

REPUBLIQUE DE LA TUNISIE

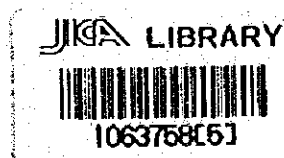
PROJET DE POMPAGE TUBERIN ET DE NOS
ETUDES GEOLOGIQUES COMPLEMENTAIRES

AGOUT 1980

LE BUREAU NATIONAL DE COOPERATION TECHNIQUE

REPUBLIQUE DE LA TUNISIE

**PROJET DE POMPAGE TURBINAGE DE KASSEB
ETUDES GEOLOGIQUES COMPLEMENTAIRES**



AOUT 1980

AGENCE JAPONAISE DE COOPERATION INTERNATIONALE

国際協力事業団

受入 月日	84. 4. 17	417
登録No.	03399	64.3
		MPN

AVANT-PROPOS

C'est un grand plaisir pour moi de pouvoir présenter le rapport intitulé "Etudes Géologiques – Projet de Pompage Turbinage de Kasseb" au Gouvernement de la République de la Tunisie.

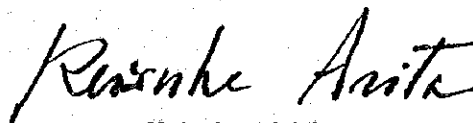
Le présent rapport comprend le résultat des campagnes d'études géologiques qui se déroulaient à Tunis et au site de Kasseb situé au Nord-Ouest de la Tunisie. Ces campagnes ont été entreprises en trois étapes: la première pour la période du 27 février au 27 mars 1979, la deuxième pour la période du 9 au 27 juillet 1979 et la troisième pour la période du 1^{er} au 28 décembre 1979, par les équipes d'étude envoyées par l'Agence Japonaise de Coopération Internationale, répondant à la demande faite au Gouvernement du Japon par le Gouvernement de la République de la Tunisie.

Les équipes d'étude, dirigées par Monsieur Tetsuro KOBAYASHI (Electric Power Development Company, LTD.), ont eu une série de réunions étroites avec les personnels en charge des autorités tunisiennes pour la collecte des renseignements nécessaires, et fait des reconnaissances sur le terrain et des analyses des données obtenues.

Je souhaite sincèrement que le présent rapport puisse être d'une utilité comme ouvrage de référence de base pour la réalisation du projet de Kasseb.

Enfin je voudrais exprimer particulièrement mes remerciements envers les personnels intéressés du Gouvernement de la République de la Tunisie de leurs collaborations étroites données à nos équipes d'étude.

Août 1980



Keisuke ARITA

Président Directeur Général

Agence Japonaise de Coopération Internationale

LETTRE DE TRANSMISSION

Monsieur Keisuke ARITA
Président Directeur Général
Agence Japonaise de Coopération Internationale

Sujet : Projet de pompage turbinage de Kasseb
Rapport final sur les études géologiques complémentaires

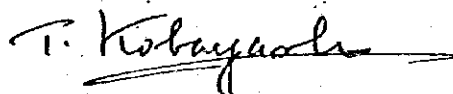
Monsieur le Président,

Nous avons l'honneur de vous transmettre ci-joint notre rapport final sur les études géologiques complémentaires entreprises en deuxième phase dans le cadre du projet de Kasseb. Les études réalisées en première phase ont fait l'objet d'un rapport qui vous a été remis en novembre 1978 et qui s'intitulait "Etude sur le projet de pompage turbinage de Kasseb".

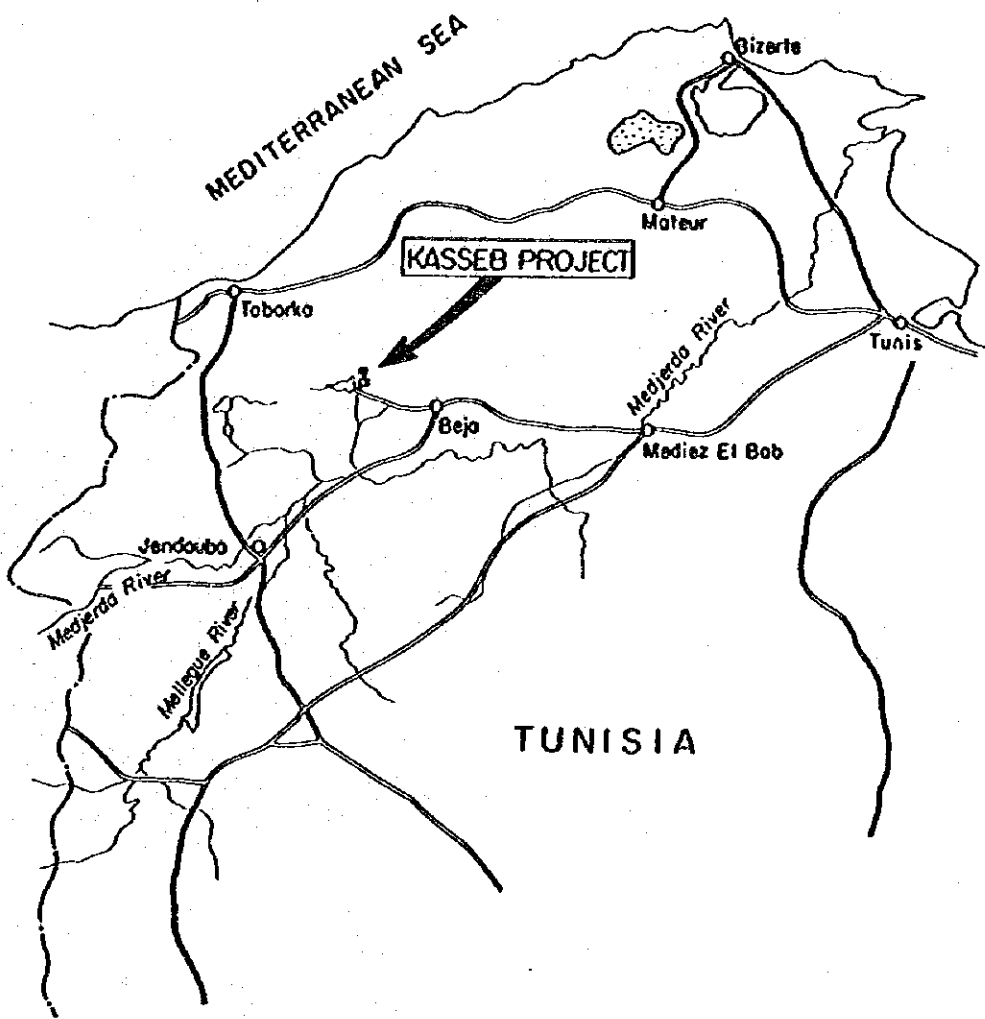
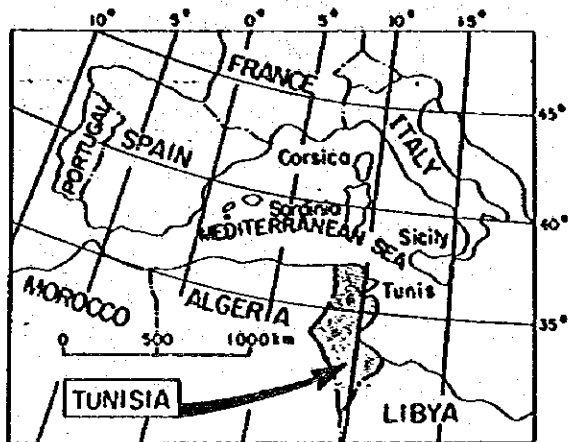
Les études ci-dessus ont permis de confirmer la faisabilité du projet de Kasseb. Il est à noter, toutefois, qu'il comprend des problèmes sur l'exécution qui doivent être résolus dans la phase des études détaillées. Le calendrier de réalisation du projet fera l'objet d'une étude dans le prochain programme d'équipement en moyens de production-transport au-delà de 1987 de la Société Tunisienne de l'Electricité et du Gaz (STEG).

Nous espérons que vous trouverez le tout à votre entière satisfaction et vous prions de recevoir, Monsieur le Président, l'assurance de notre haute considération.

Août 1980

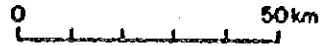


Tetsuro KOBAYASHI
Chef de la mission d'études géologiques
complémentaires du Projet de Kasseb



LEGEND

- Boundary line of country
- ==== Main road
- ~~~~~ River
- o City



KEY AND LOCATION MAP

**CARACTERISTIQUES GENERALES DU PROJET
(OUVRAGES DE GENIE CIVIL)**

1. RESERVOIR SUPERIEUR

Superficie du bassin versant	1,3 km ²
Retenue normale	Cote 430
Niveau minimum de l'eau	Cote 412
Marnage utile	18 m
Capacité grosse du réservoir	6,36 millions de m ³
Capacité utile du réservoir	5,04 millions de m ³

2. BARRAGE SUPERIEUR

Type	Barrage en enrochements
Cote de crête	Cote 433
Hauteur	55 m
Longueur de crête	375 m
Volume	1.981.800 m ³

3. RESERVOIR INFERIEUR

Superficie du bassin versant	101,0 km ²
Retenue normale	Cote 288,60
Niveau minimum de l'eau	Cote 268,60
Marnage utilisé dans le projet	15 m

4. PRISE D'EAU AMONT

Type	Type tulipe
------	-------------

5. GALERIE D'AMENEE

5.1 Galerie No. 1

Longueur	619,5 m
Diamètre intérieur	6,0 m

5.2 Galerie No. 2

Longueur	627,5 m
Diamètre intérieur	6,7 m

6. CONDUITE FORCEEE

6.1 Conduites No. 1 et No. 2

Longueur	100 m
Diamètre intérieur	6,0 - 3,9 m

6.2	Conduites No. 3 et No. 4	
	Longueur	100 m
	Diamètre intérieur	6,7 - 4,5 m
7.	CHAMBRE D'ÉQUILIBRE	
	Longueur	57,13 m
	Diamètre intérieur de puits	No. 1 : 7,0 m No. 2 : 8,3 m
8.	GALERIE DE FUITE BLINDEE D'ACIER	
8.1	Galleries No. 1 et No. 2	
	Longueur	100 m
	Diamètre intérieur	4,2 - 6,0 m
8.2	Galleries No. 3 et No. 4	
	Longueur	100 m
	Diamètre intérieur	4,8 - 6,7 m
9.	GALERIE DE FUITE NON BLINDEE	
9.1	Galleries No. 1 et No. 2	
	Longueur	1.228,88 m
	Diamètre intérieur	6,0 m
9.2	Galleries No. 3 et No. 4	
	Longueur	1.184,08 m
	Diamètre intérieur	6,7 m
10.	PRISE D'EAU AVAL	
	Type	Type trompe d'entrée
11.	PRODUCTION D'ENERGIE	
	Cote normale pondérée du réservoir supérieur	Cote 424,0
	Cote normale pondérée du réservoir inférieur	Cote 281,0
	Hauteur de chute brute de design à la puissance nominale des groupes	135,4 m
	Débit maximum équipé	308,0 m ³ /sec
	Puissance totale installée	350 MW

TABLE DES MATIERES

		Page
GENERALITES		
0.1	Sommaire du projet	0-1
0.2	Historique et mandat d'étude	0-1
0.3	Objectifs des études	0-4
0.4	Conclusions	0-4
0.5	Recommandations	0-10
Chapitre 1.	ETUDES GEOLOGIQUES	
1.1	Généralités	1-1
1.2	Géologie globale du site d'aménagements	1-2
1.3	Fondations des ouvrages	1-5
Chapitre 2.	MATERIAUX DE CONSTRUCTION ET LES RESULTATS D'ESSAIS	
2.1	Généralités	2-1
2.2	Matériaux imperméables	2-1
2.3	Matériaux d'enrochement et matériaux d'agrégats pour le béton	2-2
Chapitre 3.	ANALYSES SUR L'ENVASEMENT DANS LE RESERVOIR INFERIEUR DE KASSEB	
3.1	Généralités	3-1
3.2	Mesures d'envasement	3-1
3.3	Analyses	3-2
3.4	Estimation du volume d'envasement futur	3-3
3.5	Prévision de la forme d'envasement futur	3-5
Chapitre 4.	ETUDE PRELIMINAIRE ET PROGRAMME DES TRAVAUX	
4.1	Ouvrages de génie civil	4-1
4.2	Méthode des travaux	4-5
4.3	Programme des travaux	4-8
Chapitre 5.	ESTIMATION DES COUT D'AMENAGEMENTS	
5.1	Conditions de base	5-1
5.2	Conditions d'estimation dans le rapport de 1978	5-1
5.3	Réestimation des coûts d'aménagements	5-2

FIGURES :

Figures 1-1	1-11	Cartes géologiques
Figures 3-1	3-3	Profils d'envasement
Figures 4-1	4-7	Dessins des ouvrages de génie civil

APPENDICES :

1. Coupes géologiques	21	feuilles
2. Essais d'absorption	17	feuilles
3. Coupes de terrain	20	feuilles

GENERALITES

- 0.1 SOMMAIRE DU PROJET**
- 0.2 HISTORIQUE ET MANDAT D'ETUDE**
- 0.3 OBJECTIFS DES ETUDES**
- 0.4 CONCLUSIONS**
- 0.5 RECOMMANDATIONS**

GENERALITES

0.1 SOMMAIRE DU PROJET

Le site de l'aménagement se situe à une centaine de km à l'ouest de la ville de Tunis et à environ 20 km au nord-ouest de Béja. Le débit nécessaire à la production de l'énergie électrique de la centrale est fourni par le pompage de l'eau depuis le réservoir inférieur formé par le barrage existant de Kasseb jusqu'au réservoir supérieur qui sera formé par l'endiguement de la cluse comprise entre le Djebel El Fahama et le Djebel Bou Sattar.

Le niveau de la retenue normale du réservoir supérieur a été déterminé à la cote 430 compte tenu du col situé à la cote 435 au sud de la cuvette. Le niveau minimum de la retenue a été déterminé à la cote 412. Le volume utile du réservoir est de 5,04 millions de mètres cubes. Le réservoir inférieur dont la retenue normale se situe à la cote 288,6 est alimenté en eau par un rapport annuel moyen de 45,1 millions de mètres cubes. C'est un réservoir pour l'alimentation en eau potable des habitants de la région de Tunis. La SONEDE, exploitant de ce réservoir, envisage de sortir l'eau au débit constant de 1,40 m³/sec.

Le marnage pour pomper l'eau du réservoir inférieur a été déterminé à 15 mètres dans le rapport de la JICA de novembre 1978.

La centrale du type souterrain sera construite dans le noyau (calcaire dur) du massif d'El Fahama. Elle sera équipée d'une puissance totale installée de 350 MW consistés en deux groupes de 75 MW chacun et encore en deux groupes de 100 MW chacun. Ces groupes seront mis en service par étape au fur et à mesure de l'augmentation de la puissance maximum appelée. Dans le programme établi par l'étude de 1978, deux premiers groupes de 75 MW sont à développer en première phase, et les deux derniers groupes de 100 MW en deuxième phase. Comme les travaux en deuxième phase doivent être exécutés sans arrêter le fonctionnement des deux premiers groupes, presque tous les travaux de génie civil (98%) doivent être terminés au cours de la première phase, en laissant seulement le bétonnage pour les deux derniers groupes à exécuter en deuxième phase.

L'énergie produite sera transportée par deux lignes 225 kV à simple terre, l'une au poste de M'Nihla (110 km) et l'autre au poste de Jendouba (120 km).

Les caractéristiques générales du projet de Kasseb sont montrées dans le tableau en tête.

0.2 HISTORIQUE ET MANDAT D'ETUDE

En 1978 l'étude de faisabilité du projet de Kasseb a été menée par une mission envoyée par l'Agence Japonaise de la Coopération Internationale (JICA), et le rapport d'étude a été soumis à la STEG en novembre 1978. Ledit rapport a fait ressortir entre autres les problèmes suivants faisant l'objet des études géologiques complémentaires:

- Examen de l'imperméabilité du terrain de la cuvette supérieure et de la stabilité du talus

- Examen de la stabilité du terrain de fondation du barrage et l'étude sur le mode de traitement de fondation
- Choix de l'emplacement de la prise d'eau aval en fonction des mesures d'envasement dans le réservoir inférieur

Les études ci-dessus nécessitent l'exécution des travaux géologiques, des essais en place et en laboratoire sur les échantillons ainsi que d'une mesure d'envasement dans le réservoir inférieur.

Suivant la recommandation ci-dessus, le Gouvernement de la Tunisie a demandé en janvier 1979 au Gouvernement du Japon d'entreprendre les services d'ingénierie tels que la programmation des travaux d'étude à effectuer par la STEG, la préparation des spécifications des sondages et des essais ainsi que les analyses et interprétation des résultats acquis à partir de ces travaux d'étude.

Répondant à cette demande, la JICA a envoyé par étape trois missions d'études composées des experts de l'Electric Power Development Company, LTD. pour l'exécution de ladite ingénierie. Leurs membres et activités sont comme suit:

1) 1ère mission

o Membres:

M. Tetsuro KOBAYASHI	Chef de la mission
M. Taketoshi FUJITA	Ingénieur géologue
M. Shinobu OGATA	Ingénieur de génie civil

o Période:

Du 27 février au 27 mars 1979

o Activités:

- Détermination des emplacements et des modes opératoires des sondages carottés, des puits de reconnaissance et des essais en place
- Préparation des spécifications pour le sondage carottés, l'essai d'absorption, la reconnaissance de la surface du terrain et le prélèvement des échantillons et les essais en laboratoire
- Instructions sur la cartographie topographique aux échelles 1/500 et 1/1.000
- Instruction sur la matérialisation des profils d'envasement
- Etablissement du calendrier des travaux d'études

Suivant les instructions ci-dessus, il a été déterminé d'effectuer la cartographie

topographique par la STEG, les sondages et puits de reconnaissance ainsi que la mesure d'envasement par l'EGTH du Ministère de l'Agriculture et les essais sur les échantillons par le Laboratoire de Ben Arous. Les travaux au site ont démarré fin avril 1979.

2) 2ème mission

o Membres:

M. Taketoshi FUJITA	Ingénieur géologue
M. Shinobu OGATA	Ingénieur de génie civil

o Période:

Du 9 au 27 juillet 1979

o Activités:

- Instructions et conseils sur les travaux et essais en laboratoire en cours**
- Ajustement du programme des travaux compte tenu de l'état d'avancement des sondages carottés, des puits de reconnaissance et des essais au laboratoire**
- Instructions sur les profils de vérification compte tenu des désaccords entre le plan topo et le résultat acquis à partir de la mesure d'envasement**

3) 3ème mission

o Membres:

M. Tetsuro KOBAYASHI	Chef de la mission
M. Hiroshi SUETOMI	Ingénieur géologue
M. Shinobu OGATA	Ingénieur de génie civil

o Période:

Du 1er au 28 décembre 1979

o Activités:

- Reconnaissance géologique de la surface du terrain**
- Etablissement des coupes géologiques des sondages et des puits ainsi que l'analyse des résultats des essais d'absorption**
- Etablissement du programme des essais au laboratoire qui ne sont pas encore entamés**

- Localisation du sondage SU-11 sur l'emplacement de la prise d'eau aval
- Interprétation des résultats acquis à partir des sondages carottés et des essais en laboratoire
- Réunion au siège de la STEG pour l'établissement du rapport final

De retour au Japon de la deuxième mission, l'avancement des travaux et des essais au laboratoire a été régulièrement communiqué par la STEG au siège de l'EPDC pour la bonne marche des études au Japon.

0.3 OBJECTIFS DES ETUDES

En se basant sur les résultats des reconnaissances géologiques de la surface du terrain, des sondages carottés et des puits de reconnaissance ainsi que des essais en place et en laboratoire et de la mesure d'envasement dans le réservoir inférieur, la présente étude a pour but de:

- 1) dépouiller l'imperméabilité du terrain de la cuvette supérieure,
- 2) étudier le mode de traitement de la fondation du barrage en fonction de la capacité portante et de la résistance au cisaillement du terrain de fondation,
- 3) localiser les carrières et les zones d'emprunt des matériaux de construction,
- 4) déterminer l'emplacement de la prise d'eau aval en fonction du volume d'envasement futur dans le réservoir inférieur,
- 5) reviser les dessins des ouvrages (depuis la prise d'eau amont jusqu'à la prise d'eau aval), et
- 6) reviser les coûts d'aménagements en fonction de la modification des ouvrages ci-dessus.

0.4 CONCLUSIONS

0.4.1 Observations sur les conditions géologiques du terrain

Les dépouillements des plans géologiques établis en se basant sur la reconnaissance de la surface du terrain ainsi que les résultats acquis à partir des sondages carottés, des puits de reconnaissance et des essais en place et en laboratoire effectués sur les échantillons prélevés dans le terrain de fondation du barrage et dans les zones d'emprunt ont conduit à bien confirmer du point de vue géologique la fiabilité de la construction du barrage et des autres ouvrages sur le site de Kasseb. Ce qui suit est un sommaire des caractéristiques du terrain de chaque ouvrage.

(1) Zone du barrage

La rive gauche de l'emplacement du barrage présente un versant rapide. Elle est consistée en calcaire et marne-calcaire très durs qui sont visibles en affleurements. D'autre part, la rive droite est consistée en marne et couverte des dépôts et des brèches-calcaires. Les brèches

ne sont pas fiables pour la fondation du barrage parce qu'elles n'ont pas d'imperméabilité, ni même de résistance au cisaillement. D'ailleurs, il se peut que des fentes et une ancienne couverture ou une terre résiduelle soient intercalées entre ces brèches et le fond rocheux en y formant une couche perméable. Par conséquent l'alignement de l'axe du barrage (partie noyau central) proposé dans le rapport de novembre 1978 qui consiste à appuyer le noyau central sur la marné en amont des éboulis de brèches calcaires est jugé tout raisonnable.

Toutefois, si une étude ultérieure confirme que ces brèches ne seront pas nettement déformées par le poids du barrage, elles pourront être utilisées pour la fondation des enrochements.

Les résultats des sondages carottés, des puits de reconnaissance et des essais d'absorption ont montré la nécessité d'une excavation de 2 à 20 mètres de profondeur pour le noyau central, par rapport à une excavation de 2 à 8 mètres de profondeur proposée dans le rapport de novembre 1978.

Les observations des carottes prélevées faissent supposer la présence des failles. La répartition des roches visibles en affleurements permet de présumer que les failles, présentant une pente rapide, s'allongeraient près du ruisseau et sous la rive droite.

(2) Zones de la prise d'eau amont et du réservoir supérieur

Des carottes prélevées dans les emplacements du barrage et de la prise d'eau amont ont présenté de mauvais aspects à cause des éboulements et des failles. Toutefois, les essais d'absorption constatent que le fond rocheux et même les zones de failles sont très peu perméables.

(3) Coils de la cuvette supérieure

Compte tenu des résultats acquis à partir des sondages carottés, des puits de reconnaissance et des études sur le terrain, on peut constater que les coils de la cuvette supérieure sont constitués des terrains imperméables. Des glissements du talus sur une grande échelle du réservoir supérieur ne seront pas provoqués même par les variations quotidiennes du plan d'eau du réservoir.

(4) Zone de la centrale souterraine

Le pourcentage de prélèvement des carottes d'une longueur supérieure à 10 cm sur tout le tronçon du sondage SU-7 est de 63%. Comme terrain de la centrale souterraine, cette valeur se classera dans un groupe assez élevé. De ce fait et vu les surfaces excavées des calcaires qui se trouvent sur les deux rives du barrage existant de Kasseb, il est possible de fouiller la caverne de la centrale dans le noyau du massif d'El Fahama.

(5) Zone de la prise d'eau aval

Les terrains de la prise d'eau aval et de la galerie de fuite sont constitués des marnes en tassement mince. L'altération à l'air les ont faits tendres jusqu'au profond. D'ailleurs, on trouve un petit jaillissement d'eau dans le trou de sondage SU-4. Par conséquent lors de l'excavation de la galerie de fuite il faudrait faire le drainage ou prendre des autres mesures appropriées pour prévenir la détérioration du terrain due aux eaux jaillies ou infiltrées.

(6) Eboulements

Le massif qui se dresse près de l'embouchure de l'oued El Brik fait apparaître beaucoup de cicatrices d'éboulement, quoique petites. Des débris solides provenant de ces éboulements semblent occuper une grande partie des sédiments entassés sur le fond du réservoir qui intéresse la prise d'eau aval. En conséquence, lors des études détaillées il faudrait étudier des mesures à prendre pour la prévention des éboulements.

0.4.2 Observations sur la mécanique du sol

(1) Terrain de fondation du barrage

Sur les échantillons prélevés du terrain de fondation du barrage les essais de consolidation, de compression simple et de compression triaxiale ont été effectués au Laboratoire de Ben Arous. D'ailleurs, pour supplément sur un échantillon envoyé au Japon les essais de compression triaxiale ont été exécutés au laboratoire de l'EPDC. Comme résultat, on constate que le terrain est doté d'une capacité portante et d'une résistance au cisaillement qu'exige la fondation du barrage.

(2) Matériaux imperméables pour le noyau du barrage

Sur les échantillons prélevés dans les zones d'emprunt les essais de teneur en eau nature, de granulométrie, de limites d'Atterberg, de poids spécifique, de densité, d'absorption, de compressibilité et de compression triaxiale ont été exécutés. Les résultats des essais et les observations des puits de reconnaissance ont constaté la présence en quantité suffisante des matériaux de construction de bonne qualité dans les zones suivantes:

- Zone d'une superficie d'environ 200 m x 400 m, étendue au pied du versant sud-est de la montagne qui implique les puits de BD-1, BD-2 et BD-4
- Zone d'une superficie d'environ 50 m x 300 m, étendue au pied du versant ouest de la montagne qui implique le puits de BA-1

Ces matériaux sont en provenance des deux formations, l'une des argiles brunâtres classées en CL ou en CH qui ont une plasticité moyenne ou forte, et l'autre des graviers argileux classés en GC qui sont un mélange du sol ci-dessus et des plaquettes de rochers. Leurs teneurs en eau sont du côté sec de la teneur en eau optimum. De ce fait on peut les ajuster facilement en teneur en eau convenable pour les travaux.

(3) Matériaux pour les enrochements et pour les agrégats de béton

Les essais de densité, de compression simple et d'absorption effectués sur les échantillons prélevés dans un massif se trouvant à l'est de la zone du réservoir supérieur ont constaté la présence en quantité suffisante des matériaux pour les enrochements et pour les agrégats de béton.

0.4.3 Analyse des résultats de la mesure d'envasement et la détermination de l'emplacement et du dessin de la prise d'eau aval

Les estimations du volume et de la forme de l'envasement futur ont été faites en se basant sur les résultats de la mesure d'envasement exécutée par l'équipe EGTH et sur les données des apports de Kasseb sur une période de 31 ans de 1930 à 1961. Les conclusions obtenues sont comme suit:

(1) Estimation du volume d'envasement futur

Pour estimer l'érosion spécifique, deux approches ont été appliquées, l'une statistique et l'autre probabiliste. Elles ont conduit à estimer respectivement une valeur de 3.140 à 3.214 m³/km²/an et celle de 2.757 à 2.926 m³/km²/an. Toutefois, étant donné que les valeurs ainsi calculées ne peuvent avoir de précision assez élevée, une valeur de 3.400 m³/km²/an a été retenue comme base de l'estimation du volume d'envasement futur. Par la suite l'érosion spécifique retenue a conduit à calculer un volume total d'envasement de 6.600.000 mètres cubes sur une période de 70 ans de 1969 à 2039. Ceci prévoit la mise en service de la centrale de Kasseb pour 1989, soit 20 ans après la construction du barrage de Kasseb.

(2) Estimation de la forme d'envasement futur et la détermination de l'emplacement de la prise d'eau aval

La mesure d'envasement exécutée a permis de constater la formation des sédiments aval (Density Current Beds) sur le fond compris entre le barrage et le profil 17-17'. Sur le reste du fond, des sédiments s'entassent uniformément. Il est tout vraisemblable qu'une telle manière de formation des envasements continuera pour l'avenir. Compte tenu de la forme d'envasement actuel ainsi que de la forme d'envasement futur qui a été présumée en utilisant "Empirical Area Reduction Method", méthode développée par l'USBR (Bureau of Reclamation, United States), l'emplacement de la prise d'eau aval a été déterminé à peu près au milieu des deux profils 9-9" et 14-9", soit à environ 250 mètres en amont de l'emplacement de la "variante aval" proposée dans le rapport de novembre 1978.

(3) Dessin de la prise d'eau aval

La prise d'eau aval sera du type trompe d'entrée. Son radier se situe à la cote 266,00 et le fond du canal d'amenée à la cote 265,00 par rapport à la cote 260 environ des sédiments actuels qui s'entassent en face de l'emplacement de la prise d'eau. A cet endroit, après 30 et 70 ans de la mise en eau du réservoir inférieur, le niveau d'envasement se soulèvera aux cotes 265 et 270 respectivement.

Si des risques de formation des envasements nuisibles sont à craindre après la construction de la centrale, on n'a qu'à les draguer périodiquement ou à construire sur le canal d'amenée une digue de protection pour la prévention de l'envasement. Dans tous les cas il n'est pas raisonnable de déplacer plus à l'aval l'emplacement de la prise d'eau par exemple jusqu'aux profils 16-D1 ou 17-17'. Un tel déplacement se traduit par l'augmentation des coûts de construction et des difficultés des travaux.

0.4.4 Modification des dessins des ouvrages et la réestimation des coûts d'aménagements

Le résultat des études géologiques complémentaires a conduit aux modifications des dessins des ouvrages qui portent sur:

- la coupe du barrage (élargissement)
- la galerie d'injection dans la fondation du barrage (aménagement ajouté)
- la quantité d'excavation de la fondation du barrage (augmentation)
- la quantité d'injection dans la fondation du barrage (augmentation)
- le déplacement à l'amont de la prise d'eau aval (ceci conduit à l'accourcissement de la galerie de fuite)
- la simplification de la structure de la prise d'eau aval (diminution des coûts)

Les modifications des ouvrages ont conduit à la réestimation des coûts d'aménagements dont le résultat peut être résumé comme suit:

- 1) Les coûts totaux de génie civil s'augmentent d'environ 837.000 DT en raison de l'augmentation des coûts de construction du barrage par rapport à ceux de la variante aval du rapport de novembre 1978.
- 2) Les coûts du matériel hydraulique se diminuent d'environ 859.000 DT en raison de la simplification de la structure de la prise d'eau aval par rapport à ceux de la variante aval ci-dessus.
- 3) Sur la même base de l'estimation que celle du rapport de 1978, le total des coûts directs des aménagements est estimé à 84.313.000 DT par rapport à 84.345.000 DT de la variante aval ci-dessus.
- 4) Dans le rapport de novembre 1978 les frais de l'administration (STEG) ont été estimés à 5% des coûts directs. Toutefois, une enquête récente à la STEG nous a amenés à réduire ce pourcentage à 2,5% des coûts directs.
- 5) En somme, les coûts totaux d'aménagements y compris les coûts indirects (l'administration et l'ingénierie) sont estimés à 90.613.000 DT par rapport à 92.745.000 DT de la variante aval ci-dessus. Ceci se traduit par une diminution de 2.132.000 DT.

Comme résultat de l'analyse d'envasement dans le réservoir inférieur, il s'est avéré que du point de vue technique la variante amont étudiée dans le rapport de 1978 ne pouvait être adoptée.

Le tableau suivant montre la comparaison globale des coûts d'aménagements entre les deux alternatives.

(1.000 DT)

Désignation	Variante aval du rapport de novembre 1978			Réestimation par la présente étude		
	Monnaie domestique	Devise	Total	Monnaie domestique	Devise	Total
COÛTS DIRECTS						
1. Centrale						
Génie civil	15.118	22.678	37.796	15.453	23.180	38.633
Matériel hydraulique	1.082	9.742	10.824	997	8.969	9.966
Matériel électrique	1.997	19.710	21.707	1.997	19.710	21.707
Sous-total	18.197	52.130	70.327	18.447	51.859	70.306
2. Ligne et postes	1.395	5.582	6.977	1.395	5.582	6.977
3. Contingences	1.991	5.049	7.040	2.015	5.015	7.030
Total des coûts directs	21.584	62.760	84.344	21.857	62.456	84.313
COÛTS INDIRECTS						
Ingénierie	-	4.200	4.200	-	4.200	4.200
Administration	4.200	-	4.200	2.100	-	2.100
Sous-total	4.200	4.200	8.400	2.100	4.200	6.300
Coûts totaux d'aménagements	25.784	66.960	92.744	23.957	66.656	90.613

05 RECOMMANDATIONS

0.5.1 Détermination du calendrier de l'implantation

Le projet de pompage turbinage de Kasseb nécessite une durée de construction d'environ 8 ans à partir du commencement des études détaillées jusqu'à la mise en service de son 1^{er} groupe.

D'autre part, la détérioration avec le temps du matériel laisse supposer le déclassement des turbines à gaz d'une puissance totale d'environ 110 MW à l'horizon 1986-89 et encore d'une puissance totale d'environ 170 MW à l'horizon 1992-93.

En conséquence, une comparaison poussée qui se base sur de nouvelles conditions technico-économiques entre le projet de Kasseb et la turbine à gaz devrait être entreprise pour déterminer le calendrier définitif de l'implantation du projet de Kasseb.

0.5.2 Etudes et essais supplémentaires à exécuter avant de procéder aux études détaillées

Si la STEG prenait la décision d'exécuter le projet de Kasseb, elle devrait, avant de procéder aux études détaillées, entreprendre les études de terrain et les essais en laboratoire supplémentaires ci-après, suivant les recommandations faites dans le rapport intérimaire de mars 1979:

- un sondage incliné de 250 mètres de long à l'emplacement de la caverne de la centrale souterraine
- une galerie de reconnaissance de 70 à 80 mètres de long à partir de l'emplacement de la prise d'eau amont jusqu'au contact de la marne avec le calcaire dans le massif d'El Fahama
- une tranchée en aval de la rive droite du barrage envisagé
- études sur les caractéristiques géologiques ainsi que sur la résistance et le tassement des marnes situées sur la rive droite
- recherches des quantités en réserve des matériaux de construction dans les zones d'emprunt

CHAPITRE 1. ETUDES GEOLOGIQUES

1.1 GENERALITES

1.2 GÉOLOGIE GLOBALE DU SITE D'AMENAGEMENTS

1.3 FONDATIONS DES OUVRAGES DE GENIE CIVIL

CHAPITRE 1. ETUDES GEOLOGIQUES

1.1 GENERALITES

Suivant les recommandations données par le rapport de JICA de novembre 1978 (Note 1), la Société Tunisienne de l'Electricité et du Gaz (STEG) a exécuté une campagne d'étude géologique complémentaire en 1979-80 sur le site du projet de Kasseb. Les principaux des opérations sont les suivants:

- 1) Cartographies topographiques et géologiques qui couvrent la zone d'aménagements
- 2) Etudes et essais sur le terrain de fondation du barrage par les sondages carottés et les puits de reconnaissance
- 3) Etudes du terrain par les sondages carottés aux emplacements des prises d'eau amont et aval ainsi qu'aux côs de la cuvette supérieure

Les opérations ci-dessus ont été exécutées suivant les manières ci-après:

1.1.1 Cartographies topographiques et géologiques détaillées

(1) Cartographie topographique détaillée

Pour la précision des études et dessins une série de plans topographiques à l'échelle de 1/500 couvrant la zone d'aménagements ont été établis. Les objets et numéros des plans qui consistent en 22 feuilles sont illustrés dans la Figure 1-1, et les coordonnées des points de repère dans le Tableau 1-1.

(2) Cartographie géologique détaillée

Comme données géologiques existantes pour le site d'aménagements, on peut utiliser une feuille de carte géologique commentée et publiée par l'autorité tunisienne (Note 2) et les cartes géologiques annexées au rapport de JICA de novembre 1978. Ces dernières à l'échelle de 1/5.000 ont été établies en se basant sur le résultat de reconnaissance sur le terrain effectuée en 1978 et par l'interprétation des photos aériennes des zones intéressées (Note 3).

En utilisant les données ci-dessus une série de cartes géologiques à l'échelle de 1/1.000 ont été établis au cours de la présente étude. Pour ce faire, des reconnaissances de la surface du sol ont été menées en se servant des plans topos à l'échelle de 1/500, et les résultats acquis ont été transcrits sur les plans topos à l'échelle de 1/1.000.

Note 1: Etude sur le Projet de Pompage Turbinage de Kasseb

Note 2: Carte géologique de la Tunisie "Zaouiet Madien", feuille No. 17 à l'échelle de 1/50.000

Note 3: 74 TU359/250, UAG 412, 2933 et 2942 à 2945

Des roches visibles en affleurements dans le site d'aménagements et dans les zones d'alentour ont été examinées pour être transcrites sur les plans topos. Leurs situations ont été mesurées au pas. Pour les zones dont il faut préciser en détail les répartitions géologiques, les mesures ont été effectuées avec le compas ou le mètre à ruban. Des affleurements ont été examinés à l'oeil nu. La diluée d'acide chlorhydrique a été également utilisée pour produire l'écume qui permet de faire la distinction entre le calcaire et la marne.

Les profils géologiques des emplacements du barrage, de la prise d'eau amont et de la prise d'eau aval ont été établis en se basant sur les résultats obtenus à partir des sondages carottés exécutés au cours des deux campagnes de 1979-80 et de 1974-75.

Pour complément des plans topos existants, une cartographie géologique au pas a été effectuée sur les environs de l'emplacement de la prise d'eau aval.

1.1.2 Sondages carottés et les essais d'absorption

Les sondages carottés qui ont été exécutés jusqu'à présent sont énumérés dans le Tableau 1-2. Les carottes prélevées au cours de la campagne de 1974-75 sont mises en magasin de la centrale de Tunis Sud. Leurs coupes géologiques sont illustrées dans le rapport de JICA de novembre 1978.

Pour la présente étude les sondages carottés et les essais d'absorption ont été exécutés en se conformant aux spécifications préparées par la mission de JICA et la STEG. Le sommaire des opérations ainsi que les coupes géologiques et les résultats de l'essai d'absorption sont illustrés dans les Appendices No. 1 et No. 2. Des modes d'exécution et de différents problèmes techniques à étudier dans la phase des études détaillées sont décrits dans le 3ème rapport intérimaire de la mission de JICA (Note 4).

D'ailleurs, il est envisagé de faire périodiquement les mesures d'eau souterraine dans les trous de sondage.

1.1.3 Puits de reconnaissance et les essais en laboratoire

Les puits de reconnaissance qui ont été exécutés jusqu'à présent pour étudier les conditions du terrain de fondation de différents ouvrages sont énumérés dans le Tableau 1-3. Les conditions géologiques des puits fouillés au cours de la campagne de 1974-75 sont montrées dans le Tableau 5-2 du rapport de JICA de novembre 1978. Les coupes de terrain des puits fouillés au cours de la présente campagne et les résultats des essais sur les matériaux de construction sont illustrés ensemble dans l'Appendice No. 3. Ces puits sont pour les observations du terrain, les essais d'absorption et le prélèvement des échantillons à soumettre aux essais au Laboratoire de Ben Arous et au Laboratoire de l'EPDC (voir le paragraphe 1.3.2).

1.2 GEOLOGIE GLOBALE DU SITE D'AMENAGEMENTS

1.2.1 Topographie

Le site d'aménagements est situé à l'extrémité Est des Atlas. Il se trouve à environ

Note 4: "Rapport intérimaire de la 3ème étape sur les études géologiques complémentaires" – décembre 1979

une centaine de km à l'ouest de la ville de Tunis et à environ 20 km au nord-ouest de Béjà.

Le débit nécessaire à la production de l'énergie électrique d'une puissance maximum de 350 MW est fourni par le pompage de l'eau depuis le réservoir inférieur (retenue normale est à la cote 288,60) formé par le barrage voûte existant de Kasseb jusqu'au réservoir supérieur (retenue normale sera à la cote 430) qui sera formé par l'endiguement de la cluse comprise entre le Djebel El Fahama et le Djebel Bou Sattar.

La zone du réservoir supérieur forme une cuvette dont le bord se situe aux cotes de 400 à 450. Elle s'entoure des massifs de 450 à 550 mètres de haut. Cette cuvette a deux cols, l'un se trouvant au nord et à la cote 450 et l'autre se situant au sud et à la cote 435, présentant tous les deux des versants doux.

A l'ouest de la cuvette une vallée transversale est creusée profondément par l'érosion. Un petit ruisseau qui s'en écoule se débouche dans le réservoir inférieur.

Le versant nord du Djebel El Fahama qui s'allonge du nord-nord-est au sud-ouest présente une pente très rapide sur une longueur d'environ 350 mètres. Ce versant sur lequel des roches sont visibles en affleurements continuels permet de présumer la tectonique et la géologie du site d'aménagements. La rive droite de la cluse est le pied du versant sud du Djebel Bou Sattar. Son talus est couvert des éboulis sur sa majeure partie, présentant une pente plus douce que celle de la rive gauche.

En aval de la cluse s'étend un terrain d'une pente très douce d'environ 400 mètres de large jusqu'à la rive gauche du réservoir inférieur. De l'amont à l'aval ce terrain est cultivé sur une longueur d'environ 1,4 km.

Le projet de Kasseb se propose d'implanter la prise d'eau amont sur la rive gauche du réservoir supérieur et la prise d'eau aval sur un talus doux du rivage inférieur du réservoir de Kasseb. La galerie de fuite qui traverse le noyau du Djebel El Fahama relie à la galerie d'amenée par l'intermédiaire de la centrale souterraine construite dans le profond du massif.

Comme phénomène particulier, des cicatrices des lissements sont localement trouvées sur le terrain de pente douce qui s'étend en aval de la cluse du réservoir supérieur.

1.2.2 Géologie

(1) Généralités

Comme montré dans la Figure 1-2, le terrain du site d'aménagements est formé du calcaire et de la marne d'âge nummulitique, et en dessus du terrain d'âge quaternaire. Les calcaires se classent en nombreuses catégories depuis le calcaire pur jusqu'à l'alternance du calcaire et de la marne ou au calcaire-marneux. D'autre part, les marnes ont des caractéristiques plus ou moins propres aux calcaires, quoiqu'elles varient légèrement suivant les marnes.

Le calcaire paraît blanc grisâtre à son affleurement. Cependant, quand il est cassé par le marteau, sa coupe paraît grisâtre sombre. La marne est grisâtre sombre ou noirâtre. Entre des couches de marne s'intercalent des couches sableuses grisâtres comprenant des éléments fins ou moyens, et rarement des couches de grès glauconieux comprenant des éléments moyens ou

grossiers. Entre des couches de calcaire s'intercalent des couches schisteuses qui sont facilement fracturées en écailles.

Les calcaires sont visibles en affleurements sur les massifs de Bou Sattar et d'El Fahama ainsi que sur les montagnes qui bordent le rivage Est du réservoir inférieur. D'autre part, les marnes se trouvent sur la zone du réservoir supérieur ainsi que sur les versants doux qui entourent les massifs et sur le rivage du réservoir inférieur.

La plupart des couches d'âge nummulitique présentent une stratification régulière ayant une direction de 10 degrés nord-est et un pendage de 40 à 60 degrés nord-ouest. Toutefois, les affleurements sur les montagnes situées à l'est du réservoir supérieur ainsi que les affleurements que l'on voit au bord du réservoir inférieur présentent des directions et pendages irréguliers à cause des perturbations géologiques.

Le terrain d'âge quaternaire se compose du mort-terrain qui couvre largement les versants doux et les pieds des montagnes, les éboulis de pente et les brèches calcaires localisées sur la partie inférieure de la rive droite de l'emplacement du barrage. Le mort-terrain et les éboulis de pente sont constitués principalement des argiles silteuses ou des argiles graveleuses. Les brèches calcaires sont partiellement cimentées.

(2) Couches et catégories des roches

Les détails des couches et les caractéristiques des roches réparties dans le site d'aménagements sont montrés dans le Tableau 1-4.

(3) Tectonique

Présentant une direction nord-est et un pendage de 45 à 60 degrés nord-ouest, le terrain, depuis la zone du réservoir supérieur jusqu'au centre du massif d'El Fahama, se compose successivement des marnes en bloc, des marnes-calcaires en planches, des marnes en bancs et des calcaires en bloc, et depuis le centre du massif jusqu'au rivage du réservoir inférieur, des calcaires-marneux en bancs, des calcaires-marneux en planches et des calcaires en bloc. Ainsi, avec une structure monoclinale, de différentes couches s'arrangent symétriquement ayant au centre le calcaire en bloc.

Par l'interprétation des photos aériennes et par la reconnaissance sur le terrain, on peut présumer la présence de quelques failles qui traversent rectangulairement ou obliquement les passages des couches. D'ailleurs, les résultats des sondages exécutés à l'emplacement du barrage laissent supposer la présence de trois failles qui s'allongent parallèlement à la direction de la vallée de la cuvette.

Les failles A, B et C qui traversent l'axe du barrage semblent assez larges. Toutefois, pour la dimension et le type du barrage envisagé, les observations des carottes prélevées et les résultats des essais d'absorption conduisent à juger qu'il est possible de stabiliser le barrage par un traitement approprié de la fondation.

La prise d'eau aval sera localisée de façon que la galerie de fuite puisse éviter la faille qui s'allonge vers le réservoir inférieur après avoir traversé le massif d'El Fahama sous son col du sud.

Il existe encore d'autres failles. Toutefois, quelques-unes d'entre elles n'ont que de larges failles et les autres sont constituées des éléments assez cimentés, quoique fracturés.

(4) Phénomènes particuliers

a) Dissolution du calcaire

Ni des sondages carottés ni des reconnaissances détaillées sur le terrain n'ont permis de présumer la présence de grands entonnoirs. Toutefois, comme montré dans la Figure 1-4, on trouve de petites dépressions ovales et peu profondes sur une partie anticlinale du massif d'El Fahama. Elles s'arrangent à des intervalles dans la direction des couches. Elles sont produites par la dissolution de calcaire qui ne semble pas pénétrer jusqu'au profond. Toutefois, leurs localisations et caractéristiques doivent être examinées en détail dans la phase des études détaillées.

b) Glissement du terrain

A l'entrée de la cluse qui fait face au terrain de pente douce devant le réservoir inférieur il existe de nombreuses cicatrices de petits glissements (voir la Figure 1-5). La plupart d'entre eux sont les glissements du mort-terrain, mais il existe également les glissements des couches de marne. Quoique ces glissements soient encore limités localement, ils risquent de s'agrandir dans l'avenir. En conséquence, il faudrait exécuter les travaux préventifs pour les stabiliser.

Outre les glissements ci-dessus, on trouve les érosions des terrasses sédimentaires sur la rive droite de l'embouchure de l'oued El Brik dans le réservoir inférieur.

c) Eaux jaillies

Sur le flanc de montagne située à l'est du réservoir supérieur il existe un endroit où l'eau jaillit abondamment. Les habitants l'utilisent comme eau potable et pour d'autres usages. On peut supposer que cette eau s'écoule d'un entonnoir (voir le Tableau 1-5).

On trouve d'autres jaillissements d'eau, soit dans la zone du réservoir supérieur, soit à partir du trou de sondage SU-4. Toutefois, ils ne donneraient pas d'empêchements à la construction des ouvrages.

1.3 FONDATIONS DES OUVRAGES

1.3.1 Réservoir supérieur et la prise d'eau amont

(1) Réservoir supérieur

La zone du réservoir supérieur est entourée par les massifs et cols; à l'est et à l'ouest par les massifs de 530 et 550 mètres de haut respectivement, et au nord et au sud par les cols de 450 et 435 mètres de haut respectivement. La superficie du plan d'eau lors de la retenue normale est approximativement de 550 mètres de l'est à l'ouest et de 700 mètres du nord au sud. Le plan d'eau présentera une forme de sac d'argent. Ce sac est resserré à l'emplacement du barrage par les massifs de Bou Sattar et d'El Fahama. Les largeurs des cols du nord et du sud sont respectivement de 500 et 300 mètres environ lors de la retenue normale.

Actuellement, le terrain du réservoir supérieur est cultivé pour sa majeure partie. Il est couvert d'une couche mince de terre végétale, et en dessous d'une couche de terre mélangée de limon et d'argile plastique qui est la terre résiduelle des marnes altérées.

L'imperméabilité des cols ont été examinée en creusant 5 puits de reconnaissance de C1 à C5 dans le col du nord et également 6 puits de reconnaissance de D1 à D6 dans le col du sud au cours de la campagne de 1974-75. Comme résultat de cette campagne, il s'est avéré que les terrains des cols sont constitués de marne en dessous de la couverture de 0,8 à 2 mètres d'épaisseur.

Au cours de la présente campagne les essais d'absorption ont été effectués dans les trous de sondage SB-13 et SB-14 creusés respectivement dans les cols du sud et du nord. Leurs résultats sont montrés dans la Figure 1-11, les Appendices No. 1 et No. 2 ainsi que dans les Graphiques de 1 à 6.

Le sondage SB-14 a été exécuté dans la marne après avoir passé la couverture de 2,2 mètres d'épaisseur. Jusqu'à une profondeur de 15 mètres la marne est altérée et tendre, mais de là elle devient fraîche et après 20 mètres de profondeur elle permet, en augmentant sa dureté, de prélever des carottes solides sur beaucoup de tronçons.

Toutefois, entre 30,8 et 31,85 mètres de profondeur le pourcentage de carottage est faible à cause des remaniements du terrain, et entre 33,3 et 35,0 mètres les roches sont facilement écaillées à 45 degrés présentant des carottes fracturées en grains à cause de l'altération. Le résultat des essais d'absorption montre qu'entre 25 et 35 mètres de profondeur la perméabilité du terrain est très faible mais que si les pressions supérieures à 5 kg/cm^2 et à 7 kg/cm^2 sont exercées respectivement sur les tronçons compris entre 15 et 20 mètres et entre 20 et 25 mètres de profondeur leurs perméabilités s'augmentent jusqu'aux taux de perte de 26,1 et 13,8 unités Lugeon respectivement.

D'autre part, le sondage SB-13 a été exécuté dans la marne facilement écaillée. Sur presque tout le tronçon du sondage les carottes prélevées étaient fracturées. Jusqu'à une profondeur de 24 mètres l'essai d'absorption était impossible à cause des éboulements. Toutefois, les tronçons compris entre 24 et 29 mètres et également entre 29 et 33 mètres de profondeur présentent respectivement les taux de perte de 1,35 et 0,68 unités Lugeon au maximum. Ceci veut dire que le terrain est presque imperméable.

Sur le terrain étendu entre les puits de reconnaissance C3 et A5/2 les roches sont visibles en affleurements à des intervalles. Il paraît que ces roches sont assez cimentées à leur intérieur. D'après leur apparence on peut supposer que des variations journalières du plan d'eau du réservoir n'auraient pas l'effet de provoquer de grands glissements du talus du réservoir.

D'après l'analyse chimique, l'eau jaillie du talus situé à l'est du réservoir s'écoule sans doute d'un entonnoir (voir le Tableau 1-5). Toutefois, la source d'eau est située plus haut que le niveau de la retenue normale envisagée. Les mesures d'eau souterraine effectuées dans les puits et dans les trous de sondage précisent que la nappe d'eau est peu profonde, ce qui s'explique par le fait que la perméabilité du terrain du réservoir supérieur est très faible. De toute façon, on peut supposer que l'infiltration d'eau du réservoir demeure dans une limite admissible.

(2) Prise d'eau amont (voir les Figures 1-2 et 1-11)

La prise d'eau amont sera implantée sur le pied nord du Djebel El Fahama. A cet emplacement a été exécuté le sondage SG-7 (sondage vertical de 30 mètres de long) lors de la campagne de 1974-75. Ce qui suit est le résultat de ce sondage:

Sondage

0 - 3,5 m :	Argile jaunâtre plastique
3,5 - 30,0 m :	Marne-calcaire rubanée généralement tendre
(jusqu'au fond)	
3,5 - 8,6 m :	Marne argileuse plastique et altérée
8,6 - 22,5 m :	Marne partiellement dure
22,5 - 24,5 m :	Marne relativement dure
24,5 - 30,0 m :	Marne partiellement dure

Essai d'absorption

6,0 - 12,0 m :	$2,2 \times 10^{-6}$ cm/sec
24,0 - 30,0 m :	$8,9 \times 10^{-6}$ cm/sec

Les essais n'ont pas été exécutés pour les tronçons compris entre 0 et 6,0 mètres et entre 12,0 et 24,0 mètres.

Pour supplément le sondage SI-2 a été exécuté au cours de la présente campagne (sondage vertical de 150 mètres). Toutefois, l'utilisation d'une vieille sondeuse n'a pas permis de prélever de bonnes carottes. Le résultat obtenu est comme suit:

Sondage

0 - 1,0 m :	Terre végétale
1,0 - 5,0 m :	Terre résiduelle de la marne altérée
	Argile adhérente
5,0 - 150,0 m :	Marne généralement tendre
(jusqu'au fond)	
5,0 - 17,5 m :	Marne-calcaire
5,0 - 7,9 m :	Marne très altérée
7,9 - 17,5 m :	Marne très fissurée ou serrée
17,5 - 44,9 m :	Altération du faciès sableux (gris clair) et du faciès schisteux (grisâtre sombre). Le faciès sableux (17,5 - 22,0 m, 26,0 - 31,1 m et 33,75 - 44,9 m) est généralement compact. Le faciès schisteux est quelquefois feuilleté ou cisailé. Les miroirs de faille à 35,7 m (pendage de 70 degrés) et à 37,15 m (pendage de 65 degrés).
44,9 - 150 m :	Marne schisteuse. Zone remaniée sur presque tout le tronçon.
44,9 - 80 m :	Zone feuilletée avec miroirs de faille. Friable à

	l'air
52,95 - 54,9 m :	Marne sableuse et friable à l'air. Veines de calcite à 52,3 m (1 cm de large) et à 52,4 m (0,5 cm de large)
65,3 - 66,5 m :	Marne argileuse
66,5 - 70,0 m :	Marne feuilletée verticalement avec nombreux miroirs de faille. Tendre.
76,1 - 76,6 m :	Marne argileuse
79,0 - 85,0 m :	Marne argileuse. Miroir de faille à 79,0 m
80,0 - 150,0 m :	Carottage très faible. La plupart des carottes prélevées sont cassées en petits morceaux. Il est supposé que les roches sont remaniées ou feuilletées.
96,0 m :	Miroir de faille
133,5 - 135,0 m :	Marne sableuse et broyée
135,0 - 150,0 m :	Pendage de feuilletage de 70 à 80 degrés

Essai d'absorption

10,0 - 20,0 m :	Taux de perte minimum de 1,87 unités Lugeon et le taux de perte maximum de 26,48 unités Lugeon
20,0 - 35,0 m :	Taux de perte minimum de 0 unité Lugeon et le taux de perte maximum de 16,0 unités Lugeon
35,0 - 65,0 m :	Taux de perte minimum de 0 unité Lugeon et le taux de perte maximum de 2,76 unités Lugeon

Les essais d'absorption n'ont pu être exécutés sur les tronçons compris entre 0 et 10 mètres et également entre 65,0 et 150 mètres.

Le niveau d'eau dans le trou de sondage SI-2, mesuré à partir de la surface du terrain, se situe à une profondeur de 10 mètres pour le forage de 65 mètres, de 20 mètres pour le forage de 50 mètres et de 50 mètres pour le forage de 115 mètres. Toutefois, lorsque le forage dépasse 115 mètres de profondeur le niveau d'eau est restitué à 30 mètres.

Les carottes prélevées dans ce trou laissent supposer la présence d'une couche des roches remaniées ou des roches schisteuses et facilement écaillées traversant l'emplacement de la prise d'eau amont avec une direction d'environ 75 degrés vers l'ouest. Cette couche est intitulée de "Faille probable D" et illustrée dans la Figure 1-11. Malgré cette faille, la galerie d'amenée pourra passer dans des roches dures au fur et à mesure de son avancement.

1.3.2 Emplacement du barrage

(1) Généralités

La première campagne géologique effectuée sur l'emplacement du barrage est celle de 1974-75. Au cours de cette campagne ont été exécutés 6 sondages carottés d'une longueur totale de 210 mètres, 9 puits de reconnaissance d'une longueur totale de 38,25 mètres et les essais d'absorption dans les trous de sondage. Le détail de ces travaux est montré dans le Tableau 1-2.

En se basant sur le résultat de sa reconnaissance sur le terrain, la mission de JICA de 1978 a établi les plans géologiques à l'échelle de 1/5.000 et élucidé sommairement les répartitions et les caractéristiques des roches et des dépôts superficiels couvrant le réservoir supérieur et l'emplacement du barrage. Pour l'emplacement du barrage les coupes géologiques ont été également établies à partir des données existantes concernant les sondages carottés et les puits de reconnaissance. Ces données ont permis d'étudier du point de vue géologique la localisation et la structure du barrage envisagé. Les résultats des travaux de 1974-75 ont été récapitulés dans le rapport de JICA de novembre 1978.

Au cours de la présente étude complémentaire ont été exécutés les reconnaissances géologiques de la surface du sol, les sondages carottés ainsi que les puits de reconnaissance et les essais de mécanique du sol de la fondation du barrage.

Suivant les spécifications préparées par l'EPDC et la STEG ont été exécutés les sondages carottés par l'équipe EGTH sous la direction de la STEG ainsi que les essais de mécanique du sol sur les échantillons prélevés dans les trous de sondage et les puits de reconnaissance par le Laboratoire de Ben Arous du Ministère de l'Agriculture. Pour complément d'étude, les essais de compression triaxiale ont été également exécutés au Laboratoire de l'EPDC.

Les données nécessaires pour les dessins du barrage, de la prise d'eau amont et de la prise d'eau aval ainsi que pour le traitement de leurs fondations ont été obtenues à partir des essais dynamiques et des essais d'absorption effectués sur les terrains de fondation.

(2) Géologie

(a) Roches et terres alluvionnaires

(a).1 Roches

Comme montré dans la Figure 1-3, les roches réparties sur l'emplacement du barrage se composent successivement des marnes en bloc, des marnes-calcaires en planches et des marnes-schisteuses écaillées. Toutefois, les marnes en bloc réparties dans la zone du réservoir supérieur ne sont pas visibles en affleurements parce qu'elles sont couvertes de dépôts superficiels.

a) Marne en bloc

C'est une roche d'un gris sombre qui ne présente pas de litage clair. L'analyse à rayon X montre qu'elle contient beaucoup de montmorillonit. Par conséquent elle est facilement dissoute à l'eau et broyée à l'air en petits morceaux.

b) Marne-calcaire en planches (Couche A)

C'est une roche grisâtre ou d'un gris sombre qui contient quelquefois des passages minces de calcaire. Ses litages sont clairs et se collent bien à des intervalles de moins de 10 cm. La marne-calcaire qui se trouve sur la rive gauche est dure et visible en affleurements larges. Sur la rive droite cette roche ne présente guère d'affleurement parce qu'elle est couverte de dépôts superficiels, mais le résultat des sondages carottés et des puits de reconnaissance précise qu'elle est altérée jusqu'au profond et beaucoup plus tendre que la marne-calcaire répartie sur la rive gauche.

c) Marne-schisteuse écaillée (Couche B)

On peut compter trois passages de marne-schisteuse écaillée sur la rive gauche de l'emplacement du barrage. Son affleurement frais présente des litages bien serrés et durs. Cependant, cette roche n'est pas très forte à l'altération à l'air.

d) Calcaire-marneux en bancs (Couche C)

Cette roche a une caractéristique pareille à celle de la couche A, mais ses litages se présentent à des intervalles de 15 à 20 cm. Elle est visible en affleurements minces (environ 15 mètres de large) dans la couche A sur la rive gauche. Ses litages se collent solidement, mais en dessous des dépôts superficiels sur la rive droite la roche serait dégradée jusqu'à certaine profondeur à cause de l'altération.

e) Calcaire en bloc (Couche D)

Sur la rive gauche et en aval de l'emplacement du barrage le calcaire en bloc est visible en affleurements depuis le lit du ruisseau jusqu'au sommet du massif. Cette roche est très dure et présente des litages à des intervalles de plus de 30 cm. Des reconnaissances sur le terrain ont été effectuées non seulement sur l'emplacement du barrage mais aussi sur toute la surface du massif d'El FAhama. Cependant, on n'a trouvé aucune indice de l'entonnoir. Comme décrit au paragraphe 1.2.2.(4).(a), sur une partie du massif on trouve de petites dépressions ovales et peu profondes qui sont produites par la dissolution de calcaire (voir la Figure 1-4). Toutefois, la dissolution semble limitée à des surfaces des roches. D'ailleurs, ces dépressions se trouvent à des endroits assez hauts et loin de l'emplacement du barrage. Du côté rive droite le calcaire en bloc n'est visible qu'en affleurements intermittents sur le talus se trouvant près du ruisseau.

(a).2 Dépôts superficiels

Les dépôts superficiels sont classés en trois catégories: la couverture, l'éboulis de pente et la brèche calcaire. Sur la rive gauche et en aval de l'axe du barrage, des roches sont visibles en affleurements larges, et des éboulis de pente n'existent que très localement.

a) Couverture

La couverture de la zone du réservoir supérieur et de la rive droite de l'emplacement du barrage est très adhérente mais son épaisseur est très faible. En dessous de la couverture se trouvent la terre résiduelle altérée de 1 à 2 mètres d'épaisseur et puis des roches altérées.

b) Eboulis de pente

Les éboulis de pente se trouvent en aval de l'emplacement du barrage et sur le massif de la rive droite. Ils sont constitués des terres argileuses et des fragments des roches calcaires. Il est supposé que leur épaisseur n'est que d'environ 10 mètres.

c) Brèches calcaires

Les brèches calcaires sont réparties localement depuis le lit du ruisseau jusqu'au sommet du massif sur la rive droite. Sur le flanc du massif elles sont visibles en petits affleure-

ments, présentant des formes très irrégulières à cause de l'altération. Elles sont consistées en fragments de calcaire consolidés, comprenant toutefois des fentes et des parties qui ne sont pas encore consolidées. Il se peut qu'en dessous des brèches calcaires se trouvent l'ancienne couverture et les éboulis de pente et qu'il existe des fentes entre les brèches et les anciens terrains. Le résultat de sondage SB-4 précise que ces brèches ont une épaisseur de 15 mètres.

(3) Tectonique

L'observation des roches visibles en affleurements permet de présumer que les couches des roches sur la rive gauche présentent une direction de 0 à 20 degrés nord-est et un pendage de 40 à 55 degrés nord-ouest. A ce contre, la tectonique du terrain sur la rive droite ne peut être identifiée à cause des dépôts superficiels, sauf la partie qui borde le ruisseau en aval de l'emplacement du barrage.

A l'emplacement du barrage aucune faille n'est visible. Cependant, le désaccord des massifs sur les deux rives (voir la Figure 1-2) et les observations des carottes prélevées des sondages SB-2, SB-11, SB-12 bis et SB-13 laissent supposer la présence de trois failles A, B et C telles qu'elles sont présentées dans les Figures 1-3, 1-9 et 1-10. La répartition des roches non remaniées ainsi que la direction des passages de calcite que l'on observe sur les carottes prélevées aux environs de l'emplacement du barrage ont permis de présumer les directions et les largeurs des failles A et B. La direction et la largeur de la faille C ont été présumées par les observations des carottes prélevées dans les trous des sondages SB-12 bis et SB-3.

Toutes ces failles sont des envergures assez grandes et s'allongent presque parallèlement à la direction du ruisseau. Par conséquent le barrage ne peut être construit en dehors de ces failles. Des roches des failles sont très dégradées à cause de l'altération à la surface du terrain mais bien cimentées dans son profond, présentant des valeurs faibles de Lugeon aux pressions d'eau inférieures à 5 kg/cm². Cependant, le sondage SB-11 localisé entre les failles A et B a des tronçons qui ont marqué les taux de perte d'environ 30 unités Lugeon. Les nappes d'eau dans les trous des sondages exécutés dans les zones de failles sont maintenues au niveau 10 mètres environ à partir de la surface du terrain.

(4) Travaux d'étude géologique

(a) Sondages carottés

Les localisations des sondages carottés sont présentées dans les Figures 1-2 et 1-3. Les coupes géologiques sont illustrées dans l'Appendice No. 1. La Figure 1-10 montre les coupes géologiques ainsi que les résultats des essais d'absorption et les niveaux d'eau dans les trous de sondage. Le sommaire de la géologie de chaque trou de sondage est comme suit:

a) SB-10 :

Sondage incliné au pendage de 45 degrés et à la direction du sud-nord.
Longueur de 50 mètres.

0 - 3,4 m :

Couverture

0 - 1,5 m :

Terre végétale brunâtre et limoneuse

1,5 - 3,4 m :

Eboulis ou roches fissurées fortement.

Brun pâle.

3,4 - 50,0 m :	Marne gris sombre
3,4 - 20,0 m :	Marne-calcaire
3,4 - 6,0 m :	Marne-calcaire légèrement altérée avec des litages à 45 degrés aux tronçons compris entre 4,5 et 4,7 m et également entre 5,9 et 6,0 m. Marne brun sombre.
6,0 - 15,0 m :	Marne-calcaire fraîche et dure. Carottes broyées en petits morceaux ou cassées en courtes barres. Carottes broyées en fragments aux tronçons compris entre 8,0 et 8,5 m, 8,8 et 9,4 m et 11,5 et 13,5 m.
15,0 - 20,0 m :	Marne-calcaire légèrement altérée et modérément dure. Carottes cassées en courtes barres. Carottes broyées en fragments aux tronçons compris entre 15,65 et 16,5 m et également entre 17,6 et 18,0 m.
19,8 m :	Fissure avec des films de calcite.
20,0 - 50,0 m :	Marne fraîche et sableuse.
20,0 - 22,5 m :	Marne dure modérément. Carottes broyées en petits morceaux ou cassées en courtes barres.
20,85 m :	Marne voilée horizontalement avec une largeur de 3 cm.
21,0 - 21,46 m :	Carottes broyées en fragments à cause de la fissuration à l'air.
22,5 - 50,0 m :	La plupart des carottes prélevées en barres dures et compactes
26,0 - 27,5 m :	Carottes cassées en courtes barres.
28,5 m :	Veines de calcite à 1 cm de large et au pendage de 20 degrés.
40,7 - 40,9 m :	Carottes broyées en fragments.
42,3 - 42,7 m :	Carottes de grains - sableuses et argileuses
46,7 m :	Carottes écrasées. Largeur de 1 cm et le pendage de 70 degrés.
46,98 - 47,05 m :	Passage de film d'argile entre les joints.

b) SB-11 :
Sondage incliné au pendage de 45 degrés et à la direction du nord-sud.
Longueur de 55 mètres.

0 - 11 m :	Argile adhérente
9 - 3,0 m :	Argile brunâtre ou brun sombre
3,0 - 11,0 m :	Argile brunâtre
3,0 - 3,3 m :	Argile avec des fragments de calcaire
3,3 - 9,2 m :	Brèche-calcaire probablement
11,0 - 55,0 m :	Marne-calcaire
11,0 - 31,0 m :	Marne-calcaire grisâtre. Roche remaniée. Brèche cimentée avec des matières argileuses.
27,3 m :	Plaquette de calcite de 3 mm de large.
31,0 - 45,0 m :	Marne-calcaire dure. Carottes broyées en petits morceaux ou cassées en courtes barres, mais des parties fissurées existent à quelques endroits. Carottes broyées en fragments aux tronçons

compris entre 31,0 et 32,4 m, 33,7 et 33,9 m et 36,3 et 36,7 m.

Carottes broyées en fragments, gris sombre et légèrement altérées aux profondeurs de 40,0 à 41,5 m et de 43,0 à 45,0 m.

43,0 - 45,0 m : Pourcentage de carottage très faible.

42,2 m : Joint voilé des films de calcite au pendage de 75 degrés.

42,8 m : Fissures irrégulières et inclinées rapidement.

45,0 - 55,0 m : Marne. Zone feuilletée (zone de faille) consistée principalement en éléments argileux avec des fragments et grains des roches. De petits grains de calcite sont trouvés dans quelques carottes broyées en fragments.

51,0 - 52,0 m : Carottes cisailées et feuilletées au pendage de 60 degrés.

c) SB-12 :

Sondage vertical de 30,6 mètres de long.

0 - 3,1 m : Couverture

0 - 1,5 m : Terre végétale, brun sombre

1,5 - 3,1 m : Terre résiduelle de la marne. Brunâtre.

3,1 - 30,6 m : Marne gris sombre, remaniée et argileuse à quelques endroits.

3,35 m : Désaccord au pendage de 70 degrés.

5,8 m : Feuilletage vertical.

10,5 - 12,4 m : Roche fissurée.

10,5 m : Fissure inclinée rapidement.

12,0 m : Argile de 5 cm de large.

12,4 - 23,2 m : Fragments des roches sont trouvés à quelques endroits.

23,2 - 27,9 m : Roche fissurée. Carottes broyées en fragments ou cassées en courtes barres.

23,2 - 23,4 m : Friable à l'air

24,75 - 24,9 m : Marne argileuse

25,0 - 27,9 m : Marne fraîche

25,2 m : Miroirs de faille

27,5 m : Marne fraîche. Joint au pendage de 80 degrés.

27,9 - 30,6 m : Faciès schisteux frais et fissuré à l'air le long des feuilletages. Le feuilletage a lieu à des intervalles de 0,5 à 2 mm au pendage de 80 degrés.

30,4 - 30,6 m : Carotte argileuse.

d) SB-12 bis :

Sondage vertical de 30 mètres de long.

0 - 2,9 m : Couverture

0 - 1,7 m : Terre végétale brun sombre, argileuse et

	cohérente.
1,7 - 2,9 m :	Terre résiduelle de la marne.
2,9 - 30,0 m :	Marne-calcaire.
2,9 - 20,0 m :	Marne-calcaire gris sombre. Intercalation des faciès schisteux et sableux.
2,9 - 4,3 m :	Marne-calcaire fissurée rapidement. Tendre et argileuse partiellement.
4,0 m :	Argile de 10 cm de large.
4,3 - 13,1 m :	Parties argileuses à beaucoup d'endroits. Zone remaniée.
12,5 - 12,8 m :	Friable à l'air.
13,1 - 17,3 m :	Carottes broyées en fragments.
17,3 - 26,4 m :	Zone remaniée et anglée rapidement.
	Gris sombre.
26,85 m :	Plan cisailé au pendage de 80 degrés.
26,4 - 30,0 m :	Carotte gris sombre ou noirâtre. Friable à l'air et broyée avec angle aigu en petits fragments et grains schisteux.

(b) Essais d'absorption

Le résultat des essais d'absorption est montré dans l'Appendice No. 2. La relation entre la pression et la quantité d'eau injectée est montrée dans les Graphiques 1-1, 1-2 et 1-3. La relation entre les valeurs Lugeon et le niveau d'eau souterraine est montrée dans la Figure 1-10. Dans la présente campagne géologique les essais d'eau étaient impossibles dans quelques tronçons à cause des éboulements. Toutefois, le résultat des essais peut être récapitulé comme ci-après:

- 1) Dans les tronçons soumis aux essais la pression d'eau injectée a pu être augmentée jusqu'à 10 kg/cm².
- 2) Dans beaucoup de tronçons, la quantité d'eau absorbée s'est augmentée rapidement aux pressions supérieures à 7 kg/cm². Il paraît que ce phénomène se résulte d'un relâchement des roches dû à l'augmentation de la pression.
- 3) Le tronçon compris entre 10 et 20 mètres de profondeur du sondage SB-10 a marqué une haute perméabilité (taux de perte de 21,6 unités Lugeon au maximum), ce qui est dû, semble-t-il, au relâchement léger des roches en raison de la couverture mince. Dans le même trou la perméabilité s'est diminuée rapidement au-delà de 20 mètres de profondeur.
- 4) Le tronçon compris entre 35 et 45 mètres de profondeur du sondage SB-11 a également marqué une haute perméabilité (taux de perte de 33 unités Lugeon au maximum), ce qui pourrait s'expliquer par le fait que quoique dure, la roche sableuse de ce tronçon a des fissures au pendage presque parallèle au trou.
- 5) La plupart des essais ont marqué les valeurs inférieures à 14 unités Lugeon comprenant des valeurs très faibles qui signifient presque l'imperméabilité.

- 6) Les essais d'absorption exécutés au cours de la campagne de 1974-75 ont enregistré les coefficients de perméabilité allant de 10^{-3} cm/sec à 10^{-6} cm/sec (10^{-4} cm/sec en majorité). Les valeurs qui tombent autour de 10^{-3} cm/sec sont pour les tronçons de la surface du sol (moins de 15 mètres de profondeur) et les valeurs de l'ordre de 10^{-6} cm/sec sont pour les terrains marneux.

Le résultat des essais d'absorption montre qu'à l'emplacement du barrage le terrain est assez perméable à sa surface mais imperméable généralement à son profond. Toutefois, comme on le voit dans le trou de sondage SB-11, des roches fissurées qui sont réparties près des zones remaniées ont des perméabilités assez élevées (taux de perte de 33 unités Lugeon au maximum), et des roches marneuses ainsi que les marnes-calcaires en planches ont une tendance d'augmenter leur perméabilité aux pressions d'eau supérieures à 5 kg/cm². Ces phénomènes signifient qu'il est nécessaire de prendre des mesures appropriées pour le traitement de fondation ainsi que pour l'injection d'étanchement.

(c) Puits de reconnaissance

Comme montré dans la Figure 1-3, 5 puits de reconnaissance ont été exécutés dont P-10 sur la rive gauche et 4 puits de P-11 à P-14 sur la rive droite de l'emplacement du barrage. Leurs coupes de terrain sont montrées dans l'Appendice No. 3.

De ces puits, le puits P-11 a été fouillé dans l'endroit où la couverture atteint 4 mètres et le reste a été exécuté aux endroits où la couverture n'atteint qu'environ 1 mètre.

L'épaisseur de la surface du terrain altéré est plus de 2 mètres dans le puits P-11, de 1,7 mètres dans le puits P-13 et moins d'un mètre dans le reste. En dessous du terrain altéré se trouvent des roches bien serrées, quoique tendres. A cause de leurs profondeurs faibles les puits P-11 et P-14 n'atteignent pas le niveau d'eau souterraine. Dans les autres puits la nappe d'eau se situe aux niveaux de 3,0 à 4,85 mètres de profondeur. Dans tous les cas les explosifs n'ont pas été employés pour l'excavation.

(5) Essais au laboratoire

Les essais sur les échantillons intacts, prélevés dans les puits de reconnaissance et les sondages carottés, ont été exécutés au laboratoire. Les résultats d'essais sur les échantillons prélevés dans les puits et dans les trous de sondages sont montrés respectivement dans le Tableau 1-6 et le Tableau 1-7.

5 échantillons ont pu servir aux essais triaxiaux pour la fondation (marne) du barrage. Ils ont été prélevés dans les puits et les sondages suivants:

P-10	1,5/1,7 mètres
P-11	5,5/5,8 mètres
P-13	3,6/3,8 mètres
SB-11	19,05/19,35 mètres
SB-12 bis	10,23/10,65 mètres

De ces 5 échantillons celui du puits P-13 (3,6/3,8 m) a été soumis aux essais exécutés au laboratoire de l'EPDC.

L'échantillon du puits P-10 (1,5/1,7 m), consisté en marne dure, présente l'angle de frottement interne de 40 degrés. Ceci veut dire que le terrain a une résistance assez forte comme fondation du barrage.

Par rapport aux marnes réparties sur la rive gauche, les marnes sur la rive droite ont des résistances nettement faibles. Dans la Figure 1-10, celles-ci sont classées en 3 catégories de roches: la marne fissurée, la marne altérée et la marne cisailée. Les 4 échantillons prélevés sur la rive droite et soumis aux essais triaxiaux se classent comme suit:

SB-12 bis	Marne fissurée
P-11	Marne altérée
P-13	Marne altérée
SB-11	Marne cisailée

L'angle de frottement interne (ϕ') dans les essais CUi (consolidation non drainée - consolidation imparfaite - compression non drainée) et CUp (consolidation non drainée - consolidation parfaite - compression non drainée) est de 25 degrés pour la marne fissurée (SB-12 bis) et de 12 à 20 degrés pour la marne altérée et la marne cisailée (P-11, P-13 et SB-11). La résistance au cisaillement de design ne tient compte que de l'angle de frottement interne (ϕ'), et on a adopté une valeur de 20 degrés pour la marne fissurée incluant une marge de sécurité étant donné que les essais n'ont été faits que sur un échantillon, tandis que l'on a adopté une valeur de 13 degrés pour la marne altérée et la marne cisailée compte tenu des résultats des essais CUi et CUp.

(6) Observations du point de vue de géologie et de génie civil

Compte tenu des résultats d'étude ci-dessus, il est possible de récapituler les observations relatives à l'emplacement du barrage comme suit:

- 1) Sauf la partie amont de l'axe du barrage, l'appui latéral rive gauche est assez solide comme fondation du barrage parce qu'il est consisté en calcaire dur et que le relâchement du calcaire même est limité à la surface du terrain.
- 2) Le long du ruisseau, le calcaire dur en bloc se trouve en aval de l'axe du barrage. Toutefois, ce calcaire devient tendre à cause de l'altération au fur et à mesure qu'il s'approche de l'axe du barrage.
- 3) Sur la rive droite la présence des trois failles A, B et C a été présumée. Ce seraient ces failles qui ont avancé l'altération et la dégradation du terrain sur toute la zone. Le terrain est tendre jusqu'au profond. Toutefois, le niveau d'eau souterrain est maintenu à environ 10 mètres de profondeur. Ceci laisse supposer que la roche au profond serait assez compacte, quoique tendre.
- 4) Le résultat des essais d'absorption montre que dans le terrain dur la perméabilité diminue avec la profondeur. Dans le cas de sondage SB-10 le tronçon compris entre 10 et 20 mètres de profondeur a enregistré le taux de perte maximum de 21 unités Lugeon, mais que le tronçon plus profond a enregistré les valeurs inférieures à 14 unités Lugeon aux pressions plus fortes. Toutefois, dans le cas de sondage SB-11 le terrain intercalé entre les failles A et B a enregistré le taux de perte maximum de 32 unités Lugeon à cause des

fissures parallèles à la direction du trou. Il est à noter que dans les failles et les roches altérées il y a beaucoup plus d'endroits de perméabilité faible que dans les roches dures.

- 5) Près de la surface du terrain il y a des endroits très altérés qui ne permettaient pas d'exécuter les essais d'absorption à cause de l'impossibilité de la mise en place du joint étanche. Toutefois, dans beaucoup d'endroits soumis à l'essai la pression d'eau injectée a pu être augmentée jusqu'à 10 kg/cm^2 . Comme particularité de cet emplacement, on peut remarquer que le terrain présente des valeurs Lugeon qui signifient presque l'imperméabilité aux pressions d'eau faibles, mais qu'il a une tendance d'augmenter les valeurs Lugeon aux pressions d'eau supérieures à 5 ou 7 kg/cm^2 . Ce phénomène résulterait de la démolition des roches à cause de l'augmentation de la pression d'eau injectée.
- 6) Les failles présumées sur la rive droite seraient assez larges. Si elles s'allongent parallèlement au ruisseau, l'implantation du barrage ne peut se faire en dehors de la zone de failles. La dégradation du terrain est très avancée à la surface de la zone de failles et des zones environnantes. Dans les sondages SB-11 et SB-12 bis les essais d'absorption étaient impossibles à cause des éboulements. L'épaisseur du terrain dégradé est d'environ 10 mètres.
- 7) Comme excavation de la partie noyau central du barrage, il faut enlever des roches altérées et des failles relâchées qui s'étalent sur l'appui latéral rive gauche avec une profondeur de 5 mètres environ et depuis le pied du massif de la rive gauche jusqu'à l'appui latéral rive droite avec une profondeur de 10 mètres environ.
- 8) Le noyau central du barrage doit être remblayé en évitant la zone des brèches calcaires parce que leurs caractéristiques ne conviennent pas à la fondation du noyau et qu'en dessous de ces brèches calcaires la présence des fentes ou d'anciennes couvertures est à craindre. Même pour la partie d'enrochements il faut prendre des mesures appropriées pour ne pas provoquer des tassements anormaux des brèches calcaires. Dans la phase des études détaillées les risques de leurs tassements doivent être examinés en détail.
- 9) Des sondages carottés et des reconnaissances de la surface du sol conduisent à juger qu'il n'existe pas d'entonnoir dans les calcaires du site. La quantité et doivent être prises pour le terrain étendu depuis le lit du ruisseau jusqu'à l'appui latéral rive droite et surtout pour la zone de failles.
- 10) Des sondages carottés et des reconnaissances de la surface du sol conduisent à juger qu'il n'existe pas d'entonnoir dans les calcaires du site. La quantité et la pression d'eau jaillie à partir du pied du massif sur la rive droite sont très faibles.
- 11) En conclusion, on peut juger que si un traitement approprié est exécuté sur le terrain de fondation, il est possible d'implanter le barrage sur l'emplacement proposé.

1.3.3 Emplacement de la prise d'eau aval

Comme montré dans les Figures 1-2 et 1-8, l'emplacement de la prise d'eau aval a été déterminé en évitant la faille traversant le col du Djebel El Fahama. Comme roches visibles en affleurements aux environs de cet emplacement, on voit çà et là les marnes gréseuses altérées ou les marnes schisteuses altérées. D'après le sondage carotté SU-11, les caractéristiques du terrain de cet emplacement sont comme suit:

SU-11 : Sondage vertical de 70 mètres de long.

0 - 3,0 m :	Couverture
0 - 0,4 m :	Terre végétale
0,4 - 3,0 m :	Argile brunâtre très plastique. Oxydée de fer.
3,0 - 44,0 m :	Marne grisâtre. Tubage NX jusqu'à 36,5 m.
3,0 - 5,0 m :	Marne argileuse cassée.
5,0 - 13,0 m :	Carottes broyées en morceaux.
13,0 - 21,0 m :	Carottes broyées en morceaux et en grains en alternance.
	Carottes broyées en grains aux tronçons compris entre 13,0 et 14,0 m, 15,0 et 17,0 m et 18,0 et 21,0 m.
21,0 - 23,0 m :	Carottes dures cassées en courtes barres.
23,0 - 29,0 m :	Carottes modérément dures, broyées en fragments.
29,0 - 33,8 m :	Carottes modérément dures, broyées en morceaux.
33,8 - 34,5 m :	Carotte prélevée en bâton. Dure.
34,5 - 37,0 m :	Carottes broyées en fragments. Argileuses.
37,0 - 38,2 m :	Carottes broyées en morceaux. Marne schisteuse avec pendage de 45 degrés.
38,2 - 41,0 m :	Carottes dures, prélevées en bâtons.
41,0 - 41,8 m :	Carottes broyées en fragments. Veines de calcite.
41,8 - 44,0 m :	Carottes cassées en courtes barres, modérément dures. Veines de calcite. Schistosité au pendage de 45 degrés.
44,0 - 70,0 m : (jusqu'au fond)	Marne très dure, mais le pourcentage de carottage est faible.
44,0 - 48,0 m :	Carottes broyées en morceaux et en grains.
	Marne argileuse.
48,0 - 51,0 m :	Carottes dures, cassées en courtes barres.
	Joint au pendage de 60 degrés.
51,0 - 54,0 m :	Carottes broyées en morceaux.
52,0 - 54,0 m :	Carottes tendres.
53,5 m :	Marne argileuse.
36,5 - 69,0 m :	Tubage BX.
65,0 - 70,0 m :	Impossibilité de l'essai d'absorption à cause des éboulements.

Comme montré dans l'Appendice No. 1 et dans la Figure 1-8, le pourcentage de carottage dans ce trou a été très faible. Les carottes dures et tendres ont été prélevées en alternance. On a adopté le tubage NX de 0,4 à 36,4 mètres de profondeur, et le tubage BX de 36,5 à 69,0 mètres de profondeur.

Les essais d'absorption étaient impossibles à cause des boulements dans les tronçons de 0 à 30 mètres, de 45 à 50 mètres et de 65 à 70 mètres de profondeur. Le taux de perte maximum était de 21,4 unités Lugeon dans le tronçon compris entre 30 et 35 mètres qui correspond approximativement à la cote de la retenue normale du réservoir inférieur. Toutefois, de là jusqu'à 45 mètres de profondeur le taux de perte a diminué aux niveaux de 16 à 5 unités Lugeon et encore jusqu'à 0,1 unité Lugeon. La nappe d'eau souterraine dans le trou était située au niveau 7,85 mètres de profondeur.

L'ouvrage de la prise d'eau aval doit être construit sur une roche mélangée des éléments tendres. D'ailleurs, les eaux infiltrées du réservoir inférieur sont à craindre à cet emplacement. Il est donc nécessaire d'établir des solutions pouvant résoudre ces problèmes. De l'aval vers l'amont, la galerie de fuite, après avoir traversé la marne tendre, passera le calcaire-marneux dur à environ 60 mètres en amont de la chambre d'équilibre. Les études effectuées jusqu'à présent laissent supposer que les terrains aux environs de la prise d'eau aval présenteraient presque les mêmes caractéristiques que cet emplacement choisi.

**Tableau 1-1 LISTE DES POINTS DE REPERE D'UNE SERIE DE PLANS TOPOS
A L'ECHELLE 1/500
(LIST OF SURVEYED POINTS IN A SERIES OF TOPOGRAPHIC
MAPS AT SCALE 1/500)**

Points de repère	Coordonnées			Observation
	X+	Y+	Z	
J 1	85.319,19	79.921,23	295,23	
J 2	85.450,94	79.842,08	303,25	
J 3	85.580,35	79.798,30	293,75	
J 4	85.535,69	79.638,22	335,15	
J 5	85.621,51	79.709,62	314,14	
J 6	85.699,20	79.622,99	323,06	
J 7	85.692,18	79.737,33	301,71	
J 8	85.819,10	79.787,19	287,08	
J 9	85.873,15	79.636,47	311,20	
J10	85.803,44	79.569,98	331,90	
J11	85.682,30	79.484,01	352,58	
J12	85.838,58	79.476,96	341,99	
J13	86.020,10	79.462,78	334,55	
J14	86.120,05	79.545,27	316,04	
J15	86.055,60	79.606,14	305,65	
J16	86.043,31	79.674,78	291,62	
J17	86.247,73	79.557,26	301,77	
J18	86.398,38	79.538,76	300,34	
J19	86.511,52	79.514,42	297,70	
J20	86.669,89	79.556,16	286,15	
J21	86.669,27	79.477,76	296,57	
J22	86.648,12	79.362,95	316,77	
J23	86.714,15	79.441,35	296,24	
J24	86.771,98	79.271,83	303,97	
J25	86.772,24	79.176,01	318,48	
J26	86.610,74	79.236,49	339,17	
J27	86.580,33	79.140,82	369,15	
J28	86.620,21	79.114,10	369,47	
J29	86.721,40	79.060,44	358,31	
J30	86.895,39	79.045,96	334,31	
J31	86.551,52	78.744,20	519,69	
J32	86.666,72	78.709,02	509,31	
J33	86.566,01	78.683,07	507,51	
J34	86.445,14	78.851,14	508,16	
J35	86.625,75	78.774,00	521,61	
J36	86.688,99	78.818,68	493,31	
J37	86.685,42	78.930,29	439,41	
J38	86.499,78	79.003,93	436,95	
J39	86.568,64	78.662,54	498,36	
J40	86.667,01	78.675,76	500,01	
J41	86.651,55	78.507,30	442,56	

**Tableau 1-2 LISTE DES SONDAGES EN CAROTTAGE
(LIST OF CORE BORINGS)**

Sondage	Localisation	Coordonnées			Direction	Profondeur (m)
		X+	Y+	Z		
SB 1	Barrage, rive gauche	87.028,91	78.642,17	420,77	90°	35,0
SB 2	Barrage, lit	87.108,06	78.642,00	393,00	90°	35,0
SB 3	Barrage, rive droite	87.268,78	78.643,46	422,82	90°	35,0
SB 4	Barrage, rive droite	87.184,80	78.759,93	419,61	90°	35,0
SB 5	Barrage, lit	87.103,80	78.736,94	393,99	90°	35,0
SB 7	Barrage, rive gauche	87.015,88	78.543,96	407,54	90°	30,0
SB 8	Prise d'eau amont	87.184,70	78.642,94	404,94	90°	35,0
SU 1	Prise d'eau aval (variante)	86.022,03	79.644,05	298,57	90°	70,0
SU 2	dito	85.985,16	79.429,74	339,79	90°	38,5
SU 4	dito	86.242,47	79.516,81	310,22	90°	100,0
SU 5	Galerie d'amenée	86.319,87	79.400,52	330,00	90°	100,0
SU 6	Galerie d'amenée	86.413,12	79.260,43	350,14	90°	125,0
SU 7	Centrale	86.502,77	79.125,87	380,24	90°	75,0
SB10	Barrage, rive gauche	87.047,44	78.644,03		N 45°	50,0
SB11	Barrage, rive droite	87.157,47	78.638,77		S 45°	55,0
SB12	Barrage, rive droite				90°	30,6
SB12 bis	Barrage, rive droite	87.246,77	78.641,06		90°	30,0
SB13	Col du sud de la zone de réservoir supérieur	86.613,08	78.480,04		90°	35,0
SB14	Col du nord de la zone de réservoir supérieur	87.692,10	77.872,81		90°	35,0
SI 2	Prise d'eau amont	86.947,01	78.490,58		90°	150,0
SU11	Prise d'eau aval proposée	85.500,00	79.470,00		90°	70,0

Total : 21 trous et 1.444,1 mètres

- Note :
1. Les sondages de SB1 à SB8 ainsi que de SU1 à SU7 ont été exécutés au cours de la campagne de 1974-75.
 2. Les sondages de SB10 à SB14 ainsi que le sondage SU11 ont été exécutés au cours de la présente campagne (1979-80).
 3. La plupart des trous sont de carottage NX.
 4. Coordonnées Z indiquent la cote NGT en mètres.

**Tableau 1-3 LISTE DES PUIITS DE RECONNAISSANCE
(LIST OF TEST PITS)**

Puits	Localisation	Cote (m)	Profondeur (m)	Puits	Localisation	Cote (m)	Profondeur (m)
P 2	Barrage, rive droite	421,47	5,20	H 1	Prise d'eau amont		5,00
P 3	ditto	433,11	4,30	H 2	ditto		5,00
P 4	ditto	426,25	5,60	H 3	ditto		5,70
P 5	ditto	420,10	6,00	H 4	ditto		5,90
P 6	ditto	412,50	5,50	H 5	ditto		6,30
P 7	ditto			H 6	ditto		6,80
P 8	ditto	426,25	5,60	H 7	ditto		4,80
				H 8	ditto		4,00
A 1/2	Réservoir supérieur	468,95	3,65	H 9	ditto		3,80
A 3/2	ditto	449,81	3,50	H10	ditto		2,00
A 5/2	ditto	431,50	2,00	H11	ditto		2,80
A 1/4	ditto	459,93	4,30	H12	ditto		3,50
A 3/4	ditto	444,94	4,00	H13	ditto		2,80
				H14	ditto		3,00
				H15	ditto		4,00
B 1	Barrage, rive droite	426,74	3,80				
B 2	ditto	426,71	2,25				
B 3	Réservoir supérieur	432,57	2,00	K 1	Barrage, rive droite		0,70
B 4	ditto	454,16	2,00	K 2	ditto	420,20	2,70
				K 3	ditto	420,18	1,50
C 1	Col du nord	459,68	2,00	K 4	ditto	428,63	0,60
C 2	ditto	437,48	2,30	K 5	ditto	429,08	1,90
C 3	ditto	442,11	1,70	K 6	ditto	429,81	2,30
C 4	ditto	444,81	2,70				
C 5	ditto	450,60	1,40	L 1	Prise d'eau aval (variante)		4,90
				L 2	ditto		5,00
D 1	Col du nord	442,42	2,00	L 3	ditto		2,00
D 2	ditto	436,74	1,60				
D 3	ditto	431,57	2,00	P10	Barrage, rive gauche		3,50
D 4	ditto	436,36	3,20	P11	Barrage, rive droite		6,00
D 5	ditto	435,38	2,50	P12	ditto		4,00
D 6	ditto	433,72	1,45	P13	ditto		5,70
				P14	ditto		3,50

Note : Les puits 10 à 14 ont été exécutés au cours de la campagne de 1979 et le reste lors de la campagne de 1974-75.

Tableau 1-4 TYPES ET CARACTERISTIQUES DES ROCHES REPARTIES AU SITE
(ROCK TYPE AND ITS CHARACTER DISTRIBUTED IN KASSEB SITE)

Age	Type de roche	Caractéristiques	Lieux de répartition	
Quaternaire	Sol superficiel	Limon et argile. Très cohérent et quelquefois on y trouve des racines.	Terrain plat et le champs cultivé.	
	Eboulis de pente et éclats de roches	Sol cohérent avec déblais. Epaisseur de quelques mètres.	Fond du réservoir supérieur. Versants et pieds de massifs.	
	Brèche-calcaire cimentée	Graviers et déblais cimentés avec matières calcaires. Roche généralement vacuolaire consolidée faiblement ou demi-consolidée partiellement. Le gravier est principalement le calcaire et localement la marne. Epaisseur de quelques mètres.	Rive droite du réservoir supérieur. Terrain en aval de l'axe du barrage.	
Paléogène	Calcaire	Calcaire massif	Roche grisâtre ou gris sombre. Les intervalles d'assises sont quelquefois supérieures à 1 mètre. Roche dure et de bonne qualité.	Noyau du Djebel El Fahama.
		Calcaire-marneux assisé	Roches grisâtres ou gris sombre bien stratifiées, entre lesquelles sont intercalées les assises de marne. Les intervalles des assises sont de 15 à 30 cm. Roche dure et d'assez bonne qualité.	Versants des massifs de Bou Sattar et d'El Fahama, ainsi que les massifs situés à l'est du réservoir supérieur.
	Marne	Marne-calcaire rubanée	Roche grisâtre et bien rubanée. On y trouve partiellement les intercalations de calcaire. Intervalles d'assises de 5 à 15 cm.	
		Marne-calcaire massive	Roche gris sombre, altérée et amollie jusqu'à profondeur considérable. Faciès sableux dans quelques endroits.	Majeure partie des réservoirs supérieur et inférieur, ainsi que leurs proximités. Localement les versants du Djebel El Fahama
	Argile schisteuse	Intercalée comme assise mince dans les calcaires ou les marnes. Feuilletage est trouvé dans beaucoup de cas. Friable et pas dure. Noirâtre.		
	Grès glauconieux	Intercalé comme assise dans les calcaires ou les marnes. Brisé en grains moyens ou grossiers. Roche assez dure ou l'être modérément, mais les affleurements sont faiblement altérés dans beaucoup d'endroits.	Petite crête située au sud du col de sud de la zone du réservoir supérieur. Zone du réservoir inférieur.	

**Tableau 1-5 ANALYSE CHIMIQUE DE L'EAU JAILLIE DU RESERVOIR SUPERIEUR
(CHEMICAL ANALYSIS OF SPRING WATER OF UPPER RESERVOIR)**

RESULTAT D'ANALYSE D'EAU

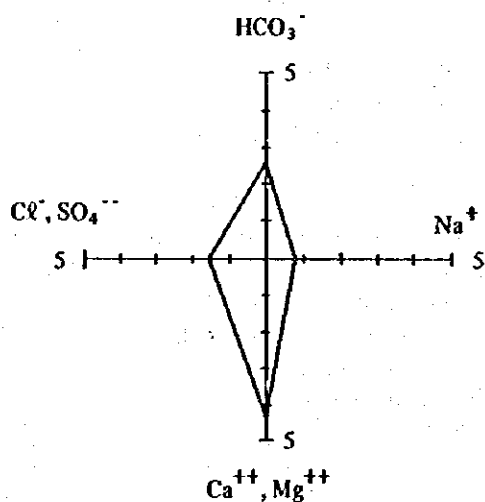
REPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
DIRECTION E.G.T.H.
Laboratoire de Ben Arous

Analyse No. 458
Demandeur: STEG (M. HELARI)
Remise au Labo. le 12/12/1979
Analyse effectuée par M. CARBOUJ

OBSERVATIONS :	K mg/l	P.H.	Conductivité mmhos/cm		R.S. mg/l d'après la cond.	R.S. mg/l	D.H.
			25 C	20 C			
	4	7,46	0,41	0,37	280	382	21

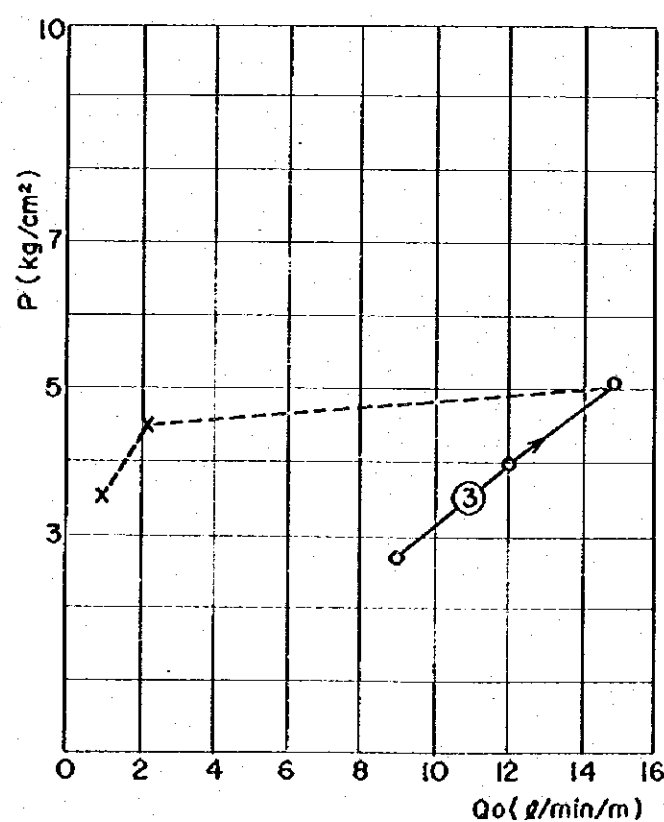
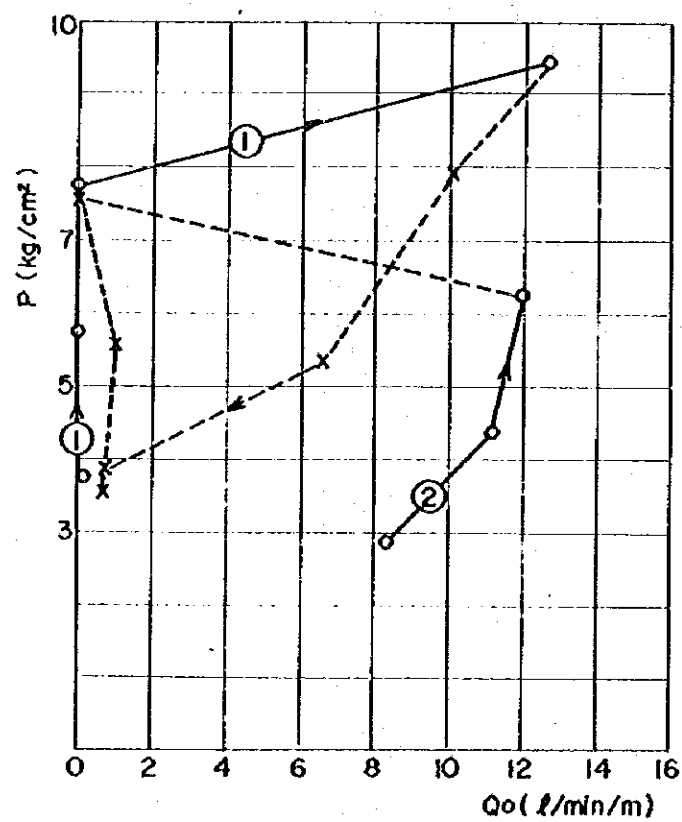
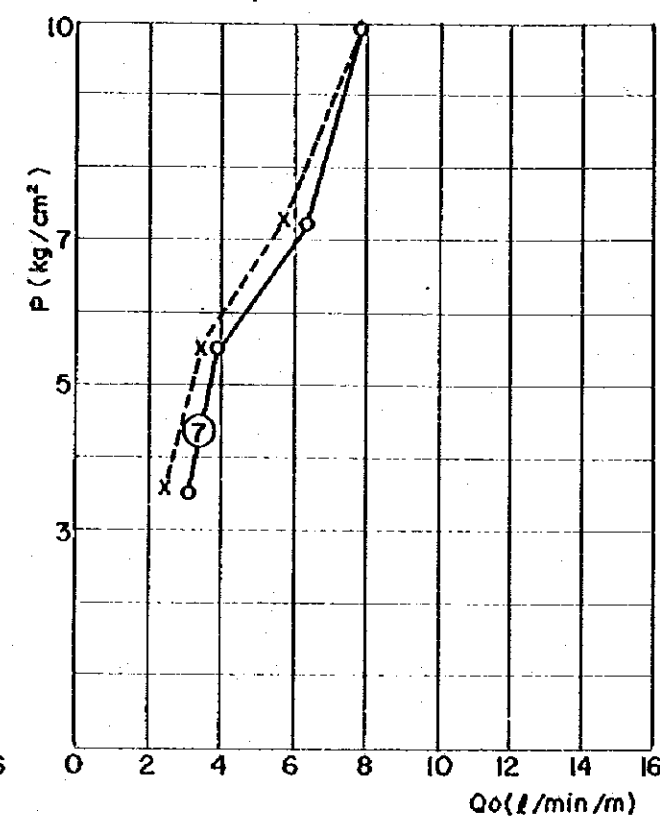
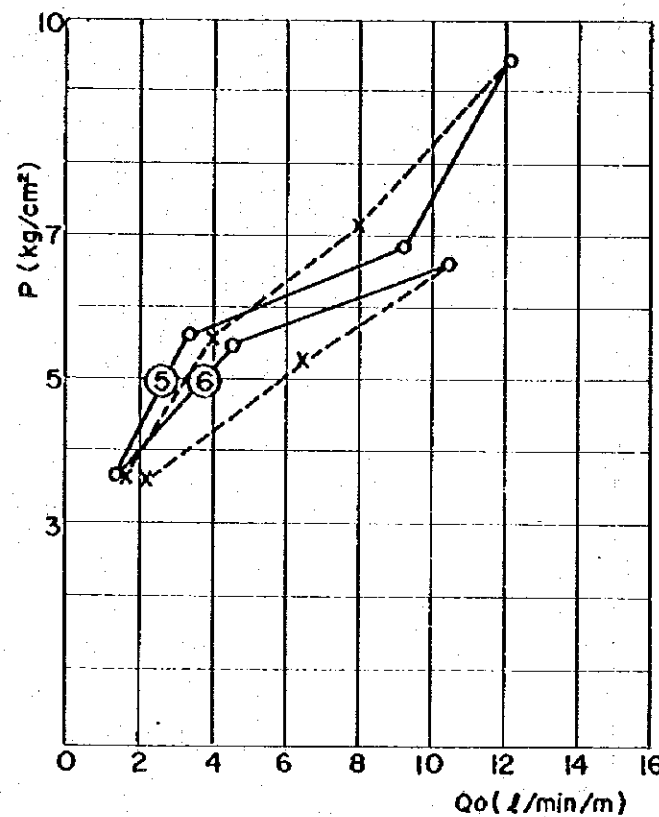
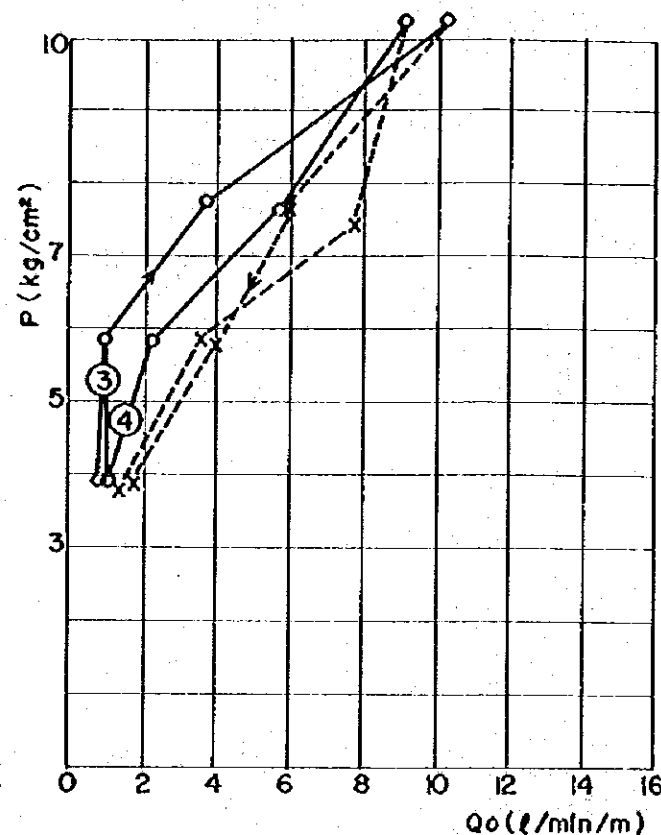
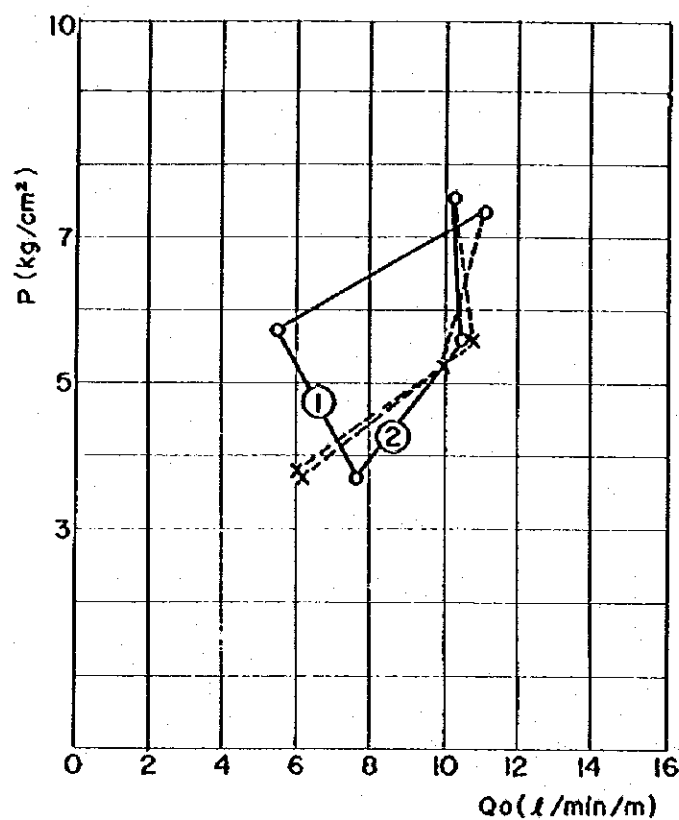
RESULTAT DE L'ANALYSE CHIMIQUE EN : me/l et mg/l

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
3,60	0,80	0,78	0,51	1,0	2,60
72	9	19	25	35	158



Echelle pour le tétradiagramme
0 ——— 5 me/l
(epm)
me/l: équivalent par million

Graphique 1-1 RELATION ENTRE LA PRESSION ET LE VOLUME D'EAU INJECTÉE (Série 1/3)



EXPLICATION

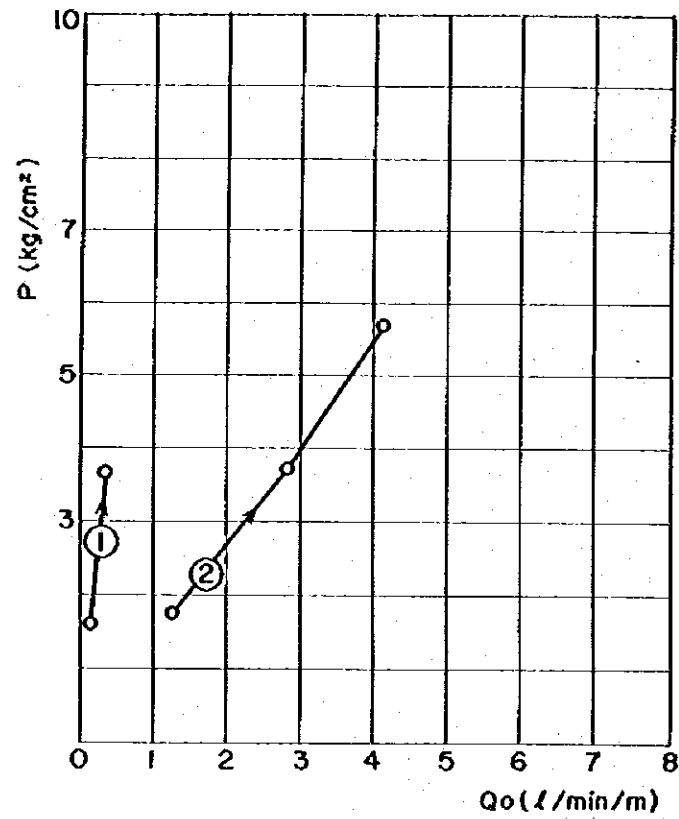


Tronçons non soumis à l'essai :

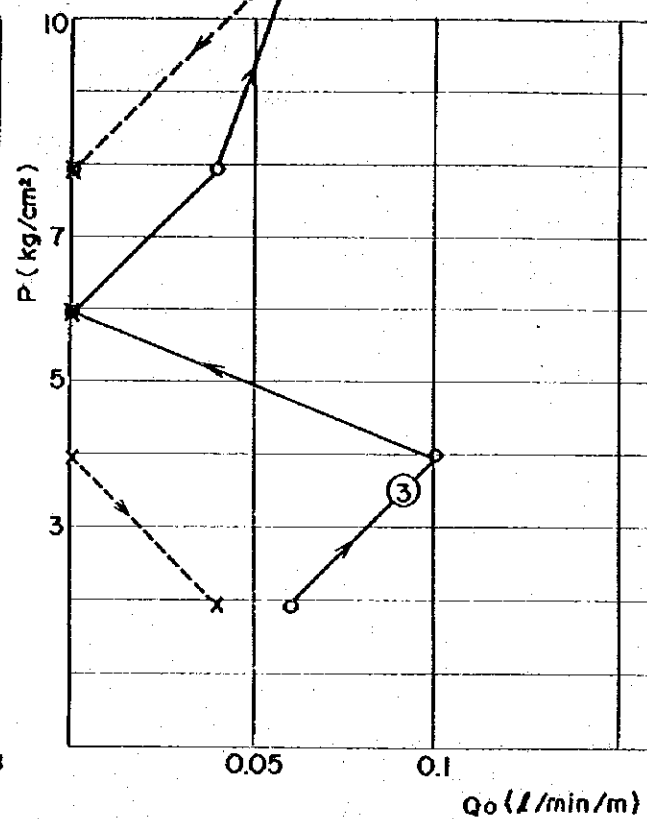
SB-10 : De 0 à 10 m de profondeur

SB-11 : De 0 à 30 m de profondeur et de 45 à 50 m de profondeur

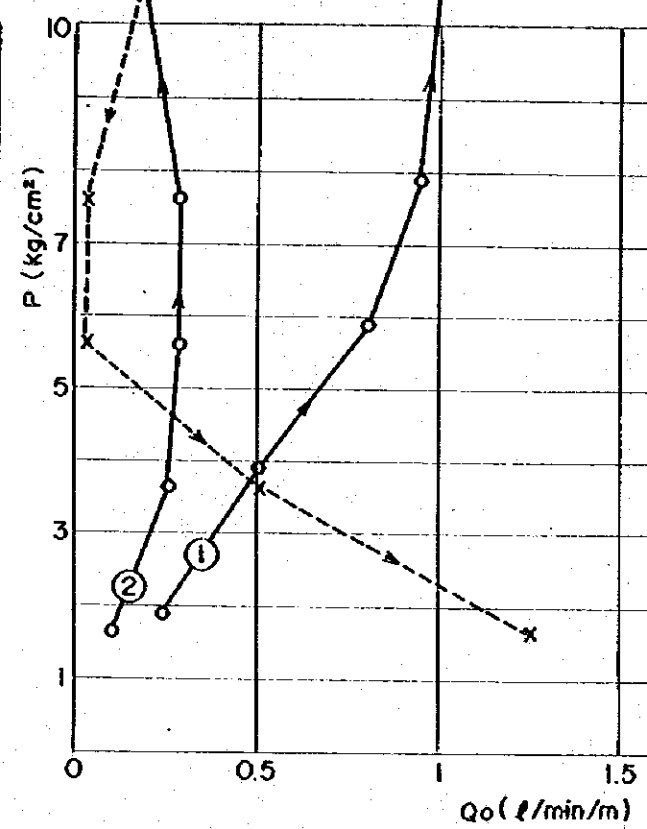
Graphique 1-2 RELATION ENTRE LA PRESSION ET LE VOLUME D'EAU INJECTÉE (Série 2/3)



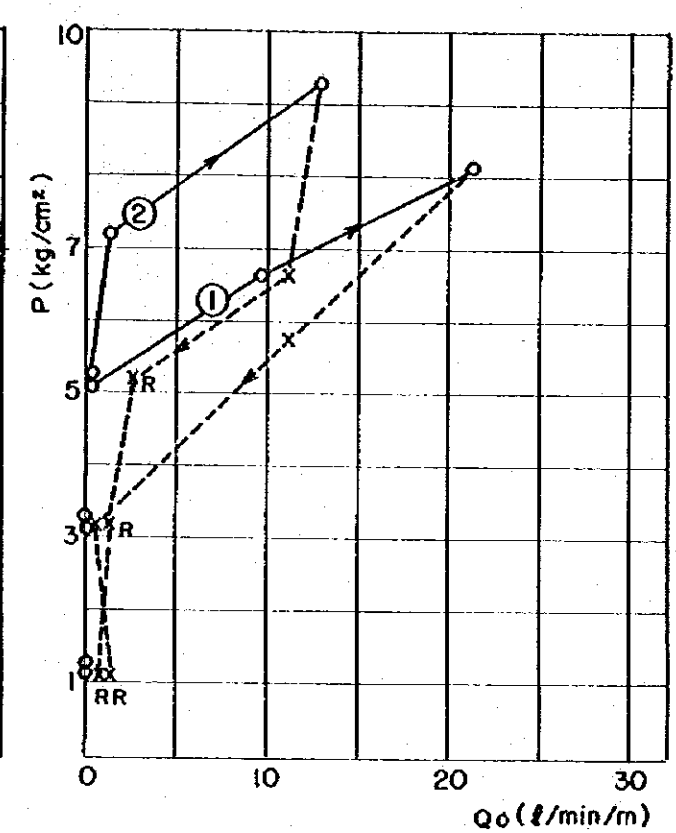
Graphique 1-2-1 SB-12 bis : 10-15m ①
20-25m ②



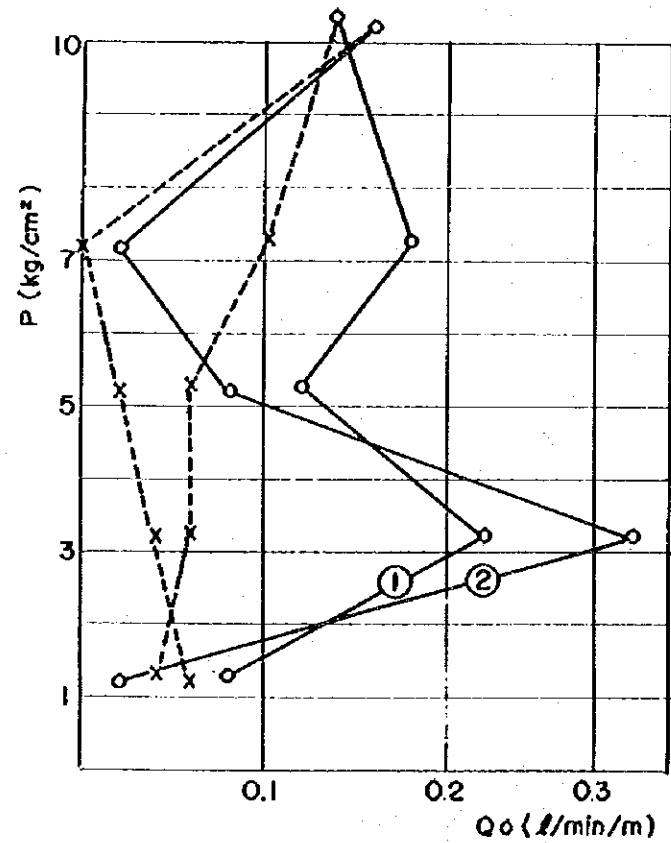
Graphique 1-2-2 SB-12 bis : 25-30m ③



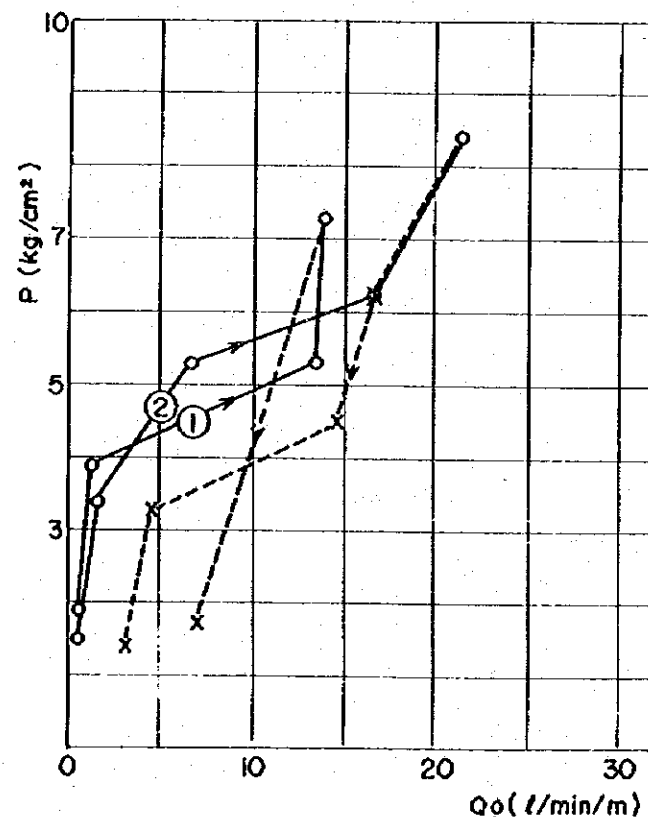
Graphique 1-2-3 SB-13 : 24-29m ①
29-33m ②



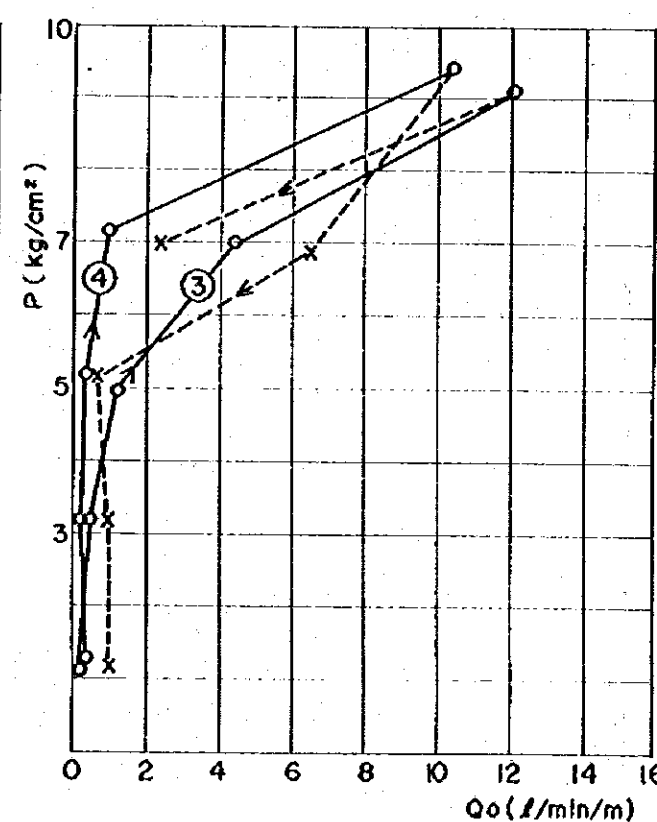
Graphique 1-2-4 SB-14 : 15-20m ①
20-25m ②



Graphique 1-2-5 SB-14 : 25-30m ①
30-35m ②



Graphique 1-2-6 IB-2 : 10-15m ①
15-20m ②



Graphique 1-2-7 IB-2 : 20-25m ③
25-30m ④

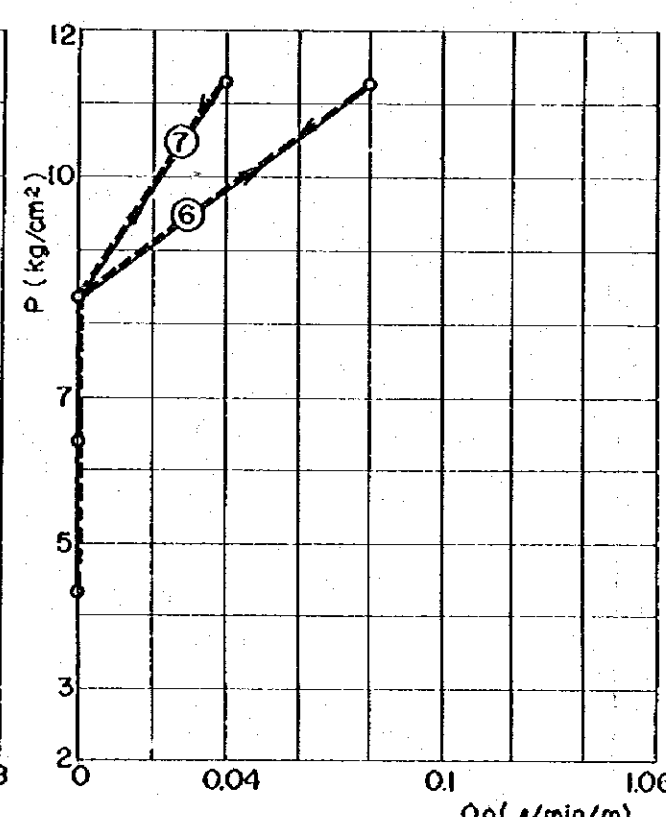
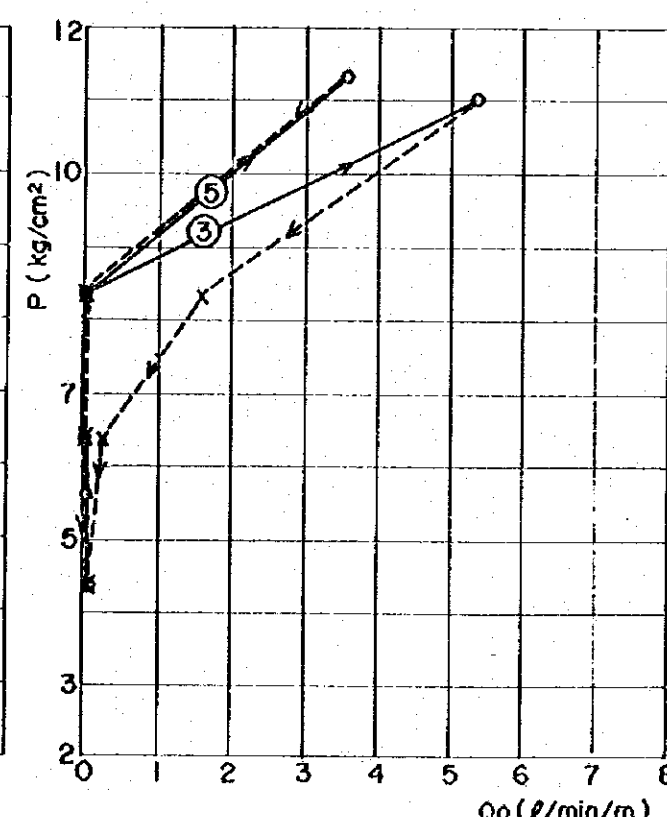
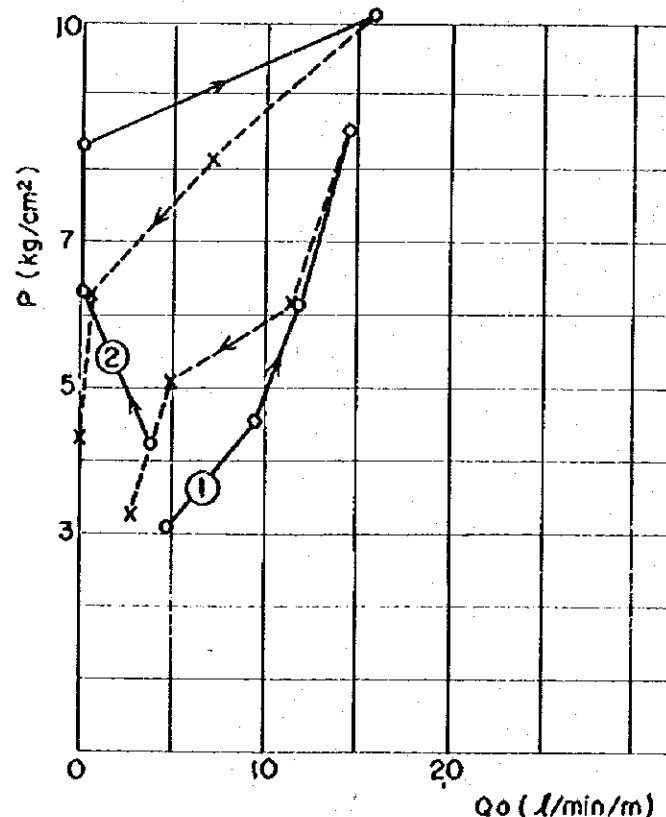
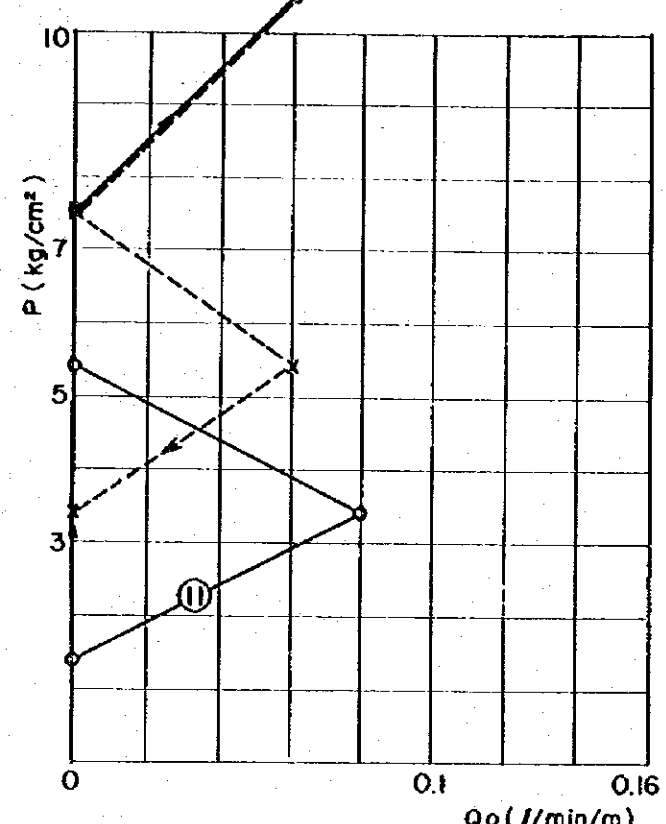
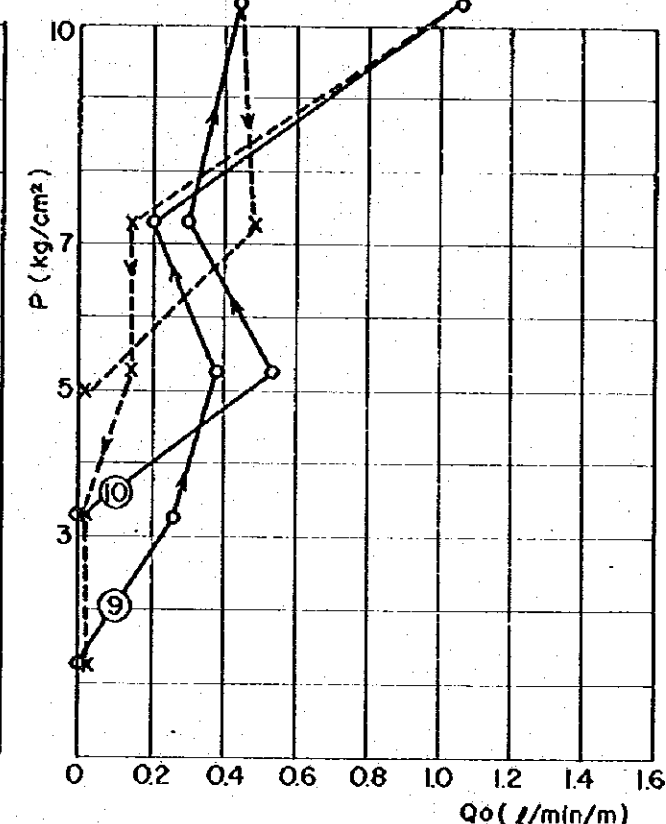
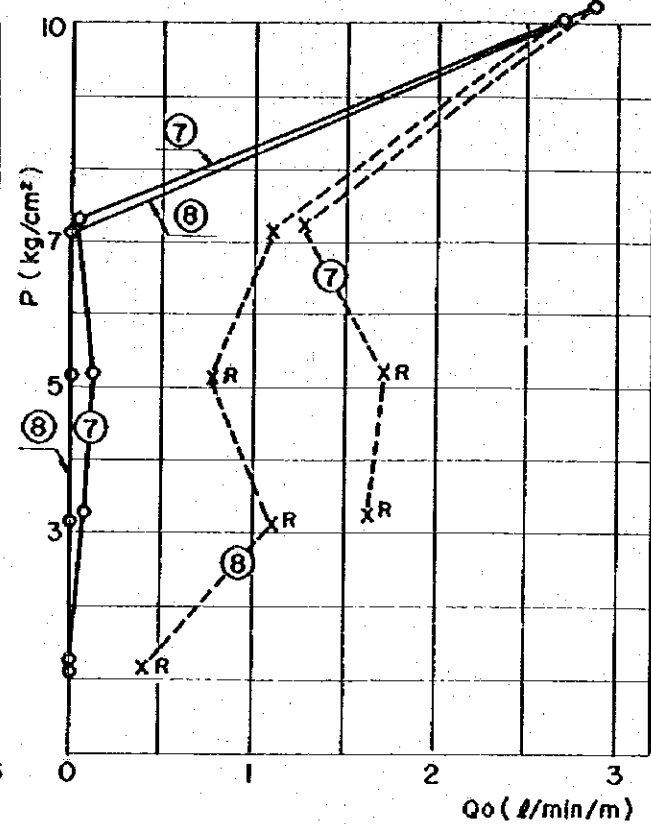
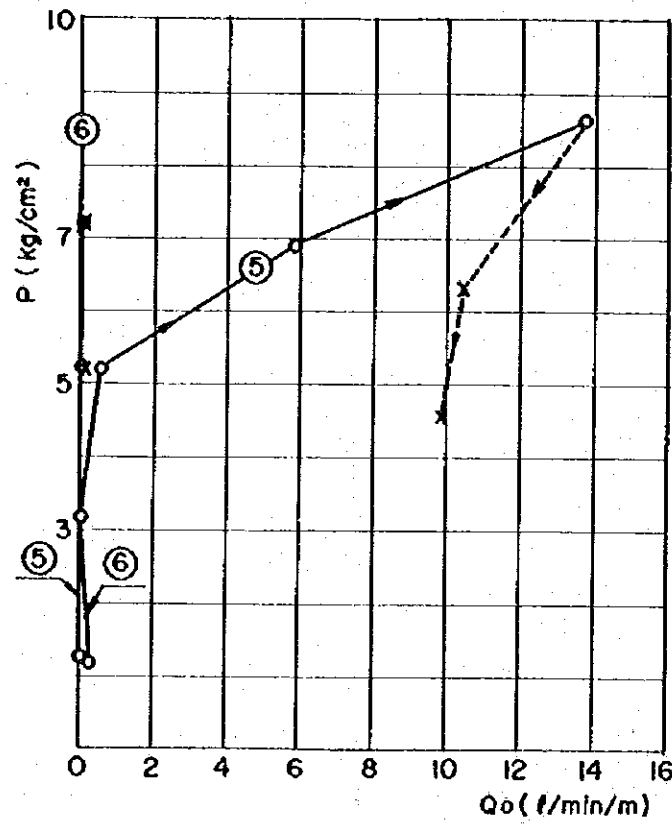
EXPLICATION

 Pression croissante
  Pression décroissante

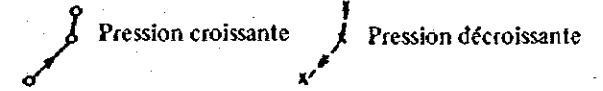
Tronçons non soumis à l'essai :

- SB-12 bis : De 0 à 10 m et de 15 à 20 m de profondeur
- SB-13 : De 13 à 24 m et de 33 à 35 m de profondeur
- SB-14 : De 14 à 15 m de profondeur
- IB-2 : De 0 à 10 m et de 65 à 150 m de profondeur

Graphique 1-3 RELATION ENTRE LA PRESSION ET LE VOLUME D'EAU INJECTÉE (Série 3/3)



EXPLICATION



Tronçons non soumis à l'essai :

- IB-2 : De 0 à 10 m et de 65 à 150 m de profondeur
- La nappe d'eau n'a pas été mesurée en dessous du niveau 125 mètres de profondeur
- SU-11 : De 0 à 30 m, de 35 à 50 m et de 65 à 70 m de profondeur

Tableau 1-6-2 SOMMAIRE DES ESSAIS EN PLACE ET EN LABORATOIRE POUR LA FONDATION DU BARRAGE (Suite)
- PUIXS DE RECONNAISSACE -

Puits	Pro-fon-deur (ω)	Désignation	Echantillon remanié										Echantillon intact						En place			
			Classi-ficati-on du sol	ωn (%)	Poids spéci-fique	Lts. Atterberg		Granulométrie			Proctor		Consolidation			Compression triaxiale				ω (%)	γd (t/m³)	
						LL	PI	+5mm (%)	5mm-0,08mm (%)	-0,08mm (%)	ωopt (%)	γdmax (t/m³)	Initiale ω (%)	γd (t/m³)	Po (kg/cm³)	Cc	Mode d'essai	Initiale ω (%)	γd (t/m³)			c' (kg/cm²)
P-12	1,0	Argile jaune grisâtre	(0)	16,7	2,70	56,0	30,6	3,5	2,5	94,0	24,0	1,57	(1,0)	1,7	2,4	UU	19,0	1,70	(0,78)	(16,0)	17,6	1,49
			CH										(1,0)									
	2,0	Marne gris verdâtre, altérée avec petites écailles de calcite	(1,5)	19,0	1,66	1,7	2,4	CUP	19,0	1,69	0,52	18,0	20,5	1,55								
			(1,3)												(1,3)							
P-13	1,0	de 3,8 m, très compacte																				
	2,0	Marne brun sombre, complètement altérée et étroitement fissurée																				
	3,0	Marne gris sombre, saine mais friable et tendre																				
	4,0															(3,6)						
	5,0															CUP	19,5	1,76	0,45	13,0		
	5,7															(3,8)						

Note: ωn : Teneur en eau nature
 Note: ωopt : Teneur en eau optimum
 γd : Densité à sec
 Po : Contrainte de préconsolidation
 Co : Indice de compression

UU : Consolidation non drainée → Compression non drainée
 CUI : Consolidation non drainée → Consolidation imparfaite → Compression non drainée
 CUP : Consolidation non drainée → Consolidation parfaite → Compression non drainée
 c' φ : Cohésion et angle de frottement interne sous forme de contrainte effective
 (c) φ : Cohésion et angle de frottement interne sous forme de contrainte totale
 (2,0) : Profondeur d'échantillonnage
 (2,3)

**Tableau 1-7 SOMMAIRE DES ESSAIS AU LABORATOIRE POUR LA FONDATION DU BARRAGE
- CAROTTES DE SONDAGE -**

Sondage	Profondeur (m)	Couleur	Observation			Nom de roche	ω_n (%)	γ_{dn} (t/m ³)	Absorption (%)	Compression simple		Compression triaxiale					Teneur en CaCO ₃ (%)	
			Altération	Dureté	Taille					Naturelle (kg/cm ²)	Saturée (kg/cm ²)	ω_0 (%)	γ_d (t/m ³)	C' (kg/cm ²)	ϕ' (deg)	$\tan \phi'$		
SB-10	6,93- 7,50	Gris sombre	2	2	2-3	Marne	3,5	2,35	2,8		60,6							
	10,15-10,68	"	2	2	2-3	"	3,2	2,41									61,2	
	14,50-15,00	"	2	2	2	"	2,7	2,34									46,3	
	16,50-16,90	"	3	2	2	"	7,2	2,34	5,7		7,6						34,7	
	20,10-20,42	"	1	2	2	"	5,4	2,28										
	23,28-23,68	Grisâtre	1	2	2	"	2,4	2,51	1,8		75,7							
	26,00-26,65	"	1	2	2	"	3,1	2,48									55,7	
	29,55-30,00	"	1	2	2	"	4,2	2,39									61,7	
SB-11	11,00-11,35	Brunâtre	-	-	-	Argile	22,5	1,63				22,5	1,58	0,05	19	0,34		
	12,07-12,37	Grisâtre	5	5	5	Marne	17,3	1,83										
	15,06-15,30	"	5	5	5	"	11,4	1,82										
	19,05-19,35	"	5	5	5	"	14,0	1,89				14,0	1,94	0,01	20	0,36		
	26,00-26,30	"	5	5	5	"	12,4	1,93										
	33,00-35,50	Gris sombre	2	2	3	"	2,5		2,1		102,6							
	35,60-36,00	"	2	2	2	"	2,2	2,47	1,6		35,4							
	39,10-39,50	"	2	2	2	"	2,9	2,44									62,5	
SB-12bis	1,70- 1,92	Brunâtre	-	-	-	Sol résiduel	26,0	1,93			1,10							
	6,50- 6,80	Gris sombre	2	5	5	Marne	21,7	1,65			1,25							
	8,17- 8,30	"	2	5	5	"	20,5	1,70			0,70							
	9,75- 9,90	"	2	5	5	"	18,5	1,79										
	10,23-10,65	"	2	5	5	"	13,2	1,94				13,2	1,92	0,03	25	0,47		
	13,42-13,60	"	2	2	3	"	10,5	2,14			6,00							
	15,65-15,85	"	2	2	3	"	10,5	2,14			13,15							
	17,40-17,62	"	2	5	5	"	11,3	2,01			3,00							
	20,60-20,72	Grisâtre	2	5	5	"	10,9	2,12										
	21,45-21,62	"	2	5	5	"	14,9	1,91										
	23,86-24,00	"	2	5	5	"	13,9	1,96										
	25,80-26,20	"	2	5	5	"	8,3	2,27									6,4	
	29,25-29,58	Gris sombre	2	4	5	"	9,5	2,16									7,7	

Note: 1. Altération 1(fraîche) . . . 5(broyée)
 Dureté 1(dure) . . . 5(tendre)
 Taille 1(cohérente) 2(un peu cohérente) 3(pièces)
 4(fragments) 5(grains)

2. Le procédé de l'essai triaxiale est comme suit:
 Consolidation non drainée → Consolidation parfaite → Compression non drainée
 C', ϕ' : Cohésion et angle, respectivement, de frottement interne sous forme de contrainte effective

CHAPITRE 2 MATERIAUX DE CONSTRUCTION ET LES RESULTATS D'ESSAIS

2.1 GENERALITES

2.2 MATERIAUX IMPERMEABLES

2.3 MATERIAUX D'ENROCHEMENT ET MATERIAUX D'AGGREGATS POUR LE BETON

CHAPITRE 2 MATERIAUX DE CONSTRUCTION ET LES RESULTATS D'ESSAIS

2.1 GENERALITES

Sur la demande de la STEG, motivée par la recommandation du rapport de JICA de novembre 1978, les essais sur les matériaux imperméables pour le noyau du barrage ont été exécutés au Laboratoire de Ben Arous du Ministère de l'Agriculture. Comme décrit dans le rapport ci-dessus, il est supposé que les matériaux d'enrochements, les matériaux filtrants ainsi que les matériaux d'agrégats pour le béton peuvent être trouvés en quantité suffisante et en qualité requise dans les massifs qui se trouvent au nord-est de la zone du réservoir supérieur. Par conséquent les essais sur ces matériaux ont été limités au minimum nécessaire pour savoir leurs caractéristiques fondamentales.

Les recherches des matériaux imperméables ont été effectuées en creusant les puits de reconnaissance dans quatre zones plates proposées d'une superficie totale de 1,2 km² situées au sud de la zone du réservoir supérieur. Les essais ont été effectués sur les échantillons prélevés dans ces puits. Les résultats des observations et des essais conduisent à juger que les matériaux de bonne qualité et en quantité nécessaire sont disponibles principalement dans les zones étendues au pied du massif de Djebel El Fahama à environ 1,5 km au sud de l'emplacement du barrage.

2.2 MATERIAUX IMPERMEABLES

Pour la recherche des matériaux imperméables 15 puits de reconnaissance d'une longueur totale de 54,05 mètres ont été exécutés dans les 4 zones suivantes:

Zone A:	3 puits	Profondeur	12,6 mètres
Zone B:	4 puits	"	7,8 mètres
Zone C:	4 puits	"	8,6 mètres
Zone D:	4 puits	"	25,05 mètres
Total	15 puits		<u>54,05 mètres</u>

Les caractéristiques de ces puits sont montrées dans le Tableau 2-1. Leurs localisations et coupes de terrain sont respectivement montrées dans la Figure 1-2 et l'Appendice N° 3.

Suivant les indications faites par la 1ère mission, de différents essais ont été exécutés sur les échantillons prélevés dans ces puits. Les résultats d'essais sont récapitulés dans le Tableau 2-2.

Des observations des puits et des dépouillements des résultats d'essais au laboratoire permettent de conclure comme suit:

Dans les puits de BA-1 (de 0,9 à 6,0 m), BD-1 (de 0,8 à 6,75 m), BD-1 (de 1,0 à 7,0 m) et BD-4 (de 1,5 à 4,1 m) on trouve des sols de bonne qualité ayant les caractéristiques

requis pour matériaux de construction telles que l'imperméabilité, la stabilité et la résistance. Ces sols sont prélevés dans les deux catégories de terres; l'une est consistée en argiles brunâtres classées en CL ou CH qui ont une plasticité moyenne ou forte, et l'autre est consistée en graviers argileux classés en GC qui sont un mélange du sol de la première catégorie et des plaquettes de rochers. Leurs teneurs en eau naturelles se situent du côté sec de la teneur en eau optimum. En conséquence, on peut les ajuster facilement en teneur en eau convenable pour les travaux.

Le rest des puits ne présente que des argiles grisâtres ou noirâtres très plastiques ou des sols rocheux et altérés qui se transforment facilement en argile. Par conséquent ces sols ne peuvent être utilisés comme matériaux de construction.

Ce qui se précède nous permet de juger qu'il existe en quantité suffisante des matériaux imperméables de bonne qualité dans les deux zones suivantes:

- a) Zone d'une superficie d'environ 200 m x 400 m, étendue au pied du versant sud-est de la montagne qui implique les puits de BD-1, BD-2 et BD-4.
- b) Zone d'une superficie d'environ 40 m x 300 m, étendue au pied du versant ouest de la montagne qui implique le puits de BA-1.

Avant de procéder aux études détaillées du projet de Kasseb, il faudrait exécuter une autre campagne pour préciser les quantités en réserve de ces matériaux et pousser encore les essais en laboratoire pour savoir plus en détail leurs caractéristiques. Dans cette campagne, les essais suivants doivent être exécutés en plus des essais effectués jusqu'à présent:

L'essai de compressibilité et l'essai d'imperméabilité sur les échantillons d'une granulométrie comparable à celle des matériaux à utiliser pour le moule de 30 cm de diamètre.

2.3 MATERIAUX D'ENROCHEMENT ET MATERIAUX D'AGREGATS POUR LE BETON

Des matériaux d'enrochements et des matériaux d'agrégats pour le béton sont disponibles dans les massifs calcaires et les massifs calcaires-marneux qui entourent la zone du réservoir supérieur. Pour préciser les caractéristiques générales de ces matériaux, quelques essais ont été exécutés sur les échantillons prélevés dans un massif qui se trouve à l'est de la zone du réservoir supérieur. Le résultat des essais est récapitulé dans le Tableau 2-3.

**Tableau 2-1 LISTE DES PUIITS DE RECONNAISSANCE POUR
LES MATERIAUX IMPERMEABLES**

Zone	Localisation	N° de puits	Coordonnées X, Y (m)	Cote de tête	Profondeur (m)	N° des échantillons
A	0,8 à 1,1 km au sud-est de l'emplacement du barrage	BA-1	X 86.179,16 Y 77.956,77		6,40	
		BA-2	X 86.605,41 Y 77.981,48		3,70	
		BA-3	X 86.376,22 Y 77.946,18		2,50	
B	1,0 à 1,5 km au sud-est de l'emplacement du barrage	BB-1	X 86.732,57 Y 77.671,70		2,20	
		BB-2	X 86.578,59 Y 77.632,92		1,70	
		BB-3	X 86.245,89 Y 77.725,52		2,50	
		BB-4	X 86.114,61 Y 77.727,00		1,40	
C	0,5 à 1,3 km au sud de l'emplacement du barrage	BC-1	X 86.599,77 Y 78.554,17		1,70	
		BC-2	X 86.320,00 Y 78.548,31		2,30	
		BC-3	X 86.107,43 Y 78.479,13		2,20	
		BC-4	X 85.863,91 Y 78.439,61		2,40	
D	1,6 km au sud de l'em- placement du barrage	BD-1	X 85.554,15 Y 78.722,91		6,75	
		BD-2	X 85.678,06 Y 78.902,10		7,00	
		BD-3	X 85.473,50 Y 78.847,22		6,20	
		BD-4	X 85.596,36 Y 79.016,67		5,10	

Total: 54,05 mètres

**Tableau 2-2 SOMMAIRE DES ESSAIS AU LABORATOIRE DES MATERIAUX FILTRANTS
(ECHANTILLONS REPRESENTATIFS)**

Puits	Profondeur (m)	Couleur du sol	Classification unifiée du sol	Teneur en eau nature W ⁿ (%)	Poids spécifique (-5mm)	Absorpt. (+19mm) (%)	Limites d'Atterberg		Granulométrie				Proctor (-19mm)		Perméabilité (-19mm)		Compression triaxiale				W _n - W _{opt}	
							LL	PI	D _{max} (mm)	-20mm (%)	-5mm (%)	-0,08mm (%)	W _{opt} (%)	γ _{dmax} (t/m ³)	W _o (%)	K (cm/sec)	W _o (%)	d (t/m ³)	C' (kg/cm ²)	φ' (deg)		
BD-2	4,5 - 5,2	Jaune	CC (CL)	13,4	2,69	2,4	40,0	20,8	100	53,0	43,0	33,5	14,6	1,84								- 1,2
BD-4	1,5 - 2,0	Jaune grisâtre	GC (CH)	5,7	2,68	4,7	52,4	30,0	80	65,0	30,5	12,0	16,8	1,75								-11,1
BA-1	0,9 - 6,0	Brun	GC (CH)	11,0	2,70	3,0	63,2	35,3	100	55,0	23,5	13,0	17,4	1,69								- 6,4
BD-2	1,0 - 4,0	Brun	GC (CH)	14,3	2,69	3,0	56,2	31,9	100	45,0	37,0	33,5	20,0	1,70	17,0	6,5x10 ⁻⁸						- 5,7
															20,0							
															23,0							
BD-2	2,7 - 3,6	Brun	CL	16,3	2,70	3,3	47,0	23,5	60	76,0	69,0	63,5	21,4	1,64								- 5,1
BD-1	0,8 - 1,7	Jaune	CL	21,4	2,69	7,9	47,9	27,3	60	85,0	82,6	78,0	25,5	1,52								- 4,1
BB-3	1,2 - 2,0	Gris jaunâtre	CH	10,7	2,70	-	66,6	38,8	5		100,0	97,0	18,8	1,66	15,8	7,7x10 ⁻⁸						- 8,1
															18,8	1,0x10 ⁻⁸						
															21,8	1,2x10 ⁻⁸						
BD-2	0,0 - 2,7	Noir	CH	11,0	2,69	2,8	59,4	32,0	80	73,0	64,0	60,0	18,9	1,63								- 7,9
BC-4	2,1 - 2,4	Noir	CH	4,9	2,70	-	64,8	36,8	30	96,5	92,5	86,0	20,3	1,63								-15,4
BC-4	1,0 - 2,1	Noir	CH	37,6	2,69	6,1	73,4	39,8	60	83,0	79,0	74,5	37,5	1,25								+ 0,4
BD-1	1,7 - 3,6	Brun	CH	17,5	2,69	4,5	58,0	28,3	60	76,0	69,5	66,0	22,5	1,58								- 5,0
BD-1	0,8 - 4,0	Brun	CH	20,5	2,68	4,0	56,0	31,0	50	63,0	61,0	57,5	24,5	1,59	21,5	-						- 4,0
															24,5	1,7x10 ⁻⁸						
															27,5	9,5x10 ⁻⁸						
BD-4	2,4 - 4,1	Jaune brunâtre	CH	18,8	2,69	3,1	69,2	40,1	60	77,0	71,5	69,0	27,0	1,45								-8,2
BD-4	4,1 - 5,1	Gris verdâtre	CH	18,3	2,71	-	77,8	30,2	5	100,0	99,5	97,5	24,5	1,48								- 6,2

Note: 1. Absorption:

Les valeurs sont pour les échantillons passés au tamis supérieur à 19mm.

2. Proctor:

W_o - Teneur en eau optimum
γ_{dmax} - Densité sèche maximum

3. Perméabilité:

Les valeurs sont pour les essais effectués à l'oedomètre.

W_o - Teneur en eau initiale
K - Valeur de la pression normale à 1 kg/cm²

4. Compression triaxiale:

W_o, γ_d - Teneur en eau et densité sèche initiales

C', φ' - Cohésion et angle de la friction interne en terme de la contrainte efficace

5. W_n - W_{opt}:

Différence entre la teneur en eau nature et la teneur en eau optimum

**Tableau 2-3 RESULTATS DES ESSAIS SUR LES MATERIAUX
D'ENROCHEMENTS ET SUR LES MATERIAUX
D'AGREGATS POUR LE BETON**

No. des échantillons	Poids unitaire (Sec) (t/m ³)	Absorption (%)	Compression simple (kg/cm ²)	
			Naturelle	Saturée
1	a	2,57		765
	b	2,60		776
	c	2,66	0,72	820
	d	2,73		485
	e	2,53		581
2	a	2,59	0,79	344
	b	2,60	1,18	394
	c	2,71		500
	d	2,59		412
	e	2,77		576
3	a	2,79	0,50	466
	b	2,72	0,76	343
	c	2,72	0,52	644
	d	2,67		344
	e	2,68		1,236

Note: 15 échantillons ont été prélevés dans de différents endroits sur la carrière proposée. Les éprouvettes sont approximativement de 20 cm x 10 cm.

CHAPITRE 3 ANALYSES SUR L'ENVASEMENT DANS LE RESERVOIR INFERIEUR DE KASSEB

3.1 GENERALITES

3.2 MESURES D'ENVASEMENT

3.3 ANALYSES

3.4 ESTIMATION DU VOLUME D'ENVASEMENT FUTUR

3.5 PREVISION DE LA FORME D'ENVASEMENT FUTURE

CHAPITRE 3 ANALYSES SUR L'ENVASEMENT DANS LE RESERVOIR INFERIEUR DE KASSEB

3.1 GENERALITES

Pour la détermination de l'emplacement de la prise d'eau aval de la centrale pompage turbinage de Kasseb, le rapport de JICA soumis à la STEG en novembre 1978 décrit une recommandation sur la mesure d'envasement dans le réservoir inférieur de Kasseb. Suivant cette recommandation la STEG a demandé au Ministère de l'Agriculture d'effectuer les mesures en avril 1978. La mesure d'envasement a été effectuée deux fois; la première campagne en mai 1979 et la deuxième campagne en août de la même année. Les résultats acquis ont été communiqués au siège de l'EPDC pour les dépouillements.

Pour la mesure envisagée, 36 profils ont été matérialisés dans les zones intéressées du réservoir. Cependant, comme on n'a disposé que d'un plan topo à l'échelle 1/5.000 établi à partir des photos aériennes de 1973-75 comme moyen de préciser les configurations initiales du fond de la retenue, les analyses sur le volume d'envasement ont été obligées de se limiter à la zone de l'oued El Brik. D'ailleurs, les zones des affluents pour lesquels ont été matérialisés les profils A1-A1', A2-A2' et A3-A3' n'étant pas couvertes par le plan topo de 1973-1975, on a été obligé de cartographier leurs configurations initiales en se basant sur le plan topo à l'échelle 1/5.000 établi en 1974 avant l'établissement du réseau NGT. Toutefois, comme le volume d'envasement de ces affluents est très faible par rapport à celui de l'oued El Brik, cette cartographie fictive ne soulève pas de problème important. La localisation des profils de l'oued El Brik est présentée dans la Figure 3-1.

3-2 MESURES D'ENVASEMENT

La prise de mesures a été effectuée comme suit:

- a) La matérialisation des profils sur le terrain a été faite par l'équipe de topographes de la STEG.
- b) La mesure de profondeur d'eau s'est faite à l'écho-sondeur SIMARD.
- c) Le canot équipé de l'écho-sondeur a filé sur les profils à une vitesse presque constante, mais aucun record de la vitesse effectuée n'est enregistré.

Une confrontation des mesures effectuées au cours de mai 1979 avec des configurations initiales du fond de la retenue obtenues à partir du vieux plan topo à l'échelle 1/5.000 de 1947 a fait ressortir un volume d'envasement total négatif. Devant ce résultat douteux il a été décidé d'exécuter une deuxième campagne pour refaire quelques profils de vérification. Les résultats obtenus sont les suivants:

- a) 6 profils de vérification de 2-2', 4-4', 6-6', 8-8', 9-9' et 15-15' ont présenté le même aspect que les profils exécutés au même endroit lors de la première campagne.
- b) Pour vérifier la précision du plan topo à l'échelle 1/5.000 de 1973-75, on a mesuré sur le terrain les longueurs sur le plan d'eau de ces 6 profils. Ces

mesures ont fait apparaître les différences de $-6,3\%$ à $8,3\%$ entre les longueurs réelles et les longueurs obtenues à partir du plan topo. Pour tous les profils sauf le profil 2-2', la longueur obtenue à partir du plan topo s'avère plus importante que la longueur mesurée sur le terrain. Ceci veut dire que le volume d'envasement calculé sur la base du plan topo au 1/5.000 serait plus important que le volume d'envasement réel.

- c) En ce qui concerne le niveau du plan d'eau du réservoir de Kasseb, les mesures effectuées lors de la deuxième campagne ont fait remarquer une différence de 1,70 mètres environ entre la cote observée sur l'échelle d'eau (282,82) et la cote obtenue par le nivellement (281,09). Par conséquent, la cote observée sur l'échelle lors de la première campagne (285,00) doit être corrigée en 283,30, déduction faite de 1,70 mètres.

3.3 ANALYSES

3.3.1 Matérialisation des profils

Comme décrit plus haut, la confrontation des résultats des mesures faites à l'écho-sondeur avec des configurations obtenues à partir du vieux plan topo à l'échelle 1/5.000 a conduit à supposer des érosions ou des envasements douteux. De ce fait, pour matérialiser de nouveaux profils d'envasement (Figures 3-2 et 3-3), quelques modifications ont été apportées à ces configurations en se basant sur les considérations suivantes:

- a) Sauf sa partie d'extrémité amont dans le réservoir l'oued El Brik présente un parcours presque linéaire. Par conséquent aucun écoulement dévié n'aurait lieu. Ceci permet de supposer que d'importantes érosions n'auraient pas lieu sur les talus doux des deux rives.
- b) A propos des lignes des érosions et des envasements apparus sur les profils des terrains monotones et dépourvus de configuration auxquels n'arrive pas d'ailleurs le charriage du débit solide évacué du ruisseau de la zone du réservoir supérieur, on suppose que ces érosions et envasements n'existent pas en réalité et que leurs lignes ont été produites à cause du vieux plan topo erroné. Toutefois, aux environs de l'embouchure du ruisseau on remarque localement les envasements.

3.3.2 Calcul du volume de sédiments actuel

Le volume de sédiments actuel n'a été calculé que sur le parcours de l'oued El Brik. Le calcul effectué suppose que dans la zone comprise entre le profil 17-17S et le barrage existant les sédiments s'entasseraient jusqu'à la même cote que celle des sédiments entassés sur le profil 17-17S' et que dans la zone située en amont du profil 1-1' la superficie du profil d'envasement serait zéro à l'extrémité amont de la retenue normale à la cote 288,60.

Dans le cas où deux profils contigus ne sont pas parallèles, la distance entre ces deux profils est déterminée comme distance entre deux points projetés des centres des profils sur le plan d'eau. Et les profils à retenir pour le calcul du volume d'envasement sont déterminés comme profils projetés rectangulairement sur la ligne qui relie ces deux points projetés.

Le volume de sédiments ainsi calculé est de 914.200 mètres cubes comme le montre