

Mesure de l'envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie

Campagne de 1975*

J. CLAUDE et R. CHARTIER
Hydrologues de l'ORSTOM à la Division
des Ressources en Eau, Tunis

RÉSUMÉ

Le contrôle de l'envasement des retenues de barrages permet d'évaluer de façon globale l'importance du processus érosion-transport solide, incluant le charriage de fond. Son intérêt est également évident pour l'exploitation des barrages. En Tunisie, les phénomènes d'érosion, de transport et de sédimentation tiennent une grande place mais sont relativement peu connus. Les relevés de fonds assurés à l'écho-sondeur à ultrasons sur les réservoirs de six barrages de ce pays et les prélèvements d'échantillons effectués à Nebeur apportent, malgré l'imprécision des résultats, de premiers éléments d'appréciation sur la quantité et la variabilité de l'envasement ainsi que sur le mécanisme de dépôt des sédiments.

ABSTRACT

The control of sedimentation in the dam reservoirs provides global evaluation of the process of erosion and transportation of sediments, including bed-material load. The knowledge of sedimentation is also useful for dam management. In Tunisia, little was known about erosion, transportation and sedimentation phenomenon having regard to their consequences. Since 1975, depth measurements determined by superson echo-depthmeter on the reservoirs of six dams and sampling carried out at Nebeur give, in spite of lack of precision, a first information as on sedimentation quantity and variability, so on method of sediment deposits.

SOMMAIRE

- I.1. Introduction
- I.2. Déroulement de la campagne de mesures 1975
- II. Méthode de mesure à l'écho-sondeur
 - II.1. Matériel utilisé
 - II.2. Mise en œuvre de la méthode
 - II.3. Dépouillement des mesures — Calcul de l'envasement
- III. Résultats des mesures
 - III.1. Le barrage de l'oued Mellègue à Nebeur
 - III.2. Le barrage de l'oued Nebaana
 - III.3. Le barrage de l'oued Bezirk
 - III.4. Le barrage de l'oued Chiba
 - III.5. Le barrage de l'oued Masri
 - III.6. Le barrage de l'oued Lakhmess

(*) Cette étude a déjà fait l'objet d'un article dans le bulletin n° 3 *Ressources en eau de Tunisie* qui est une publication de la DRE de Tunis.

IV. Discussion des résultats

- IV.1. Les densités
- IV.2. Processus de sédimentation
- IV.3. Résultats d'ensemble
- IV.4. Commentaires

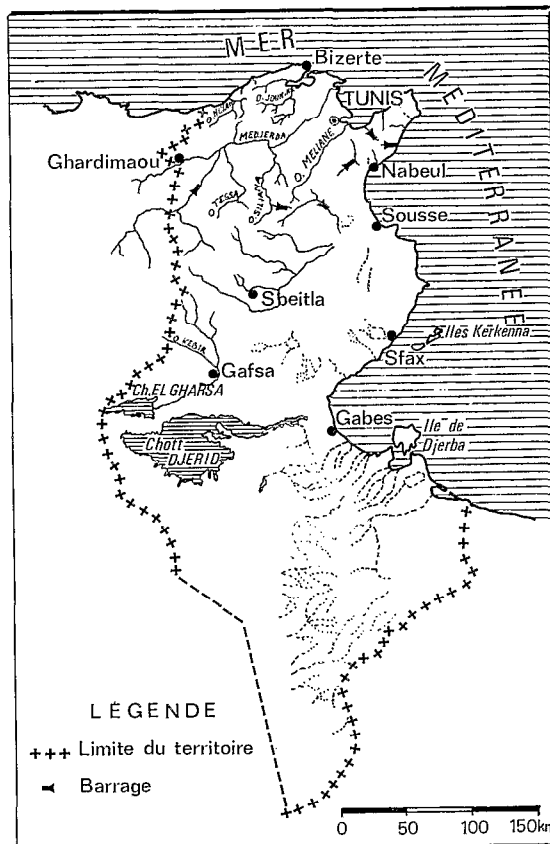
V. Conclusion

Bibliographie

I.1. INTRODUCTION

Parmi les programmes d'études entrepris en collaboration entre l'ORSTOM et la DRE, les phénomènes d'érosion, de transports solides véhiculés par les cours d'eau, de dépôts de sédiments dans les plaines tiennent une grande place. Tout le monde est conscient des graves problèmes que posent ces phénomènes en Tunisie et de la pauvreté de nos connaissances à ce sujet : les mesures effectuées sont loin d'être satisfaisantes et nous ne reviendrons pas ici sur les difficultés d'interprétation des résultats ni sur la diversité et la variabilité des paramètres qui conditionnent ces phénomènes.

Le contrôle de l'envasement des retenues de barrages est un moyen efficace d'obtenir des valeurs globales sur l'importance du transport de matériaux par les oueds barrés, intégrant l'ensemble des phénomènes du processus érosion-transport solide, y compris le charriage de fond.



Carte 1

En effet un barrage constitue une fosse à sédiments de grande taille à l'échelle du bassin versant contrôlé ; si l'on contrôle le bilan hydraulique du barrage et la turbidité des volumes d'eau déversés ou soutirés, on peut déduire de l'envasement de la retenue une valeur moyenne des transports solides sur une période allant de la date de mise en eau du barrage à la date des mesures d'envasement.

En plus de l'intérêt général de ces mesures, le contrôle de l'envasement des retenues présente un intérêt pratique évident pour l'exploitation des barrages, la surveillance des installations de prise d'eau et de dévasement et permet de mettre à jour les courbes de remplissage des retenues qui peuvent être rendues caduques par des dépôts importants.

Il était donc normal que la Direction des Études et Grands Travaux Hydrauliques (DEGTH) qui gère et exploite les principaux barrages de Tunisie soit concernée au premier chef par le programme de mesures prévu. Une collaboration fructueuse s'est instaurée entre l'ORSTOM, la DRE et la DEGTH qui a permis de prévoir et de réaliser des mesures d'envasement sur six barrages en 1974 et 1975. De telles mesures avaient déjà été réalisées auparavant, mais la méthode de relevé des fonds à l'aide d'un lest descendu au bout d'un câble gradué était assez longue à mettre en œuvre et relativement peu précise. A l'occasion des nouvelles mesures envisagées, une méthode plus complète et plus rapide du relevé des fonds grâce à un écho-sondeur à ultrasons a été mise au point ; cette méthode sera exposée plus loin en détail, mais nous pouvons déjà dire qu'elle présente de gros avantages sur l'ancienne et qu'elle est perfectible.

I.2. DÉROULEMENT DE LA CAMPAGNE DE MESURES 1975

En 1974, la mission ORSTOM-Tunisie, a fait l'acquisition du matériel spécial nécessaire aux mesures d'envasement. Fin novembre 1974, les essais du matériel et la mise au point des méthodes de mesures furent réalisés et un premier relevé des profils sur le barrage Mellègue permettait de tester la validité de la méthode. Les relevés systématiques sur six barrages furent alors prévus pour la fin du printemps 1975, date à laquelle les plans d'eau dans les retenues sont à leur maximum et où les risques de mauvais temps (surtout de grand vent) sont moindres.

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques des barrages étudiés et les dates des mesures.

TABLEAU I

Nom du barrage	Superficie du BV (km ²)	Cote de retenue maximale (m NCT)	Volume maximum stocké ($\times 10^6$ m ³)	Date de mise en eau et début des observations	Date des mesures d'envasement	Cote du plan d'eau correspondant à cette date	Volume d'eau correspondant
Mellègue Nebeur	10 300	265,0	268,06	avril 1954	24-29 nov. 1974 et 27-29 mai 1975	245,55 258,0	176,8
Nebaana	855	230,0	86,4	avril 1965 1967-1968	27-28 avril 1975	227,75	75,57
Bezirk	73 (1) (84)	54,6	6,46	décembre 1960	12-13 mai 1975	54,6	6,46
Chiba	64	77,86	7,86	1963-1965 nov. 1967	8 mai 1975	77,77	7,70
Masri	40 (2) (53)	163,0	6,82	février 1968	6 mai 1975	162,92	6,78
Lakhmess	131	517,0	8,00	avril 1966	4 juin 1975	516,90	7,90

(1) Dérivation de l'oued Defla (11 km²) dans le bassin versant de l'oued Bezirk en 1964.

(2) En mars 1971, mise en service du barrage Tahouna (13 km²), dont les eaux sont envoyées par conduite dans la retenue du barrage Masri.

II. MÉTHODE DE MESURE A L'ÉCHO-SONDEUR

Le principe de la méthode est le relevé des fonds de la retenue le long de profils transversaux préalablement repérés ; les profondeurs étant enregistrées par un écho-sondeur à bande déroulante.

II.1. MATÉRIEL UTILISÉ

Le matériel adapté à ce genre de mesures est facilement transportable et relativement peu onéreux, il comprend :

- 1 canot pneumatique gonflable type « Zodiac Mark II » ;
- 1 moteur hors bord de 20 cv ;
- 1 écho-sondeur à ultra-sons SIMRAD 160, qui se compose lui-même :
 - d'un nez de sonde, émetteur et capteur d'ultra-sons, que nous avons monté sur un petit saumon métallique de 20 kg suspendu dans l'eau sur le côté du canot par un porte à faux,
 - et d'un enregistreur sur papier thermosensible à vitesse de déroulement constante.

L'appareil est alimenté en courant continu 12 volts.

La mesure des profondeurs se fait sur une bande de mesure de 40 m dont on peut décaler l'origine par pas de 10 m pour atteindre 200 m de profondeur ; quelle que soit la profondeur mesurée la précision de la mesure est donc la même. La largeur de la bande de papier d'enregistrement est de 5 pouces soit 12,7 cm, l'échelle de l'enregistrement étant de 1 pouce pour 10 m soit 1 mm pour 39,4 cm ; comme il est possible d'apprécier le demi-millimètre sur la bande, la précision sur les mesures de profondeur est de 20 cm environ.

La vitesse de déroulement du papier peut être réglée, on choisit en général la vitesse de 1/2 pouce par minute, la vitesse du bateau au moment des relevés étant de l'ordre de 1 m/s, cela correspond à une distance couverte de 60 m par graduation de 1 minute soit à peu près 5 m pour 1 mm d'enregistrement. Ces valeurs sont évidemment réajustées pour chaque profil au moment du dépouillement. Ce matériel est peu compliqué et facile d'emploi, mais il n'est pas très précis et ne peut être utilisé systématiquement par des fonds de moins de 5 m. Cependant pour les six barrages qui ont été relevés la précision est largement suffisante. Un travail systématique de relevé des petites retenues nécessiterait l'acquisition d'un matériel plus performant du type sondeur scientifique sur lequel on peut faire varier la sensibilité en fonction de la gamme de mesures et obtenir une précision sur les profondeurs meilleure que 5 cm.

II.2. MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE

II.2.1. Opérations préliminaires

La première opération consiste à rassembler les documents cartographiques nécessaires qui sont :

- le plan coté de la cuvette du barrage avant ou au moment de la mise en eau. Ces plans sont levés topographiquement à l'échelle de 1/5 000^e ou 1/10 000^e ;
- les photos aériennes de la retenue du barrage après la mise en eau.

On procède alors au choix des profils à relever. Il n'y a pas de règle précise pour guider ce choix ; on cherche en général des sections transversales au lit de l'oued, en évitant les retrécissements et en choisissant de préférence les sections les plus larges ; si la retenue se divise en plusieurs branches, on traite chacune indépendamment.

Les profils sont positionnés sur le plan coté de la retenue et sur les photos aériennes ; une reconnaissance sur le terrain est nécessaire pour identifier les points remarquables sur les photos aériennes, qui sont facilement repérables depuis la surface de l'eau et servent à positionner les profils sur le plan sans ambiguïté. Dans le cas où des mesures d'envasement ont déjà été faites sur des sections bien identifiées, nous avons conservé les profils déjà repérés (cas du barrage Mellègue).

Les profils choisis doivent être balisés sur le terrain de façon à ce que les repères matérialisant les extrémités de ces profils soient toujours visibles depuis le bateau quelle que soit la cote du plan d'eau. La meilleure solution consiste à implanter des fers IPN ou des morceaux de tuyaux en fonte sur les berges au niveau approximatif de la cote maximum ; peints en rouge et blanc ces jalons sont toujours bien visibles et faciles à retrouver.

Si la retenue est de petite taille, on peut se dispenser du balisage et se repérer uniquement grâce à des points caractéristiques identifiés sur les photos aériennes.

II.2.2. Réalisation des mesures

La réalisation des mesures est simple et ne demande que quelques précautions élémentaires. Deux personnes suffisent pour manœuvrer le bateau et manipuler l'écho-sondeur.

- On se place au départ du profil, dans l'alignement des deux jalons ou repères matérialisant le profil.
- On descend le saumon supportant le nez de sonde juste sous la surface de l'eau ; le bas de l'écho-sondeur est alors à 40 cm environ sous la surface.
- Au départ du bateau et simultanément :
- on met en marche l'enregistreur et on note sur la bande d'enregistrement directement les références du profil, la date et la cote du plan d'eau.
- on déclenche un chronomètre qui permettra un contrôle supplémentaire des vitesses.
- On dirige le bateau à allure constante et réduite vers le jalon opposé. Par temps calme, il est facile de se maintenir en ligne droite et de garder une allure constante avec le canot Zodiac qui est très maniable, mais dès qu'il y a du vent et un léger clapot sur la retenue cela devient problématique et l'on suit une trajectoire courbe qui peut être estimée par la suite, mais dont l'écart à la trajectoire rectiligne est moindre que celui d'un câble soutenu par des flotteurs et auquel s'amarré le bateau pour les mesures au lest par la méthode manuelle. De toute façon, passé un certain degré d'agitation de l'eau il est préférable d'abandonner les mesures, la rapidité de la méthode permettant d'attendre des jours de beau temps.
- Arrivés à l'autre extrémité du profil, on arrête l'enregistrement et le chronomètre, et on note sur la bande la fin du profil et le temps de parcours.
- En général, on effectue un retour sur le même profil en répétant les mêmes opérations.

II.2.3. Intérêt de la méthode

Les avantages de la méthode de la mesure à l'écho-sondeur sur la méthode de relevés point par point à l'aide d'un lest descendu au bout d'un câble gradué sont nombreux. Lors de la mise au point de la méthode nous avons fait des mesures comparatives avec l'équipe de l'EGTH sur le barrage Mellègue. La comparaison des profils levés par l'écho-sondeur à ceux relevés avec le lest faisait apparaître des disparités surtout lorsque le fond présentait des accidents (forte pente). En fait lorsque le bateau est amarré au câble, il ne s'immobilise pas et dérive facilement d'une dizaine de mètres, le point relevé n'est donc pas positionné exactement sur le profil, de plus le câble du lest, du fait de la dérive, n'est plus vertical au moment où le lest touche le fond, et le lest lui-même ne s'immobilise pas tout de suite sur le fond : un plongeur est allé observer le comportement du lest utilisé par l'équipe EGTH et a constaté que si le fond était plat le lest pouvait se poser à la verticale ou se coucher et s'enfoncer plus ou moins profondément dans la vase, et que si le fond était en pente, le lest pouvait glisser sur la pente avant de se stabiliser ; enfin si l'eau est agitée en surface et que le bateau monte et descende sur un léger clapot, le lest suit les mouvements du bateau et ne reste pas posé au fond.

Toutes ces causes d'incertitude étant levées, des mesures simultanées dans les meilleures conditions possibles ont permis de constater des écarts de moins de 10 cm entre les profondeurs relevées par les deux méthodes et ont montré que la précision des mesures d'un écho-sondeur assez simple comme celui que nous avons utilisé était facilement supérieure à celle des relevés manuels.

La méthode de relevé à l'écho-sondeur simplifie au maximum les opérations de mesures et les prises de notes sur le terrain, elle évite de matérialiser le profil relevé par un câble qui est souvent difficile à mettre en place si le profil dépasse 200 m. Le relevé du fond est fait de façon continue, on ne risque donc pas de passer au-dessus d'une anomalie et toutes les particularités du fond apparaissent.

Enfin et surtout la rapidité des relevés à l'écho-sondeur n'est en rien comparable à celle de la méthode point par point. Pour relever un profil de 200 m de long en deux passages aller et retour avec l'écho-sondeur, il faut 15 min au maximum alors qu'avec une sonde à main, en incluant le temps nécessaire pour déplacer et immobiliser le bateau le long du câble matérialisant le profil, il faut compter 15 min par point et une précision moyenne réclame au moins un point tous les 10 m.

Il faut cependant rappeler que l'écho-sondeur dont nous disposons ne peut être employé systématiquement pour des fonds de moins de 5 m (ce qui nous a fait abandonner l'idée de faire le cubage de la Sebkhia Kelbiat par cette méthode).

II.3. DÉPOUILLEMENT DES MESURES. CALCUL DE L'ENVASEMENT

Les dépouillements des mesures sont assez longs et demandent quelques précautions.

II.3.1. Etablissement des profils

Il s'agit de déterminer sur chaque profil l'importance de l'envasement.

a) Pour chaque profil, on établit d'abord la section en travers d'origine, d'après les plans disponibles où l'équidistance des courbes de niveau est de 2 m ou de 5 m, ce qui selon la taille de la retenue donne une précision acceptable. Ces profils sont tracés jusqu'à la cote maximale d'eau (cote de déversement).

b) D'après la cote du plan d'eau au moment des mesures on détermine la longueur du profil mesuré, ce qui permet sur la bande d'enregistrement de transformer l'échelle des temps en échelle des distances, d'après la durée de la traversée. Si, comme c'est souvent le cas, la longueur du profil sur la bande est différente à l'aller et au retour à cause de l'effet du vent sur le bateau, on modifie l'échelle au moment de la transcription.

c) A l'aide d'un calque transparent, on relève les profondeurs enregistrées, et en tenant compte de la profondeur d'immersion du nez de sonde et de la cote du plan d'eau on reporte sur le profil d'origine le nouveau profil envasé. A ce moment, doivent s'effectuer différentes vérifications : comptabilité des profondeurs mesurées, calage des points les plus bas etc.

d) Les deux profils ainsi obtenus sont planimétrés et l'on en déduit la surface envasée du profil, c'est-à-dire des m² d'envasement d'une section à la cote du plan d'eau à laquelle les mesures ont été faites.

La partie exondée des profils est souvent constituée par des berges à forte pente, souvent hors d'eau, où l'envasement est négligeable. On a tout intérêt à faire des mesures au moment où les réservoirs sont à leur cote la plus élevée, en général à la fin du printemps. Cependant, pour des profils hors d'eau où l'envasement est important, seule une campagne de relevés topographiques peut restituer le profil envasé : c'est le cas des profils amont du barrage Mellègue où nous avons dû nous livrer à une estimation.

II.3.2. Calcul des volumes de sédiments

A partir des surfaces envasées par profil plusieurs méthodes sont possibles pour calculer les volumes déposés dans la retenue.

Rappel de quelques méthodes

[4]

1) Méthode de Kolmogorov

Le volume compris entre les profils non parallèles Pa et Pb, le terrain naturel et la cote du plan d'eau est partagé en deux parties par un profil auxiliaire virtuel Pc mené à partir du point A et parallèle au profil Pb (voir fig. 1). On calcule séparément les volumes PaPc et PcPb, le volume total est la somme des deux.

Pour cela on calcule tout d'abord les surfaces des sections Sa et Sb par planimétrie simple. Pour déterminer Sc on suppose qu'il y a proportionnalité entre surfaces et largeurs c'est-à-dire $Sc = Sa \frac{l_c}{l_a}$.

Le volume total est alors donné par la formule

$$V = V_1 + V_2 = \frac{S_b + S_c}{2} h_1 + \frac{S_c h_2}{2}$$

avec h_1 = longueur de la perpendiculaire commune aux 2 plans parallèles Pb et Pc,

h_2 = longueur de la normale abaissée du point A au profil virtuel Pc.

2) Méthode de la hauteur moyenne

On assimile chacun des profils Pa, ... de surface Sa, ... à un rectangle de longueur l_a , et de hauteur moyenne h_a .

La longueur l_a étant la longueur du profil Pa à la cote de mesure Sa, représentant les superficies d'envasement dans les profils Pa, ... Par planimétrie on détermine ensuite la surface d'eau entre les deux profils Pa et Pb (à la cote de mesure) soit Sab.

Le volume des apports entre les deux profils est alors donné par :

$$V_{ab} = Sab \frac{h_a + h_b}{2}$$

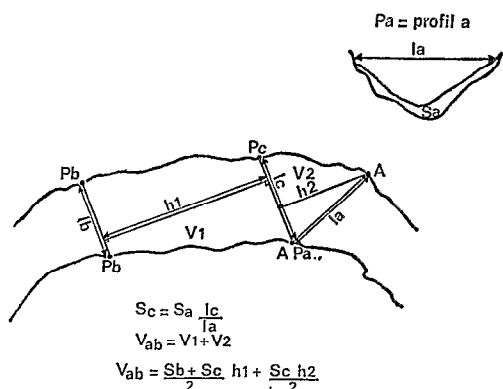


Fig. 1. — Méthode de Kolmogorov

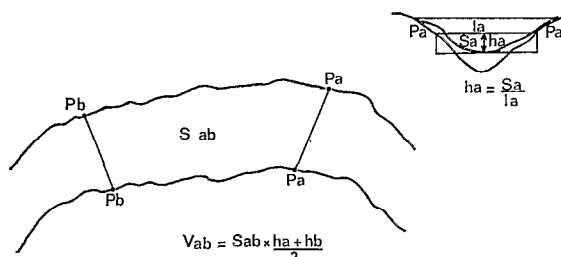


Fig. 2. — Méthode de la hauteur moyenne

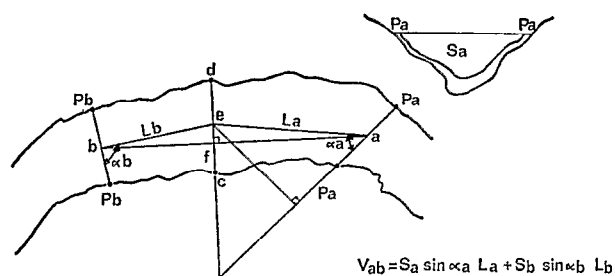


Fig. 3. — Méthode générale

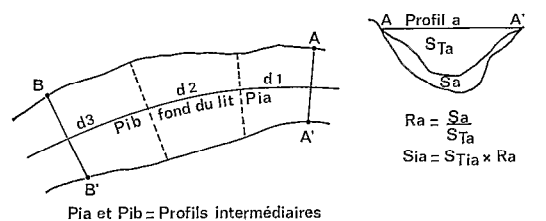


Fig. 4. — Méthode dérivée de la méthode générale

Fig. 1, 2, 3, 4. — Calcul du volume de sédiments

3) Méthode générale

On détermine les surfaces envasées S_a et S_b des deux profils P_a et P_b , puis on calcule la distance entre ces deux profils (voir fig. 3). Pour cela :

- on trace une droite ab entre les milieux de P_a et P_b ;
- on trace la droite cd perpendiculaire au segment ab en son milieu ;
- les distances entre le milieu du segment cd et les points a et b donnent les longueurs L_a et L_b .

Pour déterminer le volume total on tient également compte de l'inclinaison des sections P_a et P_b par rapport aux droites ea et eb .

Le volume total V_{ab} sera alors :

$$V_{ab} = S_a \sin \alpha_a L_a + S_b \sin \alpha_b L_b$$

4) *Méthode dérivée de la méthode générale*

C'est une simplification de la méthode générale qui tient compte de particularités de la retenue en utilisant des profils intermédiaires.

Pour chaque profil mesuré on calcule le rapport d'envasement $R = \frac{\text{section envasée}}{\text{section totale d'origine}}$.

Entre les profils mesurés, on trace des profils intermédiaires auxquels est affecté le rapport d'envasement du profil le plus proche.

On trace ensuite un profil en long de la retenue, qui passe par les points les plus bas de chaque profil transversal ; tous les profils sont positionnés sur le profil en long.

On trace alors un graphique comportant en abscisse les distances entre sections relevées sur le profil en long, en ordonnées les surfaces d'envasement mesurées ou calculées.

Le planimétrie de l'aire comprise entre la ligne brisée joignant les points représentatifs de chaque section et l'axe des abscisses donne le volume d'envasement.

Cette méthode est surtout applicable aux retenues longiformes.

III. RÉSULTATS DES MESURES

Nous avons rassemblé dans le tableau ci-dessous, les résultats bruts des mesures d'envasement que nous avons faites. Puis sous forme d'une fiche par barrage nous essayerons de relier ces résultats aux autres données dont nous disposons pour ces barrages de façon à estimer l'importance de l'érosion et des transports solides sur les bassins versants contrôlés.

TABLEAU II
RÉSULTATS DES MESURES D'ENVASEMENT

<i>Nom du barrage</i>	<i>Superficie du BV (km²)</i>	<i>Date de mise en eau ou débuts des observations</i>	<i>Volume maximum stocké (× 10⁶ m³)</i>	<i>Volume stocké au moment des mesures correspondant (× 10⁶ m³)</i>	<i>Taux de remplissage (%)</i>	<i>Volume des sédiments déposés (× 10⁶ m³)</i>	<i>Taux d'envasement du barrage (%)</i>
Mellègue	10 300	avril 1954	268,06	176,8	65,9	47,6	17,75
Nebaana	855	1965 et 1967-1968	86,4	75,6	87,5	12,90	14,94
Bezirk	73 (84)	décembre 1960	6,46	6,46	100,0	1,68	26,01
Chiba	64	1963-1965 novembre 1967	7,86	7,70	98,0	2,65	33,71
Masri	40 (53)	février 1968	6,82	6,78	99,4	1,32	19,3
Lakhmess	131	avril 1966	8,00	7,90	98,7	2,01	15,1

Il est à noter qu'à part le barrage Mellègue, le taux de remplissage des barrages au moment des mesures était tel qu'il nous a permis de relever les sections à une cote proche du maximum et de remonter jusqu'aux profils les plus en amont des retenues ; on peut estimer avoir mesuré ainsi la totalité de l'envasement.

III.1. LE BARRAGE DE L'OUED MELLÈGUE A NEBEUR

C'est le plus ancien et le mieux suivi des barrages où nous avons effectué des mesures. C'est là qu'a été testée et mise au point la méthode des relevés à l'écho-sondeur, en faisant des mesures comparatives avec l'équipe de l'EGTH qui disposait du matériel classique : barque amarrée à un câble soutenu par des flotteurs, lest suspendu à un câble gradué.

Lors d'une première campagne de mesures en décembre 1974, nous avons pu faire des relevés jusqu'au profil 22, la cote du plan d'eau étant alors à 245,55 m NGT. Fin mai 1975, nous avons pu remonter jusqu'au profil n° 35, la cote du plan d'eau étant de 258,0 m NGT (voir plan de la retenue) (fig. 5) ; une prospection pédestre à l'amont de la retenue nous a permis d'estimer l'envasement du profil 35 au profil 50, envasement qui bien que spectaculaire ne représenterait que 3% de l'envasement total.

III.1.1. Résultats

Les résultats des mesures sont les suivants :

- Mesures de décembre 1974 : jusqu'au profil 17 = 23 700 000 m³
 jusqu'au profil 23 = 29 700 000 m³
- Mesures de mai 1975 : jusqu'au profil 35 = 45 950 000 m³
 Totalité de la retenue = 47 620 000 m³
 (cote 270 m)

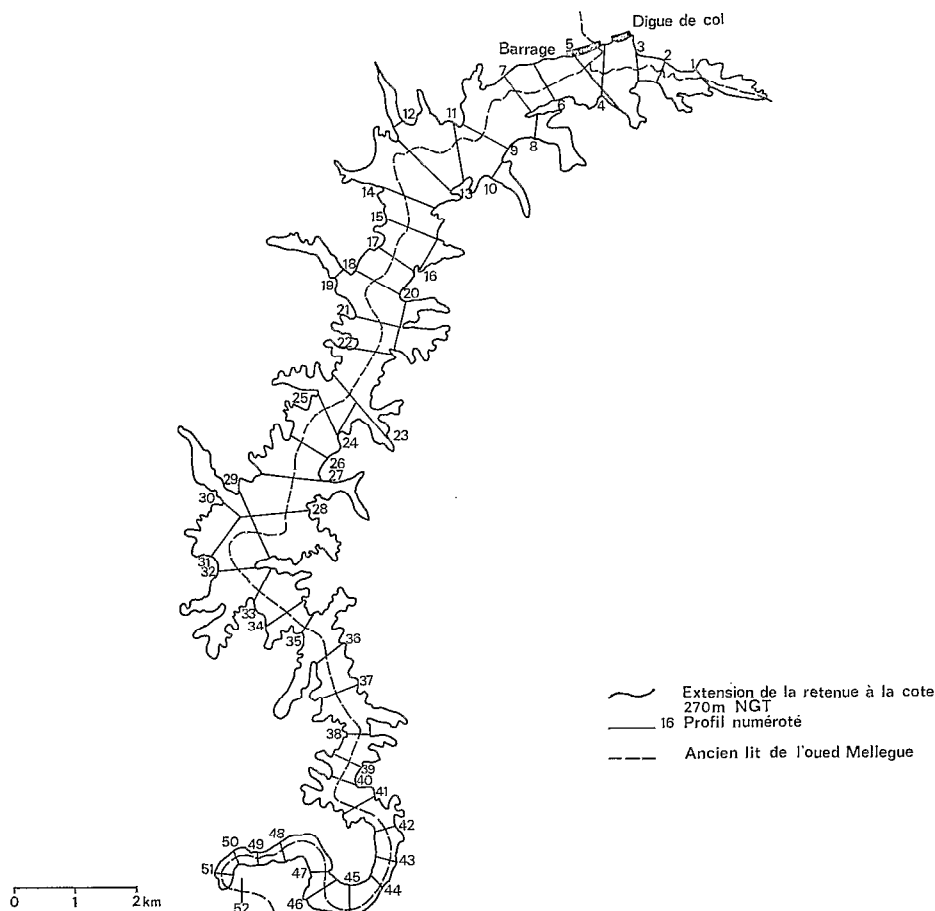


Fig. 5. — Barrage de Nebeur sur l'oued Mellègue.
 Implantation des profils transversaux pour les relevés des fonds

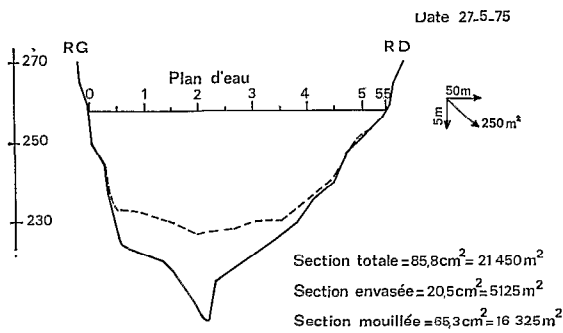


Fig. 6. — Barrage du Mellègue à Nebeur. Profil 5

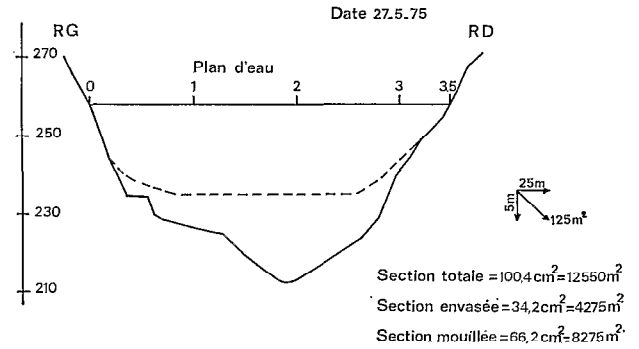


Fig. 7. — Barrage du Mellègue à Nebeur. Profil 9

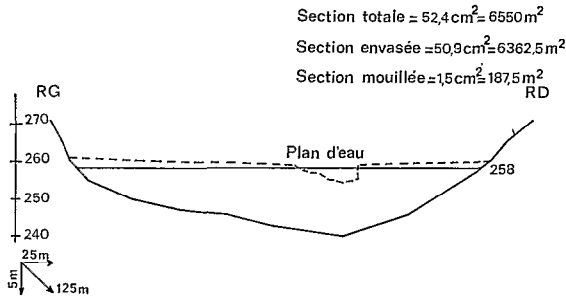


Fig. 8. — Barrage du Mellègue à Nebeur. Profil 32

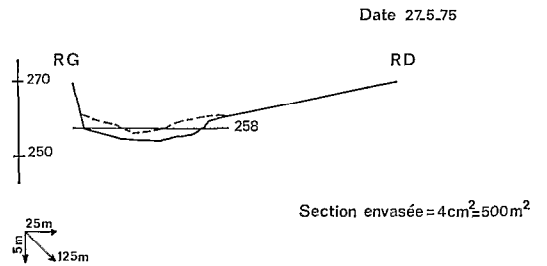


Fig. 9. — Barrage du Mellègue à Nebeur. Profil 40

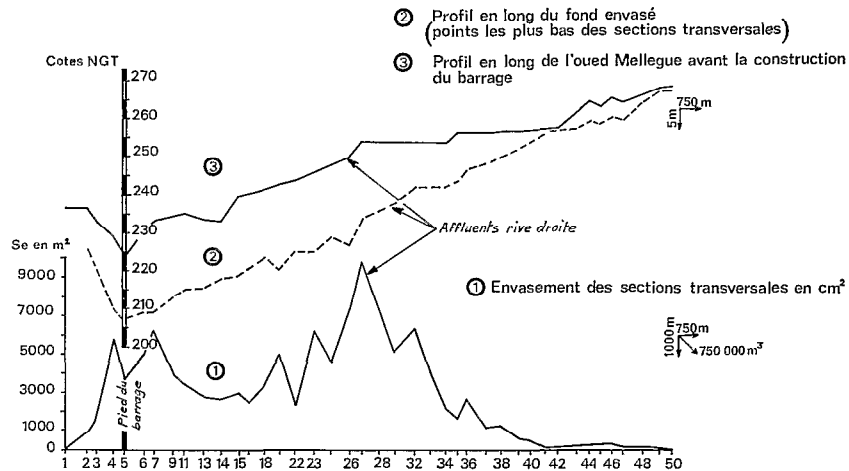


Fig. 10. — Envasement du barrage Mellègue

Les figures 6 à 9 représentent quatre profils typiques de l'envasement du barrage Mellègue.

Figure 6, profil n° 5 : proche du pied du barrage ; au milieu apparaît un chenal creusé par l'aspiration des vannes de dévasement.

Figure 7, profil n° 9 : le fond du profil envasé est pratiquement plat, l'envasement est très important.

Figure 8, profil n° 32 : dès ce niveau, l'oued Mellègue coule dans un lit qu'il s'est creusé dans les sédiments déposés par les crues précédentes ; la section d'envasement estimée au-dessus de la cote 258 m NGT est faible.

Figure 9, profil n° 40 : envasement estimé à partir du profil initial et de la largeur de l'oued à cet endroit ; étant donné la faible section du profil initial l'envasement est peu important et disparaît totalement au profil n° 50.

Sur la figure 10, nous avons reporté le profil en long de l'oued Mellègue avant la mise en eau du barrage et le profil en long du fond envasé (points les plus bas de sections actuelles) en fonction de la distance au pied du barrage, en-dessous figure le graphe des sections envasées de chaque profil, qui par planimétrie a servi à calculer le volume d'envasement.

III.1.2. Bilan de l'envasement

Le barrage de Nebeur a été mis en eau en avril 1954, nos mesures intègrent donc une période de 21 ans de fonctionnement. Les résultats d'exploitation du barrage par la DEGTH sont résumés dans le tableau III ci-dessous.

TABLEAU III
EXPLOITATION DU BARRAGE DE L'OUED MELLÈGUE (10 300 km²)

<i>Années hydrologiques</i>	<i>Apports liquides</i> ($\times 10^6$ m ³)	<i>Volumes des vases soutirées</i> ($\times 10^6$ m ³)	<i>Volumes des sédiments apportés (K13)</i> ($\times 10^6$ m ³)	<i>Mesures de l'envasement</i> ($\times 10$ m ³)
avril-août 1954	26,7	0,392	0,729	0
1954-55	80,6	2,113	3,906	
1955-56	214	7,194	7,266	
1956-57	158	1,400	4,547	
1957-58	293	7,731	7,430	13,40
1958-59	213	2,064	4,126	
1959-60	156,2	1,684	3,149	
1960-61	37,3	0,723	0,723	
1961-62	95,3	1,610	1,663	
1962-63	83,4	1,138	2,285	
1963-64	279,3	5,338	7,223	
1964-65	117,2	1,861	2,276	
1965-66	85,15	1,437	1,560	
1966-67	113,1	2,616	3,638	
1967-68	190,6	2,850	4,325	24,77
1968-69	53,6	0,937	1,379	
1969-70	758,2	19,161	18,448	
1970-71	88,8	1,283	2,250	
1971-72	208,4	3,709	4,179	
1972-73	504,2	10,421	7,110	
1973-74	76,04	0,840	0,614	
1974-75	177,5	2,572	4,183	47,62
totaux	4 009,6	79,07	93,01	47,62
moyenne sur 21,3 ans	187,98	3,71	4,36	2,23

Les causes d'imprécision des chiffres de ce tableau sont nombreuses.

a) Les volumes d'eau apportés au barrage ou soutirés sont bien contrôlés, la turbidité des soutirages est, elle aussi, contrôlée ; celle des apports est mesurée à la station du K 13. Cependant les volumes importants qui sont déversés par les évacuateurs de crue lors de crues exceptionnelles (1958, 1969, 1973) sont contrôlés de façon moins précise et leur turbidité est inconnue, on estime toutefois que ces eaux de crue ont eu le temps, avant d'arriver aux évacuateurs, de déposer la majeure partie de leur charge solide, et ne contiennent guère plus de 5 g/l.

b) La densité apparente et la densité réelle des sédiments déposés et des vases soutirées sont mal connues. On mesure dans le barrage des volumes de sédiments consolidés pendant plusieurs années sous plusieurs mètres d'eau, et on mesure sur les débits liquides une concentration moyenne de matières solides (en g/l). Le passage de l'un à l'autre demande une connaissance précise des densités, ce qui n'est pas facile à réaliser. Nous reviendrons sur ce point, car nous avons pu, grâce à un plongeur autonome, effectuer des prélèvements de vase au fond du barrage, avec de petits carottiers simplifiés, sur une profondeur de 30 cm environ (cf. § IV.1.). Pour le moment nous avons de sérieuses raisons d'admettre qu'un mètre cube de vase au fond du barrage contient 1,2 t de matières solides, ce qui conférerait aux vases, composées de limons et d'argiles de densité réelle 2,4, une densité apparente de 1,7.

c) La station hydrométrique de contrôle des débits liquides et solides apportés au barrage est située au K13 (9 000 km² de bassin versant pour 10 300 km² au barrage). Le bassin versant intermédiaire est montagneux et sujet à un fort ruissellement et une forte érosion. Les transports de fond et le charriage ne sont pas mesurés au K13. On admet de majorer les valeurs mesurées au K13 de 10% pour obtenir les apports au barrage.

Malgré ces imprécisions, on peut établir le bilan du transport de matières solides au barrage Mellègue comme suit :

	<i>Total sur 21 ans</i>	<i>Moyenne annuelle</i>
Envasement de la retenue	47 600 000 m ³	2 230 000 m ³
Evacuation par soutirages	79 100 000 m ³	3 710 000 m ³
Total des apports solides au barrage	126 700 000 m ³	5 940 000 m ³

Le taux de comblement du barrage est de 0,83% par an. Ce qui lui donnerait une durée de vie de 120 ans avant remplissage total de la cuvette.

Les apports de matières solides, mesurés au K13 et majorés de 10% se montent pour la même période à 93,01 + 9,3 = 102,3 × 10⁶ m³.

La différence avec le total des apports estimés au barrage peut être attribuée au transport de fond et au charriage qui représenterait donc 24,4 × 10⁶ m³ soit 19% du transport solide total et 23,8% du transport en suspension mesuré au K13.

A l'échelle du bassin versant de 10 300 km², ces transports de matières solides, 152 × 10⁶ t en 21 ans, représentent une ablation moyenne de 700 t/km²/an et une charge moyenne des eaux entrant dans la retenue du barrage de 38 g/l de matières solides dont 19% seraient transportées au fond.

III.2. LE BARRAGE DE L'OUED NEBAANA

III.2.1. Mesure de l'envasement

Les mesures sur ce barrage ont été délicates. La forme et l'étendue de la retenue posaient un problème pour le choix des profils à mesurer et il a fallu implanter des jalons bien visibles pour positionner tous les profils dont certains dépassent les 1 000 m. La série de relevés faits les 27 et 28 avril 1975 a permis d'exploiter 15 profils qui sont positionnés sur la carte simplifiée de la retenue (fig. 11). Étant donné la forme de la cuvette et la position relative des profils les uns par rapport aux autres, nous avons fait le calcul de l'envasement par la méthode de la hauteur moyenne à la cote 230 m, qui donne un résultat très proche de la méthode de Kolmogorov (la méthode générale ne tenant compte que des distances entre profils donne beaucoup trop d'importance aux profils latéraux qui coupent l'embouchure des petits affluents).

Le volume total d'envasement à la cote 230 m NGT s'élève à 12 905 000 m³. L'envasement est remarquable dans la partie la plus large à l'aval de la retenue où les profondeurs sont importantes. Nous avons reporté sur la figure 12 le profil en long de l'oued principal (oued Maarouf) avant et après les mesures d'envasement. On constate que les irrégularités du lit ont été lissées et que la pente du profil envasé diminue régulièrement de l'amont vers l'aval.

III.2.2. Bilan de l'envasement

Les données sur l'exploitation du barrage Nebaana sont très imprécises et il ne nous a pas été possible de reconstituer l'intégralité des apports et des volumes soutirés ou déversés.

Les prélèvements d'eau dans le barrage se font soit pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable par une conduite dont on peut estimer qu'elle ne capte pas de sédiments dans le barrage, soit par une vanne à jet creux pour les lâchures de dévasement. Le barrage a été mis en eau en avril 1965, nous avons pris en compte 10 ans de fonctionnement.

Pour les deux premières années nous n'avons pas retrouvé les données d'exploitation, mais connaissant le volume stocké au 1^{er} septembre 1967 et sachant que les installations à l'aval pour l'irrigation n'étaient pas en service, et que les années 1965-66 et 1966-67 furent nettement déficitaires sur l'ensemble du pays, nous avons estimé une valeur minimum pour les apports du bassin versant.

Les volumes d'eau soutirés pour l'irrigation ont été estimés pour les mois manquants (certaines années) en fonction des consommations faites au cours des mêmes mois pour les années suivantes. Les déversements qui ont eu lieu au cours de l'automne 1969 ont été reconstitués et sont assez imprécis (hauteurs d'eau mal relevées sur le déversoir). Il ne semble pas que l'on ait procédé à des opérations de dévasement avant 1971, mais rien ne nous permet de l'affirmer.

Tout ceci amène à considérer avec prudence les chiffres du tableau IV, où nous avons rassemblé les données et les estimations concernant l'exploitation du barrage. On y remarquera l'importance que prend l'année 1969-70 qui est fort probablement responsable d'une bonne moitié de l'envasement mesuré.

TABLEAU IV
EXPLOITATION DU BARRAGE DE L'OUED NEBAANA (855 km²)

Années hydrologiques	Apports liquides totaux ($\times 10^6$ m ³)	Déversements ($\times 10^6$ m ³)	Soutirages pour dévasement ($\times 10^6$ m ³)	Observations
1965-66	(20,0)	—	—	Volume stocké au 1/9/67 : 22×10^6 m ³ exploitation inconnue ; apports estimés à leur valeur minimum.
1966-67	(20,0)	—	—	
1967-68	(20,7)	—	?	Pour les deux années 67-68 et 68-69 irrigation et alimentation en eau potable estimées à 8×10^6 m ³ .
1968-69	(15,7)	—	?	
1969-70	155,9	(80,0)	?	Irrigation estimée : 2×10^6 m ³ .
1970-71	(28,1)	—	—	Irrigation estimée : 3×10^6 m ³ .
1971-72	23,3	—	0,50	
1972-73	55,9	10,1	16,46	
1973-74	52,7	—	17,47	
1974-75	22,1	—	1,53	
Total	414,4	90,1	35,96	
Moyenne sur 10 ans	41,44	—	3,50	

Pour calculer les apports totaux de sédiments au barrage nous avons admis que les volumes d'eau soutirés pour le dévasement avaient une charge moyenne de 60 g/l (ou kg/m³) de sédiments, par comparaison à la valeur moyenne calculée sur 14 ans au barrage Mellègue, et que les volumes déversés entraînaient 15 g/l de sédiments étant donné la morphologie de la cuvette. Ces estimations ne se basent sur aucune mesure directe au barrage Nebaana. Toutes les valeurs calculées sont ramenées au m³ de vase humide de densité apparente $d_a = 1,7$ contenant 1,2 t de matières solides par m³. Le bilan des transports solides sur 10 années au barrage Nebaana (dont 3 années exceptionnellement abondantes) peut s'établir comme suit :

Envasement mesuré	12 900 000 m ³
Volume de vase correspondant aux dévasements (60 g/l)	1 800 000 m ³
Volume de vase correspondant aux déversements (15 g/l)	1 130 000 m ³
Total des apports solides	15 830 000 m³

Ce qui représente un tonnage de $19,0 \times 10^6$ t de matières solides transportées par l'oued, soit à l'échelle du bassin versant une ablation moyenne de $2\,220$ t/km²/an et une concentration moyenne des eaux entrant dans le barrage de $45,9$ g/l.

L'envasement mesuré (avril 1975) représente $14,9\%$ de la capacité totale de la retenue soit un taux moyen de comblement de $1,5\%$ l'an, d'où une espérance de vie du barrage avant comblement total de 67 ans.

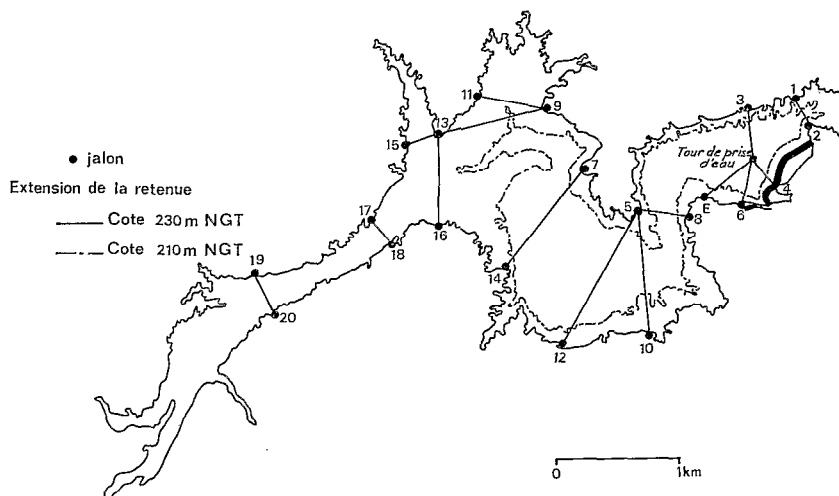


Fig. 11. — Barrage sur l'oued Nebaana. Implantation des profils transversaux

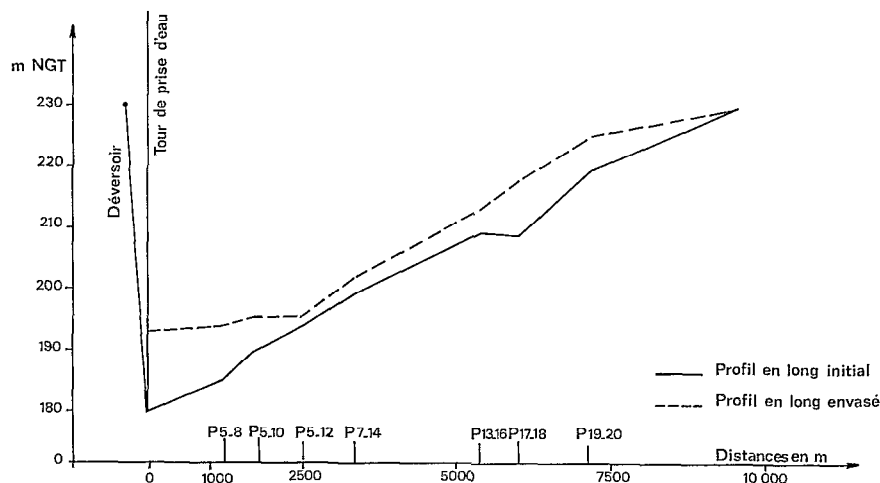


Fig. 12. — Barrage sur l'oued Nebaana

III.3. LE BARRAGE DE L'OUED BEZIRK

III.3.1. Mesure de l'envasement

Les relevés sur le terrain ont été effectués à un moment où le plan d'eau affleurait le déversoir de crue (cote 54,6 m NGT). Les mesures n'ont pas posé de problème particulier, les dimensions de la retenue étant telles que le repérage à l'aide de photos aériennes au 1/10 000^e était suffisamment précis pour être reporté sur un plan au 1/5 000^e et éviter l'implantation de jalons sur les berges.

La retenue est formée de deux branches bien séparées (fig. 13) qui correspondent à l'oued Haouas (en RD) et à l'oued Lella Mellouka (en RG) qui sont les deux formateurs de l'oued Bezirk lui-même. Nous avons donc, à partir des profils mesurés, calculé le volume des sédiments pour chaque branche séparément par la méthode dérivée de la méthode générale. Un contrôle par la méthode de la hauteur moyenne a donné un résultat légèrement supérieur, dû au fait que la surface de la retenue est planimétrée à la cote 55 m NGT et non 54,6 m, cote du déversoir de crues.

Nous avons abouti au chiffre de $1,68 \times 10^6$ m³ de sédiments déposés dans la retenue du barrage ce qui représente 26% de la capacité totale de la cuvette. Nous avons reporté sur les figures 14a et b les courbes des sections envasées des deux branches de la retenue et sur la figure 15 les profils en long avant et après envasement des deux oueds. On remarquera ici encore l'importance de l'envasement dans la partie aval de la retenue et au confluent des deux branches et l'évolution régulière de la pente du fond après l'envasement.

III.3.2. Bilan de l'envasement

Le barrage de l'oued Bezirk a été fermé en décembre 1960. Les eaux utilisées pour l'irrigation, sont prélevées dans une tour de prise d'eau par des vannes aux cotes 41,0 et 48,0 m NGT. Les lâchures se font par des vannes de fond à la cote 38,30 m NGY. Les observations y sont faites régulièrement depuis la création et elles ont pu être dépouillées par le bureau Coyne et Bellier dans le cadre de sa collaboration avec la DEGTH[5]. Les résultats de cette exploitation sont donnés dans le tableau V par années hydrologiques. Nous avons pris en compte 15 ans de fonctionnement. En 1964, la dérivation de l'oued Deila est venue augmenter de 11 km² la superficie du bassin versant contrôlé par le barrage dont il nous faut tenir compte pour le calcul de l'envasement, nous avons donc considéré une superficie moyenne du bassin versant sur 15 ans de 81 km² (4 ans à 73 km² et 11 ans à 84 km²). Nous avons supposé que les eaux évacuées par les vannes de fond avaient une charge moyenne de 60 g/l et les eaux déversées

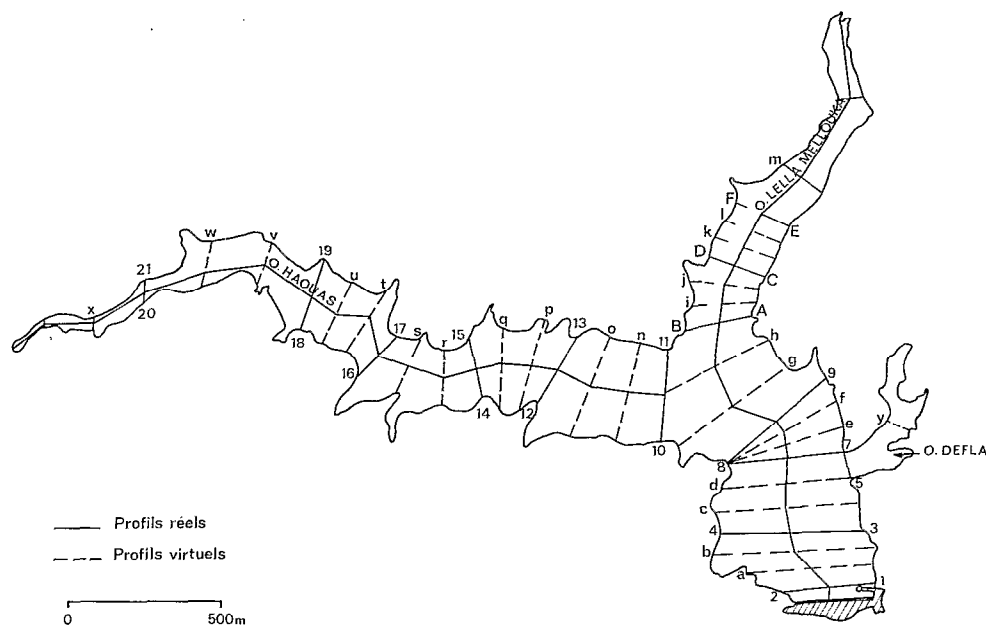


Fig. 13. — Barrage sur l'oued Bezirk. Plan de la retenue à la cote 55 m NGT

par l'évacuateur de crue une concentration moyenne de 15 g/l ; cela à défaut de mesures précises faites sur place au moment des crues. Nous avons aussi admis que les vases déposées avaient une densité apparente de 1,7 et contenaient 1,2 t/m³ de matières solides.

TABLEAU V
EXPLOITATION DU BARRAGE SUR L'OUED BEZIRK (73 puis 84 km²)

<i>Années hydrologiques</i>	<i>Apports liquides totaux</i> (× 10 ⁶ m ³)	<i>Déversements</i> (× 10 ⁶ m ³)	<i>Lâchures</i> (× 10 ⁶ m ³)
1960-61	1,574	—	0,331
1961-62	5,274	—	0,105
1962-63	1,989	—	0,001
1963-64	7,185	—	1,698
1964-65	1,417	—	0,087
1965-66	2,141	—	0,008
1966-67	0,524	—	0,083
1967-68	7,173	2,021	0,503
1968-69	1,512	—	0,246
1969-70	1,058	—	0,459
1970-71	4,047	—	0,255
1971-72	2,317	—	0
1972-73	16,384	4,276	8,956
1973-74	4,179	—	0,236
1974-75	6,878	0,187	0,250
Totaux	63,652	6,484	13,218
Moyenne sur 15 ans	4,243	—	0,881

Moyennant quoi, le bilan des transports solides peut s'établir comme suit :

Envasement mesuré	1 680 000 m ³
Lâchures = 13,218 × 10 ⁶ m ³ d'eau à 60 g/l soit 793 000 t représentant	661 000 m ³
Déversements = 6,484 × 10 ⁶ m ³ à 15 g/l soit 97 260 t représentant	81 000 m ³
Total des apports solides	2 422 000 m³ de vase soit 2 906 000 t.

Ramenés à 81 km² de bassin versant ces apports solides représentent 161 400 m³ par an ou 2 390 t/km²/an d'où une concentration moyenne des eaux entrant dans le barrage de 45,6 g/l. Le taux d'envasement de la retenue est de 112 000 m³/an soit 1,73% de la capacité du réservoir ce qui lui donne une espérance de vie de 57 ans avant un comblement total.

III.4. LE BARRAGE DE L'OUED CHIBA

Le repérage des profils transversaux sur la retenue de l'oued Chiba a pu être fait facilement à l'aide de photos aériennes au 1/10 000^e et du plan de la retenue au 1/5 000^e où l'équidistance des courbes de niveau est de 2 m. Le relevé des profils à l'écho-sondeur s'est effectué sans grande difficulté pour une cote du plan d'eau voisine du maximum ; 13 profils ont été mesurés.

Les dépouillements ont été menés suivant la méthode dérivée de la méthode générale en traitant séparément la branche principale de l'oued Chiba et les trois bras formés par des petits affluents (fig. 16).

Les calculs ont abouti à un volume de sédiments déposés égal à 2,65 × 10⁶ m³ ce qui est considérable pour un barrage de cette taille. Ce volume représente 33,7% de la capacité initiale de la retenue soit un taux annuel de comblement de 2,81% depuis sa mise en eau en 1963.

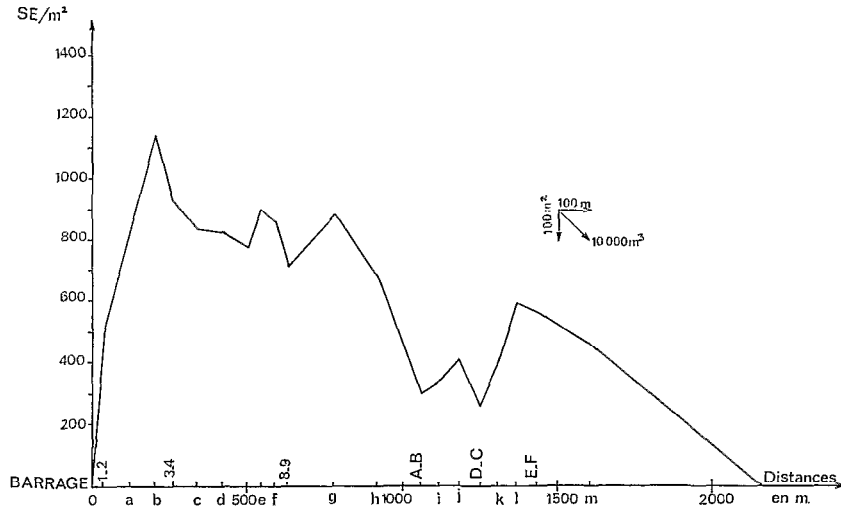


Fig. 14 a. — Barrage sur l'oued Bezirk.
Courbes des sections envasées le long de l'oued Bezirk et Lella Mellouka

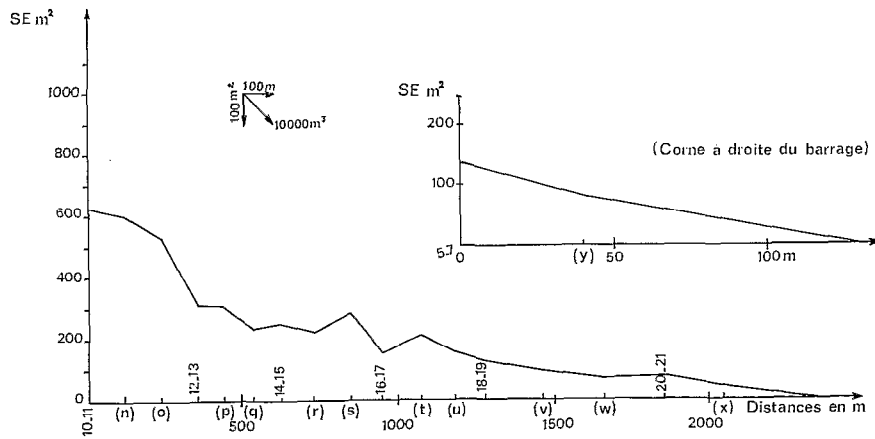


Fig. 14 b. — Barrage sur l'oued Bezirk.
Courbe des sections envasées le long de l'oued Haouas (rive droite)

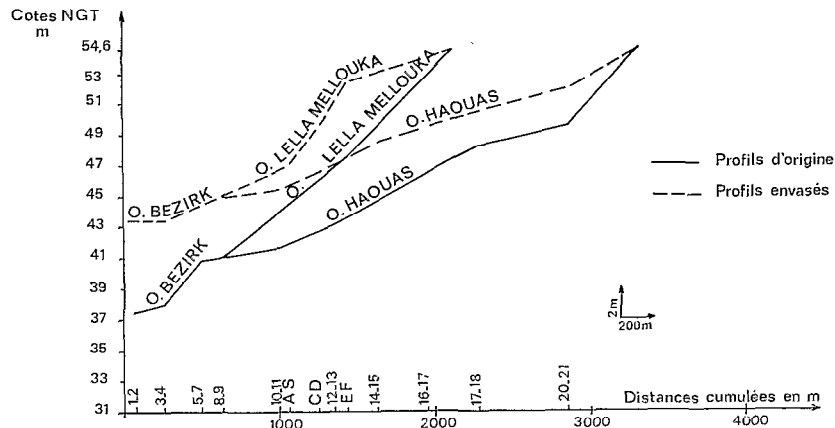


Fig. 15. — Barrage sur l'oued Bezirk. Profils en long

Bilan de l'envasement

L'historique de barrage de l'oued Chiba est assez compliqué et il ne nous a pas été possible de reconstituer avec précision l'exploitation hydraulique de l'ouvrage.

Mis en eau en 1963, le barrage s'est rempli assez rapidement, mais très vite un débit de fuite assez important est apparu qui a nécessité la vidange totale du barrage en 1965 (?) pour y effectuer des travaux. Les relevés réguliers du plan d'eau ne commencent qu'en 1967, encore manque-t-il beaucoup d'éléments pour calculer avec quelque précision le bilan hydraulique. Force nous a été de faire des approximations grossières soit par voisinage avec le barrage de l'oued Bezirk (dont le bassin versant a une exposition orographique très différente) soit par la formule de ruissellement de Tixeront Berkaloïf : $R = \frac{P^3}{3E^2}$ (R : lame ruissellée annuelle en mètres, P = pluviométrie annuelle en mètres, E = évaporation réelle annuelle en mètres). Les valeurs du tableau VI, résumant les 12 années de fonctionnement du barrage, sont donc très imprécises et ne nous fourniront que des approximations pour le bilan des apports solides. Nous avons aussi supposé que les volumes déversés (estimés) avaient une charge moyenne de 15 g/l. Les lâchures ont toujours été limitées et les débits de fuite ne peuvent entraîner de matières en suspension hors du barrage.

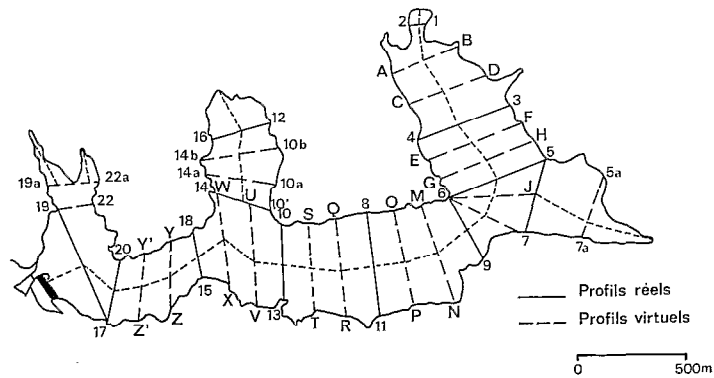


Fig. 16. — Barrage sur l'oued Chiba.
Plan de la retenue à la cote 79 m NGT

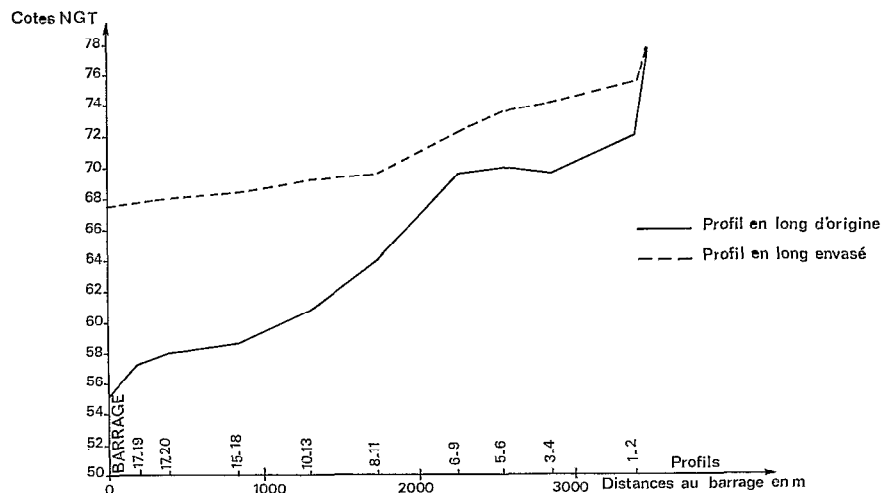


Fig. 17. — Barrage sur l'oued Chiba. Profils en long

TABLEAU VI
EXPLOITATION DU BARRAGE SUR L'OUED CHIBA (64 km²)

<i>Années hydrologiques</i>	<i>Variations du stock retenu (× 10⁶ m³)</i>	<i>Observations</i>	<i>Apports totaux supposés réels (× 10⁶ m³)</i>	<i>Déversements estimés (× 10⁶ m³)</i>
1963-64	—	Pas de relevés	5,460	—
1964-65	—	»	1,070	—
1965-66	—	Vidange totale du barrage	1,620	—
1966-67	—	Pas de relevés	0,750	—
1967-68	1,368		1,370	—
1968-69	0,535	Fuites et déversements non compris	1,150	—
1969-70	2,819	id.	3,500	0,700
1970-71	3,746	Fuites non comprises	4,150	—
1971-72	7,528	Exploitation normale	7,530	1,500
1972-73	4,827	Déversements non compris	6,850	2,000
1973-74	3,087		3,090	—
1974-75	8,109		8,110	—
		Total	44,650	4,200
		Moyenne	3,720	

Le bilan approximatif du transport solide sur 12 années se traduirait donc ainsi :

Envasement mesuré	2 650 000 m ³
Déversements (4,2 × 10 ⁶ m ³ à 15 g/l)	52 500 m ³
Lâchures = inconnues mais faibles à négligeables	
Total, environ	2,70 × 10 ⁶ m ³

soit $3,24 \times 10^6$ t de matières solides apportées au barrage en 12 ans. L'apport annuel moyen est de 225 000 m³ soit 2 530 m³/km²/an ou encore 4 220 t/km²/an (toujours avec une densité apparente de 1,7 pour les vases). La charge solide moyenne des eaux entrant dans le barrage serait :

$$\frac{3,42 \times 10^6 \text{ t}}{44,65 \times 10^6 \text{ m}^3} \simeq 72,5 \text{ g/l}$$

La précision de ces chiffres est bien sûr très mauvaise puisque les éléments du bilan hydraulique sont mal connus ; mais il apparaît nettement que le bassin versant de l'oued Chiba est sujet à une forte érosion et que la plus grande partie des transports solides est retenue dans la cuvette du barrage qui au rythme actuel de comblement aurait une espérance de vie de 35 ans.

III.5. LE BARRAGE DE L'OUED MASRI

Les mesures d'envasement de la cuvette du barrage Masri se sont déroulées dans les mêmes conditions que pour l'oued Bezirk et l'oued Chiba.

Nous disposons d'un plan détaillé au 1/2 000^e et de photos aériennes au 1/5 000^e ; étant donné la taille limitée de la retenue, le choix et l'implantation des profils de mesures furent aisés. Dix profils transversaux ont été relevés. Deux méthodes de dépouillement ont été utilisées : la méthode de la hauteur moyenne et la méthode dérivée de la méthode générale ; les résultats concordent à 3% près environ ce qui est très acceptable.

Le volume des sédiments accumulés dans le barrage se monte à $1,32 \times 10^6$ m³. Comme pour l'oued Chiba ce volume est énorme eu égard à la taille du bassin versant et à la date récente de mise en service. Cet envasement représente 19,3% de la capacité totale du barrage qui n'a que 7 ans et demi de fonctionnement, le rythme de comblement est donc de 2,57% par an ce qui donne une espérance de vie de 39 ans à l'ouvrage, chiffres très comparables à ceux de l'oued Chiba.

Bilan de l'envasement

Le barrage de l'oued Masri a été mis en eau en février 1968, la superficie du bassin versant est de 40 km². En mars 1971 le barrage Tahouna entre en service ; c'est une petite retenue de 1 million de m³, sur un bassin de 13 km² adjacent à celui de l'oued Masri. Une conduite commandée par une vanne permet d'envoyer les eaux stockées à Tahouna vers le barrage Masri. La comptabilisation de ces échanges n'est pas bien claire ; de toute façon les eaux supplémentaires comportent peu de matières en suspension à leur arrivée dans la retenue du Masri et l'on peut affirmer que les sédiments cubés dans cette retenue proviennent des seuls 40 km² de bassin versant propres à l'oued Masri.

Pour les mêmes raisons qu'au barrage de l'oued Chiba le bilan hydraulique de l'exploitation du barrage est très imprécis, en particulier les volumes déversés en 1969, 1972 et 1973 sont très mal connus. Nous avons rassemblé dans le tableau VII les valeurs que nous pensons être les plus proches de la réalité, ce qui permet d'établir approximativement le bilan des transports solides.

Envasement mesuré	1 320 000 m ³
Déversements et lâchures	<u>200 000 m³</u>
Total des apports solides	1 520 000 m ³ soit 1 824 000 t

Pour une période de fonctionnement de 7,5 ans et un bassin versant de 40 km² cela représente : 202 000 m³ par an ou 5 060 m³/km²/an soit encore 6 080 t/km²/an.

Ramenés au total des apports liquides ayant transité dans le barrage, ces $1,82 \times 10^6$ t d'apports solides représentent une charge moyenne de 85 g/l. Ce sont les chiffres les plus élevés que nous ayons trouvés ; ils peuvent être expliqués par la taille réduite du bassin versant et surtout la pente très forte des versants et des lits de torrents qui forment l'oued Masri ; de plus le bassin versant est ouvert aux vents d'est-nord-est porteurs des orages les plus violents ; enfin et surtout depuis 1969, cet ouvrage a connu au moins trois épisodes d'écoulement intense (septembre 1969, mars et décembre 1973) dont l'occurrence doit être bien supérieure à sa durée d'existence.

Il est dommage que ces chiffres qui constituent presque des valeurs record pour les phénomènes mesurés ne puissent s'étayer sur des données hydrauliques plus sûres ; il serait intéressant de pouvoir confirmer que le taux d'envasement mesuré correspond bien à des apports d'eau très élevés pour un bassin de 40 km² et à des déversements et des lâchures peu chargées de matières en suspension.

TABLEAU VII
EXPLOITATION DU BARRAGE SUR L'OUED MASRI (BV = 40 km²)

<i>Années hydrologiques</i>	<i>Apports annuels totaux</i> ($\times 10^6$ m ³)	<i>Déversements et lâchures</i> ($\times 10^6$ m ³)	<i>Observations</i>
Février-août 1968	(0,400)		
1968-69	0,860		Sous-estimé
1969-70	1,002		Déversements mal connus
1970-71	1,471		
1971-72	0,876		
1972-73	6,529	2,500	Déversements estimés
1973-74	6,208	2,100	Déversements estimés
1974-75	<u>4,126</u>	<u>0,600</u>	
Total	<u>21,472</u>	<u>5,200</u>	
Moyenne	2,863		

III.6. LE BARRAGE DE L'OUED LAKHMESS

Les mesures sur le barrage de l'oued Lakhmess se sont faites à une époque favorable, où le plan d'eau était presque au maximum mais sans déversements.

Le choix des profils de mesures était assez difficile dans la partie aval de la retenue où le plan d'eau s'élargit

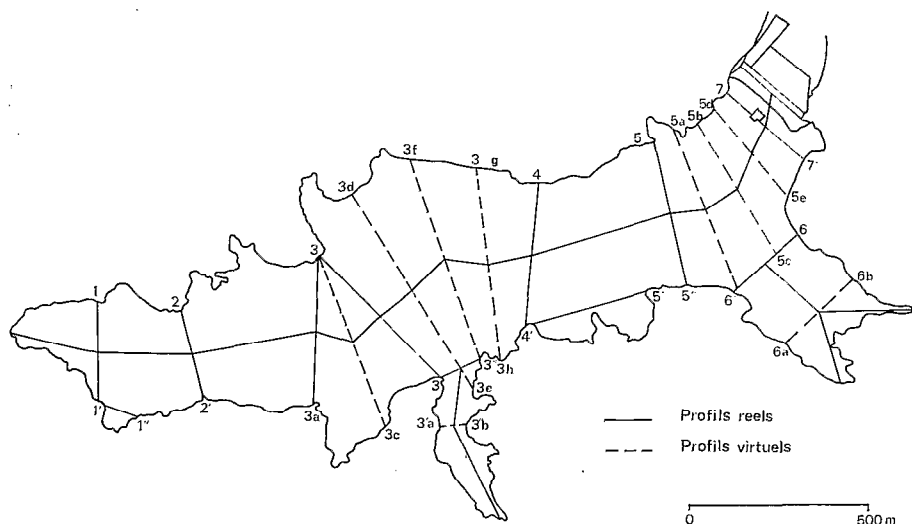


Fig. 18. — Barrage sur l'oued Masri. Plan de la retenue à la cote 163 m NGT

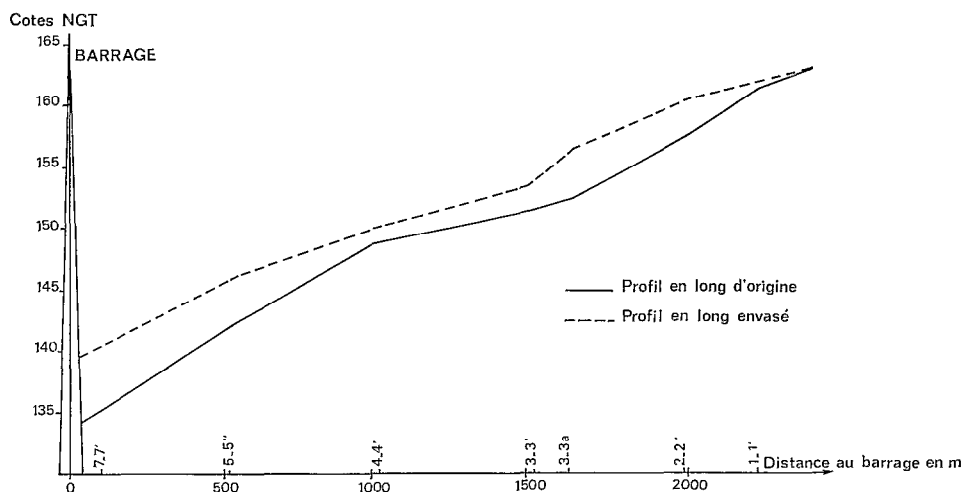


Fig. 19. — Barrage sur l'oued Masri. Profils en long

énormément (voir fig. 20). Dix profils ont été mesurés, l'implantation de jalons était nécessaire pour le repérage des profils 1, 2 et 3, pour les autres l'emploi de photos aériennes au 1/10 000^e et le report sur un plan au 1/2 500^e, avec équidistance des courbes de niveau de 1 m, était suffisant.

Nous avons conduit les dépouillements par deux méthodes différentes, à cause de la forme particulière de la retenue : la méthode de la hauteur moyenne et la méthode dérivée de la méthode générale. Les deux résultats sont très voisins : $1,998 \times 10^6 \text{ m}^3$ et $2,023 \times 10^6 \text{ m}^3$. Nous avons retenu la valeur moyenne de $2,01 \times 10^6 \text{ m}^3$ pour le volume total d'envasement ce qui représente 25% de la capacité totale de la retenue.

Mis en eau en avril 1966, ce barrage fonctionne depuis 9 ans au moment des mesures ; pour englober toute l'année hydrologique 1974-75, nous considérons une période de 9,33 années de service. Le taux d'envasement annuel est alors de 2,7% ce qui donne une espérance de vie de 37 ans à l'ouvrage dans les conditions actuelles.

Bilan de l'envasement

Le bilan hydraulique de l'exploitation du barrage a été assez difficile à établir. Les observations du plan d'eau ont été faites régulièrement depuis avril 1966, mais depuis 1969, les eaux stockées sont peu utilisées pour l'irrigation à l'aval, et le taux de remplissage du barrage est toujours élevé ce qui mène à des déversements prolongés pendant la période hivernale. Le déversoir de crue est très large et la courbe d'étalonnage très peu précise pour les faibles lames d'eau. De plus la séparation entre les déversements et les lâchures par vannes de fond n'est pas faite. Tout cela rend fort imprécis les chiffres des apports liquides totaux que nous avons résumé dans le tableau VIII.

Cependant à partir de ces chiffres nous avons pu établir comme suit le bilan des apports solides dans la retenue :

Envasement mesuré	2 010 000 m ³
Déversements + lâchures 27,3 × 10 ⁶ m ³ à 40 g/l en moyenne	910 000 m ³
Total des apports solides	2 920 000 m³ soit 3,504 × 10⁶ t de matières solides.

Ramenés à 131 km² de bassin versant et à 9,33 années de fonctionnement ces chiffres donnent :

Apports solides annuels moyens	312 850 m ³
soit	2 390 m ³ /km ² /an
ou encore	2 865 t/km ² /an

Comparés aux 66 × 10⁶ m³ d'apports liquides totaux, les apports solides en 9,33 ans représentent une concentration moyenne de 53 g/l des eaux entrant dans la retenue.

TABLEAU VIII
EXPLOITATION DU BARRAGE SUR L'OUED LAKHMESS (131 km²)

<i>Années hydrologiques</i>	<i>Variations stocks (× 10⁶ m³)</i>	<i>Déversements + lâchures (× 10⁶ m³)</i>	<i>Apports liquides totaux (× 10⁶ m³)</i>
Avril-août 1966	1,698	—	1,698
1966-67	2,805	—	2,805
1967-68	4,940	—	4,950
1968-69	1,023	—	1,023
1969-70	6,202	10,659	16,861
1970-71	3,167	7,787	10,954
1971-72	3,774	1,018	4,792
1972-73	3,853	4,011	7,864
1973-74	5,345	3,550	8,895
1974-75	5,907	0,253	6,160
Total	38,714	27,278	65,992
Moyenne sur 9,33 ans	4,150		7,073

IV. DISCUSSION DES RÉSULTATS

Comme l'a montré l'exposé des résultats pour chaque barrage, nous nous trouvons en face d'un ensemble de chiffres assez disparates dont il ne semble pas que l'on puisse tirer immédiatement des conclusions générales à l'échelle régionale. Chaque barrage constitue une entité particulière tant par sa construction elle-même que par le bassin versant qu'il contrôle. Les comparaisons des taux de sédimentation d'un barrage à un autre ne doivent pas être faites directement mais elles doivent tenir compte de nombreux facteurs : morphologie, géologie, pédologie, couvert végétal du bassin versant, irrégularité plus ou moins marquée du régime hydrologique..., toutes choses

Fig. 20. — Barrage sur l'oued Lakhmess.
Plan de la retenue à la cote 517 m NGT

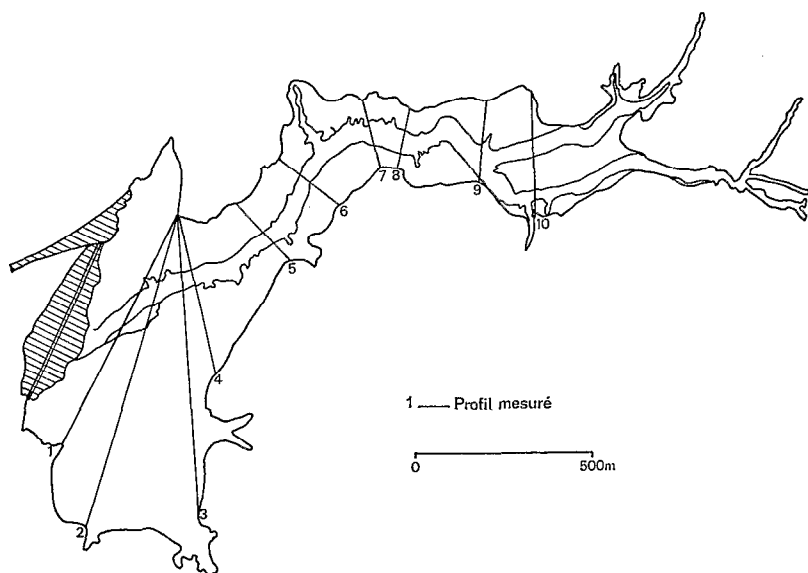


Fig. 21. — Barrage sur l'oued Lakhmess.
Sections envasées

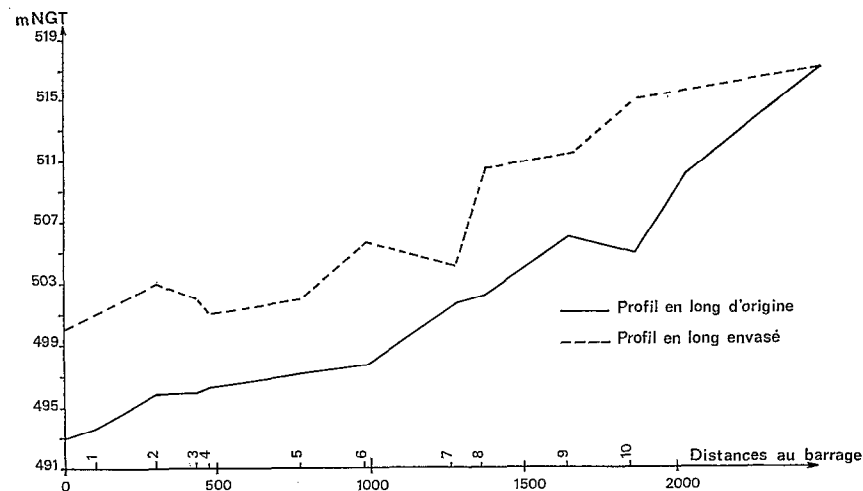
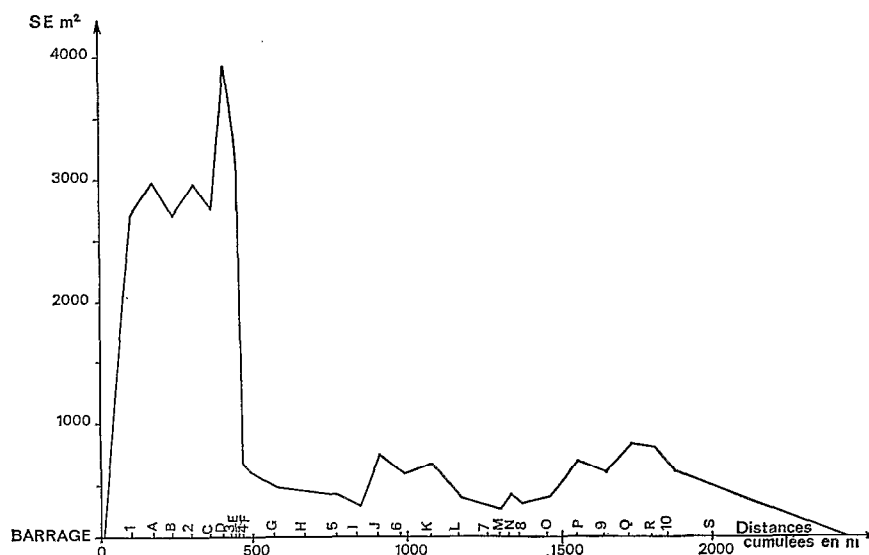


Fig. 22. — Barrage sur l'oued Lakhmess.
Profils en long

qu'il est difficile de faire entrer dans des formules ; de plus les modalités de gestion du barrage et l'utilisation des eaux retenues influent sur les quantités de sédiments qui se déposent dans la retenue.

Toutefois, avant d'examiner les résultats pour l'ensemble des barrages, il nous a semblé utile de faire une mise au point préliminaire sur le problème des densités des sédiments et des processus supposés de sédimentation.

IV.1. LES DENSITÉS

IV.1.1. Définitions théoriques

La nécessité de relier les mesures de transports solides faites dans les rivières (concentrations en g/l) aux mesures de sédimentation (envasement de barrage ou alluvionnement dans les plaines) (volumes de sédiments en m³) exige des définitions précises et des termes non ambigus.

Les matériaux transportés au cours de la chaîne érosion-transport-sédimentation passent schématiquement par 3 états :

- les matériaux originels qui sont en général des sols en place qui seront arrachés plus ou moins profondément (érosion pelliculaire — ravinement — éboulis de berge) ;
- les matériaux sous forme de particules *en suspension* dans l'eau ou en saltation ou charriés au fond (sans parler des minéraux qui peuvent se dissoudre au cours du transport) ;
- les sédiments, déposés sous l'eau dans les retenues de barrages, ou alluvionnés dans les plaines et exondés.

A ces états correspondent des caractères physiques particuliers :

- a) le sol en place est un mélange de 3 phases : terre, eau et air ; de même que les sédiments hors d'eau après un certain temps de ressuyage ;
- b) l'eau chargée de matériaux peut devenir une boue ou une vase (ces deux termes étant pour nous synonymes) si la concentration en matériaux solides augmente beaucoup (limites d'Atterberg) ;
- c) un dépôt de sédiments sous l'eau est une boue plus ou moins consolidée ; s'il se trouve hors d'eau, il redevient assimilable à un «sol», à la structure et à la texture près.

Nous raisonnons ici schématiquement et faisons abstraction des phénomènes de gonflement et d'adsorption d'eau par les argiles, nous appellerons «eau» dans le sol ou dans la boue, toute l'eau susceptible d'être extraite par passage à l'étuve à 105° pendant 48 heures.

Considérons un volume V de mélange terre + eau + air et appelons :

- da = la densité apparente du mélange
- V_s = le volume de solide contenu dans le mélange
- dr = la densité réelle de ce matériau solide
- ps = son poids sec
- Hv = le volume d'eau dans le mélange (ou humidité volumique)
- ρ = la densité de l'eau = 1
- V_a = le volume d'air dans le mélange
- ε = la densité de l'air (qui sera négligeable)

La relation entre les masses de ce mélange est :

$$V \cdot da = V_s \cdot dr + Hv \cdot \rho + V_a \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Prenons V = 1, et si ρ = 1 et ε ≈ 0 on déduit :

- a) Volume occupé par le matériau solide dans le volume unité

$$V_s = \frac{da - Hv}{dr} \quad (2)$$

- b) Poids de la terre dans le volume unité

$$ps = da - Hv \quad (3)$$

c) Volume occupé par l'air

$$V_a = 1 - H_v - V_s = 1 - H_v - \frac{da - H_v}{dr} \quad (4)$$

— pour un sol sec $\Rightarrow H_v = 0$ d'où $V_s = \frac{da}{dr}$ et

$$V_a = \frac{dr - da}{dr}$$

et on appelle la porosité totale ou indice des vides en %

$$pr = 100 \times \frac{dr - da}{dr}$$

— pour un mélange eau + terre (boue ou eau chargée) $V_a = 0$ et $V_s + H_v = 1$ d'où $V_s = \frac{da - 1}{dr - 1}$

et

$$ps = dr \frac{(da - 1)}{dr - 1}$$

et

$$H_v = \frac{dr - da}{dr - 1}$$

On appelle aussi la teneur en eau d'une boue : $\frac{\text{poids de l'eau}}{\text{poids de terre}}$ soit

$$te = \frac{dr - da}{dr (da - 1)}$$

Ces notions simples montrent que les propriétés du mélange terre + air + eau évoluent dans une large gamme et qu'il y a lieu de préciser toujours de quelle grandeur on parle ; ainsi il est inexact de penser que 1 m³ de sol érodé occupera 1 m³ de capacité dans une retenue de barrage et il est malaisé de prévoir quel volume de sédiments déposera une eau chargée de ps g/l de matières en suspension.

Pour ces raisons nous préférons écarter la notion de lame érodée sur un bassin qui n'a pas d'image physique réelle et nous quantifions l'érosion globale d'un bassin par l'exportation de matériaux en t/km²/an. Par contre l'envasement d'un barrage sera mesuré en m³ étant entendu que ce sont des mètres cubes de vase consolidée sous l'eau.

IV.1.2. Valeurs pratiques

En fait la principale incertitude provient de la difficulté à réaliser des mesures sur le terrain qui soient représentatives.

Il est assez aisé de déterminer au laboratoire la densité réelle des matériaux, l'humidité volumique d'un échantillon, ou le poids de matières en suspension dans l'eau ; par contre la mesure de la densité apparente en place et la mesure des transports solides par prises d'échantillons dans les écoulements posent de tout autres problèmes.

Nous nous sommes rendu compte, au cours de l'étude des alluvions déposées par la Medjerdah lors de la crue de mars 1973 [11], qu'un échantillon d'eau prélevé dans l'oued en surface et sur le bord d'un écoulement turbulent représentait très mal le transport solide dans la section.

La mesure de la densité apparente est encore plus malaisée en particulier sur les boues immergées dont l'état physique est souvent mal défini ; ce paramètre est pourtant fondamental pour déterminer les poids respectifs de matériau solide et d'eau contenus dans un volume donné de boue,

Le tableau IX, où nous avons calculé le poids de terre en kg par m³ de boue pour différentes valeurs de d_r et d_a , montre que les variations de d_r influent beaucoup moins que celles de d_a , or dans la réalité d_r varie très peu et peut être déterminé avec assez de précision, par contre d_a peut varier dans de larges limites et sa mesure dans ces conditions particulières est fort imprécise.

On comprend alors que, suivant les auteurs, la valeur prise en compte pour ce poids de terre varie de 0,8 t/m³ à 1,6 t/m³ selon les hypothèses admises qui reposent rarement sur des mesures réelles de terrain.

La DEGTH admet généralement les valeurs moyennes $d_a = 1,6$ et $d_r = 2,5$ ce qui donne $ps = 1.000$. C'est-à-dire qu'une tonne de matières solides déposées dans une retenue de barrage occupe 1 m³ de capacité du barrage

TABLEAU IX
POIDS DE MATIÈRES SOLIDES (en kg) DANS UN MÈTRE CUBE DE VASE

$$ps = \frac{d_r (d_a - 1)}{d_r - 1}$$

d_r	d_a								
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
2,2	183	366	550	733	916	1 099	1 283	1 466	1 650
2,3	177	353	530	707	884	1 064	1 238	1 415	1 592
2,4	171	342	514	686	857	1 028	1 200	1 371	1 542
2,5	167	333	500	666	833	1 000	1 166	1 333	1 500
2,6	162	325	487	650	812	975	1 137	1 300	1 462
2,7	159	318	476	635	794	953	1 112	1 270	1 429
2,8	155	311	466	622	777	933	1 088	1 244	1 400

IV.1.3. Essais de mesures

Pour tenter de préciser ces chiffres nous avons procédé à des prises d'échantillons dans la retenue du barrage Mellègue, au fond sous 3 à 19 m d'eau et sur les berges à l'amont du profil 32.

Sur les berges les prélèvements ont été faits à la tarière et n'ont pas fait l'objet de mesures de densité apparente.

Sous l'eau les prélèvements étaient faits par un plongeur qui enfonçait un cylindre aux bords biseautés de 30 cm de long et 5,2 cm de diamètre, l'extraction de la carotte se faisait sans difficulté et le cylindre était fermé hermétiquement aux deux extrémités avant d'être remonté à la surface.

Les constatations suivantes ont pu être faites :

- lors d'un premier essai le 19 décembre 1975, la cote du plan d'eau est de 250,55 m NGT, l'eau est presque claire aux profils 9 et 3, le fond est visible et présente une consistance plastique mais résistante ;
- au deuxième essai, le 29 juin 1976, la cote est à 255,05 m NGT, une crue de 181 m³/s (débit max.) est passée au K13 le 27 juin à 20 heures; l'eau est trouble, la visibilité au fond presque nulle et sur la boue consolidée du fond surnage 10 cm environ d'une « crème de vase » très fluide qui n'est pas prélevée, mais le fond est moins résistant, la couleur de la boue plus claire ;
- la boue prélevée est une pâte très cohérente ressemblant à du mastic, mais après 24 heures hors de l'eau elle se fluidifie complètement et devient liquide (phénomène de thixotropie très marqué) ;
- les sédiments déposés sur les berges à l'amont et qui étaient hors d'eau ont un aspect beaucoup plus grossier que les argiles fines prélevées au fond, ce qui sera confirmé par la granulométrie.

La consolidation des boues sous une certaine profondeur d'eau est un phénomène très complexe, fort peu décrit dans la littérature, le tassement des argiles et des particules colloïdales s'accompagne d'un rejet d'eau et d'une forme différente d'adsorption d'eau sur les particules ainsi que d'une réaction de réduction des boues (d'où le changement de couleur constaté) ; il est certain que la pression hydrostatique joue le rôle principal dans le processus de consolidation mais les phénomènes sont difficiles à suivre et à mesurer dans leur évolution en profondeur [7-8-9]. Nous n'envisageons pas de pouvoir disposer d'un carottier qui permettrait de prélever une épaisseur de boue allant jusqu'à 20 m et sous 30 m d'eau.

Les échantillons prélevés ont donné les résultats suivants :

TABLEAU X
BARRAGE MELLÈGUE : ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS SOUS L'EAU
LE 19 DÉCEMBRE 1975

	Profil échantillon		
	P 13 RG 2 062	P 13 milieu 2 063	P 9 milieu 2 049
da mesuré	1,59	1,70	1,58
dr mesuré	2,28	2,28	2,32
Ps/m ³ mesuré	1,027	0,977	0,910
Ps/m ³ calculé	1,051	1,246	1,019

TABLEAU XI
BARRAGE MELLÈGUE : ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS SOUS L'EAU
LE 29 JUIN 1976

	Profil échantillon			
	P 9 3 296	P 13 3 297	P 17 3 298	P 22 3 299
da mesuré	1,36	1,397	1,35	1,357
dr mesuré	2,3	2,28	2,32	2,33
Ps/m ³ mesuré	0,594	0,612	0,657	0,653
Ps/m ³ calculé	0,636	0,707	0,615	0,625

La concordance entre Ps calculé et Ps mesuré est assez bonne pour des mesures assez grossières. On constate la différence très forte entre la première et la deuxième série, due à la différence de tassement des boues. Nous considérons que les prélèvements intéressant une couche de 30 cm de boue sont des prélèvements de surface c'est-à-dire de boue relativement peu consolidée et que sous une certaine épaisseur la densité apparente peut atteindre 1,8 et même 2. La densité réelle des argiles peut être prise en moyenne égale à 2,3-2,4.

Pour l'ensemble de nos calculs permettant de transformer des tonnes de sédiments en mètres cubes d'envasement ou inversement il nous a semblé raisonnable d'adopter les valeurs de $da = 1,7$ (puisque c'est une valeur mesurée une fois en surface) et $dr = 2,35 - 2,4$. Ce qui mène à un poids de matières solides par mètre cube de boue $ps = 1,2 \text{ t/m}^3$. Il serait intéressant d'entreprendre au laboratoire des essais de consolidation des boues à l'eudomètre ou à l'appareil triaxial en mesurant les rejets d'eau en fonction de la pression appliquée.

Nous n'avons procédé à ces prélèvements de vase que dans la retenue du barrage de Neheur, nous avons par la suite admis cette valeur de $1,2 \text{ t/m}^3$ pour tous les autres barrages. Il est évident que cela demande confirmation et qu'une campagne systématique de carottage dans les retenues des barrages serait bien utile mais ces mesures sont onéreuses en matériel et en personnel et si l'on tient compte de ce que la plupart des sols des régions où sont situés les bassins versants des barrages étudiés ici sont issus de roches mères très voisines (argiles et calcaires) on peut penser que les caractéristiques physiques des sédiments ne doivent pas varier sur une large gamme (en particulier la granulométrie et la densité réelle des matériaux). Aussi cette extension du chiffre $1,2 \text{ t/m}^3$, lui-même assez imprécis, nous semble justifiée en un premier temps.

IV.2. PROCESSUS DE SÉDIMENTATION

Les analyses granulométriques pratiquées sur les sédiments prélevés au barrage de l'oued Mellègue et l'examen des profils en long des fonds avant et après l'envasement sont très éloquents quant aux mécanismes de dépôt des sédiments.

Sur la figure 10, sont reportés le profil en long de l'oued Mellègue avant la mise en eau du barrage et le profil en long du fond envasé (points les plus bas des sections mesurées).

Le profil initial est assez régulier, la pente moyenne sur 21,3 km est de 2,89‰, ce qui exclut la possibilité de dépôts importants dans le lit de l'oued. On peut dire qu'avant la mise en eau du barrage, ce tronçon de l'oued Mellègue était en phase d'érosion. Les variations de pente autour de cette moyenne sont faibles, on constate seulement des irrégularités locales entre les profils 13 et 27 dues au passage dans un rétrécissement de la vallée.

Le profil envasé est très différent : les irrégularités ont été lissées par l'envasement, la pente globale sur 21,3 km n'est plus que de 2,16‰ mais elle n'est plus du tout uniforme. Trois cassures apparaissent au niveau des profils 41, 27 et 14.

Nous avons en fait distingué 5 tronçons, de l'amont à l'aval.

- 1 : du profil 50 au profil 41, pente 2,50‰ sur 4,7 km. C'est la partie amont de l'oued qui est rarement en eau ; les dépôts ont lieu essentiellement sur les berges à la décrue. Elle se termine aux profils 42-41 où, au passage d'un seuil, le niveau de base du lit de l'oued n'a pratiquement pas bougé.
- 2 : du profil 41 au profil 27, pente 0,52‰ sur 7,6 km. C'est la partie où le courant entrant dans la retenue diminue rapidement et où se dépose la plus grosse partie des éléments lourds.
- 3 : du profil 27 au profil 14, pente 3,83‰ sur 5,45 km. Ce tronçon correspond à une partie presque rectiligne de la retenue avec peu d'apports latéraux et une vallée large.
- 4 : du profil 14 au profil 7, pente nulle sur 2,6 km avec une partie à contre pente formant une sorte de cuvette. Dans cette zone le fond des profils est plat, le dépôt des sédiments se fait par décantation en l'absence de courants.
- 5 : du profil 7 au barrage, pente 8,62‰ sur 1,1 km. La proximité du barrage place cette zone sous l'influence des prises d'eau et vannes de fond qui ont créé un chenal dans les dépôts. On remarque que cette zone d'influence est très limitée.

La rupture de pente très nette entre les tronçons 3 et 4 fait nettement penser au profil d'un cône de déjection avec une pente très faible dans la partie supérieure, la zone de rupture correspondant aux sections les plus fortement envasées (profil 27). On peut décrire le mécanisme des dépôts en 3 phases :

- à l'amont de la retenue, les eaux entrant dans le barrage voient leur vitesse diminuer rapidement, elles abandonnent une partie importante des matériaux transportés les plus lourds donc les plus grossiers (profils 11 à 27) ;
- dans la partie médiane (profils 27 à 14), les eaux entrantes se mélangent avec celles qui sont stockées, les courants ne correspondent plus à un écoulement et sont très faibles, c'est ce qu'on nomme les « courants de densité » sur lesquels nous sommes mal renseignés. Les dépôts se font plus lentement mais les particules fines restent en suspension ;
- à l'aval, près du barrage, les eaux retenues déposent les particules en suspension, par décantation pendant un temps beaucoup plus long. D'après Leliavsky [2] une particule de 10 μ de diamètre mettrait 20 heures pour traverser une tranche d'eau de 7 m, et il faudrait 80 jours à une particule de 1 μ pour le même trajet. Dans cette partie du barrage les eaux restent troubles longtemps après l'arrivée d'une crue.

Ceci est assez bien confirmé par la répartition granulométrique des sédiments, dont nous avons rassemblé les résultats dans le tableau ci-après.

A l'amont les éléments grossiers (sables) prédominent et représentent la quasi totalité des dépôts à une certaine profondeur. Le prélèvement fait sur des délaissés de crue au profil 33 (délaissés très récents puisque la crue en question s'est produite deux jours avant les prélèvements) montre une plus forte proportion d'éléments fins en surface ; ces éléments sont susceptibles d'être repris par une crue plus importante et transportés plus à l'aval ; dans le tronçon compris entre les profils 32 et 41 où l'oued Mellègue coule dans un lit qu'il s'est recreusé dans les alluvions, on distingue nettement sur les berges les strates de sédimentation correspondant aux crues importantes. Ce prélèvement du profil 33 est très comparable à celui du profil 2 qui, bien que situé à proximité du barrage, correspond au débouché d'un affluent de la rive droite, l'oued Bel Hannech, dont le bassin versant est sujet à une forte érosion ; au niveau du profil 2 le dépôt de sédiments grossiers est aussi important qu'au profil 33.

Au profil 29, les sables fins deviennent plus importants, le tri des particules est déjà très net.

TABLEAU XII
 GRANULOMÉTRIE DES SÉDIMENTS — BARRAGE DE L'OUED MELLÈGUE

Lieu de prélèvement	Distance au barrage (km)	Profondeur prélevée (cm)	Argiles	Limons	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	Densité réelle dr
			0-2 μ %	2-20 μ %	20-50 μ %	50-200 μ %	200 - 2 000 μ %	
P 33 amont sur berge RD	12	0-20	10,5	12,0	14,5	52,5	7,0	2,51
		40-55	1,0	0,5	1,5	10,0	86,0	2,61
		60-75	1,0	0	1,0	11,0	85,5	2,79
P 33 sur délaissés	12	0-20	15,0	16,0	20,0	44,5	2,5	2,50
		20-35	3,0	3,5	4,0	78,0	10,0	2,59
P 29 RD, sur berge	10,5	0-20	8,5	6,0	9,0	70,0	3,5	2,36
		40-55	9,0	7,0	22,5	57,5	1,0	2,50
		60-75	8,5	5,5	15,0	67,0	1,0	2,47
P 17 13,2 m sous l'eau	4,9	0-30	24,0	44,0	20,0	9,5	1,5	2,32
P 13 17,9 m sous l'eau	3,0	0-30	48,0	41,5	7,0	1,5	1,0	2,28
P 9 19 m sous l'eau	1,8	0-30	48,5	43,5	5,0	1,5	0,5	2,30
P 2 RD, Oued Bel Hannoeh hors d'eau	1,5	0-20	8,5	8,0	5,0	61,5	14,5	2,51
		20-40	12,0	10,5	6,5	43,0	25,5	2,48
		40-60	12,0	11,0	0	59,5	14,5	2,51

Au profil 17, qui est à 5 km du barrage, les particules grossières ne représentent plus que 10% environ du total alors que les argiles et les limons constituent 68% des sédiments. Cette tendance s'accroît de plus en plus et au profil 9, il n'y a plus que 8% des particules supérieures à 50 μ alors que les particules fines (A+L) constituent 92% des dépôts.

Les prélèvements faits aux profils 22 et 27 n'ont malheureusement pas été traités au laboratoire, ce qui aurait permis de compléter la série d'observations.

Les particules fines étant les seules à rester en suspension et à être transportées jusqu'au barrage, on notera que les dévasages pratiqués par les vannes de fond concernent uniquement des vases à très fine granulométrie et que le comblement de la retenue se fait d'abord à l'amont ; la zone d'efficacité des vannes de fond est très restreinte et leur utilisation principale est de maintenir hors des sédiments les prises d'eau des turbines.

L'interprétation des différences entre les profils en long avant et après l'envasement peut être faite de la même façon pour les autres barrages étudiés :

— *Au barrage de l'oued Nebaana* (fig. 12) : après une partie amont où la pente du profil envasé est très faible, on retrouve une pente presque parallèle à celle du profil initial jusqu'à la section 5-12. Là, un rétrécissement très marqué de la retenue isole la partie aval de la réserve où les dépôts de sédiments se font uniquement par décantation. La pente du fond envasé y devient quasi nulle et aussi le fond des sections transversales y est presque plat.

— *Au barrage de l'oued Bezirk* (fig. 15) : le profil en forme de cône de déjection est très net sur la branche de l'oued Lella Mellouka dont le profil en long initial est très régulier. Ceci est moins marqué pour l'oued Haouas dont le parcours dans la retenue est plus long, mais la diminution de la pente du profil en long envasé est très nette. La partie correspondant à l'oued Bezirk, après le confluent, dont la pente initiale était plus forte que celle des deux formateurs, est maintenant celle où la pente est la plus faible.

— *Les profils en long de l'oued Chiba* (fig. 17) sont aussi remarquables. Malgré la petite taille de la retenue et les apports importants des affluents de la rive droite, le profil en long après envasement révèle une pente allant en diminuant de l'amont à l'aval jusqu'à devenir presque nulle au pied du barrage, alors que le profil initial à l'inverse présentait une plus faible pente à l'amont et une accentuation très nette à l'aval à l'approche du site du barrage.

— Cela est moins sensible pour *le barrage de l'oued Masri* (fig. 19) dont la retenue ne dépasse pas 2,5 km de long et où en raison de la forte pente initiale de l'oued et de la violence des crues du petit bassin versant drainé, le triage des sédiments doit être beaucoup moins net. Il semble bien cependant que l'inversion de courbure du

profil envasé par rapport au profil initial à l'amont entre les sections 1-1' et 3-3' correspond à une accumulation de sédiments grossiers dans cette zone.

— *Au barrage de l'oued Lakhmess* (fig. 21), on remarque, contrairement aux autres profils en long, une irrégularité de la pente du profil envasé bien plus grande que pour le profil initial. Ceci s'explique par la présence de deux rétrécissements très marqués au droit des sections 7 et 5, dans la partie amont de la retenue à un endroit où le courant des flots entrants n'est pas encore annulé ; on constate alors une accumulation de sédiments probablement grossiers à l'amont de ces verrous et un recressement du profil envasé immédiatement à l'aval. La partie aval de la retenue qui s'élargit considérablement tend à se combler uniformément et presque horizontalement sauf au voisinage du profil 2 où se situent des zones d'emprunt de matériaux ayant servi à construire le barrage.

IV.3. RÉSULTATS D'ENSEMBLE

Nous avons constitué un tableau récapitulatif de l'ensemble des mesures d'envasement faites sur les six barrages et des chiffres que l'on peut en déduire.

TABLEAU XIII
TABLEAU RÉCAPITULATIF DES MESURES D'ENVASEMENT SUR LES SIX BARRAGES

<i>Nom du barrage</i>	<i>Mellègue</i>	<i>Nebaana</i>	<i>Besirk</i>	<i>Chiba</i>	<i>Masri</i>	<i>Lakhmess</i>
Surface du BV (km ²)	10 300	855	73-84	64	40	131
Volume total de la retenue ($\times 10^6$ m ³)	268	86,4	6,46	7,86	6,82	8,00
Date de la mise en service	avril 1954	avril 1965	déc. 1960	1963	février 1968	avril 1966
Période de fonctionnement jusqu'en août 1975 (années)	21,33	10	14,75	12	7,5	9,33
Volume de sédiments déposés ($\times 10^6$ m ³)	47,6	12,9	1,68	2,65	1,32	2,01
Taux d'envasement (%)	17,8	14,9	26,0	33,7	19,3	25,1
Rythme annuel de comblement (%)	0,83	1,5	1,76	2,81	2,58	2,69
Apports liquides totaux (10^6 m ³)	4 010	414,4	63,65	44,65	21,47	65,99
Apport moyen annuel ($\times 10^6$ m ³)	188	41,4	4,32	3,72	2,86	4,15
Apports solides totaux ($\times 10^6$ m ³)	126,7	16,4	2,42	2,70	1,52	2,92
Apports solides moyens annuels ($\times 10^6$ m ³)	5,94	1,64	0,164	0,225	0,202	0,313
Tonnage moyen annuel ($\times 10^6$ t)	7,13	1,97	0,197	0,270	0,242	0,375
Érosion spécifique (t/km ² /an)	695	2 300	2 430	4 220	6 050	2 865
Charge moyenne des apports liquides (g/l ou kg/m ³)	38	47,5	45,6	72,5	85	53

Comme nous l'avons déjà signalé, il ne faut pas attendre une précision remarquable des chiffres contenus dans ce tableau. La reconstitution des apports totaux liquides et solides dans les retenues des barrages a été faite dans certains cas à l'aide d'estimations très hasardeuses.

On peut estimer à 10% la précision relative sur les mesures d'envasement et le cubage des sédiments déposés. La précision sur les apports liquides est très variable ; nous pouvons indiquer pour nous résumer que :

— le barrage de l'oued Mellègue a été le mieux suivi dans son exploitation ; le contrôle des débits soutirés ou déversés est correct, les recoupements faits avec la station hydrométrique du Mellègue au K13 (9 000 km²) sont satisfaisants. On peut estimer à 5% la précision sur les apports totaux au barrage.

- le barrage de l'oued Bezirk a fait l'objet d'une étude détaillée [5]; les apports ont pu être reconstitués avec une précision acceptable que nous estimerons à 5-10%.
- par contre les apports liquides et les volumes d'eau déversés ou soutirés aux barrages Nebaana, Chiba, Masri et Lakhmess sont le fruit de larges estimations ; en particulier les volumes très importants déversés lors des crues exceptionnelles de l'automne 1969, de mars 1973 et de décembre 1973 (dans le Cap Bon) sont très imprécis alors qu'ils sont responsables d'une forte proportion des apports solides totaux.

A part pour le barrage Mellègue où les prélèvements d'eau permettent de mesurer la turbidité des soutirages et des lâchures, ainsi que de contrôler les matières en suspension à la station hydrométrique du K13 nous ne disposons pour les autres barrages que de mesures de turbidité très lacunaires ; aussi les quantités de matières solides sorties des retenues par soutirages ou déversements ont-elles aussi été estimées sur la base des quelques mesures dont nous disposons et de comparaisons avec les chiffres du barrage de l'oued Mellègue.

En somme, l'évaluation des apports solides totaux aux barrages ne peut être faite avec une précision relative meilleure que 20 à 25 %, sauf pour le barrage de l'oued Mellègue où nous l'estimerons à 15 %.

Il nous a semblé toutefois intéressant d'utiliser ces chiffres pour quantifier l'érosion sur les différents bassins versants et l'examen du tableau XIII nous incite à faire quelques commentaires.

IV.4. COMMENTAIRES

IV.4.1. Influence de la taille du bassin versant

Il apparaît nettement que les plus petits bassins versants produisent proportionnellement le plus de dépôts. Cela est tout à fait normal, si l'on considère que sur un bassin versant de taille réduite les matériaux érodés peuvent être entraînés et déposés dans la retenue au cours d'une même crue, les distances à parcourir étant faibles et en général la pente du lit de l'oued assez forte. Par contre dans un grand bassin versant, il peut exister des zones d'épandage intermédiaires, ou des tronçons de lit où l'oued divague et peut abandonner une partie de la charge solide transportée ; les sédiments peuvent alors être repris plusieurs fois avant d'aboutir dans la retenue du barrage (c'est le cas pour l'oued Mellègue dont le cours amont traverse la grande dépression de la Meskiana, et où même à l'amont immédiat de la retenue du barrage on peut observer des reprises de sédiments sur les berges).

IV.4.2. Influence régionale et de l'exposition

Tous les barrages étudiés ici se trouvent dans le nord et le nord-est de la Tunisie et il est difficile de discerner une influence régionale nette sur le régime des transports solides, bien que la pluviométrie moyenne soit assez différente d'un bassin à l'autre (de 350 mm/an sur la Lakhmess à 500 mm/an sur le Masri). Cependant pour les trois barrages assez voisins du Cap Bon, à savoir ceux de l'oued Bezirk, l'oued Chiba et l'oued Masri, il semble que l'exposition du bassin versant joue un rôle non négligeable. Les bassins versants des oueds Bezirk et Chiba sont orientés l'un vers le nord-ouest, l'autre vers le sud-est sur chaque flanc de la chaîne du Jebel Abd Er Rahmane, ils sont l'un et l'autre abrités soit des vents d'hiver (oued Chiba) soit des vents de printemps et d'automne (oued Bezirk) ; leurs apports moyens annuels sont assez voisins, ils correspondent à une lame écoulée de 53 mm pour l'oued Bezirk et de 58 mm pour l'oued Chiba ; par contre le bassin de l'oued Masri orienté vers le nord-est, domine le couloir de Grombalia et est exposé à tous les vents porteurs de pluie ; son module annuel correspond à une lame écoulée de 71 mm. Il est évident qu'une plus forte lame d'eau écoulée produira plus de transports solides sur des bassins versants de taille comparable.

IV.4.3. Influence de la pente

L'influence de la pente générale du bassin semble aussi déterminante. Nous n'avons pas fait l'étude détaillée du bassin versant de chaque barrage mais nous pouvons prendre l'exemple de l'oued Masri où l'érosion spécifique calculée est énorme : l'oued est formé de deux branches qui confluent dans la retenue du barrage, la pente moyenne des lits de ces deux oueds est de 7% pour l'un et de 4% pour l'autre ce qui est considérable et conduit au fait que le barrage de l'oued Masri reçoit le plus de sédiments eu égard à sa taille. De façon moins accusée, il en est de même pour le barrage de l'oued Nebaana qui est construit au débouché de la zone montagneuse du bassin. Par contre le bassin versant de l'oued Bezirk, au relief peu accusé, produit beaucoup moins de matériaux d'érosion proportionnellement à sa taille.

IV.4.4. Influence de la nature des sols et du couvert végétal

L'influence de ces deux facteurs est assez difficile à mettre en évidence sans une étude détaillée des bassins versants et une cartographie précise. On remarquera toutefois que les bassins versants des oueds Bezirk et Chiba qui sont très voisins géographiquement et dont nous avons dit que les apports moyens annuels étaient très comparables, sont très différents sous ces deux aspects : on rencontre sur le bassin versant de l'oued Chiba des affleurements gréseux dénudés, des friches, des terres labourées et peu de cultures intensives, alors que les vergers d'agrumes et les cultures ordonnées occupent une bonne partie du bassin versant de l'oued Bezirk ; aussi peut-on constater que le barrage de l'oued Chiba a connu un envasement bien plus grave que celui de l'oued Bezirk.

IV.4.5. Influence du mode d'exploitation des barrages

Il est évident que la gestion des stocks d'eau retenus par les barrages joue un grand rôle dans la rapidité d'envasement de la retenue. Au barrage du Mellègue, l'ouverture judicieuse des vannes de chasse a permis d'éviter le dépôt dans la retenue de plus de 50% des matières solides qui y sont entrées, même si ces matières solides ne sont constituées que des plus fines particules comme nous l'avons montré. Cela s'est fait au prix d'une perte sensible des volumes d'eau stockés ce qui n'est pas grave dans le cas du barrage de l'oued Mellègue puisqu'il est destiné avant tout à amortir les crues et qu'il faut donc toujours maintenir une réserve de stockage suffisante pour amortir les crues importantes qui peuvent survenir presque à tout moment de l'année. Par contre, pour les barrages de taille plus réduite et dont les eaux sont utilisées pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable les opérations de vidange sont très peu pratiquées car la perte d'eau devient trop importante vis-à-vis de la taille de la retenue et il y a intérêt à maintenir la retenue à son niveau le plus élevé à la fin du printemps ; aussi pour ces barrages la presque totalité des matériaux est-elle arrêtée et déposée dans la retenue (79% au Nebaana, 87% au Masri, 98% au Chiba). Ceci est d'autant plus alarmant que la capacité de retenue de ces petits barrages ne dépasse pas 1,5 à 2 fois le module annuel et qu'ils sont les plus vulnérables à un risque de comblement total de la retenue à brève échéance.

IV.4.6. Charge solide des apports liquides — Transports de fond

Dans le tableau XIII nous avons calculé les apports en matériaux solides d'où nous avons déduit une érosion spécifique sur les bassins versants et une concentration moyenne en matériaux solides des eaux entrant dans les retenues. Tous ces chiffres sont, rappelons-le encore, le fruit d'assez larges estimations, mais nous ne pensons pas que leur ordre de grandeur puisse être modifié de façon majeure. Ils sont tous très élevés et dépassent largement les estimations qui en avaient été faites avant la construction des ouvrages ainsi que les concentrations de matières en suspension habituellement mesurées dans les échantillons d'eau prélevés en rivière. Nous voyons à cela plusieurs réponses :

a) les prélèvements d'échantillons d'eau en rivière sont faits généralement à l'aide d'une bouteille à goulot étroit, et sur le bord de l'eau ; ce mode de prélèvement n'est pas représentatif de l'écoulement dans toute la section. A l'occasion de l'étude des alluvions déposées par l'oued Medjerdah lors de la crue de mars 1973 [11] nous nous sommes aperçus que les prélèvements ainsi pratiqués sous-estimaient fortement les concentrations de matières solides, et d'autant plus fortement que les vitesses dans la section sont élevées, le tirant d'eau fort et la granulométrie des particules grossière. Ainsi pour l'oued Medjerdah à la Sloughia (21 000 km²) les prélèvements faits à la décrue donnaient une concentration moyenne des matières en suspension de 30 g/l (les concentrations mesurées allant de 23,7 g/l à 66,8 g/l), et la cartographie et l'analyse des alluvions nous ont conduits à admettre que le transport solide total au cours de la crue du 27 mars au 1^{er} avril avait été de l'ordre de 100 g/l.

b) Le charriage ou transport de fond n'est pratiquement jamais mesuré et pris en compte dans les estimations de transport solide, il est pourtant totalement intégré dans le cubage des sédiments et peut représenter une part importante des transports. Dans le cas du barrage de l'oued Mellègue, qui est le seul où nous disposons d'une station hydrométrique de contrôle à l'amont, nous avons pu estimer la part due au transport de fond en tenant compte du bassin versant intermédiaire ; les matières en suspension représentent 122×10^6 t sur 152×10^6 t de matières solides entrées dans la retenue, la différence attribuée au charriage de fond équivaut à 20% du transport solide total et 23,8% du transport en suspension. Cette valeur n'est pas très forte et il ne fait pas de doute que plus le bassin versant est petit et à forte pente et le régime d'écoulement torrentiel plus ce pourcentage doit augmenter ; c'est ainsi que S. LELIAVSKY [2] cite les expériences faites par l'U.S. Geological Survey sur la Loup River au Nebraska qui ont décomposé le transport solide total en 3 termes et montré que :

- 53% seulement du transport solide étaient en suspension,
- 29% étaient dus au déplacement sous forme de dunes, de matériaux ne quittant pas le fond du lit,
- 18% étaient dus au transport par roulage et saltation.

c) Enfin il faut considérer que la majeure partie des apports liquides dans les barrages est due aux crues (80% pour l'oued Mellègue, plus de 95% pour l'oued Masri). Au cours de ces épisodes souvent violents les phéno-

mènes d'érosion et de transports solides atteignent leur maximum et c'est malheureusement pour ces périodes que les observations et les prélèvements d'eau font défaut. Les valeurs moyennes établies pour de petites crues ou des décrues doivent être majorées largement pour des crues importantes. Nous remarquerons aussi que 5 des barrages étudiés ici sont de création assez récente et ont connu un ou plusieurs épisodes pluvieux exceptionnels qu'a subis la Tunisie ou certaines régions de la Tunisie au cours de ces dernières années (septembre-octobre 1969, mars 1973, décembre 1973). Il est certain que les apports liquides et solides dus à ces événements exceptionnels ont contribué à augmenter fortement les valeurs moyennes calculées sur des périodes de fonctionnement bien inférieures aux périodes de retour probables de tels épisodes.

V. CONCLUSION

Les mesures de l'envasement des six barrages présentées ici ont été assez fructueuses. L'occasion a été fournie de tester et de mettre au point une méthode de mesure par relevé des profils à l'écho-sondeur encore inutilisée en Tunisie. Cette méthode n'est pas encore parfaite et devra s'améliorer en particulier au niveau du repérage des profils et d'une cartographie précise des cuvettes de barrages : elle a cependant le mérite d'être rapide, sûre et facilement répétitive.

Excepté pour le barrage de l'oued Mellègue, les mesures directes d'envasement faisaient défaut ; cette campagne a permis de faire une mise au point sur le degré d'envasement de l'ensemble des principaux barrages ; elle a été l'occasion d'une collaboration intéressante avec la DEGTH qui devra se développer pour permettre de suivre à intervalles réguliers l'évolution de la vie des barrages et améliorer leurs conditions d'exploitation.

Les résultats de ces mesures ont abouti à mettre en évidence l'importance des phénomènes d'érosion auxquels sont soumises de nombreuses régions de Tunisie ainsi que l'énorme capacité de transport des oueds.

Il reste cependant beaucoup à faire pour affiner et surtout quantifier nos connaissances sur la chaîne des phénomènes érosion-transport solide-épandage et sédimentation ; le présent rapport constitue une première contribution à l'étude de ces problèmes auxquels sont sensibilisés de plus en plus de spécialistes et de non spécialistes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] LEBRETON (J.C.) – 1974 – *Dynamique fluviale*. Collection de la Direction des Études et Recherches d'EDF, Eyrolles Paris.
- [2] LELIAVSKY (S.) – 1961 – *Précis d'hydraulique fluviale*. Dunod, Paris.
- [3] TIXERONT (J.) – 1960 – *Les débits solides des cours d'eau d'Algérie et de Tunisie*. Secrétariat d'État à l'Agriculture HAR de Tunis.
- [4] SCET-Tunisie – 1960 – *Bassin versant du barrage de l'oued Mellègue. Etude des débits solides*. Étude IRH n° 22, Tunis, ronéo.
- [5] Bureau Coyne et Bellier – 1975 – *Bilan hydraulique de la retenue du Bezirk de 1960-61 à 1973-74*. DEGTH, Tunis, ronéo.
- [6] Service HAR, Secrétariat d'État à l'Agriculture – 1960 – *Oued Chiba. Etude hydrologique*. Service HAR, Subdivision des Études, Tunis, ronéo.
- [7] BOURCART (J.) et FRANCIS-BLÉUF (C.) – 1942 – *La vase. Série sédiments et sédimentation*. Paris. Éditions Hermann.
- [8] SERRUYA – 1965 – «Note sur la diagenèse primaire dans les sédiments du Lac Léman». *Archives des Sciences de Genève*, vol. 18, fasc. 3.
- [9] VERNET (J.) et al. – «Le Léman : une synthèse bibliographique». *Bulletin du BRGM*, 2^e série, Section IV, n° 2.
- [10] Ministère de l'agriculture DRE-ORSTOM – 1974 – *Monographie de la Medjerda*. ORSTOM-DRE, Tunis, ronéo.
- [11] CLAUDE (J.) FRANCILLON (G.) et LOYER (J.Y.) – 1976 – *Les alluvions déposées par l'oued Medjerda lors des crues exceptionnelles de mars 1973*. Ministère de l'Agriculture DRE-ORSTOM (ronéo).
- [12] CLAUDE (J.) CHARTIER (R.) – 1976 – «Mesure et estimation des sédiments déposés dans les réservoirs de barrages par la méthode de l'écho-sondeur». *Ressources en Eau de la Tunisie* (publication de la DRE-Tunis) Bulletin n° 3, pp. 37-51.