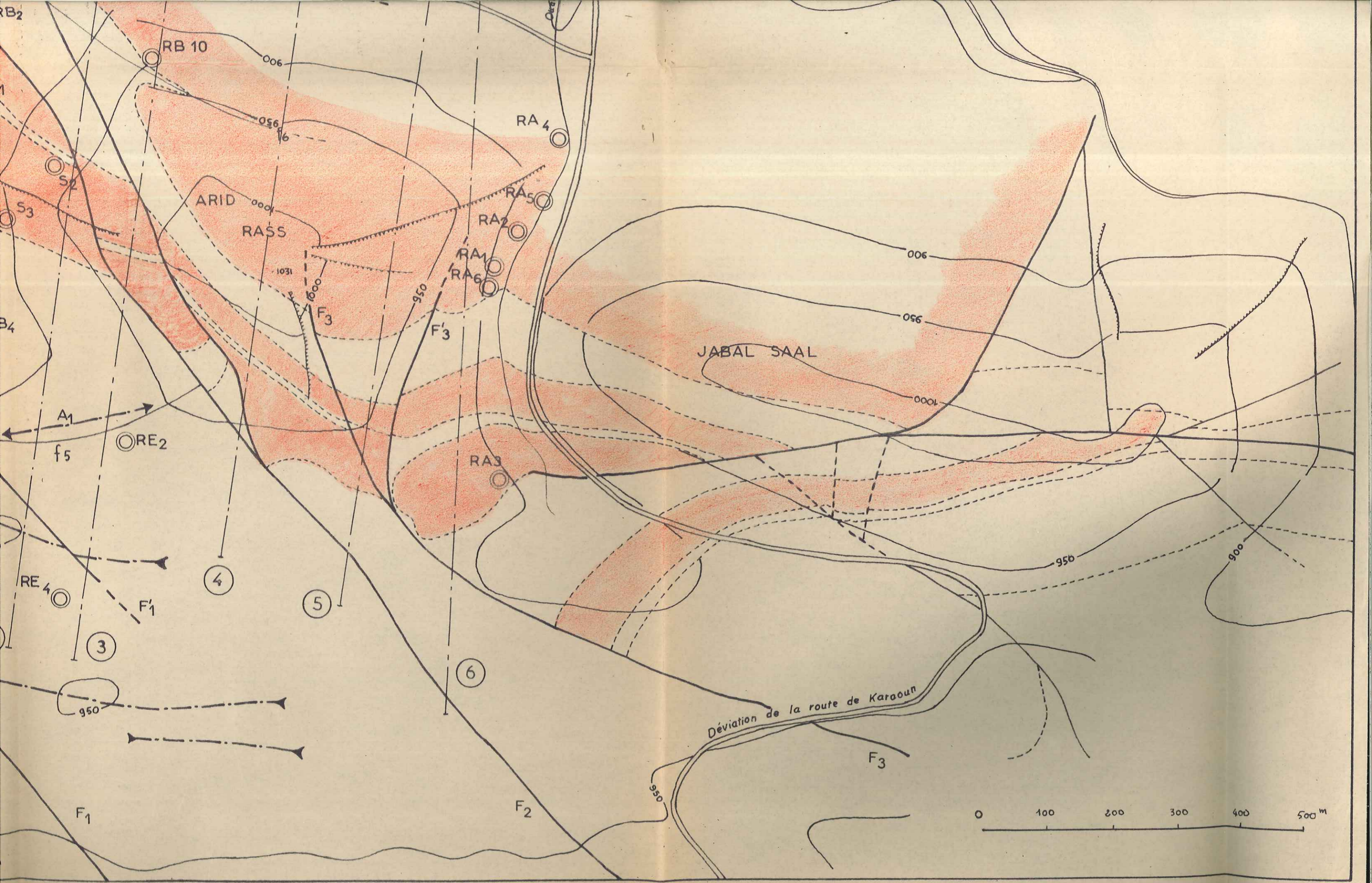
18



SCHEMA GEOLOGIQUE ET
TECTONIQUE



















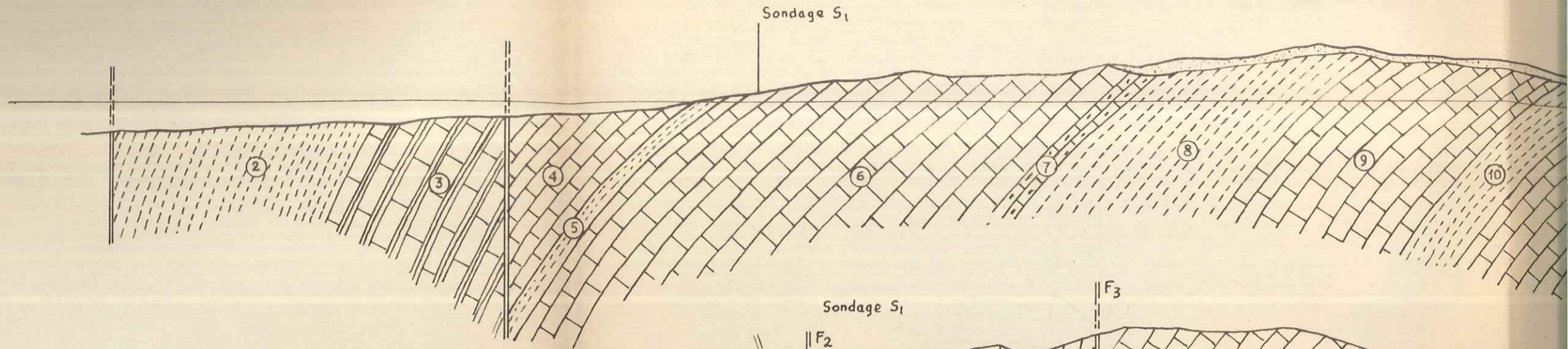
COUPES SÉRIÉES DANS LA COLLINE ARID EL RASS

LEGENDE

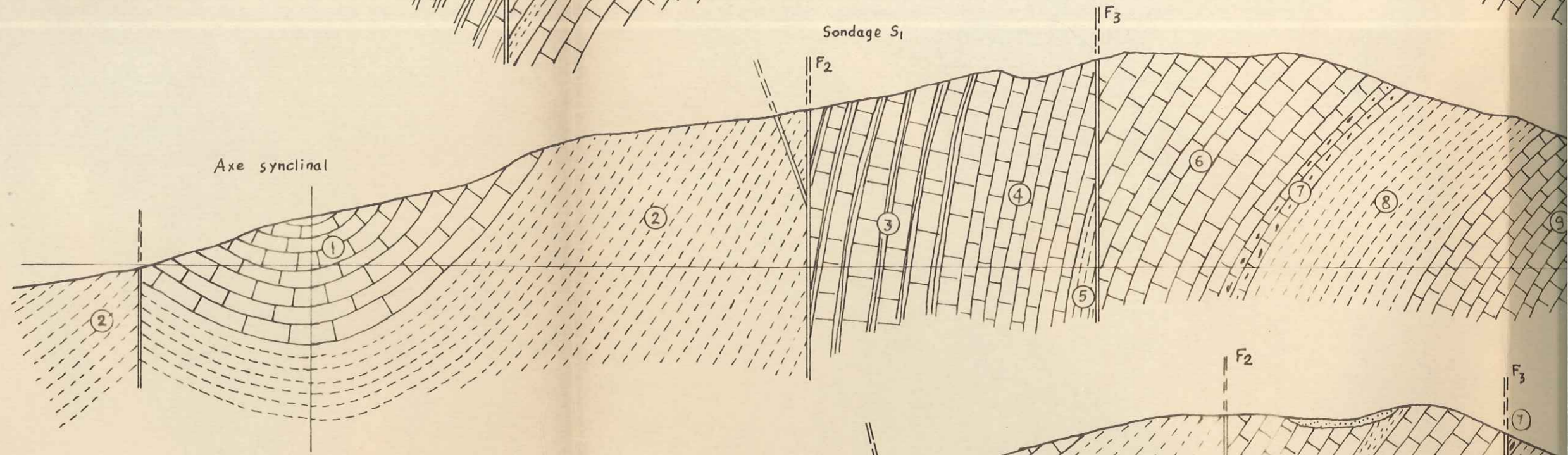
- | | |
|---|-------------------------------------|
|  | I Eocène moyen |
|  | 2 Eocène inférieur |
|  | 3 Sénonien |
|  | 4 Calcaire karstique |
|  | 5 Couche à ammonites |
|  | 6 Calcaire karstique |
|  | 7 Calcaire à silex |
|  | 8 Calcaire marneux à "choux fleurs" |
|  | 9 Calcaire dolomitique |
|  | 10 Calcaire marneux |
|  | 11 Calcaire dolomitique corrodé |
|  | 12 Terres arables |

E

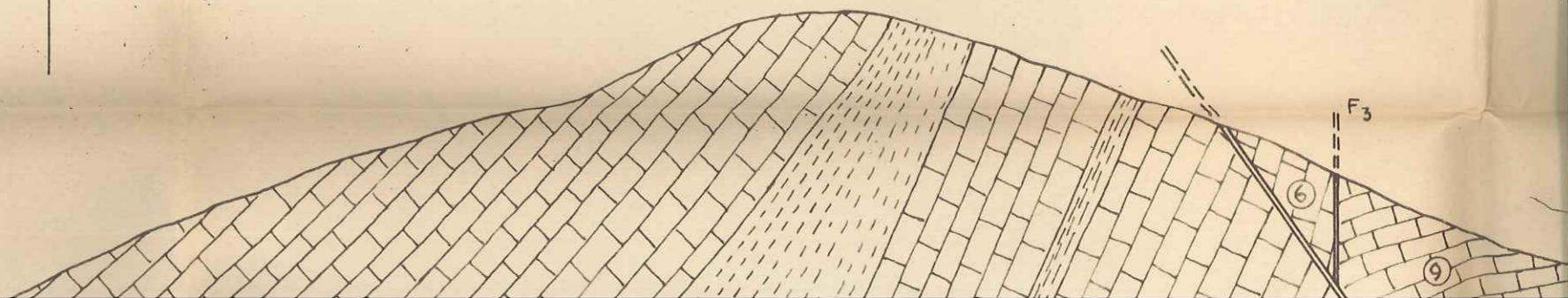
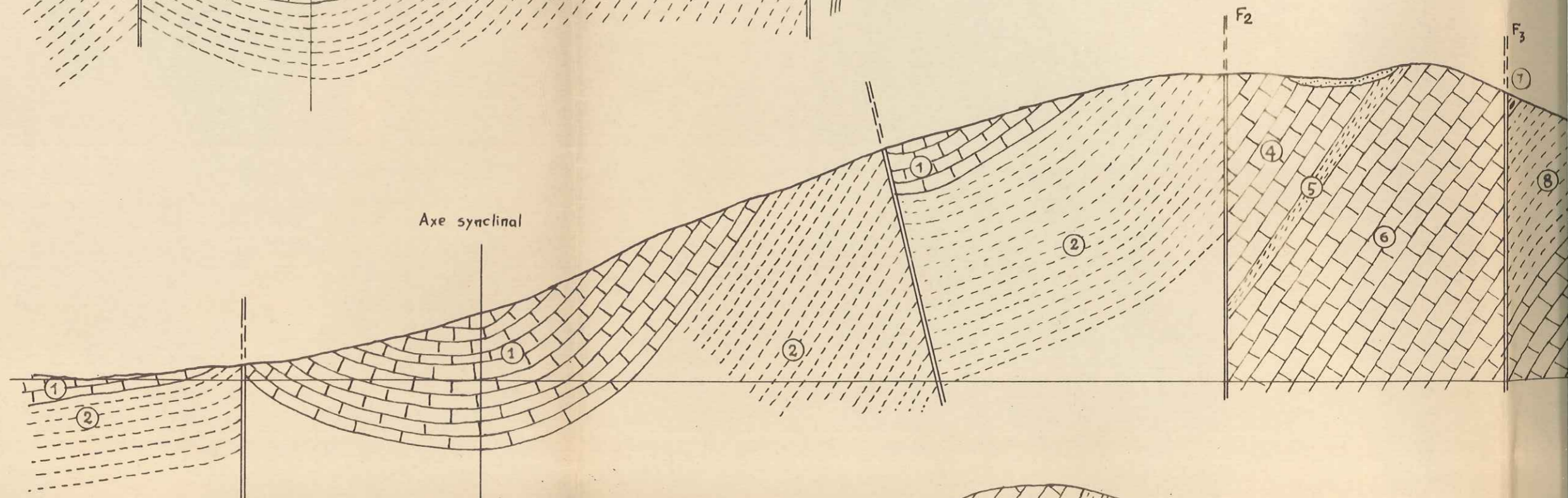
1



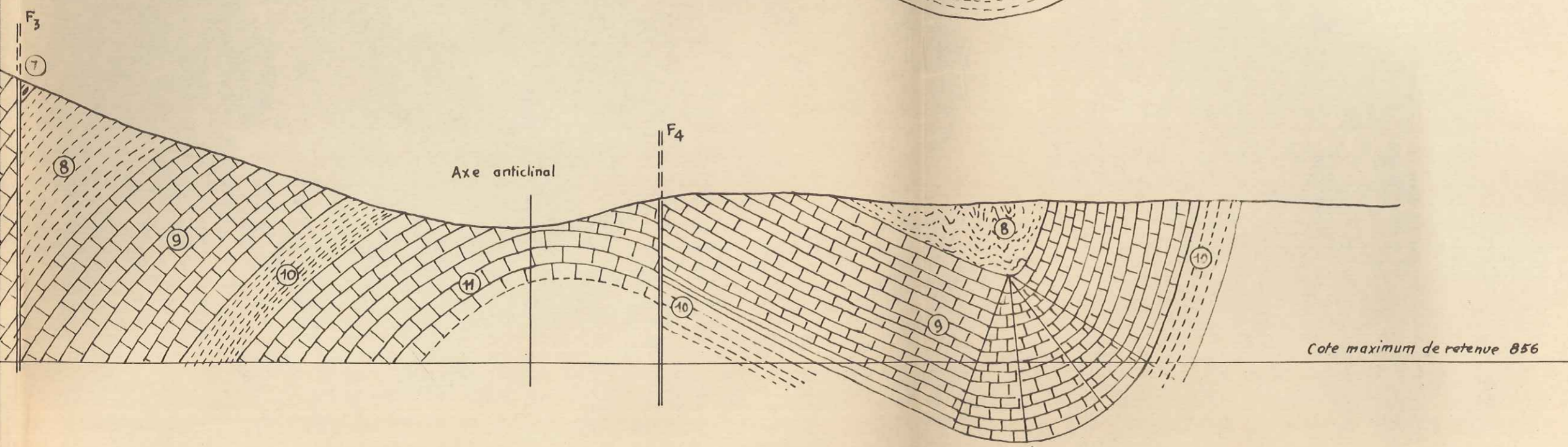
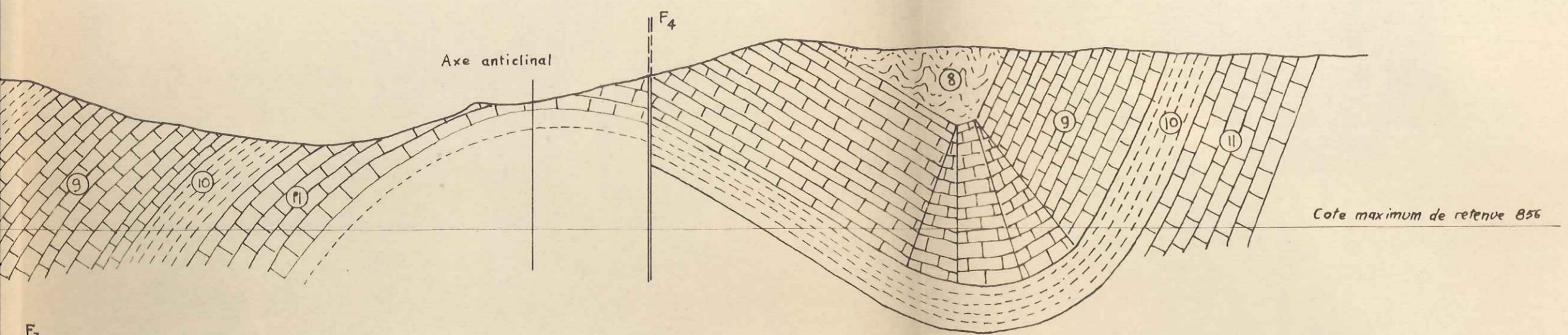
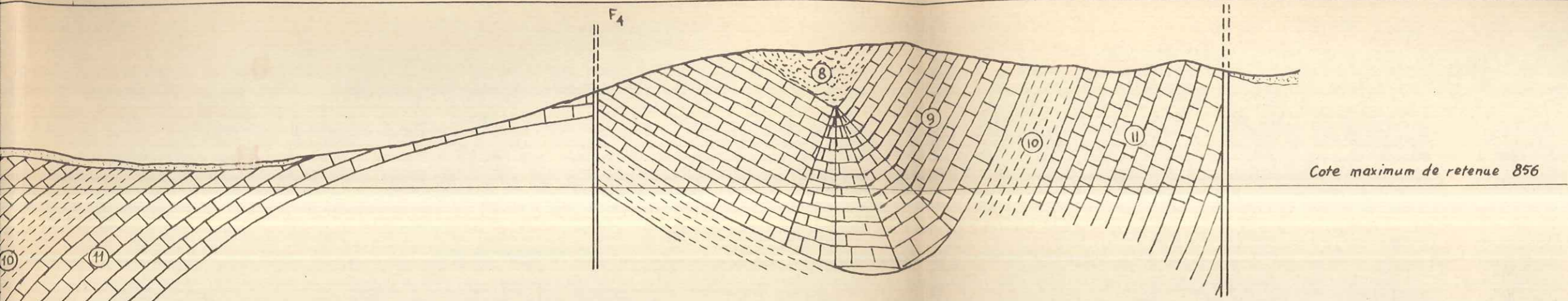
2



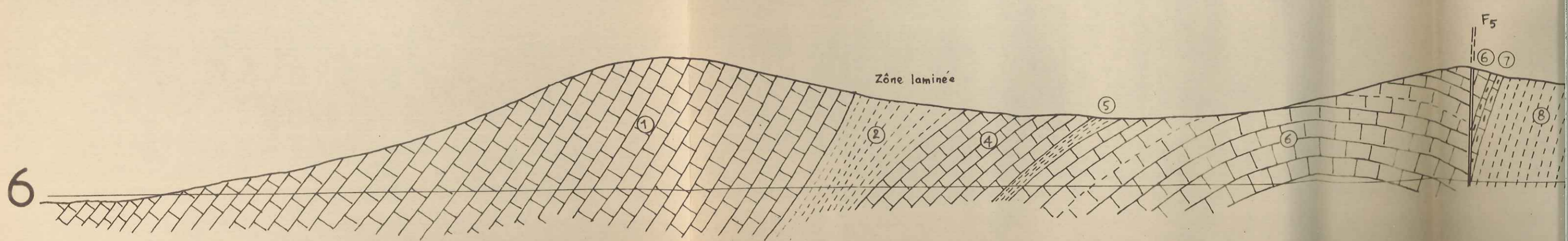
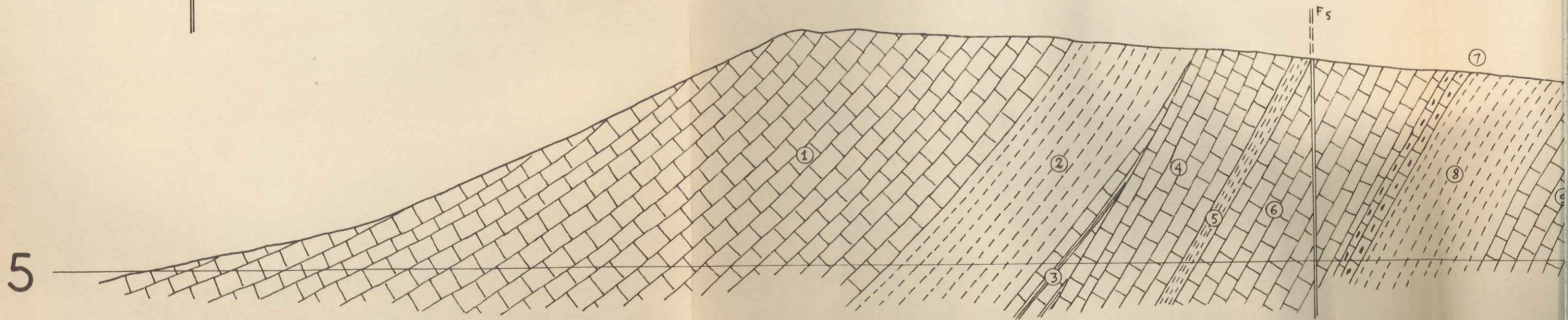
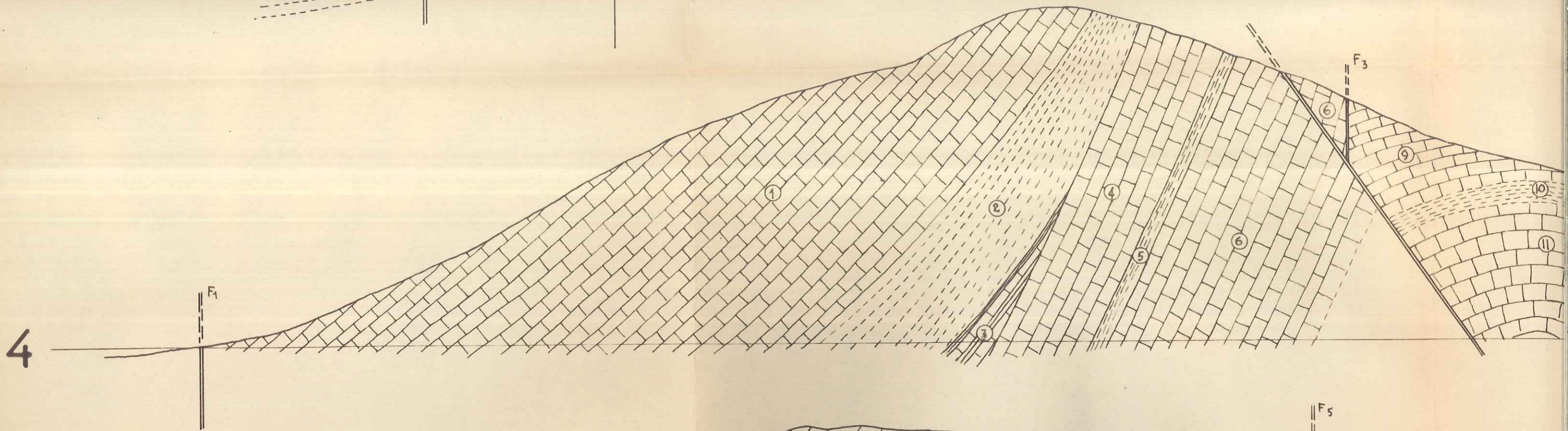
3

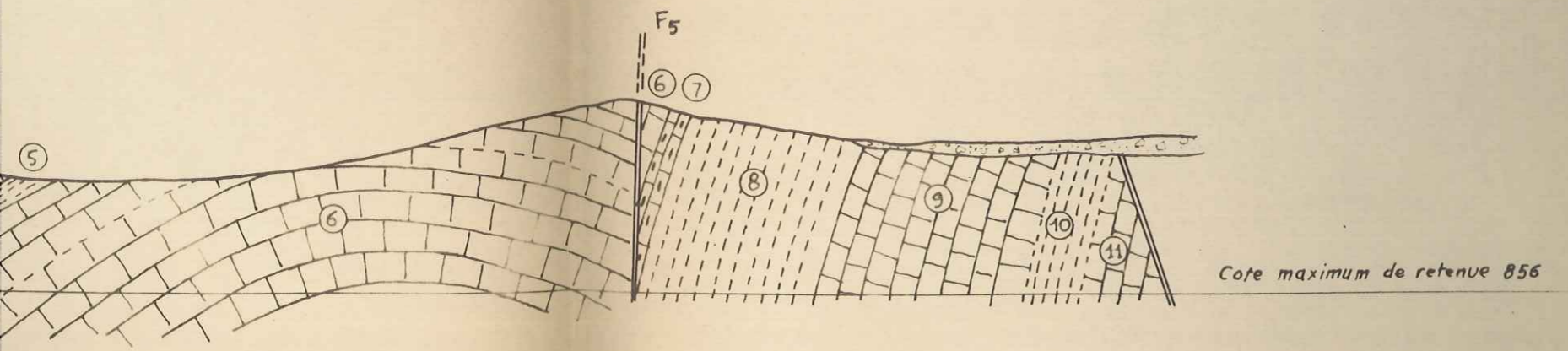
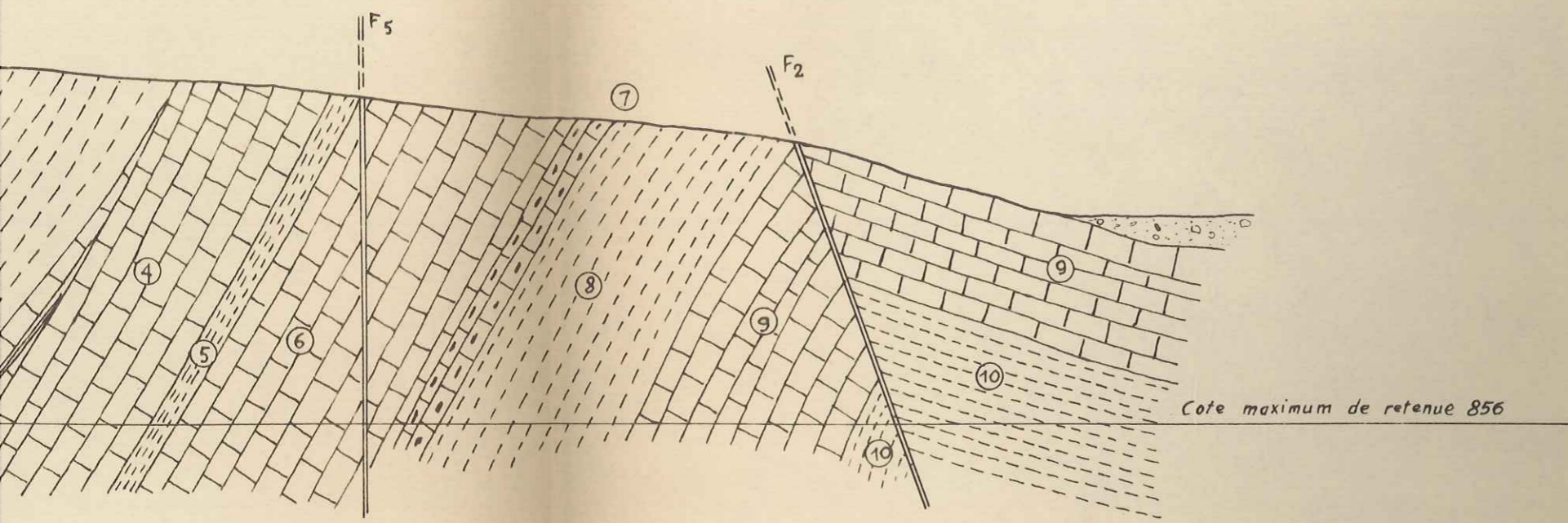
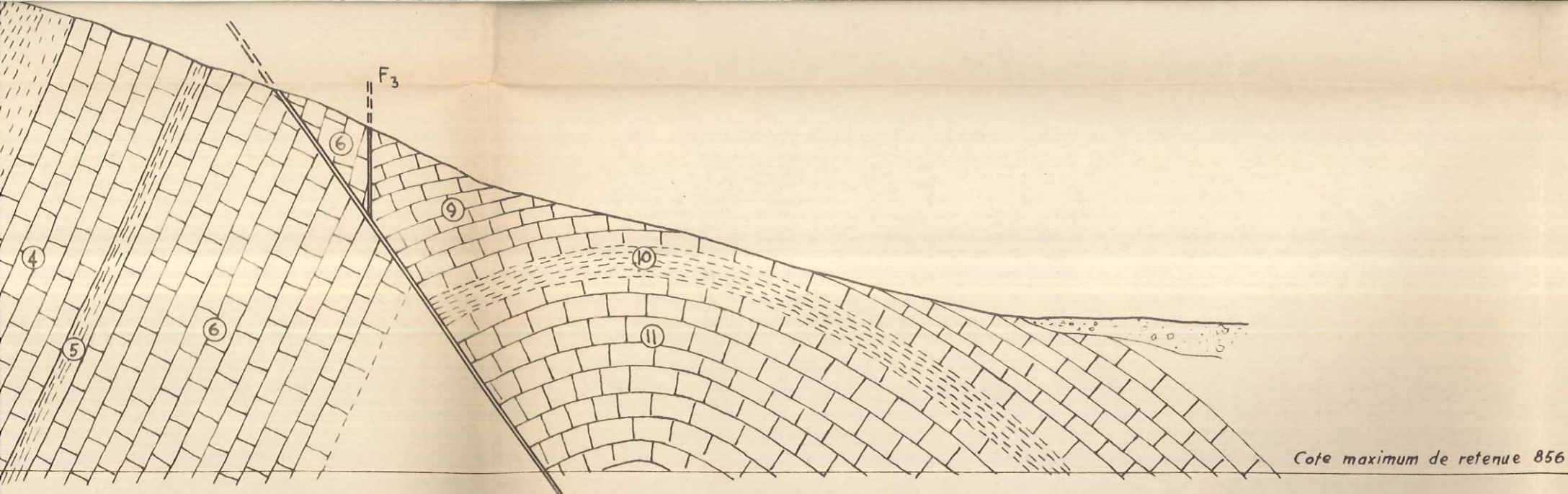


W



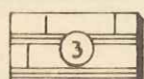


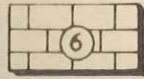


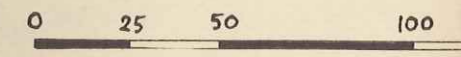
LEGENDE





LEGEN

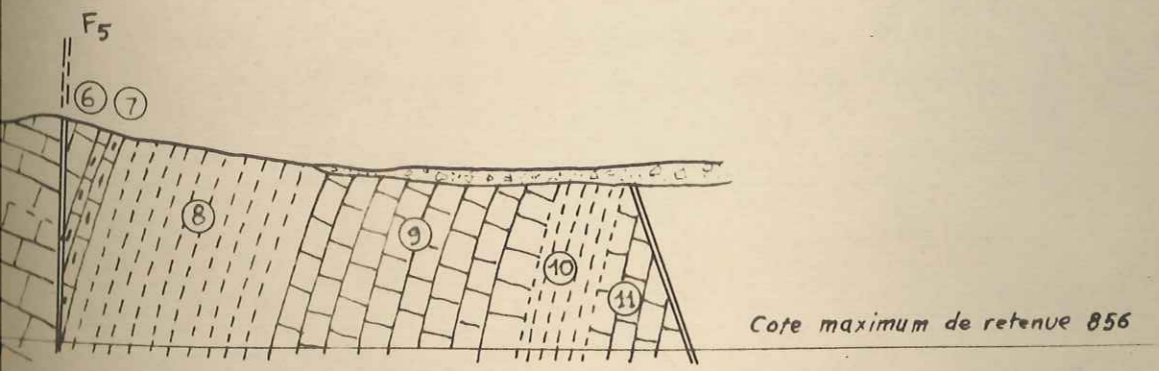
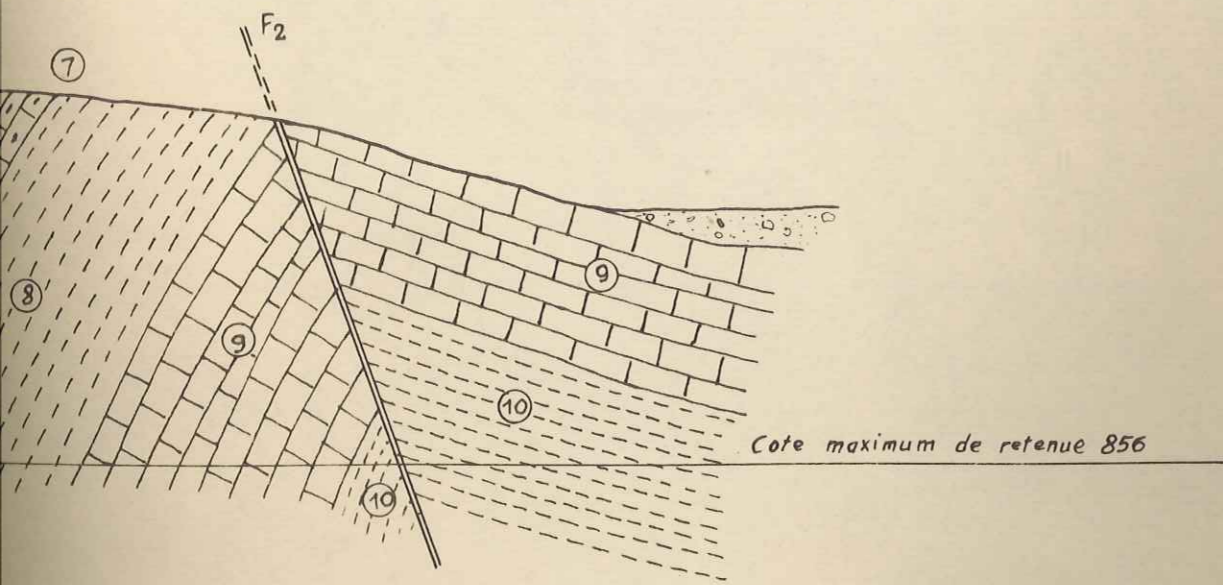
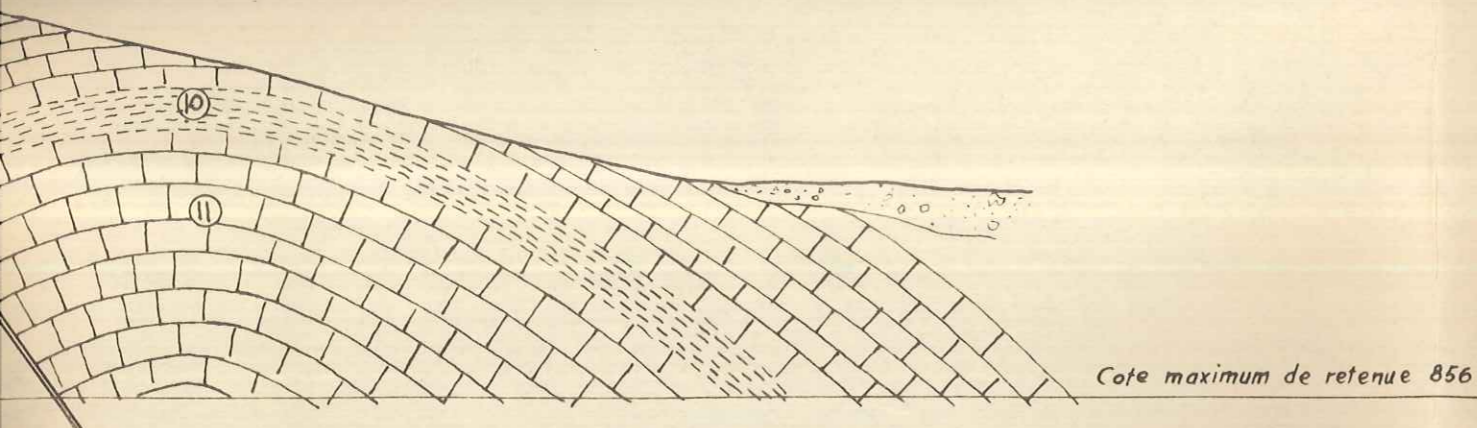
-  Eocène moyen
 -  Eocène inférieur
 -  Sénonien
 -  Calcaire Karstique
 -  Couche à ammonites
 -  Calcaire Karstique
- } Turonien



BARRAGE DE K

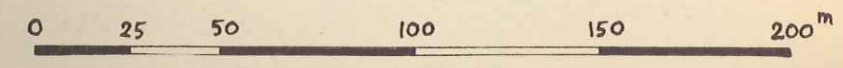
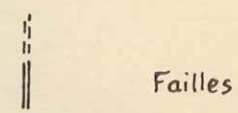
PLANCHE DE COUPES SERIEES DE

PLANCHE



LEGENDE

- | | | | | |
|--|--------------------|------------|-----------------------------------|------------------------------|
| | Eocène moyen | | Calcaire à silex | |
| | Eocène inférieur | | Calcaire marneux à "choux-fleurs" | |
| | Sénonien | | Calcaire dolomitique | |
| | Calcaire Karstique | } Turonien | | Calcaire marneux |
| | Couche à ammonites | | | Calcaire dolomitique corrodé |
| | Calcaire Karstique | | Terres arables | |



BARRAGE DE KARAOUN

PLANCHE DE COUPES SERIEES DE LA COLLINE ARID EL RAS







PLANCHE N°7

PLANCHE N°8

PLANCHE DE COUPES SÉRIÉES DANS LA COLLINE DOMINANT LE LITANI ENTRE LE
NOUVEAU ET L'ANCIEN PONT DE KARAOUW

LEGENDE

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GÉOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE-GIGNOUX
E 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL: (76) 87.46.43

- | | |
|---|---|
|  | 1 Calcaire récifal karstique |
|  | 2 Calcaire à silex |
|  | 3 Marno-calcaires à "choux fleurs" |
|  | 4 Calcaire dolomitique
avec passées marneuses.(4') |
|  | 5 Calcaire carié |
|  | 6 Dolomie friable |

ECHELLE 1 / 5000

BIBLIOTHÈQUE DE
L'UNIVERSITÉ DE SAVOIE
Inv. : NS 34 467
DEWEY : TB 1091.1964/1

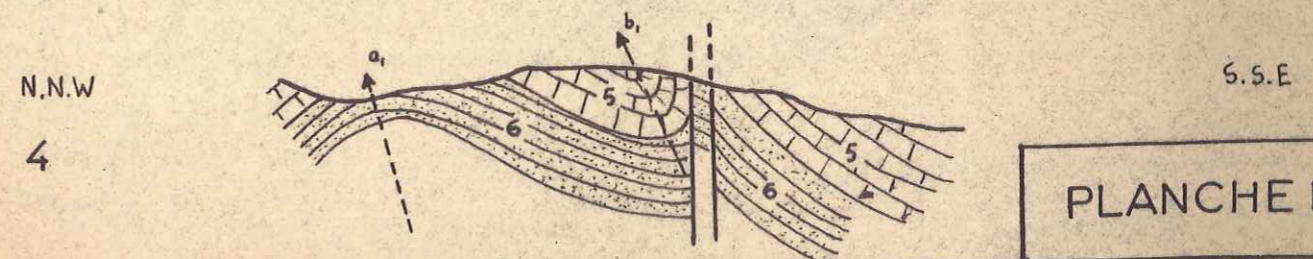
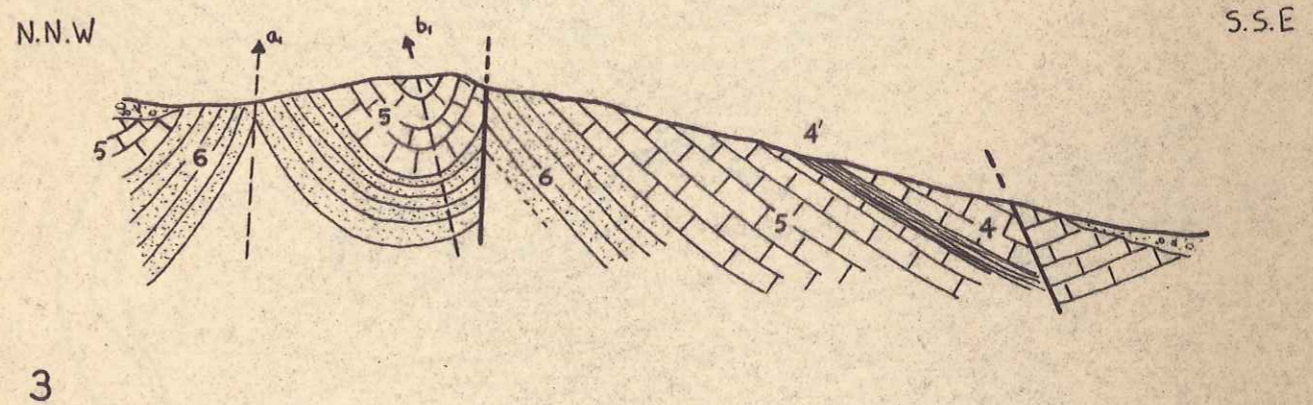
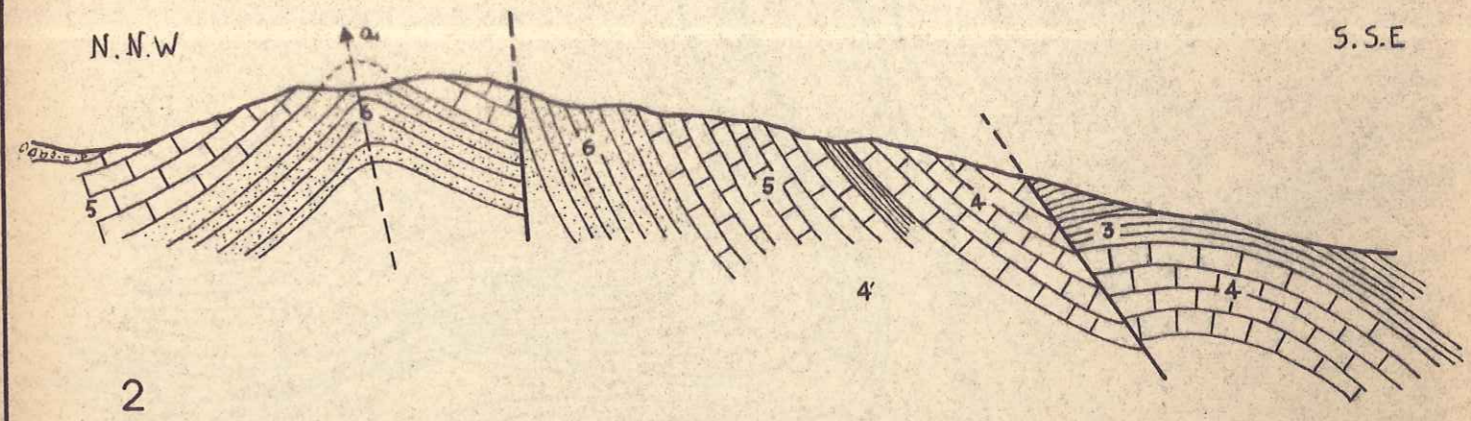
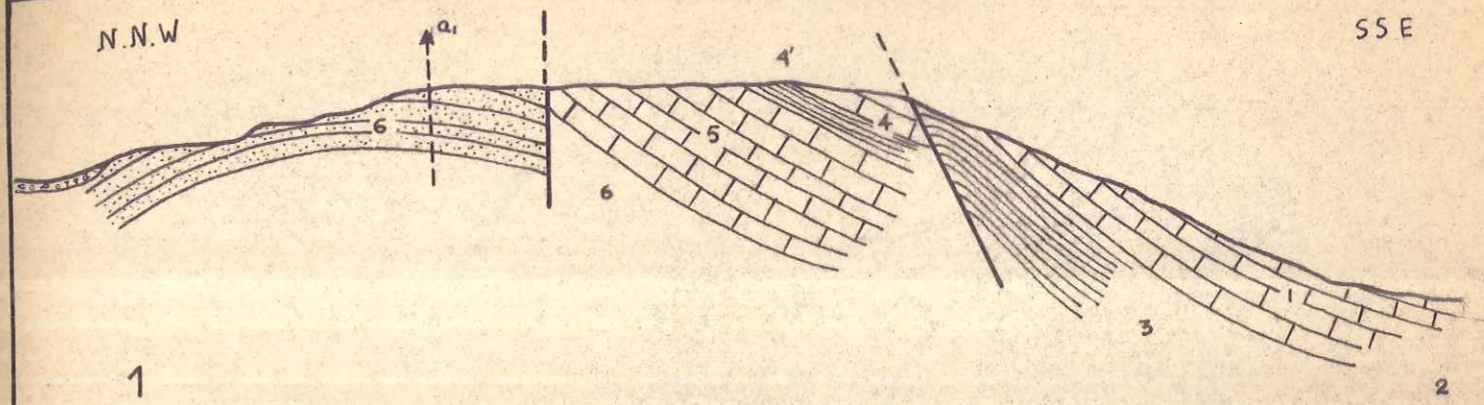
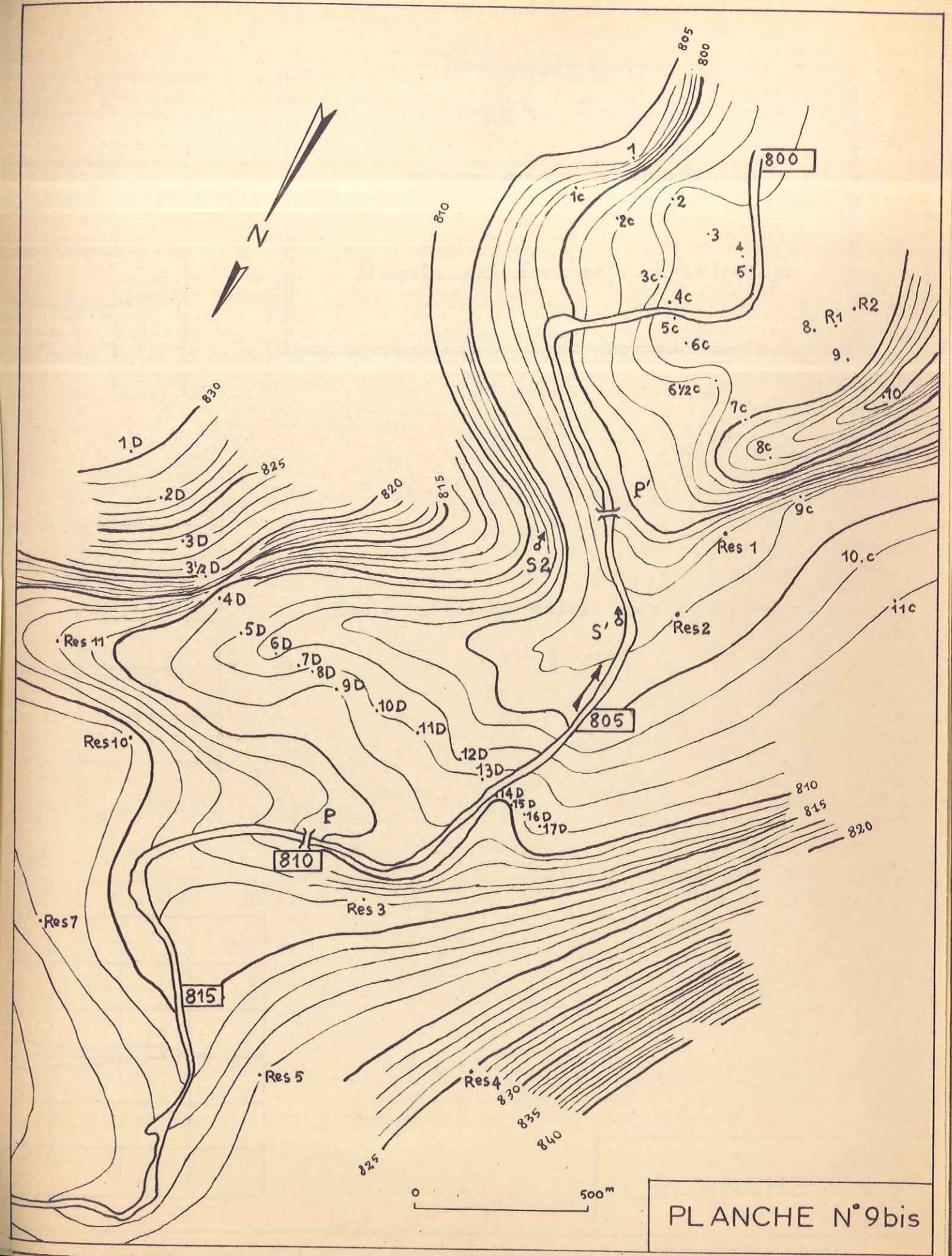
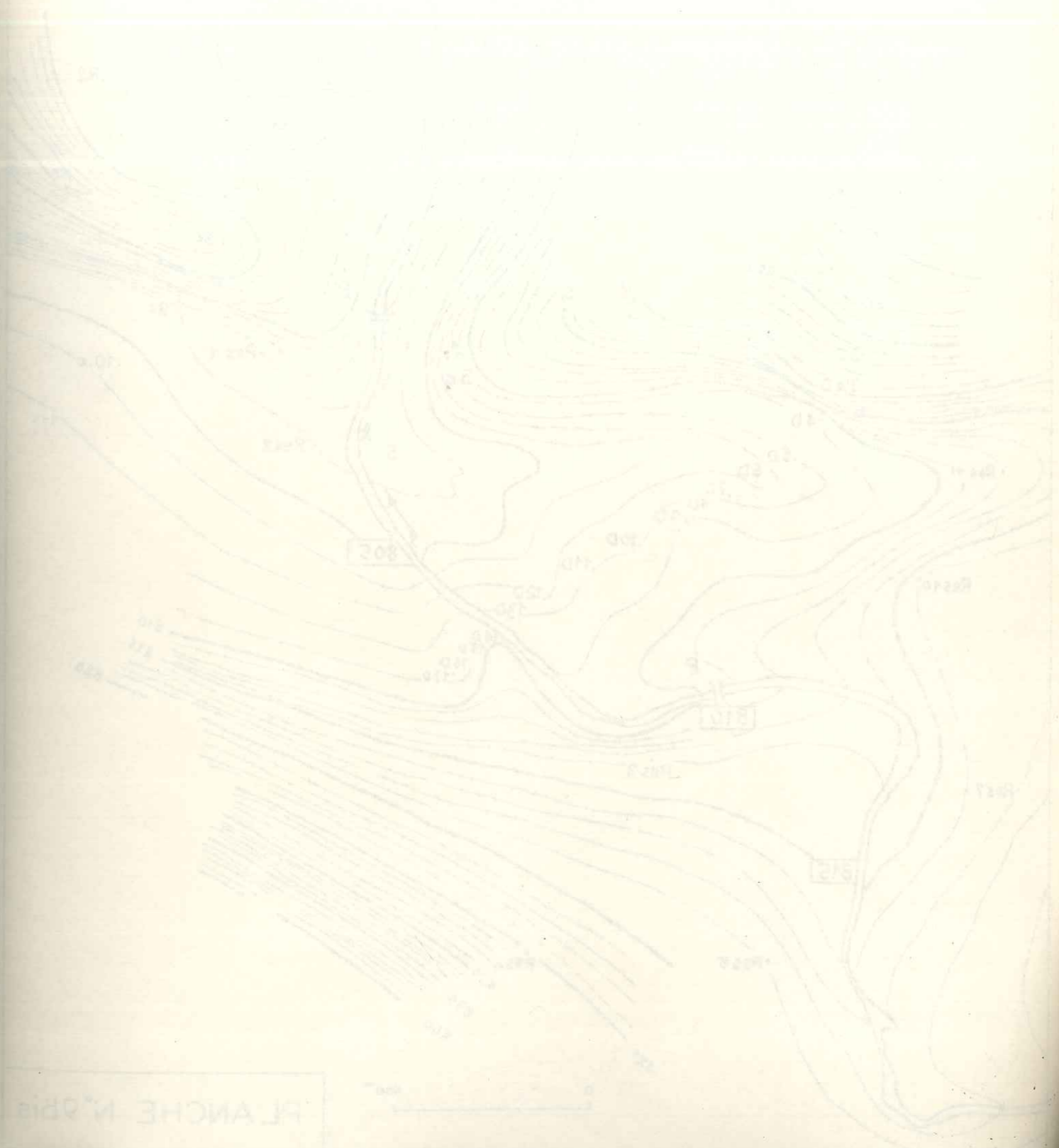


PLANCHE N°8

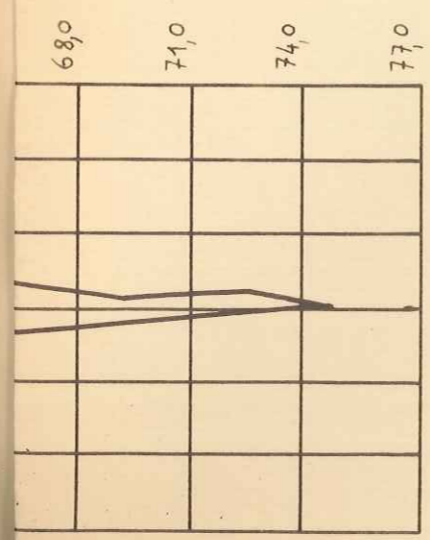
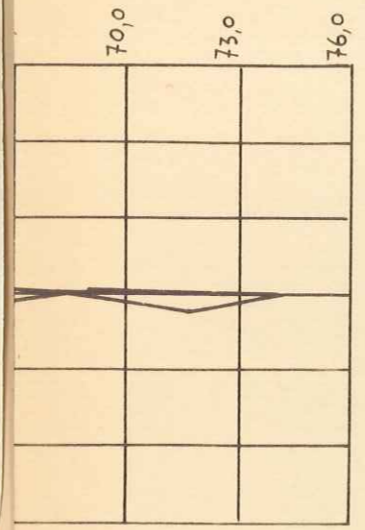
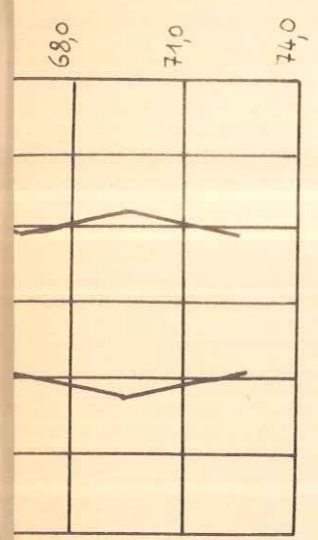




SONDAGES RB1 RB2 RB3

DIAGRAMMES D'ABSORPTION

D'après des documents Elektrosond

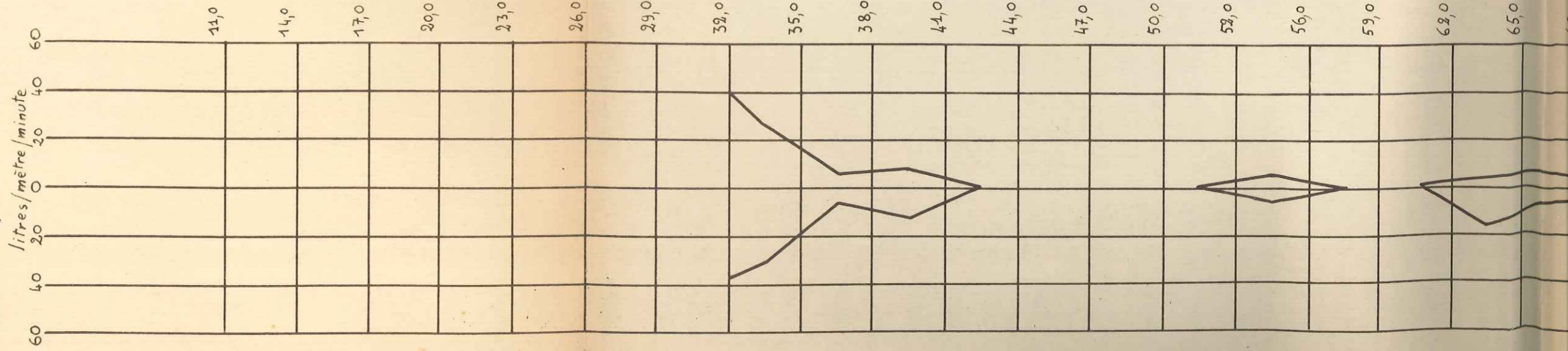


Seule la courbe d'essai sous 10 Kg/cm²
est figurée

RB 3

cote = 851,80 m

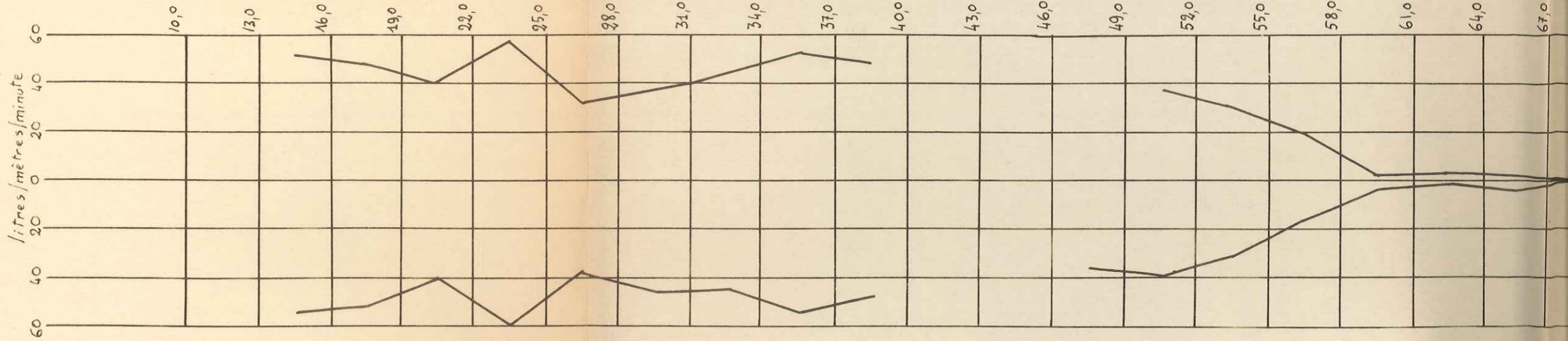
Essais d'eau
Absorptions
Pressions



RB 1

cote = 856,38 m

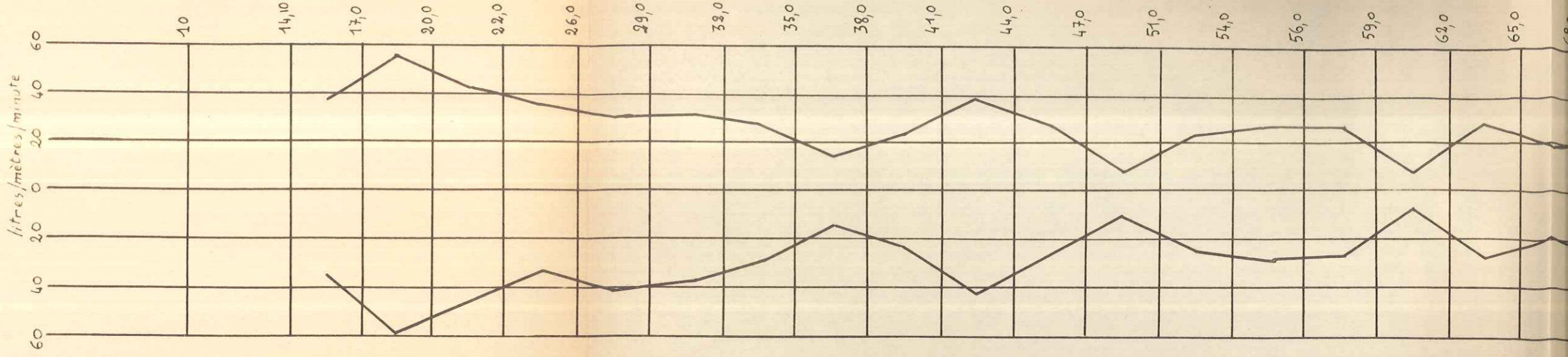
Essais d'eau
Absorptions
Pressions

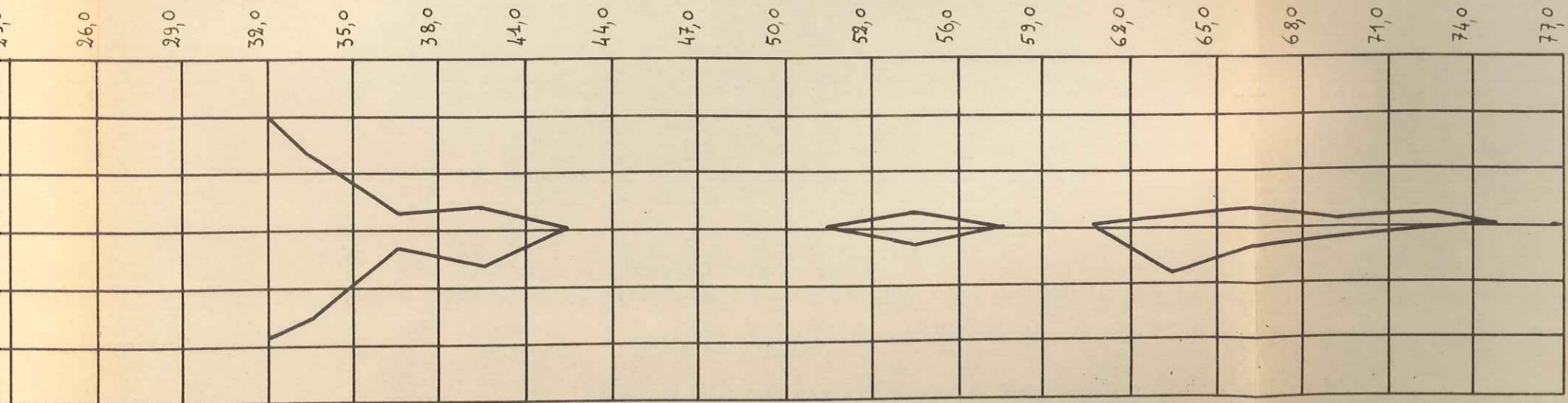
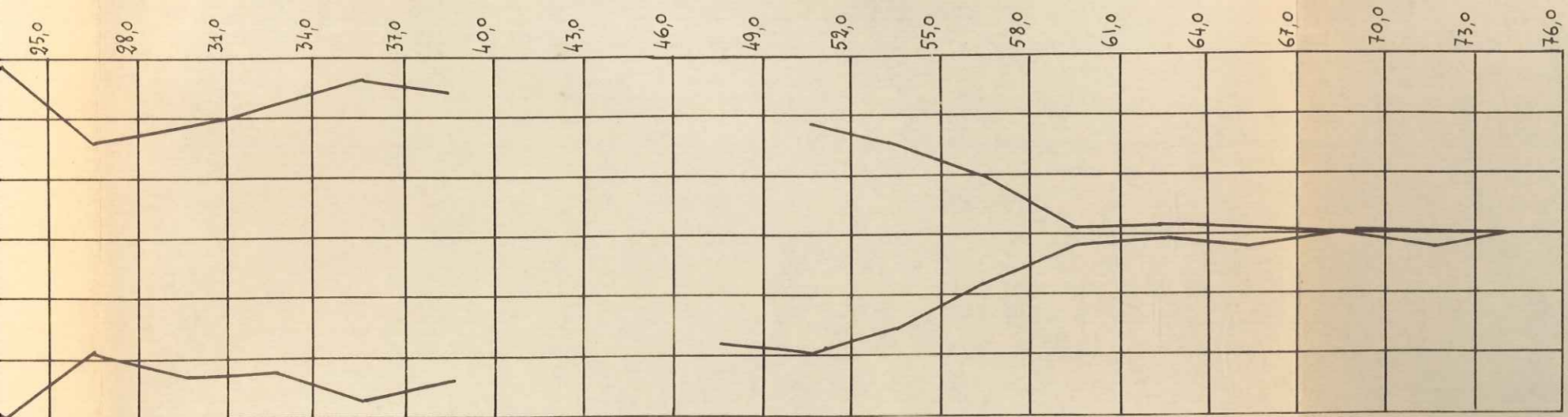
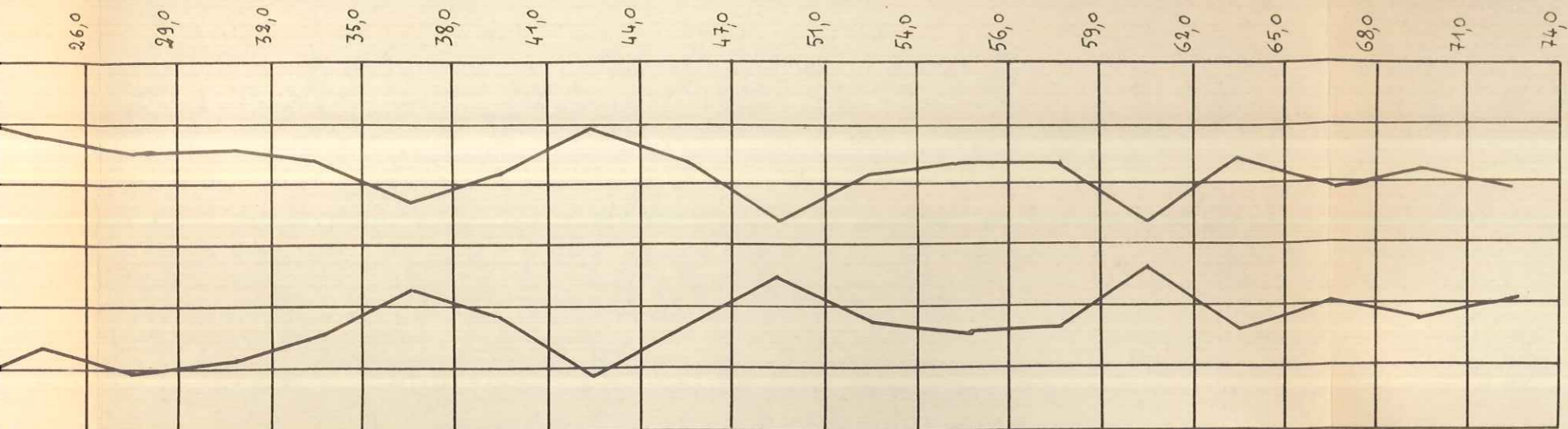


RB 2

cote = 852,65 m

Essais d'eau
Absorptions
Pressions



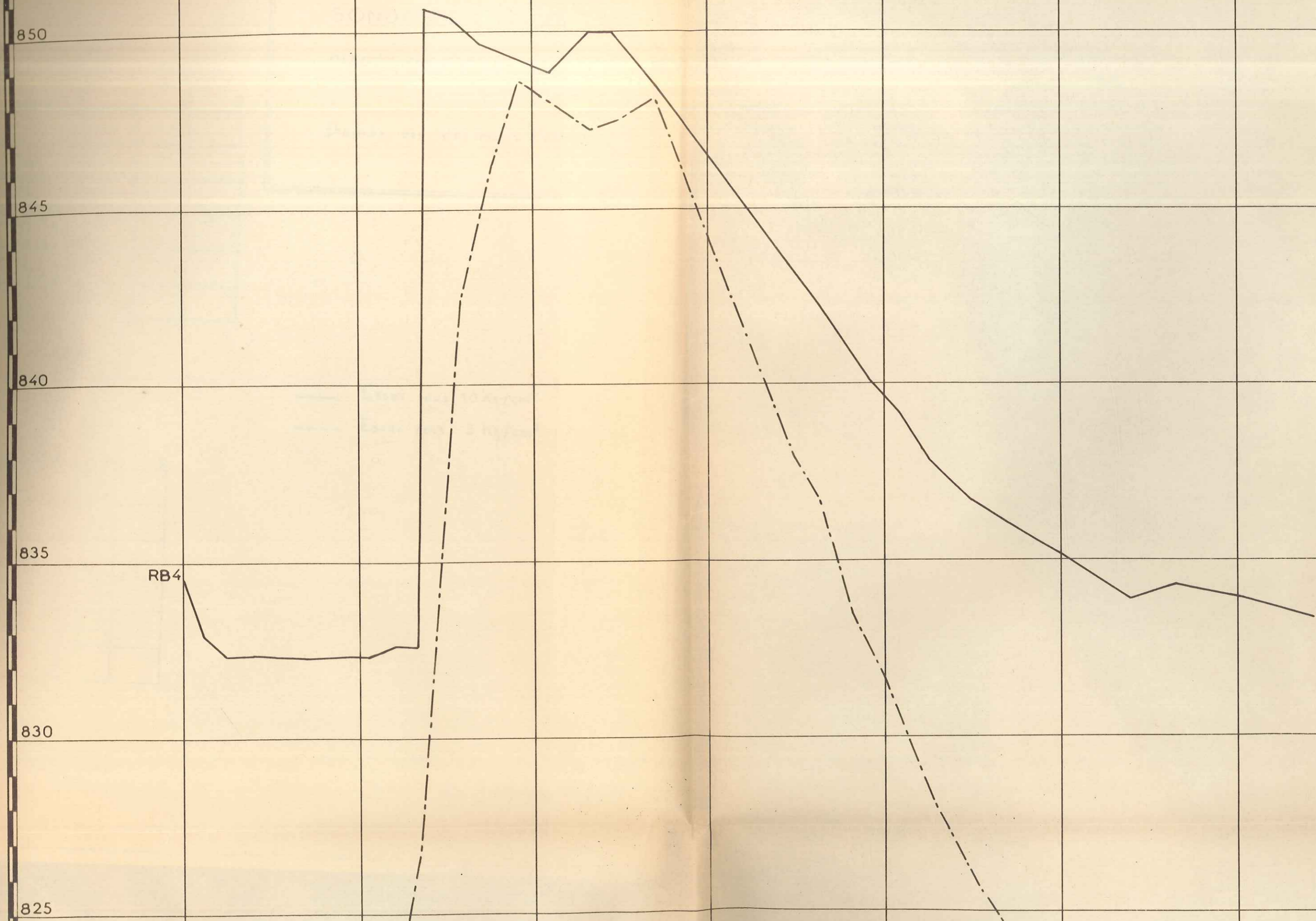


SONDAGES RB1 RB2 RB3
 DIAGRAMMES D'ABSORPTION
 D'après des documents Elektrosond

Seule la courbe d'essai sous 10 Kg/cm²
 est figurée

PLANCHE N° 9

Cotes de la nappe



RB4

850

845

840

835

830

825

825

820

815

810

805

800

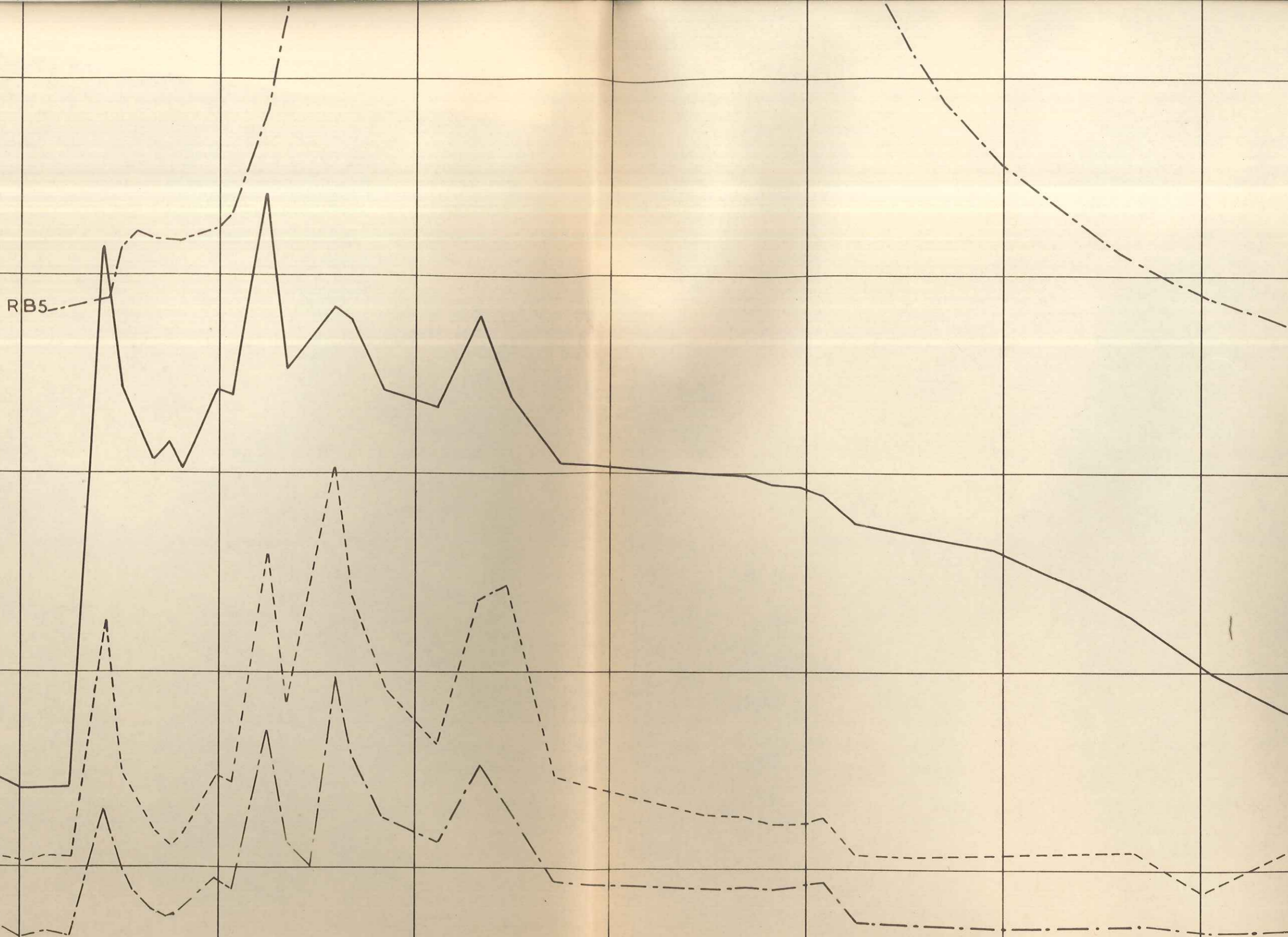
RB5

RB3

RB2

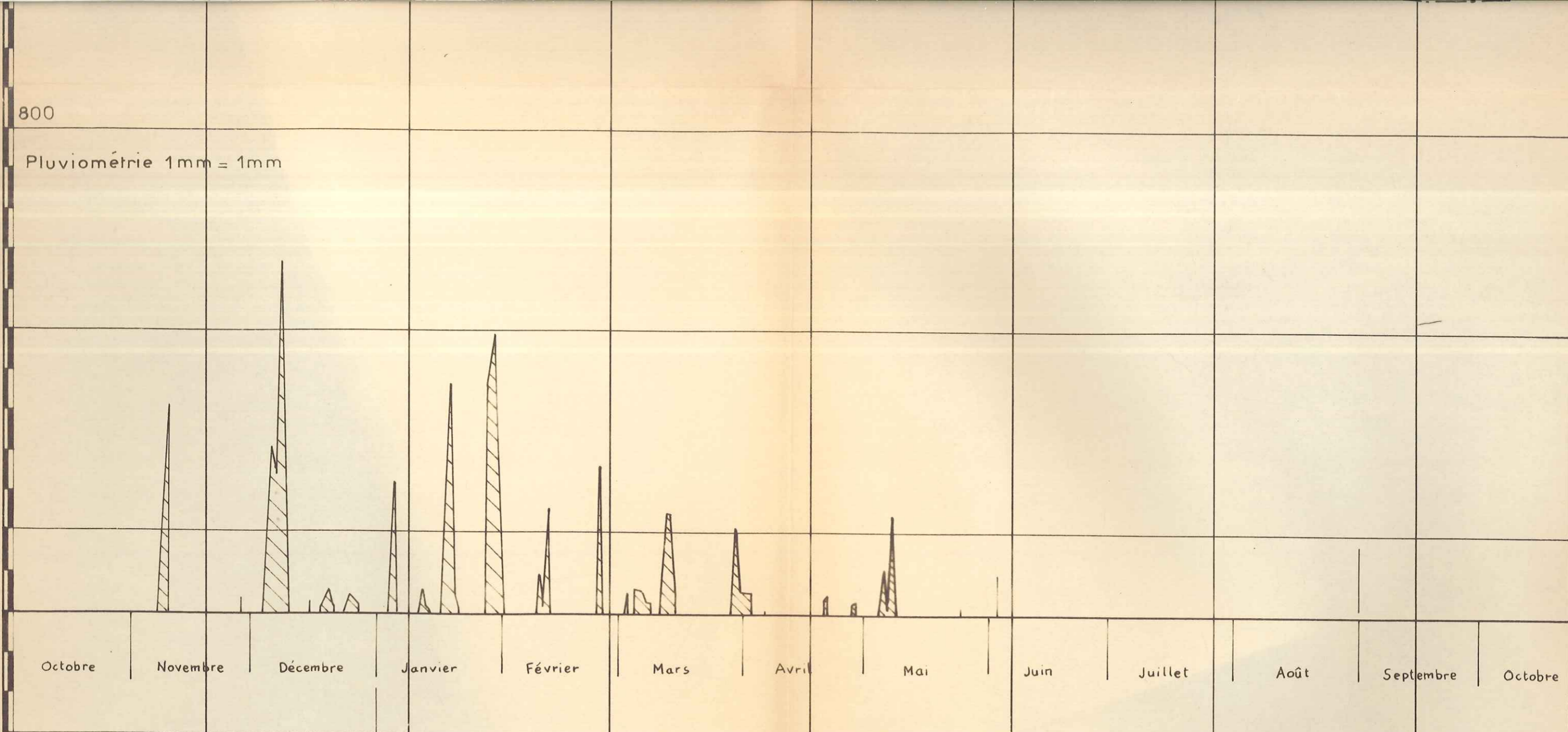
RB1

Pluviométrie 1mm = 1mm



800

Pluviométrie 1mm = 1mm



Octobre

Novembre

Décembre

Janvier

Février

Mars

Avril

Mai

Juin

Juillet

Août

Septembre

Octobre

1956

PLANCHE N° 10

BARRAGE DE KARAOUN

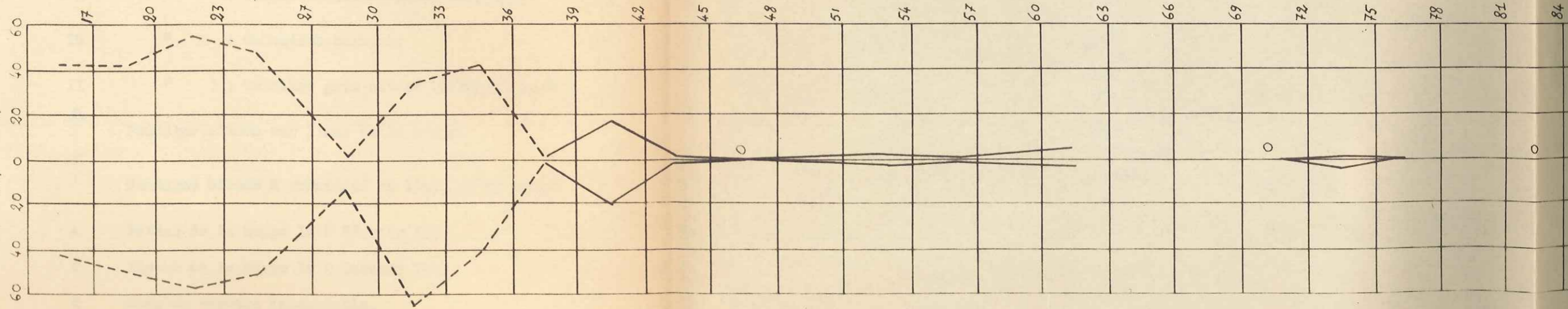
SONDAGES RB

VARIATIONS DU NIVEAU DE
LA NAPPE

RB 4

Essais d'eau

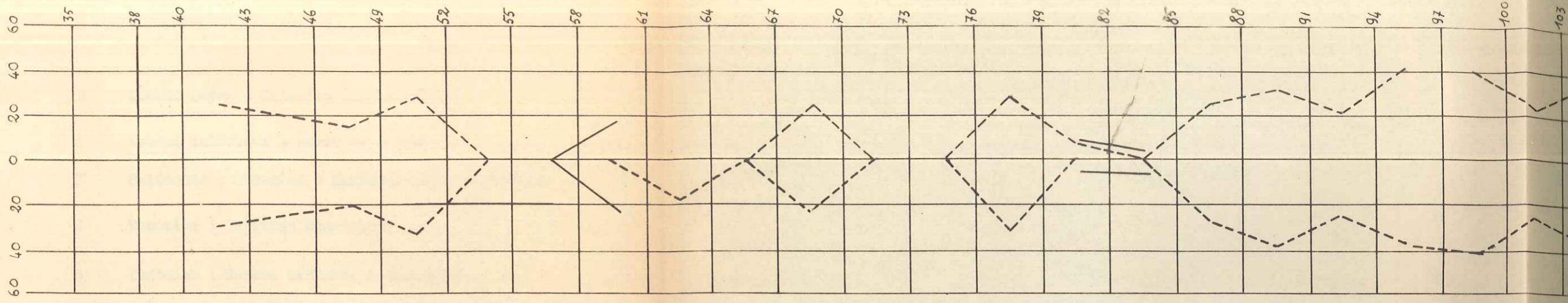
Absorbtions
Pressions ↑ Pressions ↓
litres/mètres/minute



RB 5

Essais d'eau

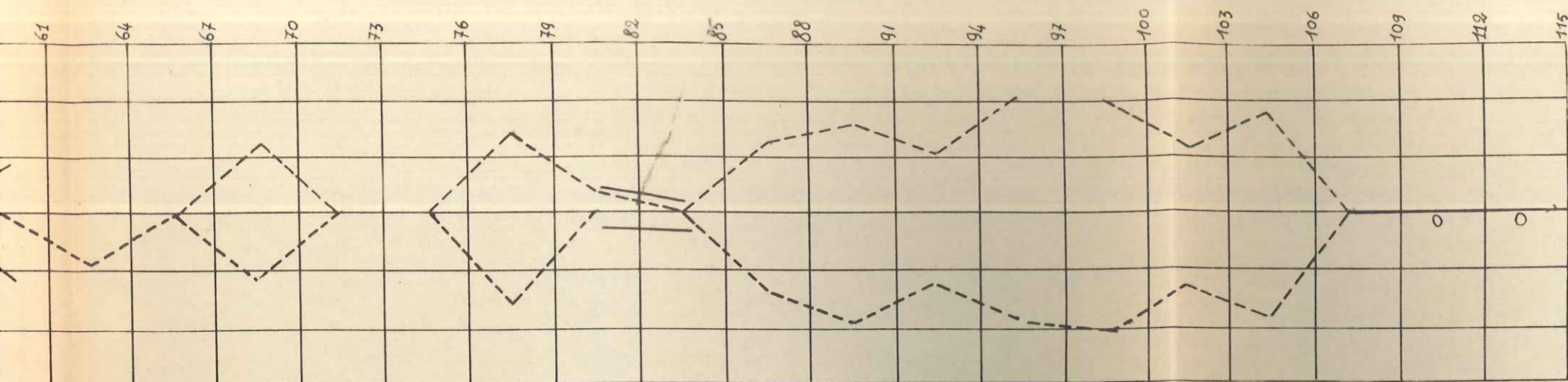
Absorbtions
Pressions ↑ Pressions ↓
litre/mètre/minute



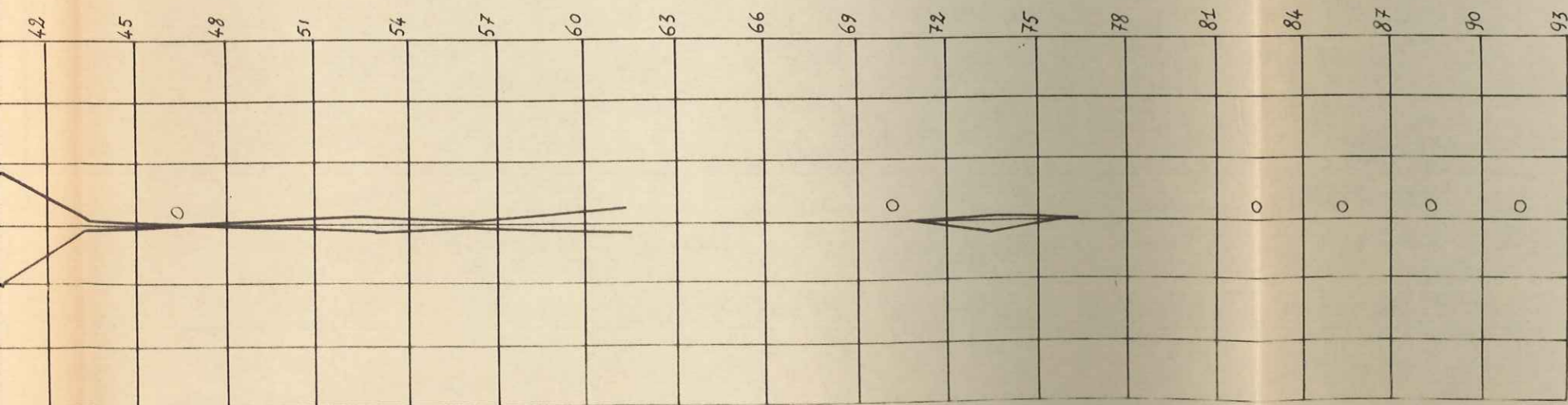
SONDAGES RB4 RB5

DIAGRAMMES D'ABSORPTION

D'après des documents Elektrosond



— Essai sous 10 Kg/cm²
- - - Essai sous 5 Kg/cm²



PROFIL EN LONG GEOLOGIQUE SUIVANT L'AXE DES SONDAGES RB

LEGENDE

- I Eocène moyen : Calcaire dur karstique
 - 2 Eocène inférieur : Marno calcaires
 - 3 Paléocène + Sénonien : Marnocalcaires et marnes.
 - 4 Turonien : Calcaire karstique
 - 5 Turonien : Couche marneuse à ammonites.
 - 6 Cenomanien : Calcaire récifal dur karstique.
 - 7 " : Calcaire à silex.
 - 8 " : Calcaire marneux à "choux-fleurs".
 - 9 " : Calcaires dolomitiques compacts.
 - 10 " : Calcaires marneux.
 - II " : Calcaire gris altéré (calcaire carié)
- ↑ Sondages situés sur l'axe de la coupe.
- ↑ Sondages situés à proximité de l'axe de la coupe.
- A Niveau de la nappe le 6 Février 1957
- B Niveau de la nappe le 9 Octobre 1957
- C Cote du terrain imperméable.

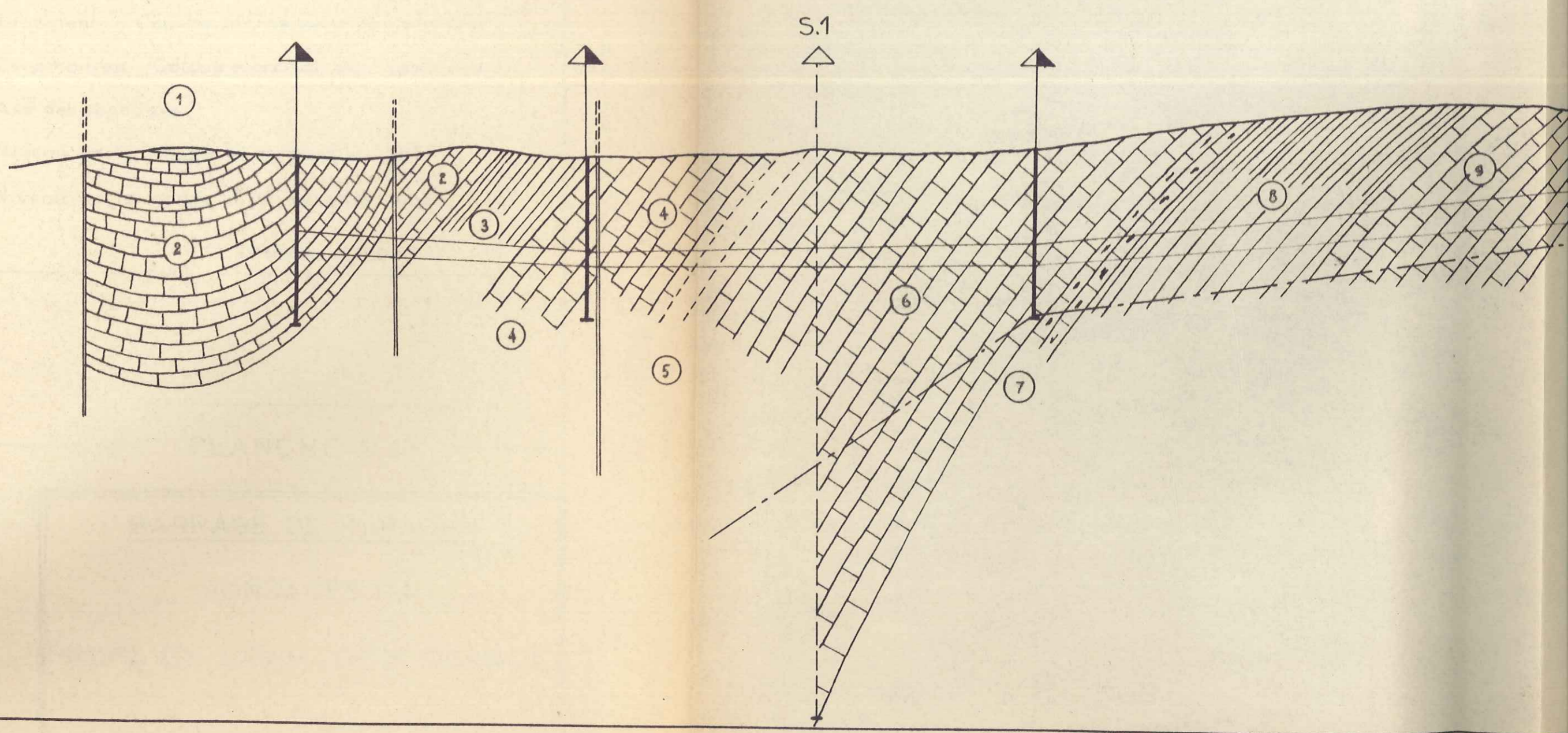


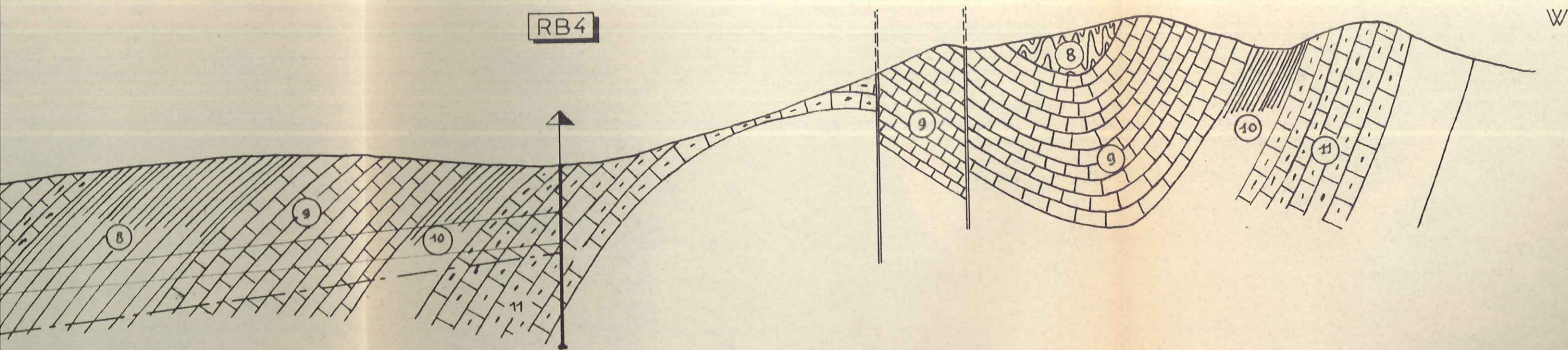
E

RB 3

RB 2

RB 1

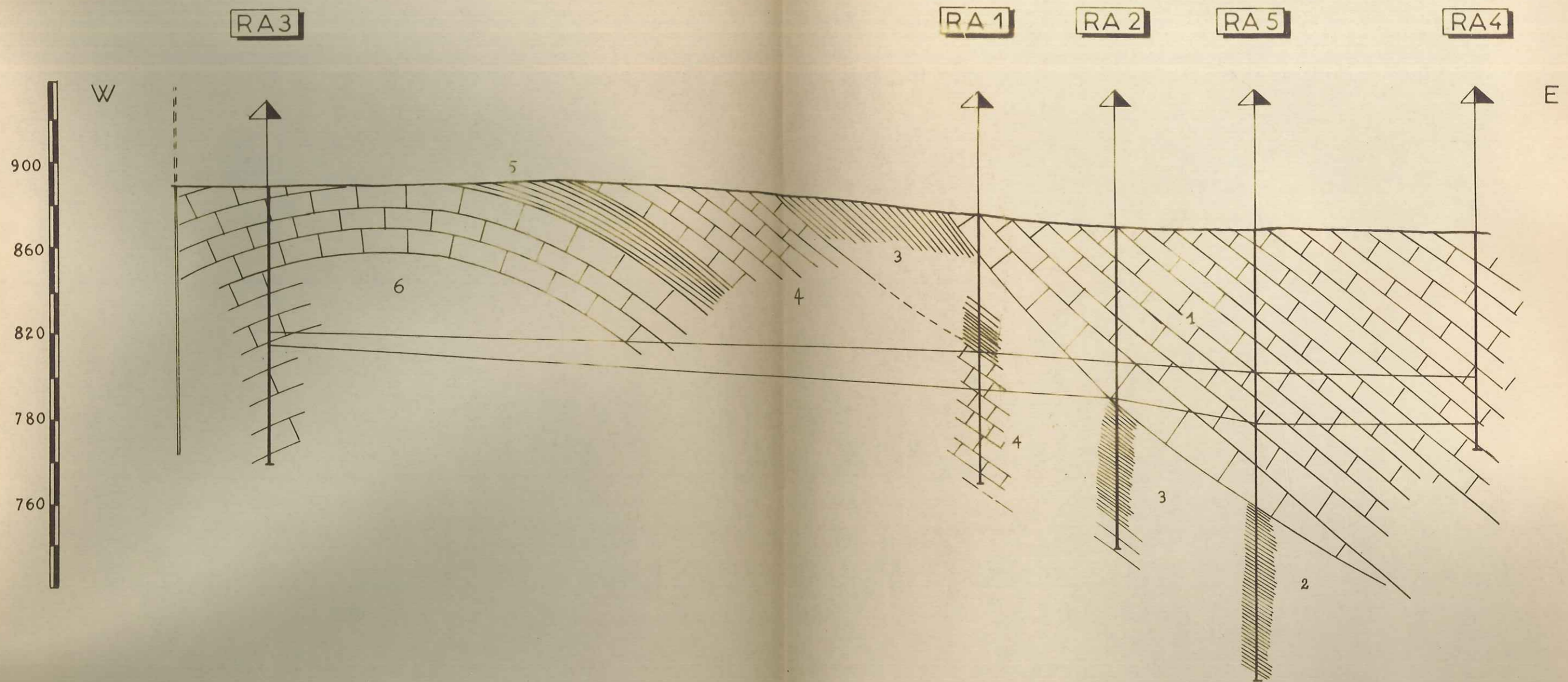


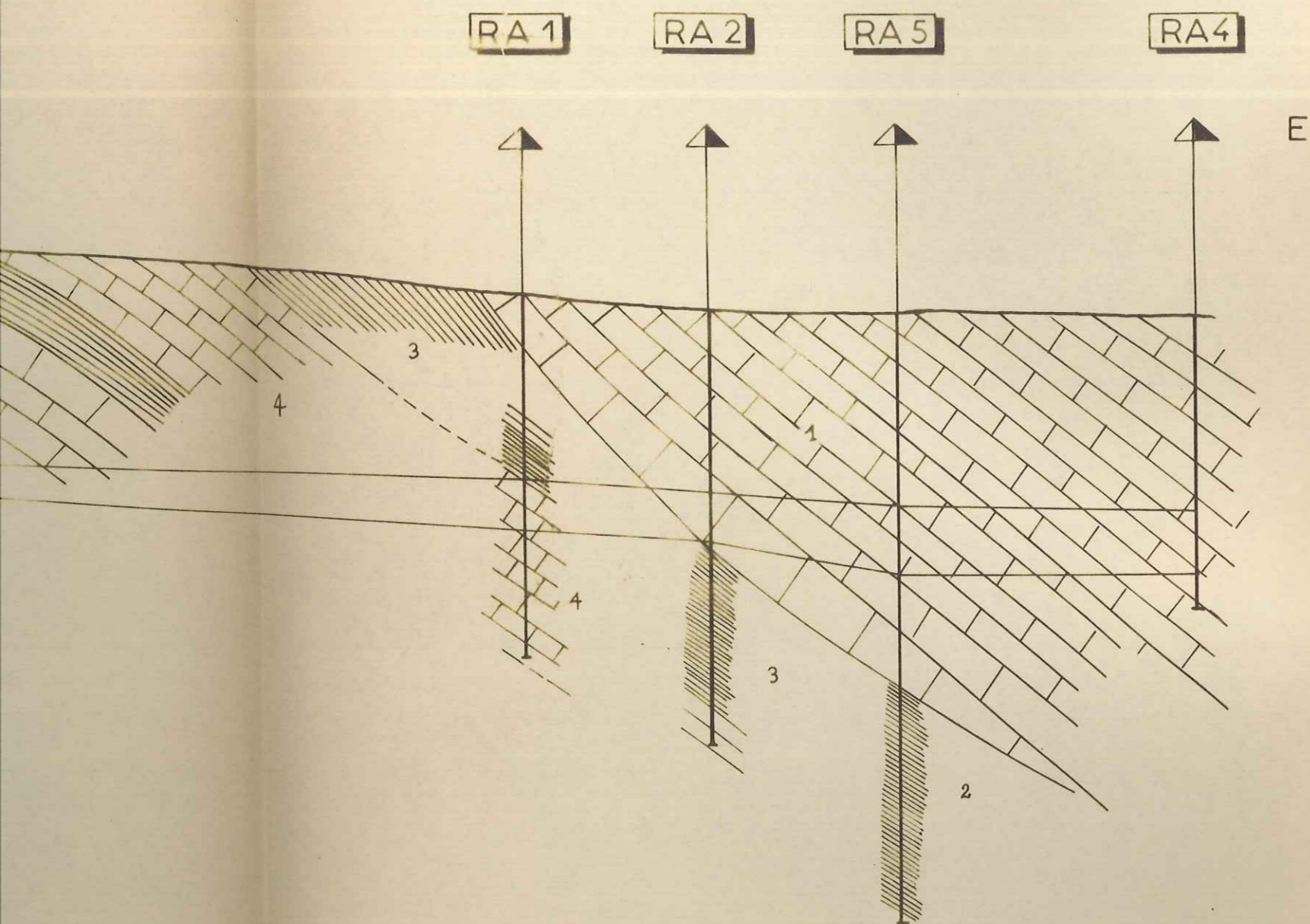


BARRAGE DE KARAOUN

PROFIL EN LONG GEOLOGIQUE
SUIVANT LES SONDAGES RB

PLANCHE N 12





LEGENDE

- 1 Eocene moyen : Calcaire dur karstique
- 2 Eocene inferieur : Marnocalcaire
- 3 Senonien : Marnocalcaire
- 4 Turonien Calcaire dur Karstique
- 5 Turonien Couche marneuse à Ammonites
- 6 Cenomanien Calcaire recifal dur karstique
- ▲ Axe des sondages
- A Niveau de la nappe le 6 fevrier 1957
- B Niveau de la nappe le 9 octobre 1957

Echelle 1/2000

PLANCHE N 13

BARRAGE DE KARAOUN

SONDAGES RA

PROFIL EN LONG GEOLOGIQUE