



HAL
open science

Barrage de Sidi Boubecker sur l'Oued El Kebir (Tunisie nord orientale) : étude structurale et hydrogéologique du site ; étude sédimentologique et géotechnique des alluvions déposées

Mohamed Rouis

► To cite this version:

Mohamed Rouis. Barrage de Sidi Boubecker sur l'Oued El Kebir (Tunisie nord orientale) : étude structurale et hydrogéologique du site ; étude sédimentologique et géotechnique des alluvions déposées. Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1984. Français. NNT : . tel-00786179

HAL Id: tel-00786179

<https://theses.hal.science/tel-00786179>

Submitted on 8 Feb 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.

205.142
1984
253

ÉCOLE NATIONALE D'INGÉNIEURS DE SFAX

88P

205142
1984
253

triple
THÈSE

présentée à

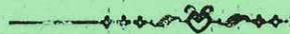
**L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE
DE GRENOBLE**

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE 3^e CYCLE DE GÉOLOGIE APPLIQUÉE

par

Mohamed Jamel ROUIS



SUJET



**BARRAGE DE SIDI BOUBECKER SUR L'OUED EL KEBIF
(TUNISIE NORD ORIENTALE)**

- * Étude structurale et hydrogéologique du site.
- * Étude sédimentologique et géotechnique des alluvions déposées.



Soutenu à SFAX le 30/10/1984 devant la Commission d'Examen

M. P. VIALON	Président
M. P. ANTOINE	Rapporteur
M. P. HOMMERIL	Examineurs
M. P. TRICART	
M. H. BEN DHIA	
M. A. HORCHANI	

205142
1984
253

إلى روح والدي الذي فارقتنا فجأة بالبقاء المقدسة
إلى أبي وأخوتي: محمود، توفيق، بدر الدين،
الحبيب، أسامة، وزيد، سلوى، ليلى
سعاد، فاطمة، بثينة، وميساء.

إلى رفقة العمر: راضية
وإلى عائلتها

أهدي أول ثمار البحث



A

- . La mémoire de mon père décédé subitement aux lieux saints
- . A ma mère, mes frères et soeurs : Mahmoud, Taoufik, Badreddine,
Habib, Oussama, Ziad.
Saloua, Leila, Souad, Fatma, Boutheina, Mayça.
- . A la compagne de ma vie : Radhia
et sa famille.

Je dédie ce travail.



0520255318

T.84/542

TRIPLE
205.142
1984
253

Au terme de ce travail, je remercie tous ceux qui ont m'aidé durant quatre années de recherche au Département de Géologie de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax et à l'I.R.I.G.M. de Grenoble.

Je tiens à remercier plus particulièrement :

- M. ANTOINE P. qui m'a accueilli au sein de l'équipe de géotechnique de l'I.R.I.G.M et a bien voulu être le rapporteur de ce travail.
- MM. BEN DHIA H., HOMMERIL P et TRICART P pour avoir suivi de très près les différentes étapes de cette étude ainsi que pour avoir accepté de la juger en participant à mon jury.
- MM. LAMBOY M, DAYRE M, DELTEIL J et LETOURNEUR M. pour l'intérêt qu'ils ont toujours manifesté lors de nos multiples discussions.
- M. VIALON P. qui m'a fait l'honneur de juger ce travail.
- M. HORCHANI A. qui a très aimablement accepté d'être membre de mon jury.
- M. ELLOUZE R. directeur de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax.
- Mes collègues et amis : TRABELSI H, OUALI J, Mademoiselle Mezghani N., BEN TOUMIA M, HATTAY M, Madame MESSAOUDI F, FRIKHA A, BACCOUR M, MAALEG M, BEN JMAA M, HAMMAMI EL HAKIM.
- Mes collègues enseignants : MM. ANDRIAMIRADO R., AMOURI M., GOURMELEN C., CREUZOT G., BESEME P., SIMONNET J.P., MERTZ J.D., Madame LAVERNE Ch., et Mesdames HOMMERIL F. et BRAHIM S.

A tous ceux parmi les fonctionnaires et employés de l'ENIS qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.

AVANT - P R O P O S

Cette étude - destinée au départ à l'étude de l'envasement - s'est transformée petit à petit en une analyse critique de tout l'aménagement.

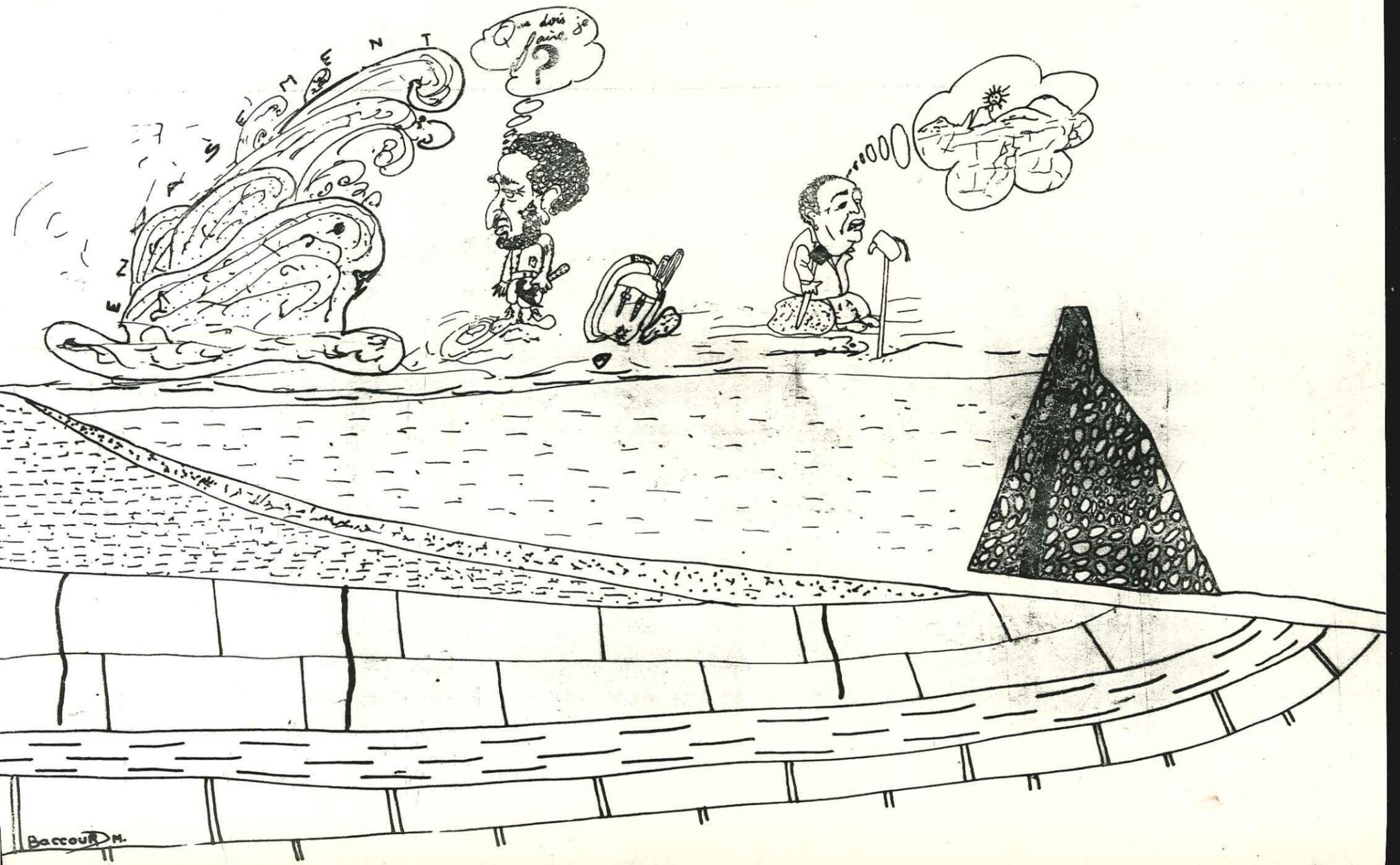
L'étude géologique - qui aurait dû précéder la construction - a intéressé le deversoir, les deux rives ainsi que l'aval du barrage. Elle a été menée de pair avec l'étude géotechnique des dépôts et l'étude géochimique des eaux : de la retenue, des nappes et des sources.

Une analyse des données bibliographiques et des mesures effectuées depuis la mise en fonctionnement du barrage a été la base d'un essai de calcul et de prévision de l'envasement du réservoir.

Cet essai fut tenté - malgré le manque très flagrant de données dans le domaine - afin d'attirer l'attention sur l'importance de telles études et leurs incidences sur la rentabilité des projets.

Même si l'étude de l'envasement ou la lutte directe contre ses conséquences est coûteuse et dépasse les moyens des services concernés, il est rentable de chercher dans les retenues elles-mêmes ou dans d'autres milieux sédimentaires contemporains des solutions de restitution des capacités perdues.

Il est regrettable de constater que l'envasement constitue souvent le dernier élément analysé dans toute étude de projet de barrage à cause du retard d'apparition de ses conséquences. L'Homme doit - à notre avis - à la nature le devoir de résoudre les problèmes qu'il crée par ses interventions et de ne pas se limiter à les retarder au prix de la satisfaction des besoins de quelques générations.



R E S U M E

Le barrage de Sidi Boubecker, situé sur l'Oued El Kebir, dans le Nord de la Tunisie centrale, a été mis en eau depuis 1925. Depuis cette date le réservoir est en envasement progressif. Au bout de 56 ans de service, les sédiments ont atteint 14 mètres d'épaisseur au pied de l'ouvrage occupant environ 55% de la capacité totale de la retenue.

En plus de l'envasement, le fonctionnement du barrage est perturbé par les fuites apparues à l'aval.

L'étude du site, de la retenue et de leur environnement a permis :

- la reconstitution des étapes de genèse de la fracturation dans le site à partir des différentes orientations du champ de contraintes principales régionales.
- d'expliquer les fuites des barrages.
- d'étudier les dépôts et mettre en évidence l'effet du biotope de la retenue sur leur évolution. (Cohésion et perméabilité).
- de tenter un essai de prévision des volumes déposés dans la retenue.

Mots clés

Tunisie/Oued El Kebir/Barrage en enrochement/Lac artificiel/Sédimentation lacustre/structure sédimentaire/fracturation/contraintes régionales/ostracodes/Polychetes/characées/retenue souterraine/taux de sédimentation/envasement/érosion/géotechnique/argiles/diffraction X/.

الخلاصة

ان دراسة سد سيدى "بويكر" على وادى الكبير، بجهة الفحص، ص 6
أظهرت النتائج التالية

الموقع — اثبتت المعاينات والفحوص الجيولوجية سوء
اختيار موقع بناء السد وذلك لعدم توافق محور الوادى مع محور القعيـرة
(Synclinal) من جهة وميلان الطبقات الكلسية نحو السافلة

من جهة اخرى . هذا وقد ساهمت الكسور والشقوق المفتوحة الناتجة عن عديد
حالات الضغط التي تعاقبت على الجهة منذ الايوسيني — في اعانة المياه على
التسرب عبر المرتكزين الايمن واليسر للتدفق وراء السد . وقد مكنت
الدراسة الحركية لهذه الشقوق من اعادة انشاء مختلف الاوضاع التي اتخذتها
الضغوط الرئيسية عبر الاحقاب الجيولوجية .

الطبقات المائية بالخزان وتحت السد — اظهرت الدراسات وجود
طبقتين مائيتين الاولى في شقوق الطبقات الكلسية الايوسينية والثانية
في فراغات مواد الترسيب . وقد اظهرت التحاليل الجيوكيميائية والقياسات
المعاصرة (Pizométriques) وجود منطقة تمازج لياه الطبقتين تحت السد .
وتخرج المياه الممتزجة عبر عيون توجد سافلة السد نتيجة تغير في ميلان
الطبقات الصخرية المتسبب في انتصاب محور القعيـرة وانحداره نحو الجنوب
الغربي (عالية النهر) عوض الشمال الشرقي .

وقد تبين ان عيون مصرف المياه الايمن (Drain droit) تتزود مباشرة من الخزان .

الترسيب — (Envasement) مواد — اسبابه والتكهن
بكمياته فيما يخص مواد الترسيب اظهرت التحاليل وانه يتمثل أساسا في راسب طيني
شديد اللدونة (Plasticité) وفيما تساهم المواد العضوية والطحالب والنباتات
— المتواجدة على سطح الرواسب او داخلها — في توفير الحديد عبر تحليلها، يساهم
نوع من الديدان في تثبيت هذا الحديد بعد أكسدة حوله الجزئيات الطينية رافعة
بذلك درجة تماسكها . (Cohésion) كما تقوم هذه الديدان بحفر جحور

خاصة بها رافعة بذلك قيمة نفوذية (Perméabilité) الرواسب .
 أما فيما يخص اسباب الترسيب والتكهن بكمياته فانه ظهر وان القياسات
 والتحليل المتواجدة حاليا الوادى الكبير (كمثل من مختلف الوديان)
 غير كافية للقيام بدراسة جديدة في الموضوع . وقد بينت المحاولات التي قمنا بها
 على أساس ما عثرنا عليه من معلومات ، جدوى مثل هذه الدراسات وأظهرت
 مستقبلا واعدا لاي محاولات جديدة في هذا الميدان .

T A B L E D E M A T I E R É

Première partie : Généralités.

1. - Aménagement de l'oued El Kebir 1
 1.1. - Caractéristiques du barrage 1
 1.2. - Caractéristiques de l'évacuateur de crue 4
 1.3. - Historique de la construction et incidents
 survenus en cours d'exploitation 4
 2. - Données climatiques et hydrauliques 5
 2.1. - Les températures 5
 2.2. - L'évaporation potentielle 6
 2.3. - Les précipitations 7
 2.4. - Les débits de l'oued El Kebir 15
 2.5. - Conclusion 19

Deuxième partie : Etude géologique

Introduction 22
 Premier chapitre : Cadre géologique régional
 I.1. - Synthèse des connaissances récentes 23
 I.1.1. - Evolution paléogéographique 23
 I.1.2. - Contexte structural 26
 I.2. - Lithostratigraphie du bassin versant 32
 I.2.1. - Le substratum 32
 I.2.2. - Les formations superficielles 35
 Deuxième chapitre : Etude de la fracturation
 II.1. - Présentation 39
 II.2. - Méthode de travail - stations de mesures 40
 II.2.1. - Critère de choix des stations de mesures 40

- II.2.2. - Emplacements des stations et résultats statistiques 40
- II.2.3. - Familles et faisceaux de fractures de calcaires lutétiens du synclinal de l'oued El Kebir..... 40
- II.3. - Etude cinématique : mouvements selon les différents types de discontinuités du massif..... 52
 - II.3.1. - Les mouvements selon le faisceau NE-SW 55
 - a - Les mouvements verticaux 55
 - b - Cisaillement horizontal selon le faisceau NE -SW. 61
 - II.3.2. - Les mouvements selon la stratification 63
 - a - Mouvements vers le SE 63
 - b - Mouvements vers le NW induits par la flexure..... 66
 - c - Répartition des mouvements dans les couches..... 71
 - II.3.3. - Les mouvements selon le faisceau N 135 72
 - II.3.4. - Conclusion 73
- II.4. - Evolution tectonique du synclinal de l'oued El Kebir 74
 - II.4.1. - Chronologie des déformations 74
 - II.4.2. - Evolution tectonique du synclinal 74
- II.5. - Essai de synthèse régionale 80
 - a - Confrontation aux données bibliographiques 80
 - b - Confrontation aux données de la fracturation régionale 83
 - c - Liaisons possibles avec des décrochements de socle. 92
- II.6. - Conclusion..... 95

Troisième partie : Etude sédimentologique et géotechnique

Troisième chapitre : Caractéristiques sédimentologiques

- III.1. - Morphologie des dépôts 107
 - III.1.1. - L'absence de chenal 107
 - III.1.2. - Les figures sédimentaires 107
- III.2. - Moyens de reconnaissances 110
 - a - Les sondages mécaniques et échantillons prélevés..... 110
 - b - Les essais in situ 112
 - c - Logs lithologiques des sondages 112
- III.3. - Propriétés granulométriques 115

Quatrième chapitre : Propriétés géotechniques

- IV.1. - Propriétés géotechniques des dépôts 121
 - IV.1.1. - Caractéristiques d'identification 121
 - IV.1.2. - Identification selon la classification L.P.C..... 124
 - IV.1.3. - Caractéristiques mécaniques 124
- IV.2. - Composition des dépôts 130
 - IV.2.1. - Teneur en matière organique 130
 - IV.2.2. - Composition minéralogique et chimique 130
- IV.3. - Mécanismes de dépôt 130
 - IV.3.1. - Moyens d'identification des modes de dépôt 130
 - IV.3.2. - Résultats..... 132

Cinquième chapitre : Influence de l'activité biologique sur certaines caractéristiques géotechniques du dépôt.

- V.1. - Influence des apports organiques et de l'activité biologique sur l'évolution des sédiments de la retenue 134
 - V.1.1. - Apports organiques détritiques 134
 - V.1.2. - Apports organiques liés à l'activité biologique dans la retenue 134
- V.2. - Conclusion 141

Quatrième partie : Problèmes d'exploitation de l'aménagement

Sixième chapitre : Le problème des fuites

- VI.1. - Présentation des problèmes 145
- VI.2. - Eléments structuraux influents sur les conditions hydrauliques 145

VI.3. - Etat actuel du problème 151
VI.4. - Les systèmes aquifères et les circuits hydrauliques 152
VI.5. - Conclusion 162

Septième chapitre : Les facteurs d'envasement :

Ruissellement, érosion et transport solide

VII.1. - Etude du ruissellement 168
 VII.1.1. - Les facteurs influents sur le ruissellement 168
 VII.1.2. - Le calcul du ruissellement 168
VII.2. - Etude de l'érosion 172
 VII.2.1. - Introduction 172
 VII.2.2. - Aspect qualitatif 173
 a - Répartition des faciès du bassin versant 173
 b - Les facteurs de l'érosion 173
 VII.2.3. - Essai de caractérisation des foyers d'érosion ... 175
 VII.2.4. - Aspect quantitatif 179
VII.3. - Le transport solide 181
 VII.3.1. - Relation qualitative débit liquide, débit solide.. 181
 VII.3.2. - Essai de quantification de la relation
 débit liquide débit solide 185
VII.4. - Volumes envasés et possibilités de prévisions..... 190

Cinquième partie : Conclusions générales

A - Les solutions proposées aux problèmes de l'aménagement201
B - Les perspectives de recherche202
C - Conclusion générale. 206

PREMIERE PARTIE : Généralités

1. - Aménagement de l'Oued El Kebir

Situé à la base d'un bassin versant de 271 Km² et assurant une retenue d'une capacité initiale de 25⁶m³ à la cote maximale prévue (341m), qui correspond à un lac d'une superficie de 30 ha, cet aménagement comporte les ouvrages suivants :

- . un barrage en enrochements avec un écran central en béton comme organe d'étanchéité ;
- . un canal évacuateur de crues suivi d'un guide-eau qui assure la restitution des eaux de crue dans l'Oued (Fig. 1).
- . une station de traitement (filtration, correction bactérienne par javellisation) située à 4 Km à l'aval. Les eaux traitées sont ensuite acheminées par conduite vers Tunis.

Après l'apparition de fuites lors de la première mise en eau, trois ouvrages supplémentaires ont été annexés au projet. Il s'agit de deux drains (tranchées à l'air libre en rive gauche et rive droite) pour le captage des sources du pied du barrage et d'une chambre de captage des sources apparues à 1 Km à l'aval de la digue. Ces eaux sont également emmenées à la station de traitement.

1.1. - Caractéristiques du barrage :

Les enrochements ont été placés en vrac dans la recharge amont et une partie de la recharge aval (Fig. 2).

Des enrochements ont été rangés à la main à la base de la recharge aval et sur la surface du talus aval.

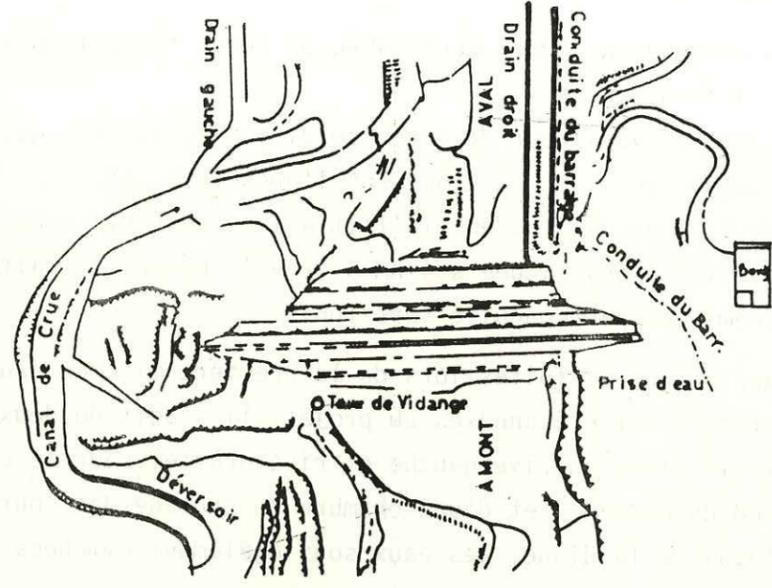
L'écran d'étanchéité est formé par l'assemblage de deux séries de voûtes demi-cylindriques à l'amont, plates à l'aval et réunies par des cloisons en ciment armé. Une série de voûtes renversées assure la liaison entre cet écran et le rocher, et permet la répartition uniforme des charges.

Les principales caractéristiques de cet ouvrage sont les suivantes :

- altitude de la crête du barrage344 m(NGT)
- hauteur maximale au dessus du point le plus bas des fondations..... 36,25m
- cote du terrain naturel au niveau des fondations..... 320 m.

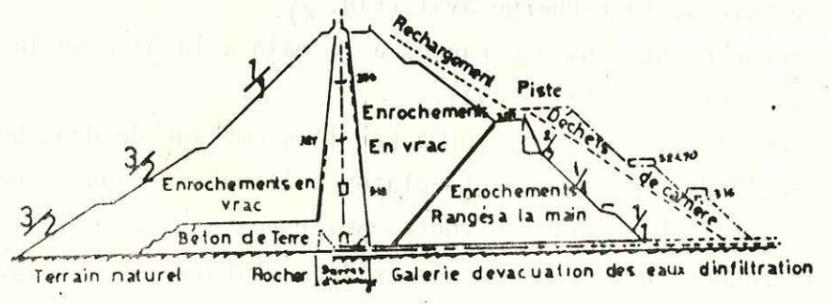
PLAN DU BARRAGE DE L'OUED EL KEBIR

Fig.1



BARRAGE SUR L'OUED KEBIR Profil en travers cellule 70

Fig. 2



- hauteur maximale au dessus du thalweg35m
- largeur en crête.....10m
- largeur maximale au niveau des fondations.....112,7m
- longueur en crête.....331,7m
- volume du corps du barrage343000m³
- profondeur maximale de l'organe d'étanchéité
au dessous du niveau du sol.....1m
- volume des réserves utilisables :

Les données disponibles concernant la capacité de la retenue sont contradictoires. En effet F.LOJEAN (1955) évalue la capacité à 2210⁶ m³ à la cote 342 m. Pour J.TIXERONT, la capacité est de 2510⁶ m³ à la cote 340,5m. Les diagrammes de capacité trouvés dans les archives de la SONEDE (Société Nationale d'Exploitation et de Distribution d'Eau) donnent une capacité de 2510⁶ m³ à la cote 341 m. Il nous a été impossible de calculer la valeur exacte de la capacité à partir du plan topographique initial du réservoir. Sur ce plan, l'équidistance des courbes de niveau est de 5 m et seule la courbe 342 (côte initiale du déversoir, ramenée à 341 m à la construction) y est représentée. Certains rapports du Bureau d'Inventaire des Ressources Hydrauliques mentionnent l'existence d'un plan topographique du réservoir avec une équidistance des courbes de niveau d'un mètre. Nous ne sommes malheureusement pas parvenus à le retrouver.

Ce manque de documents précis nous a conduit à adopter la valeur donnée par les diagrammes de capacité de la SONEDE, à savoir 2510⁶ m³.

- Liaison de l'organe d'étanchéité avec le rocher de fondation :
deux rangées de barres verticales d'ancrage en acier (longueur 4,5m et diamètre 25 mm) espacées de 0,5 m, solidaires des séries amont et aval de voûtes forment l'écran d'étanchéité.

La manoeuvre des débits s'effectue à partir d'une chambre de prise installée sur la rive droite et qui comprend des robinets pouvant commander :

- . trois vannes de prise d'eau placées aux cotes : 334,330 et 326m.
- . une vanne placée en rive gauche avec prise dans la tour de vidange à la cote 320.
- . une vanne de fond avec prise dans la tour de vidange à la cote 310,5.

Toutes les vannes de prise et de vidange sont actuellement envasées et inutilisables.

1.2. - Caractéristiques de l'évacuateur de crues.

C'est un canal à parois verticales, taillé dans les calcaires éocènes tendres de l'appui rive gauche; commandé par un déversoir à la cote 341, il a une superficie de 220 m² et une capacité de 1000 m³/s. A la suite de la crue d'octobre 1969 (avec un débit maximal de 1200 m³/s) le barrage a deversé en crête pendant environ deux heures, ce qui a amené les responsables de la direction des grands travaux hydrauliques à ramener le déversoir à la cote 337,19 m.

1.3. - Historique de la construction et incidents survenus en cours d'exploitation.

De nombreux détails concernant les incidents qui ont affecté le barrage, les réparations effectuées, ainsi que plusieurs détails techniques sont rassemblés dans la note de F. LOJEAN (1955).

Nous nous limiterons ici aux évènements les plus importants ;

- Mai 1922 : début des études sur le terrain.
- Juillet 1922 : début des travaux de construction par la Société des Grands Travaux de Marseille, pour un montant global de 10 millions de francs (de 1925)
- Février 1925 : fin de la construction.
- Du 25 au 29 mars 1929 : pluies d'intensité exceptionnelle, cumulant une tranche d'eau de 191 mm, la retenue, qui était pratiquement vide pendant les quatre premières années de service, se trouve remplie en un jour. Cette crue de 22 Mm³ (10⁶ m³), la première depuis la construction de l'ouvrage, provoque le cisaillement du diaphragme de béton et l'apparition de sources à l'aval.
- Juillet 1929 : vidange de la retenue et début des travaux de réparation.
- Juillet 1938 : toute l'eau disponible ayant été évacuée, le sommet de l'envasement apparaissait à la cote 323,8.
- Juillet 1945 : à la suite d'une nouvelle vidange le sommet de l'envasement apparaissait à la cote 327.
- Avril 1956 : sous l'action de vents violents les vagues ouvrent une brèche de 9 m de large sur 4 m de profondeur

dans l'enrochement à partir de la crête.

- Octobre 1969 : suite à des crues importantes (85 millions de m³ d'eau en quelques jours) le barrage déverse en crête pendant deux heures environ. Aucune dégradation du parement aval n'a été signalée.
- Juin 1978 : l'eau de la retenue étant totalement évacuée et évaporée, le sommet de l'envasement apparaît à la cote 333,55. Depuis, la retenue s'est trouvée périodiquement à sec à la même cote, notamment en mai 1979, octobre 1979, décembre 1979 et avril 1980.
- Septembre 1981 : la retenue étant vide la vase apparaît à la cote 333,9.

2. - Données climatiques et hydrauliques.

Le bassin versant de l'Oued El Kebir se développe entre les cotes 310 m et environ 1208 m.

Dans ce bassin trois stations ont été équipées dans le but de récolter des données météorologiques ou hydrologiques ; ce sont :

- La station de Sidi Boubecker, sur le site du barrage, située à 340 m d'altitude et fonctionnant essentiellement comme station météorologique.
- La station de Sidi Aouidat située à 5 Km environ à l'amont du barrage, toutes les données concernant les débits liquides et solides ont été récoltées à cette station. Son altitude est de 370 m et elle couvre un bassin versant de 228 Km².
- La station de Sidi Saïd, située à 15 Km environ à l'amont du barrage. C'est une petite station météorologique à 450 m d'altitude.

2.1. Les températures.

L'influence des températures dans les zones à climat semi-aride, se manifeste au niveau de l'évaporation potentielle et de vapotranspiration. La première influe sur les variations de cote des lacs naturels et artificiels ; la seconde conditionne la quantité d'humidité stockée dans

Le sol, facteur non négligeable dans les bilans hydrologiques et dans les études d'érosion par les lames ruisselées.

Le tableau. 1, basé sur les données de 22 ans (1921 - 1942) regroupe les moyennes annuelles ainsi que les moyennes maximales et minimales mensuelles à la station de Sidi Boubecker.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An- née
Moyenne	9,0	9,6	11,7	14,3	18,0	22,9	26,0	26,1	23,1	18,5	13,9	10,1	16,9
Moyenne Maximale	13,5	14,0	17,0	20,7	25,0	30,9	34,7	34,2	29,9	24,1	18,8	14,6	23,1
Moyenne Minimale	4,7	5,3	6,6	8,3	11,2	15,2	17,6	18,1	16,5	12,9	9,1	6,0	11

Tableau. 1 . Moyennes annuelles et moyennes maximales et minimales mensuelles des températures (°C) à Sidi Boubecker de 1921 à 1942.

Bien que les chiffres limites des moyennes maximales et minimales soient respectivement 35 et 4,7°C, le thermomètre a enregistré des maximums et minimums absolus de 40 et - 2°C.

2.2. - L'évaporation potentielle, à travers des variations annuelles assez sensibles, reste en moyenne toujours importante : 1,3 m au bac fixe et 1,8 m au bac colorado. Cette évaporation contribue, avec l'envasement, à la diminution de la rentabilité des barrages tunisiens et en particulier de celui de l'Oued El-Kebir (où les fuites ont, en plus, un effet aggravant).

Année	1960	1961	1962	1963	1965	1966	1967	1969
Bac fixe (mm)	1392,5	1570,1	1485,4	1333,3	1291,5	1324,8	1421,9	1346,5
Colorado (mm)	2072,95	2229,11	2052,88	1785,9	1903,8	1495,8	1663,5	1761,9
Pêche (mm)	1400,6	1476,9	1337,4	1168,9	1285,3	1220,9	1266,3	899,1

Tableau . 2. évaporation potentielle à la station de Sidi Boubecker.

Au cours de l'année, l'évaporation est faible de septembre à avril, forte de mai à août. Elle passe par un minimum au mois de janvier et par un maximum en juillet (Fig. 3).

2.3. - Les précipitations.

3.1. - Répartition dans l'espace.

La figure(4) montre la répartition de la pluie moyenne sur le bassin versant.

Le relief du Jebel Bargou (1268m), situé au S - SE, constitue une barrière pour les nuages qui proviennent, la plupart du temps, du NW, et provoque leur transformation en pluie. Il en résulte que les isohyètes sont sensiblement orientées comme l'axe du bassin versant (Fig. 4) et qu'il existe en moyenne un écart de 100 mm entre les précipitations reçues par les versants gauche et droit, à l'avantage de ce dernier.

3.2. - Répartition dans le temps.

Nous avons pris pour référence la station de Sidi Aouidat qui présente à la fois l'avantage d'offrir la plus longue série d'observations(1933 - 1973) et celui d'être en même temps météorologique et hydraulique.

Quelle que soit la façon d'examiner et de confronter les mesures recueillies, on est d'abord frappé par l'irrégularité foncière des précipitations. Relativement aux valeurs annuelles (Fig. 5, on constate un écart considérable entre la tranche d'eau moyenne sur 40 ans (475 mm) et les tranches minimale (230m) et maximale (896mm).

D'une année à la suivante, la tranche d'eau peut passer du simple au triple, ce qui fut le cas en 1968 - 69 (320 mm) et 1969 - 70 (896 mm). Nous nous trouvons ainsi dans un domaine où l'on ne peut rattacher ce contraste à aucun mécanisme périodique. C'est le caractère aléatoire typique des climats semi-arides.

En ce qui concerne les moyennes mensuelles, la même variabilité apparaît (Fig. 8) : le mois le plus arrosé est octobre (63 mm) et le plus sec juillet (7 mm).

Enfin, les valeurs effectives de précipitation, caractérisant un même mois, sont tout aussi fluctuantes (Fig. 6 et 7).

En nous référant aux mêmes années successives que précédemment (période 1968-1970) nous voyons la moyenne de juillet passée de 8 à 19 mm et la moyenne d'octobre de 10 à 425 mm.

OBSERVATIONS DE L'EVAPORATION POTENTIELLE

(Valeurs mensuelles en % du total annuel)

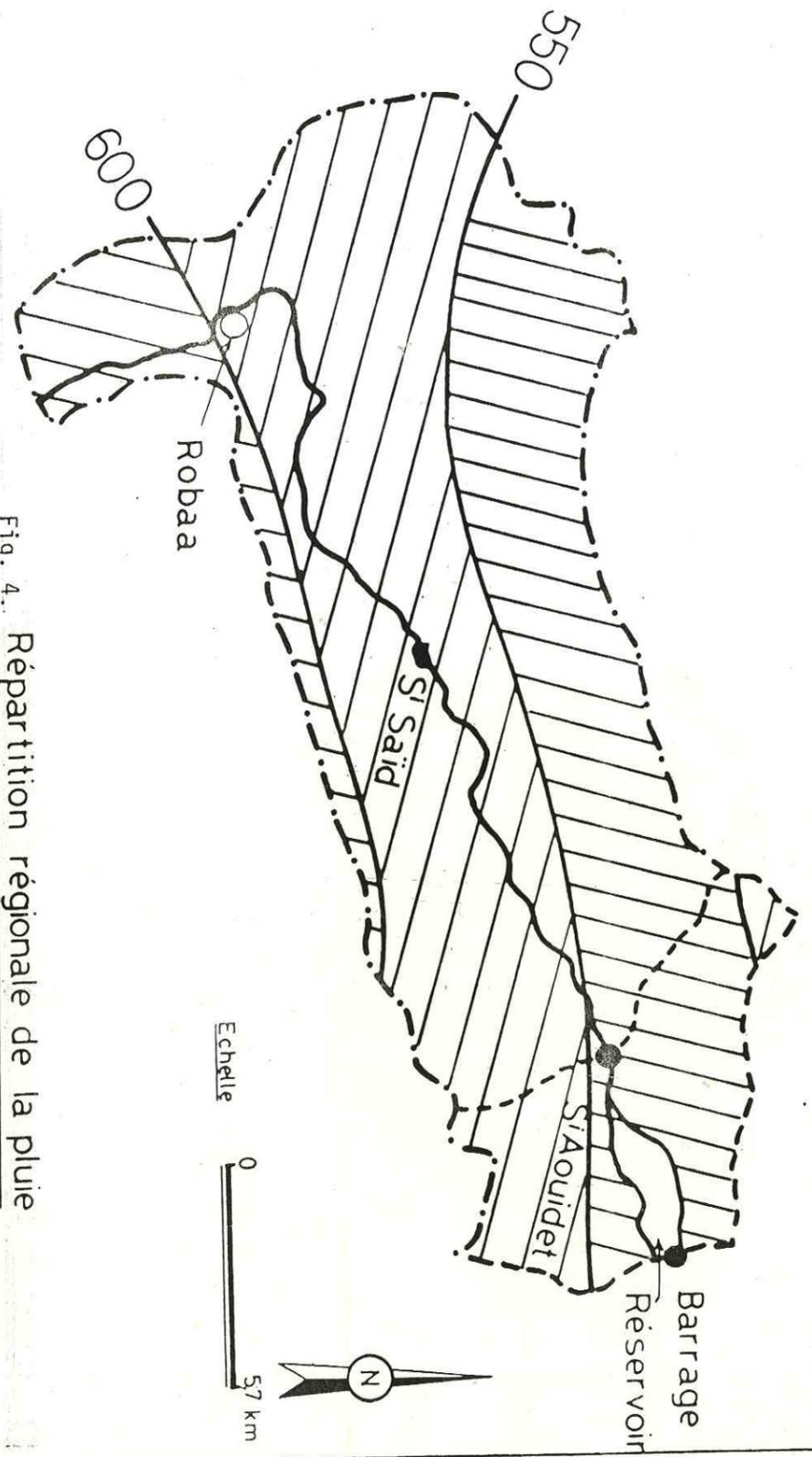
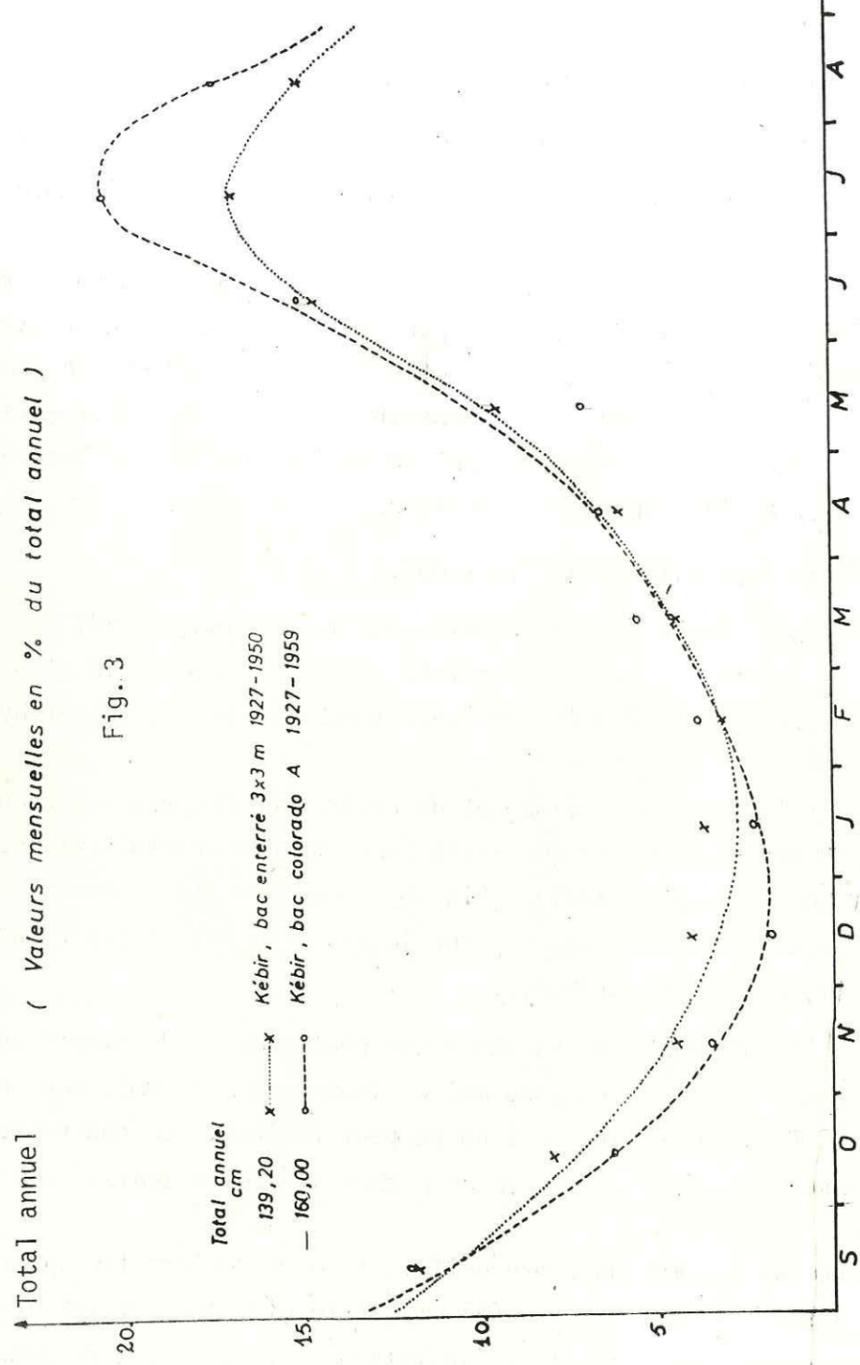


Fig. 5. PRECIPITATION À SIDI AOUIDET
VALEURS ANNUELLES

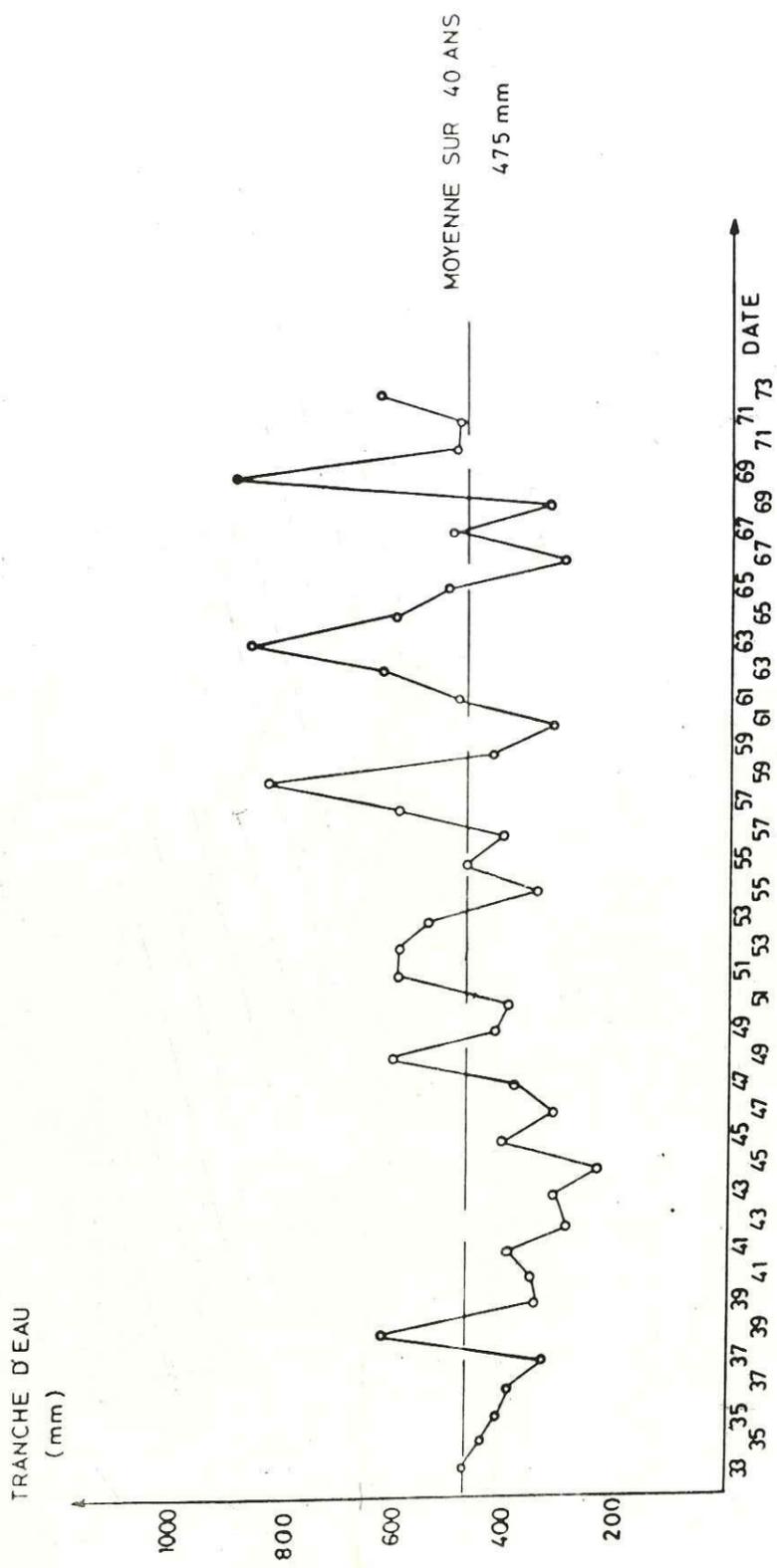


Fig. 6. PRECIPITATIONS A SIDI AOUIDET
VALEURS DU MOIS D'OCTOBRE

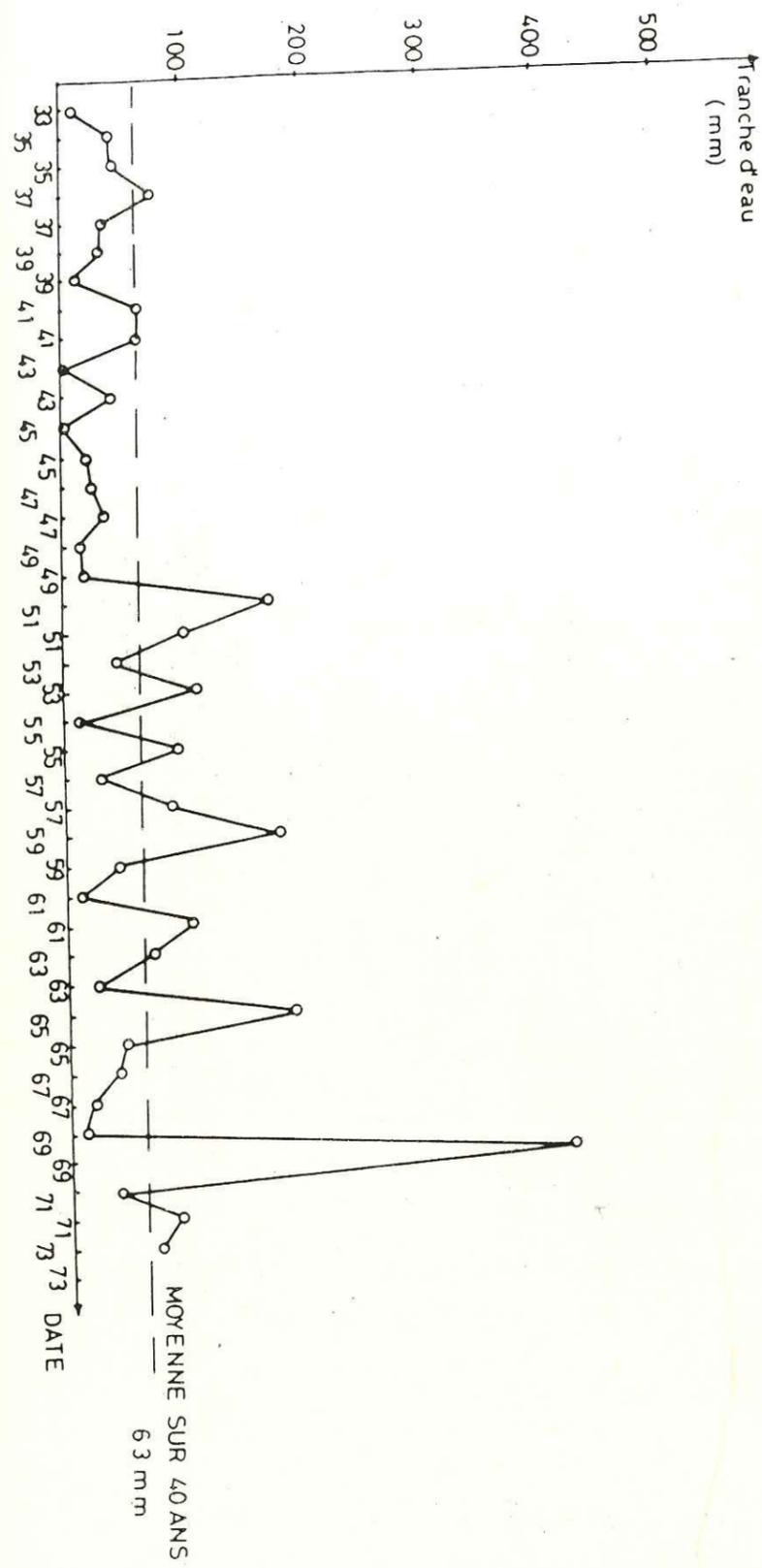


Fig. 7. PRECIPITATIONS A SIDI AOUIDET
VALEURS DU MOIS DE JUILLET

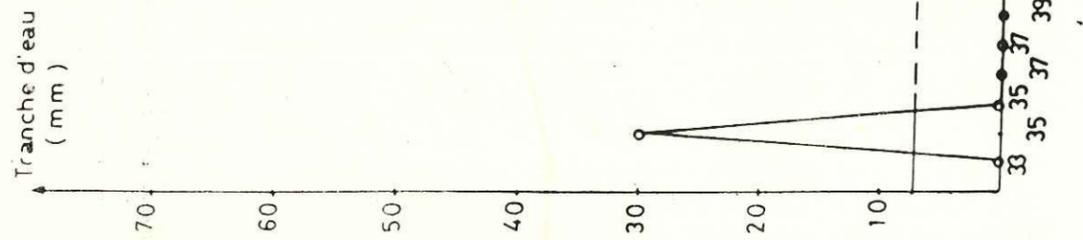
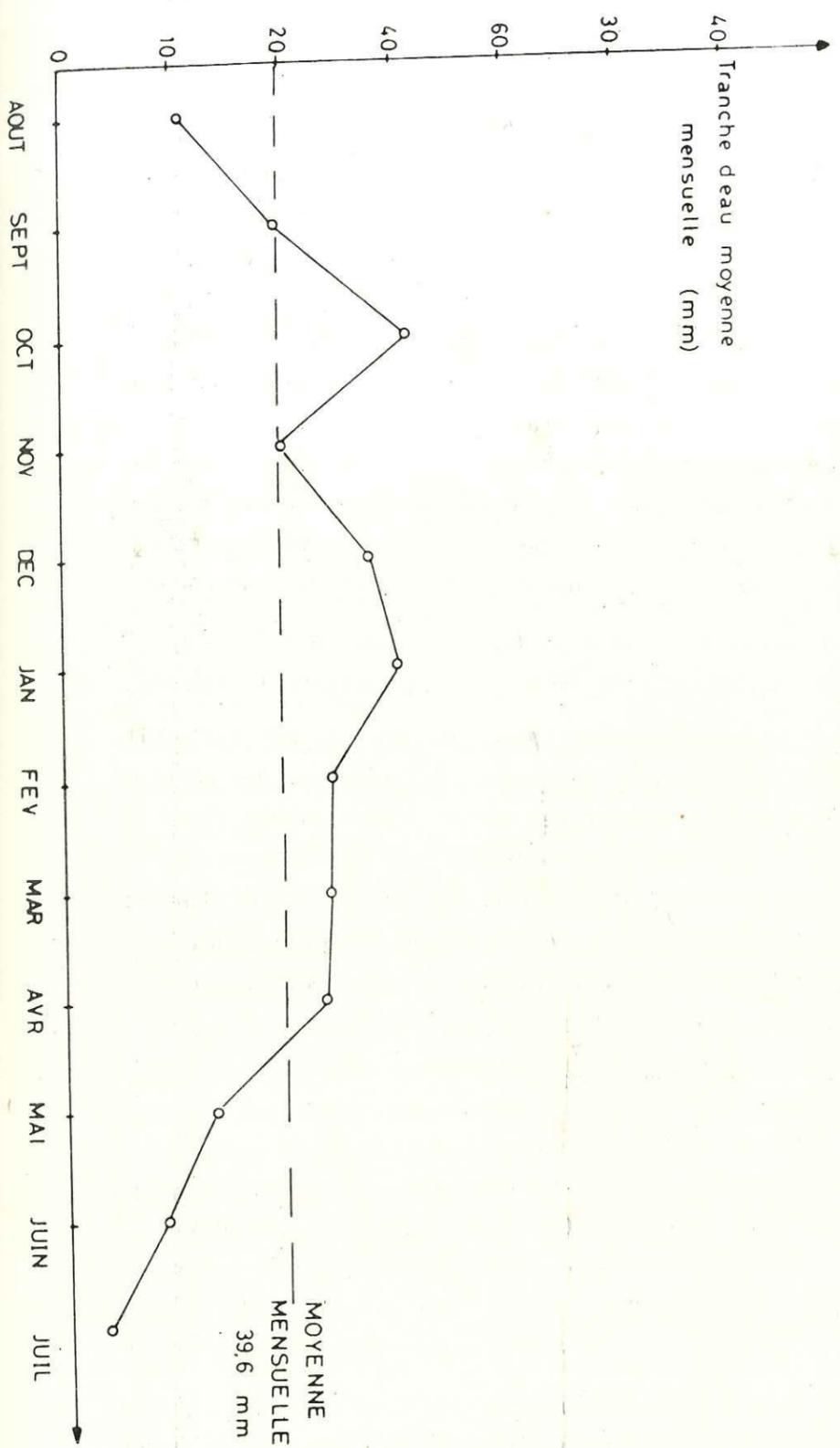


Fig. 8. PRECIPITATIONS A SIDI AOUIDET
MOYENNE MENSUELLE



Si l'on considère l'ensemble des 40 années, la moyenne d'octobre y est à six reprises supérieure à 100mm, mais aussi une dizaine de fois inférieure à 20mm.

Seul, le graphique des moyennes mensuelles (Fig. 8) semble suggérer une loi annuelle de répartition : il existerait une saison sèche (mai - août) et une pluvieuse (septembre avril), mais nous venons précisément de constater quelles irrégularités se cachent sous cette apparence. En fait, pour chaque année, et surtout pour celles qui ont été très pluvieuses, un graphique hebdomadaire ou quotidien de répartition montrerait que l'essentiel de la pluviosité peut être acquis en quelques courtes périodes.

Cette constatation est fondamentale pour le problème qui nous occupe : les pluies, sur le bassin versant, sont surtout des averses torrentielles. Elles surviennent après des périodes de dessiccation superficielle parfois prolongées.

L'évacuation d'une grande masse d'eau dans un laps de temps relativement bref amplifie l'érosion et favorise de ce fait l'envasement de la retenue.

D'après THEVENIN (1960) l'agressivité des précipitations se manifesterait au dessus d'une chute d'environ 15 mm en une heure, qui recouvre des pointes instantanées de 1 mm par minute, libérant des masses d'eau, animées d'une énergie considérable. Les risques sont encore grands pour des averses de 20 mm en deux heures et même pour des pluies intenses mais continues donnant plus de 30 mm en 24 heures. Les pluies de plus de 100 mm en trois jours consécutifs, sont tout aussi redoutables car le terrain superficiel, qui reste saturé, favorise le ruissellement.

La fréquence annuelle des pluies plus ou moins fortes à la station de Sidi Saïd est la suivante :

Pluie (mm/jour)	20 - 30	30 - 50	50 - 100	> 100
Fréquence annuelle	4,5	2,1	1,4	0,05

Pluie dépassant 100 mm/3 jours : 0,27 fois par an.

Nous pensons que ces valeurs ne reflètent pas fidèlement la réalité du phénomène et nous souhaitons que des études hydrologiques plus poussées puissent déterminer avec d'avantage de précision les taux de précipitation à partir

desquels l'érosion devient sensible. Le développement de cette recherche requiert des appareils et des observateurs, ce dont notre bassin versant est actuellement dépourvu.

2.4. - Les débits de l'Oued El Kebir.

L'étude des débits porte sur des valeurs enregistrées à la station de Sidi Aouidet pendant la période de septembre 1933 à août 1973.

Mois débits(m ³)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Moyenne	0,7	0,6	0,6	0,4	0,2	0,1	0,05	0,1	0,3	1	0,3	0,2	0,4
Minimum	0	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03
Maximum	4	5,8	8,9	3,7	0,8	0,8	0,2	0,7	3,6	25,2	2,4	1,45	33,1

Tableau 3. Débits mensuels et annuels de l'Oued El Kebir à la station de Sidi Aouidet de 1933 à 1973.

Ainsi que l'on peut s'y attendre, après ce que nous venons de dire à propos des précipitations, le débit de l'Oued El Kebir est particulièrement variable. Comme le montre la figure 9, les débits accusent une dispersion telle qu'aucune loi ne semble pouvoir en être déduite ; toutefois des maxima se dégagent assez nettement. Les maxima, tout comme les minima, ne peuvent pas être attribués aux mêmes mois deux années de suite. On remarque seulement que pendant 40 ans d'observation, les plus fortes valeurs ont été enregistrées au mois d'octobre et les plus faibles au mois de juillet.

Le tableau 4 résume les caractéristiques des crues maximales annuelles enregistrées de 1933 à 1973.

Deux faits importants sont à retenir :

- Le temps de base est généralement faible : le minimum est de 12 heures et le maximum de 240 heures; la moyenne est de 58 heures.
- Les débits de pointe ainsi que les débits spécifiques maximaux sont très importants. Les valeurs maximales ont été enregistrées à l'occasion

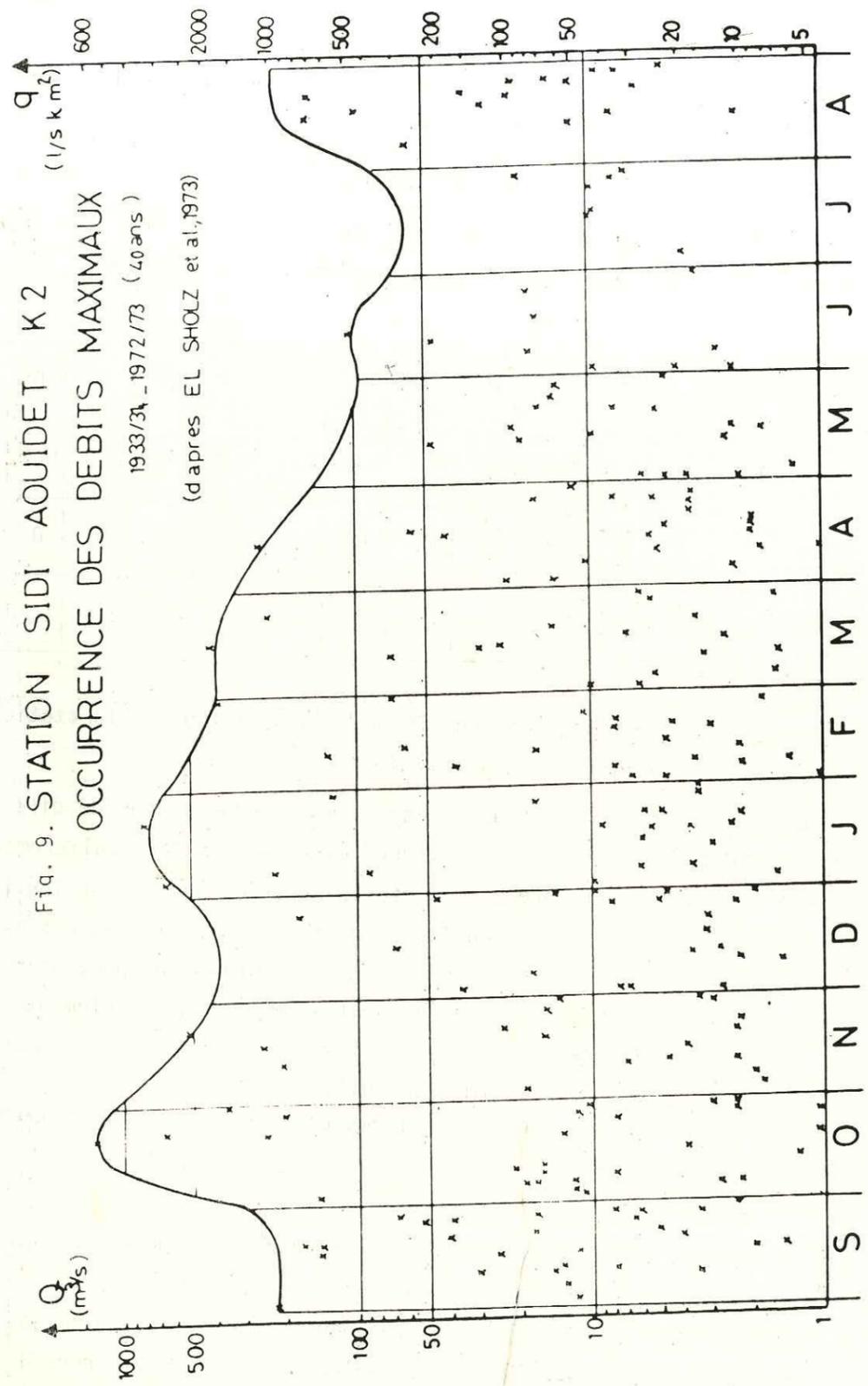


Tableau 4.

STATION Sidi Aouidet
 Tableau des Caractéristiques des Crues
 Bassin Versant = 228 Km²

Année	Date	F moy (mm)	Vr (10 ³ m ³)	Hr (mm)	Kr (%)	Tbase (heures)	Q max (m ³ /s)	q max (l/s.km ²)
1933/34	17. 6.	23	276	1,2	5,3	32	16	70
1934/35	24. 8.	3	528	2,3	77	69	15	66
1935/36	25. 8.	12	126	0,6	5	12	28	123
1936/37	14.11.	61	2.363	10,4	12,1	96	67	294
1937/38	21. 8.	24	168	0,7	2,9	26	34	149
1938/39	27. 2.	66	5.430	24	36	48	385	1688
1939/40	1. 9.	36	1.891	8,2	23,4	55	219	960
1940/41	21. 9.	1	42	0,2	14,2	26	4	18
1941/42	3.12.	54	621	2,7	5,1	46	35	153
1943/44	18. 8.	53	1.021	4,5	8,4	48	210	921
1944/45	20. 9.	5	230	1	22	26	42	184
1945/46	26. 1.	88	6.651	29	33	63	782	3429
1946/47	23. 8.	40	446	1,9	4,9	72	21	92
1947/48	21.10.	19	1.434	6,3	33,8	45	242	1061
1948/49	6. 1.	81	7.160	31	39	72	219	960
1949/50	15. 8.	83	1.500	6,6	8	28	157	689
1950/51	22.10.	153	9.804	43	28	240	660	2894
1951/52	16. 9.	76	2.120	9,3	12,2	92	160	702
1952/53	15. 3. 0. 0.	108 46	4.267 1.675	18,7 7,3	17,3 15,9	92 44	411 128	1802 562
1953/54	14. 4.	62	6.562	29	46	67	260	1140
1954/55	22. 8.	22	909	4	18	49	152	667
1955/56	3. 1.	91	9.019	40	43	54	629	2758
1956/57	27. 9.	22	159	0,7	3,2	48	6	26
1957/58	16.11.	91	2.427	10,6	11,7	58	259	1136
1958/59	27.10. 2. 4.	120 60	2.927 1.528	12,8 6,7	10,7 11,1	64 60	210 14	921 61
1959/60	21.11.	78	3.404	14,9	19,1	24	520	2280
1960/61	27. 9.	23	285	1,3	5,4	32	18	79
1961/62	2.10.	94	3.006	13,2	14	24	147	645
1962/63	25. 6.	46	175	0,8	1,7	48	19	83
1963/64	24.12. 28. 1.	111 138	3.042 5.750	13,4 25,2	12 18,2	44 112	171 126	750 553
1964/65	30.10.	160	5.288	23	14,5	40	356	1561
1965/66	14. 6.	31	1.138	5	16	34	112	491
1966/67	27. 7.	15	491	2,2	15	20	20	00
1967/68	9. 9.	56	3.463	15	27	69	70	307
1968/69	7. 8.	9	296	1,3	14,7	26	59	259
1969/70	25. 9. 22.10.	189 160	9.243 29.000	40,5 132	21,5 83	87 120	658 1280	2890 5613
1970/71	9. 2.	101	3.836	17	17	82	131	574
1971/72	2.10.	77	836	4	4,8	119	11	48
1972/73	17. 3. 27. 3.	33 132	1.313 20.600	5,8 90,5	17,5 68,5	58 196	10 243	44 1065

Légende du tableau 4

- P - moy = pluie moyenne par rapport à la superficie d'un bassin versant
- V_r - volume ruisselé
- H_r - hauteur d'eau ruisselée ou lame d'eau écoulée
- K_r - coefficient de ruissellement
- T_{base} - temps de base (durée de la crue qui a été séparée de l'écoulement de base).
- Q_{max} : débit maximum.

des crues exceptionnelles d'octobre (1969) : $1280 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un débit spécifique de 5613 l/s Km^2 . La valeur minimale est de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un débit spécifique de 18 l/s Km^2 . La moyenne est de $204 \text{ m}^3/\text{s}$ soit un débit spécifique de 752 l/s Km^2 .

On le voit, les réserves d'eau accumulées dans la retenue sont dues à des crues de courte durée mais aux débits très élevés, entraînant une érosion très intense du bassin versant. L'essentiel de l'apport annuel total peut être dû à un nombre très limité de crues. (Généralement trois ou quatre dans l'année, fréquemment une ou deux seulement).

Par ailleurs, la période de retour des forts débits est relativement brève (Fig. 10) : on peut s'attendre à voir apparaître une crue de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ tous les deux ans et une de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ tous les 10 ans.

De même si l'on se réfère aux apports annuels - en moyenne $12,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ les écarts peuvent être importants (Fig. 11). On passera ainsi de valeurs souvent modestes, (les débits de 13 années sont $< 510 \text{ m}^3$ pour 40 ans) à des chiffres très élevés de l'ordre de 30 Mm^3 , voire même 8510 m^3 dans le cas de l'exceptionnelle année 1969 - 1970.

2.5. - Conclusion.

Les conditions climatiques qui caractérisent le bassin versant font de l'Oued El Kebir un cours d'eau au régime irrégulier. L'efficacité de l'aménagement se trouve affectée à la fois par l'irrégularité des apports et par l'importance de l'évaporation de l'eau stockée. Elle pâtit également du caractère torrentiel des précipitations, provoquant une forte érosion et, par là même, le colmatage rapide de la retenue.

Fig. 10. PERIODE DE RETOUR DES DEBITS MAXIMAUX ANNUELS

(Distribution log-norm)

STATION SIDI AOUIDET (K 2)

Periode 1933/34 - 1972/73 n=40

(D'après el SHOLZ et AL 1973)

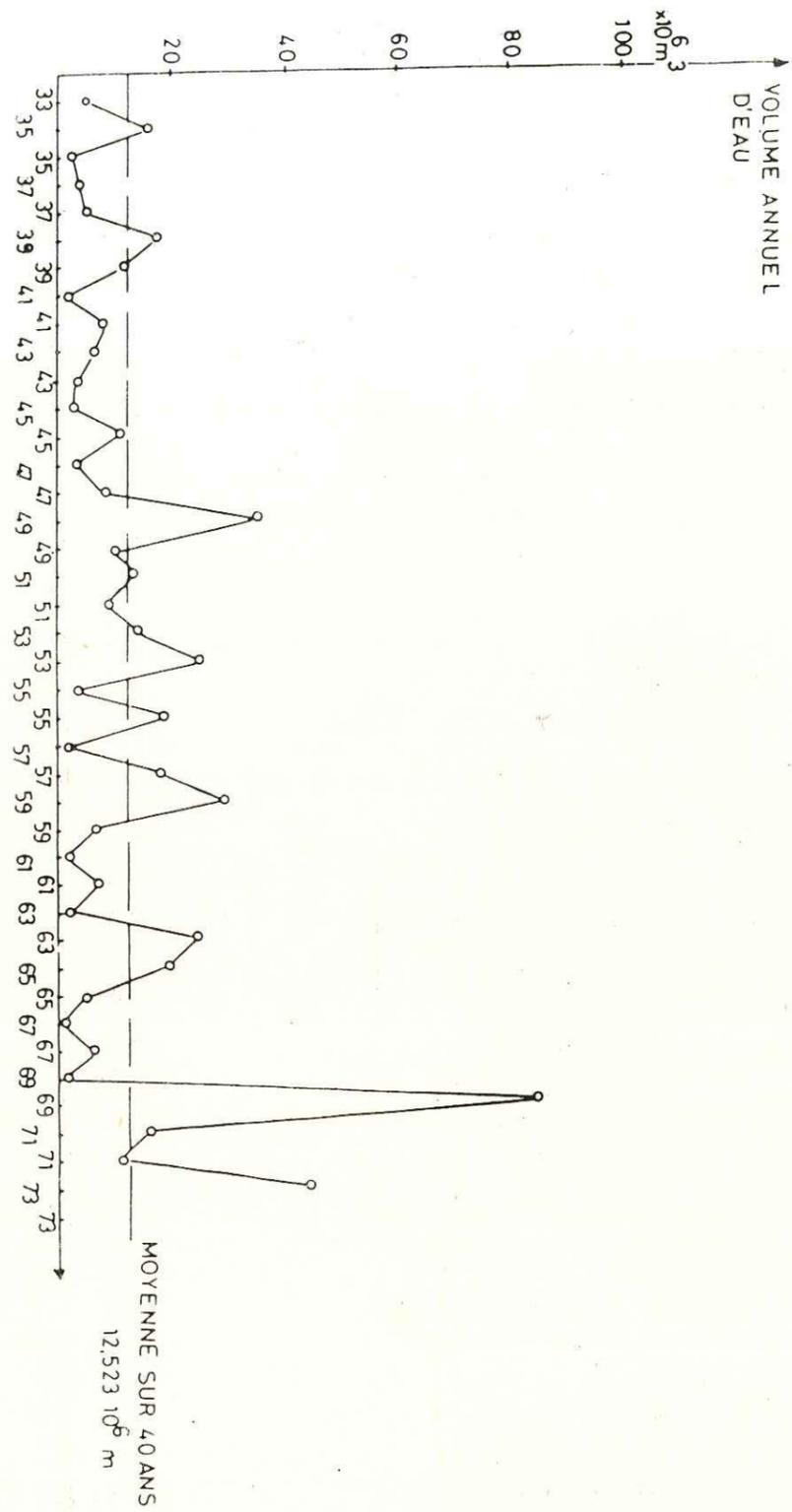
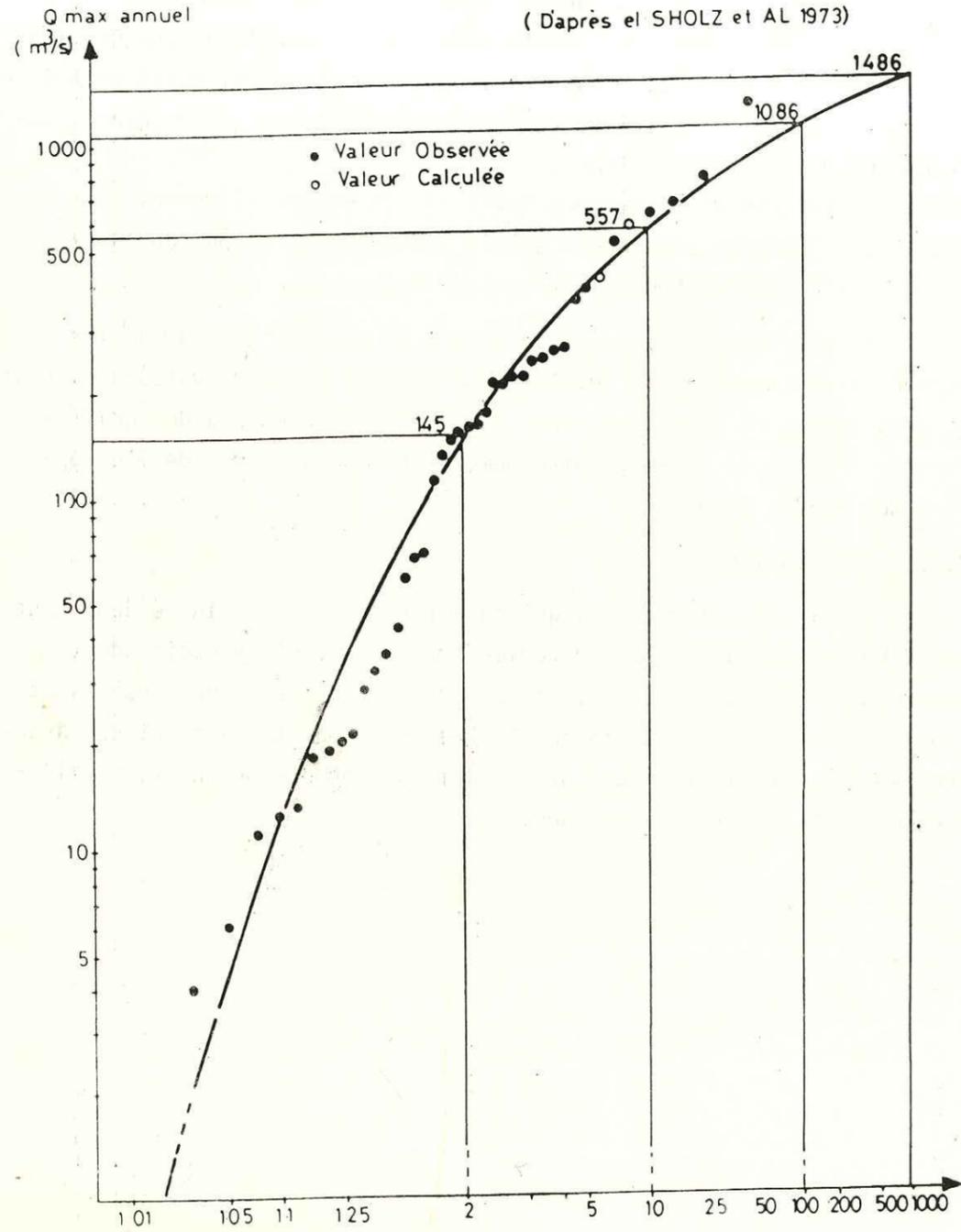


Fig. 11. APPORT ANNUEL D'EAU DE L'OUED EL KEBIR STATION DE SIDI AOUIDET

DEUXIEME PARTIE : Etude géologique

Introduction

Premier chapitre : Cadre géologique régional

Deuxieme chapitre : Etude de la fracturation

PREMIER CHAPITRE

CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL

Introduction :

De nombreuses enquêtes menées à la suite d'accidents survenus à des grands barrages (Malpasset 1959 , Teton 1972) ont montré l'intérêt des reconnaissances géologiques sérieuses menées avant la construction. Ces reconnaissances permettent d'attirer l'attention sur les risques éventuels pouvant entraîner des problèmes des fuites ou de stabilité, lesquels problèmes peuvent causer des dégâts importants souvent financiers mais parfois - hélas - en vies humaines.

Dans de telles études, il a été toujours fait appel à l'analyse structurale pour expliquer des particularités géotechniques (anisotropie de vitesses sismiques selon les directions par exemple) - ou une hétérogénéité des caractéristiques hydrauliques. Ainsi, l'étude des structures tectoniques (failles, diaclases, fentes etc.) aux différentes échelles d'observation, est-elle devenue une nécessité primordiale pour tout projet de barrage. (FILLIAT G. 1981).

La liaison entre les caractéristiques hydrauliques d'un massif et le type de déformation qu'il a subi, a été confirmée par de nombreuses études hydrogéologiques menées dans des contextes géologiques et climatiques différents. Il en résulte que l'identification des conducteurs possibles (par leur caractéristiques géométriques) suivie de l'analyse des implications de ces caractéristiques compte tenu de leurs positions par rapport à l'ouvrage permet la plus part du temps de préciser l'existence ou non des risques de fuites. Dans le cas du barrage de Sidi Boubecker le problème se pose d'une manière différente. Le barrage étant construit et les fuites existantes, il s'agit de montrer si l'étude structurale du site permettait de prévoir de telles pertes. Par conséquent, dans tout ce qui suivra, la reconstitution de l'histoire des déformations subies par le synclinal de l'oued El Kebir, constitue le fil directeur de la recherche d'un lien entre les particularités structurales et les fuites.

I.1. - Synthèse des connaissances récentes.

La région de l'Oued El Kebir appartient à la Dorsale tunisienne, partie NW de l'Atlas tunisien.

L'ossature de cette Dorsale est formée par des plis serrés orientés NE-SW dont les plus importants déterminent les massifs de Zaghouan, Fkirine-Saïdane, Bargou-Serdj et Maktar-Kessara.

Le synclinal de l'Oued El Kebir, au coeur duquel coule l'Oued El Kebir, est bordé par l'anticlinal du Dj. Mansour au NW, et par l'anticlinal du Dj. Bargou au SE ; il est par ailleurs limité au NE par le graben qui détermine la plaine du Fahs et au SW par celui de Siliana. (Fig. I.1).

La région de Bargou a été étudiée par L. PERVINQUIERE en 1930 puis, plus en détail, par L. VOLPELIERE en 1935. L. CALEMBERT lui consacra à la même époque un chapitre de son mémoire.

En 1951 G. CASTANY lui consacra un chapitre de sa thèse, comportant en particulier des coupes sériees.

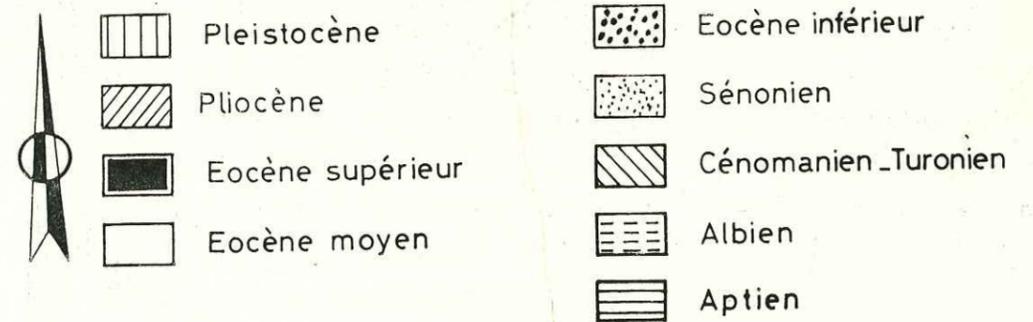
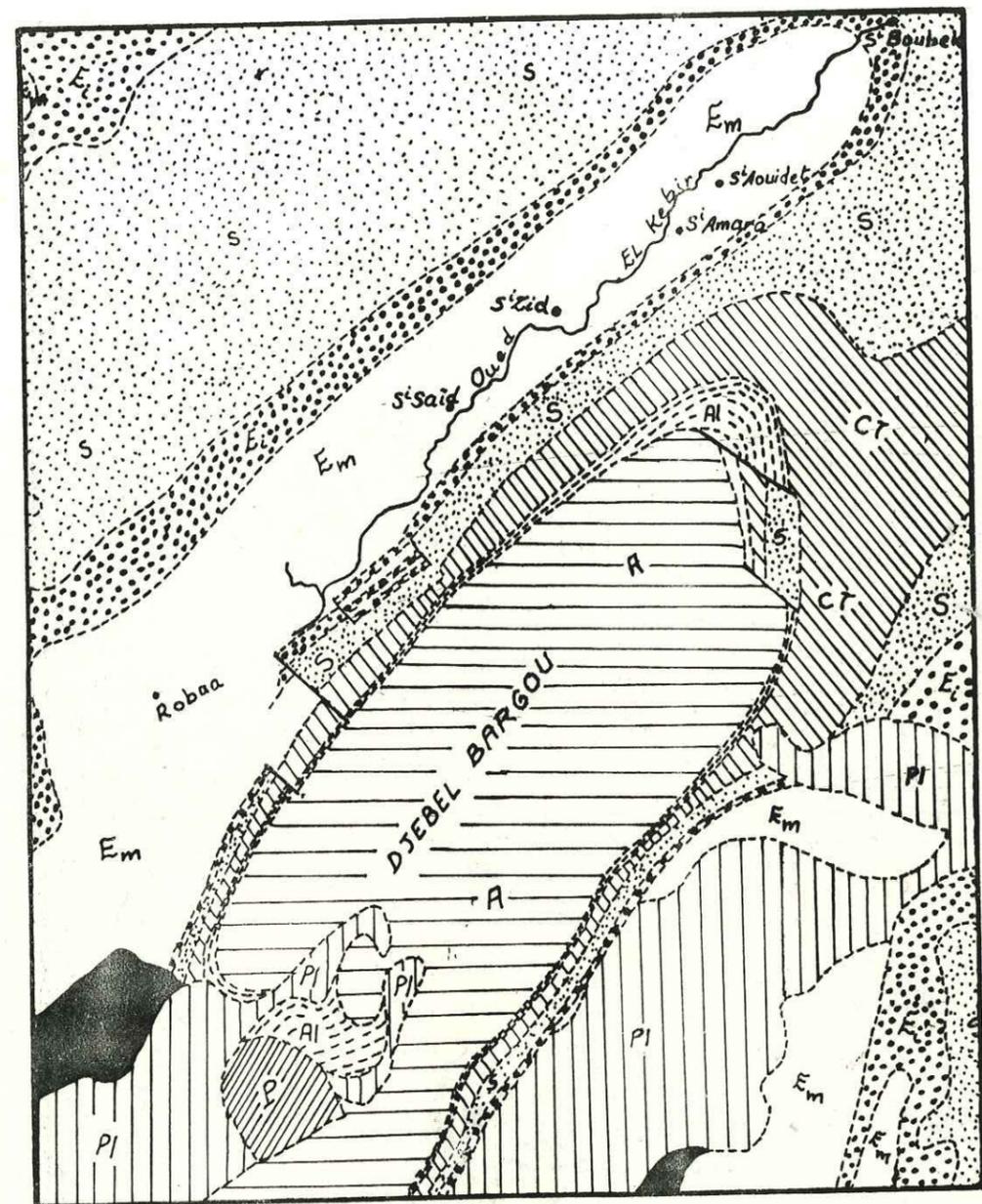
Plus récemment, A. JAUZEIN (1967), a proposé une série de coupes stratigraphiques dans l'anticlinal du Dj. Bargou et le synclinal de l'Oued El Kebir. Il a cependant surtout insisté sur la morphologie et les formations quaternaires. Sa carte géologique du synclinal du Kebir et du Dj. Mansour a été publiée en 1961.

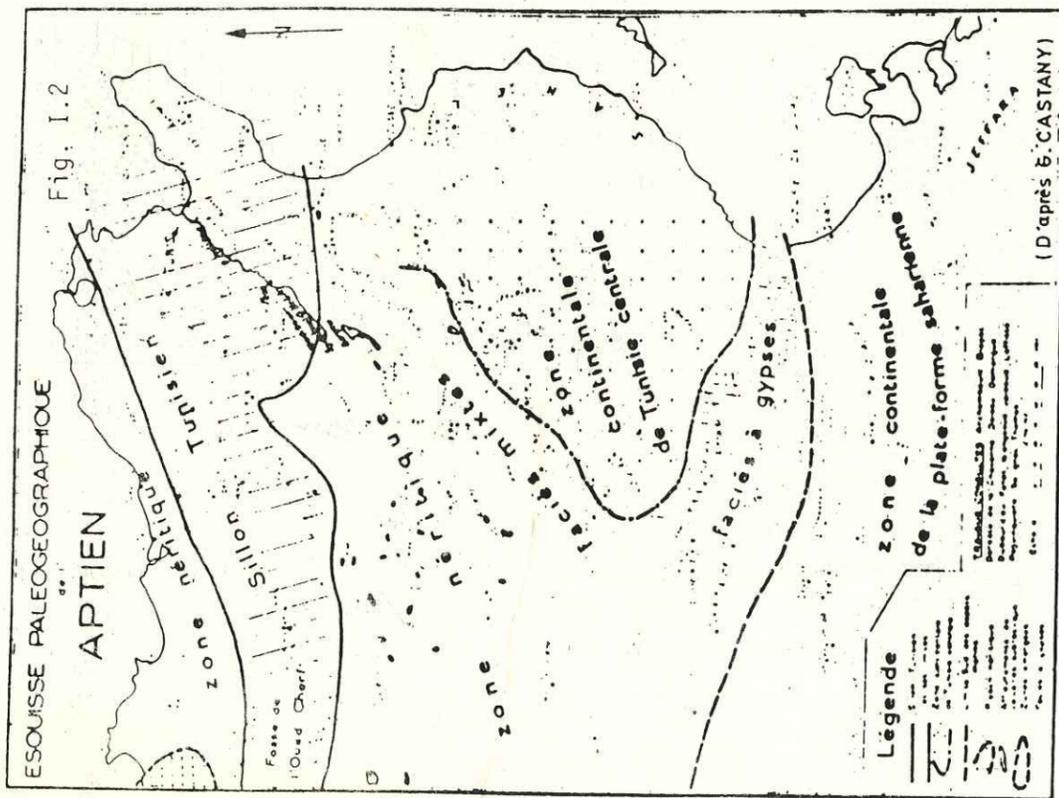
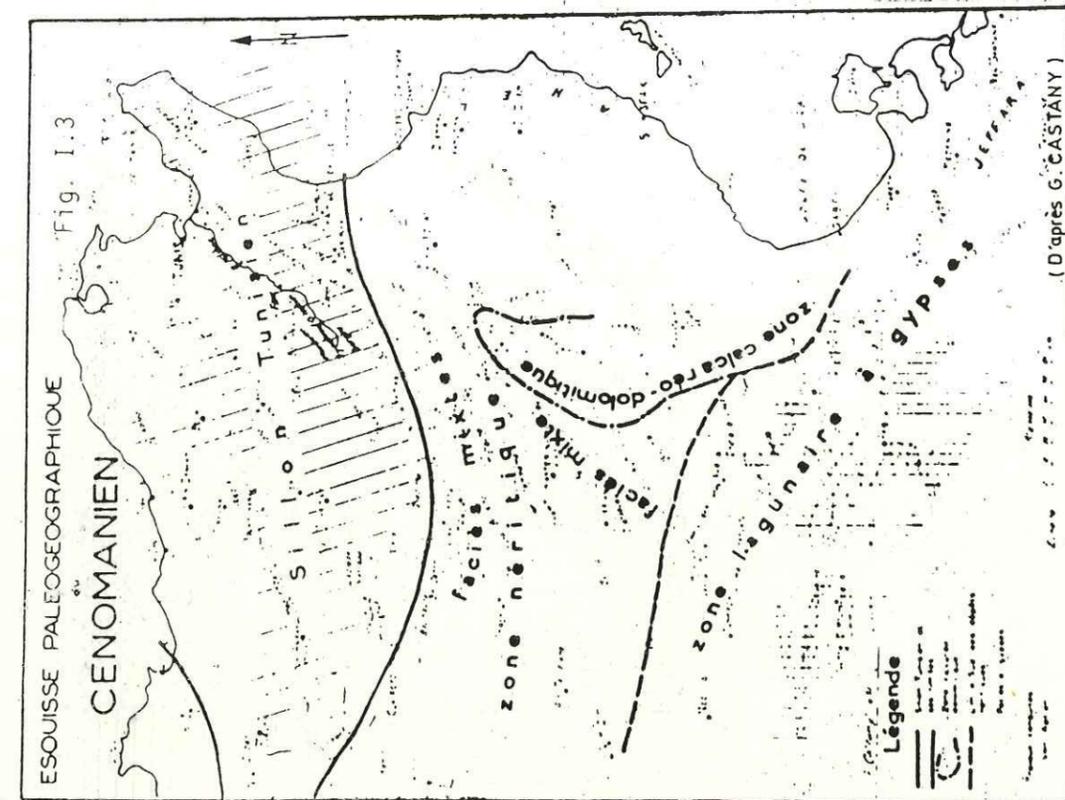
Enfin M. TURKI (1975), dans son étude structurale, a abordé le massif Serdj-Bargou. Il y a particulièrement analysé les principaux accidents tectoniques du secteur et a retracé son évolution paléogéographique du Mésozoïque à nos jours.

I.1.1. - Evolution paléogéographique.

On l'a vu, la vallée de l'Oued El Kebir est bordée au SE par la zone anticlinale du Dj. Bargou. Au sein du sillon tunisien, un haut-fond à l'emplacement des actuels reliefs des Dj. Bargou et Serdj, est apparu dès l'Aptien. (Fig. I.2). Ce bombement, à l'origine d'un régime subrécifal, continue à l'Albien inférieur et moyen. Au Cénomaniens, malgré l'extension vers le Sud du sillon tunisien (Fig. I.3), le secteur continue à fonctionner comme haut-fond avec, toujours, une sédimentation réduite assez significative.

Fig. I.1 Carte géologique du secteur El Kebir - Bargou





Accentuée au Sénonien, cette tendance positive se transforme progressivement en un véritable soulèvement, responsable de la lacune importante du Dano-Montien et du Thanétien inférieur au sommet du massif et à la réduction des épaisseurs sur ses flancs.

Au Lutétien inférieur la mer à globigérines située à l'emplacement de l'ancien sillon tunisien s'étend aussi jusqu'au secteur étudié (Fig. I.4).

Au Lutétien supérieur un léger mouvement négatif est à l'origine du faciès marneux qui termine le cycle sédimentaire éocène (Fig. I.5).

A l'Oligocène, les zones émergées (localisées pendant l'Eocène au niveau de l'île de Kasserine et de la plate forme saharienne) s'étendent sur une grande partie de la Tunisie occidentale ; la partie orientale de la Dorsale tunisienne connaît alors des dépôts gréseux marins (Fig. I.6). Un exhaussement général y met fin ; il achève la phase pré-orogénique.

La première phase atlasique responsable de l'élaboration des plis orientés NE - SW s'est déroulée entre la fin de l'Oligocène et le Tortonien. Il faut noter qu'au Sud du Dj. Bargou cette phase est totalement miocène vu l'existence de dépôts burdigaliens marins concordants (Fig. I.7), notamment dans la région de Siliana - Sers (N. Ben Ayed - 1975).

Cette première phase est suivie d'une deuxième phase pendant et après le dépôt du Miopliocène continental, localisé dans les bassins subsidants (Fig. I.8). Durant cette phase, les plis se sont accentués et déversés vers le SE.

Il est intéressant de noter qu'on ne trouve aucune trace de ces dépôts oligocènes et miopliocènes dans le synclinal de l'Oued El Kebir.

I.1.2.-Contexte structural.

Le bassin versant de l'Oued El Kebir occupe un Synclinal à fond plat d'axe NE-SW plongeant vers le NE.

Il est encadré au NW et au SE respectivement par les anticlinaux Dj. Mansour à coeur Senonien et Dj. Bargou à coeur Albo-Aptien (Fig. I.9). Ce Synclinal - à structure simple - constitue en gros une zone tectoniquement calme. En effet, les perturbations tectoniques se résument à quelques failles (décrochements et failles inverses) et flexures, essentiellement développées sur les flancs.

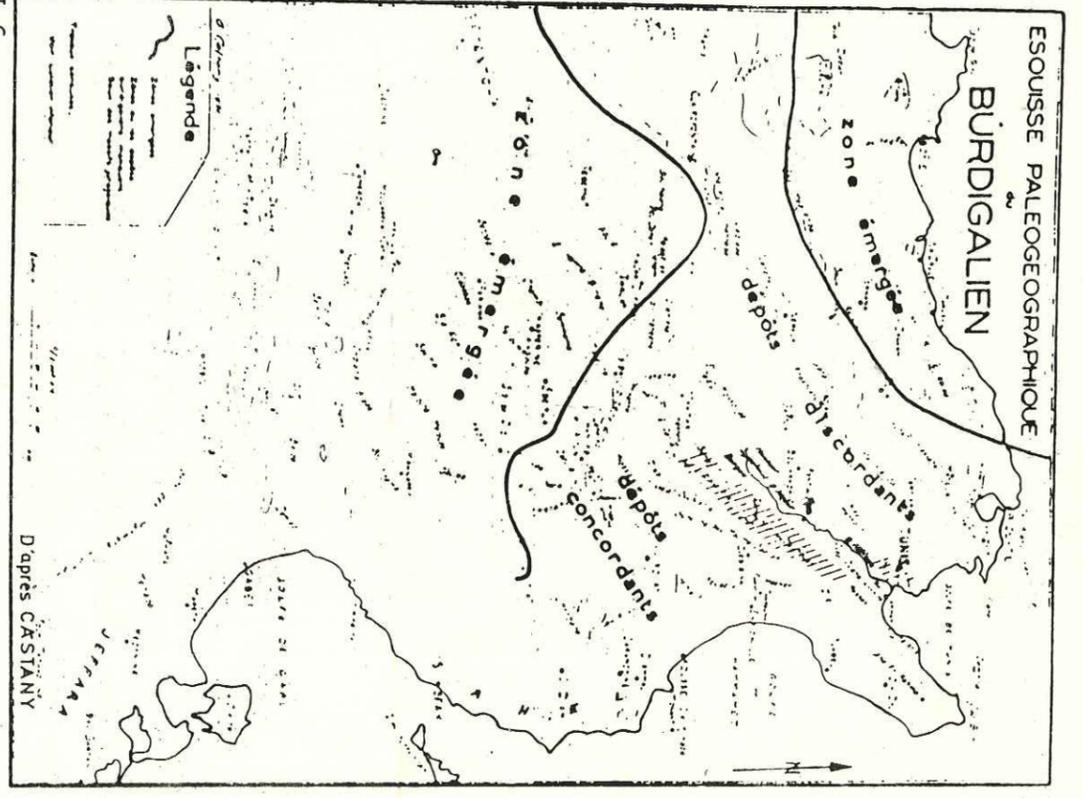
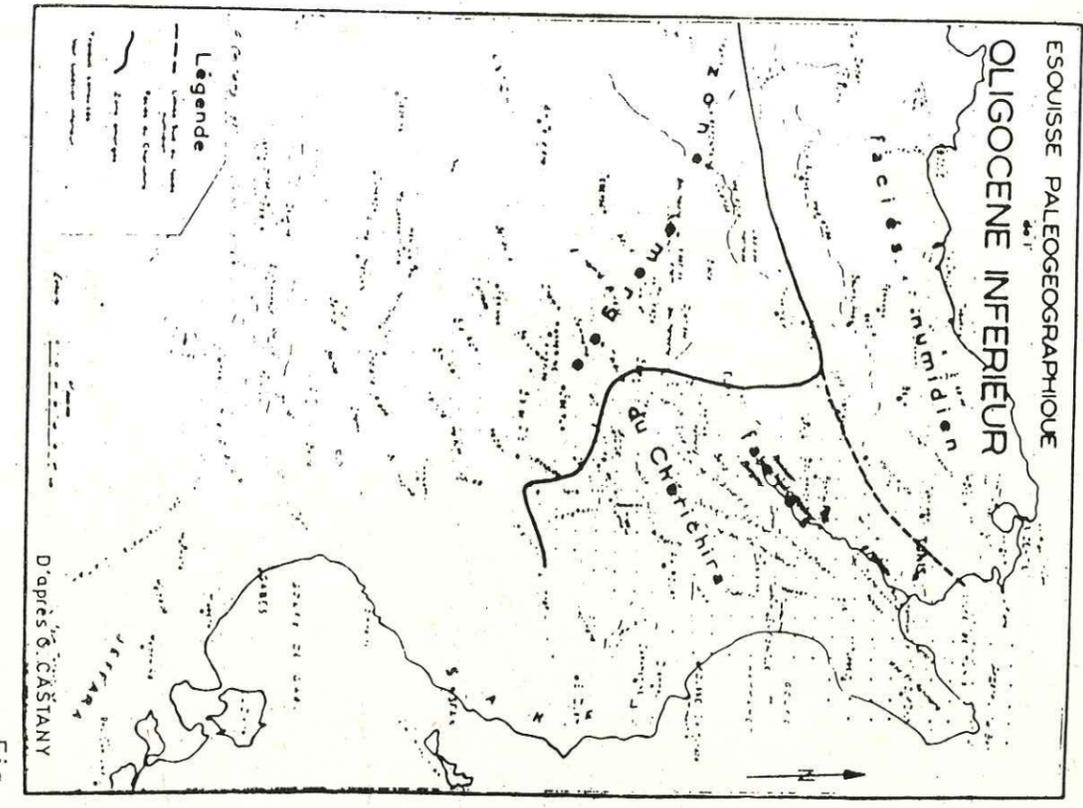
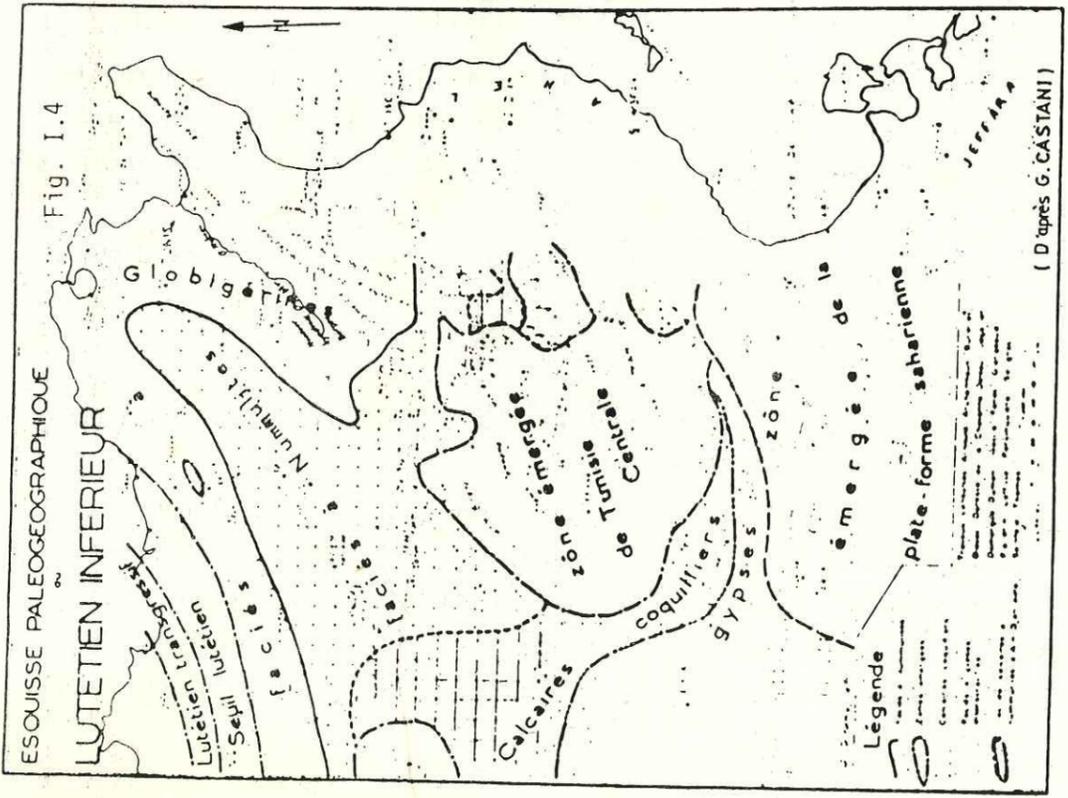
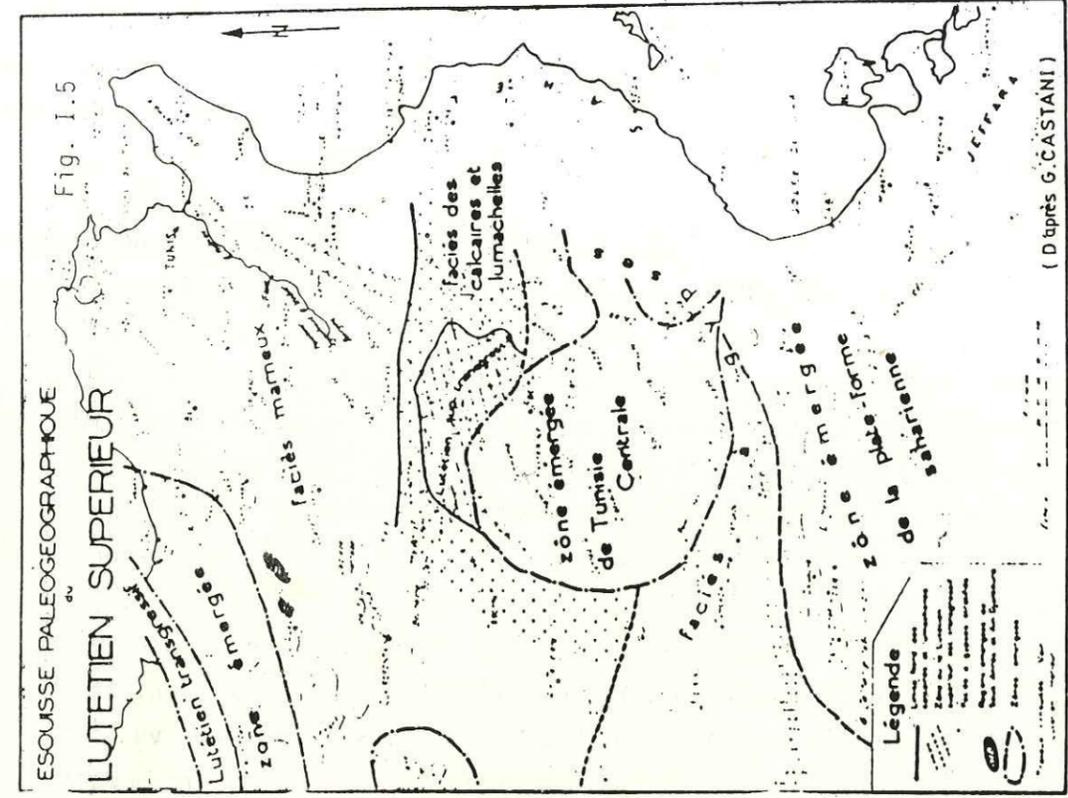


Fig. I.6

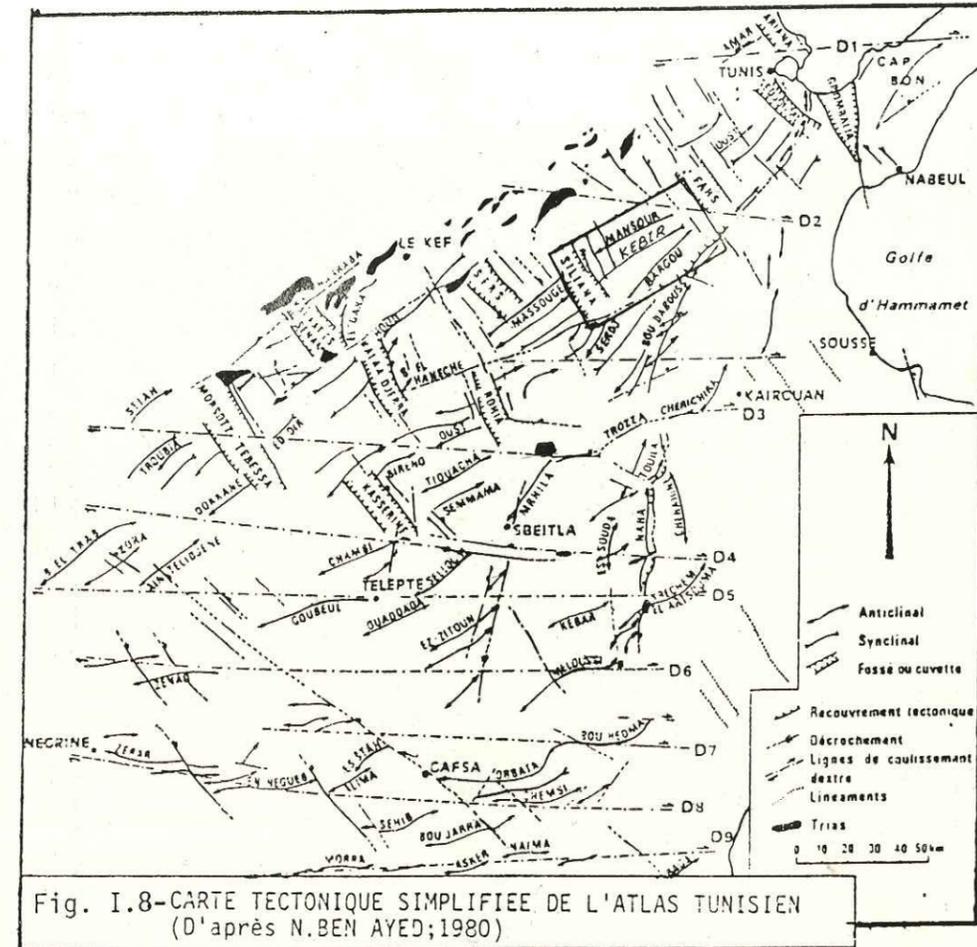
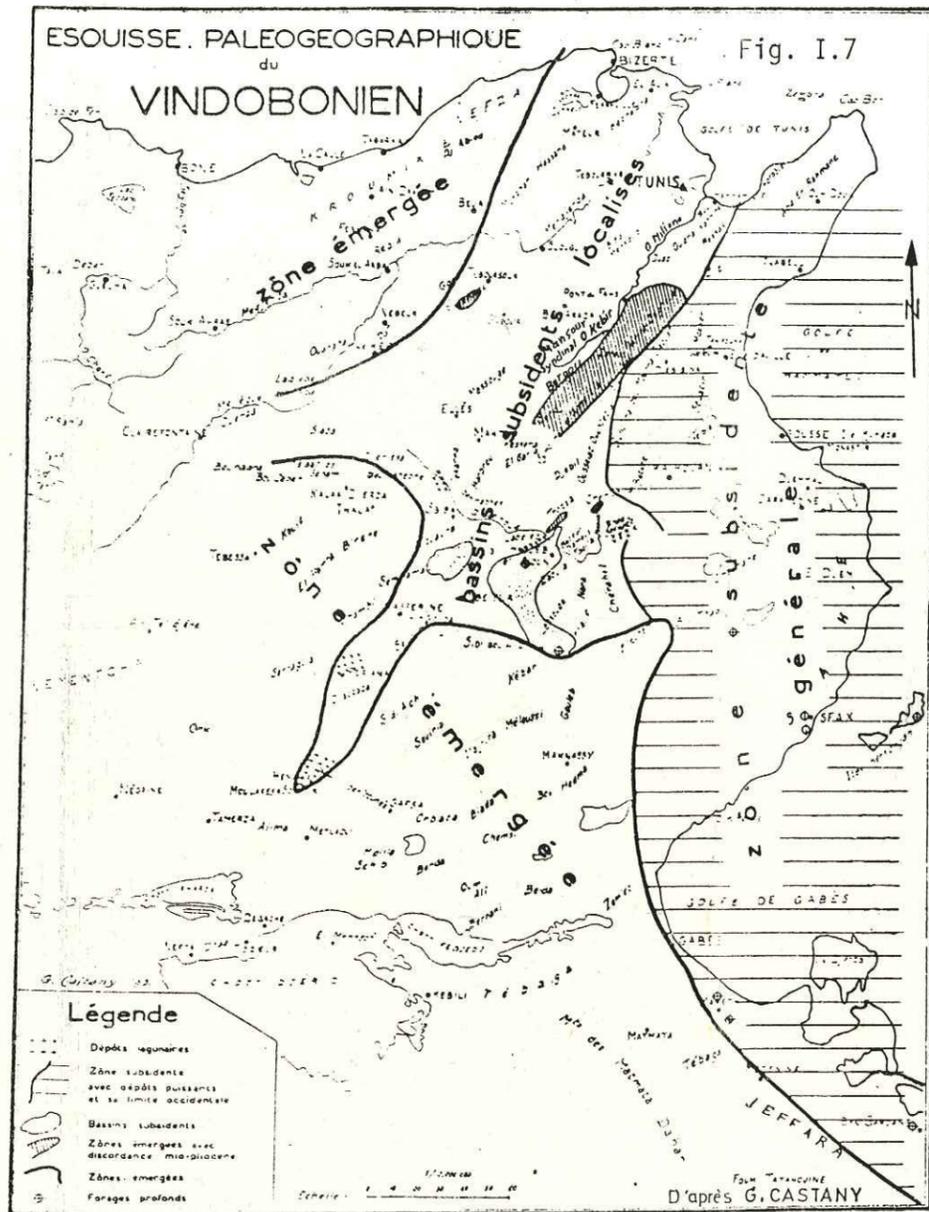
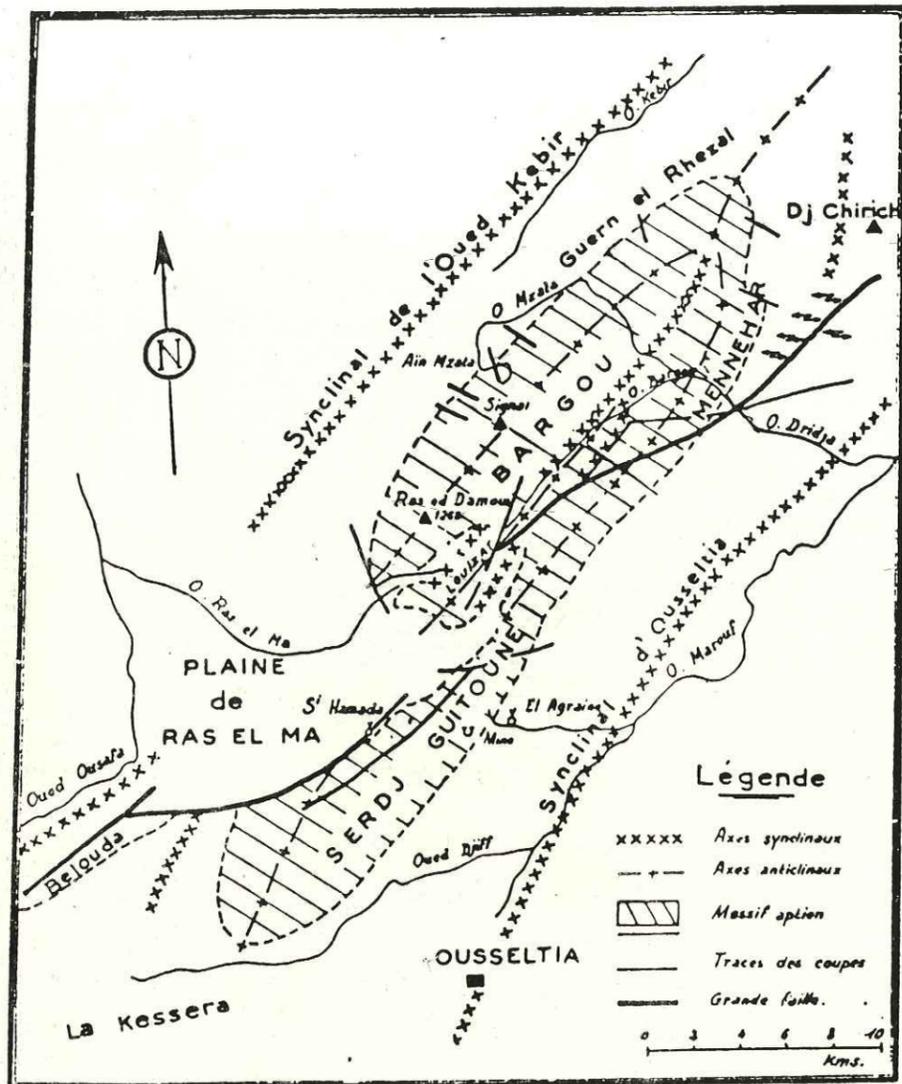


FIG. I.9-Esquisse géologique du Bargou.



(D'après SCHOELER 1931)

I.2. - Lithostratigraphie du bassin versant

I.2.1. - Le Substratum.

"Les unités lithostratigraphiques (groupes, formations, membres, etc.) sont définies par un certain nombre de caractères physiques présents dans une coupe-type.

Le nom d'une unité doit être utilisé tant que ses caractères existent ; il doit être abandonné lorsqu'ils viennent à manquer pour faire place à un terme basé sur des caractères qui remplacent les premiers. Les limites lithostratigraphiques ainsi définies peuvent évidemment être obliques par rapport aux lignes chronologiques et il ne faut passer des unes aux autres qu'avec la plus extrême prudence "(P.F. BUROLLET, 1956).

Les unités litho-stratigraphiques telles qu'elles ont été définies par P.F. BUROLLET constituent le moyen le plus prudent pour l'étude de la stratigraphie dans la plupart des structures tunisiennes.

Nous nous proposons ici de présenter par ordre chronologique, les différentes formations affleurant dans le bassin versant ; nous devons cependant attirer l'attention sur le fait que les attributions à l'échelle stratigraphique générale sont celles qui avaient été avancées par P.F. BUROLLET et qu'elles ne sont pas toutes définitives. Actuellement, de nombreux chercheurs ont repris ce problème, à propos duquel une mise au point (tableau I.1) a été publiée par D. FOURNIE (1978).

1) - Formation SERDJ : Aptien supérieur.

Ce sont des calcaires à faciès neritique subrécifal. Leur sommet est constitué par une alternance de calcaires et de marnes gréseuses ou carbonatées. Les marnes totalisent 180 m et les calcaires 55 m.

2) - Formation FAHDENE : Albien, Cénomanién

La partie albienne est constituée de deux termes :

- des marnes gris foncé à miches ferrugineuses passant vers le bas à des marnes gris-bleu.
- des marnes grises avec quelques intercalations plus calcaires.

La partie cénomaniénne comporte trois ensembles :

Tableau I.1.
NOMENCLATURE LITHOSTRATIGRAPHIQUE

AGES ET ETAGES		FORMATIONS		
2 QUATERNAIRE		PORTO-FARINA		
7 PLIOCENE	ASTIEN	SEGUI	RAF-RAF	
	PLAISANCIEN			
12 MIOCENE	MESSINIEN		O. BEL KHEDIM	
	Sup. TORTONIEN	KECHABTA	SAOUAF MELQUART	
		OUM	BEGLIA	
	Moy. SERRAVAL.	O. El Meïah	DOUIL	MAHMOUD
	LANGHIEN	HAKIMA		
	18 Inf.	BURDIGALIEN	AIN GRAB	Membre basal
AQUITANIEN		EL HAOUARIA	MESSIOUTA SALAMMO	
26 OLIGOCENE		KORBOUS	Rep. N. VASCUS	
45 EOCENE	PRIABONIEN	DJEBS	CHERAHIL "B"	
	Sup. LUTETIEN		Rep. REINECHE	
		Inf. LUTETIEN		CHERAHIL "A"
	YPRESIEN	METLAOUI	FAID EL GUERIA BOU DABBOUS	
53 PALEOCENE	LANDONIEN		CHOUABINE	
	MONTIEN		EL MARIA	
65 CRÉTACE	DANIEN			
	MAESTRICHT.	BERDA	MERFEG ABIOD	
	CAMPANIEN			
	SANTONIEN	ALEG	BIRENG MISKAR ALEG	
	CONIACIEN		ANNABA	
	TURONIEN	BAHLOUL	GATTAR	
94 SUP.	CENOMANIEN	ZEBBAG	FAHDENE	
			ALLAM	
106 CRÉTACE	VRACON			
	Moy. APTIEN	ORBATA	SERDJ dolom	
		Sidi AICH	Calcaire	
	BARREMIEN		BOU HEDMA	
	HAUTERIVIEN		BOUDINAR	
	VALANGINIEN		MELOUSSI	
130 BERRIASIEN		DOULEB 101		
136 JURASSIQUE	MALM		NARA	
	DOGGER			
195 TRIAS	LIAS		horizon B	
	Sup. Moy. Inf.		Trias à Evaporites Trias carbonaté Trias gréseux	
225 PERMIEN				
CARBONIFERE				
DEVONIEN				
SILURIEN				
CAMBRIEN				
SOCLE				

d'après D. FOURNIE (SEREPT) 1978.

- alternances de calcaires très durs à patine jaune verdâtre et de marnes feuilletées gris-bleu. L'ensemble fait 60 m d'épaisseur.
- marnes gris foncé de 55 m d'épaisseur à 45% de CO₃Ca.
- alternances de calcaires argileux très durs se débitant en rognons et de marnes grisâtres cartonées. L'épaisseur des bancs calcaires et leur richesse en CO₃Ca augmentent assez régulièrement vers le bas. L'épaisseur totale de cet ensemble est d'environ 85 m dont 40 m pour une barre inférieure dépassant 80% en CO₃Ca.

3) - Formation BAHLOUL : Turonien basal

Ce sont des calcaires finement lités et généralement feuilletés ou cartonés ; certains lits sont plus marneux. Ils alternent parfois avec des marnes. Ils sont bruns, gris foncé ou noirs.

4) - Formation ALEG

Elle est divisée en deux parties distinctes :

a - l'ensemble ANNABA-BIRENO : Coniacien, Santonien inférieur.

- Les argiles de l'ANNABA : ces argiles grises fissiles avec quelques marnes sont finement sableuses à patine beige.
- Les calcaires du BIRENO : calcaires massifs gris foncé à patine claire, irrégulièrement lités, devenant plus marneux vers le haut.

b - les marnes du Santonien supérieur, Campanien inférieur.

C'est un ensemble marneux coupé, dans sa partie médiane, par une alternance de calcaires fins, de calcaires marneux et des marnes grises. Les marnes de couleur gris-bleu sont assez carbonatées et contiennent des intercalations calcaires.

5) - Formation de l'efférel Campanien moyen et supérieur, Maestrichtien et moyen.

Cette formation est divisée en cinq parties distinctes :

- a - l'actuel inférieures : 4 m de marnes (60% de CO₃Ca supérieur à 80%.

- b - masse calcaire inférieure : ce sont des alternances de calcaires à grain fin, bleuté ou gris beige, et de calcaires marneux beiges. Epaisseur : 80 m.
- c - les alternances de la partie médiane : bancs calcaires (90% de CO_3Ca) à interlits marneux (67 à 75 % de CO_3Ca). Cet ensemble de 11 m d'épaisseur marque le passage du Campanien au Maestrichtien.
- d - la masse calcaire supérieure : 7,5 m de calcaire blanc à grain très fin renfermant jusqu'à 97% de CO_3Ca .
- e - les alternances supérieures du Maestrichtien : six bancs calcaires séparés par des marnes. La richesse des calcaires en CO_3Ca varie de 74 à 91%. L'épaisseur de l'ensemble est de 7 m environ.

6) - Formation EL HARIA : Maestrichtien supérieur, Paléocène
 Ce sont des argiles calcaires noires à 24% de CO_3Ca constituant une combe monoclinale entre les cuestas calcaires maestrichtienne et éocène.

7) - Formation METLAOUI : Ypresien, Lutetien inférieur.
 C'est un ensemble de bancs calcaires contenant quelques intercalations de marnes et de sables gréseux sur une épaisseur totale de 35 m environ.

8) - Formation SOUAR : Priabonien
 Ce sont des argiles calcaires gris noir présentant un aspect schisteux lorsqu'elles ne sont pas altérées. La puissance de cette formation est de 250 m environ.

I.2.2. - Les formations superficielles.

Dans le bassin versant de l'Oued El Kebir, on rencontre deux types de formations superficielles datant tous deux du Quaternaire récent, ce sont les terrasses et les alluvions du lit majeur de l'Oued.

I.2.2.1. - Les terrasses

Elles sont au nombre de quatre situées sur les flancs du synclinal comme le montre la Fig I.10.

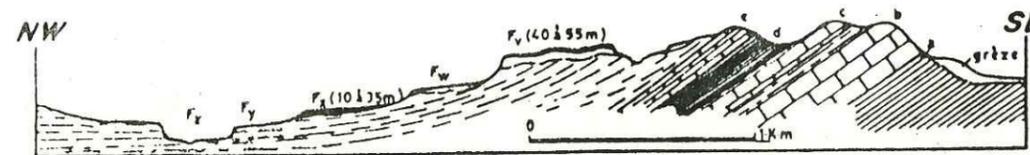


Fig. I.10-LES TERRASSES DU SYNCLINAL DE L'OUED EL KEBIR. (d'après JAUZEIN A. 1967).

- Fz - lit majeur de l'Oued El Kebir, avec pavage de blocs
- Fy - première terrasse avec alluvions rares.
- Fx - deuxième terrasse encroûtée localement par la "torba"
- Fw - troisième terrasse épisodique avec alluvions grossières remaniées de la quatrième terrasse.
- Fv - quatrième terrasse: épandages de blocs encroûtés avec traces de paraglacière.
- a - marnes santoniennes (ALEG).
- b et c - barres calcaires de l'ABIOD.
- d - marnes de transition (EL HARIA)
- e - calcaires éocènes

a - Première terrasse : niveau de 4 - 6 m.

Cette terrasse est formée d'éléments qui proviennent de l'érosion des marnes priaboniennes.

b - Deuxième terrasse : niveau de 10 à 25 m.

C'est une terrasse d'accumulation constituée d'une matrice fine dans laquelle s'intercalent des éléments plus grossiers. Elle est bien développée dans les parties basses du synclinal, où sa surface est protégée par une croûte granuleuse blanche, riche en calcaire, régulièrement concave, avec des pentes atteignant 5 à 7°.

c - Troisième terrasse : niveau de 30 à 35 m.

Elle se réduit à des lambeaux intercalés entre la deuxième et la quatrième terrasse et contient des éléments remaniés de cette dernière.

d - Quatrième terrasse : niveau de 45 à 55 m.

C'est la terrasse la plus ancienne du bassin. Elle est formée d'une matrice argileuse, devenant de plus en plus abondante vers le haut, et qui renferme des blocs de tailles différentes ; une croûte peu consolidée la recouvre.

I.2.2.2. - Les alluvions de l'Oued.

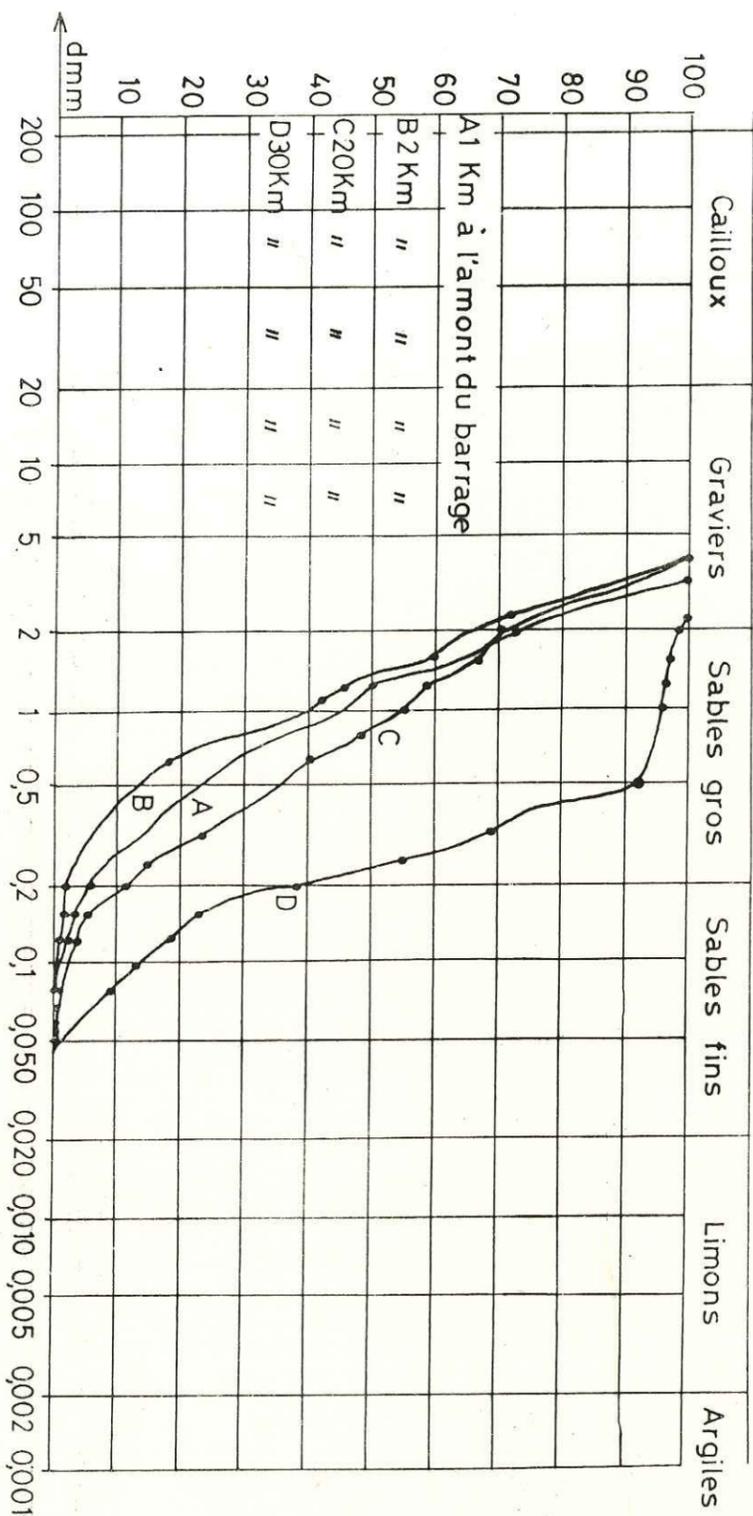
Le lit majeur actuel est occupé essentiellement par des sédiments grossiers. Outre les gros blocs arrachés aux terrasses occupant les

berges et les versants, le lit de l'Oued est recouvert d'un mélange de sable et de gravier. Les éléments grossiers sont des galets et des graviers calcaires. Parmi les éléments fins nous trouvons des débris de coquilles de foraminifères, des grains de calcite et des fragments calcaires ou marneux.

Des analyses granulométriques effectuées sur des échantillons prélevés en divers points du lit confirment l'observation précédente et montrent que la répartition granulométrique varie peu d'amont en aval (Fig. I.11). En effet si nous ne tenons pas compte des éléments de diamètre supérieur à 4 mm - non prélevés et dont la présence et l'importance dépendent de la proximité ou non d'affleurements de la quatrième terrasse du lit - les alluvions de l'Oued peuvent être considérées comme des sables. Ceci conduit à la constatation suivante : les matériaux présents tout au long du lit de l'Oued sont des sables alors que ceux déposés dans la retenue sont essentiellement des limons et des argiles.

Fig. I.11 ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Provenance : Oued El Kebir
Nature :



DEUXIEME CHAPITRE

ETUDE DE LA FRACTURATION

II.1. - Présentation

Les fractures naturelles des ensembles rocheux calcaires représentent l'une des principales causes d'anisotropie de leurs propriétés mécaniques et hydrauliques. C'est pourquoi avant l'implantation d'un ouvrage même moyen, l'étude de stabilité et d'étanchéité du site doit comporter, en plus de la classique analyse de la structure générale, une étude spécifique de la fracturation. Celle-ci passe par la détermination de paramètres qui influent directement sur la circulation des eaux au travers des ensembles rocheux.

On sait en effet que leur perméabilité est bien plus liée aux caractères géométriques des fractures qu'à la porosité efficace de la roche elle-même.

L'analyse que nous avons menée sur le terrain nous a conduit à regrouper en "familles" les fractures présentant une orientation (direction, pendage) voisine sinon semblable. Nous avons ensuite déterminé, pour chaque famille, la fréquence et, le cas échéant, l'ouverture moyenne des fractures ; nous avons alors considéré la proportion et la nature de leur remplissage.

Localement une analyse cinématique est venue à l'appui de cette analyse géométrique ; l'ensemble a conduit à formuler des hypothèses sur l'origine et l'évolution des différentes familles de discontinuités, d'abord à l'échelle de l'affleurement, puis, de façon plus synthétiques, à l'échelle régionale.

Le deversoir du barrage de Sidi Boubacker s'est rapidement révélé un site de choix, tant pour l'analyse statistique que pour l'analyse cinématique de la fracturation polyphasée. Quatre stations principales de mesure y ont été délimitées.

Ce secteur a par ailleurs permis de comprendre certains aspects structuraux qui conduisent à s'interroger sur le bien-fondé de l'implantation du barrage lui-même.

II.2. - Methode de travail. - Stations de mesures :

II.2.1. - Critères de choix des stations de mesures :

- Critères liés aux propriétés de la surface de mesure

Les surfaces choisies répondent à des conditions de propreté permettant de suivre chacune des discontinuités sur une distance minimale de 2 m afin d'éliminer les discontinuités dues aux effets du dynamitage lors de l'exca- vation du déversoir ouvertes par suite de la décompression. Nous avons aussi veillé à ce que chacune des surfaces de mesure (toujours horizontale) soit en liaison directe avec au moins deux surfaces verticales. Ceci a permis de noter avec précision le pendage des fractures et de relever les différents paramètres énumérés au paragraphe précédent.

- Critères liés à des particularités structurales.

Une investigation générale du site nous a montré la nécessité d'effectuer deux types de stations :

* Stations à proximité d'une fracture de grande taille avec ouverture ou remplissage importants : dans ce cas nous avons remarqué que se développe un important réseau de fractures secondaires de même direc- tion que la fracture majeure.

* Stations à l'écart des grandes fractures : elles reflètent mieux la répartition statistique des différentes familles de discontinuités à l'échelle du site.

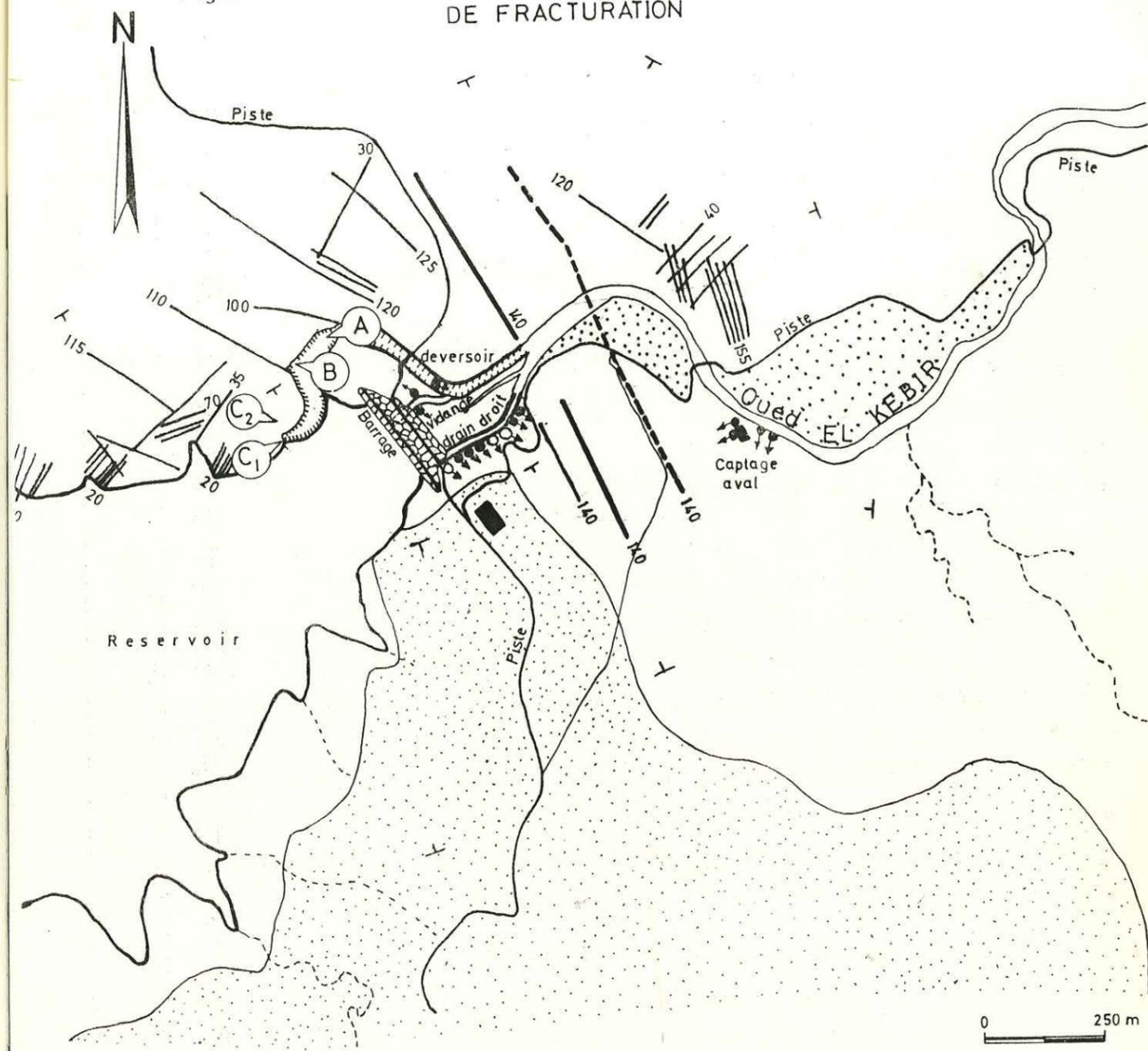
II.2.2. - Emplacements des stations et résultats statistiques.

L'emplacement des quatre stations de mesure est représenté sur la figure II.1.

Sur cette figure nous avons représenté les principales fractures qui ont pu être observée sur la photographie aérienne au 1/12500 du site du barrage et de ses environs. Nous y avons groupé d'autres renseignements qui nous seront utiles dans le sixième chapitres. Parmi ces renseignements nous citons :

- les grandes fractures N140
- la flexure voisine du captage aval
- l'emplacement des sources : du déversoir, drain droit et du captage aval.

Fig.II.1. SITUATION DES STATIONS DE MESURES DE FRACTURATION



- - - Flexure
- 125 Fracture de direction N 125°
- 3,C Stations de mesures de fracturation.
- Terrasse alluviale.
- Marnes éocènes
- Calaires éocènes
- Source au niveau de joint de stratification.
- Source au niveau d'une fracture N 140

b.1. - Station A.

Lithologie : calcaire lithographique à globigérines du Lutétien inférieur.
 Superficie : 9 m² Stratification : N 65, 65°SE.
 Nombre de mesures : 42.

Cette station se situe à proximité d'une grande fracture N 45 remplie de calcite en gros cristaux automorphes maclés, constituant un filon de 40 à 120 cm d'épaisseur autour duquel s'est développé un réseau de fractures de direction voisine et dont l'épaisseur du remplissage - nettement plus faible que celle du filon - varie de 2 à 5 cm. Quand on s'éloigne de part et d'autre de cette grande fracture, les petites fractures à calcite s'estompent et laissent la place à un réseau de fissures ouvertes et de joints stylolitiques en majorité ouverts de direction N30 à N50 ; leur espacement est de 5 à 25 cm. Il existe aussi quelques fractures dont la direction varie peu autour de N 130. Toutes ces fractures sont plurimétriques souvent même décimétriques. Certaines ont été suivies sur des distances de 100 à 150 m. Dans la station, la seule fracture, de cette famille, qui contient de la calcite, a une direction N 140 ; son épaisseur est de 20 cm.

La rosace de fracturation (fig.II.2) est l'illustration de ce qui a été dit plus haut : à proximité d'une grande fracture la famille de même direction présente la fréquence maximale. En effet, ici, plus de 75% des fractures ont une direction comprise entre N 35 et N 45.

b.2 - Station B.

Lithologie : calcaire lithographique à globigérines du Lutétien inférieur.
 Superficie : 12 m² Stratification : N70, 30 SW.
 Nombre de mesures : 79.

Cette station a été effectuée dans une zone bordée par la station A à l'Est et une grande fracture N 115 à l'Ouest (Photo II.1). L'existence de cette fracture N 115 dont l'ouverture varie de 80 à 150 cm avec un remplissage de calcite, se traduit par le développement du réseau de fractures N 115 à N 135 dont la fréquence est passée à environ 50%. Les fractures de la familles N 45 sont surtout des diaclases de faible ouverture (1 à 2cm), alors que celles de la famille N 125 sont relativement moins fréquentes mais plus ouvertes (2 à 10cm).

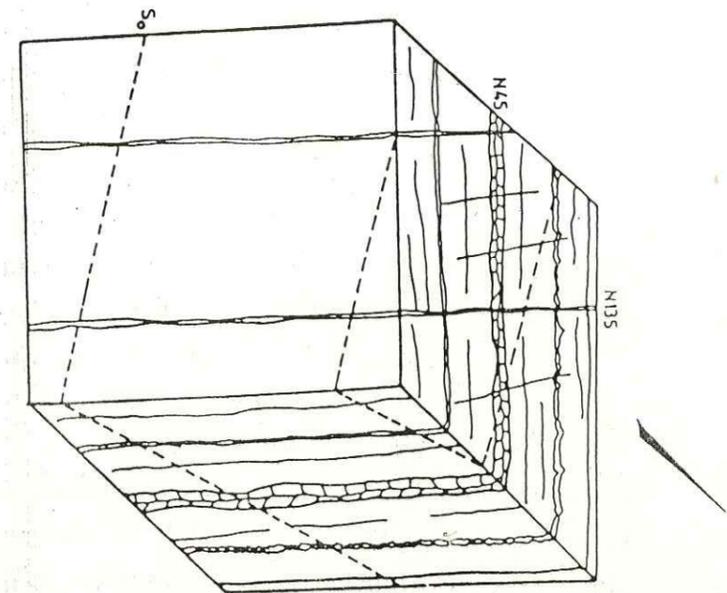
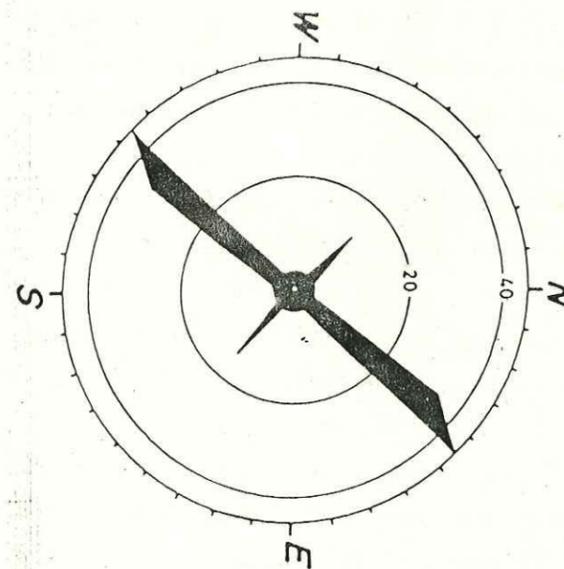


Fig.II.2 STATION -A-



Il faut noter aussi l'apparition de deux autres réseaux de fractures : le N 110 et le N 160 (fig. II.3).

B.3. - Stations C₁ et C₂

Lithologie : calcaire lithographique à globigérines du Lutétien inférieur.

Superficie : C₁ : 6 m² C₂ : 8 m²

Stratification : N 80, 35 S

Nombre de mesures : C₁ : 24 C₂ : 47

L'emplacement de ces deux stations a été choisi pour montrer l'importance que peuvent prendre localement les réseaux N 90 et N 160. En effet dans la zone de calcaires en contact avec l'eau de la retenue en rive gauche nous avons choisi la station C₁ voisine d'une fracture N150 (longueur 5m, ouverture 15cm, pendage vertical; type: diaclases fentes) présentant un remplissage régulier de calcite de 5 cm d'épaisseur, lessivé par des circulations d'eau ferrugineuse. La station C₂, elle, est proche d'une fracture N 75 (longueur 3 m, ouverture 35 cm, remplissage, calcite blanche en gros cristaux automorphe), subverticale et présente un remplissage de 50 cm de calcite. Parallèlement à chacune de ces deux fractures, se développe un réseau de fissures ouvertes (quelques centimètres) de direction voisine, parmi lesquelles certaines contiennent un remplissage de calcite dont l'épaisseur tend à diminuer lorsqu'on s'éloigne de la fracture mère.

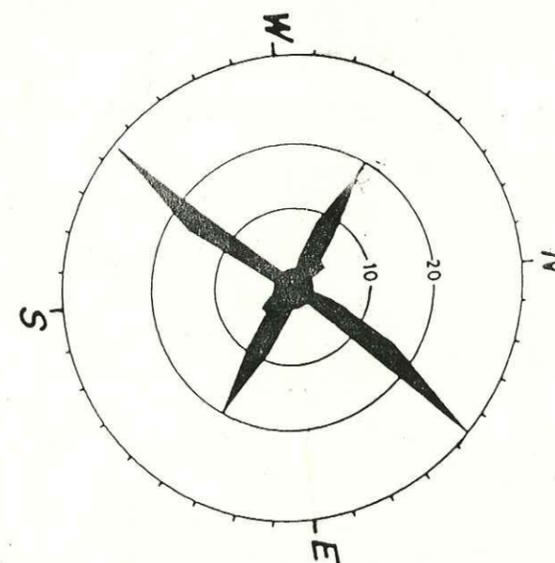
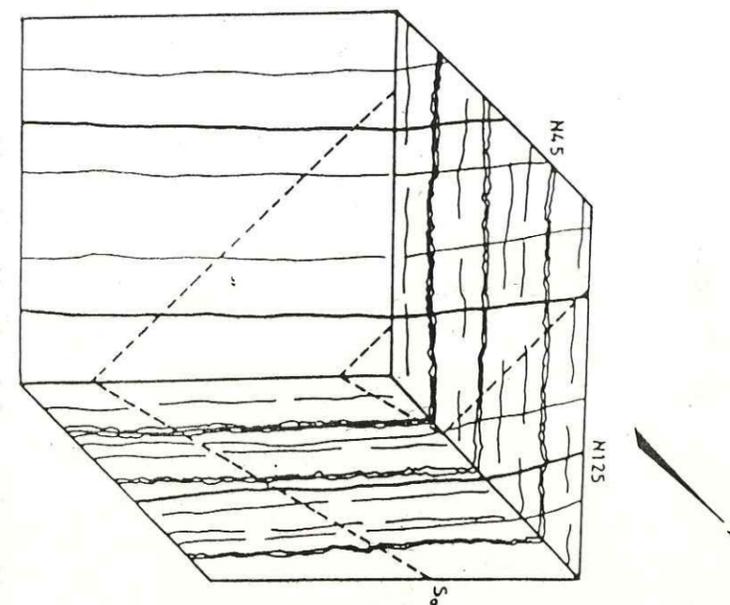
Dans la station C₁, le faisceau N 125 à N 160 se développe nettement par rapport à la famille N 45. Ce faisceau présente à lui seul 65% des fractures du massif à cet endroit, (Fig.II.4). La rosace de fracturation de la station C₁ fait apparaître deux réseaux supplémentaires :

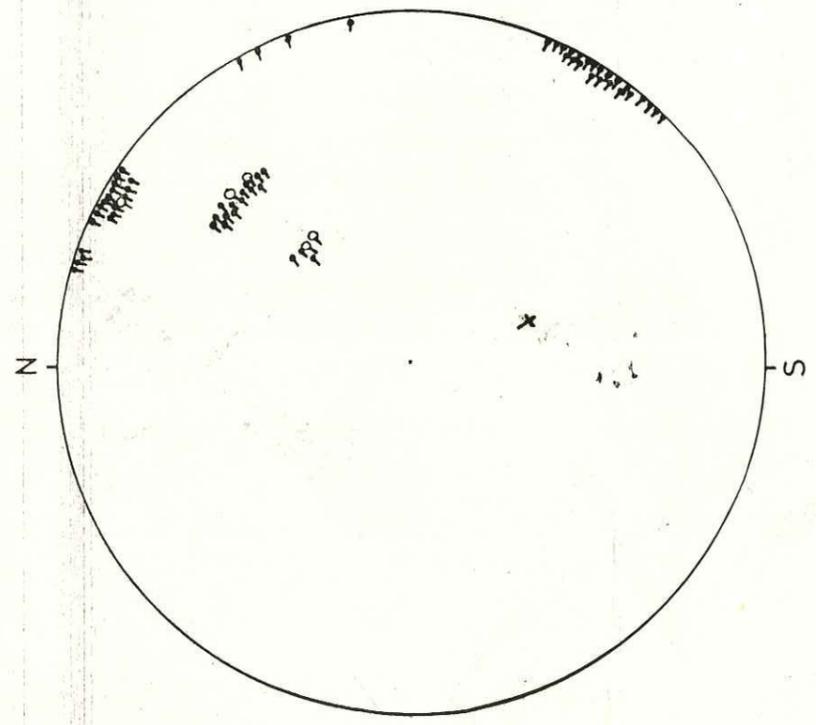
- 1) Un réseau N 110 confondu dans les autres stations avec la famille N 125 alors qu'il paraît être en fait un réseau indépendant,
- 2) Un réseau N-S qui semble bien absent dans les autres stations.

Dans la station C₂, les directions au sein de la famille N 45 se dispersent en tournant un peu plus vers l'Est-Ouest avec une augmentation de la fréquence du faisceau NE-SW : 40% (25% pour la famille N 45 dans C₁).

La famille N 110 est de nouveau confondu avec celles du faisceau N 125. La plus fréquente de ces dernières est la N 135 et non la N 125 comme pour les autres stations. La fréquence totale du faisceau dans la station C₂ a subi une diminution (30% environ). Du fait de la proximité de la fracture N 75 décrite ci-haut un faisceau N 75 à N 95 s'est développé avec une fréquence de 25% environ alors que sa fréquence, nulle dans les stations A et B, n'est que de 5% environ à la station C₁.

Fig. II.3 STATION B.





- + S₀
- Fracture mineure ou joint
Stylolitique ouvert
- o Grande fracture
(fracture majeure)

Fig.II.3 (suite) Représentation stéréographique des poles des discontinuités de la station : B (Canevas de Schmidt.H.S.)

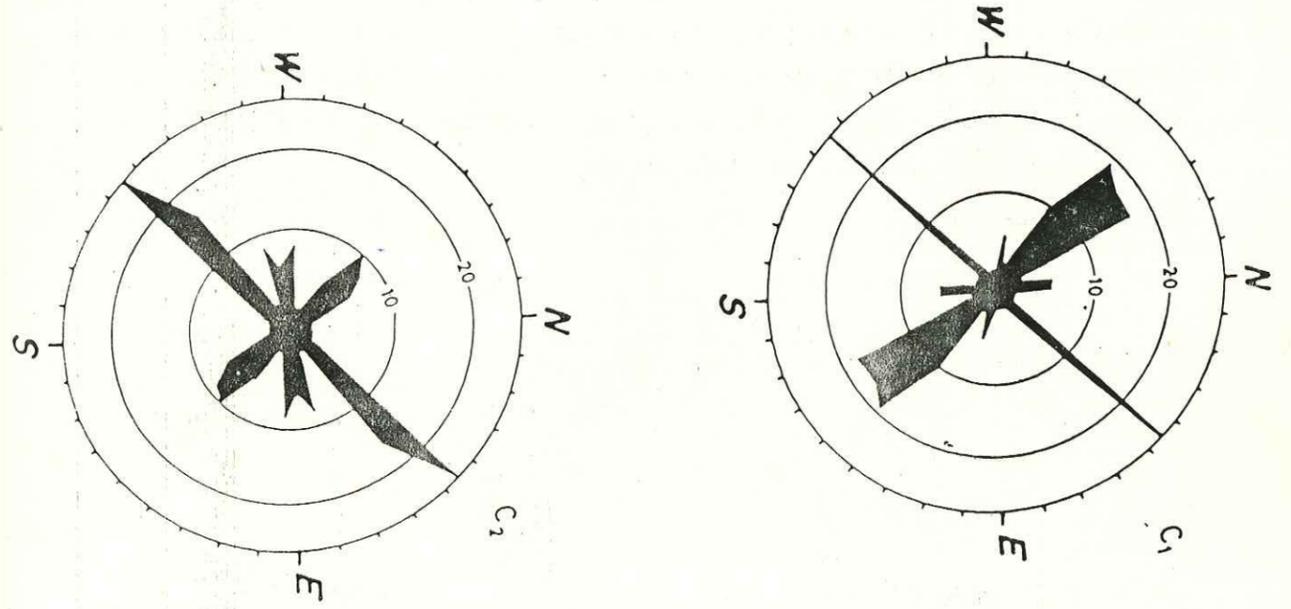
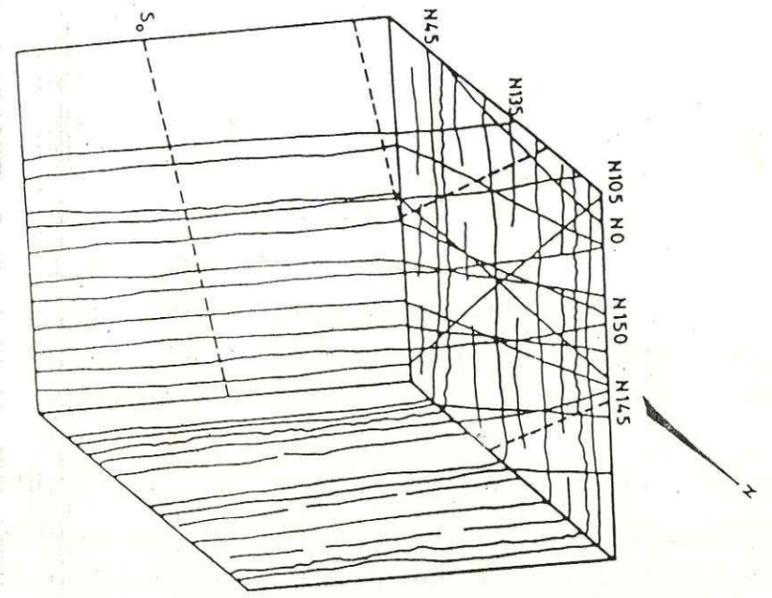


Fig.II.4 STATIONS C1 C2



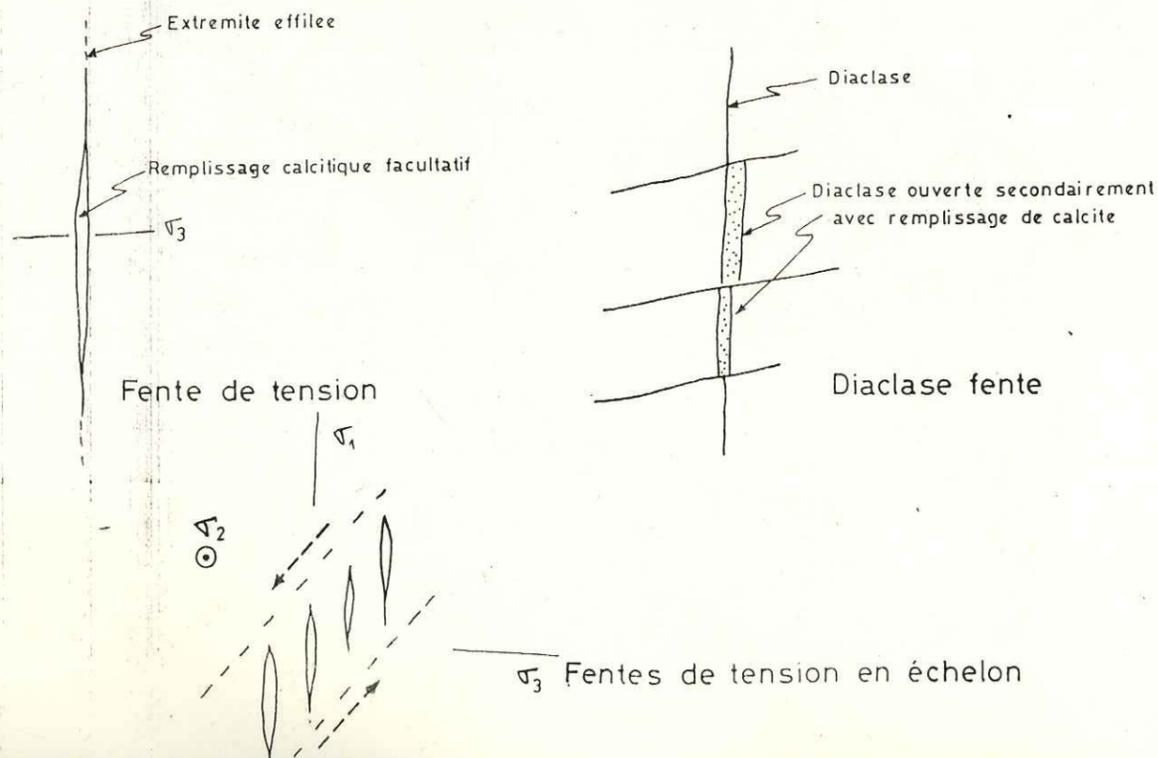
II.2.3. - Familles et faisceaux de fractures du calcaire lutétien du synclinal de l'oued El Kebir.

a - Types de discontinuité du calcaire lutétien du synclinal

Avant d'aborder la description des différentes familles de discontinuités rencontrées lors de l'étude du site, il nous paraît utile de préciser la signification des termes que nous emploierons dans ce qui suit.

* Les diaclases : ce sont des fractures (terme synonyme de discontinuité sans valeur génétique) au long desquelles aucun mouvement n'est décelable. Pour certaines, l'origine est encore mal connue bien que leur orientation soit en relation directe avec la structure géologique régionale. Elles peuvent évoluer de la même manière que l'un ou l'autre des types de fractures décrits ci-dessous.

* Les fentes de tension : Elles naissent par extension, perpendiculairement à la direction de la contrainte principale mineure σ_3 , sans mouvements relatifs des deux lèvres parallèlement à leur propre direction. De telles fractures sont reconnaissables à leur extrémités effilées. Etant en ouverture elles favorisent la circulation des eaux et la précipitation de minéraux, ici la calcite. Il est capital de ne pas les confondre avec des diaclases secondairement ouvertes, et colmatées de calcite, suite à une rotation de contrainte. Enfin, de façon caractéristique les vraies fentes de tension peuvent être disposées en échelon suivant des zones plus ou moins obliques sur la direction σ_1 et ayant la signification de plans de cisaillements.



* Les Stylolites : ce sont des surfaces de dissolution de la roche présentant des indentations caractéristiques (doigts ou pics stylolitiques). Alors que l'orientation des surfaces est à priori quelconque, celle des doigts ou pics est parallèle à la direction de σ_1 . Lors des permutations de contraintes ces joints stylolitiques peuvent s'ouvrir à la manière des fentes de tension, avec remplissage éventuel de calcite. Nous parlerons alors de "stylofente" s'il reste ouvert et de stylofente à calcite s'il est rempli de calcite.

b : Notion de famille et de faisceau.

En essayant de chercher une relation entre les familles de discontinuités apparues sur les rosaces de fracturation et les observations cinématiques faites sur le terrain, il nous est apparu nécessaire de classer toutes les fractures en faisceaux composés de familles. Ainsi, une famille est l'ensemble de fractures dont la direction varie dans un interval de dix degrés ouvert à sa borne supérieure et centré sur la direction affectée à la famille. Un faisceau est composé d'au moins une famille.

Pour le site du barrage de sidi Boubecker, la rosace de fracturation globale (Fig.II.5), toutes directions confondues, fait apparaître les familles suivantes : N 5, N 45, N 75, N 95 et N 135. L'analyse des rosaces de fracturation des quatre stations de mesures ainsi que des considérations cinématiques nous ont amené à distinguer les faisceaux suivants : (les renseignements concernant les différentes familles de fracturation sont groupés dans le tableau.VI.1.

b.1: Le faisceau subméridien : ce faisceau est composé des familles : N 5, N 170, N 160.

Ce sont en grande partie des diaclases ouvertes secondairement. Elles n'apparaissent pas partout dans le site. Elles sont localisées aux endroits où une fracture importante de la même famille est apparue.

b.2: Le faisceau NE-SW : il comprend les familles : N 35, N 45 et N 55.

D'un endroit à un autre la dispersion des directions peut varier. Ainsi les différentes familles du faisceau peuvent diminuer d'importance ou disparaître complètement pour certaines. Ceci est le cas des familles N 35 à l'amont du site et N 55 sur le site même. La famille N 45, toujours plus fréquente est présente partout. Les fractures de ce faisceau se classent en trois types.

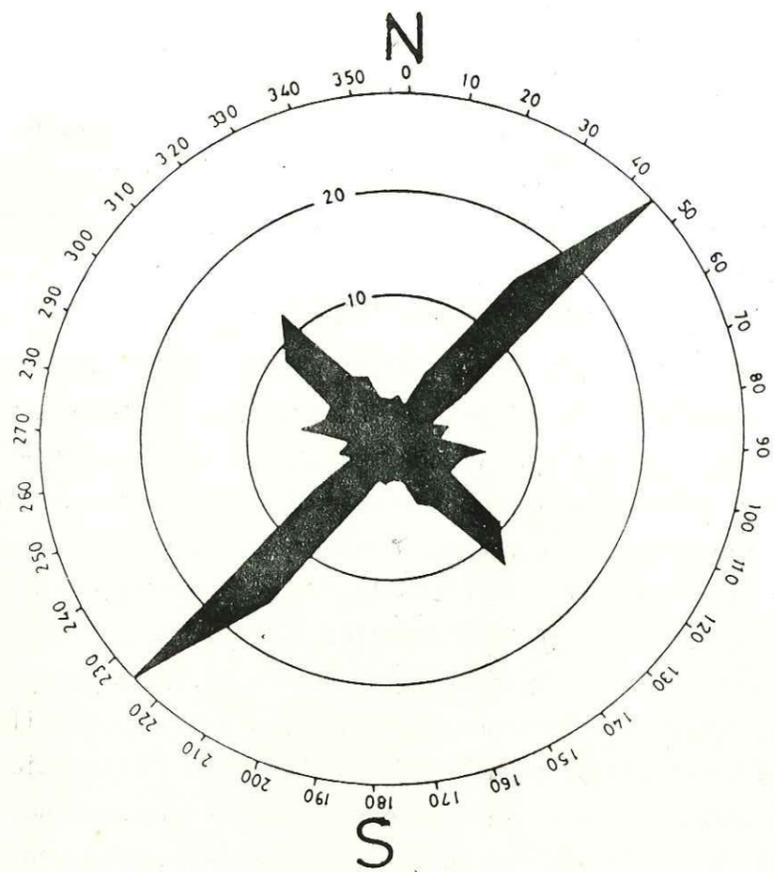


FIG.II. 5-Rosace de Fracturation du site de Sidi Boubeker.
(Fréquence globale)

* Les diaclases et les diaclases fentes : elles sont décimétriques à métriques, sauf exception elles sont très faiblement ouvertes et peu espacées.

* Les stylolites et stylo-fentes : les joints stylolitiques à picstrapus (5 mm de hauteur et 3 à 4 mm de base), sont souvent assez réguliers ; ils se développent sur des distances de 2 à 3 m, ils évoluent presque toujours à leurs bouts en diaclases. Particulièrement à proximité de grandes fentes de tension, les stylolites peuvent s'ouvrir secondairement. A la manière des fentes de tension, elles peuvent alors être colmatées, totalement ou partiellement par de la calcite, ou bien rester ouvertes ; elles influent bien sûr sur la perméabilité du massif.

* Les fentes de tension : elles sont généralement par groupes de quatre ou cinq. Leur épaisseur est souvent assez faible (quelques millimètres) et elles sont colmatées par la calcite.

Nous avons rencontré des difficultés pour classer les grandes fractures de ce faisceau, transformées en filons de calcite. En effet, et comme le montre la photo II.1, les conditions d'affleurement et la forte déformation dans le massif ne permettent pas de trancher entre les deux hypothèses suivantes :

- . Ces fractures sont des fentes de tension géantes.
- . Ces fractures peuvent être d'anciennes diaclases secondairement ouvertes.

Dans les deux hypothèses, le colmatage par de la calcite, précipitée à partir des solutions saturées percolant dans le massif, a suivi l'ouverture.

Les fractures de ce faisceau sont soit des diaclases ouvertes vides ou colmatées par la calcite, soit des fentes de tension de faible ouverture (quelques millimètres) et remplie de calcite à petits cristaux. Leur disposition dans le massif est analogue à celle des fractures du faisceau N 5, à savoir qu'elles sont localisées au voisinage d'une grande fracture de la même famille.

b.3. - Le faisceau N 100.

Les familles de ce faisceau - la N 105 et la N 115 - rattachées sur les rosaces de fracturations, aux familles du faisceau N 135, ont été individualisées parce qu'elles paraissent liées comme le montrera l'étude cinématique, à un épisode particulier de la phase atlasique en Tunisie centrale. Cet épisode correspondrait à la formation des flexures sur les flancs

du synclinal de l'oued El Kebir et à un jeu décrochant dextre de l'accident chevauchant de Zaghouan.
 Parmi ces familles, la N 115 est la plus fréquente ; les fractures de cette famille se développent sur des distances assez importantes (plusieurs dizaines de mètres) et forment un réseau très régulier surtout dans la zone du déversoir. L'ouverture et le remplissage de ces fractures sont très variables. Rappelons à ce sujet la fracture N 115 de la station de mesure B, dont l'ouverture peut atteindre 150 cm. Globalement l'ouverture varie de 2 à 20 cm.

b 4. - Le faisceau N 135 : il est composé des familles N 120, N 130, N 140 et N 150. Elles sont identiques en tout point aux fractures du faisceau précédent. A part la direction qui change, une grande ressemblance existe entre les deux faisceaux en ce qui concerne les points suivants :

- Origine des discontinuités : toutes les fractures semblent être des diaclases au départ, ouvertes suite à une accentuation de la contrainte principale majeure et des réarrangement du champ de contraintes permettant une disposition de la contrainte principale mineure favorable à l'évolution des diaclases en diaclases fentes.
- Les caractéristiques géométriques : nous retrouvons pour les deux faisceaux les mêmes fourchettes de valeur relatives à la longueur, l'ouverture et l'espacement des fractures.

II.3.- Etude cinématique : mouvements selon les différents types de discontinuités du massif.

Après l'étude géométrique (statistique) des éléments structuraux planaires, nous avons procédé à l'analyse des mouvements dont ils ont été le siège (Analyse cinématique). Il s'agit bien sûr de mouvements relatifs : ouverture, fermeture et/ou glissement. Il est en effet apparu rapidement que chacune des principales familles de joints, y compris la stratification, avait été le siège de mouvements successifs différents. Ils sont décrits ci-après, sur la base de 16 points répartis dans l'évacuateur de crues et la carrière voisine. (Fig II.6) . Outre la qualité exceptionnelle des affleurements (vastes excavations récentes), ce site a l'avantage de montrer une "flexure tectonique".

Il s'agit d'un pli faille , à axe horizontal de direction N 45, semblable à ceux représentés sur la carte géologique du secteur. (Feuille Jebel Mansour

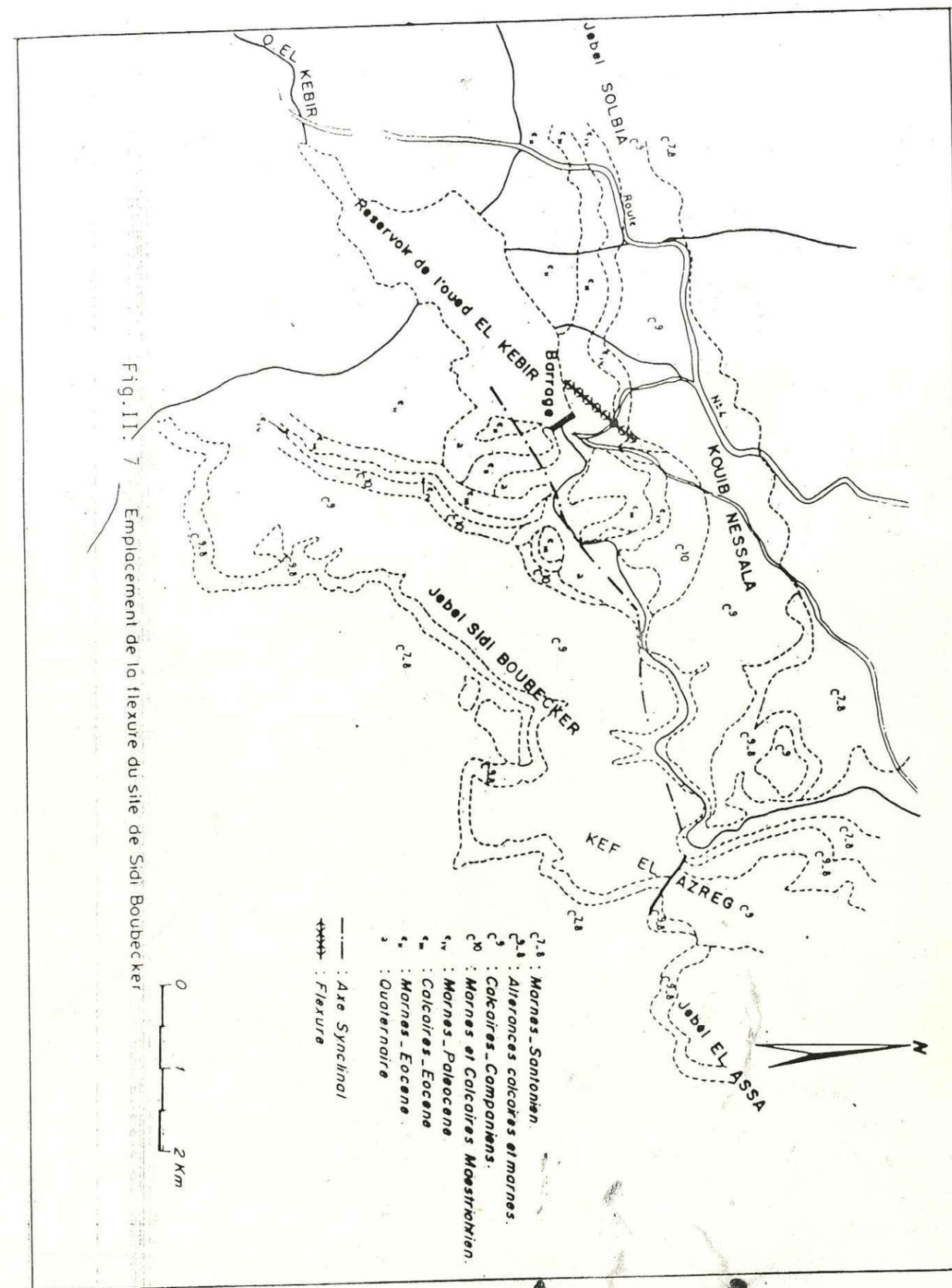
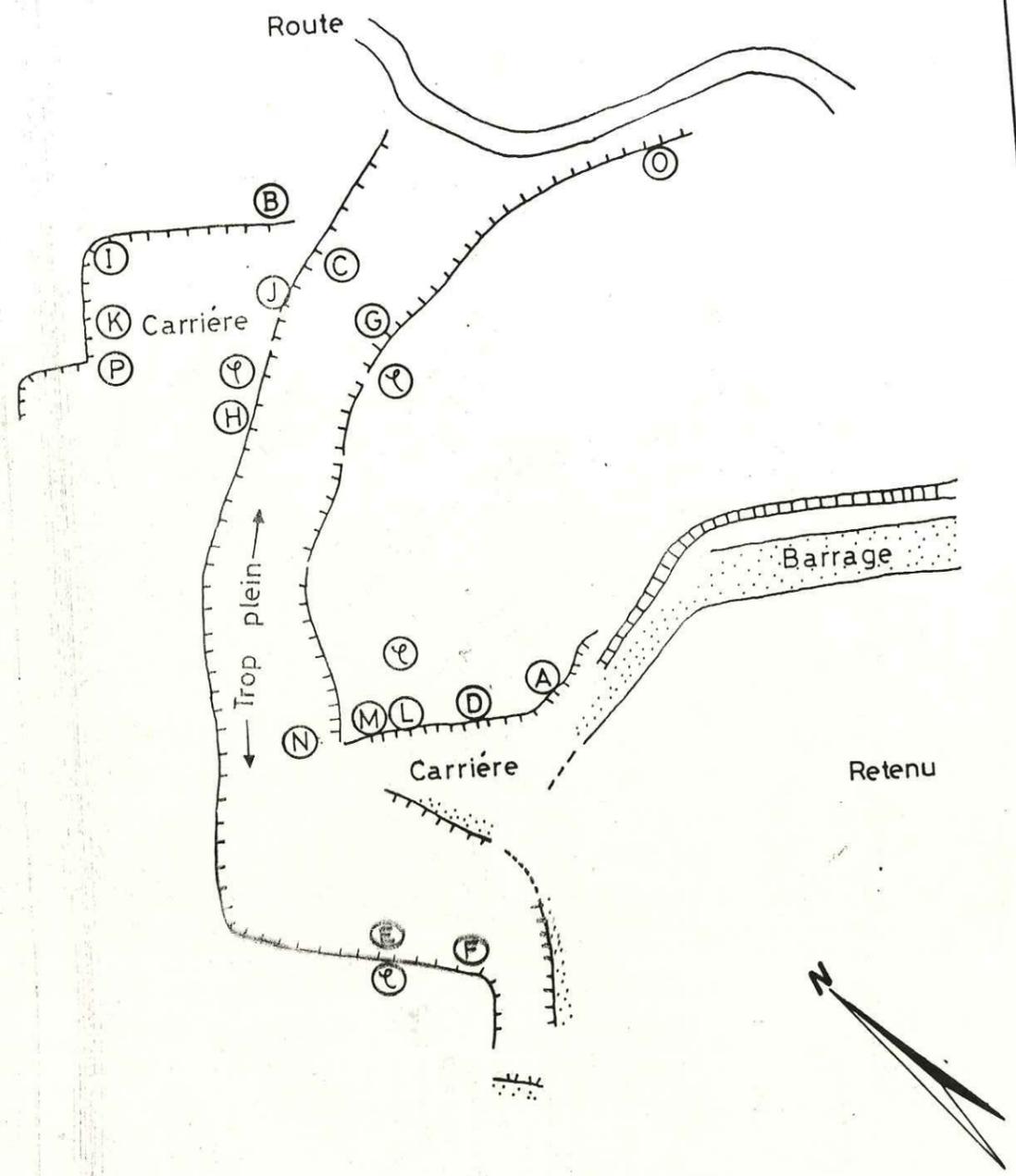


Fig. II. 7
 Emplacement de la flexure du site de Sidi Boubecker

Fig. II. 6 Emplacement des stations d'observations cinématiques



1/50.000, A. JAUZEIN 1961), (Fig. II.7) . La rupture des couches lors de l'accentuation du plissement a entraîné la formation de deux directions de plans de cisaillement : (Photo II.3).

- Les plans de chevauchement vers le S.E : Ψ à pendage vers le N - W.
- Les plans conjugués des précédents ; un pendage vers le S - E.

II.3.1- Les mouvements selon le faisceau NE - SW.

a - Les mouvements verticaux

Station A.

La compression NW - SE, responsable de diaclases et surfaces stylolitiques verticales NE - SW (pics stylolitiques N 140 : station L) a été suivie d'une traction de même orientation. Il s'en est suivi l'ouverture des diaclases et joints stylolitiques et leur colmatage par de la calcite. Concurrentement, se sont développées de véritables fentes de tension, également à remplissage calcitique, orientées NE - SW, et verticales. La station A (Fig II.8, Photo : II.2) en fournit une bonne illustration.

NNW

SSE

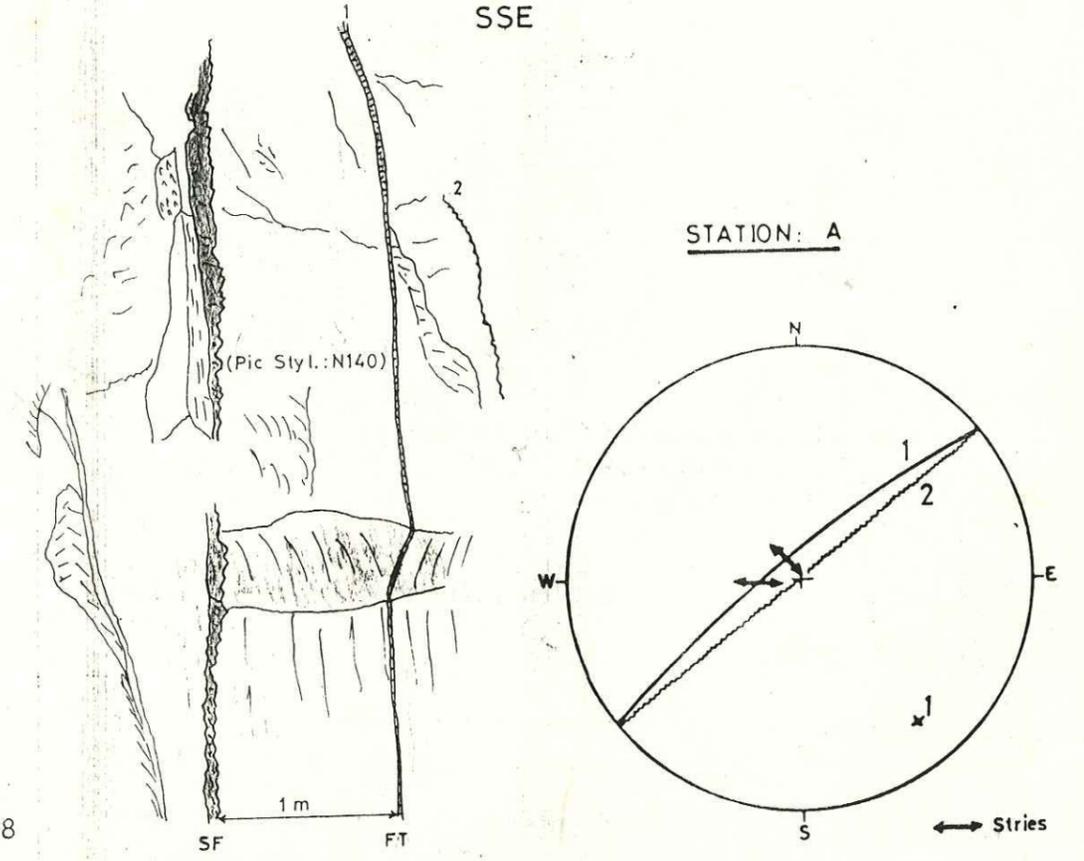


Fig. II.8

Station A vue en coupe. Evolution des stylolites du faisceau NE-SW en stylofentes

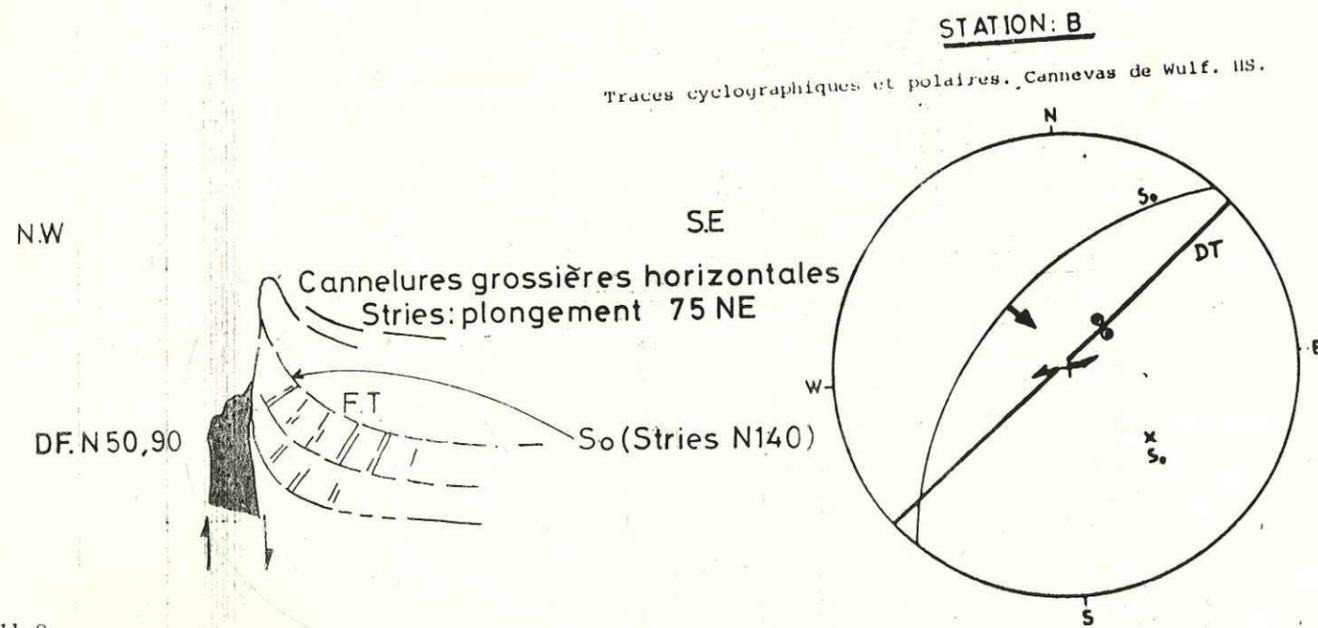
L'ouverture a transformé les stylolites en stylofentes (SF), les diaclases en diaclase-fentes (DF).
 L'histoire des joints NE - SW ne s'arrête pas là. La calcite qui les colmate va en effet se trouver cisailée dans d'autres mouvements que l'on a reconstitué comme suit :

./ Premier mouvement vertical : glissement avec effondrement relatif des compartiments SE. (jeu en micro failles à rejet vertical).

Ce mouvement est observé à deux stations :

* Station B :

Il s'agit d'une diaclase fente N 50, verticale dont le colmatage calcitique atteint 10 cm d'épaisseur (Fig II.9).
 Il porte des stries plongeant de 75° vers le NE (cisaillement subvertical).
 Le crochon (plis à axe horizontal) dessiné par les joints de stratification en donne le sens (Fig.II.9), de même que le basculement vers le SE des fentes de tension normales aux couches. Il en est de même des autres fentes et stylofentes du faisceau NE - SW, qui indiquent clairement un mouvement d'effondrement relatif des compartiments SE.



II.9. Station B vue en coupe. Indices de mouvements vertical et horizontal selon le faisceau NE - SW.

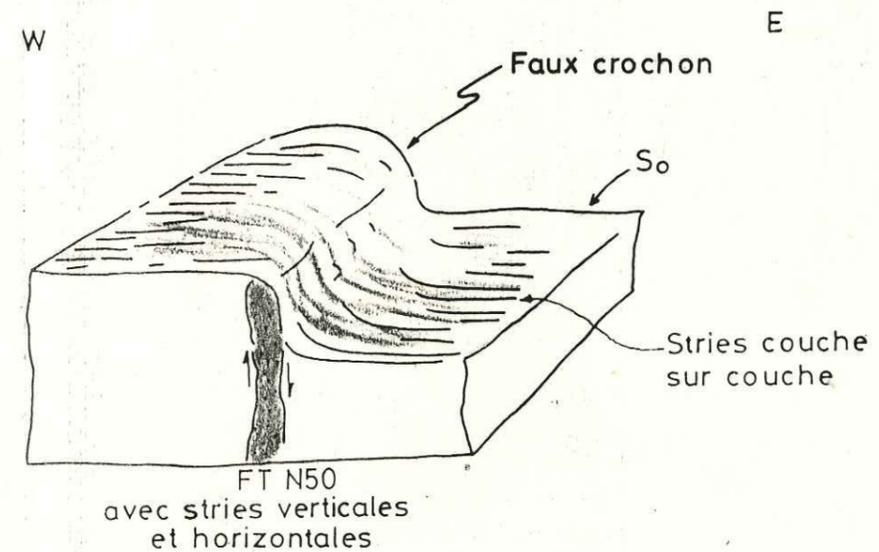
* Station C :

A la station C, "un faux crochon" est provoqué par la superposition de deux mouvements différents (Fig II.10) :

Un mouvement vertical selon une fente de tension N 50 colmatée (stries verticales) a entraîné l'effondrement côté SE d'un joint de stratification. (Cette fente porte également des stries horizontales : leur signification est envisagée plus loin).

Un mouvement ultérieur dans les couches, marqué par des stries de ripage, est à l'origine du broyage des surfaces masquant ainsi le décalage du joint de stratification.

L'espacement qui en résulte donne une fausse impression de crochon.



II.10. Station C vue en perspective. Indice de mouvement vertical selon le faisceau NE - SE

./ Deuxième mouvement vertical : déformation en cisaillement des fentes et stylofentes.

Trois stations fournissent des exemples de ce mouvement.

* Station D

Les stries portées par les stylofentes indiquent un mouvement cisailant vertical, des fentes de tension secondaires en échelon indiquent un soulèvement relatif du compartiment SE, en accord avec le décalage des joints de stratification (Fig.II.11, photo II.3)

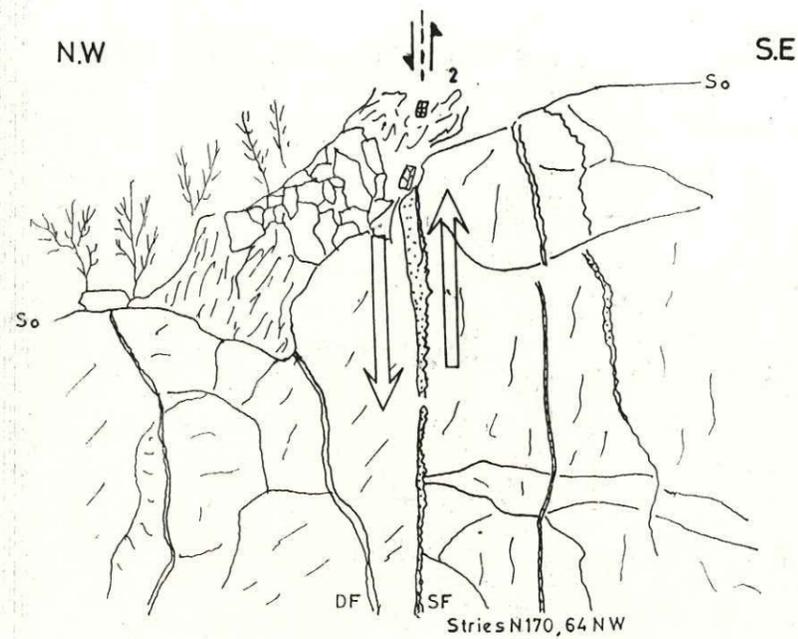
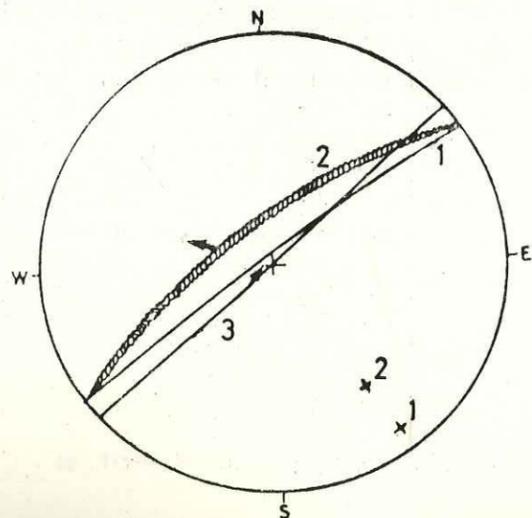


Fig.II.11 Station D vue en coupe. Cisaillement vertical des fentes du faisceau NE - SW

STATION: D



* Station E

Dans un couloir de cisaillement vertical N 50, les plis d'entraînement dessinés par les fentes de tension (Fig.II.12, photo II.4), initialement subverticales, sont dus à un mouvement semblable à celui décrit dans la station D.

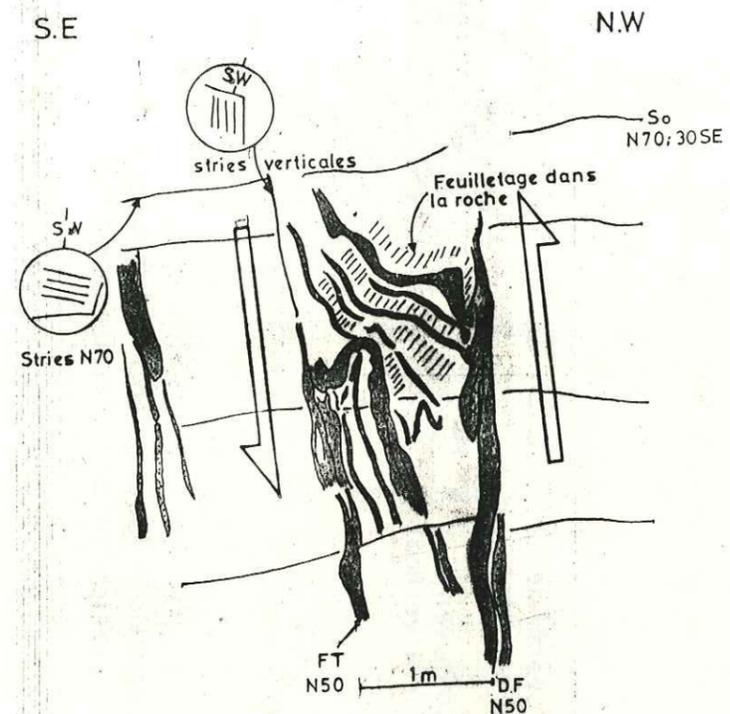
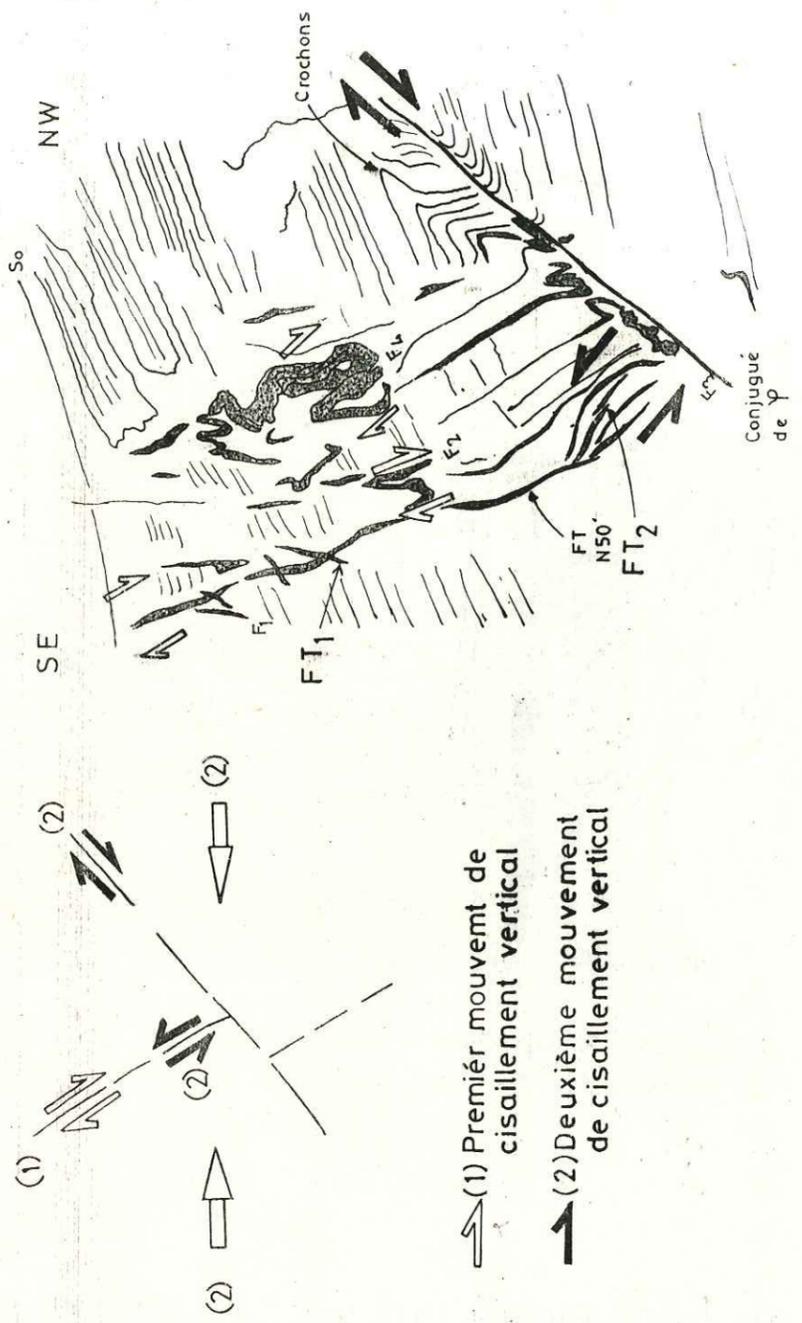


Fig.II.12 Station E vue en coupe. Mouvement vertical selon le faisceau NE - SW

* Station F

Dans cette station d'intérêt capital, les deux mouvements décrits précédemment se trouvent réunis. Par ailleurs, la signification du deuxième sens de cisaillement vertical (déformation en cisaillement des fentes et stylofentes) y apparait clairement. Celui-ci est d'autant plus visible que les deux observations suivantes relatives à l'effondrement des compartiments-S-E des fractures NE - SW ne sont pas prises en compte.



Station F vue en coupe. Deux mouvements verticaux selon le faisceau NE-SW avec deux generations de fentes de tension obliques sur le faisceau.

Fig. II.13

- L'existence de nombreuses petites fentes de tension obliques sur la fente F_1 (Fig.II.13).

- Le cisaillement et le plissement des deux fentes colmatées : F_2 et F_3 (Fig.II.13).

Ainsi, des structures microtectoniques détectées sur un plan de cisaillement conjugué de φ montrent - elles clairement, la relation entre le déplacement, selon ce dernier et le mouvement selon les fentes NE-SW, initialement verticales, basculées tardivement dans la flexure.

Il s'agit des structures suivantes :

- Les crochons dans les fentes de tension et dans la roche de part et d'autres du plan de faille. (Photo II.5).

- Des petites fentes de tension - pentées vers le NW, obliques sur une fente principale N 50 colmatée F_4 , indiquent un cisaillement subvertical de cette dernière avec soulèvement de son compartiment NE.

Il s'ensuit qu' une étroite relation existe entre la formation du plis faille et le deuxième type de cisaillement des fentes NE - SW.

b - Cisaillement horizontal selon le faisceau NE - SW.

Outre les déplacements verticaux décrits ci-dessus, un important cisaillement horizontal a affecté les stylolites, les diaclases fentes et les fentes de tension de ce faisceau.

Les traces de ce mouvement ont été déjà mentionnées dans les stations précédentes - notamment la station B (cannelures horizontales) - sans indications sur son sens et sa place chronologique.

Les deux observations suivantes - effectuées à la station G, indiquent clairement un mouvement tardif de type décrochement senestre.

. Dans un couloir de décrochement, limité au Sud par une fente de tension N 50, (stries verticales et horizontales sur enduit de calcite), les fentes de tension induites par le cisaillement indiquent un mouvement senestre (Fig II.14).

. Des demi fentes de tension en échelon orientées en N 20 (Fig.II.15, photo II6), obliques sur une grande fente de tension N 50, montrent le même mouvement que celui de la fig.II.14.

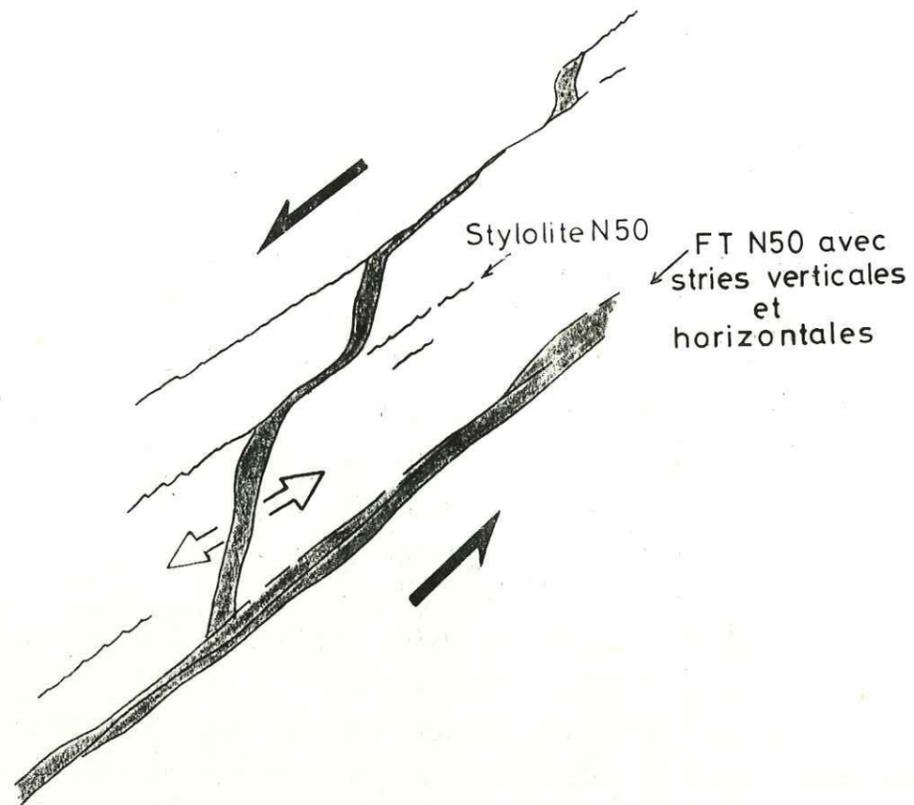
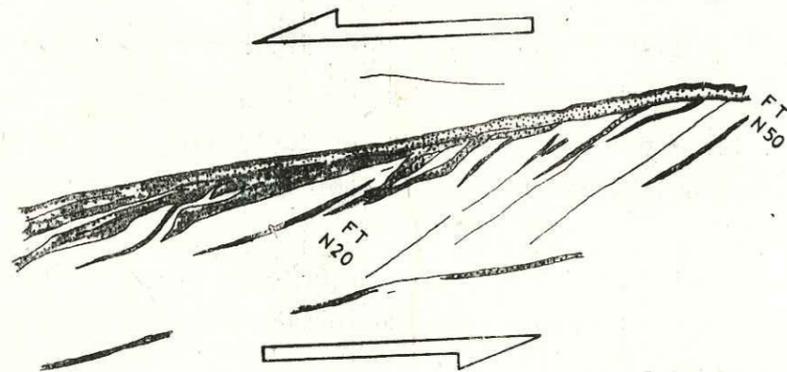


Fig. II.14 Station G vue en plan. Indice de mouvement senestre selon le faisceau NE-SW
Ouverture de fentes de tension obliques au faisceau



Station G vue en plan. Indice de mouvement senestre selon le faisceau NE-SW naissance de fente de tension N20

Fig. II.15

II.3.2. - Les mouvements selon la stratification.

Deux mouvements (horizontaux) dans les joints de stratification ont été mis en évidence : le premier vers le SE, le second vers le NW (mouvement relatif des couches supérieures).

Le mouvement vers le SE a une signification régionale, celui vers le NW, plus local apparaît au contraire directement induit par la formation du pli-faille.

a - Mouvements vers le SE.

Nombreux sont les endroits où des stries horizontales sur les strates sont observées sans que le sens du mouvement ne puisse en être déduit.

La station H en est un exemple (Fig. II.16).

Par contre les stations I et J ont fourni des indications de mouvement vers le SE.

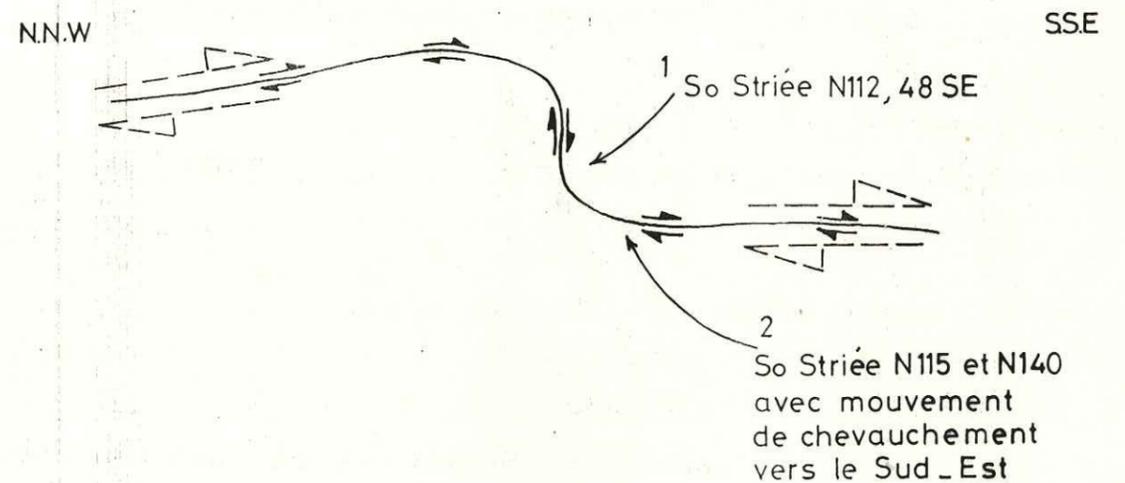


Fig. II.16 Station H vue en coupe. Hypothèse de mouvement selon la stratification

* Station I.

Deux faits importants sont à tirer du décalage de fentes de tension et de diaclases fentes NE-SW (Fig. II.17) :

- . les parties supérieures des fentes étant déplacées vers le SE. les strates ont subi un mouvement relatif de même sens.

- . la chronologie relative de ce mouvement par rapport à ceux du faisceau NE - SW est la suivante :

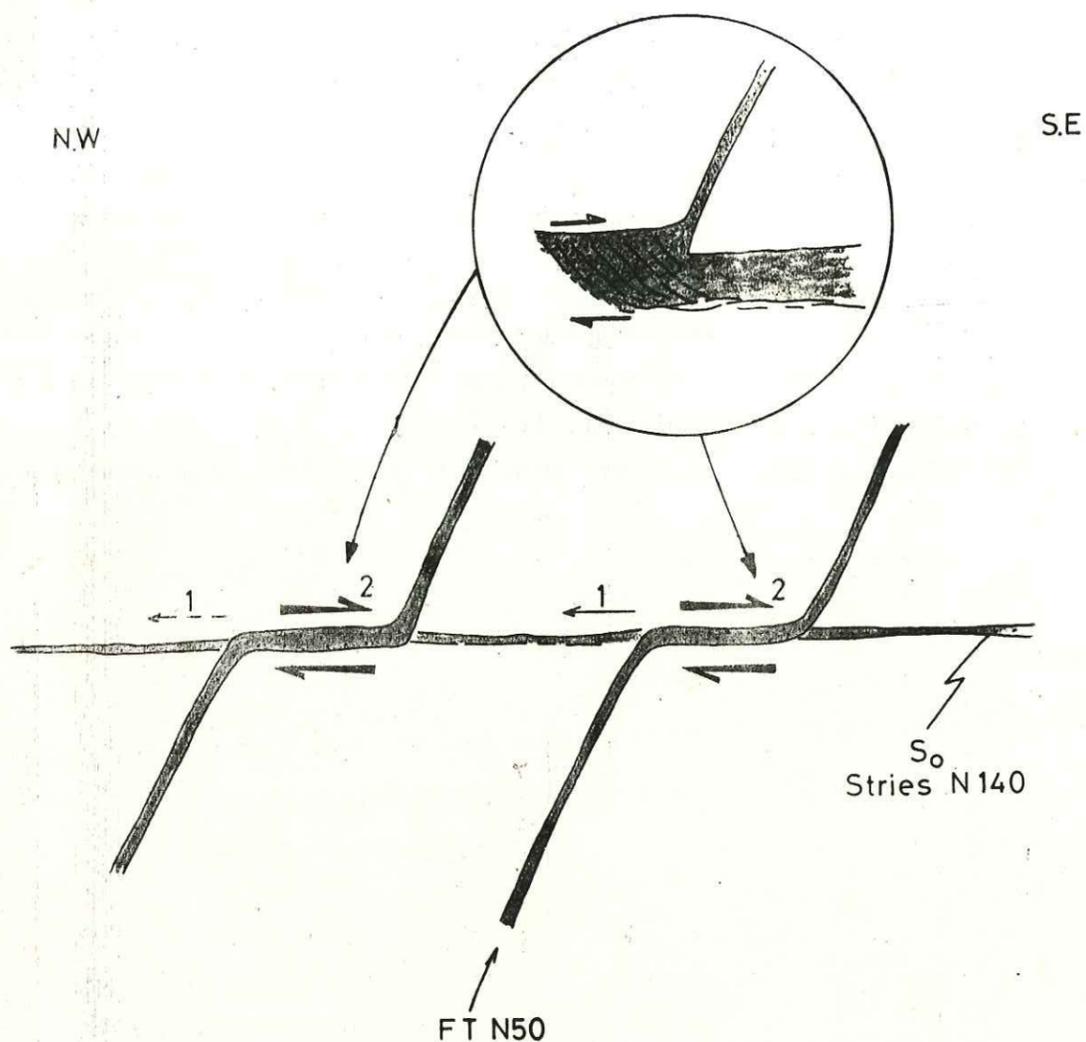


Fig II.17. Station I vue en coupe. Mouvement vers le SE selon les joints de stratification.

- les fentes décalées étant colmatées, le déplacement s'est effectué postérieurement à leur ouverture et remplissage,
 - certaines de ces fentes présentent des stries verticales sur les portions supérieures et inférieures décalées.
- Ces stries sont crochonnées dans le mouvement de ripage suivant la stratification. Elles lui sont donc antérieures, (Effondrement des compartiments SE). Cela s'accorde d'ailleurs avec le fait que le décalage suivant la stratification des fentes NE-SW, leur enlève toute possibilité de jeu vertical important.

Par contre les deux autres types de déplacements de ce faisceau (cisaillement vertical et décrochement senestre) sont postérieurs au mouvement décrit ici. Dans cette station, un enduit de calcite (provenant visiblement des fentes décalées) remplit partiellement les joints de stratification. Il est débité en lamelles si fines et si régulièrement espacées que l'on pense à un clivage penné, du moins après un examen uniquement macroscopique (Photo II.9).

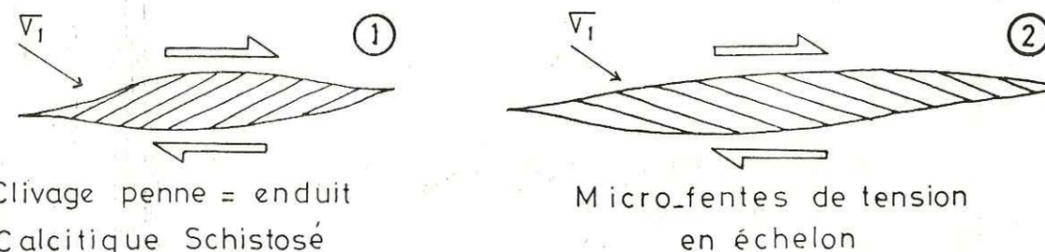


Fig.II.18-Différentes interprétations du "Pseudo-clivage penné"

Le sens de mouvement déduit de ce tectoglyphe dépend de la valeur attribuée aux plans séparant les lamelles de calcite : schistosité (sens 1. Fig II.18), ou microfentes de tension (sens 2 Fig.II.18).

Des lames minces effectuées dans l'enduit clive (Photo II.8, II.9 et II.10) nous ont permis de vérifier que le débit en lamelles correspond à des microfentes de tension en échelon. Le mécanisme de formation de ce pseudoclivage penné-pourrait être le suivant :

. 1 ère étape : au début du mouvement dans les couches, des fentes de tension en échelon (épaisseur 1 à 2 mm) s'ouvrent. Elles sont remplies par de la calcite, largement cristallisée (plans de clivage nets et bien développés), non fibreuse. Les microfentes sont séparées par des joints remarquablement tenus (0,1 mm d'épaisseur) qui sont tout ce qui reste de la roche encaissante (photo II.11) ; la présence de microfociles caractéristique confirme cette origine (Photo III.12). Le rapport Épaisseur de la matrice interfente ici de l'ordre de 1/10

Épaisseur de la fente contrairement aux cas habituels, est à l'origine de la confusion mentionnée précédemment.

. 2 ème étape : le cisaillement horizontal s'accroissant, des fentes de tension (FT - Photo II.13) de formes irrégulières s'ouvrent dans l'enduit, localement déviées (d) au niveau des plans de clivage (c- photo II.13). Ces derniers peuvent, lorsqu'ils sont favorablement orientés se transformer en véritables fentes (Photo II.14).

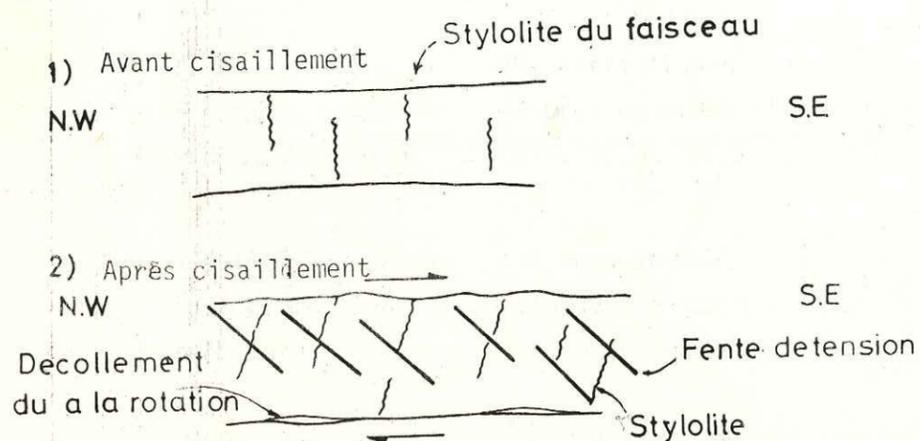
Un phénomène similaire s'observe dans l'oued Abiod (J. Faïd. Axe N-S Tunisie centrale) sur un plan de faille normale dans les calcaires campaniens (J.OUALI communication orale - photo II.15) a montré la même structure de faux clivages. Les lames effectuées dans l'échantillon (photo II.16) contenaient le même type de fente de tension que précédemment.

* Station J.

Dans cette station deux observations permettent de mettre en évidence un mouvement relatif des couches supérieures vers le S.E (Fig.II.19) :

. Les stylolites N.E - S.W initialement verticaux et normaux aux couches basculés vers le S.E.

. Des fentes de tension décimétriques (ouverture 1 à 2 cm) pentées vers le NW se développent en échelon dans l'épaisseur du banc; l'un et l'autre dispositif localement réunis traduisent un cisaillement horizontal dans l'épaisseur même des bancs - La vergence est S.E



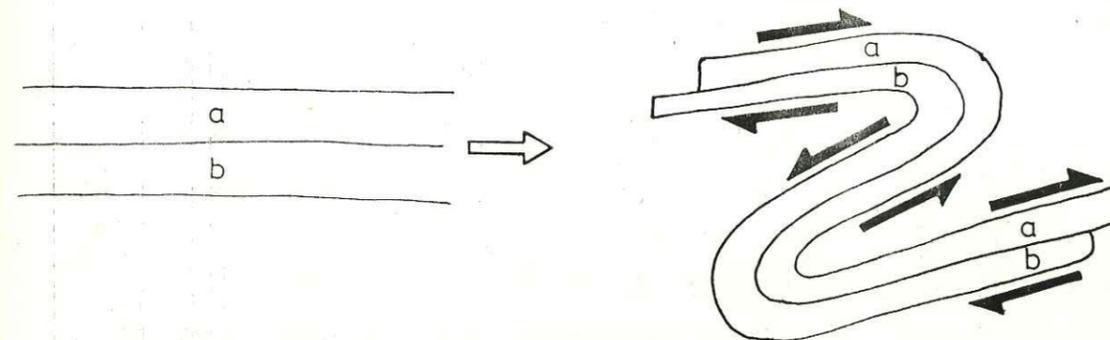
FigII.19. Station J. Rotation des joints Stylolitiques et mouvement des fentes de tension en échelon durant les mouvements selon les joints de stratification

b - Mouvements vers le N.W induits par la flexure.

La formation d'un plis faille résulte de la superposition des deux étapes de déformation suivantes comme schématisé ci-dessous :

- la première du type souple conduit à la formation de flexures dans les strates initialement tabulaires (Fig.II.7).

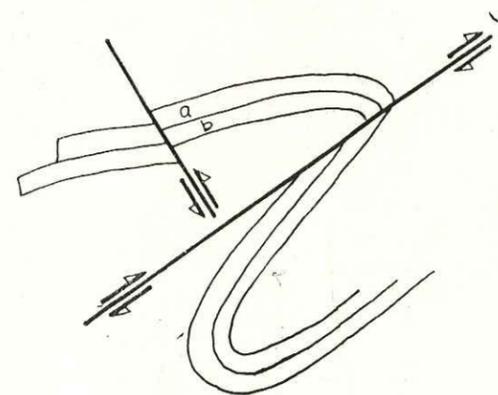
* 1^{ère} étape



Des mouvements relatifs des strates les unes par rapport aux autres apparaissent dans les flancs des plis. Les déformations dans les charnières sont limitées à l'ouverture des joints de stratification.

- la seconde du type cassant transforme le plan axial et/ou un plan - souvent de même direction - en une faille inverse. Le flanc supérieur chevauche alors le flanc inférieur.

* 2^{ème} étape



Les déplacements selon son conjugué et/ou l'une de leurs répliques provoquent le cisaillement de tous les types de structures qui lui sont antérieures.

b₁ - Mouvements dans les couches (induits par la flexure).

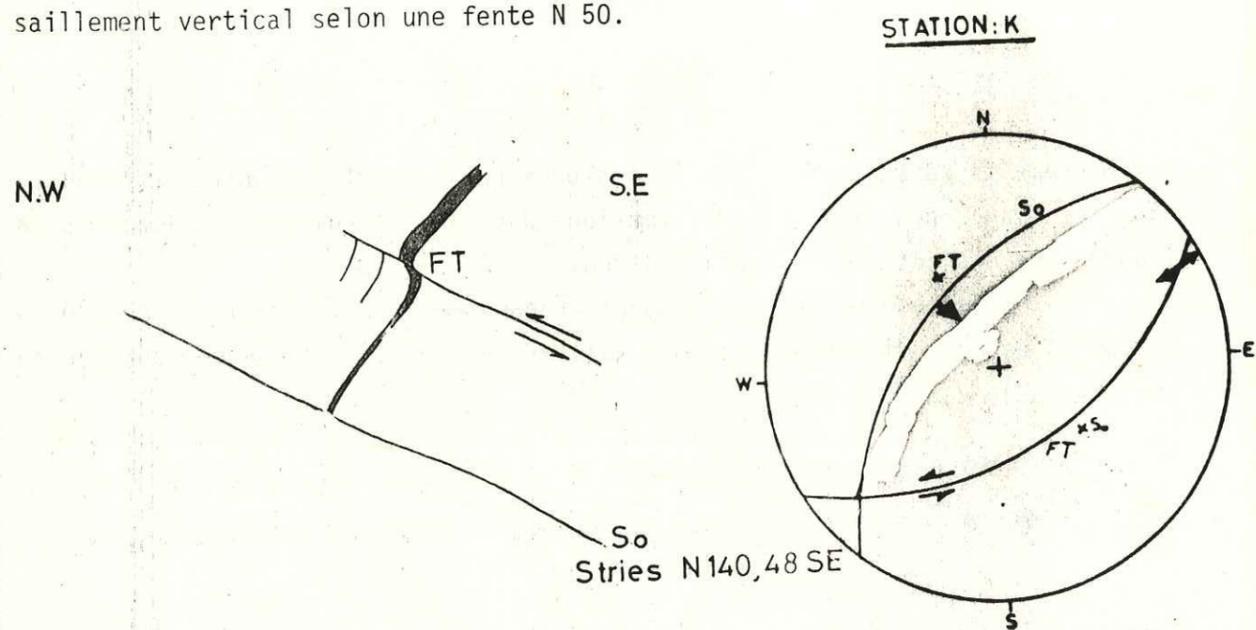
Deux stations permettent d'illustrer ce mouvement.

* Station K

Le décalage vers le N.W (couche supérieure) d'une fente de tension N.50 colmatée, au niveau d'un joint de stratification indique un mouvement vers le N.W (Fig.II.20)

D'autres indices de sens de direction de mouvement y sont observables :

- Stries N 140 et N 135 et stries de décrochement N 45 (analogues à celles du faisceau N.E - S.W) sur strates.
- Les parties S.E des joints de stratification sont rehaussées suite à un cisaillement vertical selon une fente N 50.



Traces cyclographiques et polaires. Cannevas de Wulf. H.S.

FigII.20 Station K vue en coupe. Mouvements dans les couches liés à la formation de la flexure

* Station M

L'étude de cette station (Fig.II.21) appelle les remarques suivantes :

. Elle confirme les observations mentionnées précédemment au sujet de la flexure et les mouvements vers le N.W.

La déformation des fractures et leur décalage vers le N.W sont de plus en plus marqués à l'approche de φ .

. Une ouverture localisée (charnière du pli-faille) des joints de stratification est observée (fig.II.21).

Cette ouverture - différente de celle plus générale induite par le mouvement relatif des strates vers le S.E (Fig.II.19. Photo 17) - est à l'origine des fentes de tension cisailées et décalées par φ .

b₂ - Déformations supplémentaires dues au pli-faille.

Les repercussions de la transformation de la flexure en pli-faille sont les suivantes :

- apparition de nombreuses répliques du plan principal de faille inverse φ ;
- apparition d'un réseau de plans conjugués de φ ;
- le déplacement inverse selon φ est de l'ordre d'un mètre. Il est déduit du décalage d'une fente de tension N 50 colmatée (Photo II.18);

Des blocages locaux seraient à l'origine des variations de directions des déplacements selon φ . Ceci explique la présence de stries de directions différentes sur le plan de φ strié : N 96, N 115 et N 140 (direction principale de mouvement).

La station L fournit des exemples des repercussions précédemment décrites :

* Station L

Sur une réplique de φ , la torsion et le cisaillement de diaclases fentes du faisceau NE - SW indique un déplacement vers le NW. (Fig II.22. Photo II.19).

Trois familles de stries : N 102, N 115 et N 125 sont mesurables sur les diaclases fentes décalées.

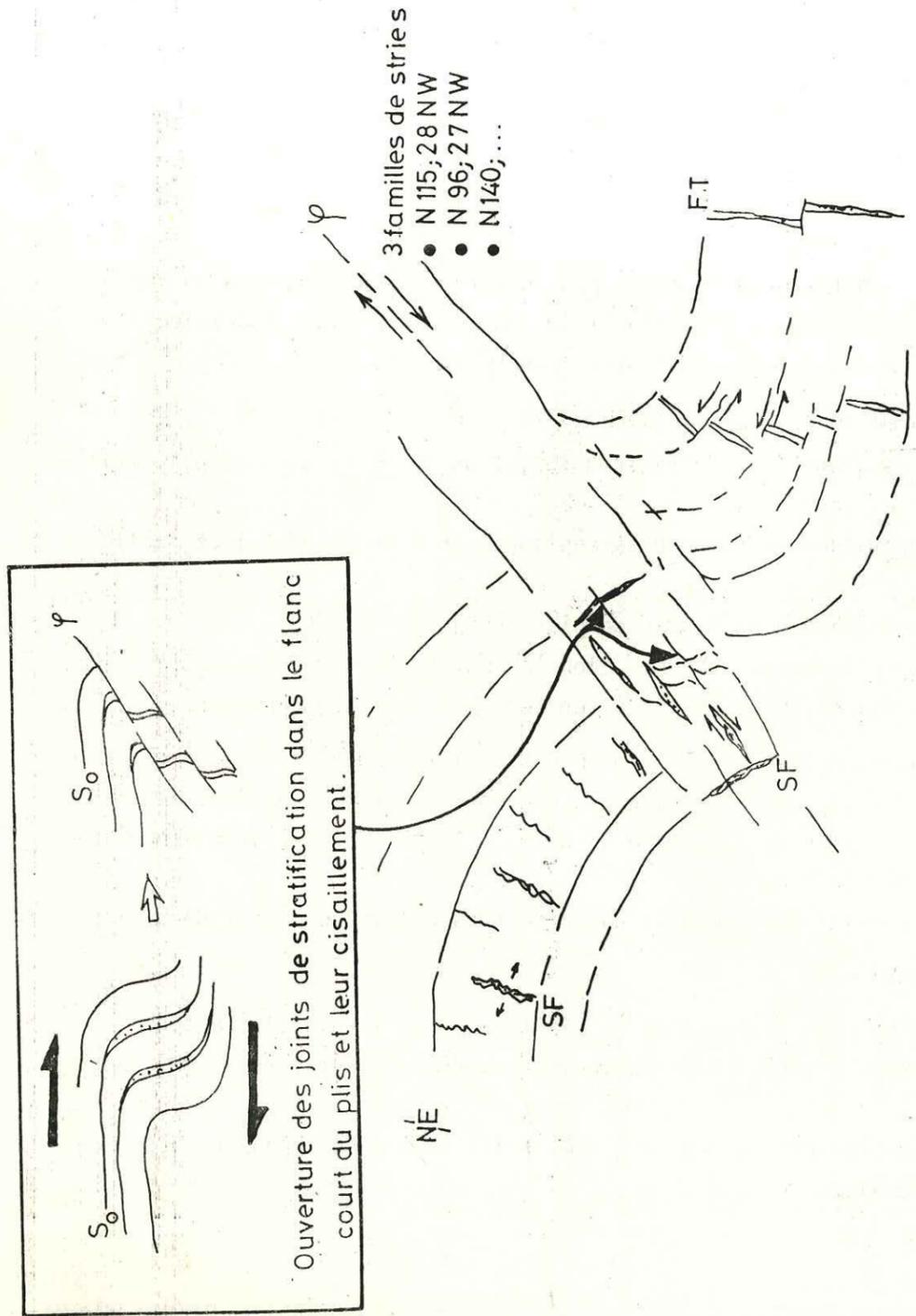


Fig. II.21 Station M vue en coupe. Detail au voisinage du plan de cisaillement φ accompagnant la flexure.

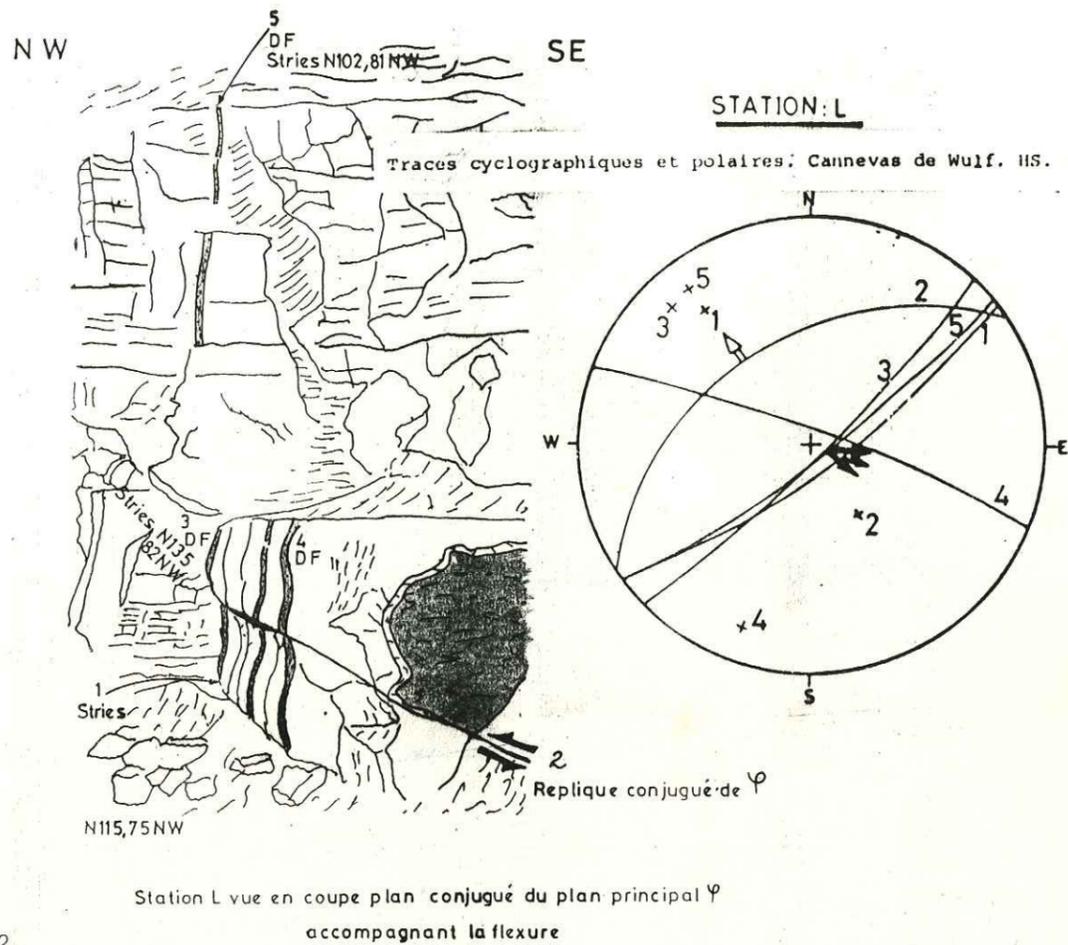


Fig. II.22.

c - Répartition des mouvements dans les couches.

La synthèse des observations tirées des stations décrites dans les paragraphes a et b permet de proposer le mécanisme suivant (Fig. II.23) pour la déformation dans les strates

- . 1^{er} Stade : un cisaillement général provoque un déplacement relatif des couches supérieures vers l'E-S-E (direction probable N 100).
- . 2^{ème} stade : dans un deuxième temps, le mouvement dans les couches se poursuit selon une direction probable N 140. (vers le S-E).

Un blocage de ce mouvement conduit à la formation d'une flexure de direction NE - SW (N 45 environ) qui évolue en pli-faille.
 Les mouvements vers le NW sont donc étroitement liés à la formation du plis-faille. Ceci est compatible avec leur localisation dans la charnière et les parties avoisinantes.

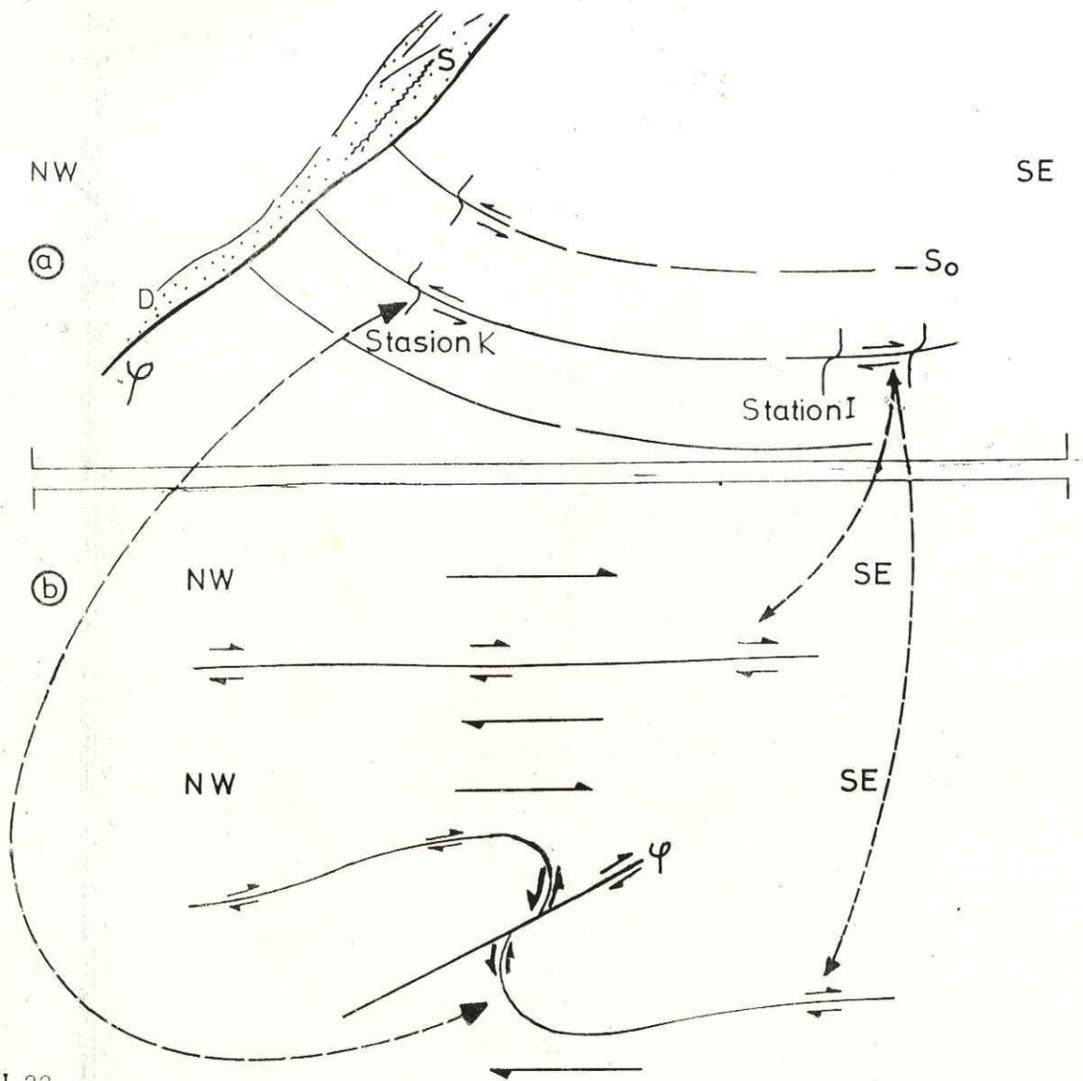


Fig II.22. Vue en coupe a et schemas d'explication b de la formation du pli-faille et structures associées

II.3.3. - Les mouvements selon le faisceau N 135.

Un seul indice de ce mouvement fût reperé à la station G (Fig.II.23). Il s'agit du plissement de fentes de tension N 50 à la traversée d'une diaclase fente de direction N 125. La géométrie indique un mouvement de décrochement dextre .

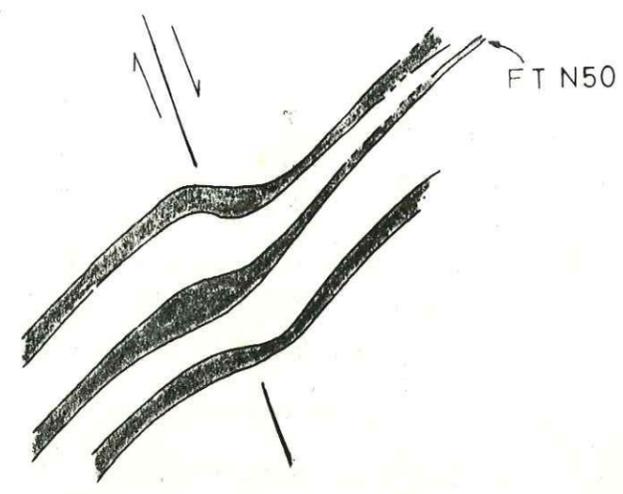


Fig II.23. Station G vue en plan. Indice de mouvement dextre selon le faisceau N135 Torsion de fentes de tension N50 à remplissage de calcite

Ce mouvement dextre pourrait être le conjugué de celui, senestre, du faisceau NE - SW.

II.3.4. - Conclusion.

L'étude cinématique de ce site a montré la variété et le nombre des mouvements qui se sont succédés dans le synclinal de l'Oued El Kebir. Elles correspondent à une succession d'états de contrainte-probablement à partir de l'Eocène supérieur - qui ont affecté le site du barrage comme le reste de la région.

Les discontinuités et hétérogénéités - ainsi induites donnent au site son originalité structurale et influencent les conditions hydrauliques. Leurs repercussions sur l'aménagement sera démontrée à l'occasion de l'analyse de l'étanchéité du site et de l'explication des fuites apparues dès la première mise en eau.

II.4 - Evolution tectonique du synclinal de l'Oued El Kebir
 (Essai de synthèse régionale - Zone de l'accident de Zaghouan).

Le regroupement des mouvements décrits dans l'étude cinématique permet de reconstituer l'essentiel des étapes majeures de l'évolution structurale du site du barrage ainsi que du synclinal de l'Oued El Kebir. Par extension, à la lumière de l'histoire polyphasée ainsi reconstituée un essai de compréhension de l'évolution régionale des principaux massifs de la dorsale tunisienne (Bargou, Serdj, Boudabbous) sera tentée.

II.4.1 - Chronologie des déformations.

Dans cette étude nous nous limiterons à classer les événements tectoniques selon une chronologie relative à partir de l'Oligocène (matériel étudié : calcaires lutetiens; les marnes du Priabonien ne fournissent aucune indication).
 A notre avis, au stade actuel des études microtectoniques de l'ensemble de la Tunisie tout essai de chronologie absolue sera confronté aux handicaps suivants :
 * faible nombre des références bibliographiques: nous regrettons que les études aboutissant à une classification fine des orientations du tenseur du contrainte et/ou de déformations dans le temps - à l'image de celle de LETOUZEY et TREMOLIERE (1980) soient très rares ;
 * manque de clarté des interprétations actuelles qui estiment de façon contradictoire, le nombre et les effets des phases de compression et de distension.

II.4.2 - Evolution tectonique du synclinal de l'Oued El Kebir.

a - 1 ère phase : formation des diaclases et stylolites (fig.II.24)

Après l'Eocène, les traits structuraux dominants dans le secteur d'étude sont les suivants :
 des ébauches de plis anticlinaux de direction NE - SW existent à l'emplacement actuel des massifs Bargou et Zaghouan limités par des synclinaux.

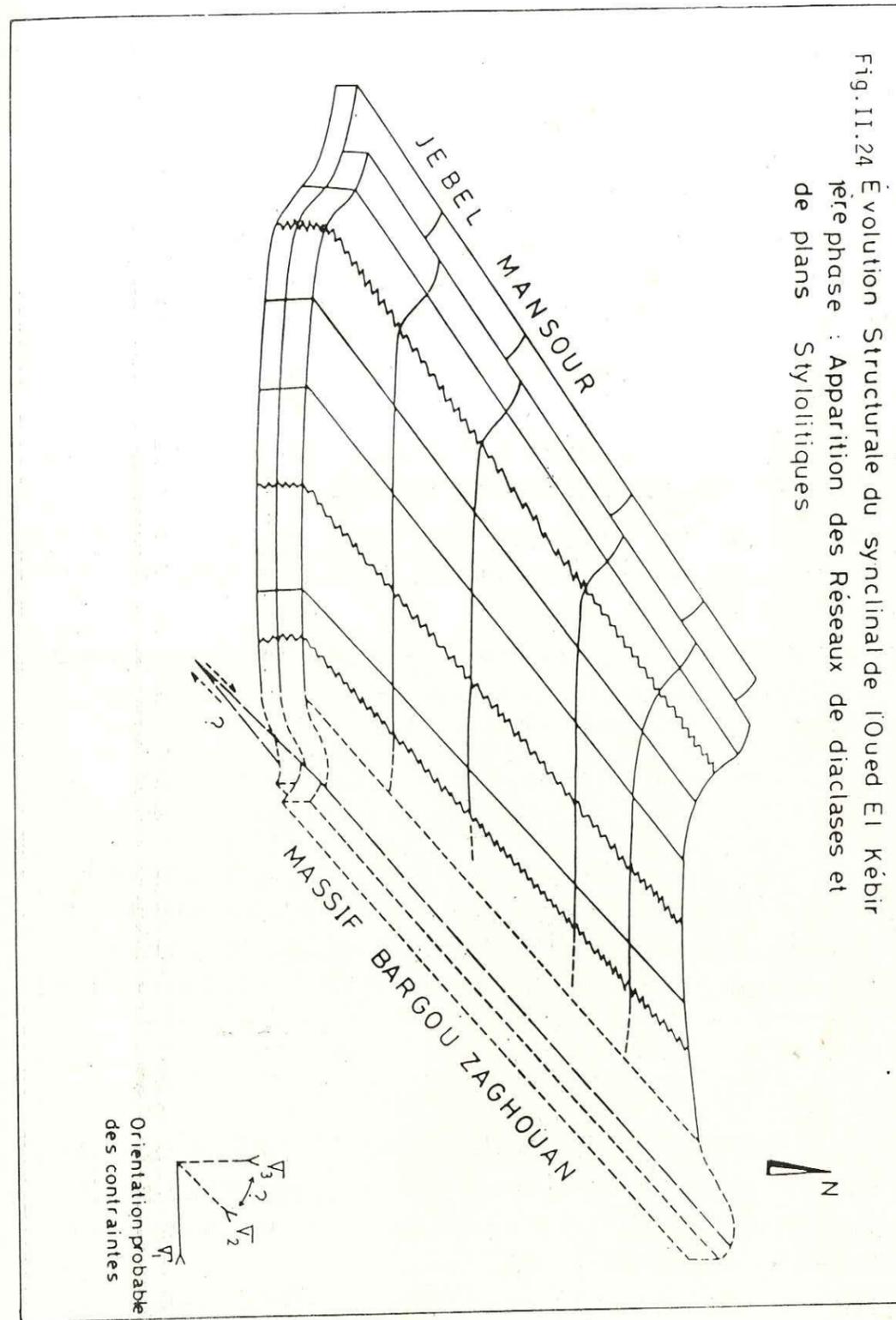


Fig. II.24 Evolution Structurale du synclinal de l'Oued El Kebir
 1ère phase : Apparition des Réseaux de diaclases et de plans Stylolitiques

. L'accident de Zaghouan - manifestation probable dans la couverture secondaire d'une ancienne direction d'accident de socle-est apparemment le siège de mouvements successifs depuis le début de l'évolution décrite ici. Le premier de ces mouvements - après l'Eocène - aboutit à la formation de deux réseaux de diaclases : un réseau NE - SW longitudinal (parallèle à l'accident) et un second NW - SE transversal.

Par accentuation du raccourcissement NW - SE, des plans stylolitiques NE - SW apparaissent.

Ainsi pendant cette étape, la contrainte principale majeure σ_1 avait une direction N 140 (orientation des pics et doigts stylolitiques).

b - 2^{ème} phase : ouverture des diaclases et stylolites NE - SW. Des fluides minéralisants saturés permettent le colmatage de certaines fractures ouvertes. (Fig.II.25).

L'ouverture de ces discontinuités s'est probablement effectuée selon une direction de contrainte principale mineure σ_3 voisine de N 140 (fentes de tension N 50) attestant la permutation des contraintes.

c - 3^{ème} phase : Effondrement des compartiments SE des fractures NE - SW (Fig.II.26).

Une permutation possible entre la contrainte principale majeure σ_1 (devenue verticale) et la contrainte principale intermédiaire (devenue horizontale) aurait permis à l'accident de Zaghouan d'évoluer en véritable faille normale. Ce mouvement induit dans le synclinal, l'effondrement des compartiments SE des discontinuités NE - SW précédemment ouvertes.

d - 4^{ème} phase : mouvement relatif des strates vers le SE (Fig.II.27).

Une reprise de la compression NW - SE (de direction probable N 100) entraîne les couches du synclinal dans un mouvement horizontal relatif et généralisé vers l'E-SE. Les discontinuités verticales précédemment décrites se trouvent ainsi déformées.

Ce mouvement pourrait correspondre aux premières manifestations chevauchantes (vers le SE) de l'accident de Zaghouan. Dans ce cas ces manifestations seraient accompagnées d'une tendance au décrochement dextre selon cet accident. Ceci permet d'expliquer la direction d'entraînement généralisée N 100 et non N 140.

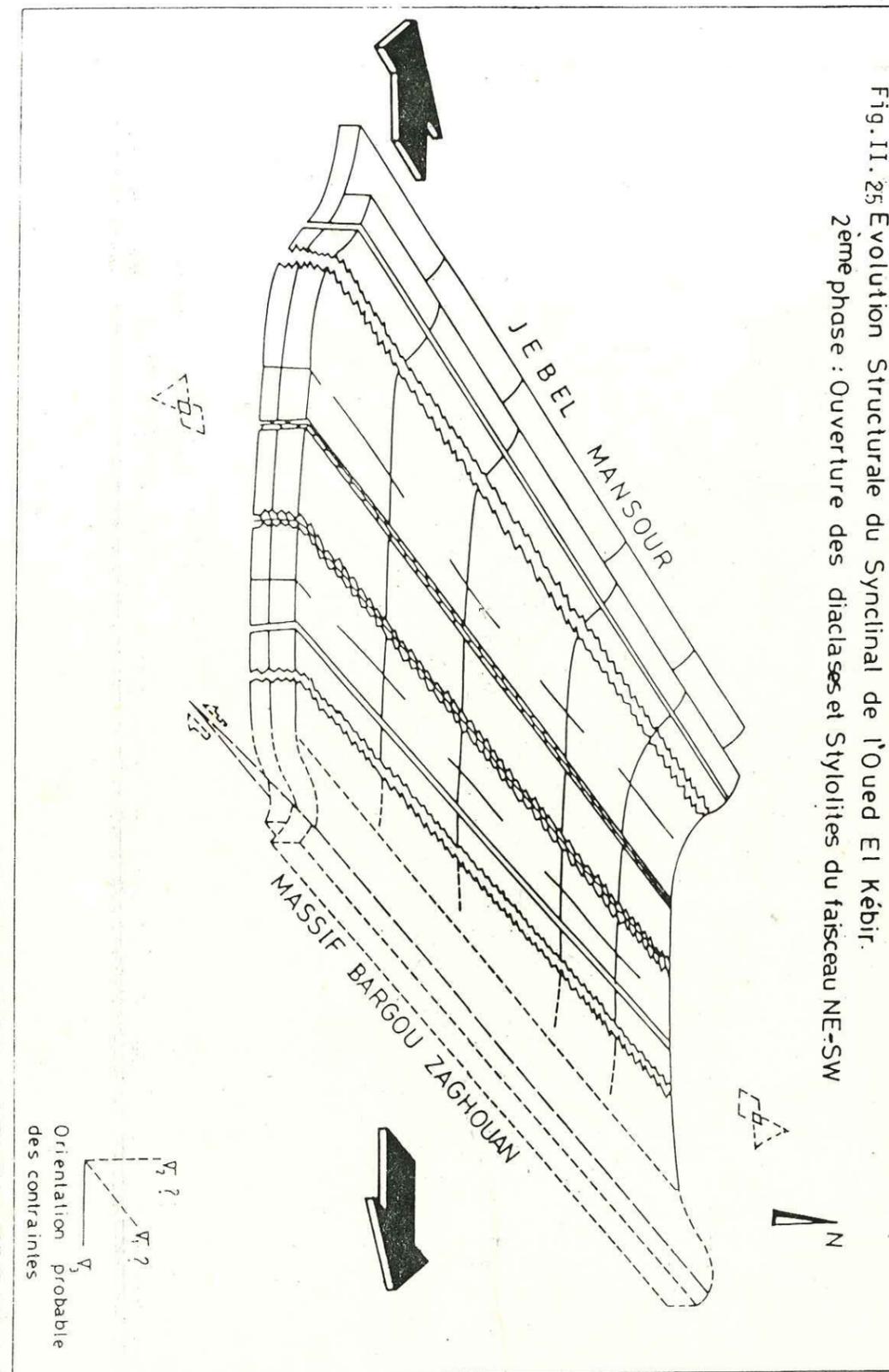
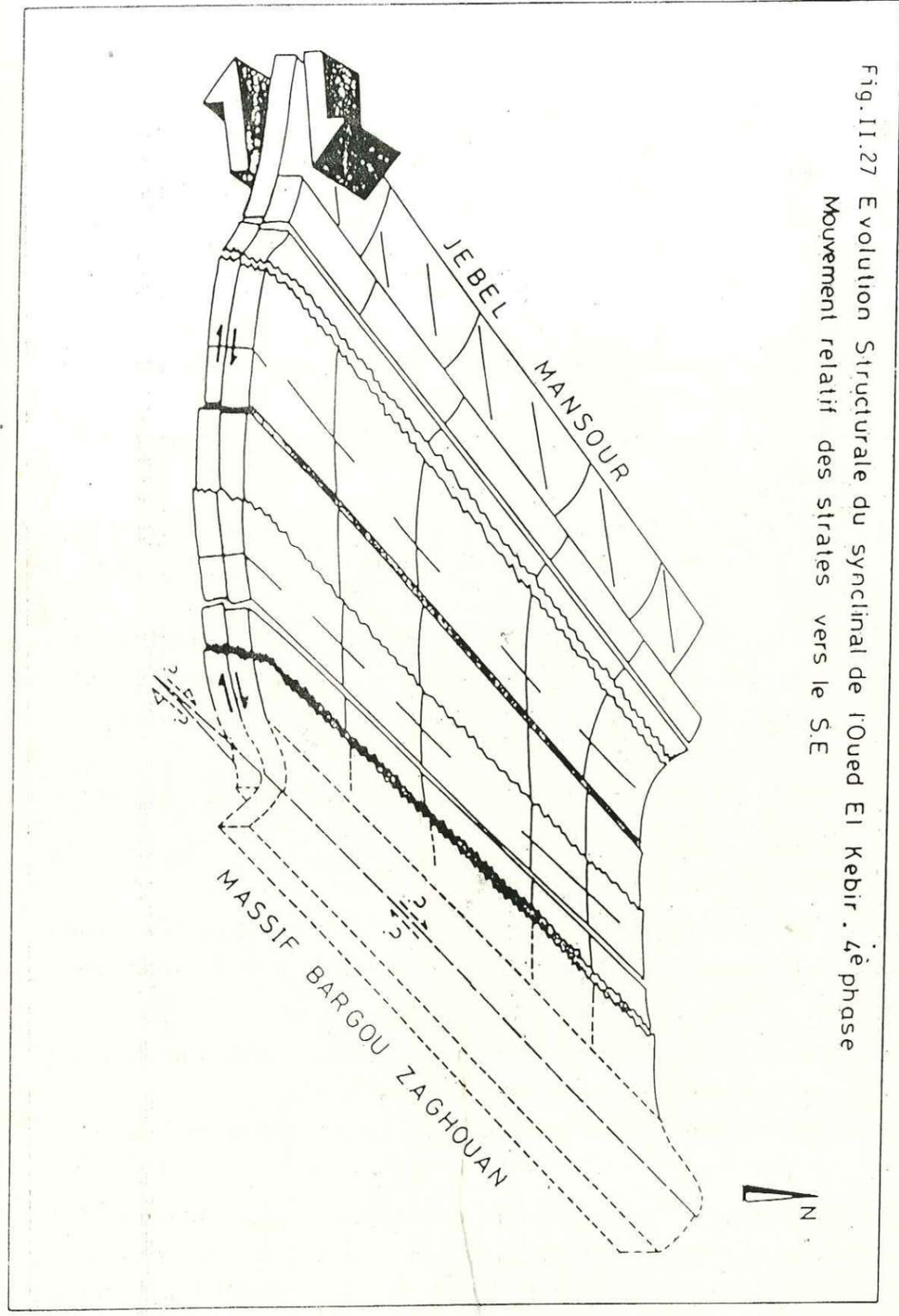
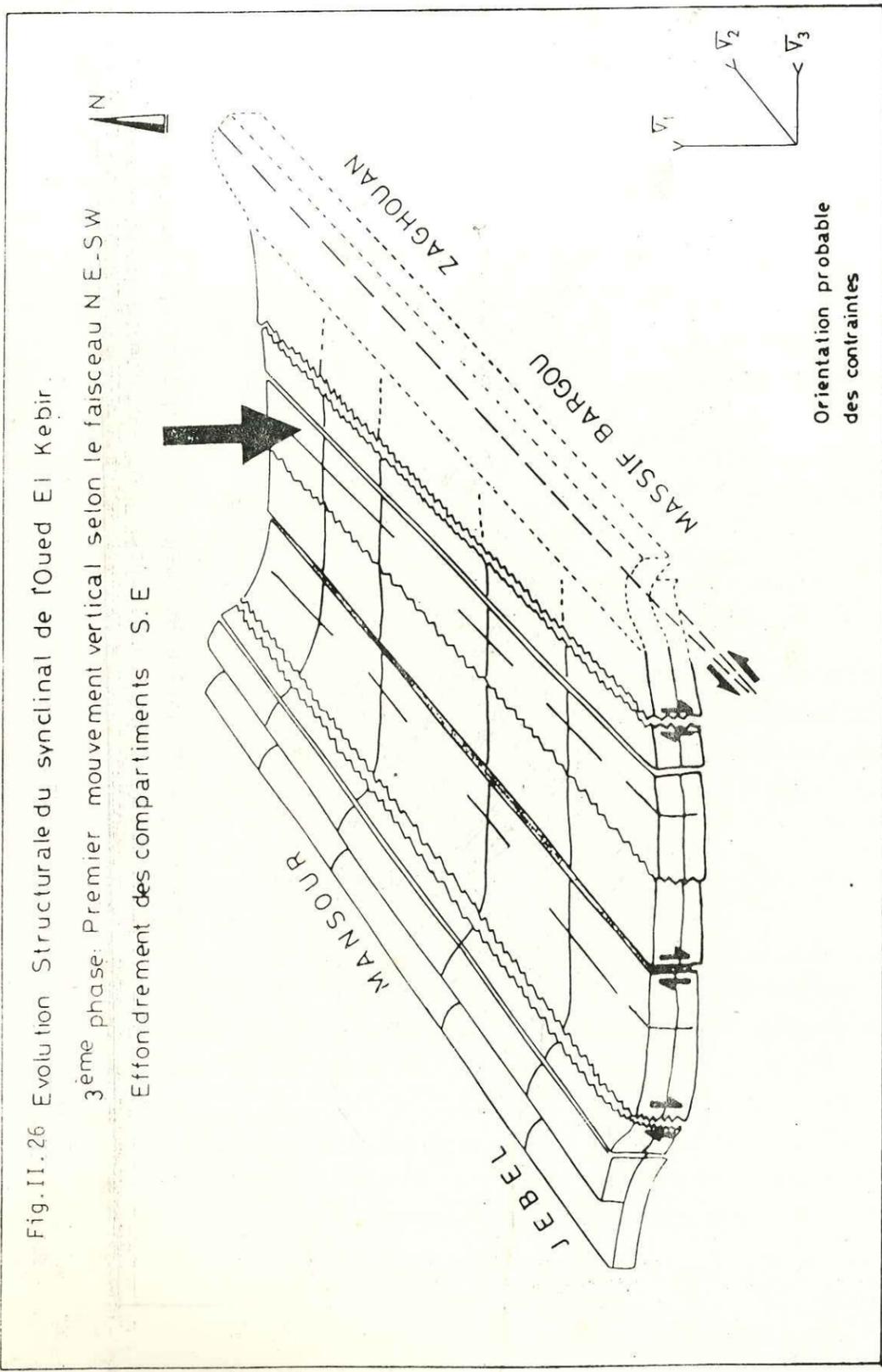


Fig.II.25 Evolution Structurale du Synclinal de l'Oued El Kébir.
2^{ème} phase : Ouverture des diaclases et Stylolites du faisceau NE-SW



e - 5 ème phase : paroxysme de la déformation : expression des plis NE - SW (Fig. II.28).

Le chevauchement de la serie jurassique vers le SE - selon l'accident de Zaghouan, ayant atteint son apogée, des blocages du mouvement entraînent la formation de plis principaux dans la couverture déplacée.

Localement, des repliques de ces plis sont apparus.

C'est ainsi que sur le flanc NW du synclinal de l'Oued El Kebir plusieurs flexures ont pris naissance. Celle du site du barrage de Sidi Boubecker en est l'exemple.

Les déformations et les mouvements provoqués par ce type de plis (parfois plis faille) ont été précédemment décrits.

Durant cette étape, nous proposons l'orientation probable des directions principales de contraintes :

. majeure σ_1 : N 140, intermédiaire σ_2 : N 50, mineure σ_3 verticale.

f - 6 ème phase : jeu en décrochement des réseaux NE - SW et N 135.

Une rotation (Fig.II.29) des directions de contrainte principale majeure et contrainte principale intermédiaire de l'étape précédente provoque le cisaillement des fractures NW - SW (décrochements senestres) et des fractures NW - SW (décrochements dextres).

Nous pensons que depuis ce mouvement - l'orientation du tenseur de contraintes régionales n'a pas subi de changements.

II.5 - Essai de synthèse régionale

Le but de cet essai est de discuter les limites d'une possible signification générale - à l'échelle de la Tunisie Nord-orientale - de la reconstitution précédente.

A cet effet, il convient de chercher des éléments de réponses dans deux voies différentes :

- . Confrontation aux données bibliographiques.
- . Confrontation aux données de fracturation régionale.
- a - Confrontation aux données bibliographiques

La confrontation des étapes de l'évolution tectonique du synclinal de l'oued El kebir avec les étapes reconstituées par six auteurs différents dans l'axe Nord-Sud (DELTEIL, TRUILLET), dans la zone de la faille de Gafsa (ZARGOUNI), en Tunisie orientale (HALLER), dans la zone de Djerba (PERTHUISOT) appelle les constatations suivantes :

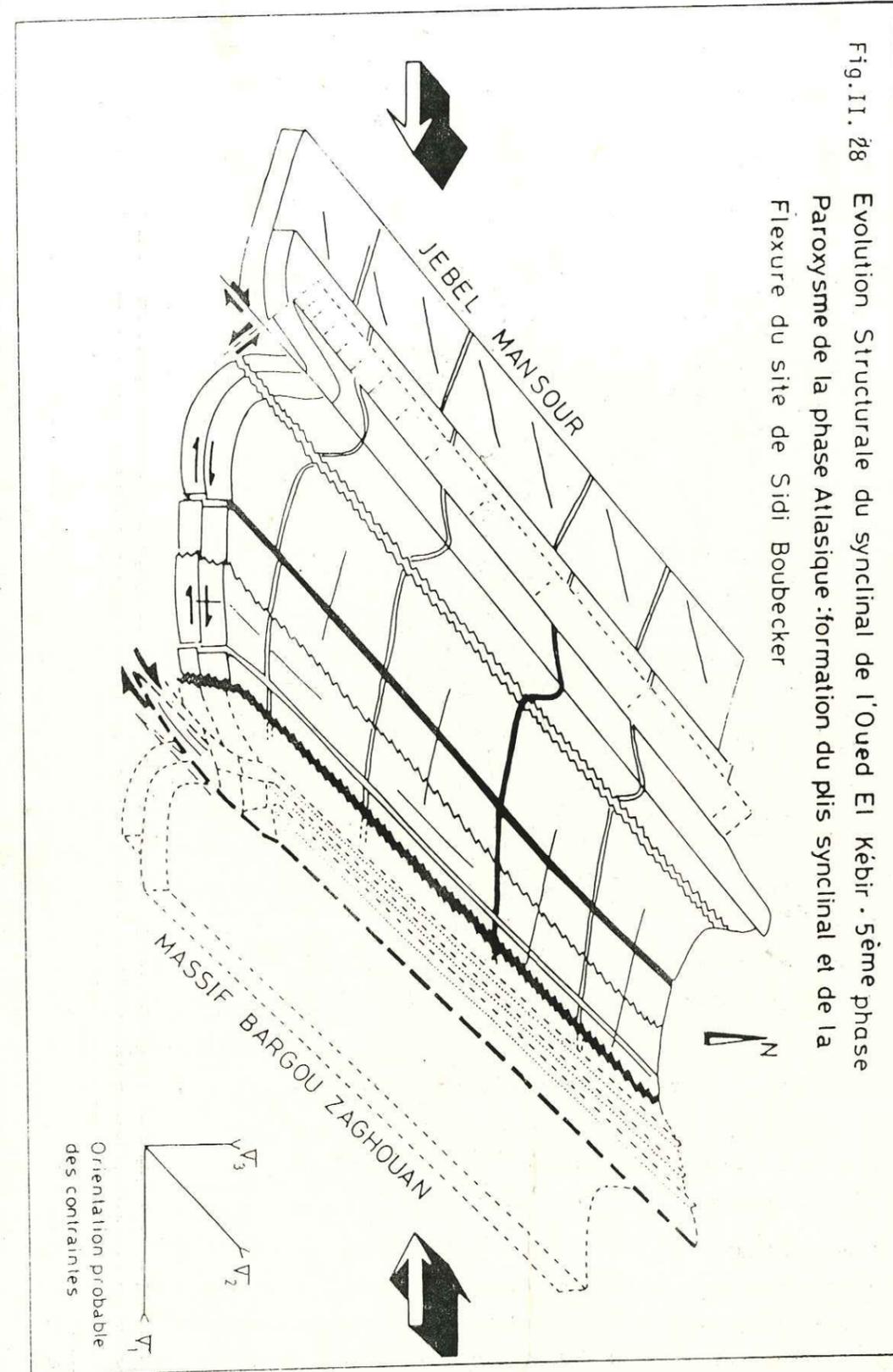


Fig.II. 28 Evolution Structurale du synclinal de l'Oued El Kébir - 5ème phase Paroxysme de la phase Atlasique : formation du plis synclinal et de la Flexure du site de Sidi Boubecker

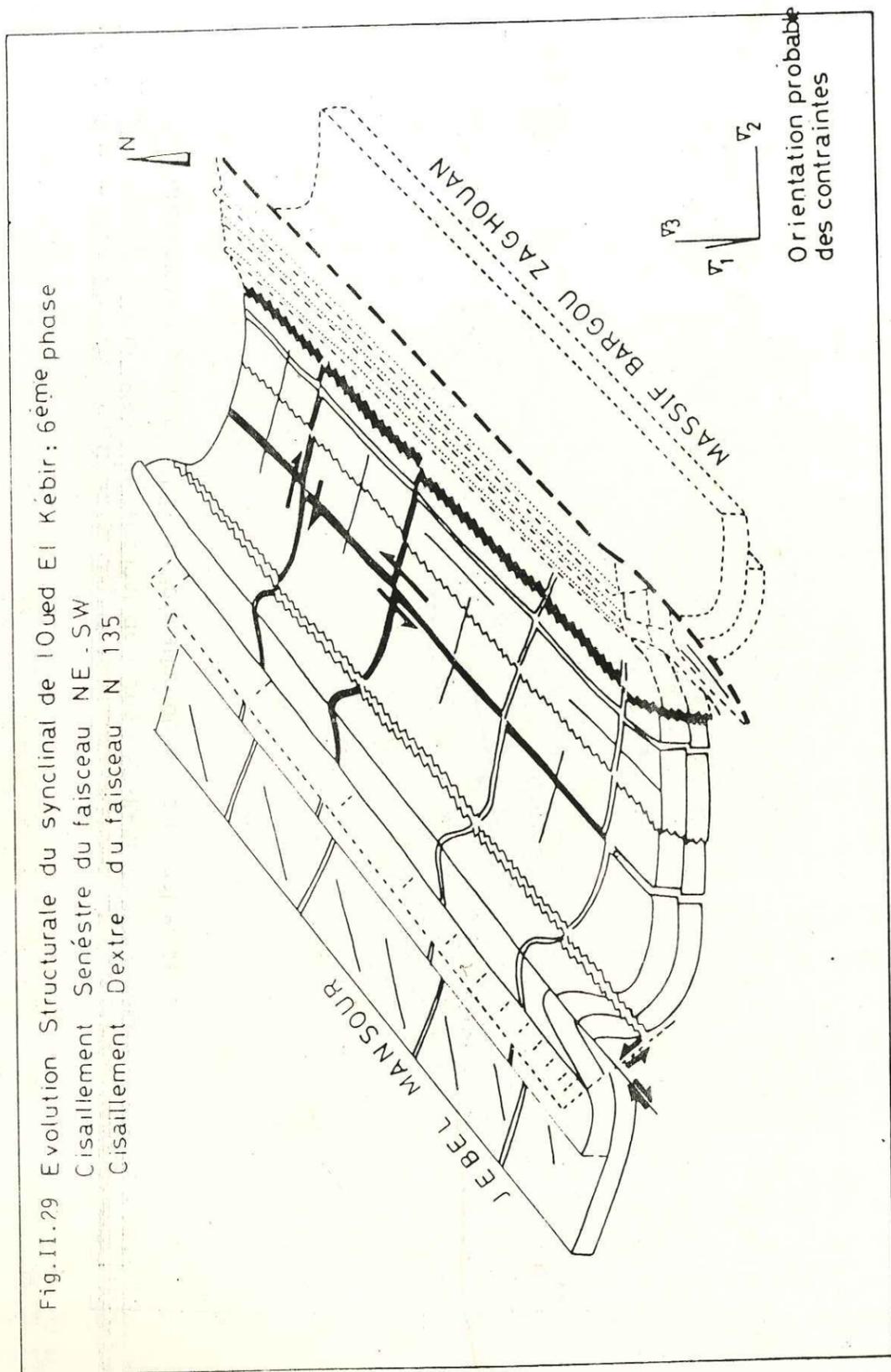


Fig.II.29 Evolution Structurale du synclinal de l'Oued El Kebir: 6ème phase
 Cisaillement Senestre du faisceau NE-SW
 Cisaillement Dextre du faisceau N 135

Comme le montre le tableau II.1 chacune des étapes reconstituée pourrait correspondre à certaines des phases tectoniques décrites par ces auteurs (Mise à part l'étape d'effondrement suivant les directions NE - SW).

La différence avec les travaux antérieurs réside en deux points essentiels :

- Le nombre de phases qui peuvent être mises en correspondance :

Le nombre de phases conformes aux étapes décrites ne dépasse guère trois pour la plupart des auteurs. Il est limité à une phase dans certains cas.

Parfois et pour un même auteur, ce nombre varie selon l'âge qui pourrait être attribué à la phase atlasique majeure. (Voir par exemple la synthèse de DELTEIL J.1982).

- La direction d'entraînement des couches - N 100 constitue une originalité du synclinal de l'oued El Kebir. Son équivalent n'existe que pour ZARGOUNI, DELTEIL et TRUILLET (1979) qui décrivent des déplacements en direction de l'est dans l'axe N-S (Tunisie centrale).

Il y a un consensus apparent sur l'existence d'une compression submérienne achevant l'histoire régionale (Plioquaternaire ou quaternaire très récent - équivalent de la 6ème étape).

Ainsi cette comparaison nous permet de proposer l'esquisse suivante pour les phases de déformation en Tunisie Nord-orientale. (Voir tableau II.2).

Cette esquisse dégage trois directions de recherches que nous espérons entreprendre pour essayer de lever les doutes concernant :

la direction d'entraînement lors de la phase de tectonique tangentielle en Tunisie centrale (E et/ou SE).

l'âge exact de la phase atlasique. Ceci exige entre autre de faire la différence entre phase majeure et phases de reprise ultérieures.

la persistance ou non jusqu'à nos jours de la compression submérienne.

b - Confrontation aux données de la fracturation régionale : analyse photogéologique .

A partir de la carte géologique des massifs : Bargou; Serdj, Boudabbous et Fkirine , (Feuille Maktar au 1/200.000.P.GUI RAND. 1968) une carte des accidents et fractures fût déduite. (Fig.II.30).

Cette dernière a permis l'établissement des rosaces de fracturation en directions globales, des accidents dextres et des accidents senestres. (Fig.II.31). Il en découle que les accidents à apparence cartographique plutôt dextre ou plutôt senestre se classent comme suit (tableau II.3) :

Fig. II.31 MASSIFS BARGOU SERDJ BOUDABBOUS
ROSACES DES FRACTURES ET ACCIDENTS
TECTONIQUES

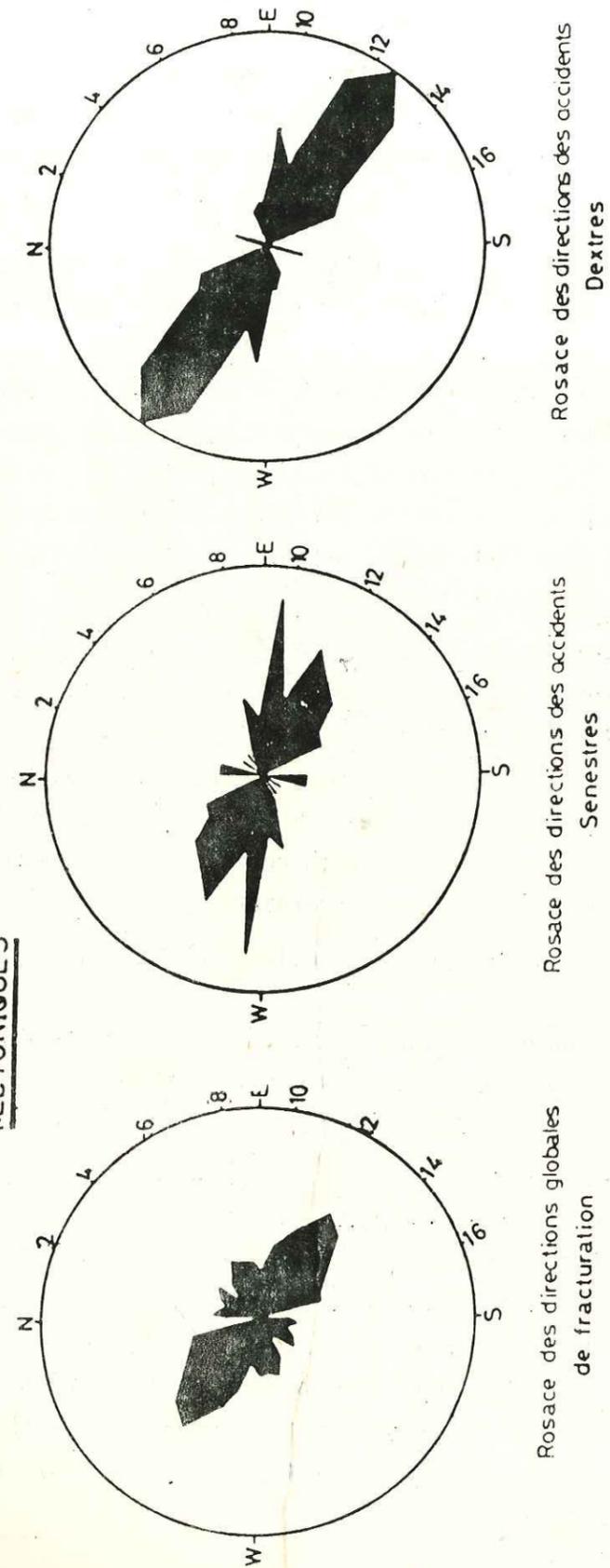


Tableau II.2. Différentes étapes de déformation
en Tunisie Nord orientale depuis l'Eocène.

Phase	Eléments structuraux	Age probable
1 ère Phase Compression N 140	Pics stylolithiques N 140	Eocène terminal
2 ème Phase Extension N140	Ouverture des joints stylolithiques N 50 Ouverture de fentes de tension Effondrements selon les joints N50	Oligocène
3 ème Phase Tectonique tangentielle vers l'Est.	. Mouvements d'entraînement dans les couches . Manifestations chevauchantes selon les failles inverses (Zaghouan). . Chevauchements de l'axe Nord-Sud.	Miocène inférieur
4 ème Phase Compression N 140 "Phase Atlasique majeure".	Chainons de la dorsale et structures correspondantes	Deux âges possibles : Miocène supérieur ou Quaternaire (Post villafranchien)
5 ème Phase	Jeux en décrochement selon les directions conjuguées NE-SW et NW-SE.	Quaternaire récent à actuel.

Tableau II.3. Directions des accidents dextres et senestres.

Type d'accident	Groupes de fractures			
Accidents dextres	N 20	N 70 à N 100	N 120 à N 140	N 160
Accidents senestres	N 20	N 40	N 70 à N 100	N 120 à N 160

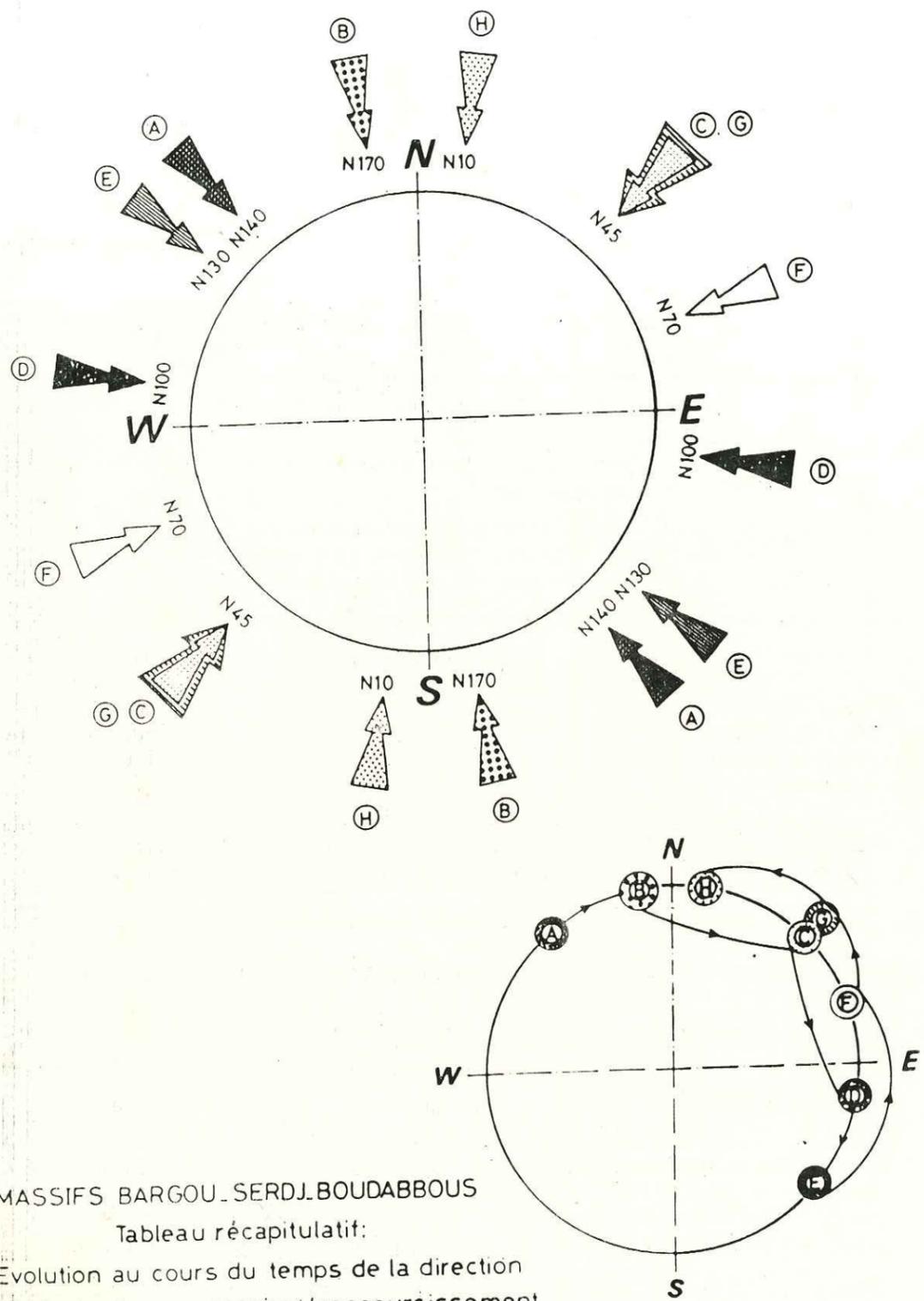
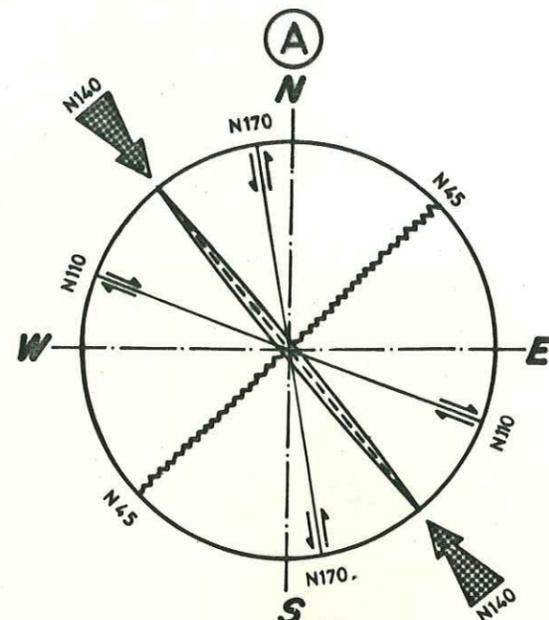
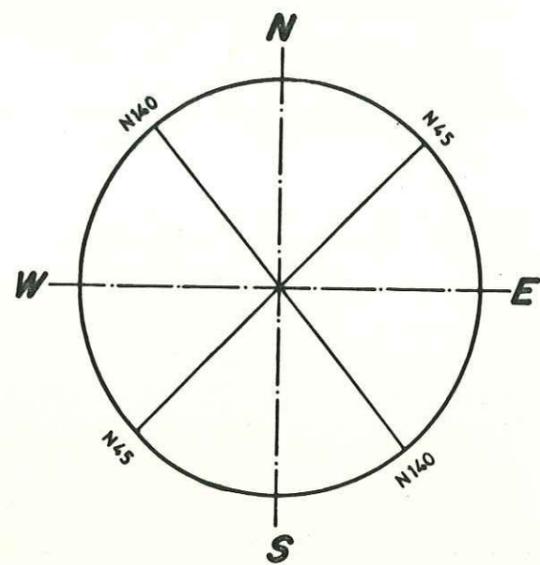
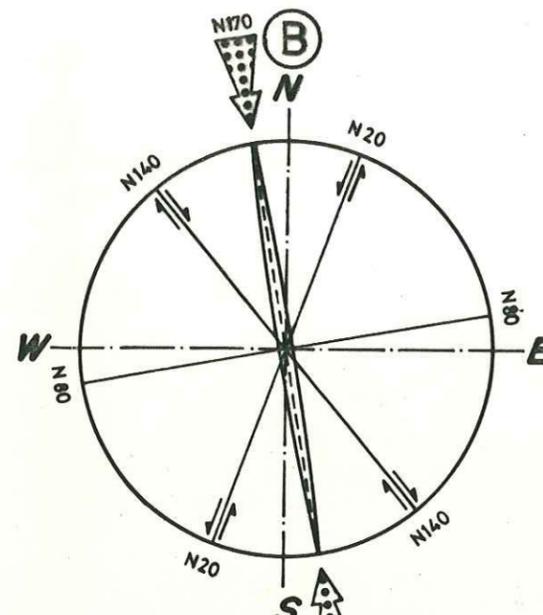


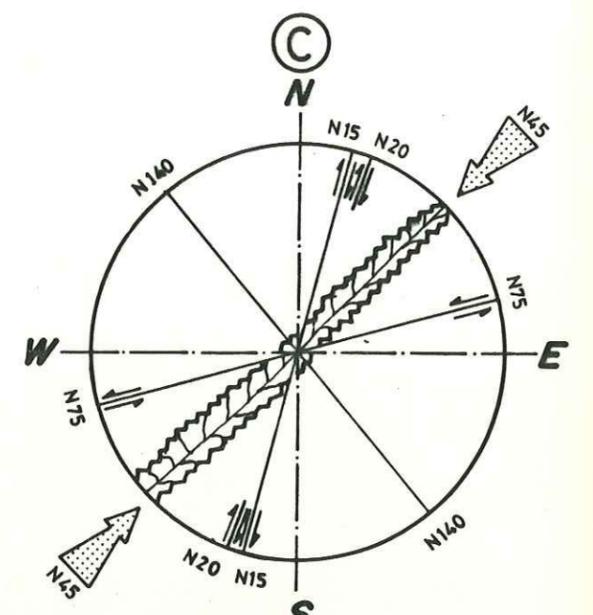
Fig. II. 3. MASSIFS BARGOU-SERDJ-BOU DABBOUS
 Tableau récapitulatif:
 Evolution au cours du temps de la direction
 générale de compression/raccourcissement.



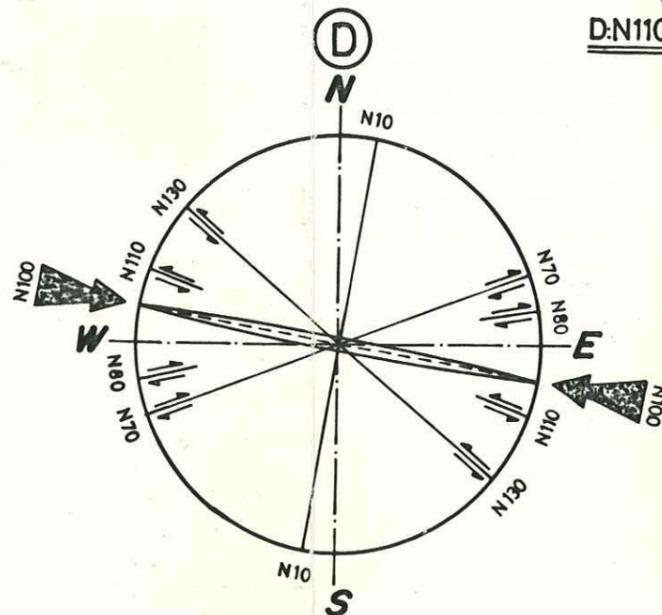
D:N110, S:N170



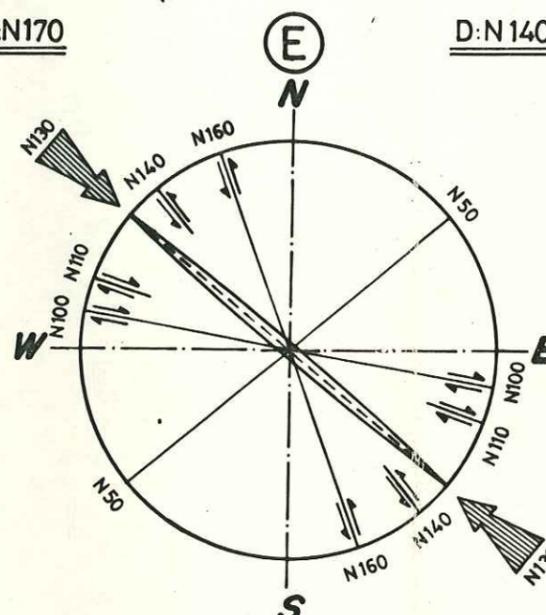
D:N140, S:N20



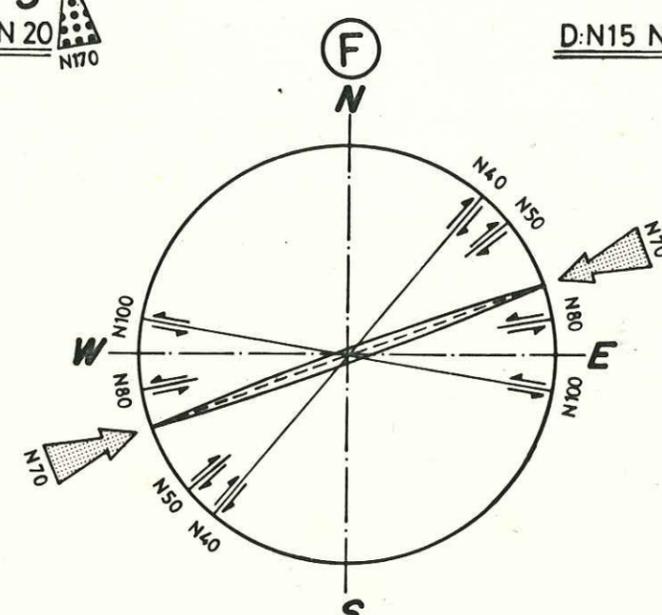
D:N15 N20, S:N80



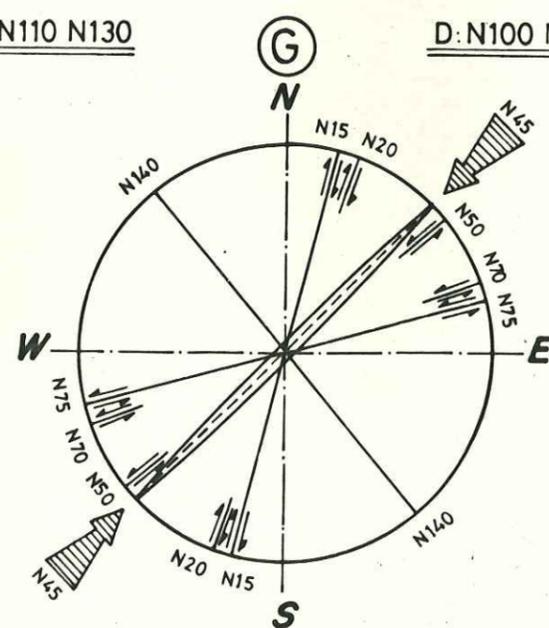
D:N70 N80, S:N110 N130



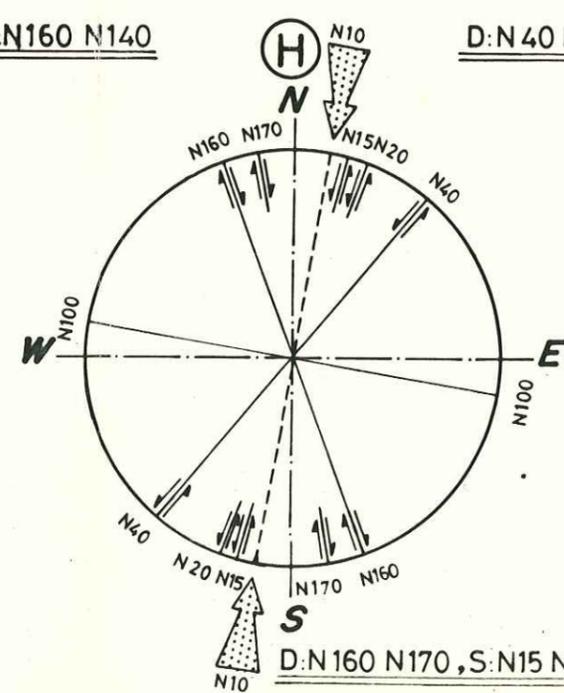
D:N100 N110, S:N160 N140



D:N40 N50, S:N100 N80



D:N15.N20, S:N50 N70 N75



D:N160 N170, S:N15 N20 N40

MASSIFS BARGOU - SERDJ. BOUDABBOUS

Tableau récapitulatif:

Différentes étapes de l'évolution au cours du temps de la direction générale de compression / raccourcissement.

D: Cisaillement dextre
S: Cisaillement senestre

Fig. II .35

Tableau II.1-Confrontation des étapes de déformation du synclinal de l'oued El kebir aux données bibliographiques.

Phase	Le Touzey et Tremolère (1983) (Tunisie)	Zargouni (Accident de Gafsa).	Truillet Zargouni Deltell (Axe N - S)	Haller (1983) (Tunisie orientale)	Perthuisot (1977) (Ile de Jerba)	Deltell (1982) (Tunisie centrale).
1 ^{ère} Phase Compression N.140.	Eocène Compression N.150	Eocène Oligocène Compression N.140		Eocène moyen (Lutétien) Compression N.135		Post villafranchien Phase atlasique Majeure Compression N.130.
2 ^{ème} Phase Extension N 40	Oligocène supérieur Miocène inférieur compression N.70	Miocène supérieur Extension N 160		Oligocène-miocène inférieur Extension NW-SE		Post villafranchien Anté-Eutyrrhénien. Distension N 130
3 ^{ème} Phase Tectonique tangentielle E			Miocène inférieur Tectonique tangentielle E			
4 ^{ème} Phase Phase atlasique Majeure Compression N. 140	Miocène supérieur Compression N.140			Miocène supérieur Plioquaternaire (sans distinction).		Post villafranchien Compression N 130 Phase atlasique majeure.
5 ^{ème} Phase Compression subméridienne	Plio-quaternaire Compression subméridienne	Post Pliovillafranchien Compression N 175			Quaternaire très récent Compression Subméridienne	Entre Wurm et limons Post Romains Compression submeridienne. Entre Wurm et limons post Romains Compression Subméridienne

- 87 -

Pour l'interprétation de ces directions, en vue d'en déduire une reconstitution de l'évolution tectonique régionale, nous avons fait appel au modèle des décrochements conjugués. Ce modèle - qui permet de prévoir les directions des décrochements conjugués (dextre et senestre) par rapport aux directions des contraintes principales, a été décrit par de nombreux auteurs dont : VIALON et al.(1976) (Fig.II.32), PRICE (1961) (Fig.II.33) et KIRALY.L (1978). (Fig. II.34).

Selon ces auteurs, la contrainte principale majeure est horizontale et bissectrice de l'angle aigu formé par les deux plans de décrochement. La contrainte principale intermédiaire est, quand à elle, verticale.

Théoriquement, l'angle du dièdre aigu que forment les deux décrochements est proche de 90° . Les forces de friction interne dans les roches interviennent pour ramener cet angle à $\frac{\pi}{2} - \phi$ (ϕ : angle de frottement interne de la roche).

Dans les calcaires, la valeur de ϕ étant de l'ordre de 30° , le précédent angle ne vaut alors que 60° .

L'existence des deux directions conjuguées n'est pas une condition nécessaire à l'application de ce modèle.

En effet, l'une des directions de cisaillement peut ne pas se développer si un accident ou plusieurs préexistants ont une direction qui lui est voisine. Dans ce cas le mouvement conjugué se limite à un rejeu de ces directions antérieures. Cela est d'ailleurs vrai pour toutes les directions de fractures.

L'application de ce schéma interprétatif au secteur étudié (Bargou Serdj-Boudabbous) a révélé la possibilité d'existence de huit étapes successives de déformation cassante. (Fig.II.35). Ceci correspond à huit orientations possibles de la contrainte principale majeure σ_1 depuis l'Éocène jusqu'à l'actuel. (Fig.II.36). Nous les avons comparées avec les étapes de déformation du synclinal de l'oued El Kebir (tableau II.4).

MODELES THEORIQUES : cisaillements conjugués superposés.

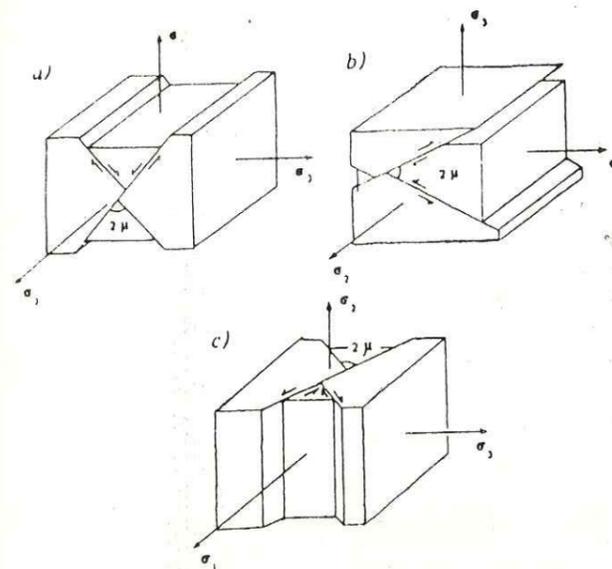


Fig. II.32 Les trois principaux types de failles. a) Failles normales. b) Failles inverses. c) Failles de décrochement. (D'après VIALON et al.-1976.)

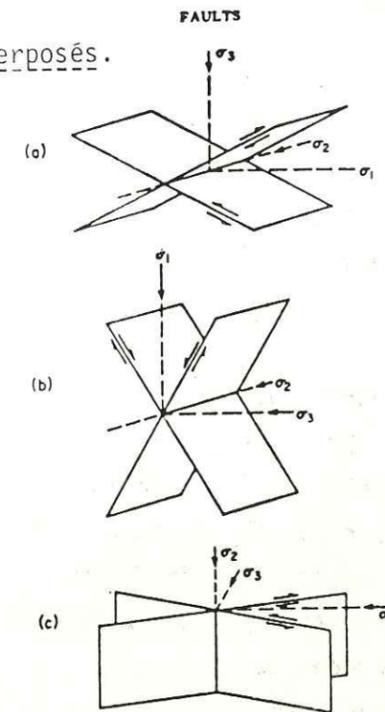


Fig. II.33 Relationship of faults to axes of principal stress (after Anderson). (a) Thrusts—formed when greatest principal stress is horizontal and the least principal stress is vertical. (b) Normal faults—formed when greatest principal stress acts vertically and least principal stress is horizontal. (c) Wrench faults—formed when greatest and least principal stresses act in the horizontal plane and the intermediate principal stress acts vertically. (D'après PRICE-1966.)

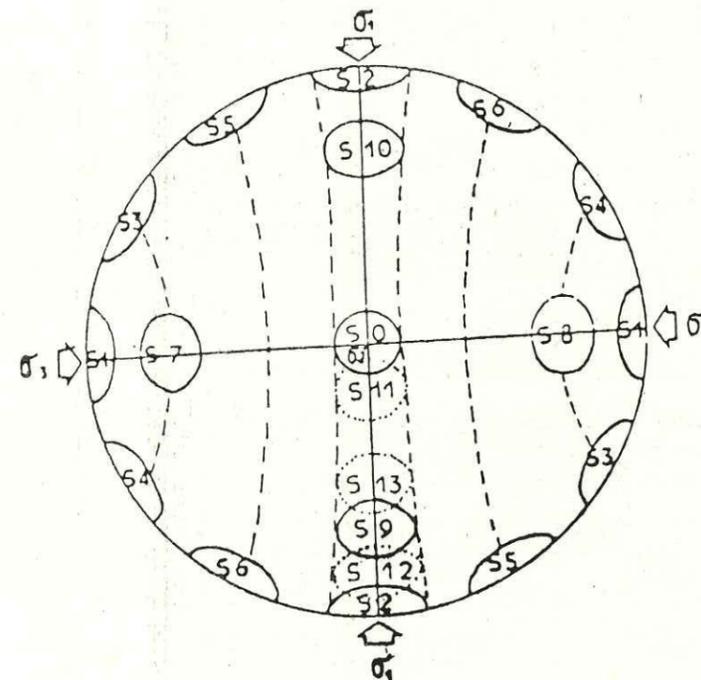
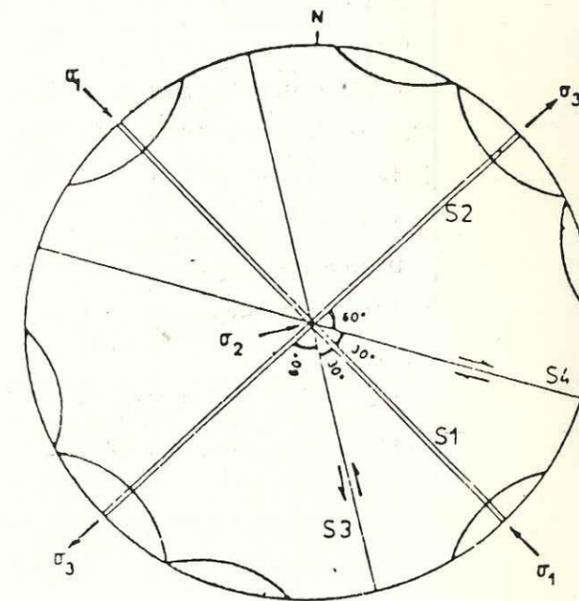


Fig. II.34 Orientation théorique des principaux groupes de fracture par rapport aux contraintes. Projection stéréographique équif-surfaces, hémisphère supérieure (d'après L.KIRALY, 1978, in FORESTIER & VEREZ-1978)



c.- Liaison possible avec des décrochements de socle.

De nombreux travaux ont permis à plusieurs auteurs (FABRE et ROBERT. 1975, VIALON et al.1976, et autres...) de proposer des modèles décrivant les discontinuités et les mouvements engendrés dans la couverture par des décrochements de socle (Fig.II.38).

L'application de ces modèles aux données de fracturation des quatre massifs étudiés ici (Fig.II.39) appelle les commentaires suivants :

. Il est possible d'envisager que les accidents dextres et senestres de la couverture crétacée des massifs ont été provoqués par des mouvements suivant deux directions de décrochement dans le socle, selon la chronologie suivante :

- Un décrochement senestre de direction N 105 engendre dans la couverture des Riedels senestres : N 70 à N 100, leurs symétriques P senestres N 120 à N 160, et leurs conjugués dextres R' : N 20.
- Un décrochement senestre de direction N 175 aurait donné naissance à des symétriques de Riedels P senestres N20 et leurs conjugués dextres R' N70 à N100.
- L'accident N 105 aurait joué tardivement en décrochement dextre. Il est ainsi apparu des R dextres N 120 à N 160, des P dextres N 70 à N 100 et des R' senestres N 20.

. A l'image de la zone étudiée ici, l'interprétation des structures et discontinuités de la Tunisie dans l'hypothèse d'accidents de socle n'est possible que sous deux conditions :

- Il est nécessaire de supposer l'existence de deux directions d'accidents dans le socle : l'une submérienne et l'autre proche de l'E-W.

- Il est indispensable d'admettre que la direction E - W ait joué en décrochement dextre d'abord puis en décrochement senestre ensuite, sans cette inversion du sens de mouvement, il est impossible d'expliquer ni l'existence - dans la couverture - d'accidents dextres et senestres E - W dans la même zone, ni la chronologie relative des mouvements.

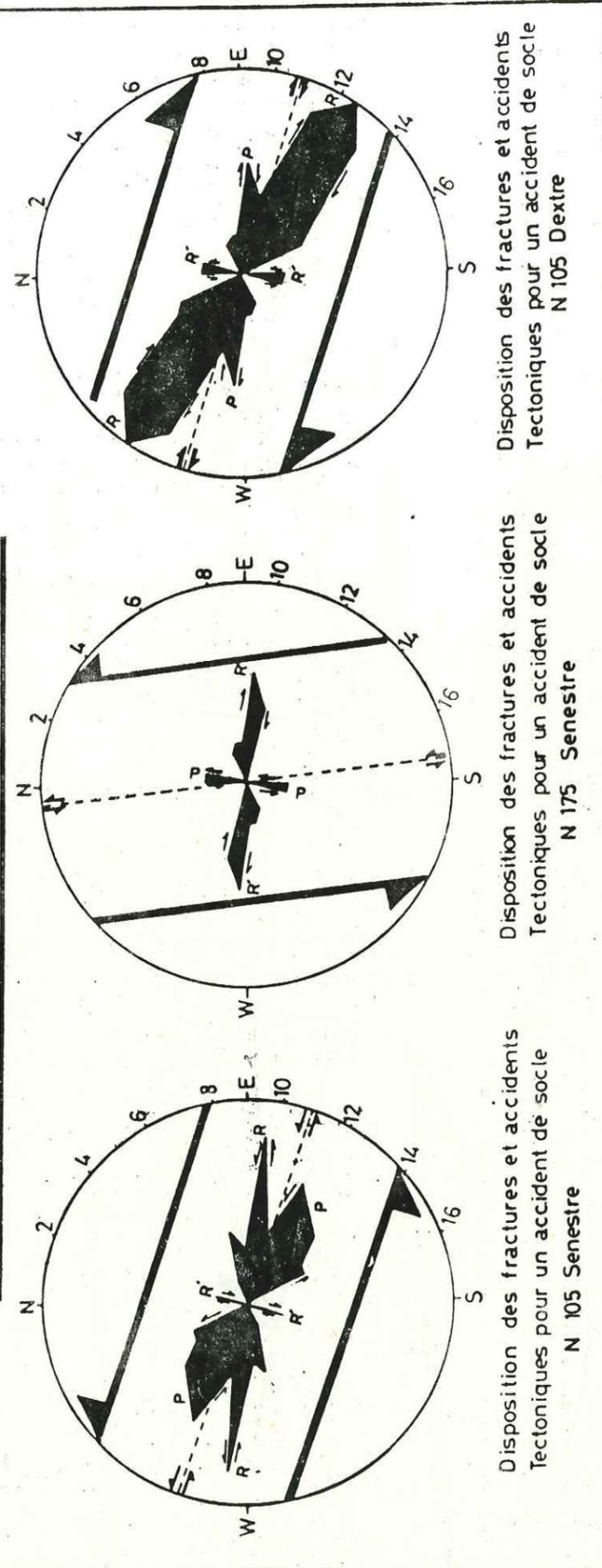
Ces remarques concordent bien avec les critiques soulevées par l'interprétation de BEN AYED.N(1981) qui ne retenait qu'une seule direction d'accident de socle E - W dextre pour l'explication de la genèse des structures tectoniques atlasiques.

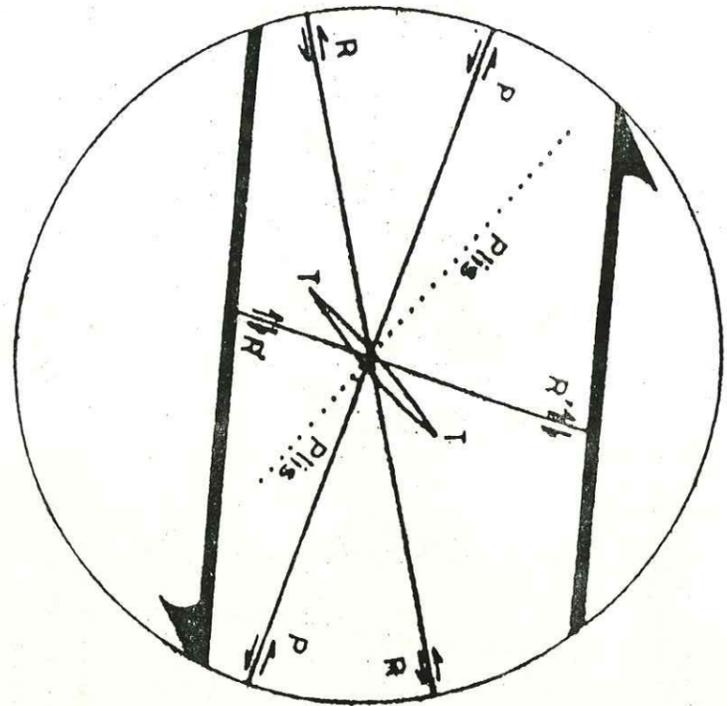
Malgré quelques aspects séduisants, nous pensons que cette hypothèse - selon la proposition de BEN AYED ou telle que nous l'avons précédemment formulée - est incapable de restituer les mécanismes de déformation recherchés.

Ses handicaps proviennent de ce que :

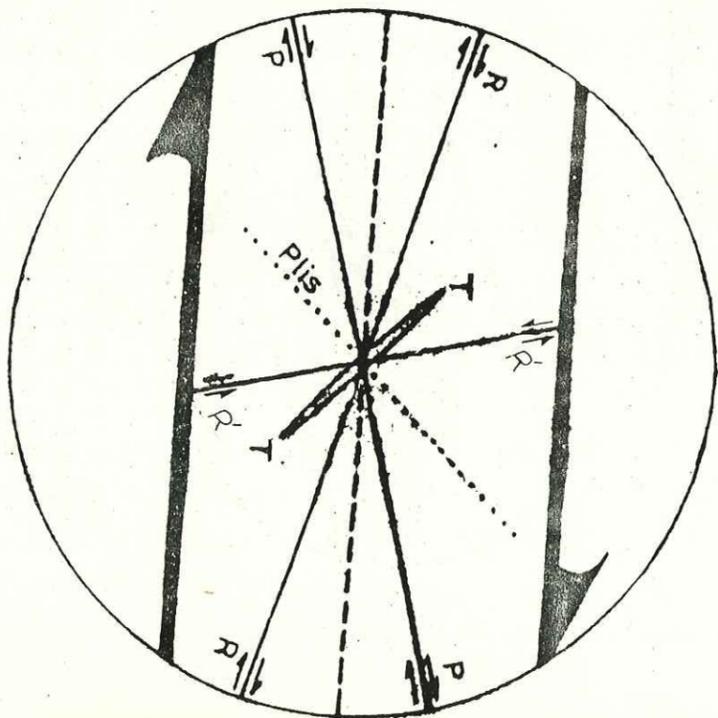
Fig.II.39 MASSIFS BARGOU SERDJ BOUDABBOUS

DISPOSITION DES FRACTURES ET ACCIDENTS TECTONIQUES DANS L'HYPOTHESE D'ACCIDENT DE SOCLE





Structures en échelon dans une zone de cisaillement senestre



Structures en échelon dans une zone de cisaillement dextre

Fig. II.38 - Structures tectoniques engendrées dans la couverture par des accidents de socle.

* Tous les modèles - bases de l'hypothèse - confirment une observation importante à savoir que dès que des déplacements apparaissent dans la couverture, l'accident de socle s'y manifeste et y prend progressivement de l'importance.

Or contrairement à ceci, le seul accident important du secteur est celui de Zaghouan de direction N 50.

* Dans les zones de cisaillement effectif (VIALON et al. 1976) la prédominance de l'un des réseaux de fractures R ou R' est possible. (R. prédominantes dans le cas de forts déplacements dans le sens général de la zone, et R' dans le cas de blocage ou de rotation).

La prédominance du réseau P n'a par contre jamais été signalée.

Or nous remarquons que :

- décrochements senestres N 105 : prédominance d'un réseau P par rapport aux réseaux R et R'.
- décrochements senestres N 175 : absence totale du réseau R.
- décrochements dextres N 105 : prédominance du réseau P par rapport au réseau R'.

Tous ces éléments nous insistent à rejeter cette hypothèse et à chercher une autre interprétation.

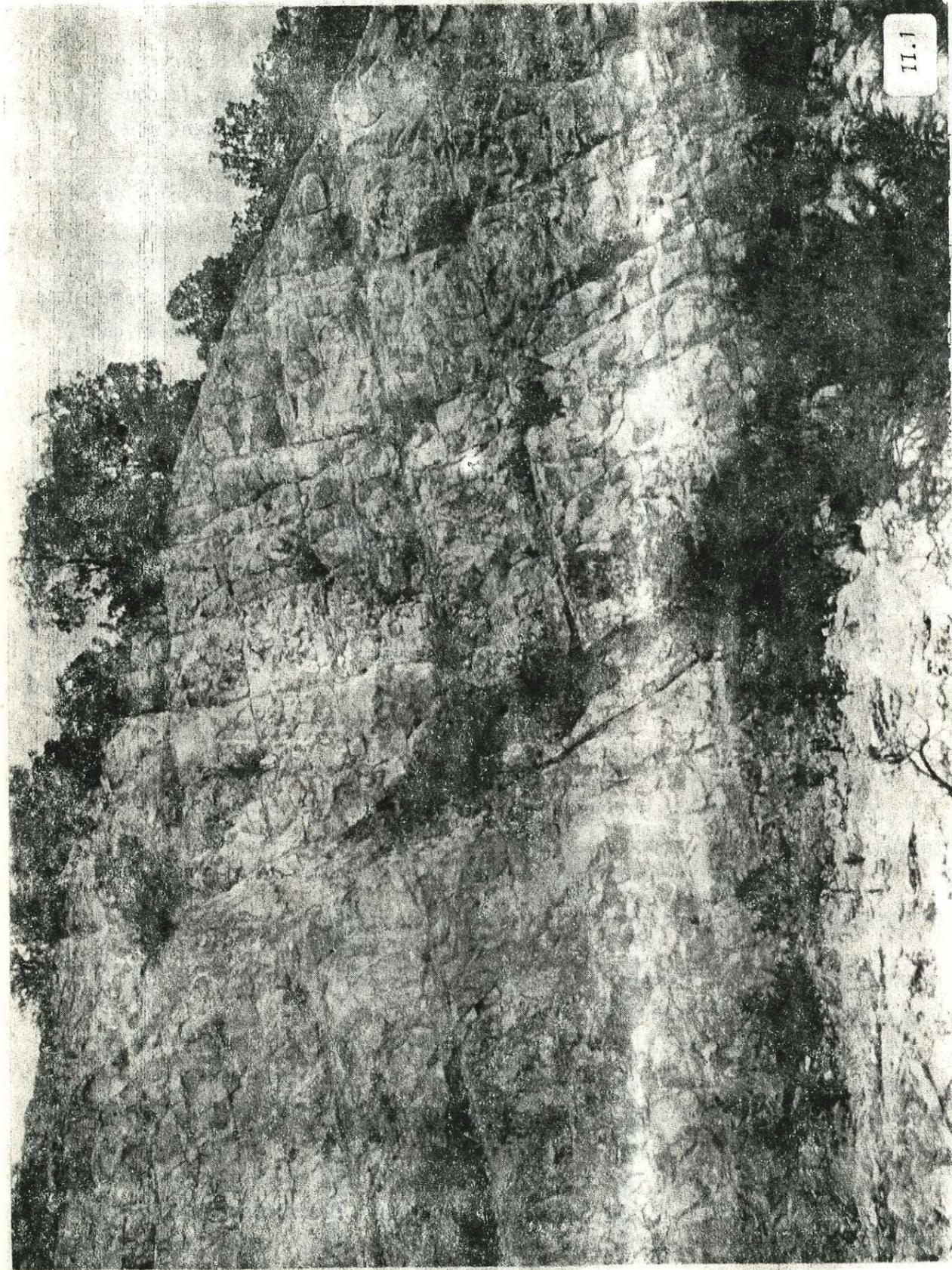
II.6 -Conclusion

L'étude géologique (lithostratigraphique et structurale) du site du barrage de Sidi Boubecker et du synclinal a permis de mettre en évidence les faits suivants :

- Les formations meubles (argiles, marnes, sables et limons) sont nombreuses dans le bassin versant.
- Le synclinal a été affecté par plusieurs états de contraintes déviatoriques qui ont engendré des structures tectoniques variées, et de toute façon polyphasées aux différentes échelles

La reconstitution de cette chronologie des déformations est le préalable indispensable à toute tentative d'interprétation régionale puis générale et en particulier si l'on souhaite discuter l'étanchéité du massif de fondation d'un barrage.

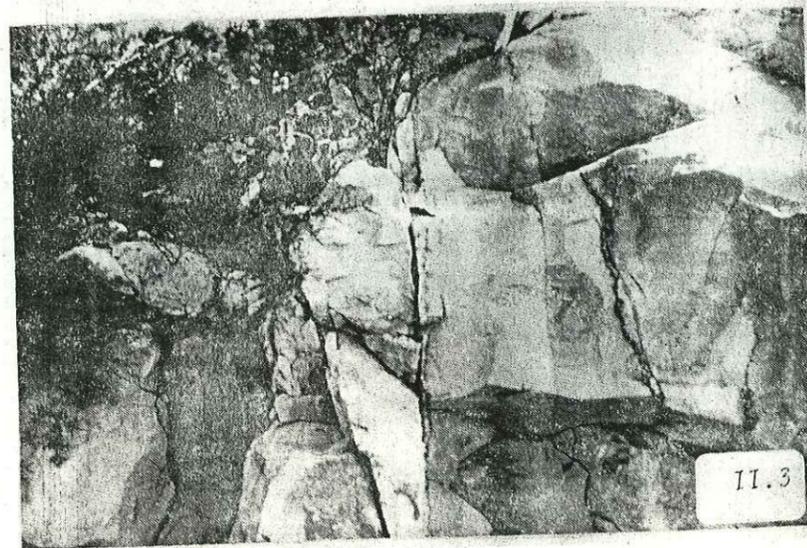
Ainsi dans le cas présent les constatations - relatives au site et au bassin versant - ne manqueront pas de manifester leur effet négatif sur la rentabilité du barrage dès sa première mise en eau. L'étude des fuites et de l'envasement en fournira l'exemple.



Grande fracture N115.



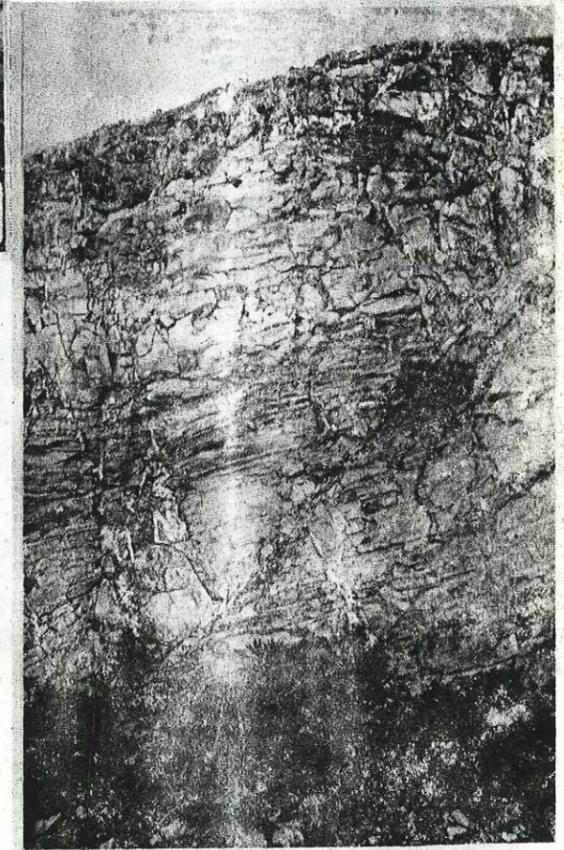
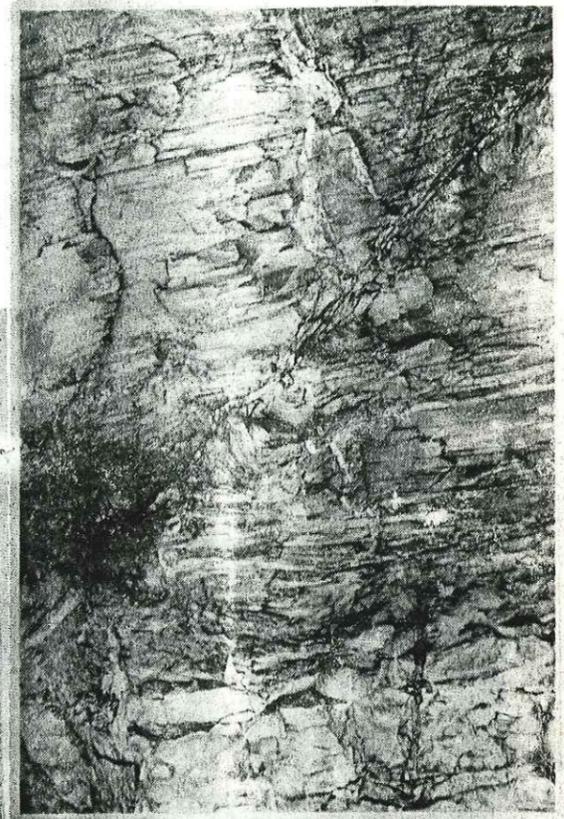
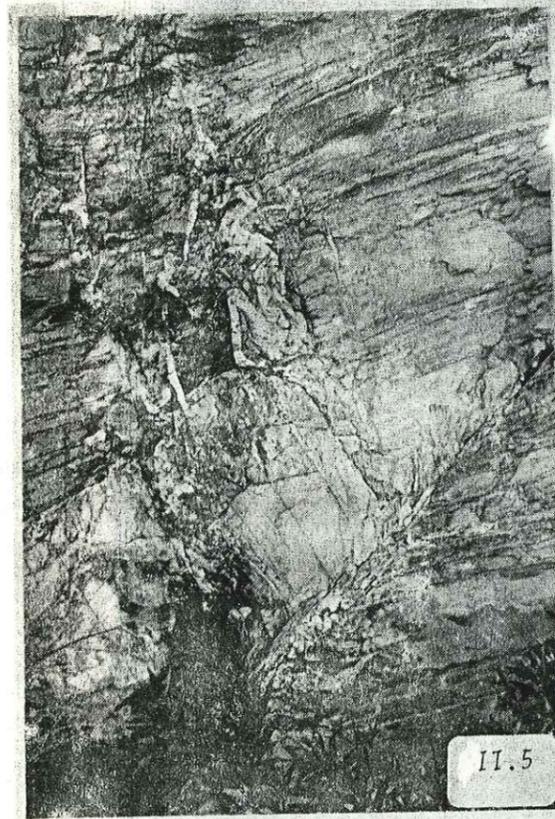
*Station A
pics stylolitiques
ouverts.*



Station D



Station E

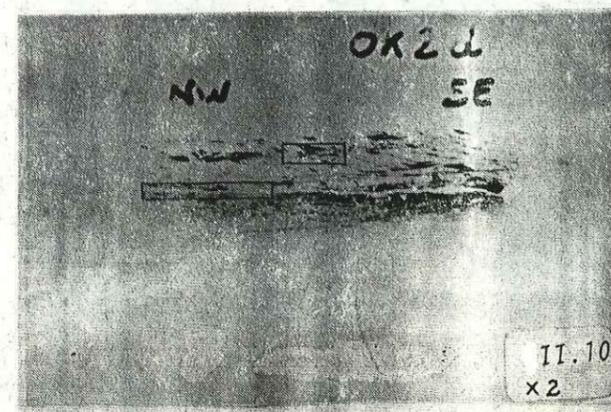
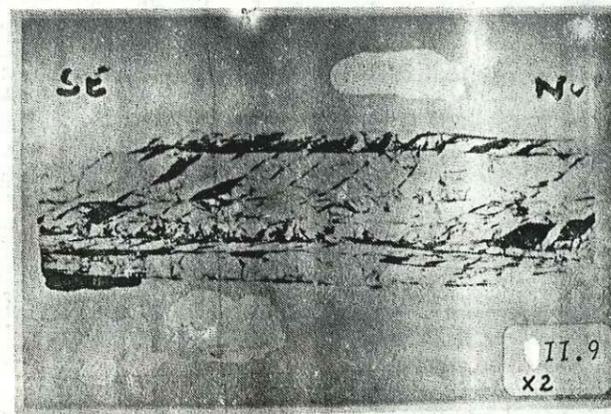
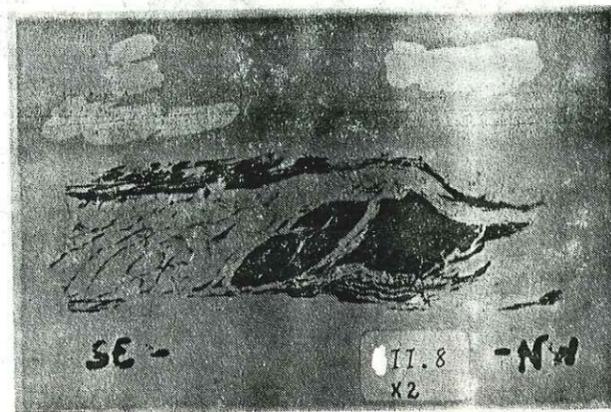


Station F

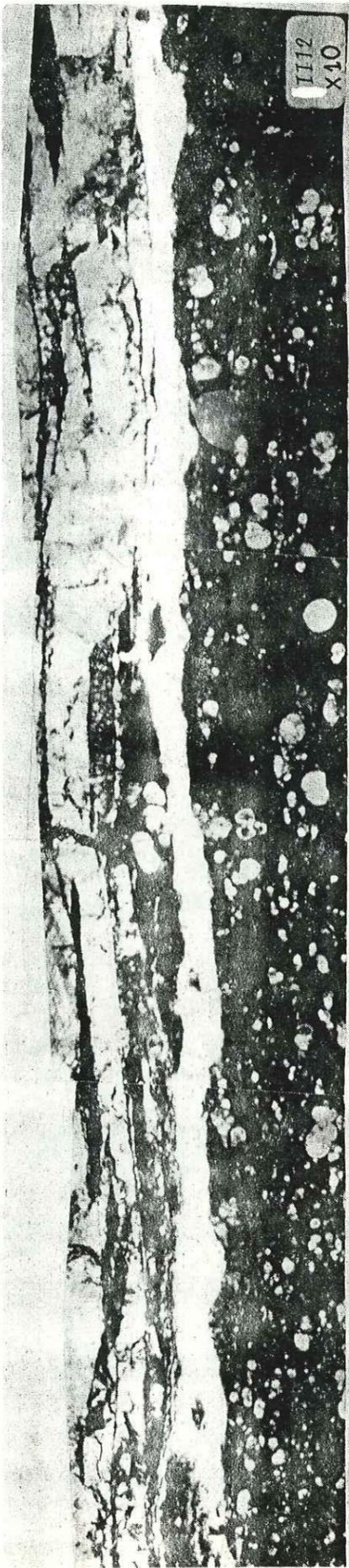
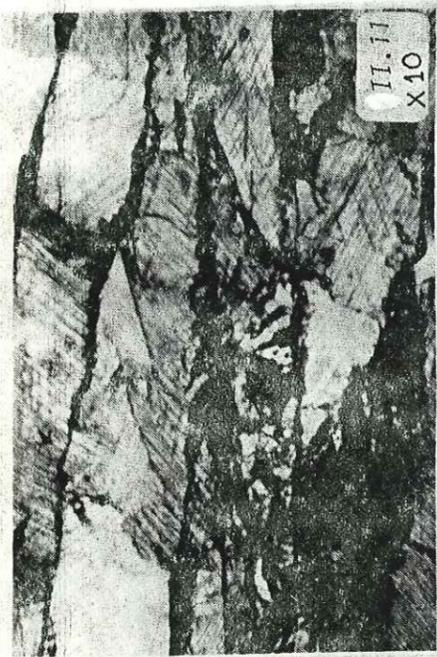




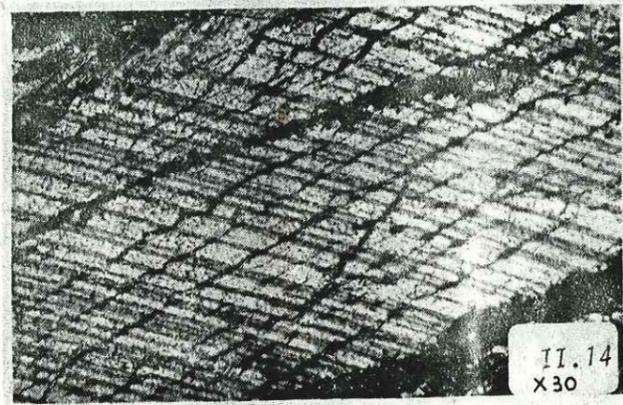
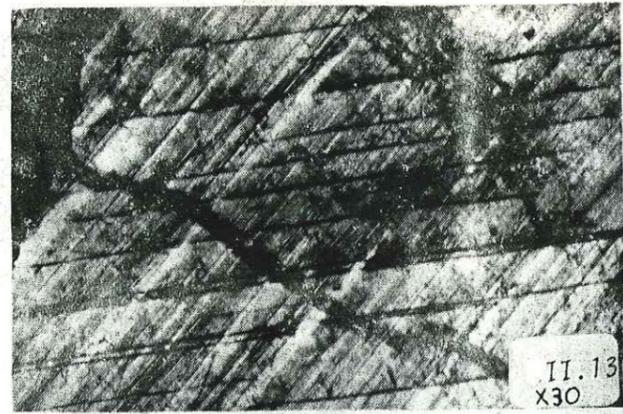
Stries N100 sur calcaires eocènes (dans le déversoir.)



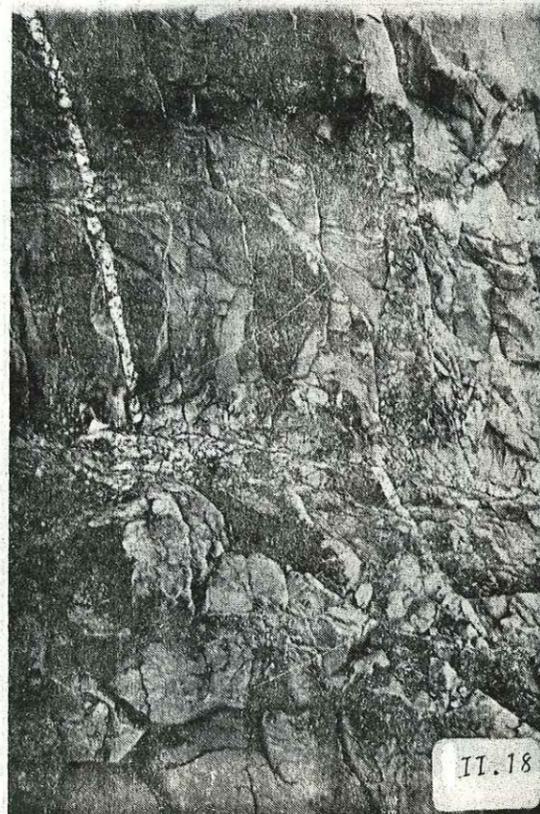
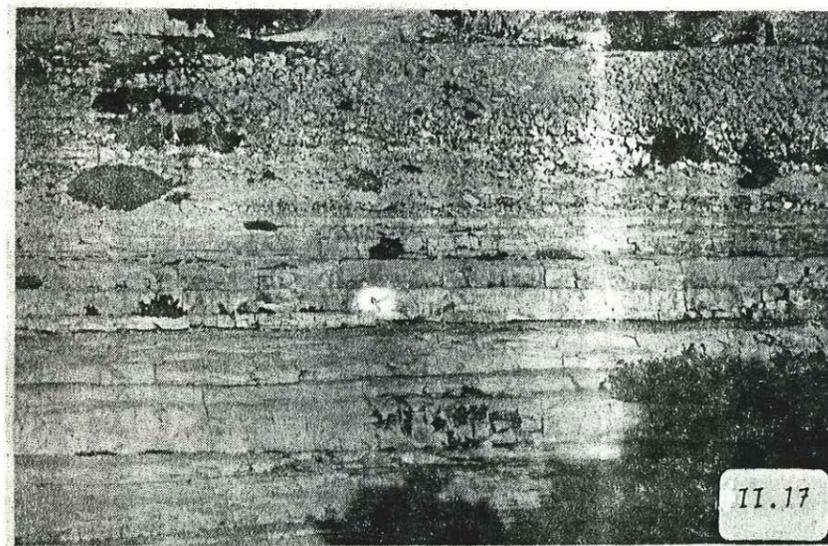
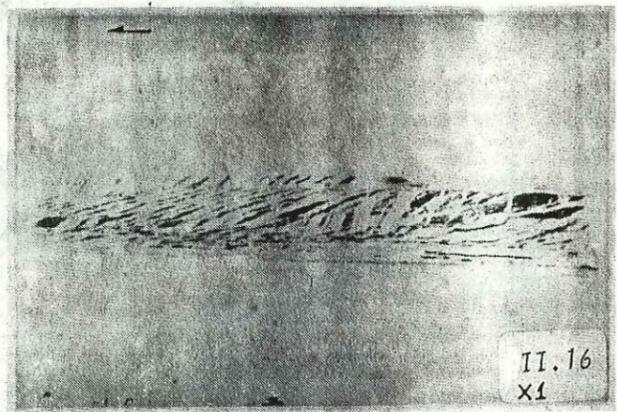
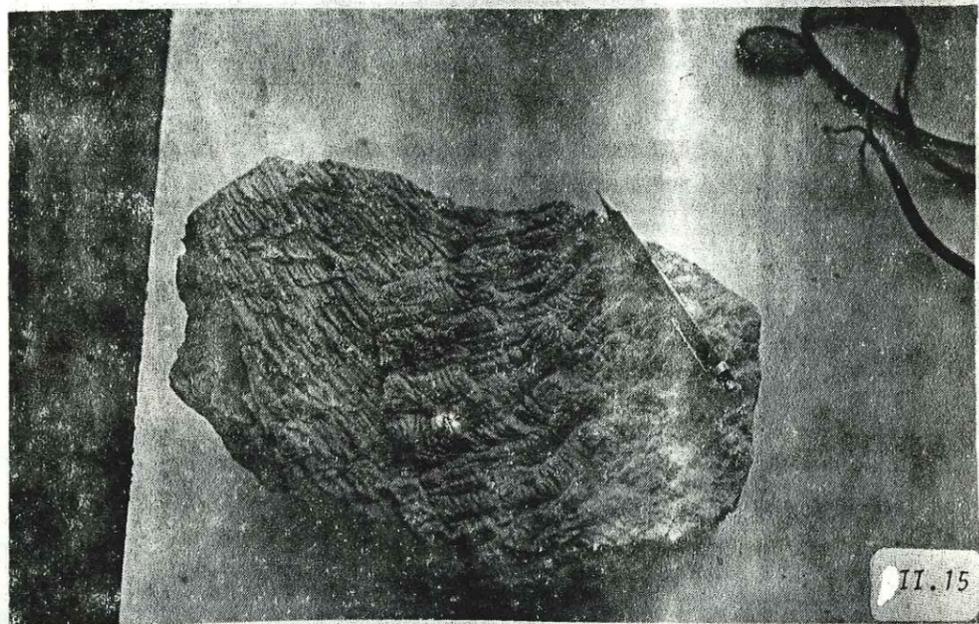
Lames minces effectuées dans l'enduit clivé.

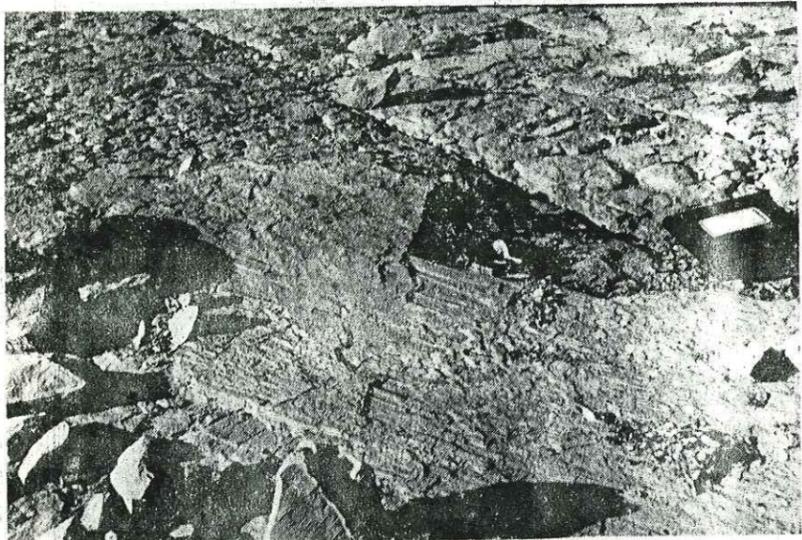


Détail de la fig. II.10

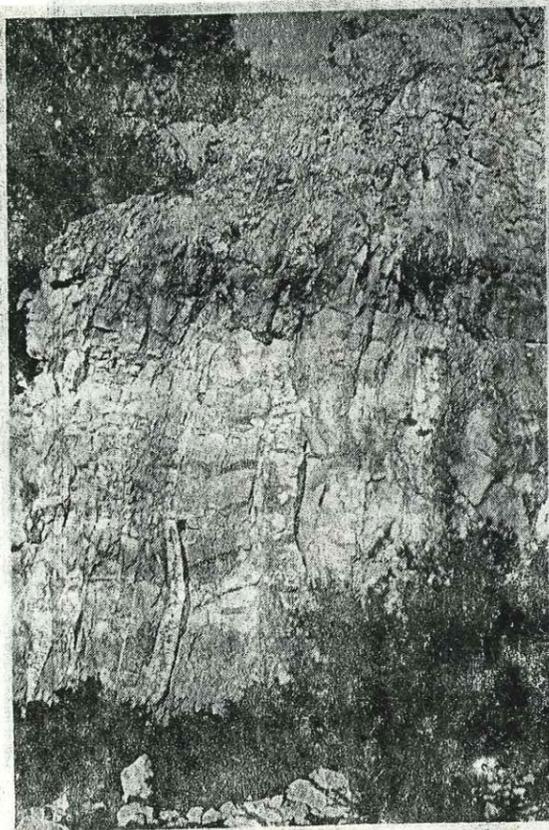


Stylolites dans la roche non ouverte. (X 30)





Stries N100 sur dalles calcaires.



*Filons de calcite déformés
(direction N50).*



Grandes fractures N115 ouvertes.

TROISIEME PARTIE : Etude sédimentologique et granulométrique

Troisième chapitre : caractéristiques sédimentologiques

Quatrième chapitre : propriétés géotechniques

TROISIEME CHAPITRE

CARACTERISTIQUES SEDIMENTOLOGIQUES

Cette étude a été réalisée afin de définir les propriétés sédimentologiques et géotechniques d'une part et le mode de transport et de dépôt d'autre part.

III.1. - Morphologie des dépôts.

Depuis une dizaine d'années environ, tous les ans, le barrage se trouve vidé à la fin de l'été (mois de juillet et août) ce qui permet l'observation directe des sédiments accumulés dans l'ensemble de la retenue.

III.1.1. - L'absence de chenal.

La morphologie de la retenue diffère des morphologies sous lacustres typiques par l'absence du chenal.

Le chenal, permanent et entretenu sur toute la longueur des lacs naturels, correspond à l'ancien lit de l'oued ou de la rivière dans les lacs artificiels, il est régulièrement creusé et accentué par les vidanges et les turbinages qui provoquent l'augmentation de la vitesse des courants de fond. L'examen des plans topographiques de la retenue avant construction du barrage (fig.III.1) et après 25 ans de service (fig.III.2) montre que le colmatage de la vidange de fond provoqué par les premiers dépôts a eu pour conséquence le comblement des anciens chenaux.

De ce fait, la surface des dépôts est subhorizontale avec une pente de 8/10.000. Elle se raccorde avec une pente douce aux berges.

III.1.2. - Les figures sédimentaires.

Les figures sédimentaires permettent-lorsqu'elles sont bien conservées-de donner des renseignements sur l'agent de transport.

Dans le cas de sédiments lacustres, il est intéressant de chercher l'existence de rythmicité dans le dépôt. Cette rythmicité, qui se manifeste dans les retenues européennes sous forme d'alternance de lits clairs (quartzeux) et de lits sombres (argileux) correspond à des cycles successifs de crues et de décrues. De telles structures sont absentes dans la retenue du barrage de l'oued El Kebir. Ceci est dû au fait que les sédiments ne se déposent qu'à l'occasion de crues importantes (plusieurs centaines de milliers de tonnes en une à deux fois par an).

Il sera donné dans ce qui suit une description de quelques figures qui reflètent quelques caractéristiques des mécanismes de sédimentation ou de diagenèse.

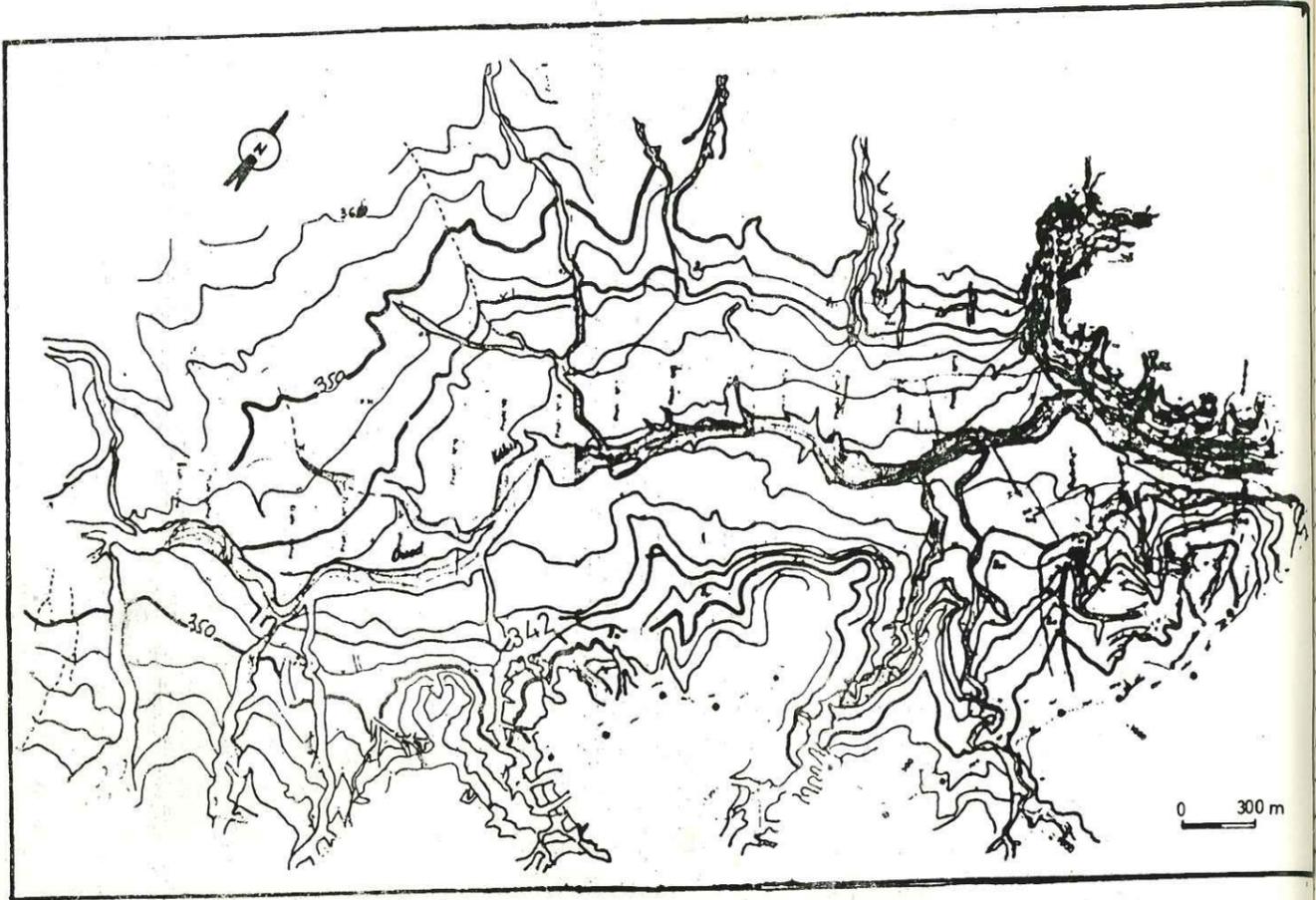


Fig. III.1. Barrage de l'O.El Kebir. Plan topographique initial de la retenue.

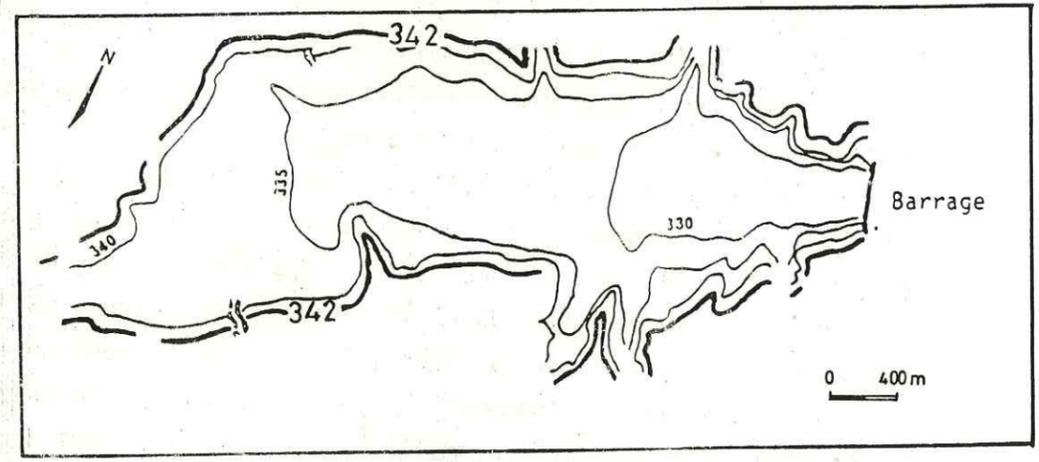


Fig.III.2. Barrage de l'O. El Kebir. Plan topographique de 1950 de la retenue

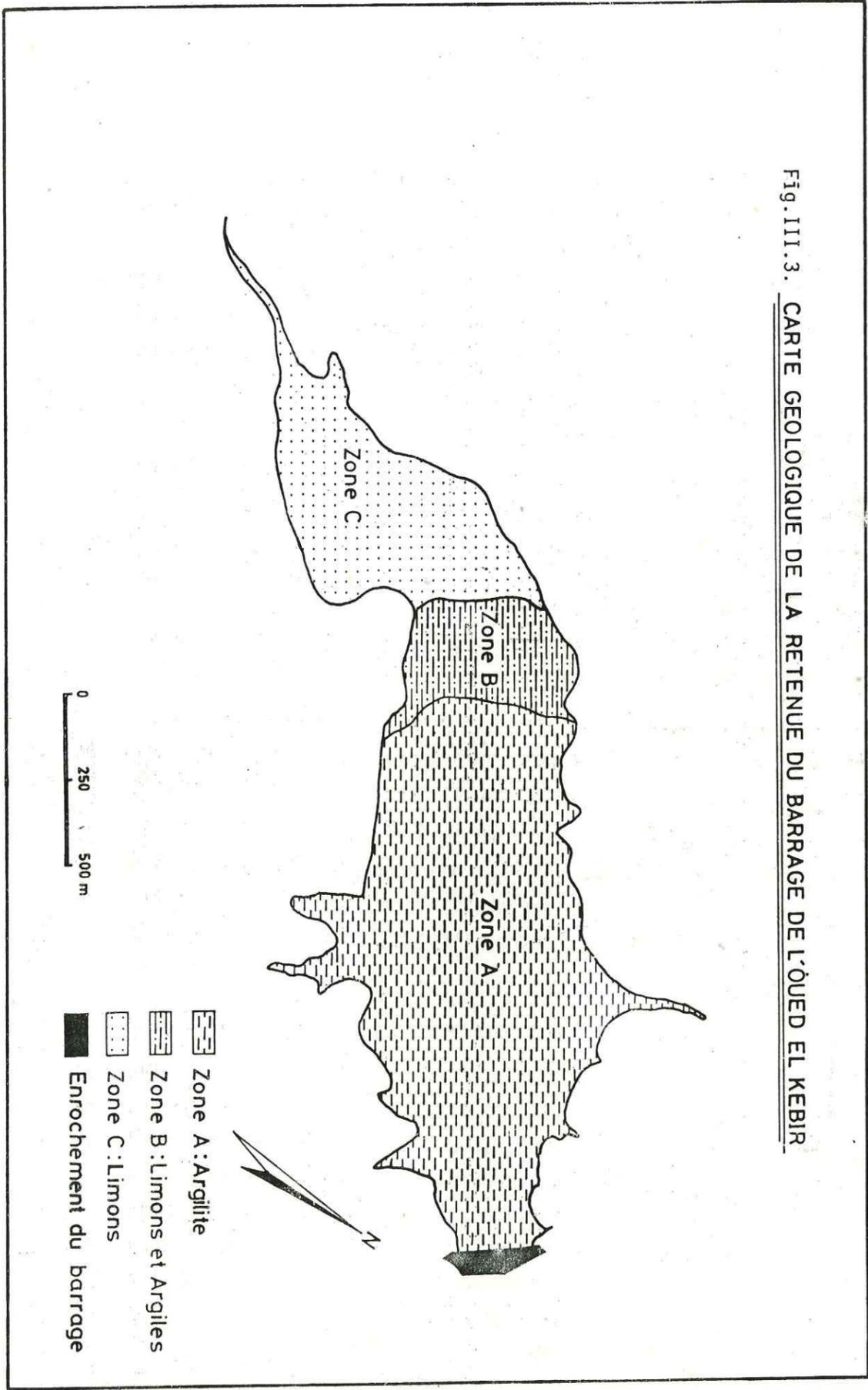


Fig. III.3. CARTE GEOLOGIQUE DE LA RETENUE DU BARRAGE DE L'OUED EL KEBIR

a - Les fentes de dessiccation

La vidange complète de la retenue provoque l'assechement de la surface des dépôts. La forme et les dimensions des fentes de dessiccation dépendent essentiellement de la granulométrie de la vase. La carte lithologique de la retenue (Fig.III.3) montre en surface 3 zones de dépôt :

. Zone A : Il s'agit d'une argilite plastique très fine. La dessiccation entraîne le développement de fentes très larges (3 à 5 cm) très profondes (20 à 40 cm) (Photo III.1) delimitant des polygones à côtés décimétriques plus ou moins réguliers, Photo III.2.

. Zone B : Le mélange des argiles semblables à celles de la zone A par une proportion variable de grains limoneux (grains marneux et calcaires) entraîne une réduction des dimensions des fentes. Ces dernières, moins profondes et peu ouvertes delimitent des polygones de surfaces plus réduites. (Photo.III.3).

. Zone C : La prédominance des éléments limoneux dans le dépôt empêche la formation de fentes de dessiccation. (Photo III.4).

b. - Les "bird-eyes". : Les gaz provenant - probablement - de la décomposition de la matière organique piégée, donnent naissance - lorsqu'ils n'arrivent pas à se dégager - à des petites surfaces bombées appelées "bird - eyes".

c. - Les ripples - marks : Ces rides formées par des courants sous-lacustres n'ont été observé dans le dépôt que dans une zone peu étendue à l'entrée de l'oued dans la retenue. Par contre des tapis algaires remaniés présentaient des figures similaires au pied du barrage. (Photo III.5).

III.2.- Moyens de reconnaissance

a - Les sondages mécaniques et le prélèvement d'échantillons.

* Sondages mécaniques : suite à la demande, du Ministère de l'Agriculture, nous avons proposé (mars 1981) trois emplacements de sondage destinés à une reconnaissance optimale du remplissage alluvial. Pour des raisons diverses, et notamment par suite de la date d'exécution réelle de ces forages, des difficultés d'accès à la retenue (terrain saturé, jusqu'en surface (saison des pluies) n'ont pas permis le respect des emplacements proposés. Ainsi les sondages S₁ et S₂ ont-ils perdu pratiquement tout intérêt en raison de leur position à la limite du versant (Fig. III.4).

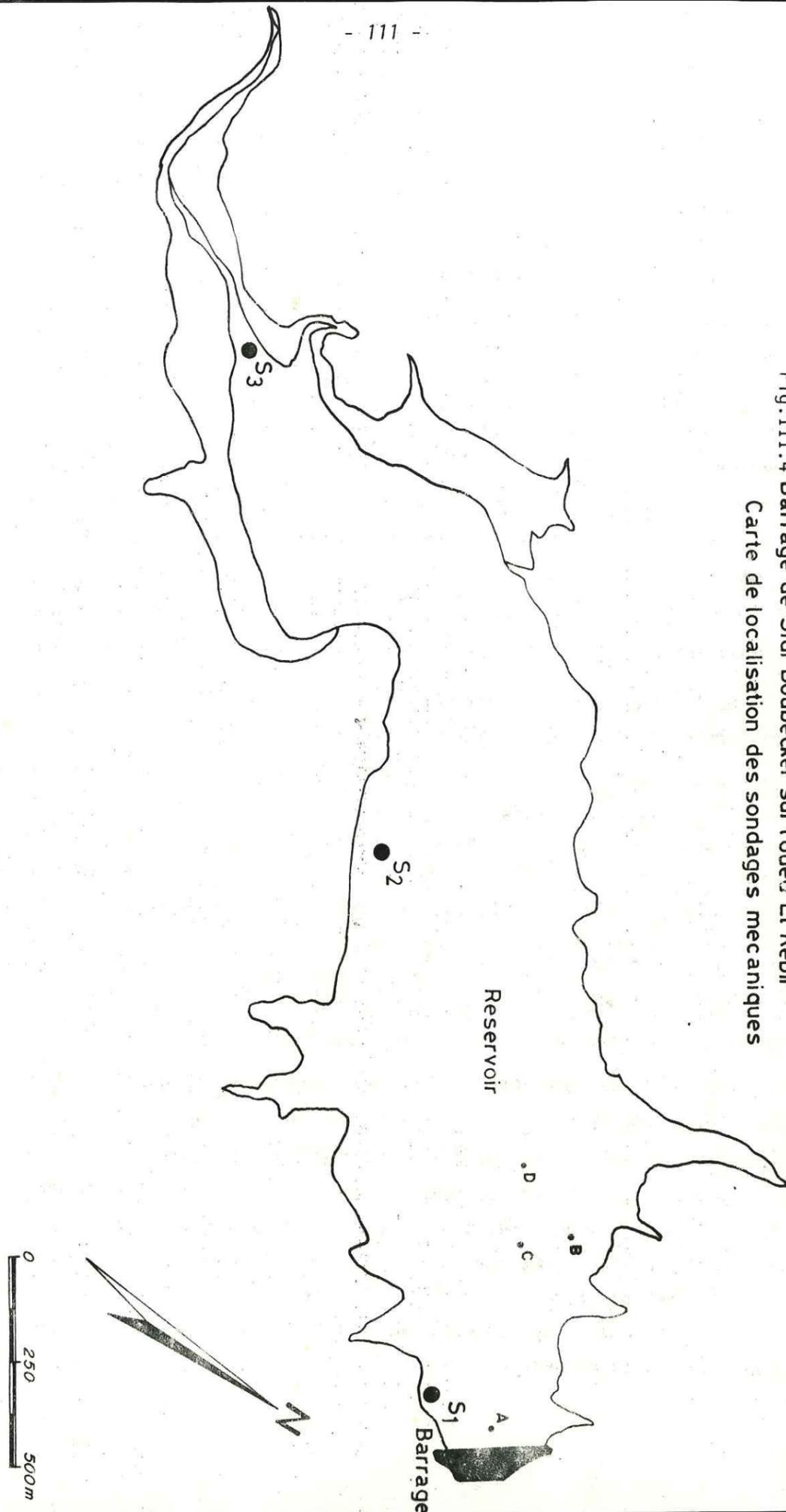


Fig. III.4 Barrage de Sidi Boubecker sur l'oued El Kebir
Carte de localisation des sondages mécaniques

Par ailleurs le diamètre du carottier double utilisé (50 mm) limitait les possibilités ultérieures d'essais de laboratoire par suite de la dimension trop restreinte des échantillons.

Les logs réalisés lors de cette campagne sont néanmoins donnés, à titre indicatif :

sur les fig. III,5 à III,7 figurent les descriptions du sondeur ;
notre interprétation est représentée sur la figure III - 14.

* Echantillons prélevés : Afin de palier aux échecs partiels décrits ci-dessus quatre prélèvements ont été effectués dans les dépôts de la crue de janvier 1981 (échantillons A, B, C et D).

Les caractéristiques sédimentologiques et géotechniques qui seront décrites se rapporteront par conséquent à ces échantillons et à certains prélevés dans les sondages S₁, S₂ et S₃.

b. - Les essais in situ.

./ Sismique refraction : une campagne de sondages sismique refraction fût réalisée à l'aide d'un sismographe 12 traces et d'une ligne d'enregistrement de 48 m de long. L'impact est créé par un marteau.

Les ondes sont très vite amorties par la vase et de ce fait le substratum calcaire ou marneux ne fût jamais atteint. Les épaisseurs du dépôt n'ont donc pas pu être confirmées par cette méthode.

Seules les vitesses sismiques des ondes longitudinales ont été mesurées. Elles sont de l'ordre de 300 m/s en moyenne pour la zone A (Fig.III.3), de 400m/s en moyenne pour la zone B et de 600 m/s pour la zone C.

./ Densité en place : Des densités en place mesurées avec un densitomètre à membrane ont donné des poids volumiques moyens de l'ordre de 1,5g/cm³ pour les matériaux de surface (jusqu'à 30 cm de profondeur).

c. - Logslithologiques des sondages

* Description par les sondeurs.

... Sondage S₁ (Fig.III.5).

Le dépôt d'envasement est décrit comme étant de la vase grisâtre légèrement argileuse (épaisseur 2,1 m).

Fig.III.5 Retenue du barrage de Sidi Boubecker sur l'oued El Kebir

Log du sondage mécanique

S 1

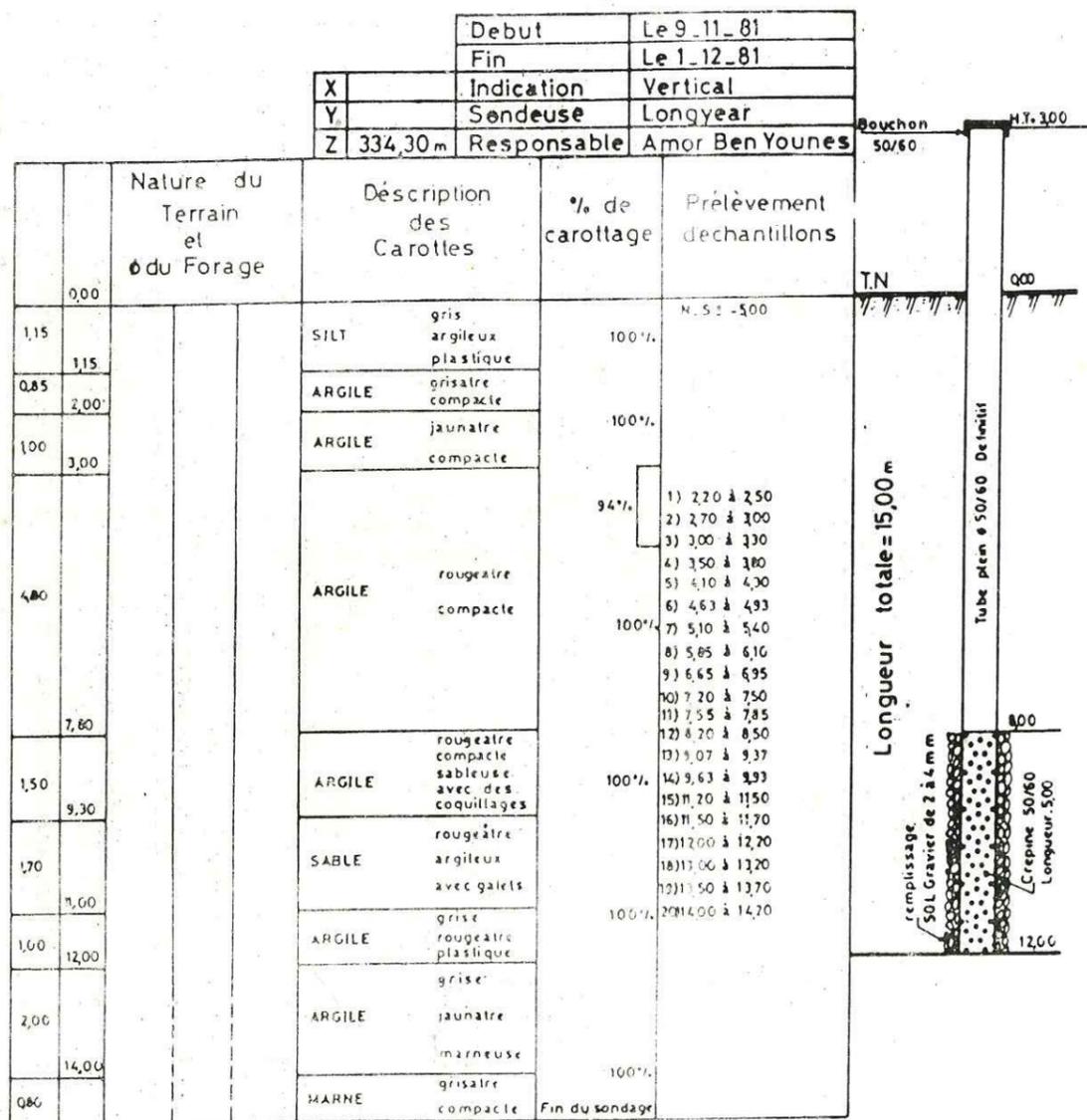
		Debut	Le13_12_81		
		Fin	Le24_12_81		
X		Indication	Vertical		
Y		Sondeuse	Longyear		
Z	334 m	Responsable	Amor BenYounes		
		Nature du Terrain et Ø du Forage	Description des Carottes	% de carottage	Niveau d'eau (N.T.A.)
0,00					
2,10		Tube Ø NX à -3,00 provisoir retiré entièrement	VASE grisâtre légèrement argileuse	100% 100% 100%	Niveau statique le 24 - 12 - 1981 à - 0,05
2,10			TUF grisâtre seche calcaireux	0%	
0,75					
2,85			CALCAIRE blanchâtre avec joints de siltes grisâtre à la base	65% 90%	
3,15				0%	
6,00				50%	

TUF : Argile limoneuse (Terme de carriers)

Fig. III.6 Retenue du barrage de Sidi Boubecker sur l'oued EL Kébir

Log du sondage mécanique

S 2



Sondage S₂ (Fig. III.6).

De 0 à 9,3 m de profondeur, quatre niveaux argileux - faisant suite à un niveau de silt argileux, surmontent un niveau sableux de 1,7 m d'épaisseur. Ce dernier est séparé du substratum de marnes priaboniennes par deux niveaux argileux.

Vingt échantillons non remaniés ont été prélevés entre les profondeurs 2,2 m et 14 m.

La difficulté principale que nous avons rencontrées pour l'interprétation des coupes de ces forages tenait à la distinction malaisée entre le dépôt récent et la terrasse sous-jacente (2^{ème} terrasse - JAUZEIN 1967. Fig. III - 10) qu'il recouvre (suite à l'implantation trop latérale du forage). Notre critère fut la présence d'oxydes de fer caractéristiques du remplissage récent comme nous le montrerons à la page 64.

Sondage S₃ (Fig. III.7)

Aucun élément ne nous permet de faire la séparation entre les matériaux dus à l'envasement et ceux qui lui sont antérieurs dans ce sondage constitué d'une alternance de lits sableux ou limoneux et de lits argileux surmontant un niveau graveleux très épais.

III.3. - Propriétés granulométriques

Les coefficients granulométriques sont définis à partir des courbes granulométriques de la fig. III.8.

b - Heterométrie : H_e définie comme étant le rapport d₈₅/d₁₅ caractérise l'étalement de la granulométrie selon l'échelle suivante :

Granulométrie	d 85 / d 15
Très serrée	inf à 2
Serrée	2 à 5
Semi étalée	5 à 20
Étalée	20 à 200
Très étalée	Sup. à 200

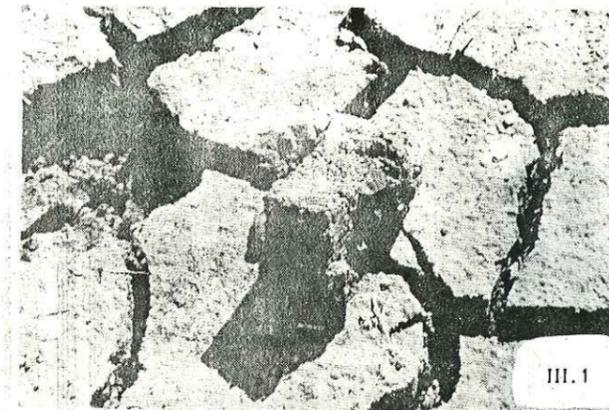
D'après les courbes granulométriques, He est supérieur à 300 pour les échantillons de la crue de janvier 1981, et supérieur à 100 pour l'échantillon prélevé dans le sondage S₁.

Ceci confirme le résultat donné par le coefficient de Hazen à savoir que la granulométrie est très étalée.

c - Les classes granulométriques.: Les résultats d'analyses (sur les échantillons B sur S₁) dont nous disposons permettent de proposer les compositions granulométriques suivantes : (d'après la classification décimale) :

Sable (0,2mm à 0,02)	Limons (0,02mm à 0,002)	Argile < 0,002 mm
20 à 30%	20 à 40%	30 à 60%

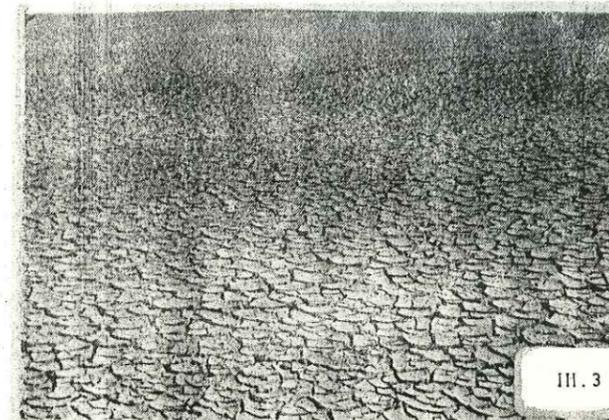
Il s'agit essentiellement donc, d'argile limoneuse.



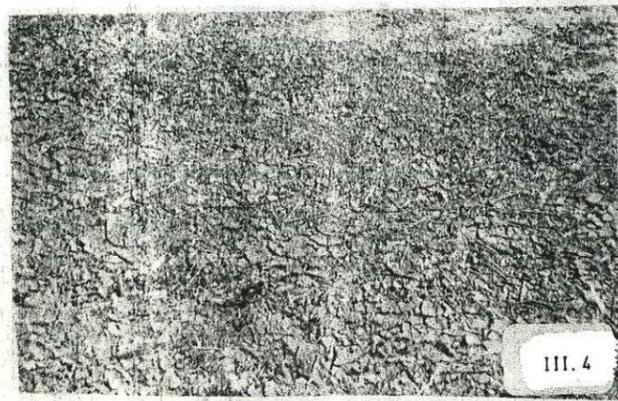
Fentes de dessiccations;
largeur: 3 à 5 cm;
profondeur: 20 à 40 cm.



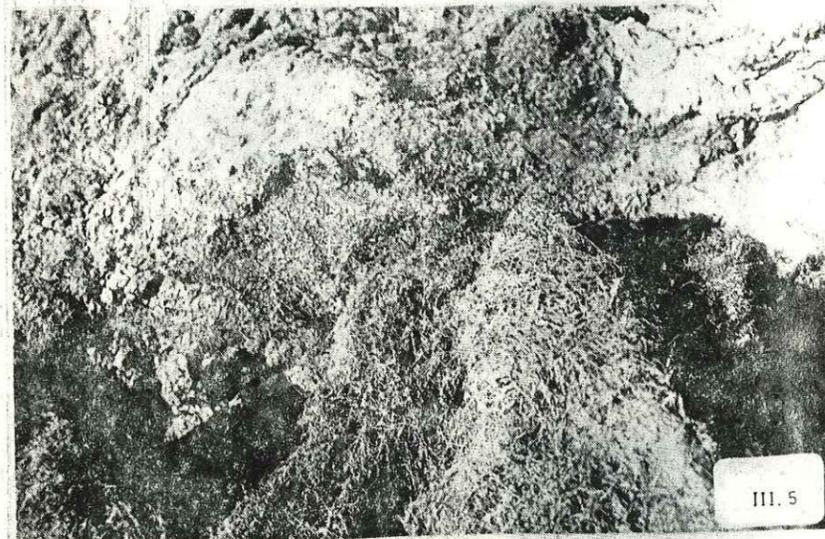
Zone A: fentes très développés.



Zone B: fentes moins développées que dans la zone A.



*Zone C: absence de fentes
(dépot limoneux)*



*Tapis algaires
remaniés avec des
formes de
Ripple-marks*

QUATRIEME CHAPITRE

PROPRIETES GEOTECHNIQUES

IV.1. - Propriétés géotechniques des dépôts.

IV.1.1.- Caractéristiques d'identification.

. Teneur eau : C'est le rapport du poids de l'eau d'un échantillon à son poids sec.

* Teneur en eau naturelle :

- Echantillon B : Dans la tranche inférieure des sédiments la teneur en eau est importante : 70% environ (Fig. IV.1). Elle diminue à l'approche de la surface (les cinq premiers centimètres) pour atteindre des valeurs de 50% deux à trois semaines après émergence du dépôt. La diminution de l'humidité gagnera en profondeur d'autant plus vite que la période d'émergence est longue et la température est forte.

- Sondage S₂ : Dans les matériaux de la terrasse la teneur en eau est peu variable (du moins dans les dix premiers mètres) autour d'une valeur moyenne de 25%. (Fig. IV.2).

La différence avec la valeur de 70% (échantillon B) pourrait être l'indice d'une aptitude plus grande à l'infiltration pour les dépôts du barrage. Cette dernière serait liée à une porosité efficace plus importante.

* Teneur en eau de saturation :

Elle indique la quantité maximale d'eau que pourrait contenir un échantillon.

Les essais de laboratoire ont donné des valeurs de 86% pour des dépôts argileux poreux à traces d'oxydes de fer, et de 54% pour des dépôts argileux homogènes.

. Poids volumiques

* Poids volumique humide : γ_h

C'est le rapport du poids de l'échantillon humide à son volume total.

* Poids volumique sec : γ_d

C'est le rapport du poids de l'échantillon sec (séjour de 24 h à 105° C) à son volume total.

* Poids volumique du solide : γ_s

C'est le rapport du poids d'un grain du solide, constituant l'échantillon, à son volume.

Fig. IV.1. Retenue du Barrage de Sidi Boubecker sur l'oued El Kebir depot de Jan. 1981
Variation de la teneur en eau en fonction de la profondeur
Echantillon : B

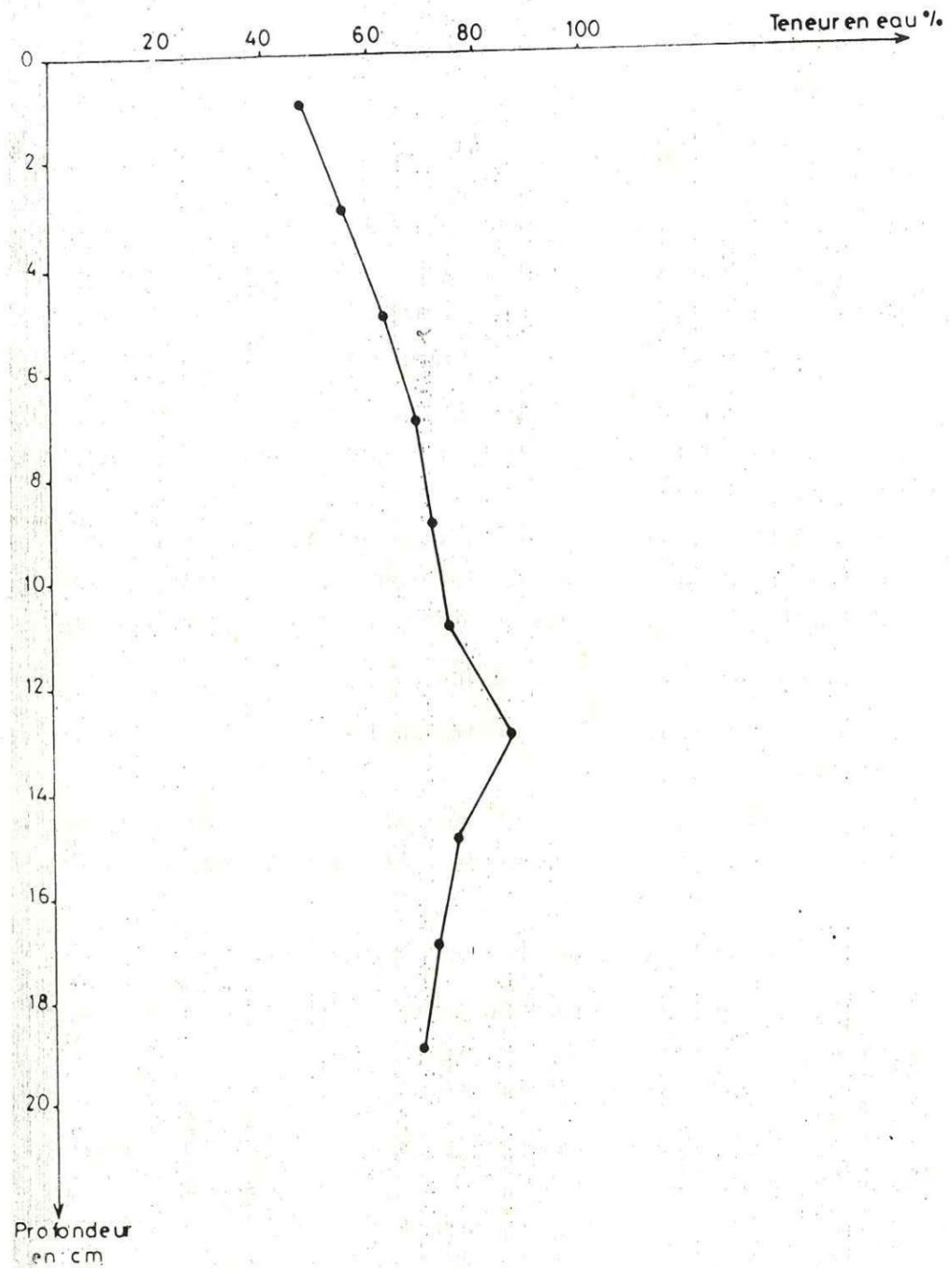
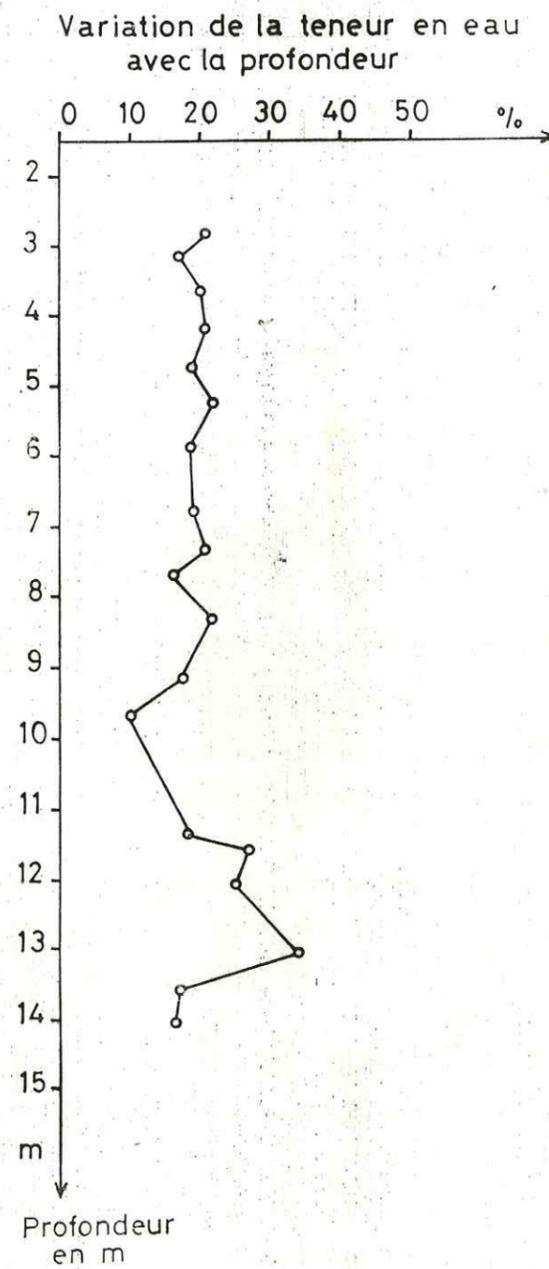


Fig. IV.2. Retenue du barrage de Sidi Boubecker sur l'oued El Kebir
Sondage S₂



Les mesures faites sur l'échantillon B ont donné les résultats suivants :

- γ_h : 1,32 à 1,8

Quant aux échantillons du sondage S_1 , ils ont donné - γ_d : 1,5, - γ_s : 2,6

Dans le sondage S_2 : γ_d variait de 1,5 à 1,9.

. Consistance : Limites d'atterberg.

Dans le sondage S_2 , La limite de liquidité et l'indice de plasticité montrent la même variation en fonction de la profondeur. Leurs valeurs moyennes sont respectivement : 50% et 35%.

Des valeurs de l'ordre de 75% pour W_L , 40% pour W_p ont été trouvées pour les échantillons A, B, C et D d'une part et ceux du sondage S_1 d'autre part. La limite de retrait est de 19%.

. Equivalent de sable.

Il est déduit d'un essai basé sur la vitesse de sédimentation des particules constituantes de l'échantillon. Ainsi, il exprime la proportion des sables par rapports aux fines.

Les essais effectués ont donné les résultats suivants :

- Echantillon B : ES : de 20 à 35%
- Sondage S_1 : ES : de 20 à 30%
- Sondage S_2 : ES : de 25 à 35%.

IV.1.2. - Identification selon la classification L.C.P.C.

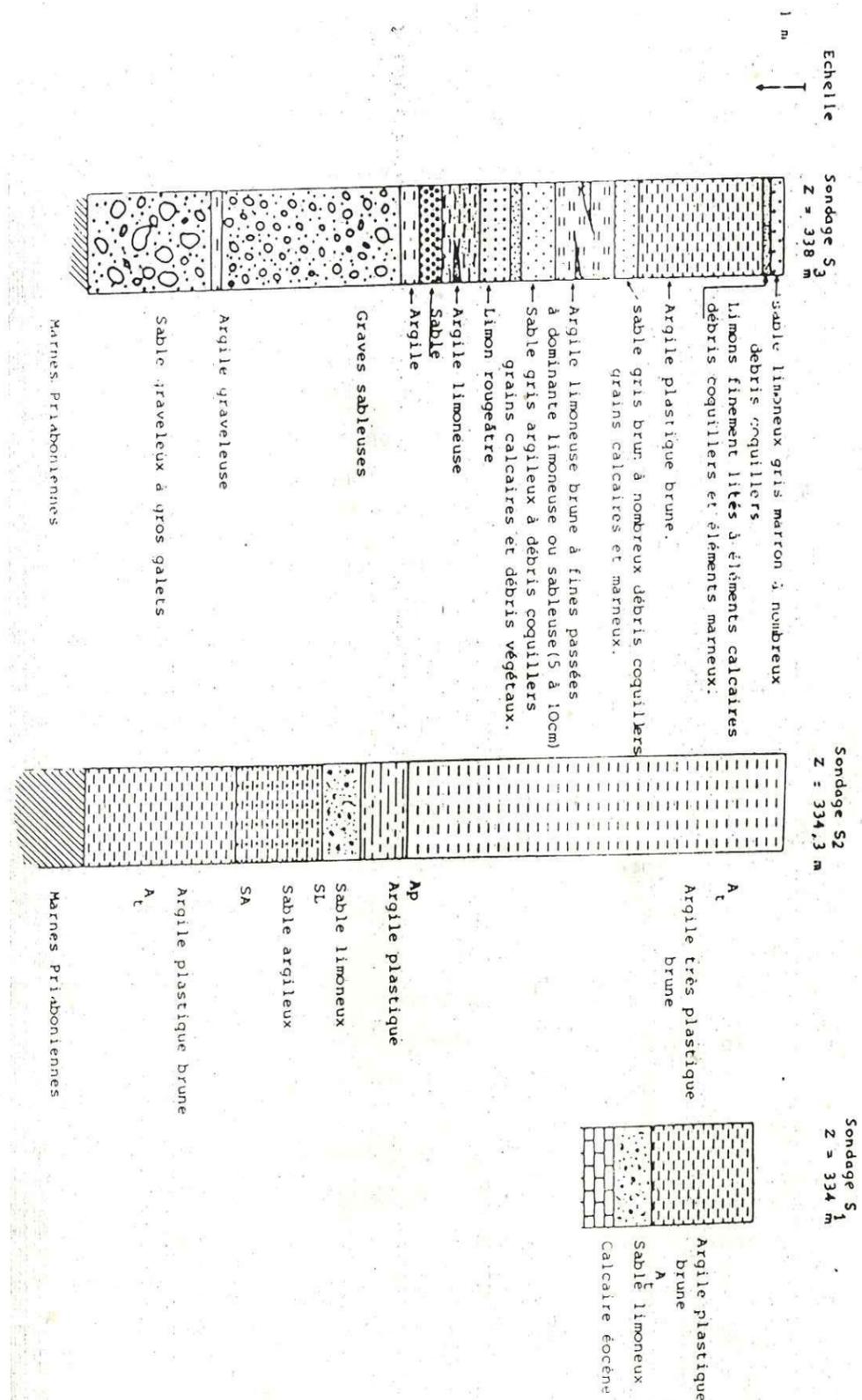
Nous avons repris la description lithologique des carottes des sondages S_1 , S_2 et S_3 afin d'avoir un log plus précis que celui établi par l'équipe de sondage, et plus compatible avec les données d'identification.

La description et l'identification visuelle des matériaux est en accord complet avec les données physiques d'identification sur le fait de la ressemblance des propriétés géotechniques entre les dépôts du barrage et ceux de la deuxième terrasse. (Fig. IV.4).

En effet, selon la classification du laboratoire entral des onts et. haussées français, les deux types de dépôts correspondent à des argiles très plastiques A_t .

- Caractéristiques mécaniques : Cisaillement.

IV.1.3. La réponse des matériaux de la retenue aux efforts de cisaillement est étroitement liée - comme nous le montrerons dans ce qui suit - à leur teneur en eau.



* La résistance à la compression simple :

Deux essais sur des éprouvettes taillées dans l'échantillon B de teneur en eau différentes ont donné les résultats suivants :

Les essais de compression à teneur en eau variable ($\omega = 48\%$, $\omega = 30\%$) confirment la nature essentiellement argileuse du matériau (forte cohésion à sec) ; la rupture fut atteinte pour des valeurs de contrainte verticale de $2,1 \cdot 10^5$ Pascals pour le premier échantillon et de $3,6 \cdot 10^5$ Pascals pour le deuxième. (Fig. IV.5 - IV.6).

* La cohésion non drainée.

- Les mesures au poinçon ont permis de tracer la courbe de variation de la cohésion non drainée en fonction de la teneur en eau. (Fig. IV.7).

- cohésion consolidée non drainée : Elle est déduite de l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande. Un essai effectué après une consolidation sous une charge de 1 bar. (Fig. IV.8) a donné les résultats suivants :

. Cohésion : $0,025 \text{ b}$, $\phi = 43^\circ$. (La teneur en eau était de 70% environ).

* La compressibilité.

L'essai oedométrique effectué sur le même échantillon de l'essai de cisaillement à la boîte (échantillon B) a fourni les caractéristiques suivantes :

. Module oedométrique $E_0 = 4500 \text{ bars}$
Cette valeur faible indique une forte plasticité.

. $\sigma'_c = 0,16 \text{ bars}$. Elle correspond à la hauteur d'eau maximale au dessus de l'échantillon.

. Le coefficient de perméabilité : L'échantillon testé présentait une porosité efficace plus grande que celle habituellement rencontrée pour les argiles ; ainsi la perméabilité trouvée était plus importante : 10^{-4} m/s au début de l'essai. Les mesures effectuées au cours de l'essai ont révélé l'existence d'une relation entre la perméabilité du matériau et la contrainte verticale qu'il subit.

Fig. IV.5

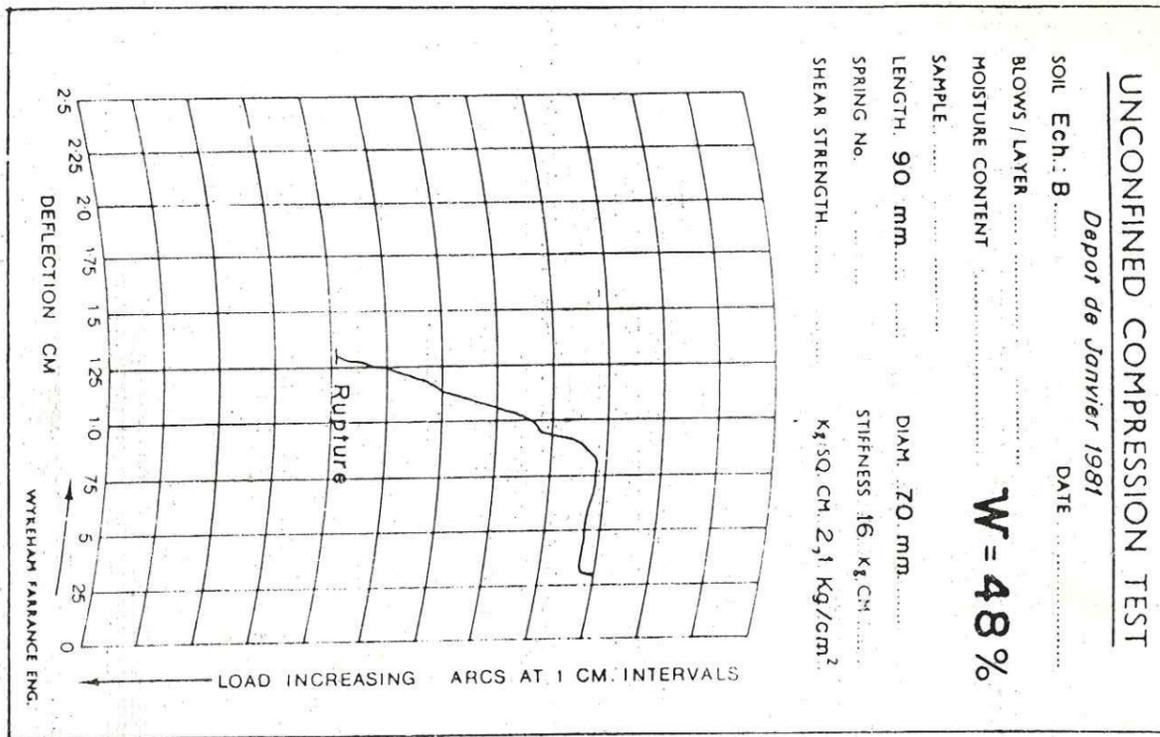


Fig. IV.6

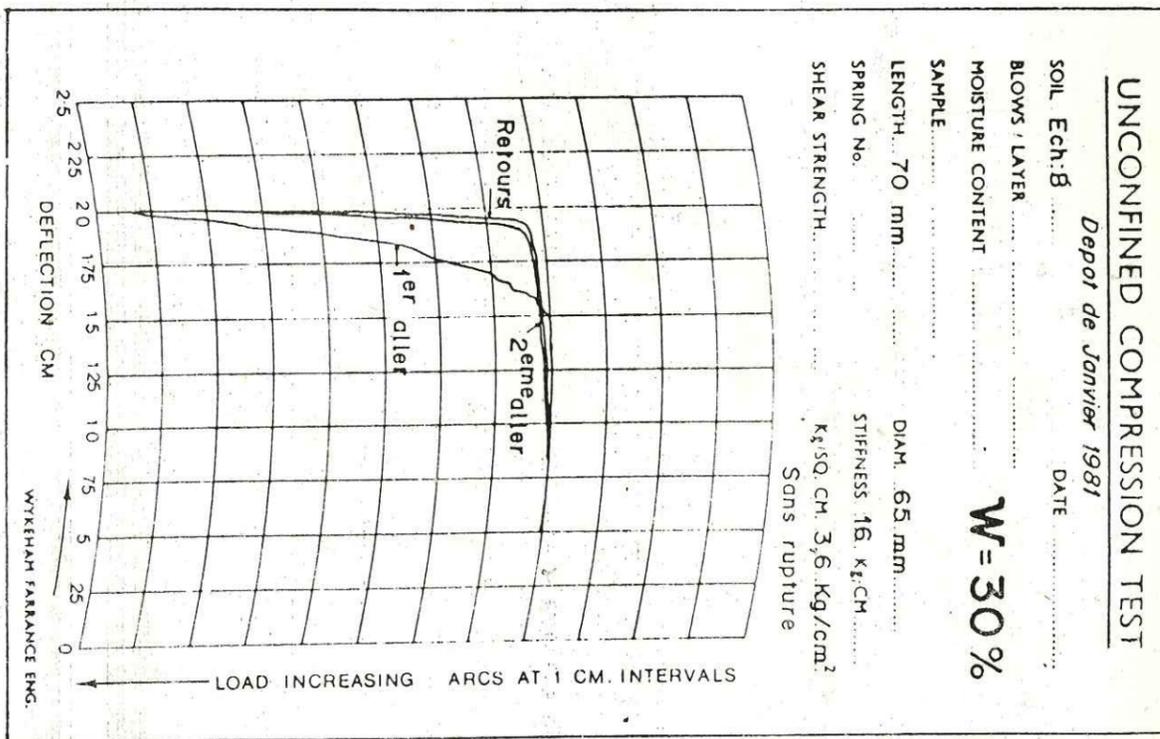


Fig. IV.7. Retenue du barrage de Sidi Boubecker sur l'oued EL Kebir
Depot de Janvier 1981
Relation Cu / Teneur en eau

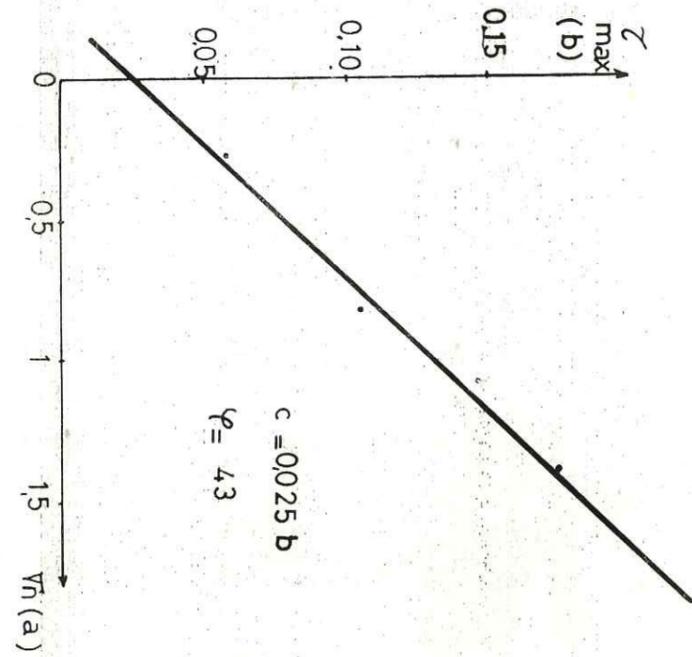
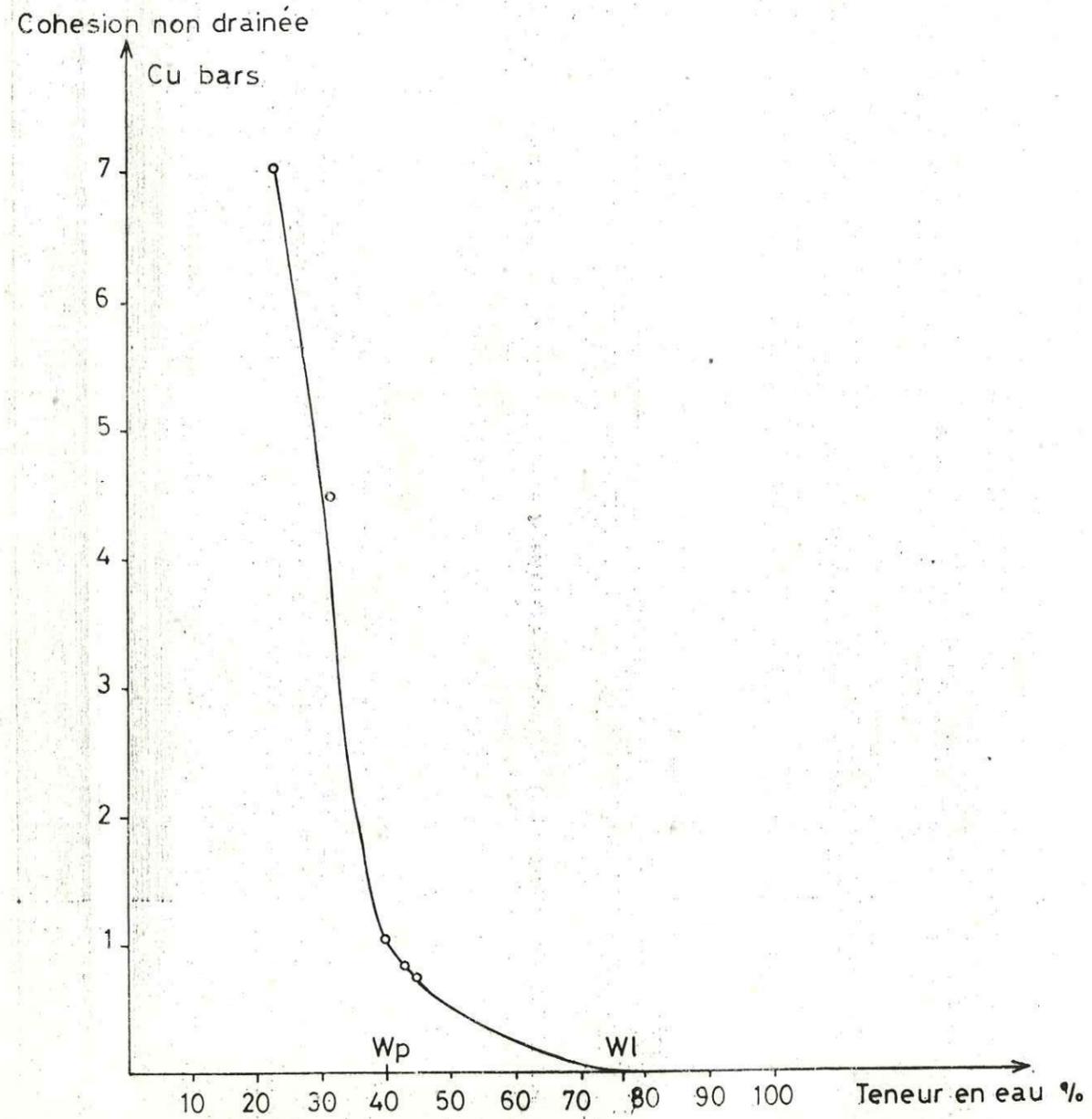


Fig. IV.8. Essai de cisaillement (Preconsolidé)
Dépot de la crue de janvier 1981

IV.2. - Composition des dépôts.

IV.2.1- Teneur en matière organique.

Elle est mesurée sur des échantillons préalablement étuvés (24 heures à 105°C) par calcination dans un four à 400°C pendant 2 heures.

Les mesures, effectuées sur des échantillons de surface prélevés à différents endroits de la retenue, pouvaient être classées en trois groupes :

- . Les bords de la retenue : valeurs très importantes de 7 à 15%
- . Partie centrale de la retenue : valeurs intermédiaires : de 4 à 6%.
- . Partie Amont de la retenue : valeurs faibles : de 1 à 2,8%.

(Ces valeurs sont comparables à celles des formations argileuses du bassin versant).

Cette repartition est liée aux apports détritiques organiques et à l'activité biologique dans le réservoir. Ces mécanismes seront décrits ultérieurement.

IV.2.2. - Composition minéralogique et chimique

* Les minéraux argileux (voir annexe).

* Les autres minéraux : il s'agit essentiellement de grains de calcite, et de très fins grains de quartz.

Les seules analyses chimiques dont nous avons pu disposer, concernent uniquement les teneurs en carbonates. Les valeurs trouvées varient de 35% à 55% de $CaCO_3$. Ces carbonates sont constitués de grains calcaires amorphes, de grains de calcite (remplissage des fractures), de tests de foraminifères et des fragments de coquilles d'Helicidés.

IV.3. - Mécanismes de dépôt .

IV.3.1. - Moyens d'identification des modes de dépôt .

1 - Le diagramme de Passega(1957) : par son découpage en zones correspondant à des modes de dépôts distincts, ce diagramme constitue un moyen d'interprétation valable.

Celle - ci est basée sur l'utilisation du rapport C/Me : C étant le percentile 1 (diamètre des grains les plus grossiers) et Me la médiane.

Le diagramme est constitué des trois zones suivantes : (Fig.IV.9) :

* Zone 1 : en forme d'un "S" est subdivisée en :

Segments du diagramme	Modes de dépôt
NO	Sédiments roulés
OP	Sédiments roulés avec quelques particules en suspension.
PQ	Suspensions granoclassées avec quelques particules roulées.
QR	Suspensions granoclassées : "saltation".
RS	Suspensions uniformes.

* Zone 2 : elle est parallèle à la limite C = Me et concerne les dépôts dûs aux courants de turbidité.

* Zone 3 : elle est relative aux sédiments transportés en suspension et déposés par décantation dans une eau calme.

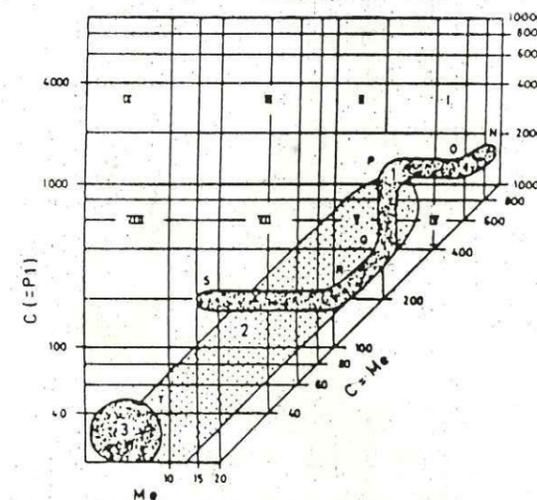


Fig.IV. 9. . - Diagramme de PASSEGA(1957)

2 - Détermination à partir des faciès granulométriques de rivière.

A. Rivière (1952) a défini trois faciès principaux à partir de la forme de la courbe granulométrique représentée en coordonnées semi-logarithmiques (Fig.IV.10).

* Le faciès parabolique : il représente les apports d'un courant rapide dans des eaux peu profondes et agitées. Dans ce cas, le transport se fait par suspension graduée et le matériau est bien classé.

* Le faciès logarithmique : il caractérise les dépôts par excès de charge à la suite d'une diminution de la compétence de l'agent de transport qui se fait par suspension uniforme.

* Le faciès hyperbolique : il correspond à un dépôt naturel par décantation dans un milieu calme des matériaux transportés par suspension.

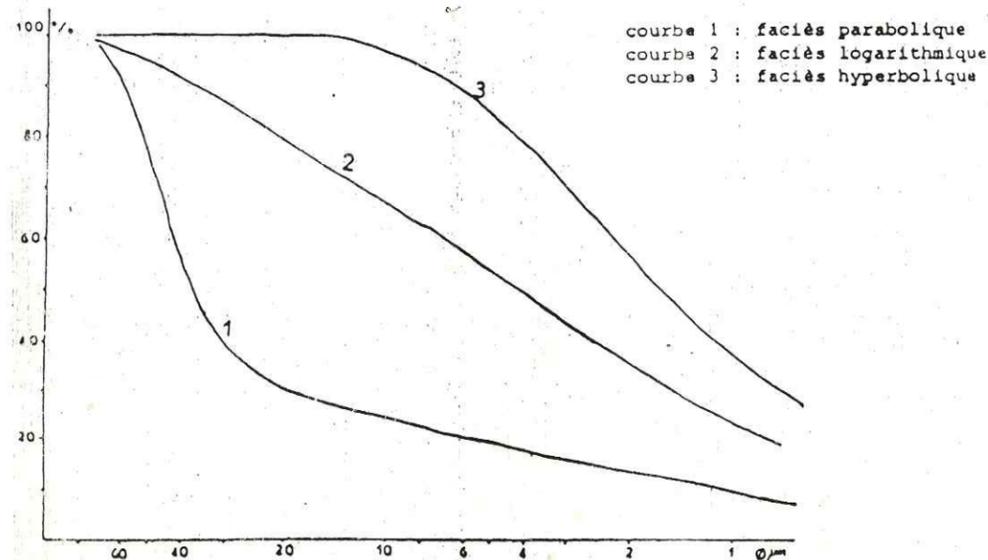


Fig. IV.10 - Différents faciès de dépôt des sédiments fins (d'après Rivière, 1952)

IV.3.2- Résultats.

Sur le diagramme de Passega, les points relatifs à l'échantillon B (dépôt de janvier 1981), et au sondage S₁ se situent à proximité de la zone 3. (Fig. IV.11). Il s'agit donc de sédiments transportés en suspension et déposés par décantation dans une eau calme.

Les courbes granulométriques des échantillons cités ci-dessus rappellent le faciès logarithmique de Rivière. Ceci confirme les indications du diagramme de Passega. Il s'agit bien par conséquent d'un transport en suspension et d'un dépôt suite à une baisse de l'énergie de transport.

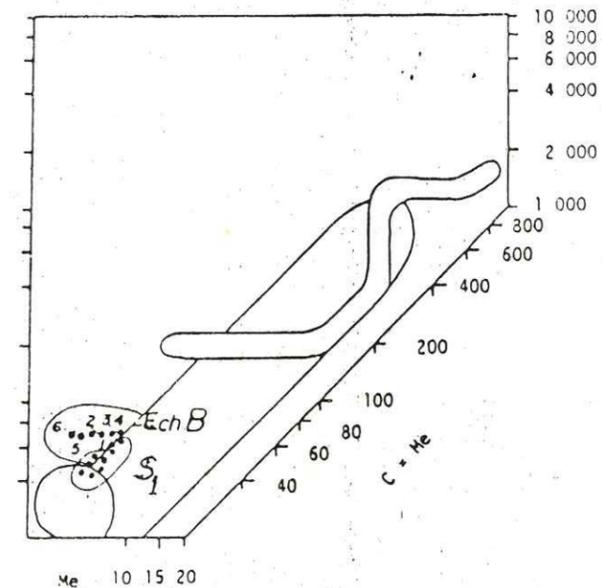


Fig. IV.11 . Situation des échantillons B et S₁ dans le diagramme de PASSEGA.

CINQUIEME CHAPITRE

INFLUENCE DE L'ACTIVITE BIOLOGIQUE
SUR CERTAINES CARACTERISTIQUES

GEOTECHNIQUES DU DEPOT

V.1. - Influence des apports organiques et de l'activité biologique sur l'évolution des sédiments de la retenue.

V.1.1.- Apports organiques détritiques

Les crues de l'oued amènent dans la retenue des quantités assez importantes de matériaux organiques récupérés dans le bassin versant.

a - Nature des apports

* Apports d'origine animale.

Il s'agit essentiellement de :

- Tests ou débris d'Helicidés actuels :

Les tests intacts sont amenés jusqu'au pied du barrage alors que les débris sont généralement déposés à l'amont de la retenue dans la zone des dépôts limoneux (Zone C).

- Excréments d'animaux :

Ce sont surtout les rejets d'ovins, récupérés dans la forêt (lieu de paturage), dans les fermes (lieu de stockage à l'air libre) ou dans les champs (utilisé comme engrais) qui constituent l'essentiel des apports d'excréments d'origine animale.

* Apports d'origine végétale.

- Produits de la forêt :

Il s'agit essentiellement d'aiguilles et pommes de pins de branches et troncs d'arbres morts.

- Restes des récoltes :

Les restes des récoltes de blé, d'orge ou de foin (paille) peuvent - s'ils n'ont pas été totalement ramassés - être transportés lors des crues jusqu'à la retenue.

b - Répartition et dépôt des apports

Dès leur arrivée dans la retenue, les apports organiques flottent à la surface de l'eau. Leur position dans la retenue dépend de la direction du vent dominant. Cette direction détermine la position finale de ces matériaux lors de l'assèchement complet du réservoir. Le plus souvent, les vents dominant étant généralement au N - W, les apports sont localisés au pied du barrage et dans la partie S - E de la retenue.

V.1.2.- Apports organiques liés à l'activité biologique dans la retenue

a - Expériences de laboratoire.

Dès l'émersion du fond de la retenue (après évaporation complète de l'eau), l'observation des sédiments met en évidence deux faits importants :

- Les deux rives de la retenue sont recouvertes (sur presque toute la longueur du réservoir sur une largeur allant jusqu'à 25 m) d'un tapis de plantes aquatiques blanchâtres (Photo V.1.).

- Le dépôt présente une texture interne différente de celle des vases de barrage. Il est caractérisé par :

. des vides correspondant à des terriers d'animaux fuisseurs (diamètre 1 à 3 mm) ou à des restes de racines de végétaux aquatiques (diamètre 0,1 à 0,5 mm) ; les terriers se distinguent des empreintes de racines par le fait qu'ils communiquent entre eux (Photo V.2.).

. Presque tous les vides sont souillés par des oxydes de fer. Trois expériences menées au laboratoire ont permis l'explication des observations précédentes.

* 1^{ère} expérience

Lors d'un essai de consolidation de sédiments (prélevés dans l'oued El-Kebir - amont de la retenue) dans une éprouvette de verre remplie d'eau du réservoir, les phénomènes suivants se sont produits :

- Apparition d'un tapis algair à la surface du sédiment
- Prolifération de l'algue entre les parois internes de l'éprouvette et le sédiment.

- Alors que l'algue continue à pousser vers le fond de l'éprouvette, la partie supérieure subit une réduction suivie d'une oxydation. L'algue se trouve ainsi progressivement remplacée par des oxydes de fer (couleur rouille). (Photo V.3.).

Cette expérience a attiré notre attention sur le rôle de la matière organique dans l'évolution des sédiments du barrage.

* 2^{ème} expérience

A côté d'une prise d'eau envasée et dans une zone humide un échantillon de dépôt fut prélevé.

Après une dizaine de jour de séjour dans l'eau, les restes (partiellement verts) de la plante aquatique dépigmentée ont repoussé et deux semaines plus tard des crustacés ainsi qu'un ver polychète ont été observés.

* 3^{ème} expérience

Celle-ci fut menée en trois phases

- 1^{ère} phase : à partir de matériaux prélevés dans la retenue, les passants au tamis 40 ont été récupérés et placés en décantation dans un récipient en verre. La surface en a étéensemencée avec des silts contenant les restes de la plante aquatique

Au bout d'une dizaine de jours des plantes vertes ont poussé à la surface du matériau expérimental.

- 2^{ème} phase : des crustacés prélevés dans le récipient de la deuxième expérience, transférés dans celui de la troisième sont mis en observation pendant environ un mois. Alors que les plantes continuent leur développement, l'activité des animaux transférés s'est limitée au remaniement de la surface de la vase. Aucune élaboration de terrier profond ne fut observée malgré l'apparition d'une nouvelle génération - produit d'un cycle de reproduction effectué dans le nouveau milieu.

- 3^{ème} phase : à partir du transfert du vers polychète prélevé dans le récipient de la deuxième expérience, le troisième milieu expérimental évolue favorablement et fournit les éléments fondamentaux de la compréhension du biotope constitué par la retenue du barrage : des terriers apparaissent.

b - Principales espèces du biotope et leurs modes de vie.

* Espèces végétales :

-/Les algues : il s'agit essentiellement d'espèces filamenteuses. (Cyanophycées).

-/Les characées : d'après la détermination de M^{me} GUERLESQUIN (Laboratoire de Biologie Végétale - ANGERS), l'espèce présente dans la retenue est : Chara globularis (Photo V.4). Cette espèce ne suppose pas de séjours prolongés en eau saumâtre et s'adapte bien avec l'eau du barrage dont la salinité n'excède guère 1,5 g/l.

D'après les premiers essais de culture in vitro, cette espèce - dont la période de germination à partir d'oogones est de l'ordre de 10 jours - nécessite un ensoleillement intense et durable.

Ceci explique la localisation de cette espèce sur les berges de la retenue.

* Espèces animales :

-/Ostracode :

C'est un mollusque à test calcaire (Photo V.5) qui présente les caractères suivants :

- Dimensions : jusqu'à 2,5 mm de longueur à l'âge adulte.
- Déplacement : par nage lorsqu'il est jeune, par marche à l'âge adulte.
- Régime alimentaire : il se nourrit essentiellement d'algues ou de débris organiques prélevés dans la vase.

* Matériel confié au laboratoire de paléontologie de l'Université de Lyon.

- Cycle de vie : environ un mois
- Conditions de vie :

. Ensoleillement : c'est en présence d'un rayonnement solaire intense que l'ostracode sort de la vase (où il s'enterre dans la partie superficielle) et présente le maximum d'activité.

. Salinité : au fur et à mesure de l'évaporation de l'eau du milieu de vie *in vitro* (augmentation de la salinité) l'activité de l'ostracode diminue et le nombre d'individus mort augmente.

. Présence de cyanophycées : qui constituent leur aliment principal, leur présence est donc nécessaire.

-/Ver polychète

La présence de ce ver* (Photo V.6) dans la retenue engendre les conséquences suivantes :

. Structures sédimentaires : ce ver vit dans un terrier qu'il creuse dans la vase. Par sa bouche (toujours à l'intérieur du trou) il avale la vase qui passe dans son système digestif où les éléments organiques sont extraits. Les restes de la digestion sont rejetés par la partie postérieure en dehors du trou (Photo V.7). Cette activité donne naissance à des terriers de formes et tailles différentes. Dans la retenue, ces terriers ont été détectés jusqu'à des profondeurs supérieures à un mètre. Nous pensons qu'ils existent à des profondeurs plus grandes.

. Oxygénation du milieu :

Pendant la digestion de la vase, le ver effectue des mouvements oscillatoires qui provoquent le mélange de l'eau du terrier pauvre en oxygène avec l'eau libre plus riche. Ceci permet à l'animal d'assurer en permanence ses besoins en oxygène. Le surplus est consommé dans des réactions d'oxydation.

c - Conséquences de l'activité biologique

* Augmentation de la perméabilité

L'activité des vers dans la retenue a eu pour conséquence l'augmentation de la porosité totale et efficace des sédiments.

Lors d'une prise d'échantillon avec un tube en plastique, la carotte prélevée a montré une réduction de volume (suite à la fermeture des vides préexistants par tassement) de l'ordre de 45%.

C'est cette porosité efficace secondairement acquise qui explique la forte perméabilité des sédiments (10^{-4} m/s) mesurée au début de l'essai oedométrique (Fig.III.19).

* D'après la détermination de Monsieur J.P.DUPONT (Labo.de Biosédimentologie marine de l'Université de Rouen), il s'agirait d'un Capitellidé, proche de l'espèce *Capitellia capitata*, espèce marine mais pouvant supporter des des-salures importantes.

Les tapis algaires sont susceptibles de modifier nettement la perméabilité du dépôt argileux. En effet, l'insertion de lits perméables entre des lits de matériaux moins perméables, améliore considérablement la perméabilité verticale K_v et horizontale K_h .

Exemple : dans une masse argileuse de perméabilité K_A , l'intercalation de couches limoneuses de perméabilité ($K_L = 100 K_A$) et dont l'épaisseur représente 0,15% de l'épaisseur totale, améliore K_h de 15% environ.

L'activité biologique (liée à la faune et la flore) transforme les matériaux argileux de la retenue en multipliant la porosité et facilitant ainsi la perméance d'une véritable nappe souterraine. Dans un trou exécuté à la pelle dans ces sédiments, l'eau jaillissante à partir des terriers rappelle les puits dans les sables au fond des oueds.

* Augmentation de la cohésion.

Les matériaux déposés aux fonds de la retenue voient leur cohésion augmenter de deux façons :

- Augmentation par dépôt d'oxydes de fer.

La dégradation par réduction de la matière organique contenue dans la vase entraîne la libération du fer.

Celui-ci est fixé par l'oxygène produit dans le milieu par photosynthèse (activité de la flore) et introduit dans les terriers par les mouvements oscillatoires des vers.

Le mécanisme - ci dessus décrit explique la présence d'oxyde de fer en concentration plus forte dans les parois des terriers et de leurs environs*.

Cet oxyde - amorphe d'après des analyses aux R.X - cimente les particules argileuses et augmente leur cohésion ce qui frêne les opérations de devasement.

- Augmentation par variation de la structure des montmorillonites.

Les travaux de N. HASBANI (1978) ont mis en évidence l'influence de l'addition de certains cations sur les propriétés mécaniques du kaolin et d'une argile à 70% environ de montmorillonite. Les résultats de cette étude sont résumés dans le tableau V.1.

Pour l'argile à montmorillonite, seul le magnésium entraîne une baisse de la cohésion à long terme lorsqu'il est ajouté à fortes concentrations (2% et plus). Tous les autres cations (Na^+ , Ca^{++} , K^+ , $Fe^{(++)}$, $Fe^{(+++)}$) provoquent jusqu'à 50% d'augmentation de la cohésion non drainée.

Les analyses minéralogiques (aux rayons X) des matériaux de la retenue ont montré que ceux-ci sont composés essentiellement de montmorillonite et accessoirement de kaolinite.

* Constatation comparable a été faite au niveau de terriers de *Nereis* dans les sables vaseux du milieu marin intertidal, Dupont J.P (1981), où la formation de monosulfures et bisulfures de fer a été mise en évidence.

Cations	Na	Mg	Ca	K	Fe	Al	Cu non traité.
Argile à Montmorillonite	Fortes concentrations	+ 48%	+ 19%	+ 52%	+ 57%	+ 46%	0,67 bars
	Faibles concentrations	+ 23%	+ 3%	+ 36%	+ 45%	+ 25%	
Kaoline	Fortes concentrations	+ 40%	+ 12%	+ 58%	+ 30%		0,43 bars
	Faibles concentrations	0	+ 23%	+ 44%	+ 40%		0,43 bars

Tableau V.1. Influence de l'addition de certains cations sur la cohésion non drainée de certaines argiles (D'après travaux de N. HASBANI 1978).

Des analyses chimiques, d'eau du réservoir, de sédiments du barrage et du bassin versant, des espèces végétales de la retenue, ont permis de préciser la nature et l'origine des cations influant sur la cohésion.

Le tableau V.2. fournit les teneurs en % (en poids) des principaux cations dosés :

Tableau V.2.

Nature de l'échantillon	Perte au feu	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	K ⁺	Fe (Total)	Zn ⁺⁺	Mn ⁺⁺
Dépôt de la retenue (crue Janvier 83)	28	0,2	1,04%	15,52%	0,061%	2,8%	0,009	0,026
Marnes priaboniennes (formation Souar)	28,62	0,046	1,34	17,1	0,062	3,01	0,014	0,035
Marnes cenomaniennes (formation Fahdène)	30,84	0,038	0,5	19,5	0,054	2,46	0,009	0,02
Algues (cyanophycés)	59,19	0,046	1,21	10,3	0,048	1,2	0,009	0,02
Charas	55,2	0,124	1,09	19,4	0,038	0,64	0,005	0,078
Eau libre de la retenue	-	0,004	0,005	0,04	0,004	9 x 10 ⁻⁴	-	-
Eau interstitielle du dépôt.	-	0,015	0,015	0,045	0,015	1 x 10 ⁻³	-	-

Il faut noter que les teneurs précédemment citées englobent aussi les quantités de cations préexistants dans la structure des minéraux argileux.

Par conséquent la désignation du type de concentration de cations présents (faible ou forte) en vue de la prévision de la variation de la cohésion, devrait à notre avis se baser sur les teneurs trouvées pour les deux échantillons d'eaux analysés (eau libre et surtout eau interstitielle en contact direct avec les minéraux).

Ces teneurs, comparées aux concentrations utilisées dans l'étude à laquelle nous nous référons (faibles concentrations : 0,4% en poids pour cations monovalents et 0,8% pour les bivalents ; fortes concentrations : 2% en poids pour cations monovalents et 4% pour les bivalents) peuvent être décrites comme suit, tableau V.3. (extrait du tableau V.1).

Tableau N° 3.

Echantillon	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	K ⁺	Fe total
Eau libre de la retenue	*	*	*	*	*
Eau interstitielle du dépôt.	*	*	*	*	*
Variation attendue de la cohésion à long terme	+ 23%	+ 3%	+ 36%	+ 26%	+ 45%

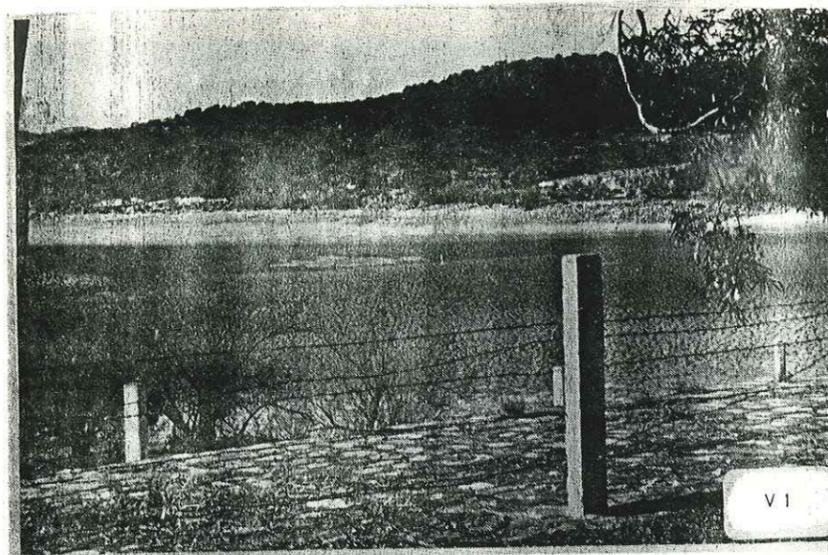
* : Faible concentration.

Tous ces cations présents à faible concentration vont agir mutuellement dans le sens de l'augmentation de la cohésion des matériaux déposés. Ceci explique la consistance que montrent ces dépôts même lorsqu'ils sont consolidés sous faible tranche d'eau (1 à 2 m), ainsi que l'échec des opérations de dévasement par chasses tentées par TIXERONT entre les années 1953 et 1956.

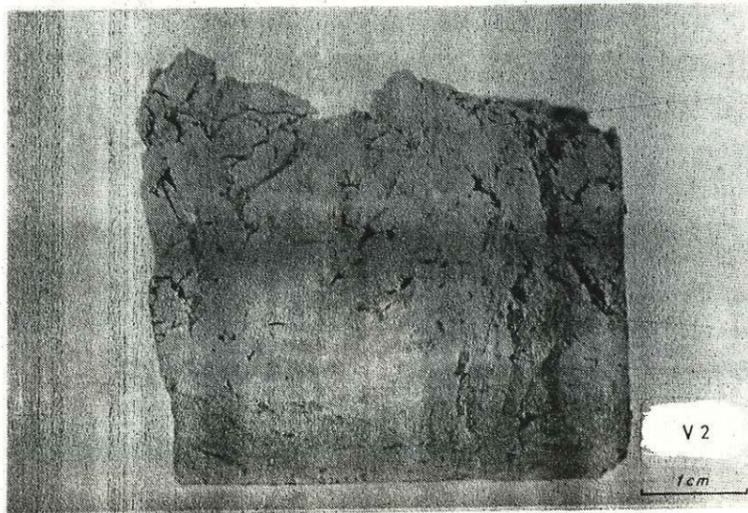
V.2. - Conclusion.

Les dépôts de la retenue (essentiellement des argiles plastiques - A_t) présentent des propriétés sédimentologiques et mécaniques qui dépendent étroitement des conditions géochimiques et biologiques du réservoir. Ainsi, l'enrichissement du milieu de dépôt en certains cations confère aux dépôts une cohésion suffisante pour empêcher toute solution de dévasement hydraulique. L'activité biologique, quant à elle augmente considérablement la perméabilité des dépôts initialement imperméables.

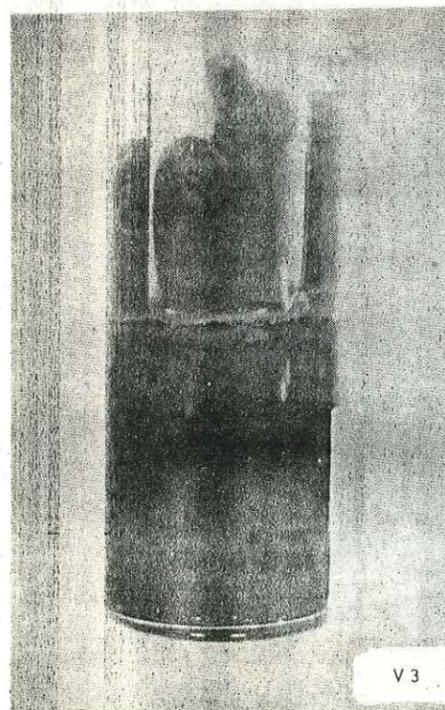
Les réserves hydrauliques souterraines ainsi constituées compensent, ne fût-ce que partiellement, la capacité de retenue d'eau supprimé par l'envasement.



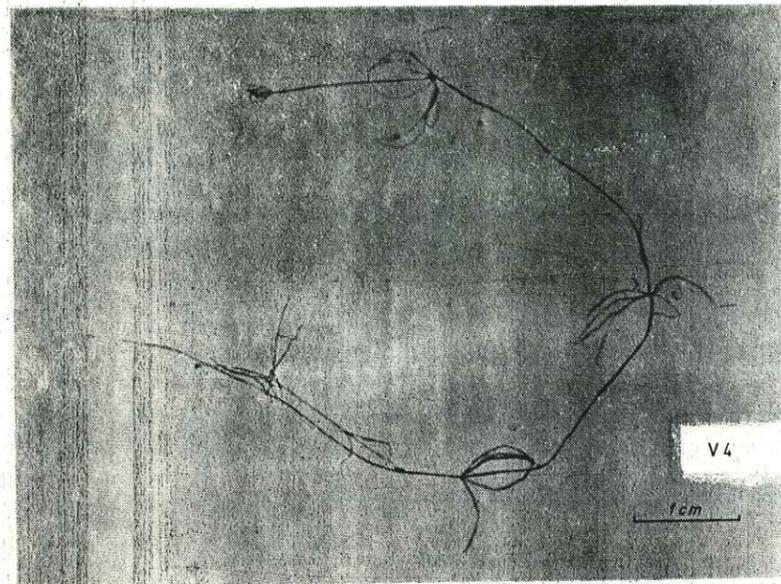
Prolifération de characées en rive gauche. (Zone blanchâtre)



Depot de la retenue: terriers et traces d'oxydes de fer.

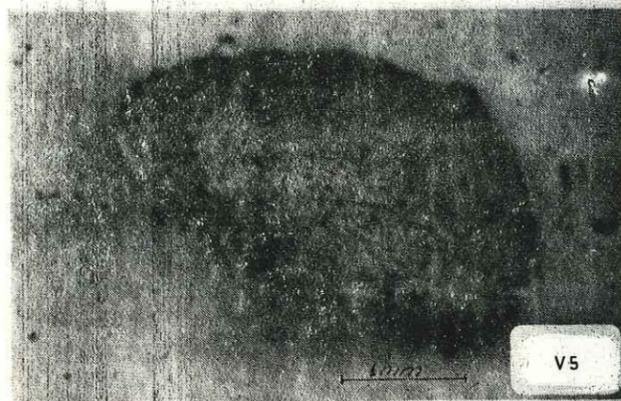


Expérience de laboratoire: prolifération de cyanophycées et oxydation de la matière organique.



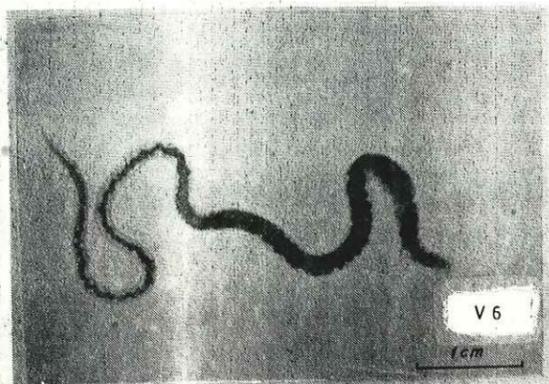
Chara globularis.

V4



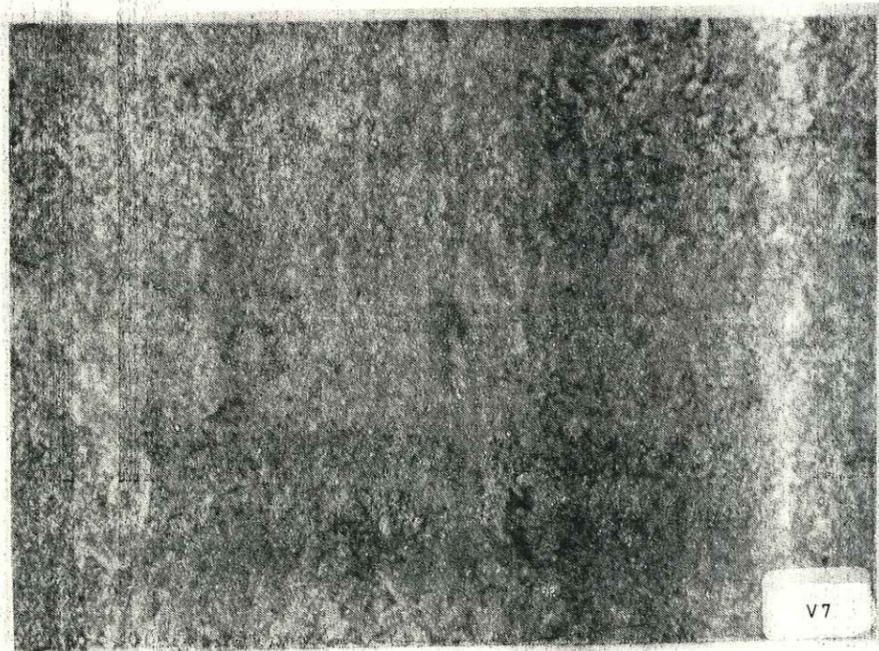
Ostracode.

V5

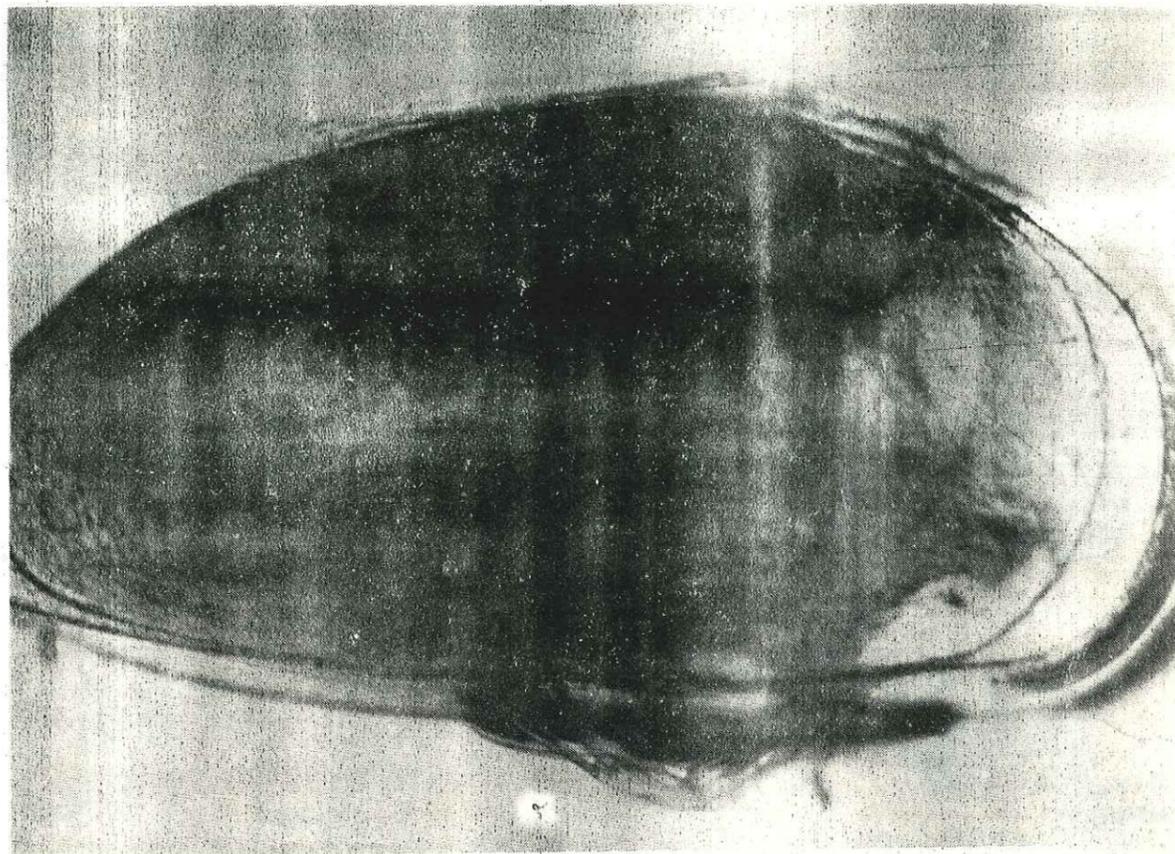


Ver polychète; Capitella capitata

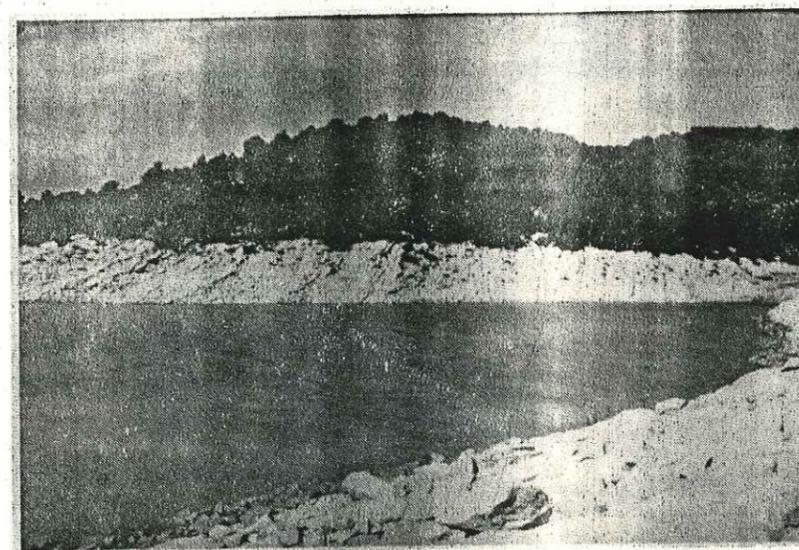
V6



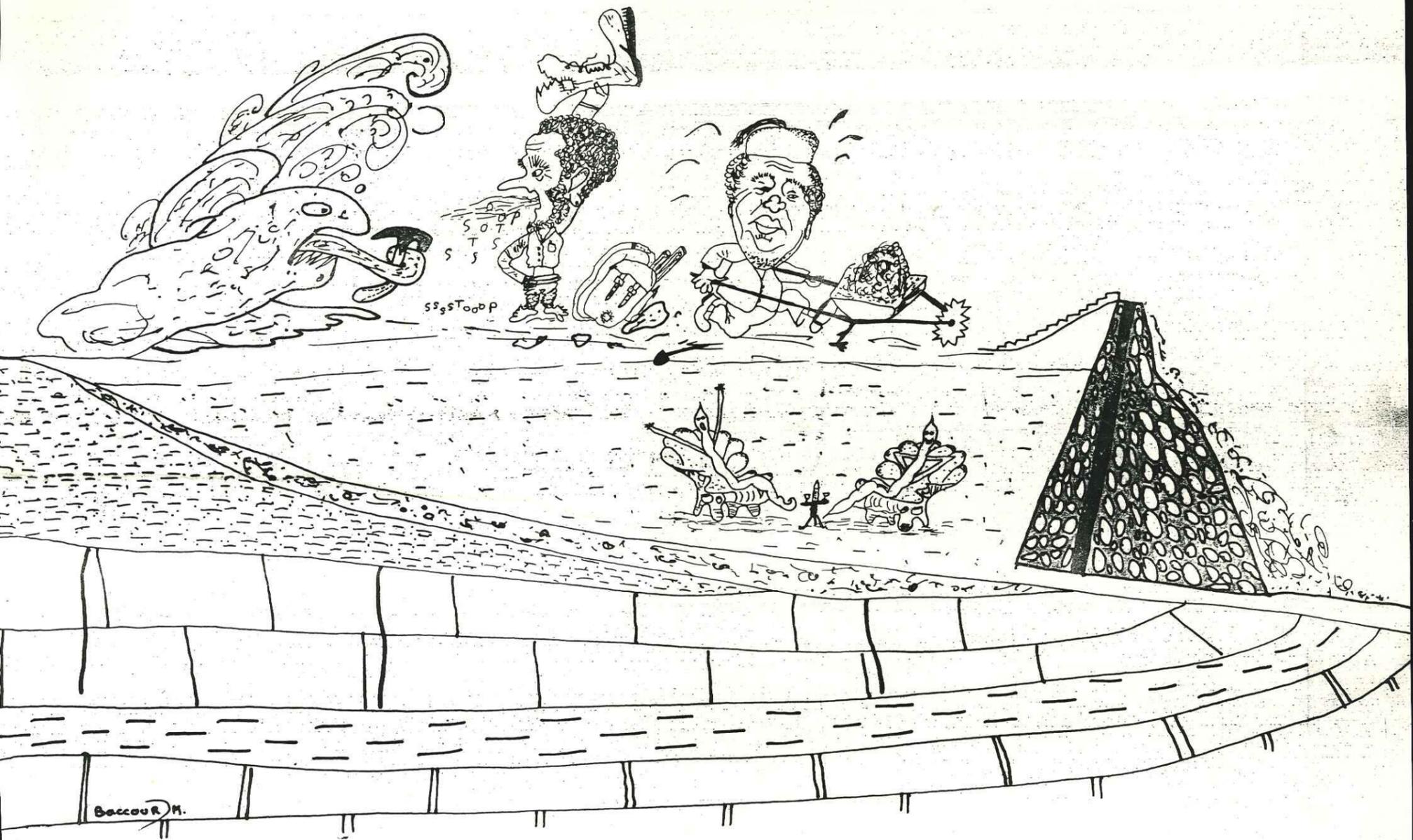
V7



Ostracode en vie. (X60. Remarques pattes et système digestif.)



Calcaires lutétiens mouillés en rive gauche.



Quatrième partie : Problème d'exploitation de l'aménagement

Sixième chapitre : Le problème des fuites

Septième chapitre : Les facteurs de l'envasement

- Ruissellement
- Erosion
- Transport solide

SIXIEME CHAPITRE

LE PROBLEME DES FUITES

VI.1 - Présentation du problème

Dès le premier remplissage provoqué par une crue - en 1929 - des fuites importantes ce sont manifestées sous forme de sources à l'aval: au voisinage immédiat du barrage et à un km environ plus loin.

La première explication attribuait ces fuites au cisaillement du masque en béton. L'eau passait à travers le barrage, et s'infiltrait dans les fissures des roches pour ressortir à l'aval.

Les fuites furent attribuées à l'origine au cisaillement du diaphragme en béton qui assurait l'étanchéité de l'ouvrage lors du premier remplissage. Par la suite le diaphragme ayant été réparé les sources en aval de l'ouvrage persistèrent et il fallut bien se rendre à l'évidence l'eau retenue en amont empruntait des fissures du substratum sous le barrage. Il fut alors décidé la construction d'ouvrages de captage.

Il nous a paru intéressant de déterminer dans quelle mesure l'histoire structurale régionale permettait de mieux comprendre la localisation de ces cheminements privilégiés.

Des observations microtectoniques et structurales, ainsi que des études géochimiques et hydrauliques effectuées sur les sites du barrage (Secteur I, fig.VI.1) et au captage aval (secteur II, fig. VI.1) nous ont permis de proposer une nouvelle explication

VI .2 - Eléments structuraux influant sur les conditions hydrauliques.

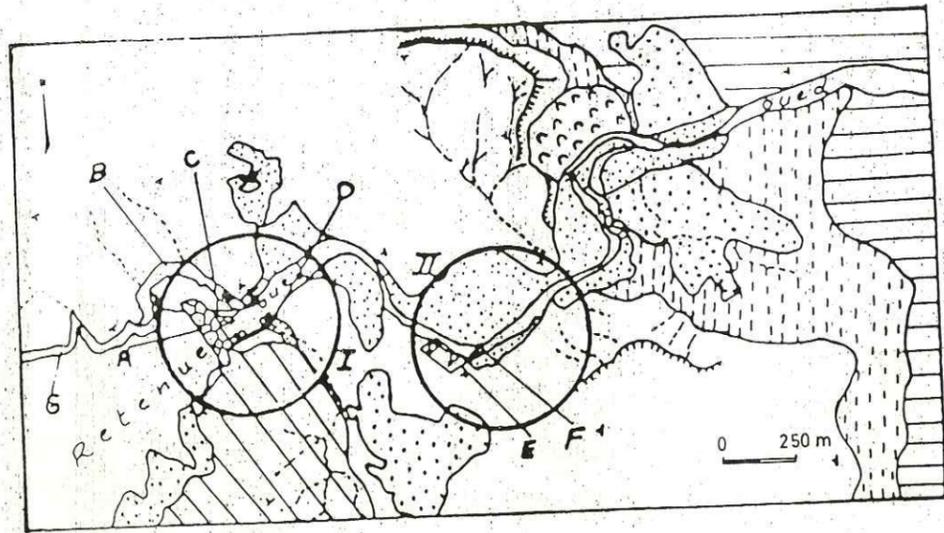
a - Position de l'axe du synclinal

L'examen de l'esquisse géologique de l'extrémité NE du synclinal (Fig. .2 d'après SCHOELLER 1936) montre que l'axe de la structure ne passe pas sous le barrage. Sur la coupe transversale du synclinal (Fig.VI.3), on voit que cet axe est décalé vers le SE par rapport à la position de la vallée et se situe sous le versant rive droite de celle-ci. De ce fait, dans l'appui rive droite du barrage, les couches plongent, comme dans la rive gauche, vers le SE et le drainage en direction de l'axe du synclinal se trouve facilité.

b - Les flexures

Deux flexures, affectant le synclinal au voisinage du site étudié (Fig.VI.2) sont à l'origine de conditions hydrauliques particulières :

Fig.VI.1-Sites d'étude des fuites



LEGENDE

- BASSE TERRASSE : LIMONS ARGILEUX
- DEUXIEME TERRASSE : ARGILE A GALETS CALCAIRES
- MARNES PRIABONIENNES (FORMATION SOUAR)
- CALCAIRE YPRESIEN ET LUTETIEN INFERIEUR (FORMATION METLAOUI)
- MARNES DU MAESTRICHTIEN SUPERIEUR ET PALEOCENE (FORMATION EL HARIA)
- CALCAIRE DU MAESTRICHTIEN INFERIEUR ET DU CAMPANIEN SUPERIEUR (FORMATION ABIOD).
- FALAISE
- TERRAIN GLISSE
- SOURCE
- A** BARRAGE EN ENCROCHEMENT
- B** EVACUATEUR DES CRUES
- C** TRANCHEE DE RESTITUTION DES EAUX DE LA GALERIE DE VIDANGE
- D** TRANCHEE DE DRAINAGE DES EAUX DE FUITE
- E** CAPTAGE DES FUITES AVAL
- F** SOURCES A L'AVANT DU CAPTAGE
- G** CALCAIRE EN CONTACT AVEC L'EAU DE LA RETENUE.

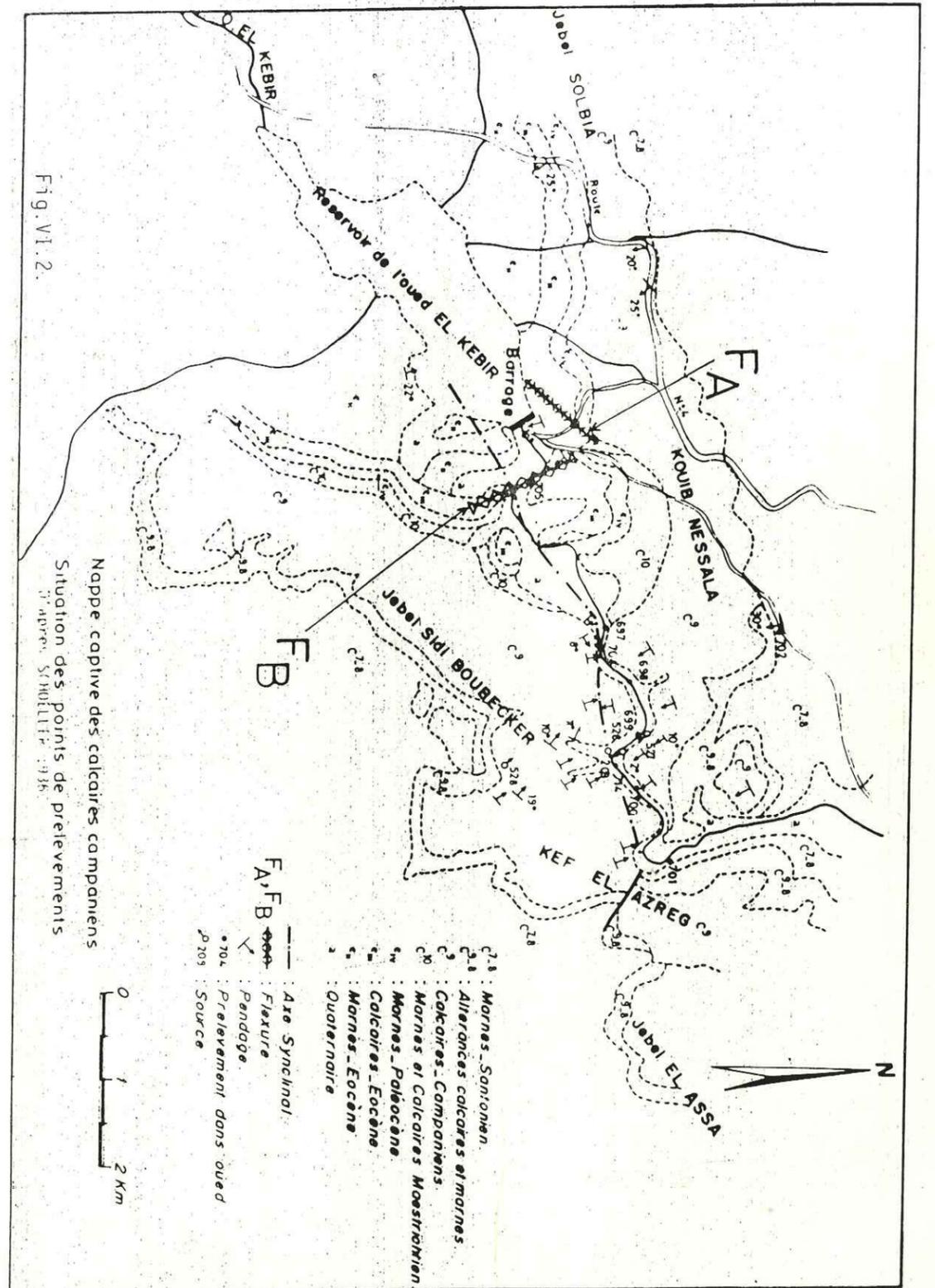


Fig. VI.2.

Nappe captive des calcaires campaniens
Situation des points de prélèvements
d'après Schmittler, 1976.

- : Axe Synclinal
- : Flexure
- : Pente
- : Prélèvement dans oued
- : Source
- 1** : Marnes - Santonien
- 2** : Alternances calcaires et marnes
- 3** : Calcaires - Campaniens
- 4** : Marnes et Calcaires Maestrichtien
- 5** : Marnes - Paléocène
- 6** : Calcaires - Eocène
- 7** : Marnes - Eocène
- 8** : Quaternaire

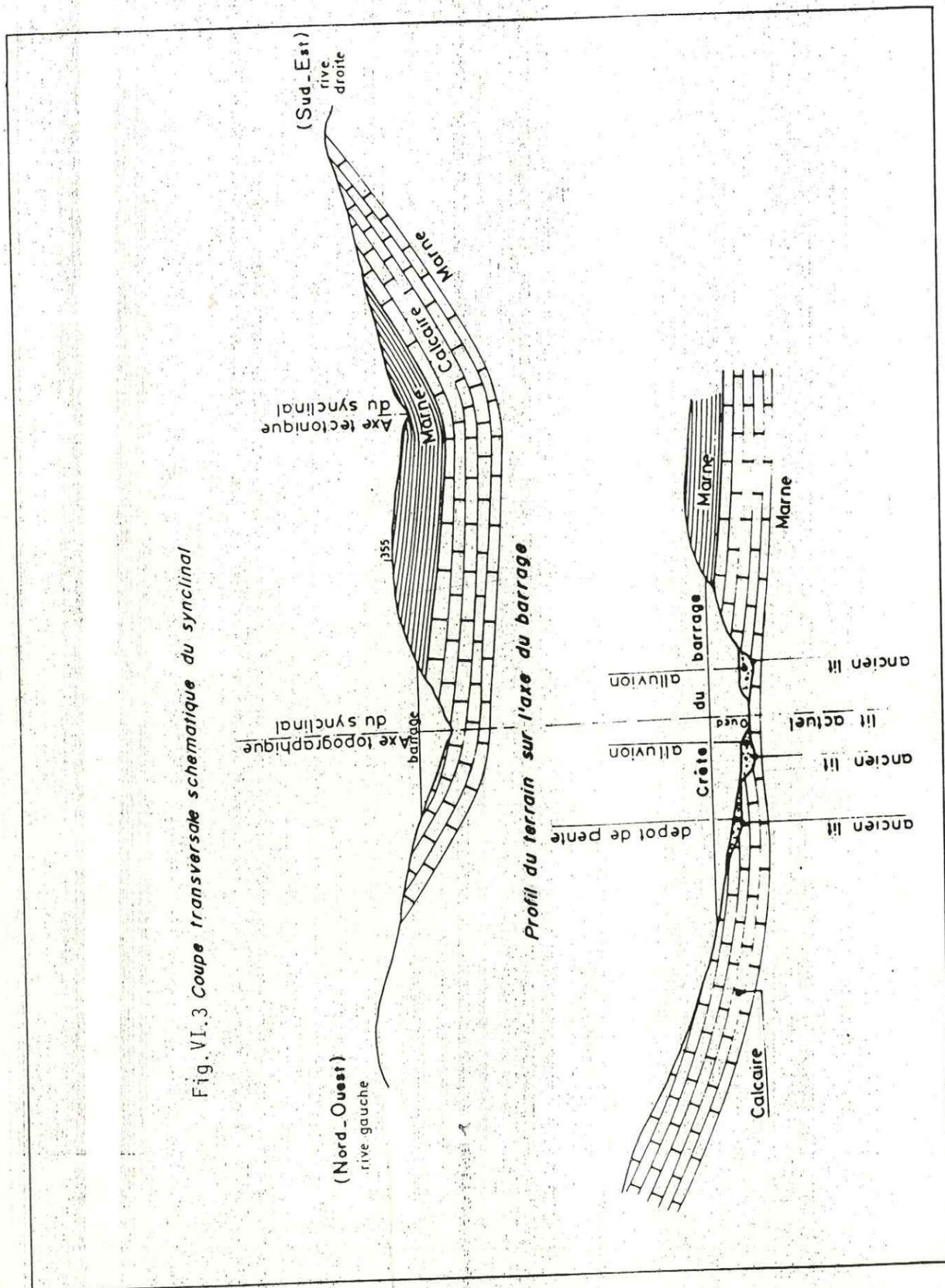


Fig. VI.3 Coupe transversale schématique du synclinal

- la flexure du déversoir (F_A : décrite dans l'étude cinématique.p.35). Dans cette zone, les déformations subies par les strates lors du plissement, ont accentué les hétérogénéités du massif suite à la création de nouvelles surfaces de discontinuité.

- la flexure du captage aval (F_B). Cette flexure de direction moyenne N140, provoque un redressement de l'axe du synclinal - initialement plongeant vers le NE et marque le début de la fermeture perisynclinale.

c. - La fracturation :

Les réseaux de fractures - décrits dans l'étude géologique renferment des discontinuités qui vont - suite aux épisodes successifs de déformations qu'elles ont subis - jouer le rôle de drains naturels. Elles augmenteront ainsi la perméabilité du massif. A titre indicatif nous avons groupé dans le tableau VI.1., les caractéristiques géométriques des plans de discontinuité (fractures et joints stylolitiques) pouvant influencer sur les propriétés hydrauliques du massif et par conséquent l'étanchéité du site.

D'après certaines caractéristiques géométriques (ouverture, longueur ...), les principales possibilités de drainage sont les suivantes (tableau VI) :

Famille		Fréquence dans le faisceau	Longueur	espacement	ouverture	% de remplissage dans la famille
R E S E A U X	NE - SW.	F.T	0,3 à 15m	-	2 à 100cm	80%
		S.F	0,3 à 2m	-	1 à 5 cm	20%
N 110		D.F	10 à 200m	0,5 à 0,8m	0,5 à 30cm	5%
		F.T	Plusieurs dizaine de mètres	-	5 à 150cm	60%
N 135		D.F	10 à 100m	0,5 à 0,8m	0,5 à 15cm	1%
		F.T	Plusieurs dizaine de mètres	-	2 à 30cm	20%

Tableau VI.2. Principaux circuits de drainage dans le site du barrage.

Faisceau et fractures		Pourcentage par rapport au nombre globale	Pendage	Developpement en longueur	Espacement	Ouverture	Remplissage	
							Pourcentage	Nature
Faisceau subméridien.	D	84%	Vertical	5 à 150 cm	20 à 30 cm	Minime	0	—
	D.F	5%	Vertical	5 à 150 cm	20 à 30 cm	2 à 5 cm	20%	Calcite automorphe gros cristaux
	F.T	10%	Vertical	20 à 100 cm	1 à 3 cm dans le groupe aléatoire entre les groupes	0,1 à 1 cm	100%	Calcite fine blanche brunâtre
	F.T.E	1%	Vertical	1 à 5 cm	Aléatoire	Maximum 0,5 cm	0	—
Faisceau NE - SW	D	30%	Vertical	5 à 400 cm	5 à 20 cm	Minime	0	—
	D.F	20%	Vertical sauf dans les plis	1 à 150 m	5 à 20 cm	0,1 à 2 cm	1%	Calcite automorphe en gros cristaux blancs.
	F.T	15%	Vertical ou avec 20° d'obliquité sur verticale	0,3 à 15 m	Par groupes à des distances aléatoires	2 à 100 cm	80%	Calcite brune pour les fentes de faibles ouvertures et blanche automorphe pour les autres.
	S	25%	Vertical sauf dans les plis	0,3 à 2 m	20 à 100 cm	Nulle	—	—
	S.F ↓	10%	Vertical sauf dans les plis	0,3 à 2 m	Au voisinage des plis	1 à 5 cm	20%	Calcite automorphe en gros cristaux blancs
Faisceau N 80	D	84%	Vertical	0,5 à 2,5 m	0,5 à 1 m	Minime	0	—
	D.F	5%	Vertical	0,5 à 10 m	Aléatoire à côté de grande fracture	1 à 10 cm	60%	Calcite automorphe en gros cristaux blancs
	F.T	10%	Vertical	0,5 à 3 m	1 à 3 cm fracture dans le groupe Aléatoire entre groupes.	0,1 à 1 cm	100%	Calcite fine brunâtre
	F.T.E	1%	Vertical	1 à 5 cm	Aléatoire	Maximum 1 cm	0	—
Faisceau N 110	D	5%	Vertical	Plusieurs dizaines de mètres	Aléatoire	Minime	0	—
	D.F	90%	Souvent vertical parfois inclinaison NW	Dizaines à une ou deux centaines de mètres.	0,5 à 0,8 m	0,5 à 30 cm	5%	Calcite automorphe en gros cristaux blancs.
Faisceau N 135	F.T	5%	Souvent vertical 80 à 75 NW	Plusieurs dizaines de mètres.	Aléatoire	5 à 150 cm	60%	Calcite automorphe en gros cristaux blancs.
	D	5%	Vertical	Plusieurs dizaines de mètres	Aléatoire	Minime	0	—
	D.F	90%	Vertical	Dizaines à une ou deux centaines de mètres.	0,5 à 0,8 m	0,5 à 15 cm	1%	Calcite automorphe en gros cristaux blancs.
	F.T	5%	Vertical	Plusieurs dizaines de mètres	Aléatoire	2 à 30 cm	20%	—

Tableau VI.1 -Caractéristiques géométriques des plans de discontinuité du site du barrage de Sidi Boubecker.

A ces réseaux, il faut ajouter les joints de stratification qui peuvent être ouvertes, à la suite du mouvement des strates vers le SE.

VI .3. - Etat actuel du problème.

a - Les sources du site.

Ces sources sont localisées - comme le montre la fig.II.1 p dans le déversoir, au pieds du barrage et dans une tranchée drainante creusée sur la rive droite.

L'eau coule soit à partir de joints stratigraphiques ouverts soit à partir de fracture N140.

Cette eau est très claire ; les débits sont relativement importants : jusqu'à 5 litres/seconde.

Ces sources tarissent complètement en période d'étiage lorsque la retenue est vide. Elles reprennent leur fonctionnement normal dès que l'eau commence à s'accumuler derrière le barrage.

b - Les sources du captage aval.

Très nombreuses, ces sources sortent toutes au niveau des joints stratigraphiques dans les calcaires lutetiens. Depuis leur apparition - date de la mise en eau du barrage - elles n'ont jamais tari.

Les eaux des sources du drain et du captage aval sont acheminées ensemble vers la ville de Tunis après passage à travers une station de filtration.

Le tableau IV.3 groupant des données tirées des archives du barrage, montre une chute des quantités envoyées vers Tunis à partir du moment où la retenue est à sec (c'est à dire quand les sédiments accumulés ne sont plus recouverts d'eau).

Cette chute est due au tarissement des sources du drain d'une part et à la diminution du débit des sources du captage d'autre part. Ces données, datant des mois de mai et de juin 1968, prouvent que rien n'a changé depuis la mise en service de l'aménagement.

Date	Côte du lac (en m)	Volume d'eau (en m ³ /j)
21 - 4 - 1968	332.23	5660
22	332.20	5530
23	332.18	4900
24	332.16	4700
25	332.14	4500
26	332.10	3730
27	332.05	3670
28	332.03	3540
29	332.03	2900
30	332.00 sec	2700
1 - 5 - 1968	Sec	2220
2	Sec	2220
3	Sec	2220
4	Sec	2220
31 - 5 - 1968	Sec "	800
5 - 6 - 1968	Sec	1200
6	332.02	3100
7	332.02	3100

Tableau IV.3. Volume d'eau envoyé sur Tunis.
(Avril, Mai et Juin 1968).

VI.4. - Les systèmes aquifères et les circuits hydrauliques.

L'étude géologique, les données de sondages mécaniques ainsi que des mesures piézométriques nous ont permis de schématiser les systèmes aquifères et les principaux circuits hydrauliques dans la zone du barrage. (Fig. IV.4).

a - La nappe alluviale.

Nous adoptons le terme "alluvial" pour indiquer la localisation de la nappe dans les dépôts dus à l'envasement ainsi qu'au niveau d'un lit de sable.

- 1 Depot argileux du reservoir
- 2 Niveau sableux
- 3 Marnes priaboniennes
- 4 Calcaire lutetien.
- 5 Marnes paleocene
- 6 Calcaires campaniens
- 7 Enrochement du barrage

- Ecoulement dans les nappes calcaires eocenes et alluviale
- ↔ Ecoulement dans la nappes calcaires campanien

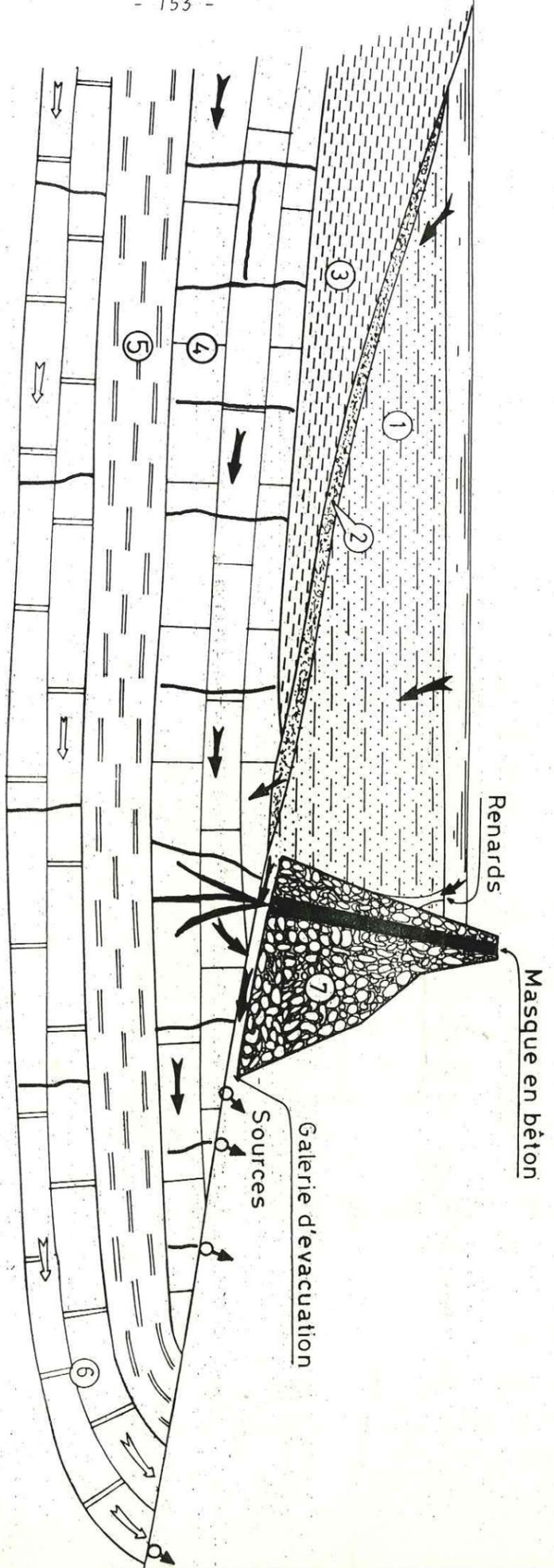


Fig. VI.4 Barrage de Sidi Boubecker sur l'oued El Kebir
Schema des systèmes aquifères
Représentation Hypothétique des circuits hydrauliques

rougeâtre faiblement argileux à gros galets. L'épaisseur de ce dernier diminue d'amont en aval : 4 mètres au niveau du sondage S₃ et 1,7 mètre au niveau de S₂.

Cette nappe est libre. Son niveau piézométrique est constitué par la surface de l'eau occupant les pores "artificiels" du dépôt de la retenue. (Terrier, traces de restes de végétaux, fentes de dessiccation).

L'alimentation de la nappe s'effectue par infiltration à travers la surface du dépôt bioturbé et desséché d'une part et à travers l'enrochement du barrage et les calcaires mouillés d'autre part; ce phénomène est prouvé par les renards situés au pied du barrage, lesquels fonctionnent au moment de la vidange complète (Photo.VI.1).

La liaison entre la nappe alluviale et l'eau de la retenue fût étayée de deux manières différentes :

* Après la réalisation des sondages S₂ et S₃ (équipés immédiatement en piézomètres) et pendant le forage du sondage S₁, les sondeurs ont effectué des mesures journalières du niveau piézométrique en S₂ (Fig.VI.5) et S₃(Fig.VI.6). L'examen de ces deux diagrammes appelle les remarques suivantes :

- la retenue étant à sec jusqu'au 14 - 1 - 1982, l'évènement important à retenir est la réponse quasi instantannée du niveau piézométrique après les fortes pluies du 16 - 1 - 82. En une journée la surface de la nappe s'est élevée de 0,7 m environ et a continué à monter.

- les fluctuations enregistrées au sondage S₃ entre le 30.12.1981 et le 2 - 1 - 1982, seraient - à notre avis - à attribuer à des erreurs de mesures; en effet aucune cause physique ne permet d'expliquer cette réaction.

- la différence de comportement de la surface piézométrique entre S₃ (surface stable) et S₂ (niveau en baisse) pourrait s'expliquer par l'écoulement probable de l'eau de la nappe alluviale vers l'aval et son mélange avec l'eau de la nappe des calcaires lutétiens. Cette hypothèse sera discutée plus loin.

* Un limnigraphe placé pendant un mois et demi environ sur le piézomètre S₂ a montré la relation entre le plan d'eau du réservoir et le niveau piézométrique.

En effet, la comparaison de ces deux surfaces (Fig.VI.7) fournit deux exemples très instructifs :

- le premier : les pluies enregistrées au barrage du 20 au 24 - 3 - 82 (environ 80 mm) ont provoqué une élévation de 15 cm environ de la côte du plan d'eau dans le réservoir.

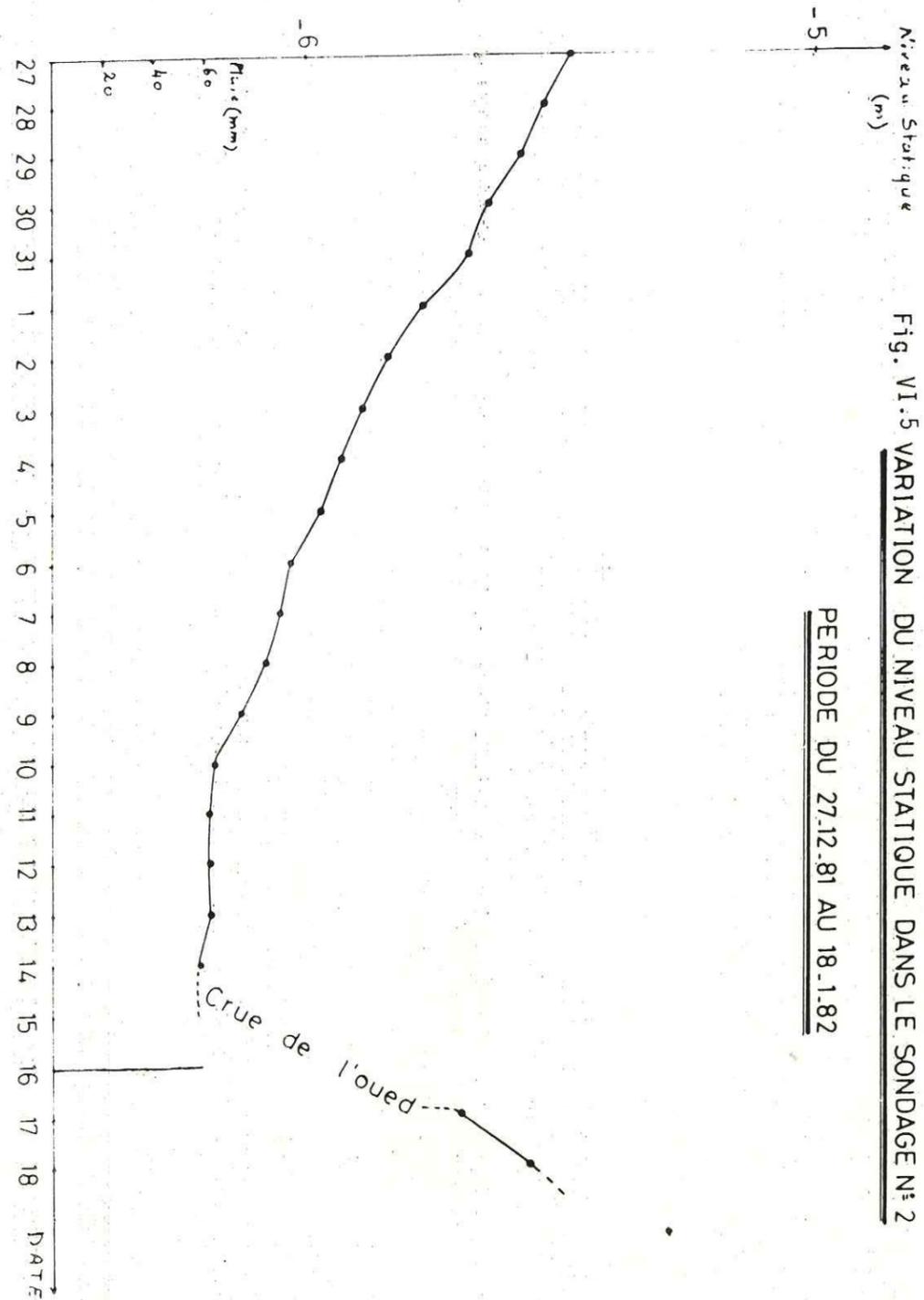


Fig. VI.6. VARIATION DU NIVEAU STATIQUE DANS LE SONDAGE N° 3

Niveau Statique (m)

PÉRIODE DU 27.12.81 AU 18.1.82

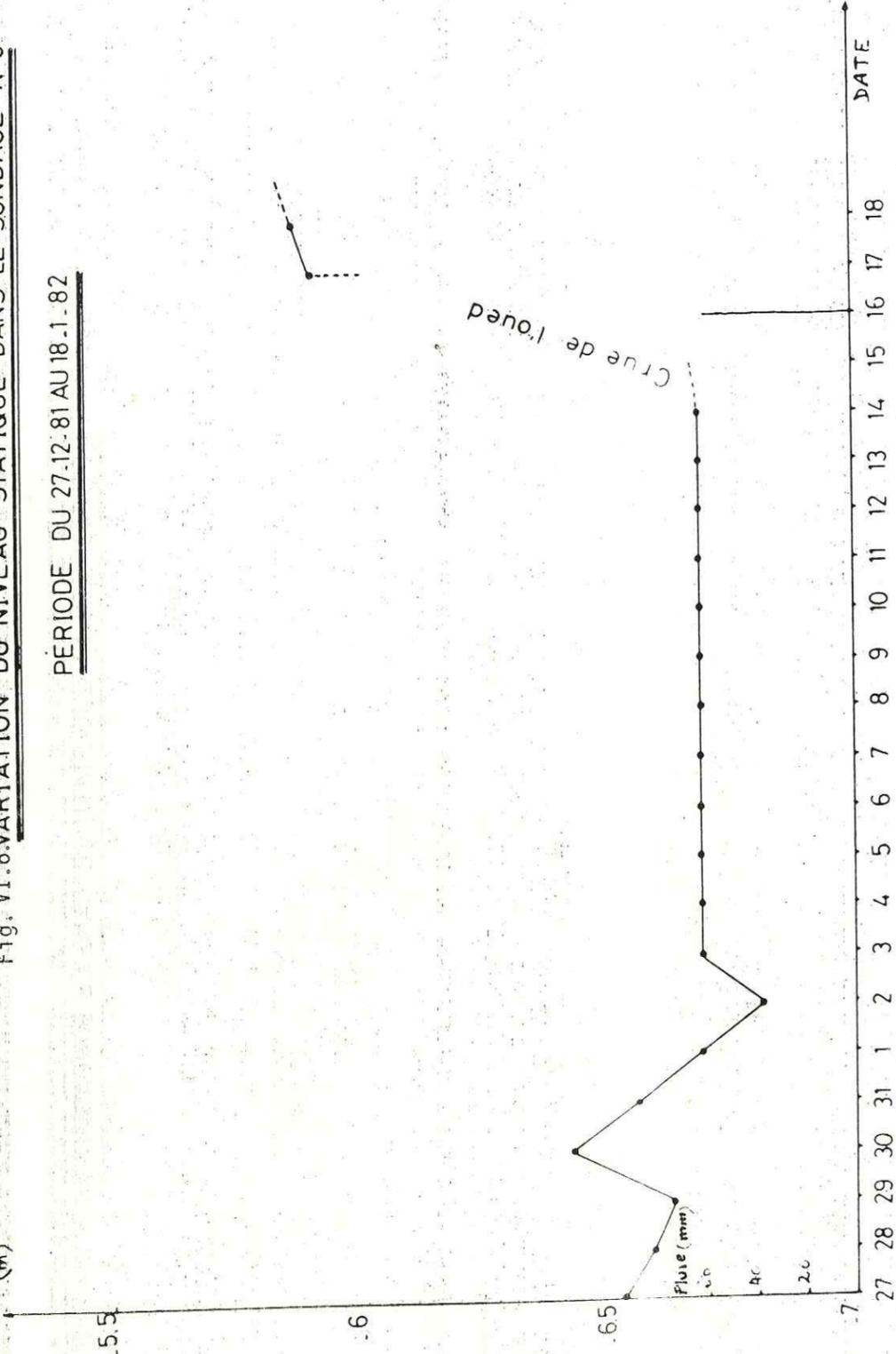
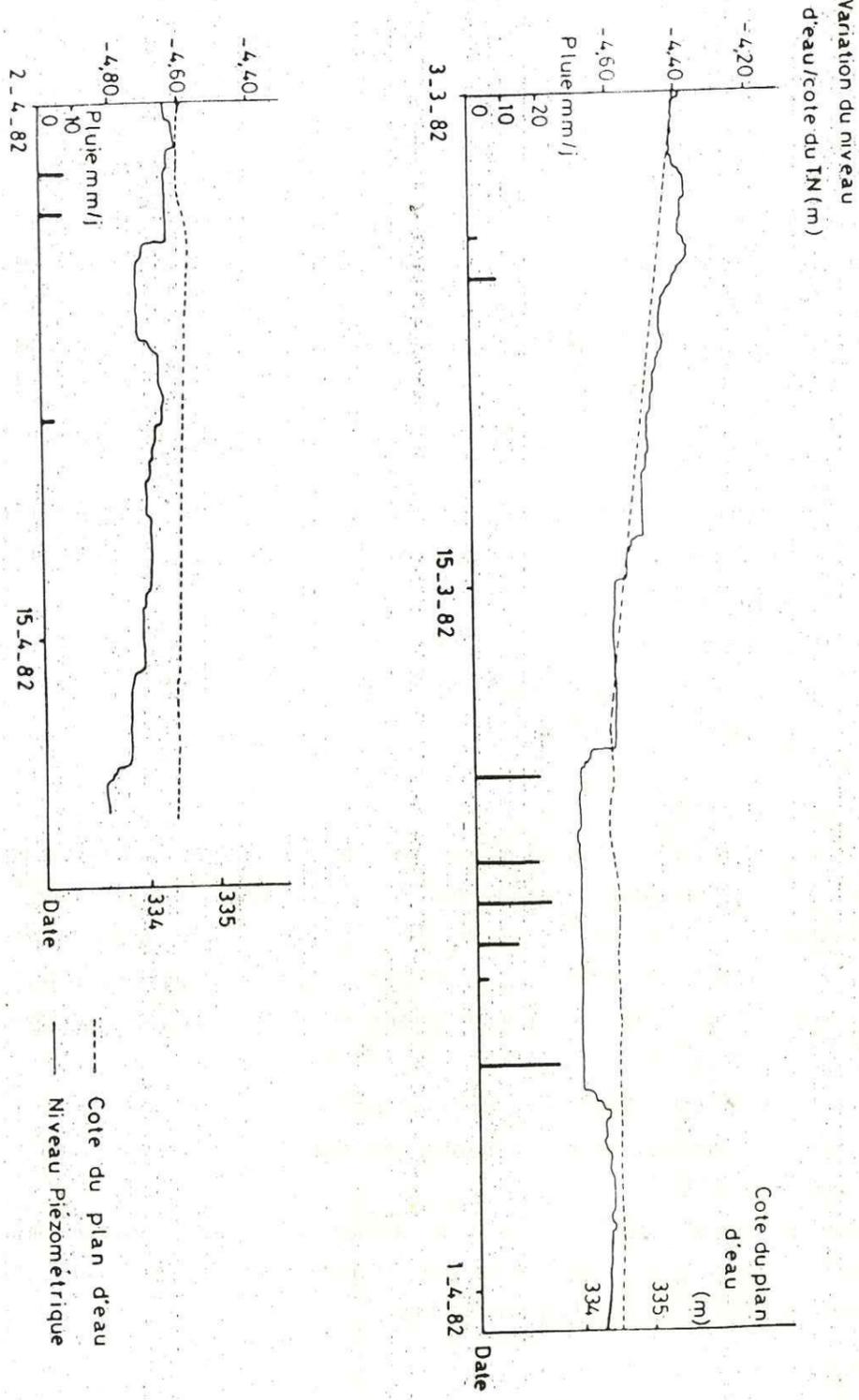


Fig. VI.7. Barrage de Sidi Boubecker sur l'oued El Kebir
Variation du niveau piézométrique de la nappe sous alluviale
Piezomètre S2



Cette élévation produite, 24 heures environ après le début de la pluie, fût suivie d'une variation du niveau piézométrique 5 à 6 jours après. Ainsi ce dernier est - il passé de la cote - 4,60 m à la cote - 4,50 m environ.

- le deuxième : après la remontée du niveau piézométrique, qui ne dure que trois à quatre jours, celui-ci entame une descente rapide et irrégulière. Mais les pluies enregistrées le 3 - 4 - 1982 (8 mm à deux reprises avec 15 h d'intervalle) entraînent de nouveau une remontée de la surface de la nappe au bout de trois jours. Ensuite, et en l'absence de pluies importantes les deux niveaux sont en baisse simultanée.

Les pompages de courte durée (1 h 30 maximum) effectués lors du développement du piézomètre S₂ (Fig. VI.8) et du piézomètre S₃ (Fig. VI.9) ne permettent aucune interprétation valable.

Cependant il est possible de penser à l'existence d'une relation entre la présence de l'eau dans la retenue et la profondeur à laquelle se situe le niveau piézométrique de cette nappe.

b - La nappe des calcaires lutétiens

C'est une nappe captive utilisée par les habitants du bassin versant pour leurs besoins en eau potable. Elle est localisée dans les calcaires fissurés du Lutetien inférieur compris entre deux niveaux imperméables : les marnes priaboniennes au toit et les argiles paléocènes au mur. Son alimentation est assurée par infiltration d'eau de ruissellement sur l'aire d'affleurement des calcaires (environ 15 km²).

Son exploitation se fait à partir de puits creusés sur les flancs du synclinal. L'exutoire naturel principal de cette nappe est situé à la fermeture perisynclinal aux environs du captage aval.

Dans cette zone et du fait de la flexure N 140 qui provoque le redressement de l'axe synclinal de nombreuses sources se sont formées à la rencontre de la surface de la nappe avec la surface topographique.

c - La nappe des calcaires campaniens.

Cette nappe captive, située dans les calcaires campaniens (compris entre deux séries marneuses : paléocène au toit et santonienne—maestrichtienne au mur) fût étudiée par SCHOELLER en 1936. Cette auteur a fourni une description analogue à celle que nous venons de faire pour la nappe des calcaires éocènes.

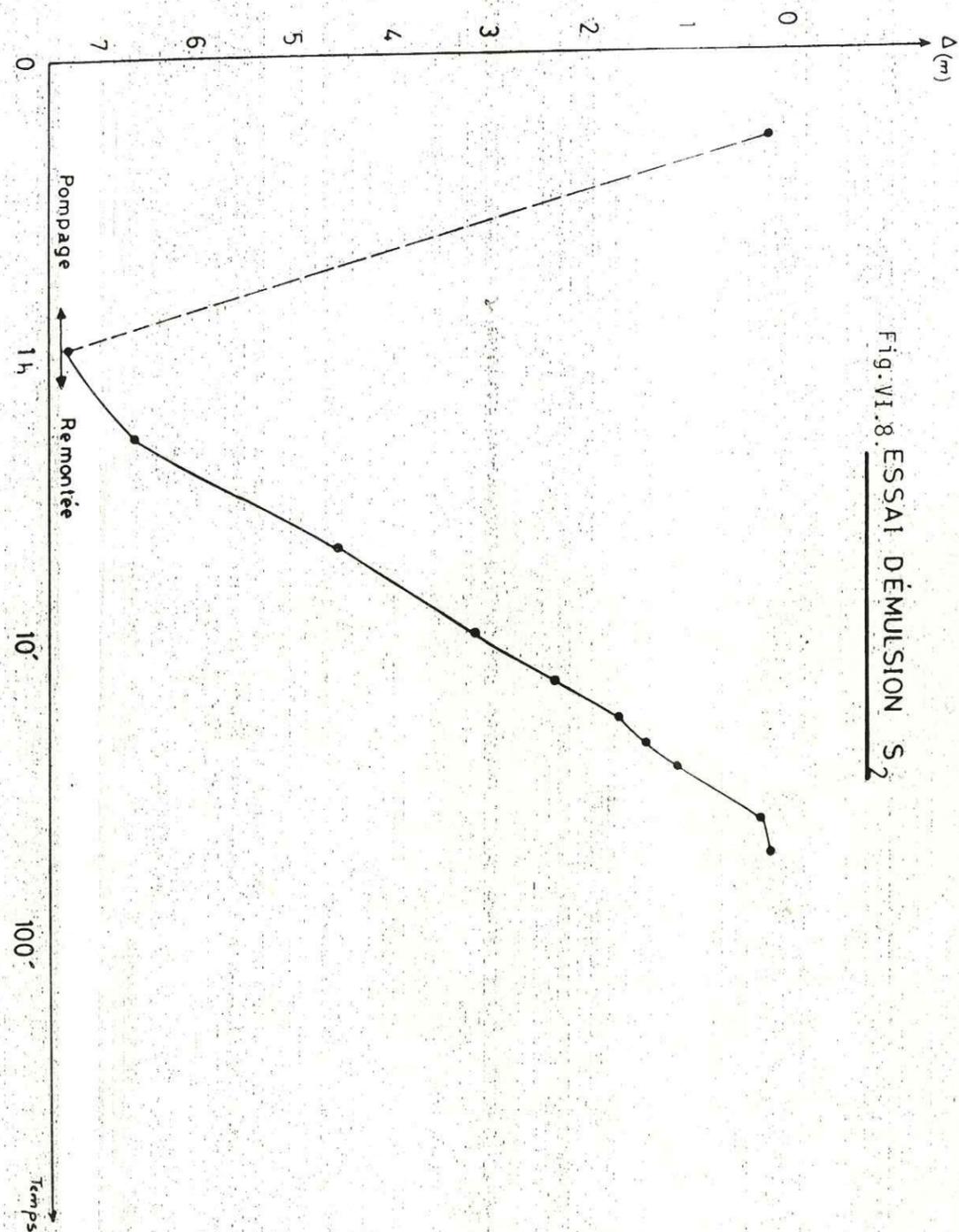


Fig. VI.8. ESSAI DÉMULSION S₂

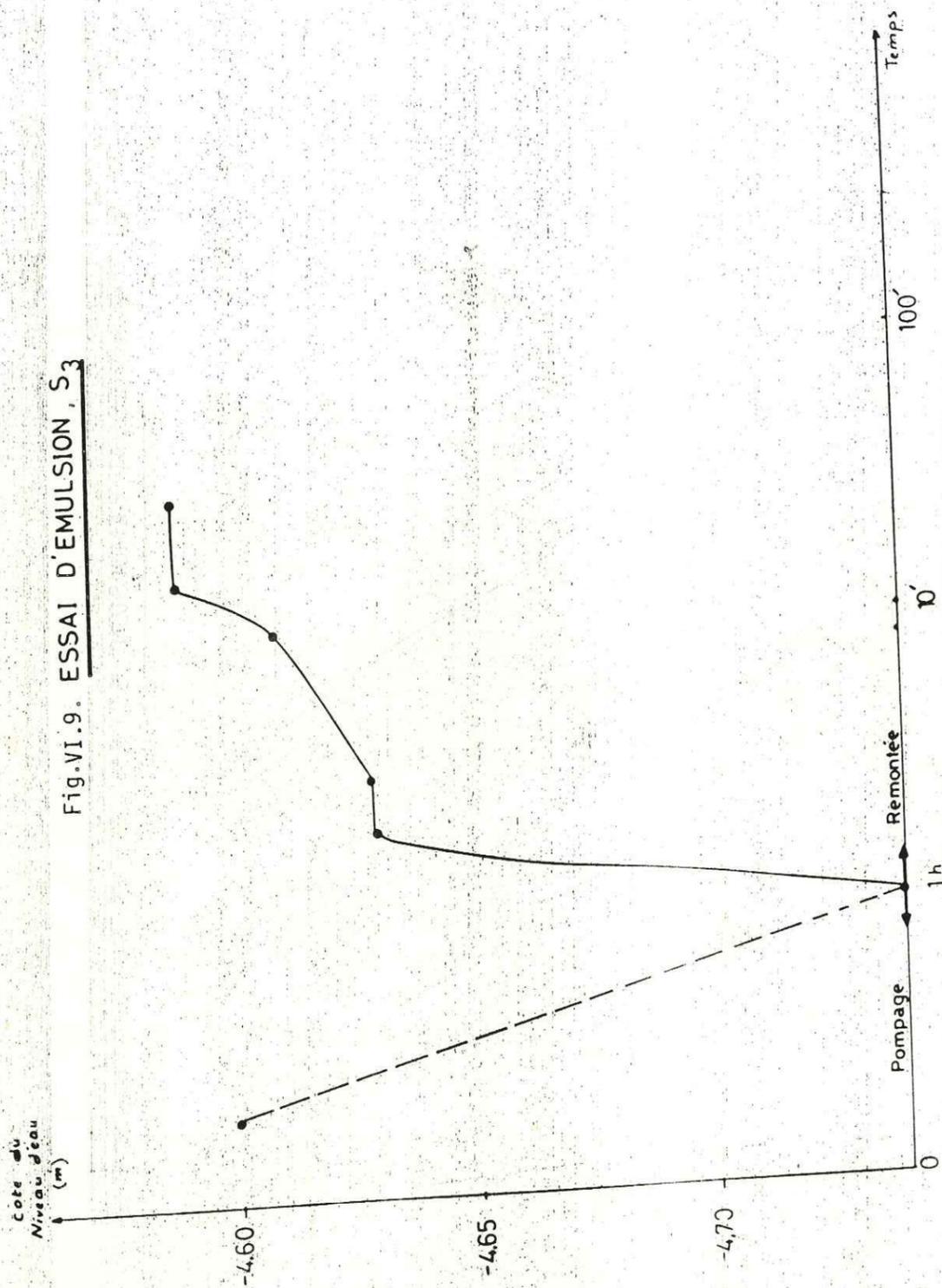


Fig. VI.9. ESSAI D'EMULSION, S3

En effet, les réseaux captifs des calcaires campaniens émergent à l'affleurement des calcaires (dénudés de leur couverture le long de l'oued). Des études géochimiques ont permis à SCHOELLER de prouver le rattachement des émergences de la zone de Kef Lazreg (affleurement des calcaires campaniens - fig. VI.1) à la nappe qu'il a étudiée.

d - Particularités hydrauliques du site du barrage.

L'analyse des données hydrauliques (comportement du niveau piézométrique de la nappe alluviale, comportement des sources du drain droit), nous a poussé à supposer l'existence des deux particularités suivantes :

* Mélange des eaux des nappes : alluviale et calcaires lutétiens

Les calcaires éocènes, étant dénudés de leur couverture de marnes priaboniennes dans la partie aval de la retenue (constatation confirmée par le sondage S₁) des possibilités de communication entre les deux nappes peuvent exister.

Le masque central en béton, joue le rôle de barrière hydraulique derrière laquelle s'accumule l'eau de la nappe alluviale qui peut s'infiltrer et rejoindre la surface piézométrique de la nappe des calcaires éocènes, laquelle a perdu son caractère captif, devenant presque libre au voisinage du barrage. Les eaux des deux nappes mélangées s'écoulent vers les sources du captage aval.

* Alimentation des sources du drain et du déversoir.

Nous pensons que l'eau de la retenue, absorbée par les calcaires éocènes qui affleurent sur une distance de 1600 mètres environ sur la rive gauche (Photo IV.4) et sur une partie de la rive droite, peut circuler dans les fractures et les ouvertures des joints de stratification. Une partie de l'eau infiltrée arrive à rejoindre les deux premières nappes précédemment décrites.

Le reste de l'eau (circulant essentiellement dans des joints ouverts) est isolée des systèmes aquifères voisins et sous-jacents grâce à des intercalations marneuses (épaisseur 0,5 à 1,2 m) dans la partie supérieure des calcaires éocènes. Cette eau arrive à contourner le barrage de deux façons différentes :

- en circulant sous le déversoir, vers l'Est, elles émergent au contact de strates avec la surface topographique derrière le barrage en rive gauche.

- l'eau infiltrée en rive droite, s'écoule dans les joints des bancs et contourne par conséquent le barrage. A la rencontre de fractures ouvertes (N 140 par exemple) cette eau peut être ramenée vers le lit de l'oued.

Ces deux cheminements pourraient expliquer l'existence de sources de joints en rive gauche et des sources de joints et de fractures dans le drain droit. Des données physicochimiques et géochimiques confirment les hypothèses précédemment formulées.

- Propriétés physicochimiques.

Les mesures de température, conductivité, salinité et de pH prouvent l'existence de la différence entre les eaux des sources du drain et celles du captage aval (Fig. IV. 11). Elles indiquent en plus une certaine ressemblance entre les eaux de la retenue et celles des sources du drain et du deversoir.

- Les analyses géochimiques.

La figure IV. 12 regroupe les résultats des analyses géochimiques effectuées sur des eaux prélevées dans :

- la nappe des calcaires éocènes à Sidi Naoui (à 2 km au NW du barrage).
- la nappe alluviale dans les sondages S₂ et S₃
- la retenue
- les sources du captage aval
- sources du drain droit : une source de joint de stratification et une source de fracture N 140

Les quantités de cations et d'anions solubles dans ces eaux permettent de les classer en quatre groupes :

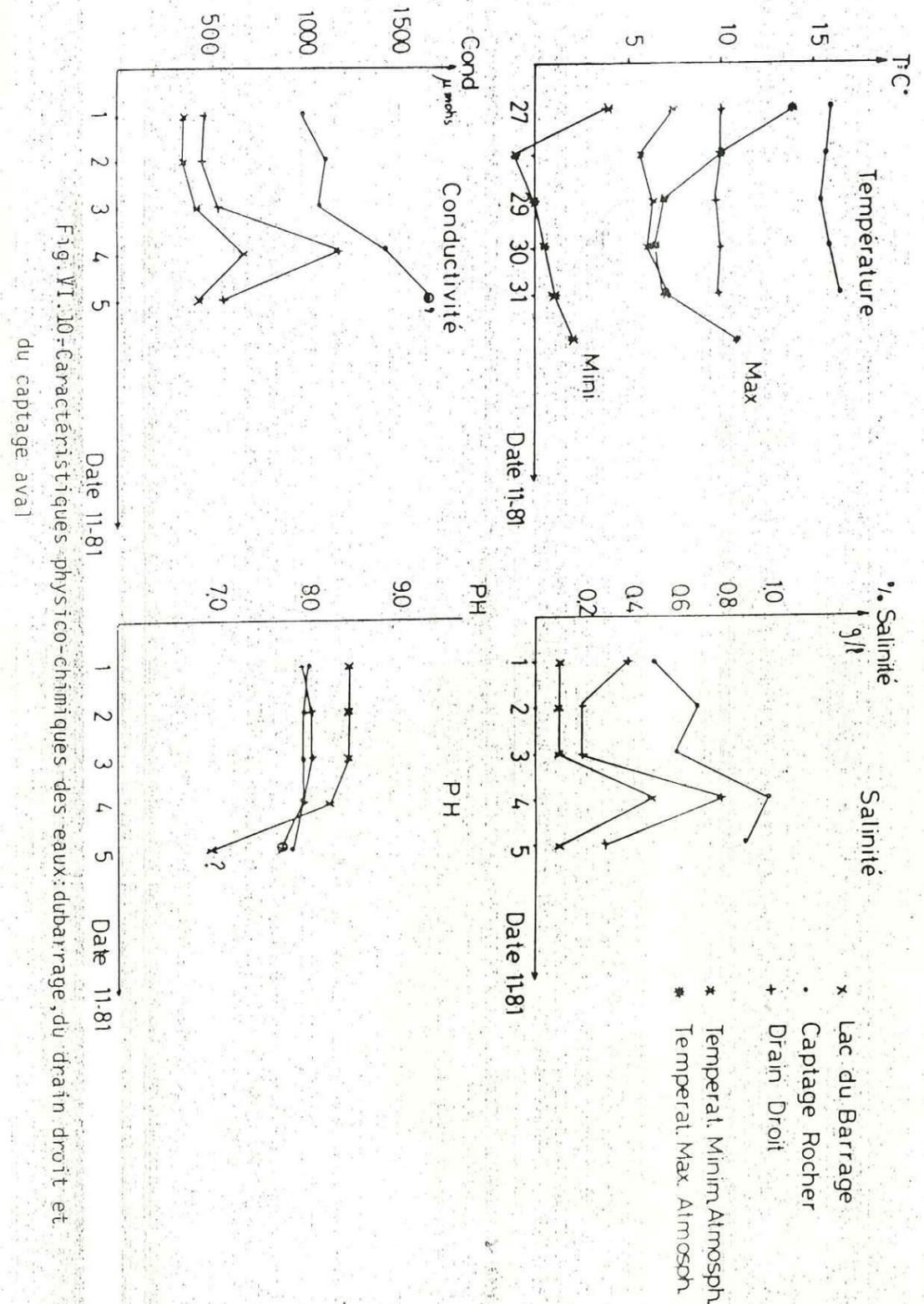
- . groupe 1 : eaux de la retenue et des sources des drains
- . groupe 2 : eaux des sondages S₂ et S₃
- . groupe 3 : eaux de la nappe des calcaires éocènes
- . groupe 4 : eaux du captage aval.

La composition chimique de l'eau du captage aval étant intermédiaire entre celle de la nappe alluviale (plus forte) et celle de la nappe des calcaires éocènes, elle pourrait constituer une preuve du mélange précédemment proposé. L'origine de l'eau des sources du drain droit se trouve confirmée par la ressemblance de sa composition chimique avec celle de l'eau de la retenue.

VI.5. - Conclusion.

Cette étude fournit - en plus de l'explication des fuites et de la description des systèmes aquifères - les deux constatations importantes suivantes :

- les fuites en pied du barrage auraient pu être évitées par le choix d'un emplacement plus judicieux du site ou par un traitement approprié du rocher de fondation.



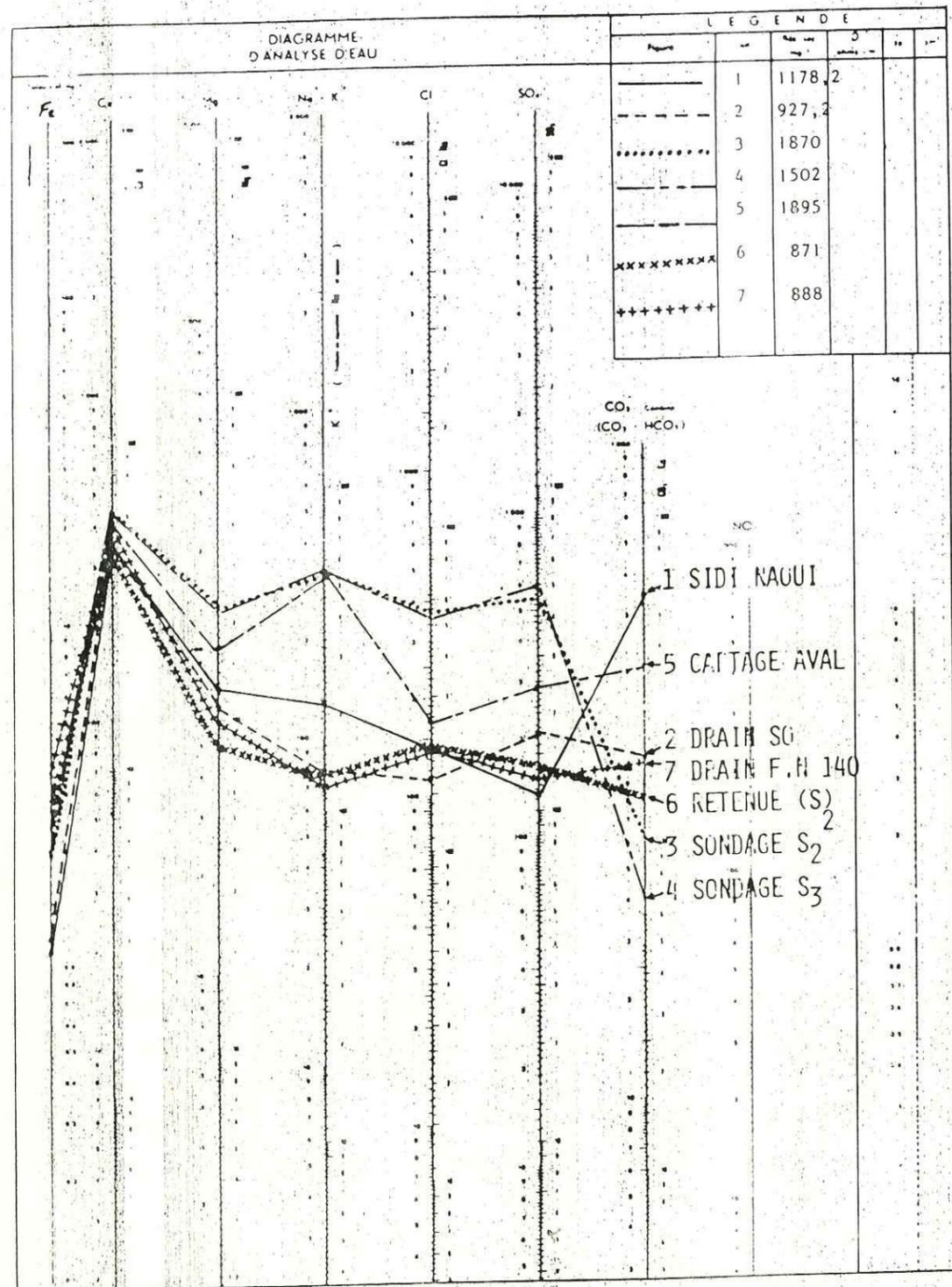
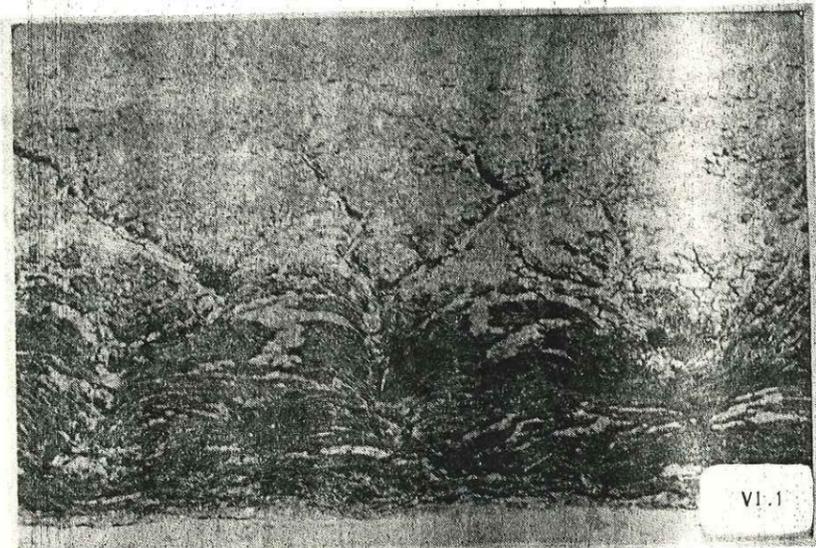


Fig.VI.11-Analyses chimiques(Diagramme de SCHOELER)

A son emplacement actuel, le barrage présente des conditions d'étanchéité médiocres dues à des facteurs morphologiques (décalage entre axe du synclinal et axe des gorges) et structuraux (fracturation intense au voisinage de la flexure, pendage aval et biseautage par érosion des marnes priaboniennes).

- le site retenu pour la réalisation du barrage ne permet en aucun cas d'éviter les émergences des sources du captage aval.

Le barrage a eu l'avantage de mettre en évidence ces sources (présentes avant sa construction) en arrêtant l'eau de l'oued et en alimentant leur nappe "mère" ce qui a rendu leur écoulement pérenne.



Surface du dépôt au pieds du barrage: tapis algaires matérialisant les écoulements à travers les "renards"

SEPTIEME CHAPITRE

LES FACTEURS D'ENVASEMENT

RUISSELLEMENT, EROSION ET TRANSPORT SOLIDE

Introduction.

Dès les premières années de fonctionnement du barrage de Sidi Boubecker, un deuxième problème - outre celui des fuites - est venu entraver la rentabilité de l'aménagement : celui de l'envasement. En effet, les quantités de sédiments piégées par le barrage pendant chaque crue conduisent à la réduction progressive et rapide de la capacité de la retenue. Ceci entraîne nécessairement la baisse de la rentabilité du projet et par conséquent de nombreux problèmes socioéconomiques.

Dès les premiers mois qui ont suivi le début de ce travail de recherche (orienté initialement principalement vers l'étude de l'envasement) nous étions frappés par le manque de données brutes et d'études de synthèses de ce phénomène. Ceci est d'autant plus étonnant que la Tunisie compte environ une dizaine de barrages de plus de 50 m de haut - principaux piliers de l'agriculture et de l'alimentation en eau potable dans la moitié nord du pays.

Si le problème de l'envasement intéresse la direction des études des grands travaux hydrauliques (responsable de l'exploitation des barrages), celui du transport solide (dont l'étude est le principal moyen de prévision du remplissage des retenues) ne paraît pas figurer parmi les préoccupations principales de la direction des ressources en eau et en sols-unique responsable officiel de collecte des données dans ce domaine. En effet, les seules études ou récoltes de données intéressantes sont les suivantes :

- . campagnes de mesures des débits solides de 1952 à 1956 par J. TIXERONT à la station de Sidi Aouidet;

- . campagnes de mesures des débits solides en 1970 par EL SCHOLTZ et al. sur les oueds El Kebir et Jrabiaa.

- . mesures d'envasement et de transport solides pour six barrages en 1976 par J. CLAUDE.

Ces études resteront sans suites sérieuses jusqu'à maintenant.

Nous regrettons surtout que l'Université qui ne peut assurer elle-même les campagnes de mesure, ne puisse être davantage associé aux travaux de certains services techniques auxquels elle pourrait apporter en échange son potentiel de recherche et de réflexion.

Nous tenons par contre à remercier vivement M. ABID, ingénieur principal à la D.E.G.T.H., dont les travaux concernant les transports solides de l'oued Mellègue et surtout le dévasement du barrage de Nebbeur sont très instructifs.

L'étude de l'envasement passe par l'analyse de ses facteurs principaux : le ruissellement, l'érosion et le transport solide. Le but des études consultées nous a paru essentiellement de tester des méthodes diverses afin de cerner le mieux possible le phénomène réel. Nous proposons dans ce qui suit une modeste contribution à un tel effort.

VII.1. - Etude du ruissellement.

VII.1.1. - Les facteurs influant sur le ruissellement.

Ils sont divisés en deux groupes :

- les facteurs climatiques : la quantité de pluie et son intensité, la température.

- les facteurs relatifs aux caractéristiques du sol : état physique du sol, sa capacité de rétention ainsi que son état de saturation pendant l'épisode pluvial;

L'influence de ces facteurs a été longuement exposée par J. TIXERONT dans deux notes concernant le ruissellement et l'érosion dans le bassin versant de l'oued El Kebir :

VII.1.2. - Le calcul du ruissellement.

* Les formules de calcul.

- Formule de MEDINGER. (J. TIXERONT 1951)

$R = 0,75 (H - 400)$. R : Ruissellement en mm/an
. H : Hauteur de pluie en mm/an

- Formule de COUTAGNE. (J. TIXERONT 1951)

$R = 1,024 (H - 0,26)^2$. R : Ruissellement en mm/an
. H : Hauteur de pluie en mm/an

- Formule algérienne. (J. TIXERONT 1951)

L'auteur de cette formule (appliquée pour l'Algérie) est inconnu.

$R = P^3 / 3 \cdot e^2$. R : Ruissellement annuel moyen
. P : Hauteur de pluie annuelle moyenne
. e : Hauteur représentant l'évaporation annuelle vers laquelle on tend quand la pluie augmente de façon à satisfaire toute la capacité d'évaporation du sol et des plantes.

e = est analogue à l'évaporation potentielle de THORNTHWAITE.

D'après PRECIOZI (1954), l'évapotranspiration potentielle varie de 0,80 à 1,20 m pour l'ensemble de la Tunisie. Si on admet une valeur moyenne de 1 m la formule devient : $R = P^3 / 3$. R et P sont en mètre

D'après TIXERONT, cette formule n'est valable que pour des régions où les pluies sont inférieures à 600 mm par an. Elle est surtout applicable dans des bassins assez étendus.

Dans ces régions il semble préférable d'utiliser le chiffre 4 au lieu de 3 au dénominateur.

Ainsi la forme définitive de la formule est :

$R = P^3 / 4$. R et P sont en mètres.

- Formule de l'oued El Kebir

L'essai de corrélation entre les valeurs de précipitation annuelle d'une part et les valeurs de ruissellement annuel de l'oued El Kebir à la station de Sidi Aoudat appelle les constatations suivantes :

le nuage de points peut être divisé en deux populations : chaque population est représentée par une courbe d'ajustement linéaire (Fig.VII.1): la première étant : $R = 0,66 P - 225,6$; la seconde est $R = 0,2 P - 57,69$.

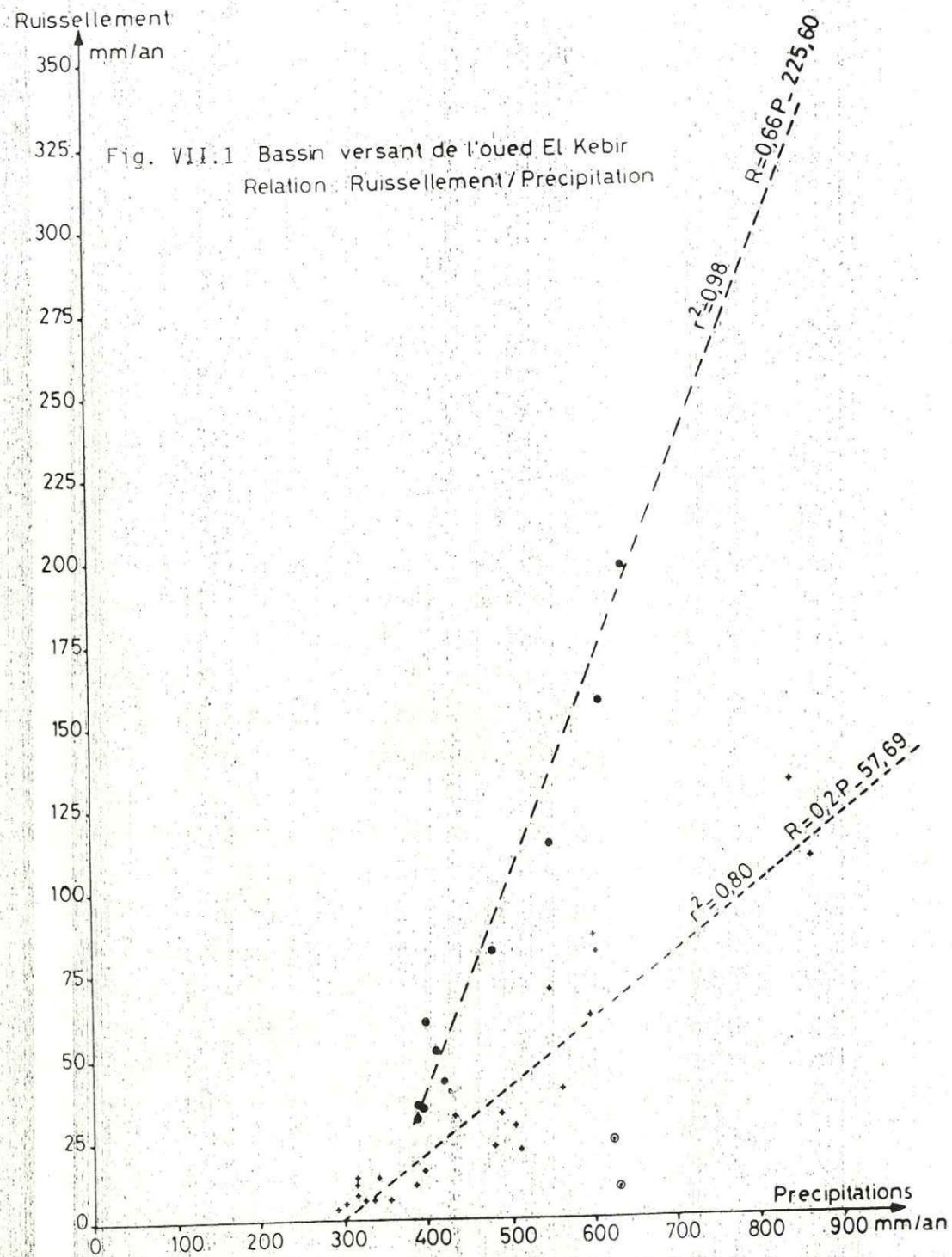
cette dualité dans le nuage provient des valeurs de précipitations identiques qui provoquent des ruissellements très différents. Une valeur annuelle de précipitations de 600 mm/an peut correspondre à un ruissellement annuel de 75,150 ou 200 mm.

Ces écarts sont dus - à notre avis - à la répartition des pluies le long de l'année.

En effet si le bassin reçoit une quantité de pluie annuelle de 600 mm en 60 reprises de 10 mm chacune, le ruissellement annuel sera faible parce qu'il faudra à chaque fois satisfaire l'évapotranspiration et la reconstitution du stock d'humidité dans le sol.

Mais, si la même quantité de pluie tombe en 10 fois de 60 mm chacune, le ruissellement annuel sera important vu que l'excédent d'eau disponible pour le ruissellement est considérable.

les plus fortes valeurs de ruissellement annuel (de 150 à 390 mm/an) sont enregistrés pour des précipitations annuelles supérieures à 600 mm/an. Ces deux dernières considérations nous ont amené à adopter la méthode suivante pour le calcul du ruissellement dans notre bassin versant :



lorsque la valeur de P (précipitation annuelle) est inférieure à 600 mm/an, la relation $R = 0,2 P - 57,69$ est utilisée.

si P est supérieure à 600 mm/an, nous employons la relation :
 $R = 0,66 P - 225,6$.

* Volume d'eau et qualité du ruissellement.

En appliquant les formules précédemment citées, le ruissellement annuel (calculé à partir de la moyenne de 40 valeurs de précipitations annuelles : 475 mm) moyen du bassin versant de l'oued El Kebir est :

Formule	Medinger	Coutagne	Algérienne	Oued El Kebir
Ruissellement (mm)	56,3	46,2	107,2	37,30

Rappelons que la moyenne des ruissellements annuels calculé par la D.R.E.S. à la station de Sidi Aouidat (1933 — 1973) est de 55 mm.

Si l'on calcule ce ruissellement à partir de la moyenne des précipitations annuelles de 1933 à 1973 (en exceptant 1969, année de grandes inondations) on trouve la valeur de 35,35 mm, ceci montre que pour la période d'observation choisie (40 ans) l'effet des phénomènes exceptionnels s'estompe.

Il résulte que les apports d'eaux pouvant être espérés annuellement au barrage sont comme suit :

Nature de l'apport	Medinger	Coutagne	Algérienne	Oued El Kebir	
				DRES	Calculé
Volume d'eau $10^6 m^3$	15,25	12,5	28,35	14,9	9,8

Nous avons traité dans la première partie l'aspect qualitatif du ruissellement dans le bassin versant en décrivant les débits de l'oued.

Le point le plus important à rappeler concernant le ruissellement est son caractère irrégulier et violent, ce qui lui confère une agressivité très forte.

VII.2-Etude de l'érosion.

VII.2.1.Introduction.

Aborder le problème de l'érosion constitue l'une des tâches les plus difficiles que l'on puisse confier aux responsables des phases d'études ou d'exploitation d'un aménagement hydraulique comportant un barrage réservoir. La difficulté provient de deux causes essentielles :

Le nombre de facteurs physiques, chimiques et mécaniques qui influent sur l'érosion est très grand.

La réponse des différents types de roches à l'action des facteurs mentionnés ci-dessus est très variable selon la nature de la roche et le type de facteur. Dans certains cas, cette réponse est instantanée et de courte durée. Dans d'autres, elle est très étalée dans le temps et nécessite une longue durée d'observation.

Ceci fait de l'érosion, un domaine bien difficile à étudier par les seuls moyens des laboratoires universitaires et qui ne l'est guère plus semble-t-il par les exploitants d'ouvrage.

Les difficultés - citées ci-dessus - n'empêchent cependant pas les responsables - confrontés à des nécessités de service - d'avancer des constatations qualitatives et des estimations quantitatives précisant bien entendu - dans la plupart des cas - leur degré d'imprécision et les nombreuses suppositions sur lesquelles elles ont été basées.

Cette nécessité provient du fait que le taux annuel de sédiments arrachés au bassin versant et transportés jusqu'au futur réservoir est un élément capital pour la détermination de la perte annuelle de capacité par envasement. Cette dernière donnée est la base du calcul de durée de vie liée donnée essentielle au calcul de la rentabilité du projet.

Dans la présente étude nous nous bornerons à apporter quelques observations qualitatives. Pour l'aspect quantitatif - dépassant nos moyens d'étude - nous nous baserons exclusivement sur des données bibliographiques.

VII.2.2.Aspect qualitatif.

a - Répartition des faciès dans le bassin versant.

A partir des cartes géologiques Jebel Mansour 1/50 000 (A.JAUZEIN 1960) et Maktar 1/200 000 (P.GUIRAND 1968 inédite) ainsi que la couverture aérienne nous avons établi la carte lithostratigraphique du bassin versant (Fig.VII.2. Dans ce document les formations géologiques ont été groupées en trois types de faciès : les calcaires et les calcaires marneux, les argiles et marnes, les alluvions. Cette distinction en trois faciès différents est dictée par le fait que chaque type de faciès est susceptible d'engendrer des réactions distinctes aux différents agents d'érosion. Ceci sera illustré ultérieurement dans ce chapitre.

La répartition aréale des différents faciès est la suivante :

Calcaires et calcaires marneux :

- Eocène supérieur	15 km ²
- Crétacé supérieur et moyen	40 km ²
- Crétacé inférieur	11 km ²
Total :	66 km ²

Argiles et marnes.

- Eocène supérieur	108 km ²
- Eocène inférieur	27 km ²
- Crétacé supérieur et Moyen	40 km ²
Total :	175 km ²

Terrasses et Alluvions quaternaire.

Total : 30 km²

Ceci fait un total de 205 km² pour les roches tendres (argiles, marnes, alluvions) et 66 km² pour les roches dures (calcaires et calcaires marneux).

b - Les facteurs de l'érosion :

1- Action de l'eau : l'étude de la pluviométrie et du ruissellement nous a déjà permis de dégager le caractère très discontinu et variable de l'action de l'eau dans le bassin versant.

Cette action est susceptible de provoquer l'érosion selon deux mécanismes :

- L'énergie potentielle des gouttes et lames d'eau au cours du ruissellement est capable d'arracher et d'entraîner les particules de roches sur les roches ou sol défrichés ou en cours d'altération.

- Les cycles d'imbibition et de séchage conduisent à la desquamation et à l'effritement de la roche, ce qui prépare avant chaque cycle de ruissellement une quantité de matériaux, au transport vers la retenue du barrage.

2 - Les écarts et variations de température : il semble que les effets de ce phénomène soient assez limités actuellement quoiqu'il soit possible que certains cycles de gel et de dégel contribuent à l'éclatement des roches pendant les périodes les plus froides de l'hiver.

L'action de ce phénomène a atteint son maximum pendant le quaternaire récent et notamment au cours des dernières périodes de glaciation (JAUZEIN A. 1967). Cependant les températures, par leurs valeurs importantes durant les mois de l'été contribuent favorablement à préparer des quantités importantes de matériau transportable pour les grandes pluies de l'automne.

3 - Les facteurs topographiques : il est évident que l'écoulement de l'eau - principal agent d'érosion dans le bassin - sur des pentes de plus en plus forte ne peut qu'accroître son énergie cinétique pour un point donné, par définition l'énergie potentiel est invariable, et par conséquent augmenter son agressivité vis à vis des terrains sur lesquels elle ruisselle.

J. TIXERONT (1955) estime qu'un m³ d'eau se déplaçant de l'altitude moyenne de 600 mètres à l'altitude du barrage dissipe environ 270 m de chute dans les thalwegs, les ravinements et le lit de l'oued.

4 - Facteurs liés à l'action humaine :

α. Influence du couvert végétal : l'examen de la carte de végétation (Fig.VII.3) permet de dégager les constatations suivantes :

- La forêt constituée essentiellement de pins avec un sous bois de romarin est localisé surtout au niveau de sols rendziniformes à croûte tendre (J.TIXERONT 1955).

Ces forêts couvrent une superficie de 40 Km² environ. Le reste des terrains calcaires - soit environ 26 Km² - est irrégulièrement couvert par les broussailles.

- Les marnes de l'éocène inférieur et du Crétacé supérieur et moyen sont généralement découvertes. Elles sont parfois envahies par des arbustes-pins oliviers sauvages - très éparpillés.

- Les marnes de l'Eocène supérieur et les alluvions couvrant une superficie de 138 Km² sont presque totalement dépourvues de couvert végétal permanent. Elles sont soumises à des cultures biennales : blé, jachère et parfois triennales : blé, jachère, légumineuses. De ce fait le couvert végétal sur ces terrains est soumis à des variations saisonnières importantes. Ces observations concernant le couvert végétal influenceront - comme nous l'exposerons ultérieurement - sur le comportement de différents types de roche du bassin versant.

β - Exploitation et protection du sol.

Le mode d'exploitation du sol et des forêts par l'homme influe énormément sur l'érosion. En effet le phénomène peut être aggravé de deux manières :

- en utilisant des méthodes inadaptées lors du labour de la terre, ce qui augmente le degré d'érodabilité des champs. Ainsi les agriculteurs devraient-ils cesser de pratiquer des labours très profonds et surtout de ne pas chercher à faciliter la tâche des engins agricoles en pratiquant le labour dans le sens des pentes. Il est impératif que la terre soit travaillée selon les courbes de niveau pour ne pas favoriser la formation de rigoles qui se transforment progressivement d'une crue à une autre en ravins puis en thalwegs. (Photo.VII.1).

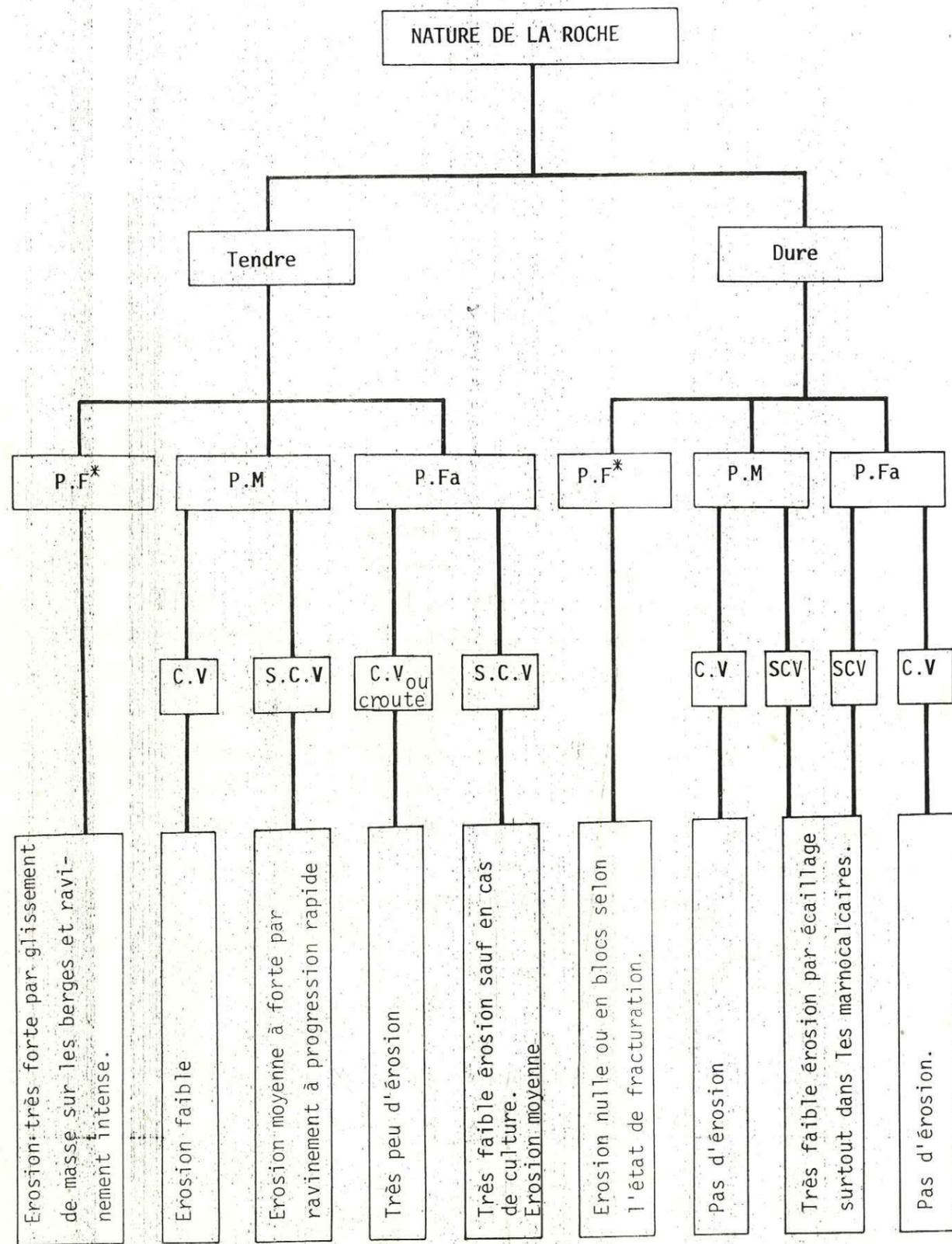
- la destruction de la forêt par les troupeaux d'ovins qui la parcourt journalièrement sous la surveillance, souvent, de jeunes adolescents qui ne réalisent pas l'importance de la protection de ce moyen de lutte contre l'érosion -

VII.2.3. Essai de caractérisation des foyers d'érosion.

a - Comportement des différentes formations vis à vis de l'érosion.

1. - Influence des facteurs d'érosion.

La combinaison des différents facteurs de l'érosion nous a permis de dresser un schéma de détermination du comportement espéré de chaque type de roche du bassin versant. (Fig.VII.4).



(P: pente, F: forte, M: moyenne, Fa: faible, S: sans, C: couvert, V: végétal.)

Fig.VII.4-Schéma de comportement des formations du bassin versant.

* Le couvert végétal ne peut pas se développer sur les pentes fortes.

- C.V. : avec couvert végétal, S.C.V : sans couvert végétal

- pente faible : 0 à 5 °, pente moyenne : 5 à 15°, pente forte : > 15°

Nous voyons donc que ce sont les roches tendres à pente forte ou moyenne qui fournissent le maximum de matériaux transportables par le ruissellement diffus ou dans les oueds.

Il serait très intéressant de quantifier les termes érosion forte, moyenne ou faible, c'est à dire de fournir un chiffre exprimant la contribution en matière minérale par unité de surface pour chacun des secteurs du bassin versant que ce classement définit. Ceci n'est possible qu'avec l'aide des services responsables constituée par l'installation de parcelles et bassins expérimentaux et de nombreux postes d'observation permanents. Ces valeurs déterminées pour chaque bassin permettraient des comparaisons valables entre bassins différents et constitueraient un moyen plus objectif pour l'estimation du taux d'érosion.

En nous basant sur des observations de terrains et des descriptions des mécanismes de l'érosion par certains auteurs - notamment J.TIXERONT - il nous a été possible d'estimer la contribution de chaque type des trois termes : érosion forte, moyenne et faible, dans l'érosion totale.

Ces chiffres ne sont qu'un moyen actuel de travail en l'absence de données expérimentales plus rigoureuses.

Type d'érosion	érosion forte	érosion moyenne	érosion faible.
Contribution % de l'érosion totale du bassin	75%	20%	5%

2 - Influence de la nature lithologique

Le mode et l'importance de l'érosion dépendent entre autres de la dureté de la roche. Cette dureté est étroitement liée à la nature lithologique. En effet des comportements différents sont observés pour les marnes, calcaires ou marno-calcaires.

* - Erosion dans les marnes et les terrasses

Elle est de deux types :

. Sur les pentes faibles, l'érosion est en nappe modérée à moyenne. L'accentuation de la pente peut entraîner la formation de ravins accidentels.

. Sur les pentes fortes, l'érosion est en nappe forte avec ravinements profonds en rigoles et ravins.

Le mécanisme essentiel d'érosion de ces roches est basé sur l'alternance de périodes d'humidification et de périodes de séchage. Cette alternance conduit à la désquamation des feuillets argileux qui gonflent durant les périodes humides et ne peuvent plus reprendre leur état initial après séchage. Il en résulte une altération de la roche qui s'effrite en particules disponibles au transport par les eaux de ruissellement.

* - Erosion dans les calcaires et les marnocalcaires

Ces roches sont exposées à une dégradation mécanique ainsi qu'à une dissolution en surface et le long des joints.

La dégradation mécanique, guidée par des phénomènes d'alternance thermique et hygrométrique, conduit à l'arrachement de particules calcaires ou marno-calcaires à partir des bancs ou du remplissage des fractures.

La dissolution, plus marquée sur les roches calcaires, fournit l'essentiel des sels des eaux de ruissellement.

b - Détermination visuelle.

Les foyers d'érosion sont les suivants :

. Les berges de l'oued :

Taillées dans la terrasse la plus récente, ces berges fournissent des matériaux soit par petites nappes soit par de véritables glissements (Photo VII.2).

. Les ravins dans les marnes :

Les marnes priaboniennes ainsi que les argiles paléocènes sont parcourues par environ 120 km de ravins.

Les berges de ces ravins sont couramment le siège d'une érosion intense par rigoles.

. Le lit de l'oued :

Les marnes priaboniennes affleurent, à certains endroits, dans le lit de l'oued. Lors des fortes crues, des blocs de tailles différentes peuvent être détachés de ces marnes.

Lorsqu'ils sont de petite taille ces blocs sont roulés sur le fond de l'oued.

Leur imbibition d'eau ainsi que la présence de graviers adhérents à leur surface leur confère une cohésion suffisante les protégeant ainsi contre la dégradation. Mais lorsque ces blocs sont de grande taille, ils sont transportés sur de faibles distances où ils s'effritent au fur et à mesure de leur séchage.

* Localisation des foyers d'érosion.

La ressemblance des associations de minéraux argileux empêche l'identification du principal fournisseur de matériaux d'envasement. Il est cependant possible d'affirmer que toutes les formations meubles contribuent au remplissage de la retenue.

Partant de ces deux observations, les facteurs principaux pour la détermination des foyers d'érosion restent la pente et le couvert végétal.

VII.2.4- Aspect quantitatif.

Les tentatives de quantification de l'érosion sont assez rares en Tunisie à cause de la complexité du phénomène et des moyens coûteux et compliqués qu'il nécessite.

En ce qui concerne le bassin versant de l'oued El Kebir deux essais ont été tentés :

. le premier en 1953 - 1954 par un auteur inconnu (Nous pensons cependant qu'il s'agit de J.TIXERONT) qui a effectué des expériences de mesure de ruissellement et d'érosion sur deux parcelles dans le bassin versant.

A part deux mesures de débits liquide et solides datant du 14 et 15 avril 1954, nous ne possédons aucun renseignement sur la localisation, la superficie, la pente et le couvert végétal de chacune des parcelles.

Ce manque de données rend ces mesures inexploitable.

. le second essai fut tenté par J. TIXERONT en 1960 qui a énoncé une formule empirique à partir des mesures effectuées sur 7 oueds de Tunisie (dont l'oued El Kebir).

D'après cet auteur, le taux annuel d'abrasion (ou érosion spécifique) est lié au ruissellement annuel par la relation :

$$E = K.R. 1 - a$$

E : Taux d'abrasion (en /km²)

R : Ruissellement annuel (mm)

K : Constante, a : constante.

Pour les bassins versants de Tunisie, $K = 354$ et $a = 0,70$.

Cette formule devient alors : $E = 354 \cdot R$

En l'appliquant au bassin versant de l'oued El Kebir J. TIXERONT trouve un taux d'abrasion annuel de $1182 / \text{km}^2$.

Si on utilise la valeur du ruissellement calculé à partir de la formule de l'oued El Kebir E devient égale à $1052 / \text{km}^2$

La comparaison de ces valeurs avec celles d'autres bassins versants (tableau VII.1) montre que le bassin versant de l'oued El Kebir est soumis (comme tous les bassins de superficie réduite) à une érosion très intense.

Cours d'eau	Poste de mesure	Superficie en m^2	Nombre d'années considérées	E / m^2
Medjerdah	Ghardimao	1490	6	497
Medjerdah	Souk el Khemis	16361	6	485
Medjerdah	Medjez El bab	20930	5	638
Rhezala	R 17	138	5	850
Kesseb	B 11	101	5	921
Kebir	Sidi Aouidat	225	7	1313
Nébanna	Sidi Messaoud	855	5	638
Mellègue	K 13	9014	9	591
Zeroud	Sidi Saad	8950	7	492

Tableau VII.1 - Mesures du taux d'abrasion de 7 bassins versants tunisiens.

L'application de la formule précédente donne une érosion moyenne de $0,7 \text{mm/an}$.

Cette valeur est nettement plus faible que celle avancée par J. TIXERONT en 1951 à savoir $1,6 \text{mm/an}$. L'écart entre les deux valeurs pourraient être dû à la différence entre les périodes d'observations : 20 ans dans le cas du calcul de TIXERONT et 50 ans dans notre cas.

VII.3- Le transport solide.

VII.3.1.- Relation qualitative : débit liquide - débit solide.

Les rares enregistrements dont nous disposons nous ont permis de déceler deux types de relation pour les débits instantanés :

comportement lors des petites crues

Les mesures effectuées à la station de Sidi Aouidat pendant deux crues ne dépassant pas 24 heures de durée (la première du 3 au 4 - 9 - 1952 (Fig.VII.7) et la seconde du 12 au 13 - 9 - 1952 (Fig.VII.8) montrent trois faits importants :

- le temps de concentration des débits liquide et solide est comparable et faible. Il ne dépasse pas deux à trois heures.

- le maximum du débit solide est confondu avec celui du débit liquide

- à la fin de la crue, une augmentation du débit solide est remarquée.

Au stade actuel des études, ceci ne nous paraît pouvoir être expliqué que par une venue de matériaux due à des précipitations qui n'ont intéressé qu'une partie du bassin. Pendant notre étude, nous avons eu l'occasion de voir un affluent, jeter dans l'oued (à eau claire), des eaux très boueuses.

comportement lors des grandes crues.

L'exemple que nous fournissons intéresse une crue enregistrée à la station de Sidi Aouidat du 19 - 12 - 1952 au 31 - 12 - 1952.

Deux phénomènes importants sont à retirer : (Fig. VII.9).

chronologie relative des maxima de débits liquide et solide

Outre la faiblesse du temps de concentration (5 à 6 heures), le premier maximum de débit solide est en retard par rapport au premier maximum de débit liquide. Une fois que l'érosion et le transport de sédiments entamés dans le bassin versant, toute augmentation du débit de l'oued, coïncide avec le maximum de charge solide correspondante.

Vers la fin de l'épisode pluvieux, les débits solides présentent des maxima qui sont en avance de quelques heures par rapport à leurs homologues liquides. Cette différence de comportement paraît être due au fait que les premières lames ruisselées mobilisent l'essentiel de matériaux disponibles et les rapprochent assez du lit de l'oued.

comparaison des valeurs maximales de débits solides

Les charges solides maximales atteintes en début de crues sont largement supérieures (3 à 6 fois) à celles observées à la fin. Ceci pourrait

Fig.VII.7. Relation hydrogramme-turbidigramme
Station de Sidi Aouidet
Journées du 3 et 4_9_1952

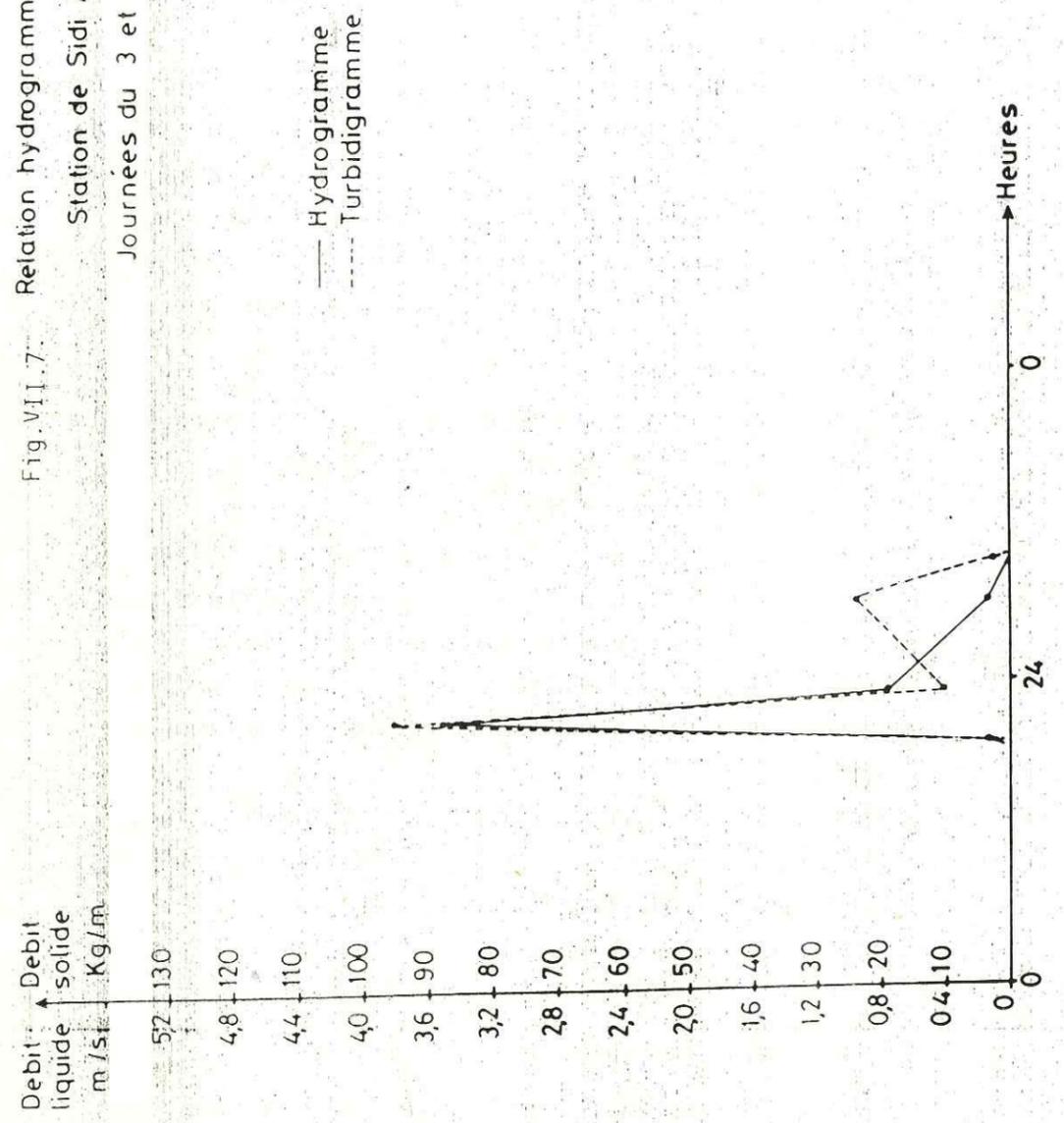
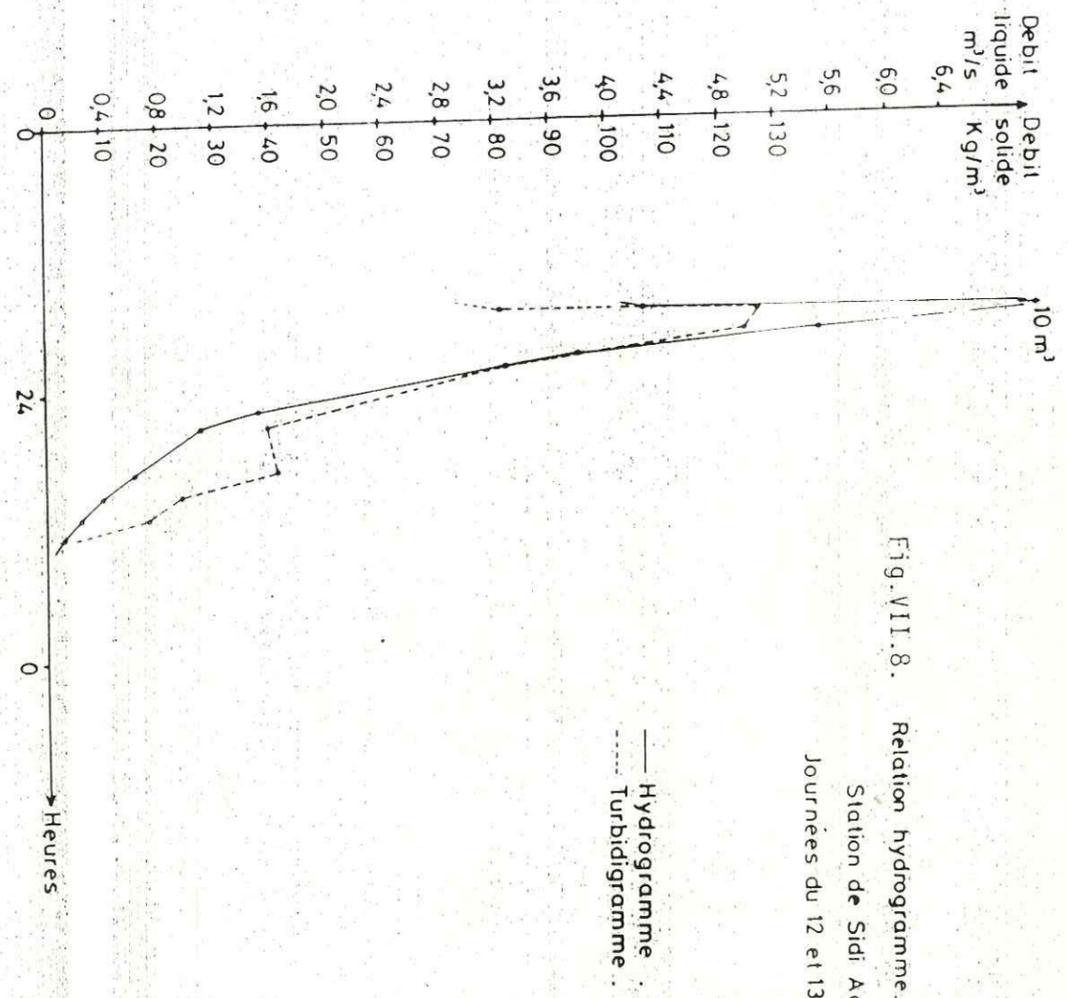
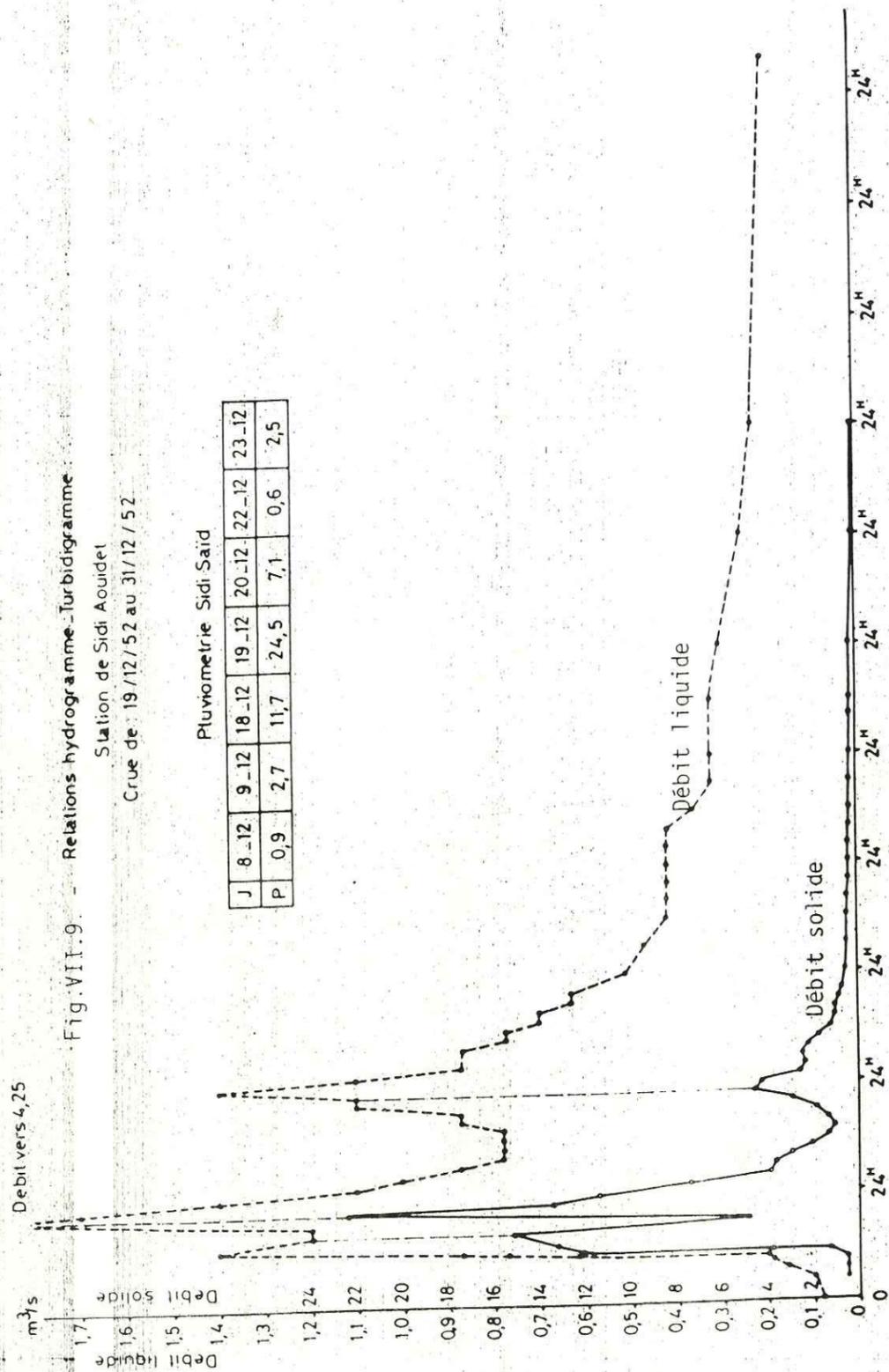


Fig.VII.8. Relation hydrogramme-turbidigramme
Station de Sidi Aouidet
Journées du 12 et 13_9_1952





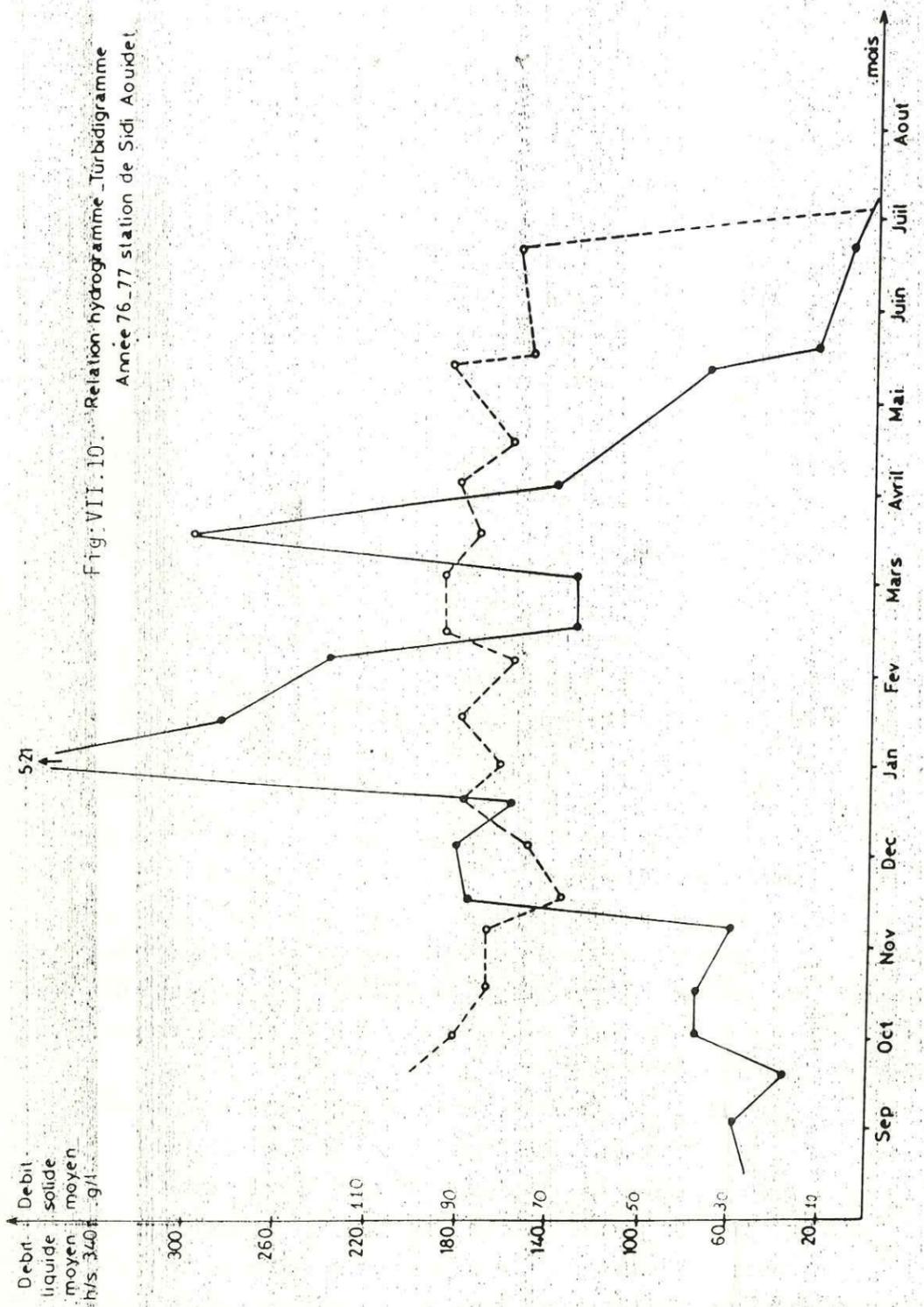
s'expliquer par deux faits :

- les premières quantités d'eau de ruissellement emportent le maximum de sédiments arrachés lors de la période sèche.
 - après les premières pluies de l'épisode, le stock d'humidité du sol étant pratiquement reconstitué, l'érosion par les lames tardives de ruissellement est nettement moins intense que celle des premières lames.
- L'irrégularité des débits solides instantanés (pouvant passer de 0 à 100 g en l'espace de deux à trois heures) n'est pas retrouvée à l'échelle des charges solides mensuelles moyennes (Fig.VII.10). L'étalement des quantités de matériaux transportés lors de crues de faible durée (5 jours maximum) sur des périodes assez longues telles que le mois masque l'agressivité et la violence du phénomène. Elle ne masque cependant pas les deux faits suivants :
- comme pour le ruissellement, les mois de septembre et d'octobre correspondent à la période où le transport est maximum (90 g/l en moyenne avec de pointes de 150 à 180 l/s) ; les mois de juillet et août représentent, quant à eux, la période d'étiage où presque aucun transport n'est décelé.

VII.3.2 - Essai de quantification de la relation débit liquide - débit solide.

Pour la réalisation de cette étude nous sommes parti d'une série de mesures effectuées à la station de Sidi Aouidet par EL SCHOLZ et al., dans le cadre de la monographie de l'oued Miliane. Il est capital de signaler dès maintenant que les valeurs utilisées sont entachées de deux types d'erreurs :

- le premier est dû à la technique de prélèvement. L'échantillon étant prélevé à la bouteille sur la rive de l'oued il est évident qu'il n'est pas totalement représentatif de toute l'eau de l'oued.
 - le deuxième type d'erreur est dû au refus de la D.R.E.S. de nous communiquer les valeurs exactes de ses mesures; devant ce refus nous étions obligés de mesurer les coordonnées des points représentés sur un graphique dans la monographie. Malgré les précautions que nous avons prises, des erreurs ont dû certainement accompagner ce travail.
- En l'absence de toute corrélation possible entre les valeurs à l'échelle de l'année, du semestre ou du trimestre, des corrélations mensuelles (moyennant l'élimination de certaines valeurs aberrantes) ont pu être obtenues. Ces corrélations ne semblent pas être dues au seul fait de la réduction du nombre de points du nuage d'ajustement. Elles paraissent découler de réalités physiques (à rattacher probablement à des données climatiques, et agricoles).



Seules des études plus élaborées dans ce domaine peuvent permettre de porter un jugement objectif.

Les résultats de ces corrélations : type d'ajustement linéaire, logarithmique, exponentiel ou puissance, coefficient de corrélation, valeurs des constantes de la relation sont groupés dans le tableau...

Il en découle 11 lois mensuelles reliant les débits liquides instantanés aux débits solides instantanés à la station de Sidi Aouidet. (Fig.VII.11).

Cette essai n'a pas la prétention de découvrir des relations exactes et définitives, mais d'attirer l'attention sur le fait que le barrage de Sidi Boubecker d'une part et l'oued El Kebir d'autre part constituent un précieux terrain d'expérience pour tester la validité de ce type de relation.

Ce terrain permet à notre avis de décider définitivement s'il faut tenir compte du débit solide des oueds dans les prévisions d'envasement où s'il faut arrêter ce type de mesures et chercher d'autres solutions.

De toute façon, les résultats trouvés jusqu'à maintenant sont encourageants et ne font qu'inciter à continuer la recherche dans le domaine.

En effet l'utilisation des lois trouvées pour le calcul d'un turbidigramme partir de l'hydrogramme de la crue du 19 - 12 - 1952 au 31 - 12 - 1952 a permis de retrouver la quantité totale de sédiments transportés pendant cette crue avec une différence de 6% par excès par rapport à la valeur observée (Fig.VII.12).

Il est évident qu'un seul exemple reste sujet à caution mais ceci ne justifie nullement l'abandon de collecte de données dans le domaine.

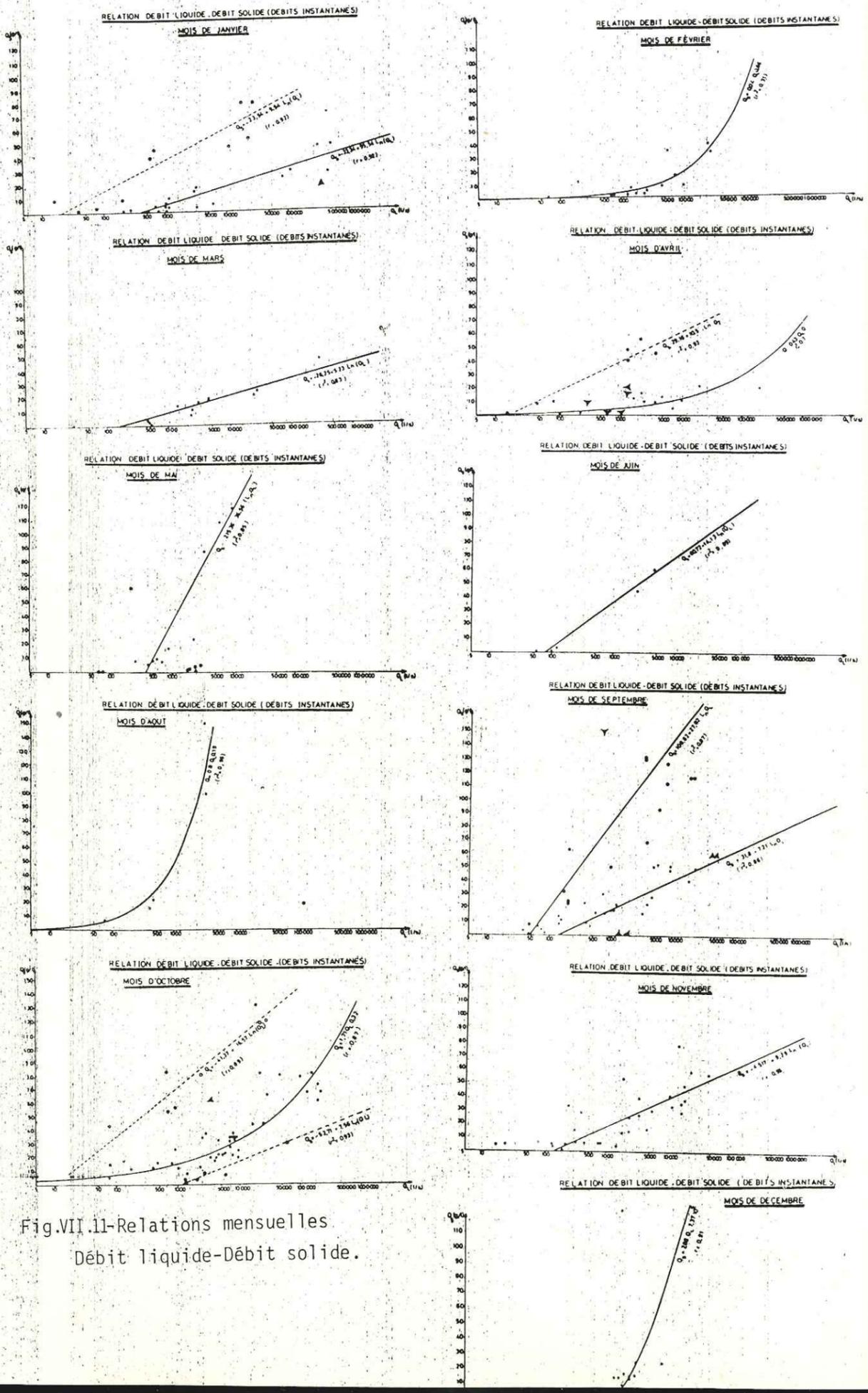
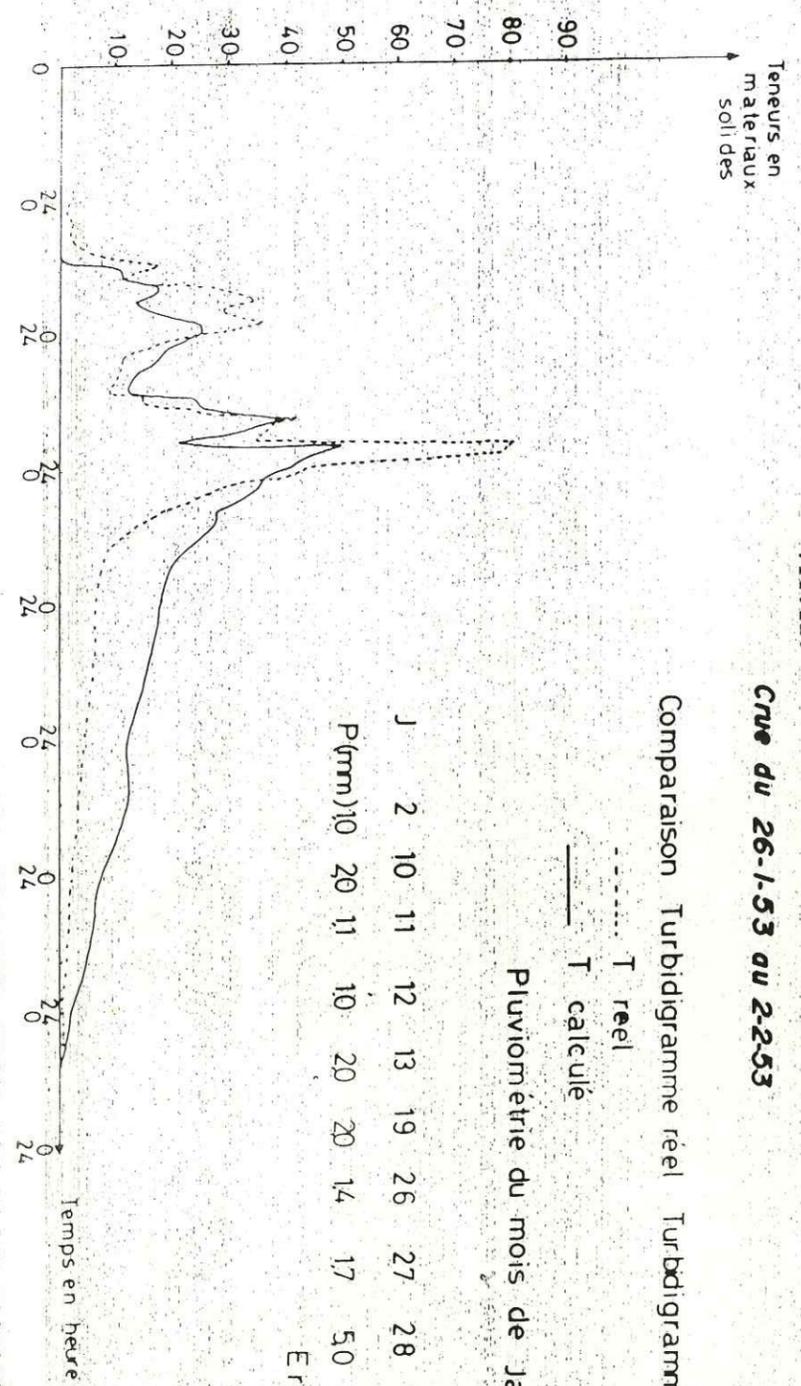


Fig.VII.11-Relations mensuelles Débit liquide-Débit solide.



VII.12. - STATION DE SIDI AOUDET
Cue du 26-1-53 au 2-2-53
Comparaison Turbidigramme réel Turbidigramme calculé
Erreur 6% par défaut

VII. - Conclusion : volumes envasés et possibilités de prévision

Introduction :

- Calcul du volume d'envasement.

Les deux méthodes habituelles de calcul des volumes de vases dans les retenues sont :

. le calcul par planimétrie à partir d'un plan à courbes isobathe. Ce plan est obtenu par la superposition du plan topographique du fond de la retenue à l'état final au plan topographique avant construction du barrage.

. le calcul à partir des épaisseurs ponctuelles des dépôts obtenues par des essais in situ : pénétration dynamique ou statique, sismique réfraction, électrique.

Dans le cas de notre étude aucune des deux méthodes n'a pu être appliquée. Parmi les essais in situ nous n'avons pu tester que la sismique réfraction. En ce qui concerne les plans topographiques nous avons pu rassembler après une année de recherches dans différents services (Ministère de l'Agriculture, service topographique) les documents suivants :

* Plans topographiques

- plan de la retenue au 1/5000 de 1921 (équidistance des courbes : 5m).
- plan de la même retenue au 1/5000 de 1945 (équidistance des courbes 1 m).
- plan de la retenue au 1/2500 de 1950 (équidistance des courbes : 1 m)
- plan de la retenue au 1/2500 de 1954 (équidistance des courbes : 1 m)

* Profils topographiques

- profils topographiques de 1925
- " " de 1945
- " " de 1967

Les profils sont effectués à des endroits différents dans la retenue. L'absence de repères communs de superposition est le principal handicap à leur utilisation. Il est à signaler que ces difficultés ont existé depuis toujours puisqu'elles ont été signalées dans une correspondance datant de 1954 entre la société NEYRPIIC et le Ministère tunisien de l'équipement. Devant ces difficultés, nous avons eu recours à une troisième méthode, certes discutable, mais la seule possible dans ce cas. Les volumes sont ainsi déterminés à partir de la courbe de capacité à l'origine (Fig.VII13). Deux causes essentielles d'erreurs existent dans ce cas :

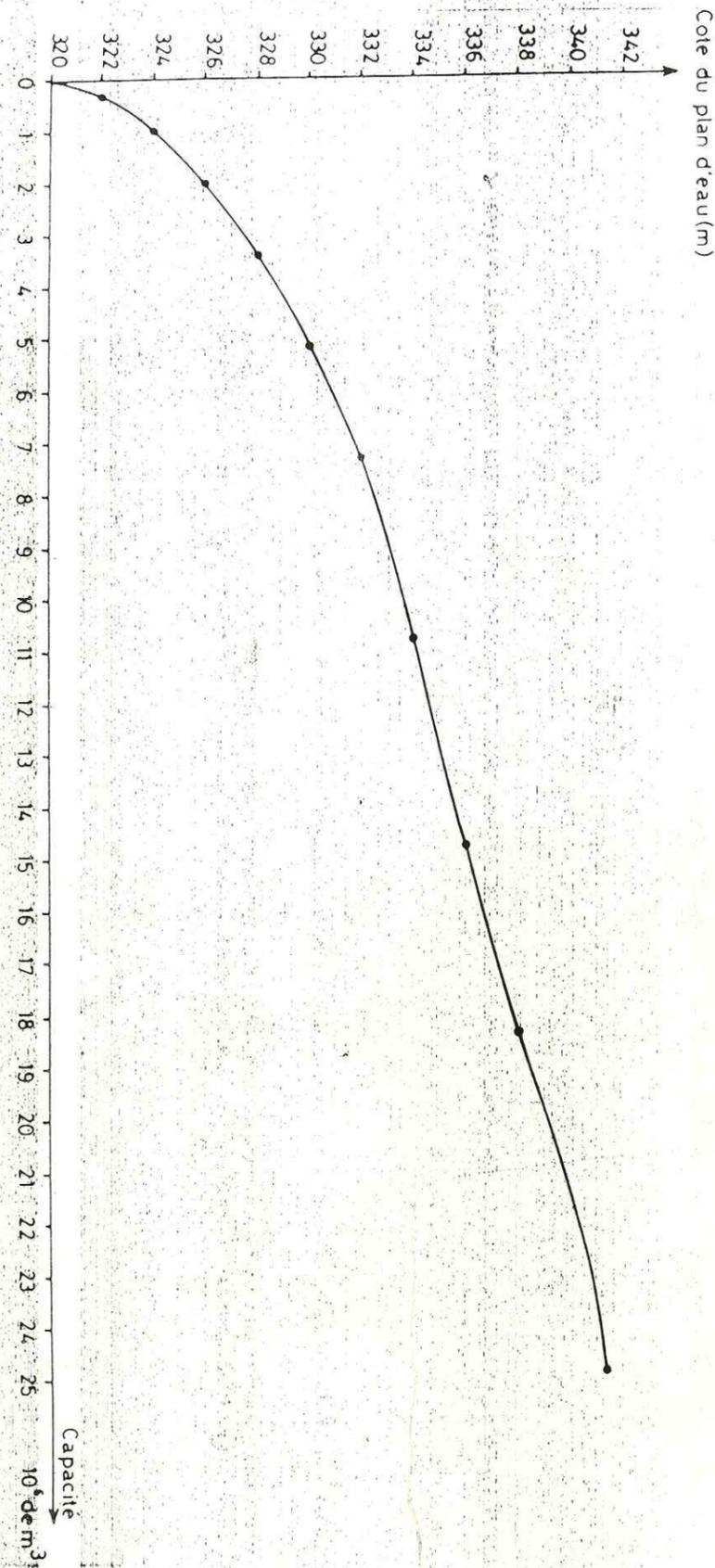


Fig. VII. 13. Barrage de Sidi Boubecker sur l'oued El Kebir. Courbe de capacité à l'origine

- l'état de la surface du dépôt (chenal et ravins) et la pente d'amont en aval.

- l'existence d'un talus de matériaux sur les berges.

Dans le cas du barrage de Sidi Boubecker l'effet de ces deux causes fut minimisé au maximum du fait de l'homogénéité de la surface du dépôt et de la faiblesse de sa pente (8/10000 environ) d'une part et de la presque absence de dépôts de berges.

Nous estimons que l'erreur commise lors de l'utilisation de cette méthode n'excède pas 10%.

a - Volumes de vases accumulées depuis 1930.

Nous avons choisi l'année 1930 et non 1925 parce que nous supposons que les cinq premières années de fonctionnement ont servi à la régularisation de la surface du dépôt et au comblement des anciens chenaux et ravins.

Toutes les données relatives aux mesures d'envasement sont présentées dans le tableau VII.2.

Période	cote de la surface de dépôt en m	volume envasé ($10^6 m^3$)	vitesse de sédimentation (m/an)	observations.
1925 - 1930	- 320	0	0	
1930 - 1945	320. 325	3.3	0.22	
1945 - 1950	325. 327	1.5	0.30	
1950 - 1954	327. 329,6	1.7	0.425	
1954 - 1967	329,6. 332	3.8	0.290	
1967 - 1981	332. 333,9	3,5	0.25	Vitesse moyenne :
	Total	13.8		$0,245 \times 10^6 m^3 / an.$

Tableau VII.2. Volumes d'envasement et vitesse de sédimentation.

L'évolution du niveau de la vase de la retenue s'est faite avec des vitesses différentes selon les époques d'observation (Fig.VII.14) mais il est possible de diviser l'envasement en deux périodes distinctes :

- la première de 1925 à 1955 est caractérisée par une forte vitesse de remplissage : 0,38m/an.

- la seconde de 1955 à 1981 présente une vitesse plus faible : 0.27m/an.

A première vue cette différence serait à attribuer à une différence d'apport d'eau dans les deux périodes.

Mais d'après les valeurs enregistrées à la station de Sidi Aouidat, l'apport d'eau moyen pendant la première période est de $15,6 \times 10^6 m^3$ alors qu'il est de $23,35 \times 10^6 m^3$ pour la seconde.

La vraie raison de cette différence est à notre avis la diminution de l'efficacité de rétention du barrage. Cette diminution est due d'une part à l'envasement de la retenue et d'autre part à l'abaissement depuis 1970 de la cote du déversoir. Il en résulte que lors des grandes crues des quantités importantes de matériaux réussissent à passer vers l'aval. Ceci est le cas de la crue de 1969 qui a provoqué un envasement disproportionné par rapport à la quantité d'eau qui a transité à travers le réservoir.

b - Possibilités de prévisions quantitatives de l'envasement

* Méthodes de calcul

Plusieurs méthodes existent dans le domaine de prévision de l'envasement. Nous nous limiterons ici à la description de celles qui ont pu être appliquées dans le cas du barrage de Sidi Boubacker.

. Calcul à partir du débit solide moyen.

$$P = V.C$$

P : poids des sédiments déposés en tonnes par an

V : volume annuel d'eau en m^3

C : concentration moyenne en matériaux solides (suspension).

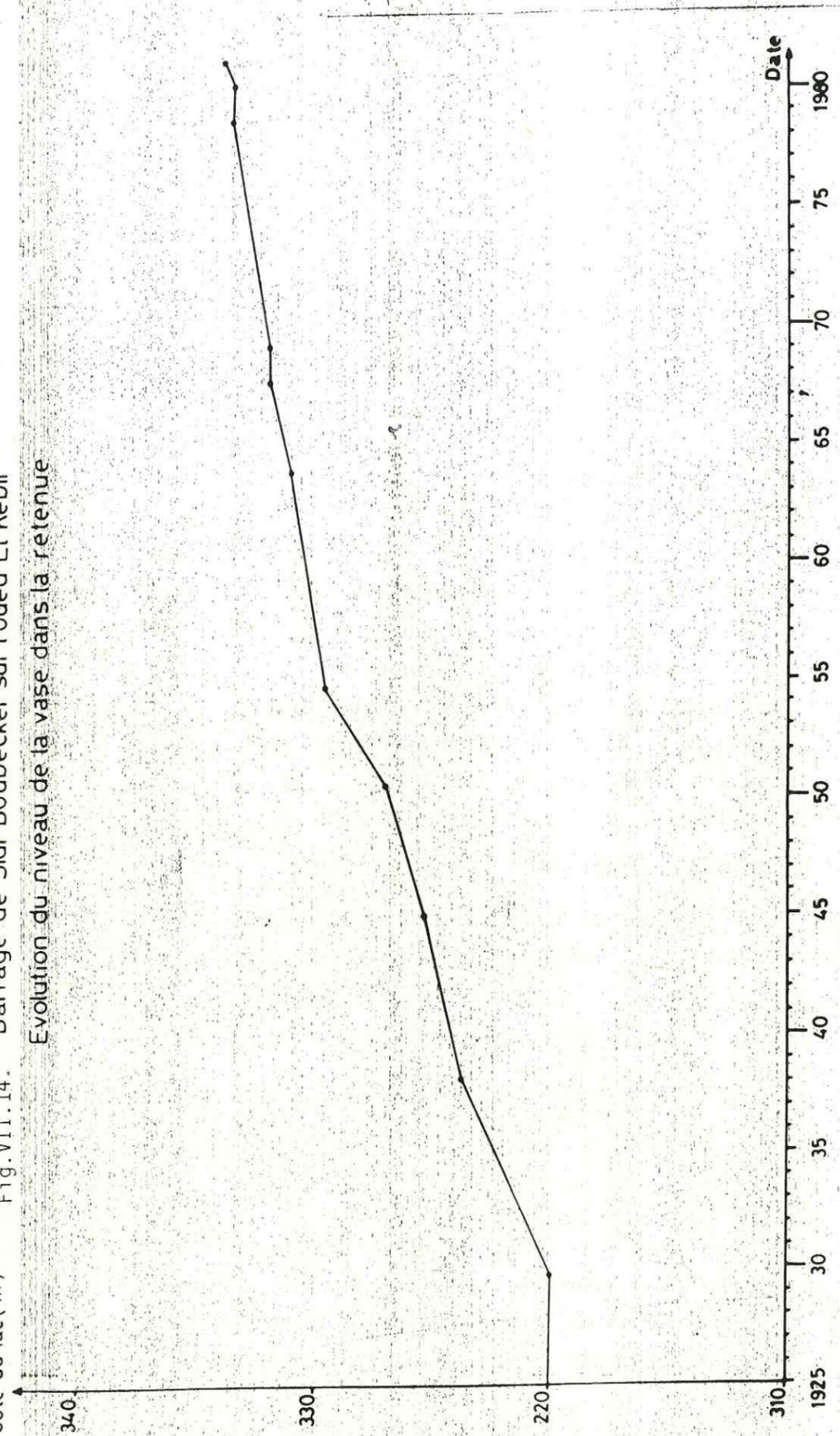
La valeur de C est déterminée à partir des mesures effectuées sur l'oued.

P et V peuvent être des quantités annuelles moyennes.

Le passage du poids au volume s'effectue par l'intermédiaire de la densité. Cette dernière est déterminée soit par mesure directe, soit à partir de formules empiriques

. Calcul à partir de l'érosion spécifique

Fig. VII.14. Barrage de Sidi Boubecker sur l'oued El Kebir
Evolution du niveau de la vase dans la retenue



P = E.S.

P : poids de sédiments déposés en tonnes par an
E : taux annuel d'érosion en tonnes/km² par an.
S : superficie du bassin versant en km²

. Calcul à partir des débits solides mensuels.

Pour le calcul de la quantité mensuelle de dépôt la démarche suivante est adoptée :

- un débit mensuel moyen est calculé à partir de l'apport d'eau mensuel,
- le débit calculé précédemment est injecté dans la formule de la courbe d'ajustement correspondante.

Il en découle une charge solide mensuelle moyenne.

- cette charge solide moyenne est multipliée par le volume mensuel d'eau pour trouver le mois considéré.
- par addition des valeurs mensuelles, le poids annuel de sédiments est retrouvé.

. Calcul à partir des formules d'Akram-Gill;

Akram Gill a proposé trois formules permettant le calcul du temps nécessaire pour le comblement d'une partie donnée du réservoir :

- sédiments grossiers:

$$t = \frac{\bar{\gamma} I}{G} \left[0.9947 (C_0 - C) / I + 0.006297 \ln (C_0/C - 0.310^{-5} (I/C_0 - I/C)) \right]$$

- sédiments moyens:

$$t = \frac{\bar{\gamma} I}{G} \left[0.012 \ln(C_0/C) + 1.02 (C_0 - C) / I \right]$$

- sédiment fin:

$$t = \frac{\bar{\gamma} I}{G} \left[1.02655 (C_0 - C) / I + 0.02621 \ln (C_0.C) + 0.13310^{-3} (I/C_0 - I/C) - 0.51.10^{-6} (I^2/C_0^2 - I^2/C^2) \right]$$

$\bar{\gamma}$: densité moyenne du sédiment.

I : volume annuel d'eau

G : taux annuel d'érosion

C₀ : capacité initiale du réservoir

C : capacité à l'instant "t"

Ces valeurs sont exprimées en unités anglaises.

Selon BROWN (1950) : "la plupart des réservoirs sont à remplacer ou à sekunder par d'autres barrages à partir du moment où ils ont atteint un temps t_L

correspondant à la perte de 50% de leur capacité". En tenant compte de la considération précédente les formules de Gill deviennent :

- sédiments grossiers :

$$t_L = \left(\frac{\bar{Y} \cdot I}{G}\right) 0,49535 C_0/I + 0,310^{-5} I/C_0 + 0,00436$$

- sédiments moyens :

$$t_L = \left(\frac{\bar{Y} \cdot I}{G}\right) (0,008 + 51C_0/I)$$

- sédiments fins

$$t_L = \left(\frac{\bar{Y} \cdot I}{G}\right) (0,51328 C_0/I - 0,13310^{-3} I/C_0 + 0,15310^{-5} (I/C_0)^2 + 0,018167)$$

Si un autre critère de vie utile est fixé, t_L correspondant peut être calculé de la même façon à partir de la formule générale.

Calcul à partir de la loi de vitesse annuelle de sédimentation.

En portant les vitesses de sédimentation relatives aux différentes époques d'observation ainsi que les apports d'eaux moyens correspondant sur le même graphique (Fig.VII.15) une corrélation entre les deux types de données est apparue. L'essai de corrélation a donné la loi d'ajustement suivante avec un coefficient $r = 0,93$

$$V = 0,04 e^{0,16 Q}$$

V : volume annuel de sédiments déposés en m^3 /an.

Q : volume annuel d'eau en m^3

L'avantage de cette méthode est l'obtention du volume d'envasement directement sans avoir à passer par la densité.

* Résultats :

Dans tous les calculs-ci-dessous décrits- on adoptera les valeurs de $9,8 \cdot 10^6 m^3$ pour le volume annuel d'eau et $1,5 T/m^3$ pour le poids volumique moyen.

- méthode du débit solide moyen.

D'après J.TIXERONT la concentration moyenne en suspension des eaux de l'oued El Kebir est de 30g/l.

Il en découle que $P = 294000$ tonnes/an d'où $V : 196000 m^3$ /an.

- méthode par érosion spécifique

E étant égale à 1100 tonnes/an environ :

$$P = 298000 \text{ tonnes/an d'où } V = 198700 m^3/\text{an}$$

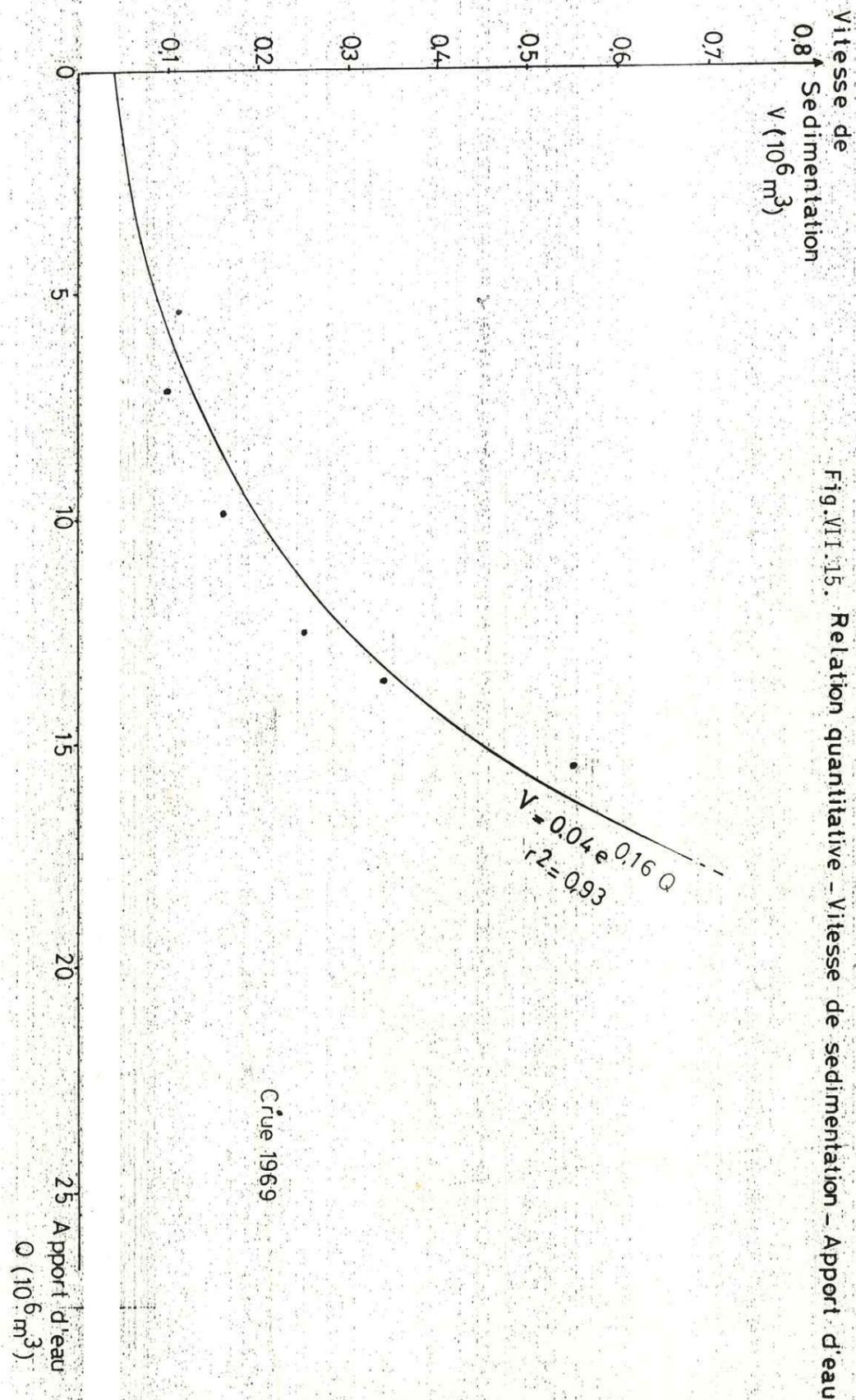


Fig.VII.15. Relation quantitative - Vitesse de sédimentation - Apport d'eau

- méthode des débits solides mensuels

Valeurs mensuelles :

Mois	S	O	N	D	J
Poids de sédiments en tonnes	63209	94384	92.75	2289	9305

Mois	F	M	A	M	Jn	A
Poids de sédiments en tonnes	5530	16976	28464	4620	-	783

Il en résulte que $P = 234000$ tonnes/an d'où $V = 156000 \text{ m}^3/\text{an}$.

- méthode d'Akram Gill.

Le dépôt dans la retenue étant essentiellement argileux, nous avons utilisé la formule relative aux sédiments fins. D'après cette formule, il faut 39,67 ans pour avoir une réduction de 55% de la capacité (ce qui correspond à un volume envasé de $13,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$). Ceci représente une vitesse de sédimentation de : $348000 \text{ m}^3/\text{an}$.

- méthode de la loi de vitesse de sédimentation.

D'après l'équation trouvée, la vitesse de sédimentation annuelle est : $V = 192000 \text{ m}^3/\text{an}$.

Méthode	Débit solide de moyen	Erosion spécifique	Débits solides mensuels	Akram Gill	Loi de vitesse de sédimentation
Vitesse de sédimentation en m^3	196000	198700	156000	348000	192000
Erreur par rapport à la vitesse moyenne observée	20 % (Par défaut)	19 % (Par défaut)	36 % (Par défaut)	42 % (Par excès)	22 % (Par défaut)

Tableau VII.3. Comparaison des vitesses de sédimentation calculée à la vitesse observée.

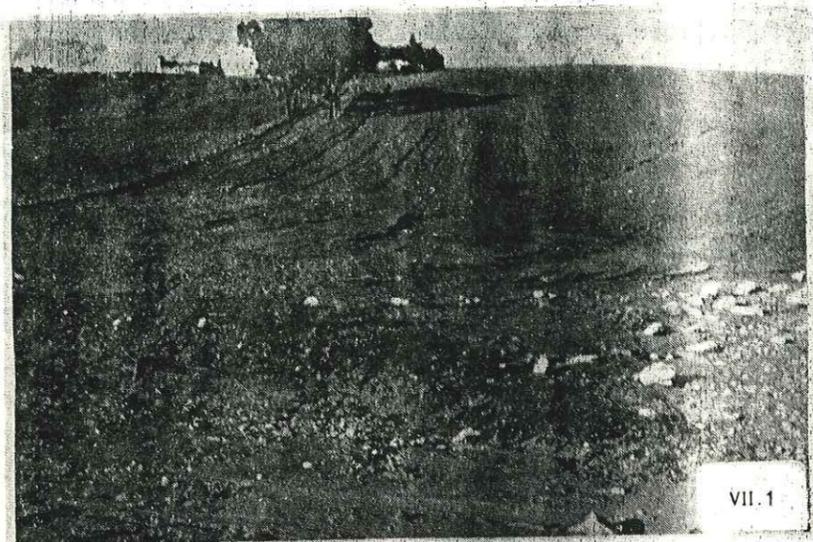
Le tableau VII.3. montre que trois méthodes sont équivalentes quant à la précision de prévision du volume d'envasement. Il s'agit du calcul par débit solide moyen, érosion spécifique ou loi de vitesse de sédimentation.

Il est donc nécessaire d'estimer pour chaque cours d'eau, avant son aménagement, le débit solide instantané moyen, et l'érosion spécifique du bassin versant.

Après construction, la détermination de la loi de vitesse de sédimentation permet de contourner le problème de densité.

En ce qui concerne le comblement total et définitif du barrage il est possible de proposer les estimations suivantes :

Capacité restante	Deversoir non arasé capacité : $11,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$		Deversoir arasé à la cote 337,19 capacité : $3,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	
	observée	calculée	observée	calculée
Vitesse de sédimentation	$245\,000 \text{ m}^3$	$196\,000 \text{ m}^3$	$245\,000 \text{ m}^3$	$196\,000 \text{ m}^3$
Temps de comblement en (an.)	45	57	13	16
Durée de vie totale	101	113	69	72



Labour des terres dans le sens de la pente : méthode à rejeter.



Berges de l'oued el kebir: glissements dans les berges.

CINQUIÈME PARTIE : Conclusions générales

A. - Les solutions proposées aux problèmes de l'aménagement.

1. - Problème de l'envasement et d'érosion.

Il est normalement indispensable, avant tout aménagement, de disposer des données sur l'envasement qui pourrait s'y produire. Ceci exige des mesures répétées à fréquence régulière en plus des mesures supplémentaires en période de crue. L'obtention de l'apport global moyen nécessite une longue durée d'observation et une infrastructure importante. Ce travail doit être suivi immédiatement par des efforts de réduction de l'érosion. A cet effet, il faut procéder au reboisement du bassin versant, au développement d'une végétation appropriée, la construction de rigoles collectrices, et des canalisations de rectification des écoulements naturels. Tout ce travail devrait être mené 10 à 20 ans avant la construction du barrage. Mais souvent le choix définitif d'un aménagement n'intervient qu'une à deux années avant le début des reconnaissances, ce qui rend toute tentative de prévention programmée et durable impossible. D'autres tentatives d'intervention peuvent avoir lieu après construction.:

- arrêt du transport par des petites digues à l'amont de la retenue principale.

- évacuation systématique des matériaux déposés par intervention d'engins flottants ou par purge.

Ces interventions posent des problèmes techniques et financiers qui sont parfois insolubles.

Dans le cas des barrages tunisiens, nous regrettons l'absence de politique claire et de choix définitifs dans le domaine.

La situation actuelle impose la considération de l'envasement comme inéluctable. Il est ainsi indispensable de chercher des solutions correctrices des effets du phénomène : amélioration de la perméabilité des dépôts par développement d'activité biologique dans les retenue par exemple.

2. - Régénération de la rentabilité de l'aménagement.

Nous espérons que les suggestions que nous proposons dans ce qui suit constituent la base d'une étude technicoéconomique permettant la réalisation d'une action de régénération de l'activité et de la rentabilité de l'aménagement de l'oued El Kebir. Ceci constitue un souhait pour nous, il représente un grand espoir pour les paysans de la région qui voient en cette régénération

une solution possible à beaucoup de problèmes de la région : chômage, manque d'eau etc.

Dans ce but nous proposons :

- le rétablissement de la cote du déversoir à son niveau initial car les crues de débits semblables à celui de 1969 n'ont pratiquement aucune chance de se réaliser avant le comblement total du barrage.

- la transformation du site en un parc naturel annexé à un complexe de repos de montagne. De nombreuses espèces animales fréquentent le réservoir. (Canards, cigognes, sangliers, lièvres, perdrix etc...). Ceci nécessitant la présence en permanence d'eau, nous conseillons la restauration par pompage des quantités captées dans les sources à l'aval.

- à moyen terme, la construction d'un barrage à l'aval.

Ce barrage se situerait à 1,5 km à l'aval de celui déjà construit. (Fig. A 1). La carte géologique du site (Fig. A 2) ainsi que la coupe selon son axe (Fig. A 3) montrent que :

. le barrage aura les deux appuis sur les calcaires lutétiens.

. l'axe du synclinal passe sous le barrage.

. l'axe du barrage ayant une direction sensiblement N 140, il est possible de couper les circulations par un voile d'étanchéité qui lui est parallèle dans le site et de direction orthogonale (N 50 environ) dans les rives.

. l'existence de paquets écroulés en rive gauche ne représente aucun danger car ces paquets par leur accumulation les uns contre les autres bloquent la falaise d'une part et ils sont eux-même à leur base par leur butée contre les couches de calcaires campaniens d'autre part (coupe fig. A 3).

. en ce qui concerne l'étanchéité, seules les fractures N 110 à N 140 (longueur décimétrique, ouverture : 1 à 15 cm) constituent des drains possibles à des cotés élevés dans les deux rives.

Ce barrage de 50 m de haut environ aura une capacité voisine de $20 \cdot 10^6 m^3$. Son emplacement aval-par rapport à celui déjà existant lui permettra d'avoir une très bonne rentabilité vu que l'essentiel des sédiments sera arrêté à l'amont.

B. - Les perspectives de recherches.

La présente étude nous a permis de mettre en évidence l'intérêt des axes de recherche suivants :

. en tectonique : l'étude de l'évolution du champ de contrainte régional au cours du temps.

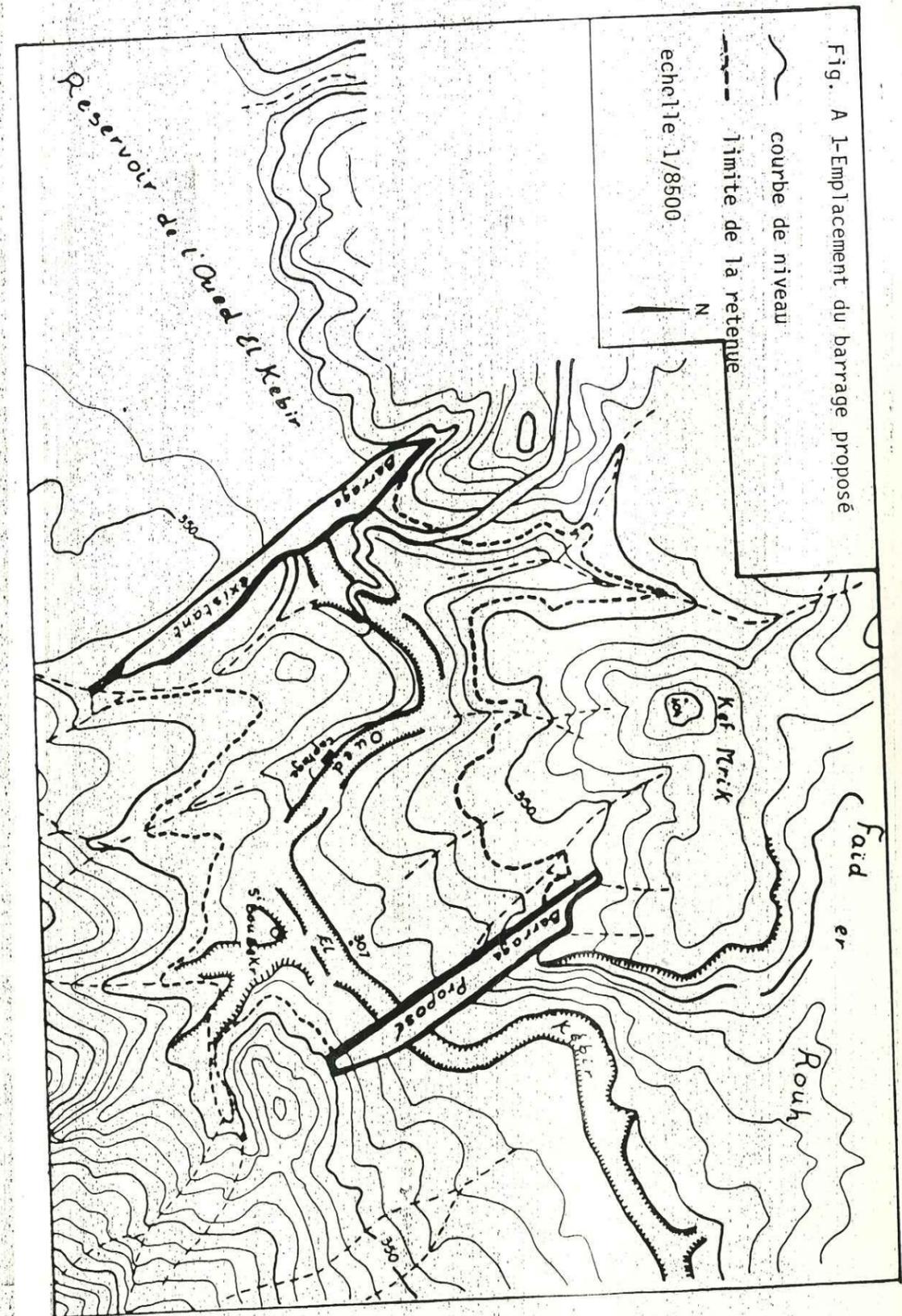


Fig. A 1-Emplacement du barrage proposé

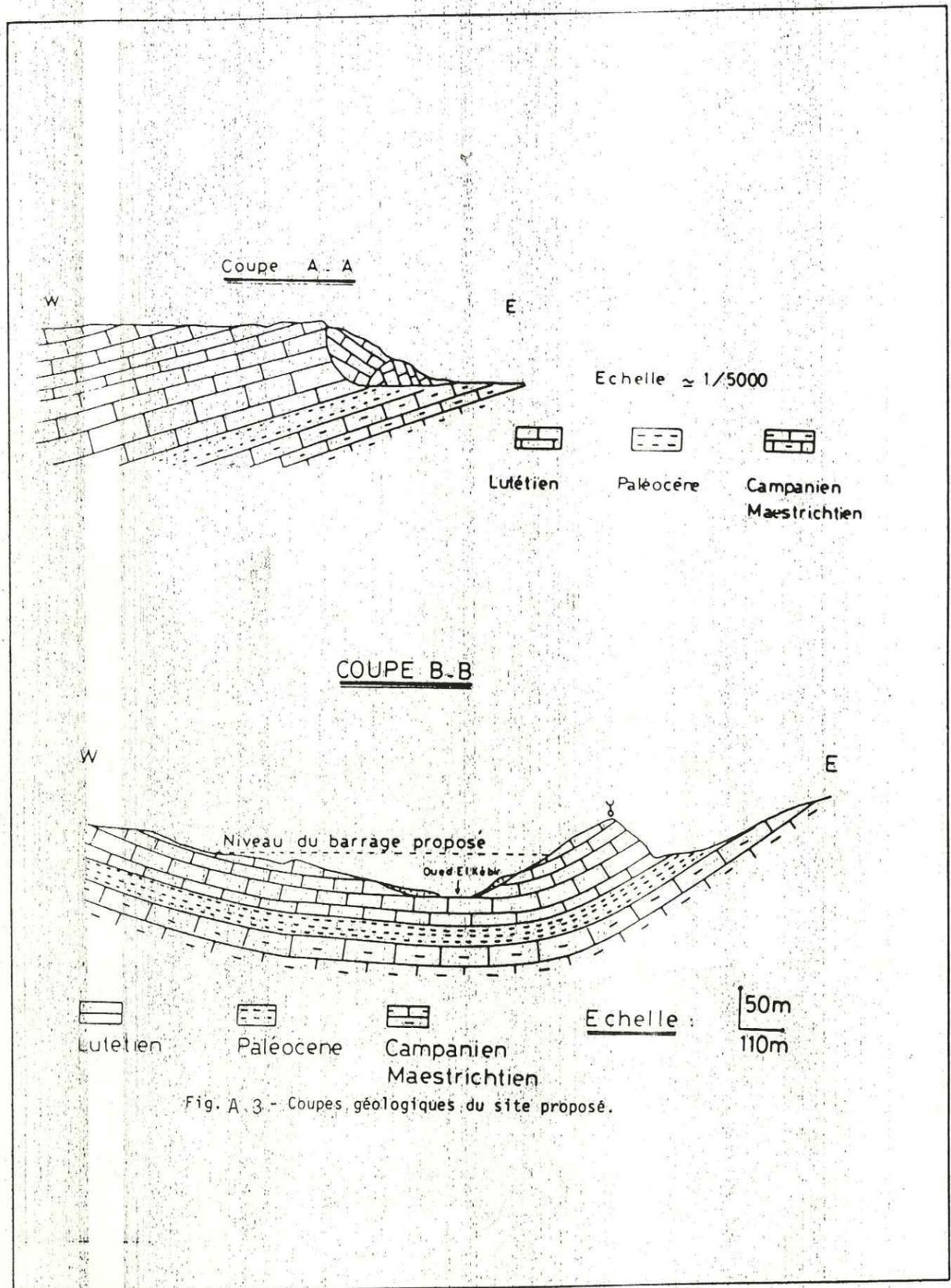


Fig. A.3. - Coupes géologiques du site proposé.

en géologie des barrages : l'intérêt du développement d'un biotope dans les retenues et les conséquences sur la perméabilité et la cohésion des dépôts.

en sédimentologie et métallogénie : le rôle de certaines espèces animales dans le changement des conditions géochimiques d'un milieu continental et les conséquences sédimentologiques et métallogéniques qui en découlent.

en hydraulique : la nécessité de la multiplication des mesures sur les cours d'eau et les retenues des barrages pour une meilleure maîtrise des phénomènes d'érosion de transport solide et d'envasement.

C. - Conclusion générale.

L'étude de l'aménagement de Sidi Boubecker, menée avec un manque de moyens techniques et bibliographiques, a néanmoins fourni des renseignements intéressants dans plusieurs domaines.

* Géologie régionale : elle a permis de reconstituer l'évolution, depuis la fin de l'Eocène jusqu'à nos jours, du champ de contraintes régionales. Cette reconstitution prouve une fois de plus le caractère polyphasé des déformations en Tunisie.

* Géologie des barrages :

- géotechnique : une première approche des propriétés géotechniques des dépôts a été tentée.

Elle a montré que ces dépôts - des argiles très plastiques en majorité - étaient caractérisés par une cohésion assez forte, une homogénéité granulométrique ainsi qu'une perméabilité secondaire assez forte élevée.

- étanchéité du site et explication des sources :

Deux systèmes aquifères différents ont été identifiés :

la nappe des dépôts et la nappe des calcaires éocènes .

Les deux nappes communicantes au niveau du barrage possèdent les sources du captage aval comme exutoire.

Les sources du pied du barrage sont, elles, alimentées directement par la retenue à cause des particularités structurales du site (axe synclinal en rive droite, grandes fractures ouvertes).

* Sédimentologie :

Les sédiments, déposés par simple décantation dans l'eau calme, constituent un biotope intéressant. Ce biotope formé par les espèces végétales (algues et charas) et animales (ostracodés et vers polychètes) joue un rôle important. Il permet la fixation du fer-libéré par la décomposition de la matière organique - provoquant ainsi la cimentation des particules argileuses du dépôt d'où l'augmentation de la cohésion. Il confère d'autre part - au moyen de la création de terriers des vers - une perméabilité plus grande que celle qui existait initialement.

Ce biotope, s'il rend les possibilités de dévasement difficiles, supplée néanmoins la capacité perdue par l'obtention de réserve souterraine.

* Erosion et mesures de l'envasement.

Dans ce domaine le manque de mesures et d'observations régulières et continues sur une période longue a été l'handicap essentiel.

Cependant des essais de quantification de l'envasement ont permis d'estimer la vitesse annuelle moyenne d'envasement ainsi que le temps nécessaire pour le comblement définitif du réservoir.

Ces essais - dont les résultats ne sont pas définitifs quoiqu'encourageants, incitent à multiplier les observations et les mesures sur les différents cours d'eau (aménagés ou non) de Tunisie pour une estimation raisonnable et objective de la rentabilité des aménagements. Ceci permettra d'éviter beaucoup de problèmes socioéconomiques dans cette période de crise.

BIBLIOGRAPHIE

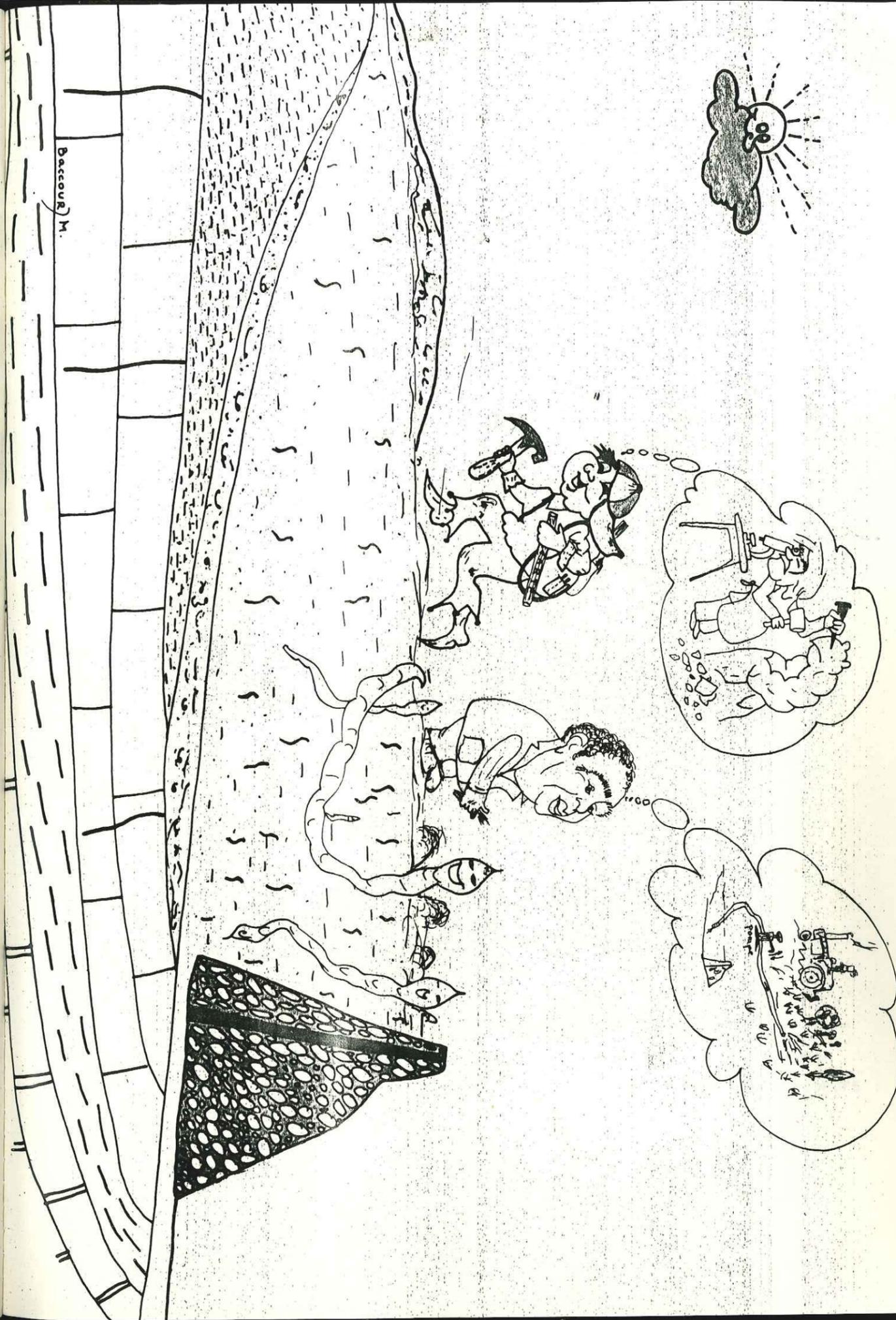
- ABID. A. (1981) - *Apports solides et soutirages au barrage de Nebeur sur l'oued Mellègue, pour la période du 1^{er} mai 1954 (date de la mise en eau) au 30 avril 1980.* - Séminaire international d'experts sur le dévasement des retenues, Tunis juillet 1980, 13 p.
- ANDERSON E.M. (1951) - *Dynamics of faulting.* - Oliver and Boyd, Edinburgh, 206 p.
- ANTOINE P., FABRE D. (1980) - *Géologie appliquée au génie civil* - MASSON, Paris, 291 p.
- ARTHAUD F. (1969) - *Méthode de détermination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles.* - Bull.Soc.Géol. France.(7), t.XI, p 729 - 757.
- BEN AYED N. (1977) - *Tectonique cassante polyphasée et formation des cuvettes : région de Siliana et du Sers (Atlas tunisien central).* - Notes du service géologique de Tunisie N°43, travaux de géologie tunisienne N°11.
- B.I.R.H. (1950) - *Barrage sur l'oued El Kebir, graphiques des capacités,* B.I.R.H, Tunis.
- BLES. J.L., FEUGA B. (1981) - *La fracturation des roches.* - B.R.G.M. N°1, 123 p.
- BOUAZIZI H. (1981) - *Etude de la salinité et de l'envasement de la retenue du barrage Nebeur sur l'oued Mellègue.* - Thèse de 3^{ème} cycle. Université Franche-comté.
- BOUVARD M. (1978) - *Entrainement des matériaux.* - Cours. Ecole Nat.Sup.Hydrau. Grenoble. 105 p.
- BROQUET P. (1975) - *Etude qualitative de la fracturation dans les monts de Madonies (Sicile). Intérêt en néotectonique et en géologie appliquée.* - Ann.Sc. Univ. Besançon. Géol., Fasc. 23, p.87 - 93
- BUROLLET P.F. (1956) - *Contribution à l'étude stratigraphique de la Tunisie centrale.* - Ann.mines et géol., Tunis N°18, 345 p.
- CASTANY G. (1951) - *Etude géologique de l'Atlas tunisien oriental.* - Ann.mines et géol. N° 8.

- CHOUKROUNE P. (1968) - *Un exemple d'analyse microtectonique d'une série calcaire affectée de plis isopaques.* Tectonophysics.- 7 (1), (1969), pp. 57 - 70.
- CHOUKROUNE P., SEGURET M. (1968) - *Un exemple de relations entre joints de cisaillement, fentes de tensions, plis et schistosité.*- Rev.de géogr. phys. et de géol. dyn.(2), vol. X, Fasc.3, pp.239 - 246. Paris.
- COEUR - BIZOT J. (1950) - *Sondage de la retenue du barrage de l'oued El Kebir - Grenoble, NEYRPIC.*
- COSTET J. , SANGLERAT G. (1975) - *Cours pratique de mécanique des sols, plasticité et calcul des tassements.* - Dunod, Paris, 263 p.
- DELTEIL J. (1982) - *Le cadre néotectonique de la sédimentation plioquaternaire en Tunisie centrale et aux îles Kerkennah.* C.R. -
- DELTEIL J. , TRUILLET R., ZARGOUNI F. (1979) -*Extension et ampleur de la tectonique tangentielle dans l'axe N - S (Tunisie centrale).* 7^{ème} RAST. Lyon.
- DESITTER L.U. (1956) - *Structural Geology* - Mc Graw Hill edit, New York. 552 p.
- DUPONT J.P. , HOMMERIL P. (1984) - *Relation entre processus biologiques et processus sédimentaires littoraux sous climat tempéré.* - Mem.Géol.Univ. Dijon, T.7, p. 163 - 176.
- DUQUENNOIS H. (1956) - *New Methods of sediment control in reservoirs. Water power* - Mai 1956. pp. 174 - 180.
- EL SHOLZ M. , GUTTMANN A., STASCHEN G. (1973) - *Monographie de l'oued Miliane.*- DRES.et Inst.für Wass., HydroI., Univ. Hannover, Tunis, 165 p.
- FABRE D., ROBERT J. P. (1975) - *Analyse expérimentale des ruptures de la couverture liées à un mouvement décrochant du socle et applications.* - Ann.Soc.Géol.Nord, XCV, 3, pp. 175 - 182.
- FILLIAT G. (1981) - *Pratique des sols et fondations* - Editions le Moniteur. Paris.
- FORESTIER G., VEREZ P. (1978) - *Etude de la fracturation du plateau d'ornans.* - Th. 3^{ème} cycle, Besançon.
- GIGNOUX M. , BARBIER R. (1955) - *Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques* - Masson, Paris.
- GILL M.A. (1978) - *Analysis of reservoir sedimentation.* -Wat.Power. Dam constr. GBR., vol 30, N12, pp.29 - 53.

- GIRAUD A. (1974) - *Etudes géologiques sur quelques sites de barrage. (Essai méthodologique)*. - Th. 3^{ème} cyc. Univ. Grenoble. 114 p.
- GOBERT A., TRAUTMANN J. (1979). - *Problèmes d'érosion et de sédimentation liés à l'implantation d'un lac de barrage hydroélectrique dans le bassin de RIOBATA (Colombie)*. - Rech. Geogr. Strasbourg. N10, pp. 35 - 54.
- GRAMBERG J. (1965) - *Axial cleavage fracturing a significant process in mining and geology*. *Engineering Geology* - T.1, N° 1, pp. 31 - 72.
- HALLER P. (1983) - *Structure profonde du Sahel tunisien. Interprétation géodynamique*. - Th. 3^{ème} cyc. Univ. de Franche-comté. 163 p.
- HASBANI N. (1978) - *Amélioration des propriétés mécaniques de deux argiles par voie chimique, particulièrement par l'emploi de cendres végétales*. - Th. 3^{ème} cyc. Univ. Grenoble. 143 p.
- JAUZEIN A. (1960) - *Carte géologique de la Tunisie. Ech. 1/50.000. Feuille N° 41, Jebel Mansour*. - Notice explicative, Tunis.
- JAUZEIN A. (1967) - *Contribution à l'étude géologique des confins de la dorsale tunisienne. (Tunisie septentrionale)*. *Ann. des min. et de la Géol. Tunis.*
- KIRALY L. (1978) - *La notion d'unité hydrogéologique. Essai de définition*. - Neuchâtel, Bull. centre d'hydro., N°2, p.83 -216.
- LABAYE G. (1948) - *Note sur le débit solide des cours d'eau*. - La houille blanche. Num. Spec. A. 1948.
- LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES DE FRANCE. (1967) - *Recommandations pour la reconnaissance géologique et géotechnique des tracés d'autoroutes*. - Novembre 1974. 122 p.
- LETOUZEY J., TREMOLLIÈRES P. (1980) - *Paleo-stress fields around the mediterranean since the Mesozoic derived from microtectonics : comparaisons with plate tectonic data*. - 26^e Congr. Geol. Internation. Paris, coll : CS, p. 261 - 268, BRGM edit.
- MAMOU A. (1981) - *Etude géologique et hydrogéologique de la région de Tamerza. Possibilités de création de retenues souterraines au Nord du Jebel El Ardha*. - Th. 3^{ème} cyc. Univ. Grenoble 194 p.
- MENARD (1983) - *Graphiques annuelles des débits de l'oued El Kebir et de la pluviométrie à Sidi Boubecker de 1922 - 1938*. - Tunis, DTP.

- MILLOT G. (1964) - *Géologie des argiles*. - Masson. Paris, 499 p.
- MOSER T.H., SEARS W.D. (1976) - *Sediment control at imperial Dam*. *Proc. Brd. Fed. Inter. Agency sedim. Conf., DENVER 1976*. pp. 2. 103 - 2. 123.
- MURRAY - RUST H. (1972) - *Soil erosion and reservoir sedimentation in a grazing area west of Arusha, Northern Tanzania*. - *Geografiska Annaler*, 5 A. A.3 - 4 pp. 325. 342.
- ODONNE F. (1981) - *Medélisation analogique du plissement lié à un décrochement de socle. Aspects expérimentaux et naturels d'une relation socle - Couverture*. - Th. 3^{ème} cyc. Univ. Grenoble. 146 p.
- PERTHUISOT J.P. (1977) - *Le "lambeau de Tlet" et la structure néotectonique de l'île de Jerba (Tunisie)* - *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 285, série D, pp. 1091 - 1093.
- PRICE N.J. (1966) - *Faults and joint development brittle and semi brittle rock*. - Pergamon press, Londres, t X, 176 p.
- RAMSEY J.G. (1967) - *Folding and fracturing of rocks*. - Mac.Grow Hill, New York, t. XVI, 568 p.
- RICHERT J.P. (1971) - *Mise en évidence de quatre phases tectoniques successives en Tunisie*. - *Notes serv. géol. Tunisie*. N° 34, pp.115 à 125.
- SHEPHARD L.E., BRYANT W.R., DUNLAP W.A. (1978) - *Consolidation characteristics and excess - pore water pressures of Mississippi delta sediments*. *Ann. off schore technol. Conf., Dallas*. 1978. Vol. 2, pp 1037 - 1048.
- SHOELLER (1936) - *Recherche d'eau dans les gorges de l'oued El Kebir*. - BIRH. Tunis. inédit.
- SIKIRDJI L. (1982) - *Etude sédimentologique et géotechnique des alluvions déposées dans la retenue du Chambon*. - Th. 3^{ème} cyc. Univ. Grenoble. 195 p.
- THEVENIN J. (1960) - *La sédimentation des barrages - réservoirs en Algérie et les moyens mis en oeuvre pour préserver les capacités* - *Ann. de l'ITBTP*. N°156, décembre 1960, pp. 1278 - 1292.
- TIXERONT J. (1951) - *Etude du ruissellement et de l'érosion dans le bassin de l'oued El Kebir* - Tunis. HAR.
- TIXERONT J. (1956) - *Oued El Kebir, transport des matériaux et ruissellement, période 1952 - 1956*. - Tunis. HAR.

- TRUILLET R., ZARGOUNI F., DELTEIL J. (1981) - *La tectonique tangentielle dans l'axe Nord-Sud (Tunisie centrale)* - , C.R. Somm.Soc.Geol.Fr., 1981, Fasc.2, pp. 50 - 540.
- TURKI M.M. (1977) - *Structure et évolution du massif Serdj-Bargou (Atlas tunisien central)*. - Notes du service géologique de Tunisie N°43, travaux de géologie tunisienne N°11.
- TURKI M., TRUILLET R. (1980) - *Mise en évidence d'un décollement de couverture à flectre plurikilométrique au Dj. Bargou*. - 8^e RAST 1980. Paris.
- VALI-KHODJEINI A., MOHAMED A. (1975) - *Étude du débit solide et de la sédimentation du barrage de SHAH-BANOUE - FARAH*. - Bull.Sci.Hydro., E.U., vol.20, N°2, pp. 223 - 231.
- VIALON P., RUHLAND M., GROLIER J. (1976) - *Eléments de tectonique analytique*. - Edit. Masson. Paris.
- VIVIAN H. (1979) - *Erosion et transports solides du haut Drac, en amont du Dautet*. - Rapport Glaciolab. Univ. Grenoble.
- WILLIS B, WILLIS R. (1934). - *Geologic structures*. - Mac Graw Hill, New York, 544 p.
- ZARGOUNI F., DELTEIL J., TRUILLET R. (1979) - *Interprétation des éléments structuraux dans le cadre d'une genèse polyphasée. (Tunisie centrale)*. - 7^e RAST. Lyon.



A N N E X E

Etude minéralogique des formations meubles du bassin versant et du dépôt d'envasement

1- Détermination des argiles par diffraction des rayons X.

a - Méthode de préparation des lames orientées.

La détermination des minéraux argileux par diffraction des rayons X s'effectue sur des agrégats préalablement orientés de façon que les rayons incidents rencontrent le maximum de plans réticulaires caractéristiques sur leurs trajectoires au cours de l'enregistrement. Nous avons adopté la méthode utilisée au laboratoire de minéralogie de l'Institut Dolomieu de Grenoble modifiée par Christine LAVERNE. La préparation d'une lame orientée comprend les étapes suivantes :

- tamisage à l'eau et récupération des particules inférieures à 50 μ m.
 - broyage
 - attaque à l'acide chlorhydrique dilué (10%) jusqu'à arrêt de l'effervescence.
 - lavage de l'échantillon à l'eau distillée jusqu'à obtention d'un pH voisin de 7.
 - destruction de la matière organique par attaque avec une solution diluée (10%) d'eau oxygénée.
- La fin de l'attaque est obtenue lorsque la formation de petites bulles à la surface du mélange s'arrête.
- centrifugation à différentes vitesses avec passage aux ultrasons jusqu'à obtention d'un liquide surnageant trouble. Ce liquide trouble est centrifugé.

Le résidu est étalé sur trois lames rainurées qui seront passées à l'enregistrement, la première à l'état normal, la deuxième après chauffage à 490° pendant deux heures, et la troisième après exposition pendant 24 heures aux vapeurs de l'éthylène glycol.

b - Comportement des argiles en diffraction des rayons X.

La comparaison des trois diffractogrammes pour un échantillon donné permet en se basant sur le déplacement (suite au gonflement) ou la disparition de certains pics, permet la détermination des minéraux argileux. La détermination des principaux minéraux argileux est résumée dans le tableau I. Le comportement d'un interstratifié régulier est égal à la somme des comportements de chacun des feuilletts élémentaires. Il faut noter que tous les pics correspondant à ces minéraux correspondent à des espaces interfoliaires supérieurs à 22 Å ou un angle double de diffraction $2\theta > 4$ degrés. Suite à l'absence de périodicité dans les édifices interstratifiés irréguliers il ne peut se former pour ces minéraux de réflexions comparables à celles observées pour les autres types de minéraux.

2 - Prise d'échantillon et traitement

Pour la réalisation de l'étude nous avons prélevé 11 échantillons provenant du bassin versant, du lit de l'oued, de la retenue et d'une terrasse à l'aval.

3 - Problèmes d'interprétation des diffractogrammes et de détermination des minéraux argileux.

* Problèmes techniques

- Borne 2θ inférieure : l'appareil utilisé ne permettait pas de commencer l'enregistrement à un angle 2θ voisin de 2 degrés. Tous les enregistrements obtenus ont été commencés à un angle $2\theta = 4^\circ$. Cette limitation nous a privé de tous les renseignements relatifs aux interstratifiés réguliers.

- Utilisation des ultrasons pour la défloculation.

Le mode opératoire utilisé pour la préparation des agrégats orientés, conseillait l'utilisation des ultrasons entre deux centrifugations successives pour favoriser et accélérer la défloculation des particules argileuses. Nous n'avons pas pu disposer d'un appareil à ultrasons pendant la réalisation de ce travail.

Cet handicap s'est repercuté sur la qualité des spectres obtenus. En effet, nous avons été souvent gênés par l'intensité des bruits de fond et la faiblesse de certains pics caractéristiques. Cette faiblesse est due au fait que la flocculation empêche les particules argileuses de présenter leurs plans réticulaires caractéristiques avec la densité optimale nécessaire à l'obtention de pics intenses et individualisés.

* Problèmes liés aux structures des minéraux argileux

Ces échantillons, dont l'emplacement figure sur la carte lithostratigraphique du bassin versant (fig.VII.2) peuvent être classés en quatre groupes comme suit :

Groupe d'échantillons	Numéro de l'échantillon	Désignation de l'échantillon et observations.
Bassin versant	E ₁	Marnes compactes de la formation SOUAR - Priabonien
	E ₂	Marnes et Argiles de la formation El Haria - Paléocène.
	E ₃	Marnes de la formation Fahdene Cénomaniens
Lit de l'oued	E ₄	Sable graveleux du lit majeur de l'oued
	E ₅	Sable graveleux du lit majeur de l'oued
Retenue	E ₆	Dépôt argileux de la crue de janvier 81 dans la partie aval de la retenue.
	E ₇	Dépôt limoneux de la crue de janvier 81 dans la partie amont de la retenue.
	E ₈	Echantillon pris à 0,1 m dans le sondage S ₂ effectué dans la retenue.
	E ₉	Echantillon pris à 10 m de profondeur dans le sondage S ₂
Aval du barrage	E ₁₀	Echantillon pris à 14,5 m dans le sondage S ₂
	E ₁₁	Echantillon provenant d'une terrasse très récente à l'aval du barrage. Sédiment de débordement.

Echantillon	M I N E R A L S									
	Montmorillonite	Kaolinite	Chlorite	Illite	Quartz	Calcite	Dolomie	Glauconite		
Marnes Souar	X	X			X	X				
Marnes El Haria	X		X	X (peu)	X	X				
Marnes Fahdene	X	X		X (très peu)	X	X				
BS 22	X	X		X (très peu)	X	X		X		
BS 29	X	X		X (peu)	X	X		X		
Vases 81	X	X	X (peu)		X	X		X		
Limon 81	X	X			X	X		X		
S ₂ 0.1 m	X	X			X	X				
S ₂ 10 m	X	X	X (peu)		X	X				
S ₂ 14,5 m	X	X	X (très peu)		X	X		X		
Terrasse aval	X	X	X (peu)		X	X				

Tableau A - Espèces minéralogiques des échantillons étudiés.

Pour chacun de ces échantillons trois lames orientées et une lame de poudre (fraction < 40 m de l'échantillon total) ont été préparées.

Pour les lames orientées, les trois spectres habituels : normal, chauffé et glycol, ont été réalisés. Un diagramme de poudre fût exécuté pour chaque échantillon.

- Indétermination kaolinite, chlorite.

La chlorite et la kaolinite possèdent des pics superposés sinon très rapprochés. Ceci est le cas des pics : 3,55 Å. Cette superposition nous a posé quelques problèmes de détermination pour certains échantillons citons l'exemple de E₆ (fig. A) et E₁₁ (fig. B).

- Structure des montmorillonites

Dans la plupart des cas, les pics relatifs à la montmorillonites sont étalés et de forme 'patatoïde' contrairement à ceux des autres minéraux presque toujours minces et étirés. Nous pensons que ceci pourrait être expliqué par les deux faits suivants :

. Les feuillets de montmorillonites pourraient être interstratiés selon un arrangement irrégulier avec d'autres feuillets d'espèces minérales différentes.

. La montmorillonite étant un minéral très gonflant, ses feuillets pourraient présenter des degrés de gonflement différents selon les cations adsorbés et par la suite avoir des distances réticulaires voisines mais suffisamment différentes pour donner un faisceau de réflexion et non une réflexion individualisée.

Au stade actuel d'étude, il nous a été impossible d'éclaircir ce problème.

f - Résultats de l'étude.

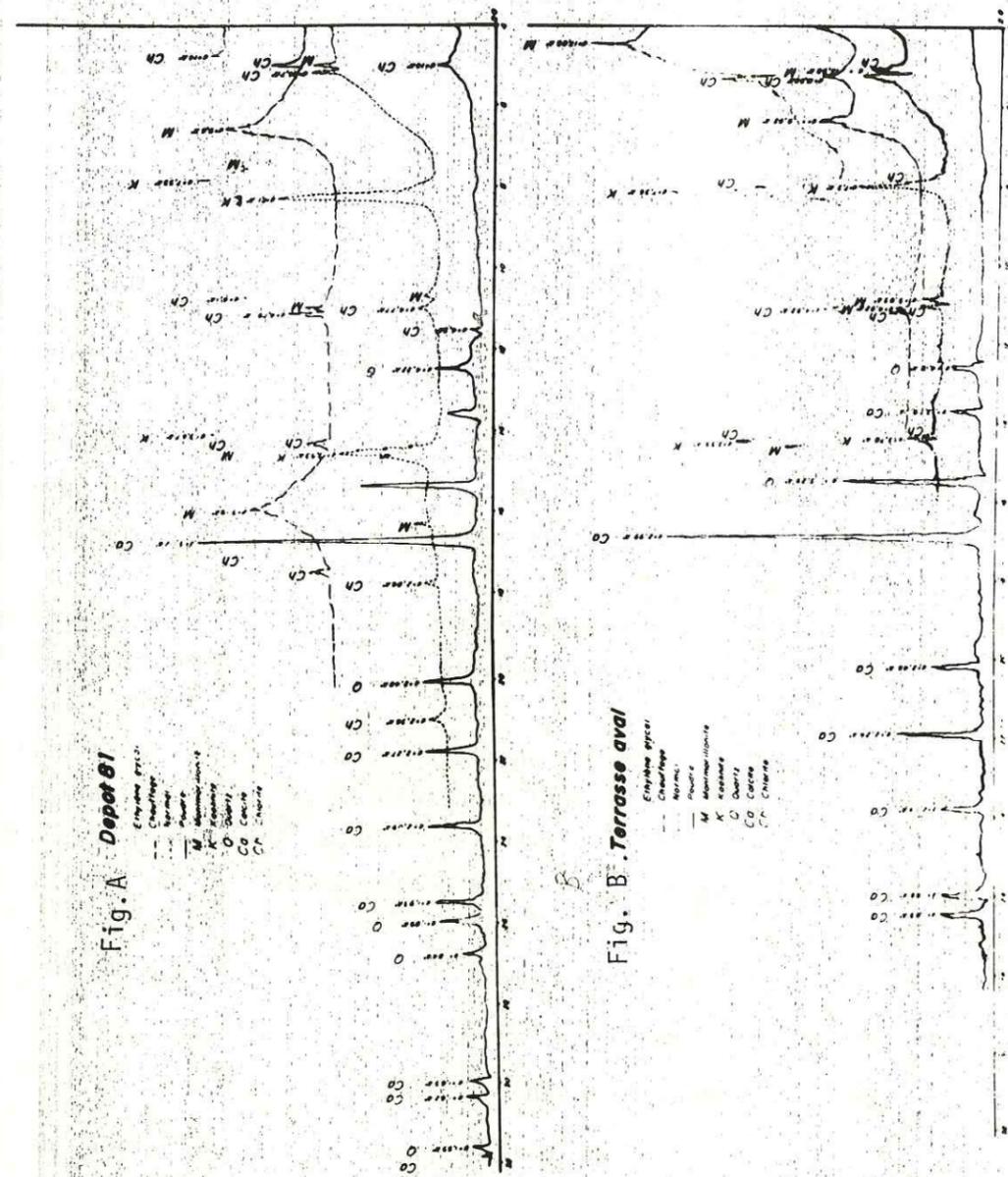
* Espèces minéralogiques

Le Tableau. A présente les associations de minéraux argileux ou non détectés pour chaque échantillon.

Ce tableau appelle les constatations suivantes :

. la montmorillonite constitue le minéral argileux principal dans la totalité des échantillons (45 à 90 % environ)

. la chlorite est le minéral secondaire sauf pour les marnes paléocènes et le dépôt de 1981 où elle est en proportion semblables à la montmorillonite (environ 40%).



. Illite et la kaolinite, présentés en très faibles proportions, constituent des minéraux accessoires.

. les renseignements obtenus concernant les phyllosilicates ne doivent pas masquer un fait important à savoir que la calcite (identifiée dans tous les diagrammes de poudre) entre pour une part importante dans la composition de tous les échantillons comme le montre le tableau B.

Echantillon	Marnes Souar.	El Ha-ria	BS29	Vases 81	Limons 81	S ₂ 0,1m	Terrasse Aval
Teneur en carbonates	48%	40%	80%	34%	56%	45%	44%

Le tableau B. - Teneurs en carbonates de certains échantillons étudiés.



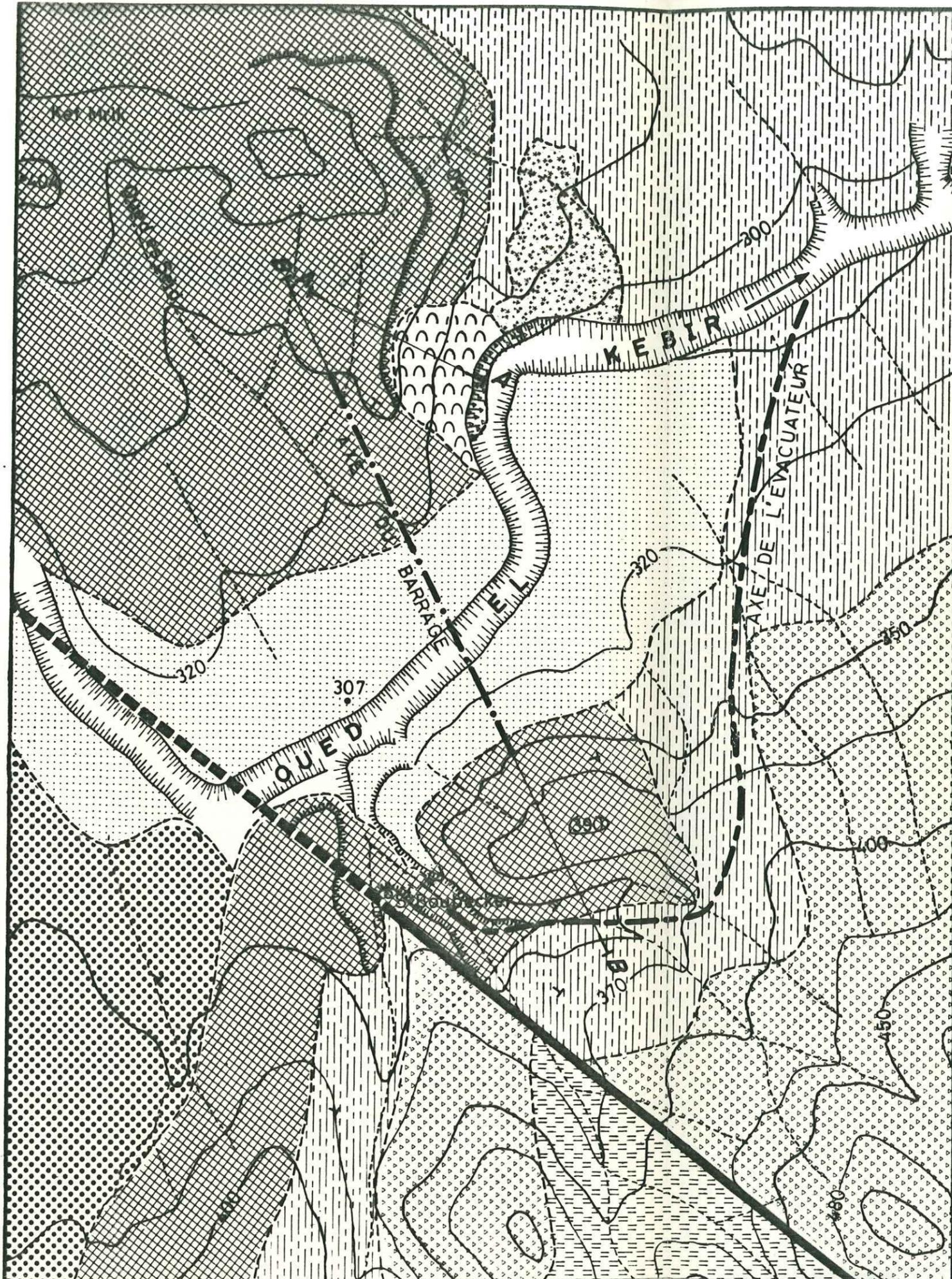


Fig.VI.A2

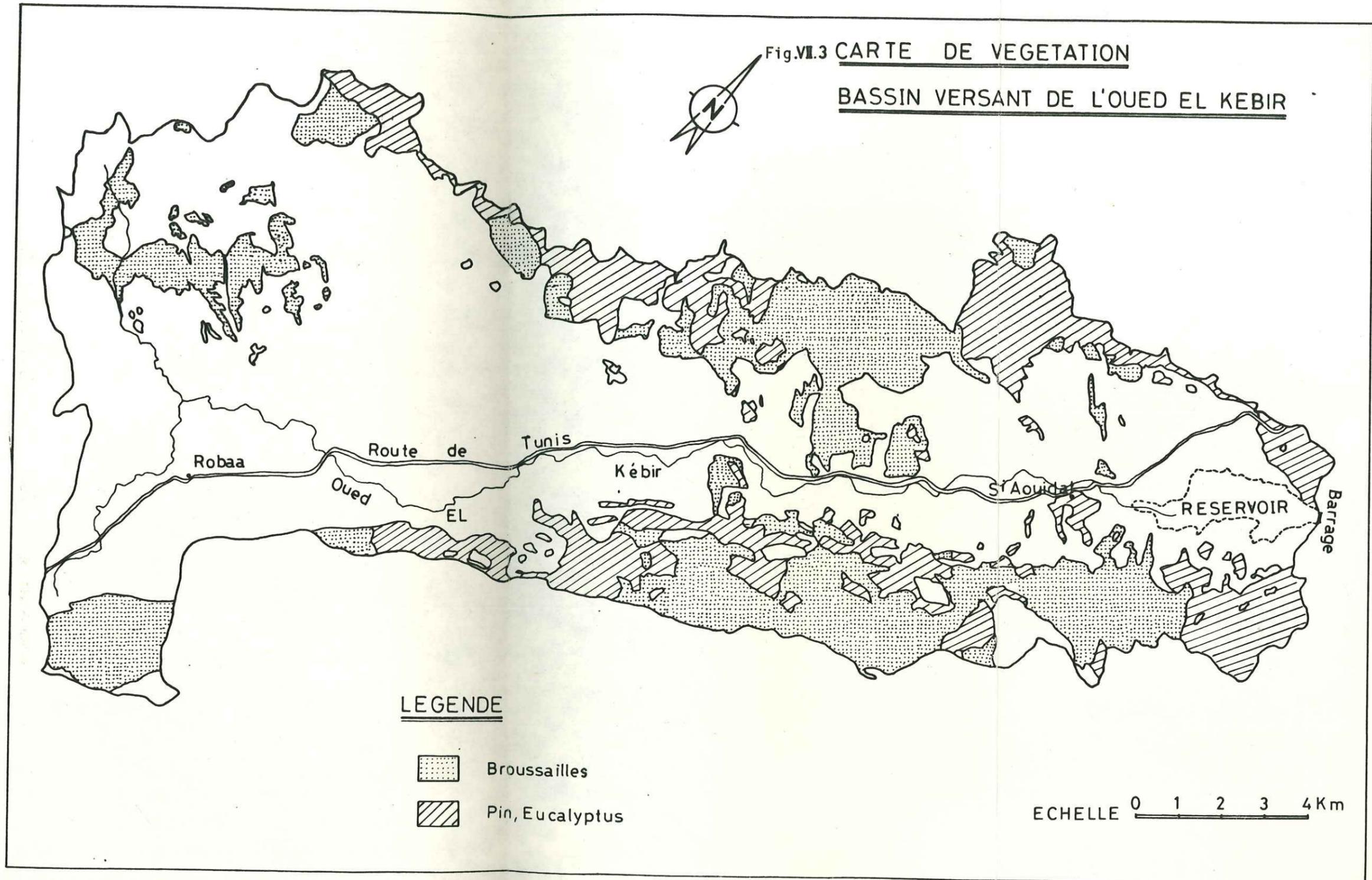
SITE AVAL CARTE GEOLOGIQUE

-  Eboulis
-  Paquets écroulés
-  Basse terrasse
-  Formation Souar
-  Formation Mètlaoul
-  Formation El Haria
-  Formation Abiod
-  Formation Fahdène
-  Faille



Fig.VII.3 CARTE DE VEGETATION

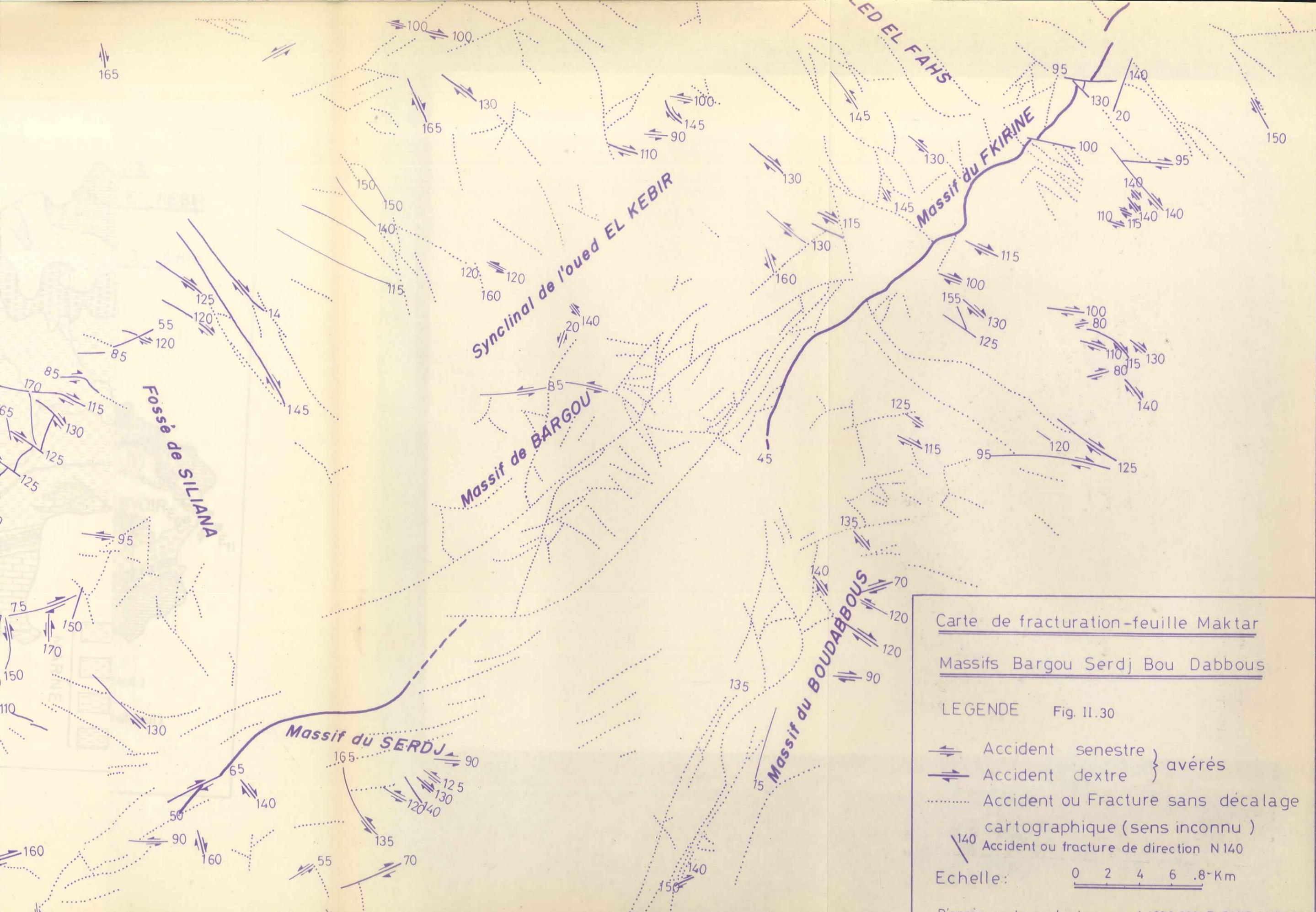
BASSIN VERSANT DE L'OUED EL KEBIR



LEGENDE

-  Broussailles
-  Pin, Eucalyptus

ECHELLE 0 1 2 3 4 Km



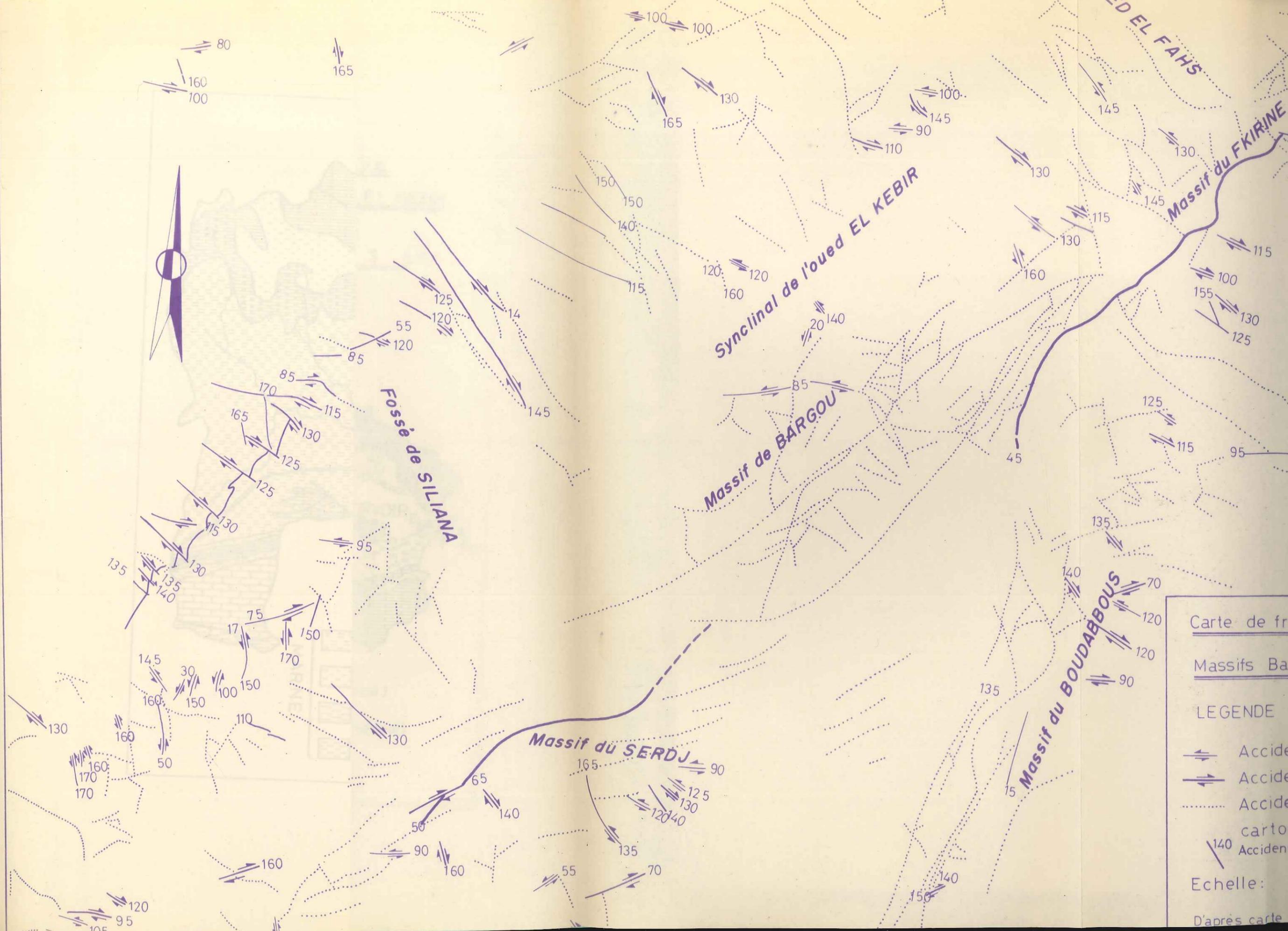
Carte de fracturation-feuille Maktar
Massifs Bargou Serdj Bou Dabbous

LEGENDE Fig. II.30

Accident senestre } avérés
 Accident dextre } avérés
 Accident ou Fracture sans décalage cartographique (sens inconnu)
 Accident ou fracture de direction N140

Echelle: 0 2 4 6 .8-Km

D'après carte géologique au 1/200.000 P. GUIRAND 1968



Carte de fra

Massifs Bar

LEGENDE

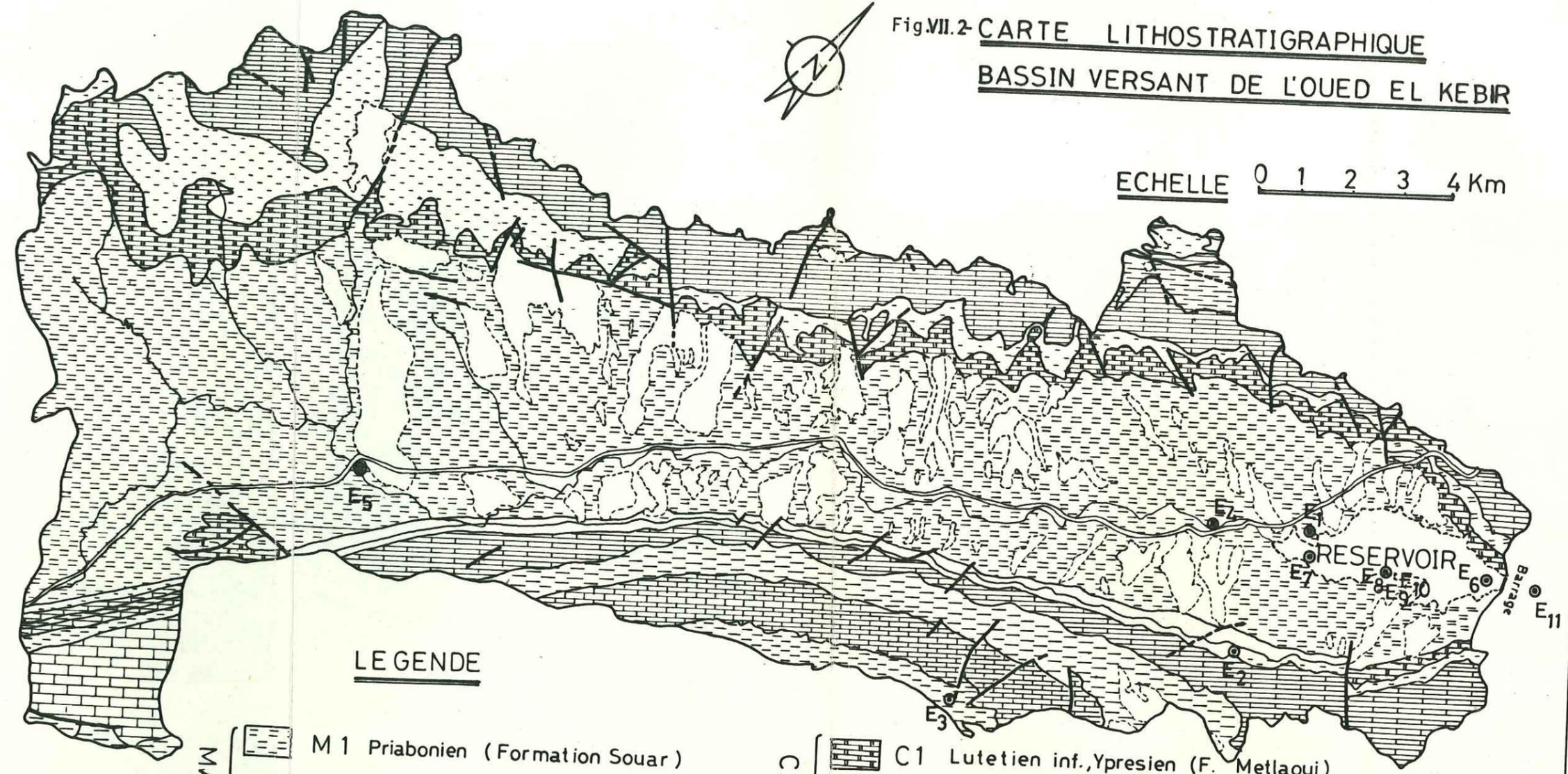
-  Accider
-  Accider
-  Accider
-  cartog
-  Accident c

Echelle:

D'après carte or

Fig.VII.2- CARTE LITHOSTRATIGRAPHIQUE
 BASSIN VERSANT DE L'OUED EL KEBIR

ECHELLE 0 1 2 3 4 Km



LEGENDE

- MARNE
- M 1 Priabonien (Formation Souar)
 - M 2 Paléocène, Maestrichtien Sup. (Formation EL Haria)
 - M 3 Campanien inf., Santonien Sup. (Formation Aleg)
 - M 4 Coniacien, Albien (Formation Fahdène)

- CALCAIRE
- C1 Lutetien inf., Ypresien (F. Metlaoui)
 - C2 Maestrichtien inf., Campanien Sup. (F. Abiod)
 - C3 Santonien inf., Coniacien, Turonien (F. Bahloul)
 - C4 Aptien Sup. (F. Serdj)