

9
D0001/97A

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Polytechnique

Thèse de doctorat d'état

Présentée

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE par المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

REMINI Boualem

spécialité: Hydraulique

Titre

***ENVASEMENT DES RETENUES DE BARRAGES EN
ALGERIE: IMPORTANCE, MECANISMES ET MOYEN
DE LUTTE PAR LA TECHNIQUE DU SOUTIRAGE***

Soutenue publiquement le 11 mars 1997 devant le jury:

Dr BALI	A.	Professeur	E.N.P.	Président
Dr BOUHADEF	M.	Professeur	U.S.T.H.B	Examineur
Dr KERBACHI	R.	Professeur	E.N.P.	Examineur
Dr KHALAF	H.	M. de conférences	U.S.T.B	Examineur
Dr KETTAB	A.	M. de conférences	E.N.P	Rapporteur
Dr AVENARD	J-M.	Professeur	U.L.P de Strasbourg	Rapporteur

A

*mes chers parents,
ma femme,
mes frères et soeurs,
et à toute la famille*

Avant-propos

Après avoir obtenu notre diplôme d'Ingénieur d'état en juin 1987 et passer avec succès la première année de Magister en juin 1988 à l'école nationale polytechnique d'Alger, nous avons voulu nous spécialiser dans le domaine de la sédimentologie et plus particulièrement l'alluvionnement des barrages: phénomène qui pose d'énormes problèmes à notre infrastructure hydrotechnique.

Dès 1988, nous avons entamé nos recherches sur l'étude de l'envasement du barrage de BENI AMRANE jusqu'à l'obtention du diplôme de Magister en juin 1990 avec la mention très honorable.

Ces premiers résultats étaient pour nous un encouragement pour la poursuite des travaux de recherches en vue de l'obtention du doctorat d'état.

Monsieur KETTAB A., Maître de conférence à l'école nationale polytechnique, avait accepté d'être notre Directeur de thèse, qu'il trouve ici tous nos remerciements très sincères et nous voudrions lui exprimer notre profonde gratitude pour les conseils et les encouragements inestimables avec lesquels il a suivi la réalisation de ce travail: Il a été notre meilleur soutien dans les moments les plus pénibles.

Monsieur le Professeur AVENARD J.-M., rencontré lors d'une conférence qu'il a animée à l'institut national d'agronomie d'Alger en 1992, a bien voulu suivre et diriger patiemment ce travail, ses conseils précieux et ses justes critiques, témoignant de l'intérêt qu'il lui portait, ont été un encouragement permanent. En nous accueillant dans son laboratoire de C.R.E.G à l'université de LOUIS PASTEUR à Strasbourg durant plusieurs mois, trois années consécutives, Professeur AVENARD, a mis tous les moyens matériels à notre disposition pour que ce travail se déroule dans de bonnes conditions, nous lui exprimons ici notre très sincère gratitude, nous n'hésiterons pas à dire qu'il fut pour nous un modèle de rigueur scientifique et un exemple d'intégrité.

C'est un très grand honneur pour nous que Monsieur BALI A., Professeur à l'école nationale polytechnique, connu pour sa compétence et sa modestie pour avoir accepté la présidence de notre jury. Nous le prions bien respectueusement de croire à notre sincère et profonde reconnaissance.

Monsieur BOUHADEF M., Professeur à l'U.S.T.H.B., qui a accepté de nous accorder une partie de son temps pour lire et apprécier cette recherche, il est pour nous un modèle de rigueur et d'intégrité. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous sommes très reconnaissant à Monsieur KERBACHI, Professeur à l'école polytechnique d'Alger, qui nous fait l'honneur de participer à notre jury de thèse. Sa présence dans le jury est pour nous un gage de confiance, qu'il trouve ici l'expression de notre sincère gratitude.

Nous remercions également Monsieur KHALAF H., maître de conférence à l'université de Blida, d'avoir bien voulu accepter de participer à ce jury.

Nous sommes conscient de la chance qui fut la notre d'avoir reçu la riche formation de base dispensée à l'école nationale polytechnique par Monsieur PIMINOV, Maître de conférence, BERKANI M., BENMAMAR S., DIMIDEM, NAKIB et ZARFA F/Z, chargés de cours, et tous nos enseignants, nous leur rendons l'hommage reconnaissant qu'il méritent.

Nous ne saurons trop dire la reconnaissance que nous devons à Monsieur MIGNIOT C., Docteur es sciences et spécialiste en sédimentologie de renommée mondiale, il n'a cessé d'apporter ses critiques rien qu'avec son nombreux courrier durant toutes ses années de recherches, nous n'oublierons jamais ses orientations même lorsqu'il était à l'hôpital. Il a eu la grande amabilité de corriger certains de nos articles.

Nous adressons nos respectueux remerciements à Madame le Professeur Monique Mainguet, Directrice du laboratoire de géographie zonale de l'université de Reims, pour nous avoir prodigué ses encouragements. Les entretiens que nous avons eu pendant un séjour à Mednine au sud Tunisien lors d'un workshop international ont été très bénéfiques pour la poursuite de nos recherches.

Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur XANG DANG, Professeur à l'université de Hanoi, qui nous a fait l'honneur de s'intéresser à nos recherches durant les années 1990 et 1991 quand il était professeur à l'université de Blida., son entier dévouement à la science et son goût pour le travail bien fait ont été pour un exemple inestimable.

Résumé

Après un rapide constat de l'importance de l'envasement dans les retenues des barrages des pays du Maghreb et la mise en évidence du rôle joué par la dégradation du bassin versant amont dans le comblement, les problèmes posés par ce phénomène sont abordés à partir d'exemples de barrages Algériens, alors que sont données quelques solutions adoptées dans d'autres pays.

La réduction de la capacité et l'obturation des organes de vidange sont des menaces qui pèsent lourdement sur la rentabilité des infrastructures hydrotechniques quand ce n'est pas sur la sécurité même de l'ouvrage.

Le mécanisme et la distribution des sédiments dans les retenues, phénomène très complexe en raison de la multiplicité des types de retenues et les principaux facteurs qui peuvent influencer sur l'envasement, ont été abordés. Trois modes d'envasement ont été dégagés.

Le remplissage des « petites » retenues de basse chute par les sédiments reste un sujet non maîtrisé. L'étude faite sur le modèle réduit du barrage de BENI AMRANE dans ce sens, nous a permis de donner une première approche sur la distribution des sédiments: elle est uniforme sur toute la surface de la retenue et le classement granulométrique n'est pas respecté.

La technique du soutirage peut réduire la vitesse de sédimentation dans la retenue d'un barrage, mais il est indispensable qu'elle soit pratiquée avec rigueur, ce qui n'est pas le cas dans la majorité des barrages Algériens et a engendré des problèmes importants de gestion, avec parfois même l'arrêt de l'exploitation du barrage.

L'étude de la concentration de la vase dans différents barrages nous a permis de mettre en évidence une valeur critique propre à chaque type de vase, et de déterminer ainsi une « zone optimale de soutirage », à l'intérieur de laquelle la densité de la suspension permet le soutirage. Sur cette base, deux types de soutirage ont été définis: le « bon » soutirage et le « mauvais » soutirage.

L'évolution des dépôts de sédiments dans les retenues de barrages est abordée à partir de quatre situations: faible ou fort taux de comblement, vanne de fond obturée, surélévation de la digue. Les résultats obtenus montrent que le soutirage des particules solides par l'utilisation des pertuis de vidange influe sur la progression de l'envasement de la cuvette. En effet, au début de l'exploitation d'un barrage, l'envasement évolue linéairement en fonction du temps et fonction de la hauteur d'eau dans la retenue, mais dès que le toit de la vase atteint le seuil des vannes, la loi devient polynomiale du deuxième degré en fonction du temps et du troisième degré en fonction de la hauteur d'eau.

Cependant les études effectuées sur l'évolution de l'envasement dans une dizaine de retenues de barrages en Algérie ont permis de montrer qu'une retenue peut être divisée en trois zones, et que la zone II qui désigne la partie centrale du réservoir est loin de toute perturbation liée aux manoeuvres des vannes et des variations du plan d'eau dues aux crues. En conséquence la sédimentation s'effectue de façon uniforme, avec un toit de la vase qui évolue parallèlement au fond de la retenue.

Par contre l'évolution des dépôts de la vase dans la partie basse de la retenue et qui la zone I, stagne dans le temps dans un barrage dans lequel est pratiqué un « bon » soutirage contrairement à celui dans lequel est pratiqué un « mauvais » soutirage où l'évolution de la vase est très significative.

Les « bons » soutirages ont été enregistrés au barrage d'IGHIL EMDA puisque 55 % des apports solides totaux ont été soutirés. Ce rendement peut encore être amélioré pour atteindre la valeur critique qui peut être évaluée à 70 %, soit une augmentation de la durée de vie de l'ouvrage de près de trois fois. A cet effet, l'installation d'un dispositif approprié au soutirage composé de vannettes de faible diamètre doit être le paramètre principal pour les projets de réalisation de nouveaux barrages.

Mots clés: Barrage - Retenue - Distribution des sédiments - Courants de densité - soutirage - Rouleaux de recirculation - Evolution de l'envasement.

Nous avons été heureux de bénéficier de la visite à l'école nationale de Monsieur PARKINSON, Directeur du laboratoire LASALLE à Montréal (Canada), ses enrichissantes conversations, ses orientations vers un travail de recherches sur le terrain, ses suggestions avisées nous ont été très profitables, qu'il reçoive ici l'expression de notre gratitude.

Ce n'est pas en quelques mots que nous pouvons remercier Monsieur SAHRAOUI, Directeur de la maintenance des barrages à l'agence nationale des barrages pour la facilité d'accès aux données et aux documents.

Nous remercions également toute l'équipe de la maintenance des barrages à l'A.N.B en particulier Messieurs GUETTARNI et HABCHI pour la mise à notre disposition de toute la documentation.

Nous exprimons notre reconnaissance à toute l'équipe de la division de contrôle des barrages de l'entreprise X.P.T.H de Derguana (SONELGAZ), notamment Messieurs ZERGUINI et ALLAOUA pour toute l'aide matérielle qu'il nous ont apporté lors de nos déplacements sur les barrages d'Ighil Emda et Erraguène.

C'est avec un réel plaisir que nous exprimons notre reconnaissance et notre amitié à Monsieur MESBAH Salah, Chef de la division centrale des barrages de l'X.T.P.H. qui a mis tout à notre disposition allant de la documentation jusqu'à l'accès au matériel et fut notre compagnon sur le terrain pendant toutes nos sorties.

Que nos remerciements aillent à Monsieur KELLIL A., maître de conférence, GUENDOUZ A. et TAIBI A., chargés de cours à l'université de Blida pour leurs conseils et leurs encouragements.

Nous sommes heureux de pouvoir profiter de cette occasion pour remercier vivement Madame HOCINI, attachée de recherche au centre de développement des techniques nucléaires, pour tous ses encouragements et sa compréhension, nous souhaitons qu'elle soutienne sa thèse d'état dans les meilleurs délais.

Nous sommes également reconnaissant à toute l'équipe de D.D.H.I à savoir Messieurs MOULAY, MAMI, CHERCHALI et Madame MAMI pour leur soutien moral, qu'ils acceptent ici nos sincères remerciements.

Nous adressons nos respectueux remerciements à Monsieur FERHAT, Economiste, qui s'est toujours préoccupé de l'avancement de nos travaux de recherche.

Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur KHOULI M-R., Directeur de l'institut de Génie Rural, pour son aide et sa compréhension lors de nos déplacements sur le terrain.

Nous ne saurions oublier de présenter tous nos remerciements à Monsieur BENZIADA S., responsable du laboratoire d'hydraulique de l'école nationale polytechnique, pour tous les moyens mis à notre disposition.

Monsieur BENSALIA D., responsable du laboratoire d'épuration et valorisation des eaux, pour toute l'aide amicale qu'il nous a apporté. Nous sommes heureux de pouvoir profiter de cette occasion pour le remercier vivement.

Nos remerciements vont également à M^{lle} MOKRANI L., Secrétaire de direction à l'université de Blida, qui nous a assuré le traitement de texte de certains de nos articles.

C'est avec un grand plaisir que nous exprimons nos remerciements à Madame Odille qui s'est occupée de la reliure définitive de nos articles à l'imprimerie de l'U.F.R de géographie de Strasbourg.

Enfin qu'il nous soit permis de remercier ici profondément et sincèrement tous ceux qui de près comme de loin se sont intéressés à cette recherche, ou qui nous ont aidé à sa réalisation.

Abstract

After a fast statement on importance of sedimentation in dams of Maghreb's countries and the observance of roll played by the degradation of side basin in upper on the filling, the problems posed by this phenomenon are approached by examples of Algerian dams, and solutions adopted in others countries are given.

The reduction of the capacity and obturation of gates are menace who weigh heavily on profitability to hydrotechnical infrastructures and on the security of the work.

The mechanism and the distribution of sediments in reservoirs are a very complex phenomenon in cause of the multiplicity of type of reservoirs and the principal factors who can influence on sedimentation are approached. Three manners of sedimentation are drawn.

The filling of the little reservoirs of the basins remain a no controllable subject. The study done on the small model of BENI AMRANE's dam has permitted to give a first approach that the distribution of sediments is uniform on all surface of a reservoir and that the granular classification isn't respected.

The technical of the drawing off can reduce the speed of sedimentation in reservoir's dam, but it's indispensable that it will be practised with rigour, who isn't the case in the majority of Algerian's dams and has engendered an important problems of management with sometimes the stopping of the exploitation of dam.

The study of mud's concentration in different dams has permitted to find a critical value own to every type of mud, and determine like this the « optimal zone » of the drawing off it where the density of suspension can permit the drawing off. On this base, two type of drawing off are defined « good » and « bad » drawing off.

The evolution of sediment's depositing in reservoir's dam is approached of four initial situations: feeble or strong filling rate, gate of bottom obturated, raising of dyke. The results obtained shows that the solid particle's drawing off by utilization of draining's sluice influence on the sedimentation's progress in the reservoir. In first of the exploitation of dam, the sedimentation evolve in function of time and height of water in reservoir, but when the mud attain gates it became polynome of second degree in function of height of water.

Still the studies effected on sedimentation's evolution on the ten of reservoir's dam in Algeria has permitted to show that the reservoir can be divided in three zones, and that the zone II that designate the central part of reservoir is far to all perturbation bound at manoeuvring of gates and variations of water's stretch caused by rising. In consequence the sedimentation is done uniformly, with a mud's roof who evolve parallel to reservoir's bottom.

Evolution of mud's depositing in bas part of reservoir and who is designate zone I stagnates in time in dam where a good drawing off is practised contrary to the one where is practised the bad drawing off when the mud's evolution is very significant.

The good drawing off is recorded in IGHIL EMDA's dam since 55 % of solid's contributions total are drawn off. This produce can still be improved to attain the critical value who can be valued at 70 %, that an increase of the duration of dam's life to three times.

At this effect, the installation to the appropriate system to the drawing off composed to gates of feeble diameter must be the principal parameter for the new projects of realizations of dams.

Keys words: Dam - Distribution of sediments - Currents of density - Drawing off - Sedimentation's evolution.

ملخص
بعد التعرف السريع إلى أهمية التوحد في سدود المغرب العربي وإظهار الدور الذي يلعبه تدوير حوض التفريغ الواقع قبل السد في أمثلة هذا التدوير كما نرى أنها إلى أمثلة المطروحة بسبب هذه الظاهرة عن طريق أمثلة سدود جزائرية، وأعطيت بعض الحلول طبقت في بلدان أخرى.

إنخفاض القدرة واستداد الأسكار يهدد مردود السدود وحتى أهمها. توزيع الرواسب ظاهرة معقدة جداً بسبب إختلاف السدود، والعوامل المؤثرة على التوحد درست واستخرجنا ثلاثة أنواع من التوحد. امتلاء السدود الصغيرة يفتقر بشكل غير متحكم فيه. الدراسة المجرأة على الشكل المصغر لسد في عمران سمحت لنا بإعطاء الإقتراحات الأولية التالية: التوزيع موحد على كل مساحة السد وترتيب الرواسب غير منظم. تقنية التفريغ يمكنها تظهير سرعة التوحد في السد لكن يجب أن تتم بطريقة مبرمجة، وهذا ليس مبرح في معظم السدود الجزائرية السببية الذي أدى إلى مشاكل تسيير مهمة مع بعض الأحيان إيقاف استعمال السد. دراسة وكيز الوحد في مختلف السدود سمحت لنا بإظهار قيمة جديدة خاصة بكل نوع من الوحد، وبإيجاد هكذا منطقة مثالية للتفريغ، داخلها كثافة الوحد تسمح بالتفريغ، وهكذا عرفنا نوعين من التفريغ: «دو تفريغ حسن» و«دو تفريغ غير حسن».

تطور الترسب في السدود درس من أربع مواضع: امتلاء، تجميع، وتوحي، أسكار مسدودة، وإعادة رفع السد. النتائج المحصل عليها أظهرت أن تفريغ الرواسب باستعمال الأسكار تأثر على تطور الوحد في السد. في بداية استعمال السد، التوحد دالة خطية بدلالة الوقت وارتفاع الماء في السد لكن عندما يصل الوحد إلى الأسكار تصبح متعددة الحدود حتى الدرجة الثانية بدلالة الوقت ومن الدرجة الثالثة بدلالة ارتفاع الماء. الدراسات التي أجريت حول تطور الوحد في عشرات من السدود الجزائرية سمحت بإظهار أن هاته الأخيرة تنقسم إلى ثلاثة مناطق، وأن المنطقة I التي تمثل المنطقة الوسطى من السد بعيدة عن كل إضطراب مرتبطة بخلق أو فتح الأسكار وتغيرات مستوى الماء بسبب العياضانات وفي الدرجة التوحد يتم بطريقة موحدة وسقف الوحد موازي لطاق السد. الوحد لا يتطور بدلالة الوقت في المنطقة السفلى أي المنطقة I من السد في حالة «دو التفريغ الحسن» بعكس حالة «دو التفريغ الغير حسن» التي يصبح صمم جداً.

«دو التفريغ الحسن» مسجلة في سد إغزل عمدة، حيث وصلت إلى 55% من المواد الصلبة الكلية، وهذا المردود يمكن له أن يتحسن ليصل إلى القيمة العادية 70% بإرتفاع «حياة» السد بحوالي ثلاثة مرات. ولهذا يجب أن يكون ملائم للتفريغ مكون من أسكار ذات قطر ضيق عامل رئيسي في المستارع الجديدة للسدود.

الكلمات المهمة: سد - تفريغ الرواسب - السيارات الكثافية - التفريغ - تطور الوحد - معاورة إعادة العديان.

SOMMAIRE

Chapitres	Page
Introduction.....	1
01-Position du problème.....	1
02-Objectif de l'étude.....	2
Première partie:	
<i>L'importance du phénomène de l'envasement dans les retenues de barrages</i>	
Chapitre I Ampleur et conséquences du phénomène.....	4
Introduction.....	4
I-1 L'envasement des retenues de barrages dans le Maghreb.....	4
I-1-1 Eau et apports solides.....	4
I-1-2 Dégradation spécifique annuelle des bassins versants.....	7
I-1-3 Quantité de vase déposé dans les retenues de barrages.....	7
I-2 Problèmes posés par l'envasement	7
I-2-1 Réduction de la capacité.....	7
I-2-2 Obturation des organes de vidange.....	19
I-2-3 Sécurité de l'ouvrage.....	24
I-2-4 Envasement des canaux d'irrigation.....	26
I-2-5 Dégradation de la qualité de l'eau.....	26
Conclusion.....	26
Chapitre II Constat de la situation de quelques barrages vis à vis de leurs envasement.....	29
II-1 Barrage de BENI AMRANE.....	29
II-1-1 Situation et caractéristiques du barrage.....	29
II-1-2 Le bassin versant.....	31
II-1-3 Rôle de la retenue.....	31
II-1-4 Les apports.....	31
II-1-5 Envasement de la retenue.....	34
II-1-6 Moyens de lutte contre l'envasement.....	34
II-2- Barrage de HAMIZ.....	35
II-2-1 Situation et caractéristiques du barrage.....	35
II-2-2 Le bassin versant.....	35
II-2-3 Les apports.....	35
II-2-4 Envasement de la retenue.....	35
II-2-5 Moyens de lutte contre l'envasement.....	37
II-3 Barrage de K'SOB.....	37
II-3-1 Situation et caractéristiques du barrage.....	37
II-3-2 Le bassin versant.....	37
II-3-3 Envasement de la retenue.....	39
II-4 Barrage des ZARDEZAS.....	41
II-4-1 Situation et caractéristiques du barrage.....	41
II-4-2 Le bassin versant.....	42
II-4-3 Envasement et dévasement de la retenue.....	44

II-5 Barrage de OUED EL FODDA.....	47
II-5-1 Situation et caractéristiques du barrage.....	47
II-5-2 Le bassin versant.....	47
II-5-3 Les apports de la retenue.....	48
II-5-5 Moyens de lutte contre l'envasement.....	48
II-6 Barrage de GHRIB.....	49
II-6-1 Situation et caractéristiques du barrage.....	49
II-6-2 Le bassin versant.....	49
II-6-3 Les apports.....	50
II-6-4 Envasement de la retenue.....	50
II-6-5 Moyens de lutte contre l'envasement.....	51
II-7 Barrage des CHEURFAS I.....	51
II-7-1 Situation et caractéristiques du barrage.....	51
II-7-2 Le bassin versant.....	51
II-7-3 Envasement de la retenue.....	52
II-7-4 Dévasement de la retenue.....	53
II-8 Barrage de FERGOUG.....	54
II-8-1 Situation et caractéristiques du barrage.....	54
II-8-2 Historique.....	54
II-8-3 Le bassin versant.....	55
II-8-4 Les apports.....	57
II-8-5 Envasement de la retenue.....	58
II-8-6 Moyens de lutte contre l'envasement.....	59
II-9 Barrage de FOUM EL GHERZA.....	59
II-9-1 Situation et caractéristiques du barrage.....	59
II-9-2 Historique.....	60
II-9-3 Le bassin versant.....	61
II-9-4 Les apports.....	62
II-9-5 Envasement de la retenue.....	64
II-9-6 Moyens de lutte contre l'envasement.....	64
II-10 Barrage d'ERRAGUENE.....	65
II-10-1 Situation et caractéristiques du barrage.....	65
II-10-2 Le bassin versant.....	66
II-10-3 Envasement de la retenue.....	67
II-10-4 Moyens de lutte contre l'envasement.....	67
Conclusion.....	69

Deuxième partie:

Les mécanismes de l'envasement des retenues de barrages

Chapitre III	Processus d'envasement d'une retenue.....	70
III-1-	L'érosion des bassins versants.....	70
III-2-	Les apports solides dans la retenue.....	70
III-2-1	Les apports solides par charriage.....	70
III-2-2	Les apports solides en suspension.....	71
III-3	La résultante: le piégeage des sédiments et l'envasement de la retenue.....	71
III-4-	Dépôt et tassement des sédiments.....	73
III-4-1-	Conditions et débit de dépôt.....	73
III-4-2-	Vitesse de chute des particules en eau calme.....	73
III-4-3-	Influence de la floculation.....	74
III-5-	Tassement et consolidation des vases.....	74
III-5-1-	Tassement des sédiments grossiers : galets, graviers et sables.....	75
III-5-2-	Loi de tassement.....	75
Chapitre IV	Distribution des sédiments dans les retenues.....	76
IV-1	Problématique.....	76
IV-2	Distribution des sédiments par courants de densité.....	79
IV-2-1	Les courants de densité dans un canal prismatique.....	80
IV-2-1	Définition.....	80
IV-2-1-2	Anatomie d'un courant de densité.....	81
a-	Point de plongée.....	81
b-	La tête et le corps d'un courant de densité.....	81
c-	L'interface.....	82
IV-2-1-3	Equation fondamentale d'un courant de densité.....	83
IV-2-1-4	Description d'un courant de densité.....	85
IV-2-1-5	Facteur de pression.....	87
IV-2-1-6	Etude expérimentale de la vitesse d'un courant de densité dans un canal prismatique.....	89
a-	Vitesse initiale du courant de densité.....	91
a-1	Vitesse initiale sur fond horizontal.....	91
a-2	Vitesse initiale sur fond incliné.....	92
b-	Vitesse de propagation.....	93
c-	Installation expérimentale.....	93
d-	Caractéristiques du matériau utilisé.....	94
e-	Résultats.....	94
e-1	Influence de la distance sur la vitesse du courant de densité le long d'un canal horizontal.....	94
e-2	Influence de la distance sur la vitesse du courant de densité le long d'un canal incliné.....	98
IV-2-1-7	Comportement de la tête du courant de densité le long du canal.....	98
Conclusion	98
IV-2-2	Les courants de densité dans la retenue - Cas d'IGHIL EMDA-.....	101
IV-2-2-1	Situation et caractéristiques du barrage.....	101
IV-2-2-2	Le bassin versant.....	103
a-	Description sommaire.....	104
b-	Lithologie.....	104
	Caractéristiques climatiques.....	104
d-	Pentes.....	106
e-	réseau hydrographique.....	107

IV-2-2-3 Localisation des zones d'érosion.....	106
a- Secteurs stables ou relativement stables.....	107
b- Secteurs à fortes érosion.....	107
c- Secteurs d'intense érosion.....	107
IV-2-2-4 Les conditions d'apparition des courants de densité dans la retenue.....	109
a- Les facteurs favorables.....	110
b- La plongée des courants de densité.....	111
c- La résultante: Propagation des courants de densité dans la retenue.....	112
IV-2-2-5 Les mesures des courants de densité.....	112
a- Mesure de la vitesse.....	112
b- Mesure de l'épaisseur.....	112
c- Mesure des dépôts de sédiments.....	113
c.1 - Principe.....	113
c-2 Le matériel utilisé.....	113
c-3 Exécution des mesures.....	113
c-4 Etablissement d'un profil.....	115
c-5 L'évolution des dépôts de vase.....	115
c-6 Calcul de l'envasement.....	115
c-7 Quantification des dépôts de vase dans la retenue.....	119
Conclusion.....	120

IV-3 Distribution des sédiments dans une retenue par l'avancement du « delta » des sédiments grossiers et la décantation des particules fines.....	120
IV-3-1 Etudes antérieures.....	121
IV-3-2 Description du mode de distribution des sédiments.....	121
IV-4 Distribution des sédiments dans les « petites » retenues de basse chute (distribution par « rouleaux de recirculation »).....	121
IV-4-1 Similitude entre le modèle et conditions réelles.....	121
IV-4-2 Dispositif expérimental.....	123
IV-4-3 Résultats de l'étude expérimentale.....	123
IV-4-3-1 Phénomène observé: rouleaux de recirculation.....	123
IV-4-3-2 Etude quantitative de l'évolution spatio-temporelle des centres des rouleaux de recirculation.....	129
IV-4-3-3 Influence du débit d'apport sur l'évolution de la structure stable.....	129
IV-4-3-4 Répartition des sédiments dans la retenue.....	131
IV-4-4 Résultats des opérations de chasses effectuées au niveau du site de BENI AMRANE.....	131
IV-4-4-1 Les analyses granulométriques.....	131
IV-4-4-2 Les quantités de vase évacuées.....	133
IV-4-5 Les opérations de chasses effectuées au niveau du modèle réduit de BENI AMRANE.....	133
IV-4-5-1 Dispositif d'évacuation du barrage.....	133
IV-4-5-2 Résultats et discussions.....	135

Conclusion.....	135
-----------------	-----

Troisième partie:

La « technique du soutirage »: un moyen de lutte contre l'envasement

Chapitre V La pratique de la « technique du soutirage ».....	141
Introduction.....	141
V-1 Quelques exemples d'utilisation des pertuis de vidange comme moyen de lutte contre l'envasement.....	143
V-2 Mécanisme des courants de densité près des pertuis de vidange.....	144
V-3 Définition de la « technique du soutirage ».....	144
V-4 Importance de la pratique de cette technique.....	146
V-5 Organes de soutirage.....	146
V-6 Evolution historique de la méthode d'évacuation des sédiments par les pertuis de vidange en Algérie.....	146
V-7 Constat de la pratique de la « technique du soutirage » dans certains barrages Algériens..	150
V-7-1 Quantité de suspension évacuée.....	150
a- Barrage de OUED EL FODDA.....	150
b- Barrage de GHRIB.....	157
c- Barrage de FERGOUG.....	159
d- Barrage de FOUM EL GHERZA.....	167
e- Barrage des ZARDEZAS.....	169
f- Barrage de HAMIZ.....	172
g- Barrage de K'SOB.....	176
h- Barrage de BAKHADDA.....	179
i- Barrages de SARNO, MEFROUCH, MEURAD.....	182
j- Barrage d'ERRAGUENE.....	185
V-7-2 La pratique de la « technique du soutirage » dans le barrage d'IGHIL EMDA.....	188
a- Principe de soutirage.....	189
b- Méthode de calcul.....	189
c- Quantité de sédiments évacués.....	190
V-7-3 Granulométrie des sédiments évacués.....	194
Conclusion.....	194
V-8 Zone optimale du soutirage.....	195
V-8-1 Influence de la concentration en éléments fins sur le « facteur de pression ».....	195
V-8-2 Vitesse de chute des particules fins dans une retenue.....	197
V-8-3 Flux solide.....	200
Conclusion.....	204
V-9 « Bon soutirage » et « Mauvais soutirage ».....	205
Problématique.....	205
V-9-1 Le « Bon » soutirage.....	205
V-9-2 Le « Mauvais » soutirage.....	211
V-10 Quelques exemples de types de soutirage pratiqués au niveau des barrages Algériens.....	211
a- Barrage d'IGHIL EMDA.....	211
b- Barrage d'ERRAGUENE.....	226
c- Barrage de GHRIB.....	240
d- Barrage de OUED EL FODDA.....	240
e- Barrage de K'SOB.....	250
V-11 Propositions pratiques pour un « bon » soutirage.....	250
V-12 Résultats et relations.....	252
V-12-1 Formation des courants de densité avec de faibles concentrations.....	252
V-12-2 Apparition de plusieurs courants de densité au cours d'une même crue.....	252
V-12-3 Remaniement des dépôts par les courants de densité.....	252
V-12-4 Influence de la concentration sur le débit du soutirage.....	252

V-12-5	Variation du facteur $(g'H)^{1/2}$ en fonction de la densité de la mixture.....	257
V-12-6	Relation: débit de vase évacuée et le facteur $\Delta\rho/\rho_m(H)^{1/2}$	257
V-13	Capacités sauvegardées par la « technique du soutirage ».....	260
a-	Barrage d'IGHIL EMDA.....	260
b-	Barrage de OUED EL FODDA.....	260
c-	Barrage d'ERRAGUENE.....	260
V-14	Efficacité de la « technique du soutirage ».....	264
V-15	Limite d'application de la « technique du soutirage ».....	270
V-16	« Durée de vie » d'un barrage dans lequel la « technique de soutirage » est pratiquée.....	270
V-17	Transport « approche » et de « dégravement ».....	271
V-17-1	Le transport « approche ».....	273
V-17-2	Le transport « dégravement ».....	274
V-17-3	Principe de la technique.....	274
V-17-4	Projection pour la construction de barrage de chasse à l'amont de ceux d'IGHIL EMDA et OUED EL FODDA.....	274
Conclusion.....		278
Chapitre VI Evolution de l'envasement dans la retenue d'un barrage dans lequel est pratiqué la technique du soutirage.....		
VI-1	Evolution de l'envasement dans le temps.....	280
VI-1-1	Faible taux de comblement.....	280
VI-1-2	Vanne de fond complètement obturée.....	280
VI-1-3	Taux de comblement important.....	282
VI-1-4	Surélévation de la digue d'un barrage.....	282
Conclusion.....		291
VI-2	Evolution de l'envasement suivant la hauteur de la retenue.....	291
VI-2-1	Faible taux de comblement.....	291
VI-2-2	Taux de comblement important.....	291
VI-2-3	Surélévation de la digue d'un barrage.....	296
VI-2-4	Evolution à la suite d'un dragage (approfondissement de la retenue).....	296
Conclusion.....		300
VI-3	Evolution dans la partie centrale de la retenue.....	300
Introduction.....		300
VI-3-1	Remaniement des sédiments dans une retenue.....	301
VI-3-2	Délimitation des zones à l'intérieur d'une retenue.....	301
VI-3-3	Evolution de l'envasement dans le temps.....	305
VI-3-4	Evolution à la suite d'un dragage.....	306
VI-3-5	Evolution après surélévation de la digue du barrage.....	312
Conclusion.....		312
VI-4	Evolution de l'envasement dans la partie basse de la retenue d'un barrage dans lequel est pratiquée la technique de soutirage.....	312
VI-4-1	Cas d'un barrage dans lequel est pratiqué un « Bon » soutirage.....	313
VI-4-2	Cas d'un barrage dans lequel est pratiqué un « Mauvais » soutirage.....	316
Conclusion.....		319
VI-5	Description du comblement d'une retenue de barrage.....	319
VI-6	Schémas approximatifs des étapes de l'envasement d'une retenue d'un barrage.....	324
a-	Barrage de OUED EL FODDA.....	324
b-	Barrage de FOUM EL GHERZA.....	324
c-	Barrage d'IGHIL EMDA.....	326
d-	Barrage des CHEURFAS I.....	326
Conclusion générale.....		331
Références bibliographiques		333

Symboles et abréviations utilisés

- a = Hauteur d'eau dans un canal.
 B = Largeur du canal
 C = Concentration massique en éléments fins.
 C_d = Coefficient de friction.
 D_r = Distance entre deux centres de rouleaux de recirculation.
 DS_{53} = Section par tranche de 2 m d'épaisseur en 1953.
 DV_{53} = Volume d'eau correspondant à la section DS_{53} .
 DS_t = Section par tranche de 2 m d'épaisseur à (t) années d'exploitation.
 DV_t = Volume d'eau correspondant à la section DS_t .
 c = Porosité
 E = Coefficient d'entraînement
 E_s = Taux d'érosion du bassin versant.
 F_t = Nombre addimensionnel
 F_{fi} = Force de frottement à l'interface
 F_{f0} = Force de frottement sur le fond
 g' = Accélération de la pesanteur réduite ($g' = g \cdot \Delta\rho/\rho_m$).
 g = Accélération de pesanteur
 G = Force de pesanteur
 h = Hauteur de la suspension dans un canal.
 h' = Variation de la hauteur de la suspension
 h_1 = Hauteur d'eau claire dans la section 1-1.
 h_2 = Hauteur d'eau claire dans la section 2-2.
 h_t = Hauteur de la tête du courant de densité.
 h_c = Hauteur du corps du courant de densité.
 H = Hauteur d'eau dans le canal.
 H_{ca} = Hauteur du canal
 h_m = Hauteur d'eau dans le modèle
 h_p = Hauteur d'eau dans la nature
 H_0 = Hauteur d'eau dans la retenue à la cote normale.
 H_{0v} = Hauteur d'eau dans la retenue à partir de l'axe des vannes jusqu'à la cote normale.
 I = Pente du lit.
 i = Indice des rouleaux de recirculation.
 K = Coefficient de proportionnalité
 L = Longueur du canal.
 n = pente de la droite $\ln W_s = f(Ln e)$
 P = Pression hydrostatique.
 P_0 = Pression hydrostatique exercée par l'eau claire.
 P_m = Pression hydrostatique exercée par la mixture.
 P_1 = Pression hydrostatique sur le côté AC
 P_2 = Pression hydrostatique sur le côté BD
 q_m = Coefficient qui dépend de la topographie
 Q_m = Débit de mixture soutirée
 Q_v = Débit de vase soutirée (à une densité de 1,6)
 IR_s = Nombre de Reynolds
 $S.M.B.A$ = Sidi M'hamed Ben Aouda.
 S_b = Superficie du bassin-versant.
 S = Rendement de la technique du soutirage
 S_2 = Paramètre de forme.
 T_s = Nombre d'années d'exploitation.
 T = Durée de vie d'un barrage dans lequel est pratiquée la technique du soutirage (année)
 T_0 = Durée de vie d'un barrage sans la pratique de la technique de soutirage (année)
 t = Temps
 V_m = Vitesse de l'écoulement dans le modèle réduit
 V_p = Vitesse de l'écoulement dans la nature (prototype)

V_i = Vitesse initiale du courant de densité.
 V = Vitesse de propagation du courant de densité.
 W_{SD} = Volume des sédiments déposés dans la retenue
 W_{ss} = Volume des sédiments évacués
 W_{se} = Volume des sédiments entrants dans la retenue
 W_m = Volume de la mixture ($V_m = V_v + V_e$)
 W_v = Volume de vase
 W_e = Volume d'eau pure
 W_s = Vitesse de chute des particules fines
 W_{ss} = Volume des sédiments évacués
 W_{se} = Volume total des sédiments entrants dans la retenue
 W_0 = Volume initial de la retenue .
 W_{SDA} = Volume annuel des sédiments déposés dans la retenue .
 W_{STA} = Volume annuel des sédiments entrants dans la retenue .
 W_{SSA} = Volume des sédiments soutirés par les vannes .
 X, Y = Coordonnées
 X_{ri}, Y_{ri} = Coordonnées des centres des rouleaux de recirculation.
 $Z.O.S$ = Zone optimale de soutirage
 ρ_0 = Densité de l'eau claire.
 ρ_m = Densité de la mixture ($\rho_m = \rho_0 + \Delta\rho$).
 ρ_s = Masse volumique des particules .
 ρ_{FI} = Densité de la suspension correspondant à l'apparition de la rigidité initiale.
 ρ_{FM} = Densité de la suspension correspondant au flux maximum.
 $\Delta\rho$ = Variation de la densité.
 Δh = Variation de la hauteur de la suspension.
 ΔP = Différence de pression
 ΔF = Variation de la force hydrostatique
 τ_i = Contrainte à l'interface
 τ_0 = Contrainte au fond
 λ_i = Coefficient de frottement à l'interface
 λ_0 = Coefficient de frottement aux parois
 ψ = Flux solide
 θ = Angle d'inclinaison

Liste des tableaux



	Page
Tableau 1- Capacité totale des barrages du Maghreb.....	04
Tableau 2- Envasement moyen annuel dans les pays du Maghreb.....	06
Tableau 3- Envasement des retenues de barrages des pays du Maghreb.....	06
Tableau 4- Pertes de capacités dues à l'envasement dans certains pays du monde.....	11
Tableau 5- Réduction de capacités suite à l'envasement dans certains barrages.....	12
Tableau 6- Capacités de certains barrages Algériens en l'an 2010.....	12
Tableau 7- Capacités de certains barrages de faible taux d'envasement.....	19
Tableau 8- Pentcs du bassin -versant amont du barrage de K'SOB.....	39
Tableau 9- Localisation des zones d'érosion du bassin versant amont du barrage de K'SOB.....	40
Tableau 10- Pentcs du bassin versant amont du barrage des ZARDEZAS.....	44
Tableau 11- Localisation des zones d'érosion du bassin versant du barrage des ZARDEZAS.....	44
Tableau 12- Caractéristiques de la vase de la retenue de OUED EL FODDA.....	49
Tableau 13- Différents levés bathymétriques de la retenue de GHRIB.....	50
Tableau 14- Différents moyens de lutte contre l'envasement utilisés dans certains barrages Algériens....	69
Tableau 15-Taux d'érosion spécifique de certains bassins versants.....	70
Tableau 16- Bassin versant du barrage d'IGHIL EMDA - Domaines d'occupation.....	103
Tableau 17- Quantification de la vase dans les deux branches de la retenue d'IGHIL EMDA.....	119
Tableau 18- Echelle du modèle.....	121
Tableau 19-Analyses granulométriques de la vase évacuée à travers les vannes de fond.....	131
Tableau 20- Quelques barrages dans lesquels les puits de vidange sont utilisés comme moyen de lutte contre l'envasement.....	143
Tableau 21- Rapport eau /sédiments évacués suivant différents modes de vidange.....	143
Tableau 22- Rapport eau /sédiments évacués en fonction de différents modes de vidange (Algérie).....	144
Tableau 23- Organes de soutirage de quelques barrages.....	146
Tableau 24- Capacités des premiers barrages Algériens.(période 1830-1930).....	148
Tableau 25- Capacités des barrages Algériens.(période 1930-1945).....	148
Tableau 26-Analyse granulométrique des vases soutirées.....	194
Tableau 27- Valeurs de la concentration de la vase.....	197
Tableau 28- Valeurs critiques de la concentration de la vase (enregistrées au cours de différentes opérations de soutirage).....	197
Tableau 29- Concentration correspondantes aux valeurs critiques du flux solide.....	203
Tableau 30- Relation débit de vase soutirée en fonction du facteur $(\Delta\rho / \rho_m H^{1/2})$	257
Tableau 31- Prolongation de la « durée de vie » de barrages dans lesquels est pratiquée la technique du soutirage.....	270
Tableau 32- Vitesse de sédimentation moyenne des barrages surélevés.....	282
Tableau 33- Fonction de l'évolution des dépôts de sédiments dans certaines retenues des barrages Algériens.....	300

Liste des planches photographiques

	Page
Photo 1- Canal d'irrigation provenant du barrage des CHEURFAS.....	27
Photo 2- Fin d'une opération d'irrigation: une quantité de la vase est déposée dans le canal.....	27
Photo 3- Dépôts successifs des sédiments dans le canal diminuant ainsi la hauteur d'amorçage du siphon.....	28
Photo 4- Opération de dévasement de la conduite principale d'irrigation.....	28.
Photo 5- Ouvrage du barrage de BENI AMRANE.....	30
Photo 6- Retenue du barrage de BENI AMRANE de capacité de $15,6.10^6 \text{ m}^3$	30
Photo 7- Vue sur une partie du bassin versant amont du barrage de BENI AMRANE.....	31
Photo 8- Oued ISSER débouchant dans la retenue du barrage de BENI AMRANE, draine des quantités considérables en sédiments.....	33
Photo 9- Barrage de BENI AMRANE équipé d'un système de six vannes de chasse.....	34
Photo 10- Vue générale du barrage de HAMIZ.....	35
Photo 11- Vue générale de l'ouvrage des ZARDEZAS.....	41
Photo 12- Retenue du barrage des ZARDEZAS.....	41
Photo 13- Vue générale d'une partie du bassin versant amont du barrage des ZARDEZAS.....	42
Photo 14- Avancement progressif du « delta » des sédiments grossiers dans la retenue des ZARDEZAS.....	45
Photo 15- Barrage des ZARDEZAS. Plongement du désagrégateur de la drague.....	46
Photo 16- Rejet de la vase à l'aval du barrage lors de l'opération du dragage de l'été 1993.....	46
Photo 17- Vue générale du barrage de OUED EL FODDA.....	47
Photo 18- Vue générale du barrage des CHEURFAS II (Mai 1996).....	53
Photo 19- Oued El Hammam véhicule une quantité importante des sédiments	58
Photo 20- Retenue du barrage de BOUHANIFIA de 73.10^6 m^3 de capacité en 1940 se retrouve en 1955 à 56.10^6 m^3 suite au dépôt successif des sédiments.....	58
Photo 21- La voûte du barrage de FOUM EL GHERZA.....	59
Photo 22- Vue générale de la retenue du barrage de FOUM EL GHERZA.....	59
Photo 23- Oued El Abiod prend naissance dans les monts de l'Aurès.....	60
Photo 24- Partie désertique du bassin versant du barrage de FOUM EL GHERZA. Erosion en profondeur peu développée.....	61
Photo 25- Vanne de vidange de fond du barrage de FOUM EL GHERZA. Evacuation de plus de $0,5.10^6 \text{ m}^3$ de vase durant la période 1989-1990.....	64
Photo 26- Bassin versant du barrage FOUM EL GHERZA. Seuils en gabion dans les ravins.....	65
Photo 27- Vue générale du barrage d'ERRAGUENE.....	66
Photo 28- Propagation du courant de densité. Temps 15 mn.....	85
Photo 29- Propagation du courant de densité. Temps 30 mn.....	85
Photo 30- Interface. Zone de dilution.....	86
Photo 31- L'usine de production de l'énergie électrique à Derguina.....	101
Photo 32- Retenue du barrage d'IGHIL EMDA (de capacité initiale de 156.10^6 m^3 en 1953, ramenée à 103.10^6 m^3 en 1992).....	102
Photo 33- Terrains nus représentant 22 % de la superficie du bassin versant d'IGHIL EMDA.....	104
Photo 34- Bassin versant amont du barrage d'IGHIL EMDA. L'importance du ruissellement est attesté par le déchaussement des arbres.....	107
Photo 35- Bassin versant amont du barrage d'IGHIL EMDA. Glissement du terrain avec niche d'arrachement. L'extrémité de la langue boueuse arrive directement dans la retenue.....	108
Photo 36- Oued Atteba (amont de la confluence avec l'oued Berd). Les sédiments transportés lors des crues occupent tout le fond de la vallée.....	108
Photo 37- Quantité importante des sédiments se dépose en continue sur la route Béjaia - Sétif, suite au glissement chronique.....	110
Photo 38- Les terres sont jetées directement dans la retenue pour libérer la route Béjaia - Sétif.....	110
Photo 39- Retenue du barrage d'IGHIL EMDA. Enregistrement en marche.....	114
Photo 40 Retenue du barrage d'IGHIL EMDA. La barque est entraînée vers le jalon opposé.....	114
Photo 41- Retenue du barrage de BENI AMRANE. Modèle réduit (échelle 1/100).....	123

Photo 42- Evolution spatio-temporelle des rouleaux de recirculation dans la cuvette de BENI AMRANE. $Q_m = 4 \text{ l/s}$, $Q_p = 400 \text{ m}^3/\text{s}$. (a. Temps $t = 150 \text{ s}$, b. Temps $t = 180 \text{ s}$).....	124
Photo 43- Barrage de BENI AMRANE (Modèle réduit à l'échelle géométrique 1/100. Evolution spatio-temporelle des rouleaux de recirculation dans la cuvette de BENI AMRANE. $Q_m = 6,32 \text{ l/s}$, $Q_p = 632 \text{ m}^3/\text{s}$. (a. Temps $t = 80 \text{ s}$, b. Temps $t = 90 \text{ s}$, c. Temps $t = 100 \text{ s}$, d. Temps $t = 110 \text{ s}$, e. Temps $t = 120 \text{ s}$, f. Temps $t = 130 \text{ s}$, g. Temps $t = 270 \text{ s}$, h. Temps $t = 280 \text{ s}$, i. Temps $t = 290 \text{ s}$, j. Temps $t = 300 \text{ s}$, k. Temps $t = 310 \text{ s}$, l. Temps $t = 320 \text{ s}$).....	125
Photo 44- Evolution spatio-temporelle des rouleaux de recirculation dans la cuvette de BENI AMRANE. $Q_m = 10 \text{ l/s}$, $Q_p = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$. (a. Temps $t = 135 \text{ s}$, b. Temps $t = 155 \text{ s}$).....	127
Photo 45- Evolution spatio-temporelle des rouleaux de recirculation dans la cuvette de BENI AMRANE. $Q_m = 15 \text{ l/s}$, $Q_p = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$. (a. Temps $t = 95 \text{ s}$, b. Temps $t = 105 \text{ s}$).....	128
Photo 46- Système de chasse du barrage de BENI AMRANE. (Modèle réduit à l'échelle 1/100).....	131
Photo 47- Retenue du barrage de BENI AMRANE. Rouleaux de recirculation. . (a. Vanne 4 ouverte. Débit $Q_m = 4 \text{ l/s}$, temps $t = 65 \text{ s}$, b. Vanne 4 ouverte. Débit $Q_m = 4 \text{ l/s}$, temps $t = 85$, c. Vannes 1 et 6 ouvertes. Débit $Q_m = 6,32 \text{ l/s}$, temps $t = 80 \text{ s}$, d. Vannes 1 et 6 ouvertes. Débit $Q_m = 6,32 \text{ l/s}$, temps $t = 90 \text{ s}$, e. Vannes 1 et 6 ouvertes. Débit $Q_m = 20 \text{ l/s}$, temps $t = 80 \text{ s}$, f. Vannes 1 et 6 ouvertes. Débit $Q_m = 20 \text{ l/s}$, temps $t = 90 \text{ s}$, g. Vanne 6 ouverte. Débit $Q_m = 20 \text{ l/s}$, temps $t = 120 \text{ s}$)	136
Photo 48- L'obturation des vanettes de soutirage en 1985 a accéléré l'envasement dans la retenue des ZARDEZAS et qui contraint les services concernés à procéder au dragage de la retenue en 1993.....	171
Photo 49- Dispositif du soutirage des sédiments.....	188
Photo 50- Barrage d'IGHIL EMDA. Fin d'une opération de soutirage après une évacuation d'une quantité importante de vase.....	191
Photo 51- Aval du barrage d'IGHIL EMDA. Après quelques années, la vase évacuée par le soutirage est colonisée par une abondante végétation.....	191
Photo 52- L'arrivée du courant de densité près de la vanne.....	207
Photo 53- L'ouverture immédiate de la vanne entraînera le soutirage du courant de densité et l'écoulement reste permanent jusqu'à son évacuation.....	207
Photo 54- Nous pouvons dire que c'est un « bon soutirage ». La densité de la suspension est située dans la zone optimale de soutirage. Si les 4 vanettes ont été ouvertes au moment de l'arrivée du courant de densité au pied du barrage, la 5 ^{ème} vanette située au dessus des quatre évacuant de l'eau claire, ce qui prouve qu'il n'y avait pas d'onde de retour.....	210
Photo 55- C'est en pratiquant ce type de soutirage qu'on arrive à prolonger la durée de vie de nos barrages.....	210
Photo 56- Barrage de OUED EL FODDA. L'écoulement de la suspension à travers un pertuis de dévasement. La suspension est à l'état plastique, sa densité a dépassé 1,200, elle n'appartient pas à la zone optimale de soutirage. L'ouverture tardive de la vanne a accéléré la décantation des particules fines. C'est un « Mauvais soutirage ».....	213
Photo 57- La densité de la suspension est comprise entre 1,090 et 1,200. Il s'agit toujours d'un « Mauvais soutirage ». La continuité de la pratique de ces manoeuvres risque un jour l'obturation de la vanette.....	213
Photo 58- Vidange totale de la retenue du barrage de FERGOUG. La photo montre clairement que seul un cône a été évacué durant plusieurs années de la pratique des « Mauvais soutirage ».....	215
Photo 59- Barrage OUED EL FODDA. La pratique des soutirages s'est effectué avec des densités très élevées.....	248
Photo 60- Barrage OUED EL FODDA. Une fois que la consolidation a eu lieu que l'ouverture des vanettes se fait. C'est avec ces manoeuvres que la vanne de fond a été complètement obturée en 1948. ...	248

Liste des figures

Figure 1- Capacité totale des barrages du Maghreb.....	5
Figure 2- Répartition des barrages dans le Maghreb.....	5
Figure 3- Envasement moyen annuel des barrages du Maghreb.....	5
Figure 4- Variation de l'érosion spécifique (E_s) en fonction de la superficie du bassin versant (S). (28 barrages dans les zones semi arides des Etats Unis).....	8
Figure 5- Variation de l'érosion spécifique (E_s) en fonction de la superficie du bassin versant (S). (34 barrages des pays du Maghreb).....	8
Figure 6- Variation de l'érosion spécifique en fonction du rapport débit liquide /superficie du bassin versant (Q_L / S).....	8
Figure 7- Evolution de l'envasement moyen annuel en fonction de l'apport liquide annuel. (barrages du Maghreb).....	9
Figure 8- Evolution de l'envasement moyen annuel en fonction de la superficie du bassin versant (barrages du Maghreb).....	9
Figure 9- Evolution du toit de la vase dans cinq réservoirs de barrages au Etat Unis (Pemberton 1980).....	10
Figure 10- Evolution de la capacité de la retenue du barrage de FERGOUG.....	14
Figure 11- Evolution du toit de la vase dans la retenue du barrage de FERGOUG.....	15
Figure 12- Evolution de la capacité de la retenue du barrage FOUM EL GHERZA.....	16
Figure 13- Evolution du toit de vase dans la retenue du barrage de FOUM EL GHERZA.....	16
Figure 14- Evolution de la capacité utile de la retenue du barrage de OUED EL FODDA.....	17
Figure 15- Evolution du toit de la vase dans la retenue du barrage de OUED EL FODDA.....	18
Figure 16- Evolution de la capacité de la retenue du barrage d'IGHIL EMDA.....	20
Figure 17- Evolution de la capacité de la retenue du barrage de BOUHANIFIA.....	20
Figure 18- Evolution de la capacité de la retenue du barrage d'ERRAGUENE.....	21
Figure 19- Evolution de la capacité de la retenue du barrage de S.M.B.A.....	21
Figure 20- Evolution de la capacité de la retenue du barrage de DJORF EL TORBA.....	21
Figure 21- Evolution du toit de la vase dans la retenue du barrage des ZARDEZAS.....	22
Figure 22- Evolution du toit de la vase dans la retenue du barrage de K'SOB.....	23
Figure 23- Barrage de SAUTET (France). Evolution du toit de vase causant ainsi la surélévation de la vidange.....	25
Figure 24- Carte de situation du barrage de BENI AMRANE.....	29
Figure 25- Variations annuelles des apports liquides de l'oued Isser (station de Lakhdaria).....	32
Figure 26- Variations mensuelles des apports liquides de l'oued Isser (station de Lakhdaria, période de 26 ans).....	32
Figure 27- Variations mensuelles moyennes du débit solide dans l'oued Isser (période de 20 ans).....	33
Figure 28- Bassin versant amont du barrage du HAMIZ.....	36
Figure 29- Bassin versant amont du barrage du HAMIZ. Pluviométrie mensuelle (période 1980-1992).....	36
Figure 30- Bassin versant du barrage de K'SOB. Domaine d'occupation.....	38
Figure 31- Bassin versant amont du barrage de K'SOB. Pluviométrie mensuelle (période 1980-1992).....	38
Figure 32- Répartition de la densité du réseau hydrographique du bassin du barrage de K'SOB.....	39
Figure 33- Bassin versant du barrage des ZARDEZAS. Domaine d'occupation.....	42
Figure 34- Bassin versant amont du barrage des ZARDEZAS. Pluviométrie annuelle (période 1975-1987).....	43
Figure 35- Bassin versant amont du barrage des ZARDEZAS. Pluviométrie mensuelle (période 1975-1987).....	43
Figure 36- Quantité de vase déposée dans la retenue du barrage des ZARDEZAS.....	45
Figure 37- Toit de vase en 1986 dans la retenue du barrage de OUED EL FODDA.....	48
Figure 38- Retenue du barrage des CHEURFAS I.....	51
Figure 39- Profil du toit de la vase en 1958 dans la retenue du barrage des CHEURFAS I.....	52
Figure 40- Barrage de FERGOUG I (1885-1927).....	54
Figure 41- Barrage de FERGOUG II (1927-1970).....	55
Figure 42- Barrage de FERGOUG III (1970-1996).....	55
Figure 43- Bassin versant du barrage de FERGOUG. Pluviométrie annuelle (1981-1992).....	56
Figure 44- Bassin versant amont du barrage de FERGOUG. Pluviométrie mensuelle (période 1981-1992).....	56

Figure 45- Bassin versant amont du barrage de FOUM EL GHERZA. Pluviométrie annuelle (période 1978-1991).....	62
Figure 46- Bassin versant amont du barrage de FOUM EL GHERZA. Pluviométrie mensuelle (période 1978-1991).....	62
Figure 47- Variations annuelles du débit liquide de l'oued El Abiod.....	63
Figure 48- Variations annuelles de la concentration des sédiments dans l'oued El Abiod.....	63
Figure 49- Retenue d'Erraguene de capacité de 202.10^6 m^3	65
Figure 50- Bassin versant amont du barrage d'ERREGUENE. Pluviométrie annuelle (période 1967-1992).....	66
Figure 51- Profil en travers (a. Profil 35g -35 de oued Bahar, b. Profil 36 -37 de oued Bahar).....	67
Figure 52- Profil en long du toit de la vase.....	68
Figure 53- Dispositif de soutirage.....	68
Figure 54- Types de charriage.....	71
Figure 55- Organigramme du processus d'envasement d'une retenue.....	72
Figure 56- Distribution des sédiments dans les retenues.....	78
Figure 57- Quelques exemples de retenues de type canal.....	79
Figure 58- Types d'intrusions.....	80
Figure 59- La plongée.....	81
Figure 60- Le corps et la tête du courant de densité.....	81
Figure 61- Formes de l'interface.....	83
Figure 62- Schéma des forces s'exerçant sur un parallélépipède d'une suspension.....	83
Figure 63- Forme de la tête du courant de densité.....	86
Figure 64- Tête d'un courant de densité (d'après Ippen Gravity waves).....	86
Figure 65- Comportement du courant de densité face à un obstacle.....	88
Figure 66- Représentation schématique des forces hydrostatiques.....	87
Figure 67- Schéma explicatif du « facteur de pression ».....	89
Figure 68- Variation du « facteur de pression en fonction de la concentration en matières de suspension.....	90
Figure 69- Dispositif expérimental.....	93
Figure 70- Variation de la vitesse en fonction de la distance.....	95
Figure 71- Variation du nombre de FROUDE en fonction de la distance relative.....	95
Figure 72- Variation de la vitesse du courant de densité en fonction du temps.....	96
Figure 73- Variation de la vitesse initiale en fonction du facteur $(g'H)^{1/2}$	97
Figure 74- Variation de la vitesse initiale en fonction du facteur $(g'h_c)^{1/2}$	97
Figure 75- Variation du coefficient de friction C_d en fonction du nombre de REYNOLDS.....	99
Figure 76- Variation de la vitesse de propagation en fonction du facteur $(g'h_c)^{1/2}$	99
Figure 77- Variation de la vitesse du courant de densité en fonction de la pente du fond du canal.....	99
Figure 78- Variation de la hauteur de la tête du courant de densité en fonction de la distance.....	100
Figure 79- Situation du barrage d'IGHIL EMDA.....	101
Figure 80- Retenue du barrage IGHIL EMDA.....	102
Figure 81- Bassin versant du barrage d'IGHIL EMDA. Domaines d'occupation.....	103
Figure 82- Bassin versant amont du barrage d'IGHIL EMDA. Pluviométrie annuelle (période 1977-1992).....	104
Figure 83- Coupes topographiques du bassin versant.....	105
Figure 84- Modèle en amont du barrage d'IGHIL EMDA.....	105
Figure 85- Réseau hydrographique du bassin versant.....	106
Figure 86- Propagation des courants de densité dans la retenue d'IGHIL EMDA.....	111
Figure 87- Branche oued Berd. Profil en travers N° 3.....	116
Figure 88- Branche oued Embarek. Profil en travers N° 104.....	116
Figure 89- Evolution du toit de la vase dans la retenue du barrage d'IGHIL EMDA.....	117
Figure 90- Retenue du barrage d'IGHIL EMDA. Zones de sédimentation et d'érosion.....	118
Figure 91- Profil du toit de la vase observés par ASHIDA (SUGIO et OKABE, 1974).....	122
Figure 92- Formation du « delta » des sédiments grossiers. (Murray, 1978).....	122
Figure 93- Cas où les conditions de formation des courants de densité ne sont pas réunies.....	122
Figure 94- Repère des centres des rouleaux de recirculation.....	129
Figure 95- Variation temporelle de la distance D_r	130
Figure 96- Variation du rapport R en fonction du nombre de Froude F_r	132
Figure 97- Répartition des sédiments dans la retenue du barrage de BENI AMRANE.....	132

Figure 98- Barrage de BENI AMRANE. Apports liquides (période 1988-1993).....	134
Figure 99- Barrage de BENI AMRANE. Quantités annuelle de suspension soutirée.....	134
Figure 100- Barrage de BENI AMRANE. Quantité annuelle de vase soutirée.....	134
Figure 101- Répartition des sédiments dans la retenue du barrage de BENI AMRANE (Modèle réduit, vannes ouvertes).....	139
Figure 102- Organigramme de distribution des sédiments dans les retenues.....	140
Figure 103- Méthodes d'évacuation des sédiments par les pertuis de vidange d'un barrage.....	142
Figure 104- Mécanisme des courants de densité près des pertuis de vidange.....	145
Figure 105- Evacuation des sédiments par la technique du soutirage.....	145
Figure 106- Importance de la pratique de la technique du soutirage.....	147
Figure 109- Barrage de OUED EL FODDA. Apports liquides saisonniers (période 1980-1992).....	152
Figure 110- Barrage de OUED EL FODDA. Quantité saisonnière de suspension soutirée.....	152
Figure 111- Opérations des soutirages au barrage de OUED EL FODDA.....	153
Figure 112- Barrage de OUED EL FODDA. Apports liquides annuels (période 1980-1992).....	154
Figure 113- Barrage de OUED EL FODDA. Quantité de suspension soutirée (période 1980-1992).....	154
Figure 114- Pratique de la technique du soutirage au barrage de OUED EL FODDA.....	156
Figure 115- Barrage de GHRIB. Apports liquides mensuels (période 1980-1992).....	157
Figure 116- Barrage de GHRIB. Quantité mensuelle de suspension soutirée (période 1980-1992).....	157
Figure 117- Pratique de la technique du soutirage au niveau du barrage de GHRIB durant le mois de septembre, août, juin et juillet.....	157
Figure 118- Barrage de GHRIB. Apports liquides annuels (période 1980-1993).....	158
Figure 119- Barrage de GHRIB. Quantité annuelle de suspension soutirée (période 1980-1991).....	158
Figure 120- La pratique de la technique du soutirage au niveau du barrage de GHRIB durant la période 1980-1985.....	158
Figure 121- Barrage de FERGOUG. Apports liquides mensuels (période 1978-1993).....	160
Figure 122- Barrage de FERGOUG. Quantité mensuelle de suspension soutirée (période 1978-1993).....	160
Figure 123- Barrage de FERGOUG. Apports liquides saisonniers (période 1978-1993).....	160
Figure 124- Barrage de FERGOUG. Quantité de mixture saisonnière soutirée (période 1978-1993).....	161
Figure 125- Barrage de BOUHANIFIA. Quantité de mixture (moyenne) mensuelle soutirée (période 1980-1992).....	161
Figure 126- Barrage de BOUHANIFIA. Quantité de mixture saisonnière soutirée (période 1980-1992).....	161
Figure 127- Conséquences de la mauvaise pratique de la technique du soutirage au niveau des barrages de FERGOUG et BOUHANIFIA durant les mois de juin, juillet, août et septembre.....	162
Figure 128- Soutirage au niveau des barrages du FERGOUG et de BOUHANIFIA durant le mois de janvier.....	163
Figure 129- Barrage de FERGOUG. Variation des apports liquides (période 1978-1993).....	164
Figure 130- Barrage de FERGOUG. Quantité annuelle de suspension soutirée (période 1978-1993).....	164
Figure 131- Barrage de BOUHANIFIA. Quantité annuelle de suspension soutirée.....	164
Figure 132- La pratique de la technique de soutirage au barrage de FERGOUG.....	165
Figure 133- Barrage de FOUM EL GHERZA. Apports liquides annuels (période 1966-1991).....	167
Figure 134- Barrage de FOUM EL GHERZA. Quantité annuelle de suspension soutirée (période 1966- 1991).....	167
Figure 135- Pratique de la technique du soutirage au niveau du barrage de FOUM EL GHERZA.....	168
Figure 136- Barrage des ZARDEZAS. Apports liquides annuels (période 1965-1979).....	169
Figure 137- Barrage des ZARDEZAS. Quantité annuelle de suspension soutirée (période 1965-1979).....	169
Figure 138- Barrage des ZARDEZAS. Apports liquides dans la retenue.....	170
Figure 139- Barrage des ZARDEZAS. Quantité annuelle de suspension soutirée (période 1980-1991).....	170
Figure 140- La pratique de la technique du soutirage au barrage des ZARDEZAS.....	171
Figure 141- Barrage de HAMIZ. apports moyens mensuels (période 1980-1992).....	172
Figure 142- Barrage de HAMIZ. Quantités mensuelle de suspension soutirée (période 1980-1992).....	172
Figure 143- La pratique de la technique du soutirage au barrage de HAMIZ.....	173
Figure 144- Barrage de HAMIZ. Apports liquides annuels (période 1980-1992).....	174
Figure 145- Barrage de HAMIZ. Quantités annuelle de suspension soutirée (période 1980-1991).....	174
Figure 146- La pratique de la technique de soutirage au barrage du HAMIZ.....	175
Figure 147- Barrage de K'SOB. Apports liquides mensuels soutirés (période 1980-1992).....	176
Figure 148- Barrage de K'SOB. Quantité mensuelle de suspension soutirée (période 1980-1992).....	176

Figure 149- Barrage de K'SOB. Apports liquides annuels (période 1980-1992).....	177
Figure 150- Barrage de K'SOB. Quantité annuelle de suspension soutirée (période 1980-1992).....	177
Figure 151- La pratique de la technique du soutirage au barrage de K'SOB.....	178
Figure 152- Barrage de BAKHADA. Apports liquides annuels (période 1980-1992).....	179
Figure 153- Barrage de BAKHADA. Quantité annuelle de suspension soutirée (période 1980-1992).....	179
Figure 154- La technique du soutirage pratiquée au niveau du barrage de BAKHADA.....	180
Figure 155- Barrage de SARNO. Apports liquides annuels (période 1965-1980).....	182
Figure 156- Barrage de SARNO. Quantité annuelle de suspension soutirée (période 1965-1978).....	182
Figure 157- Barrage de MEFROUCH. Apports liquides annuels (période 1980-1992).....	183
Figure 158- Barrage de MEFROUCH. Quantité annuelle de suspension soutirée (période 1980-1992).....	183
Figure 159- Barrage MEURAD. Apports liquides annuels (période 1967-1978).....	184
Figure 160- Barrage MEURAD. Quantité annuelle de mixture soutirée (période 1967-1978).....	184
Figure 161- Barrage d'ERRAGUENE. Apports liquides annuels au barrage (période 1964 -1984).....	185
Figure 162- Barrage d'ERRAGUENE. Quantités de vases annuelles soutirées au niveau du barrage (période 1964 -1984).....	185
Figure 163- La pratique de la technique du soutirage au barrage d'ERRAGUENE.....	186
Figure 164- Barrage d'ERRAGUENE. Quantité de vases soutirée saisonnièrement (période de 20 ans).....	186
Figure 165- Barrage d'ERRAGUENE. Quantité de vase soutirée mensuellement (période de 20 ans).....	187
Figure 166- Densités maximales annuelles des suspensions soutirées au barrage d'ERRAGUENE.....	187
Figure 167- Dispositif du soutirage des vases.....	188
Figure 168- Barrage d'IGHIL EMDA. Abaque d'évaluation de la vase soutirée (période de 27 ans).....	189
Figure 169- Barrage d'IGHIL EMDA. Apports liquides annuels dans la retenue (période 1964-1992).....	190
Figure 170- Barrage d'IGHIL EMDA. Quantités annuelles de vases soutirées (période 1965-1992).....	190
Figure 171- Barrage d'IGHIL EMDA. Apports liquides saisonniers.....	192
Figure 172- Barrage d'IGHIL EMDA. Quantité saisonnière de vase soutirée.....	192
Figure 173- Barrage d'IGHIL EMDA. Apports liquides annuels (période 1965-1992).....	193
Figure 174- Barrage d'IGHIL EMDA. Quantité mensuelle de vase soutirée (période 1965-1992).....	193
Figure 175- Densités maximales annuelles des mixtures soutirées au barrage d'IGHIL EMDA.....	193
Figure 176- Evolution du « Facteur de pression » en fonction de la concentration.....	196
Figure 177- Evolution du « Facteur de pression » en fonction de la concentration, d'après les données des opérations.....	198
Figure 178- Variation de la vitesse de chute des particules fines en fonction de la concentration.....	199
Figure 179- Détermination de la pente « n ».....	201
Figure 180- Variation du flux solide en fonction de la concentration.....	202
Figure 181- Variation de la rigidité initiale de la vase de HAMIZ en fonction de la concentration [C. Migniot et Valembos 1975].....	207
Figure 182- « Bon soutirage ».....	206
Figure 183- Début de l'ouverture des vannes.....	208
Figure 184- Cas d'un « Bon soutirage ».....	209
Figure 185- « Mauvais soutirage ».....	212
Figure 186- Cas d'un « Mauvais soutirage ». Variation de la densité de suspension au cours d'une opération de soutirage.....	214
Figure 187- Barrage d'IGHIL EMDA. Soutirage du 22/12 au 25/12/1966.....	216
Figure 188- Barrage d'IGHIL EMDA. Soutirage du 18 octobre 1983.....	218
Figure 189- Barrage d'IGHIL EMDA. Soutirage du 18 juin 1983.....	219
Figure 190- Barrage d'IGHIL EMDA. Soutirage du 14 au 18 mai 1966.....	220
Figure 191- Barrage d'IGHIL EMDA. Soutirage du 4 au 5 décembre 1965.....	221
Figure 192- Barrage d'IGHIL EMDA. Soutirage du 9 au 15 décembre 1965.....	223
Figure 193- Barrage d'IGHIL EMDA. Soutirage du 2/11/1983 au 3/11/1983.....	224
Figure 194- Barrage d'IGHIL EMDA. Soutirage du 25/05 au 1/06/1966.....	225
Figure 195- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage du 22 au 23 avril 1970.....	227
Figure 196- Le courant de densité est arrivé au pied du barrage avant 13h (heure d'ouverture de la vanne), ce qui a provoqué une augmentation sensible de la densité de l'eau turbide (1,066).....	228
Figure 197- L'ouverture de la vanne à 13h, a provoqué la chute de la densité de la mixture de 1,066 à 1,040 en 3 heures pour se stabiliser ensuite entre 1,033 et 1,040 pendant 16 heures, ce qui prouve que l'écoulement du courant de densité est permanent.....	228

Figure 198- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage du 21 au 22/09/1981.....	229
Figure 199- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage du 24 au 25/08/1981.....	230
Figure 200- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage du 23 au 25 décembre 1969.....	231
Figure 201- Barrage d'ERRAGUENE. Déroulement du premier soutirage de la crue du 23 au 25 décembre 1969.....	232
Figure 202- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage du 01 au 08 décembre 1969.....	234
Figure 203- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage du 18 au 22 décembre 1980.....	235
Figure 204- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage du 01 au 06 octobre 1969.....	236
Figure 205- Barrage d'ERRAGUENE. Variation de la densité de la mixture au cours du soutirage du 02 au 05/04/1978.....	238
Figure 206- Barrage d'ERRAGUENE. Variation de la densité de la mixture au cours du soutirage du 25 au 28/09/1973.....	238
Figure 207- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage du 15 au 18 novembre 1990. Variation temporelle de la densité de la mixture.....	239
Figure 208- Barrage de GHRIB. Soutirage du 2 au 19 avril 1939 (Variation de la densité de la mixture au cours du soutirage.....	241
Figure 209- Les étapes du soutirage des sédiments au niveau du barrage de GHRIB.....	242
Figure 210- Barrage de OUED EL FODDA. Soutirage du 8 au 20 décembre 1937. Variation de la densité de la mixture au cours du soutirage.....	244
Figure 211- Schéma probable de l'obturation de la vanne de fond du barrage de OUED EL FODDA en 1948.....	245
Figure 212- Barrage de OUED EL FODDA. Déroulement des opérations de soutirage.....	247
Figure 213- Barrage de K'SOB. Soutirage du 01 et 02 octobre 1985.....	250
Figure 214 - La pratique de la technique du soutirage.....	251
Figure 215- Au cours d'une crue, deux (ou trois) courants de densité peuvent se former successivement et atteindre le pied du barrage.....	251
Figure 216- Remaniement de la vase par les courants de densité.....	254
Figure 217- Variation du nombre addimensionnel (F.) en fonction de la concentration de la mixture évacuée.....	256
Figure 218- Variation du facteur $(g'H)^{1/2}$ en fonction de la densité de la mixture soutirée.....	258
Figure 219- Variation du débit de vase soutirée en fonction du facteur $(\Delta\rho/\rho_m)(H)^{1/2}$	259
Figure 220- Evolution temporelle de l'envasement dans la retenue du barrage d'IGHIL EMDA.....	261
Figure 221- Evolution temporelle de l'envasement.....	262
Figure 222- Evolution temporelle de l'envasement dans la retenue de OUED EL FODDA (période 1932-1994).....	263
Figure 223- Evolution dans le temps du rendement du soutirage.....	264
Figure 224- Quantités de vase soutirées au barrage d'IGHIL EMDA.....	267
Figure 225- Quantités de vase soutirées au barrage d'ERRAGUENE.....	268
Figure 226- Quantités de vase soutirées au barrage de OUED EL FODAA.....	269
Figure 227- Sédiments déposés dans la retenue qui ne seront pas évacués, quelque soit le rendement du soutirage.....	271
Figure 228- Durée de vie d'un barrage.....	272
Figure 229- Amélioration de la technique du soutirage en utilisant le barrage de chasse.....	275
Figure 230- Barrage de chasse à l'amont de celui d'IGHIL EMDA.....	276
Figure 231- Possibilités de mise en place des barrages de chasse.....	277
Figure 232- Barrage de chasse à l'amont de celui de OUED EL FODDA.....	279
Figure 233- Soutirage des sédiments dans un barrage nouvellement mis en exploitation.....	281
Figure 234- Evolution dans le temps de l'envasement des retenues de barrage à faible taux de comblement.....	281
Figure 235- Evolution dans le temps de l'envasement dans la retenue du barrage de OUED EL FODDA durant la période du blocage de la vanne de fond (1948-1961).....	283
Figure 236- Soutirage des sédiments dans un barrage à fort taux de comblement.....	283
Figure 237- Evolution dans le temps de l'envasement des retenues à fort taux de comblement.....	284
Figure 238- Variation de la vitesse de sédimentation des retenues de barrages dans le temps.....	286
Figure 239- Evolution dans le temps de l'envasement dans les retenues de barrages surélevés.....	288

Figure 240- Variation de la vitesse de sédimentation dans le temps des retenues de barrages surélevés.....	289
Figure 241- Evolution dans le temps de l'envasement dans les retenues de barrages en l'absence de soutirage des sédiments.....	290
Figure 242- Evolution de l'envasement dans une retenue à faible taux de comblement.....	292
Figure 243- Evolution de l'envasement dans une retenue à fort taux de comblement.....	294
Figure 244- Evolution de l'envasement dans la retenue du barrage d'IGHIL EMDA.....	295
Figure 245- Evolution de l'envasement dans une retenue de barrage après surélévation de la digue.....	297
Figure 246- Schéma approximatif de l'évolution du toit de la vase dans une retenue de barrage surélevé.....	298
Figure 247- Evolution de l'envasement dans la retenue du barrage du HAMIZ.....	299
Figure 248- Zones remaniées dans une retenue de barrage.....	302
Figure 249- Délimitation de trois zones d'envasement dans la retenue.....	3 03
Figure 250- Courbe granulométrique des dépôts solides accumulés dans la réserve des CHEURFAS I.....	3 04
Figure 251- Evolution de l'envasement dans la zone II.....	307
Figure 252- Evolution du toit de la vase dans la zone II dans la retenue.....	309
Figure 253- Evolution de l'envasement dans la zone II de la retenue du barrage de CHEURFAS I.....	311
Figure 254- Evolution de l'envasement dans la zone II de la retenue du barrage du HAMIZ.....	311
Figure 255- Evolution de l'envasement dans la zone II après surélévation de la digue.....	313
Figure 256- Répartition des sédiments dans une retenue durant plusieurs périodes d'exploitation.....	314
Figure 257- Evolution de l'envasement dans le temps dans une retenue de barrage dans laquelle est pratiqué un « Bon soutirage » - Cas d'IGHIL EMDA.....	316
Figure 258- Evolution de l'envasement dans le temps dans une retenue de barrage dans lequel est pratiqué un « Mauvais soutirage ».....	317
Figure 259- Evolution de l'envasement durant les premières années d'exploitation.....	322
Figure 260- Evolution de l'envasement dans une dont le taux de comblement est avancé.....	322
Figure 261- Variation du volume de vase dans la zone I.....	323
Figure 262- Cas d'une retenue dont l'état d'envasement est très avancé.....	323
Figure 263- Etapes de comblement de la retenue du barrage de OUED EL FODDA.....	325
Figure 264- Etapes approximatives du comblement de la retenue du barrage de FOUM EL GHERZA.....	327
Figure 265- Etapes approximatives du comblement de la retenue du barrage d'IGHIL EMDA.....	328
Figure 266- Evolution probable du toit de vase dans la retenue des CHEURFAS I.....	330

Introduction

1. Position du problème

En construisant les barrages sur des cours d'eau naturels, l'homme modifie le transit des particules solides, qui vont se déposer au fond des retenues créées par ces ouvrages, réduisant ainsi progressivement leur capacité, et il arrive même un moment où l'ouvrage ne sera plus efficient. Toutes les retenues à travers le monde sont plus ou moins exposées au phénomène de l'envasement mais avec des vitesses de sédimentation qui diffèrent d'une région à une autre.

Les dommages causés par ce phénomène (Réduction de la capacité, obturation des pertuis de vidange...) peuvent être importants et il peut s'avérer extrêmement difficile, voir même impossible d'y remédier particulièrement dans les régions arides et semi arides.

Le taux d'érosion est généralement élevé et les quantités transportées sont extrêmement variables suivant les dispositions du bassin versant, les pentes des rives, l'état de la végétation...

L'importance de ce phénomène est défini par le taux annuel d'érosion. Selon **BERTHIER A.** (1970) [1], ce paramètre peut varier de quelques dizaines à plusieurs milliers de $t / km^2 \cdot an$. En Algérie par exemple, l'érosion spécifique dans 30 bassins versants étudiés varie entre 30 et $3350 t / km^2 \cdot an$ [2]. Selon **DEMMAK A.** (1982) [3], le taux d'érosion peut atteindre $4000 t / km^2 \cdot an$ sur la chaîne du côtier de Dahra. Il atteint par contre $62 t / km^2 \cdot an$ sur le bassin de la Seine, et $1500 t / km^2 \cdot an$ et sur le bassin de la Durance (France) et dépasse $2500 t / km^2 \cdot an$ sur certains bassins de la Chine et de l'île de Java en Inde [4].

Des quantités considérables de sédiments sont transportées par les oueds Algériens pendant les crues, variant de 50 à $150 g / l$ avec des valeurs maximales dépassant même 500 à $600 g/l$ [2] puisque des valeurs de $650 g / l$ ont été enregistrées sur certaines rivières [2]. Par contre dans les rivières Françaises la concentration en sédiments est de $2 g / l$ et elle peut atteindre la valeur maximale de $20 g/l$ en période de crue [5]. Ainsi, des quantités importantes de particules solides se déposent annuellement dans les réservoirs de barrages dans l'ensemble du monde, le phénomène ayant été largement signalé aux Etats Unis, la Russie, le Taiwan, la Chine, l'Iran, Soudan et dans les barrages du Maghreb (l'Algérie, le Maroc et la Tunisie).

Défavorisé sous le rapport du régime des rivières, défavorisé sous le rapport des possibilités de régularisation, l'Algérie a en outre le douloureux honneur de figurer parmi les contrées les plus dangereusement menacées par l'érosion et l'envasement des retenues. Certains barrages ont été complètement abandonnés tels que ceux de SIG, de FERGOUG II et des CHEURFAS I, d'autres donnent des inquiétudes tels que ceux de OUED EL FODDA, GHRIB et FOUM EL GHERZA et finiront par périr si des solutions ne sont pas prises à court terme.

Un cumul de sédiments évalué à $560 \cdot 10^6 m^3$ se trouve actuellement (1996) dans les retenues de 98 barrages. Plus de $650 \cdot 10^6 m^3$ de sédiments sont prévus pour l'an 2000 pour le même nombre de barrages. Peu de recherches ont été menées sur ce phénomène en Algérie depuis l'époque coloniale et plus précisément depuis les derniers travaux de **DUQUENNOIS H.** en 1956 et 1957 [6] [7]. Dans une première étude sur l'envasement des barrages de GHRIB et de OUED EL FODDA, **DUQUENNOIS H.** avait été le premier à avoir affirmé que les retenues de ces barrages s'ensavaient par courants de densité. La réalisation du barrage d'IGHIL EMDA en 1953 lui a permis de poursuivre ces recherches sur les courants de densité et leur comportement au niveau de cette retenue jusqu'à l'année 1957. Malgré l'insuffisance des études sur ce phénomène, beaucoup d'efforts ont été déployés par les services d'hydrauliques dans la lutte contre l'envasement [8] [9], il faut remarquer que l'Algérie fait figure de pionnier en la matière et son expérience singulière dans le monde fait qu'il n'est pas fait référence à des expériences d'autre pays. En revanche, le point est à faire en ce qui concerne les équipements de devasement qui sont actuellement produits par les pays industrialisés.

Plusieurs procédés de lutte ont été utilisés à savoir: le reboisement des bassins versants, la surélévation des digues (tel que celui de HAMIZ, K'SOB, et ZARDEZAS), la construction de barrages de décantation (tel que celui de BOUGHEZOU à l'amont du barrage de GHRIB), l'utilisation du barrage à onde de chasses (tel que celui de BOUHANIFIA à l'amont de FERGOUG), le dragage des barrages tel que celui des CHEURFAS I durant la période 1959-1962, celui de HAMIZ entre 1969-1972. L'Algérie a même acquit en 1986 une drague suceuse refouleuse baptisée «Rezoug Youcef». La première retenue qui fut draguée par cette dernière est celle de FERGOUG durant la période 1986-1989. La drague se trouve actuellement dans la retenue du barrage des ZARDEZAS.

Le moyen le plus simple et le moins coûteux reste à notre avis l'évacuation des sédiments par les pertuis de vidange d'un barrage - que nous avons préféré appeler « Technique du soutirage »- peut prolonger la durée de vie d'un barrage. Malheureusement elle a été mal utilisée depuis la réalisation du premier barrage et même encore aujourd'hui, ce qui a engendré une évolution rapide de l'envasement dans l'ensemble des retenues, provoquant ainsi:

- L'obturation des vannes de fond des barrages de OUED EL FODDA (1948) et FOU EL GHERZA (1982).

- L'abondons total du barrage des CHEURFAS I en 1966.

- Le dragage forcé de la retenue du barrage de FERGOUG en 1989 dû à un taux de comblement de 80 % provoqué à notre avis essentiellement par l'inefficacité des soutirages au niveau du barrage de BOUHANIFIA (se trouvant à l'amont de FERGOUG sur le même oued).

- L'augmentation de la vitesse de sédimentation dans l'ensemble des retenues.

Le seul barrage qui ait enregistré des résultats jugés encourageants est celui d'IGHIL EMDA. Durant l'année 1955-1956, plus de 50 % des sédiments entrants dans la retenue ont été évacués.

Le mérite en revient au chercheur **DUQUENNOIS H.** qui a été parmi les premiers à avoir mis en évidence les courants de densité dans la retenue et surtout le premier à avoir conçu un système approprié du soutirage des courants de densité composé de vannettes de faible diamètre.

Une batterie composée de 8 vannettes de dévasement et 3 vannes de dégrèvement a été installée dans le corps du barrage d'IGHIL EMDA en 1953. Il a été parmi les rares barrages dans le monde à être équipé par un tel système.

Au vu des résultats obtenus par ces pertuis de faible diamètre, six vannettes de dévasement ont été placées dans le barrage de OUED EL FODDA en 1961. Quatre vannettes de dévasement et deux de dégrèvement ont été installées dans le corps du barrage d'ERRAGUENE en 1962.

2. Objectif de l'étude

A partir des considérations précédentes, nous nous sommes fixés un double objectif:

- Un objectif à court terme, consistant à étudier dans une première phase, l'importance et le mécanisme de l'envasement ainsi que la manière dont se comblent les retenues, et dans une deuxième phase d'étudier la technique du soutirage des sédiments afin d'améliorer son efficacité en évacuant le maximum de sédiments avec un minimum d'eau claire.

- Un objectif à long terme, consistant en la mise au point d'un système efficace de lutte contre l'envasement qui sera adapté pour chaque type de retenue.

Ce double objectif constitue l'ossature de nos principales activités de recherche dans le passé, dans le présent et dans le futur immédiat, mais dans le cadre de cette thèse notre ambition a été forcément limitée, et nous avons essayé d'atteindre au moins « partiellement » l'objectif à court terme. Nous étions en effet conscient dès le début que notre but risquait de ne pas être atteint complètement pour plusieurs raisons:

-Le manque de documents spécialisés et les données sur les apports solides et liquides, ainsi que les lâchés au moins durant une durée continue de 20 années afin que nous puissions tirer une certaine loi. Il est à signaler que plusieurs barrages de plus de 20 ans d'exploitation ne disposent même pas d'une station de jaugeage à l'amont de la retenue. On ignore ainsi complètement la quantité des sédiments arrivés dans la retenue. D'autres barrages ne disposent d'aucun levé bathymétrique.

-La quasi-absence, à notre connaissance d'études sérieuses sur l'envasement et dévasement de barrages en Algérie.

La présente étude est structurée comme suit:

-La première partie fait le point sur l'importance de l'envasement à travers certains barrages du monde et plus particulièrement ceux des pays du Maghreb et les conséquences qui peuvent en découler sur l'ouvrage et l'environnement.

Il est établi un constat de la situation de dix barrages Algériens vis à vis de leur envasement ainsi qu'un examen des moyens mis en oeuvre pour lutter contre ce phénomène.

-Dans la deuxième partie, nous essayerons de donner une approche sur le mécanisme de l'envasement et la distribution des sédiments dans les retenues.

Les courants de densité, cause principale du comblement des barrages Algériens, seront traités en deux volets: le premier est expérimental sur un canal prismatique pour l'étude de la vitesse et le comportement de ces derniers en fonction de certains paramètres (concentration, hauteur d'eau....) et en deuxième volet, nous étudierons l'évolution des dépôts de sédiments drainés par les courants de densité qui se manifestent en période de crue dans la retenue d'IGHIL EMDA.

Nous essayerons aussi d'aborder la répartition des sédiments dans les petites retenues de basse chute. A cet effet, une étude expérimentale de ce phénomène sera traitée sur le modèle réduit du barrage de BENI AMRANE réalisé à l'échelle géométrique 1/100.

-Enfin la troisième partie sera consacrée à l'étude de la « technique du soutirage » qui peut contribuer à augmenter d'une manière très sensible la durée de vie d'un réservoir. Pourtant ce moyen a été mal pratiqué dans l'ensemble des barrages Algériens, sauf dans celui d'IGHIL EMDA qui a enregistré des résultats très encourageants.

La méconnaissance du phénomène des courants de densité et du comportement des vases dans les réservoirs fut la principale cause de cet échec. La résultante a été une augmentation rapide des sédiments dans les réservoirs.

L'utilisation courante de la technique du soutirage influe sur la progression du toit de la vase dans une retenue de barrage, ce qui nous amènera à étudier l'évolution des dépôts de sédiments dans le temps et suivant la hauteur du réservoir.

Enfin, cette méthode devrait être une règle dans les pays arides et semi-arides. Elle peut être améliorée et pratiquée sur l'ensemble des barrages Algériens avec un rendement de soutirage élevé, ainsi que notre présente étude va tenter de l'explicitier.

Première partie:

L'importance du phénomène de l'envasement dans les retenues de barrages

Chapitre I: Ampleur et conséquences du phénomène

Introduction

Dans de nombreux pays du monde, le transport des sédiments dans le réseau hydrographique des bassins versants et leur dépôt dans les retenues pose aux exploitants des barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse. Non seulement la capacité utile est progressivement réduite au fur et à mesure que les sédiments se déposent dans la retenue mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, qui bien souvent exige que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les pays arides et semi-arides. Dans l'un et l'autre cas, il en résulte des dommages considérables à l'environnement et une mise en péril de l'économie du projet.

A titre d'exemple, MADDOK (1969) [10], dans un rapport sur la relation de l'aspect économique avec l'envasement, a déduit que les dommages provoqués par l'envasement des retenues aux Etats Unis avaient coûté la somme de 50.10^6 \$ en 1948.

I.1. L'envasement des retenues de barrages dans le Maghreb

I.1.1. Eau et apports solides

Les pays du Maghreb comme l'Algérie, le Maroc et la Tunisie se caractérisent par la rareté des ressources en eau, rejoignant ainsi l'ensemble des pays arides et semi-arides: le potentiel des eaux mobilisées par 149 barrages n'excède pas 17.10^9 m³ répartis selon le tableau 1 et les figures 1 et 2.

Pays	Nombre de barrages	Capacité (10 ⁹ m ³)	Références
Algérie	98	4,5	[11] [12] [13] [14]
Maroc	33	10	[15] [16] [17]
Tunisie	28	2,4	[18] [19] [20] [21] [22] [23]

Tableau 1- Capacité totale des barrages des pays du Maghreb.

Or ces pays font partie d'une zone montagneuse (tellienne), caractérisée par un climat agressif avec alternance d'années sèches et humides, et des pluies d'automne intenses et dévastatrices pour les sols, d'autant plus qu'elles surviennent à une période où la couverture végétale est réduite ou inexistante et les sols ameublés par les labours.

La conséquence est que d'une part les crues d'automne, violentes et brutales, sont la cause d'une forte ablation, et que d'autre part, le taux d'érosion dans les bassins versants est important. A titre d'exemple, selon les résultats des travaux de HEUSCH B. [24], sur les bassins versants du Maghreb, le taux d'abrasion est de 800 t/km².an, tandis que celui obtenu par la SOGREAH [25] est encore plus important, puisque de l'ordre de 1250 t/km².an.

C'est donc une quantité élevée de matériaux solides qui est transportée annuellement par les cours d'eau jusqu'aux réservoirs des barrages. Or ces trois pays se sont dotés d'une infrastructure hydraulique dont dépend, dans une large mesure, leur développement économique, et qui se trouve ainsi menacée par le phénomène de l'envasement: au moins 100.10^6 m³ de sédiments se déposent chaque année dans les retenues, entraînant une diminution des disponibilités en eau potable et pour l'irrigation. Au total, l'envasement moyen annuel dans les pays du Maghreb est estimé comme suit (tableau 2 et fig. 3):

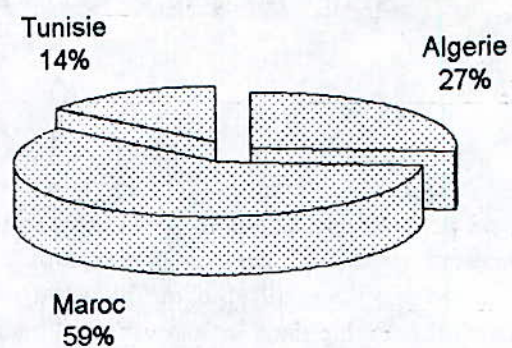


Fig.1- Capacité totale des barrages du Maghreb

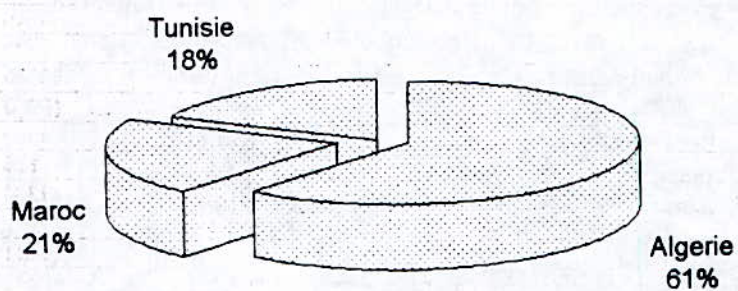


Fig.2- Répartition des barrages dans le Maghreb

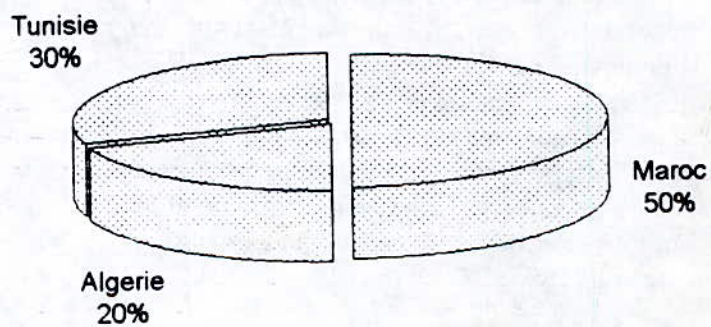


Fig.3- Envasement moyen annuel des barrages du Maghreb

Pays	Envasement moyen annuel (10 ⁶ m ³ /an)	Taux d'envasement annuel (%)
Maroc	50	0,5
Algérie	20	0,5
Tunisie	30	1,0

Tableau 2- Taux d'envasement annuel dans les pays du Maghreb.

Le tableau 3 permet de se faire une idée sur l'importance du mal qui affecte l'ensemble des retenues des barrages.

Barrages	Pays	Année de mise en eau	Capacité Initiale (10 ⁶ m ³)	Surface du bassin-versant (km ²)	Envasement moyen annuel (10 ⁶ m ³ / an)
Al Massira	Maroc	1979	2724	28500	9
Bin el ouidane	Maroc	1953	1484	6400	3,3
Idriss lies	Maroc	1973	1217	3680	2
El Makhabine	Maroc	1979	789	1820	1,8
Mohamed V	Maroc	1967	725	49920	14,5
M.Eddahbi	Maroc	1972	567	15000	4,7
Sidi Salem	Tunisie	1981	555	17730	5,62
S.M.Ben Abdellah	Maroc	1974	493	9800	2,5
Hassan Eddakhil	Maroc	1971	369	4400	1,75
Djorf El torba	Algérie	1934	350	22000	1,30
El Kansera	Maroc	1935	330	4540	1,4
Y.B.Tachfine	Maroc	1973	310	3784	1,1
Ghrib	Algérie	1939	280	23300	3,20
Mellegue	Tunisie	1954	268	10300	5,94
S.M.B.A	Algérie	1978	235	4890	1
Oued El Fodda	Algérie	1932	228	800	2,66
Abdelmoumen	Maroc	1981	216,3	1300	0,2
Erraguene	Algérie	1962	202	-	-
Moulay youcef	Maroc	1970	198	1441	1,4
Lacheffia	Algérie	1965	175,68	575	0,17
Ighil Emda	Algérie	1953	154,8	652	1,60
Zeroud Saad	Tunisie	1982	131	8650	1,163
Nebhana	Tunisie	1965	86,4	855	1,64
Kasseb	Tunisie	-	81,9	101	0,43
Bouhanifia	Algérie	1944	73	7000	0,78
Beni Bahdels	Algérie	1940	63	1016	0,20
Bir M'cherga	Tunisie	1971	53	1398	0,3875
Bakhada	Algérie	1936	37,6 (50,3*)	1300	0,27
Foum El Gherza	Algérie	1950	47	1280	0,80
Ibn Batouta	Maroc	1977	43,6	178	0,49
M.Krim elKhettabi	Maroc	1081	43	780	2,7
Talle Takekoust	Maroc	1953	34,4	1707	1
Zardezaz	Algérie	1936	14,9 (27*)	345	0,25
Sarno	Algérie	1954	22	264	0,12
Hamiz II	Algérie	1935	21	139	0,35
Mefrouch	Algérie	1936	16	90	0,12
Nakhla	Maroc	1961	13	107	0,12
K'sob	Algérie	1940	11,6	1310	0,30
Lakhmess	Tunisie	1966	8	131	0,037
Chiba	Tunisie	1963	7,86	64	0,255
Masri	Tunisie	1968	6,82	40	0,2
Bezirk	Tunisie	1960	6,46	73,84	0,164
Foum El Gueiss	Algérie	1939	3	156	0,03

**Tableau 3- Envasement moyen annuel des barrages du Maghreb.
(par ordre décroissant de la capacité initiale)**

*Barrage surélevé

I.1.2. Dégradation spécifique annuelle des bassins versants

Sur la base de corrélations faites sur l'érosion spécifique et la superficie du bassin versant de 28 barrages situés dans les zones semi arides des Etats Unis (fig. 4) [26], nous avons établi une corrélation entre les mêmes paramètres pour 34 grandes retenues de barrages du Maghreb (fig. 5).

Il apparaît que l'ensemble des points représentant les barrages d'Algérie se situent en dessous de ceux du Maroc et de la Tunisie, ce qui indique que la quantité des sédiments érodés annuellement par kilomètre carré du bassin versant est beaucoup plus faible en Algérie.

Pour compléter cette approche, nous avons représenté sur la figure 6, la relation entre l'érosion spécifique et le rapport débit liquide / superficie du bassin versant: nous constatons que l'allure de la fonction formée par le nuage de points des bassins versants Tunisiens croit beaucoup plus rapidement que celle des pays voisins, ce qui nous amène à conclure que la Tunisie est le pays du Maghreb le plus touché par ce phénomène d'érosion, suivi du Maroc et de l'Algérie.

I.1.3. Quantité de vase déposée dans les retenues des barrages

Pour prévoir et déterminer la quantité de vase qui pourrait se déposer annuellement à l'amont d'un barrage à réaliser, une corrélation a été établie d'une part entre les apports solides annuels et les apports liquides annuels (fig. 7), d'autre part entre l'envasement moyen annuel et la superficie du bassin versant (fig. 8).

Les deux régressions permettent d'estimer le comblement d'une retenue de barrage située dans la région du Maghreb.

I.2. Problèmes posés par l'envasement [27]

Parmi les problèmes que pose l'envasement des retenues de barrages, on peut retenir quatre inconvénients majeurs qui sont la réduction de la capacité, l'obturation des organes de vidange, la sécurité de l'ouvrage, l'envasement des canaux d'irrigation et la dégradation de la qualité de l'eau.

I.2.1. Réduction de la capacité de la retenue

Cette réduction de la capacité de stockage de l'eau est sans aucun doute la conséquence la plus dramatique de l'envasement: chaque année le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue. C'est par exemple le cas des réservoirs « ELEPHANT BUTTE », « H.STRUNK », « LAKE GURNESEY », « LAKE MEAD » et « S.MARTIN », étudiés par PEMBERTON [28] [10] (fig. 9).

TALEB (1987) [29] [2] a donné une idée sur les pertes de capacités de quelques barrages dans le monde dûes à l'envasement [tableau 4].

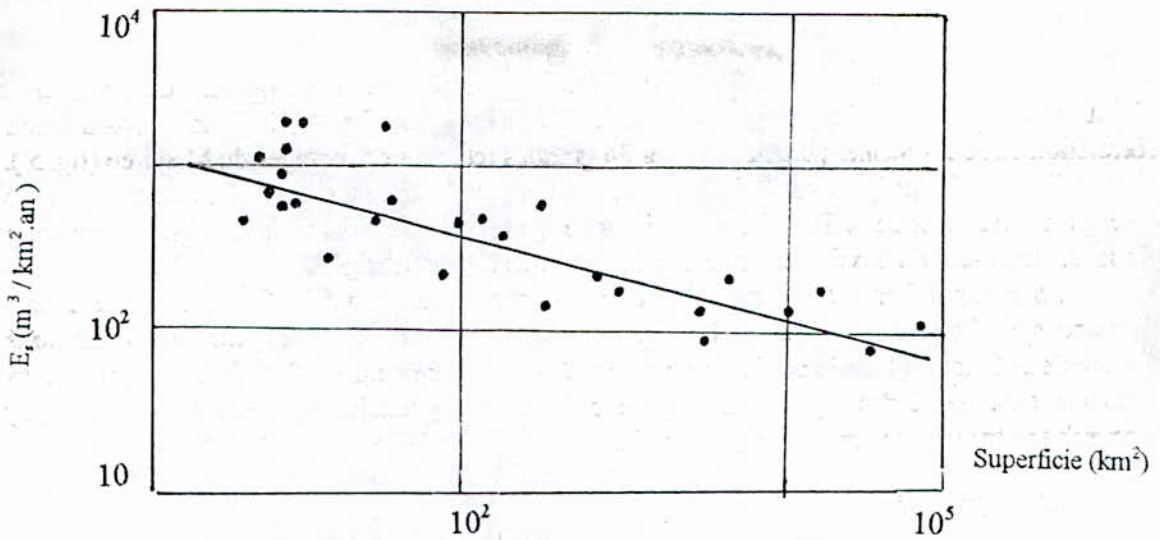


Fig. 4-Variation de l'érosion spécifique (E_s) en fonction de la superficie du bassin-versant (S) (28 barrages dans les zones semi-arides des Etats Unis)

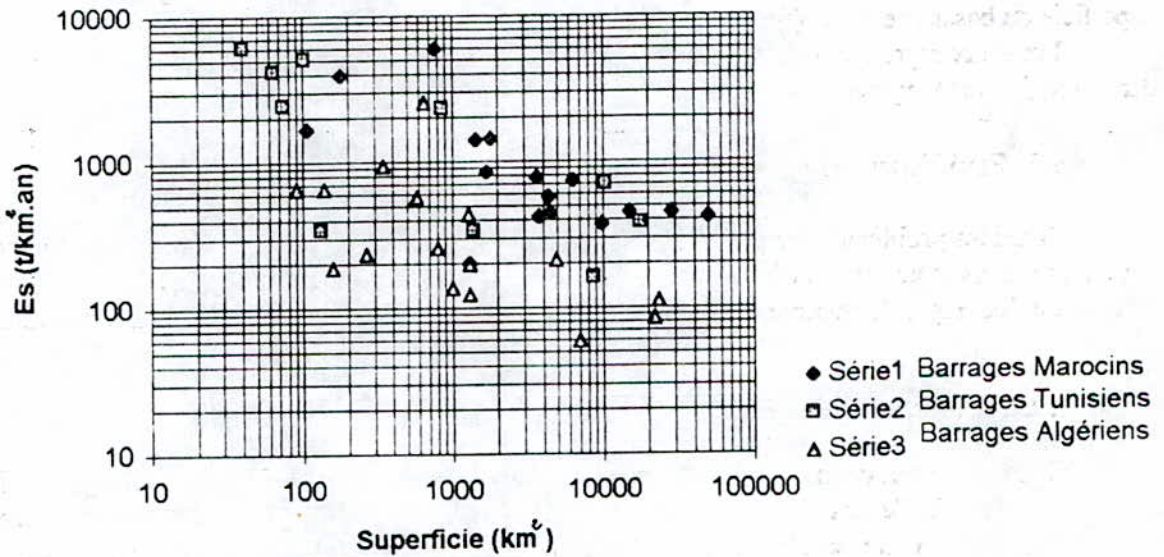


Fig 5-Variation de l'érosion spécifique en fonction de la superficie du bassin-versant (34 barrages du Maghreb)

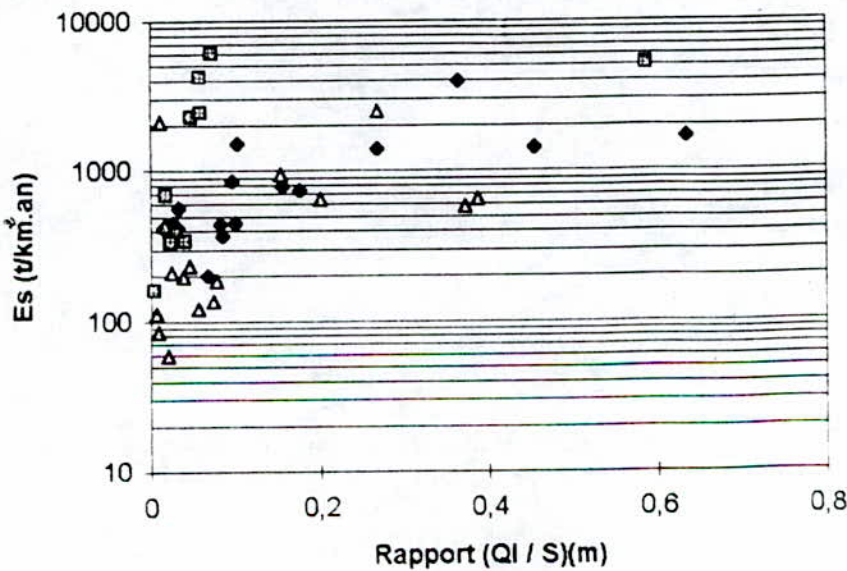


Fig6-Variation de l'érosion spécifique en fonction du rapport: débit liquide/superficie du bassin-versant (Ql/S)

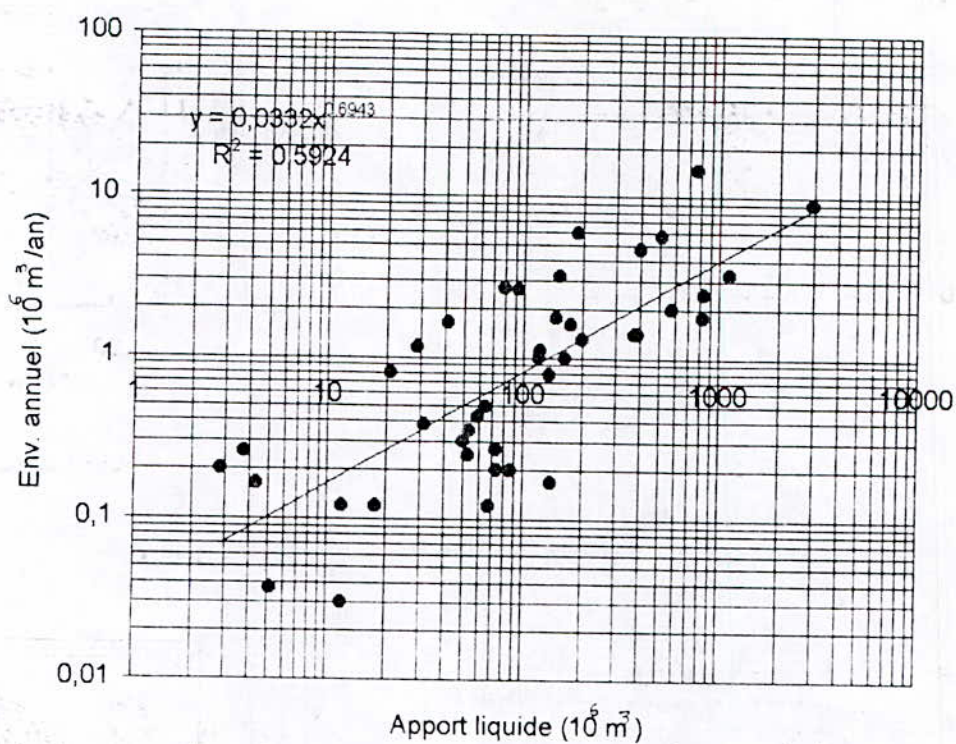


Fig.7- Evolution de l'envasement moyen annuel en fonction de l'apport liquide annuel (barrages du Maghreb)

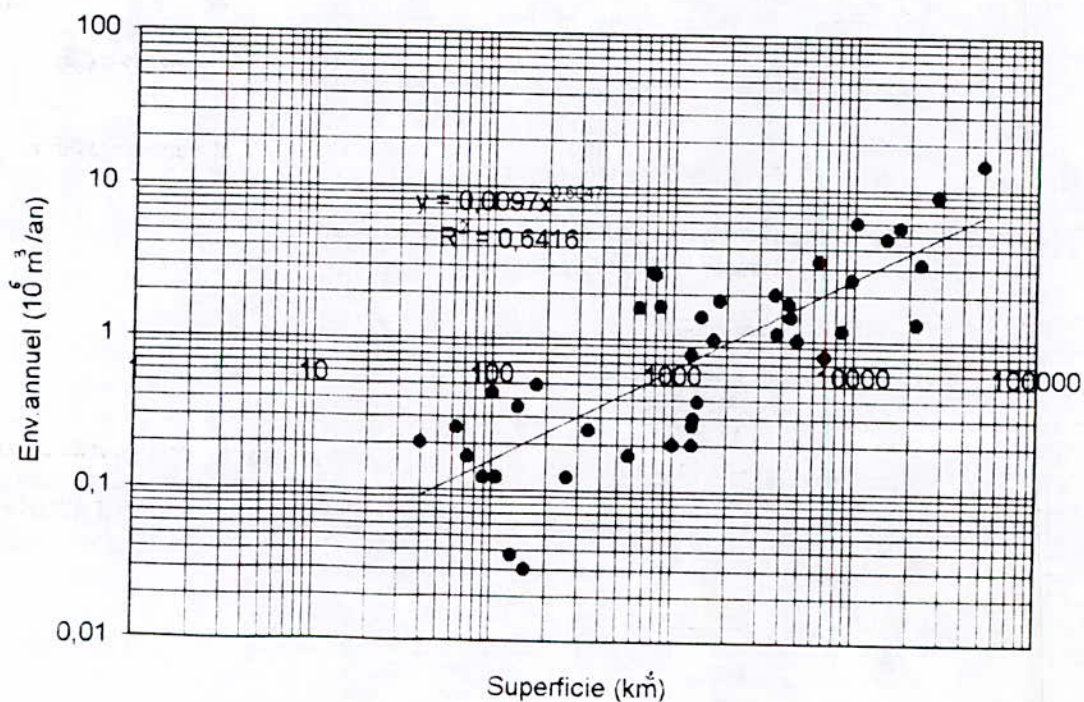
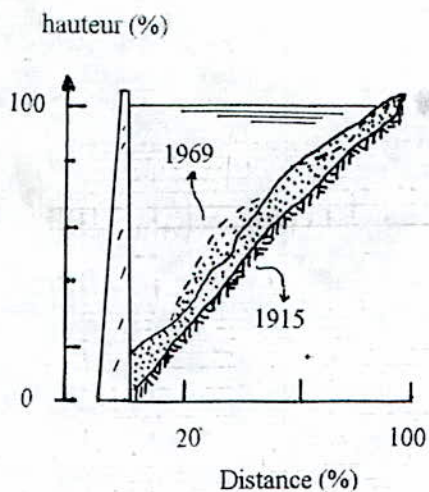
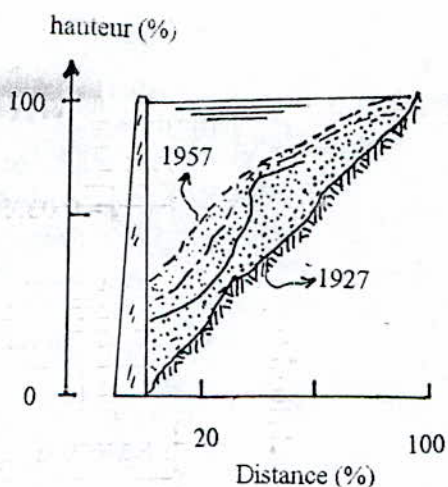


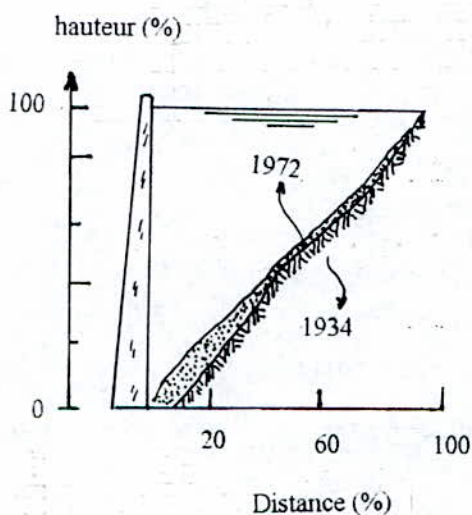
Fig. 8-Evolution de l'envasement moyen annuel en fonction de la superficie du bassin versant (Barrages du Maghreb)



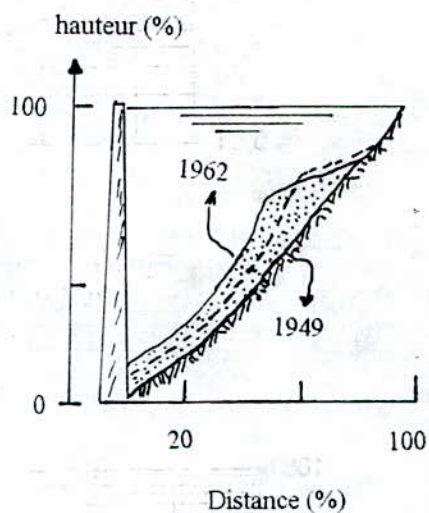
Réservoir Elephant Butte



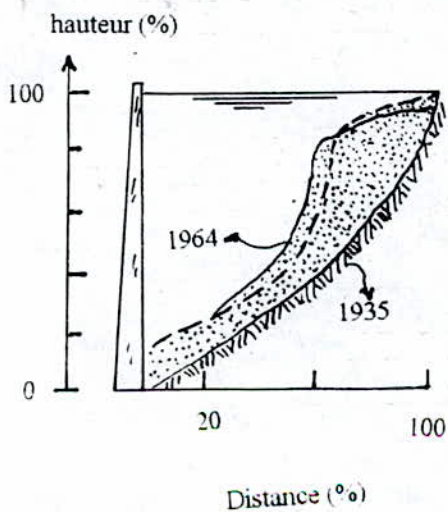
Réservoir strunk lunk



Réservoir Guernsey



Réservoir S.Martin



Réservoir Lake Mead

Fig.9- Evolution du toit de la vase dans cinq réservoirs barrages aux Etats Unis (PEMBERTON (1989))

Pays	Barrages	Capacité initiale (10 ⁶ m ³)	% annuel de perte de capacité
Algérie	K'SOB	11,6	3,5
	CHEURFAS	14,4	2
	FOUM EL GHERZA	47	1,7
	GHRIB	280	1,1
Autriche	BACHENTAL	0,7	3
	BURG	0,24	2,5
Chine	HEISONGLIN	8,6	6,5
Espagne	DONA AL DONZA	23	6,5
	PEDRO MARIN	19	5,9
	LAS TORCAS	8,9	1,9
France	BEAUVOIR	11	3
	ESCALE (DURANCER)	15,7	4,2
Grèce	LAUROS	1	4,3
Inde	TUNGABHADRA	3750	1,4
	NIZAMSAGAR	1050	1,4
	PANCHET HILL	1580	0,7
Maroc	NECKOR	43	6,3
	LALLA TAKERKOUSTE	77	2
	MOHAMMED V	725	2
	IBN BATTOUTA	43,6	1
Etats Unis	LAGUANA (COLORADO ARIZONA)	25	100
	IMPERIAL (COLORADO ARIZONA)	104	11,2
	AUSTIN (COLORADO TEXAS)	39,4	7,35
	BOYSEN (BIG HORN RIVER)	22	6,25
	McMILLAN (N.MEXIQUE)	35	6,1
	ZUNI (ZUNI RIVER)	19,5	3,5
	ALHOGORDO (N.MEXIQUE)	191	2,3
	WORTH (WEST FORTH TRINTY)	58,2	2,3

Tableau 4- Pertes de capacités dues à l'envasement dans certains pays du monde [TALEB 1987]

Nous avons, quant à nous, dressé le même type de tableau de pertes de capacité dans d'autres barrages du monde (tableau 5)

Pays	Barrages	Capacité initiale (10 ⁶ m ³)	% annuel de perte de capacité	Observations	Références
Chine	Sanmenxia	9,64	5,5	Une perte de 55 % de capacité durant les dix premières années d'exploitation.	[30] [31]
Georgie	Lajanuri	25	10,8	Réservoir réduit à 6,1.10 ⁶ m ³ durant les sept premières années.	[32]
Iran	Safidrud	1800	2,35	Une perte de capacité de 42,4.10 ⁶ m ³ /an.	[33]
Inde	Kundah Palam	1,75	6,3	Réservoir réduit à 0,96.10 ⁶ m ³ , soit une perte de 0,11.10 ⁶ m ³ /an	[34]
	Baira	2,4	3,8	Une perte capacité de 0,092.10 ⁶ m ³ /an.	[35]
Soudan	Roseirs	-	-	Une perte de capacité de 40.10 ⁶ m ³ /an.	[36]
	Girba	-	-	Une perte de capacité de 30.10 ⁶ m ³ /an.	[36]
Taiwan	Jensanpei	7	3,4	Une perte de capacité de 0,237.10 ⁶ m ³ / an.	[37]
(ex) U.R.S.S	20 barrages	Les capacités varient de 0,5 à 100	-	Une hauteur de vase de 6 à 31 m s'est déposée durant les 3 à 6 premières années.	[32]
Etats Unis	Lake Austin	-	-	Réservoir comblé durant 13 années.	[38]
	Solomon	-	100	Réservoir comblé dès la première année de sa mise en service.	[38]
Venezuela	Santo - Domingo	3	5,5	Une perte de capacité de 0,167.10 ⁶ m ³ par année.	[39]

Tableau 5- Réduction de capacité suite à l'envasement dans certains barrages

La quantité de sédiments déposés dans les 98 barrages Algériens était évaluée à 560 10⁶ m³ en 1995, soit un taux de comblement de 12,5 %; elle sera de 650 10⁶ m³ en l'an 2000, soit un taux de comblement de 14,5 %. A titre d'exemple, la capacité initiale du barrage de GHRIB (Médéa) était de 280 10⁶ m³ en 1939 et n'était plus que de 109 10⁶ m³ en 1977 [40].

Une projection a été faite pour l'an 2010 [39] [40], d'où il ressort que certains barrages comme par exemple ceux du FERGOUG et des ZARDEZAS finiront par périr si des dispositions radicales ne sont pas prises.

Les barrages de OUED EL FODDA, GHRIB, BOUHANIFIA, K'SOB et FOUM EL GHERZA ne pourront plus garantir les quantités d'eau potable et d'irrigation nécessaires (tableau 6).

Barrages	Capacité initiale (10 ⁶ m ³)	Quantité de vase en 2010 (10 ⁶ m ³)
Fergoug	18	31
Zardezaz	31	37
Oued El Fodda	228	82
Ghrib	280	227
K'sob	11,6	11,1
Foum El Gherza	47	39,5

Tableau 6- Capacités de certains barrages Algériens en l'an 2010.

D'après les études que nous avons menées sur l'envasement des barrages en Algérie, plusieurs procédés de lutte contre l'envasement ont été utilisés. On peut citer le reboisement, l'implantation de réseaux de banquettes de divers types, la création de barrages de décantation, la surélévation des barrages, le dragage des retenues, le soutirage des sédiments par les vannes de fond... [41] [42]. Mais, malgré tous les efforts déployés, l'évolution de l'envasement dans les retenues n'a pas été suivie correctement.

Peu de compagnes de mesure de levés bathymétriques ont été faites, sinon sur des périodes très espacées dépassant parfois la dizaine d'années et sur quelques barrages seulement, la dernière compagnie de mesure des levés topographiques dans 17 retenues de barrages remonte à 1986. La résultante est qu'en 1996, les exploitants des barrages sont obligés d'utiliser des courbes hauteur-capacité non actualisées, avec une diminution de volume considérable, provoquée par les dépôts de sédiments durant dix années d'exploitation.

Nous avons étudié l'évolution de la capacité utile de l'eau en fonction de la hauteur dans les retenues des barrages de DJORF EL TORBA, ERRAGUENE, S.M.B.A, BOUHANIFIA, FOU M EL GHERZA, IGHIL EMDA, OUED EL FODDA, FERGOUG, BAKHADDA, K'SOB et ZARDEZAS.

Le volume utile pour une année donnée est déduit directement par le graphe, ainsi que la différence entre la capacité initiale de la retenue et celle représentant l'envasement de l'année donnée.

a) Barrage de FERGOUG

L'envasement de la retenue du barrage de FERGOUG I (1885-1926) a réduit la capacité utile de 27.10^6 m^3 à 14.10^6 m^3 durant les 31 ans d'exploitation, soit un volume de vase égal à 13.10^6 m^3 (fig. 10 a).

Concernant la retenue du barrage de FERGOUG III, on constate d'après la figure 10 (b et c), représentant l'évolution de la capacité utile en fonction de la hauteur de cette retenue, que le point d'intersection des courbes de vase et de l'eau est monté de la cote 90 à la cote 96, durant la période de 1973 à 1985, ce qui explique que le toit de la vase dans la partie basse de la retenue (près des vannes) est à la cote 90 en 1973 (fig. 11). La capacité utile se trouve ainsi réduite de 17.10^6 m^3 en 1970 à 12.10^6 m^3 en 1973 et à 4.10^6 m^3 en 1985, ce qui représente respectivement un volume de vase de 5 et 13.10^6 m^3 équivalent en définitif à un taux de comblement de 80 % ce qui a amené les services concernés à dévaser le barrage à partir de l'année 1989 par le procédé de dragage (fig. 11).

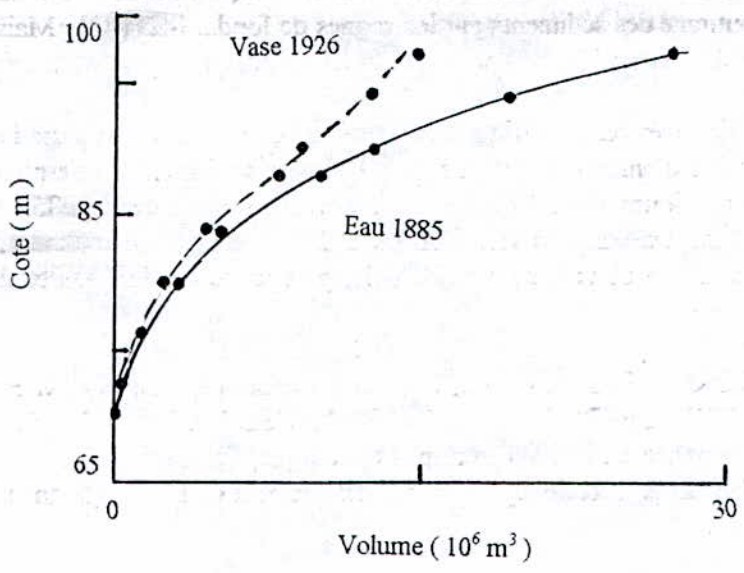
b) Barrage de FOU M EL GHERZA

La sédimentation accélérée de la retenue a été évidente dès le début de la réalisation du barrage, le batardeau amont ayant été complètement comblé en deux ans (1948-1950) (fig. 12); par la suite, elle a provoqué une montée rapide du toit de vase, soit plus de 35 mètres en 40 années d'exploitation.

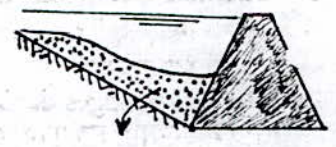
La représentation graphique de la figure 13 montre que les courbes de vase et de l'eau se rencontrent en un point d'intersection situé à une hauteur de 20 mètres, ce qui correspond exactement au profil vaseux de 1986 et représente un volume de vase égal à $18,5.10^6 \text{ m}^3$. Nous estimons la capacité de la retenue en 1995 à 24.10^6 m^3 , soit un comblement de plus de 50 %.

c) Barrage de OUED EL FODDA

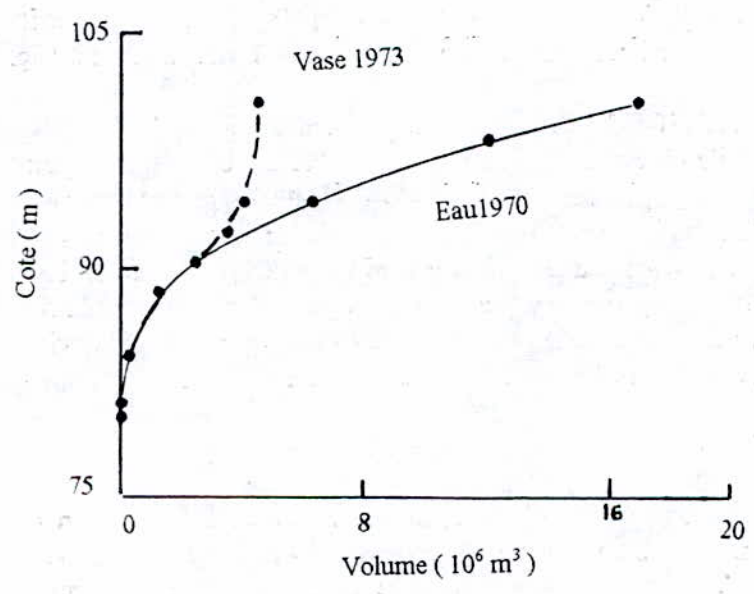
Du fait de l'envasement intensif qui affecte la retenue de OUED EL FODDA, la capacité initiale évaluée à 228.10^6 m^3 en 1932 s'est retrouvée à 130.10^6 m^3 en 1986 (fig. 14 a) et 112.10^6 m^3 en 1994 (fig. 14 b). La figure 15 montre que le toit de la vase près des vannettes est à environ 36 mètres du fond, soit un taux de comblement évalué à 50 % en 1994.



a/ Periode 1885-1926



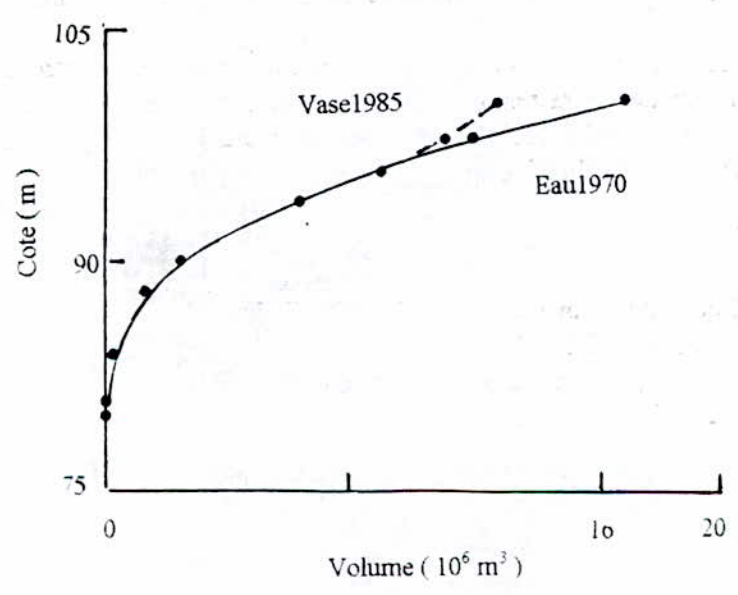
13 10⁶ m³ de vase



b/ Periode 1970-1973



5 10⁶ m³ de vase



c/ Periode 1970-1985



13 10⁶ m³ de vase

Fig.10- Evolution de la capacite de la retenue du barrage de FERGOUG

Retenue du barrage de FERGOUG

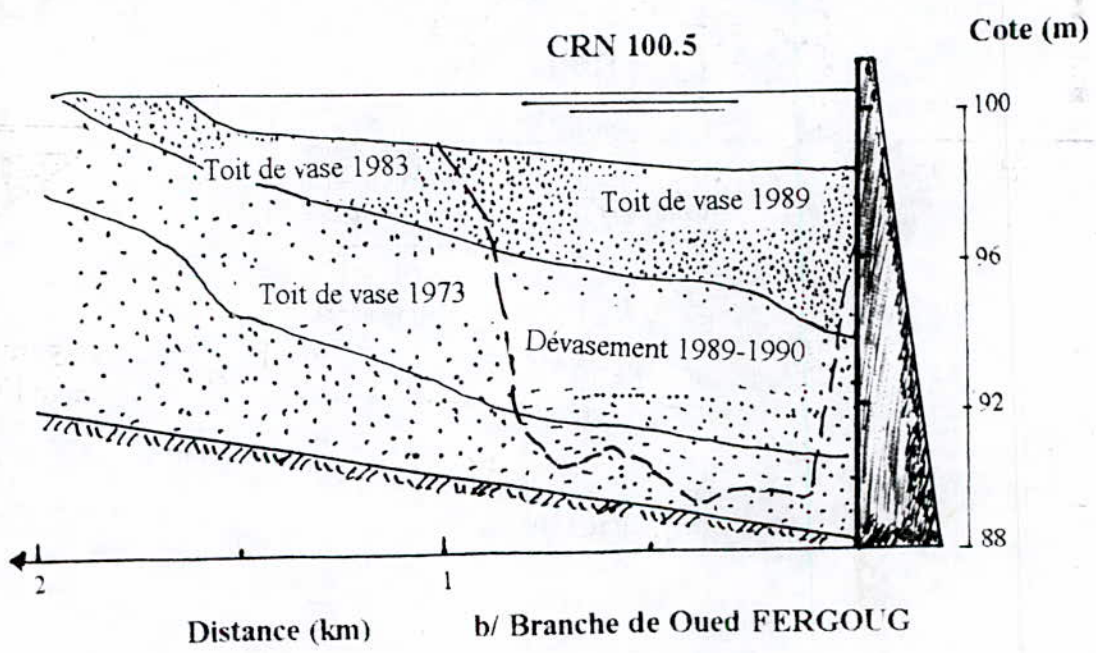
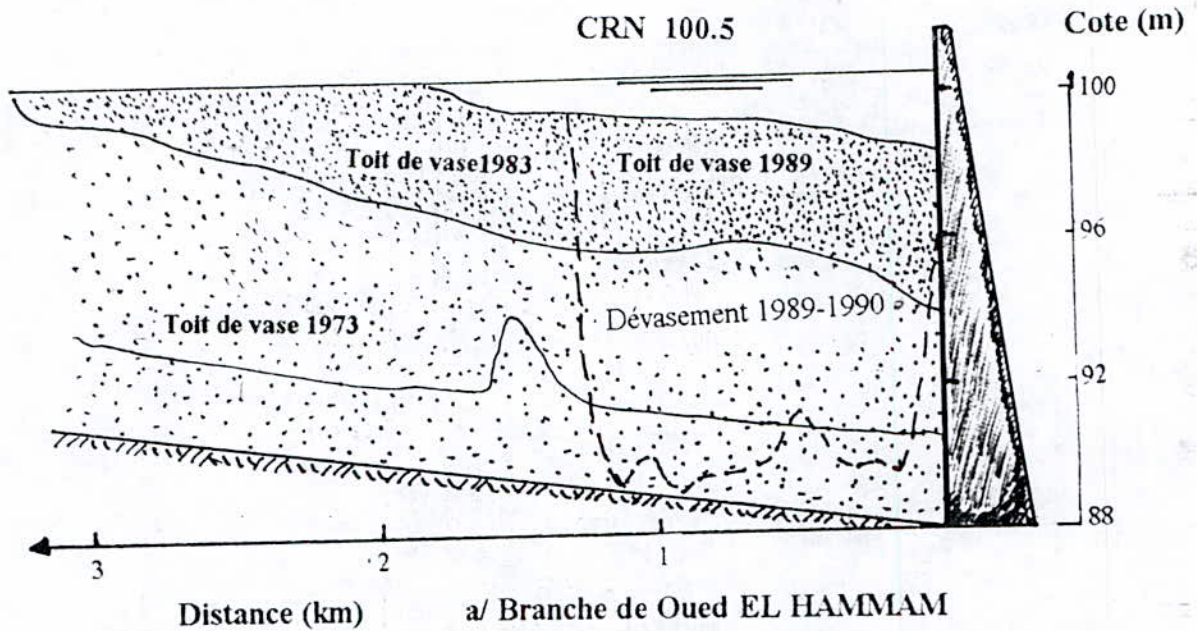
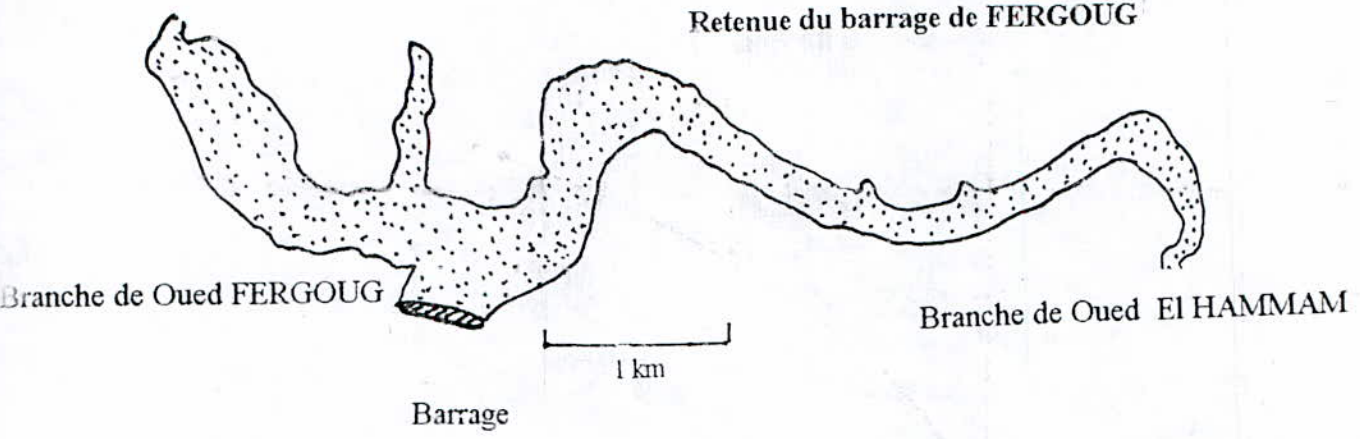


Fig.11 - Evolution du toit de la vase dans la retenue du barrage de FERGOUG

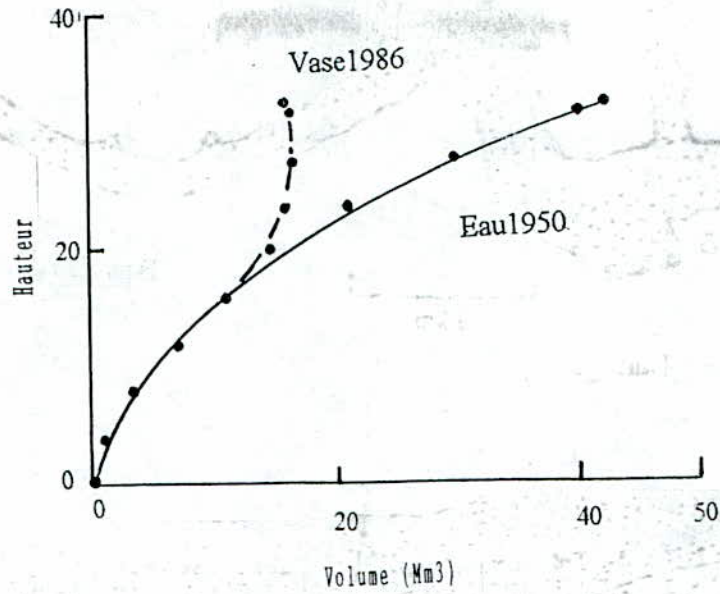


Fig.12- Evolution de la capacité de la retenue du barrage de FOUM EL GHERZA

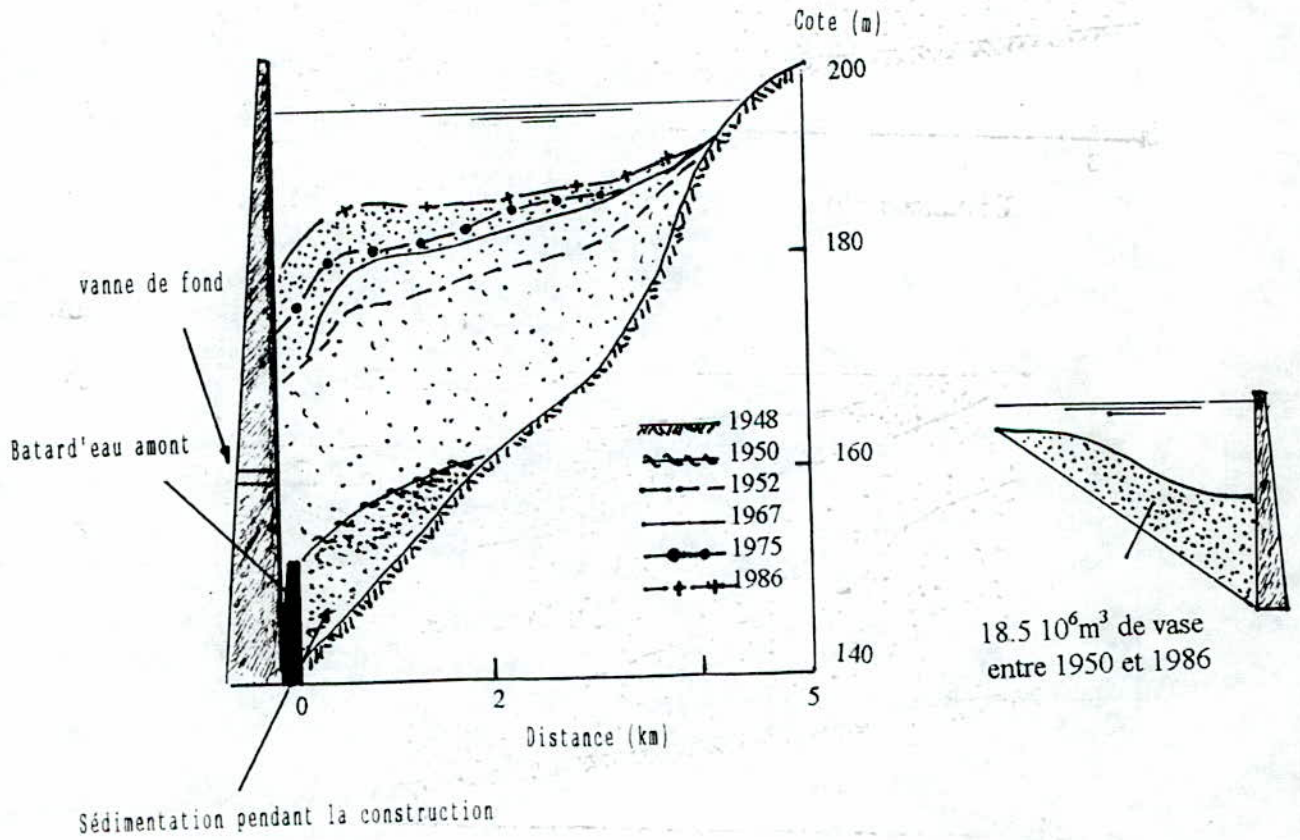


Fig.13- Evolution du toit de vase dans la retenue du barrage de FOUM EL GHERZA

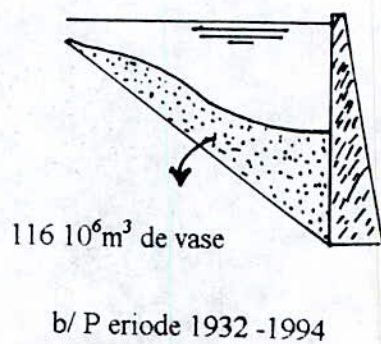
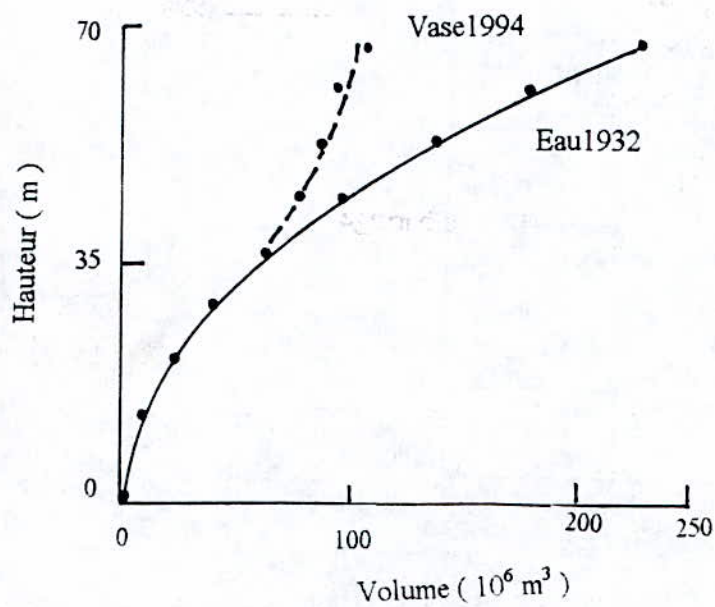
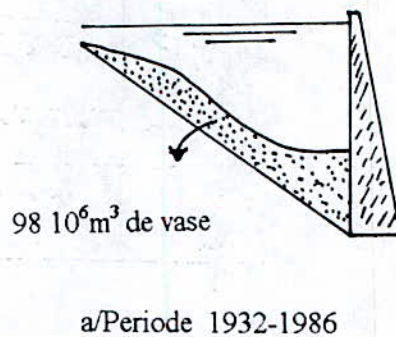
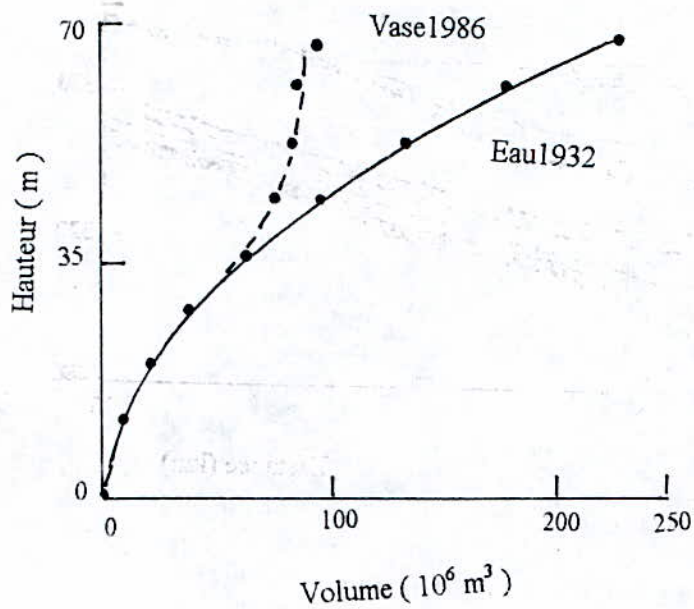
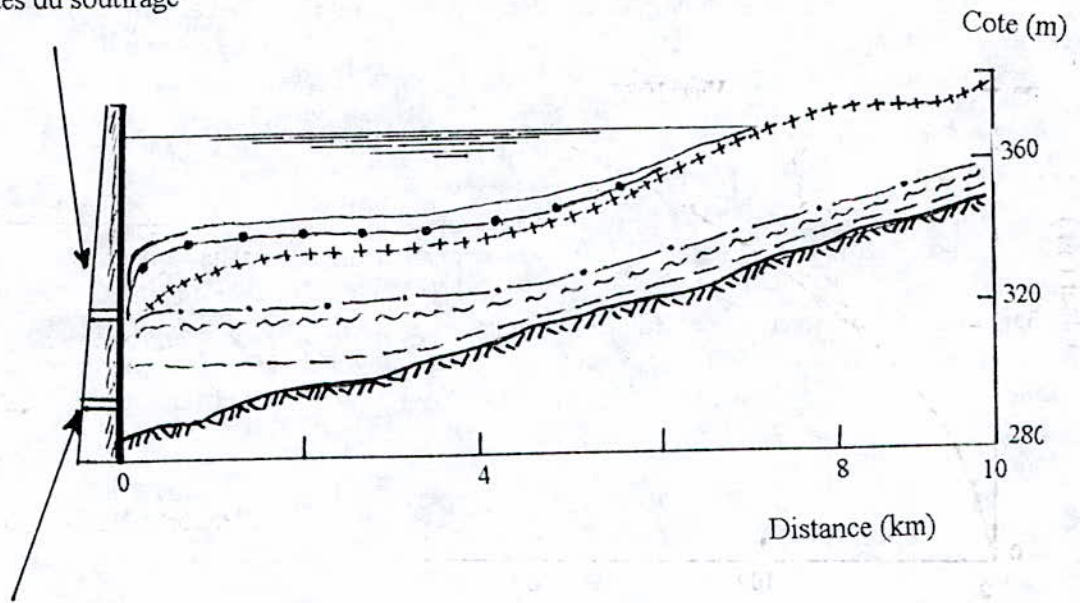
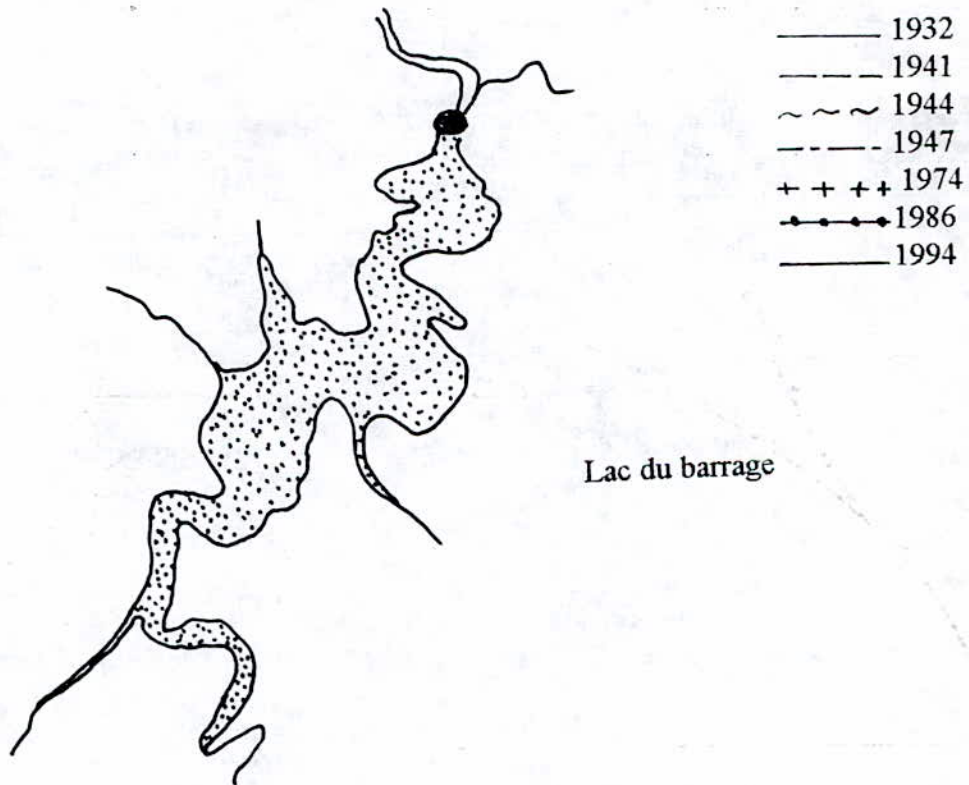


Fig.14 --Evolution de la capacité utile de la retenue du barrage de OUED EL FODDA

Vannettes du soutirage



Vanne de fond obturée en 1948



Lac du barrage

Fig. 15 - Evolution du toit de la vase dans la retenue du barrage de OUED EL FODDA

d) Barrage d'IGHIL EMDA

Comme le montre la figure 16 représentant l'évolution de la capacité utile du barrage en fonction de la hauteur, la capacité est évaluée à 103.10^6 m^3 en 1992, au niveau normal de la retenue (66,5m), soit un taux de comblement de 33 % durant la période 1953-1992.

e) Barrage de BOUHANIFIA

C'est dans le but de réduire la vitesse de comblement et ainsi prolonger la durée de vie du barrage de FERGOUG que le barrage de BOUHANIFIA a été réalisé à l'amont. Malheureusement ce barrage s'est retrouvé face à une sédimentation accélérée qui a réduit sa capacité de 73 à 47.10^6 m^3 durant la période 1940-1986 (fig.17), soit une vitesse moyenne de sédimentation égale à $0,56.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Nous estimons le dépôt des sédiments à 31.10^6 m^3 en 1995, soit un volume d'eau restant de 42.10^6 m^3 et un taux d'envasement de 42 %.

f) Barrages d'ERRAGUENE, BAKHADA, S.M.B.A, DJORF EL TORBA, MEFROUCH, CHEFFIA, SARNO

Les capacités des retenues de faible envasement sont regroupées dans le tableau N° 7. D'après les graphes des figures 18, 19 et 20 représentant l'évolution de la capacité utile des barrages d'ERRAGUENE, S.M.B.A, DJORF EL TORBA, nous constatons que le volume de la vase déposée dans ces retenues est beaucoup plus faible que les précédentes.

Barrages	Capacité Initiale (10^6 m^3)	Capacité en 1986 (10^6 m^3)	Capacité en 1995 (10^6 m^3)	Capacité en 2000 (10^6 m^3)
Erraguene	202	194	191	189
Bakhada	56	45	13	12
S.M.B.A	235	226	215	209
Diorf El Torba	350	316	305	296
Mefrouche	16	10	9	8,5
Cheffia	176	172,5	171	170
Sarno	22	18	17	16,5

Tableau 7- Capacités de certains barrages de faible taux d'envasement

g) Barrages de K'SOB et ZARDEZAS

Par suite de la réduction rapide de leur capacité utile, causée par une montée accélérée du profil vaseux due à une sédimentation importante (fig.21 et 22), les barrages de K'SOB et ZARDEZAS ont été surélevés successivement en 1973 et 1975 afin de prolonger leur durée de vie .

I. 2. 2. Obturation des organes de vidange

Un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement des organes de vidange de fond. Le cas du barrage de OUED EL FODDA (Chleff) peut servir d'exemple: en effet, la vanne de fond a été bloquée depuis 1948 et elle se trouve maintenant sous plus de 40 mètres de vase; toute opération de vidange de la retenue est de ce fait impossible.

Un autre cas à signaler pourrait être celui du barrage de FOUUM EL GHERZA (Biskra) où la vanne de fond a été bloquée de 1982 à 1989 [11] [43].

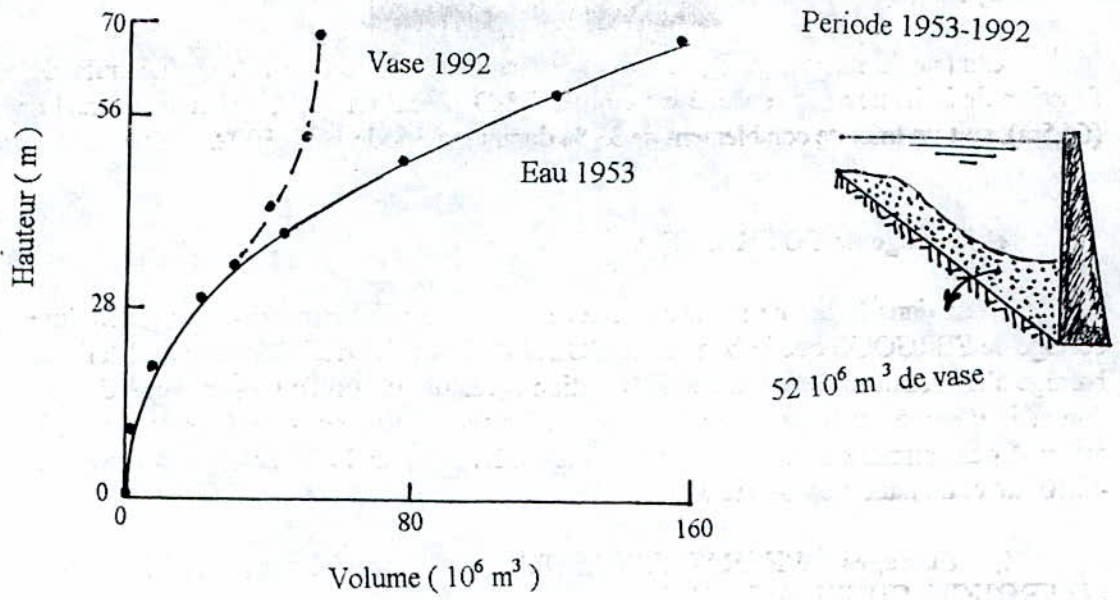


Fig.16 : Evolution de la capacité de la retenue du barrage d'IGHIL EMDA

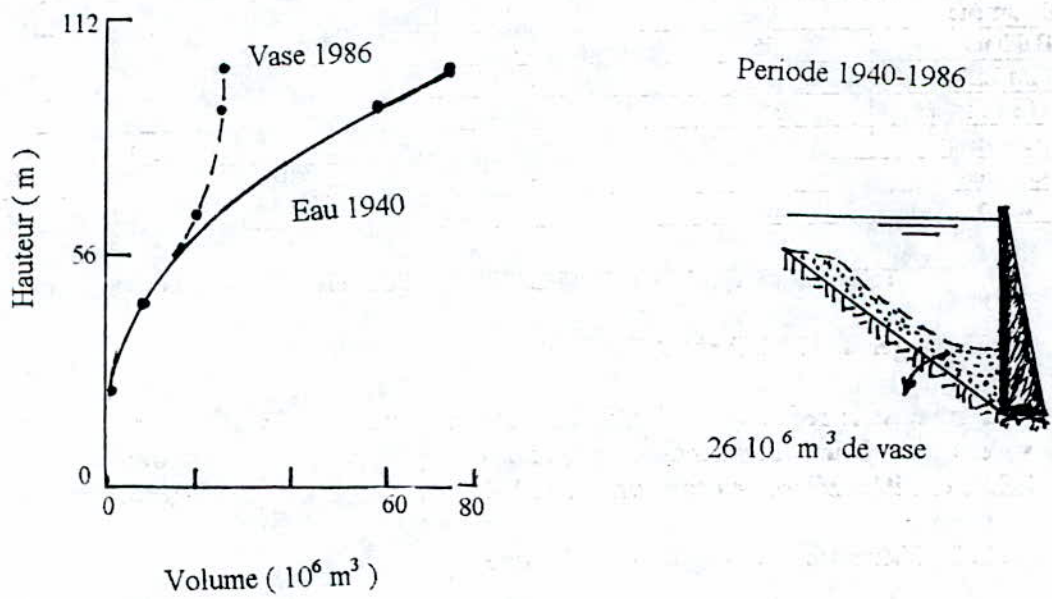


Fig.17 : Evolution de la capacité de la retenue du barrage de BOUHANIFIA

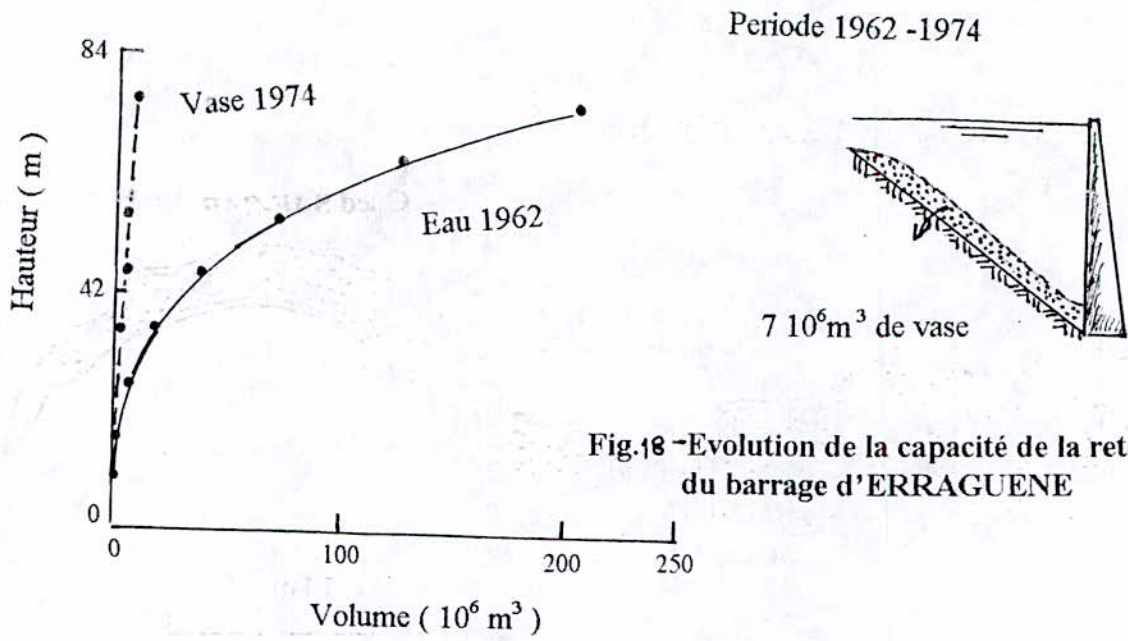


Fig.18 -Evolution de la capacité de la retenue du barrage d'ERRAGUENE

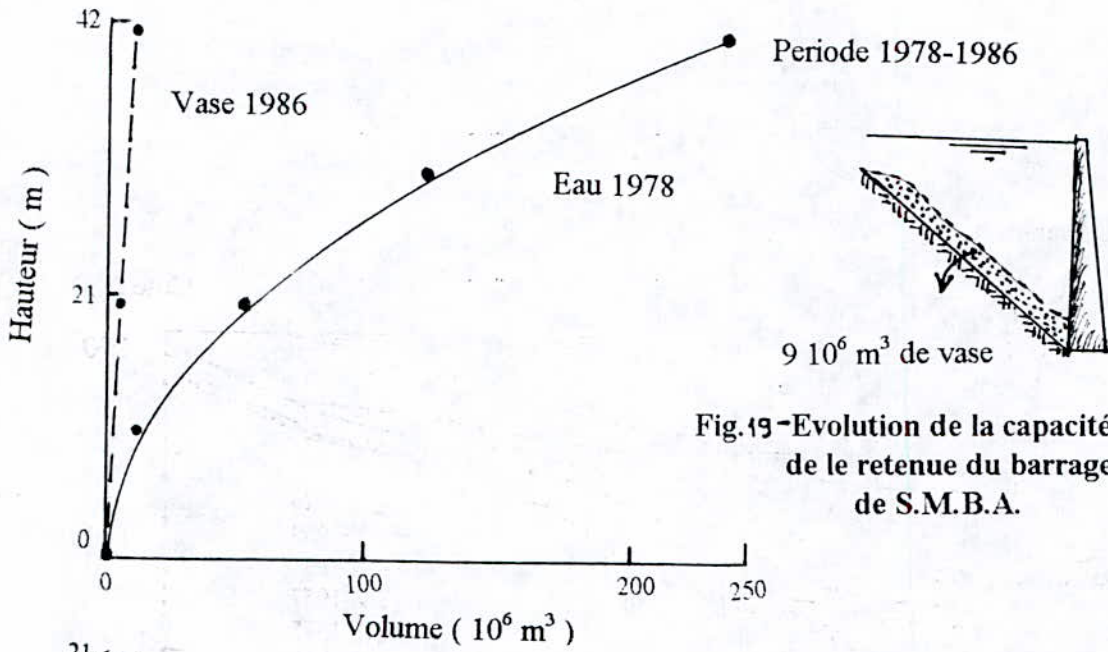


Fig.19 -Evolution de la capacité de la retenue du barrage de S.M.B.A.

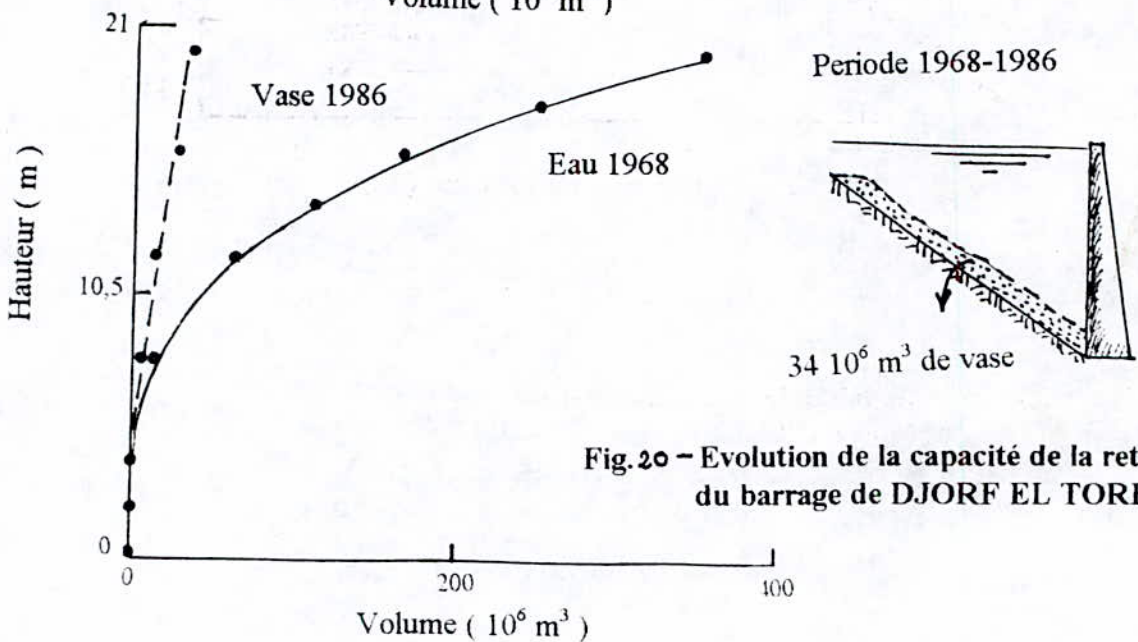


Fig. 20 - Evolution de la capacité de la retenue du barrage de DJORF EL TORBA

Retenue du barrage des ZARDEZAS

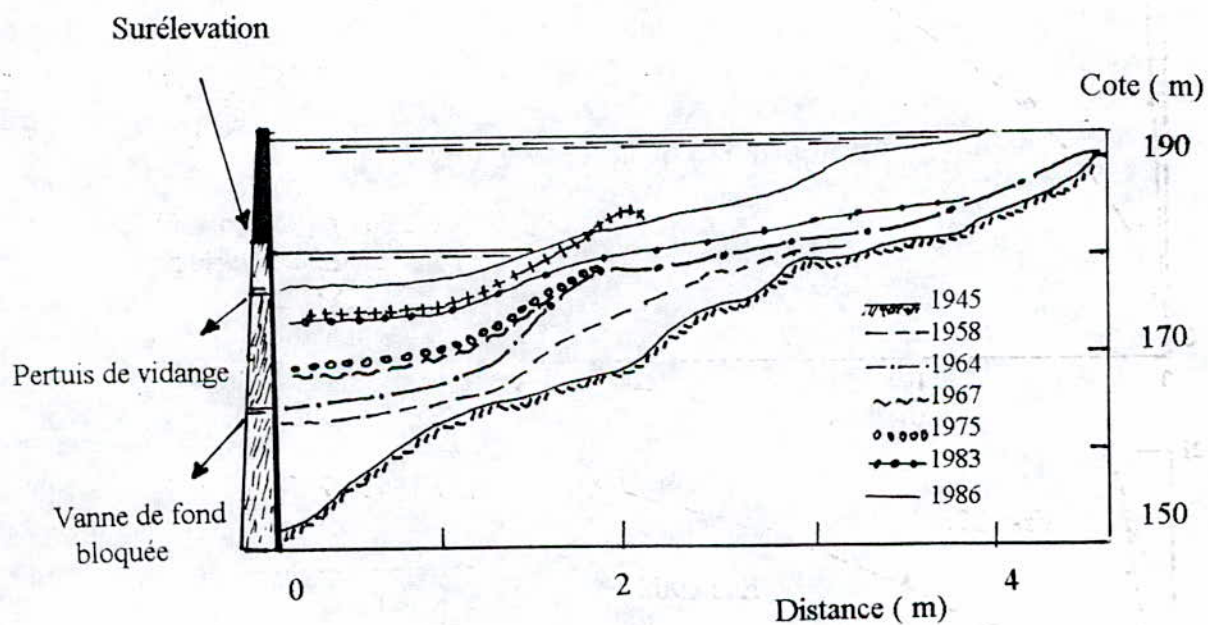
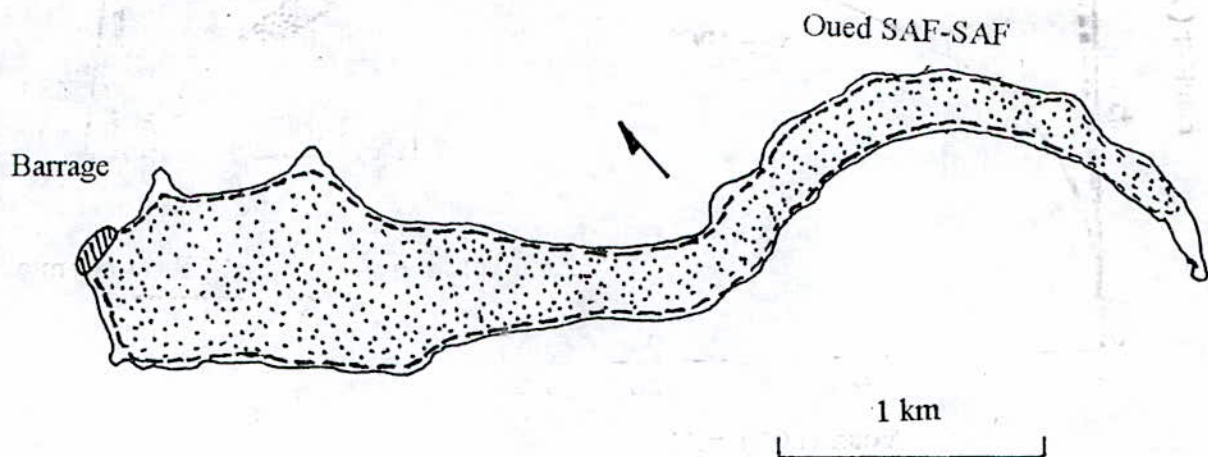


Fig. 21 - Evolution du toit de la vase dans la retenue du barrage des ZARDEZAS

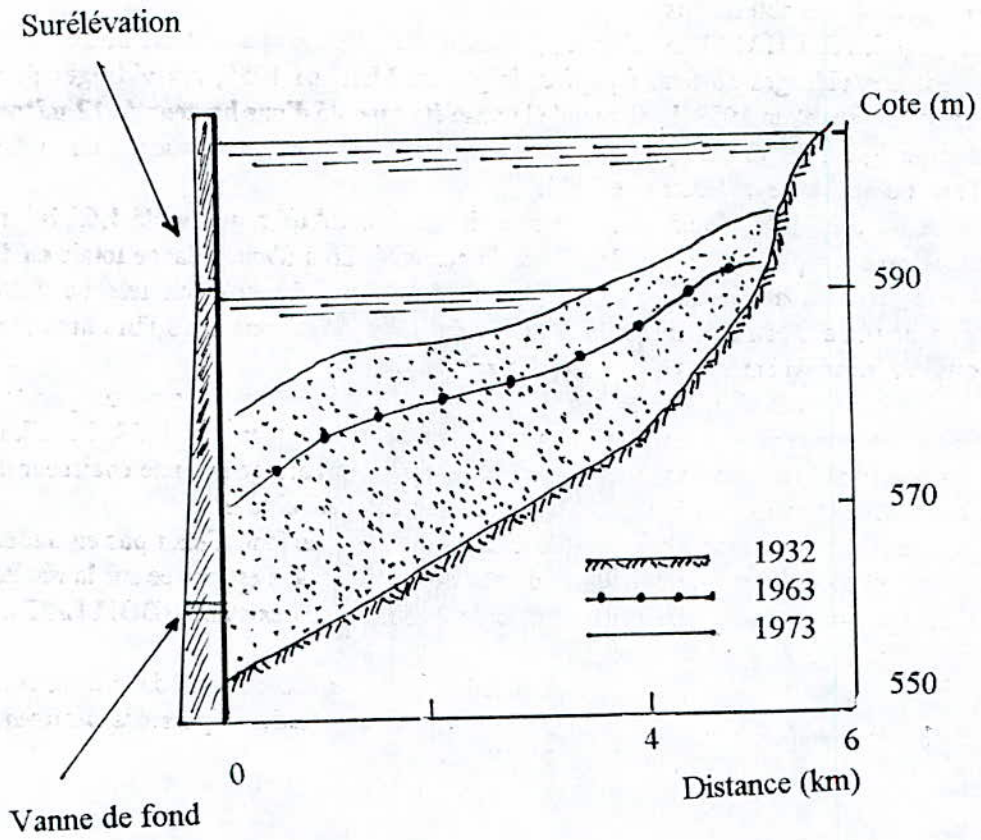
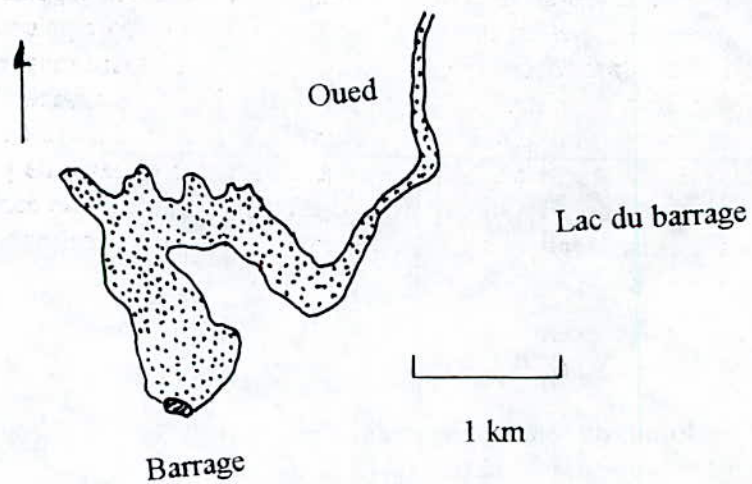


Fig.24 - Evolution du toit de la vase dans la retenue du barrage de K'SOB



Quelques exemples pris en Europe permettent de mettre en lumière quelques techniques adoptées pour lutter contre ces obturations.

- Le barrage poids de CHAMBON (France) [27] achevé en 1935 a une capacité de 56.10^6 m^3 . Il possédait à l'origine des vidanges de fond équipées de grilles. Mais, en 1955, ces vidanges de fond étaient entièrement obturées, et en 1959, le niveau de la vase était monté d'une hauteur de 12 mètres, ce qui représentait un danger pour le barrage. La solution adoptée a été la construction d'une nouvelle vidange de fond qui a été achevée en Décembre 1962.

- La retenue de GRIMSEL (Suisse), d'une capacité de 100.10^6 m^3 a accumulé $1,65.10^6 \text{ m}^3$ de sédiments en 40 ans, ce qui représente moins de 2 % de la capacité. Lors d'une vidange totale en 1973, le niveau de la vase était monté jusqu'au niveau de la prise d'eau. La solution retenue a été de transformer l'ancienne prise d'eau en pertuis de chasse, afin de préserver une zone libre autour de la nouvelle prise installée immédiatement en dessous de l'ancienne [27].

- L'envasement progressif de la retenue de MALVAGLIA (Suisse) met en danger le bon fonctionnement de la prise d'eau. Depuis le premier remplissage de la retenue en 1959, les alluvions transportés par les divers affluents se sont accumulés au voisinage du barrage sur une épaisseur de 10 mètres environ. Dans cette situation 4 à 6 pertuis de la prise d'eau ont été obturés. Etant donné sa position décalée par rapport à la prise d'eau, la vidange de fond n'était pas en mesure de provoquer le dégagement souhaité par une opération de chasse. La solution s'est portée sur la réalisation d'une galerie de purage dans le pertuis inférieur gauche de la prise d'eau existante (BOILLAT J-L., DELLY P., 1992) [44].

-Par suite de l'évolution importante liée au profil en long du toit de vase dans la retenue du barrage du SAUTET (France), et surtout à la consolidation très rapide des dépôts des sédiments, la vidange de fond a été surélevée plusieurs fois (fig.23) [2] [45].

I. 2. 3. Sécurité de l'ouvrage

Indépendamment du problème de la diminution de la capacité du réservoir, l'envasement pose celui de la stabilité de l'ouvrage: on sait que pour une variation linéaire de la hauteur de la vase, la poussée progresse au carré de la hauteur. La densité de la vase peut atteindre 1,6.

A titre d'exemple, pour le barrage des ZARDEZAS, les services concernés ont diminué le volume de l'eau claire de 9.10^6 m^3 en 1990 uniquement pour assurer la sécurité de l'ouvrage: bien évidemment, cela s'est fait au détriment de l'approvisionnement de la population de la ville de Skikda et du périmètre du Saf-saf. Le volume régularisé qui était de 20.10^6 m^3 s'est trouvé réduit à environ 10.10^6 m^3 [46].

Un autre exemple à signaler est celui du barrage de FERGOUG I. La commission chargée de déterminer les causes de la rupture survenue en 1927 a noté dans son rapport: «Avant la rupture, le débit évacué par le déversoir a été si élevé qu'il a du régner près du barrage un courant qui a contrarié la décantation de la vase, de telle sorte que pendant cette période, la partie supérieure de la digue située au dessus des dépôts, était soumise non pas à la poussée de l'eau, mais à celle plus forte, d'un liquide plus lourd dont on n'a pas pu déterminer la teneur en vase, mais d'après les renseignements qu'on possède sur le débit solide de oued El Hammam et d'après les résultats de prélèvement qui ont été opérés les 27 et 28 Novembre, il n'est pas exagéré d'admettre qu'au bord du barrage, l'eau contenait au moins 30 % de vase, ce qui donne pour le liquide exerçant la poussée, une densité voisine de 1,3 [47] . »

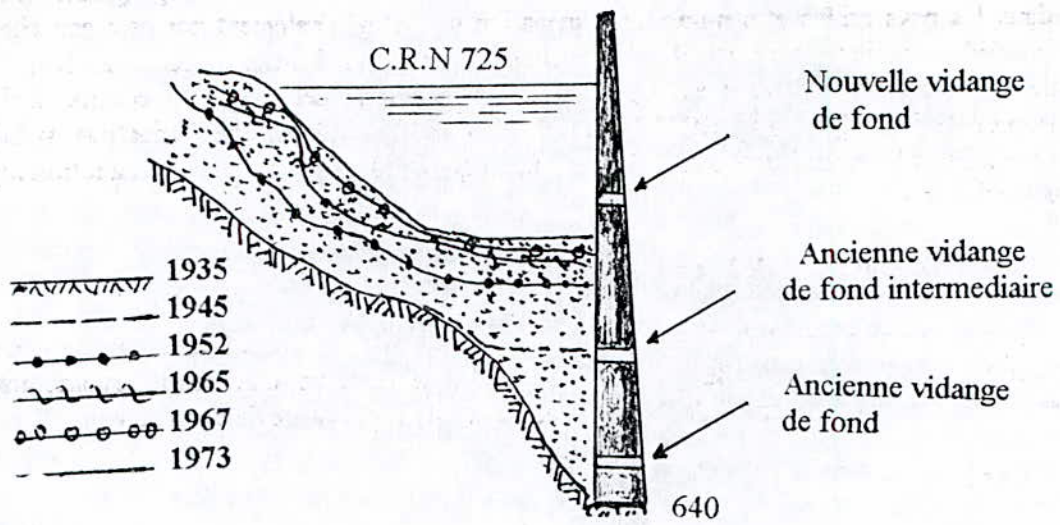
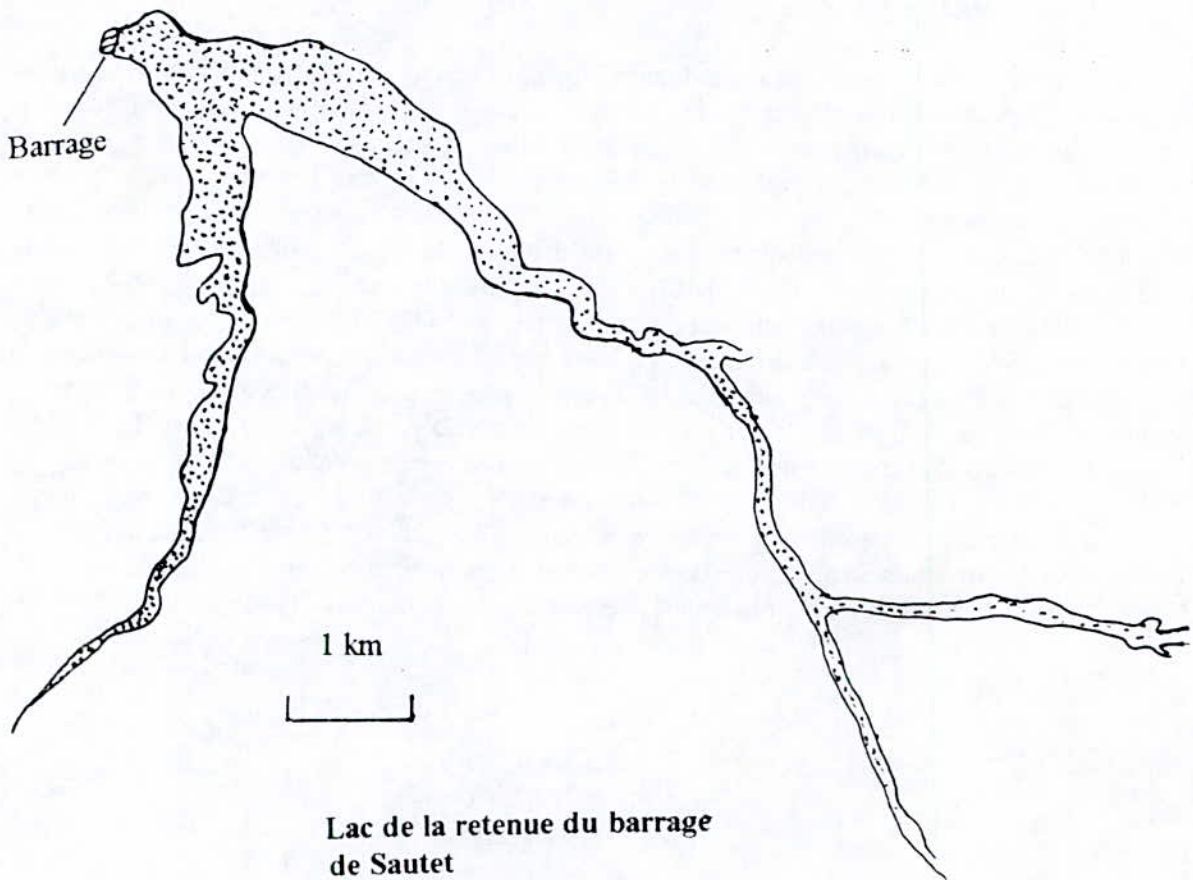


Fig 43 - Barrage de SAUTET (France)
Evolution du toit de vase, causant
ainsi la surélévation de la vidange.



I. 2. 4. Envasement des canaux d'irrigation (Photo. 1)

Le dépôt des sédiments dans une retenue de barrage destinée à l'irrigation, pose le problème de comblement du réseau (des canaux) d'irrigation se trouvant à l'aval du barrage (photo. 2 et 3), en effet dans les pays arides et semi-arides, l'irrigation se fait généralement par de l'eau chargée en sédiments, c'est ainsi que ces particules fines vont se déposer dans les canaux réduisant leurs sections mouillées et bien sûr le débit d'eau véhiculée. Le curage et le nettoyage des canaux devient une opération quotidienne [photo 4]. **BOUVARD M.** (1983) [48] a indiqué que l'irrigation avec de l'eau chargée aux Etats Unis, en Tunisie et au Niger a provoqué le plus souvent une détérioration rapide du réseau d'irrigation.

I. 2. 5. Dégradation de la qualité de l'eau

Les sédiments véhiculent des produits chimiques (nitrates, sulfates...) provenant en particulier des apports en éléments fertilisants pour les cultures, et se déposant dans les réservoirs, entraînant ainsi une dégradation de la qualité de l'eau et favorisant l'eutrophisation de ces réservoirs.

Conclusion

Notre intention était dans cette présentation rapide de donner une idée sur l'ampleur de ce phénomène particulièrement spectaculaire en Afrique du Nord. Il est devenu actuellement une réelle menace pour l'infrastructure hydrotechnique, tant au niveau de la réduction rapide de la capacité utile du barrage qu'à celui de la sécurité de l'ouvrage lui-même. Ce phénomène doit être une partie prenante dans la préparation d'un projet de faisabilité d'un barrage dans l'ensemble du Maghreb.

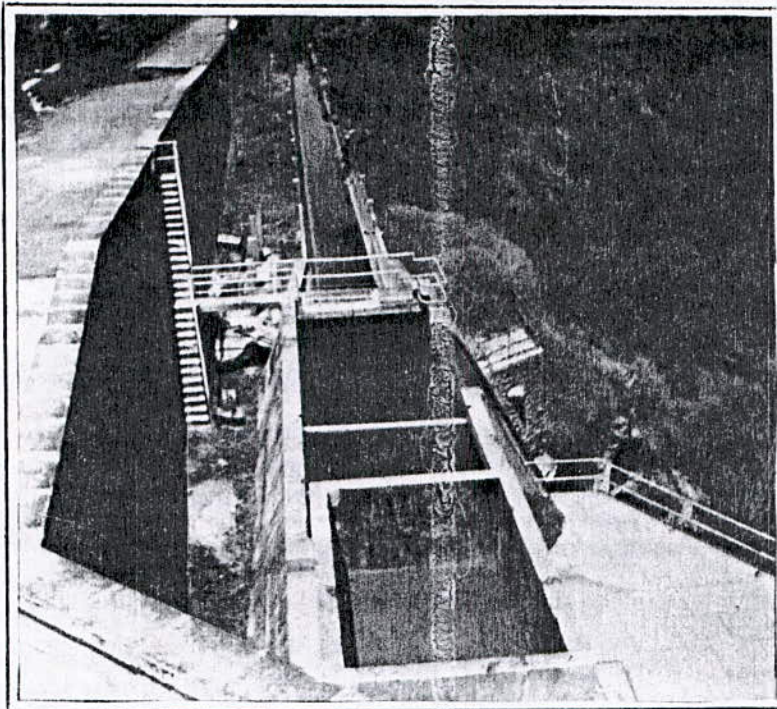


Photo.1 -
Canal d'irrigation
provenant du barrage
des CHEURFAS.

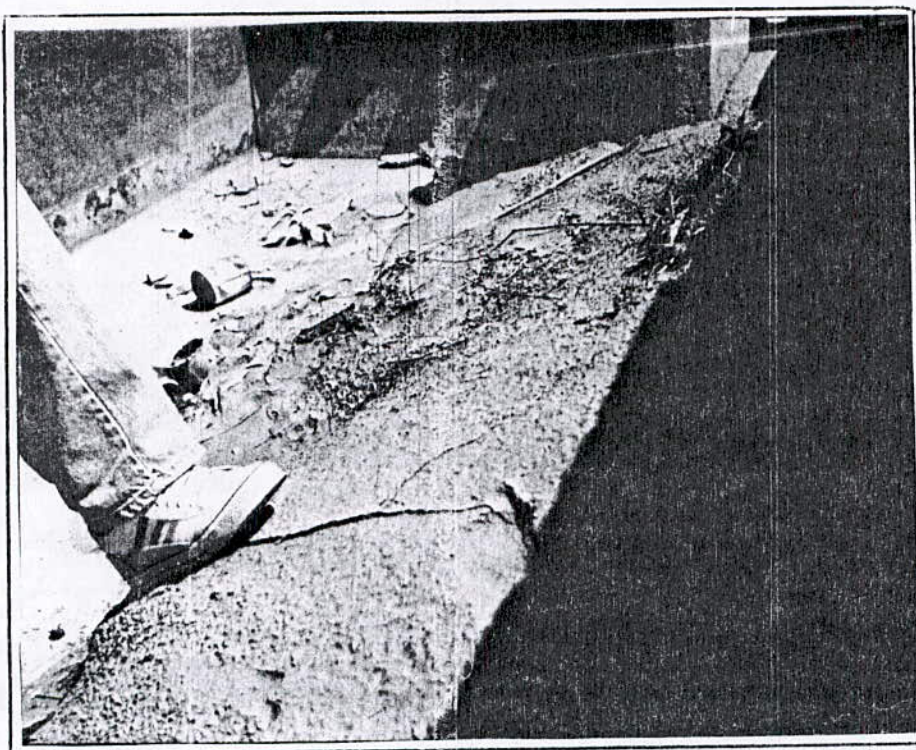


Photo.2 - Fin d'une opération d'irrigation:
une quantité importante de la
vase est déposée dans le canal.

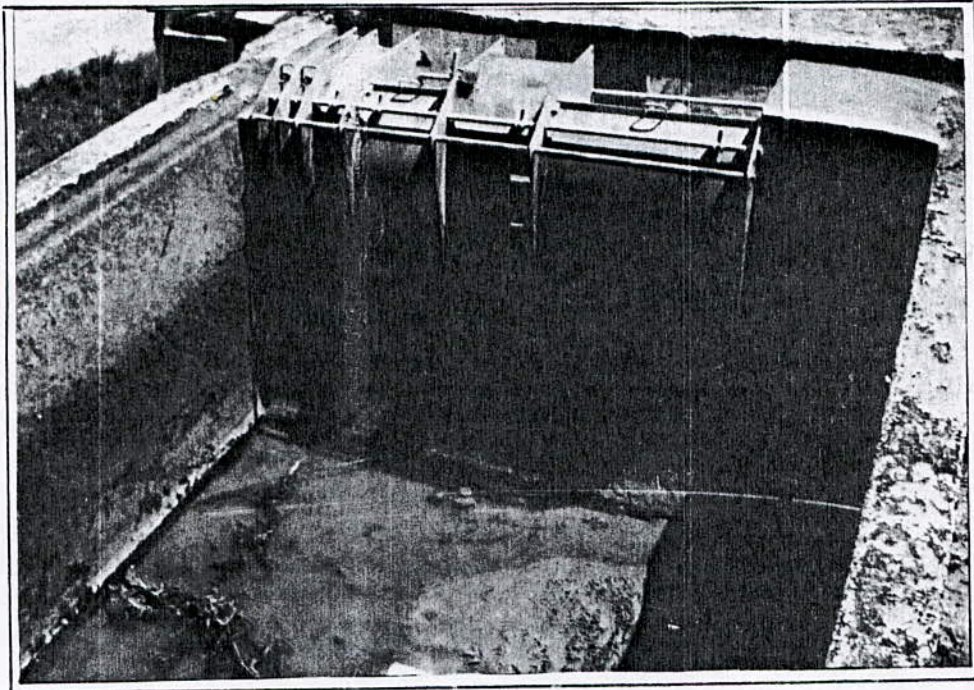


Photo.3- Dépôts successifs des sédiments dans le canal diminuant ainsi la hauteur d'amorçage du siphon



Photo.4- Opération de dévasement de la conduite principale d'irrigation

Chapitre II : Constat de la situation de certains barrages vis à vis de leur envasement

Nous essayons dans ce chapitre d'établir:

-Un constat de la situation de dix barrages vis à vis de leur envasement. Il s'agit des barrages de: BENI AMRANE, HAMIZ, K'SOB, ZARDEZAS, OUED EL FODDA, GHRIB, CHEURFAS I, FERGOUG, FOU M EL GHERZA et ERRAGUENE.

- Un examen des moyens mis en oeuvre par les services concernés pour lutter contre ce phénomène.

II.1. Barrage de BENI AMRANE

II.1.1. Situation et caractéristiques du barrage

Le barrage de BENI AMRANE fait partie du système de Isser -Keddara-Boudouaou-Alger (fig. 24).

L'aménagement est destiné à satisfaire les besoins en eau potable non seulement au grand Alger, mais aussi aux villes se trouvant dans la zone de la Mitidja entre Alger et l'oued Boudouaou.

Le site de BENI AMRANE est situé sur l'oued Isser à environ 40 km de la côte et à 1 km à l'est du village qui porte le même nom. La hauteur du barrage est de 39,5 m. au dessus du lit qui donne origine à une retenue de $15,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de volume (photo. 5 et 6).

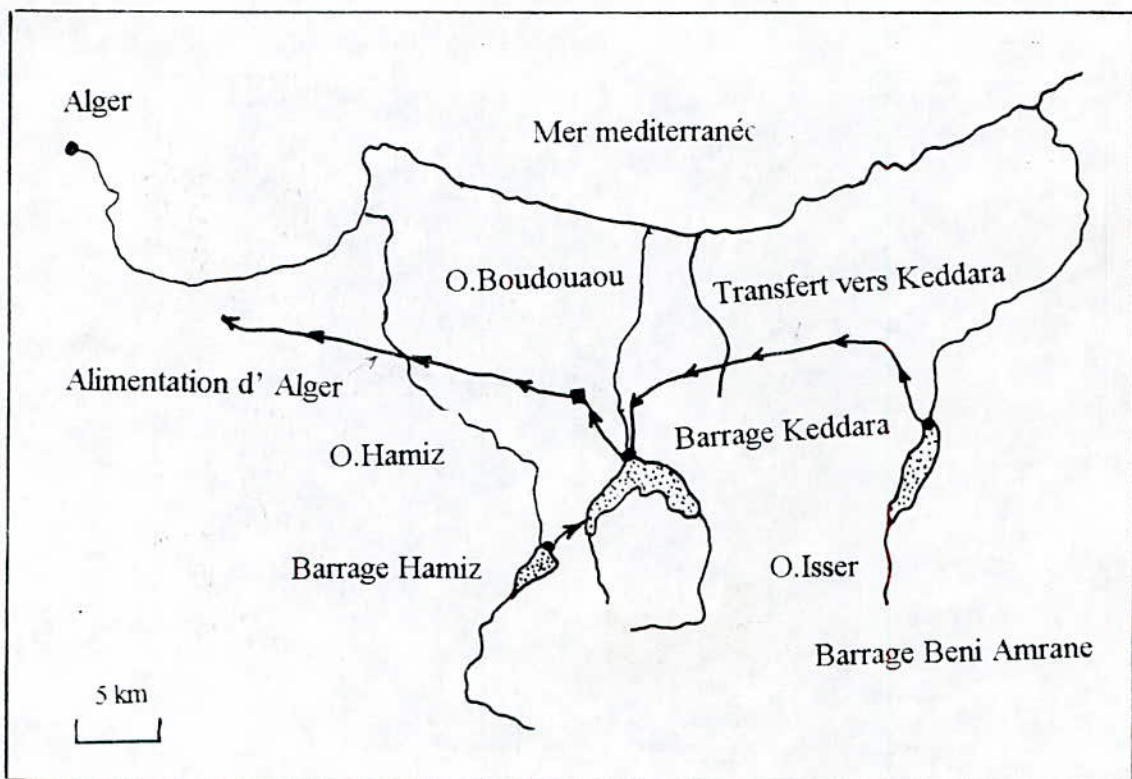


Fig.24-Situation du barrage de BENI AMRANE

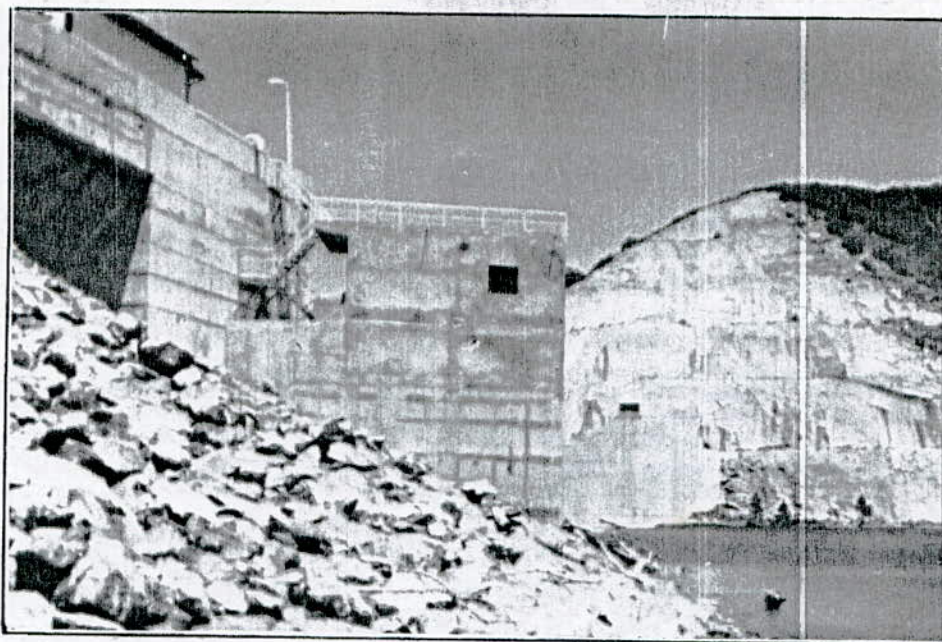


Photo. 5-
Ouvrage du barrage
de BENI AMRANE

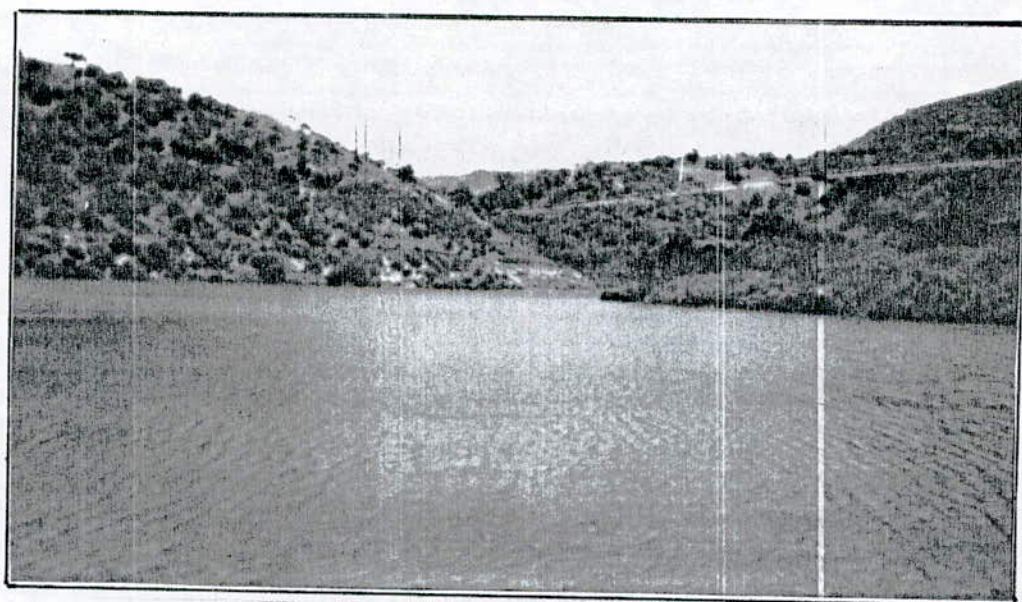


Photo. 6- Retenue du barrage de BENI AMRANE de capacité $15,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

II.1.2. Le bassin versant (photo. 7).

A l'emplacement du barrage de BENI AMRANE, la superficie du bassin versant est de 3710 km², qui comporte une végétation raisonnable essentiellement constituée de broussailles épaisses protégeant une terre végétale légèrement silteuse. Toutefois, plus en amont, la végétation se raréfie et par endroits le ravinement est prononcé, comme par exemple près de Tablat sur le cours supérieur de l'oued Isser.

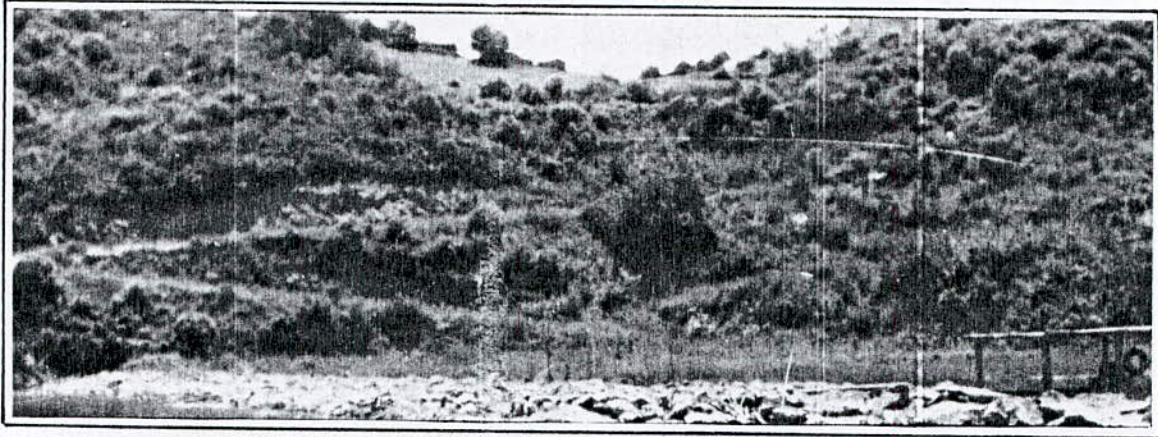


Photo.7-Vue sur une partie du bassin versant amont du barrage de BENI-AMRANE

II.1.3. Rôle de la retenue

La retenue en amont du barrage assure la fonction de bassin de décantation afin que la charge en sédiments dans l'eau transférée à Keddara soit minimale (inférieure à 2 g/l). Une charge de solides importante dans l'eau de transfert diminuerait la durée de vie de la retenue de Keddara et de la station de pompage de Beni Amrane. La retenue permet en outre la régularisation de l'écoulement de l'oued Isser et porte l'accroissement de la quantité d'eau transférée à Keddara pour une capacité donnée de pompage.

II.1.4. Les apports

a) Les apports liquides

L'irrégularité des débits de l'oued Isser est assez considérable, soit au cours de l'année, soit d'une année sur l'autre, avec souvent une série d'années humides puis une série d'années sèches (fig.25). En résultat de l'accroissement de la superficie du bassin versant entre Lakhdaria et le site du barrage, les débits augmentent d'environ 5 % et ainsi le débit annuel moyen à Beni Amrane est de $396.10^6 \text{ m}^3 \times 1,05 = 414.10^6 \text{ m}^3$.

Au cours de l'année hydrologique (Septembre-Août), 90 % de l'écoulement total sont véhiculés pendant la saison humide (dont 57 % pendant les mois de Janvier, Février) et 10 % pendant la période sèche dans les mois de Juin, Juillet et Août le débit est pratiquement nul (fig. 26).

Les crues de l'oued Isser sont fortes et ne durent pas longtemps. La crue maximale enregistrée à Lakhdaria à 26 km en amont de Beni Amrane est de 2520 m³/s.

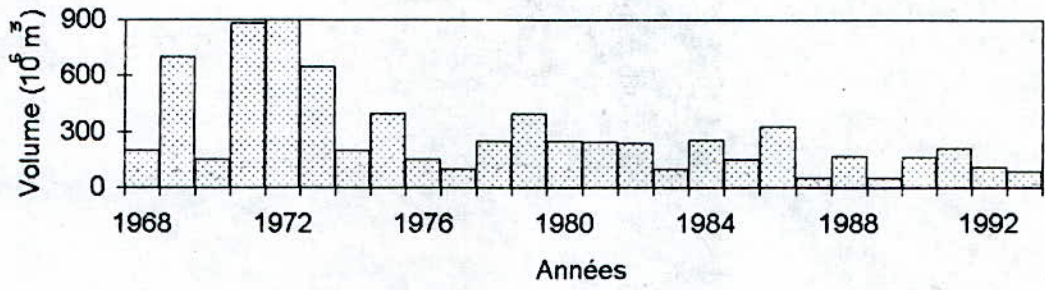


Fig.25- Variations annuelles des apports liquides de l'oued Isser (station de Lakhdaria)

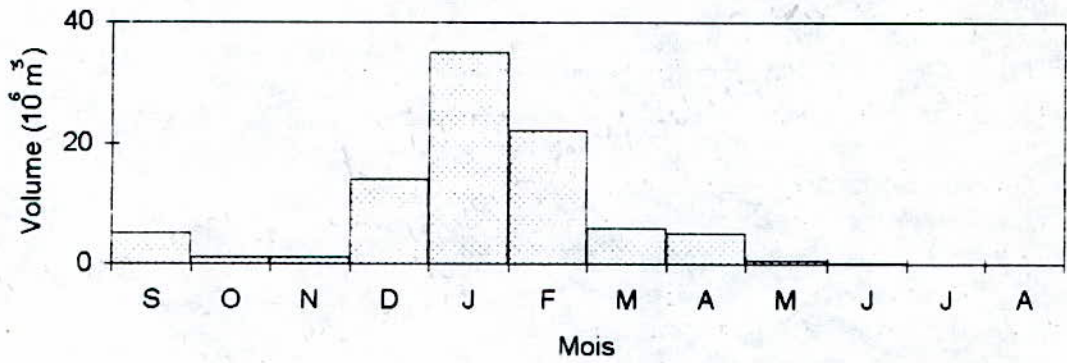


Fig.26- Variations mensuelles des apports liquides de l'oued Isser (station de Lakhdaria période de 26 ans)

b) Les apports solides

L'oued Isser d'une pente moyenne de 4m/km transporte une eau fortement chargée en solides, constituée de limons et de sables fins de concentration allant jusqu'à 265 g/l en période de crues (photo.8). Les pluies d'automne (Septembre, Octobre, Novembre) provoquent dans l'oued une forte concentration en particules solides (fig. 27).

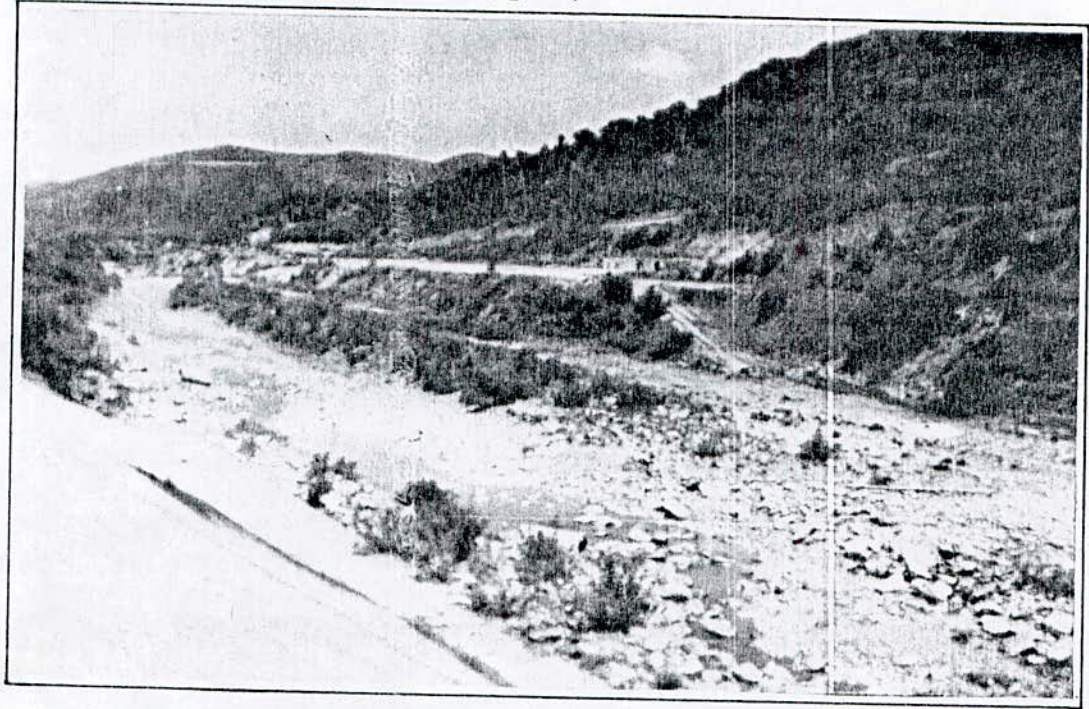


Photo.8-Oued Isser débouchant dans la retenue du barrage de BENI AMRANE, draine une quantité importante des sédiments

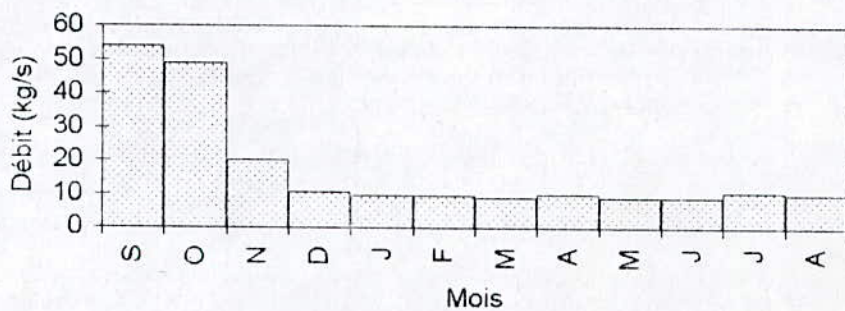


Fig.27- Variations mensuelles moyennes du débit solide dans l'oued Isser (période de 20 ans)

II.1.5. Envasement de la retenue

En l'absence de levés bathymétriques, le volume des sédiments accumulés dans la retenue est calculé par la relation (1) :

$$W_{SD} = W_{Se} - W_{SS} \dots\dots\dots(1)$$

avec,

$$W_{Se} = E_s \cdot T_e \cdot S_b \dots\dots\dots(2)$$

volume (estimé) de sédiments apportés par l'oued dans la retenue pendant « T_e » d'années.

$$E_s = 178 \text{ m}^3 / \text{km}^2 \cdot \text{an} \quad , \quad S_b = 3700 \text{ km}^2 \quad , \quad T_e = 5 \text{ an}$$

$W_{SS} = 1,32 \cdot 10^6 \text{ m}^3$; volume de vase chassée par les vannes de fond durant cinq années d'exploitation.

D'où : $W_{SD} = 1,97 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit un taux d'envasement égal à $0,39 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{an}$.

+ Ce résultat est justifié par une étude menée par le bureau d'étude **BENIE** et **PARTENERS W.S ATKINS INTERNATIONAL**; le dépôt dans la cuvette du barrage par la simulation du programme SABA sur sept années était formé de 38 % de sable et de graviers équivalent à un taux moyen d'accumulation de $0,37 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{an}$ [49].

II.1.6. Moyens de lutte contre l'envasement

Pour réduire la sédimentation de la retenue afin de permettre à la station de pompage de transférer de l'eau faiblement chargée vers le réservoir de KEDDARA, le barrage de BENI AMRANE a été doté de six vannes de fond (photo. 9).

Environ $1,32 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de vase ont été évacués durant la période 1988-1993, ce qui augmentera la durée de vie du barrage (40 ans au lieu de 23ans).

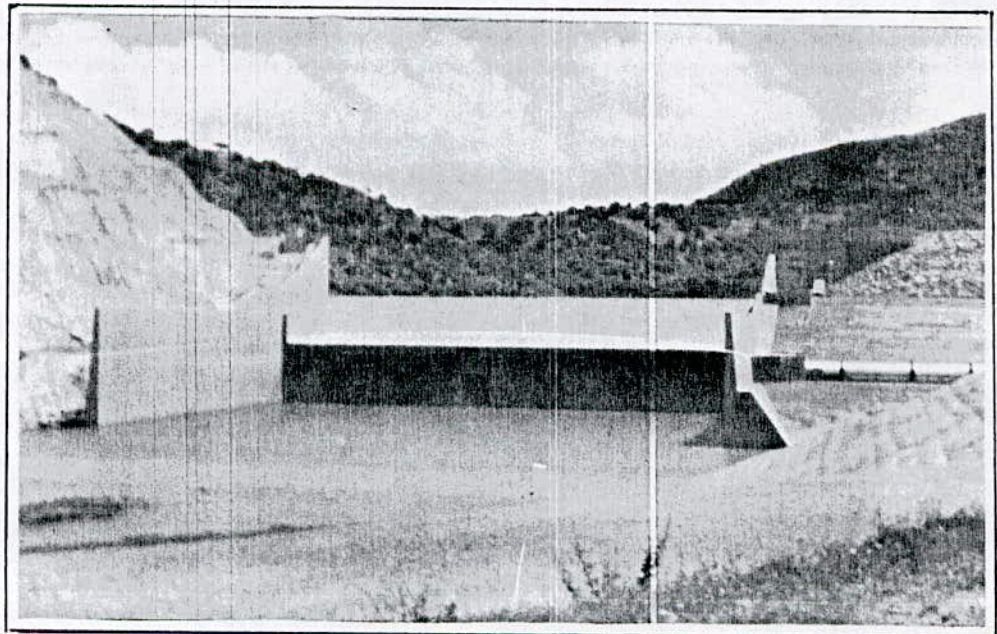


Photo.9-Barrage de BENI AMRANE équipé d'un système de six vannes de chasse

II.2. Barrage de HAMIZ

II.2.1. Situation et caractéristiques du barrage

Le barrage du HAMIZ utilisé principalement pour l'irrigation de la Mitidja, est situé dans la wilaya de Boumerdes à 35 km au sud-est d'Alger, mis en service en 1879 ce barrage a été surélevé en 1935 pour atteindre une hauteur de 45 m (photo. 10).

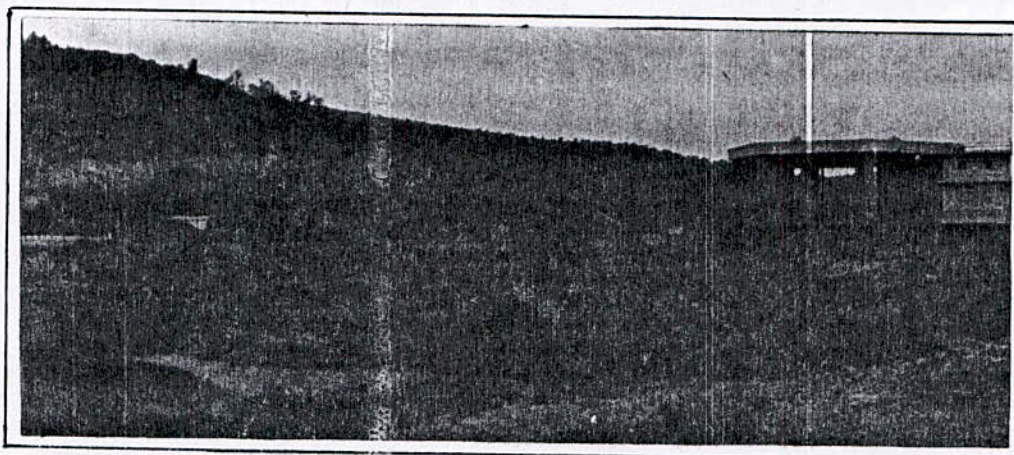


Photo.10-Vue générale du barrage du HAMIZ

II.2.2. Le bassin versant (fig. 28).

La superficie du bassin versant en amont du barrage de Hamiz est de 139 km² avec une longueur de 16 km environ et une altitude maximale de 1140 m. Ce bassin est constitué en quasi totalité par des affleurements marneux et comprend trois terrains principaux: le Flysch alboaptien, le Sénonien formé de marnes avec lentilles calcaires et le flysch de l'éocène supérieure [50]. Ces terrains peuvent s'ils ne sont pas protégés, se dégrader sous l'action des pluies et libérer un stock important de sédiments dont une partie se dépose dans la retenue.

Les précipitations atteignent en moyenne 850 mm par an sur le bassin versant. Les écarts pouvant être compris entre 550 mm et 1400 mm. Les pluies sont particulièrement abondantes de Novembre à Février où elles dépassent 100 mm par mois. La saison sèche s'étend de Juin à Septembre (fig. 29).

II.2.3. Les apports

a) Les apports liquides

Les apports liquides dans la retenue sont en moyenne de 52.10^6 m^3 /an et peuvent varier d'une année à l'autre entre 20.10^6 m^3 et 100.10^6 m^3 .

b) Les apports solides

Les apports solides dans la retenue sont évalués à $0,27.10^6 \text{ m}^3$ /an.

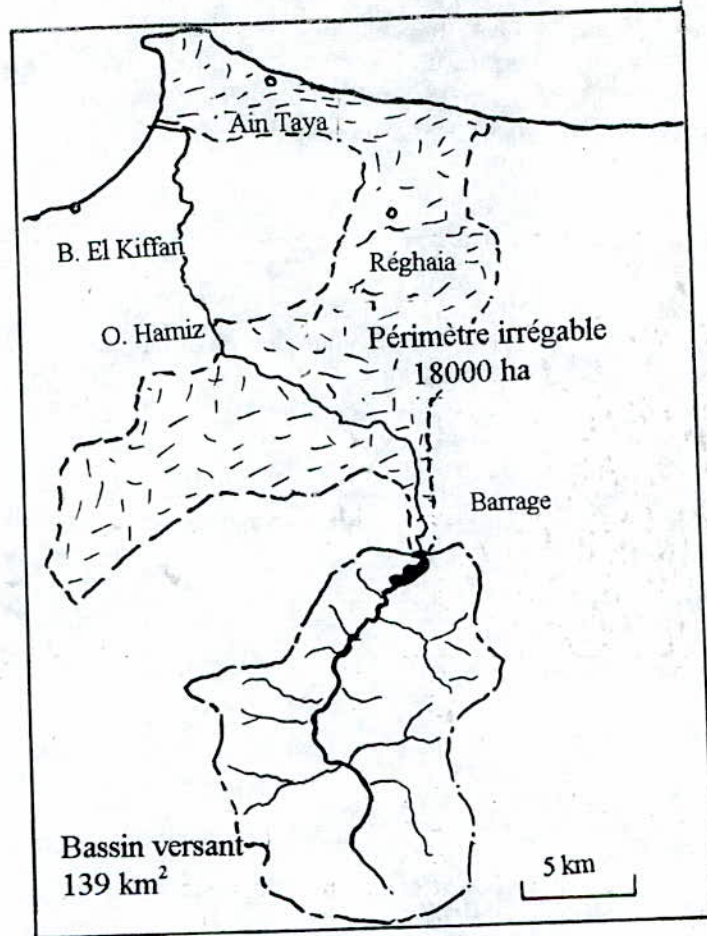


Fig. 28 - Bassin versant amont du barrage de HAMIZ

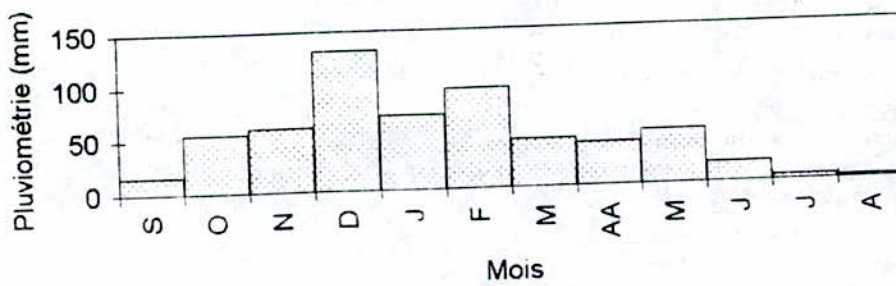


Fig 29- Bassin versant amont du barrage du HAMIZ. Pluviométrie mensuelle (période 1980-1992)

II. 2. 4. Envasement de la retenue.

Le réservoir avait une capacité initiale de 30.10^6 m^3 en 1935, qui a été ramenée progressivement à moins $12,3.10^6 \text{ m}^3$ en 1964 par suite d'une sédimentation annuelle de $0,2.10^6 \text{ m}^3$ à $0,25.10^6 \text{ m}^3$. Offrant un plan d'eau de près de 1500 hect., quelques années après sa construction, la retenue du barrage du HAMIZ présentait en 1964 l'aspect d'une immense vase avec une épaisseur de sédiments variant entre 20 et 25 m dans l'axe de la retenue.

II. 2. 5. Moyens engagés pour lutter contre l'envasement

Devant la progression de l'envasement de la retenue, le barrage de HAMIZ a subi de très grandes transformations depuis 1879. Plusieurs techniques de lutte contre l'envasement ont été expérimentées dans la retenue. Le barrage a été surélevé de 7 m en 1883 pour porter sa capacité à 23.10^6 m^3 [47]. Il a été surélevé aussi en 1935 pour atteindre une hauteur de 45 m et une capacité de 30.10^6 m^3 [47].

L'importance de cet ouvrage pour l'irrigation de la Mitidja Est, a conduit l'administration à entreprendre en plus de cette surélévation des travaux de dragage. Ce procédé a été effectué au niveau de la cuvette de 1967 à 1972 pour dévaser environ $8,65.10^6 \text{ m}^3$ de sédiments. Ce volume a été dragué au moyen d'une drague suceuse à désagrégateur "LUCIEN DUMAY" acquise par les services d'hydraulique en 1957 [51]. En plus de ces procédés, des chasses ont été utilisées plusieurs fois au niveau de la retenue, mais il n'y a pas beaucoup d'informations sur les résultats obtenus par ces opérations. Les évacuations des courants de densité ont été effectuées au niveau de la retenue.

II. 3. Barrage de K'SOB

II.3.1. Situation et caractéristiques du barrage

Le barrage de K'SOB est un ouvrage multivoute, situé dans la wilaya de M'sila à environ 400 km au Sud-Est d'Alger. Il a été réalisé entre 1933 et 1939 pour satisfaire les besoins d'eau d'irrigation du périmètre du K'SOB.

II 3. 2- Le bassin versant

a) Description sommaire

le bassin versant du K'SOB appartient au grand versant du Chott-El-Hodna. Il constitue la partie Ouest des hautes plaines constantinoises. Il est situé sur le versant Nord du mont de Hodna, et s'étale jusqu'au Nord de Bordj Bou Arreridj, il est séparé à l'influence maritime par la chaîne des Babors au Nord.

Le bassin versant du barrage de K'SOB d'une superficie de $1494,55 \text{ km}^2$ se caractérise par la prédominance du domaine agricole sur le domaine forestier comme le montre la figure 30 :

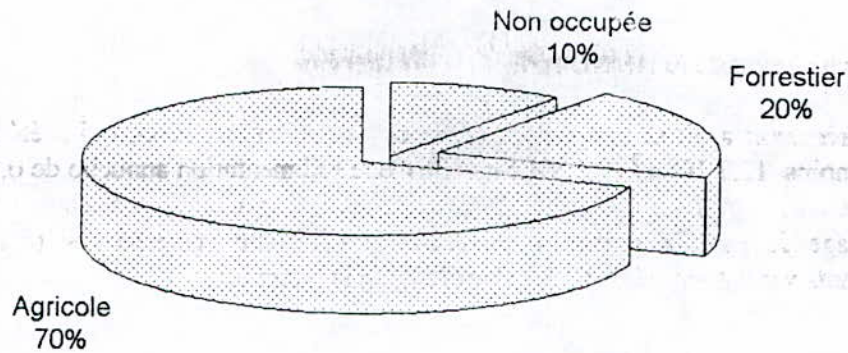


Fig.30- Bassin versant du barrage de K'SOB.
Domaines d'occupation

Les terrains nus, sans végétation ou sans utilisation agricole, représentent 10 % de la superficie totale du bassin versant, soit près de 15023,6 hect. Ils se localisent essentiellement sur une topographie accidentée, difficile à mettre en valeur. Ils sont très attaqués par l'érosion et constituent l'une des sources aboutissant dans la cuvette de K'SOB. Plusieurs facteurs se combinent pour déterminer l'évolution du milieu naturel dans ce bassin versant avec des conséquences importantes sur l'arrivée des débits liquides et solides dans la retenue du barrage.

b) Lithologie :

Les roches tendres et moyennement résistantes, facilement érodables, prédominent et couvrent près de 74 % de la superficie du bassin versant. Il s'agit essentiellement de marnes, et de composites carbonatées.

c) Caractéristiques climatiques

Le climat de type subtempéré est caractérisé par une pluviométrie à caractère méditerranéen, c'est à dire très irrégulière. La pluviométrie moyenne au cours d'une période de 26 années est de 400 mm. Elle varie de 4 mm à 30 mm au cours d'une année moyenne (fig. 31).

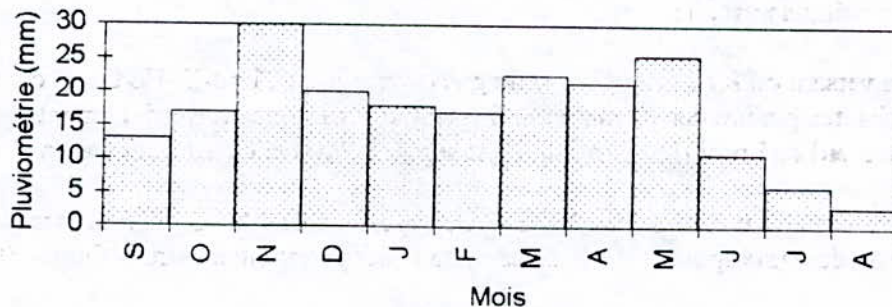


Fig.31- Bassin versant amont du barrage de K'SOB.
Pluviométrie mensuelle (période 1980-1992)

d) Pentes

Dans le bassin versant du K'SOB, la répartition de la superficie des pentes est la suivante (tableau 8):

Pentes	% de la superficie du bassin versant	Nature du terrain	Observations
Inférieures à 12.5 %	50 %	Terrains plats (faibles pentes)	Prédominance des zones planes sur les zones accidentées.
Supérieures à 21.6%	24.6 %	Terrains très accidentés (fortes pentes)	

Tableau 8- Pentes du bassin-versant amont du barrage de K'SOB

Le bassin versant est divisé en deux parties bien distinctes : la première au Nord correspond à la zone de la plaine de Bordj Bou Arreridj et elle est dominée par de faibles pentes [52]. La deuxième (Sud) correspond à la partie montagneuse du bassin versant qui est la chaîne Hodna prolongée vers le Nord Ouest par le Djebel Monsourah. C'est dans cette partie du bassin versant que l'érosion se manifeste le plus à cause, soit de la mauvaise utilisation des terres, soit à la faible densité de la couverture végétale. C'est donc la partie du bassin versant la plus dangereuse pour l'envasement du barrage

d) Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du bassin versant de K'SOB est divisé en trois zones (fig. 32) :

- La première zone dont la densité moyenne est de 1,74 km/km² occupe 35,57 % de la superficie totale.
- La deuxième zone comprend 41,03 % de la superficie totale, la densité moyenne du réseau hydrographique est de 3,7 km/km².
- La troisième zone occupe 23,7 % de la superficie du bassin versant, la densité moyenne du réseau hydrographique est extrêmement forte, elle est de 5,45 km / km².

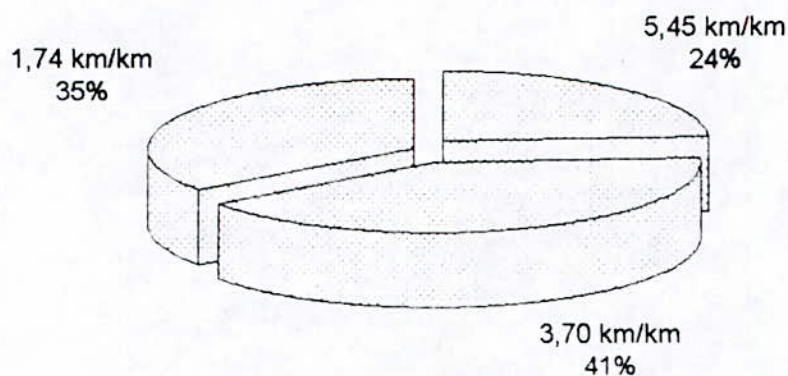


Fig.32- Répartition de la densité du réseau hydrographique du bassin du barrage de K'SOB

e) Localisation des zones d'érosion

La dynamique érosive est très intense dans le bassin versant en amont du barrage de K'SOB. Selon le degré et la nature des processus, il est possible de donner la répartition suivante (tableau 9) :

Secteurs	Superficie(hectare)	% de la superficie du bassin-versant	Observations
Stable	480	0.3	Ils sont représentés par les zones occupées par les forêts et par des zones parfaitement planes occupées par l'agriculture.
Faible érosion	125838.3	84.2	C'est la zone la plus importante .L'érosion marque sa présence par des rigoles profondes mais peu profondes.
Moyenne érosion	20551.5	13.7	-
Forte érosion	1285.5	0.9	-
Intense érosion	105	0.1	C'est un stade ultime d'évolution ; le ravinement généralisé très concentré a détruit le sol, mettant à nu la roche mère marneuse.

Tableau 9- Localisation des zones d'érosion du bassin versant amont du barrage de K'SOB

Nous pouvons dire que le bassin versant amont du barrage de K'SOB présente un aspect assez particulier en ce qui concerne l'érosion: la faible proportion des zones érodées qui se dégage du bassin n'est pas due à une protection efficace du milieu, mais à la proportion élevée des terrains peu accidentés. Le bassin versant n'est pas autant protégé contre le phénomène de l'érosion, ceci a été remarqué d'ailleurs par la vitesse accélérée de l'envasement dans la cuvette de K'SOB.

II.3.3. Envasement de la retenue

L'ouvrage avait une capacité de $11,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour une hauteur de 32 m. Au milieu des années 70, la capacité a été réduite au moins de $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, ce qui ne permettait plus de satisfaire les besoins en eau d'irrigation malgré les apports liquides importants ($50 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$). L'administration a alors décidé de surélever le barrage de 15 m, il atteint ainsi 47 m de hauteur. L'envasement moyen annuel est de $0,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$.

II.4. Barrage des ZARDEZAS

II. 4. 1. Situation et caractéristiques du barrage:

Le barrage des ZARDEZAS d'une capacité de $27 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, construit de 1929 à 1945, est situé sur l'oued Saf-saf au Nord-est de Constantine et à 30 km au Sud de Skikda. Il est du type barrage poids (photo. 11 et 12).

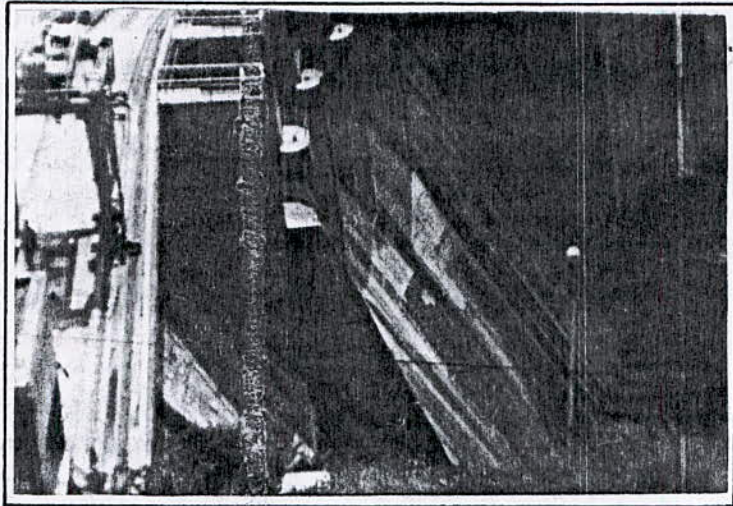


Photo.11-Vue de l'ouvrage des ZARDEZAS

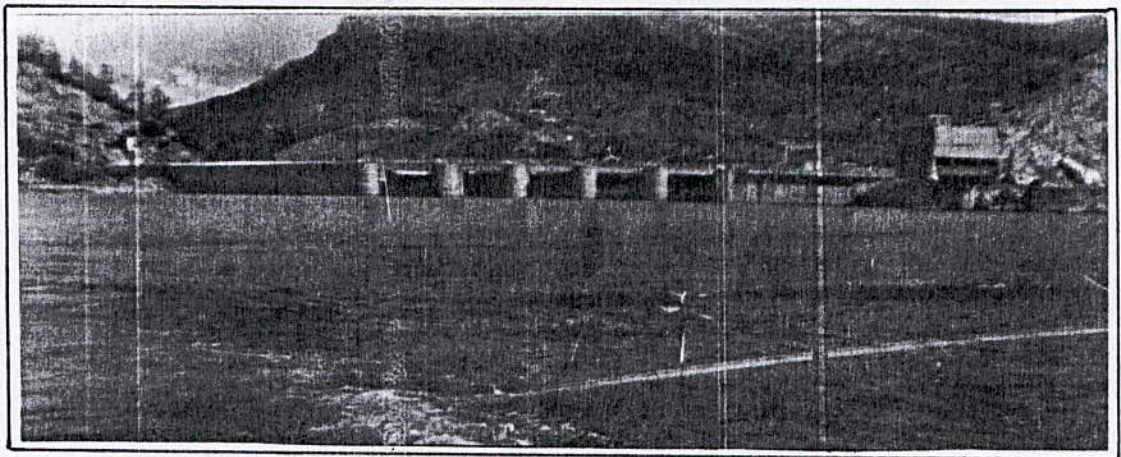


Photo.12-Retenue du barrage des ZARDEZAS

II.4.2. Le bassin versant (Photo. 13).

a) Description sommaire

Le bassin versant de l'oued Bouadjeb (ZARDEZAS) totalise une superficie de 34109 hect., est constitué par la partie des hautes plaines constantinoises drainées par les oueds Brahim, Bouadjeb et Khemakem qui se réunissent à 6 km en amont de la gorge des ZARDEZAS pour former l'oued Saf-saf. La direction générale de leur cours d'eau est Est-ouest parallèle à la chaîne numidique et celle de leurs affluents est Nord-Sud.

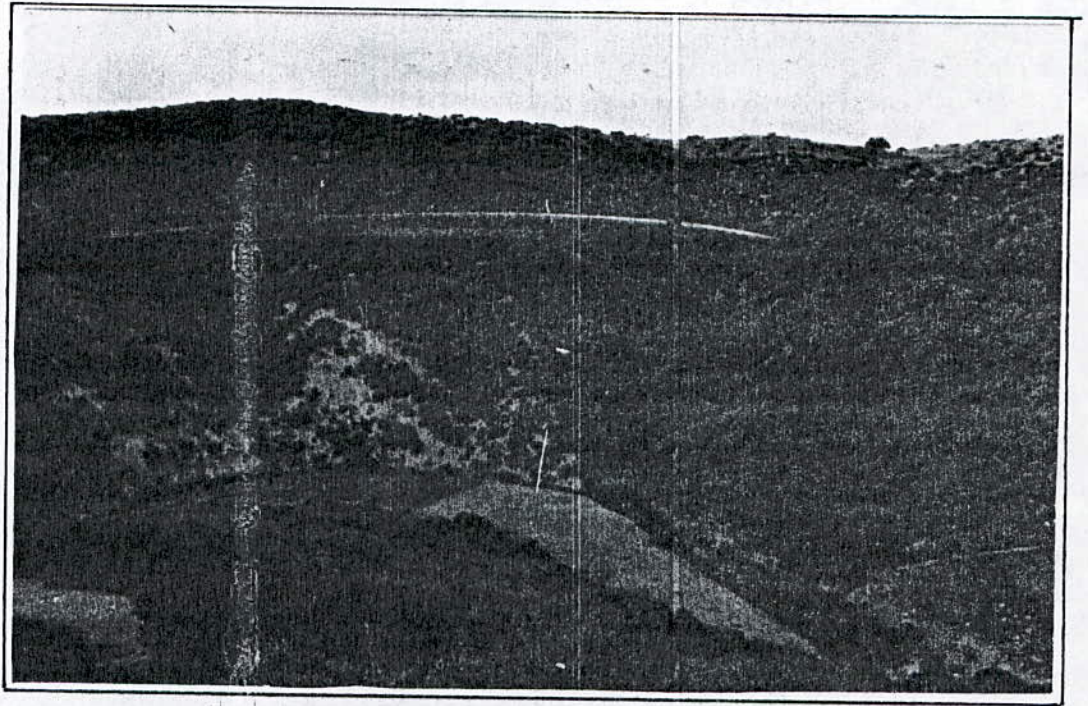


Photo.13-Vue générale d'une partie du bassin versant amont du barrage des ZARDEZAS

Le bassin versant des ZARDEZAS se caractérise par la prédominance du domaine agricole sur le domaine forestier, comme l'indique la figure 33.

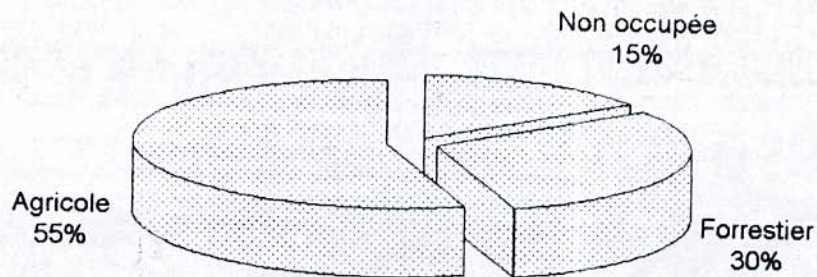


Fig.33- Bassin versant du barrage des ZARDEZAS.
Domaines d'occupation

Les terrains nus, sans végétation ou sans utilisation agricole, représentent 15 % de la superficie totale du bassin versant, soit près de 5186 hect. Ils se localisent essentiellement sur une topographie peu accidentée (l'altitude varie entre 500 et 600 m). Plusieurs facteurs se combinent pour déterminer l'évolution du milieu naturel dans ce bassin versant avec des conséquences importantes sur l'arrivée des débits liquides et solides dans la retenue du barrage [53].

b) Lithologie

La lithologie du bassin versant est dans l'ensemble composée de grès et de calcaire, mais on trouve dans certaines zones des marnes et de l'argile [54].

c) Caractéristiques climatiques

Le climat est de type sub-humide caractérisé par des précipitations irrégulières et en général torrentielles. La pluviométrie moyenne au cours d'une période de 12 années est de 650 mm (fig. 34). Elle atteint 100 mm en mois de Mars et 5 mm en Juillet (fig. 35).

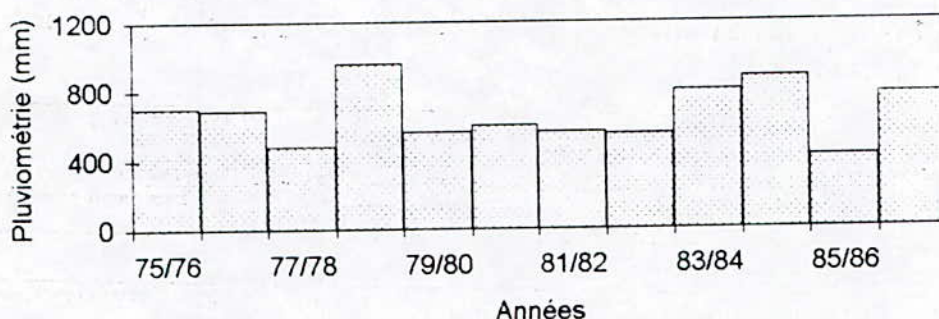


Fig. 34- Bassin versant amont du barrage des ZARDEZAS.
Pluviométrie annuelle (période 1975-1987)

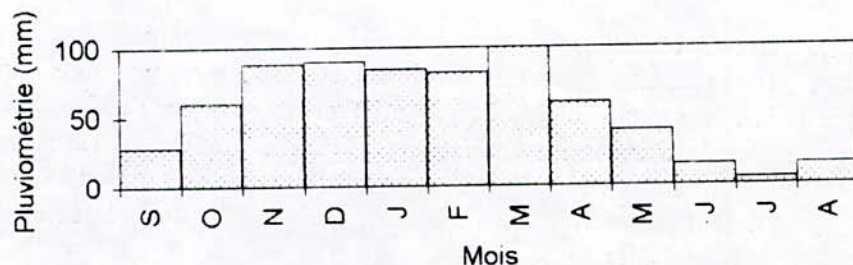


Fig. 35- Bassin versant amont du barrage des ZARDEZAS.
Pluviométrie mensuelle (période 1975-1987)

d) Pentas

Dans le bassin versant amont du barrage des ZARDEZAS, la répartition de la superficie des pentes est la suivante (tableau 10) :

Pentes	% de la superficie du bassin-versant	Nature du terrain
Comprises entre 12.5 et 45%	50%(17382 hect.)	--
Supérieures à 45 %	9.8%(3373 hect.)	Relief très accidenté

Tableau 10 - Pentas du bassin versant amont du barrage des ZARDEZAS

e) Réseau hydrographique

Les conditions dans le bassin de réception sont favorables à l'envasement accéléré de la retenue. Les zones dont la densité du réseau hydrographique est forte, occupent 85% de la superficie totale.

f) Localisation des zones d'érosion

La dynamique érosive est très intense dans le bassin versant en amont du barrage des ZARDEZAS, selon le degré et la nature des processus il est possible de donner la répartition suivante (tableau 11) :

Secteurs	Superficie (hectare)	% de la superficie du bassin versant	Observations
Stables	8966.8	26.2	Dans ces secteurs, aucun phénomène n'est apparu. Ils coïncident généralement avec les parties à couverture végétale dense et à lithologie relativement résistante
Faible érosion	4918.8	14.4	-
Moyenne érosion	18544.4	54.4	Dans ces secteurs sont regroupés les ravinelements profonds mais isolés et les glissements des terrains.
Forte érosion	13883.6	4.1	Ces secteurs englobent les ravinelements profonds, les glissements des terrains généralisés, les coulées boueuses...
Intense érosion	101.3	0.3	Ils correspondent à des parties du bassin-versant dont le processus érosif a atteint un stade quasiment irréversible.

Tableau 11- Localisation des zones d'érosion du bassin versant amont du barrage des ZARDEZAS

II.4.3. Envasement et dévasement de la retenue .

Vu l'ampleur de l'envasement, la retenue d'une capacité de $15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1945 à la cote normale (184,3 m) ne représente plus que $9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1967. Le barrage a été surélevé de 1971 à 1974 ramenant ainsi la capacité de la cuvette à $35 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et le volume régularisé était de $27 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour une cote maximale d'exploitation de 197 m. De 1975 à 1986, l'envasement s'est accru, en moyenne de $0,45 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$, valeur supérieure à celle qui avait été évaluée en 1984. Le volume de la vase a atteint $13 \text{ à } 15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1988, dépassant ainsi depuis 1985 le seuil des vannettes de dévasement [176] (photo. 14 et fig. 36).

Durant l'année 1990, le barrage a connu des problèmes d'instabilité. Plus de 20 câbles de renforcement de la stabilité de l'ouvrage ont été coupés par la forte poussée de la vase.

Pour assurer la sécurité provisoire du barrage, les services d'hydrauliques ont procédé à l'évacuation d'un volume de $9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ d'eau claire. Dès l'été de l'année 1993, la drague « Rezoug Youcef » est devenue opérationnelle : toute la vase déposée au bord du pied du barrage a été enlevée afin de réduire la poussée hydrostatique exercée par la suspension sur l'ouvrage (photos. 15 et 16). Il est à signaler que la drague se trouve actuellement dans la retenue.

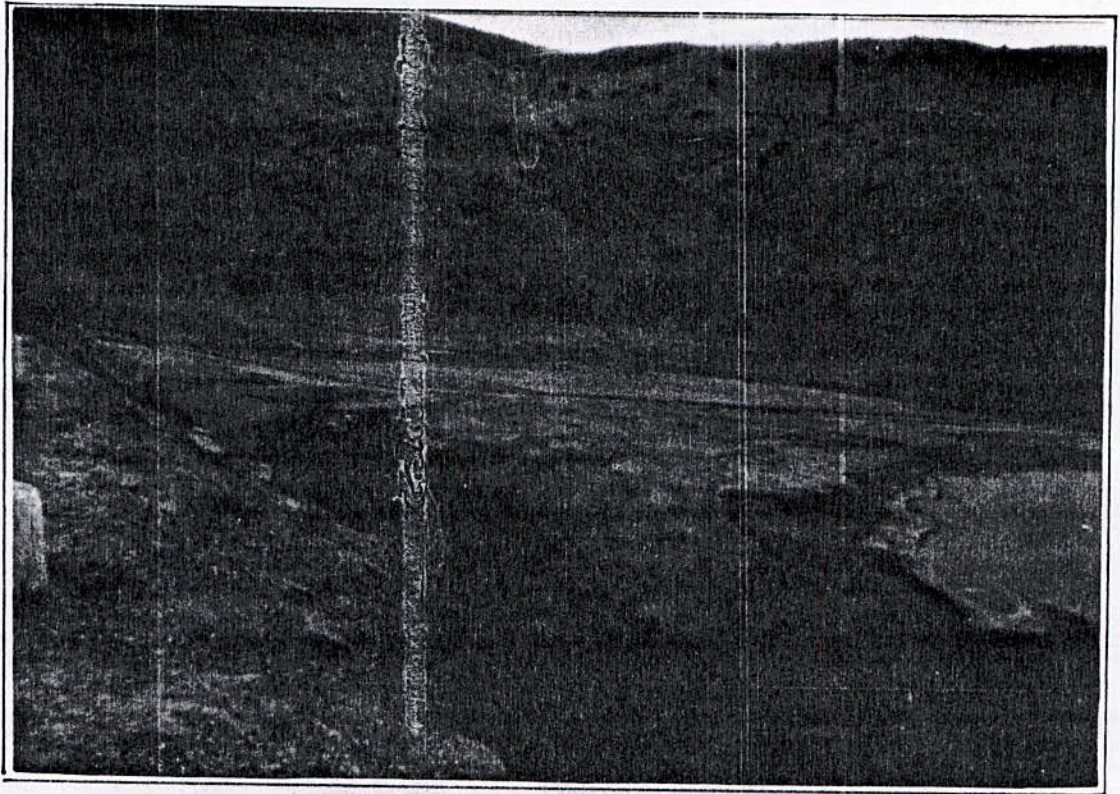


Photo.14-Avancement progressif du « delta » des sédiments des ZARDEZAS

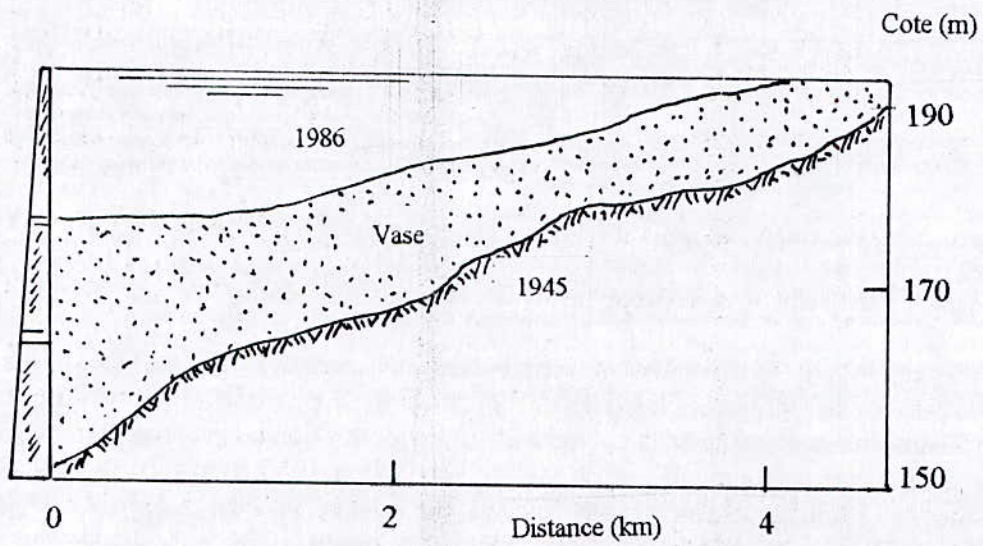


Fig.36-Quantité de vase déposée dans la retenue du barrage des ZARDEZAS

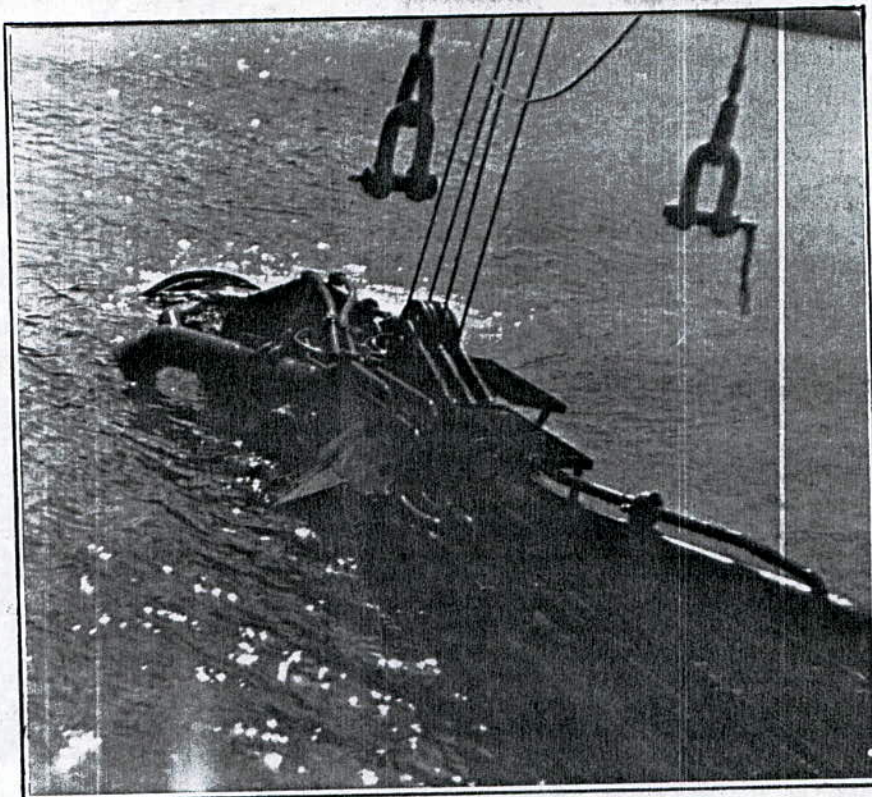


Photo. 15-
Barrage des ZARDEZAS.
Plongement du désagrégateur
de la drague.

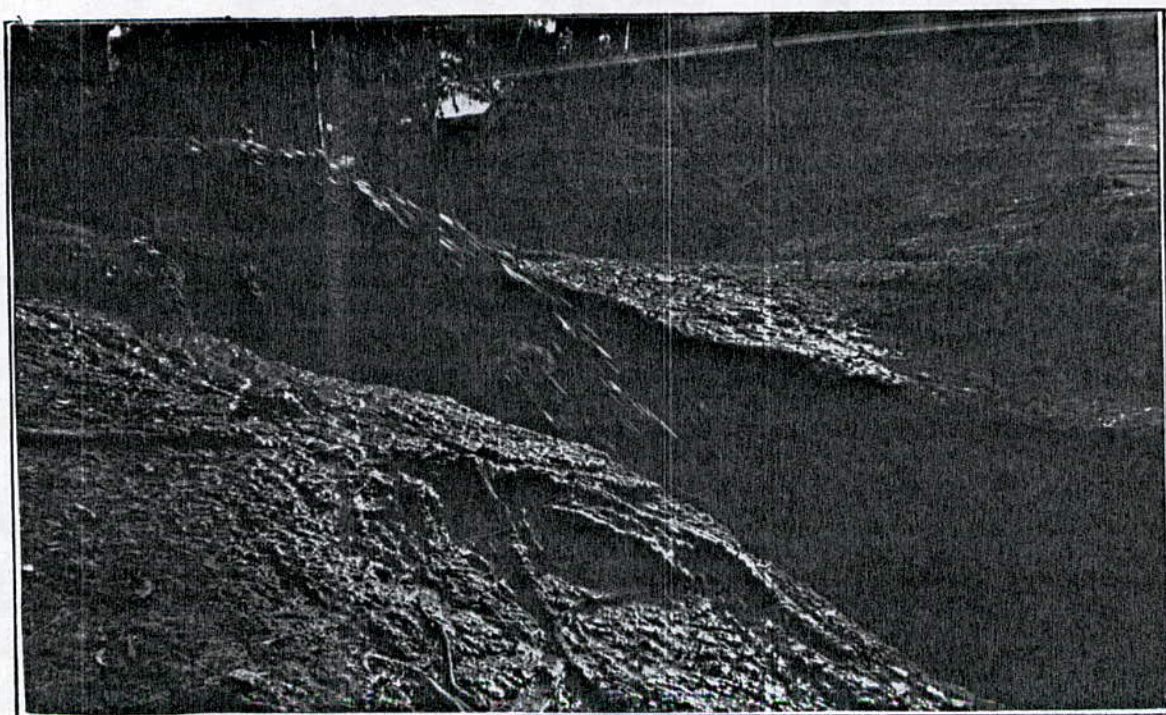


Photo.16- Rejet de la vase à l'aval du barrage lors de
l'opération du dragage de l'été 1993.

II. 5. Barrage de OUED EL FODDA

II. 5.1. Situation et caractéristiques du barrage

Le barrage de Oued EL FODDA (photo. 17) est édifié sur l'oued du même nom dans le massif calcaire du Koudiat Larouah, près de Chleff, dans la partie moyenne de la vallée du Chellif. Ces caractéristiques principales sont :

- barrage poids en béton,
- volume du corps du barrage : $273\ 000\ m^3$,
- côte de la retenue normale : 370, 5 m ,
- hauteur maximum au dessus du Talweg : 85m ,
- capacité initiale de la retenue : $228.10^6\ m^3$.

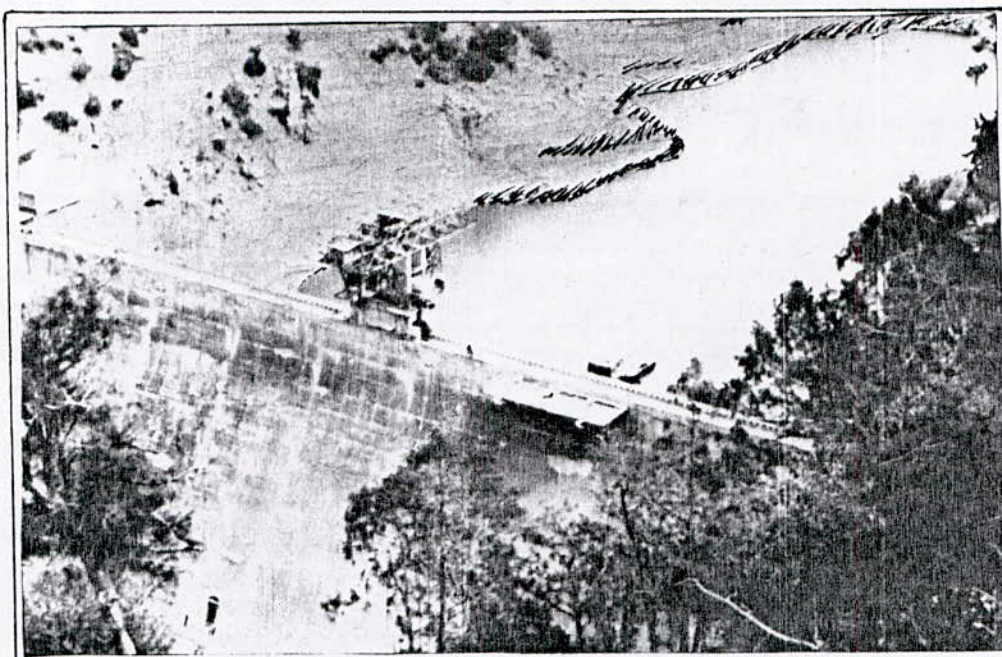


Photo.17-Vue générale du barrage de OUED EL FODDA

II. 5. 2. Le bassin versant:

La superficie du bassin versant en amont du barrage est de $800\ km^2$, sa longueur étant de 48 km. Les altitudes s'échelonnent entre 280 et 1985 m, l'altitude moyenne est de 836 m. Son relief vigoureux détermine un coefficient de ruissellement moyen de 22 %.

Les principales formations géologiques du bassin peuvent être regroupées en deux grands ensembles: 55 % de terrains crétacés et 45 % de terrains essentiellement marneux.

Le pourcentage de boisement (30 %) est relativement faible pour une région au relief accidenté. La forêt se localise d'ailleurs sur les terrains crétacés qui sont les plus résistants à l'érosion. La pluviométrie calculée à partir des données des stations voisines du bassin versant est 554, 6 mm (moyenne annuelle).

II. 5. 3. Les apports

a) Les apports liquides

L'apport moyen annuel de l'oued EL Fodda est de $82,76 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. L'apport annuel maximum enregistré a été de $167 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ durant l'année 1945/1946, alors que l'apport minimum a été de $11,72 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1956/57. Bien qu'il n'existe pas de mesures, la plus forte crue connue a été estimée à $400 \text{ m}^3/\text{s}$.

b) Les apports solides

A notre connaissance, il n'existe pas de stations hydrométriques à l'amont du barrage. On ne peut donc qu'estimer les apports solides à partir des mesures bathymétriques effectuées dans la cuvette, ce qui donne une moyenne annuelle de $2,31 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de sédiments. La durée de vie du barrage pourrait donc être estimée à 98 ans en l'absence de dévasement [55].

II. 5. 4. Envasement de la retenue

a) Relevés du toit de vase (fig. 37).

Jusqu'en 1950, les relevés ont été effectués par sondages à la main et ont permis de déterminer un nombre limité de profils en travers. A partir de 1950 et jusqu'en 1961, les relevés ont été réalisés au moyen d'un appareil à ultra-sons qui enregistre l'écho d'une onde à vitesse constante produit par un oscillateur à magnétostriction. En 1964, le relevé a été fait par l'appareillage SPARKER, procédé de sismique réflexion à enregistrement continu. Les relevés de 1974 et 1986 ont été élaborés par la compagnie géophysique de France et traités par Géokart (Pologne) dans le cadre d'un marché signé avec l'A.N.B (Agence Nationale de barrages).

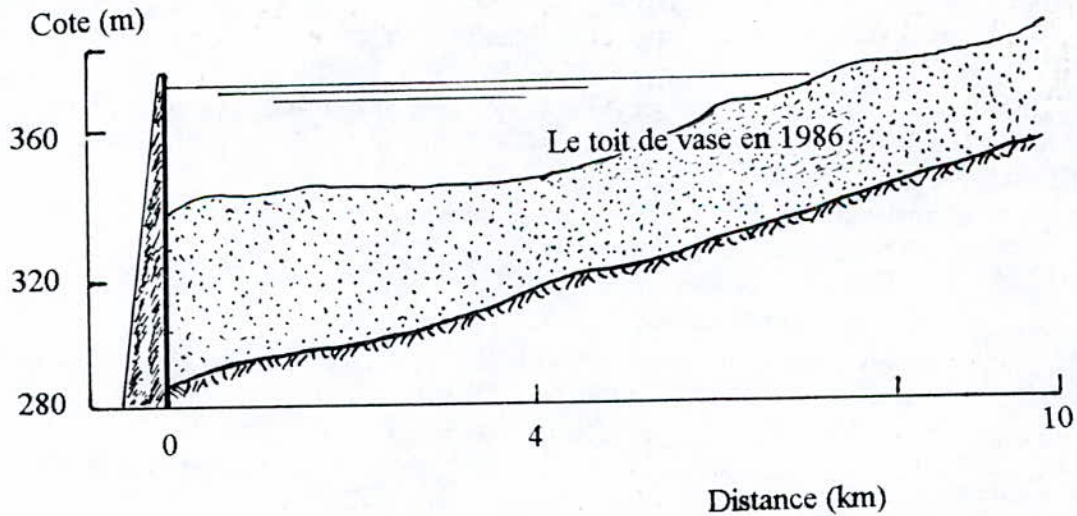


Fig.37-Toit de vase en 1986 dans la retenue du barrage de OUED EL FODDA

b) Caractéristiques de la vase.

Les caractéristiques de la vase de la retenue du barrage sont données comme suit (tableau 12) :

Caractéristiques de la vase	Résultats
Analyse granulométrique	La vase présente une extrême finesse des particules avec en moyenne: 90% d'éléments inférieurs à 10 μm et 50% d'éléments inférieurs à 1 μm .
Limite de liquidité	Systématiquement supérieur à 60%, et pouvant atteindre 78%.
Teneur en eau	De la surface du toit de vase jusqu'à une profondeur de 35 m, la teneur en eau décroît régulièrement de 130 à 50%.
Densités apparentes	Croissent de 1.40 à 1.60 et même 1.70 ,au fur et à mesure que l'on que l'on s'enfonce dans la vase. En moyenne, pour 1m ³ de vase, on a une tonne de matière solide et 0.6 tonne d'eau.

Tableau 12- Caractéristiques de la vase de la retenue de OUED EL FODDA

II. 5. 5. Moyens engagés pour lutter contre l'envasement

Le seul moyen utilisé pour lutter contre l'envasement est l'évacuation des courants de densité par les six pertuis de dévasement. Pour le soutirage de vase, la règle générale est d'évacuer les eaux chargées de densité supérieure à 1,070. A l'arrivée d'une crue dans la retenue, on fait des prélèvements pour mesurer la densité au niveau de quatre vannes et lorsque l'eau atteint la densité de 1,070 on ouvre une vanne, puis éventuellement une seconde et ainsi de suite jusqu'à diminution de la densité que l'on continue de mesurer à intervalle régulier (généralement une heure). On arrête les opérations de soutirage dès que la densité retombe en dessous de 1,070. Grâce à ce dispositif, une quantité de plus de 30.10⁶ m³ de vase a pu être évacuée en 25 ans (période 1961-1986).

II. 6. BARRAGE DE GHRIB

II.6.1. Situation et caractéristiques du barrage

Le barrage de GHRIB est situé sur le haut Cheliff en amont de la série des petites plaines qui jalonnent le cours inférieur de ce fleuve; il permet de fournir indifféremment de l'eau aux trois périmètres du haut, moyen et bas Chellif.

Les principales caractéristiques du barrage sont les suivantes :

- barrage en enrochement,
- hauteur du barrage : 70 m,
- côte de la retenue normale : 427, 5m,
- capacité initiale de la retenue (1939) : 280.10⁶ m³.

II. 6. 2. Le bassin versant

L'oued Cheliff prend naissance au djebel Amour dans l'Atlas saharien. Le Cheliff est en effet le seul cours d'eau Algérien qui prenant sa source dans l'Atlas saharien vient se jeter dans la Méditerranée.

Au droit du barrage de GHRIB, le bassin du Cheliff couvre une superficie de 238 00 km², et est schématiquement constitué par :

- une partie tellienne entre Ghrib et Bougezoul d'une superficie de 2800 km² où la pluviométrie moyenne annuelle varie entre 350 et 600 mm. Le coefficient de ruissellement dans cette zone est de l'ordre de 8,5%;

- une partie des Hauts Plateaux couvrant 20 500 km² où la pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 300 mm. Le coefficient de ruissellement est inférieur à 2,6 %. La température moyenne enregistrée sur le bassin versant est de 16 °C avec les écarts suivants:

- température minimum : 5°C

- température maximum : 46°C

L'évaporation moyenne annuelle du lac de la retenue est 8,65.10⁶ m³ sur la période 1937-1960.

II.6.3. Les apports

a) Les apports liquides

Le régime des débits mensuels et annuels du Cheliff est extrêmement irrégulier. L'écoulement de l'oued est généralement permanent, mais durant certaines années où la pluviométrie est particulièrement déficitaire, l'oued peut être à sec. Les apports sont importants de Septembre à Mai. Pendant la période d'observation de 1937 à 1960, la moyenne annuelle des apports a été de 148,1.10⁶ m³, les deux crues importantes connues étant celles qui ont provoqué des dégâts au chantier en 1930 - 1931.

b) Les apports solides

L'envasement annuel calculé à partir des levés du toit de la vase est de 3,18.10⁶ m³/an . La concentration moyenne est de 21 g/l. La durée de vie du barrage pourra ainsi être estimée à 88 ans, en l'absence d'opérations de dévasement.

II.6.4. Envasement de la retenue [45]

L'envasement de la retenue est contrôlé régulièrement par les relevés du toit de la vase. Les opérations ont été effectuées aux années suivantes (tableau 9):

Année de relevé	Technique de relevé
1944	Relevé du fond par sondage à la main.
1950	Utilisation de la sonde à ultrason (résultats incomplets non utilisés)
1952	Relevé du fond par la sonde à ultrason (Compagnie Neyrpic)
1955	Relevé du toit de vase (relevés partiels)
1958	Relevé du toit de vase (relevés partiels)
1964	Relevé du toit de vase par procédé SPARKER
1974	Relevé du toit de vase par le bureau d'étude polonais Geokart
1984	Relevé du toit de vase par le bureau d'étude polonais Geokart

Tableau 13 : Différents levés bathymétriques de la retenue de GHRIB

L'envasement annuel varie en fonction des apports liquides, les calculs ayant donné des résultats variant entre 1,25 et 2 %. Compte tenu de l'envasement, le débit régularisé par la retenue n'est que de 9 années sur 10.

II. 6. 5. Moyens engagés pour lutter contre l'envasement

Deux moyens ont été utilisés pour lutter contre ce phénomène :

- L'évacuation des sédiments par l'utilisation de la vanne de fond du barrage.
- La réalisation d'un barrage à l'amont du barrage de GHRIB.

La meilleure façon d'éviter l'envasement, c'est d'empêcher la vase d'arriver jusqu'au barrage, cela peut se faire par la création de retenues pour la décantation des apports solides, ce qui revient à construire un autre barrage en amont. Cette solution n'a été appliquée que dans un cas en Algérie, à savoir la construction du barrage de BOUGHZOUL en amont de celui du GHRIB, bien qu'édifiée essentiellement pour amortir les crues de oued Chleff, cette retenue a permis de retenir depuis sa construction un volume de près de 35.10^3 m^3 de vase, qui, sans elle, seraient venus s'ajouter aux $114,5.10^6 \text{ m}^3$ de vase qui se sont déposés dans celle de GHRIB (1986). Le barrage de BOUGHZOUL a ainsi réduit l'envasement du GHRIB de près de 24 % [56] [57].

II. 7- Barrage des CHEURFAS I

II. 7. 1- Situation et caractéristiques du barrage

Le barrage des CHEURFAS I sur l'oued Mekkerà situé à environ 20 km à l'amont de la ville du Sig, de capacité de $14,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ à la côte 229. (fig. 38). Il a été construit entre 1880 et 1882 et les deux années qui suivent étaient assez sèches et le réservoir ne se remplit que progressivement pour atteindre la côte de la retenue normale en Janvier 1885. Le barrage est équipé d'une vanne de fond installée sur le parement amont du barrage, obture un pertuis de 1,7 m de largeur par 2,3 m de hauteur, dont le seuil est à la côte 202.

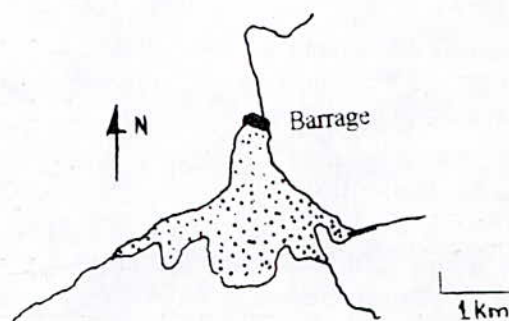


Fig.38-Retenue du barrage des CHEURFAS I

II. 7. 2. Le bassin versant

Le bassin versant qui alimente le barrage des CHEURFAS s'étend sur les reliefs adoucis de la Meseta oranaise (plaine de Sidi Bel Abbès) et sur l'extrémité des monts de Tlemcen et de Saïda suivant une zone de reliefs assez tranchés. La superficie du bassin versant est de 4150 km^2 , sa longueur est de 160 km, les altitudes s'échelonnent entre 717 et 923.

II. 7. 3. Envasement de la retenue

La cuvette du CHEURFAS est soumise à un envasement intense et accéléré (fig. 39). La capacité de la retenue à la cote 229 qui était de $14,6.10^6 \text{ m}^3$ en 1885 n'était que $9,2.10^6 \text{ m}^3$ en 1933 et $6,3.10^6 \text{ m}^3$ en 1942 et 5.10^6 m^3 en 1951. Depuis 1942 l'envasement est resté pratiquement stationnaire, les chasses évacuant sensiblement tous les apports solides annuels.

Les expériences faites avant 1951, tant au barrage de FERGOUG qu'à celui des CHEURFAS, montrent que la vase ne s'est durcie en surface que sur une profondeur de 5 à 6 m et seulement quand elle a été exposée au soleil, la densité apparente de la vase en place varie entre 1,6 et 1,76.

Le 15 Novembre 1928, le rapport de la commission Monet montre que l'ouvrage des CHEURFAS doit être considéré comme dangereux. Il est demandé un abaissement immédiat de 2 m de la cote.

L'emploi d'armatures métalliques dans la partie amont et leur mise en tension directe est envisagé de même que la construction de contreforts à l'aval, ainsi que la combinaison de deux procédés.

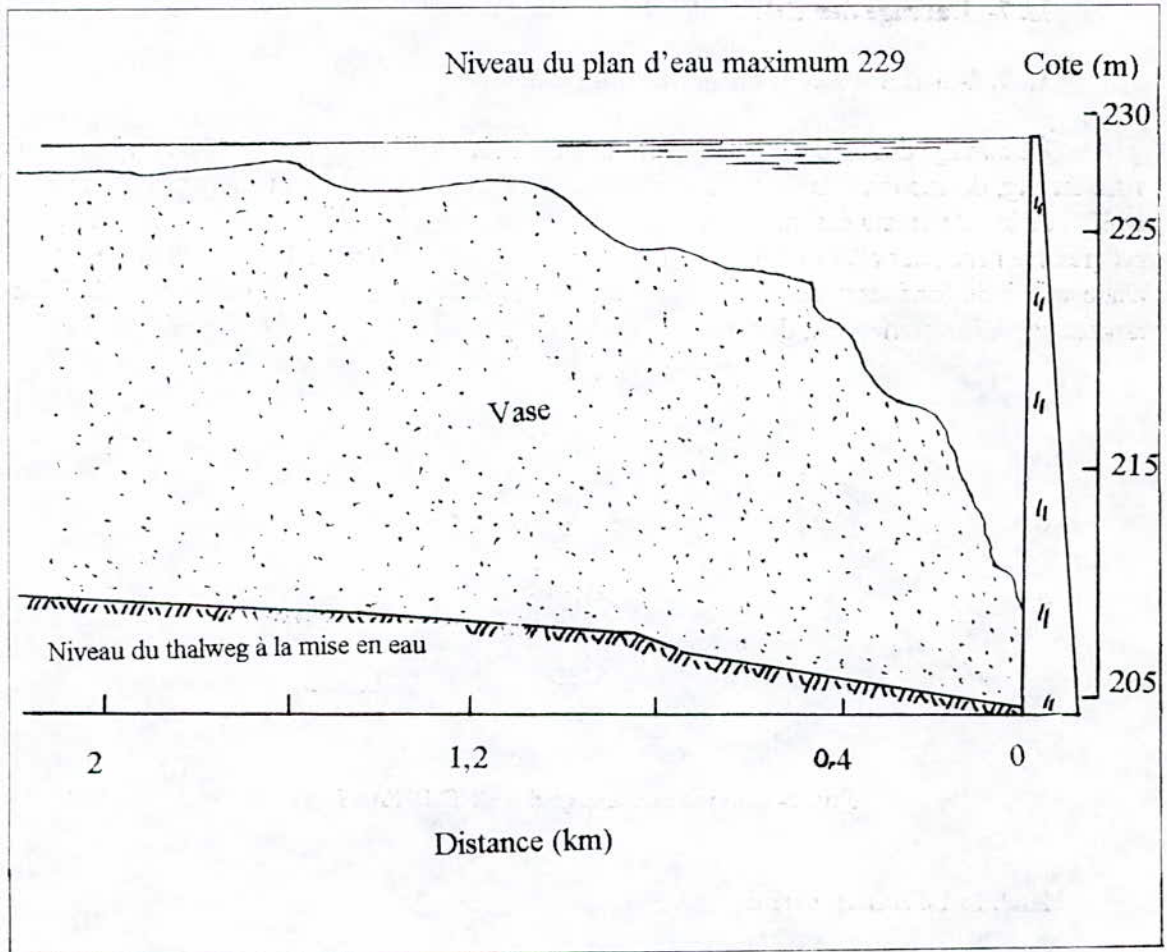


Fig.39-Profil du toit de vase en 1958 dans la retenue du barrage des CHEURFAS I

II. 7. 4. Dévasement de la retenue

Les premiers essais réels de dévasement ont eu lieu à partir de 1950 lorsqu'il est apparu très difficile de reconstruire un autre barrage dans les environs immédiats de l'ouvrage existant. Les essais de dévasement au moyen d'une drague suceuse ont eu lieu de Novembre 1950 à Mai 1953. Le volume total dragué a été de $0,318.10^6 \text{ m}^3$ avec un rendement de vase en place de 12,7 %. Les matériaux dragués comprenaient essentiellement des sables fins et des limons très fins.

En outre, un chenal de 80 m de largeur a été dégagé suivant l'axe de la cuvette pour faciliter l'accès jusqu'au barrage des apports solides qui en étaient empêchés par la formation des bancs et de rendre les chasses de fond efficaces. Le volume total dragué, qui atteignait $1,5.10^6 \text{ m}^3$ de vase en place, suffisait à améliorer momentanément la condition d'irrigation des périmètres du Sig et permettait de définir les conditions d'une opération de plus grande envergure sur l'ensemble de la cuvette. Une autre opération de dragage a été effectuée de Juin 1959 au Juin 1962, les travaux permirent de draguer $8,3.10^6 \text{ m}^3$.

Le volume de vase en place dragué à la date d'arrêt du chantier en Juin 1962 était donc de $8,3.10^6 \text{ m}^3$; la concentration moyenne de la mixture variant entre et 13 et 22,3%. On notera la variation de densité moyenne d'aval en amont de l'axe vers les berges. Un rapport de 1944 estimait que les crues les plus préjudiciables à la capacité du barrage étaient dûes aux orages de Septembre, qui fournissaient des transports solides de 100 g/l, alors qu'il n'était possible d'en évacuer par la vanne de fond, que 2 à 3 g/l en raison de la difficulté d'effectuer des chasses suffisantes à cette période de l'année où toute l'eau doit être utilisée pour les irrigations. Le barrage a été abandonné en 1966 et fut remplacé par le barrage CHEURFAS II (actuel) (photo. 18)

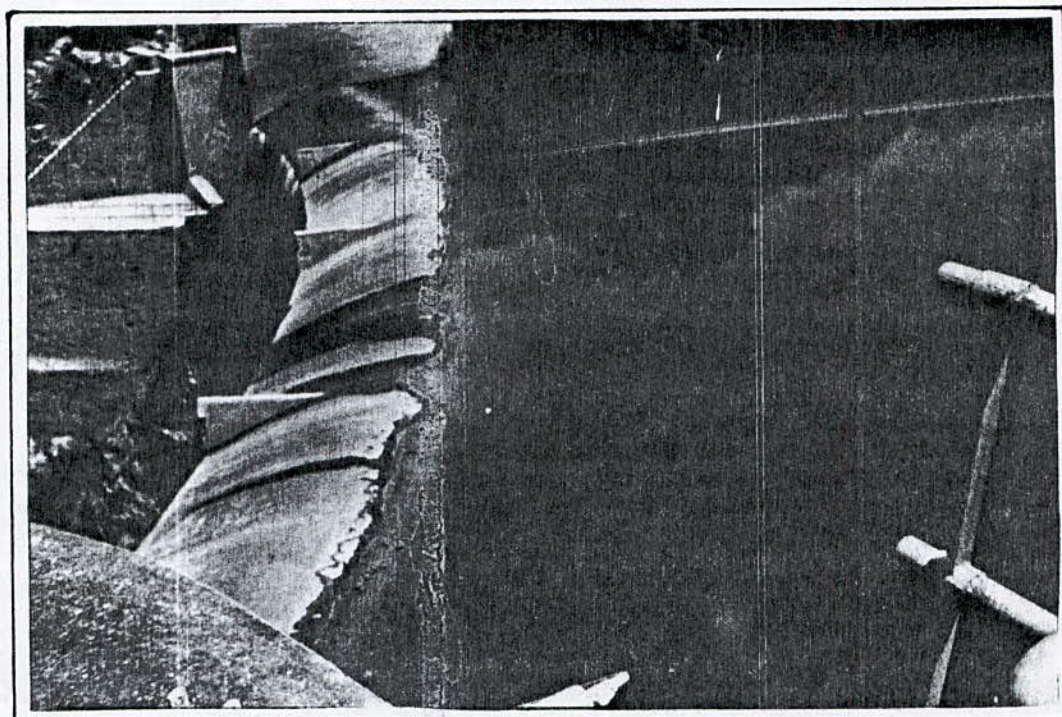


Photo.18-Vue générale du barrage des CHEURFAS II (mai 1996)

II. 8. BARRAGE DE FERGOUG

II.8.1. Situation géographique

Le barrage de FERGOUG est situé au Nord-ouest de l'Algérie, sur l'oued Habra immédiatement en aval du confluent de l'oued El Hammam près de la ville de Mohammadia à environ 80 km d'Oran, et à 60 km en amont se trouve le barrage de BOUHANIFIA. Le barrage a pour but d'assurer l'irrigation de la zone agricole autour de Mohammadia, soit environ 20000 hect de terre ainsi que de garantir l'alimentation en eau potable pour la population de Mohammadia, Sig et Oran et l'alimentation de la zone industrielle d'Arzew.

II.8.2. Historique

a) Barrage de FERGOUG (fig. 40).

Le premier barrage construit sur ce site remonte à la période Romaine. Un deuxième barrage a été reconstruit en 1732, et fût emporté par les eaux en 1850. En 1867, un barrage de grande envergure d'une capacité de 30.10^6 m^3 a été réalisé et fût endommagé à deux reprises en 1872 et 1881 et fut rétabli à chaque fois.

En 1885, le barrage était totalement dévasé, par les eaux qui s'écoulaient librement depuis 1881. Le 26 Novembre 1927, une crue exceptionnelle estimée à plus de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ détruisit ce barrage. A cette époque les analyses de la vase qui fût évacuée indiquent plus de 90 % d'argile [58]. Cette date marque la fin de l'étape du barrage de FERGOUG I.

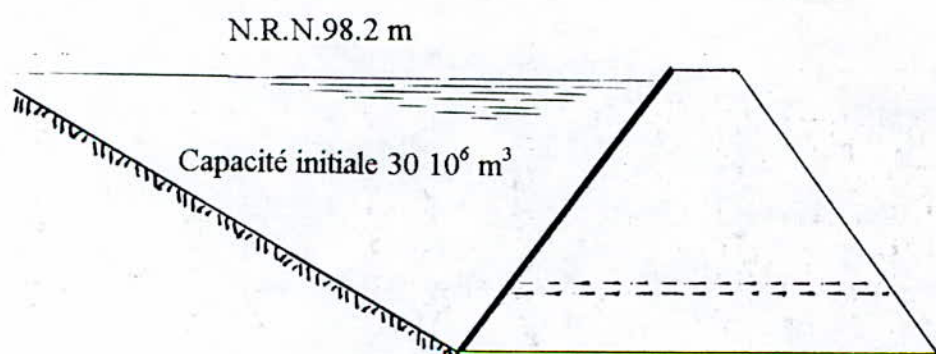


Fig.40-Barrage de FERGOUG I (1885-1927)

b) Barrage de FERGOUG II (fig. 41).

Depuis 1927, le barrage de FERGOUG restera dans ces conditions jusqu'à 1934 où l'on reconstruisit la digue. La nouvelle capacité était de $0,6.10^6 \text{ m}^3$. Entre temps en 1934, les travaux de constructions du barrage de BOUHANIFIA débutèrent à l'amont.

Depuis 1940, date de la mise en eau du barrage de BOUHANIFIA, les écoulements de l'oued El Hammam vers la retenue du FERGOUG devinrent non stationnaires puisque tous correspondaient à des lachers de reprise venant de BOUHANIFIA.

Le barrage FERGOUG est caractérisé par une faible hauteur (côte du déversoir est égale à 86,00 m) et une très faible capacité en eau.

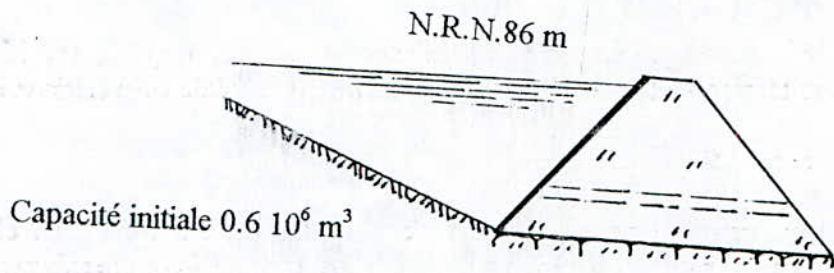


Fig.41-Barrage de FERGOUG II (1927-1970)

c) Barrage de FERGOUG III (Barrage actuel)(fig. 42).

Au cours des années 1965-1969, le barrage fût reconstruit et mis en exploitation en 1970. La capacité de la retenue du FERGOUG III est de $18 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ à la côte de 100,5 m. L'évacuateur de fond dimensionné pour un débit de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ est situé au bas de la tour de prise d'eau à la côte 76,9 m. Cette dernière est équipée de trois ouvertures supplémentaires aux côtes 80,5m, 89,50m et 96,50m, destinées aux prises d'eau pour l'irrigation et la station de traitement pour l'alimentation en eau potable des villes d'Oran, Arzew et Mohammadia.

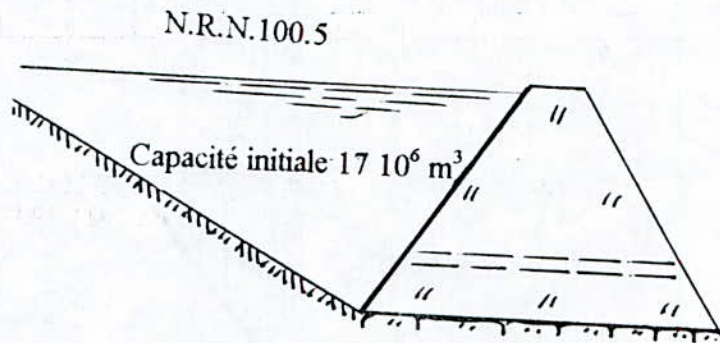


Fig.42-Barrage de FERGOUG III (1970-1996)

II.8.3. Le bassin versant

La superficie du bassin versant de l'oued Habra au niveau de la retenue du FERGOUG est de 8420 km^2 , mais à l'amont, le barrage de BOUHANIFIA mobilise 7854 km^2 et réduit la surface alimentant directement le barrage du FERGOUG par l'intermédiaire de l'oued El Hammam à 566 km^2 .

L'altitude moyenne est de 790 m pour la zone alimentant directement le barrage du FERGOUG et de 820 m sur le bassin versant de BOUHANIFIA. L'altitude maximale se trouve près de Dahya Djebel et Djorf à 1454m.

Le couvert végétal est pratiquement inexistant dans les zones marneuses et généralement peu dense sur les reliefs.

a) Lithologie

Le bassin versant présente une prédominance de marnes, d'argiles, de schistes et de sable, donc une quantité importante pour l'alimentation du transport solide en matériaux érodables.

b) Caractéristiques climatiques.

Le bassin versant amont du barrage de FERGOUG est soumis à un climat de l'Atlas Tellien. Le régime climatique est caractérisé par une nette opposition entre saison sèche et humide. Les variations annuelles se situent entre 200 mm et 400 mm (fig. 43) avec de très fortes intensités en hiver et en printemps (fig. 44).

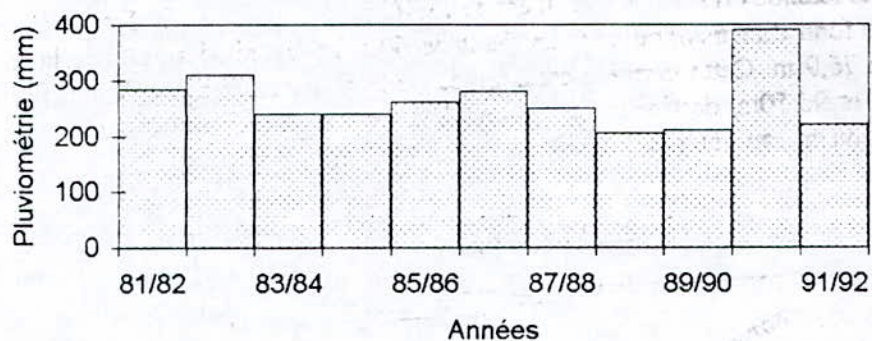


Fig. 43- Bassin versant du barrage de FERGOUG.
Pluviométrie annuelle (période 1981-1992)

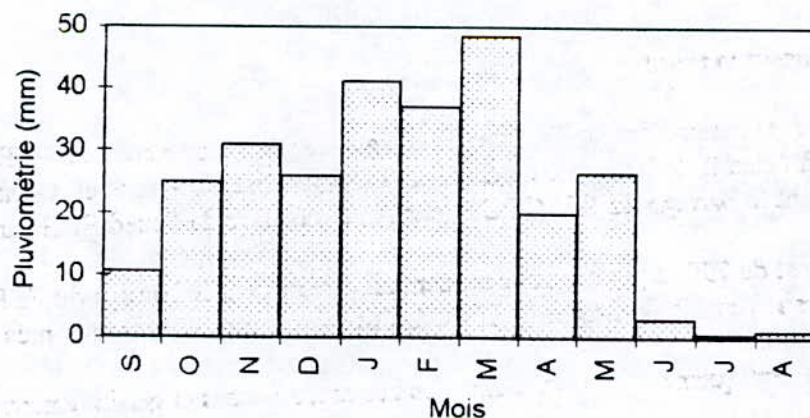


Fig. 44-Bassin versant amont du barrage de FERGOUG.
Pluviométrie mensuelle (période 1981-1992)

II.8.4. Les apports

a) Les apports liquides

L'apport moyen annuel est de 150.10^6 m^3 sur l'ensemble du bassin versant, soit un module de $4,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce volume annuel provient à raison de 138.10^6 m^3 de l'amont du barrage de BOUHANIFIA et de 12.10^6 m^3 en provenance de celui du FERGOUG.

La région est caractérisée par l'irrégularité des apports; certaines années ont été exceptionnelles de par les inondations ou par la sécheresse. A titre d'information, en 1872, le déversoir fût emporté sur une longueur de plus de 50 m par une crue estimée à $700 \text{ m}^3/\text{s}$. En 1881, une crue de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ détruisit le barrage.

b) les apports solides

Depuis 1940, les écoulements de l'oued EL Hammam vers la retenue du barrage de FERGOUG devinrent non stationnaires(photo. 19). Les lâchés venant de la retenue du barrage de BOUHANIFIA (photo. 20) en transitant par la vidange de fond et la prise d'eau sont généralement de forte concentration, ceci est corroboré par un dévasement partiel du réservoir du barrage de BOUHANIFIA d'une quantité de 6.10^6 m^3 en 1950.

II.8.5. Envasement de la retenue

L'envasement accéléré dans la cuvette du barrage de FERGOUG est dû essentiellement à l'existence dans le bassin versant de la branche oued EL Hammam d'un sol dénudé constitué d'importantes zones de marnes, d'argiles et de sables. L'érosion intense due à l'agressivité des précipitations amène en moyenne chaque année $0,72.10^6 \text{ m}^3$ de particules solides au barrage de FERGOUG et $0,38.10^6 \text{ m}^3$ au barrage de BOUHANIFIA.

Depuis sa mise en service en 1940, le barrage de BOUHANIFIA agit comme un filtre retenant les particules grossières, seuls les sédiments fins arrivent dans la retenue du FERGOUG par l'Oued El Hammam.

La capacité du barrage de FERGOUG III est passée de 18.10^6 m^3 à $12,7.10^6 \text{ m}^3$ en trois ans (1970-1973).

En 1983, la retenue n'était plus que 3.10^6 m^3 ce qui correspond à un degré d'envasement de 58 %, elle était de $1,8.10^6 \text{ m}^3$ en 1989, soit un taux d'envasement de 90%.

II.8.6. Moyens de lutte contre l'envasement

Vu l'état avancé de l'envasement de la retenue de FERGOUG, la seule solution de conserver le barrage était le dragage. L'agence Nationale des barrages a acquit en 1989 une drague suceuse refouleuse baptisée « Rezoug Youcef ».

La drague est conçue pour refouler à une hauteur de 28 m, dans une conduite de 700 mm avec un débit maximum de mixture (vase + eau) de 1600 l/s et pour draguer de 3 à 16 m. Les travaux ont débuté du mois de septembre 1989 jusqu'au mois de mai 1992, la quantité de vase évacuée est évaluée à $7,1.10^6 \text{ m}^3$ avec une densité de 1,6 et une consommation d'eau claire de 7.10^6 m^3 [59].

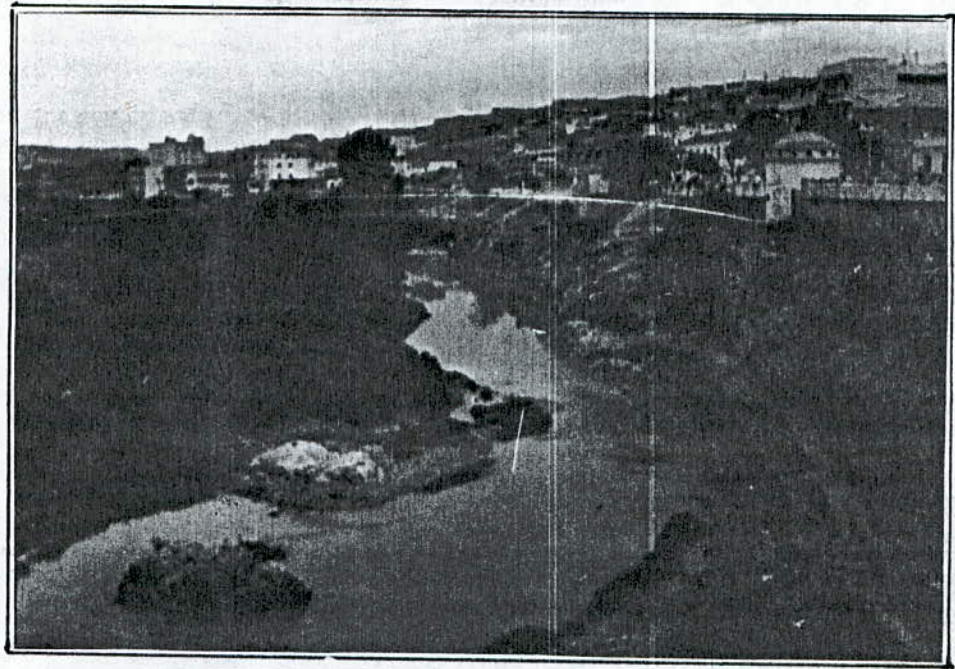


Photo.19 :Oued EL HAMMAM véhicule une quantité importante des sédiments.

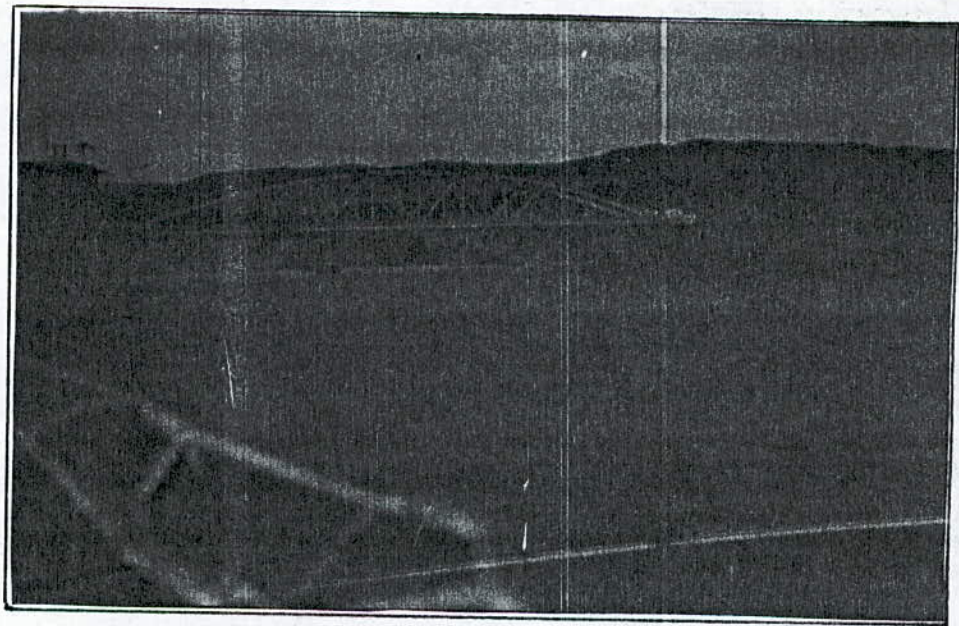


Photo.20 :Retenue du barrage de BOUHANIFIA de $73 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de capacité en 1940 se retrouve en 1955 à $56 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ suite au dépôt successif des sédiments.

II. 9. Barrage de FOUM EL GHERZA

II.9.1. Situation et caractéristiques du barrage

Le barrage de FOUM EL GHERZA est situé à 18 km à l'Est de la ville de Biskra et à environ 600 km au Sud-est d'Alger. IL permet l'irrigation des palmiers de Sidi Okba au Sud-ouest de Serian au Nord , et de Thoudra.

Les principales caractéristiques du barrage sont :

- barrage vôte (photo. 21),
- hauteur du barrage :75m,
- capacité initiale (1950) :47.10⁶ m³ (photo. 22)

Photo.21-La voute du barrage

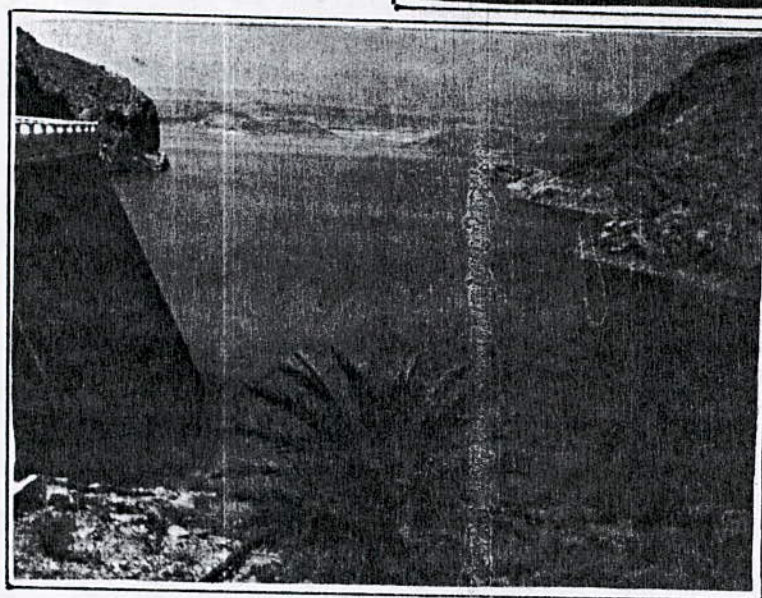
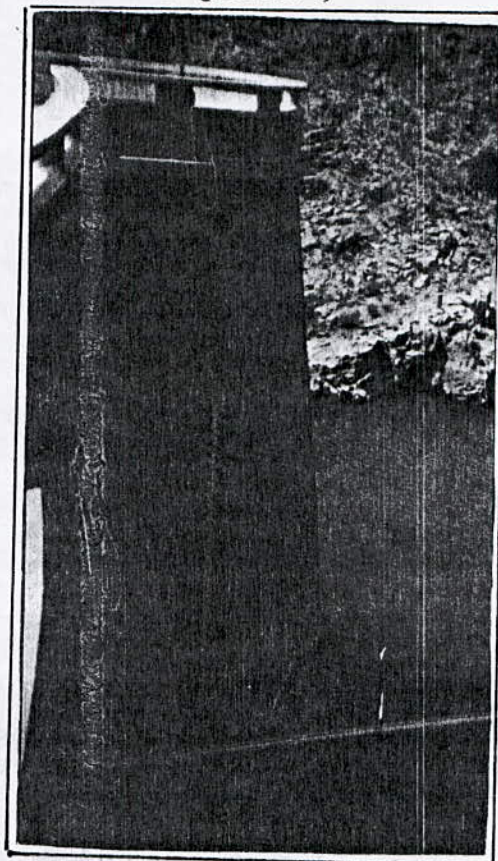


Photo.22-Vue générale de la retenue du barrage de FOUM EL GHERZA

II.9.2. Historique

Oued El Abiod qui possède une partie permanente dans les gorges de Foug El Gherza, dans les monts de l'Aures, a depuis longtemps attiré l'attention des ingénieurs. Un petit barrage a été construit en 1880 en amont des gorges et les eaux déviaient par une galerie souterraine creusée dans les calcaires de la rive droite. A cause des fortes crues, cet ouvrage a été emporté. Un deuxième barrage de 3 m fût édifié au milieu de la gorge en 1912. En 1950, un barrage de grande envergure de capacité de 47.10^6 m^3 a été réalisé et mis en exploitation. Suite à une anomalie dans le système de prise d'eau (fuites), le barrage a été vidé en 1951.

II. 9.3. Le bassin versant

L'oued El Abiod de l'atlas saharien prend naissance dans le massif des Aurès. Il est formé par la réunion de plusieurs torrents dévalant les pentes de Djebel Ichmoul (2071 m), un des points culminants de l'ALGERIE. L'oued coule vers le Sud-ouest, et descend de près de 2000 mètres en 120 km : son caractère torrentiel est ainsi très accusé (photo. 23).

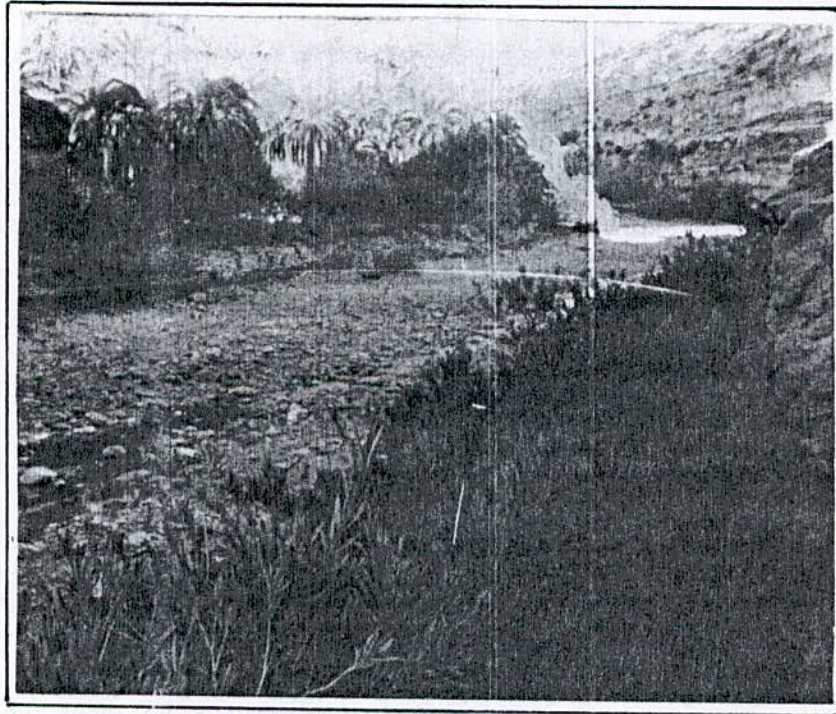


Photo.23-Oued El Abiod prend naissance dans les monts de l'Aurès

Le bassin versant de l'oued EL Abiod peut être divisé en deux parties sensiblement égales :

- une zone montagneuse boisée depuis sa source jusqu'au défilé de Tchichamimine;
- une zone de pentes sans couverture végétale, désertique qui va de Tchichamimine à Foum El Gherza (photo. 24).

Les roches dominantes du bassin versant sont essentiellement les grés, marnes, calcaires et le gypse[60].



**Photo.24- Partie désertique du bassin versant.
Erosion peu développée en profondeur**

a) Caractéristiques climatiques

Le bassin versant s'étend sur une superficie de 1300 km², pour un périmètre de 200 km. La température moyenne est de 22,9 °C. La pluviométrie moyenne annuelle est de 250 mm, mais se caractérise par une grande irrégularité . Les variations annuelles se situant entre 86 et 420 mm (fig. 45).

Les précipitations ne sont importantes qu'au milieu de l'automne et au début du printemps (fig. 46), des pluies orageuses se produisent assez fréquemment en Juin et Août, mais elles sont en moyenne peu abondantes .

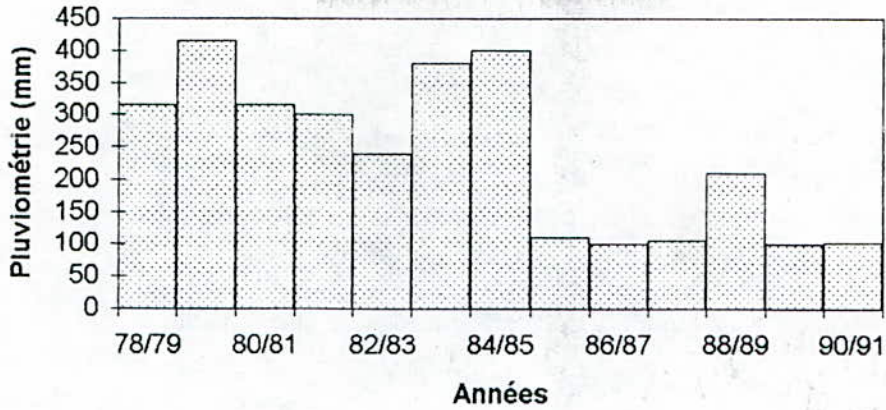


Fig.45- Bassin versant amont du barrage de FOUM EL GHERZA.
Pluviométrie annuelle (période 1978-1991)

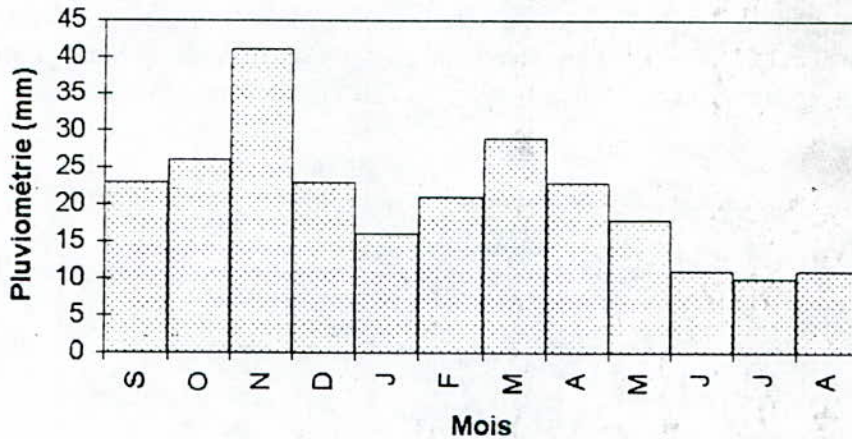


Fig.46- Bassin versant amont du barrage de FOUM EL GHERZA.
Pluviométrie mensuelle (période 1978-1991)

4) Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est caractérisé par des cours d'eau ayant un écoulement irrégulier contrairement à l'oued El Abiod qui est caractérisé par un écoulement permanent.

II. 9. 4. Les apports

a. Apports liquides

Les crues de oued EL Abiod sont liées aux précipitations orageuses ayant une double origine puisque provenant, soit d'orages locaux en été, soit des dépressions sahariennes au printemps et plus souvent encore en automne. Les variations des apports liquides annuels provenant de l'oued El Abiod sont résumées sur la figure 47. Les crues de l'oued sont très violentes et soudaines.

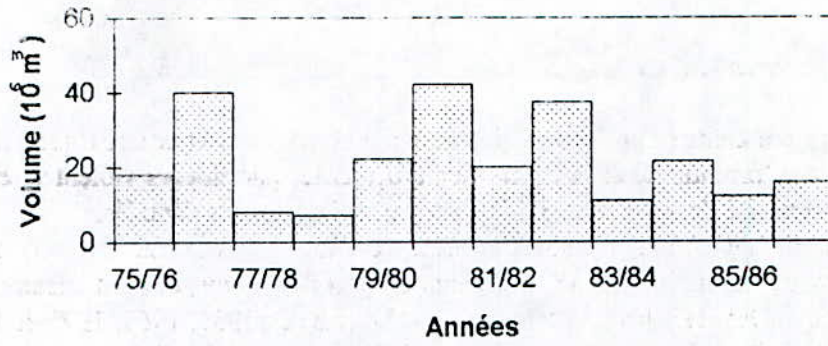


Fig.47- Variations annuelles du débit liquide de l'oued El Abiod

b. Apports solides

Les matières solides transportées ne sont en conséquence pas apportées d'une façon continue au cours de l'année, mais liées aux crues: fortes teneurs en octobre et décembre, tandis que les mois de mars et juin peuvent charrier jusqu'à 1/5 ème des apports solides. A titre d'exemple, la concentration moyenne durant l'année 1979/1980 a été de 32g/l (fig. 48).

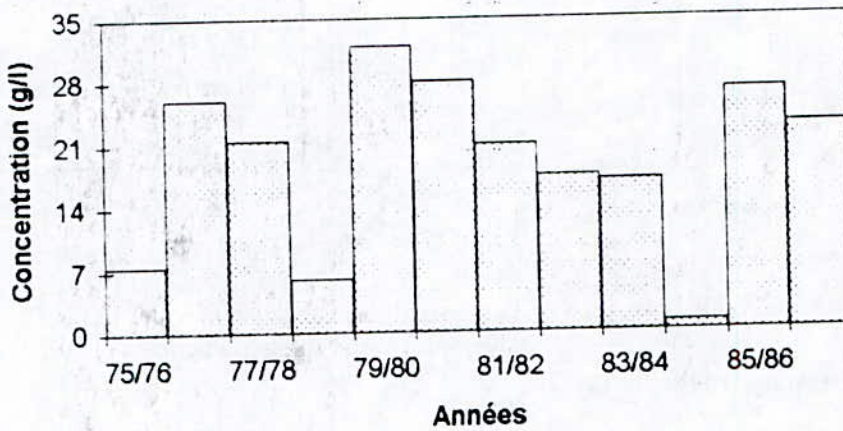


Fig.48- Variations annuelles de la concentration des sédiments dans l'oued El Abiod

II.9.5. Envasement de la retenue

Le barrage est situé dans une région saharienne dont les caractéristiques du régime des cours d'eau sont la torrencialité et la courte durée des crues par ailleurs violentes, et transportant une importante quantité de matériaux solides provenant des versants dénudés.

Un exemple de la rapidité de l'envasement a été fourni par le batardeau d'eau qui avant d'être noyé dans la retenue, avait fonctionné comme barrage pendant 3 ans, et avait accumulé un volume de vase important. Des levés bathymétriques ont été établis en 1952, 1967, 1975 et 1986 pour un suivi régulier du toit de la vase et pour l'actualisation des courbes hauteur/capacité. De 1950 jusqu'à 1992, une quantité de 25.10^6 m^3 de vase s'est déposée dans la retenue provoquant un envasement de 54 %.

II.9.6. Moyens de lutte contre l'envasement

Le moyen le plus utilisé pour la lutte contre ce phénomène est l'évacuation des courants de densité par l'ouverture de la vanne de fond. Cette technique a permis d'évacuer environ $0,5.10^6 \text{ m}^3$ durant l'année 1989/1990 (photo. 25). Or du fait de la rapidité de l'envasement, cette vanne a été bloquée au bout de 7 ans (1982-1989).

De 1990 jusqu'en 1993, une quantité de $0,1.10^6 \text{ m}^3$ de vase a été évacuée.

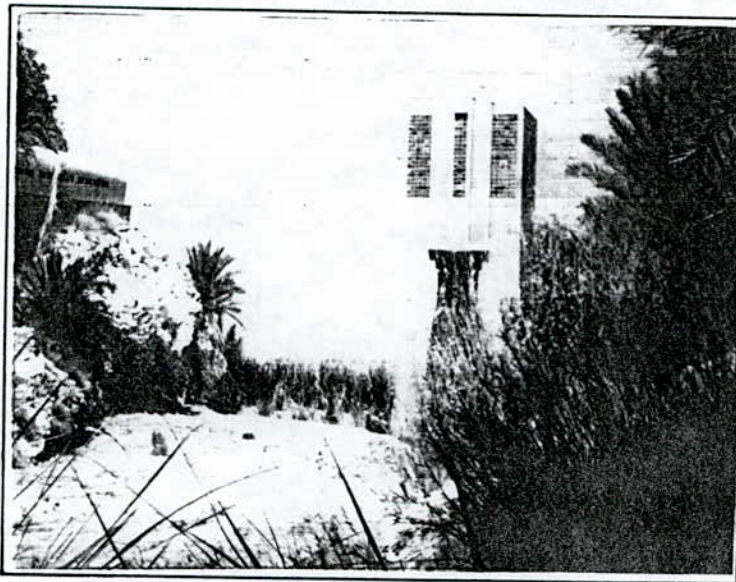


Photo.25-Vanne de vidange de fond. Evacuation de plus $0.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de vase durant la période 1989-1990

En plus de ce procédé, plusieurs techniques ont été utilisées au niveau du bassin versant afin de minimiser le taux d'érosion. Par exemple on peut citer le reboisement du bassin versant et le traitement des ravins par la construction des seuils (photo. 26).

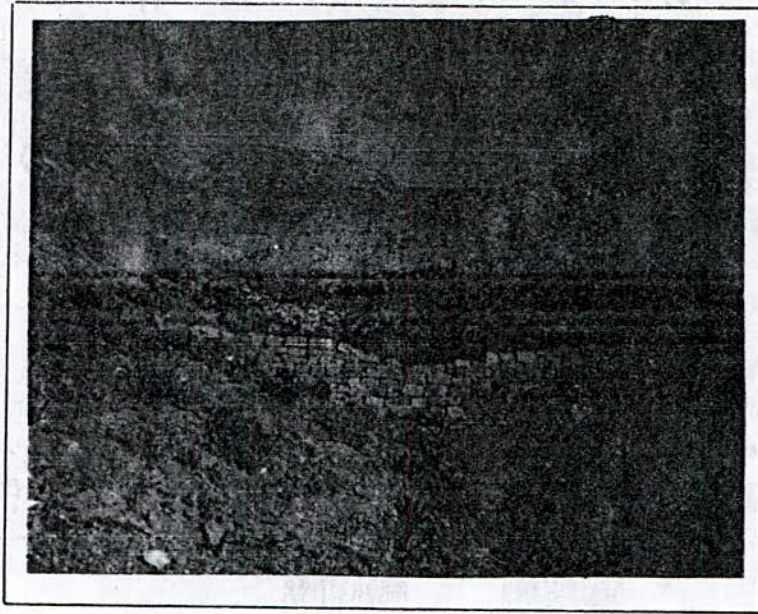
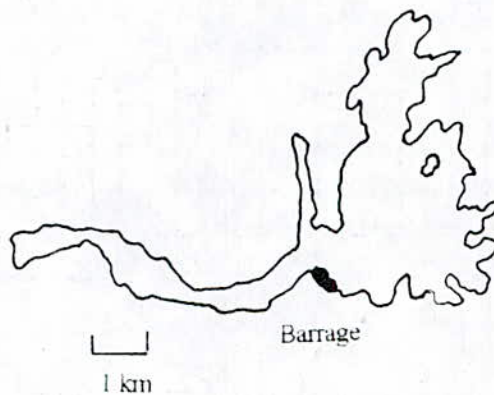


Photo.26-Construction des seuils en gablon dans les ravins

II.10. BARRAGE d'ERRAGUENE

II.10.1. Situation et caractéristiques du barrage

Le barrage d'ERRAGUENE est un barrage en béton multivoute (photo. 27) de capacité initiale évaluée à 202.10^6 m^3 (fig. 49). Il est situé dans la wilaya de Jijel à environ 350 km à l'est d'Alger . Il a été mis en exploitation le mois de janvier 1962.



**Fig.49- Retenue d'Erraguene
de capacité $202. 10^6 \text{ m}^3$.**

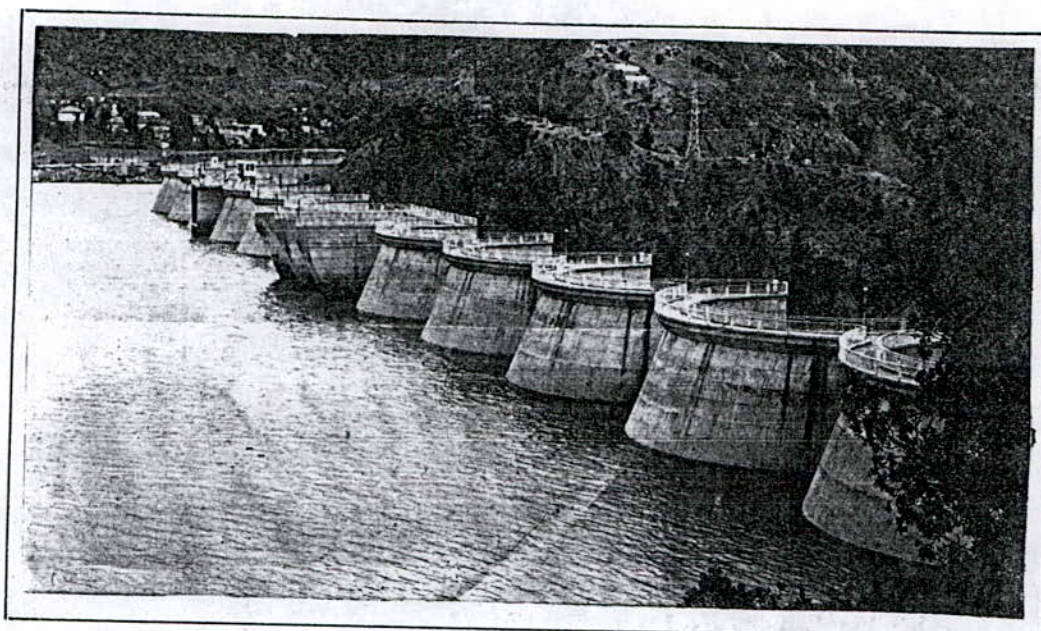


Photo. 27- Vue générale du barrage.

b) Le bassin versant

La superficie du bassin versant en amont du barrage est de 652 km², recouvert d'une végétation plus ou moins dense. La pluviométrie moyenne annuelle enregistrée dans la région est de 1500 mm (fig. 50). L'apport annuel au barrage est de 110 10⁶ m³. La capacité de régularisation compte tenu d'une certaine réserve de charge pour les groupes de l'usine peut être prise égale à 240 10⁶ m³.

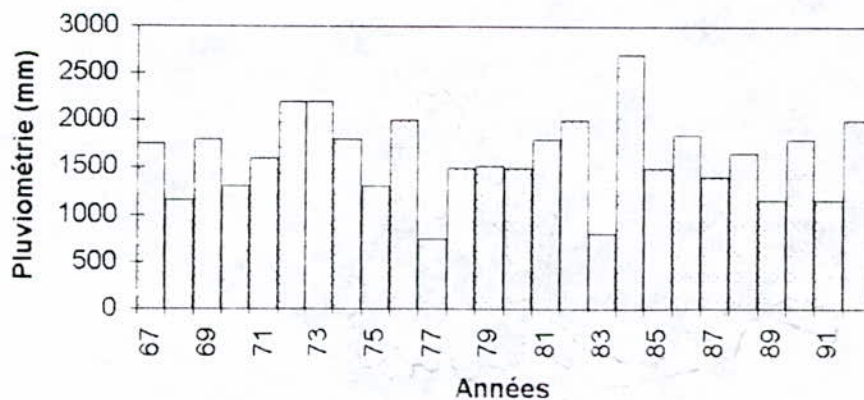


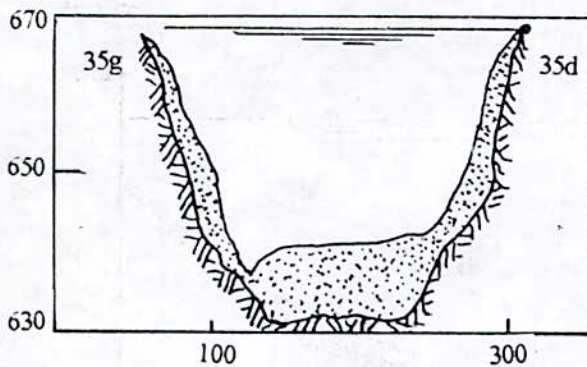
Fig.50- bassin versant amont du barrage d'ERRAGUENE.
Pluviométrie annuelle (période 1967-1992)

II.10.3. Envasement de la retenue

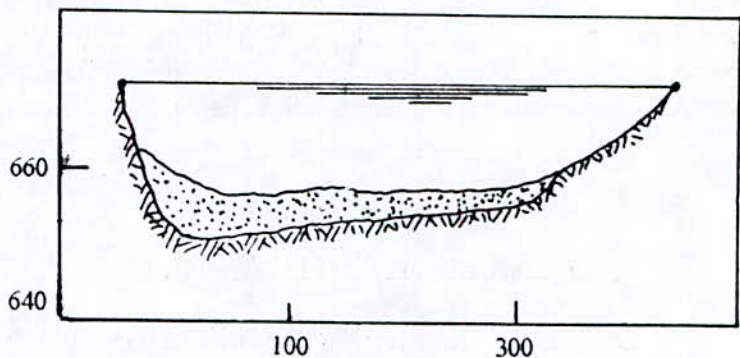
Aucune mesure des dépôts des sédiments dans la retenue n'a été faite durant la période 1962-1974.

Le premier levé bathymétrique a été fait par la société Française de stéréotopographie en Août-Septembre 1974 en exécutant des mesures de profils au nombre de 25. Un volume de 8.10^6 m³ de vase s'est déposé dans la retenue en 13 ans (1962-1974).

En se basant sur un tirage héliographique ancien du levé à 1/5000 établi avant la mise en eau et du rapport fait par la société Française de stéréotopographie [61] sur la campagne de mesure de levé bathymétrique de 1974, nous avons tracé les nouveaux profils en long du toit de vase dans les branches de oued EL Bahar et oued Labsat (fig. 51(a et b) et fig. 52(a et b)).

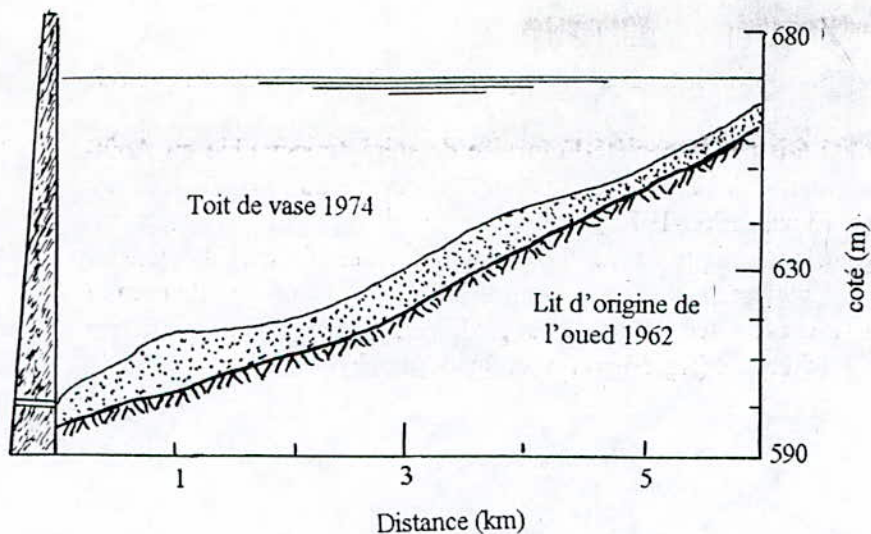


a) Profil 35g - 35 de oued El Bahar

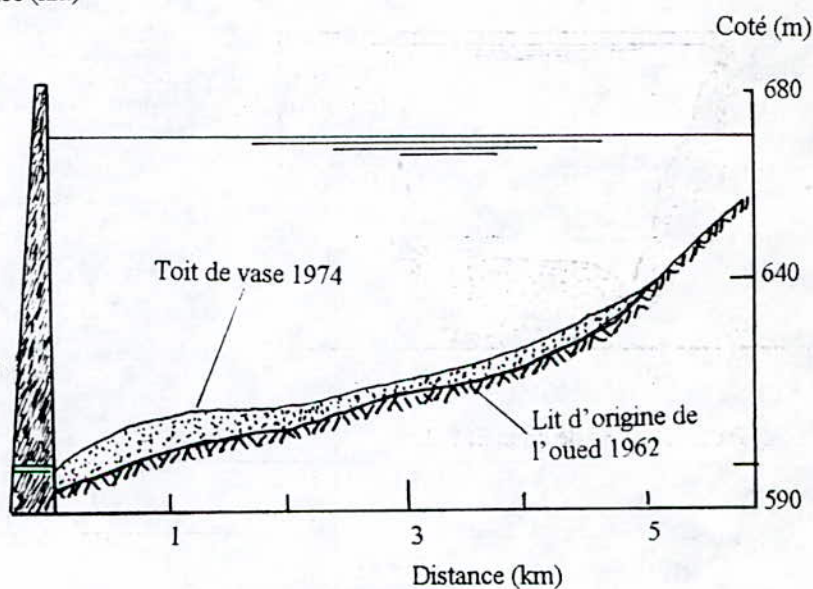


b) Profil 36 - 37 de oued El Bahar

Fig.51- Profil en travers du toit de vase



a) Branche de oued Bahar



b) Branche de oued Labsat

Fig.52- Profil en long du toit de vase dans la retenue du barrage d'ERRAGUENE

d) Moyens de lutte contre l'envasement

Le moyen de lutte le plus utilisé contre l'envasement de la retenue du barrage d'ERRAGUENE est l'évacuation des courants de densité par un système approprié composé de 04 vannettes de dévasement de 40 cm de diamètre, et de 02 vannes de dégravemet de 2,75 x 1,80 (fig. 53).

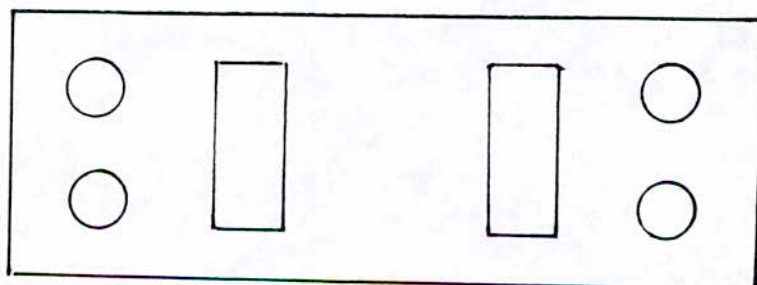


Fig.53-Dispositif de soutirage

Conclusion

A travers ce bref constat sur la situation d'une dizaine de barrage vis à vis de leur envasement, nous avons dressé un tableau récapitulatif des différents moyens utilisés à travers ces barrages (tableau 14).

Barrage	Année de la mise en exploitation	Capacité initiale 10^6 m ³	Env. moyen annuel 10^6 m ³ /an	Moyens de lutte contre l'envasement utilisés au niveau du barrage	Observation
Beni Amrane	1988	15.6	0.39	-Utilisation fréquentes des chasses par les six vannes installées dans le corps du barrage	
Hamiz	1879 1935	30*	0.35	-Surélévation de la digue en 1883 de 7 m de hauteur pour porter sa capacité à $23 \cdot 10^6$ m ³ . -Surélévation de la digue en 1935 pour atteindre une hauteur de 45 m pour porter sa capacité à $30 \cdot 10^6$ m ³ . -Dragage de la retenue de 1967 à 1972 pour dévaser un volume de $8.65 \cdot 10^6$ m ³ de vase. -utilisation des soutirages.	La capacité a chuté de $17.7 \cdot 10^6$ m ³ en 1964.
K'sob	1939	11.6	0.30	-Surélévation de la digue en 1973 d'une hauteur de 15 m	
Zardezas	1945	15	0.25	-Surélévation de la digue en 1975 pour porter la capacité à $35 \cdot 10^6$ m ³ . -Dragage de la retenue depuis 1993.	
Oued El Fodda	1928	228	2.66	-Pratique des soutirages par six vannettes placées dans le barrage depuis 1961.	Vanne de fond bloquée depuis 1948.
Ghrib	1939	280	3.2	-Pratique des soutirages par la vanne de fond. -Réalisation d'un barrage de décantation à l'amont qui a permis de retenir environ $35 \cdot 10^6$ m ³ de vase en 1986	
Cheurfas I	1885	14.6		-Pratique des soutirages par la vanne de fond. -Une faible quantité de vase ($0.318 \cdot 10^6$ m ³) a été dévasée par le dragage en 1953. -Dragage (de 1959 à 1962) d'un volume de vase de $8.5 \cdot 10^6$ m ³ .	Barrage abandonné en 1962.
Fergoug	1970	18		-Pratique des soutirages. -dragage de la retenue de 1989 à 1992 d'un volume de vase de $7.1 \cdot 10^6$ m ³ a été dévasé.	Barrage envasé à 90% en 1989.
Foum el Gherza	1950	47		-Pratique des soutirages par la vanne de fond.	Vanne bloquée de 1982 à 1989.
Erraguene	1962	202		-Pratique des soutirages par les quatre vannettes et les deux vannes de dégrèvement depuis 1962.	

Tableau14: Différents moyens de lutte contre l'envasement utilisés dans certains barrages Algériens

Deuxieme partie :

les mécanismes de l'envasement dans les retenues de barrages

III.1. L'érosion des bassins versants

L'érosion est un phénomène très répandu en zone Méditerranéenne, touchant particulièrement les pays d'Afrique du Nord dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol.

Le taux d'érosion spécifique atteint par ces pays avoisine les valeurs les plus importantes du monde (tableau 15) [62].

Pays	Fleuve	Bassin versant (Km ²)	Volume spécifique moyen de transport solide t/km ² /an	précipitations moyennes annuelles (mm)
Chine	Fleuvejaune	715000	2640	470
	Yang tsé	1025000	491	800
	King	57000	7190	
Inde	Damodar	200000	1400	1200
	Kosi	61000	2800	1800
	Mohunadi	132000	465	1380
Iran	Sefidrud	55000	750	
Soudan	Abbara	1000000	650	
Afrique duNord	Agrioum	657	3400	760
	Sebou	3470	320	660
Etats Unis	Colorado	35000	735	
	Mississipi	2977000	50	
Italie	P6	53500	300	1100
France	Iserre	11750	615	1100
	Orac	990	700	1400
	Durance	3580	150	900

Tableau 15 -Taux d'érosion spécifique de certains bassin-versants

Les travaux de DEMMAK (1982)[3] sur l'érosion et le transport solide montrent que le taux d'érosion spécifique atteint dans le Nord Algérien les valeurs les plus élevées du Maghreb, dépassant 2000 t/km².an sur la plupart des bassins versants de l'Atlas Tellien (Rhiou, sly, Fodda, Mazafran, Isser, Soummam...). Il atteint 4000 t/km².an sur la chaîne des côtiers du Dahra[63].

L'intensité du phénomène se manifeste essentiellement en période des crues, c'est ainsi que les fortes crues de mars 1974 d'une durée de 3 jours ont drainé 30.10⁶ de tonnes de sédiments dans la région Algéroise pour les bassin²versants côtiers [3]. La quantité moyenne annuelle du sol érodé en Algérie est environ de 180.10⁶ de tonnes.

III.2. Les apports solides dans la retenue

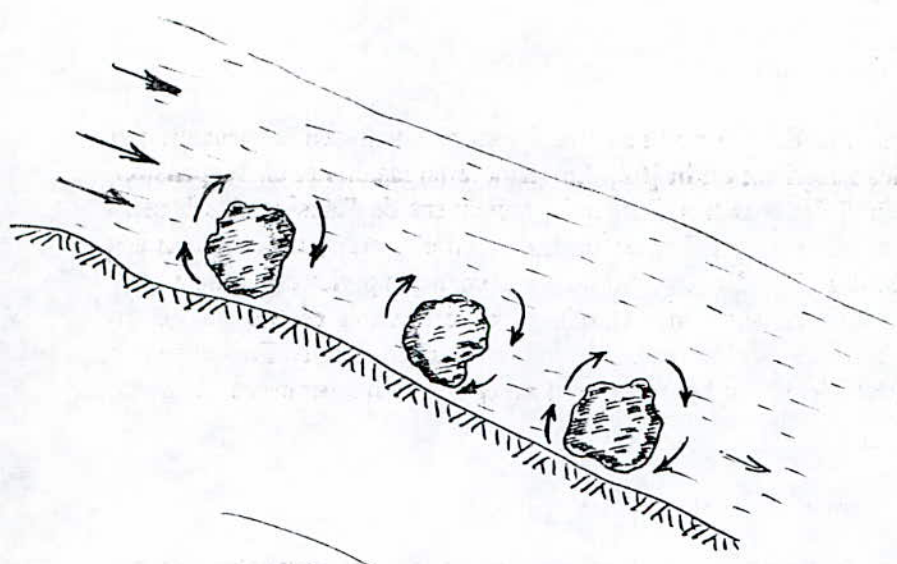
Les eaux des cours d'eaux transportent les sédiments sous deux formes [62] [64]:

- par charriage
- en suspension

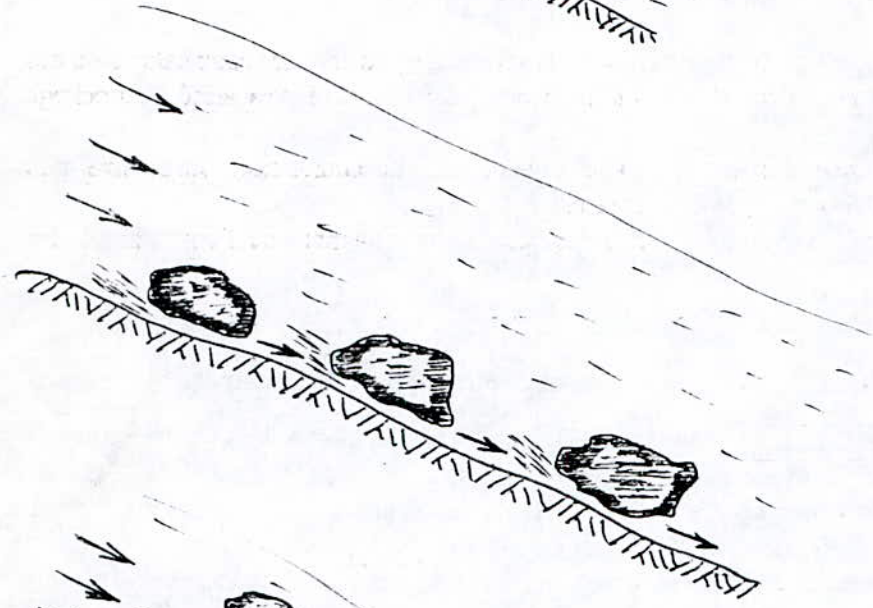
III.2.1. Les apports solides par charriage

Ils concernent les matières minérales en phase solide plus particulièrement les plus gros éléments qui contribuent à la formation et à l'équilibre du lit, principalement la pente. Ces éléments sont transportés sur le fond par roulement, glissement, saltation et aussi par suspension lorsque le débit liquide est très important (fig. 54) [65].

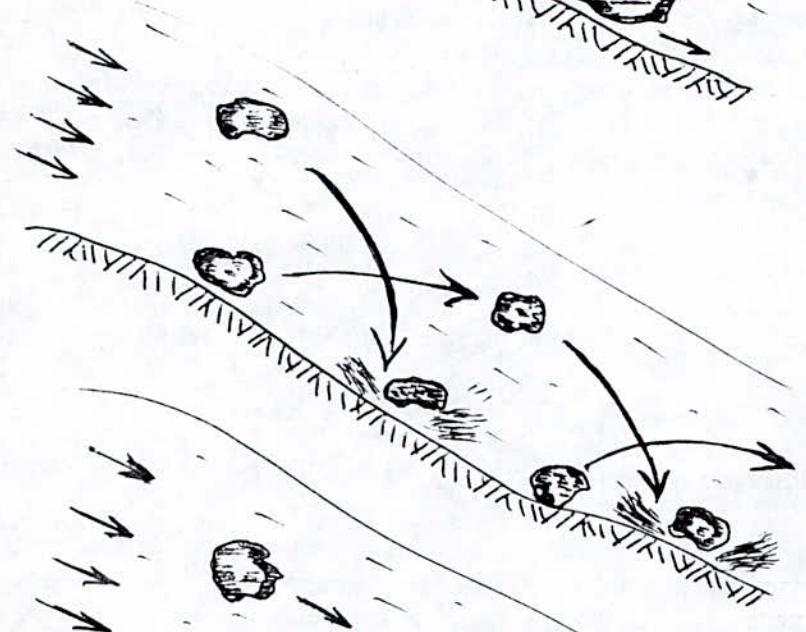
Le débit charrié dans les retenues Algériennes est estimé entre 10 à 15 % du débit en suspension [13]. En France par exemple, le flux du transport spécifique moyen par charriage avoisine 35 m³/km².an à Serre Ponçon, il descend aux environs de 20 m³ /km².an à Cadarache, il était de 25 m³/ km². an à l'ancienne prise de Briiane sur le Verdon, le flux à hauteur de Greoux est de 25 m³/ km². an [45].



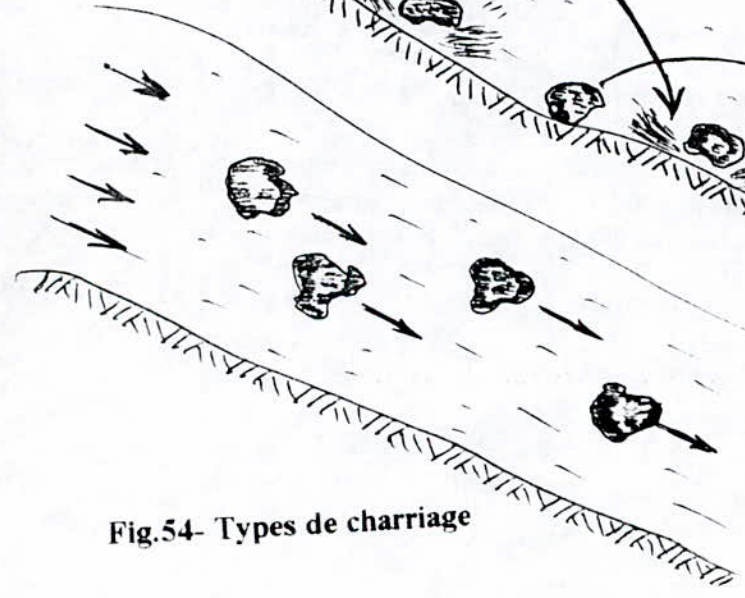
a - Roulement



b- Glissement



c- Saltation



d- En suspension
lorsque le débit
liquide est important

Fig.54- Types de charriage

III.2.2. Les apports solides en suspension

Ils concernent les éléments fins du transport solide, qui sont maintenus en suspension par la turbulence de l'eau créée par les matériaux du lit [62]. La quantité de matériaux en suspension dépend uniquement des quantités d'éléments très fins qui proviennent de l'érosion des bassins versants due au ruissellement des eaux de pluie. Les concentrations d'éléments en suspension des oueds Algériens dépassent souvent les 100 g/l surtout pendant les premières pluies d'automne.

A titre d'exemple, dans l'oued Isser (Boumerdes), la concentration est de 20 g/l en moyenne, et elle dépasse 265 g/l en période de crue. Par contre dans les rivières Françaises, la concentration en matériaux fins est d'environ 2 g/l en moyenne et atteint fréquemment 20 g/l en crue [5].

III.3. Résultante: Piégeage des sédiments dans la retenue

Arrivées dans les retenues, les particules solides seront piégées dans les eaux calmes de ces dernières, se tassent et se consolident diminuant ainsi progressivement leur capacité de stockage en eau.

L'envasement des retenues est défini comme étant l'accumulation successive des sédiments transportés par les cours d'eau dans la retenue.

L'organigramme de la figure 55 donne les étapes du processus de l'envasement des retenues [55].

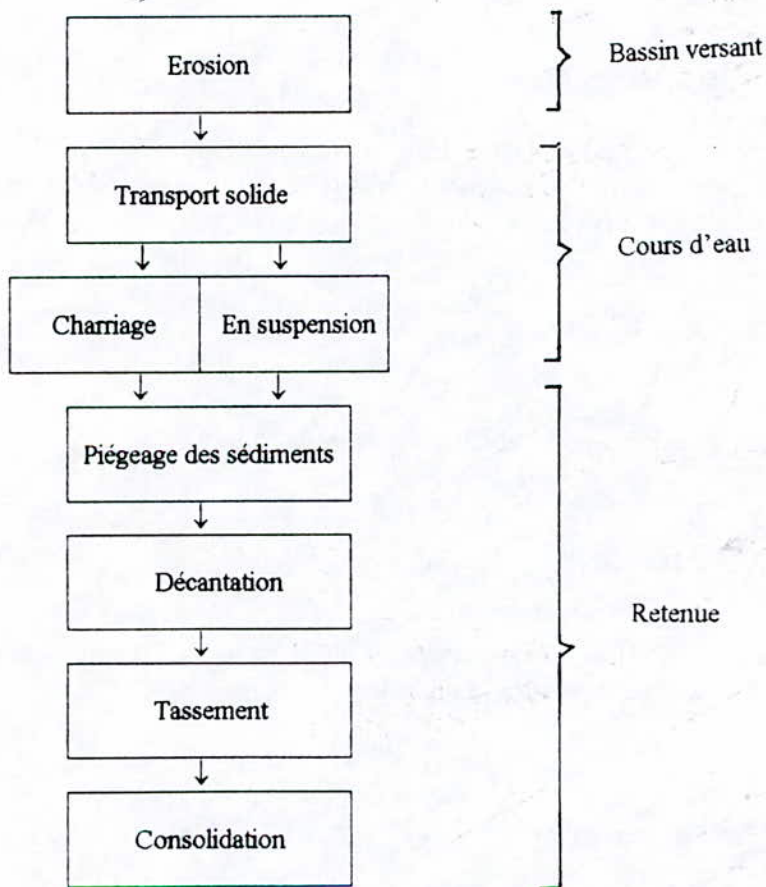


Fig.55 - Organigramme du processus d'envasement d'une retenue.

III-4- Dépôt et tassement des sédiments

Les sédiments apportés en suspension par les cours d'eau sont susceptibles de se disperser plus ou moins dans les eaux de la retenue. Ils peuvent, soit se décanter et y être piégés, soit simplement y transiter en suspension avant d'en être évacués, selon les conditions d'écoulement de la retenue. Il importe donc, de connaître les conditions de dépôt de ces sédiments.

III-4-1- Conditions et débits de dépôt

Les travaux menés par **KRONE** en 1962 [5] ont abouti à une évaluation du débit de dépôt en fonction des conditions d'écoulement. **KRONE** a proposé une loi donnant le débit de dépôt.

Le débit déposé est proportionnel à la concentration (C), la vitesse de chute (W_s) et la contrainte tangentielle (τ_0):

$$Q_{\text{dépot}} = C \cdot W_s \cdot \left(1 - \frac{\tau_0}{(\tau_0)_s}\right) \dots\dots\dots 3$$

avec, $\tau_0 < (\tau_0)_s$

Pour des vases marines en conditions de laboratoire, **KRONE**, **PARTHENIADES** et **OWEN** ont donné tous les trois une valeur de l'ordre de $8 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}^2$ [5].

en fait, cette valeur doit dépendre du type de vase et de floculation.

Cette loi est assez largement utilisée et elle a été largement vérifiée notamment au laboratoire d'hydraulique de France.

III-4-2 Vitesse de chute des particules en eau calme

La connaissance de W_s est nécessaire pour évaluer le débit de dépôt selon la loi ci-dessus.

En eau calme, la vitesse de chute s'obtient en écrivant l'équation d'équilibre des forces de gravité et des forces de résistance du fluide. Soit pour une sphère:

$$\frac{\pi \cdot d^2 \cdot g}{6} (\rho_s - \rho) = \frac{1}{2} \rho \cdot C_x \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4}\right) \cdot W_s^2 \dots\dots\dots 4$$

C_x est le coefficient de traînée qui dépend du nombre de Reynolds de chute:

$$IR_{cW_s} = \frac{W_s \cdot d}{\nu} \dots\dots\dots 5$$

Dans le cas de sédiments fins ($d < 0,1 \text{ mm}$) le mouvement du fluide est laminaire autour du grain ($IR_c < 1$). On a alors: $C_x = 24 / IR_{cW_s}$ et on obtient la relation de Stokes:

$$W_s = \frac{g \cdot d^2}{18\nu} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) \dots\dots\dots 6$$

Pour les silts, l'équation de Stokes donne des valeurs correctes, sous réserve que la concentrations ne dépasse pas 20 g/l et que l'approximation de la sphère ne soit pas trop mauvaise. Sinon, les vitesses de chute sont plus faibles.

III-4-3- Influence de la floculation

Les particules élémentaires de dimensions très petites telles que les argiles, les limons sous forme de vase ou de boue ont tendance à s'agglomérer dans certains milieux aqueux et à former des agrégats ayant des dimensions plus importantes. Ce phénomène de floculation est du en particulier à des forces d'origine électrochimique. Elles apparaissent dès que le milieu liquide a une concentration électrolytique capable de créer une attirance entre deux particules isolées.

Le pH, la température, la valeur des ions, les dimensions des particules et leur concentration ont une influence directe sur l'importance de la floculation.

On peut dire de manière plus simple que la floculation augmente avec la concentration en sels floculants et en matière en suspension et cela d'autant plus que les particules sont plus fines.

La conséquence directe de ce phénomène est qu'un agrégat formé par plusieurs particules se retrouve avec des dimensions autrement plus grandes et a une vitesse de chute plus importante.

MIGNOT C. [5] a défini un facteur de floculation comme étant le rapport entre la vitesse de chute libre des flocons ($W_{f50\%}$) dans un milieu floculant et la vitesse moyenne de chute libre des particules élémentaires $W_{d50\%}$, à l'état défloculé.

$$F = W_{f50\%} / W_{d50\%} \dots \dots \dots 7$$

III- 5-Tassement et consolidation des vases

Décantés par gravité sur les fonds, les sédiments formeront des dépôts qui pourront subir des tassements et des consolidations au cours du temps.

Le tassement d'un sol sera en étroite relation avec sa perméabilité c'est à dire les possibilités d'évacuation de l'eau interstitielle contenue entre les particules solides. Pour des matériaux à perméabilité moyenne ou forte (coefficient de perméabilité K supérieure à 10^{-5} m/s), il y aura une consolidation rapide voire instantanée. C'est le cas des matériaux sableux ou graveleux. Par contre pour des matériaux à faible perméabilité (K moins de 10^{-5} m/s), tels que les sables vaseux, les vases, la consolidation des dépôts sera très lente.

Après leur dernière phase de décantation gravitaire à vitesse entravée, les flocons de vase vont commencer, sous la surcharge des couches déposées au dessus d'eux, à se tasser en évacuant progressivement leur eau interstitielle. **MIGNIOT** et **PARTHENIADES** décrivent différentes phases du tassement. Ce dernier indique que les flocons se sont regroupés par agrégats et forment des « réseaux maillés ». Dans une première phase de tassement, le réseau des agrégats se réorganise pour devenir plus dense puis les agrégats sont rompus et les flocons se rapprochent. Dans une seconde phase, les flocons se déforment et l'eau entre flocons s'évacue par drainage (phase de type consolidation primaire). On obtient une structure homogène .

III-5-1-Tassement des sédiments grossiers-galets, graviers et sables

Les sédiments non cohésifs une fois déposés sur les fonds ne se tassent pratiquement pas sous leur propre poids mais peuvent subir une « mise en place » avec une imbrication entre eux leur permettant d'avoir une portance et de mieux résister aux actions hydrodynamiques. Des sols constitués par de tels matériaux grossiers (galets, graviers, sables) sont pratiquement stables dans le temps, leur indice des vides et leur masse spécifique dépendent du type de sable.

III-5-2-Lois de tassement

Les études sur le tassement naturel de différents sédiments fins, ont montré que la concentration moyenne d'un dépôt varie comme le logarithme du temps avec différents domaines de tassements correspondants à la vitesse entravée des flocons. Dans ces conditions de tassement, la variation de la concentration « C_v » défini comme étant le poids de particules sèches par volumes de mixtures répond à l'expression:

$$C_v = \alpha \text{Lnt} + \beta \dots \dots \dots 8$$

t: temps de tassement.

α : facteur qui dépend du diamètre des particules.

β : facteur lié au milieu aqueux.

IV.1. Problématique

Tout le monde est d'accord que la capacité utile d'un réservoir diminue au cours du temps suite aux dépôts successifs des sédiments sur le fond de la retenue, mais la question qui se pose est de quelle manière ces particules solides se sont réparties et distribuées dans l'ensemble de la retenue surtout lorsqu'on sait que ce phénomène complexe dépend de certains paramètres tel que :

- la forme géométrique de la retenue: petite, grande, « canal » et « lac »,
- la pente du fond de la retenue,
- la profondeur de la retenue,
- L'apport solide de la retenue.

Peu d'auteurs ont essayé de décrire le phénomène de la distribution des sédiments dans les retenues.

EAKIN H-M. (1936) [66] a indiqué que les particules les plus fines, par contraste avec les grains rugueux qui tendent à se concentrer dans des zones limitées à la partie haute du réservoir, se répandent largement au sein du réservoir et en beaucoup de cas s'accumulent dans les parties les plus profondes, peut être attribuée au phénomène de l'écoulement des eaux lourdement chargées sous celles déjà clarifiées de la retenue.

FAURE M. étudia en 1939 [67] la sédimentation de la retenue du barrage « La petite RHUE » (France) de faibles dimensions: longueur 1050 m, largeur 6 à 20 m, il n'a pas constaté comme au réservoir du SAUTET une séparation nette entre les dépôts de matériaux charriés sur le fond et transportés en suspension. Toutefois, tandis qu'à l'extrémité amont du réservoir les atterrissements comprennent 15 % de vase et 85 % de sable et graviers, à proximité du barrage, ces proportions deviennent respectivement 75% et 25%. L'auteur pense que le « delta » amont avait dès 1935 atteint les abords du barrage et que ses sables s'étaient mélangés aux vases précipitées dans cette région depuis la mise en service du barrage.

Selon les travaux de **BRUNE (1944)** [68] effectués sur 44 réservoirs de barrages Américains, les grands réservoirs retiennent 100 % des sédiments en l'absence de dispositions particulières. Le piégeage des sédiments fins est moins important. Par contre les "Petites" retenues (retenues de basse chute) sont beaucoup plus brassées et les phénomènes ne sont pas aussi distincts. Les courants de densité en sont absents, le classement granulométrique est moins net et l'envasement est plus uniforme sur toute la retenue. (fig. 56-a)

Selon **DROUHIN, MALLET et PACQUANT (1951)**[69], la distribution des matériaux dans les réserves est graduellement croissante de l'amont vers l'aval. Les matériaux grossiers s'accumulent d'abord immédiatement à l'amont de la retenue, il s'ensuit une rupture de la pente de la rivière qui modifie son profil d'équilibre. Des quantités considérables de matériaux peuvent alors s'accumuler en amont de la réserve et sur des hauteurs et des distances parfois très importants (fig. 56-b).

Selon **REMENIERAS G. et BRAUDEAU G.** (1951) [67], dès l'entrée d'un cours d'eau à débit solide notable dans le remous d'un barrage dont la cote de la retenue est maintenue constante, s'amorce une sorte de plateau sous lacustre faiblement incliné dans le sens du courant ; le front aval de ce plateau qui présente un talus assez raide analogue à celui d'un remblai exécuté par décharge à l'avancement progresse peu à peu dans la retenue, et en l'absence de toute manoeuvre de chasse atteint le barrage au bout d'un temps plus ou moins long, ce « delta » qui comporte peu d'éléments fins est formé en majeure partie par les matériaux charriés sur le fond de la rivière (galets, graviers et sables grossiers).

Les vases et limons en suspension dans l'eau se déposent en général en aval du « delta » suivant un processus de décantation analogue à celui réalisé dans les dessableurs des usines hydroélectriques suivant leur granulométrie et la topographie des lieux, la répartition des dépôts correspondants est alors plus ou moins uniforme dans l'ensemble de la retenue. Exceptionnellement, semble-t-il, les limons peuvent créer des courants de densité constitués par un écoulement d'eau turbide au sein des eaux relativement claires de la retenue; ces eaux troubles peuvent cheminer sur le fond du réservoir et venir s'accumuler dans sa partie aval en formant une sorte de petit lac de boue.

Dans les retenues de faible importance par rapport au débit d'alimentation -surtout si elles sont étroites et de faible longueur- les matières en suspension dans l'eau n'ont pas le temps de se déposer complètement et sont partiellement transportées à l'aval à travers les ouvrages de prise et d'évacuation des crues.

Selon **DUQUENNOIS H.** (1953-1957) [70] [71] [72], une fois que la crue arrive au niveau de la retenue, les matériaux grossiers se déposent dans la zone de remous en formant un "delta" en queue de la retenue. Les sédiments fins plongent au fond de la retenue et s'y écoulent sous la forme d'un courant de densité dans le cas où l'écoulement amont est torrentiel. S'il est fluvial, il se forme un courant de turbidité pour des débits et concentrations des apports suffisamment élevés. Si ce n'est pas le cas, l'écoulement amont se disperse alors plus ou moins dans la retenue, les sédiments fins sont tributaires de la gravité de la turbulence et des écoulements dans la retenue (fig. 56-c).

JOHSON H. (1980) [73] a affirmé que dans les grands réservoirs de barrages, les sédiments grossiers se déposent à l'amont de la retenue sous forme de « delta » et les particules fines se décantent dans tous les endroits du réservoir (fig. 56 b).

Selon **PARZONKA W.** (1986) [74] [2], la granulométrie des matériaux déposés dans les réservoirs est graduellement décroissante de l'amont vers l'aval. Une fois ces sédiments arrivés dans la retenue; la partie amenée par charriage se dépose tout près de l'entrée de la retenue sous forme de "delta", ce sont généralement les matériaux les plus grossiers (fig. 56 b). Les matériaux transportés en suspension se déposent d'une manière plus ou moins uniforme et dans différentes parties de la retenue. Les plus fins peuvent même arriver près du barrage où ils se déposeront. Généralement, la quantité des sédiments en suspension est 5 à 10 fois le volume de celui en charge assise (en dépôt).

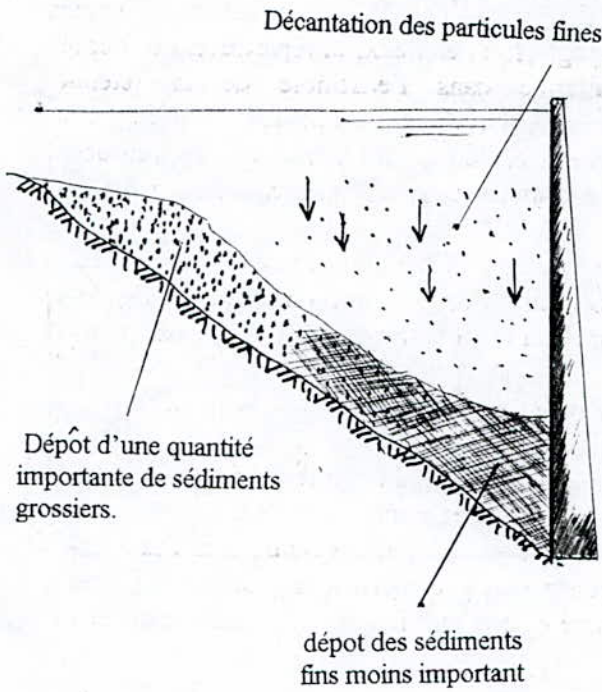
SCHEURLEIN H. (1992) [75] a affirmé que les sédiments pénètrent soit en tant que « charge assise » (en dépôt) soit en tant que « charge suspendue ». Généralement la quantité des sédiments en suspension est égale 5 à 10 fois le volume de celui en charge assise (en dépôt). Les dépôts des sédiments dans un réservoir sont ainsi composés: la quantité volumineuse qui est portée près du lit se dépose en forme de « delta » à l'entrée du réservoir. La matière en suspension est transportée plus loin et se dépose d'une manière plus ou moins uniforme sur tout le réservoir.

Suite aux différentes approches données par les auteurs cités précédemment, deux types de distribution des sédiments peuvent déjà être dégagés:

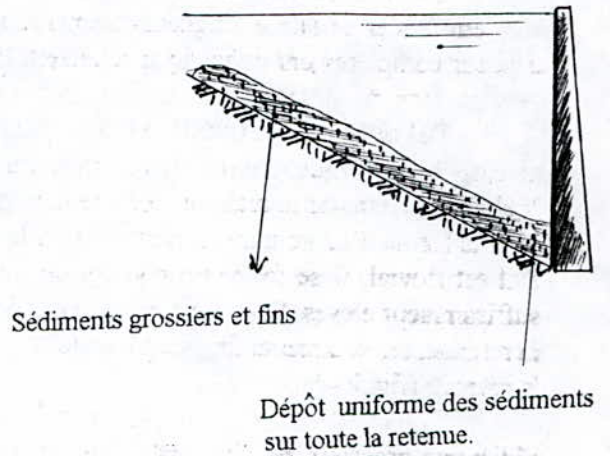
- Distribution des sédiments par courants de densité
- Distribution des sédiments par l'avancement du « delta » des sédiments grossiers et décantation des particules fines.

Un troisième type de distribution des sédiments particulier aux petites retenues (de basse chute) peut être mis en évidence. La distribution des sédiments dans une telle retenue est encore méconnu.

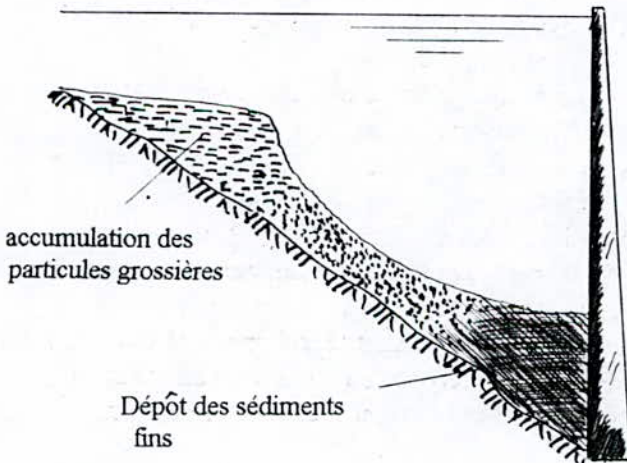
1- Grande retenue



2- Petite retenue



a- Approche de BRUNE



b) Approche de DROUHIN, JOHSON, PARZONKA, et SCHEURLEIN.

c- Approche de DUQUENNOIS H.

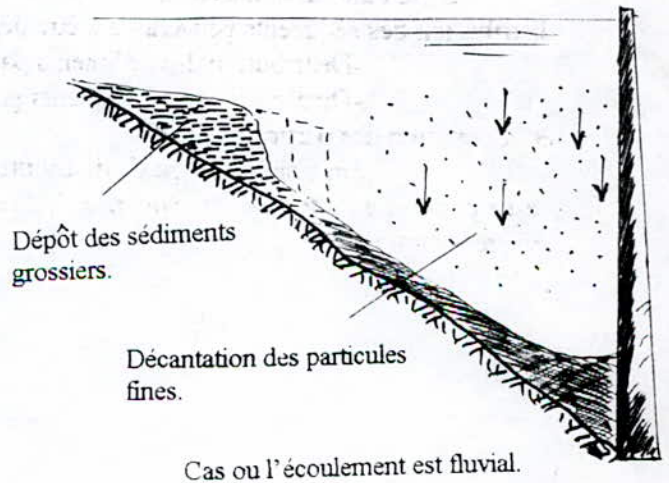
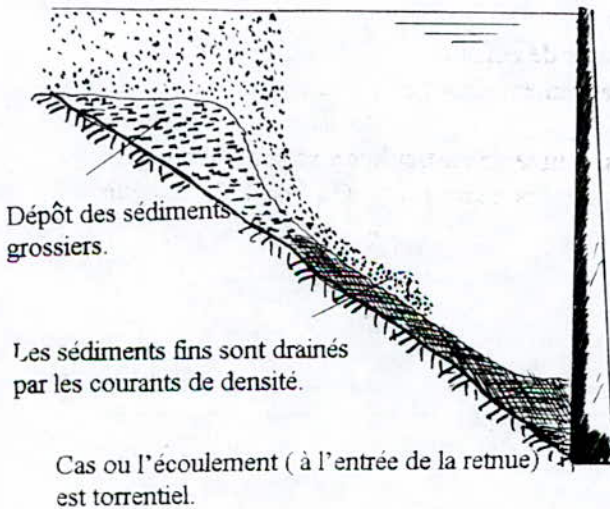


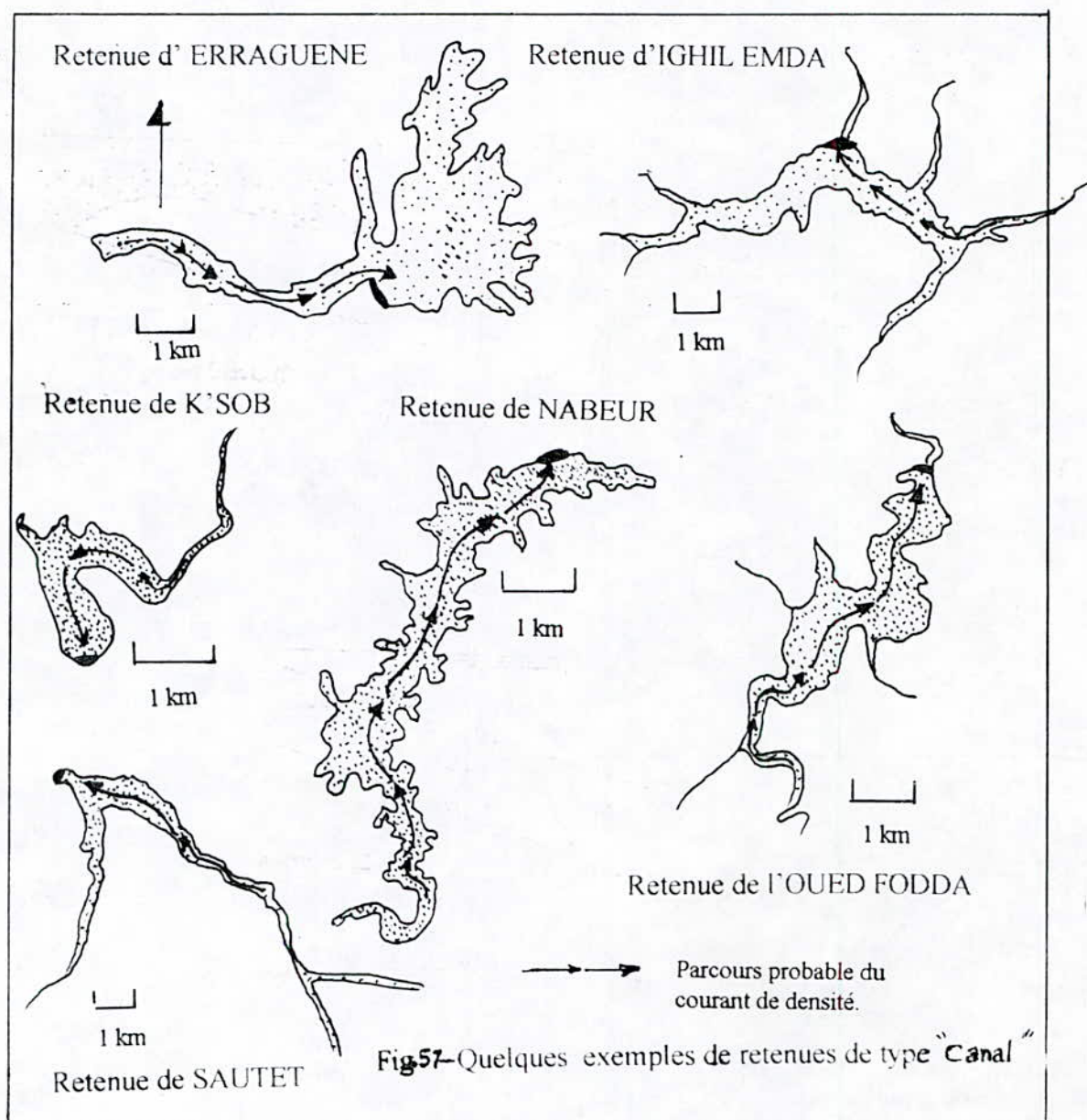
Fig.56- Distribution des sédiments dans les retenues

IV.2. Distribution des sédiments dans une retenue par courants de densité

Comme il a été déjà décrit par DUQUENNOIS H., la formation des courants de densité dans une retenue est conditionnée par deux paramètres:

- un apport solide important (concentration élevée) dans la retenue,
- un écoulement torrentiel à l'entrée de la retenue, c'est à dire que le cours d'eau principal présente une forte pente. Par exemple l'oued Berd déversant dans la retenue d'IGHIL EMDA présente une pente de 18 % où peuvent rouler des eaux boueuses dont la charge est supérieure à 100 g/l [76].

En plus de ces deux conditions nous avons constaté que les retenues d'IGHIL EMDA [77] [78] [79] [80] [81] GHRIB [82] OUED EL FODDA [83] FERGOUG [58] ZARDEZAS [84] HAMIZ [84] K'SOB, ERRAGUENE, NABEUR (Tunisie)[85], SAUTET (France)[86], SERRE PONCON(France)[87], LAKE MEAD (Etats Unis)[78], et SANMENXIA (Chine)[78] qui s'ensavent par les courants de densité présentent une forme géométrique de type « canal » (fig. 57), ce qui favorisera la propagation et l'entretien des courants de densité jusqu'au pied du barrage.



IV.2.1. Les courants de densité dans un canal prismatique

IV. 2. 1.1. Définition :

Les courants de densité appelés parfois courants de gravité sont des phénomènes qui se créent naturellement ou artificiellement. Ils correspondent aux intrusions de fluides dans d'autres sous des conditions bien précises.

Ces écoulements stratifiés; mouvement de deux ou plusieurs masses de fluides miscibles ou non, ont des densités différentes dues à la variation de la température ou à la présence de matières solides en suspension ou encore de matières dissoutes.

Ils se propagent en conservant leur individualité ou en se mélangeant au fur et à mesure.

Ces écoulements privilégiés peuvent se faire (fig. 58):

- Au dessous « Underflow »,
- Au dessus « Overflow »,
- A travers « Interflow »,

du milieu ambiant considéré.

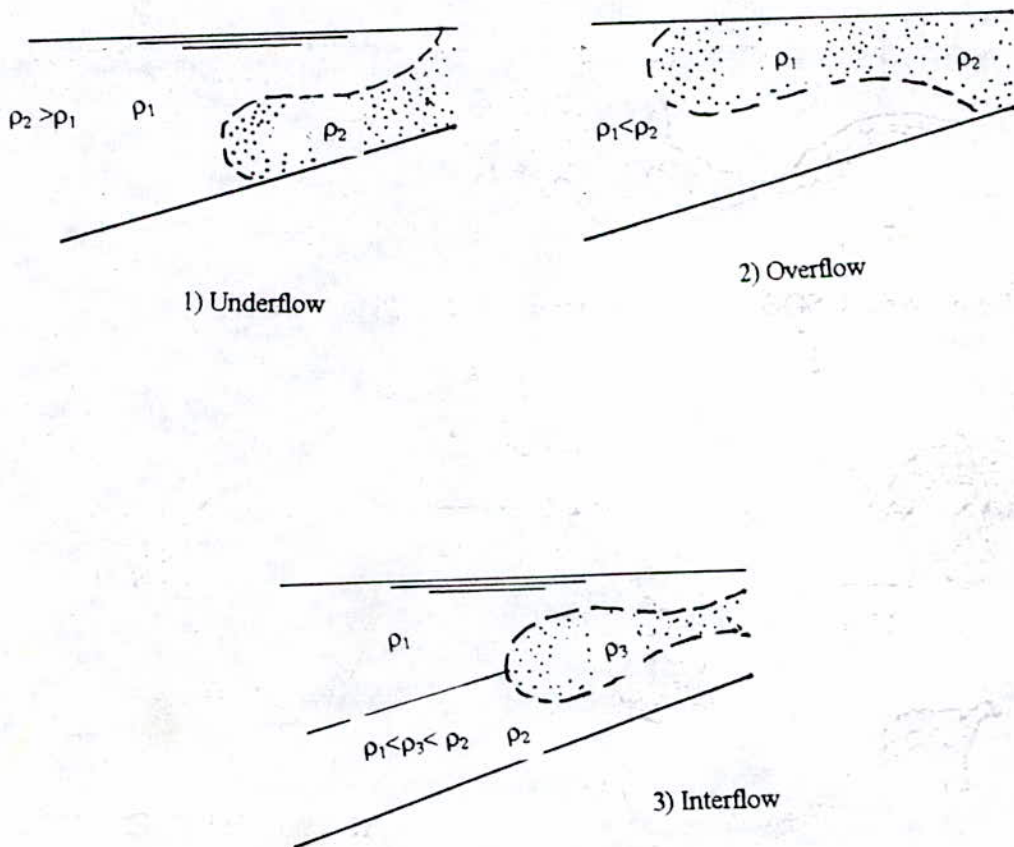


Fig.58- Types d'intrusions

IV. 2.1. 2. Anatomie d'un courant de densité

a) Point de plongée

On appelle point de plongée, le point où le fluide dense disparaît au dessous du fluide surageant (fig.59).

b) La tête et le corps du courant de densité

Un courant de densité peut être décomposé en deux parties distinctes (fig. 60).

- * La tête
- * Le corps.

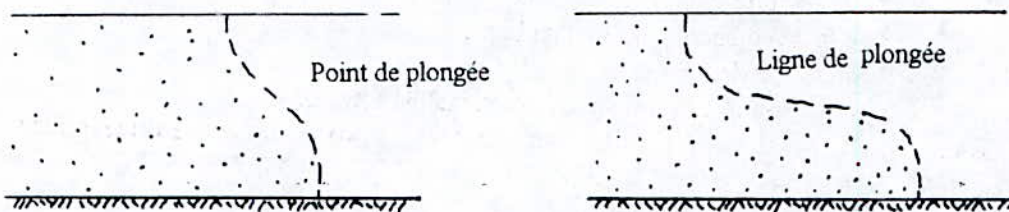


Fig.59- La plongée

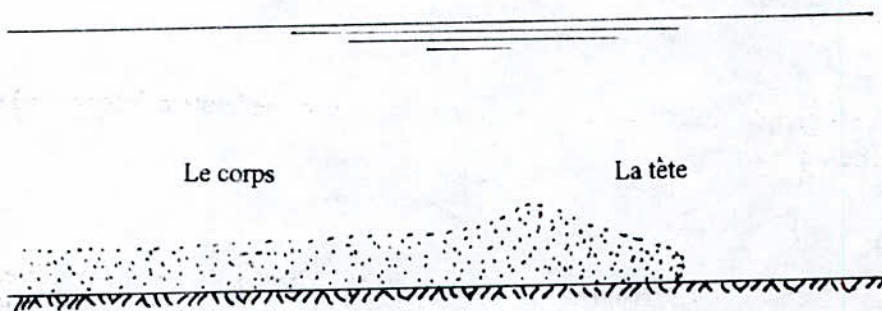


Fig.60- Le corps et la tête du courant de densité

b.1. La tête

-Description :

C'est la zone où le mélange entre les deux fluides de différentes densités est le plus considérable. Elle est caractérisée par :

-Son front (ou nez) :

Son élévation par rapport au fond a sollicité de nombreuses études expérimentales. Elle dépend du nombre de Reynolds et de la hauteur du fluide [88] [89].

-Sa longueur et sa hauteur :

Ces deux paramètres sont indépendants et quelques expériences ont montré l'influence de Reynolds, de la pente du fond et des contraintes sur celles-ci. [90].

- La forme :

Il n'est pas possible d'attribuer une forme unique au contour de la tête, car elle dépend :

- * du sens du mouvement du fluide surnageant;
- * de la turbulence du milieu ambiant;
- * des forces de viscosité;
- * de la variation de la concentration sur la verticale.

Dans le cas d'un écoulement permanent entretenu, le profil s'avère presque régulier.

-Types d'instabilité

Il existe deux types d'instabilité au niveau de la tête pouvant apparaître et conduire à des mélanges:

-Les rouleaux :

Lorsque les forces de viscosité sont assez grandes, de petites vagues se forment et s'enroulent au niveau de la tête.

-Les lobes et les crevasses :

il y'a formation d'une série de lobes et de petites crevasses. Ces dernières sont multipliées par la subdivision des grands lobes.

b.2) Le corps

Cette autre grande partie du courant est caractérisée par une hauteur inférieure à celle de la tête et une vitesse supérieure.

c) L'interface

Elle correspond à la transition entre deux couches de fluides de densités différentes. Cette surface est le siège de gradients maximaux de densité et de vitesse. Ces caractéristiques sont influencées par :

- * La miscibilité des différents fluides;
- * La différence de densité entre les fluides;
- * Les échanges et les transferts interfaciaux;
- * Le régime d'écoulement.

Elle présente différentes formes (fig.61).

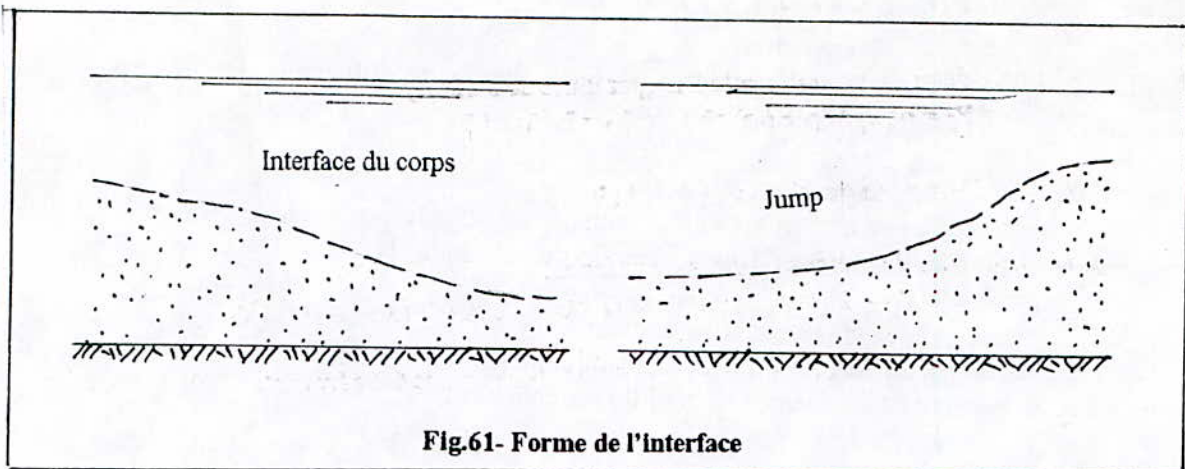


Fig.61- Forme de l'interface

IV. 2.1.3. Equation fondamentale du courant de densité [91] [92]

Soit un courant de fond en régime permanent de masse spécifique $\rho + \Delta\rho = \rho_m$ s'écoulant sous un liquide de masse spécifique ρ .

Considérons l'équilibre d'un parallélépipède de fluide A B C D de largeur B au sein de cet écoulement (fig.62). Il est soumis à des forces :

- de pression,
- de pesanteur,
- de frottement.

On suppose que l'écoulement est uniforme dans un canal de faible pente (I).

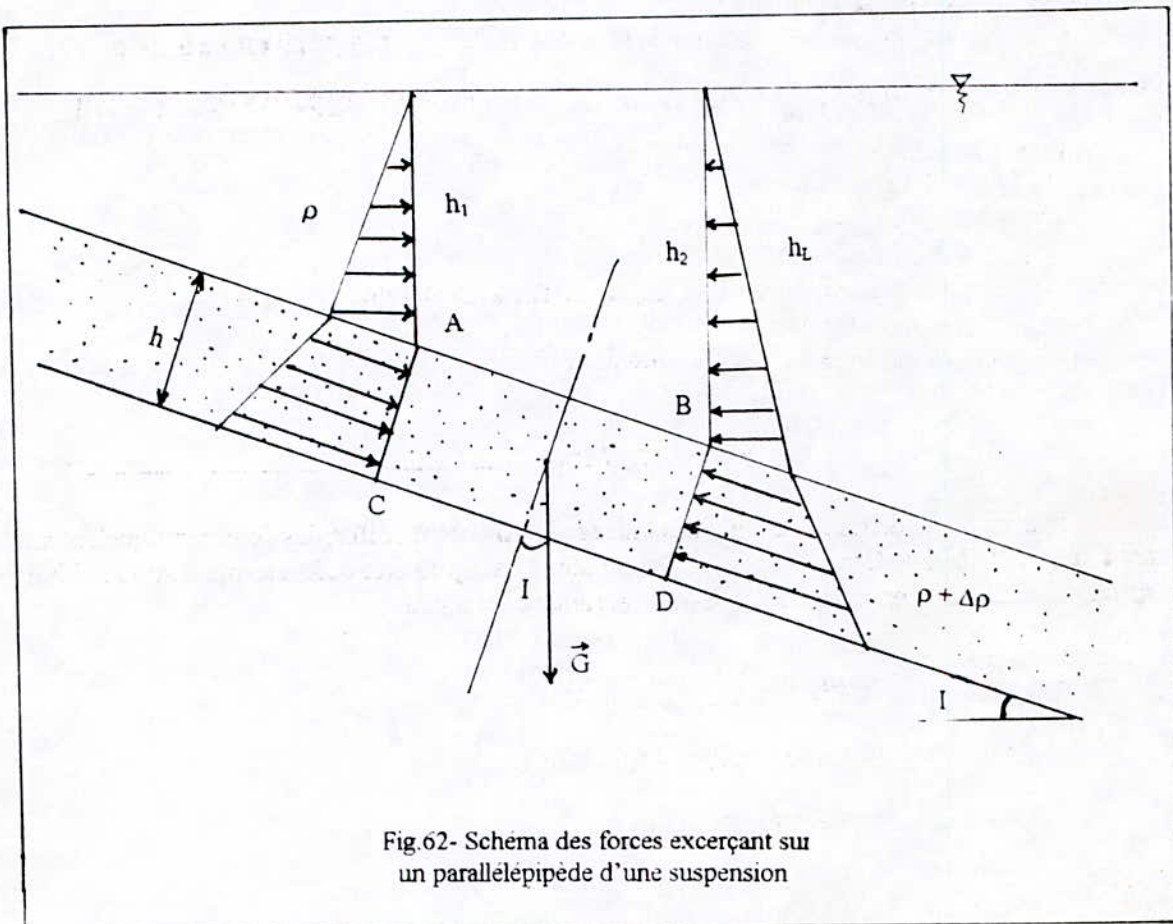


Fig.62- Schema des forces exerçant sur un parallélépipède d'une suspension

* Force de pression sur le côté AC (par unité de surface)

$$P_1 = \rho g h_1 + (\rho + \Delta\rho) g h$$

* Force de pression sur le côté BD (par unité de surface)

$$P_2 = \rho g h_2 + (\rho + \Delta\rho) g h \text{ avec } h_2 = L \sin I + h_1$$

d'où $P_2 = \rho g (h + L \sin I) + (\rho + \Delta\rho) g h$

La différence de pression sur ces deux faces :

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho g h_1 + \rho g L \sin I + (\rho + \Delta\rho) g h - \rho g h_1 - (\rho + \Delta\rho) g h$$

$$\Delta P = \rho g L \sin I \text{ donc } \Delta F = -\rho g L B h I \text{ (variation de force hydrostatique)}$$

* Force de pesanteur

$$P_x = (\rho + \Delta\rho) g L h B I$$

* Force de frottement

Sur la face AB (à l'interface)

$$F_{f1} = \tau_i L B = -(\lambda_i/4) (\rho + \Delta\rho) V^2 L B / 2$$

Sur la face CD (sur le fond)

$$F_{f0} = \tau_o L B = -\lambda_o/4 (\rho + \Delta\rho) V^2 / 2 (B + 2h)L$$

avec λ_i = coefficient de frottement à l'interface

λ_o = coefficient de frottement aux parois.

L'équilibre du Parallélépipède :

$$L h B (\rho + \Delta\rho) g I - \rho g L B h I - (\lambda_i/4)(\rho + \Delta\rho) (V^2/2) L B - (\lambda_o/4)(\rho + \Delta\rho) (V^2/2) (B + 2h)L = 0$$

$$\Delta\rho h B G I = (\lambda_i/4)(\rho + \Delta\rho) (V^2/2) B + (\lambda_o/4)(\rho + \Delta\rho) (V^2/2) (B + 2h) = (\rho + \Delta\rho) (V^2/2) [(\lambda_i/4) B + (\lambda_o/4) (B + 2h)]$$

$$\Delta\rho \cdot h \cdot B \cdot g \cdot I = \lambda_o/4 (\rho + \Delta\rho) V^2 / 2 [\lambda_i/\lambda_o B + B + 2h] \text{ D'où}$$

$$V^2 = 8h B I g \Delta\rho / \lambda_o (\rho + \Delta\rho) [\lambda_i B / \lambda_o + B + 2h]$$

avec $g' = g (\Delta\rho / \Delta\rho + \rho)$ et $R'_H = h \cdot B / ((\lambda_i / \lambda_o) \cdot B + B + 2h)$

Notons que $B (\lambda_i / \lambda_o) =$ longueur à l'interface, d'où

$$V = \sqrt{(8g') / \lambda_o} \sqrt{R'_H I} \dots\dots\dots 9$$

Les courants de densité ont donc des vitesses relativement lentes, les forces auxquelles ils sont soumis sont faibles. Ces courants de densité sont analogues aux écoulements à surface libre mais se produisant dans un monde spécial où la pesanteur est faible.

Autre méthode

de l'équation :

$$V^2 = 8g' B h I / \lambda_o (2h + B + \lambda_i B / \lambda_o)$$

$$B h / 2h \lambda_o + B \lambda_o + \lambda_i B = h / (2\lambda_o + \lambda_o) + \lambda_i$$

$$V^2 = (8 / \lambda) g' B h I / B + 2h$$

avec

$$\lambda = \lambda_o + \lambda_i B / 2h + B$$

IV. 2.1.4. Description des courants de densité [93] [94]

Les courants de densité se propagent au fond des retenues et peuvent parcourir plusieurs kilomètres. A titre d'exemple dans la retenue d'IGHIL EMDA, les courants de densité parcourent environ sept kilomètres depuis la zone de plongée jusqu'au pied du barrage. Les courants de densité remontent de faibles pentes, se réfléchissant sur des obstacles, propulsés sans cesse par une force motrice puissante ($\Delta\rho / \rho_m$). Une autre particularité de ces courants est leur individualité par rapport au fluide où ils se propagent (photos. 28 et 29). Le mélange entre les eaux troubles du courant de densité et les eaux claires ambiantes ne s'effectue que dans des proportions très faibles. A l'interface du fluide des volutes qui s'enroulent en spirales (photo.30). La tête de ces courants présente un profil très caractéristique qui pénètre dans le fluide moins dense (fig. 63 et 64). Selon **MIGNIOT C.**[95], la vitesse est maximum au voisinage du fond de la tête du courant, et est dirigée dans le sens de propagation, alors qu'elle diminue en s'incurvant vers le haut au fur et à mesure que l'on s'élève.

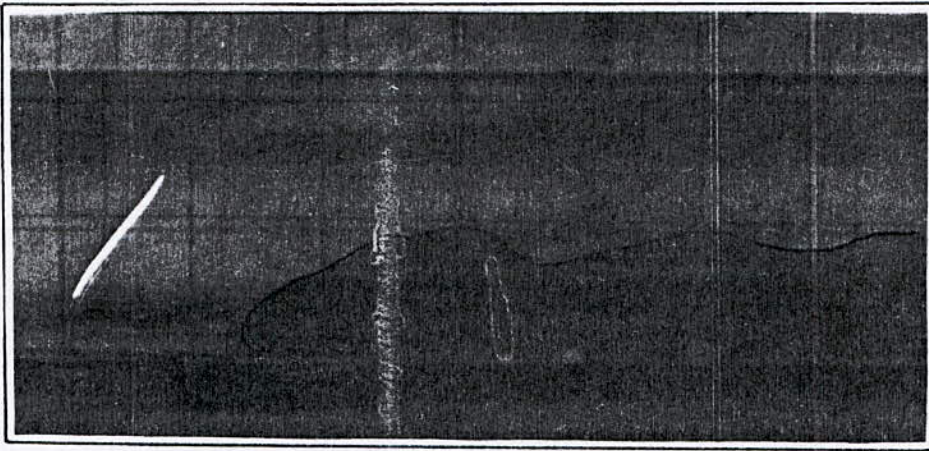


Photo.28-Propagation du courant de densité
Temps 15 mn

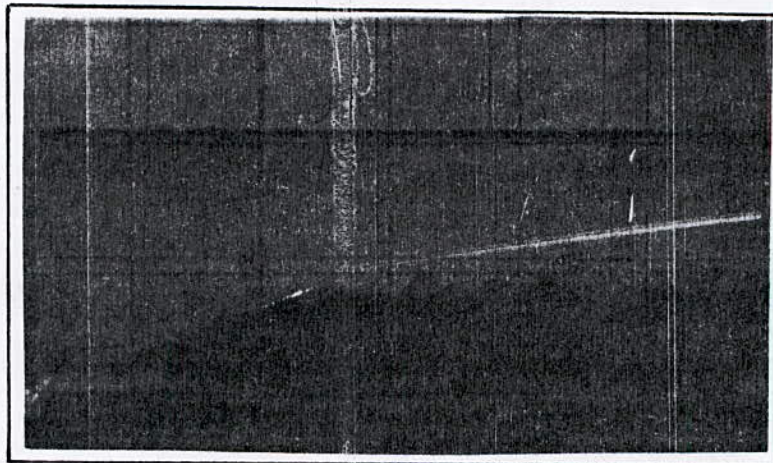


Photo.29-Propagation du courant de densité
Temps 30 mn



Photo.30- Interface: zone de dilution

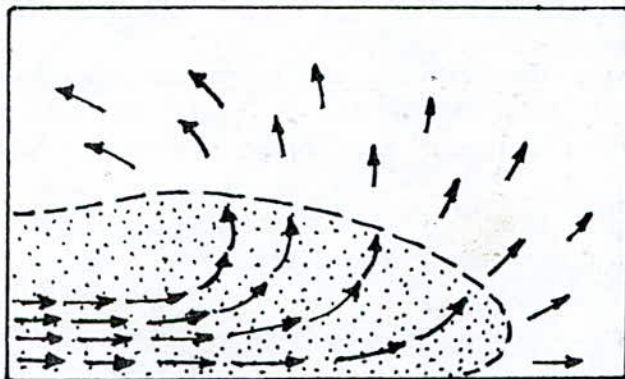


Fig.63- Forme de la tete du courant de densité

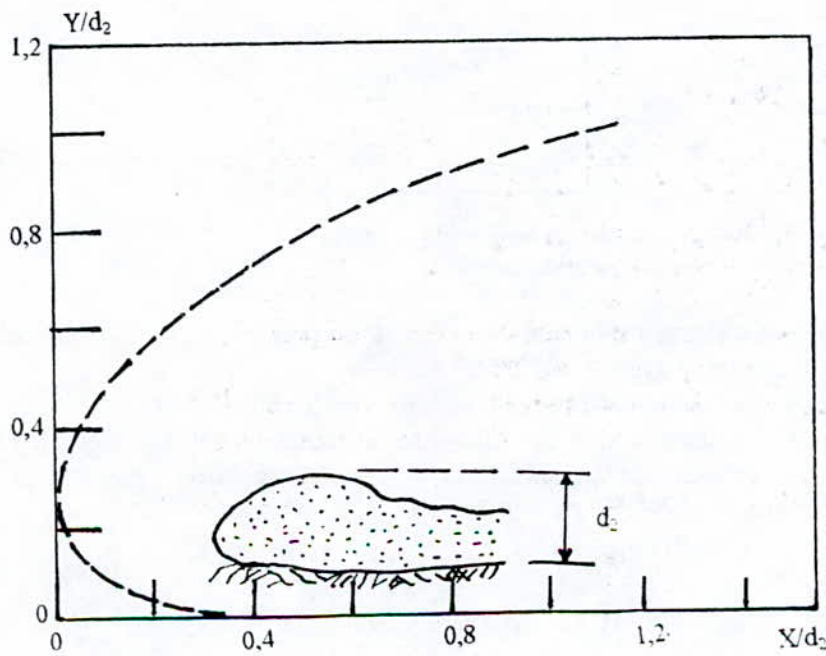


Fig.64- Tête d'un courant de densité
(d'après Ippen Gravity Waves)

A la limite supérieure, le courant est pratiquement inversé semblant s'enrouler autour d'un point fictif situé au voisinage de l'interface des deux fluides en contact. A son passage, les eaux claires situées au dessus du courant de turbidité se mettent brusquement en mouvement et forment un contre-courant supérieur dont la vitesse dépend de la hauteur de la lame d'eau.

Dans l'interface, des ondes de courte longueur peuvent prendre naissance, déferler et créer une zone de dilution importante. A l'arrière de la tête du courant de densité existe une zone de plus faible concentration qui suit le mouvement général de propagation, mais avec des vitesses graduellement lentes au fur et à mesure que l'on s'éloigne en sens contraire de la propagation.

Lorsque le courant de densité rencontre une paroi verticale (fig. 65 a), il monte le long de cette face et crée une zone de forte concentration sur une hauteur relativement importante (fig. 65-b et c); un nouveau courant de densité repart alors de cette zone en sens contraire du courant initial comme si celui-ci s'était réfléchi sur la paroi (fig. 65 - d).

On peut observer pour des vitesses très faibles de ces courants de retour la création d'ondulations qui se propagent à l'interface (fig. 65 -d).

Un obstacle immergé arrête partiellement un courant de turbidité, une partie du courant franchit l'obstacle tandis que l'autre repart en sens contraire par suite de la surélévation de la suspension (fig. 65 e, f et g).

IV.2.1.5. « Facteur de pression »

Pour caractériser l'état de « suspension » d'un mélange d'eau et de particules solides, on fait appel à la notion élémentaire de pression effective exercée par un fluide à une profondeur déterminée, pression que l'on définit par $P = \rho \cdot g \cdot h$ où P étant la pression à une profondeur h d'un liquide de densité ρ (fig. 66).

Si l'on considère deux fluides de densité ρ_m et ρ ($\rho_m > \rho$), il existera à la même profondeur H une différence de pression qui dépendra uniquement du rapport des poids spécifiques tel que :

$$P / P_m = \rho / \rho_m \dots\dots\dots 10$$

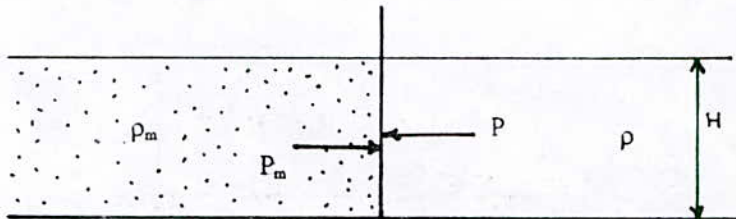


Fig.66- Représentation schématique des forces hydrostatiques

Ces deux liquides sont répartis sur la même hauteur H de part et d'autre d'un tube en U muni d'un robinet de communication à sa base (fig. 67).

En mettant les deux liquides en communication, les pressions s'égalent au point inférieur, et le liquide le plus léger sera repoussé dans le tube. La différence de hauteur h entre les deux niveaux de fluides en communication permettra de caractériser la différence initiale de pression, donc le rapport entre les poids spécifiques des deux liquides :

$$h = H [(\rho_m - \rho) / \rho_m]$$

ce qui donne :

$$\rho_m = \rho (H / (H - h)) \dots\dots\dots 11$$

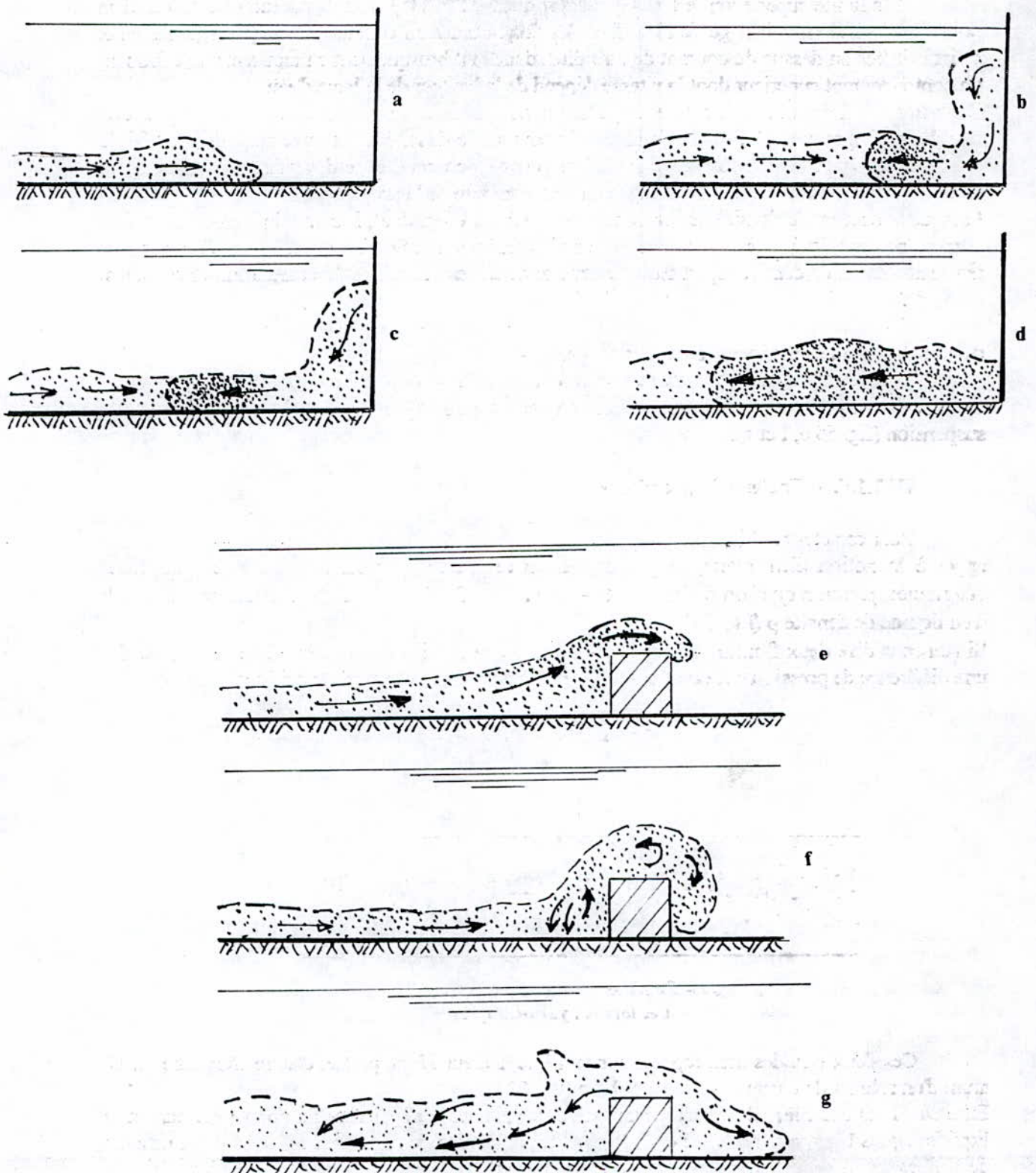


Fig.65- Comportement du courant de densité face à un obstacle

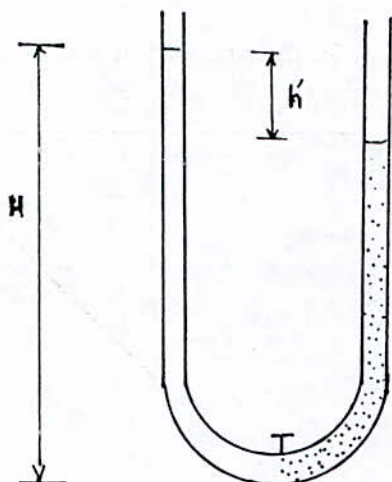


Fig.67- Schéma explicatif du « Facteur de pression »

Le « facteur pression » $\Delta\rho / \rho_m$ est déterminé comme étant le rapport entre la différence de niveaux h entre le liquide et la suspension après leur mise en communication par la hauteur H de la colonne des liquides.

Les mesures ont été réalisées dans un tube en U de 1.50 m de hauteur et de 20 mm de diamètre. Les niveaux étaient repérés dans chacun des tubes par la méthode limnimétrique. A la partie basse du tube, un dispositif permettait de mettre en communication l'eau claire et la suspension [95].

MIGNIOT C. [95] a étudié le « facteur de pression » en fonction de la concentration pour des vases marines de la région de la baie de L'AGUILLON (fig. 68 a). Il a trouvé pour des valeurs de concentration inférieures à 150 g/l :

$$h/H = \Delta\rho / \rho_m = 5.8 \cdot 10^{-4} \cdot C \dots\dots\dots 12$$

Pour des suspensions en matières plastiques (diamètre moyen égal à 50 μ m) :

$$\Delta\rho/\rho = 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot C \dots\dots\dots 13$$

valable pour des valeurs de concentrations inférieures à 300 g/l (fig 68 b).

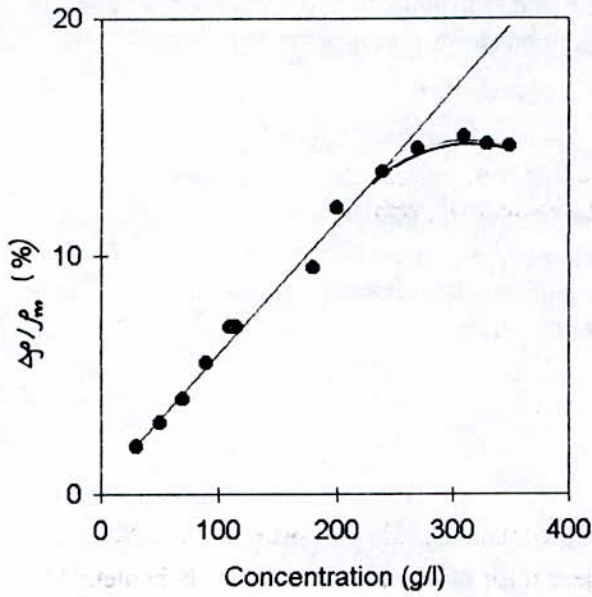
Plusieurs mesures ont été faites sur différents types de suspension [93]. Les résultats trouvés nous donnent une idée sur la variation de $\Delta\rho / \rho_m$ en fonction de la concentration (fig. 68 c et d), $\Delta\rho / \rho_m$ varie linéairement jusqu'à une valeur limite, puis varie d'une façon parabolique. Le point critique caractérise l'apparition de la rigidité initiale.

IV.2.1.6. Etude expérimentale de la vitesse du courant de densité dans un canal prismatique

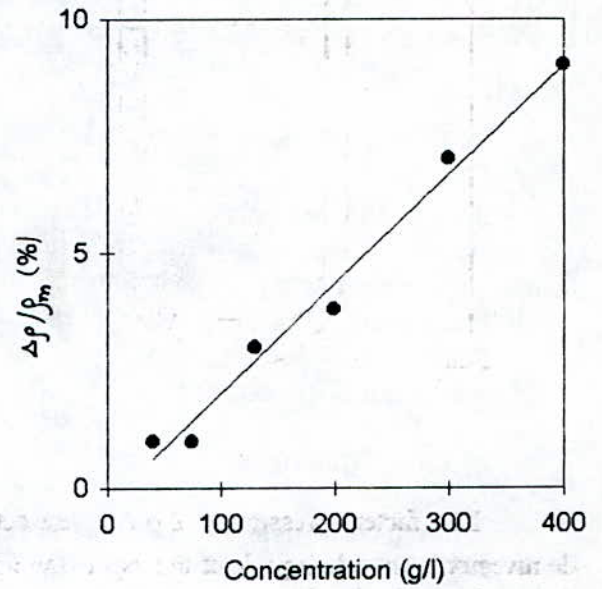
Nous avons abordé dans cette étude la vitesse et la variation de la tête du courant de densité dans un canal rectangulaire en utilisant la vase de l'oued El Harrach (région d'Alger). Cette étude expérimentale se résume en une série d'essais au cours desquels on fait varier successivement la concentration en sédiments, la hauteur totale d'eau claire et la pente du fond du canal de façon à déterminer leur influence sur la vitesse du front d'un courant de densité et la variation de sa hauteur dans un canal rectangulaire.

Il a été montré expérimentalement qu'un courant de gravité passe par deux phases distinctes et parfois une troisième si l'effet de la viscosité est très élevée.

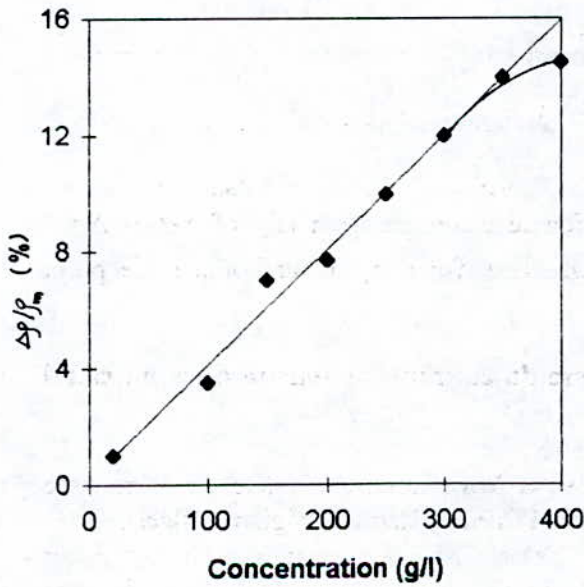
a) Vase marine de la région de la baie de l'Aguillon



b) Suspension en matière plastique



c) Vase de l'oued Agrioum



d) Boue de forage de la région de Baraki (Alger)

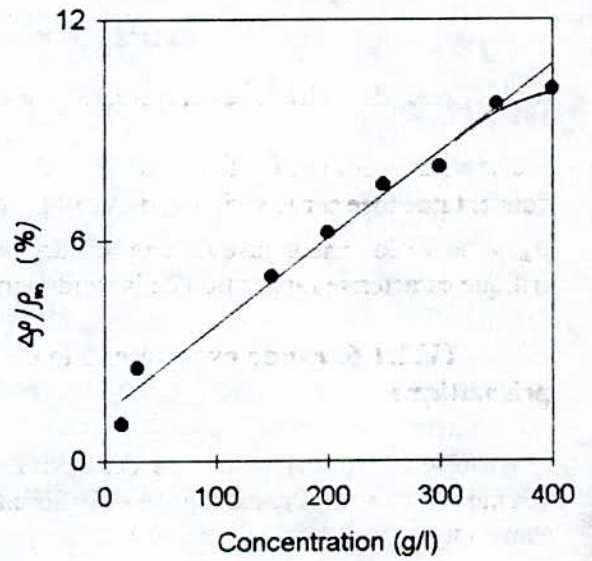


Fig. 68- Variation du "facteur de pression" en fonction de la concentration en matières de suspension

- Première phase :

après une rapide plongée causée par l'ouverture instantanée de la vanne, le courant avance avec une vitesse constante. Le « overflow » se dirige dans le sens opposé. La propagation s'avère différente selon la proportion des deux fluides en présence.

- Deuxième phase :

Il y'a modification au niveau du déplacement du front et diminution de la vitesse de la tête. l'expérience a montré que la vitesse varie linéairement en fonction du temps : $V_t = f(t^{-1/3})$, et diminue ainsi jusqu'à ce que les contraintes visqueuses deviennent vraiment prépondérantes.

Des travaux ont permis d'élaborer des lois de variation de :

- * la vitesse initiale,
- * la vitesse de propagation.

a) Vitesse initiale :

a.1. Vitesse initiale sur fond horizontal

Pour les écoulements de densité dans un canal rectangulaire, la vitesse est principalement fonction de la hauteur d'eau totale et de la différence de densité.

Obtenons ainsi :

$$V_t = K.(g' H)^{1/2} \dots\dots\dots 14$$

KEULEGAN [96] [97] [98], sur un canal de 10 cm de large et de 2 m de long, obtint :

$$V_t = 0,45(g' H)^{1/2} \dots\dots\dots 15$$

YIH [99], quelques années plus tard , pour un canal possédant une vanne centrée aboutit au même résultat.

BARR [100], pour des rapports de largeur et hauteur plus étendus proposa :

$$V_t = 0,46 (g' H)^{1/2} \dots\dots\dots 16$$

D'autres formulations en fonction de la hauteur de la tête (**ht**), du corps (**hc**) et de la différence de densité ont été données.

BENJAMIN [101], en négligeant les pertes d'énergie au niveau de l'interface, explora le mouvement d'une cavité d'eau dans un fluide stagnant de densité ρ_m comprenant un plafond horizontal.

En supposant une vitesse égale et opposée du fluide ambiant, le mouvement de la cavité apparaît constant.

A partir de l'application du théorème de **BERNOULLI** [102]

$$V_t = (2 \cdot g' \cdot h_c)^{1/2} \dots\dots\dots 17$$

En substituant l'air par un fluide léger, cette équation peut être généralisée
 Pour de petites échelles en laboratoire, la vitesse de la tête a pu être déterminée comme étant fonction de sa hauteur h_t , de la différence de densité entre les fluides et du coefficient de friction du fond :

$$V_t = C_d \cdot (g' \cdot h_t)^{1/2} \dots\dots\dots 18$$

Si le courant de densité transporte un sédiment non cohésif, C_d varie d'une manière non connue [103].

MIDDLETON et **TURNER** [93] établissent pour un courant de turbidité $C_d = 0,75$; (courant turbide).

DENTON [93][103] rapporta pour un courant salin $C_d = 0,63$; (courant salin).

* Une autre approche est d'arrêter la tête en considérant que le fluide ambiant arrive avec une vitesse égale et opposée ($-V_t$) et que les forces actives agissantes sur la tête s'équilibrent :

$$V_t = [h_c / C_d \cdot h_t]^{1/2} \cdot (g' \cdot h_c)^{1/2} \dots\dots\dots 19$$

Pour de grands nombres de **REYNOLDS**, l'effet de la viscosité peut être ignoré et cette formule se rapproche alors de celle de **BENJAMIN**.

a.2. Vitesse initiale le long d'un canal incliné

BRITTER et **LINDEN** [103] concluent que pour des pentes $\theta < 5^\circ$, la tête décélèra avec la distance parcourue depuis la source, alors que pour le canal de pente $5^\circ < \theta < 90^\circ$, les forces de gravité compensent le frottement de fond, et la vitesse V_t devient constante.

Les travaux de **GRAF** [104] [105] ont pu étendre les résultats pour des pentes $\theta < 5^\circ$. Il existe un angle critique pour lequel les forces de frottement sont négligeables devant les forces de gravité.

A partir d'une analyse adimensionnelle :

$$V_t = (g' \cdot q)^{1/3} f(\theta, R_c) \dots\dots\dots 20$$

Pour $R_c \geq 1000$;

$$V_t / (g' \cdot q)^{1/3} = (S_2)^{1/3} [\cos \theta / \theta + \sin \theta / 2 (E + C_D)] [\sin \theta / (E + C_D)]^{-2/3} \dots\dots\dots 21$$

b) Vitesse de propagation

La variation de la vitesse se fera pour un écoulement dans un canal rectangulaire : $V_t = f(t^{-1/3})$. La difficulté d'établissement de relation est due à la mauvaise estimation ou mesure des contraintes agissantes.

L'énergie turbulente au niveau de l'interface est responsable de deux phénomènes mécaniques :

- Un transfert à l'interface qui aura tendance à adoucir la discontinuité de densité et à la transformer en une zone à variation de densité continue.

- Un frottement turbulent relatif à une contrainte tangentielle interfaciale [106].

Tous ces paramètres influent directement sur la propagation de la tête d'un courant de densité.

c) Installation expérimentale

Le système est composé (fig. 69):

- un canal rectangulaire en Plexiglas dont un côté opaque et l'autre transparent assure une meilleure visualisation du phénomène.

Les dimensions sont :

- longueur $L = 400$ cm;

- hauteur $H = 15$ cm;

- largeur $B = 10$ cm;

- des graduations verticales et horizontales permettent les mesures respectives et

des hauteurs et des distances.

- Un support à faible pente variable.

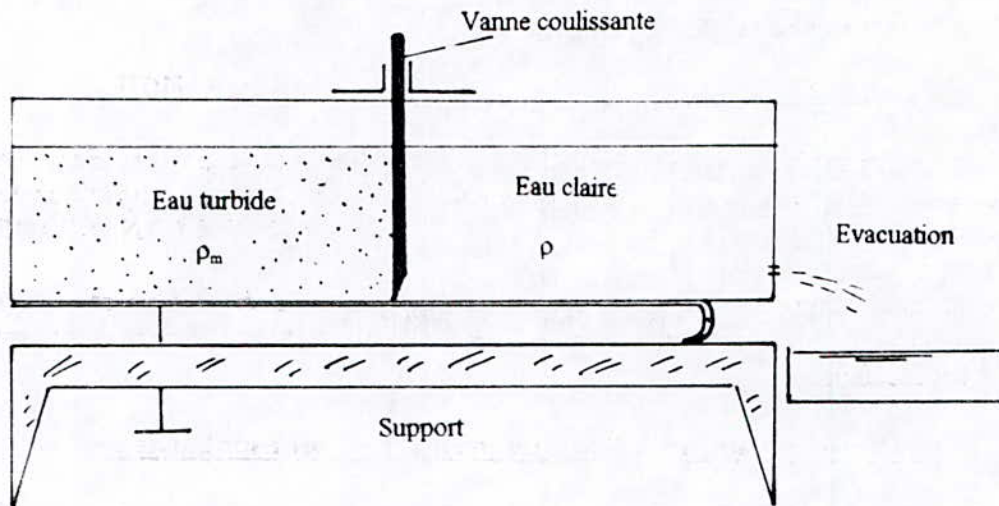


Fig 69- Dispositif expérimental

d) Caractéristiques du matériau utilisé :

Le matériau mis en suspension dans le courant de turbidité provient de la vase de l'oued El Harrach (Sud d'Alger) de densité $\rho_s = 2,52$ et de diamètre moyen $d_m = 10 \mu m$.

La suspension obtenue est de masse volumique ρ_m qui varie en fonction de la concentration en éléments solides.

L'expression du "facteur de pression" prend la forme suivante :

$$\Delta\rho / \rho_m = 0.45 \cdot 10^{-4} C \dots\dots\dots 22$$

e) Résultats

e.1. Influence de la distance sur la vitesse du courant de densité le long d'un canal horizontal:

Les courbes $V_t = f(x)$ sont tracées pour différentes hauteurs et concentrations (fig. 70 a et b). Les résultats obtenus sont rapportés aux nombres addimensionnels (fig. 71), on constate que l'évolution de la vitesse se fait de deux manières différentes :

-elle est constante sur une première partie du canal, ce qui caractérise bien la vitesse initiale du courant de densité.

-elle régresse ensuite graduellement sur le reste du canal.

Il reste à vérifier si cette progression correspond à la vitesse de propagation du courant de densité.

On trace par conséquent : $V_t = f(t^{1/3})$.

Ce tracé (fig. 72 a, b, c, et d) conduit effectivement à une variation linéaire. Cela nous amène à la subdivision de l'écoulement en deux phases distinctes que nous étudierons séparément.

e.1.1. Première phase : vitesse initiale

Influence de la concentration et de la hauteur totale de l'eau : [107]

Pour différentes hauteurs et concentrations, ces représentations (fig. 73) mènent à une variation linéaire en fonction du paramètre $(g'H)^{1/2}$. Il en découle une constante de proportionnalité telle que : $K = 0,336$. Une comparaison avec les résultats obtenus par KEULEGAN et BARR confirme cette tendance (fig. 73) [93].

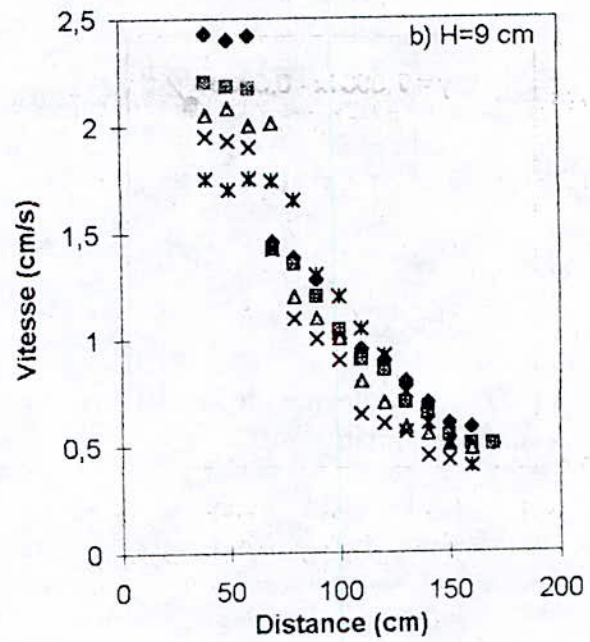
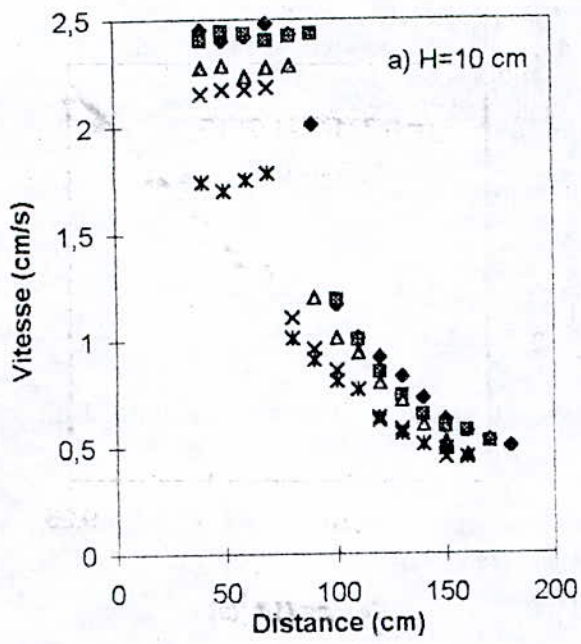
La constante de proportionnalité ainsi déterminée est notablement inférieure, ceci est dû aux caractéristiques propres des particules solides au sein du fluide turbide, comparativement à l'écoulement salin.

Influence de la hauteur de la tête du courant de densité sur la vitesse :

Pour des hauteurs et des concentrations variables, la vitesse varie linéairement en fonction du paramètre $(g'h_t)^{1/2}$. Comparés avec les résultats de MIDDLETON, TURNER et DENTON (fig. 74), il en ressort que la constante de proportionnalité ($C_d = 0,496$) reste inférieure, ce qui peut confirmer l'hypothèse précédente. [93].

e.1.1. Seconde phase : vitesse de propagation

L'évolution régressive de la vitesse en fonction de la distance laisse supposer l'intervention des forces de frottement.



- ◆ Série1 C=10 g/l
- Série2 C=9 g/l
- △ Série3 C=8 g/l
- × Série4 C=7 g/l
- ✕ Série5 C=6 g/l

Fig. 70 - Variation de la vitesse en fonction de la distance

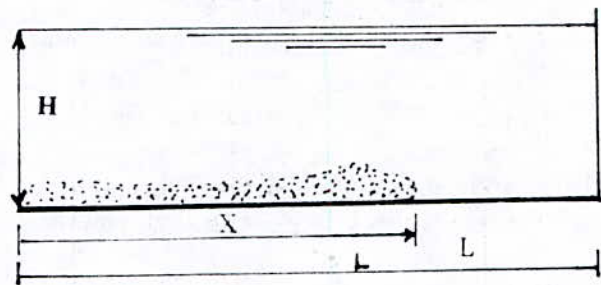
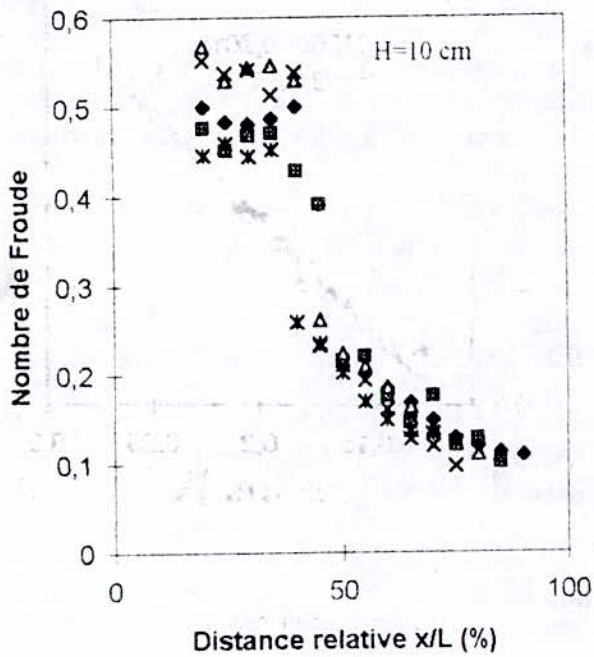


Fig. 71 - Variation du nombre de Froude en fonction de la distance relative

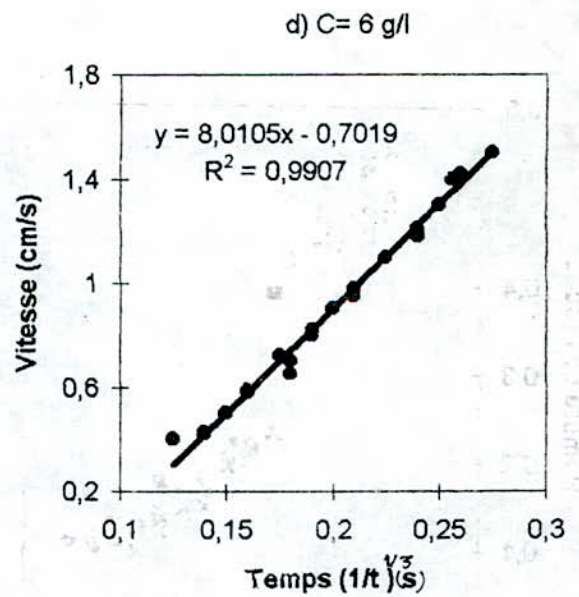
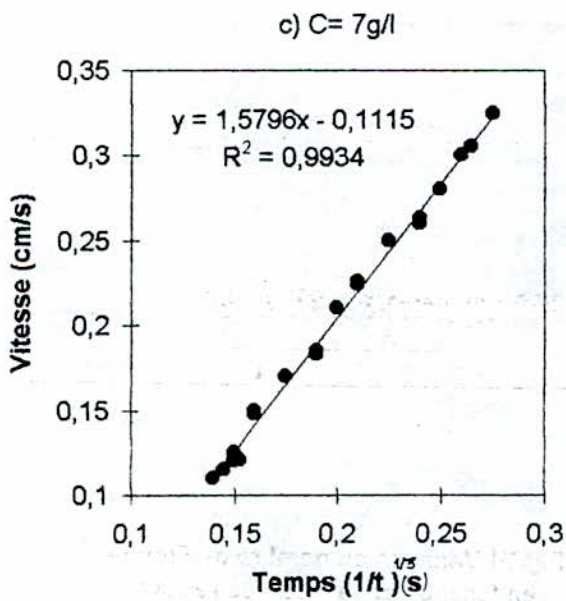
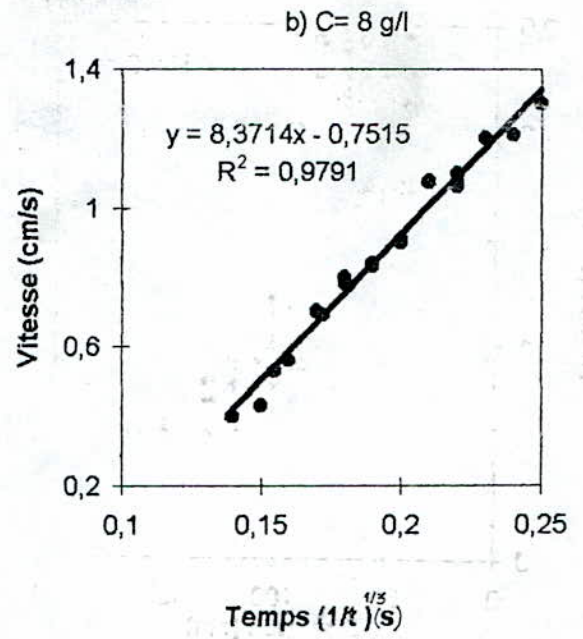
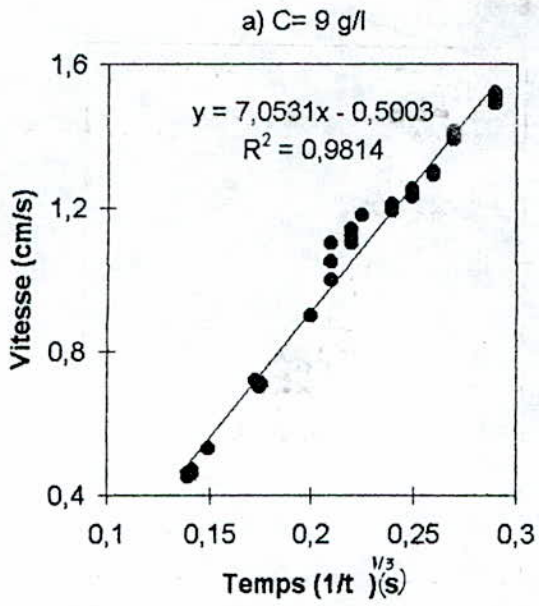


Fig.7.1 - Variation de la vitesse du courant de densité en fonction du temps

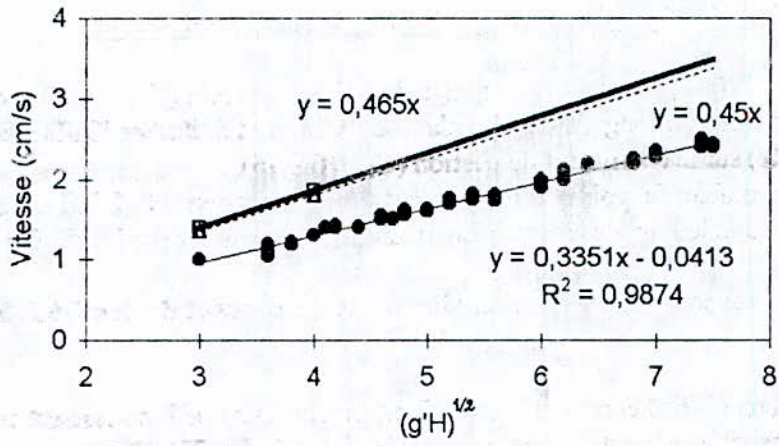


Fig. 73 - Variation de la vitesse initiale en fonction du facteur $(g' H)^{1/2}$

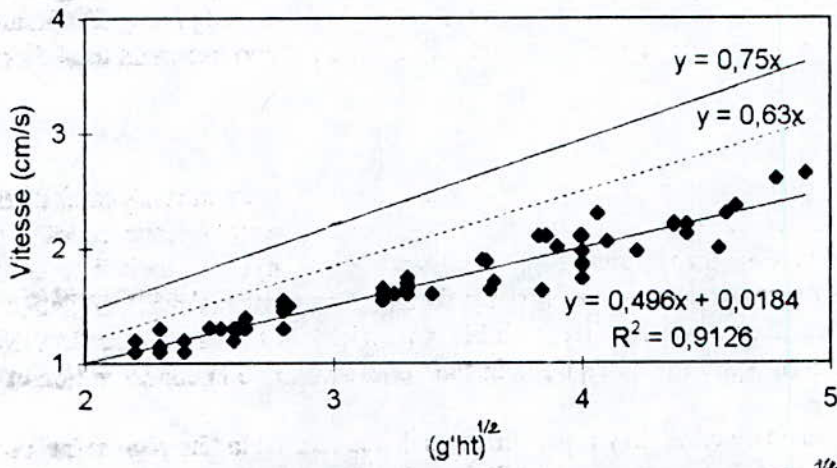
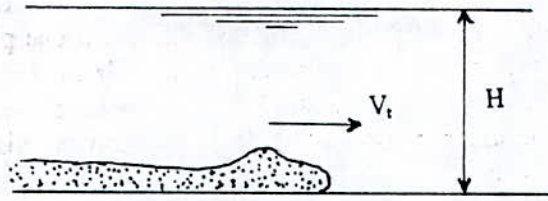
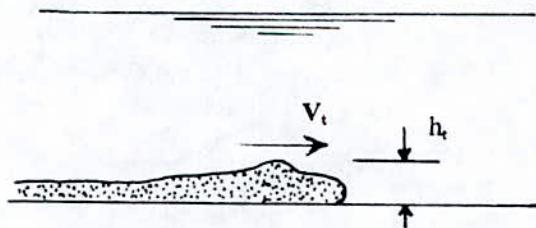


Fig. 74 - Variation de la vitesse initiale en fonction du facteur $(g' ht)^{1/2}$



Influence de la hauteur de la tête sur la vitesse du courant de densité :

Le tracé $V_t = f((g'h_t)^{1/2})$ donne un nuage de points dispersés (fig. 75) d'où on en déduit que (C_D) n'est pas constant le long du canal, cela nous a conduit à étudier l'influence du nombre de REYNOLDS (Re) sur le coefficient de friction (C_D) (fig. 76).

Il apparaît un ensemble de points qui semblent varier linéairement. L'influence des forces de frottement est variable le long de l'écoulement. Cela peut s'expliquer par les dépôts de fond.

e.2. Influence de la distance sur la vitesse du courant de densité le long d'un canal incliné :

Pour différentes hauteurs et concentrations, on constate que la vitesse est constante sur une grande partie du canal comparativement au canal horizontal (fig. 77). Cela pourrait s'expliquer par la compensation des forces de frottement suivant la projection le long de l'axe d'écoulement des forces gravitaires.

IV.2.1.7. Comportement de la tête du courant de densité le long du canal [93] [94]

C'est en étudiant expérimentalement la vitesse du courant de densité que nous nous sommes rendus compte que le comportement de la tête diffère d'une phase à l'autre. A cet effet, nous avons mené une série d'expériences dans la même installation (décrite précédemment) sur la variation de la tête du courant le long du canal. Nous nous sommes contentés uniquement d'étudier l'influence de la distance sur la hauteur de la tête du courant tout en faisant varier la concentration en sédiments et la charge d'eau.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 78 (a à e): nous constatons que durant la première phase de l'écoulement qui correspond à la vitesse constante du courant de densité (vitesse initiale), la hauteur de la tête oscille jusqu'à ce qu'elle atteigne son maximum (pratiquement à la fin de la phase). Par contre, durant la deuxième phase, elle (hauteur de la tête) diminue au même temps que la vitesse du courant jusqu'à l'évanouissement total du courant.

Conclusion :

Dans le but d'apporter une contribution à l'étude du mouvement de la tête des écoulements à gradient de densité dus à la présence des matières en suspension dans un canal rectangulaire, l'exploitation des résultats expérimentaux nous a permis de tirer les conclusions suivantes:

- sur une partie du canal, la vitesse de propagation est constante malgré l'oscillation de la hauteur de la tête principalement à cause de la faible influence des forces de viscosité. Nous avons pu établir une relation explicite de la vitesse initiale en fonction de la concentration et de la hauteur d'eau,
- sur une autre partie du canal, la vitesse ainsi que la hauteur de la tête régressent progressivement sous l'effet des forces de frottements. La relation obtenue, pour la détermination de la vitesse de la tête, dépend en plus de la viscosité du fluide. La vitesse de propagation de la tête est constante sur une plus grande partie du canal.

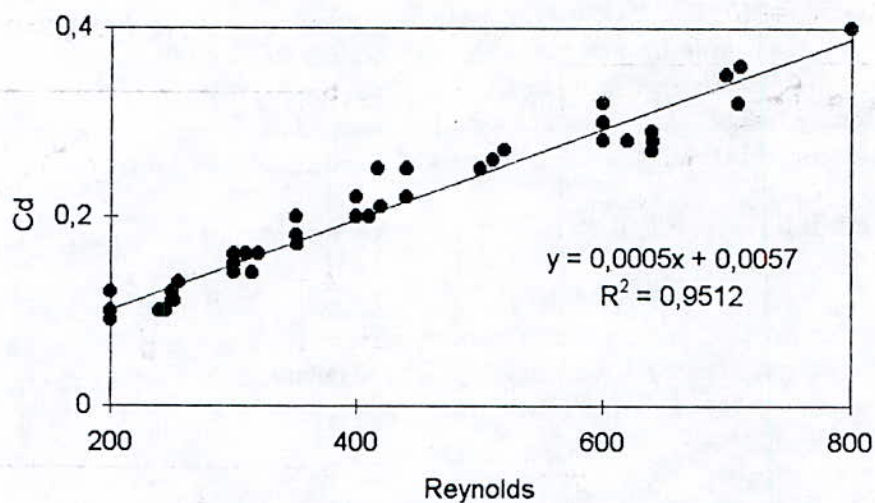


Fig. 75 -Variation du coefficient de friction en fonction du nombre de Reynolds

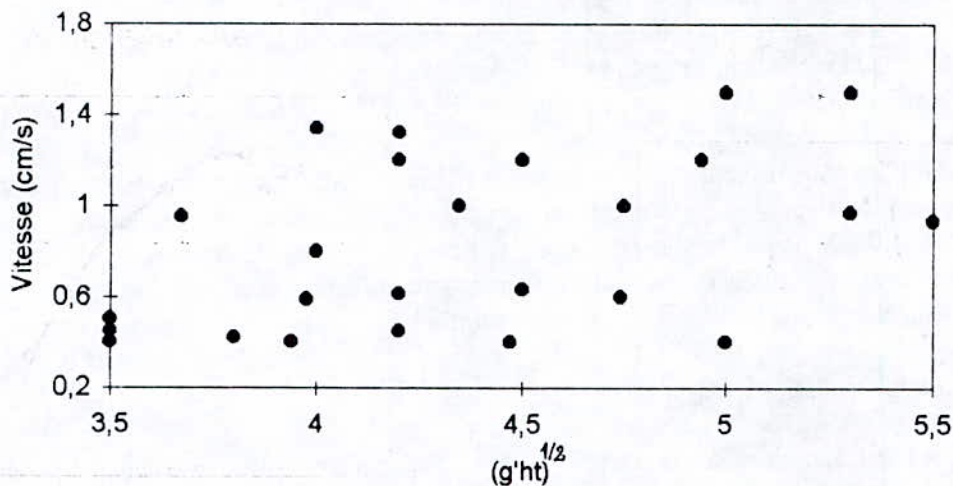


Fig.76-Variation de la vitesse de propagation en fonction du facteur (g'ht)

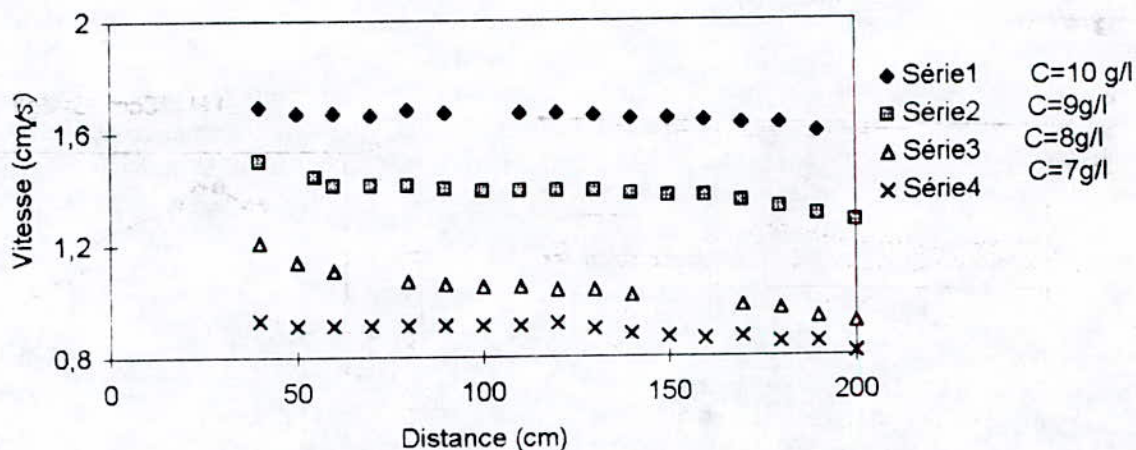


Fig.77.Variation de la vitesse du courant de densité en fonction de la pente du fond du canal

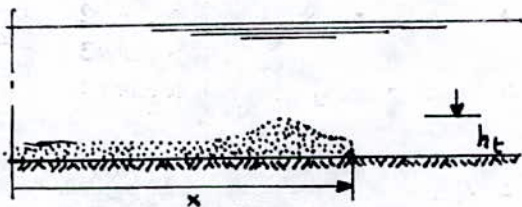
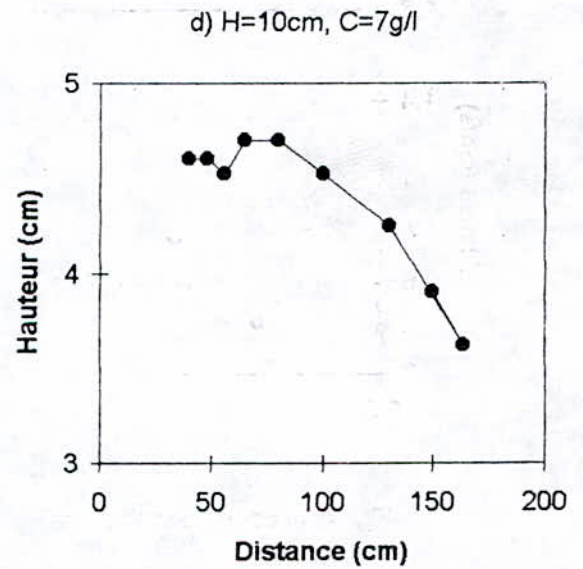
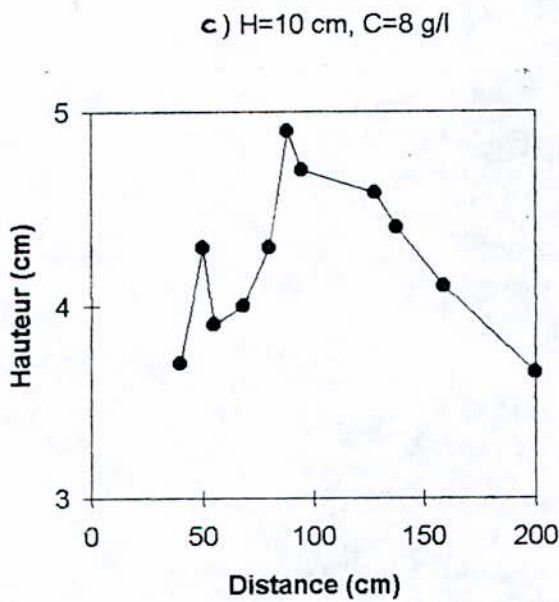
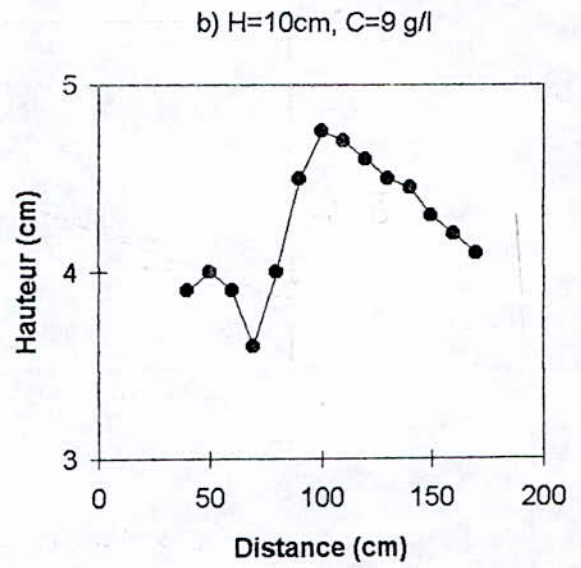
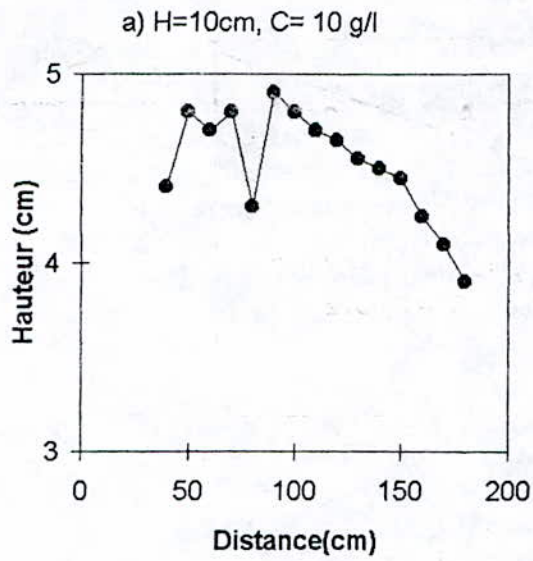
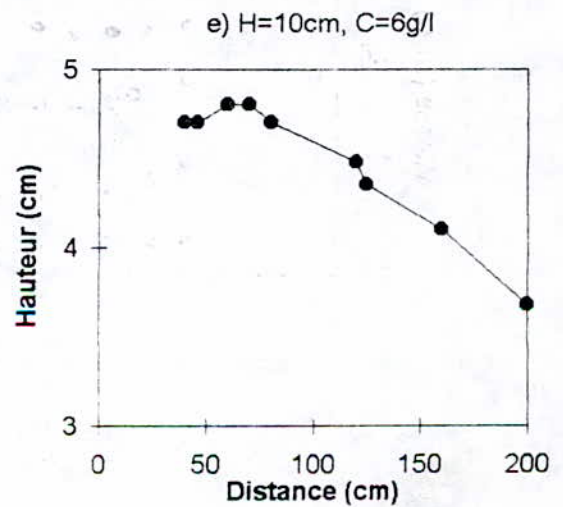


Fig. 78- Variation de la hauteur de la tête du courant de densité en fonction de la distance



4.2.2. Les courants de densité dans la retenue-cas d'IGHIL EMDA:

4.2.2.1. Situation et caractéristiques du barrage

Destiné à la production de l'énergie électrique (photo.31), le barrage d'IGHIL EMDA est situé dans la wilaya de Béjaïa, à 60 km au Sud-est de la ville, et 40 km environ au Nord de Sétif (fig. 79). Il est installé sur l'oued Berd, immédiatement en aval de la confluence de cet oued avec l'oued Embarek, leur réunion constituant, en aval du barrage, l'oued Agrioum (fig. 80)[108]. Réalisé entre 1948 et 1953, il est du type barrage poids en enrochement, solution qui avait été retenue pour tenir compte du comportement médiocre des terrains sur son site. Sa capacité initiale est évaluée à 156.10^6 m^3 à la cote 532 (photo. 32) [109].

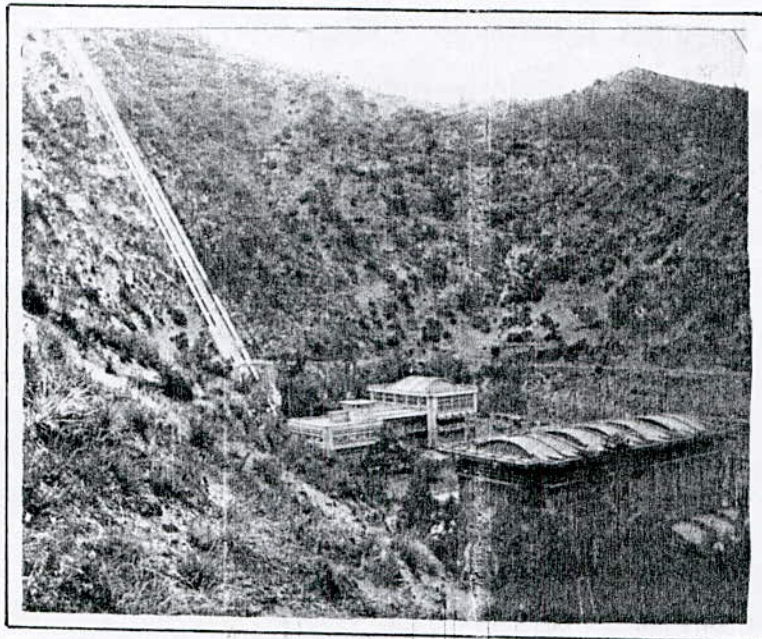


Photo 31 - L'usine de production de l'énergie électrique de Derguana

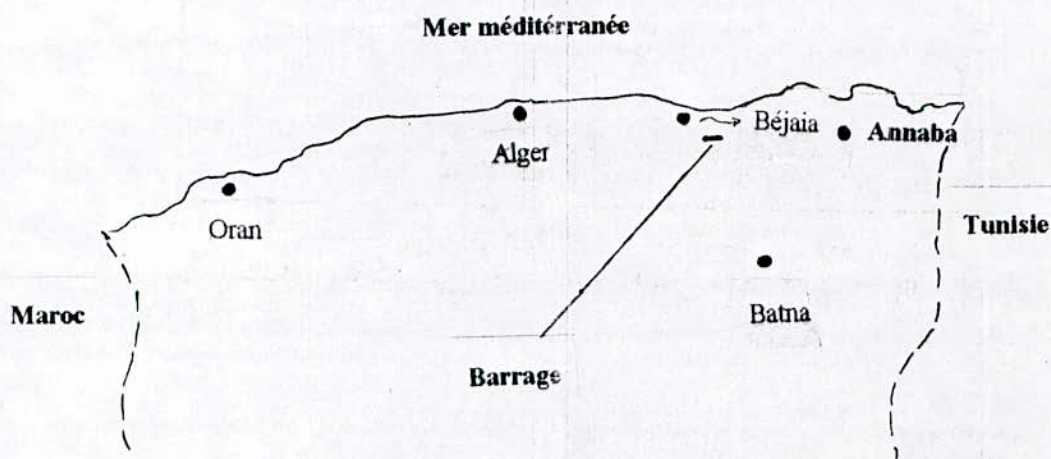


Fig.79- Situation du barrage d'IGHIL EMDA

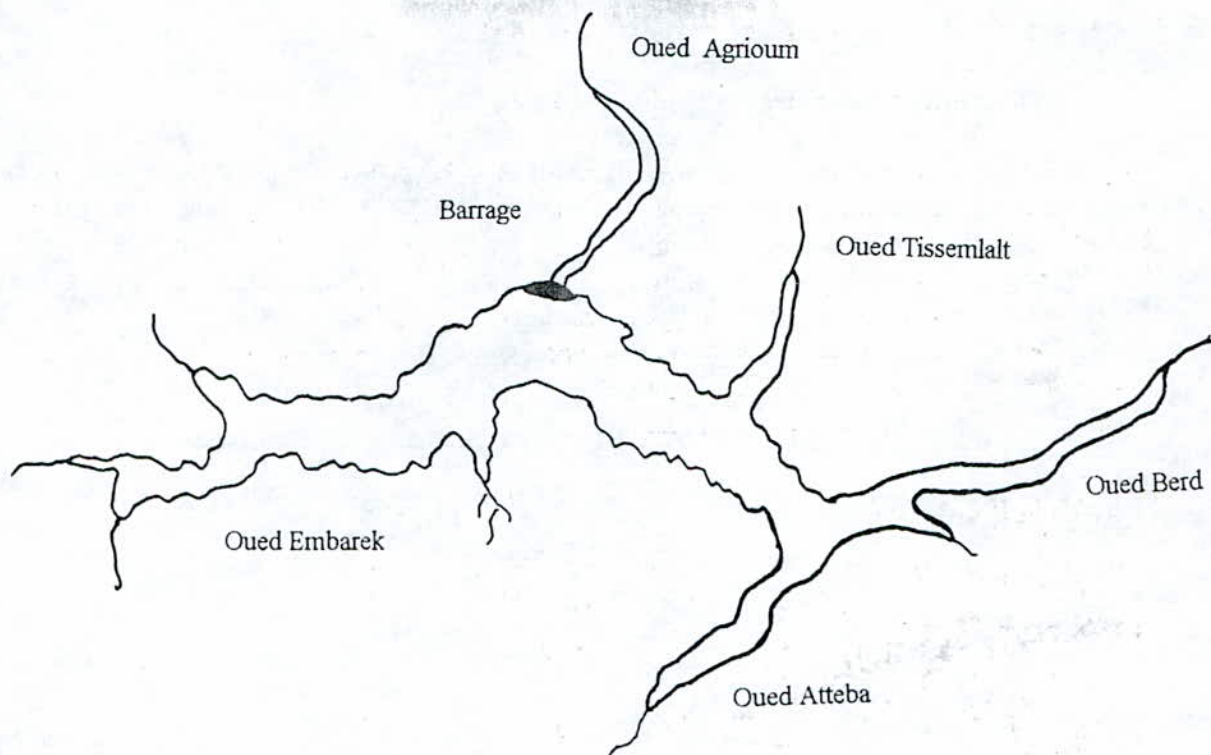


Fig. 80 - Retenue du barrage IGHIL EMDA

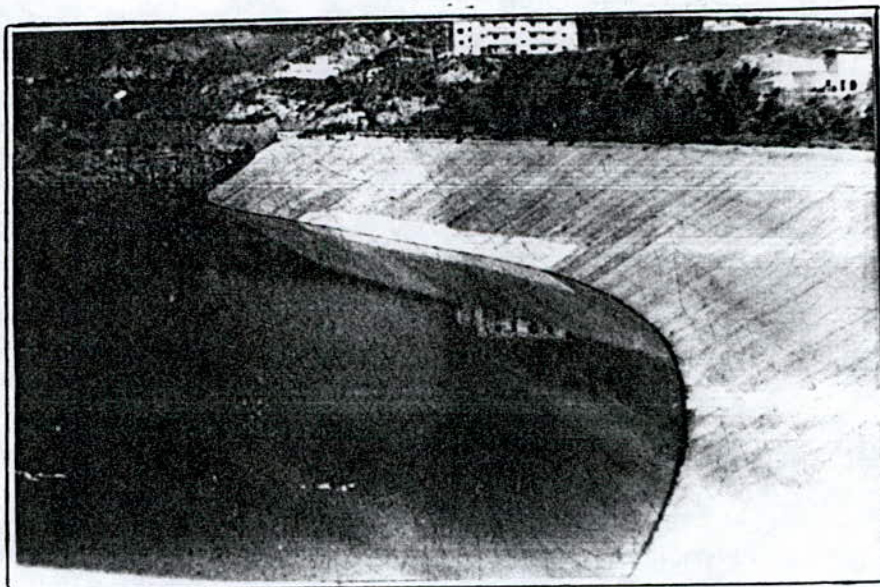


Photo 53 - Retenue du barrage d'IGHIL EMDA (de capacité initiale de $156 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1953, ramenée à $103 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1992.

V. 2.2.2. Le bassin versant

a) Description sommaire

Le bassin versant du barrage d'IGHIL EMDA d'une superficie de 63986 hectares se caractérise par la prédominance du domaine agricole sur le domaine forestier comme le montre le tableau 16 et la figure 81:

Domaine Agricole	Terrain Agricole	50 %	52 %
	Terrain arboricole	2 %	
Domaine Forestier	Couvert forestier	13,5 %	26 %
	Terrain forestier sous bois à formations herbacées (pacage)	12,50 %	

Tableau 16- Bassin versant du barrage d'IGHIL EMDA - Domaines d'occupation

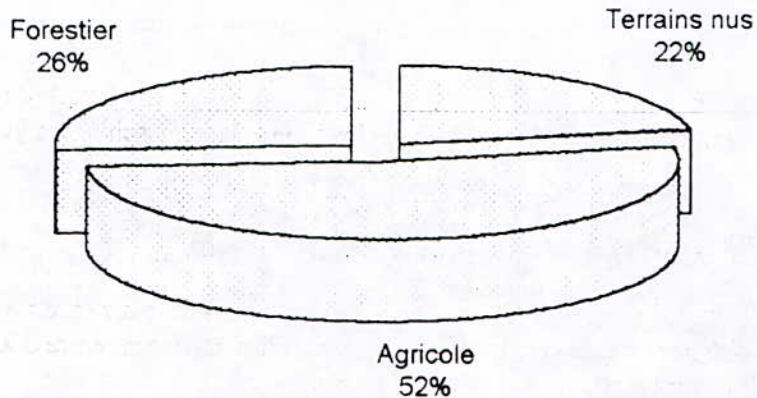


Fig 81-Bassin-versant du barrage d'IGHIL EMDA-Domaines d'occupation

Les terrains nus (photo. 33) sans végétation ou sans utilisation agricole représentent 22 % de la superficie totale du bassin versant, soit près de 13558 hectares. Ils se localisent essentiellement sur une topographie accidentée difficile à mettre en valeur: ils font partie des Hauts Plateaux Constantinois très attaqués par l'érosion et constituent l'une des sources des sédiments aboutissant dans le barrage d'IGHIL EMDA. Plusieurs facteurs se combinent pour déterminer l'évolution du milieu naturel dans ce bassin versant avec des conséquences importantes sur l'arrivée des débits liquides et solides dans la retenue du barrage.

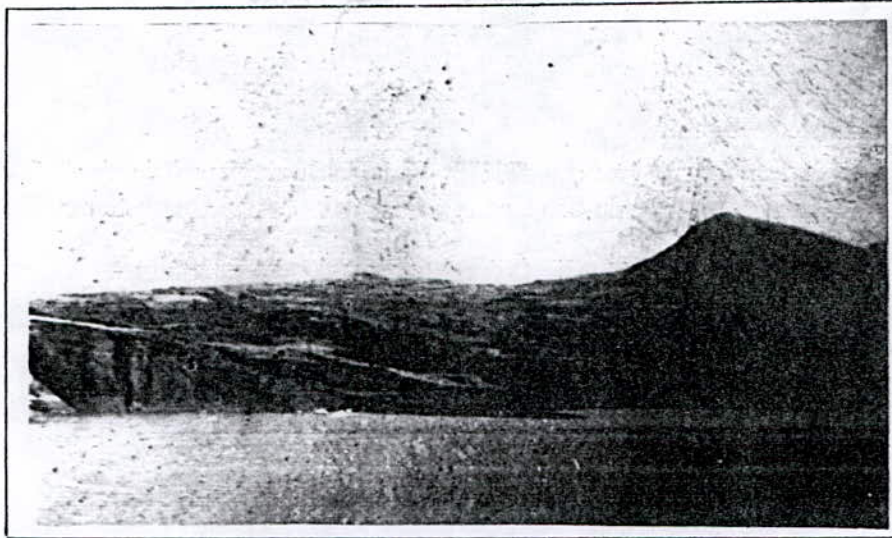


Photo.33-Terrains nus représentant 22% de la superficie du bassin-versant d'IGHIL EMDA

b) Lithologie

Les roches tendres, facilement érodables, prédominent et couvrent près de 83 % de la superficie du bassin versant. Il s'agit essentiellement de marnes à débit schisteux (Maestrichtien) [110].

c) Caractéristiques climatiques

Le climat, de type subtempéré est caractérisé par une pluviométrie à caractère méditerranéen, c'est à dire très irrégulière, les variations annuelles se situant entre 800 et 1500 mm (fig. 82) avec de très fortes intensités (Automne et Printemps).

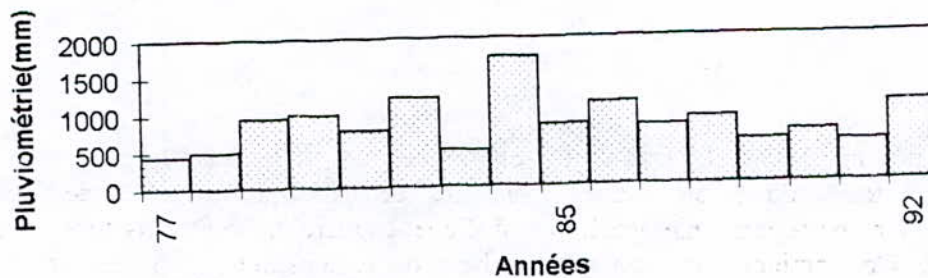


Fig. Bassin versant amont du barrage d'IGHIL EMDA. Pluviométrie annuelle (periode 1977-1992)

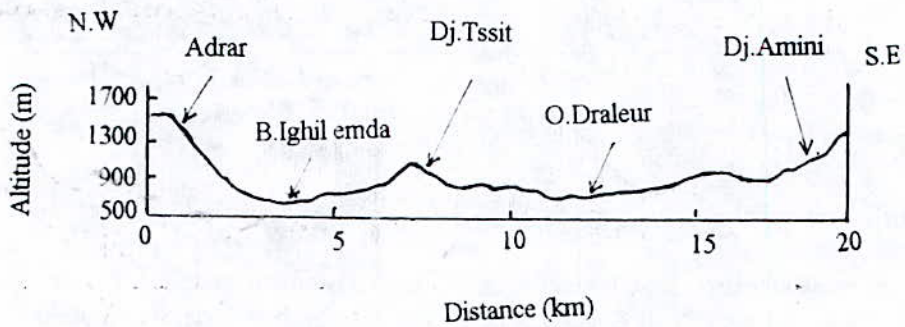
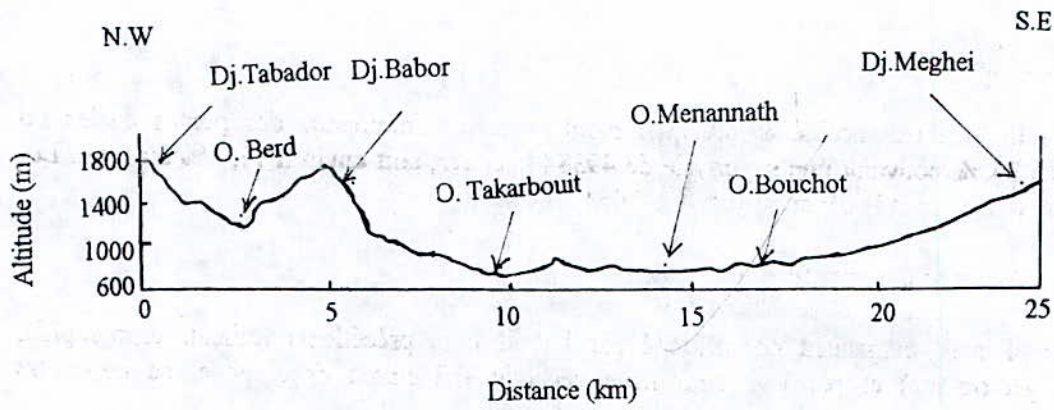


Fig.83: Coupes topographiques du bassin versant.

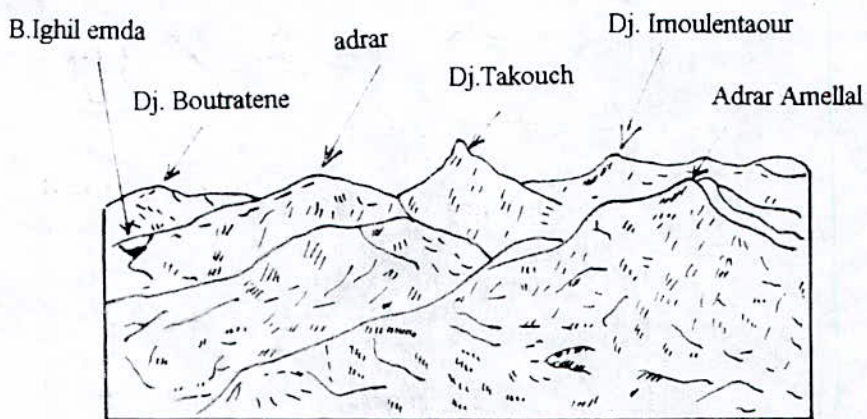


Fig.84- Modèle en amont du barrage d'IGHIL EMDA

d) Pentes

Le relief est très accidenté puisqu'il montre une prédominance des pentes égales ou supérieures à 25 % couvrant une superficie de 49384 hectares, soit environ 77,3 % du total. Les figures 83 et 84 illustrent le découpage du modèle.

e) Réseau hydrographique (fig. 85)

L'écoulement, largement conditionné par les facteurs précédents (climat, topographie, substratum géologique) et par une couverture végétale faiblement développée, se concentre rapidement.

Le réseau hydrographique est ainsi très dense : sur l'ensemble du bassin versant le nombre de km² comportant une longueur cumulée des cours d'eau dépassant 4 km est de 33,6 %. Les cours d'eau de premier ordre représentent une longueur cumulée d'environ 10874 km soit 63 % du total.

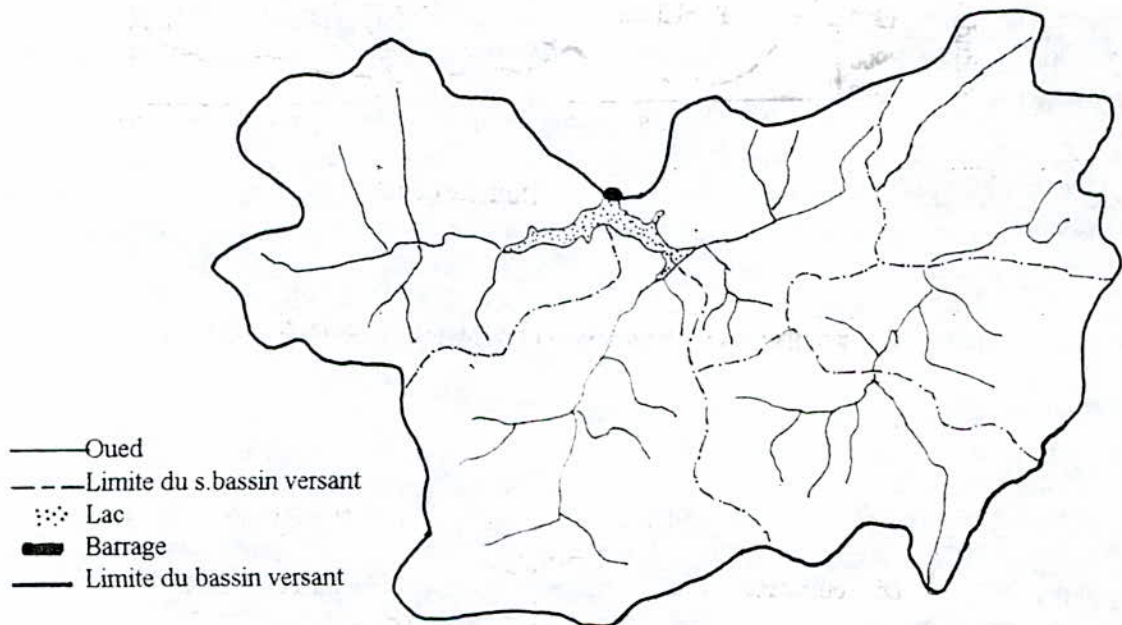


Fig. 85: Réseau hydrographique du bassin versant

IV.2.2.3. Localisation des zones d'érosion

La dynamique érosive est très intense dans le bassin versant en amont du barrage d'IGHIL. EMDA puisque l'on peut estimer à 22354 hectares les terrains atteints alors que 720,5 hectares évoluent en bad-lands. Selon le degré et la nature des processus, il est possible de donner la répartition suivante :

a) Secteurs stables ou relativement stables

Ils sont représentés essentiellement par les zones occupées par les forêts (chênes, sapins...), les maquis denses, les reboisements et l'arboriculture. La densité du réseau hydrographique est relativement faible et le sol est bien protégé par la végétation, leur superficie est de 9586 hectares, soit 15 % de l'ensemble du bassin versant.

b) Secteurs à forte érosion

Ces secteurs occupent principalement la zone centrale avec une superficie de 619,5 hectares (9,5 %). Le ravinement devient intense, les rigoles sont profondes, et les sols lacérés s'amincissent. Cette érosion est à mettre en rapport avec les fortes pentes (qui dépassent souvent 45 %) sur substratum marneux, et avec des pratiques culturales mal adaptées comme la céréaliculture.

c) Secteurs d'intense érosion

C'est un stade ultime d'évolution, le ravinement généralisé très concentré a détruit le sol mettant à nu la roche mère marneuse (marnes noires de Maestrichtien). Des bad lands apparaissent résultant parfois d'une longue surexploitation du milieu par l'homme, ils sont localement appelés les "ZRAZEHS".

En conclusion, toutes les conditions physiques et humaines sont donc réunies dans le bassin versant pour créer un déséquilibre du milieu. L'érosion a atteint un seuil critique, le ruissellement et les mouvements de masse (photo. 34 et 35) trouvant un terrain favorable (substratum marneux, forte pluviométrie) alors que les actions humaines amplifient la dégradation de la couverture végétale.

Deux conséquences en résultent : L'extension des bad lands, et l'exportation d'une quantité importante de matières solides qui viennent remplir la retenue du barrage d'IGHIL EMDA (photo. 36).

Ainsi, pendant la période 1974-1992, on peut estimer à 34114447 m³ les apports solides dans la retenue, avec dans le détail pour les périodes :

1974 - 1981, un apport de 14073346 m³;

1981 - 1984, un apport de 4602614 m³;

1984 - 1992, un apport de 15438487 m³.

pour une période de 18 ans, cela représente une détachabilité moyenne annuelle de 2966 m³/km³.



Photo.34: Bassin versant amont du barrage d'IGHIL EMDA.
L'importance du ruissellement est attestée par le déchaussement des arbres

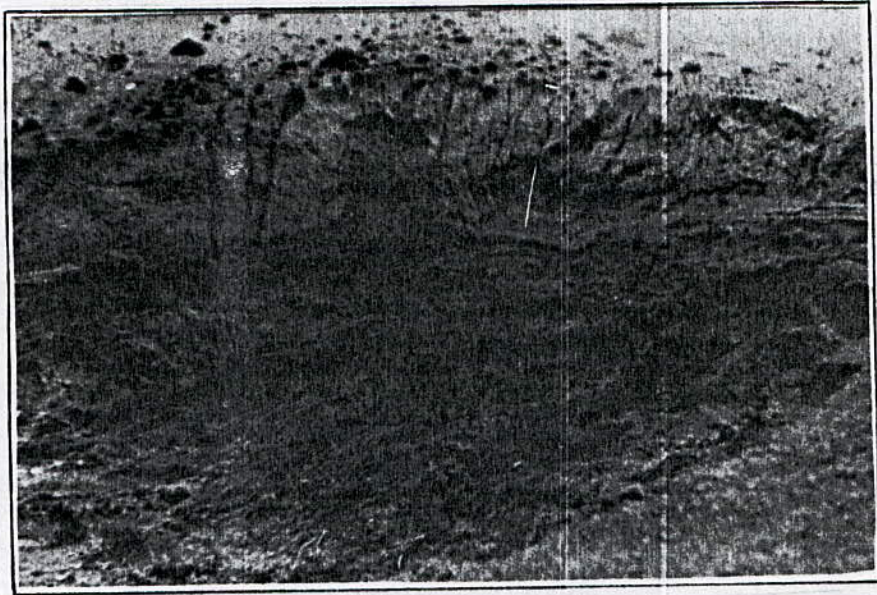


Photo.35 Bassin versant amont du barrage d'IGHIL EMDA. Glissement du terrain avec niche d'arrachement. L'extrémité de la langue boueuse arrive directement dans la retenue.

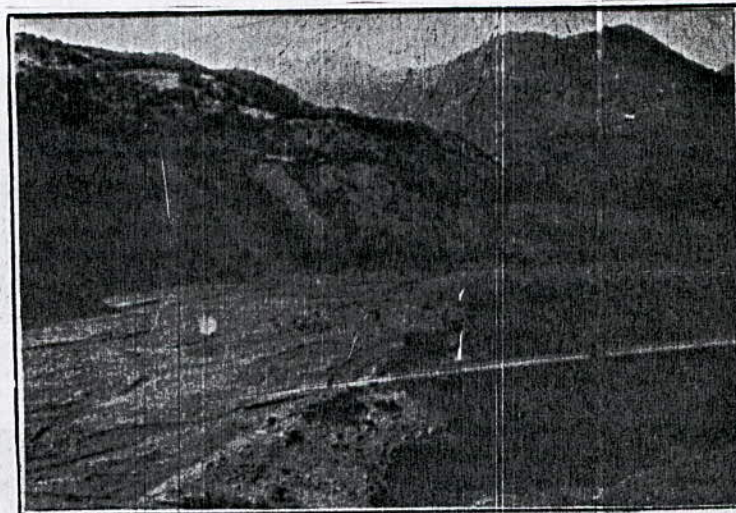


Photo.36 Oued Atteba (amont de la confluence avec l'oued Berd). Les sédiments transportés lors des crues occupent tout le fond de la vallée.

IV.2.2.4. Les conditions d'apparition des courants de densité dans la retenue

a) Les facteurs favorables

La particularité de la retenue d'IGHIL EMDA est que ses courants de densité se manifestent en période de crue uniquement sur la branche de l'oued Berd. Plusieurs observations et mesures ont été faites à ce sujet, les premières menées par **DUQUENNOIS H.** remontent aux années 1950.

A chaque crue, une quantité importante de sédiments se trouve évacuée grâce à un système de soutirage installé spécialement dans le barrage. Ainsi, les courants arrivent facilement au pied du barrage. Ils sont bien entretenus. En réalité, l'apparition de ce phénomène est conditionnée par trois facteurs essentiels qui se trouvent réunis dans la branche de l'oued Berd.

- Les crues de cet oued transportent une quantité importante de sédiments (la densité peut varier de 1,040 à 1,200) d'où un facteur de pression $\Delta\rho/\rho_m$ important ($\Delta\rho$ = force motrice des courants de densité). Cette forte concentration se manifeste surtout pendant les mois de septembre et octobre succédant à la période estivale pendant laquelle l'oued est à sec.

On peut rappeler en effet que le climat méditerranéen est caractérisé par l'opposition entre deux périodes, l'une relativement froide et pluvieuse, l'autre sèche et chaude. Cette division de l'année en deux grandes saisons bien distinctes favorise particulièrement l'érosion: en été la dessiccation du sol entraîne un important fractionnement superficiel du terrain par un réseau très serré de fissures.

Il s'agit d'un véritable travail de désagrégation sur place préparant celui de l'ablation et du transport par les eaux des premières pluies d'Automne. Ces précipitations tombant souvent sous forme torrentielle arrivent par ailleurs sur un sol dénudé et déplacent des masses considérables de terre (photo.37 et 38). Il n'est pas rare de voir les oueds, comme oued Berd, rouler les eaux boueuses dont la charge est supérieure à 100 g/l.

-L'oued présente une forte pente (jusqu'à 18 %) qui accentue son caractère torrentiel;

-La forme géométrique de la retenue est de type « canal », ce qui détermine des conditions particulières d'écoulement et de sédimentation. La vitesse de l'écoulement peut certes varier et diminuer suffisamment pour permettre un dépôt de sédiments, mais l'écoulement pourra garder un régime turbulent jusqu'en bordure du réservoir.

c) La plongée des courants de densité [111]

Plusieurs observations ont été faites durant des périodes d'apports solides dans la retenue et le point de plongée a pu être déterminé avec exactitude dans la branche de oued Berd, les premières déterminations étant celles de **DUQUENNOIS H.** durant la période 1953-1956.

A l'arrivée des premières crues, la zone de plongée est marquée par une zone d'une centaine de mètres en longueur (estimée à vue d'oeil) où l'eau est recouverte d'une couche de brindilles pouvant atteindre plus de 25 cm d'épaisseur (le chiffre de 20 cm était avancé par **DUQUENNOIS H.**) avec accumulation de bois flottant, branches d'arbres et une quantité importante de feuilles.

Ces brindilles peuvent soit provenir de la retenue soit avoir été apportées par l'oued. Elles se maintiennent à proximité immédiate de la plongée sans qu'il y ait intervention du vent. Elles sont entraînées par un courant de surface remontant vers la zone de plongée. Il existe par ailleurs, sous cette couche de brindilles, un courant de retour alimentant la dilution à la plongée.

La zone de plongée est avancée de trois kilomètres durant une période de 39 ans (1953-1992) (fig. 36) à la suite de la progression du « delta » du matériau grossier vers l'aval [111].

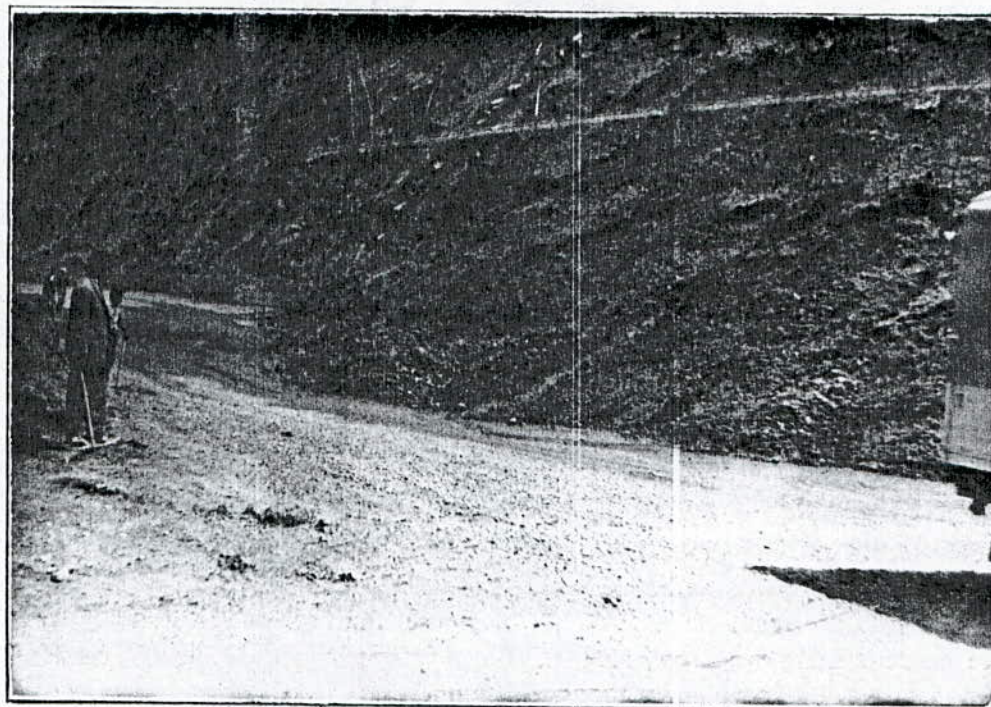


Photo. 37 :Quantité importante des sédiments se dépose en continue sur la route Bejala-Setif, suite au glissement chronique.

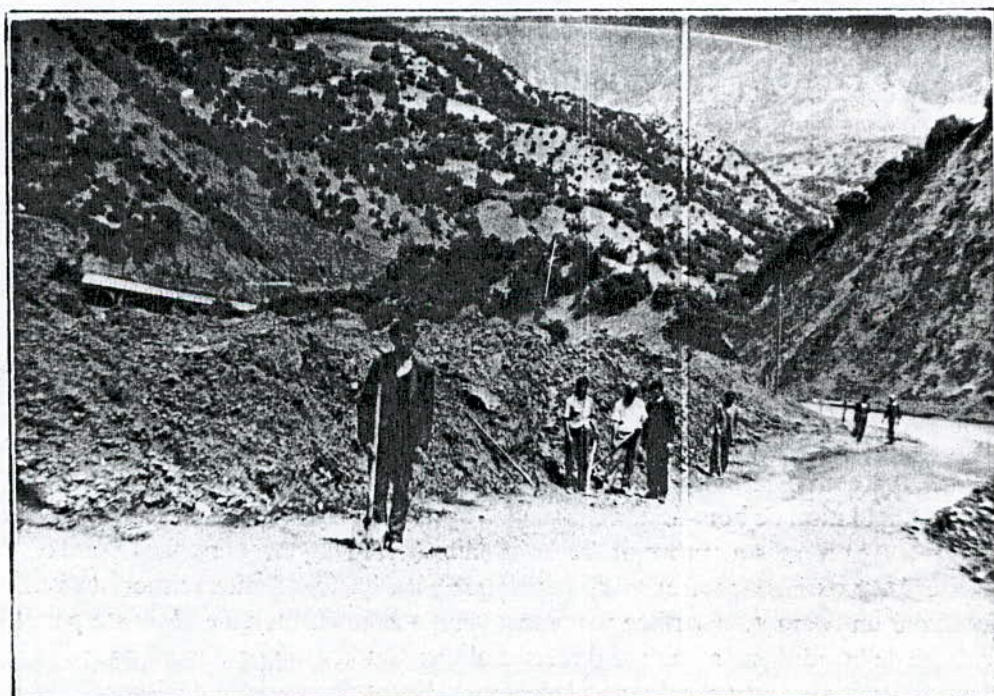
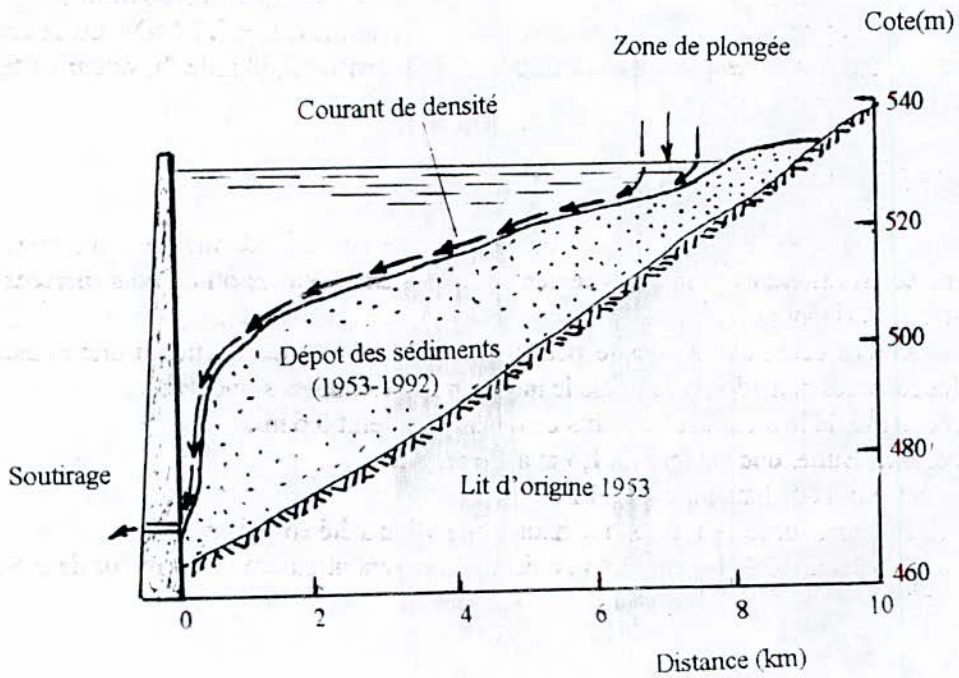
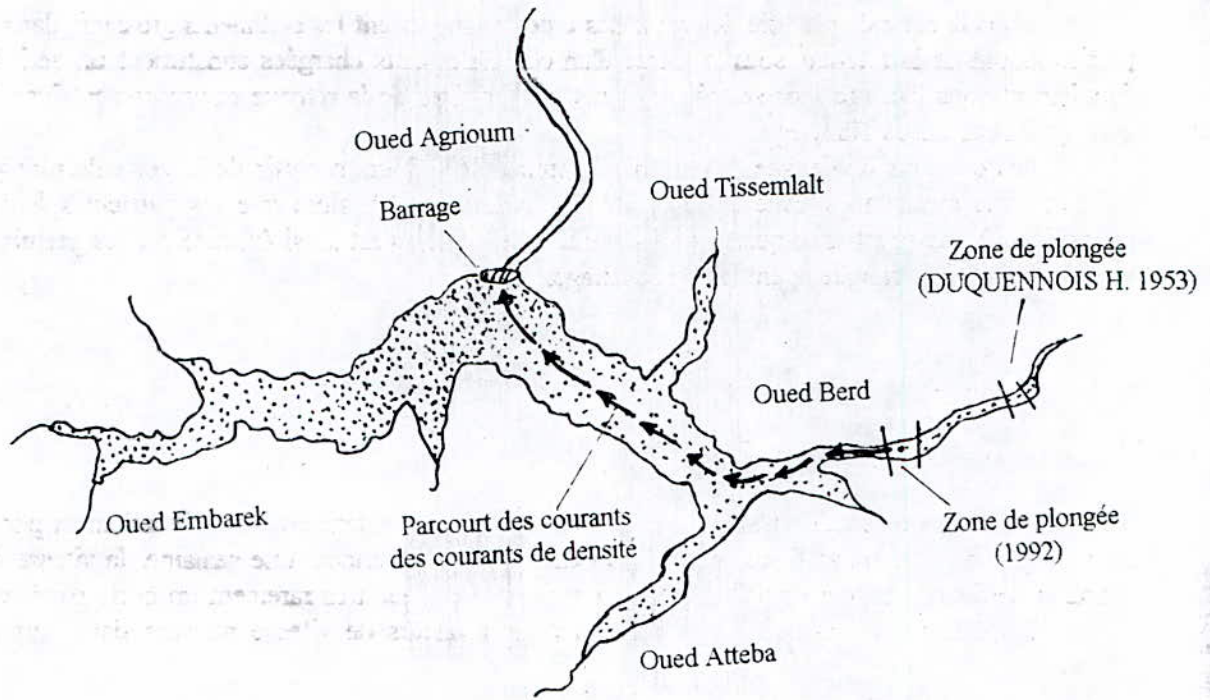


Photo.38:Les terres sont jettées directement dans la retenue pour liberer la route Bejala-Setif.



Branche de Oued BERD

Fig.86-Propagation des courants de densité dans la retenue d'IGHIL EMDA

c) La résultante : propagation des courants de densité dans la retenue

Dans la zone de plongée, les eaux des crues abandonnent les sédiments grossiers dans les parties amont de la retenue sous la forme d'un cône. Les eaux chargées constituent un véritable écoulement sous lacustre sans se mélanger aux eaux claires de la retenue et progressent jusqu'au barrage en suivant le Thalweg.

Les courants de densité, après un parcours de 6 à 7 km à partir de la zone de plongée, arrivent donc aux vannes avec une densité de 1,025 à 1,040 alors que les particules légères (brindilles...) surnagent. Une quantité importante de sédiments est ainsi évacuée par les pertuis de dévasement lors de chaque opération de soutirage.

IV.2.2.5. Les mesures des courants de densité

a) Mesure de vitesse [76]

La mesure de vitesse des courants de densité dans une retenue se fait généralement par un courantographe. Cet appareil suspendu dans l'eau enregistre pendant une semaine la vitesse des courants de densité et leur direction. Cette vitesse n'atteint que très rarement un mille par heure. D'après les mesures connues, on peut citer quelques valeurs de vitesse relevées dans certains réservoirs:

- A Lake Mead, la vitesse enregistrée est de 0,6 mile / h;
- A Elephant Butte, sur le Rio Grande, cette vitesse varie entre 0,25 et 0,75 mile/h;
- A Echo Reservoir, sur le Weber river, un courant de densité a été observé avec une vitesse de 0,15 mile/h,
- Sur le réservoir de Lake Arthur, en Afrique du Sud, la vitesse a atteint 0,34 mile/h;
- Enfin, à Lake Issaquena, près de Clémeson S. C., la vitesse a été estimée à 0,068 mile /h.

Ces références permettent une comparaison avec la retenue d'IGHIL EMDA où le courant de densité a atteint plusieurs fois la vitesse de 1,20 m/s, soit environ 2,68 mile /h, valeur nettement supérieure à celles qui précèdent.

b) Mesure de l'épaisseur [76]

la méthode de mesure de l'épaisseur du courant de densité est simple : sur son trajet probable, on place en différents points des règles verticales en Plexiglas ou en bois percées tous les 30 mm de trous horizontaux (6 mm de diamètre et 30 mm de profondeur).

L'épaisseur des courants de densité peut varier de quelques décimètres à une dizaine de mètres selon les retenues considérées. comme le montrent les exemples suivants :

- A lake Mead, la hauteur des courants de densité a atteint 0,6 m
- A Elephant Butte, une hauteur de 1,5 m a été relevée.
- A lake arthur, cette hauteur est de 1 m
- A Wilson Dam, sur le Tennessee, une hauteur de 10 m a été enregistrée.

dans la retenue d'IGHIL EMDA, les courants de densité peuvent atteindre une hauteur de 2,5 à 2,6 m.

c) Mesures des dépôts de sédiments

Au cours de leur cheminement, les courants de densité entraînent une quantité importante de sédiments, mais seuls les particules fines (inférieures à 20 μ m) peuvent atteindre les vannes de devasement, et pourront ainsi être évacuées. Le reste des dépôts se décante pendant le parcours dans la retenue. Afin d'évaluer ce volume de sédiments, nous avons fait une campagne de mesure des levés bathymétriques durant l'été 1992 [112].

c.1. Principe

La mesure de l'envasement a été faite tout simplement par différence entre la topographie du fond de la cuvette avant la mise en eau du barrage en 1953, et celle qui se présente actuellement, c'est à dire à la date de la mesure de l'envasement, soit juillet-août 1992. A cet effet, nous avons utilisé un matériel approprié composé essentiellement d'un théodolite et d'un écho-sondeur.

c.2. Le matériel utilisé

Pour les premières campagnes, entre 1954 et 1958, les levés bathymétriques ont été effectués par sondage mécanique (mesure avec un fil à plomb). Durant les campagnes suivantes, les relevés ont été effectués au moyen d'un écho-sondeur. En juillet 1992, le matériel utilisé comprenait:

- une petite barque (3,20 m / 1,60 m);
- un moteur hors bord (de 8,5 CV);
- un écho-sondeur à ultra-son et un saumon;
- un théodolite.

c.3. Exécution des mesures

La réalisation des mesures est simple et ne demande que quelques précautions élémentaires et trois personnes suffisent pour manoeuvrer la barque et manipuler l'écho-sondeur :

- on se place au départ du profil à réaliser dans l'alignement des deux jalons matérialisant le profil en travers;
- on descend le saumon supportant le nez de la sonde juste sous la surface de l'eau;
- dès que la barque avance, on met en marche l'enregistreur et on note directement sur la bande d'enregistrement les références du profil, la distance et la côte du plan (photo. 39),
- on déclenche le chronomètre qui permettra un contrôle supplémentaire des vitesses;
- on dirige la barque à allure constante et réduite vers le jalon opposé (photo 40). Par temps calme, il est facile de se manifester en ligne droite et de garder une allure constante, mais dès qu'il y'a du vent, et une agitation de l'eau, il est préférable d'abandonner les mesures. Pour éviter ce problème de vent, les mesures ont été faites dès le levé du jour et jusqu'à dix heures du matin;
- arrivé à l'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 opérations. Il convient de souligner que 23 profils ont été relevés pendant cette campagne de juillet 1992.

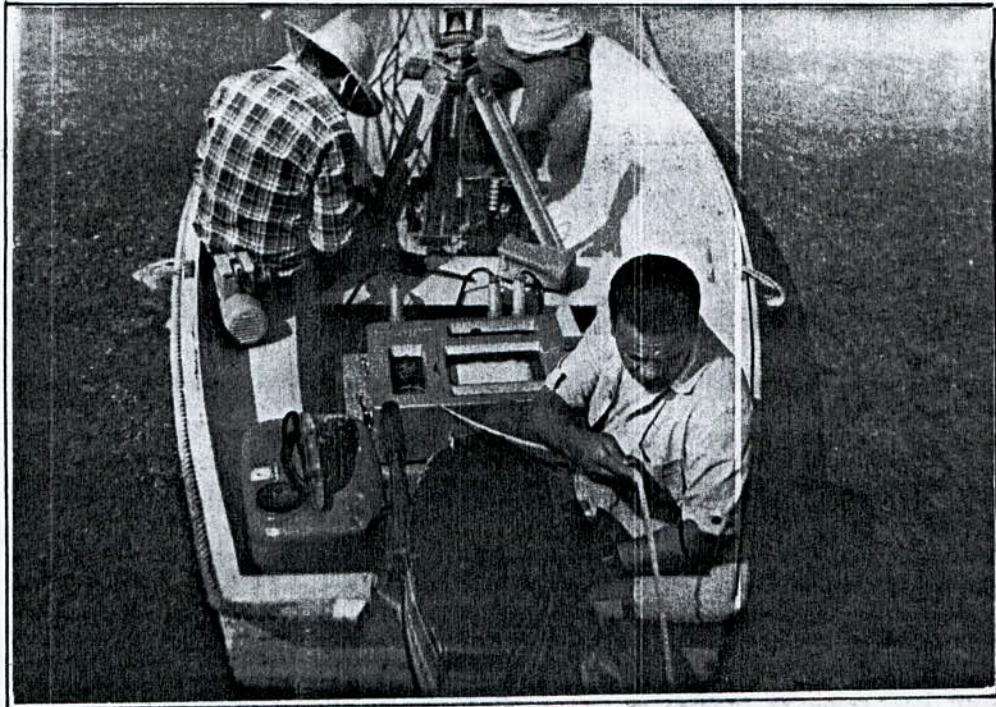


Photo 39: Retenue du barrage d'IGHIL EMDA.
Enregistrement en marche.

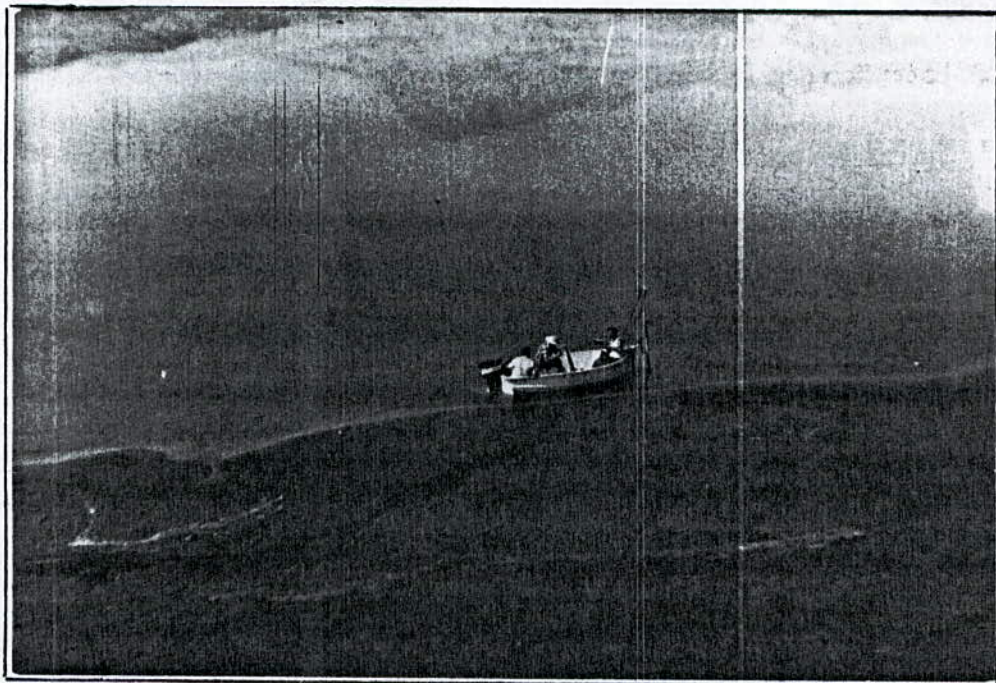


Photo 40: Retenue du barrage d'IGHIL EMDA
La barque est entraînée vers le jalon
opposé.

C.4. Etablissement d'un profil

Il s'agit de déterminer pour chaque profil l'importance de l'envasement alors que l'on connaît la section d'origine à la date de la mise en eau (1953). Sur un calque transparent, on relève les profondeurs enregistrées en tenant compte de la profondeur d'immersion de la sonde. Des deux profils ainsi obtenus (l'ancien et l'actuel), on déduit par planimétrie les surfaces d'envasement relatives à chaque tranche (fig. 87 et 88).

C.5. L'évolution des dépôts de vase [112]

Les profils en long des oueds Berd et Embarek (fig. 89) ont évolué ainsi que l'indiquent les observations qui suivent. En effet au cours du temps, le fond de la retenue a subi plusieurs changements de forme (pente, largeur...) en relation avec les dépôts successifs des sédiments provoqués par le cheminement des courants de densité.

- Ainsi, dans l'oued Berd, branche principale de la retenue, on constate qu'en Juillet 1992, à environ 2 km du pied du barrage, la hauteur du dépôt a augmenté de 21 mètres (l'épaisseur qui était en Juillet 1992). A l'amont, soit à 7 km environ du pied du barrage, l'épaisseur n'a pas changée, elle avait formé une sorte de plateau en 1957 s'étendant sur 1,5 km environ, en 1992 cette épaisseur a disparu.

- L'exploitation atteint 27,5 m, valeur qui est restée sans changement depuis 1981. Il est possible que cette forte pente du dépôt de vase soit due aux manoeuvres des vannes.

- Plus en amont, l'épaisseur des dépôts diminue progressivement jusqu'à proximité de la zone de plongée, et le profil de juillet 1992 est sensiblement parallèle à celui de 1984.

- Au dessus de la cote 520, les dépôts sont importants et sont en grande partie constitués de sable avec intercalation d'une épaisse couche de vase apportée pendant l'hiver, à cette période les eaux sont en effet moins chargées, leur densité est plus faible, et les débits solides qu'elles charrient ne suffisent pas à amorcer la formation d'un courant de densité susceptible de cheminer jusqu'au pied du barrage.

- Dans la partie haute de la retenue ("queue de la retenue"), le dépôt d'alluvions est horizontal et se termine à l'aval par une sorte de "talus" relativement incliné appelé "delta", ce sont des alluvions graveleuses déposées lorsque la retenue était à sa cote maximum 532.

Des constatations analogues peuvent être faites sur oued Embarek avec cependant quelques différences;

- L'épaisseur des dépôts varie entre 5 m à l'amont et 17,5 m au pied du barrage;

- A proximité du barrage (1000 m environ), la pente des sédiments est de 3 %;

- La zone située entre les profils P 104 et P 106 d'environ 2400 m a subi une forte érosion durant la période 1984-1992; (fig. 90).

- Depuis 1981, le profil en long est resté constant; l'envasement de cette branche s'est stabilisé. Ceci peut être expliqué par le fait que le toit de la vase en 1992 ait atteint une pente d'équilibre. Un levé bathymétrique est envisagé en 1996 pour vérifier ce phénomène.

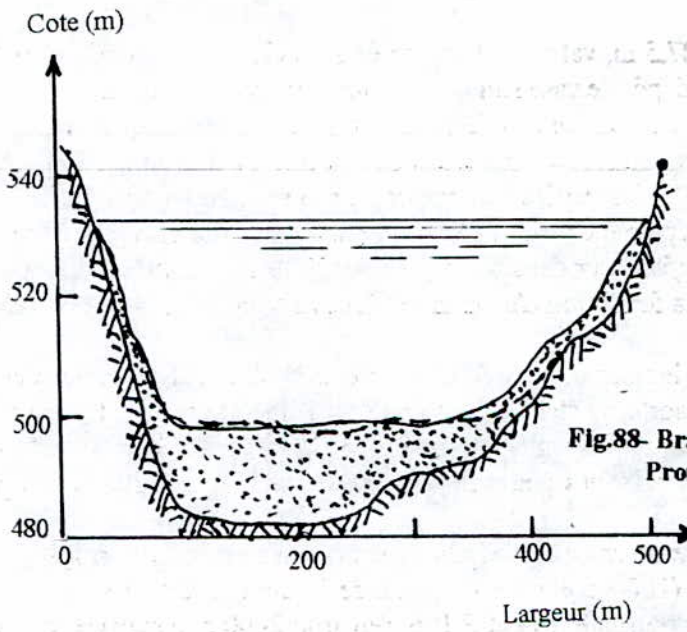
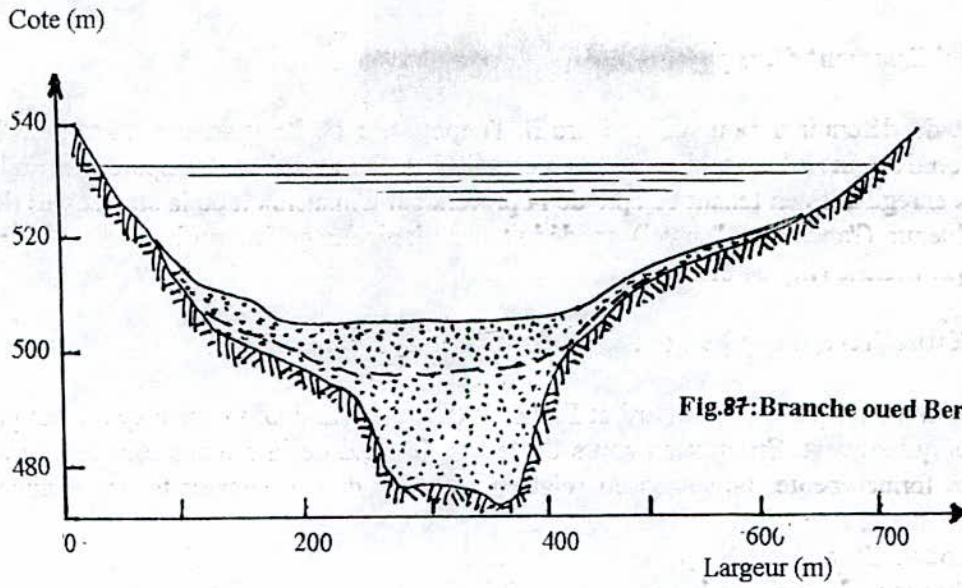
C.6. Calcul de l'envasement

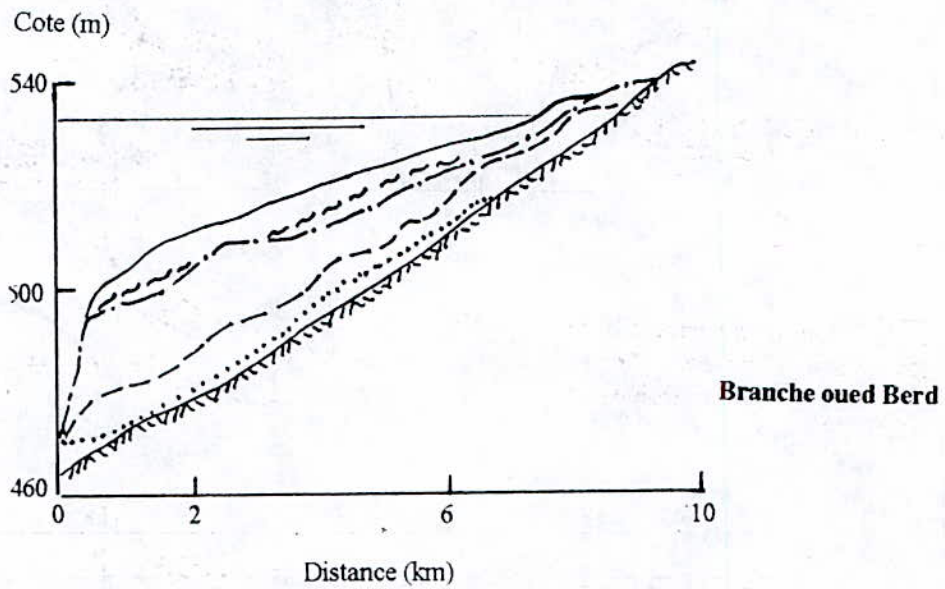
A partir des données initiales de 1953 soit :







- DS_{53} (en m^2) représentant la section par tranche de 2 mètres d'épaisseur,

- et DV_{53} (en m^3) le volume d'eau correspondant, on peut écrire que le volume associé est proportionnel à la section correspondante tel que

$$DV_{53} = qh \cdot DS_{53} \dots \dots \dots 23$$





-  1953
-  1954
-  1958
-  1981
-  1984
-  1992

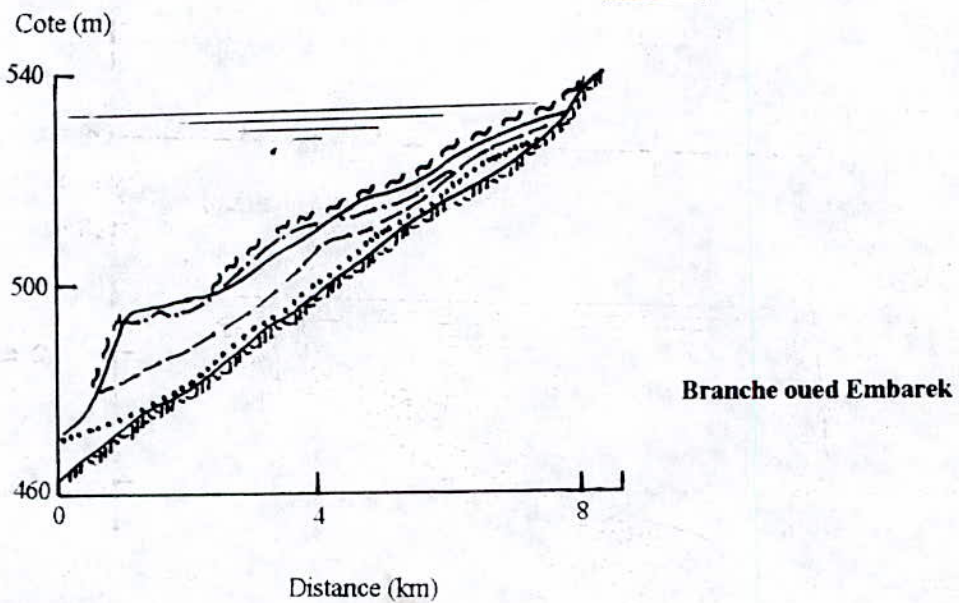


Fig. 89 : Evolution du toit de la vase dans la retenue du barrage d'IGHIL EMDA

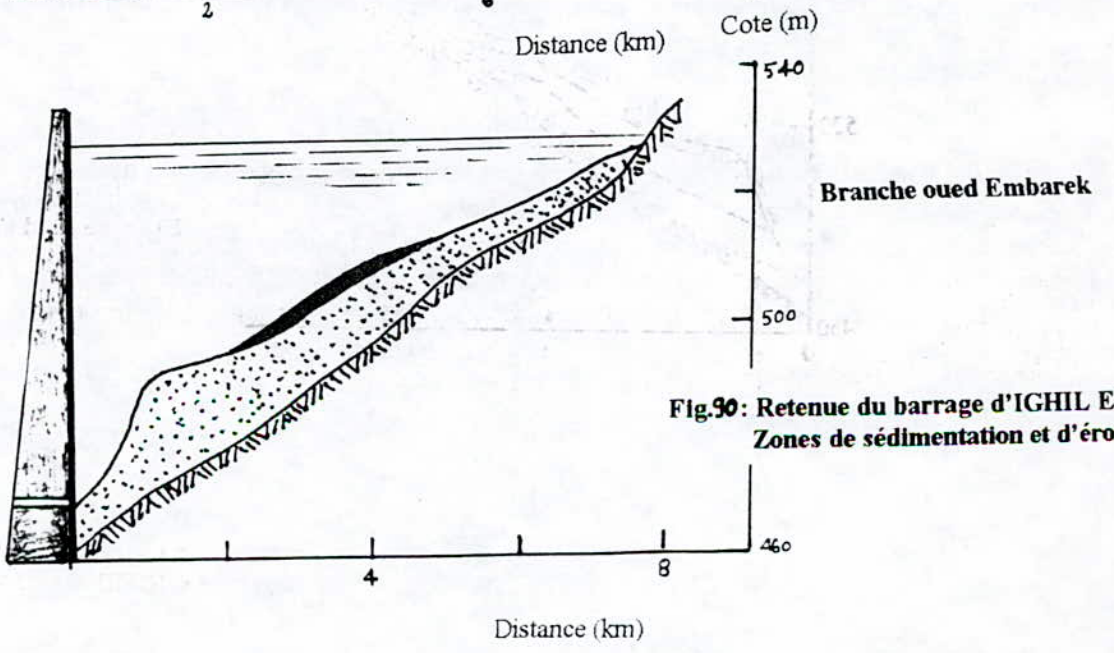
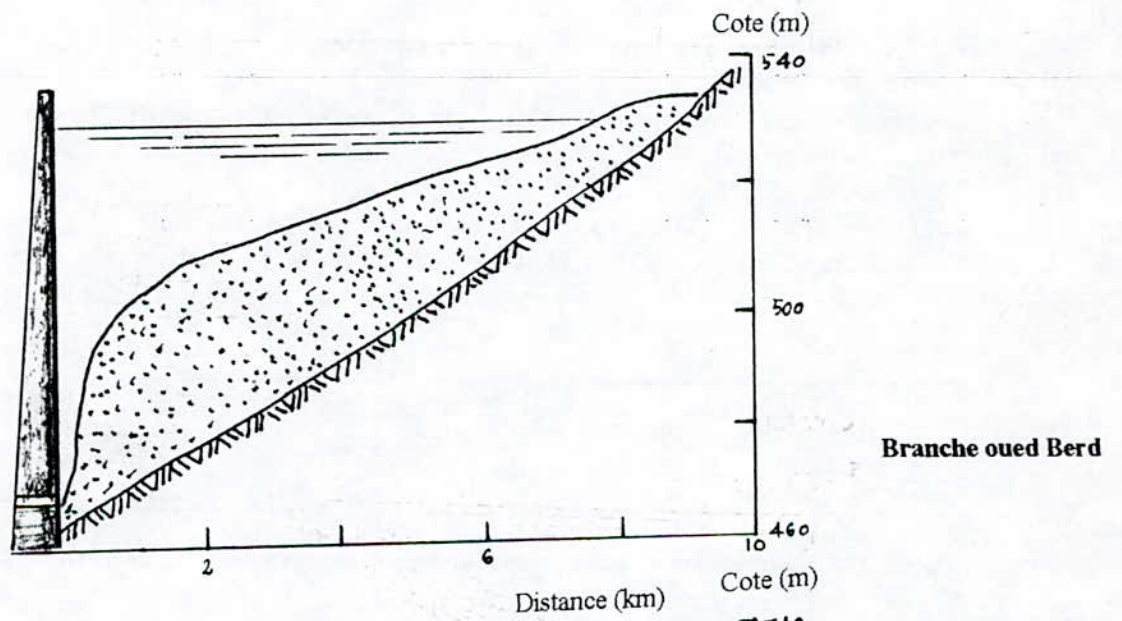
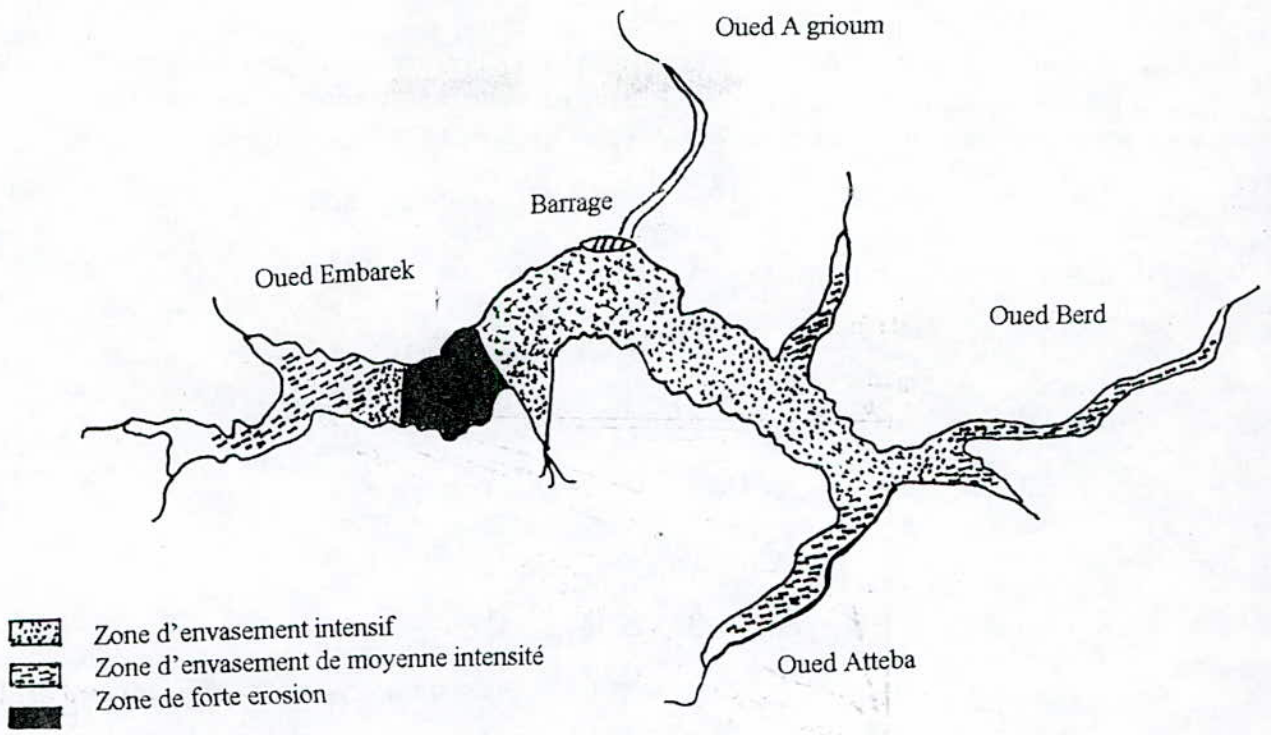


Fig.90: Retenue du barrage d'IGHIL EMDA. Zones de sédimentation et d'érosion

avec qh = coefficient qui dépend de la topographie de la retenue au niveau considéré, et qui aura une valeur constante d'une tranche d'eau à l'autre sur toute la profondeur de la retenue. Lors de la réalisation de la mesure de l'envasement, soit à l'instant (t), on aura

$$DV_{(t)} = DS_{(t)} \cdot qh \dots\dots\dots 24$$

Ainsi l'envasement (DE_h) entre 1953 et la date (t) de chaque tranche (h) sera alors :

$$DE_h = DV_{53} - DV_{(t)} = qh \cdot DS_{53} - DS_{(t)}$$

or $qh = DV_{53} / DS_{53}$ constant dans le temps,

ce qui implique : $DE_h = (DV_{53} / DS_{53}) (DS_{53} - DS_{(t)})$

soit

$$DE_h = DV_{53} \cdot (DS_{53} - DS_{(t)}) / DS_{53} \dots\dots\dots 25$$

Le rapport $(DS_{53} - DS_{(t)}) / DS_{53}$ n'est que le pourcentage d'envasement (ou perte de capacité) de la tranche d'eau à la côte h du profil considéré.

c.7. Quantification des dépôts de vase dans la retenue [76]

Depuis sa mise en service en septembre 1953, la retenue du barrage d'IGHIL EMDA accuse une perte de capacité de **34,1 %** : alors que sa capacité initiale était de 154783800 m³, elle n'est plus en 1992 que de 102019000 m³ de vase.

La retenue d'IGHIL EMDA fait l'objet d'une sédimentation croissante à des vitesses certes variables, mais à un rythme moyen de **1,33 m³/an**. Le taux de sédimentation est évalué à **0,87 %**. La branche de oued El Berd se trouve plus envasée que celle de oued Embarek comme le montre le tableau 17:

Retenue IGHIL EMDA	Branche oued Berd	Branche oued Embarek
Superficie du sous bassin	490 km ²	157 km ²
Capacité	78,7.10 ⁶ m ³	76.10 ⁶ m ³
Envasement	39,96.10 ⁶ m ³	12,80.10 ⁶ m ³

Tableau 17-Quantification de la vase dans les deux branches de la retenue d'IGHIL EMDA

Conclusion:

Dans cette partie concernant l'étude des courants de densité dans la retenue du barrage IGHIL EMDA, nous avons pu montrer que cette retenue est exposée à un envasement rapide dû essentiellement aux apports en provenance du bassin versant de l'oued Berd. Ces sédiments sont ensuite drainés par les courants de densité jusqu'au pied du barrage.

Les conditions de concentration en éléments fins, de pente, et de forme de la retenue (type canal) ont favorisé l'apparition et la propagation des courants de densité dans cette branche de l'oued Berd en période de crue.

IV.3. Distribution des sédiments dans une retenue par l'avancement du « delta » des sédiments grossiers et décantation des particules fines :

Si les conditions citées précédemment ne sont pas réunies, c'est à dire que le cours d'eau de faible pente draine un apport solide de faible concentration et débouche dans une retenue de type « Lac » (cet élargissement brusque de vallée représente une zone de dépôt et de disparition des courants de densité). Dans ce cas la distribution des sédiments se fait par décantation des particules fines dans tous les endroits de la retenue et par charriage des particules grossières dans la partie amont du réservoir.

IV.3.1. Etudes antérieures

Plusieurs chercheurs se sont intéressés surtout à l'évolution du « delta » des sédiments grossiers dans les retenues de barrage.

Des études au laboratoire ont été menées par **SCHOLTISH** (1937) [10] qui a observé que le début de la formation du « delta » se fait là où la pente hydraulique est réduite et elle est causée par le remous qui devient important.

Le comblement par l'avancement du delta a été étudié au laboratoire par **BHAMDIPATY** et **SHEN** (1971), ils ont observé durant toutes les expériences, qu'un début de comblement (delta) s'établit et l'élévation du lit de comblement à l'amont a l'allure d'une fonction logarithmique avec le temps [113].

Dans le réservoir du barrage **SERRE PONCON** [45] en France, après l'inspection effectuée en 1971 avec la secoupe du commandant **COUSTEAU**, les sondages ultra-soniques effectués dans la retenue révèlent, après deux années d'exploitation, un exhaussement régulier qui traduit l'amorce d'un "delta" d'engravement, mais après six années d'exploitation, on observe une altération sensible du « delta » initial qui se transforme en talus abrupt par dégravement qui se trouve après huit années d'exploitation à 4500 m de l'extrémité de la retenue, et présente une épaisseur maximale d'une dizaine de mètres.

SUGIO (1972) [114] a observé que le « delta » a une forme bien définie et présente un abaissement de sa taille, et une diminution de la vitesse d'avancement.

SUGIO et **OKADE** (1974) [115] ont fait un compte rendu sur des expériences réalisées par **ASHIDI** [10] qui a conclu que le « delta » se forme à cause des débits de charriage après que les dépôts de fond soient accumulés (fig. 91).

Des observations similaires ont été faites par **YUCCEL** (1976) [116] et **MURRAY** (1978) [10] qui ont observé que le sable de diamètre 0,4 mm s'est déposé entièrement dans la partie supérieure de la retenue formant un « delta » de forme triangulaire tandis que la sable de 0,14 mm forme un « delta », mais avec une quantité charriée au delà du « delta » et s'y dépose avec le dépôt de fond (fig. 92).

Les levés topographiques des retenues en Taiwan et d'autres régions en Chine observés respectivement par **LING** (1969) [117] et **HAOC** (1977) [10] ressemblent bien à ceux de la formation des « delta ». **RAO** et **PALTA** (1973) ont montré la formation nette de « delta » dans le lac de **BHAKRA** en Inde [10].

4.3.2. Description du mode de distribution des sédiments

Les eaux de la rivière arrivant dans les eaux claires de la retenue sont freinées dans la zone du remous. Là elles perdent leurs matériaux grossiers qui vont former un « delta » en queue de la retenue. Ce « delta », de surface limitée, mais de hauteur relativement grande, présente une pente raide (talus naturel des sédiments) à sa limite avale plus douce à sa surface. Il s'étend en amont de la limite des eaux calmes en rehaussant les lignes d'eau à l'amont, et avance vers le barrage avec le temps au fur et à mesure des apports (fig. 93). Les sédiments fins sont tributaires de la gravité, de la turbulence et des écoulements dans la retenue. Les particules de taille argileuses, de taille inférieure à $2\mu\text{m}$, ont une vitesse de chute très faible à l'état individuel qui les empêcherait de sédimenter mais en général la salinité des eaux lacustres est suffisante (0,5 g/l) [118] pour produire la floculation de ces particules. Les flocons ainsi formés ont une vitesse de chute beaucoup plus importante et décantent aussi rapidement que les silts.

Une fois déposées au fond, les vases sont susceptibles de former des coulées boueuses vers les parties les plus basses de la retenue. Lorsqu'elles sont stabilisées, et en l'absence de mouvements importants dans la retenue, les dépôts vont se consolider en se débarrassant de leur eau interstitielle.

IV.4. Distribution des sédiments dans les « petites retenues » de basse chute (distribution par « rouleaux de recirculation »)

L'étude de la distribution des sédiments dans les « petites » retenues de basse chute reste encore méconnue, très peu de recherches ont été effectuées dans ce sens. En effet, comme il a été cité précédemment par BRUNE [68] [5], l'envasement dans les « petites » retenues est uniforme sur toute la cuvette, le classement granulométrique est moins net et les courants de densité en sont absents.

Faisant suite à ces hypothèses, nous avons mené une étude expérimentale de la distribution des sédiments sur le modèle réduit du barrage de BENI AMRANE. Le choix de ce barrage est justifié par:

- Sa faible capacité $15,6.10^6 \text{ m}^3$,
- L'absence des courants de densité dans la retenue [49],
- L'écoulement fluvial à l'entrée de la retenue [49],
- La forte charge des sédiments dans l'oued Isser [43].

IV.4.1. Similitude entre le modèle et les conditions réelles

En ce qui concerne l'écoulement à surface libre, les forces de pesanteur et d'inertie l'emportent sur la viscosité et la tension superficielle, pour cela, on utilise les lois de FROUDE pour le calcul des rapports d'échelles :

$$V_m / (gh_m)^{1/2} = V_p / (gh_p)^{1/2} \dots\dots\dots 26$$

où V, h et g représentent respectivement la vitesse, la profondeur et l'accélération due à la pesanteur. Les indices m et p désignent respectivement le modèle et le prototype.

L'échelle du modèle (1/100) combinée aux lois sus-citées détermine comme suit les relations entre paramètres du modèle et paramètres réels (tableau 18):

Longueur	L_m / L_p	1 / 100
vitesse	$(L_m / L_p)^{1/2}$	1 / 10
Débit	$(L_m / L_p)^{3/2}$	1 / 1000

Tableau 18- Echelles du modèle

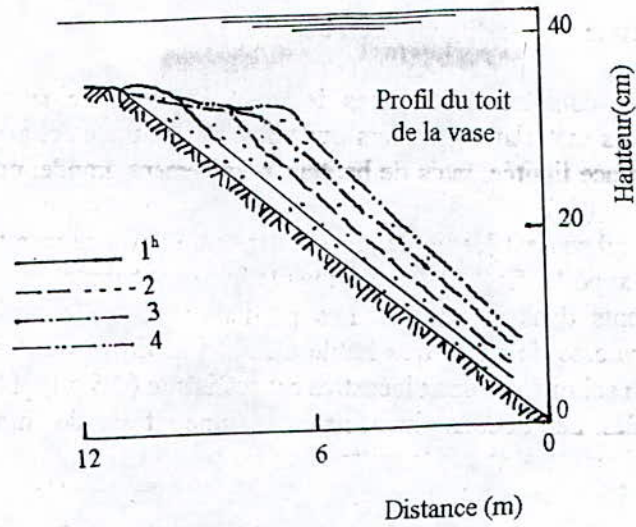


Fig.91: Profils du toit de la vase observés par ASHIDA. (SUGIO et OKABE, 1974)

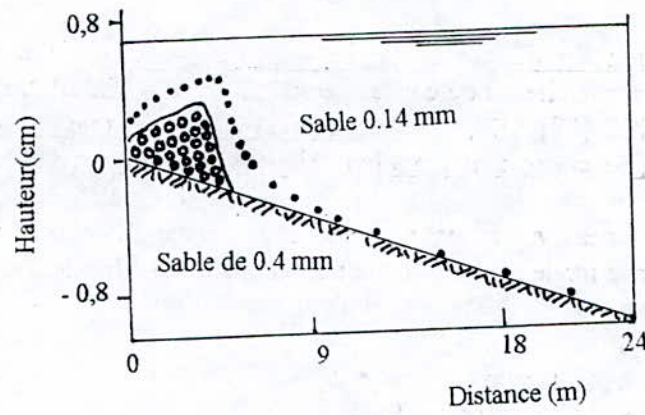


Fig.92: Formation du « delta » des sédiments grossiers. (MURRAY, 1978)

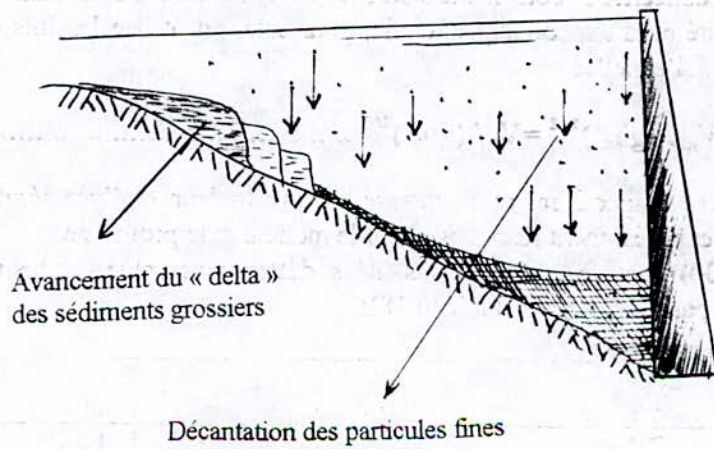


Fig.93: Cas où les conditions de formation des courants de densité ne sont pas réunies

IV.4.2. Dispositif expérimental

L'expérimentation a été réalisée sur le modèle réduit du barrage de BENI AMRANE construit à l'échelle 1/100 tel que la similitude de type REECH-FROUDE soit vérifiée (photo. 41).

Un dispositif photographique équipé d'un objectif de 50 mm, situé dans l'axe de l'ouvrage à une hauteur de 5 m, permet de prendre des clichés successifs.

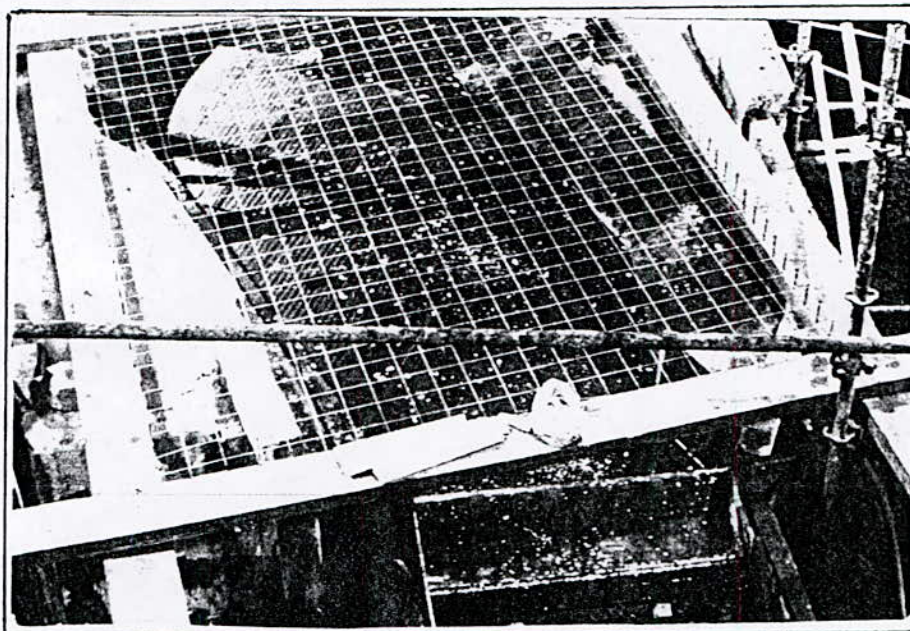


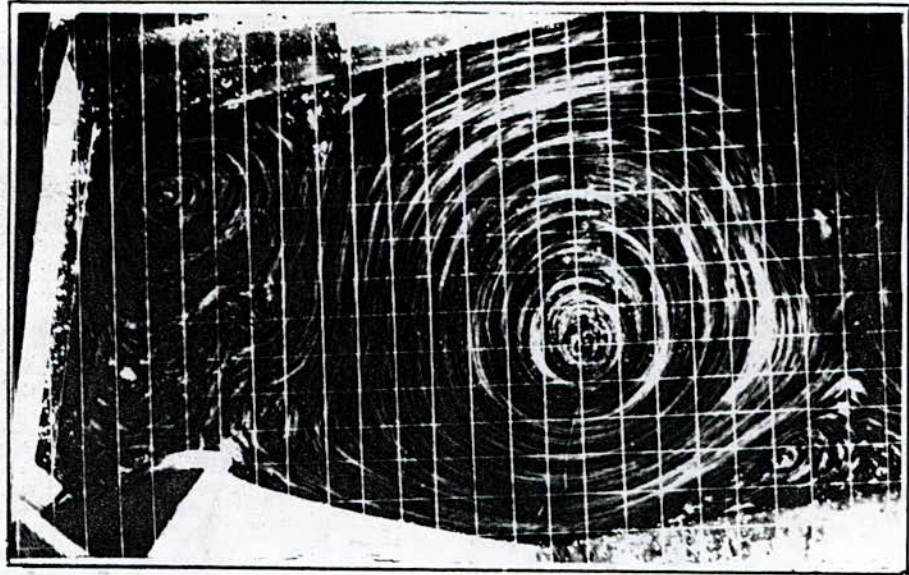
Photo.41: Retenue du barrage de BENI AMRANE.
Modele réduit (echelle 1/100)

IV.4.3. Résultats de l'étude expérimentale

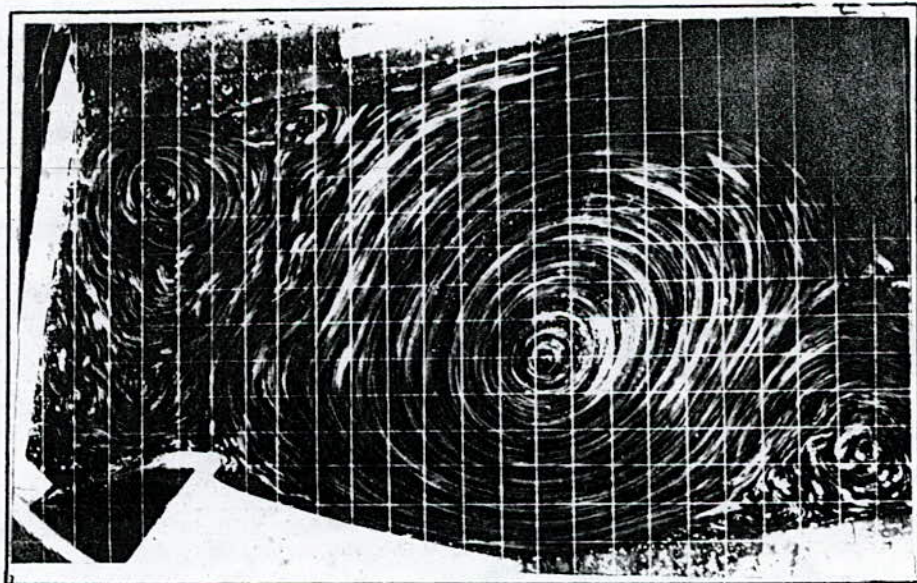
IV.4.3.1. Phénomène observé : rouleaux de recirculation : [119] [120] [121]

A l'instant initial ($t=0$), la retenue contient un volume initial d'eau (une quantité quelconque). L'arrivée d'une crue induit le mouvement des particules situées dans la zone d'entrée. Le phénomène observé est constitué de deux rouleaux de recirculation qui se déplacent vers l'ouvrage, il ne concerne que l'écoulement de la crue proprement dite. Ces structures proviennent de l'inertie qu'opposent les particules initialement immobiles à leur mise en mouvement par les particules provenant de la zone d'entrée de la retenue.

L'expérimentation a été réalisée avec une variété de débits d'apports dans la cuvette du modèle réduit du barrage de BENI AMRANE [4 l/s, 6,32 l/s, 10 l/s, 15 l/s, 20 l/s, 30 l/s et 40 l/s]. A chaque débit (Q_m), il apparaît un seul couple de ces rouleaux (Photo. 42 (a et b), 43 (a à l), 44 (a et b), 45 (a et b)).

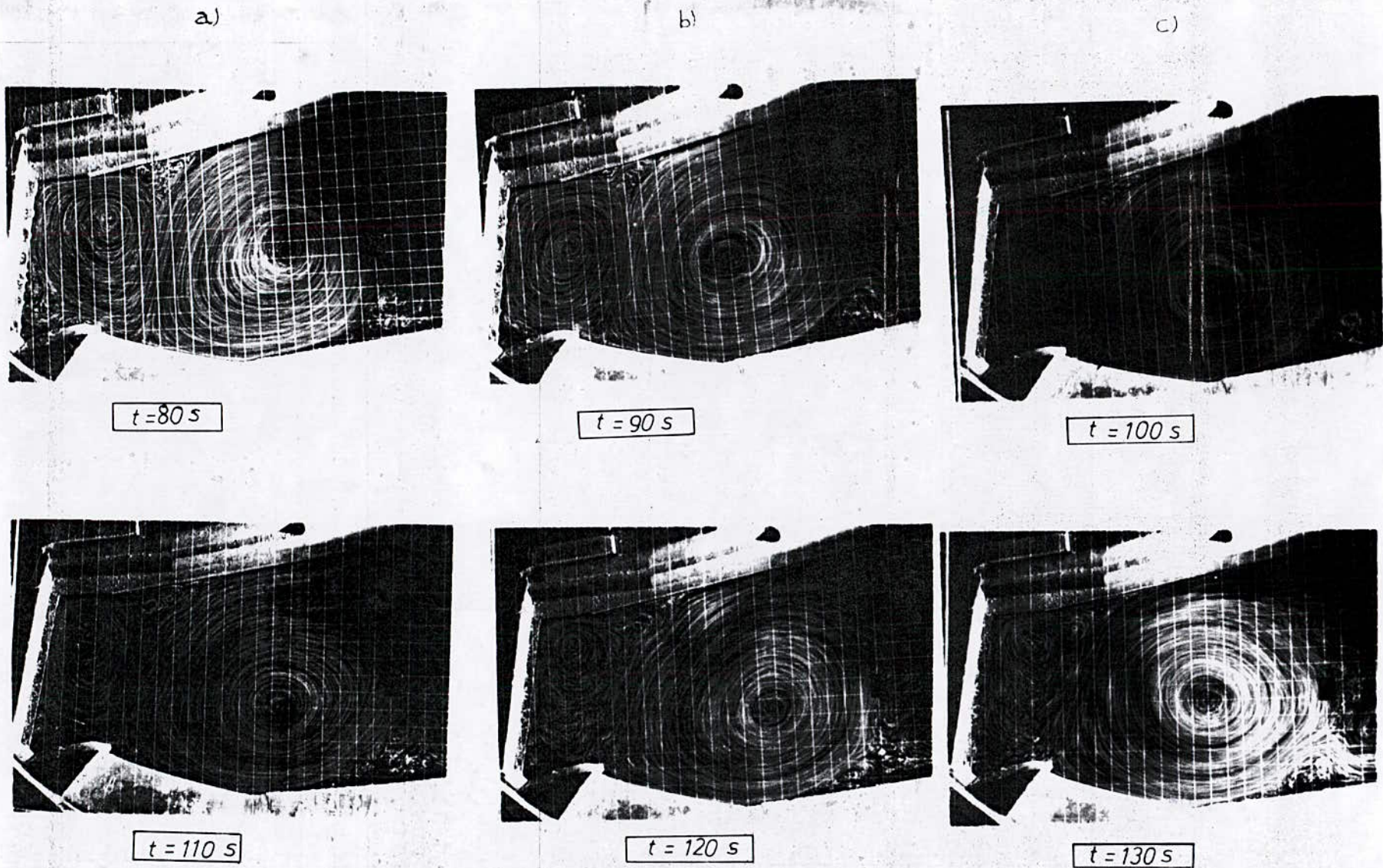


a/ Temps $t = 150$ s



b/ Temps $t = 180$ s

Photo. 42 - Evolution spatio-temporelle des rouleaux de recirculation dans la cuvette de BENI AMRANE
 $Q_m = 4$ l/s $Q_p = 400$ m³/s



d)

Photo N° 43

: Barrage de BENI AMRANE (Modele reduit à l'échelle géométrique 1/100 .Evolution spatio-temporelle des rouleaux de recirculation dans la cuvette de BENI AMRANE.

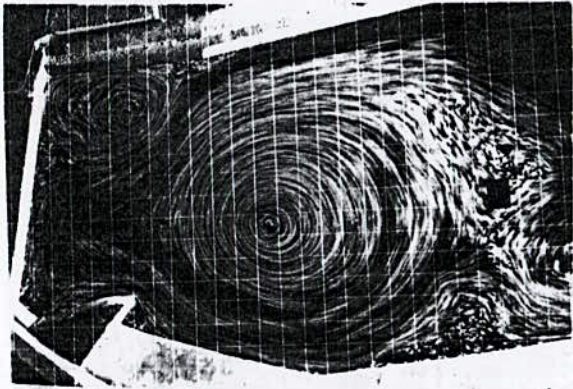
$Q_m = 6.32 \text{ l/s}$

$Q_p = 632 \text{ m}^3/\text{s}$

e)

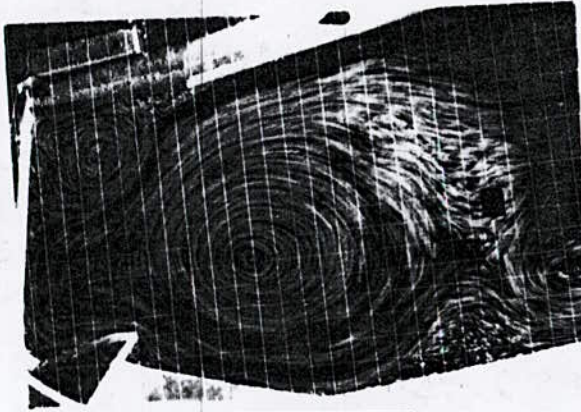
f)

g)



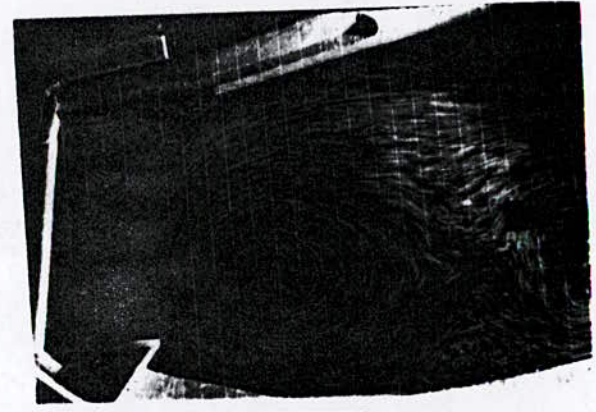
t = 270 s

h)

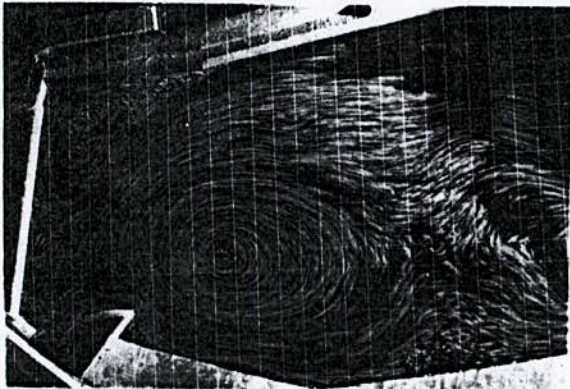


t = 280 s

i)

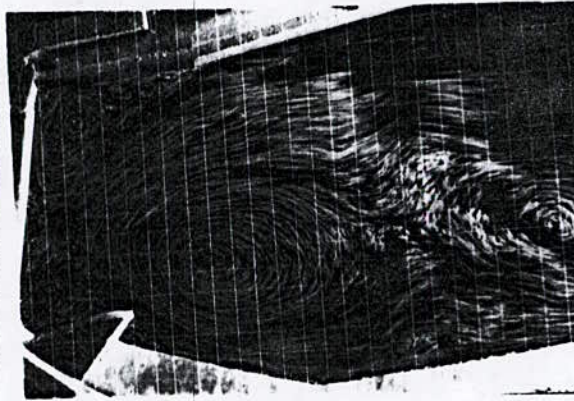


t = 290 s



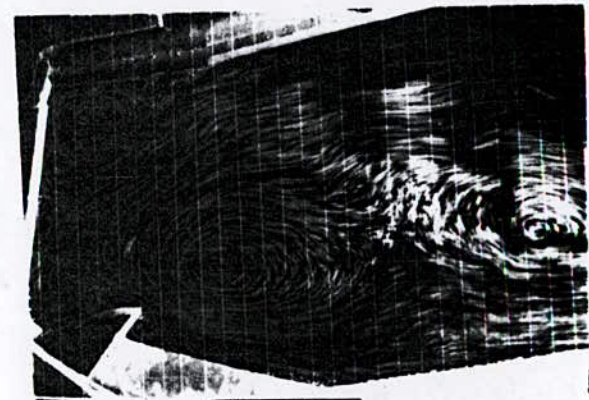
t = 300 s

j)



t = 310 s

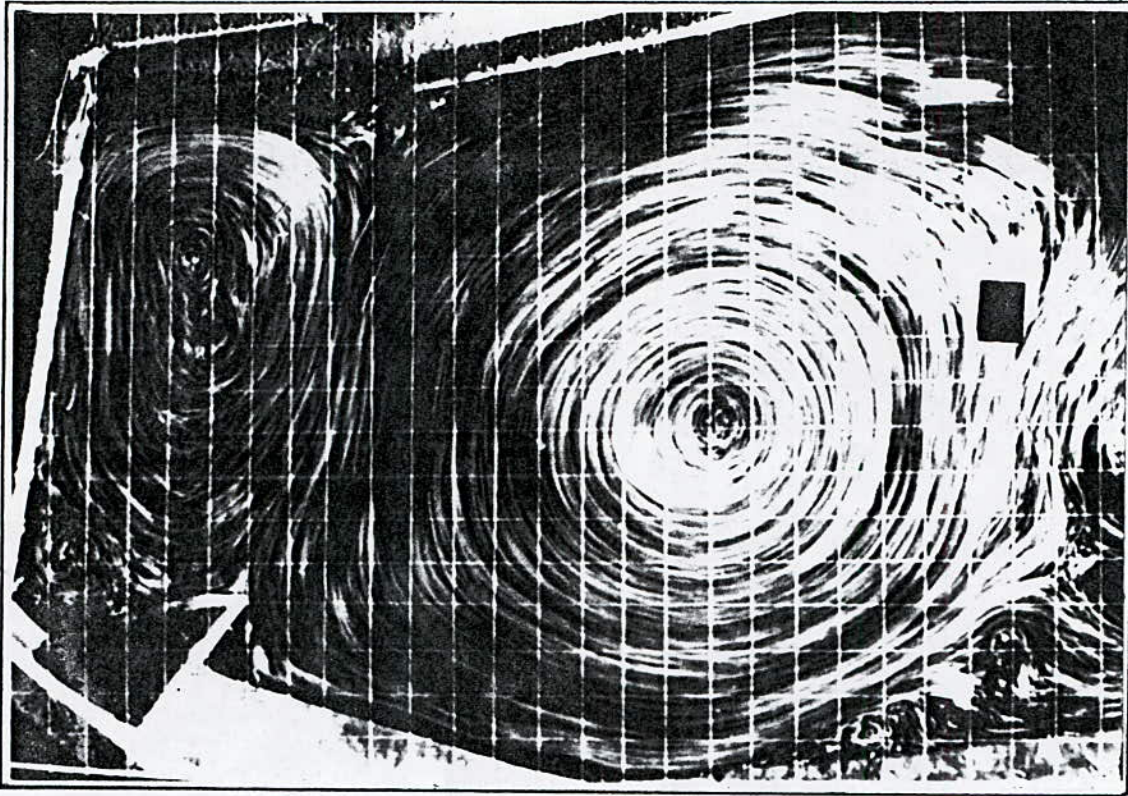
k)



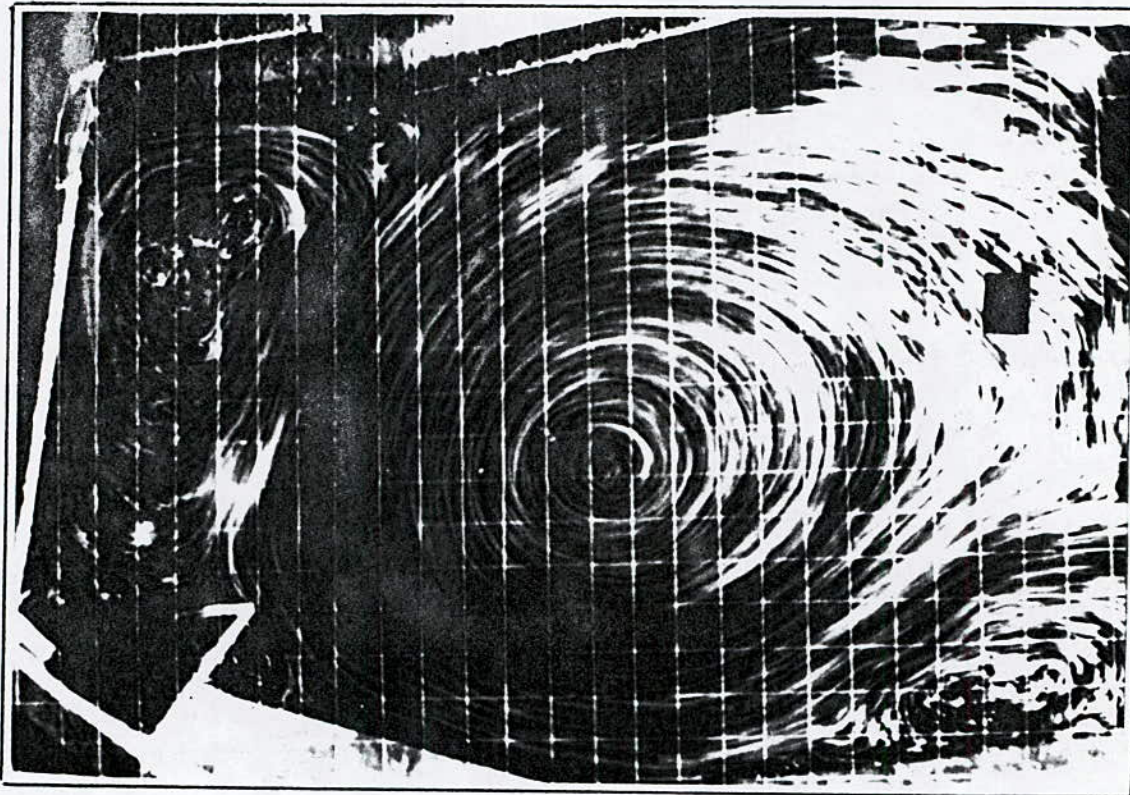
t = 320 s

l)

Barrage de BENI AMRANE (Modele reduit). Evolution spatio-temporelle des rouleaux de recirculation dans la retenue. $Q_m = 6.32 \text{ l/s}$ $Q_p = 632 \text{ m}^3/\text{s}$



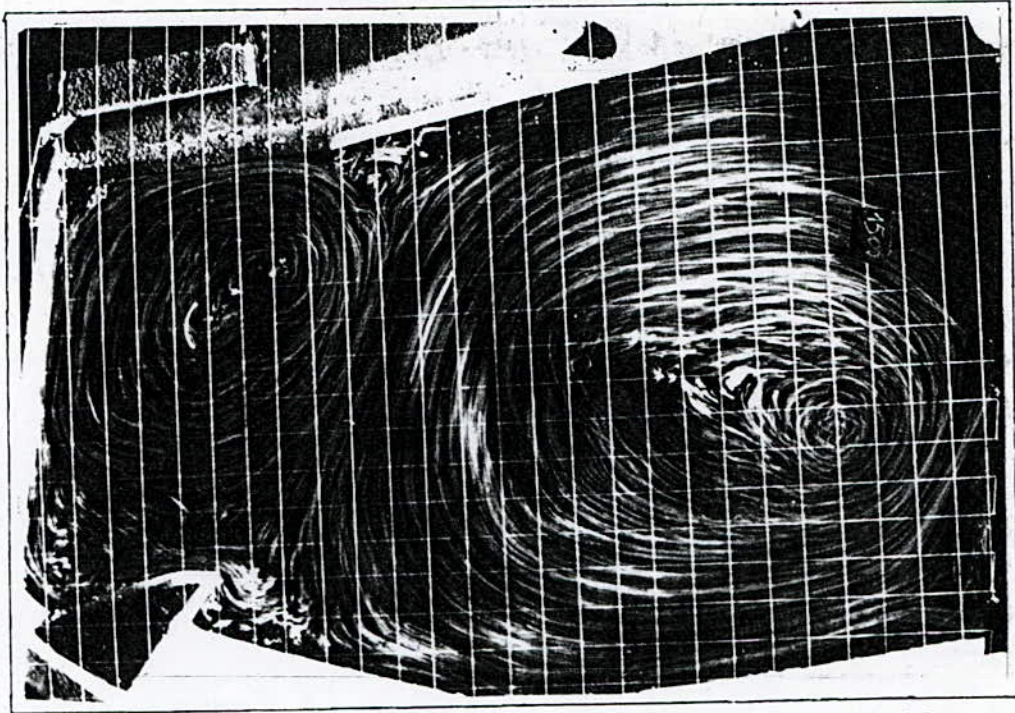
a) Temps $t = 135$ s



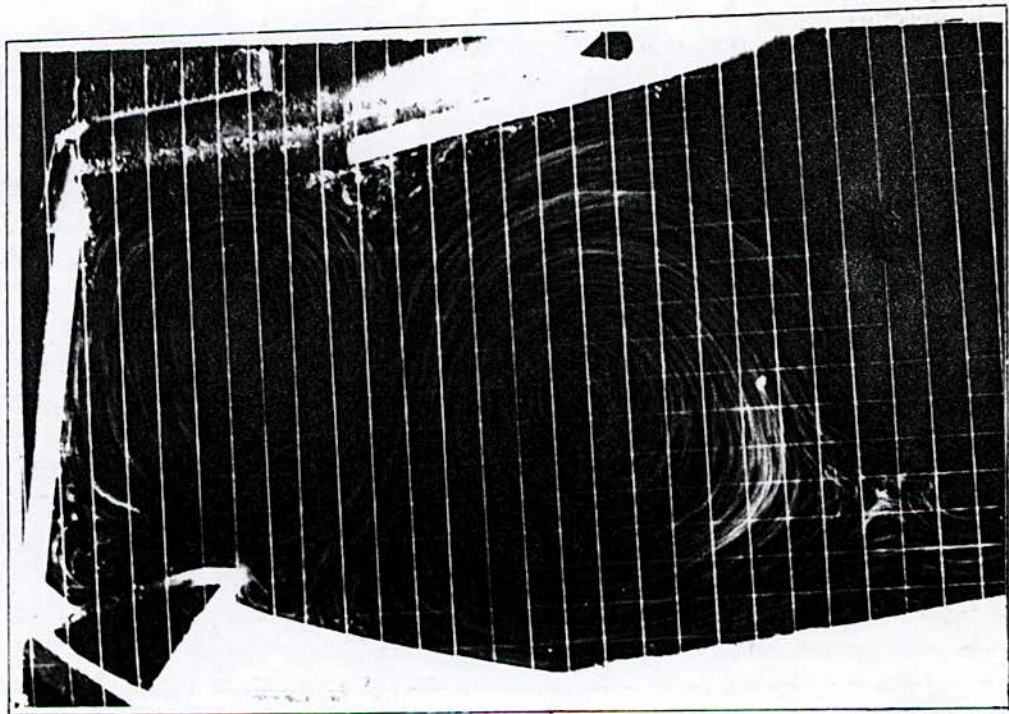
b) Temps $t = 155$ s

Photos 44 Evolution spatio-temporelle des rouleaux de recirculation dans la cuvette de BENI AMRANE.

$$Q_m = 10 \text{ l/s} \quad Q_p = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$$



a) Temps $t = 95$ s



b) Temps $t = 105$ s

Photos 45 - : Evolution spatio-temporelle des rouleaux de recirculation dans la cuvette de BENI AMRANE

$$Q_m = 15 \text{ l/s} \quad Q_p = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$$

IV.4.3.2. Etude quantitative de l'évolution spatio-temporelle des centres de rouleaux de recirculation : [122] [123]

Nous avons caractérisé l'évolution spatio-temporelle de la structure de recirculation par la variation dans le temps des centres des rouleaux. Ces centres sont repérés par la distance D_r qui les sépare et par leurs coordonnées (X_H, Y_H) relatives à des axes liés à la retenue, ox et oy sont respectivement: l'axe central de la retenue et la crête du déversoir (fig. 94). Par ailleurs, les deux rouleaux seront indicés par I et II.

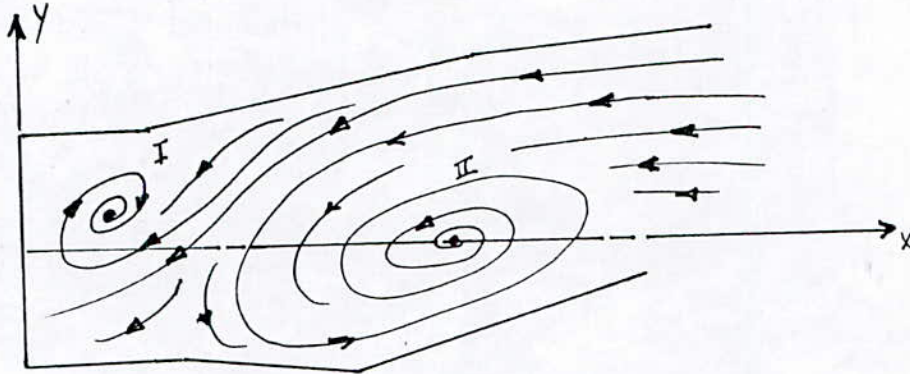


Fig. 94-Repère des centres des rouleaux de recirculation

L'interprétation des courbes représentées sur la figure 95 (a à d) permet de conclure que:

- le comportement oscillatoire des centres des rouleaux s'effectue plus rapidement durant les premiers instants de la crue.
- la structure de recirculation tend à se stabiliser lentement, ceci s'explique par le fait que l'effet de la quantité de mouvement est prépondérante à l'effet de frottement du mécanisme de l'évolution de la structure.

IV.4.3.3. Influence du débit d'apport sur l'évolution de la structure stable: [123]

[124]

les types de structures stables obtenus en fin de régime transitoire pour chaque débit gardent toujours une configuration à deux rouleaux de recirculation.

Les positions des centres de ces derniers qui représentent les zones de dépôt et de décantation des particules fines sont repérées par leurs coordonnées respectives (x_I, y_I) et (x_{II}, y_{II}) dans le même système de la figure 94. A cet effet, l'étude des relations adimensionnelles des positions des centres des rouleaux de recirculation en fonction du nombre de **FROUDE** (qui est lié au débit d'apport) est donnée par la représentation graphique de la figure 96. Nous constatons que lorsque le nombre de **FROUDE** augmente (l'écoulement est toujours fluvial); les deux courbes représentant les rapports R_1 et R_2 décroissent jusqu'à ce qu'elles se confondent, ce qui explique que la structure de l'écoulement composée au départ de deux rouleaux de dimensions différentes non symétriques évolue vers une structure constituée toujours de deux rouleaux, mais de dimensions équivalentes dont les centres se situent sur l'axe central de la retenue, et dès que le débit d'apport devient faible, les centres des rouleaux reviennent à leurs positions initiales et ainsi de suite.

Ceci explique d'ailleurs bien, le balayage de ces centres à travers l'ensemble du réservoir (il dépend évidemment de sa granulométrie), et donc la répartition spatiale des sédiments et l'uniformité de l'envasement dans la retenue, et confirme ainsi l'approche de BRUNE.

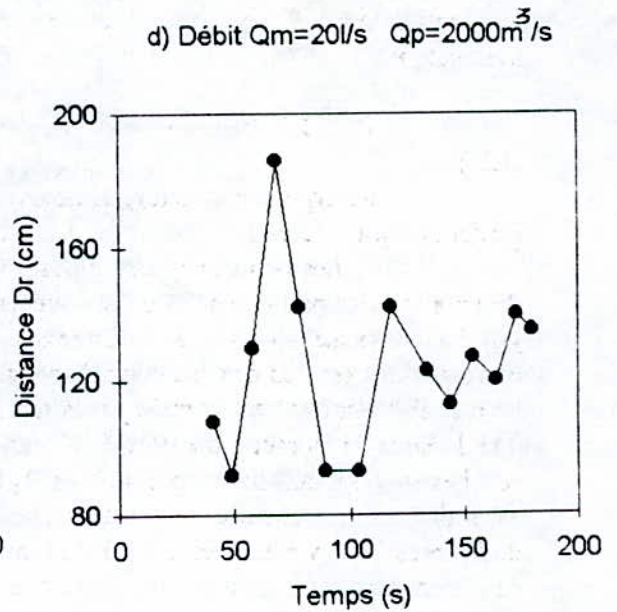
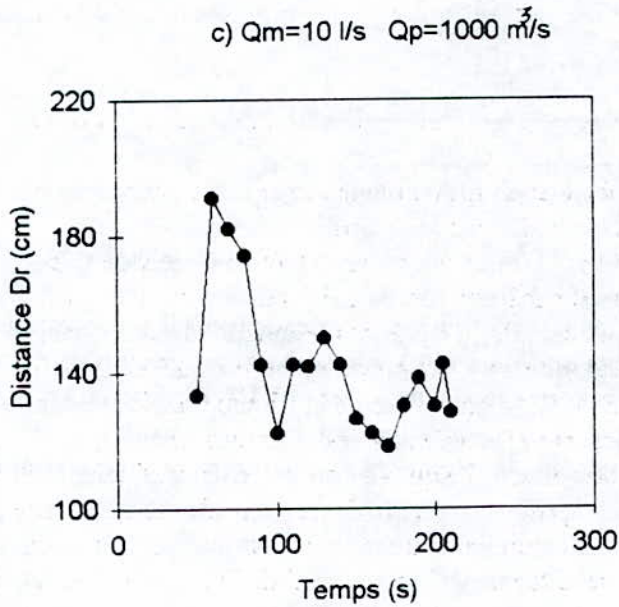
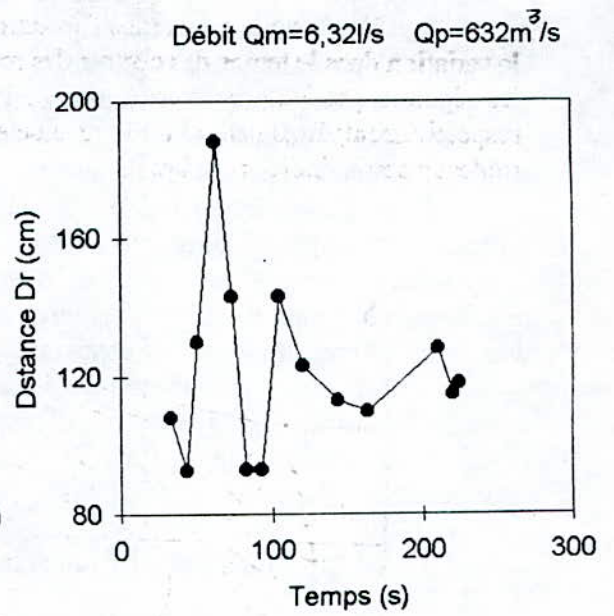
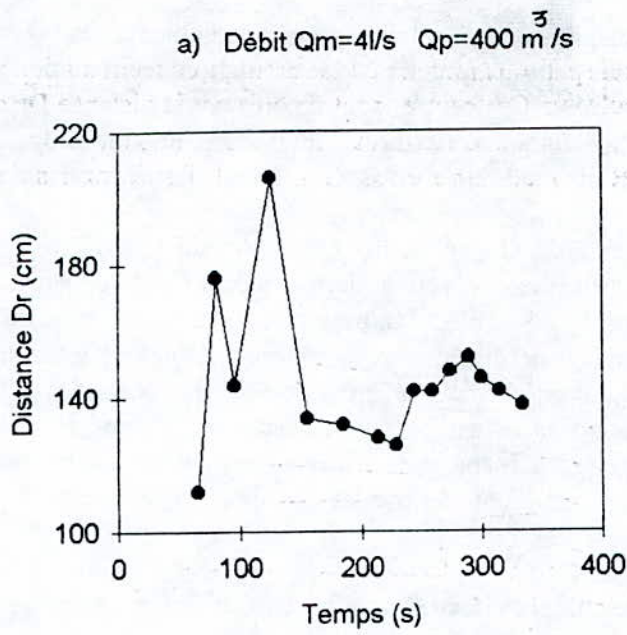


Fig.35 - Variation temporelle de la distance Dr.

IV.4.3.4. Répartition des sédiments dans la retenue : [124] [125][126]

Les résultats expérimentaux obtenus, nous ont montré que pour de faibles crues ($Q < 3$ l/s sur le modèle), l'écoulement dans la retenue est sans rouleaux de recirculation. Dans ce cas les sédiments sont tributaires de la gravité.

Les particules de faibles dimensions vont se former sous forme de flocons et ainsi elles se décantent plus rapidement, une fois déposées au fond, elles s'y accumulent en formant un lac de vase d'un volume qui peut être très important.

Quand l'énergie de l'écoulement devient importante ($Q > 4$ l/s sur le modèle), elle provoque une structure de recirculation constituée par un couple de rouleaux l'un de dimensions importantes que nous avons appelé rouleau principal qui se manifeste dans la partie centrale de la retenue appelée zone II (fig. 97), l'autre rouleau de dimensions moins importantes se manifeste dans la zone I près des vannes de fond du côté droit que nous avons appelé rouleau secondaire.

L'existence et l'importance de ces zones se justifient par le dépôt des sédiments et des matières en suspension (Fig. 97). Là, ces eaux perdent leurs matériaux progressivement pour obtenir ainsi la distribution spatiale des sédiments et qui dépend surtout de la forme géométrique de la cuvette.

IV.4.4. Résultats des opérations de chasses effectuées au niveau du barrage de BENI AMRANE

IV.4.4.1. Analyses Granulométriques

Pour donner plus de poids à l'étude expérimentale et confirmer ainsi la distribution uniforme des sédiments et un classement granulométrique moins net, nous avons fait des analyses granulométriques sur plusieurs échantillons de vases évacuées par les vannes de fond du barrage lors de plusieurs opérations de chasses. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 19.

Nature des grains	Pourcentage
Argile	15 %
Limon	28 %
Sable Fin	43 %
Sable Moyen	14 %

Tableau 19: Analyses granulométriques de la vase évacuée à travers les vannes de fond

Il est possible de constater que plus de **57 %** de sable ont été évacués dont **14 %** est du sable moyen de diamètre supérieur à **2 mm**, ce qui signifie que:

-Les particules sableuses se sont déposées dans la zone basse de la retenue (près des vannes). Il est intéressant de signaler que le sable de diamètre supérieur à **0,2 mm** se dépose généralement dans les grands réservoirs en queue de la retenue et forme le « delta ». Selon YUCEL [76] et MURAY [78], le sable de **0,4 mm** de diamètre se dépose dans la partie supérieure de la retenue.

-Les courants de densité ne se manifestent pas dans la retenue puisqu'ils drainent uniquement des particules fines.

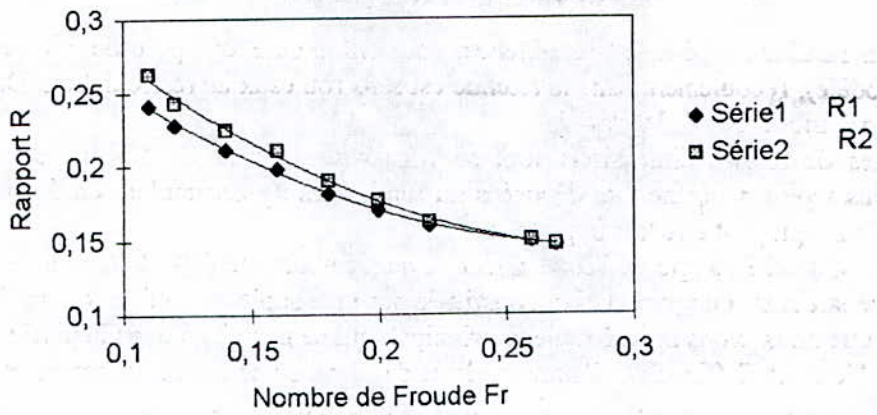


Fig.36 -Variation du rapport R en fonction du nombre de Froude Fr

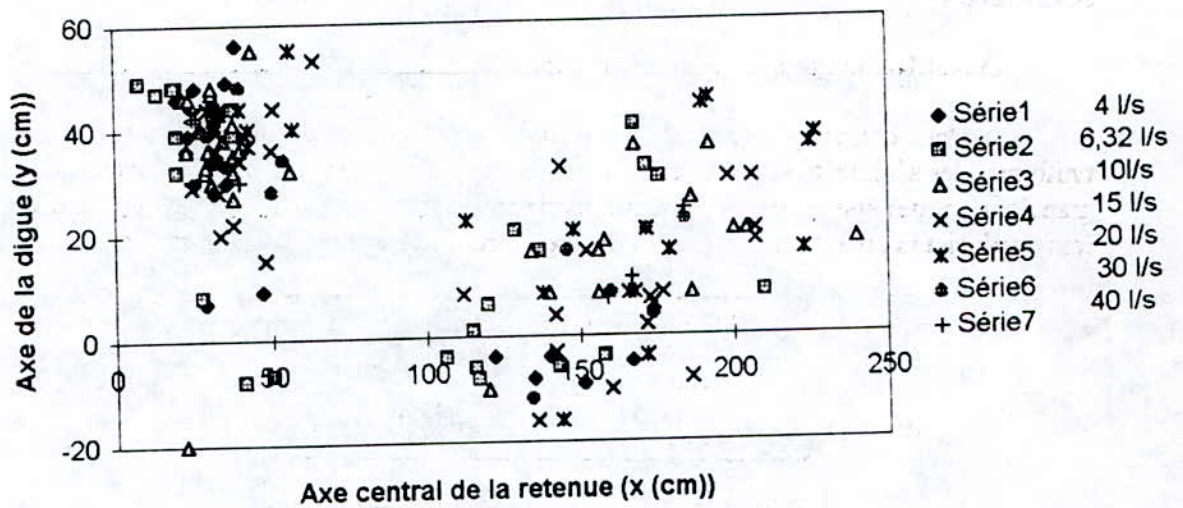


Fig.37-Répartition des sédiments dans la retenue du barrage de BENI AMRANE

IV.4.4.1. Les quantités de vases évacuées

Nous avons représenté par les figures 98, 99 et 100 les apports annuels ainsi que les quantités de mixture et de vase évacuées au niveau du barrage par le dispositif de chasse durant la période 1988-1993. Nous constatons que le rapport (vase évacuée/mixture évacuée) est de 3.2 %, ce qui représente une valeur très faible, donc les opérations de soutirage se sont déroulées avec une perte considérable d'eau.

Nous pouvons conclure aussi que durant les cinq années d'exploitation une quantité de vase évaluée à $1,32.10^6 \text{ m}^3$ a été évacuée sur la quantité de sédiment entrant dans la retenue estimée à $7,5.10^6 \text{ m}^3$, d'où une efficacité de soutirage estimée à 17 %, ce qui explique qu'une quantité importante s'était déposée dans la retenue (environ $6,2.10^6 \text{ m}^3$), soit $0,18.10^6 \text{ m}^3$ de sable moyen.

IV.4.5. Les opérations de chasses effectuées au niveau du modèle réduit du barrage de BENI AMRANE

Pour s'assurer qu'effectivement la quantité de sable soutirée est située sur la zone basse de la retenue, et qu'elle était ramenée par le rouleau de recirculation secondaire, nous avons procédé à une série d'expériences sur le modèle réduit.

IV.4.5.1. Dispositif d'évacuation des sédiments

Pour lutter contre la sédimentation accélérée de la retenue, le barrage a été équipé d'une série de six vannes (photo. 46).

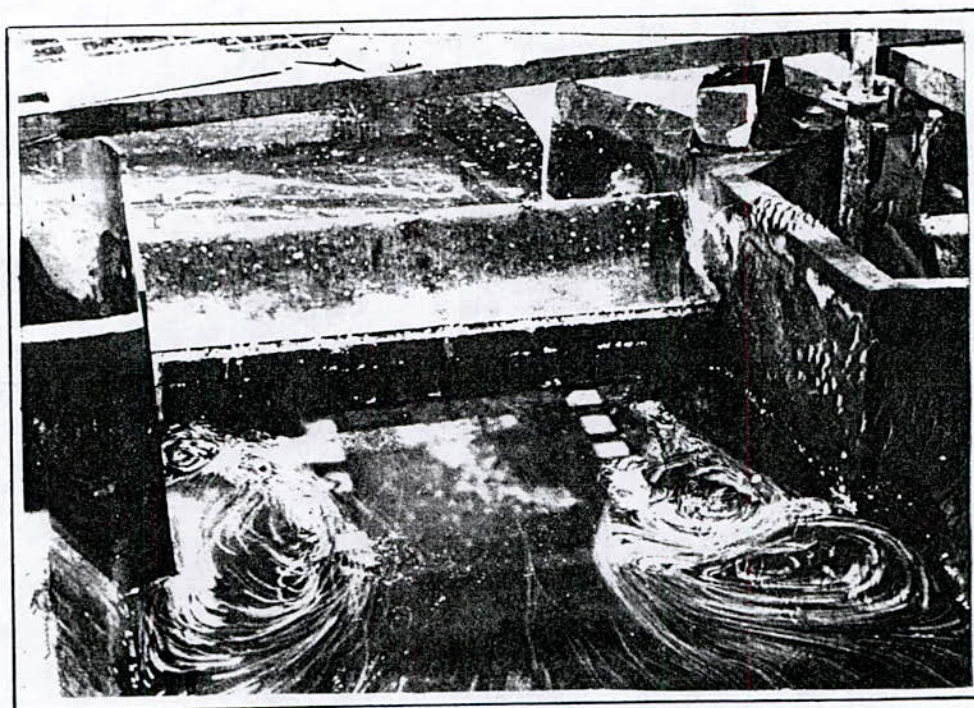


Photo.46: Système de chasse du barrage de BENI AMRANE
(Modèle réduit à l'échelle 1/ 100).

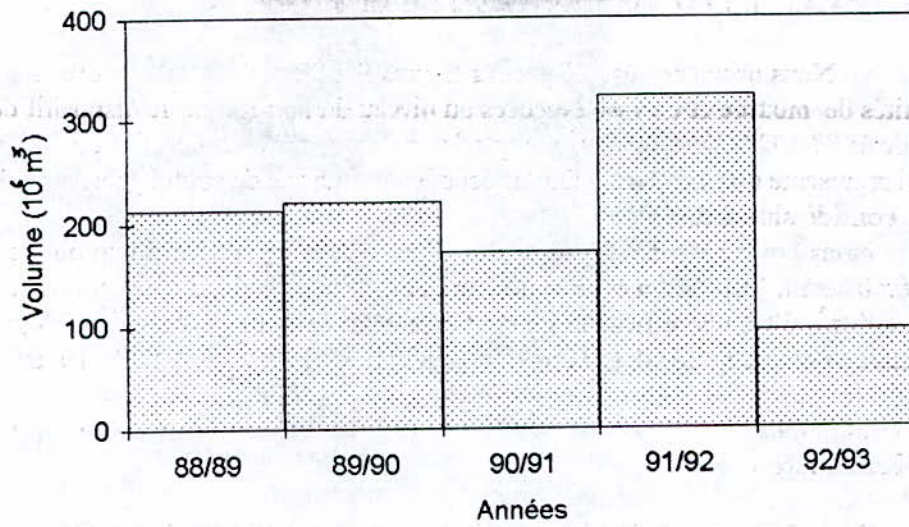


Fig. 98 - Barrage de BENI AMRANE. Apports liquides (periode 1988-1993)

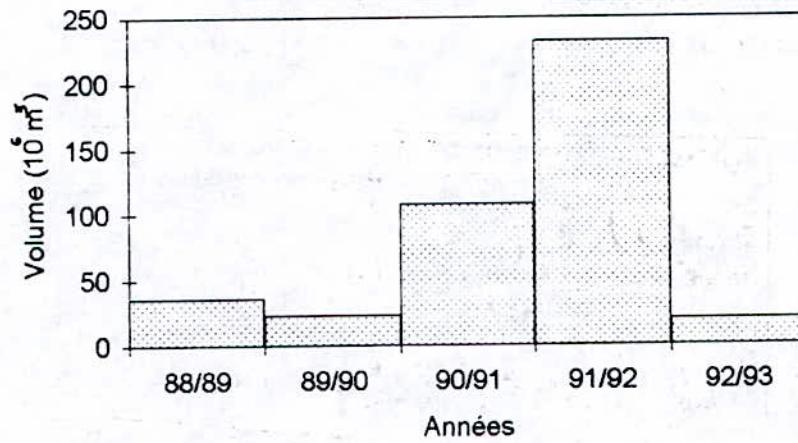


Fig. 99 - Barrage de BENI AMRANE-Quantité annuelle de suspension soutirée.

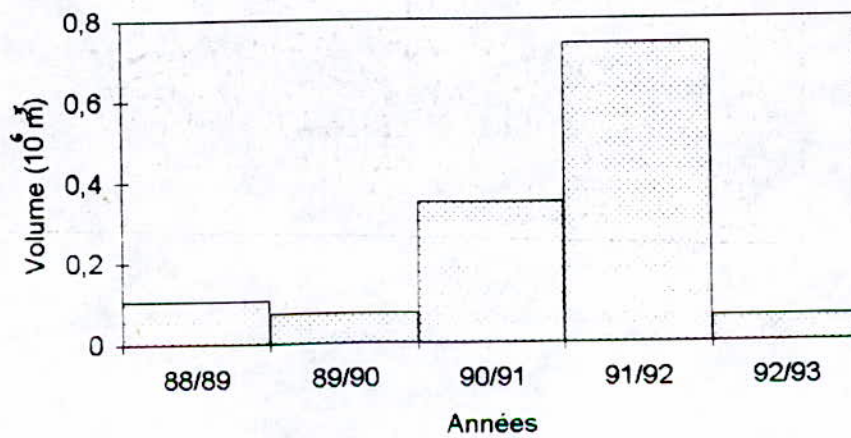


Fig. 100 - Barrage de BENI AMRANE. - Quantité annuelle de vase soutirée

IV.4.5.2. Résultats et discussions

Nous avons mené une série d'expériences avec de différents débits d'apports dans la cuvette (4 l/s, 6,32 l/s, 10 l/s, 15 l/s, 20 l/s, 30 l/s et 40 l/s) en faisant varier le nombre d'ouvertures des vannes pour chaque apport. Il est possible de constater sur les photo. 47 (a à g) que l'ouverture d'une ou plusieurs vannes fait modifier la structure de l'écoulement. En effet, le rouleau secondaire situé près des vannes a complètement disparu par l'effet de la vitesse de soutirage (fig. 101), et le rouleau principal se manifeste toujours dans la zone centrale de la retenue avec un léger avancement vers la zone basse pour des débits chassés importants (plus de 4 vannes ouvertes). Cela signifie que seule la vase déposée dans la zone basse a été évacuée et confirme ainsi que le sable moyen provient effectivement de cette zone (basse).

De la présente étude, il résulte que:

- la distribution des sédiments dans la retenue est uniforme,
- le classement granulométrique est moins net et confirme ainsi l'approche de **BRUNE**.

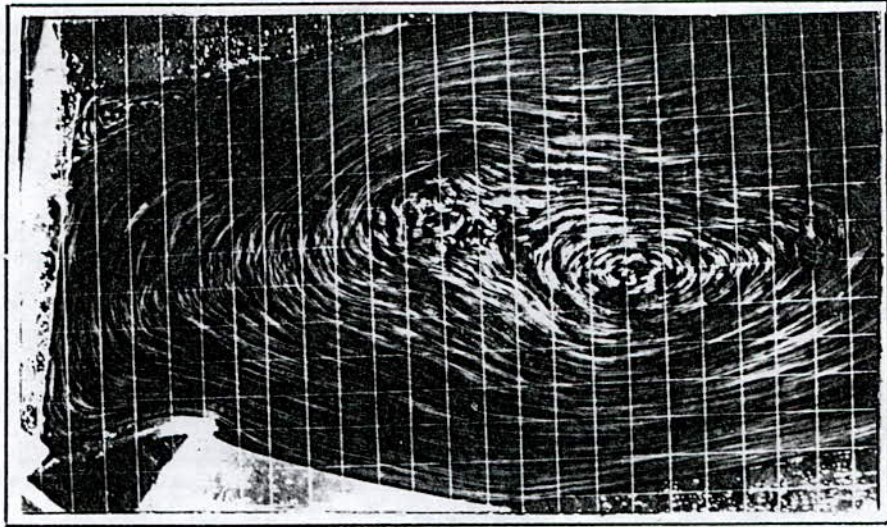
Donc, nous pouvons dire dans une première approche que la distribution des sédiments dans les petites retenues se fait par rouleaux de recirculation et nous préférons l'appeler: « distribution des sédiments par rouleaux de recirculation »

Conclusion

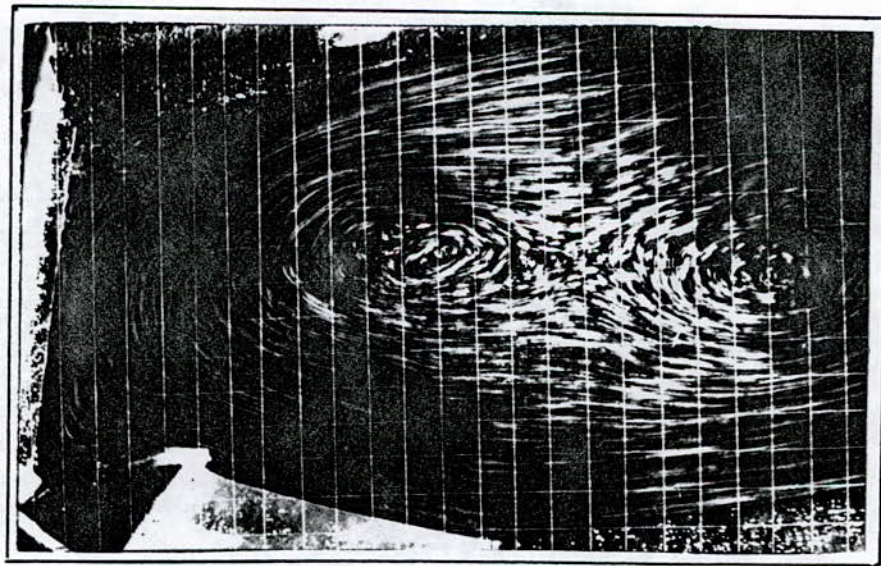
Dans une première approche, nous pouvons proposer trois modes de distribution des sédiments dans les retenues:

- Distribution des sédiments par charriage des particules grossières et décantation des sédiments fins.
- Distribution des sédiments par courants de densité.
- Distribution des sédiments par rouleaux de recirculation.

L'organigramme de la figure 102 résume cette étude.

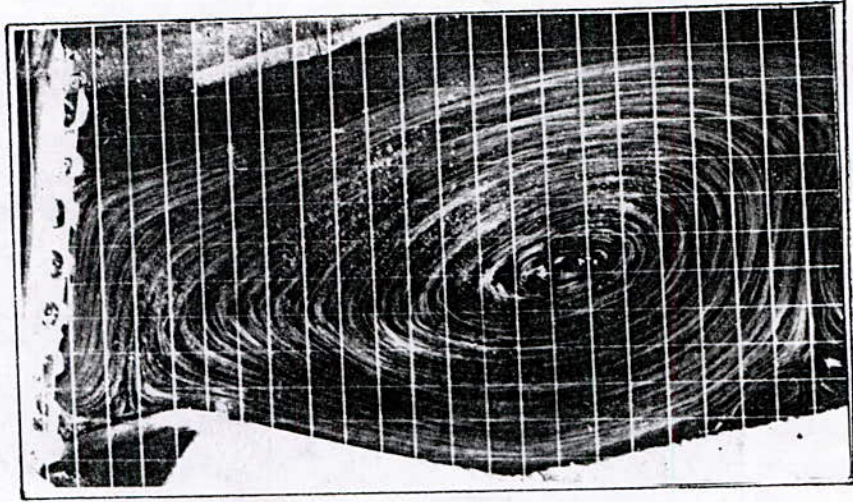


a- Vanne 4 ouverte. Débit $Q_m=4$ l/s. Temps=65 s

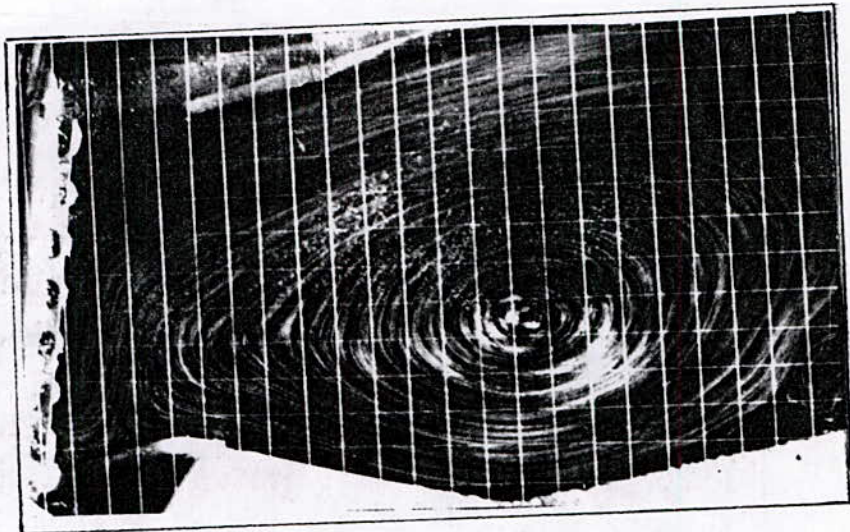


b- Vanne 4 ouverte. Débit $Q_m=4$ l/s. Temps=85 s

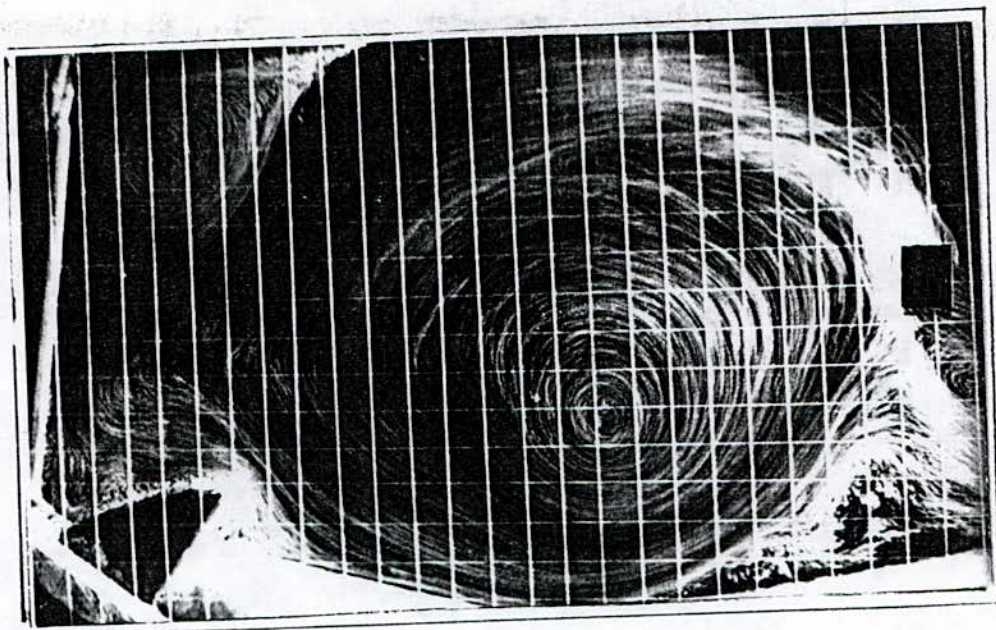
**Photo.47: Retenue du barrage de BENI AMRANE.
Rouleaux de recirculation .**



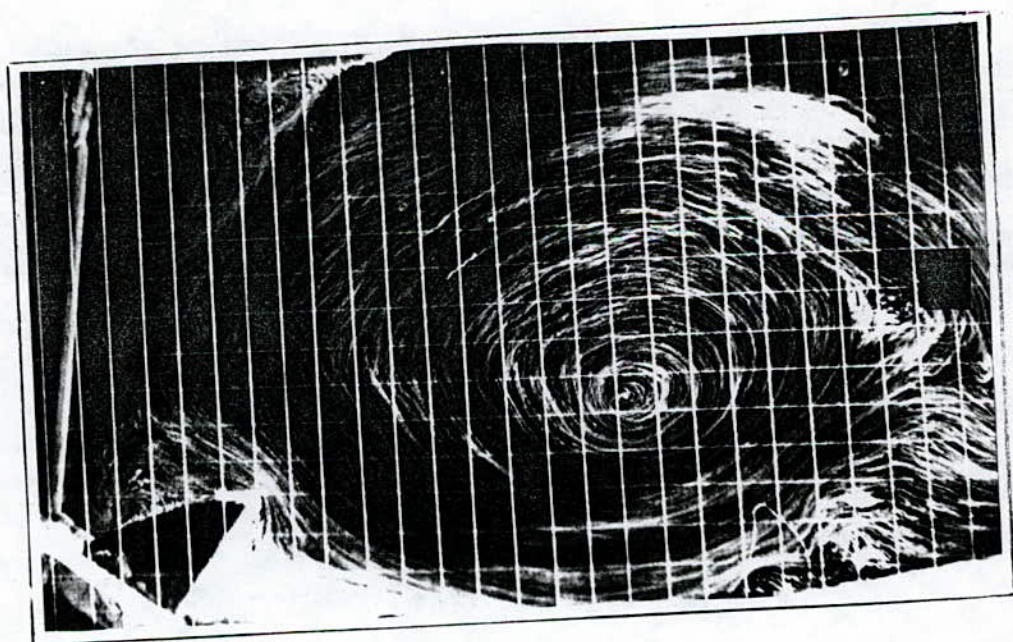
c- Vannes 1 et 6 ouvertes. Débit $Q_m=6.32$ l/s. Temps= 80 s



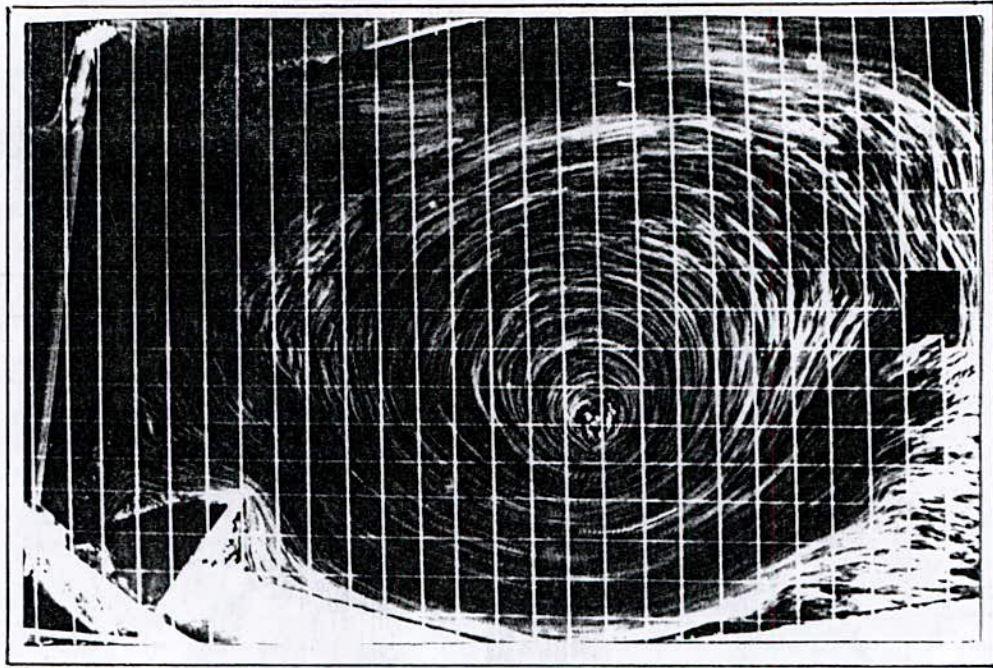
d- Vannes 1 et 6 ouvertes. Débit $Q_m=6.32$ l/s. Temps=90



e- Vannes 1 et 6 ouvertes. Débit $Q_m=20$ l/s. Temps=80 s



f- Vannes 1 et 6 ouvertes. Débit $Q_m=20$ l/s. Temps=90 s



g-Vanne 6 ouverte. Débit $Q_m=20$ l/s. Temps=120 s

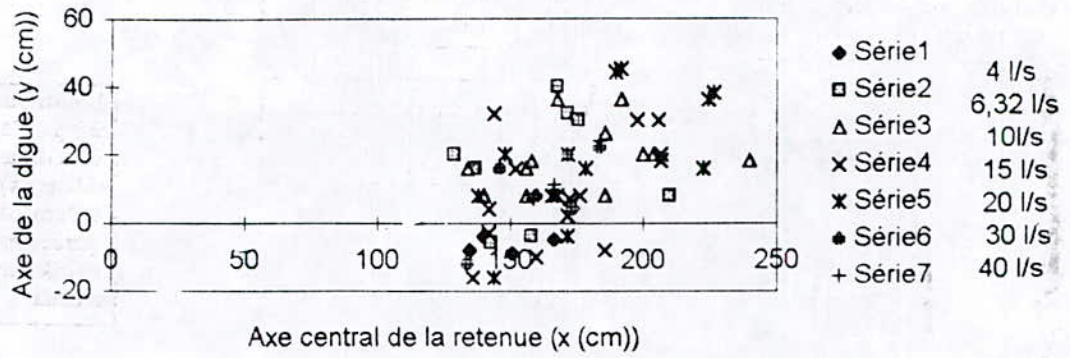


Fig.101 -Répartition des sédiments dans la retenue du barrage de BENI AMRANE
(Modèle réduit -Vannes ouvertes)

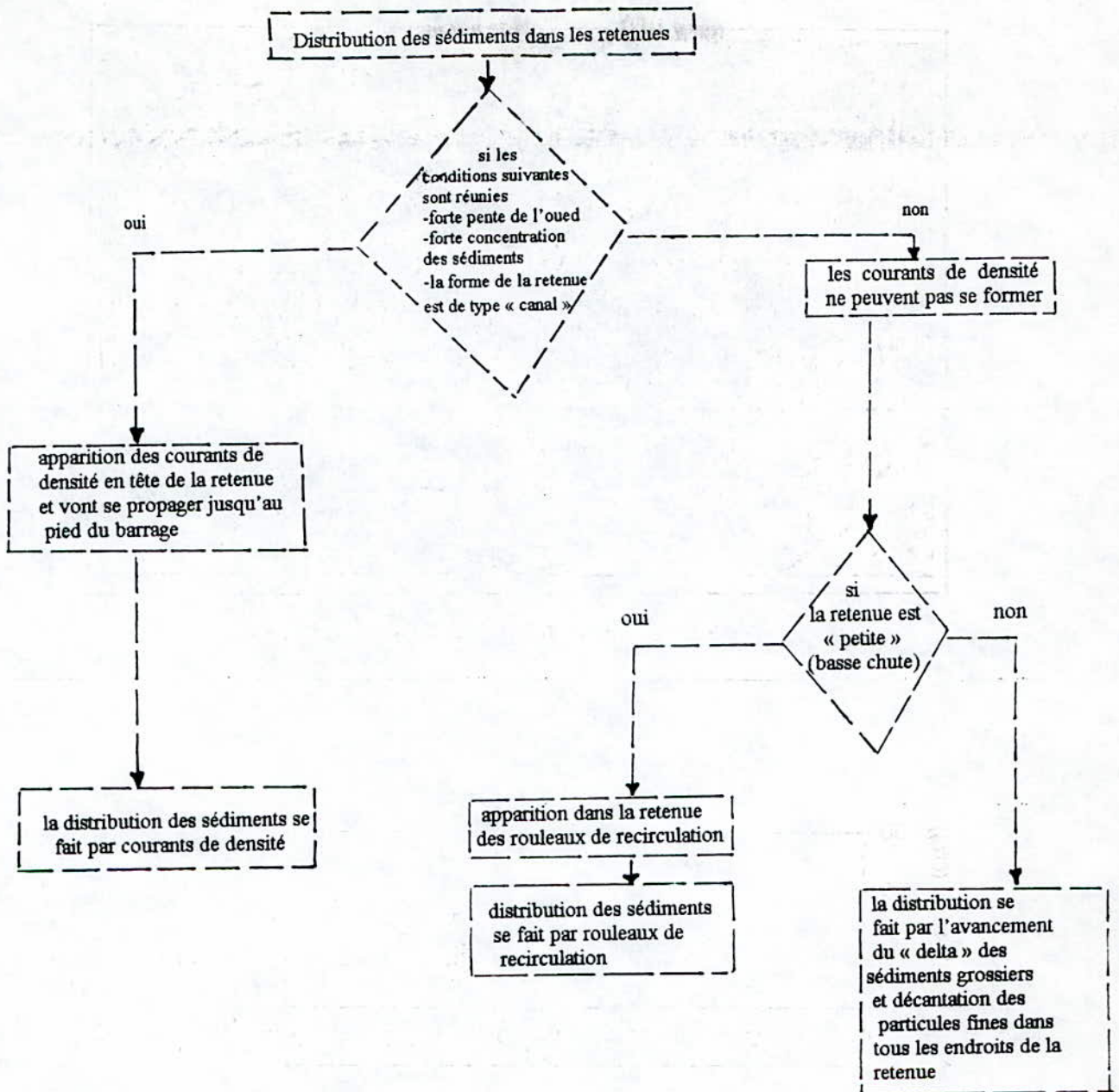


Fig. 102- Organigramme de distribution des sédiments dans les retenues

Troisième partie:

**La « technique du soutirage »: un moyen de lutte contre
l'envasement**

Introduction

Longtemps, les pertuis de vidange ont été utilisés pour réduire l'envasement des retenues de barrages. Trois méthodes principales ont été pratiquées:

-Evacuation partielle des sédiments par dégravement à réserve vide (fig. 103 a). Cette technique est basée sur la vidange de la retenue provoquant l'érosion des sédiments. Elle se pratique de préférence à la fin de l'été, et les pertuis de vidange sont laissés ouverts. A la première crue, une partie de la vase sera érodée et évacuée.

-Evacuation partielle des sédiments par la vanne de fond à réserve pleine (fig. 103 b). Elle est basée uniquement sur les manoeuvres de la vanne de fond et se fait de préférence pendant une période d'apport.

-Evacuation partielle des sédiments par utilisation des courants de densité (fig. 103 c), cette méthode qui fait l'objet de la présente étude est basée sur l'évacuation, par les pertuis de vidange, des sédiments drainés par les courants de densité [127].

La première, qui est la plus ancienne, n'est utilisée que dans les réserves de faible capacité par rapport à l'apport annuel. Elle ne peut évidemment être envisagée pour les réserves de régularisation inter-annuelle, sauf lorsque le «vieillissement» a atteint un degré tel que la réserve de sécurité ait disparu et que la réserve de régularisation annuelle soit elle-même fortement entamée. Cette méthode est en fait basée sur l'abaissement du plan d'eau provoquant l'érosion des sédiments dans la retenue.

La deuxième méthode, qui consiste à opérer des chasses violentes à partir de la vidange de fond n'a pour résultat tangible que de créer un chenal profond et étroit. La quantité de sédiments enlevée ne représente qu'un faible pourcentage par rapport au total accumulé. Selon SCHEURLEIN H. (1992)[75]: «L'efficacité de la chasse dépend en grande partie du niveau d'eau au moment de l'opération. Pour ne pas réduire le niveau d'eau, cette méthode n'est efficace que lorsqu'elle se limite à une zone proche de la vanne. Une fois la vanne ouverte, après un court délai, une dépression en entonnoir se forme autour de la sortie, aussitôt que les pentes du cratère atteignent l'angle de dépôt du sédiment, l'extraction des sédiments cesse. La chasse peut être efficace, néanmoins lorsqu'elle se pratique parallèlement à la réduction du niveau d'eau, l'efficacité est en relation inverse avec le niveau d'eau. Au moyen d'un retranchement continu des dépôts sédimentaires, on arrive à éroder un canal qui peut même atteindre le lit fluvial, pourvu que les conditions favorables qui l'imposent soient réunies c'est à dire: abaissement complet du niveau d'eau, quantité suffisante d'eau de chasse et une durée adéquate de l'opération».

Par contre, la troisième méthode d'évacuation des particules solides qui par courants de densité tendent à s'accumuler au droit des barrages, peut contribuer à augmenter d'une manière très sensible la durée de vie d'un réservoir. Pourtant, ce moyen a été mal pratiqué dans l'ensemble des barrages Algériens, sauf dans celui d'IGHIL EMDA qui a enregistré des résultats très encourageants. La méconnaissance du phénomène des courants de densité et du comportement des vases dans les réservoirs fut la principale cause de cet échec. La résultante a été une augmentation rapide des sédiments dans les réservoirs.

Cette méthode que nous avons appelé « technique de soutirage » devrait être une règle dans les pays arides et semi arides. Elle peut être améliorée et pratiquée sur l'ensemble des barrages Algériens avec un rendement de soutirage élevé, ainsi que notre étude va tenter de l'expliciter[127].

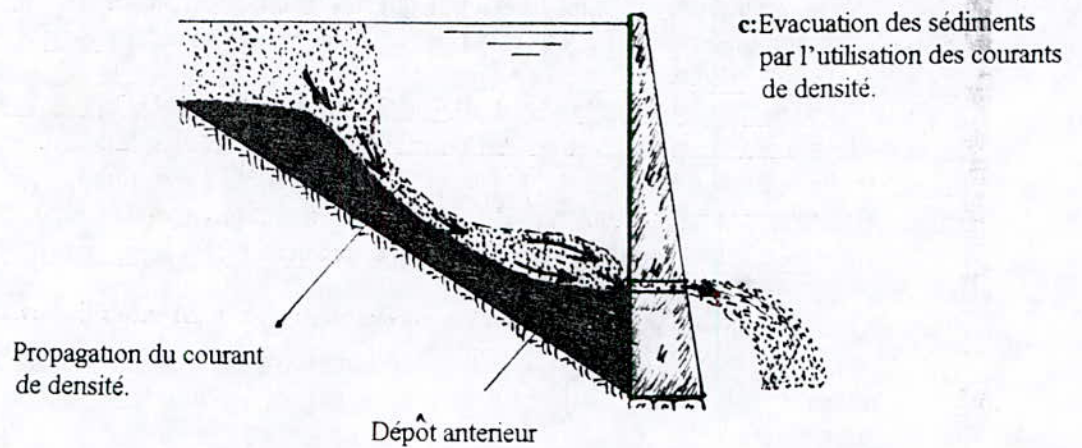
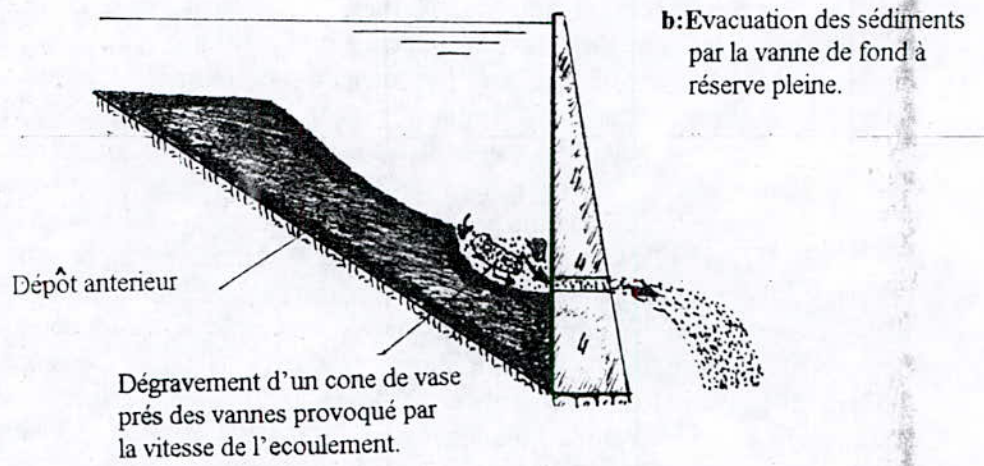
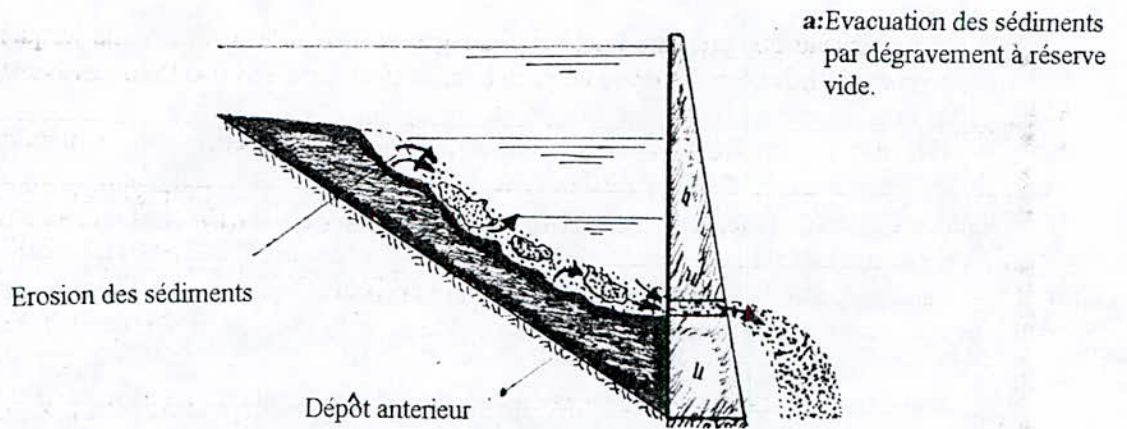


Fig.103-Méthodes d'évacuation des sédiments par les pertuis de vidange d'un barrage.

V.1. Quelques exemples d'utilisation des pertuis de vidange comme moyen de lutte contre l'envasement

Le tableau 20 présente quelques barrages à travers le monde dans lesquels les pertuis de vidange sont utilisés comme moyen de préserver les réservoirs des risques d'envasement.

Barrages	Pays	Pertuis de vidange	Méthode utilisée	Résultats	Réf.
NABEUR	Tunisie	-02 vannes (Neypric) -01 vanne Bafour	Evacuation des sédiments par l'utilisation des courants de densité.	Une quantité de $90,7 \cdot 10^6$ de tonnes de sédiments a été évacuée durant la période 1954-1980.	[8]
SERRE PONCON	France	Vanne de fond	Evacuation par la vidange de fond à réserve pleine.	Réduction de la hauteur de la vase dans la retenue de 5 à 15 cm au lieu des 30 cm prévus au bout de 20 ans.	[29]
GIRBA	Soudan	Vanne de fond	Evacuation par la vidange de fond à réserve pleine.	Une quantité de $85,10^7$ de tonnes a été évacuée entre 1971 et 1978.	[20]
HEISONGLIN	Chine	Vanne de fond	Evacuation par la vidange de fond à réserve pleine.	Diminution de la vitesse de sédimentation jusqu'à la valeur de $0,013 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$.	[15]
NAODEHAI	Chine	Deux rangées de vannes.	Evacuation par la vidange de fond à réserve pleine.	Récupération d'une partie importante de la capacité de la retenue.	[7] [15]
FOUM EL GHERZA	Algérie	Vanne de fond	Evacuation des sédiments par l'utilisation des courants de densité	Une quantité de $0,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de vase a été évacuée durant la période 1989-1992.	-
BENI AMRANE	Algérie	06 vannes de fond	Evacuation des sédiments par l'utilisation des courants de densité	Une quantité de $12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de vase a été évacuée durant la période 1988-1992.	-

Tableau 20- Quelques barrages dans lesquels les pertuis de vidange sont utilisés comme moyen de lutte contre l'envasement.

La pratique de ce moyen de lutte exige une perte d'eau dont la quantité dépend principalement du mode de manoeuvre des vannes. NING QIAN [128] [11] a dressé un tableau des valeurs de concentrations qui ont été enregistrées pendant certaines opérations de vidange (tableau 21).

Retenues	Pays	Mode opératoire	Eau / Sédiments évacués
06 retenues de chute moyenne	U.R.S.S.	Vidange de fond et abaissement du plan d'eau.	En général 30 à 40
GRIMSEL	Suisse	Vidange de fond et abaissement du plan d'eau.	20 à 50
GERBIDEU	Suisse	Vidange de fond et abaissement du plan d'eau.	42
GERBIDEU	Suisse	Sans abaissement du plan d'eau.	18
NABEUR	Tunisie	Dragage par aspiration avec de forte concentration.	9
Retenues des alpes	Autriche	Combinaison de chasse; abaissement du plan d'eau et dragage par aspiration.	17 à 20

Tableau 21- Rapport eau / sédiments évacués suivant différents modes de vidange.

Nous avons dressé le même tableau des valeurs de concentrations pour les différentes opérations de vidange dans certains barrages Algériens (tableau 22).

Retenues	Mode opératoire	Rapport Eau / Sédiments évacués
K'SOB	Vidange de fond	4 à 10
GHRIB	Vidange de fond	4 à 10
BENI AMRANE	Vannes de chasse	20 à 50
IGHIL EMDA	Vannettes de dévasement	10 à 21
ERRAGUENE	Vannettes de dévasement	9 à 21
OUED EL FODDA	Vidange de fond	3 à 8
	Vannettes de dévasement	4 à 10

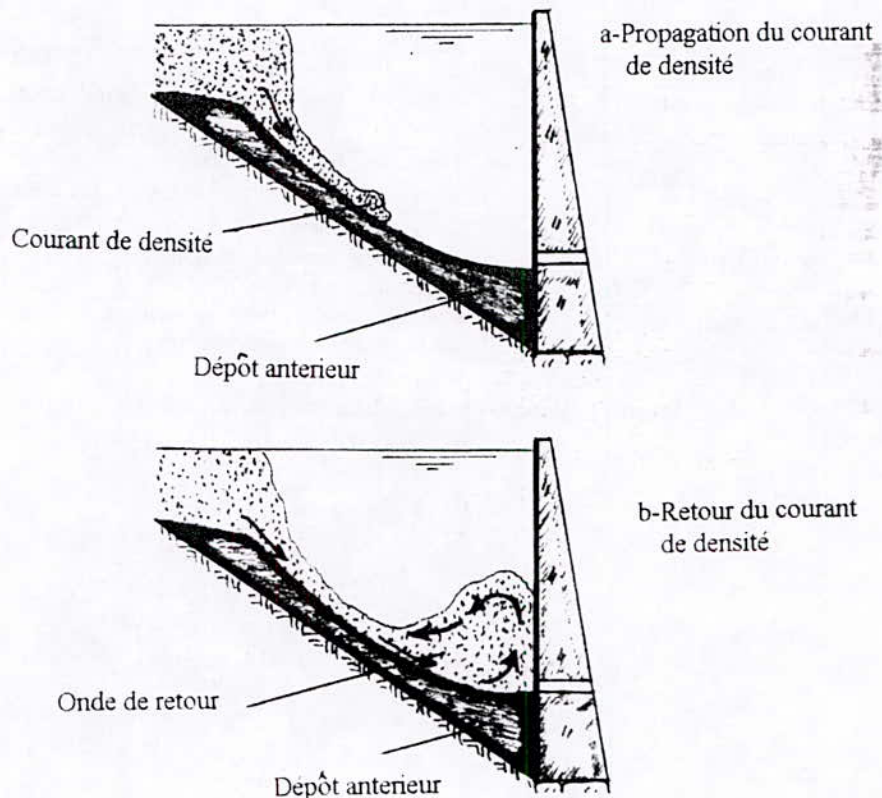
Tableau 22- Rapport eau / sédiments évacués en fonction de différents modes de vidange (Algérie).

V.2. Mécanisme des courants de densité près des pertuis de vidange

Lorsqu'un flot relativement boueux arrive dans une retenue qui présente une forme géométrique de type « canal » et une forte pente de fond, il rencontre les eaux calmes du lac et peut se mélanger partiellement avec elles. Si le mélange est plus dense que l'eau de la retenue, il s'enfonce et semble plonger sous la surface de l'eau jusqu'à ce qu'il atteigne le fond du lac. Les particules grossières tendent en permanence à se déposer, alors que les plus fines peuvent être entraînées par un courant de densité (fig. 104 a) jusqu'au pied du barrage.

En l'absence de soutirage, le courant de densité butte contre le barrage, et tend à s'élever avant de revenir en sens inverse (fig. 104 b). Par la suite, il s'étale pour former une nappe d'eau boueuse « tranquille » dans laquelle les particules fines se décantent lentement en quelques jours ou quelques semaines (fig. 104 c).

Si les vannes de fond sont ouvertes au moment de l'arrivée du courant de densité, une quantité importante de sédiments sera soutirée (fig. 104 d).



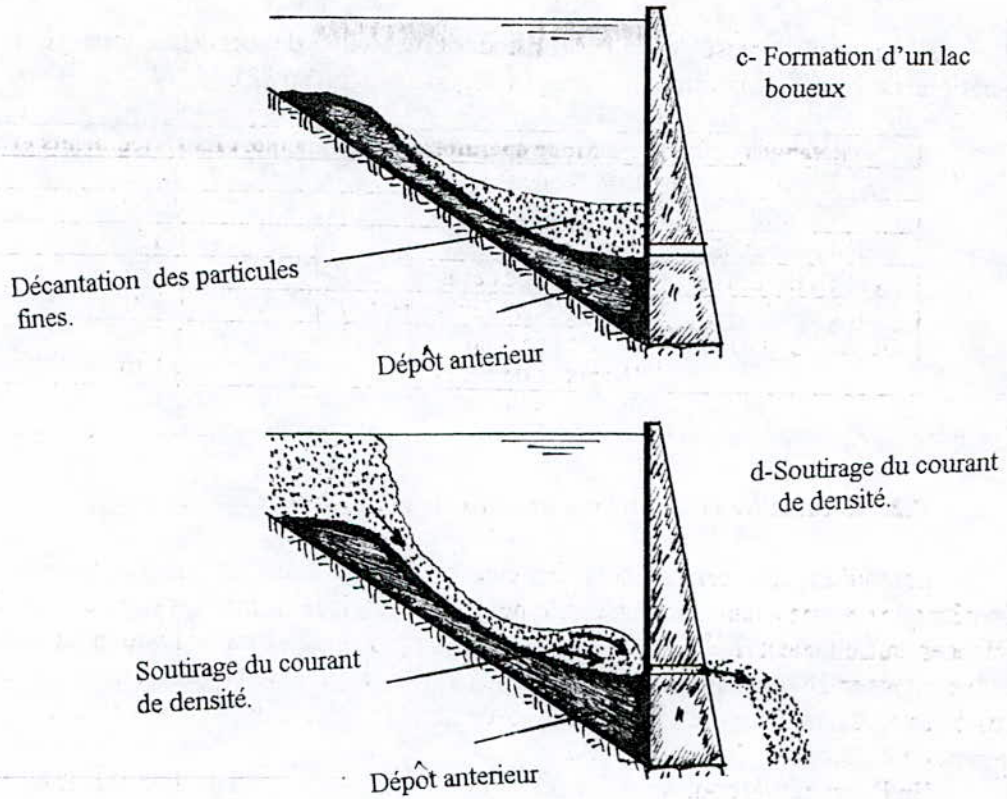


Fig.104-Mécanisme des courants de densité près des pertuis de vidange.

V.3. Définition de la technique de soutirage[127]

Nous définissons la « technique de soutirage », comme étant une méthode pratique qui consiste à évacuer les sédiments drainés par les courants de densité sur le fond de la retenue en utilisant des pertuis de vidange (vannettes de dévasement ou vanne de fond) du barrage (fig. 105).

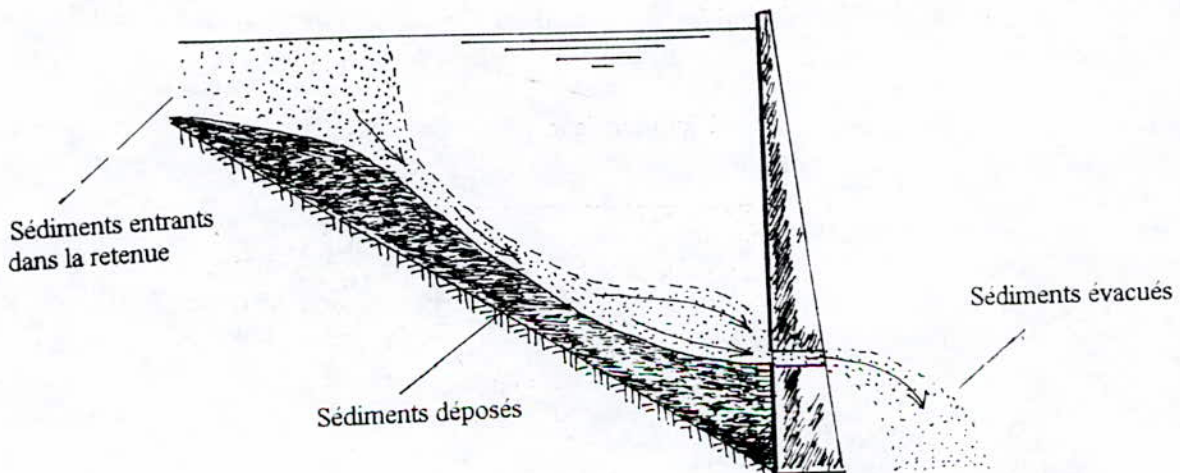


Fig.105-Evacuation des sédiments par la technique du soutirage

V.4. Importance de la pratique de cette technique (fig. 106)

Dans les pays arides et semi arides, comme l'Algérie par exemple, la technique du soutirage revêt une grande importance pratique et devrait être une nécessité. En effet, si une opération de soutirage n'est pas effectuée au bon moment pour une raison quelconque, on perd alors tout simplement une capacité de retenue égale au volume qu'on aurait dû évacuer, avec par ailleurs des répercussions ultérieures: la vase, en se déposant près de l'ouvrage, évolue dans le temps et les vannes finiront par se bloquer comme ce fut le cas de la vanne de fond du barrage de OUED EL FODDA, obturée en 1948, et les vannettes de dévasement du barrage des ZARDEZAS bloquées durant les années quatre vingt, ou la vanne de fond du barrage de FOUM EL GHERZA obturée en 1982.

Il importe donc de ne négliger aucune occasion qui consiste à soutirer la vase chaque fois que cela est possible.

V.5. Organes de soutirage (pertuis de vidange)

Dans certains barrages, la pratique de la technique du soutirage se fait par un dispositif composé d'un ensemble de vannettes de faible diamètre afin d'évacuer le maximum de sédiments drainés par les courants de densité, par contre dans d'autre elle se fait tout simplement par la vanne de fond du barrage. Le tableau 23 présente, à titre d'exemple, les organes de soutirage de quelques barrages.

Barrages	Pays	Organes de soutirage
IGHIL EMDA	Algérie	08 vannettes de dévasement (diamètre = 40 cm) 03 vannettes de dégravement
ERRAGUENE	Algérie	04 vannettes de dévasement (diamètre =40 cm) 02 vannettes de dégravement
OUED EL FODDA (avant 1948)	Algérie	Vanne de fond
OUED EL FODDA (après 1961)	Algérie	06 vannettes de dévasement
FOUM EL GHERZA	Algérie	Vanne de fond
GHRIB	Algérie	Vanne de fond
NABEUR	Tunisie	03 vannes de dévasement
SERRE PONCON	France	Vanne de fond
SAUTET	France	Vanne de fond

Tableau 23- Organes de soutirage de quelques barrages.

V.6. Evolution historique de la méthode d'évacuation des sédiments par les pertuis de vidange

L'évolution de la technique du soutirage pratiquée dans les barrages Algériens peut être répartie en cinq périodes principales (1830-1930, 1930-1945, 1945-1953, 1953-1956, 1956-1996)

-Période 1830-1930:

Durant cette étape, plus de huit barrages dont la capacité totale dépasse 75.10^6 m^3 étaient en exploitation (tableau 24).

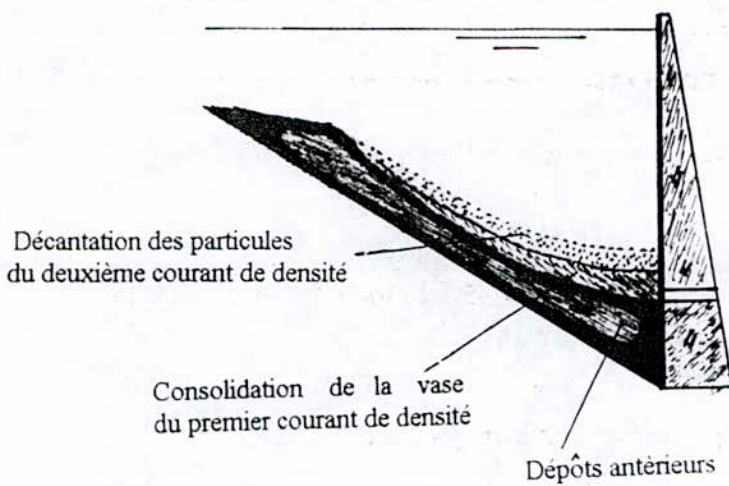
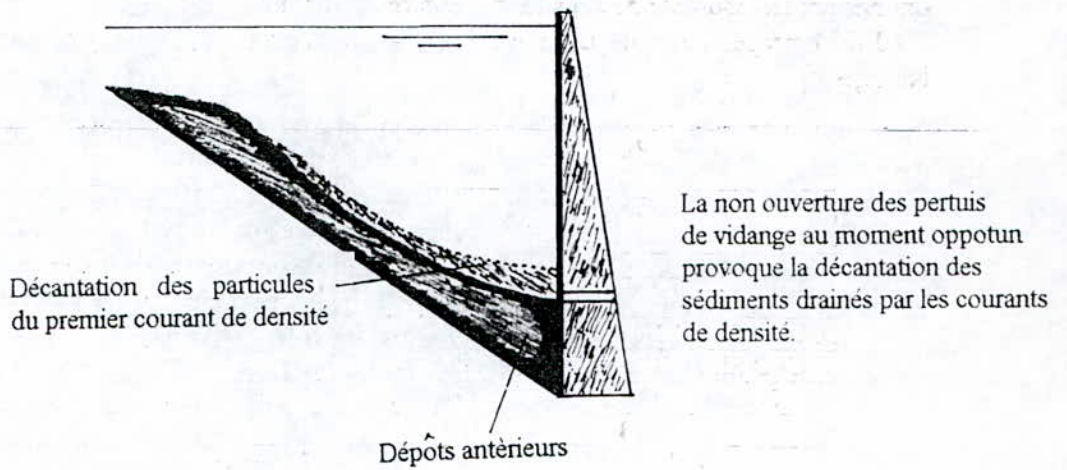
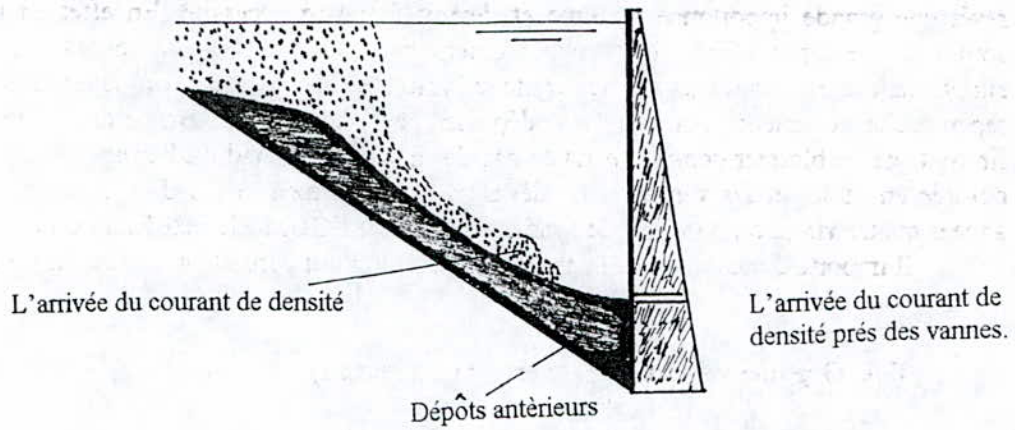


Fig.106-Importance de la pratique de la technique du soutirage

Barrages	Capacité d'origine (10 ⁶ m ³)	Année de la mise en exploitation
MAGOUM	1,00	1887
TLELAT	0,73	1860
DJIDIOUIA	0,70	1877
SIG	-	1846
MEURAD	0,83	1859 [129]
SAINT LUCIEN	-	1871
FERGOUG	30	1871
CHEURFAS I	14	1882
HAMIZ	14	1879

Tableau 24- Capacités des premiers barrages Algériens (période 1830-1930).

Or, ce volume a été menacé de réduction par la sédimentation accélérée des retenues. Les services d'exploitation se sont retrouvés donc devant un phénomène tout à fait nouveau, d'autant plus les moyens de lutte étaient insuffisants et inefficaces.

Quelques procédés de lutte ont été mis en application:

- la surélévation des barrages, c'est le cas des barrages de SIG et HAMIZ surélevés respectivement en 1858 et 1889.

- le reboisement et la restauration des bassins versants: ce n'est qu'en 1885 que les services forestiers ont commencé le reboisement et l'aménagement des versants, après avoir pris connaissance de l'état inquiétant de dénudation des bassins et les conséquences qui peuvent en découler,

- l'utilisation de la vanne de vidange d'un barrage comme un moyen de réduire l'envasement.

Cette méthode a été pratiquée sur l'ensemble des barrages. Les manoeuvres de la vanne ont été effectuées le plus souvent avec des densités très élevées atteignant généralement la valeur **1,350**. La technique s'est avérée inefficace, puisque c'est uniquement une faible quantité de vase, située près des vannes, qui s'est évacuée sous l'effet de la vitesse du soutirage. Cette inefficacité est due principalement à l'ouverture tardive de la vanne de vidange par rapport à l'arrivée de la crue, ce qui favorise la consolidation de la vase.

A cette époque, le phénomène des courants de densité était méconnu en Algérie. Les premiers résultats obtenus sur ce phénomène sont probablement ceux décrits par les auteurs Américains.

-Période 1930-1945

Pour remédier à l'accélération de l'envasement, qui a touché l'ensemble des barrages et qui a provoqué une diminution rapide de la réserve d'eau et l'abondance de certains ouvrages, comme celui du SIG au début des années trente, d'autres barrages ont été mis en exploitation, leurs capacités sont donnés dans le tableau 25.

Barrages	Capacités d'origine (10 ⁶ m ³)	Année de la mise en exploitation
OUED EL FODDA	228	1932
FOUM EL GHERZA	2,5	1936
BAKHADA	37	1936
GHRIB	280	1939
K'SOB	12	1939
BOUHANIFLA	75	1940
BENI BAHELS	41	1942

Tableau 25- Capacités des barrages Algériens (période 1930-1945).

Durant cette période, les Ingénieurs et les services d'exploitation commençaient à s'intéresser au phénomène de l'« underflow » dans les retenues, et le soutirage des sédiments drainés par ce dernier en s'inspirant des résultats trouvés au niveau des barrages Américains comme celui de LAKE MEAD par exemple.

Les premières tentatives d'évacuation des sédiments par la vanne de fond en utilisant les courants d'eau boueuse ont été effectuées au barrage de l'OUED FODDA et de GHRIB sous la direction de **DUQUENNOIS H.** en 1937 et en 1939. Les densités des vases évacuées étaient trop élevées dépassant souvent la valeur **1,300**, ce qui a conduit à la récupération d'une faible capacité de la retenue. Les soutirages ont été mal pratiqués, puisque les manoeuvres de la vanne s'effectuent après que la consolidation des sédiments (drainés par les courants de densité dans la partie basse de la retenue)ait atteint un degré très élevé.

- Période 1945-1953

L'échec de la pratique de cette méthode, qui s'est traduit par l'obturation définitive de la vanne de fond du barrage de l'OUED FODDA en 1948, n'a pas découragé les chercheurs et Ingénieurs et notamment **DUQUENNOIS H.** qui au contraire ont pris connaissance de la complexité des courants de densité et les conséquences dramatiques qu'ils peuvent apporter au barrage. A cet effet, plusieurs recherches et expériences ont été entreprises au laboratoire Dauphinois d'hydraulique en France à la demande de l'électricité et gaz d'Algérie [88], dans le but de connaître les lois principales des courants de densité dans les retenues en vue d'évacuer par les vannes de fond le maximum de sédiments.

C'est ainsi que **DUQUENNOIS H.** a proposé un nouveau système d'évacuation constitué d'un ensemble de vannettes de faibles diamètre ($\phi < 40 \text{ cm}$) permettant ainsi d'évacuer l'« underflow » à son arrivée avec un gain d'eau claire. Le premier barrage d'essai étant sans doute celui d'EL OULDJA de type voûte de 10 m de hauteur, réalisé sur l'oued Djendjen supérieur (aujourd'hui il est complètement inondé par la retenue du barrage d'ERRAGUENE) qui fut mis en eau en décembre 1947. Il a été équipé d'un dispositif de soutirage composé de 3 vannettes superposées l'une au dessus de l'autre. Le suivi des dépôts successifs de la vase dans la retenue a été effectué régulièrement afin de connaître le type de matériaux drainés par les courants de densité. Plusieurs essais de soutirage ont été effectués durant les années 1948-1949. L'ouverture successive des vannettes est conditionnée par l'évolution de la densité de la couche turbide. Ces essais avaient pour objectif de maîtriser les manoeuvres des vannes afin d'évacuer le maximum de particules solides drainées par l'« underflow ». C'est ainsi, que les résultats obtenus ont enregistré que la proportion des sédiments soutirée est d'environ **25 %** des apports solides totaux au barrage d'étude, et atteindra **40 %** au minimum pour le barrage projeté.

-Période 1953-1956:

Le barrage d'IGHIL EMDA a été mis en service dès Septembre 1953. Il est probablement parmi les premiers dans le monde à être équipé d'un dispositif de soutirage approprié conçu par **DUQUENNOIS H.** [91], constitué de 8 vannettes de faible diamètre et de 3 vannes de dégrèvement. Ce dernier a poursuivi ces recherches jusqu'en 1956 sur le comportement des courants de densité dans la retenue, et la maîtrise du soutirage par ce nouveau système. Le résultat obtenu a été très encourageant, puisque **50 %** des apports solides totaux ont été évacués durant l'année 1955-1956.

-Période 1956-1996

Pour réduire la vitesse de sédimentation dans la retenue du barrage de OUED EL FODDA, qui a enregistré une forte évolution des dépôts solides depuis l'obturation de la vanne de fond en 1948, ce dernier a été équipé en 1961 d'un système de soutirage constitué de six vannettes de dévasement de faible diamètre. Le même dispositif a été installé dans le barrage d'ERRAGUENE en 1962, il renferme 4 vannettes de dévasement et deux vannes de dégravement.

Bien qu'elle soit pratiquée sur l'ensemble des barrages, la technique du soutirage n'a pas enregistré des résultats très favorables, à l'exception de ceux obtenus au niveau du barrage d'IGHIL EMDA. La poursuite de la pratique des mauvaises manoeuvres des vannes due surtout à la méconnaissance du comportement des vases dans la retenue, et le non équipement des barrages par un système approprié de soutirage a conduit à l'accélération du comblement des barrages.

V.7. Constat de la pratique de la technique du soutirage dans les barrages Algériens

V.7.1. Quantité de suspension évacuée

Il est à rappeler qu'en Algérie, l'année hydrologique peut être répartie en deux saisons: sèche et humide.

La saison sèche est caractérisée par de faibles précipitations, les oueds sont à sec, les averses peuvent survenir, mais elles ne donneront un écoulement appréciable dans l'oued que pendant trois ou quatre jours, la saison sèche se tend du mois de mai jusqu'au mois d'octobre. Quant à la saison humide qui s'étale du mois de novembre jusqu'au mois d'avril, il y'a généralement un écoulement dans l'oued et on assiste des fois à de fortes crues transportant des quantités importantes de particules solides, dépassant souvent la valeur **100 g/l** donnant ainsi « naissance » aux courants de densité qui se propagent le long de la retenue. Donc, en principe c'est durant la saison humide que doit se pratiquer la « technique du soutirage ».

Nous avons examiné dans cette étude, les variations dans le temps des quantités de suspension évacuées par la pratique de la technique de soutirage dans les barrages: OUED EL FODDA, GHRIB, FERGOUG, FOU M EL GHERZA, K'SOB, ZARDEZAS, HAMIZ, SARNO, MEURAD, MEFROUCH, ERRAGUENE et IGHIL EMDA.

a) Barrage de OUED EL FODDA

Les figures 107 et 108 représentant les apports liquides mensuels au barrage, ainsi que les quantités de suspension évacuées mensuellement durant la période 1980-1992, montrent clairement que la technique du soutirage est pratiquée pendant la saison sèche (fig. 109 et 110) et plus particulièrement les mois de juillet et août (fig. 108), durant lesquels un faible apport d'eau a été enregistré. Par contre, pendant la saison humide et plus particulièrement le mois de novembre durant lequel l'apport liquide a été important, au contraire le soutirage a été trop faible, ce qui a entraîné une nette augmentation du volume de vase dans la cuvette (fig. 111 (a et b)).

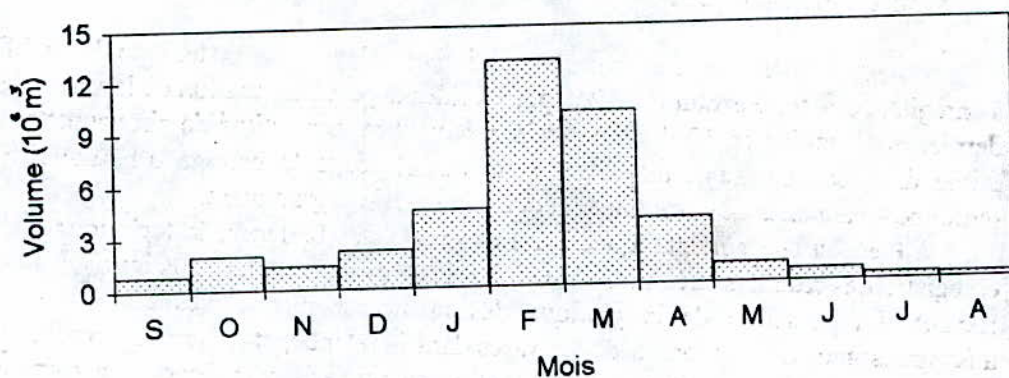


Fig. 107- Barrage de OUED EL FODDA. Apports liquides mensuels (période 1980-1992)

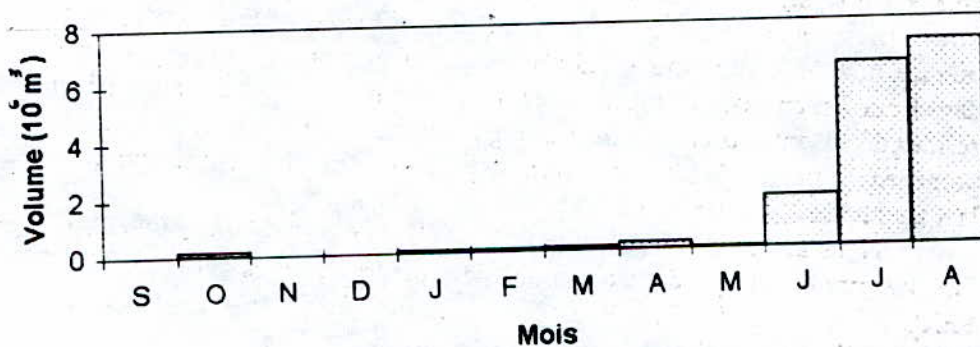


Fig. 108- Barrage de OUED EL FODDA. Quantité mensuelle de suspension soutirée (période 1980-1992)

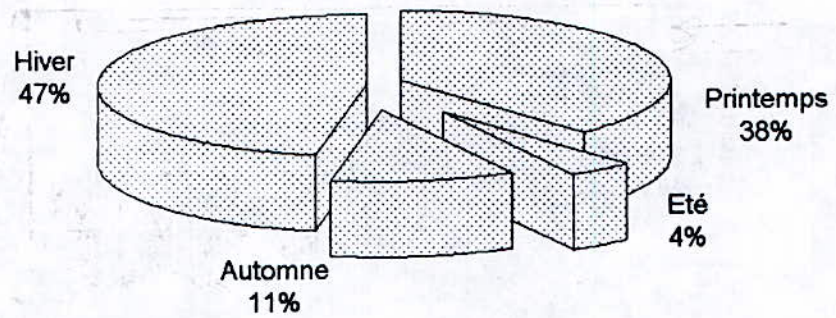


Fig. 109- Barrage de OUED EL FODD. Apports liquides saisonniers (période 1980-1992)

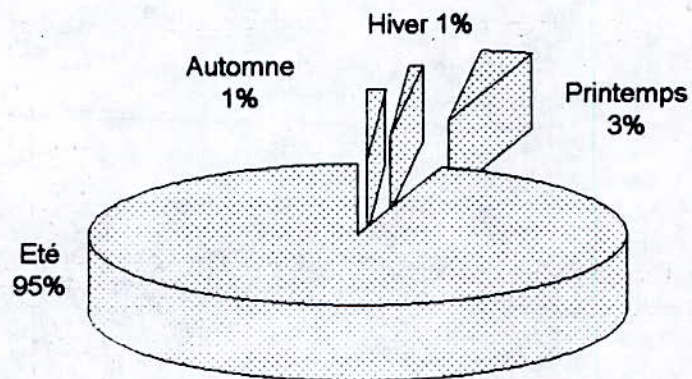
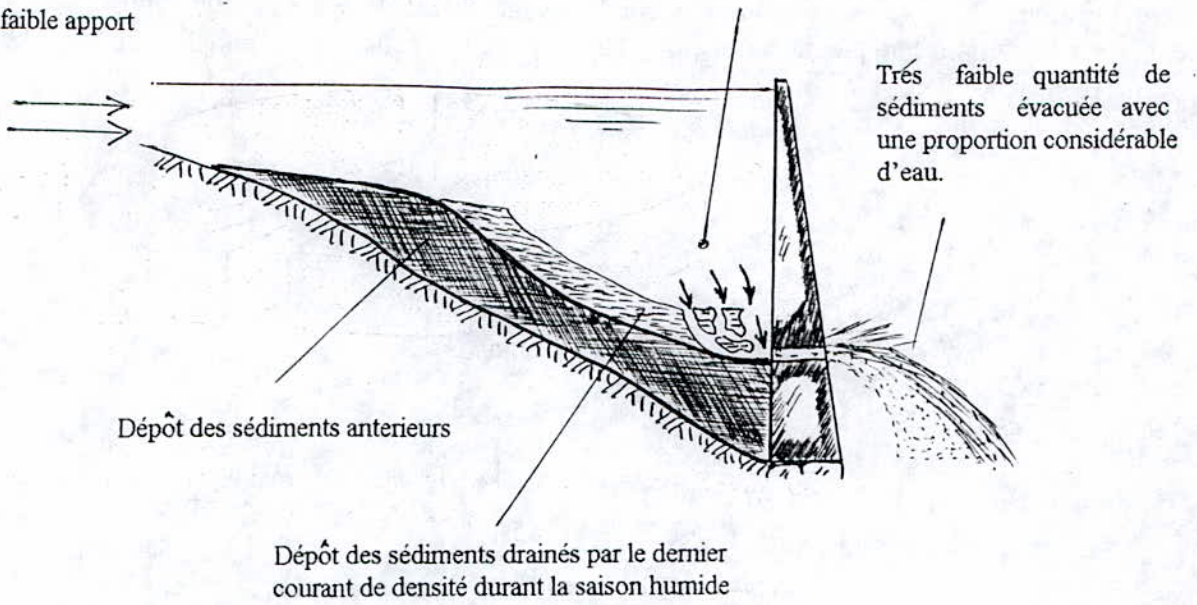


Fig. 110- Barrage de OUED EL FODDA. Quantité saisonnière de suspension soutirée

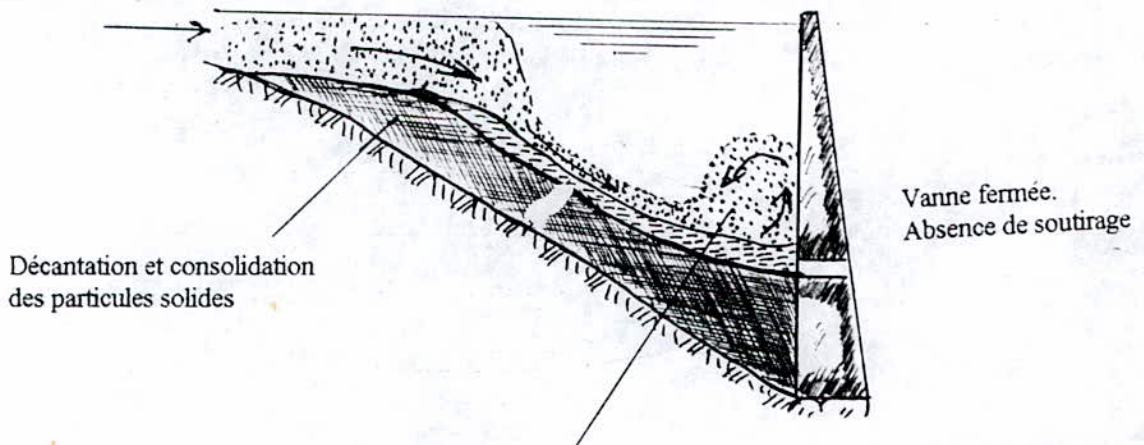
Erosion de la vase suite à la vitesse de l'écoulement provoquée par l'ouverture de la vanne

Tres faible apport



a) Soutirage du mois d'aout

Apport de $32 \cdot 10^6 \text{ m}^3$



b) soutirage du mois de novembre

E n trouvant la vanne fermée, le courant de densité butte contre l'ouvrage et revient en sens inverse

Fig. 111- Operations des soutirages au barrage de OUED EL FODDA

Nous avons représenté par les figures 112 et 113 les apports liquides au barrage, ainsi que les quantités de suspensions soutirées annuellement durant la période 1980-1992. Il apparaît clairement que la technique du soutirage a été mal pratiquée malgré un apport liquide considérable dans la retenue.

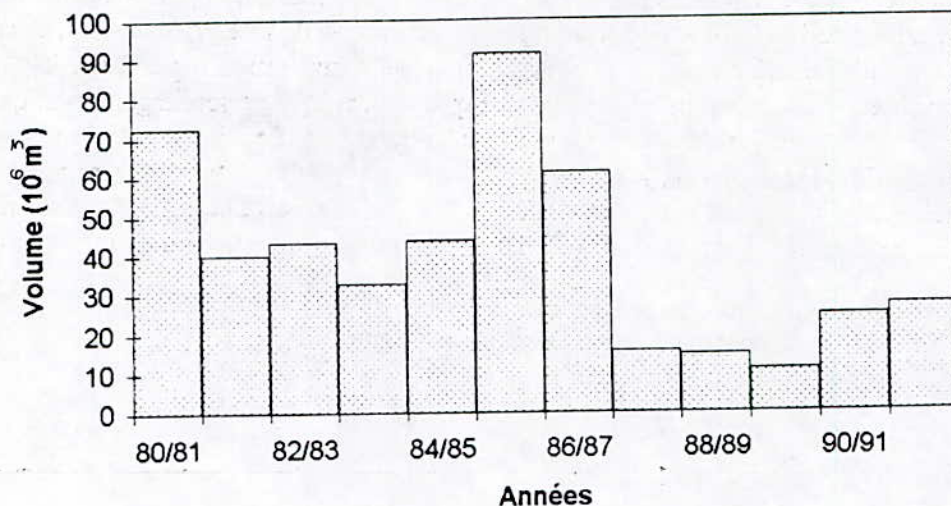


Fig. 112 -Barrage de OUED EL FODDA.
Apports liquides annuels (période 1980-1992)

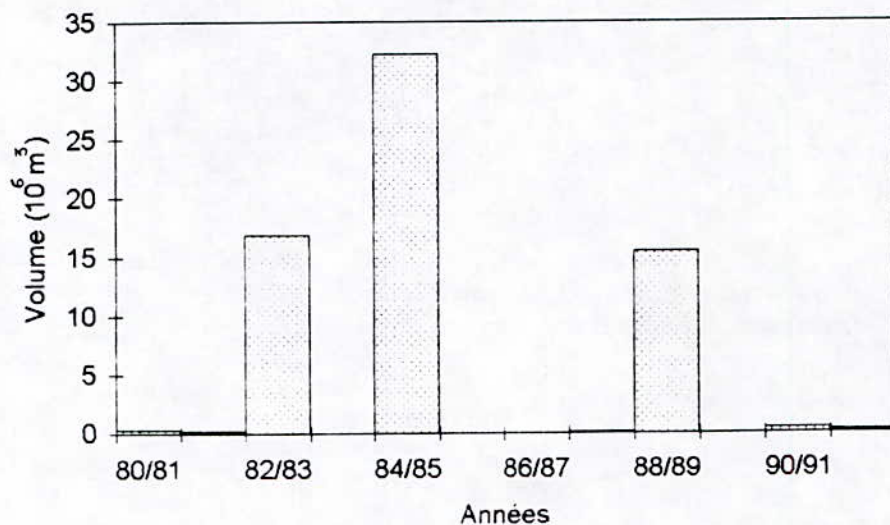


Fig. 113 -Barrage de OUED EL FODDA.
Quantité annuelle de suspension soutirée (période 1980-1992)

En analysant les opérations de soutirage durant l'année 1984-1985 (fig. 113), nous remarquons que le débit de soutirage est de l'ordre de $32,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit 77 % de l'apport annuel, ce qui explique bien la perte considérable d'eau claire et évidemment une faible quantité de vase dégagée (uniquement la vase située près des vannes), on note qu'au cours de l'année 1983-1984 aucun soutirage n'a été effectué, ce qui a avantage la consolidation de la vase (fig. 114 a). Aucun soutirage n'a eu lieu durant la période 1985-1988, malgré l'enregistrement d'un apport liquide considérable évalué à $194 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, ce qui explique que toute la quantité des sédiments drainés par les courants de densité durant cette période sont restés piégés dans la retenue (fig. 114 b). Les manoeuvres des vannettes pendant l'année 1988-1989 ne peuvent que libérer un cône de vase près des vannes vu l'état avancé de la consolidation. Evidemment la proportion d'eau claire évacuée par les $15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de mixture est importante. Finalement, nous pouvons dire que la technique de soutirage se pratique de la même façon qu'avant 1948, elle n'a aucune relation avec les arrivées des courants de densité.

L'ouverture des vannettes s'effectue lorsque la vitesse de consolidation est avancée, ce qui a conduit à l'évacuation d'une faible quantité de sédiments et un important volume d'eau claire. A ce stade, le débit évacué dépend du degré de consolidation de la vase et non pas du nombre d'ouverture des vannettes.

Apport annuel de $42 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ durant 1984-1985

Dégagement d'un cône de vase suite à l'ouverture des vannettes

Dépôt des sédiments antérieur (avant 1983)

Vase déposée durant l'année 1983-1984 (Les vannettes ont été fermées)

Vase déposée au cours de l'année 1984-1985

Evacuation d'une quantité de suspension égale à $32.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

a) Période 1984-1985

Dernier courant de densité de l'année 1987-1988

Vannettes fermées durant la période 1985-1988

dépôts antérieurs

Dépôt des sédiments antérieurs (avant 1984-1985)

Vase déposée durant durant la période 1985-1988

b) Période 1985-1988

Fig. 114-Pratique de la technique du soutirage au barrage de OUED EL FODDA

b) Barrage de GHRIB

L'examen des figures 115 et 116 représentant les apports moyens et les quantités mensuelles de mixtures évacuées au niveau du barrage de GHRIB, nous a permis de constater que les soutirages n'ont pas suivi l'évolution des apports liquides.

Durant le mois de juin, juillet, août et septembre, aucun soutirage n'a été effectué malgré l'enregistrement d'un apport liquide évalué à 24.10^6 m^3 , ce qui a provoqué évidemment un dépôt de sédiments appréciable provenant des courants de densité de forte concentration dus à l'arrivée des crues des premières pluies d'automne (fig. 117).

La quantité de mixture évacuée le mois de février est huit fois plus que celle du mois de mars, malgré l'enregistrement d'un même apport liquide dans la retenue (apport de 13.10^6 m^3).

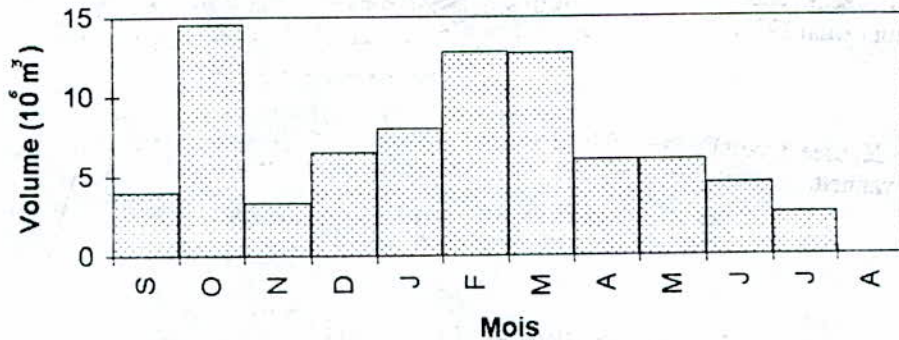


Fig. 115 -Barrage de GHRIB.
Apports liquides mensuels (période 1980-1992)

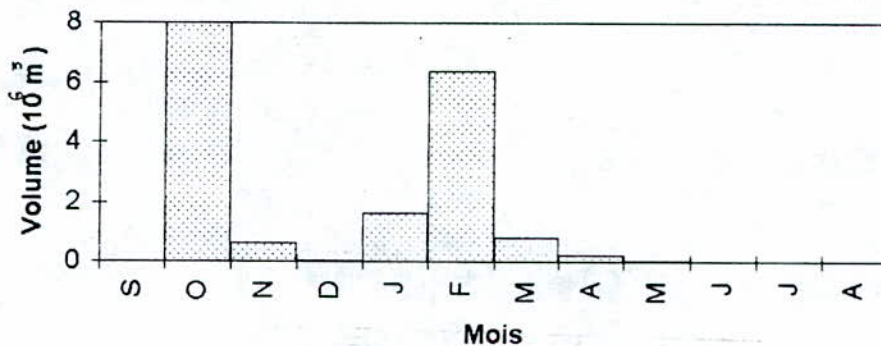


Fig. 116 -Barrage de GHRIB.
Quantité mensuelle de suspension soutirée (période 1980-1992)

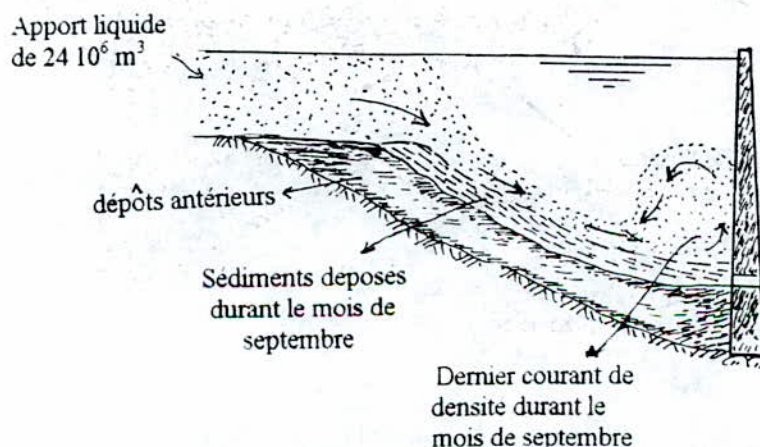


Fig.117- Patique de la technique du soutirage au niveau du barrage de GHRIB durant les mois de septembre, août juin et juillet

Les figures 118 et 119 représentant les apports annuels et les quantités de mixtures évacuées annuellement, montrent clairement que le soutirage durant la période 1980-1985 a été pratiquement nul, malgré le volume d'eau apporté par les crues évalué à plus de 300.10^6 m^3 . Contrairement à la période 1985-1987 durant laquelle la suspension évacuée est considérable (fig. 120).

Ce que nous pouvons retenir, c'est que la technique du soutirage a été mal pratiquée, mais à un degré moindre que celui de OUED EL FODDA. Les manoeuvres de la vanne ont été effectuées, soit avec une perte d'eau très élevée, soit avec une faible quantité c'est à dire la densité de la suspension est grande.

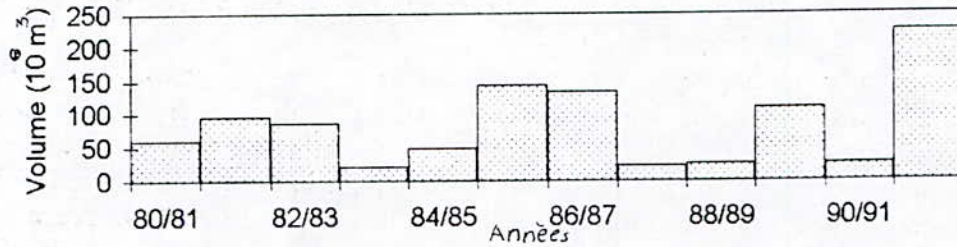


Fig. 118 -Barrage de GHRIB.
Apports liquides annuels (période 1980-1993)

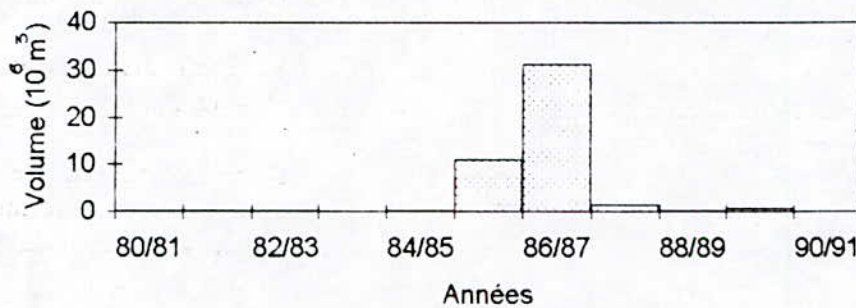


Fig. 119 -Barrage de GHRIB.
Quantité annuelle de suspension soutirée (période 1980-1991)

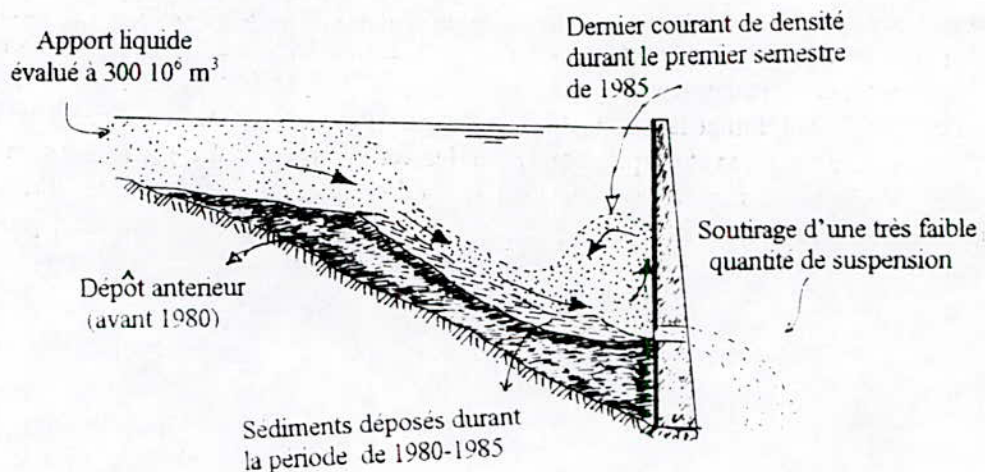


Fig.120- La pratique de la technique du soutirage au niveau du barrage de GHRIB durant la période 1980-1985

c) Barrage de FERGOUG

Nous considérons que l'accélération de l'envasement dans la retenue de FERGOUG, qui a atteint un taux de comblement de 90 % en 1985 n'est pas dûe uniquement au dépôt des sédiments provenant du bassin versant de l'oued El Hammam, mais est dûe surtout à la mauvaise pratique du soutirage dans le barrage de BOUHANIFIA, réalisé en 1940 à l'amont de celui de FERGOUG dans le but de provoquer des ondes de crues artificielles pour transporter les matériaux solides vers l'aval.

Pour répondre à cette hypothèse, nous avons effectué une étude sur les quantités de mixtures évacuées, et les apports d'eau au niveau du barrage de FERGOUG durant la période de 1973-1993. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 121, 122, 123 et 124. Il est intéressant de constater que les quantités importantes d'apports arrivant dans la retenue de FERGOUG durant les mois de juin, juillet, août et septembre (saison sèche) ne peuvent provenir que des lâchés effectués au niveau du barrage de BOUHANIFIA (fig. 125 et 126).

Cette mixture évacuée est en réalité très chargée en particules fines puisque le barrage de BOUHANIFIA joue le rôle d'un « tamis »: les particules grossières restent dans la cuvette, et les sédiments fins sont évacués dans l'oued El Hammam avec une concentration très élevée à la suite d'une mauvaise pratique de la technique du soutirage au niveau du barrage de BOUHANIFIA, puisque les manoeuvres des vannes se font une fois que la consolidation de la vase est avancée. c'est à dire au moment où les sédiments apportés par les courants de densité durant la saison humide se décantent et se consolident, soit en saison sèche.

A leur arrivée à l'entrée du réservoir de FERGOUG, les matériaux fins seront drainés sous forme d'un courant de densité jusqu'au pied du barrage, et les travaux de KORSO K. (1984) [58] ont confirmé que les courants de densité se forment dans la retenue de FERGOUG, et plus particulièrement dans la branche de l'oued El Hammam.

Durant la même période, soit de juin à septembre, pratiquement aucun soutirage n'a été effectué dans le barrage de FERGOUG, ce qui a favorisé la décantation et a accéléré la consolidation des sédiments provenant des lâchés de BOUHANIFIA (fig. 127).

Si nous examinons le soutirage du mois de Janvier, nous remarquons bien que la quantité soutirée au niveau du barrage de FERGOUG est environ 5 fois plus grande que l'apport liquide, ce qui a engendré uniquement le dégagement d'un cône de vase avec une perte d'eau considérable dans le barrage de FERGOUG et un dépôt accéléré dans la retenue de BOUHANIFIA (fig. 128).

Les apports liquides annuels et la suspension soutirée annuellement au niveau du barrage de FERGOUG sont représentés sur les figures 129 et 130. Ces apports ne proviennent que des lâchés du barrage de BOUHANIFIA (fig. 131).

Nous avons analysé la pratique de la technique du soutirage au barrage de FERGOUG durant 4 années successives (1981-1985). Il en ressort que pendant l'année 1981-1982, aucun soutirage n'a été effectué, ce qui a provoqué un dépôt important des sédiments dans la retenue (fig. 132 a). Le soutirage de l'année d'après (1982-1983) sera moins efficace puisqu'il y'aura uniquement le dégagement d'un cône de vase au pied du barrage (fig. 132 b). L'opération a été répétée au cours de l'année 1983-1984 durant laquelle, il n'y avait pratiquement pas de soutirage des sédiments drainés par les courants de densité (provoqués par les fortes crues artificielles provenant du barrages de BOUHANIFIA), qui sont restés piégés sur le fond de la retenue (fig. 132 c). Plus de $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de suspension ont été évacués durant l'année 1984-1985, ce qui a certainement provoqué une série d'érosion de la vase située à un rayon faible de la vanne (fig. 132 d).

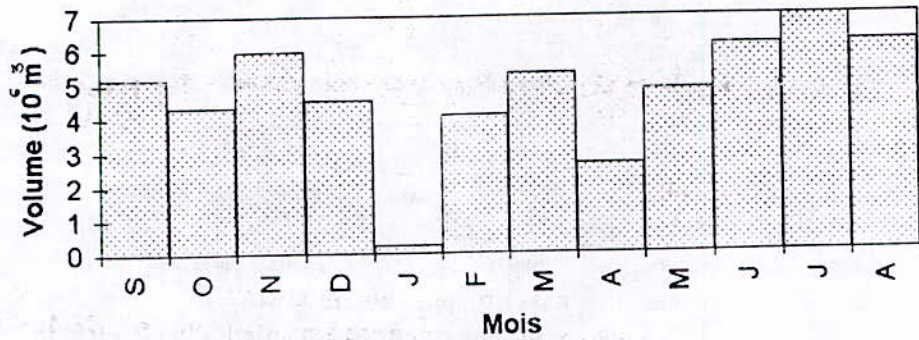


Fig. 121 -Barrage de FERGOUG.
Apports liquides mensuels (période 1978-1993)

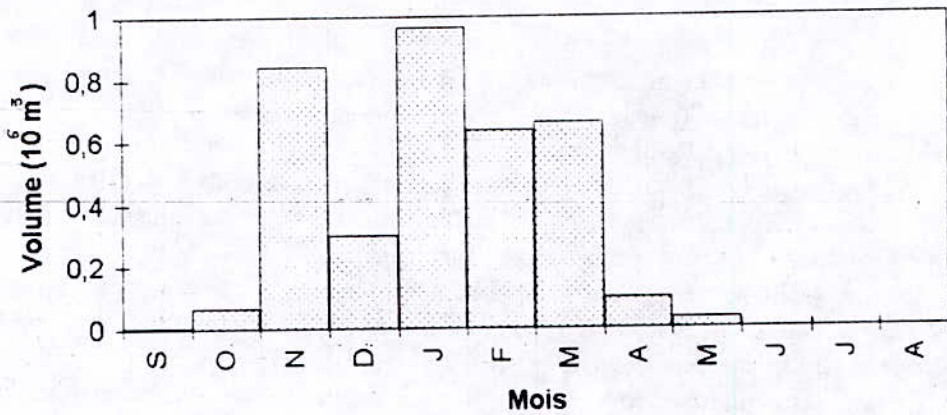


Fig 122 -Barrage de FERGOUG. Quantité mensuelle de suspension soustrée
(période 1978-1993)

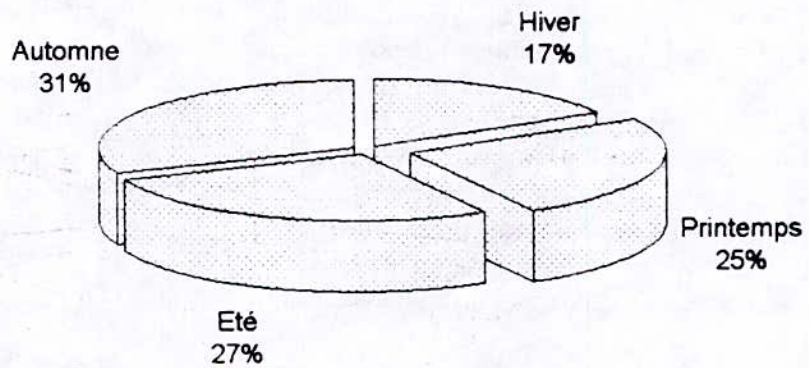


Fig.123-Barrage de FERGOUG.
Apports liquides saisonniers (période 1978-1993)

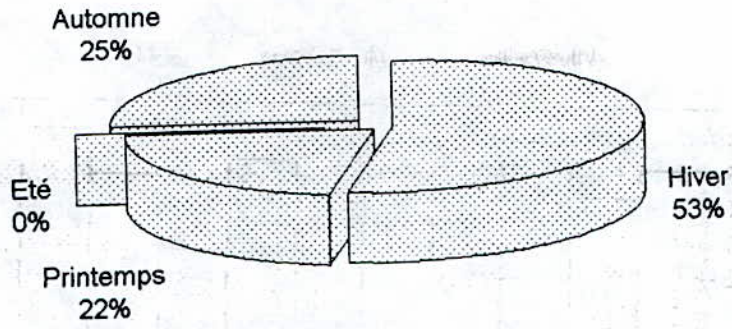


Fig.124-Barrage de FERGOUG.
Quantité de mixture saisonnière soutirée (période 1978-1993)

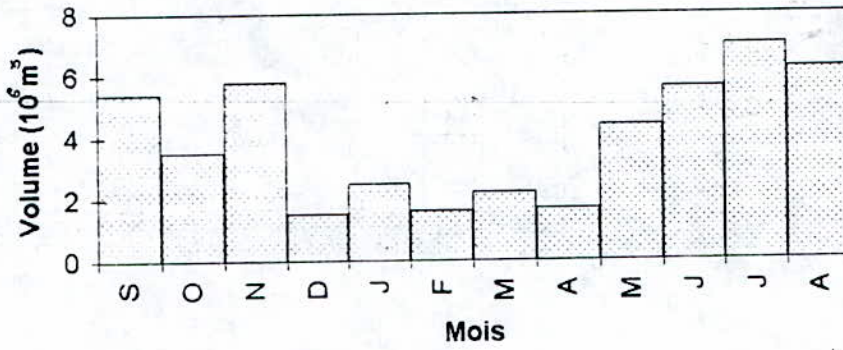


Fig. 125 -Barrage de BOUHANIFIA.
Quantité de mixture (moyenne) mensuelle soutirée
(période 1980-1992)

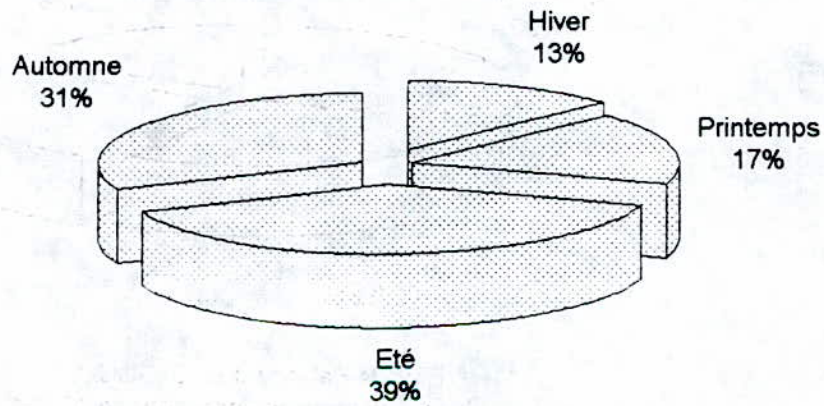


Fig.126-Barrage de BOUHANIFIA.
Quantité de mixture saisonnière soutirée (période 1980-1992)

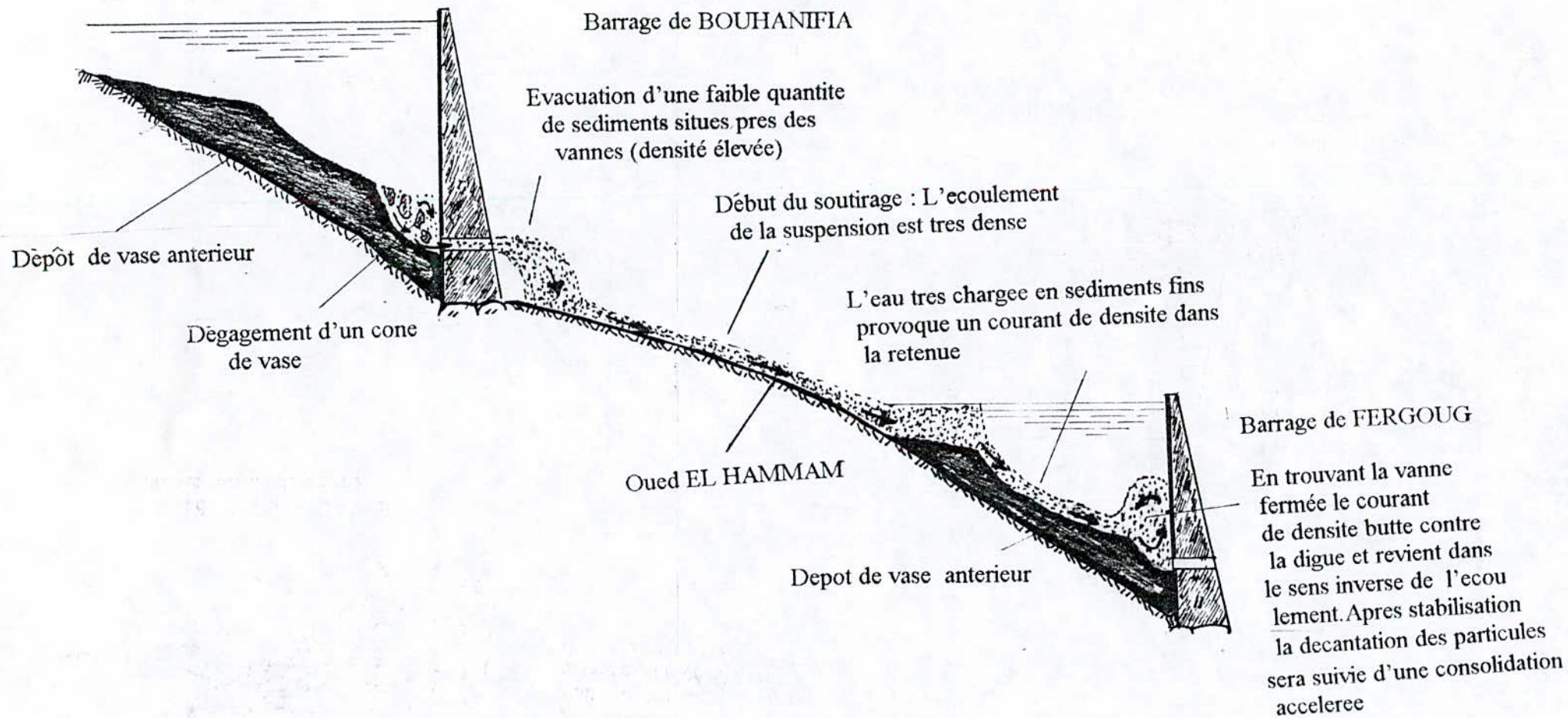


Fig.127-Conséquences de la mauvaise pratique de la Technique du Soutirage au niveau des barrages de FERGOUG et BOUHANIFIA durant les mois de juin, juillet, août et septembre .

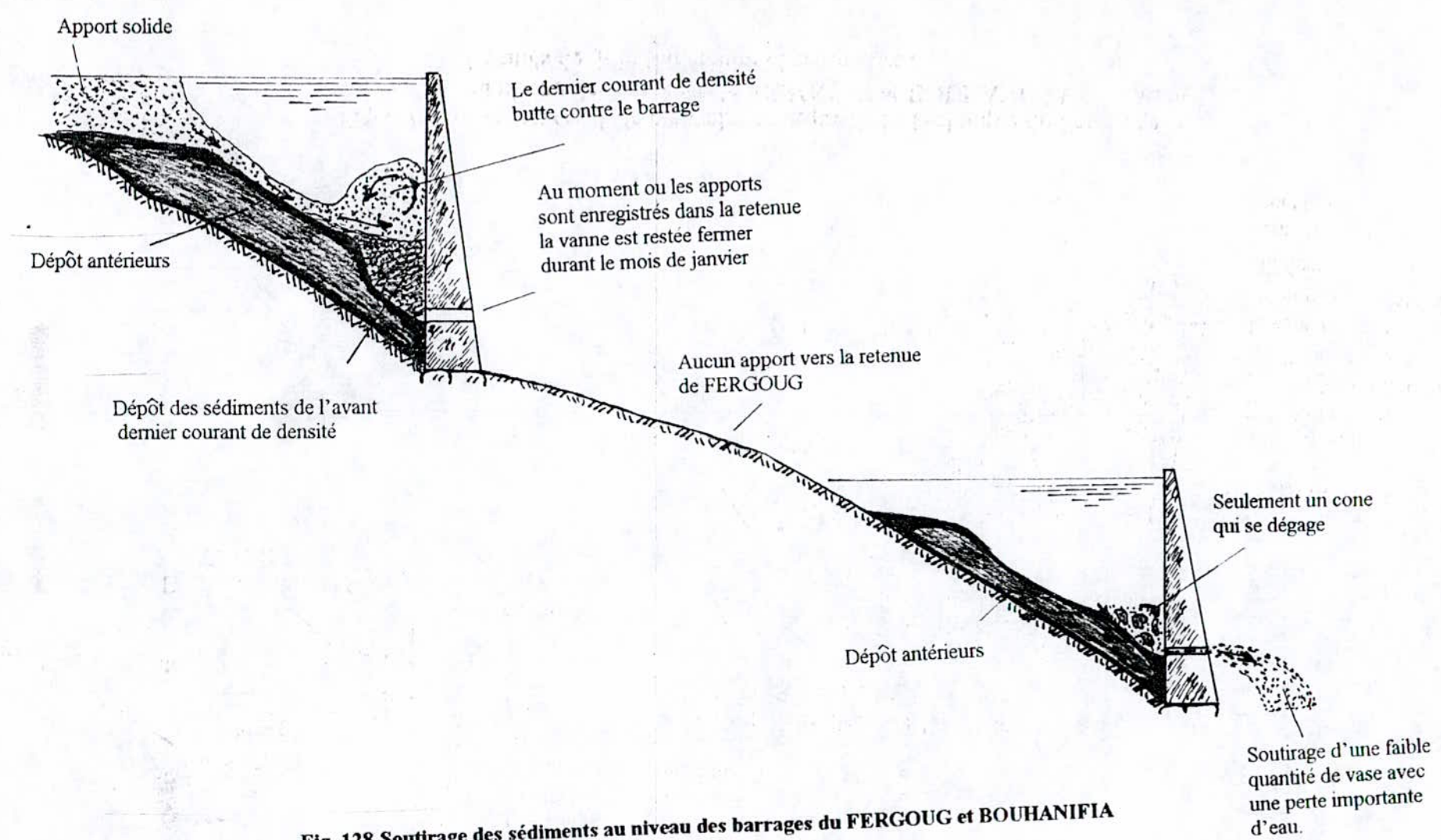


Fig. 128-Soutirage des sédiments au niveau des barrages du FERGOUG et BOUHANIFIA durant le mois de janvier.

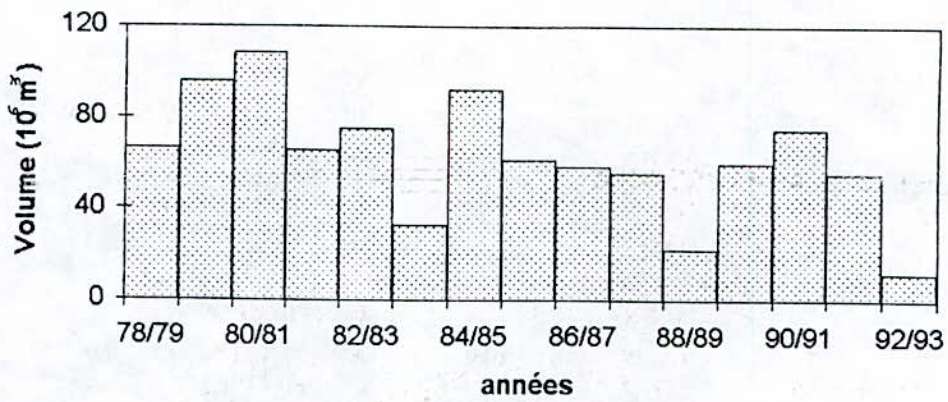


Fig.129-Barrage de FERGOUG.
Variation des apports liquides (période 1978-1993)

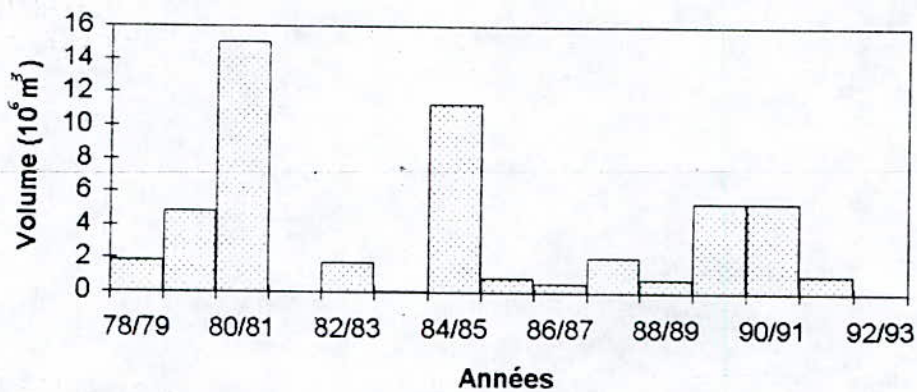


Fig.130 -Barrage de Fergoug.
Quantité annuelle de suspension soustrée (période 1978-1993)

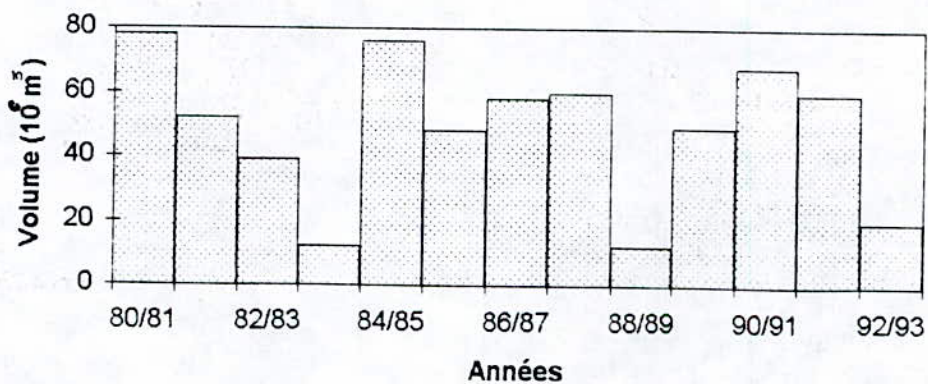


Fig. 131 - Barrage de BOUHANIFIA.
Quantité de annuelle de suspension soustrée(période 1980-1993)

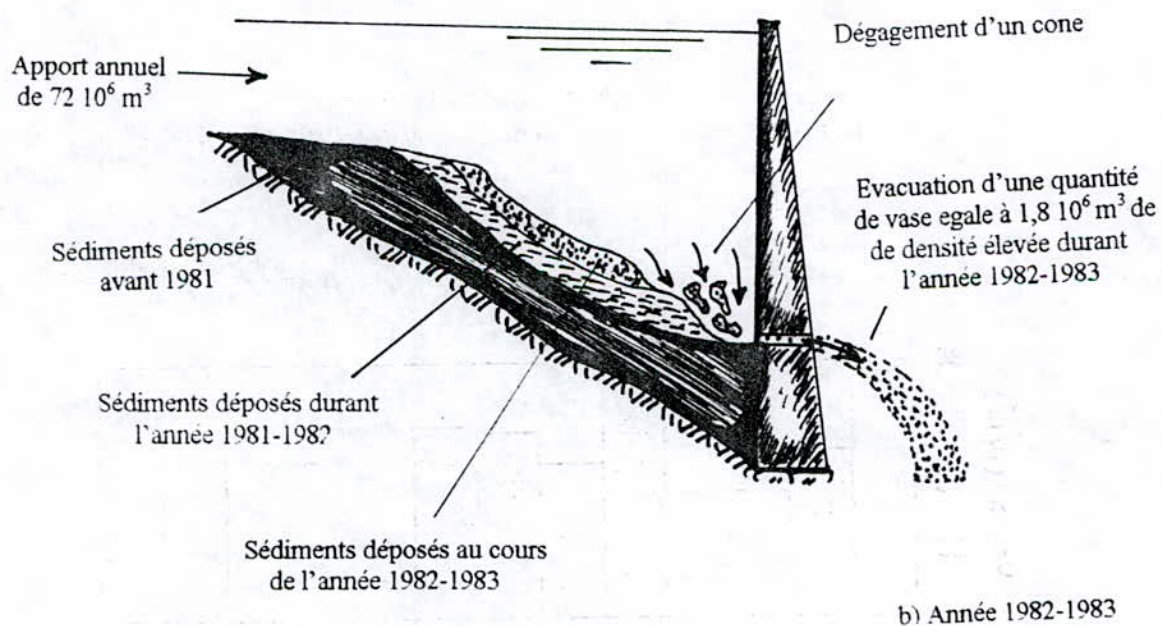
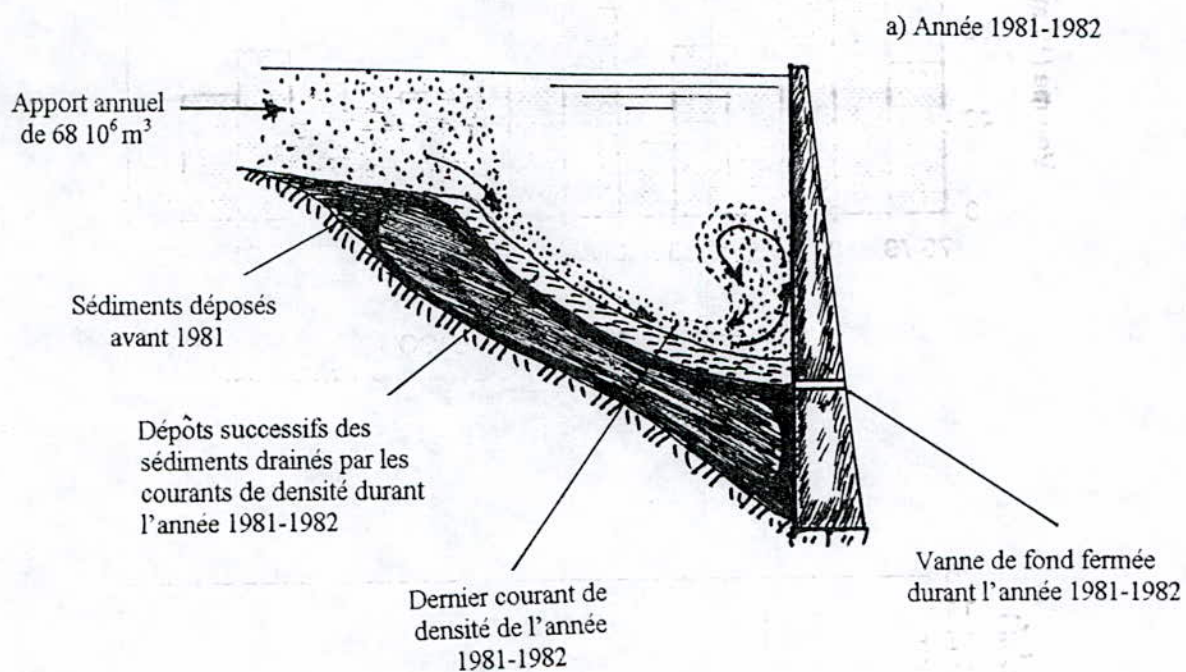
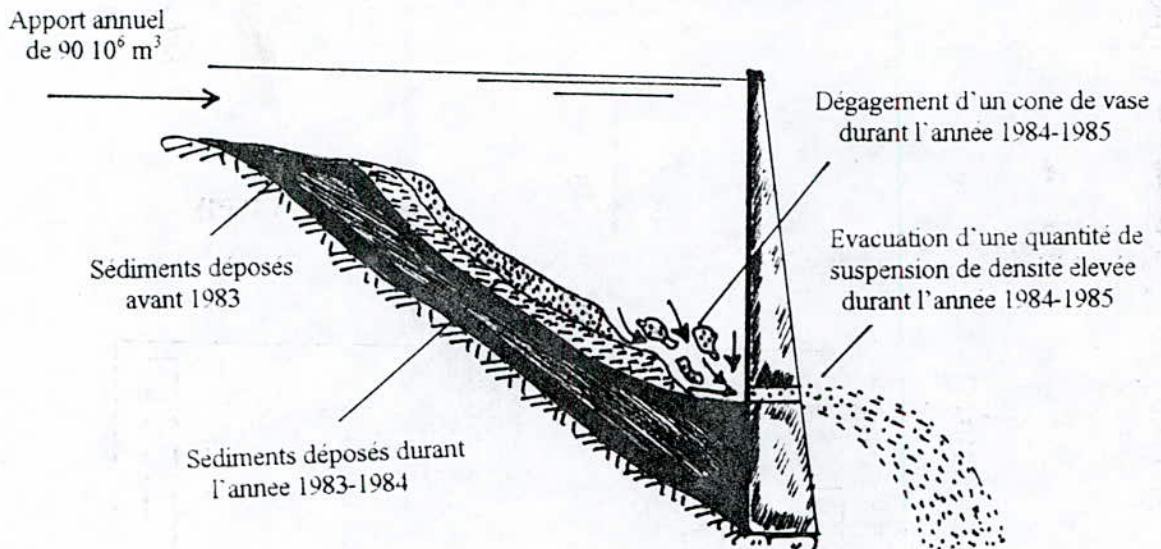
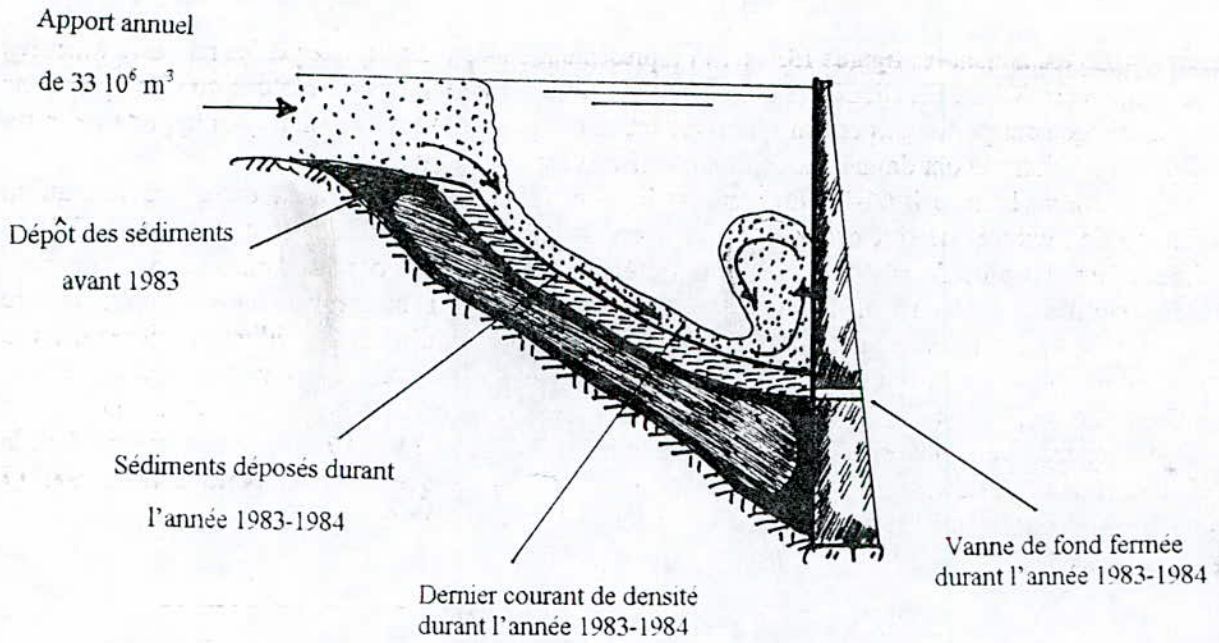


Fig.132- La pratique de la technique du soutirage au barrage de FERGOUG

c) Année 1983-1984



d) Année 1984-1985

d) Barrage de FOUM EL GHERZA

En examinant les figures 133 et 134 représentant les apports liquides, et les mixtures évacuées au barrage de FOUM EL GHERZA durant la période 1966-1991, nous constatons que les opérations de soutirage sont perturbées et mal pratiquées et n'ont pas suivi les variations des apports de crues dans le réservoir qui ont drainé une forte quantité de vase.

Durant l'année 1966-1967, un apport liquide évalué à 43.10^6 m^3 a été enregistré sans qu'un volume de mixture ne soit évacué. La même opération s'est reproduite durant l'année 1969-1970 durant laquelle, plus de 50.10^6 m^3 d'eau ont été apportés par les crues soudaines et violentes sans qu'un soutirage n'ait eu lieu. La période 1978-1981 a été aussi une période sans soutirage malgré l'apport de 95.10^6 m^3 d'eau, avec évidemment une quantité considérable de sédiments piégés dans la retenue (fig. 135 a), et qui a entraîné la consolidation de la vase dans la partie basse de la retenue provoquant ainsi l'obturation de la vanne de fond en 1982 (fig. 135 b). En 1989, la vanne a été débloquée par une équipe spécialisée, évacuant ainsi un volume de $0,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de suspension dont la densité a dépassé la valeur de 1,400 (fig. 135 c). Il est à noter que durant la période 1982-1989 (7 ans), une quantité considérable des sédiments a été déposée dans la retenue.

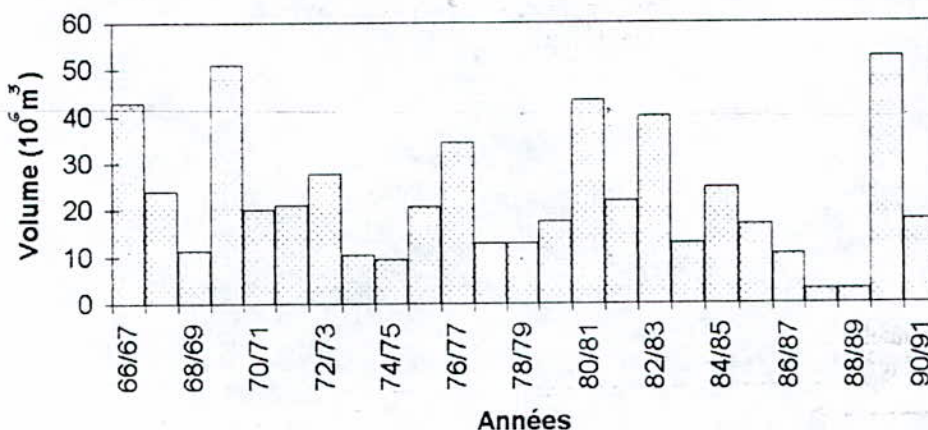


Fig. 133 -Barrage de FOUM EL GHERZA.
Apports liquides annuels (période 1966-1991)

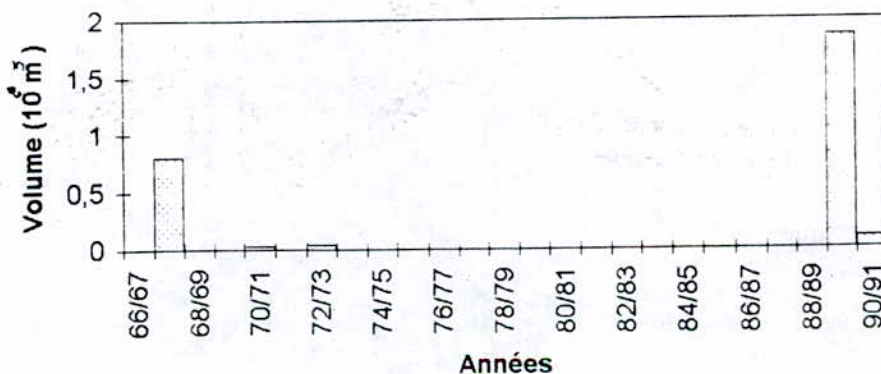
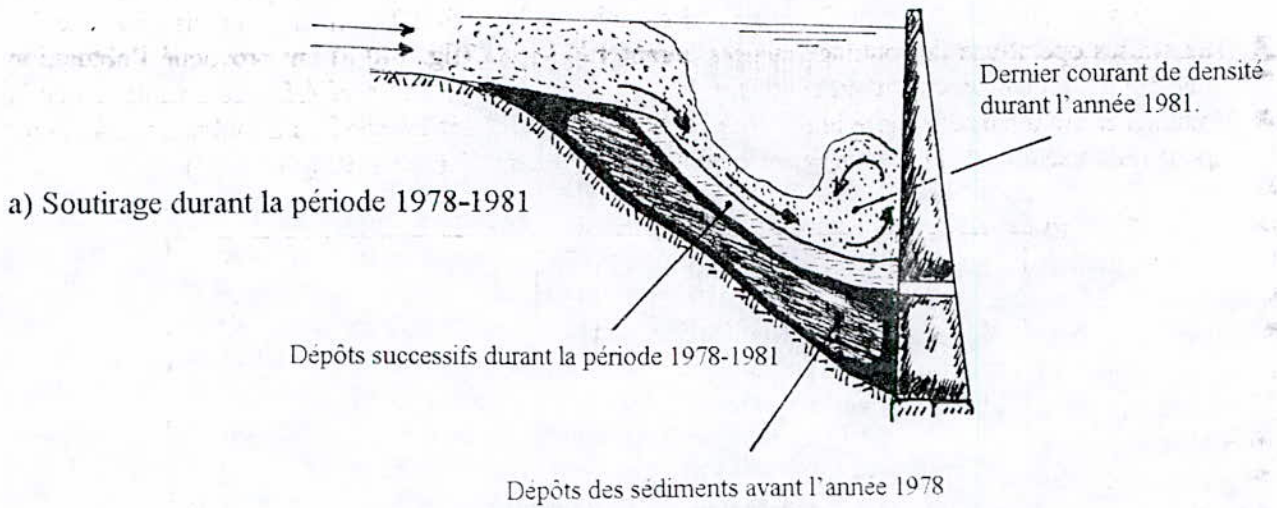


Fig. 134 -Barrage de FOUM EL GHERZA.
Quantité annuelle de suspension soutirée (période 1966-1991)

Apport total égale à 95.10^6 m^3



Apport total égal à 115.10^6 m^3

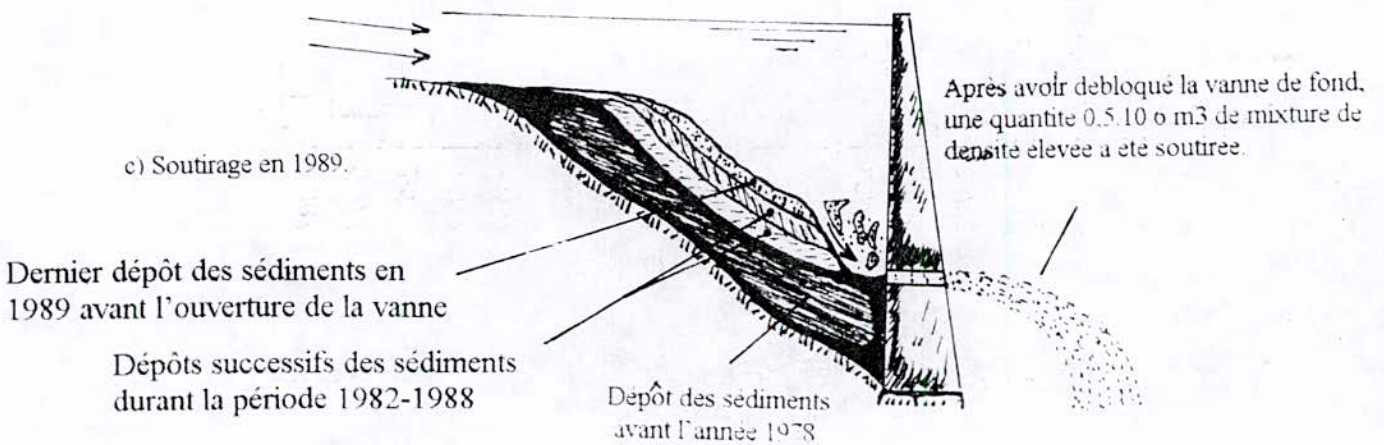
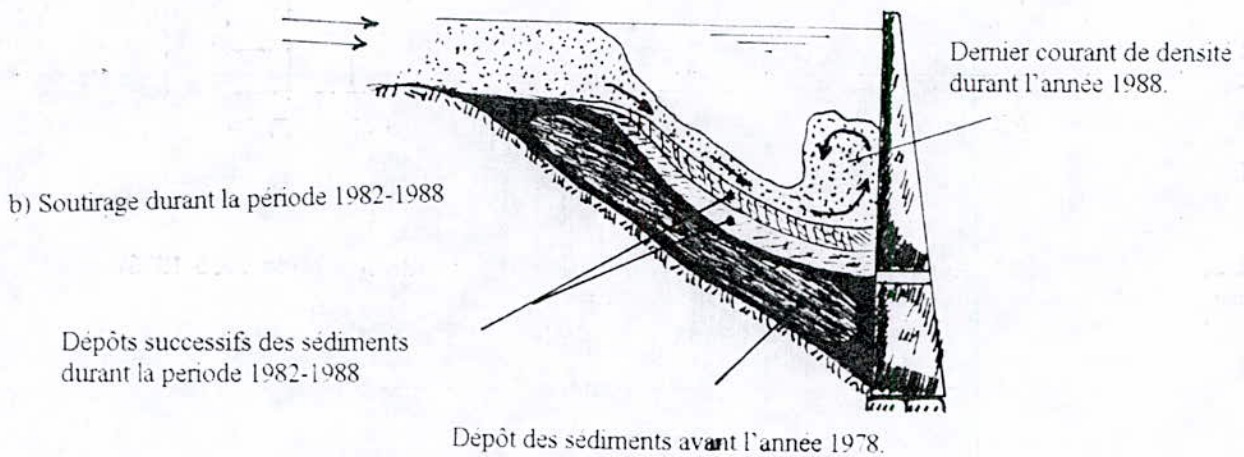


Fig.135- Pratique de la technique du soutirage au niveau du barrage de FOUM EL GHERZA

e) Barrage des ZARDEZAS

D'après les figures 136, 137, 138 et 139 représentant les apports liquides et les mixtures évacuées annuellement durant 26 années d'exploitation (1965-1991), nous pouvons dire que les mauvaises opérations de soutirage menées durant 1965-1985 (fig. 140 a) ont provoqué l'obturation des vannettes de dévasement en 1985 (fig. 140 b), ce qui a largement accéléré la sédimentation de la retenue et qui a même menacé la stabilité de l'ouvrage obligeant les services d'hydraulique à opérer pour le dévasement de la cuvette par le dragage mécanique dès l'année 1993 (photo. 48).

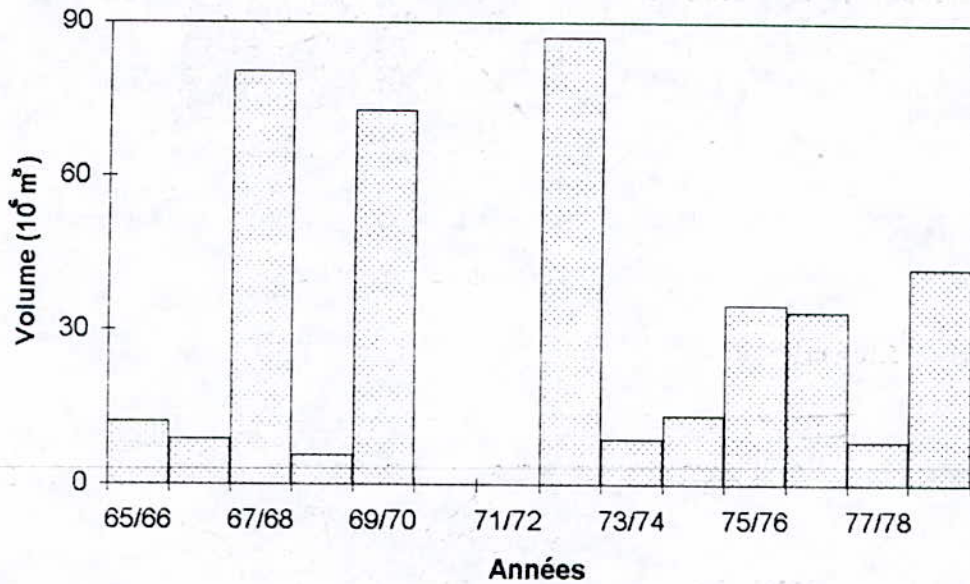


Fig- 136-Barrage des ZARDEZAS. Apports liquides annuels(période 1965-1979).

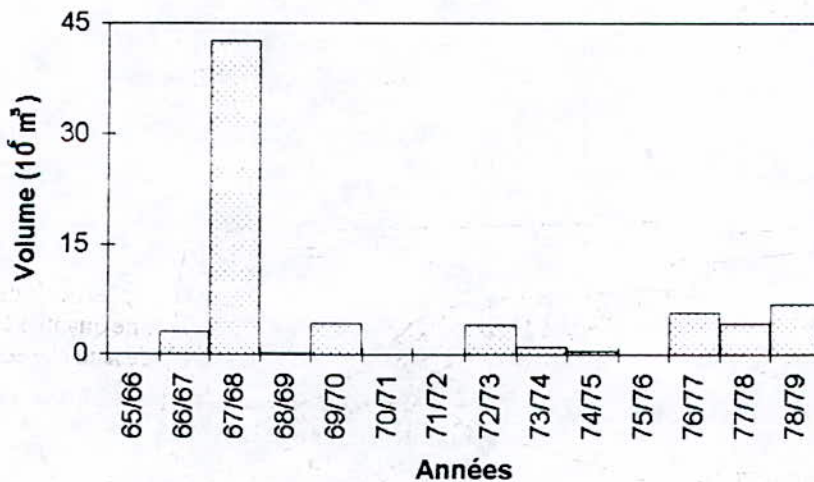


Fig.137-Barrage des ZARDEZAS. Quantité annuelle de suspension soutirée (periode 1965-1979)

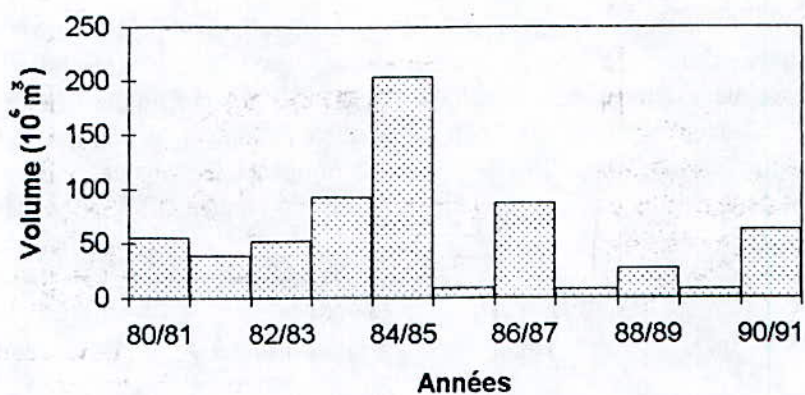


Fig. 138 -Barrage des ZARDEZAS. Apports liquides dans la retenue

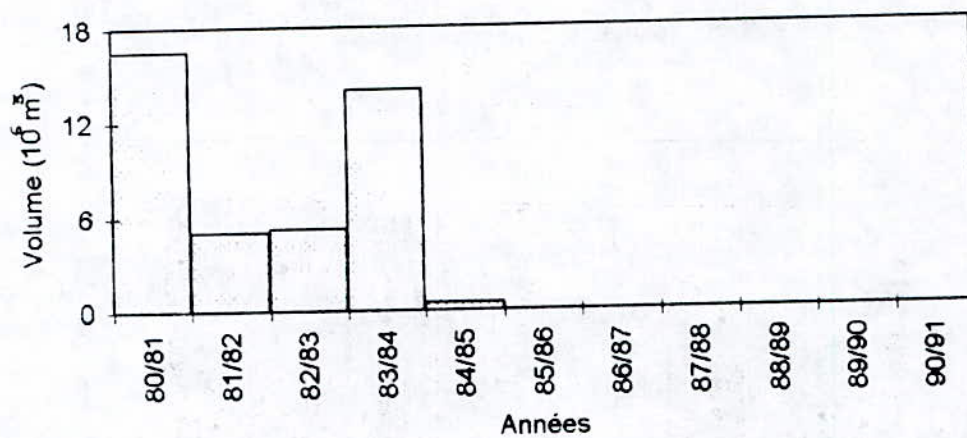
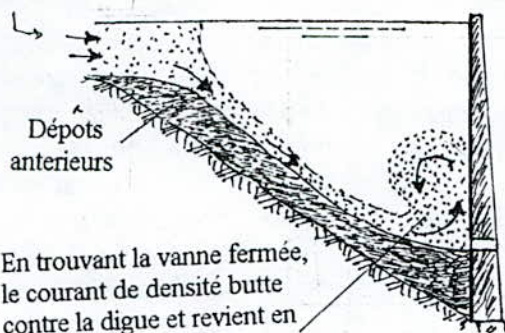


Fig.139-Barrage des ZARDEZAS-Quantité annuelle de suspension soustrée (periode 1980-1991)

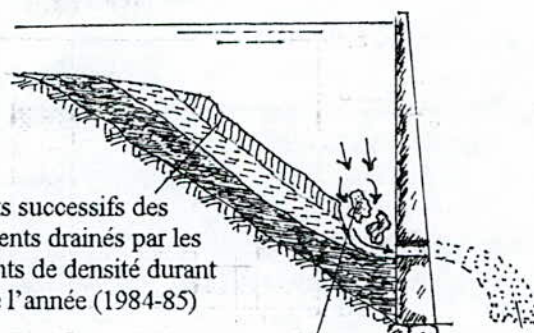
Apport annuel
de $200 \cdot 10^6 \text{ m}^3$



Dépôts
anterieurs

En trouvant la vanne fermée,
le courant de densité butte
contre la digue et revient en
sens inverse et se stabilise

Dépôts successifs des
sédiments drainés par les
courants de densité durant
toute l'année (1984-85)

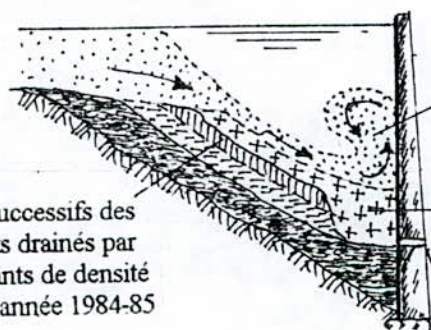


La quantité de vase soutirée
dépendra uniquement du
degré de concentration

a) Soutirage de
l'année 1984-85

Une faible quantité de
suspension a été évacuée
durant l'année 1984-85
égale à $0,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

Apport total durant 6 années
d'exploitation égal à $190 \cdot 10^6 \text{ m}^3$



Dépôts successifs des
sédiments drainés par
les courants de densité
durant l'année 1984-85

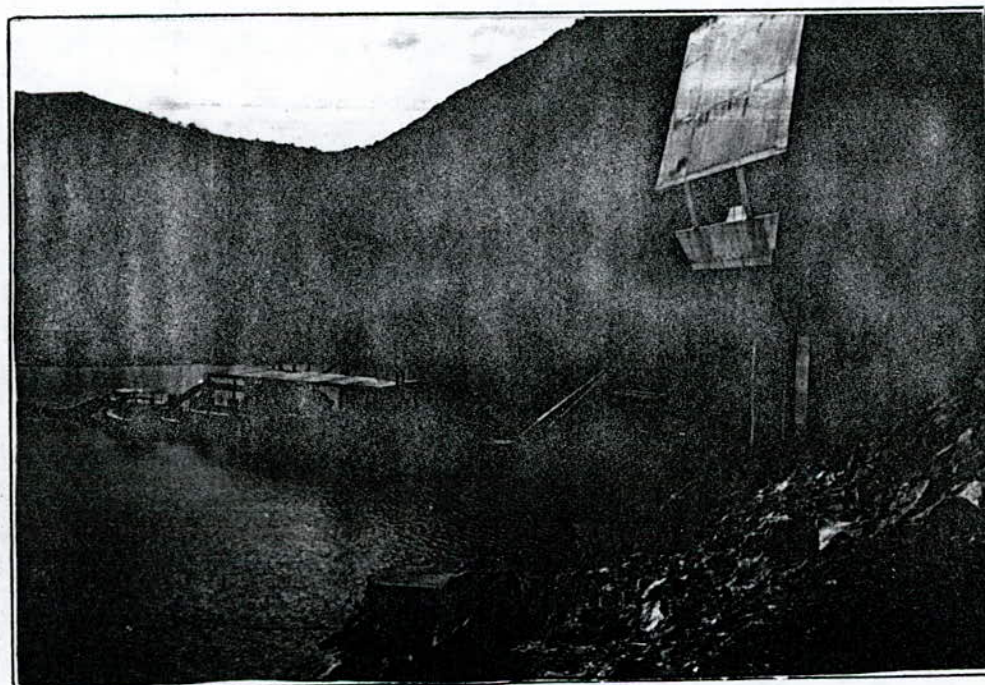
Dernier courant de
densité de l'année
1990-91

Dépôts successifs des
sédiments drainés par
les courants de densité
durant la période 1985-91

b) Soutirage de la période
1985-91

Obturation de la vanne:
conséquence d'une mauvaise
pratique de la technique du
soutirage

**Fig.140- La pratique de la technique du
soutirage au barrage de ZARDEZAS**



**Photo. 48-
L'obturation des
vannettes de
soutirage en 1985
a accéléré
l'envasement dans
la retenue du barrage
des ZARDEZAS,
ce qui a contraint
les services concernés
de procéder au
dragage de la
cuvette en 1993.**

f) Barrage du HAMIZ

La technique du soutirage a été plus ou moins bien appliquée au barrage du HAMIZ par rapport aux barrages cités précédemment. Le rapport entre les débits d'apports et soutirés sont mal répartis dans le temps (fig. 141 et 142). Par exemple, si nous prenons les mois de Janvier et Mars durant lesquels une même quantité d'apport ($4,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) a été enregistrée au barrage, mais on remarquera par contre une nette différence entre les mixtures soutirées qui sont de $0,06 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour le mois de janvier et $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour celui de mars (fig. 143 a et b), ce qui veut dire que le soutirage a été mal pratiqué: dans un premier cas, une faible quantité de suspension a été évacuée avec un dépôt important de sédiments dans la retenue, et en deuxième cas: une importante quantité de mixture a été soutirée avec une proportion considérable d'eau claire.

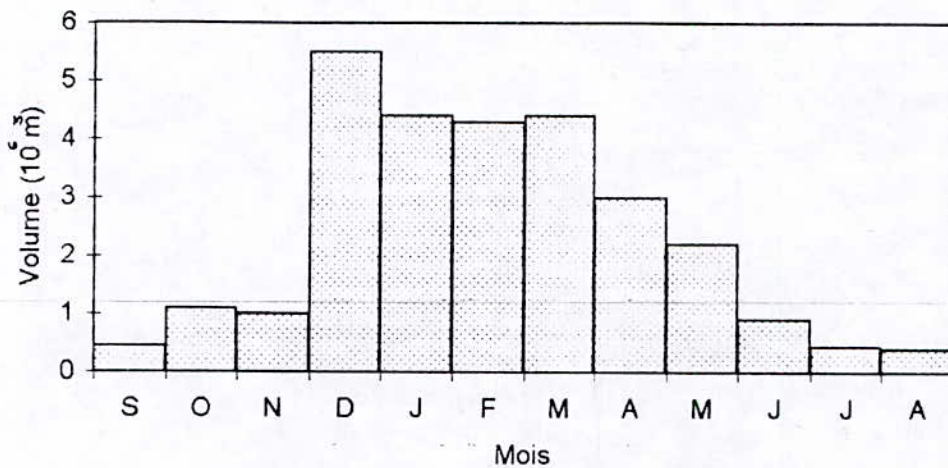


Fig. 141-Barrage de HAMIZ-Apports liquides mensuels (periode 1980-1992)

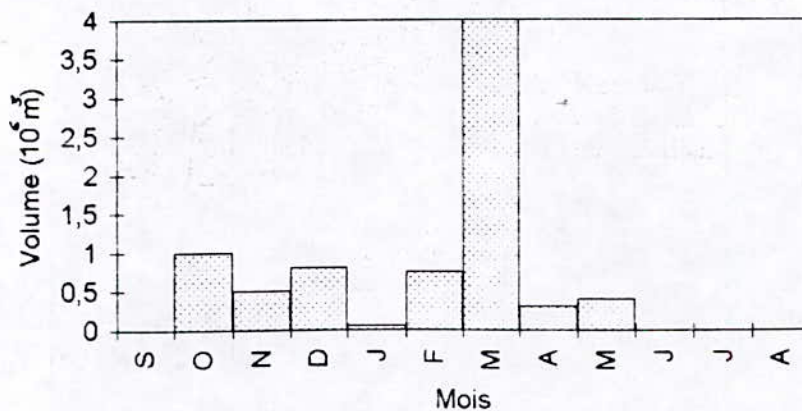
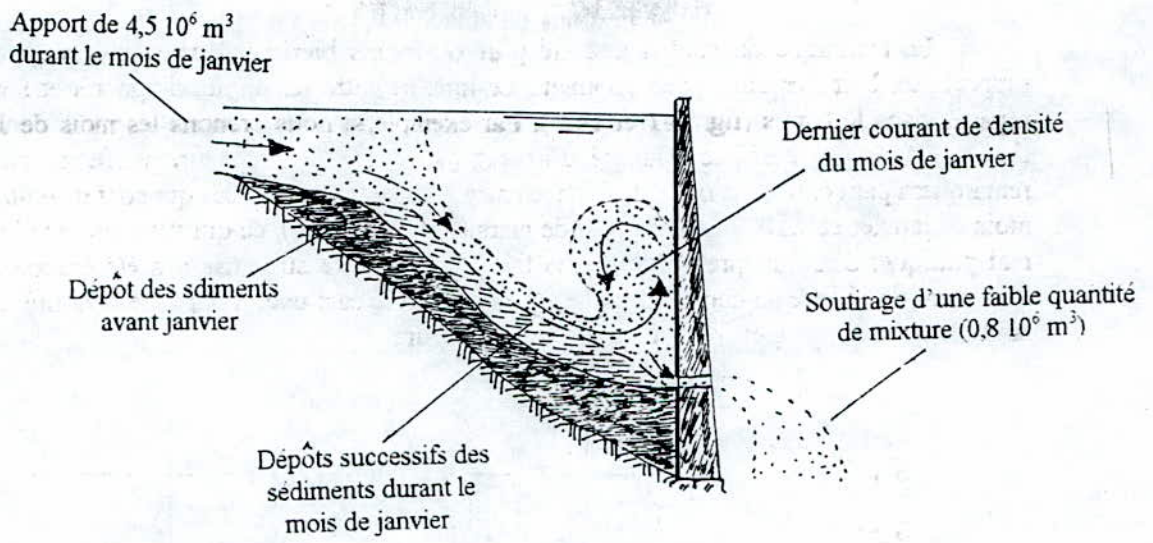
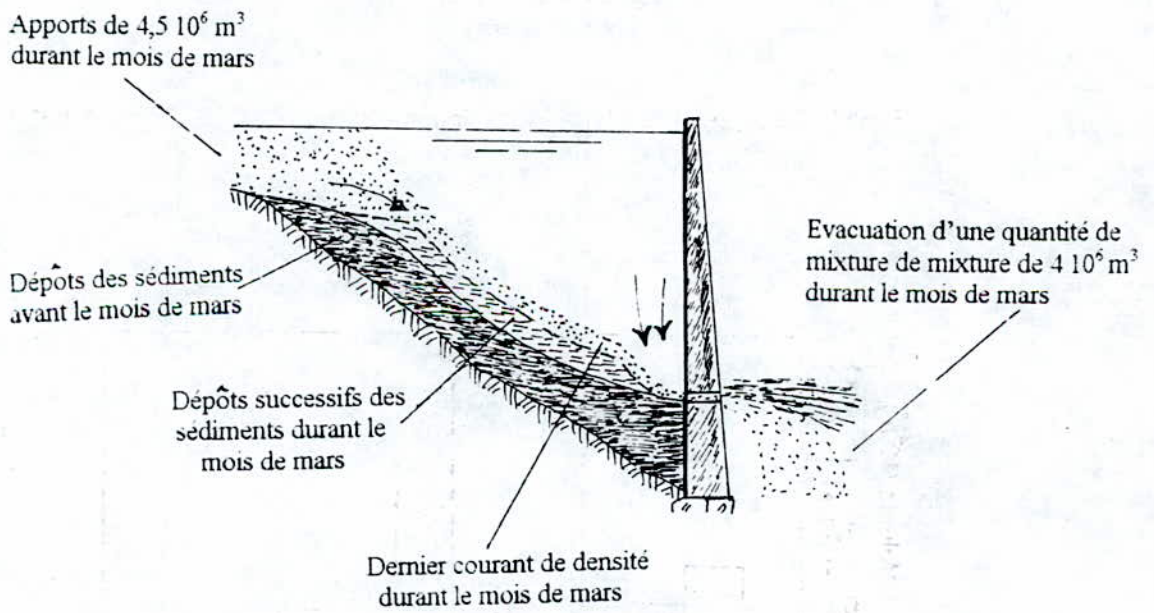


Fig. 142- Barrage du HAMIZ. Quantité mensuelle de suspension soutirée (periode 1980-1992)



a) Mois de janvier



b) Mois de mars

Fig.143- La pratique de la technique du soutirage au barrage du HAMIZ

Les figures 144 et 145 représentant les apports liquides et les quantités de mixtures évacuées annuellement, témoignent de la mauvaise pratique de la technique du soutirage. En effet, par exemple durant l'année 1984, la mixture évacuée a été plus ou moins proportionnelle au débit d'apport (fig. 146 a), contrairement aux années 1987 et 1988 durant lesquelles aucun soutirage n'a été effectué malgré un apport d'eau de 25.10^6 m^3 (fig. 146 b), ce qui a favorisé certainement le dépôt des sédiments drainés par les courants de densité au cours de cette période.

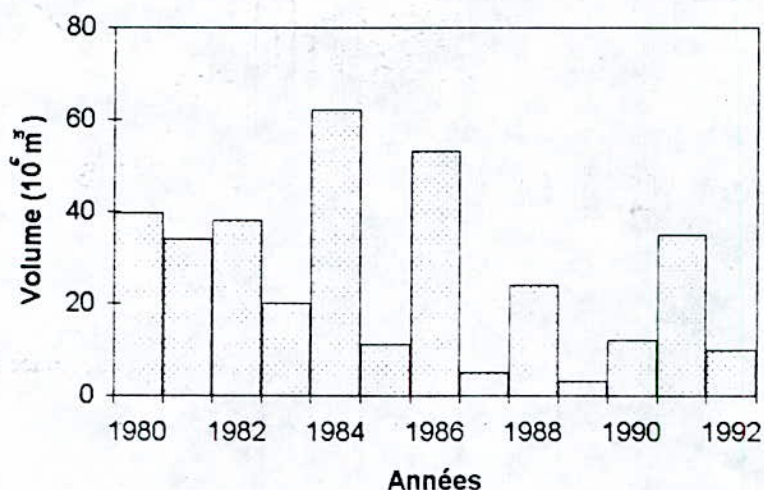


Fig.144- Barrage du HAMIZ. Apports liquides annuels (période 1980-1992)

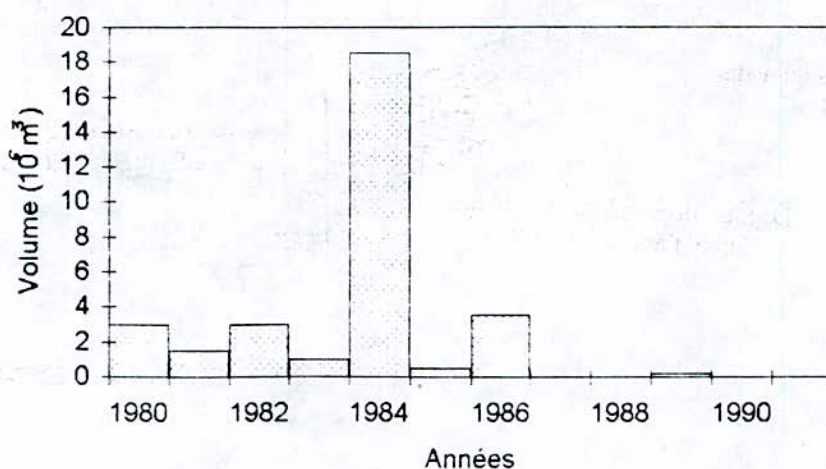
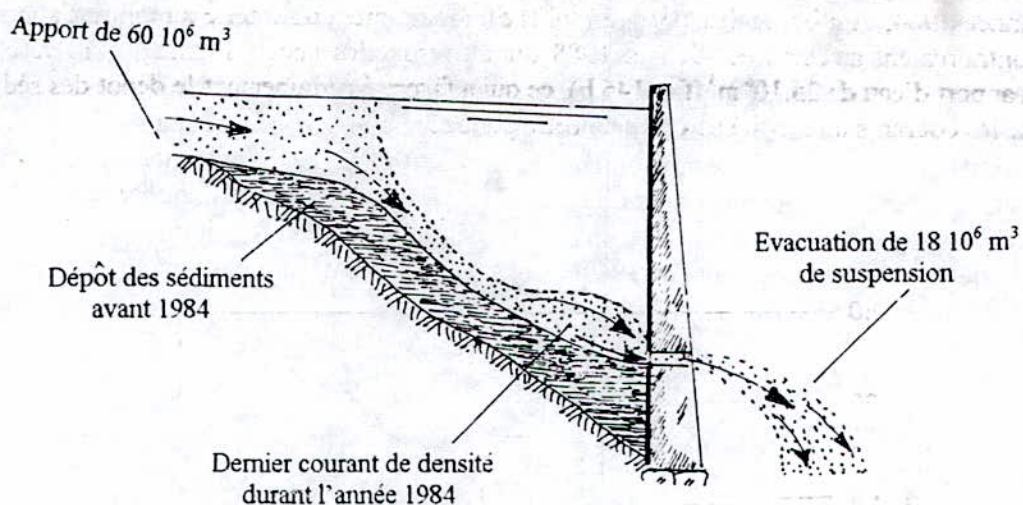
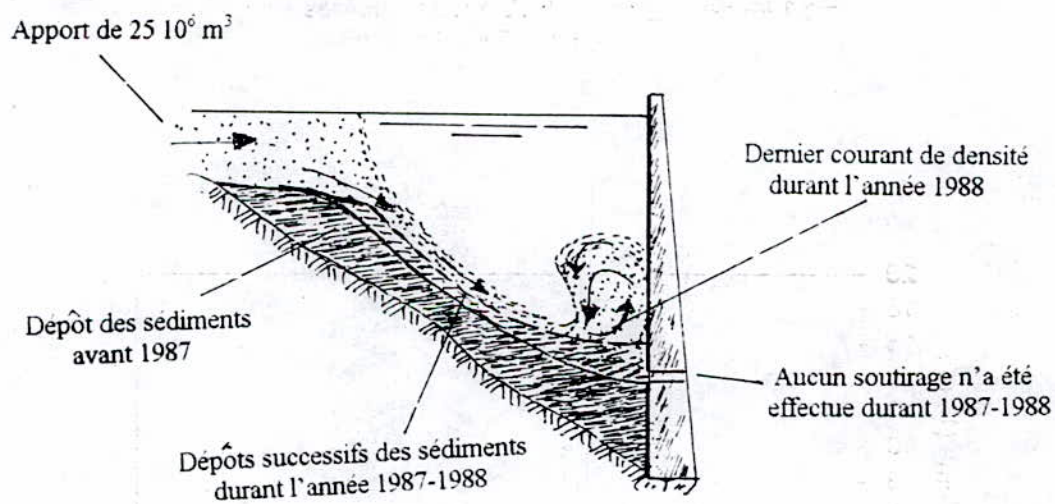


Fig.145- Barrage du HAMIZ. Quantité annuelle desuspension soutirée (période 1980-1991)



a) Année 1984



b) Période 1987-1988

Fig.146- La pratique de la technique du soutirage au barrage du HAMIZ

g) Barrage de K'SOB

Les mixtures soutirées mensuellement (fig. 147) sont plus au moins en proportion avec les apports liquides (fig. 148).

Si on examine les figures 149 et 150 représentant les mixtures soutirées annuellement, ainsi que les apports annuels enregistrés dans la retenue, on constate que le soutirage n'a pas été bien suivi durant la période 1980-1992. Par exemple durant les années 1983 et 1985, la manoeuvre de la vanne n'a pas été effectuée malgré l'apport liquide de 21.10^6 m^3 , évidemment toute la masse solide drainée par cet apport est piégée dans la retenue (fig. 151 a), le même cas s'est reproduit durant l'année 1988-1989, avec cette fois-ci un apport de 20.10^6 m^3 sans évacuation de mixture, ce qui a favorisé la décantation et la consolidation des sédiments fins (fig. 151 b).

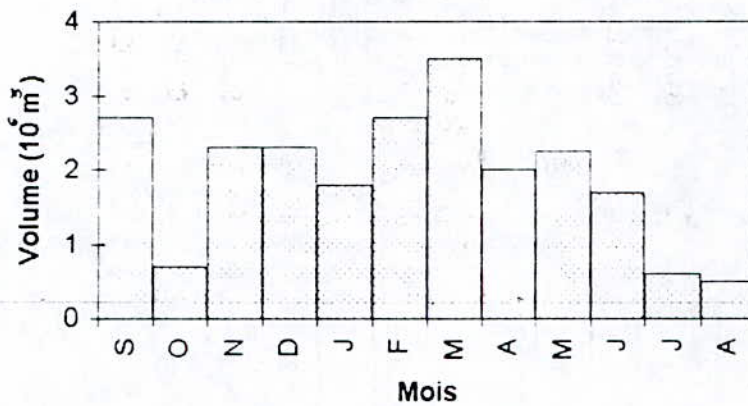


Fig.147- Barrage de K'SOB. Apports liquides mensuels (période 1980-1992)

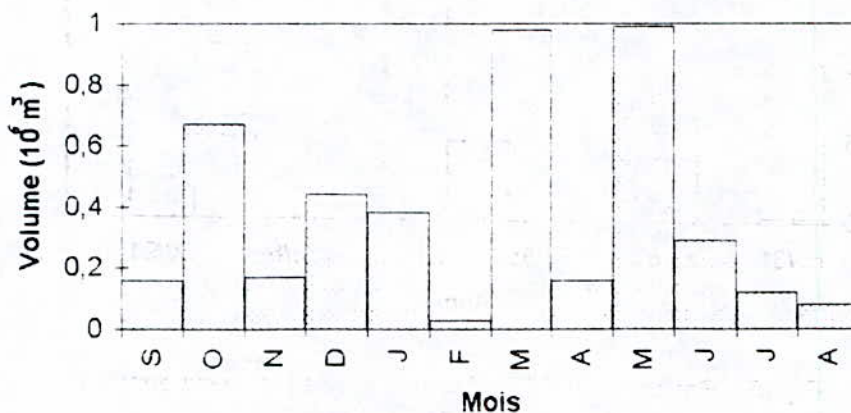


Fig.148- Barrage de K'SOB. Quantité mensuelle de suspension soutirée (période 1980-1992)

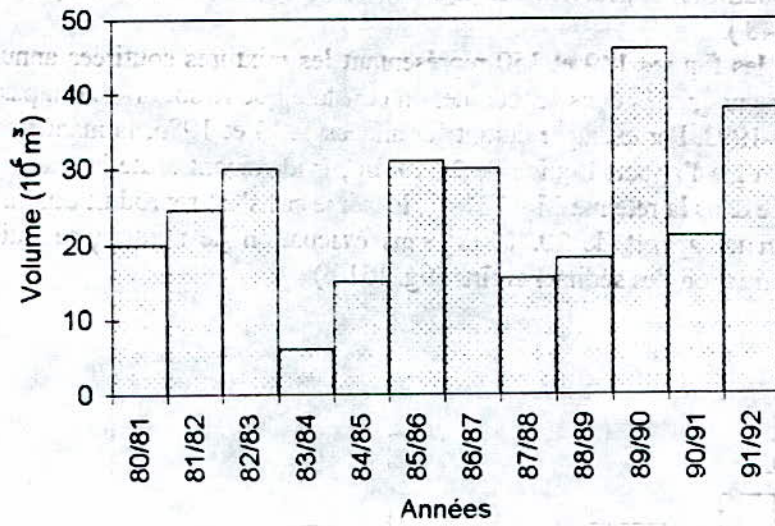


Fig. 149- Barrage de K'SOB. Apports liquides annuels (période 1980-1992)

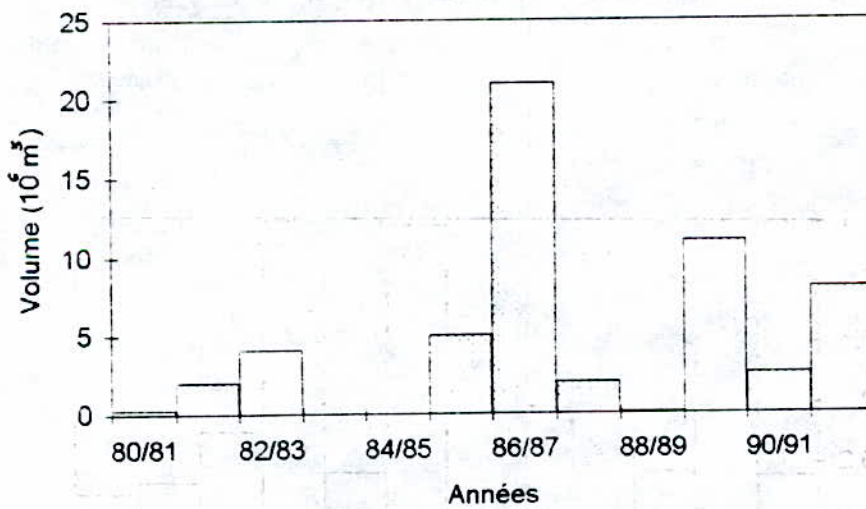
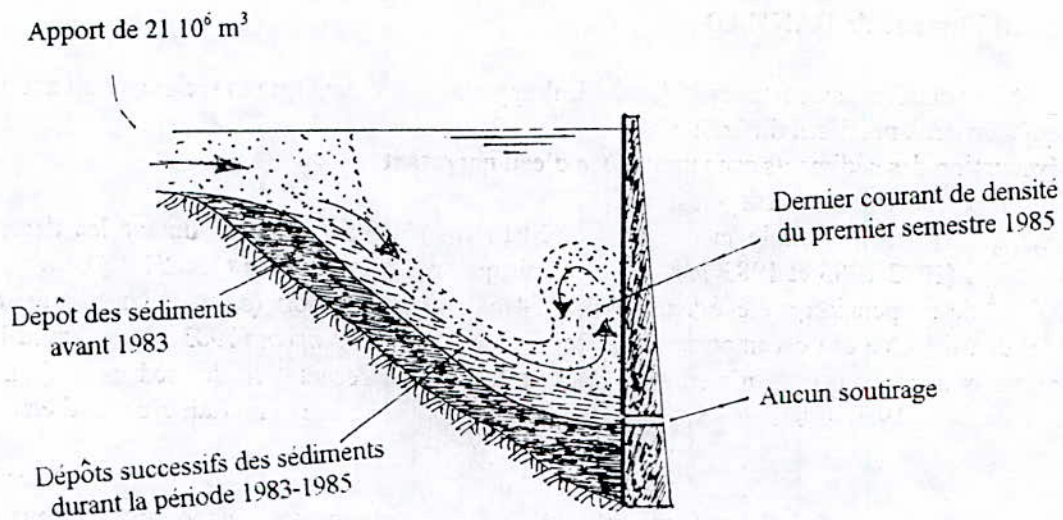
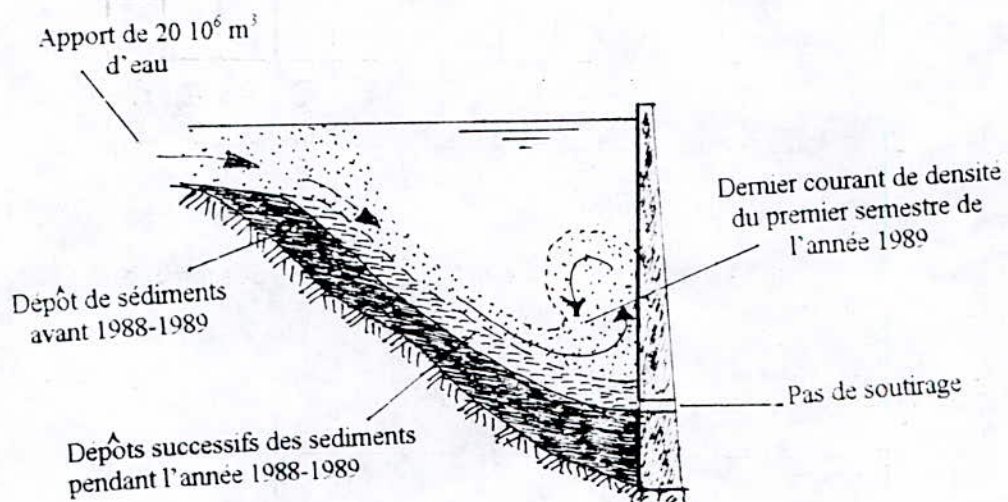


Fig. 150- Barrage de K'SOB. Quantité annuelles de suspension soutirée (priode 1980-1992)



a) Période 1983-1985



b) Période 1988-1989

Fig.151- La pratique de la technique du soutirage au barrage de K'SOB

h) Barrage de BAKHADA

Si on se réfère aux figures 152 et 153, il apparaît clairement que la technique du soutirage est pratiquée de deux manières différentes:

- évacuation des sédiments avec un volume d'eau important,
- et sans évacuation de la suspension.

Par exemple, pratiquement le même apport (20.10^6 m^3) a été enregistré durant les deux années consécutives (1982/1983 et 1983/1984), il apparaît que pendant l'année (1982/1983), un volume de $7,5.10^6 \text{ m}^3$ de suspension a été évacué (fig. 154 a), soit un rapport (suspension évacuée / apport liquide) de 36 %, ce qui est important contrairement à l'année d'après (1983/1984) durant laquelle, pratiquement aucun soutirage n'a eu lieu, ce qui a favorisé la décantation des sédiments (fig. 154 b). Pendant l'année 1980/1981, le soutirage a été fait au profil d'une importante perte d'eau, soit un rapport (suspension / apport liquide) égal à 63 % (fig. 154 c).

Durant la période 1988-1992, un apport de 95.10^6 m^3 a été enregistré sans qu'on procède au dévasement par les vannes ce qui a forcément permis à une masse solide importante de se consolider (fig. 154 d).

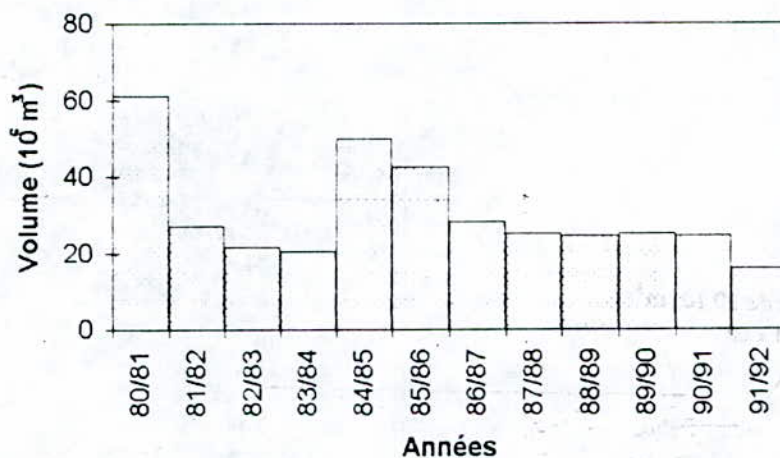


Fig.152- Barrage de BAKHADA. Apports liquides annuels (periode 1980-1992)

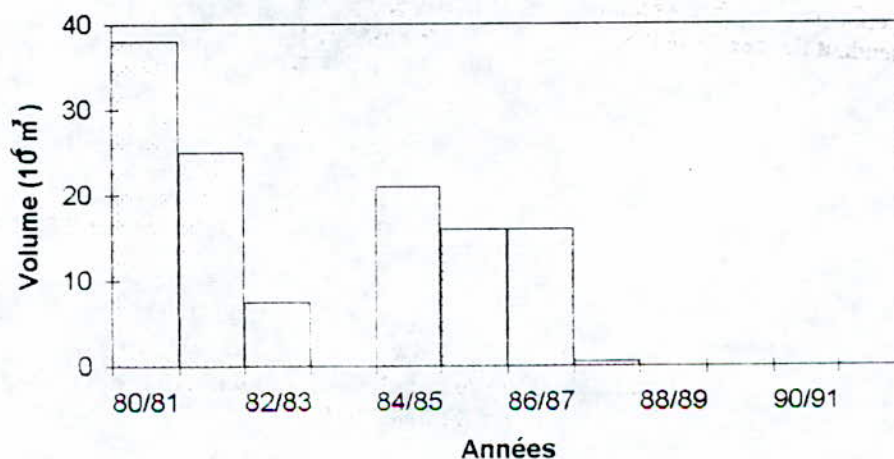
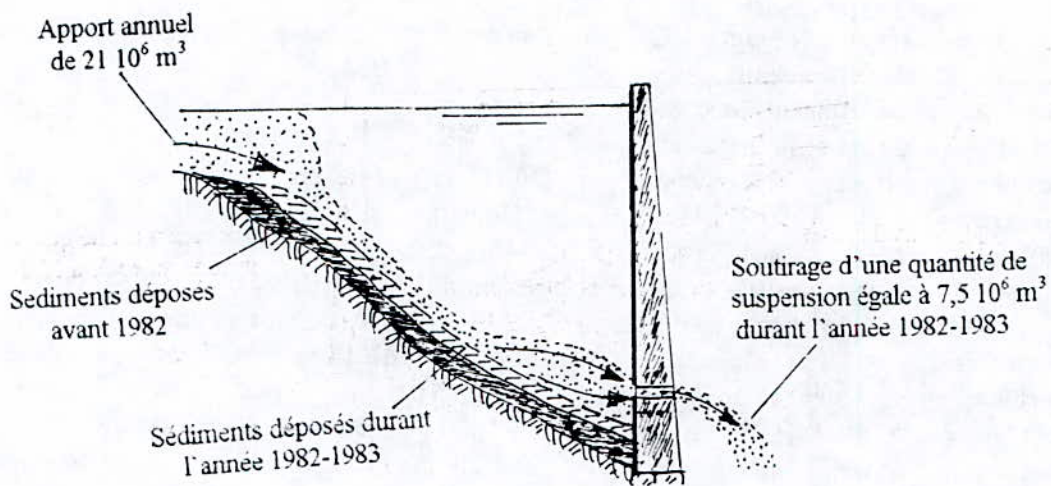
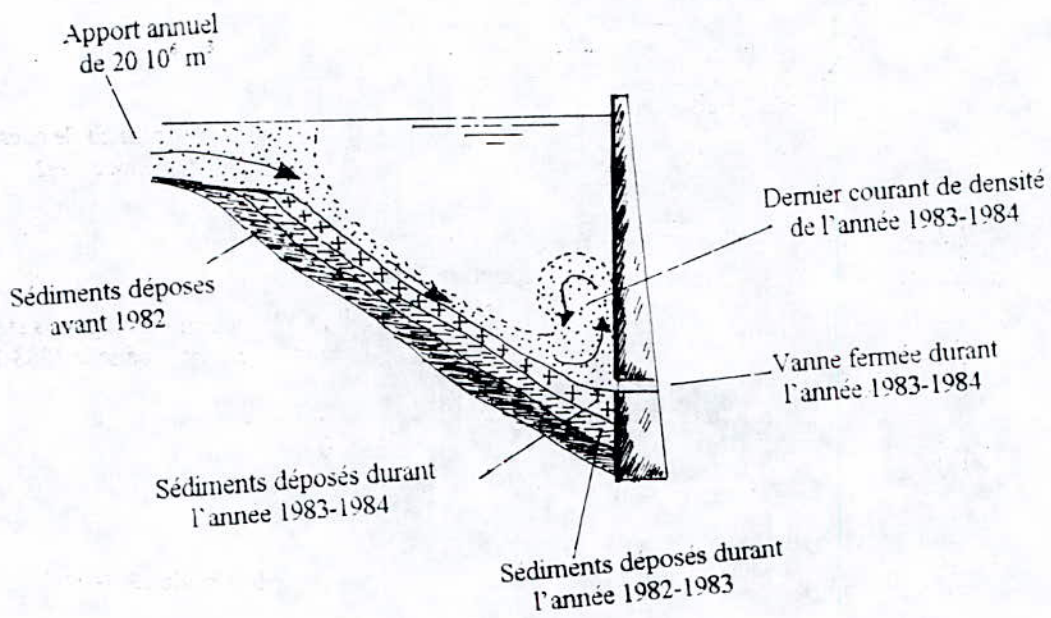


Fig.153- Barrage de BAKHADA. Quantité annuelle de suspension soutirée (periode 1980-1992)

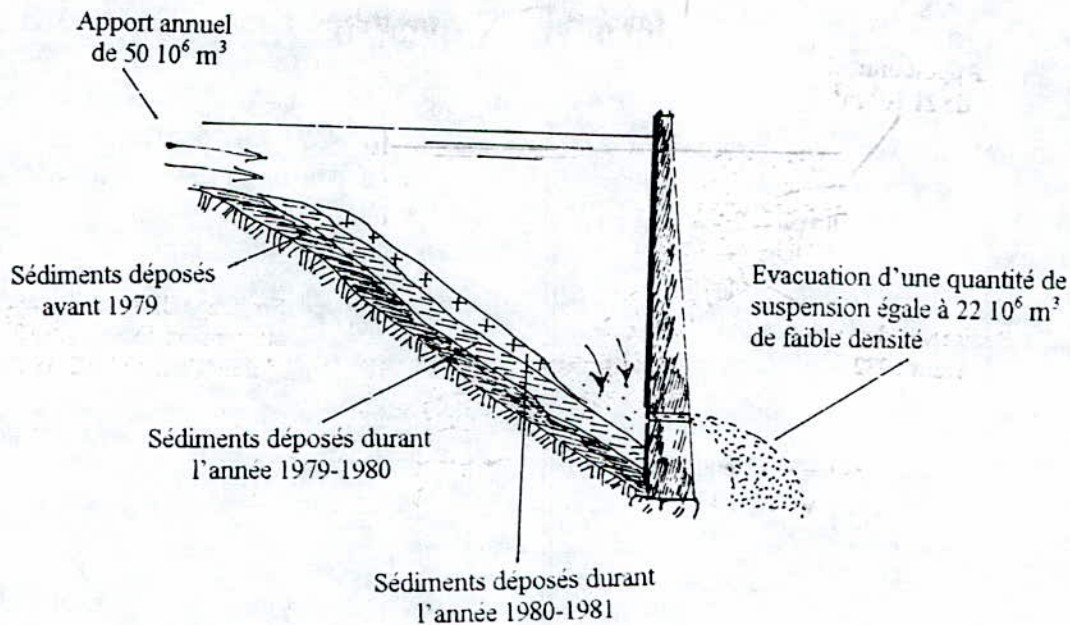


a) Année 1982-1983

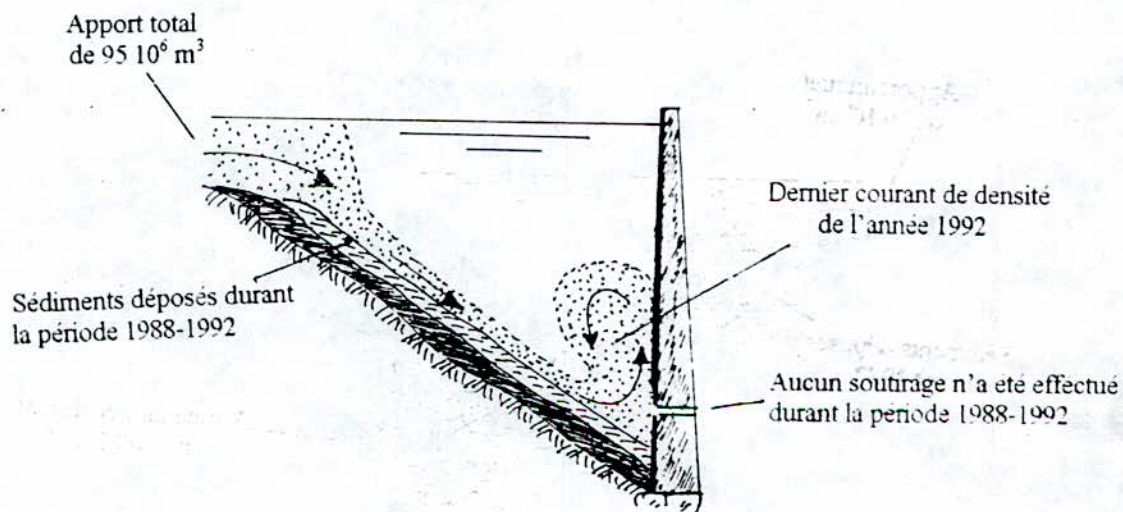


b) Année 1983-1984

Fig.154- La technique du soutirage pratiquée au niveau du barrage de BAKHADA



c) Année 1980-1981



d) Période 1988-1992

i) Barrages de SARNO, MEFROUCH et MEURAD

Les figures 155, 156, 157, 158, 159 et 160, représentant les apports liquides et les mixtures évacuées au niveau des barrages de SARNO, MEFROUCH et MEURAD, montrent clairement l'irrégularité des soutirages par rapport aux apports. Nous pouvons même remarquer que durant certaines années humides, les soutirages n'ont pas été pratiqués.

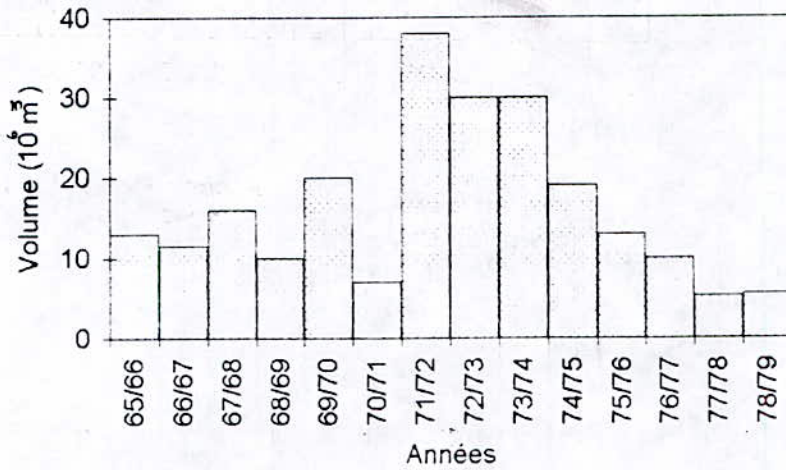


Fig.155- Barrage de SARNO..Apports liquides annuels(periode 1965-1980)

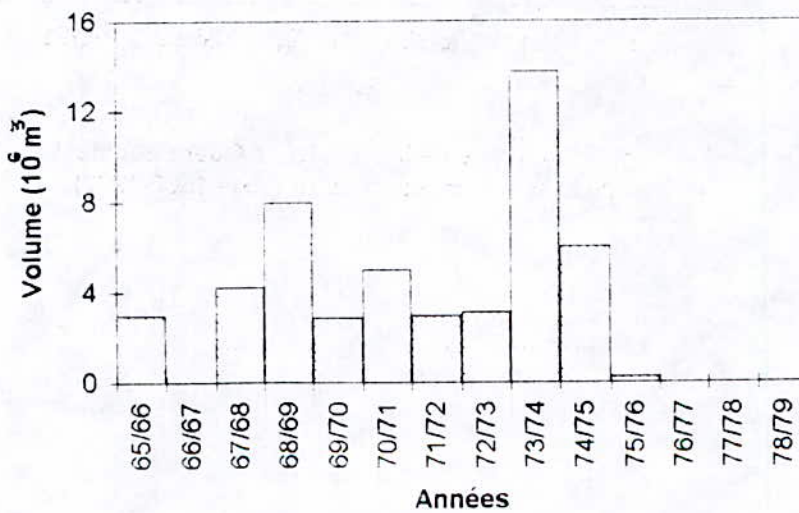


Fig.156- Barrage de SARNO..Quantité annuelle de suspension soutirée (periode 1965-1978)

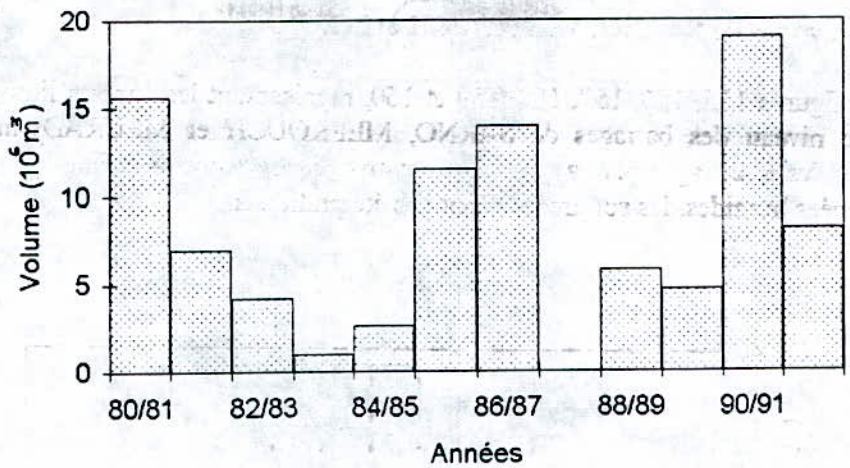


Fig.157- Barrage de MEFROUCH. Apports liquides annuels (période 1980-1992)

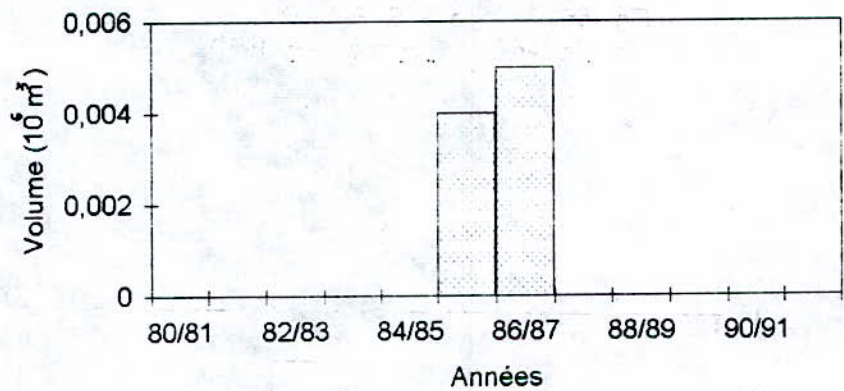


Fig.158-Barrage de MEFROUCH. Quantité annuelle de suspension soutirée (période 1980-1992)

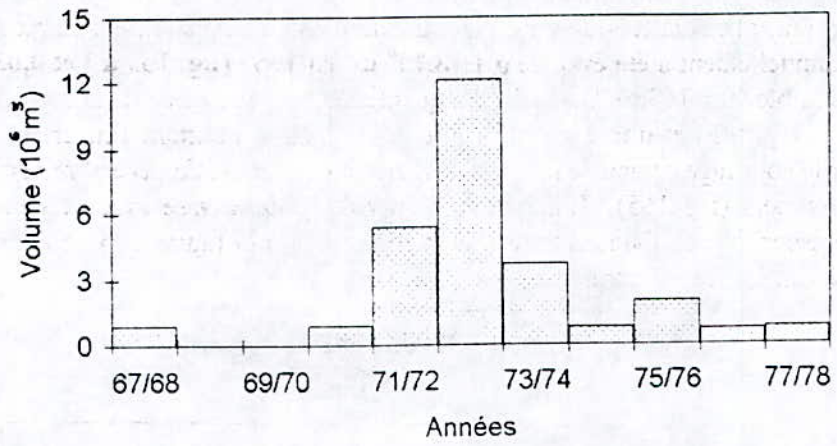


Fig.159- Barrage de MEURAD. apports liquides annuels (période 1967-1978)

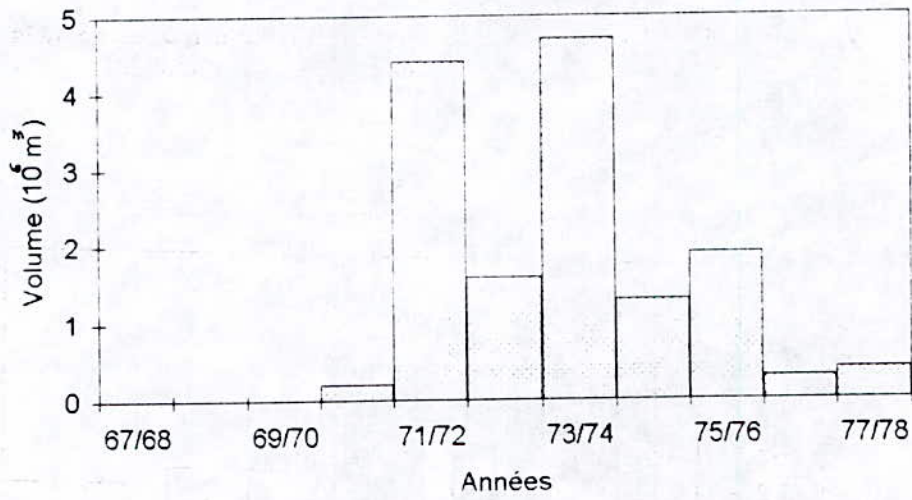


Fig.160- Barrage de MEURAD. Quantité annuelle de mixture soutirée (période 1967-1978)

j) Barrage d'ERRAGUENE

Durant 17 années d'exploitation (1967-1984) (fig. 161 et 162), les opérations de soutirage ont été respectées: pratiquement chaque année, une quantité de vase est soutirée. La plus forte quantité de vase soutirée annuellement a été évaluée à $1,18 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1969 (fig. 163 a) et $0,05 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1979 comme la plus faible (fig. 163 b). De ce fait, la quantité de vase soutirée varie considérablement d'une année à l'autre (fig. 163) et d'une saison à l'autre (fig. 164). Pourtant l'hiver est la saison la plus favorable pour le soutirage comme le montre la figure 164: le mois de décembre reste la période où le soutirage est fréquent (fig. 165). L'importance du volume de la vase évacuée dépend surtout de la densité de la suspension de l'«underflow» comme le montre la figure 166, la densité de la mixture évacuée varie d'une année à l'autre.

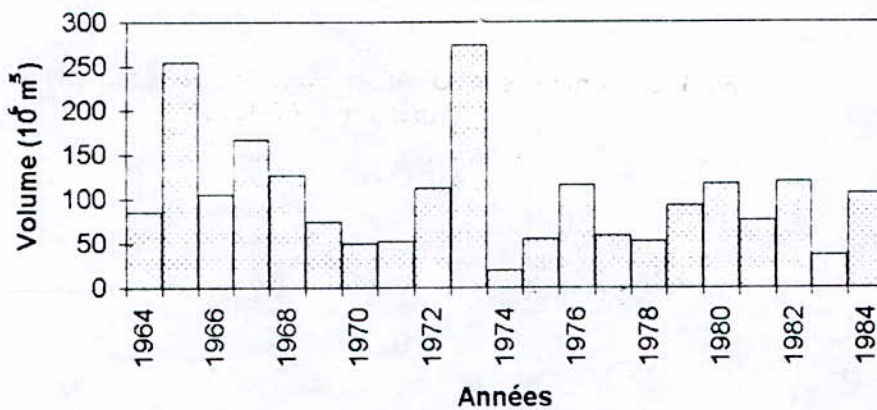


Fig.161- Barrage d'ERRAGUENE. Apports liquides annuels au barrage (periode 1964-1984)

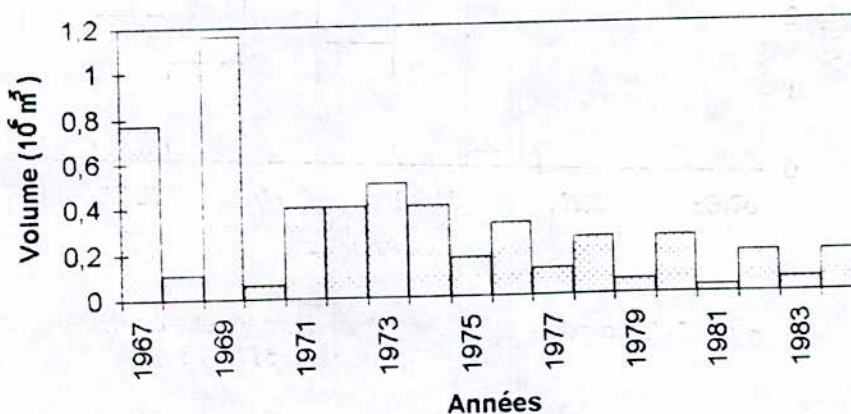
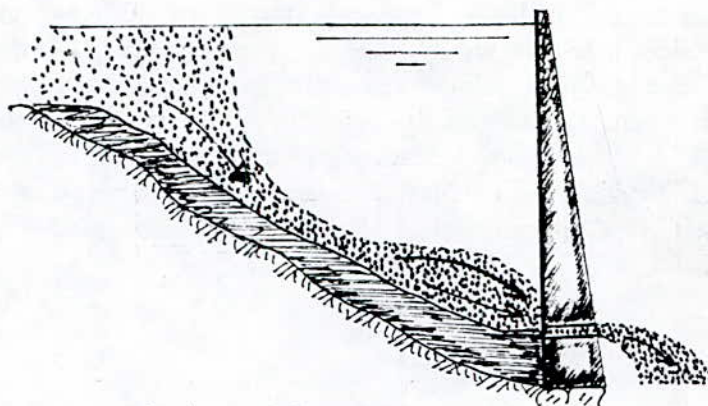
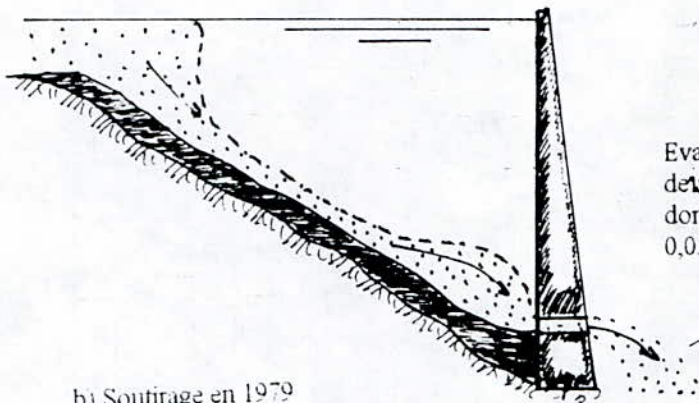


Fig.162- Barrage d'ERRAGUENE. Quantités de vases annuelles soutires au niveau du barrage (periode 1964-1984)



Evacuation d'une quantité de mixture de $11,8 \cdot 10^6$ de densité de 1,060, ce qui a donné un volume de vase égal à $1,18 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

a) Soutirage en 1969



Evacuation d'une quantité de mixture de $1,15 \cdot 10^6$ de densité 1,026 ce qui a donné un volume de vase égal à $0,05 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

b) Soutirage en 1979

Fig.163- La pratique de la technique du soutirage au barrage d'ERRAGUENE

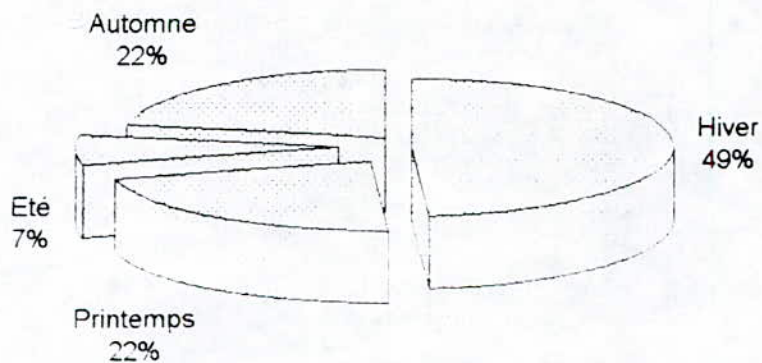


Fig.164- Barrage d'ERRAGUENE. Quantité de vase soutirée saisonnièrement (periode de 20 ans)

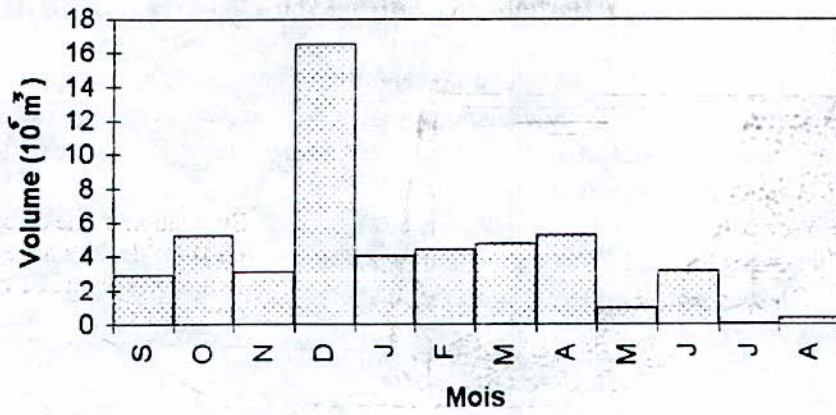


Fig.165- Barrage d'ERRAGUENE. Quantité de vase soutirée mensuellement (période de 20 ans)

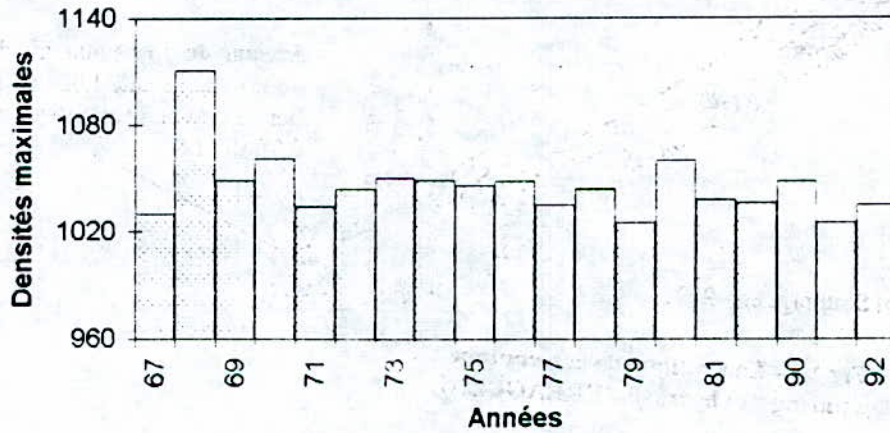


Fig.166- Densités maximales annuelles des suspensions soutirées au barrage d'ERRAGUENE

V.7.2. La pratique de la technique du soutirage dans le barrage d'IGHIL EMDA

Le barrage d'IGHIL EMDA est probablement le premier à avoir été équipé d'un dispositif constitué d'une batterie de vannes installées spécialement pour le soutirage des vases, et complétées par un appareillage permettant de déterminer rapidement l'importance, et la distribution verticale des matières solides aux abords de la prise d'eau.

La batterie est composée de (photo. 49, fig. 167):

- Trois pertuis de dégrèvement de 2,75 m de hauteur et 1,8 m de largeur,
- Huit conduites de dévasement de 40 cm de diamètre dont quatre installées à la cote 471,5 et quatre autres à la cote 469.

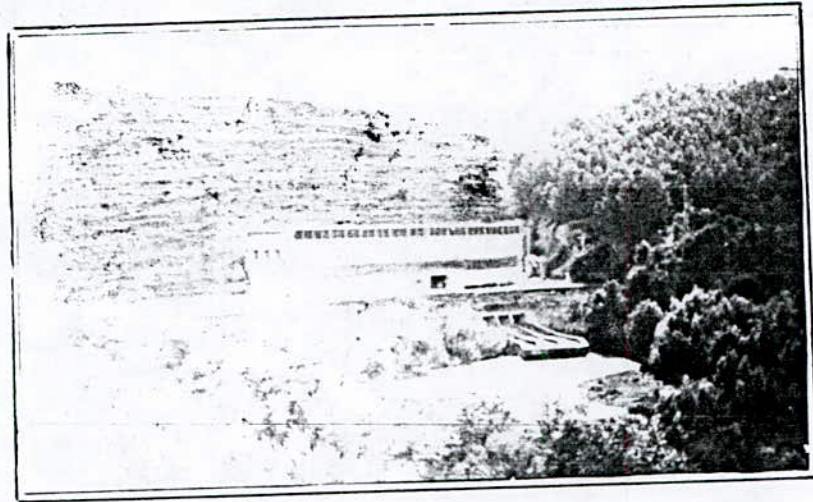


Photo 49- Dispositif du soutirage des sédiments

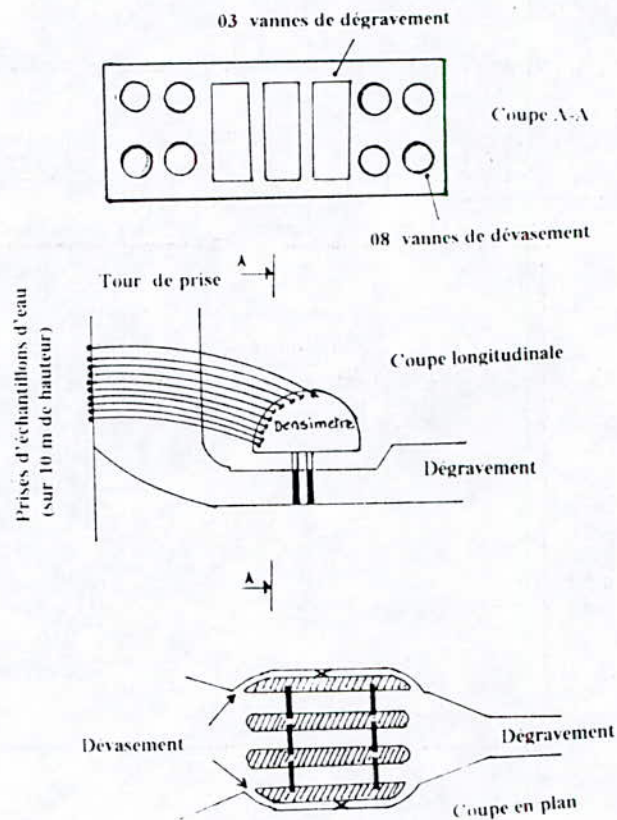


Fig 167- Dispositif du soutirage des vases

a) Le principe du soutirage[130]

Dés qu'on observe au robinet de prise d'eau, situé au dessus de la cote 469,5 (soit 50 cm au dessus du seuil des vannettes), une densité de l'ordre de **1,020 à 1,025**, on ouvre une vannette pour amorcer l'écoulement des couches inférieures. On évite ainsi l'accumulation de vase concentrée devant les vannettes qui rendrait plus difficile par la suite le réglage du débit. On mesure alors, heure par heure, la densité de l'eau soutirée. Tant qu'elle ne dépasse pas **1,050**, il n'y a pas lieu d'ouvrir d'autres vannettes (en effet la vase ne semble pas présenter de rigidité initiale par des densités inférieures à **1,060**), si au contraire la densité dépasse cette valeur, on ouvre les autres vannettes jusqu'à ce que la densité se stabilise à une valeur donnée entre **1,020 et 1,050**. Enfin, dès que la densité commence à diminuer, on ferme les vannes une par une. On arrête les opérations du soutirage lorsque la densité tombe à des valeurs inférieures à **1,020**.

b) Méthode de calcul de la vase soutirée[130]

Sachant d'après les mesures effectuées que la vase de la retenue d'IGHIL EMDA a une masse volumique moyenne de 1600 kg par m³, une mixture (W_m) évacue un volume de vase pure (W_v), et un volume d'eau pure (W_e) tel que : $W_m = W_e + W_v$

On peut écrire aussi que: $\rho_e \cdot W_e + \rho_v \cdot W_v = \rho_m \cdot V_m$

Avec ρ_m : densité de la suspension

ρ_e : densité de l'eau

ρ_v : densité de la vase

On peut aussi retirer la relation:

$$W_v = W_m \cdot (\rho_m - 1) / 0,6 \dots\dots\dots 27$$

qui permet d'évaluer le volume de vase pure soutirée (W_v) à partir du volume du mélange W_m soutiré à une densité ρ_m

Un abaque (fig. 168) permettant d'évaluer le volume de vase soutiré a ainsi été dressé à partir des données des débits et des densités des mixtures prélevées durant les 27 années d'exploitation (1965-1992).

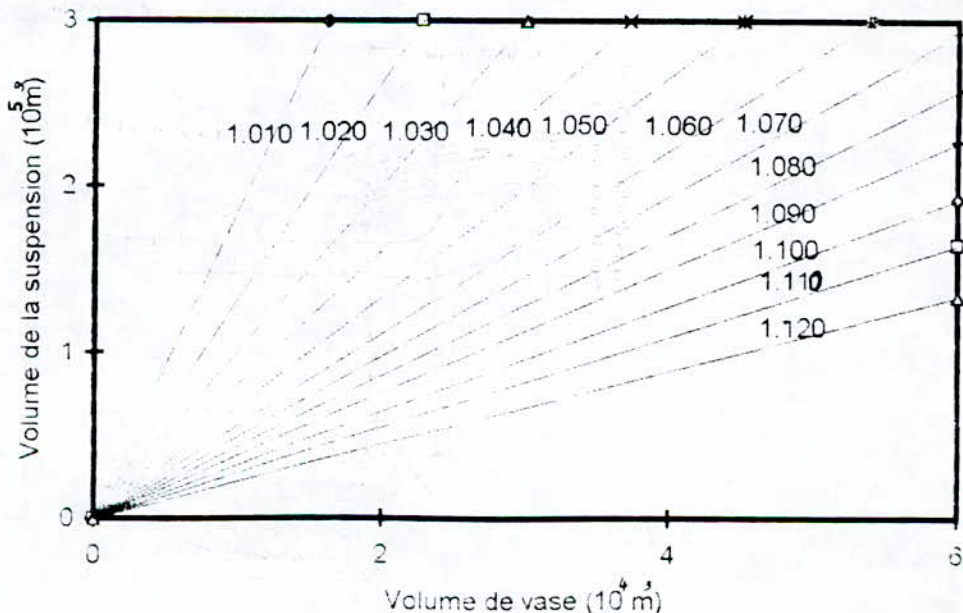


Fig 168. Barrage d'IGHIL EMDA-Abaque d'évaluation de la vase soutirée (periode 27 années)

c) Quantités de sédiments évacués [131][132]

Les plus fortes quantités de vase évacuées annuellement ont été évaluées à $2,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1969 et à $2,05 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1973 (photo. 50 et 51). De ce fait, la quantité de vase soutirée varie considérablement d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre (fig. 169 et 170). Pourtant l'automne est la saison la plus favorable pour le soutirage des sédiments comme le montre les figures 171 et 172: les mois de septembre, et octobre forment une première période où le soutirage des sédiments est fréquent (fig. 173 et 174) à cause d'une forte quantité de sédiments arrachés au bassin versant par le ruissellement des premières pluies tombant sur un sol dénudé et desséché, les mois de décembre et janvier constituant un maximum secondaire, à la suite des pluies arrivant sur un sol saturé.

La densité maximale des courants de densité prélevée au moment de leur arrivés au pied du barrage a été de **1,095** durant l'année 1990 (fig. 175).

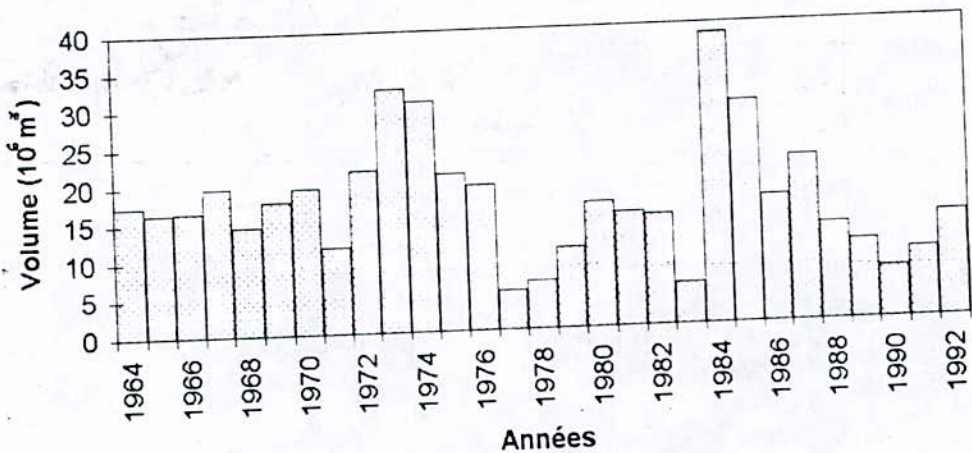


Fig. 169- Barrage d'IGHIL EMDA. Apports liquides annuels dans la retenue (période 1964-1992)

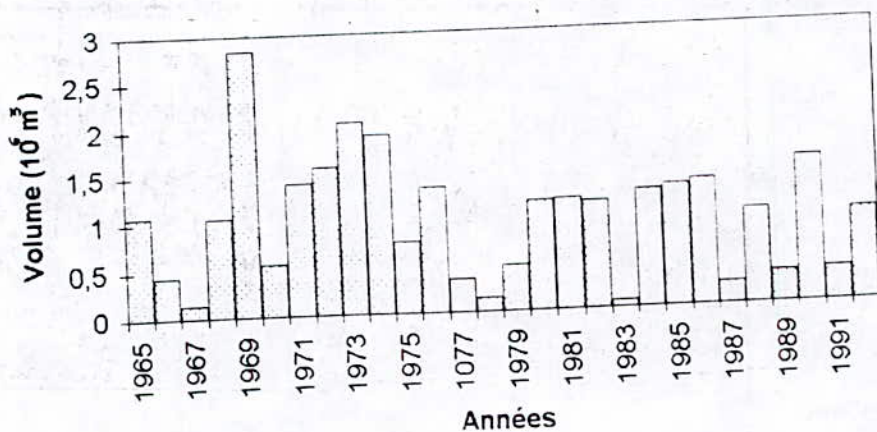


Fig. 170- Barrage d'IGHIL EMDA. Quantités annuelles de vases soutirées (période 1965-1992)

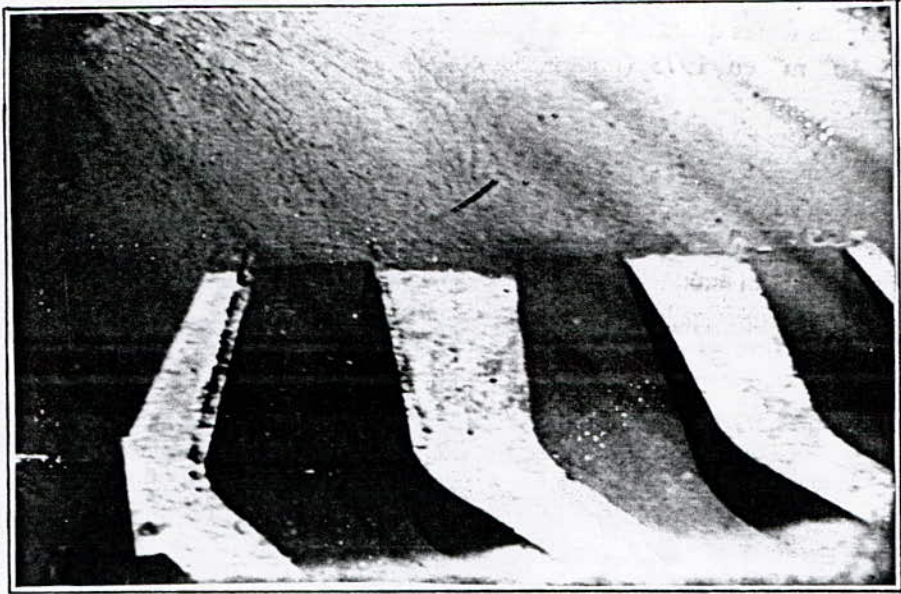


Photo 50- Barrage d'IGHIL EMDA.
Fin d'une opération de soutirage



Photo 51- Aval du barrage d'IGHIL EMDA. Après quelques années, la vase évacuée par le soutirage est colonisée par une abondante végétation

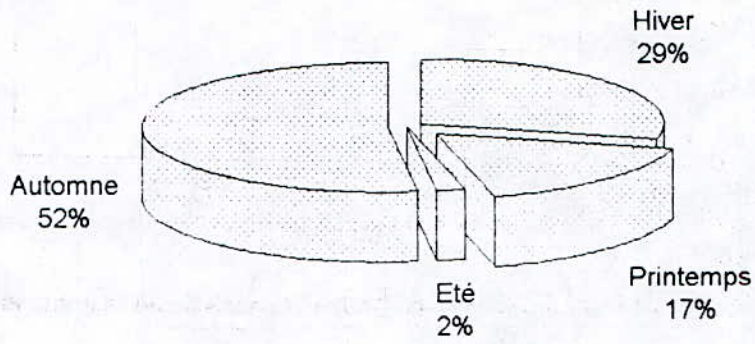


Fig.171- Barrage d'IGHIL EMDA. Apports liquides saisonniers

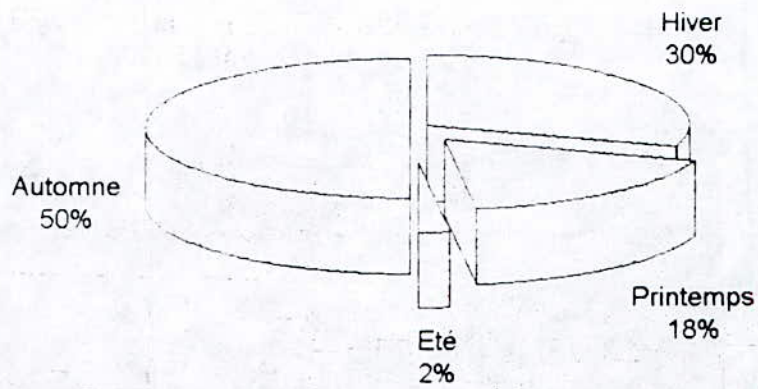


Fig.172- Barrage d'IGHIL EMDA. Quantité saisonniere soutirée

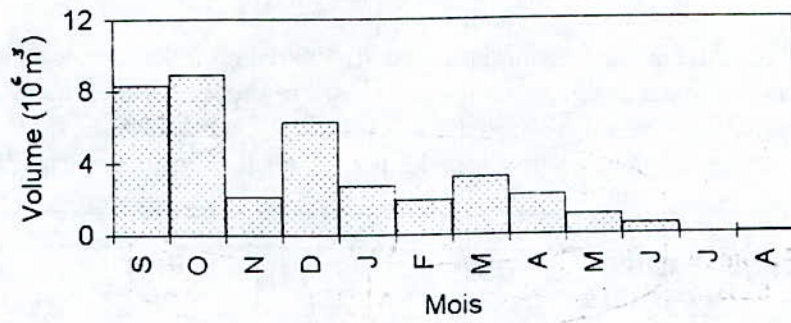


Fig.173- Barrage d'IGHIL EMDA. Apports liquides annuels (période 1965-1992)

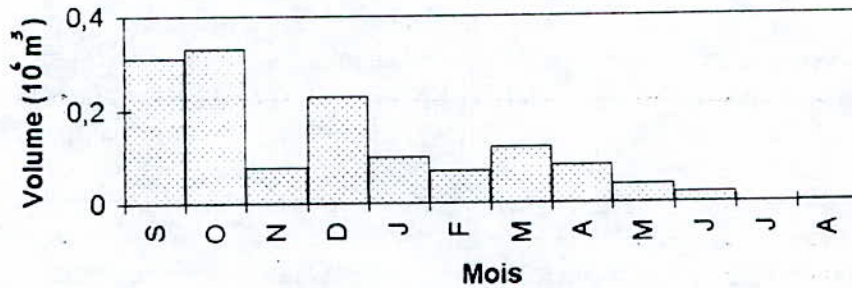


Fig.174- Barrage d'IGHIL EMDA. Quantité mensuelle de vase soustrée (période 1965-1992)

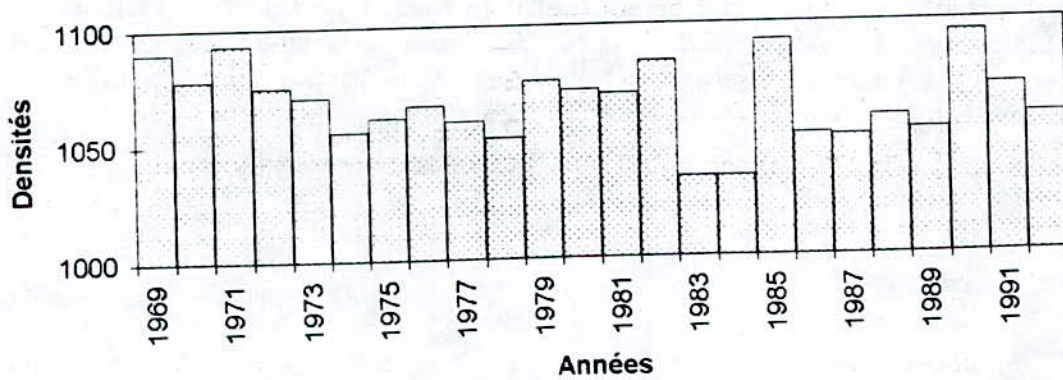


Fig.175- Densités maximales annuelles des mixtures soustrées au barrage d'IGHIL EMDA

V.7.3. Granulométrie des sédiments évacués[131][132]

Pour connaître les particules solides drainées par les courants de densité et évacuées par les pertuis de vidange, nous avons mené des analyses granulométriques sur plusieurs échantillons prélevés au niveau des vases soutirées des barrages: IGHIL EMDA, OUED EL FODDA, GHRIB, FERGOUG et ZARDEZAS. Ces analyses ont donné en moyenne les pourcentages suivants (tableau 26):

Nature des particules	Vase				
	GHRIB	OUED FODDA	EL FERGOUG	IGHIL EMDA	ZARDEZAS
Argile ($\phi < 2\mu$)	46 %	36 %	38 %	8 %	34 %
Limon ($2 < \phi < 20$)	45 %	48 %	42 %	75 %	59 %
Sable fin ($20 < \phi < 200$)	9 %	16 %	20 %	17 %	7 %

Tableau 26- Analyses granulométriques des vases soutirées

D'après ces valeurs, le soutirage concerne surtout les particules fines (argiles et limons) inférieures à $20\mu\text{m}$ (environ 80 %) et une faible quantité de sable fin (inférieur à $200\mu\text{m}$). Signalons enfin que selon une étude faite par **DUQUENNOIS H.** (1953).[92] sur la granulométrie de la vase soutirée au niveau du barrage d'IGHIL EMDA, les sédiments ne dépassent pas $200\mu\text{m}$. Nos résultats vont ainsi dans le même sens.

Les éléments les plus gros se déposent dans la retenue et sont plus ou moins remaniés suivant la cote du plan d'eau et les crues. L'évacuation de ces éléments grossiers, non cohésifs, qui s'accumulent dans les parties hautes de la retenue n'est possible, dans l'état actuel des techniques, que par l'utilisation coûteuses de moyens mécaniques.

Conclusion

Les résultats enregistrés par cette technique au niveau des barrages algériens sont relativement faibles à l'exception de celui d'Ighil Emda, qui grâce aux manoeuvres des vannettes de fond, des quantités considérables de vase ont été évacuées.

Cet échec est essentiellement dû à la méconnaissance du comportement des courants de densité dans les retenues. Les services d'exploitation continuent à confondre l'évacuation des sédiments par l'utilisation des courants de densité, avec la méthode d'évacuation des sédiments par la vidange de fond à réserve pleine. C'est ainsi, que sur l'ensemble des barrages, les manoeuvres des vannes se font toujours après que la consolidation de la vase soit commencée.

V.8. Zone optimale du soutirage

Problématique

Le soutirage des sédiments par les vannes de fond, peut réduire considérablement l'envasement des retenues en mettant à profit la présence des courants de densité, phénomène favorable à l'utilisation de cette technique. Il est même possible d'affirmer que dans les pays arides et semi arides, cette utilisation devrait être la règle. Or force est de constater que le soutirage est mal pratiqué en Algérie malgré la présence des courants de densité dans la majorité, sinon l'ensemble des retenues, ce qui a engendré des pertes considérables d'eau claire dans certains barrages, ou une évolution rapide de l'envasement dans d'autres provoquant ainsi leur abandons comme pour CHEURFAS I en 1966, ou le blocage de la vanne de fond comme pour OUED EL FODDA en 1948.

Cette idée n'est pas nouvelle, et **DESSOLIERS H.** [133] [7] avait dès 1908 parfaitement défini ce qu'il fallait faire: «Au lieu de laisser les vases s'accumuler, se tasser, se durcir, puis s'acharner à les extraire, ce qui sera d'autant plus coûteux que l'on aura attendu plus longtemps, il faut après chaque crue, pendant qu'elles sont encore semi fluides, les évacuer immédiatement par un égout de fond ». Il est à noter qu'à cette époque l'auteur n'a pas trouvé audience. Allant dans le même sens, **DUQUENNOIS H.** (1954) [68] a montré que les soutirages qui ne se font pas dès l'arrivée du courant de densité auront un rendement plus élevé, mais que la quantité totale des sédiments sera inférieure à celle du soutirage immédiat. Il a affirmé aussi qu'il n'est pas nécessaire de soutirer des mélanges très denses, au risque de ne pas évacuer le maximum possible de la vase [79]. Le même auteur avait dès 1949 [134] estimé que si on pratique l'ouverture des vannes de fond lorsque la consolidation est avancée, on évacue de l'argile et de la vase de densité élevée (plus de 1,350) mais en faible quantité, on arrive rapidement à l'eau claire.

V.8.1. Influence de la concentration en éléments fins sur le « Facteur de pression » [135].

Le facteur de pression est défini comme étant le rapport entre la variation de la densité ($\Delta\rho = \rho_m - \rho$) et la densité de la suspension ($\Delta\rho / \rho_m = (\rho_m - \rho) / \rho_m$). Il caractérise la force motrice du courant de densité et est un paramètre principal du soutirage.

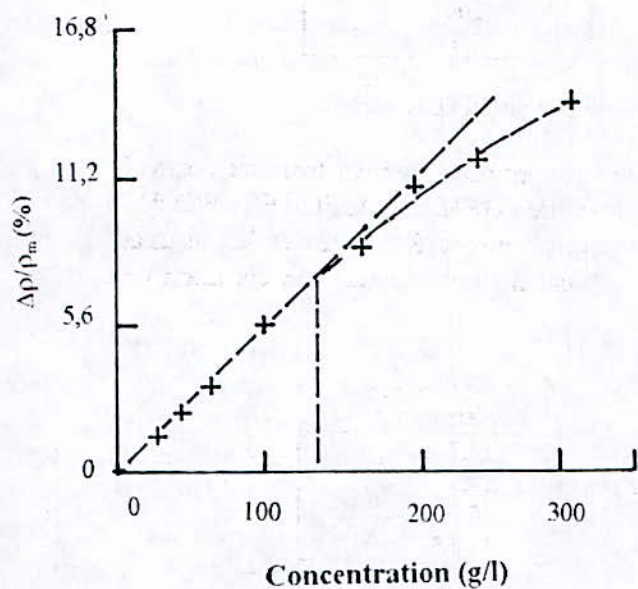
Plus $\Delta\rho / \rho_m$ est élevé, plus l'évacuation des sédiments sera importante et la perte d'eau sera faible, et il ne doit pas dépasser une valeur limite de la concentration qui dépend de la nature et de la granulométrie de la vase.

Selon **DUQUENNOIS H.** (1944) [136], si les vases restent accumulées pendant de longs mois sous l'eau, leur densité augmente en tendant vers une limite. Leur viscosité augmente très sensiblement et bien qu'il s'agisse encore de fluide, la viscosité est telle que l'écoulement ne peut se faire qu'avec de très fortes pertes de charge ». Cette hypothèse a été confirmée par **DROUHIN et al.** (1951) [67].

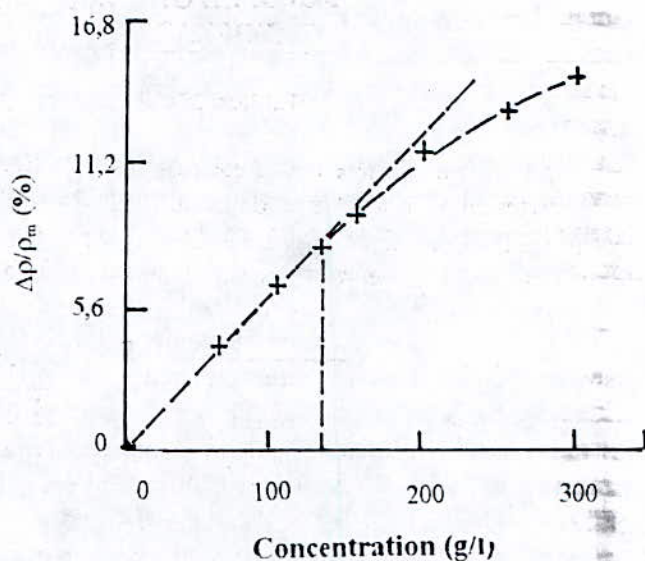
Nous avons étudié l'évolution du « facteur de pression » en fonction de la concentration des sédiments sur des échantillons de vase évacuée par les pertuis de vidange des barrages de GHRIB, OUED EL FODDA, ZARDEZAS et FOUM EL GHERZA. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 176 (a à d): on constate que le « facteur de pression » $\Delta\rho / \rho_m$ évolue linéairement dans une première phase, à partir d'une valeur critique de la concentration, il y a ralentissement de ce facteur, la fonction prenant une forme parabolique.

Les valeurs critiques de concentrations (ou densités) sont consignées dans le tableau 27.

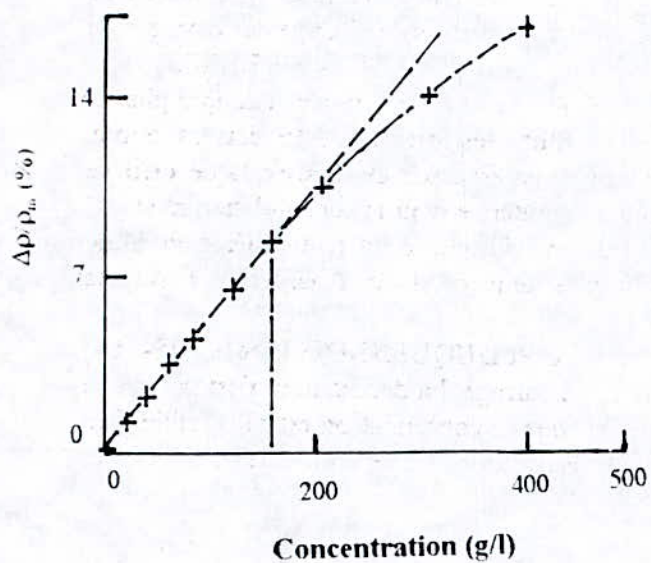
a/Vase de Oued EL FODDA



b/Vase de GHRIB



c/Vase des ZARDEZAS



d/Vase de FOUM EL GHERZA

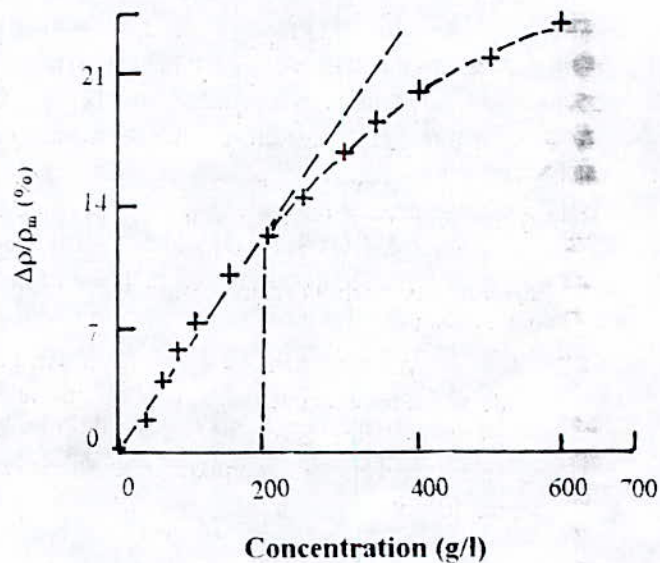


Fig.176 Evolution du « Facteur de pression » en fonction de la concentration

Vases des barrages	Valeurs critiques de la concentration	
	Densité (ρ_m)	Concentration (g/l)
GHRIB	1,096	140
OUED EL FODDA	1,083	137
FOUM EL GHERZA	1,140	200
ZARDEZAS	1,087	156

Tableau 27- Valeurs critiques de la concentration de la vase

La même étude a été faite sur des données de concentration enregistrées au cours de différentes opérations de soutirage dans les barrages de GHRIB, OUED EL FODDA, ERRAGUENE et IGHIL EMDA. Les mêmes interprétations peuvent être faites et les résultats obtenus sont représentés sur la figure 177 (a à d). Les valeurs critiques de concentration (ou densité) sont données sur le tableau 28.

Vase des barrages	Valeur critique de concentration	
	Densité (ρ_m)	Concentration (%)
GHRIB	1,096	14,7 %
OUED EL FODDA	1,082	14,0 %
IGHIL EMDA	1,059	10,5 %
ERRAGUENE	1,070	11,5 %

Tableau 28- Valeurs critiques de la concentration de la vase (enregistrées au cours de différentes opérations de soutirage)

En conclusion, nous pouvons dire que la valeur critique de la concentration correspondant à l'apparition de la rigidité initiale, soit au changement rhéologique de la suspension: ceci veut dire que la suspension passe d'un liquide Newtonien à un liquide non Newtonien.

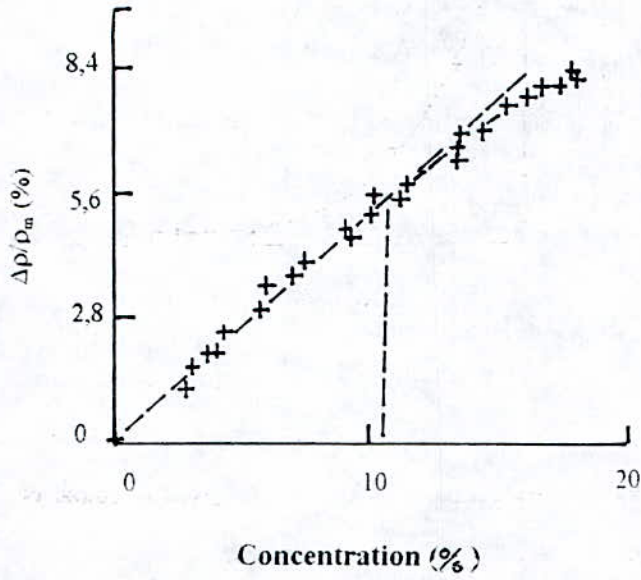
V.8.2. Vitesse de chute des particules fines dans une retenue

Nous avons étudié l'évolution de la vitesse de chute des particules fines en fonction de leurs concentration sur des échantillons de vase évacuée par les pertuis de vidange des barrages de GHRIB, OUED EL FODDA, IGHIL EMDA, FOUM EL GHERZA, ZARDEZAS et HAMIZ.

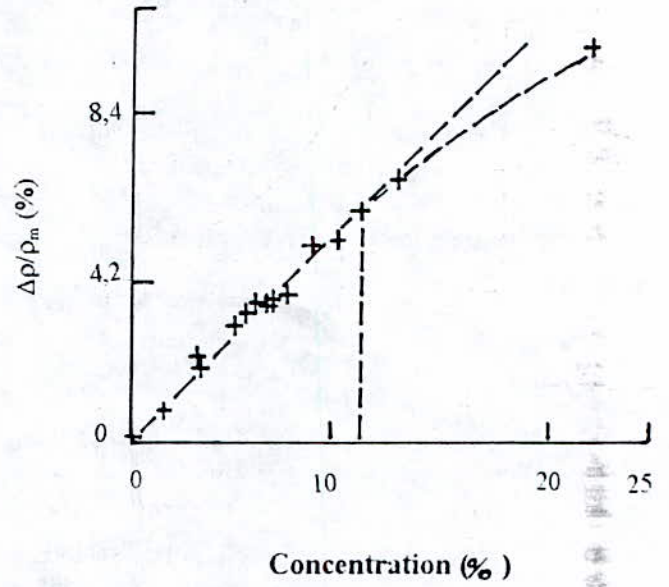
Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 178 (a à e): on constate que plus la densité (ou la concentration) est élevée, plus la vitesse de chute des particules fines devient faible. Ce ralentissement considérable de la décantation aux densités assez élevées, explique qu'il se forme en amont des vannes une couche dense au fond de la retenue dont la consolidation n'est pas immédiate et qui peut encore s'écouler sur la pente du fond. La chose est particulièrement vraie lorsque les dépôts dans les parties avales des cuvettes tendent donc à garder leur surface horizontale.

Avec le temps, ces dépôts finissent par se consolider et **DUQUENNOIS H.** dès 1954 [68] a affirmé que le mélange est quasi immobile aux abords du barrage. La décantation n'est pas gênée par la turbulence. Elle s'exerce d'autant plus rapidement que la concentration est plus faible. Les derniers apports se superposent aux premiers qui, par décantation, libèrent un certain volume et ainsi de suite.

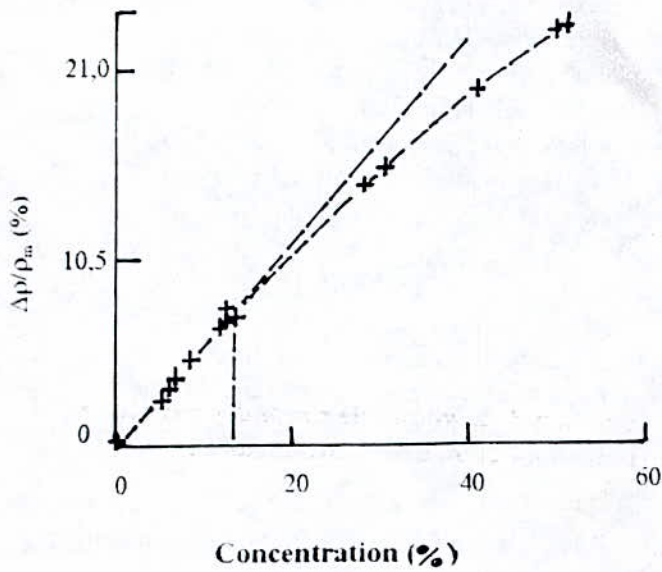
a/ Vase d'IGHIL EMDA



b/ Vase d'ERRAGUENE



c/ Vase de OUED EL FODDA



d/ Vase de GHRIB

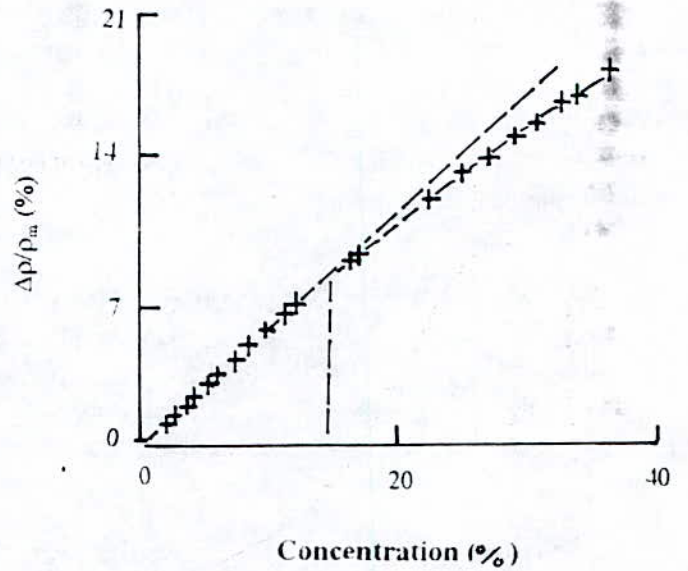


Fig.177- Evolution du « Facteur de pression » en fonction de la concentration, d'après les données des opérations.

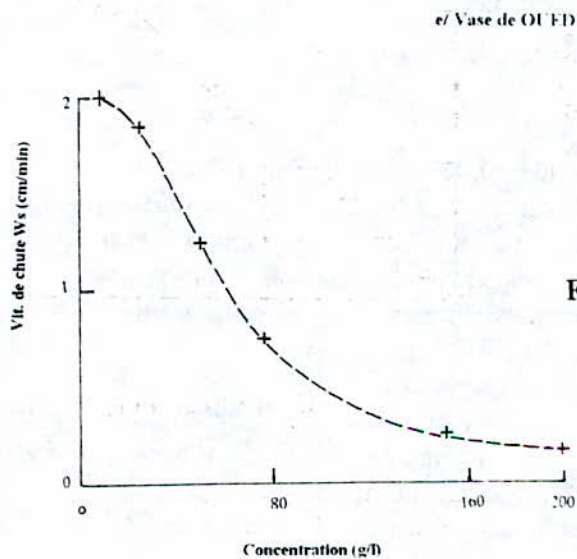
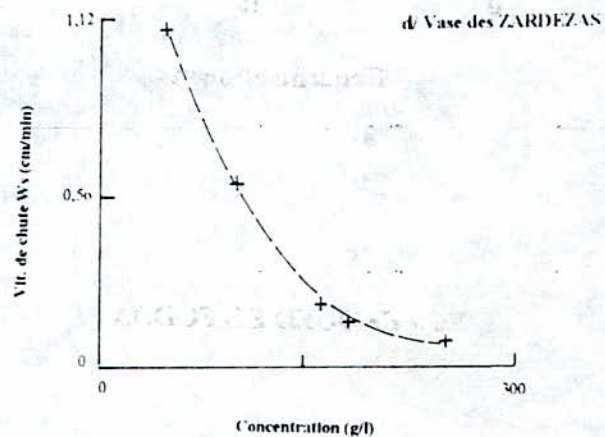
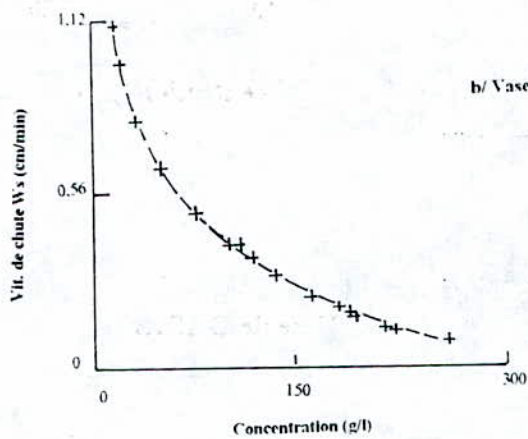
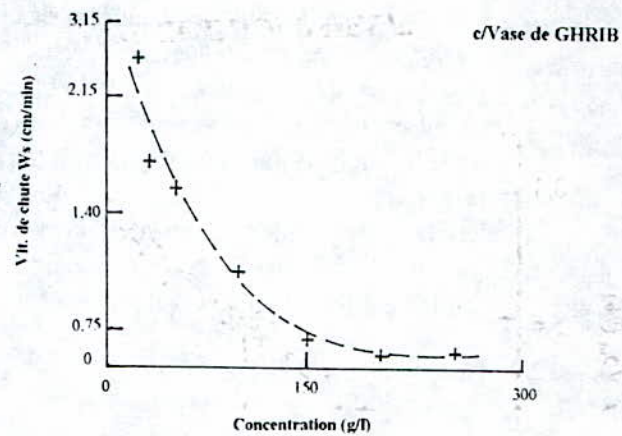
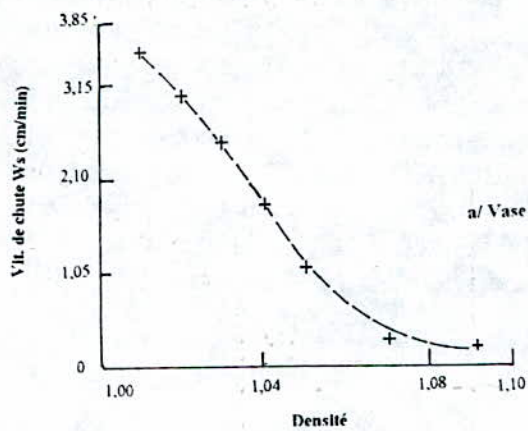


Fig.178-Variation de la vitesse de chute des particules fines en fonction de la concentration

Mais il y'a des vases qui sont restées fluides toute la vie de l'ouvrage. En Algérie c'est bien souvent le cas; le plus bel exemple est celui des CHEURFAS I, un ouvrage complètement envasé, qui après 70 ans d'existence présente toujours une vase non consolidée [67]. La vitesse avec laquelle les dépôts se consolident est fonction de la nature des matériaux transportés et de leur granulométrie. Si les éléments sableux (ou silteux) représentent une forte proportion du dépôt, la consolidation se fera beaucoup plus rapidement, et la vase pourra prendre une consistance telle qu'il faudra l'attaquer à la pioche pour la désagréger. DROUHIN et al [67] ont affirmé que les dépôts se consolident assez vite dans la retenue de FERGOUG, et les dépôts n'ont pas toujours une consistance très fluide. Mais cependant au barrage de l'OUED EL FODDA, la vase se consolide rapidement sous l'eau, ce qui a déjà rendu la vanne de fond non manoeuvrable depuis 1948.

V.8.3. Flux solide dans une retenue [135]

Dans un milieu solide, la décantation est caractérisée par un flux solide (débit massique par unité de surface) symbolisé par la lettre Ψ et qui est obtenu par la relation :

$$\Psi = C. W_s \dots\dots\dots 28$$

Pour différentes valeurs de la concentration, on mesure la vitesse de chute des sédiments. Les résultats obtenus permettent d'établir l'allure de la fonction $\ln W_s = f(\ln e)$ (fig. 179 (a à d)) qui est une droite d'équation :

$$\ln W_s = n \ln(e) + \ln W_p, \text{ d'où : } W_s/W_p = e^n.$$

C'est à dire : $\Psi = C. W_p. e^n$. Le flux dépend uniquement de la porosité « e ». Le flux maximum est obtenu pour une valeur de « e » comprise entre 0 et 1. Il est déterminé par

$$d\Psi/de = W_p [ne^n (1-e) + e^n (-1)] = 0$$

d'où $e = n/(1+n) \dots\dots\dots 29$

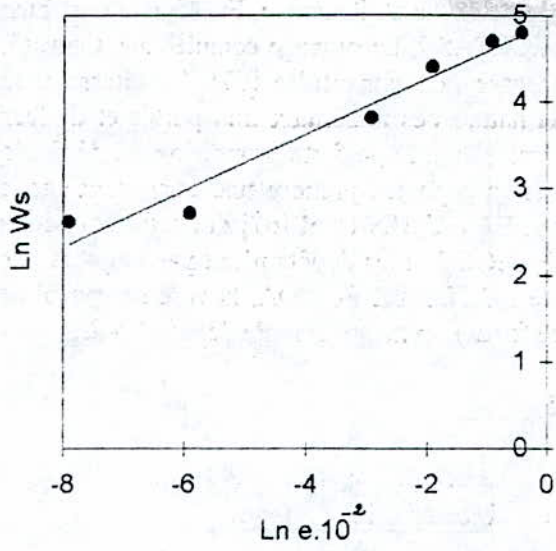
De la même manière, nous pouvons déterminer la valeur de l'indice de porosité « e » correspondant au point d'inflexion (point critique) de la courbe $\Psi = f(e)$

$$d^2\Psi/de^2 = W_p [n(n-1)e^{n-1} - n(n-1)e^{n-2}] = 0$$

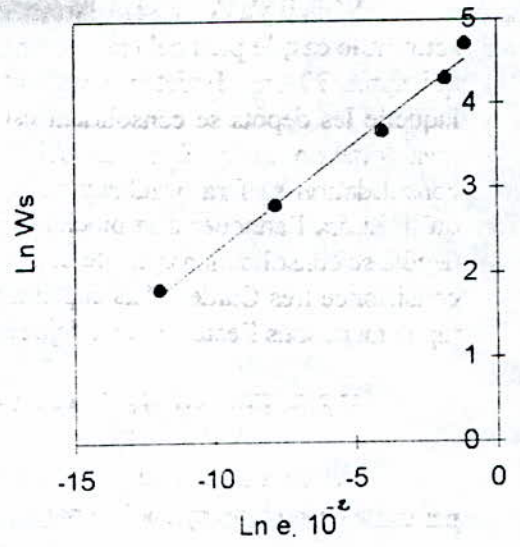
d'où $e = (n-1)/(n+1) \dots\dots\dots 30$

Nous avons étudié l'influence de la concentration en éléments fins sur le flux solide pour des vases soutirées au niveau des barrages de GHRIB, OUED EL FODDA, ZARDEZAS, IGHIL EMDA, FOUM EL GHERZA et HAMIZ. Nous constatons d'après les résultats consignés sur la figure 180 (a à f), que le flux solide suit une loi polynomiale du troisième degré en fonction de la concentration (densités) en sédiments dans la suspension, présentant ainsi un maximum et un point d'inflexion.

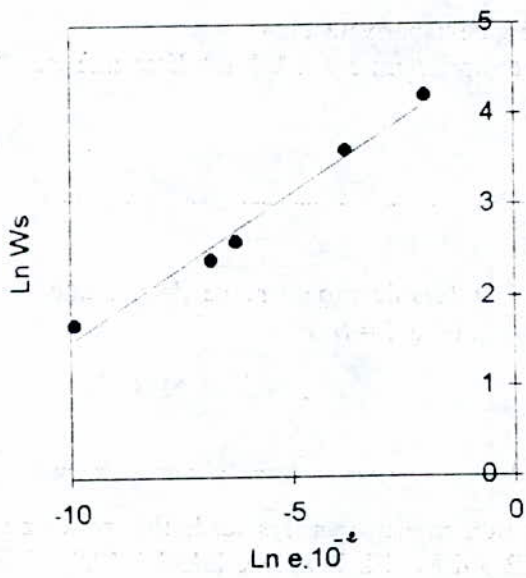
La densité (concentration) de la mixture calculée par la relation de l'indice de porosité $e = n/(1+n) = (1-c)$ correspondant exactement à celle du flux solide maximum, ce qui veut dire qu'en ce point, la décantation des particules fines est importante et qu'il y aura même risque de blocage des vannes de fond, en l'absence de soutirage.



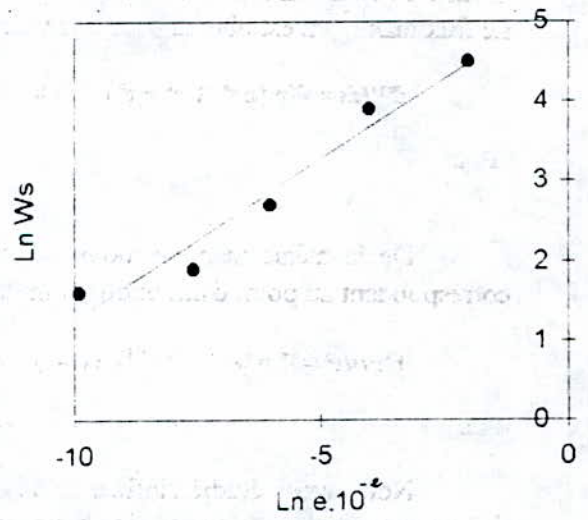
a) OUED EL FODDA



b) FOUM EL GHERZA



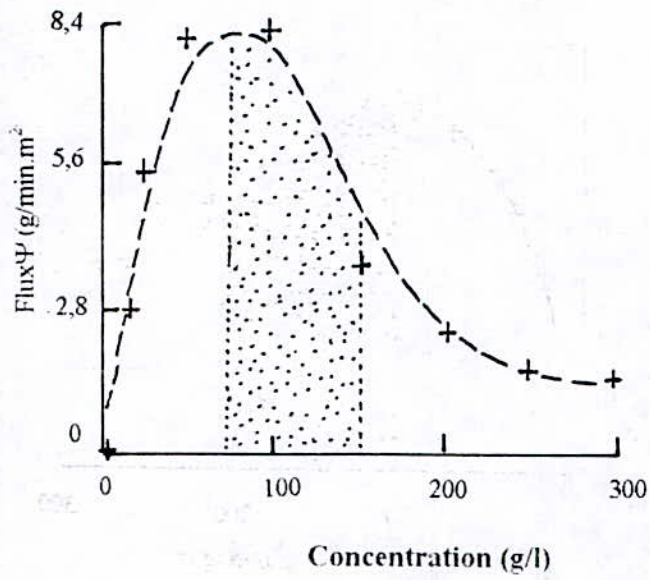
c) ZARDEZAS



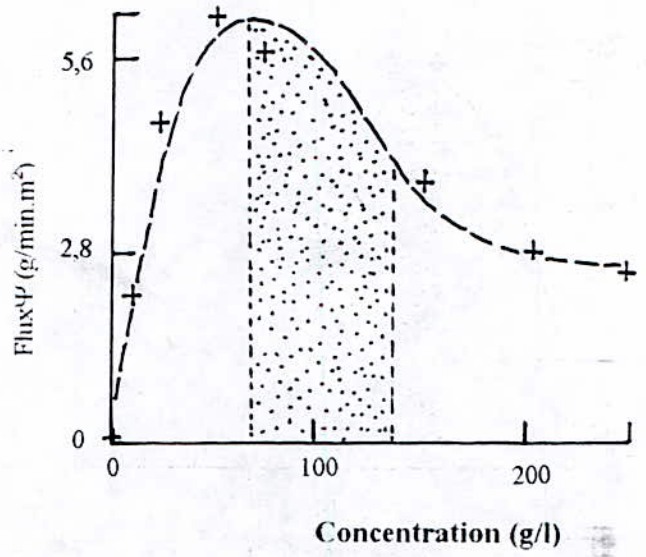
d) GHRIB

Fig 173 - Détermination de la pente « n »

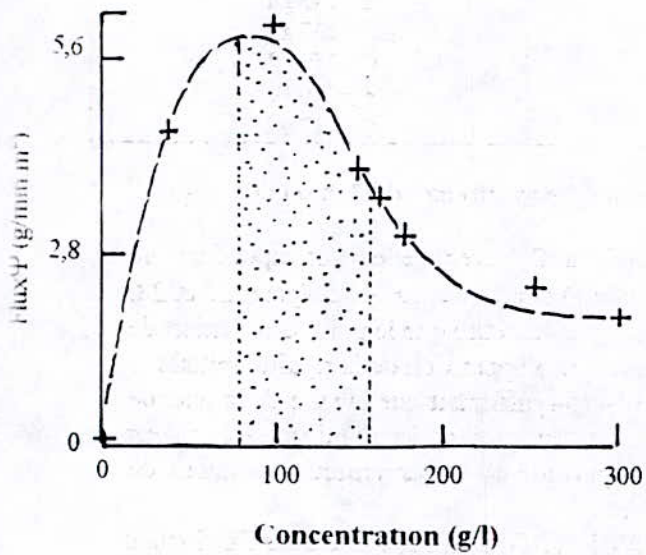
a/ Vase de GHRIB



b/ Vase de OUED EL FODDA



c/ Vase des ZARDEZAS



d- Vase de FOU M EL GHERZA

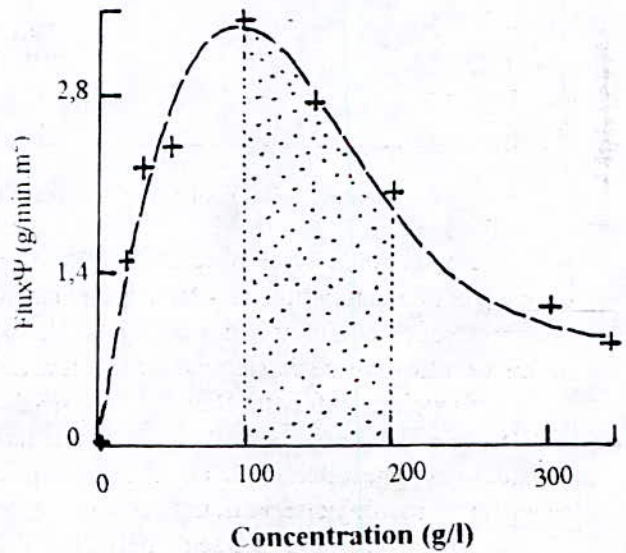
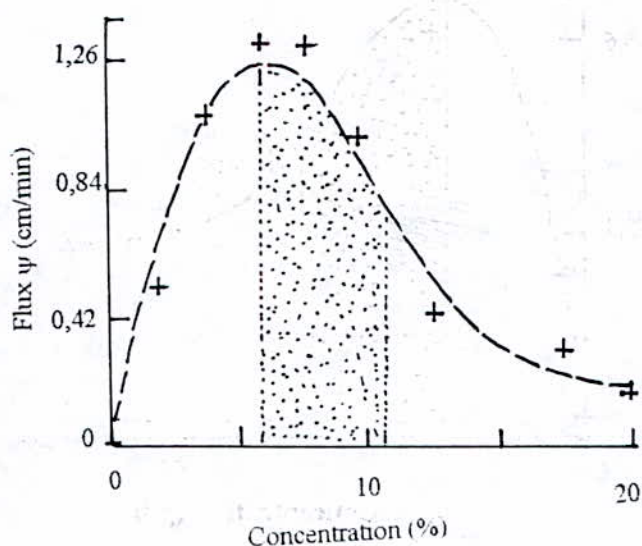
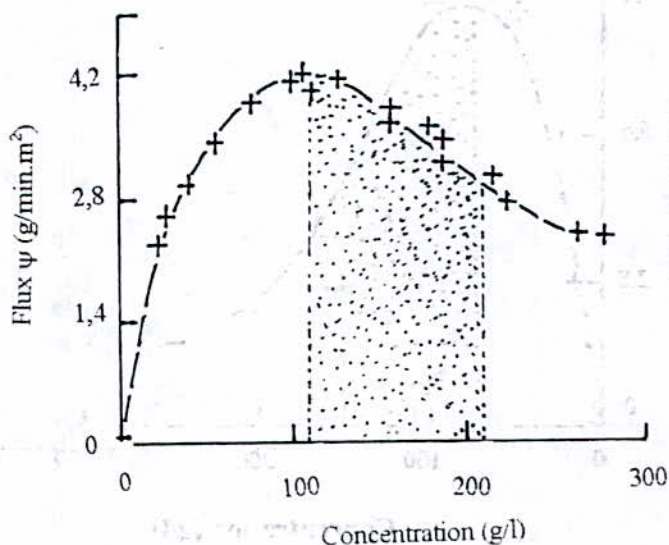


Fig.180-Variation du Flux Solide en fonction de la concentration.

e) Vase d'IGHIL EMDA



f) Vase de HAMIZ



Par contre la densité (ou la concentration) de la mixture calculée par la relation de l'indice de porosité $e=(n-1)/(n+1)=1-c$ correspond à celle du point d'inflexion du flux solide. Les valeurs obtenues pour les vases des six retenues étudiées sont données dans le tableau 29.

Vases des barrages	Densité (ou concentration) du flux maximum	Densité (ou concentration) du point d'inflexion
FOUM EL GHERZA	C= 100 g/l	C= 200 g/l
GHRIB	C= 75 g/l	C= 145 g/l
OUED EL FODDA	C= 67 g/l	C= 137 g/l
ZARDEZAS	C= 78,7 g/l	C= 156 g/l
IGHIL EMDA	$\rho_m = 1,030$	$\rho_m = 1,058$
HAMIZ	C= 110 g/l	C= 213 g/l

Tableau 29 - Concentrations correspondantes au valeurs critiques du flux solide.

En comparant les valeurs des densités du tableau 29 avec celles correspondant au changement de la fonction du « facteur de pression » ($\Delta\rho/\rho_m$) données dans les tableaux 27 et 28, nous remarquons qu'elles sont identiques. Nous pouvons ainsi admettre que le point d'inflexion de la fonction flux solide correspond exactement au point critique d'apparition de la rigidité initiale.

Signalons enfin que **DUQUENNOIS H.**, dès 1954 [54] affirmait que la vase de la retenue d'IGHIL EMDA ne se comporte plus comme un liquide Newtonien si sa densité dépasse la valeur de **1.060**. Nos résultats vont ainsi dans le même sens, puisque la valeur critique du début de changement rhéologique du liquide est pour nous de **1.059**.

Allant dans le même sens, **MIGNIOT C.** et **VALEMBOIS J.** [32] ont étudié l'influence de la concentration en éléments fins sur la rigidité de la vase de HAMIZ. La valeur de la concentration d'apparition de la rigidité (**240 g/l**) se rapproche de la notre (**213 g/l**) (fig. 181).

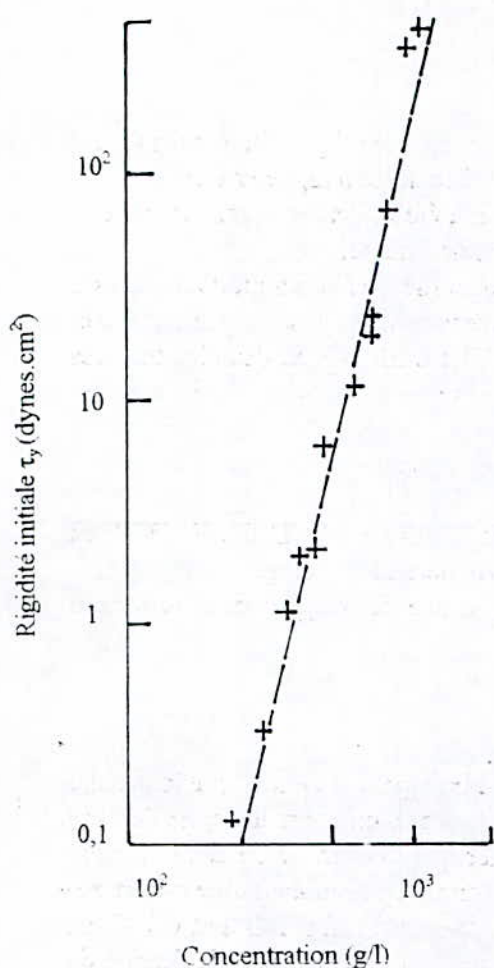


Fig. 181 - Variation de la rigidité initiale de la vase de HAMIZ en fonction de la concentration [C. Mignot et Valembois 1975]

Conclusion

De la présente étude il résulte que:

-dans le cas où le soutirage est exécuté pour des densités (ou concentrations) inférieures à la densité du flux maximum, une quantité de matière solide sera évacuée, avec une proportion d'eau claire beaucoup plus élevée;

-par contre, si le soutirage est exécuté pour des densités supérieures à celle du point d'inflexion, c'est à dire que les vases sont restées accumulées pendant un temps assez long sous l'eau, leurs densités augmentent très sensiblement. La suspension n'est plus un liquide Newtonien, mais plutôt plastique. La viscosité augmente aussi de telle sorte que l'écoulement ne peut se faire qu'avec de très fortes pertes de charges, dans ce cas une faible quantité de vase sera évacuée, mais également un faible volume d'eau.

Donc, nous pouvons définir la zone optimale de soutirage comme étant une zone comprise entre la valeur de la densité du flux solide maximum et celle du point d'inflexion du flux solide.

S'il est ainsi possible d'affirmer que la technique du soutirage des sédiments dans les pays arides et semi arides est une nécessité, elle doit être utilisée efficacement. En effet, pour avoir un bon rendement au niveau du soutirage en évacuant le maximum de vase et un minimum d'eau claire, nous avons montré qu'il existe une zone optimale de soutirage (Z.O.S), c'est à dire que l'évacuation des sédiments doit se faire avec des densités comprises dans cette zone.

V.9. « Bon » soutirage ou « Mauvais » soutirage ? [137]

Problématique

Comme nous l'avons constaté sur l'étude précédente, la technique du soutirage est pratiquée, mais mal maîtrisée sur l'ensemble des barrages en Algérie. Il est à rappeler que:

- dans certains barrages, aucune opération de soutirage n'a été effectuée durant la période des crues, qui est justement favorable à la formation des courants de densité;
- dans d'autres, des soutirages ont été opérés durant la saison sèche (sans apports de crues);
- de nombreuses opérations de soutirage ont été pratiquées au hasard, sans même que soit mesurée la densité de l'eau, sauf dans la retenue du barrage d'IGHIL EMDA où des résultats très encourageants ont été enregistrés: plus de 55 % de la quantité des apports solides ont été soutirés durant la période 1984-1992 [131].

Ces facteurs ont conduit à des conséquences dramatiques tel que:

- l'accélération de l'envasement dans la retenue.
- l'obturation des pertuis de vidange du barrage comme c'était le cas de OUED EL FODDA en 1948, FOUM EL GHERZA en 1982 et ZARDEZAS durant les années quatre vingt.

Faisant suite à ces constatations, nous avons mis en évidence deux types de soutirage, à savoir un « bon » et un « mauvais » soutirage.

V.9.1. Le « Bon » soutirage (fig. 182 a, b et c) :

A l'arrivée du courant de densité au voisinage du pied du barrage, et une fois que la densité de la suspension prélevée est située dans la zone optimale du soutirage, on ouvre la vanne de fond (ou la vannette de dévasement) (photo. 52 et 53). Il est à signaler que l'ouverture de cette dernière est très délicate, et conduit obligatoirement soit à un dépôt de sédiments (dû à une faible ouverture) (fig. 183 a et b), soit à une perte d'eau claire (dû à une grande ouverture) (fig. 183 a et c). C'est pour cette raison qu'en début de l'opération de soutirage, on assiste à des variations de densité de la mixture. Donc après réglage de la vanne, il faudra un certains temps pour que la densité se stabilise et que l'écoulement de la suspension devienne permanent. Une fois la stabilité de la densité de la mixture obtenue (généralement, elle oscille entre des valeurs situées dans la zone optimale du soutirage) (fig. 184 a et b), on essaye de la maintenir le plus longtemps possible en manoeuvrant les vannes avec beaucoup de prudence jusqu'à ce l'écoulement de la suspension devienne pratiquement permanent. Dans ce cas pratiquement, tout le courant de densité sera évacué (photo. 54 et 55), l'évolution temporelle de la vase soutirée devient linéaire (fig. 184 b) et la variation temporelle de la densité de la mixture devient à peu près constante (fig. 184 a).

Le « bon » soutirage » dépend de deux paramètres importants :

- l'importance des débits solides de la crue,
- la bonne manoeuvre des vannes.

Nous pouvons donc définir le « bon soutirage » comme étant un soutirage qui se pratique avec une densité de la mixture appartenant à la zone optimale du soutirage et qui (densité) sera maintenue constante (ou avec de faibles variations) pendant toute la durée de l'opération.

La stabilité de la densité de la mixture au cours d'une opération de soutirage prouve que:

- les sédiments évacués sont drainés continuellement par les courants de densité dans la zone I,

- il n'y a pas de remous du courant de densité près des vannes (photo. 54),
- l'écoulement de la suspension par les pertuis de vidange est permanent.

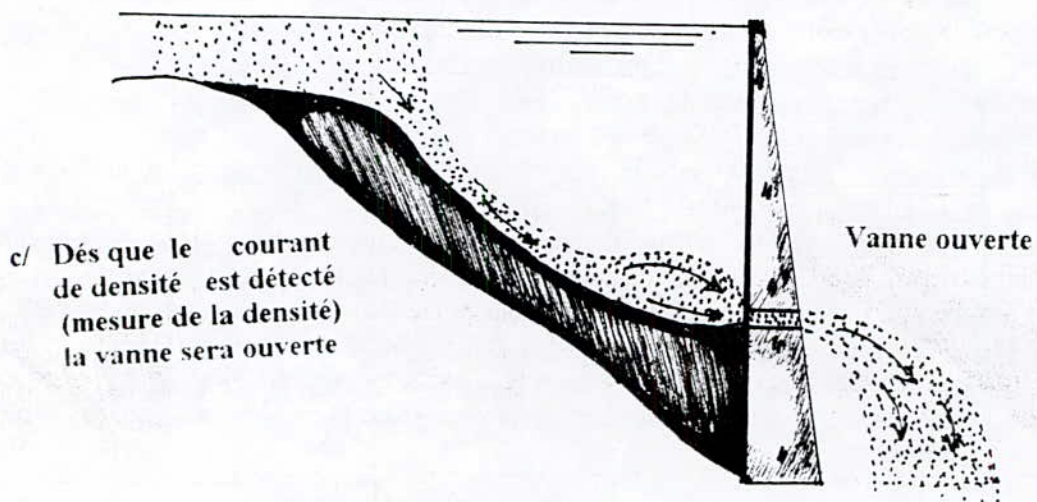
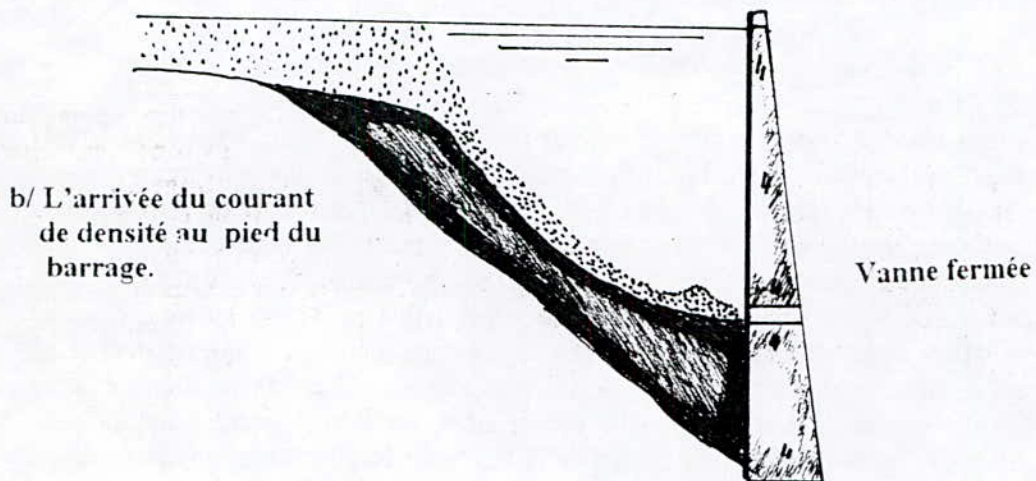
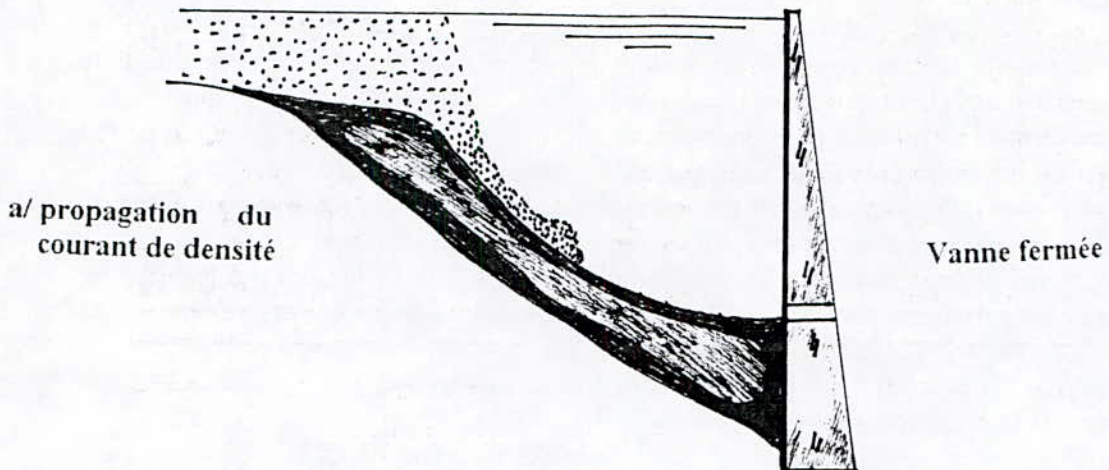


Fig 182-« Bon soutirage »

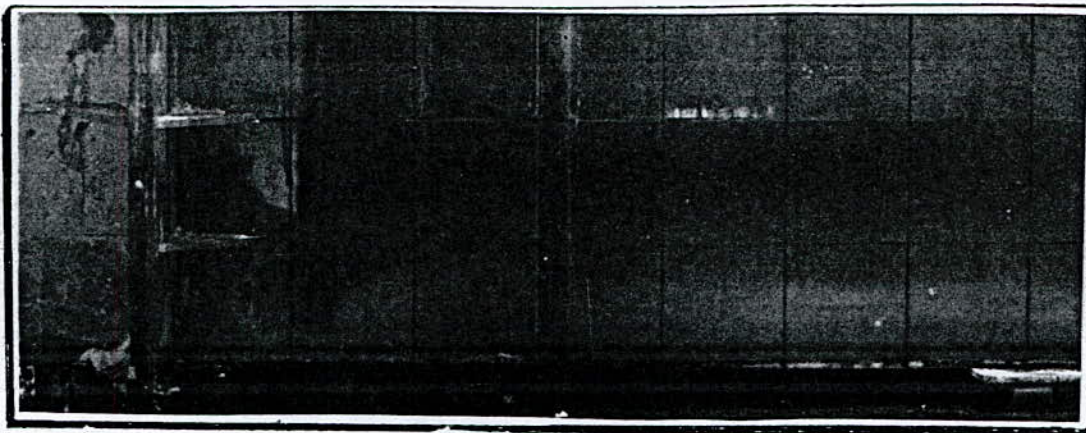


Photo.52 - L'arrivé du courant de densité près de la vanne

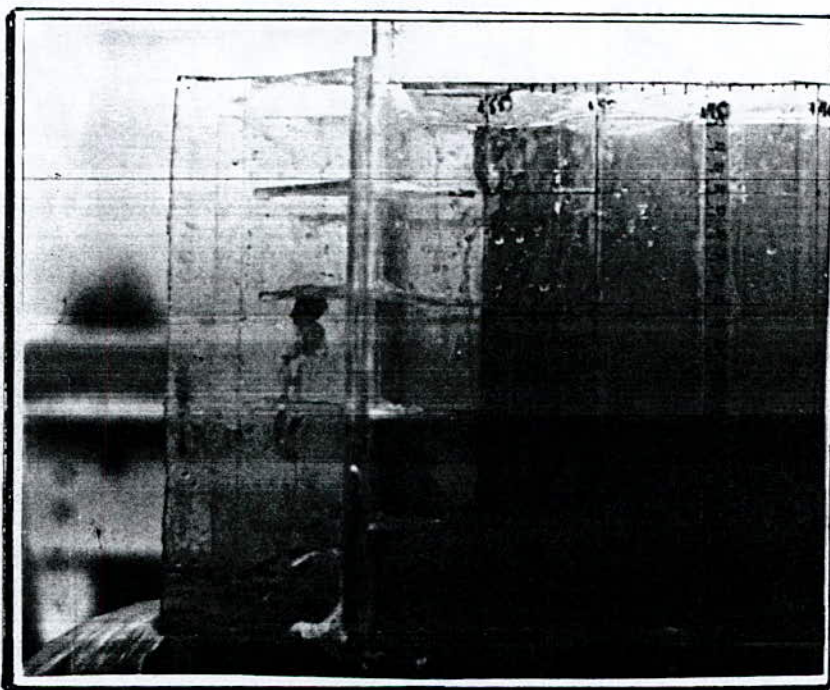
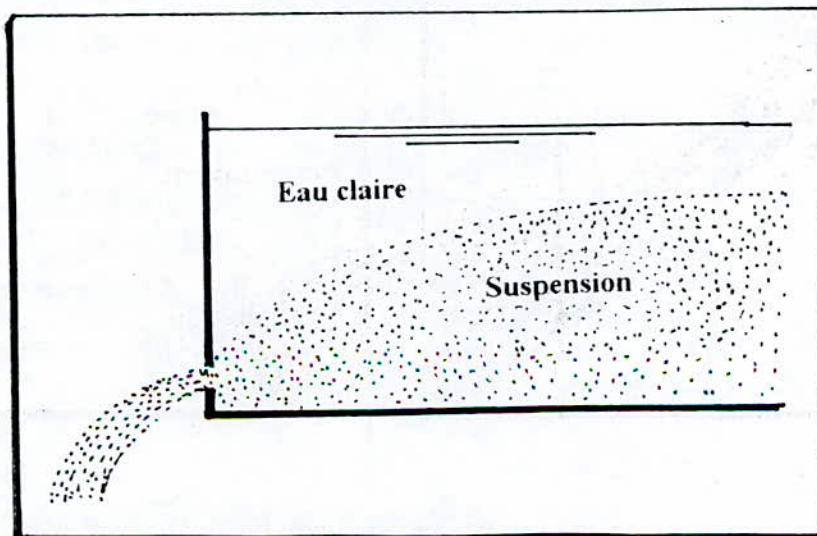
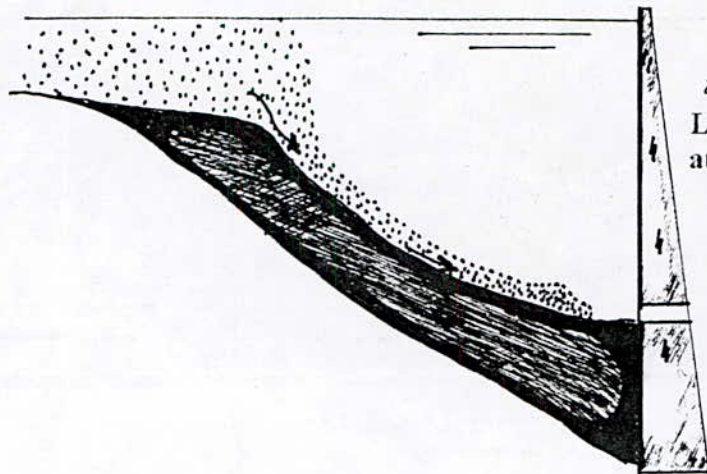
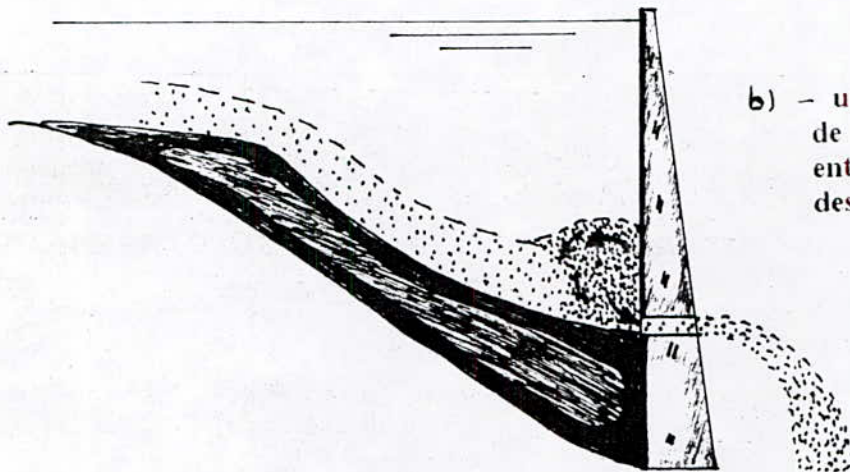


Photo.53 -
L'ouverture immédiate de la vanne entrainera le soutirage du courant de densité et l'écoulement reste permanent jusqu'à son évacuation.

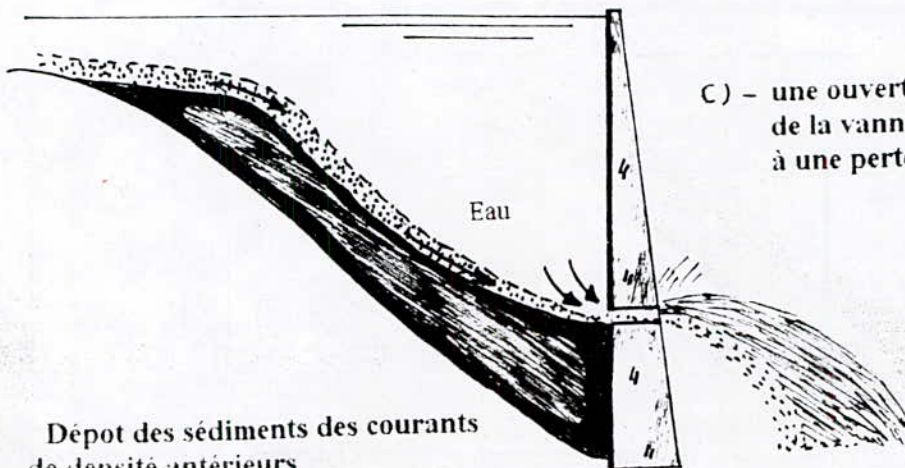




a)
L'arrivé du courant de densité
au pied du barrage.



b) - une faible ouverture
de la vanne peut
entraîner un dépôt
des sédiments.



c) - une ouverture importante
de la vanne peut conduire
à une perte d'eau.

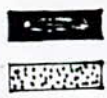
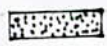

 Dépôt des sédiments des courants
de densité antérieurs

 Sédiments drainés par les courants
de densité

Fig.183- Début de l'ouverture des vannes

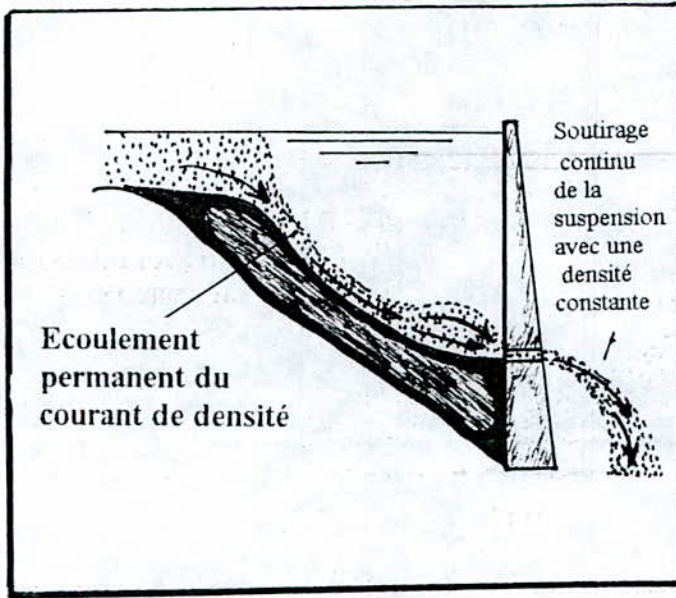
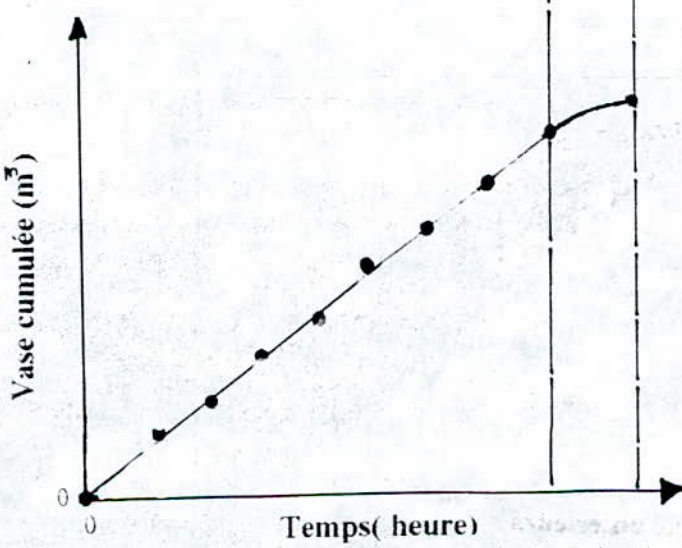
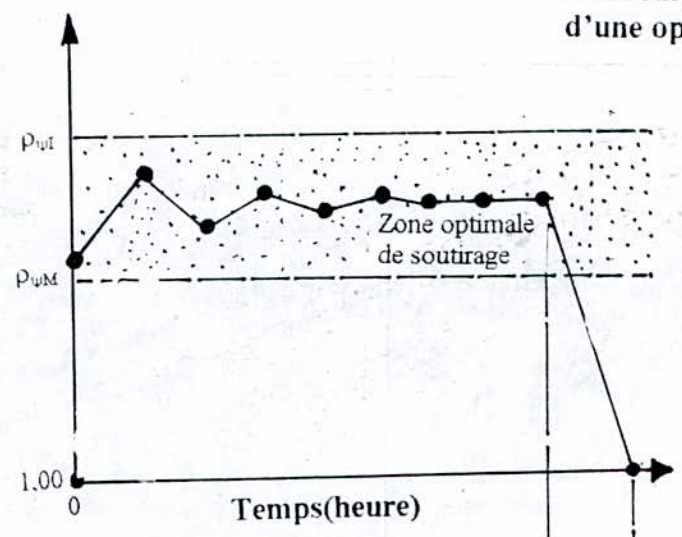
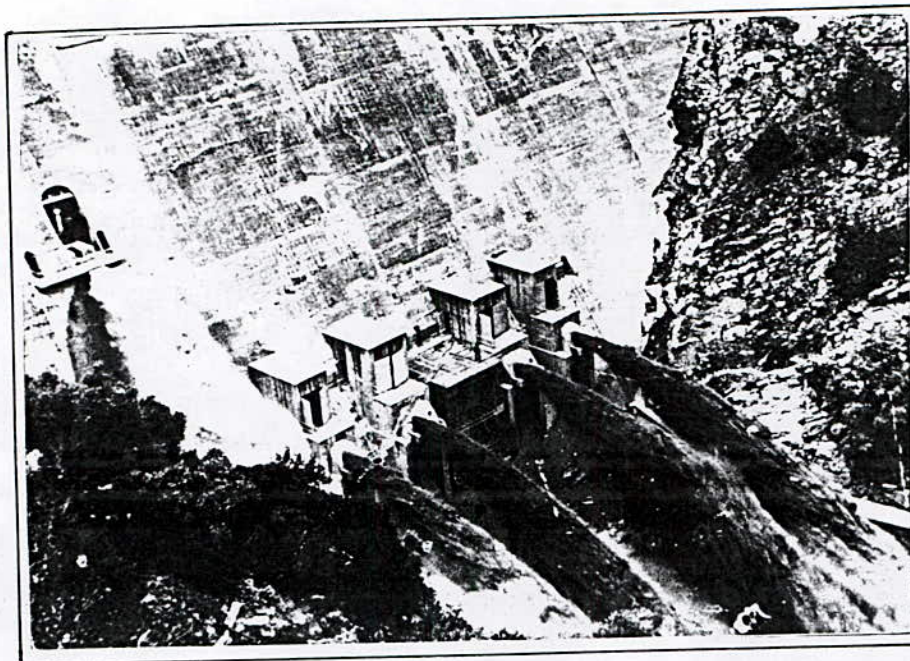


Fig 184- Cas d'un « Bon soutirage »

a/ Variation de la densité de la suspension au cours d'une opération de soutirage



b) Evolution du volume (cumule) de vase soutirée au cours d'une opération de soutirage



Barrage de OUED EL FODDA

Photo 54- Nous pouvons dire que c'est un « Bon » soutirage. La densité de la suspension est située dans la Z.O.S. Les 4 vannettes ont été ouvertes au moment de l'arrivée du courant de densité au pied du barrage, la 5^{ème} vannette située au dessus des 4 évacuant de l'eau claire, ce qui prouve qu'il n'y avait pas d'onde de retour

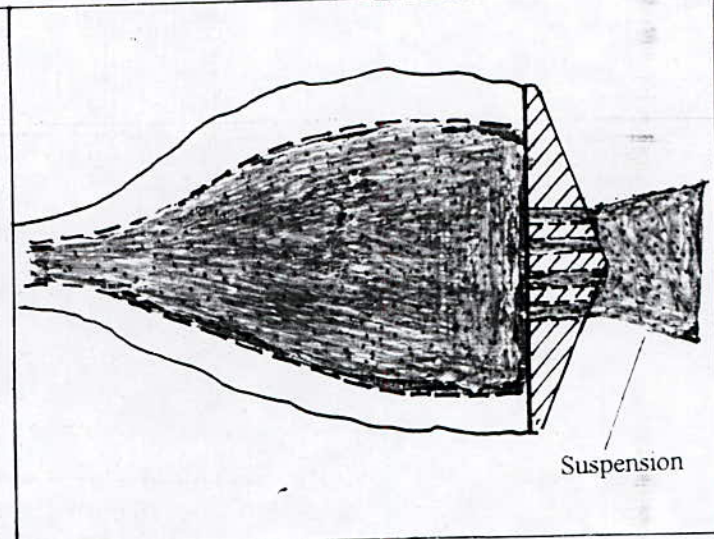
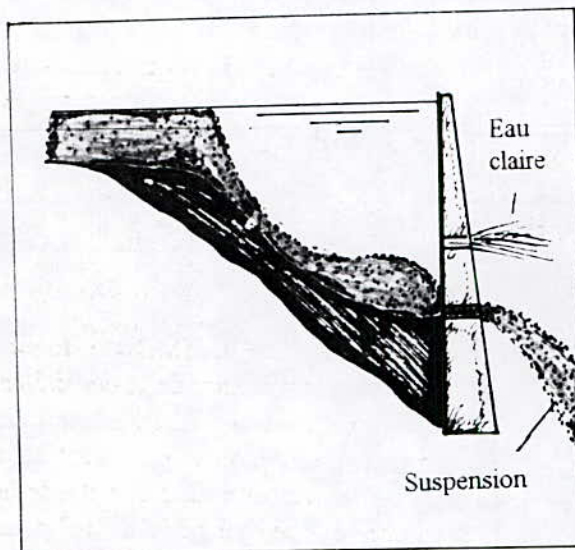


Photo 55- C'est en pratiquant ce type de soutirage qu'on arrive à protéger la durée de vie de nos barrages

V.9.2. Le « Mauvais » soutirage (fig. 185 a, b et c)

En l'absence de soutirage, le courant de densité arrivant dans la zone I de la retenue butte contre le pied du barrage et revient en sens inverse jusqu'à ce qu'il se stabilise (fig. 185 a). Nous sommes donc en présence de deux couches liquides superposées de densités différentes (fig. 185 b). La décantation des particules fines sera suivie d'une consolidation, ce qui entraînera une augmentation rapide de la densité. L'ouverture tardive de la vanne de fond (fig. 185 c) laisse évacuer une faible quantité de suspension de densité très élevée (photo. 56 et 57). On crée dans les dépôts un entonnoir dont la forme ne dépend que du degré de consolidation, et il est absolument indépendant du débit des vannes (photo. 58).

Nous définissons alors le « mauvais soutirage » comme un soutirage qui se pratique:

-avec une densité de mixture n'appartenant pas à la zone optimale de soutirage (fig. 186 a et b).

-avec des variations importantes de la densité de mixture, même si elles appartiennent à la zone optimale de soutirage (fig. 186 c).

V.10. Quelques exemples de types de soutirages pratiqués au niveau des barrages Algériens

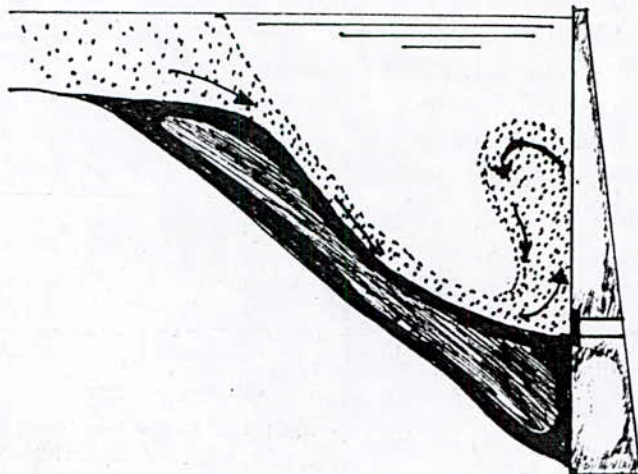
Afin de mieux mettre en lumière et différencier les différents types de soutirages, nous avons traité des exemples d'opérations de soutirages effectuées dans les retenues des barrages d'IGHIL EMDA, ERRAGUENE, GHRIB, OUED EL FODDA et K'SOB.

a) Barrage d'IGHIL EMDA

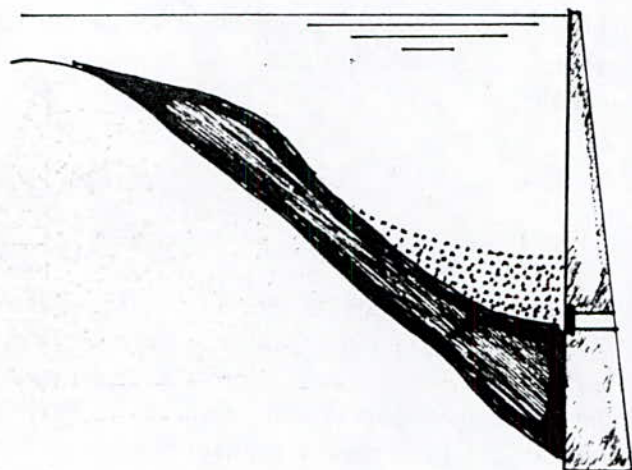
-Soutirage du 22 au 25 décembre 1966 (fig. 187 a et b)

La crue survenue du 22 au 25 décembre 1966 dans la retenue d'IGHIL EMDA a donné naissance à un courant de densité. D'après la figure 187 a représentant la variation de la densité en fonction du temps, la densité de la mixture prélevée le 22 décembre 1966 à 10 heures était de **1,0405**, ce qui justifie l'arrivée du courant de densité dans la zone I (près des vannes). Aussitôt, la vanne a été ouverte et l'opération de soutirage a duré environ **63 heures** avec une densité de la suspension variant entre **1,040** et **1,055**, ce qui a donné un volume de vase égal à **55.10^3 m^3** pour une proportion d'eau égale à **$662. 10^3 \text{ m}^3$** , soit un rapport de **8,3 %** (équivalent à **1 litre de vase pour 12 litres d'eau**) (fig. 187 b).

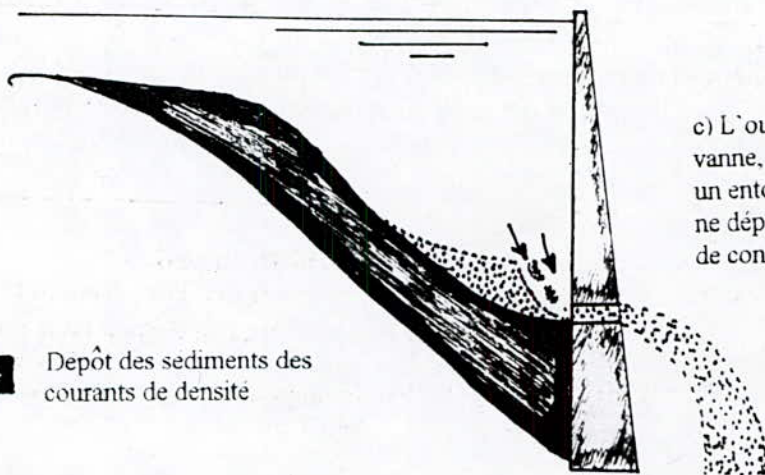
Ce soutirage peut être classé comme « **bon** » soutirage, puisque la densité de la suspension a été gradée presque constante dans la zone optimale du soutirage (**$1,030 < \text{densité} < 1,060$**) durant plus de **60 heures**, et que l'évolution de la quantité de vase (cumulée) évaluée sera linéaire dans le temps considéré.



a) En l'absence du soutirage, le courant de densité butte contre la vanne et revient en sens inverse



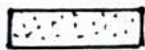
b) Stabilisation du courant de densité, les sédiments se décantent et se consolident



c) L'ouverture tardive de la vanne, crée dans les dépôts, un entonnoir dont les formes ne dépendent que du degré de consolidation



Depôt des sédiments des courants de densité



Sédiments drainés par le dernier courant de densité

Fig.185 - « Mauvais soutirage »

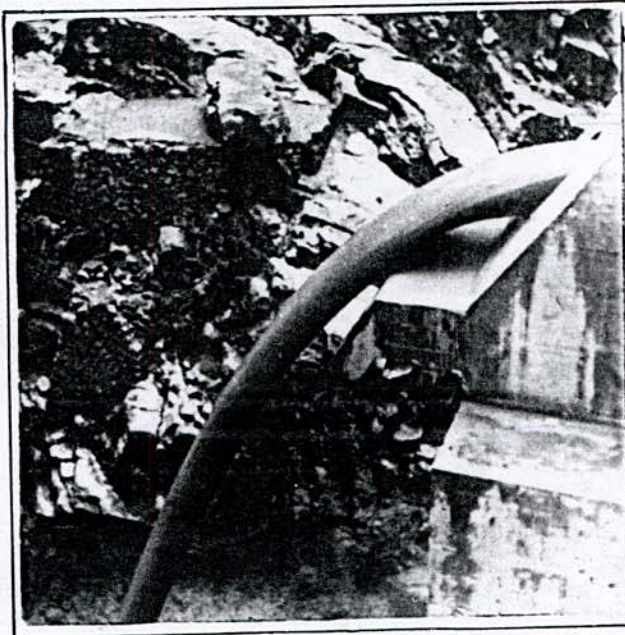


Photo 56- L'écoulement de la suspension à travers un pertuis de dévasement. La suspension est à l'état plastique, sa densité a dépassé 1,2. Elle n'appartient pas à la zone optimale du soutirage. L'ouverture tardive de la vanne a accéléré la décantation des particules fines. C'est un « Mauvais soutirage »

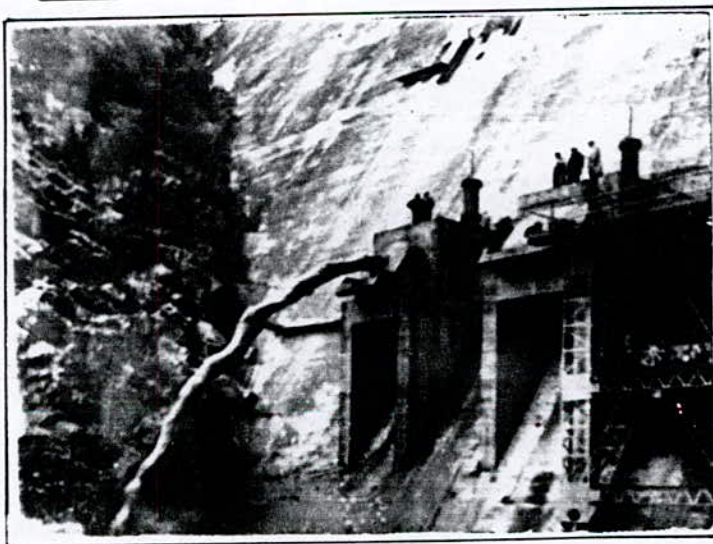
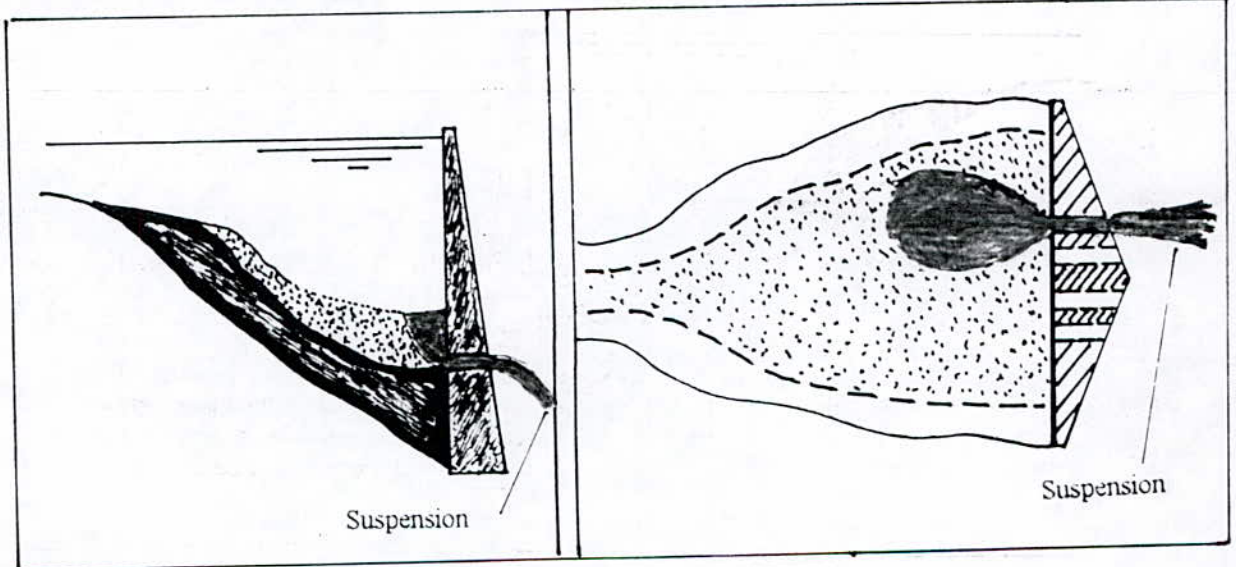
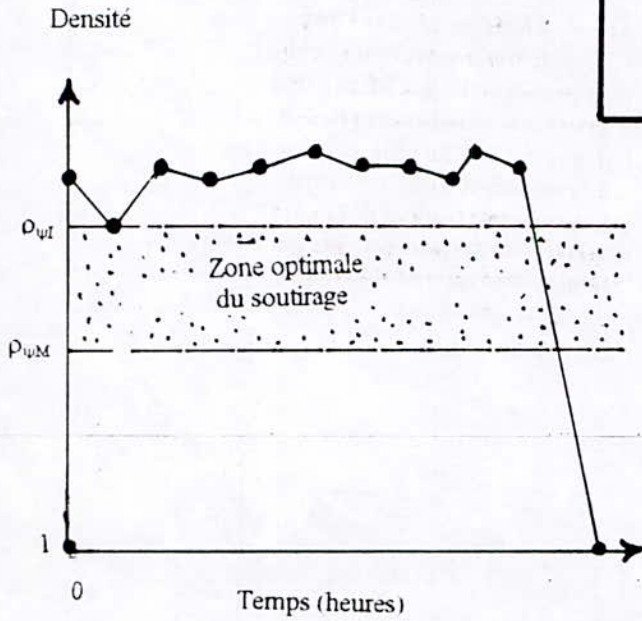
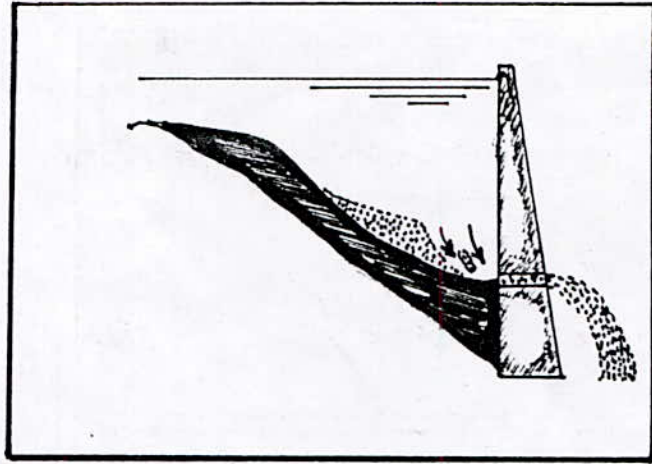
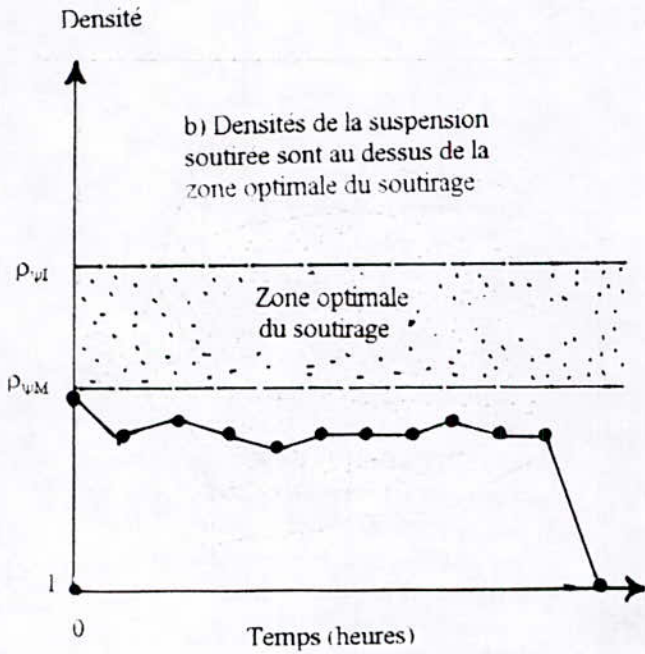


Photo 57- La densité de la suspension est comprise entre 1,090 et 1,200. Il s'agit toujours d'un « Mauvais soutirage ». La continuité de la pratique de ces manoeuvres risque un jour d'obturer la vannette

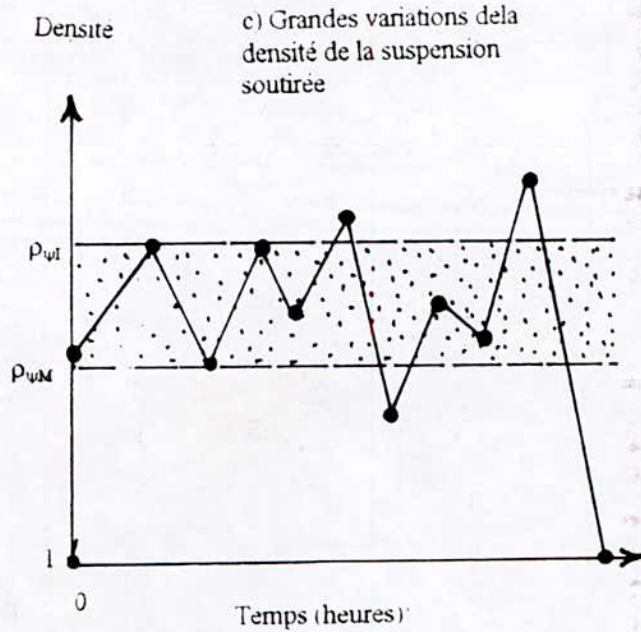
Fig.186- Cas d'un « Mauvais soutirage »
Variation de la densité de la suspension
au cours d'une opération de soutirage



a) Densités de la suspension
soutirée sont au dessus de la
zone optimale de soutirage



b) Densités de la suspension
soutirée sont au dessus de la
zone optimale du soutirage



c) Grandes variations de la
densité de la suspension
soutirée

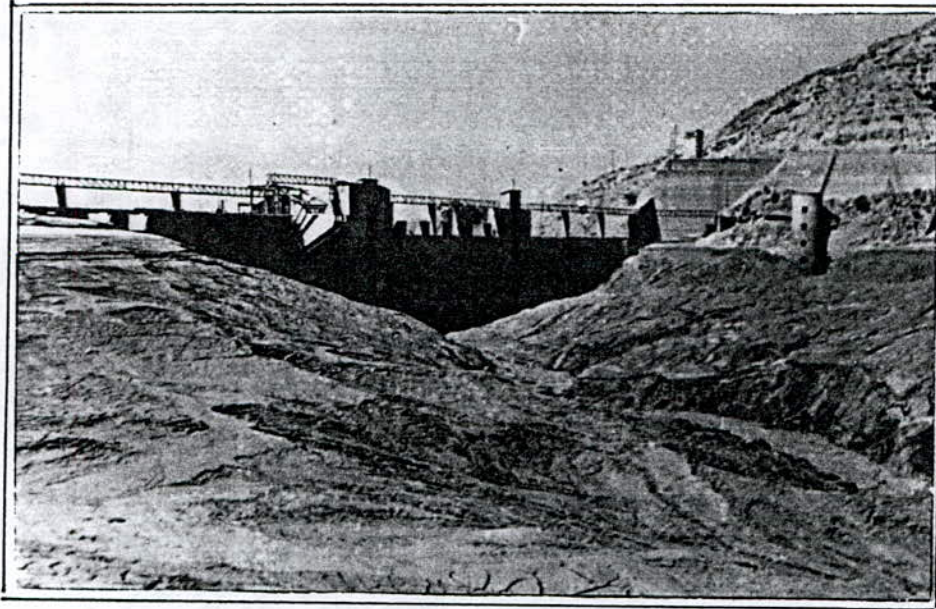
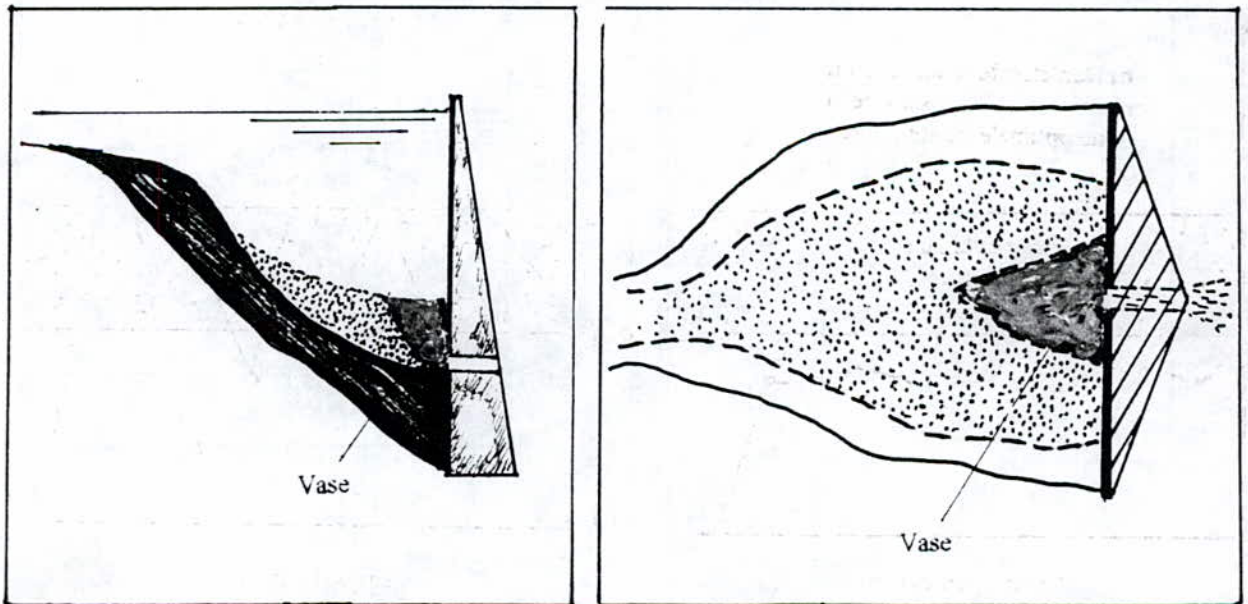



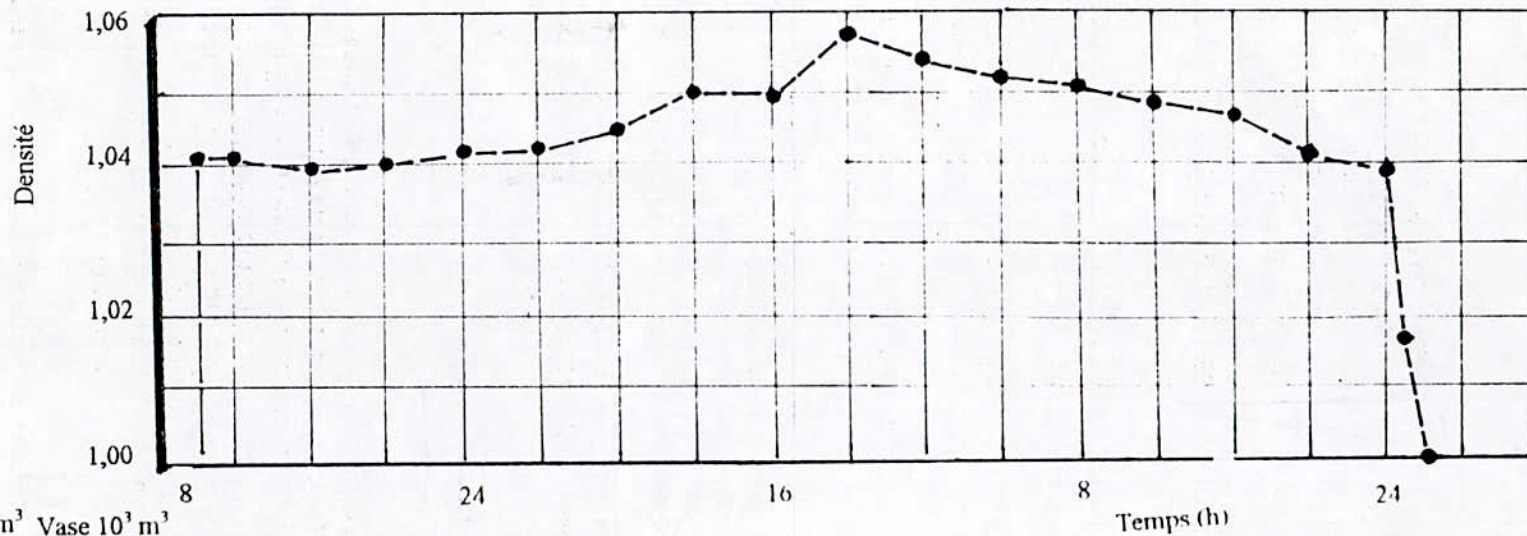


Photo 58- Vidange totale de la retenue du barrage de FERGOUG. La photo montre clairement qu'un cone de vase a été évacué durant plusieurs années de la pratique des « Mauvais soutirage »

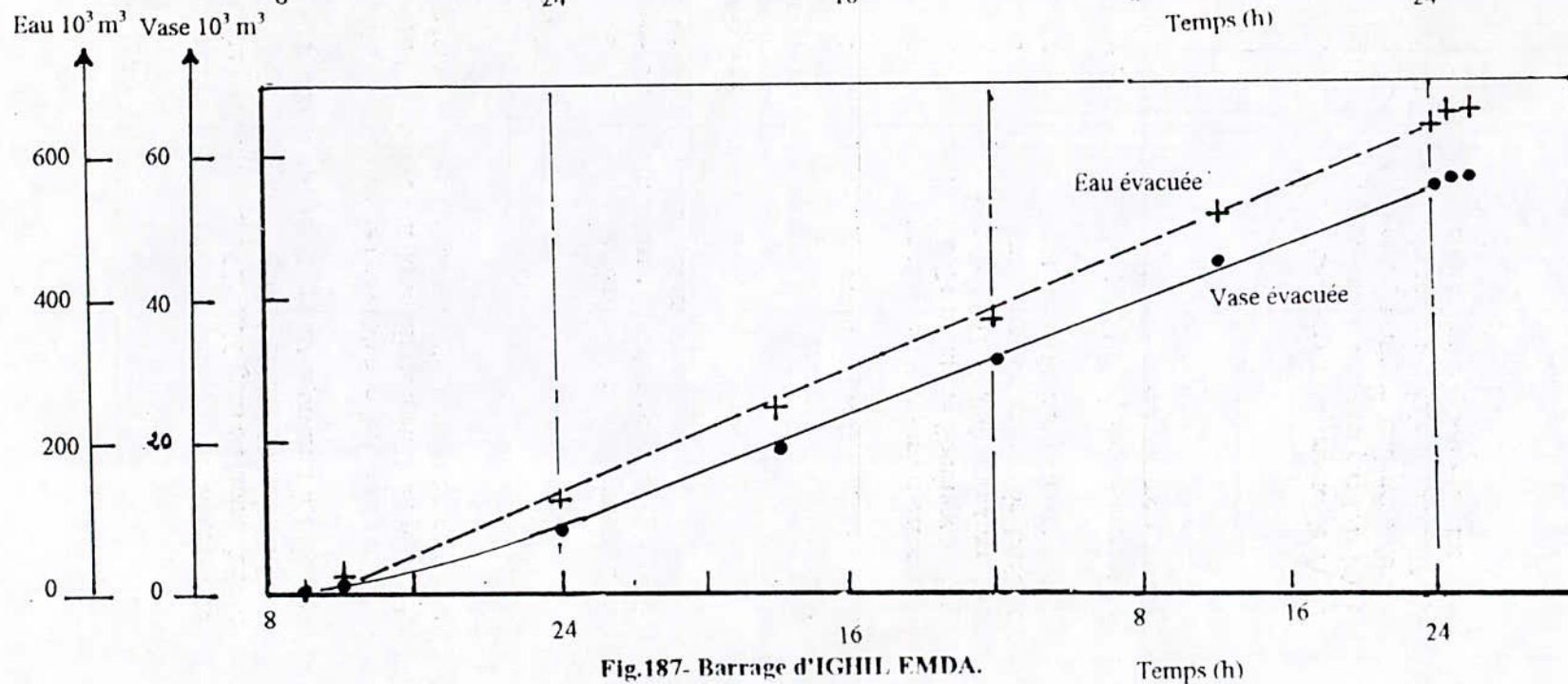
Formation d'un entonnoir dans la vase



-  Dépôt de vase antérieur
-  Dépôt des sediments draines par les derniers courants de densité
-  Sediments soutirés



a) Barrage d'IGHIH. EMDA
Variation de la densité de la
mixture au cours de l'opération
du soutirage



b) Evolution de la vase
(cumulée) soustrée au
cours de l'opération
du soutirage

Fig.187- Barrage d'IGHIH. EMDA.
Soutirage du 22/12 au 25/12/1966

-Soutirage du 18 Octobre 1983 (fig. 188 a et b)

La crue du 18 Octobre a donné « naissance » à un courant de densité. Le soutirage de ce dernier a duré environ 20 heures avec une densité variante de **1,025 à 1,036** (plus ou moins dans la zone optimale de soutirage), ce qui a donné un volume de vase évacué égal à 14.10^3 m^3 pour une proportion d'eau égale à 316.10^3 m^3 , soit un rapport de **4,4 %**, ce qui est équivalent à 1 litre de vase pour 22 litres d'eau claire.

La stabilité de la densité de la mixture (fig. 188 a) qui a engendré une évolution linéaire du volume de vase (cumulé) en fonction du temps (fig. 188 b), prouve que le soutirage a été bien pratiqué. Néanmoins, il faut noter que le courant a une faible densité. Ce cas peut être classé comme « **bon** » soutirage.

-Soutirage du 18 Juin 1983 (fig. 189 a et b)

Le Soutirage a duré environ 18 heures sans arrêt avec une densité de mixture pratiquement constante, elle fluctue entre 1,022 et 1,025 (fig. 189 a), ce qui a donné un volume de vase égal à 8.10^5 m^3 (fig. 189 b). Nous considérons que ce cas peut être un « **bon** » soutirage.

-Soutirage du 14 au 18 Mai 1966 (fig. 190 a et b)

La crue a duré cinq jours (du 14 au 18 Mai 1966). Le premier soutirage n'a duré que 9 heures (de 8 h à 17 h), les vannes ont été fermées à 17 h, mais on continue à faire les mesures de densité de l'eau.

La réouverture des vannes a eu lieu le 15 Mai 1966 à 8h (15 heures après) après avoir détecté un nouveau courant de densité (puisque la densité était de **1,045**). Ce deuxième Soutirage a duré environ 76 heures sans arrêt avec une densité de mixture variant de **1,032 à 1,060** (variations très sensibles) (fig. 190 a) et durant plus de 40 heures, la densité oscille entre les valeurs de **1,055 et 1,060**, ce qui a donné une évolution linéaire de vase (cumulée) soutirée en fonction du temps (fig. 190 b).

Ces deux opérations ont permis d'évacuer un volume de vase égal à 133.10^3 m^3 , soit un rapport de **9 %** c'est à dire 1 litre de vase pour 11 litres d'eau. Ce cas peut être classé comme « **bon** » Soutirage.

-Soutirage du 4 au 5 Décembre 1965 (fig. 191 a et b)

La crue du 4 au 5 décembre 1965 a donné naissance à un courant de densité de faible concentration puisque le soutirage a été pratiqué avec une faible densité n'excédant pas **1,035** (fig. 191 a). Le Soutirage a été bien exécuté puisque durant 16 heures de soutirage, la densité fluctue entre **1,031 et 1,032** et pendant 8 heures la densité est restée constante égale à **1,032**. Cette opération a donné 5500 m^3 de vase (fig. 191 b). Ce cas peut être classé comme « **bon** » Soutirage.

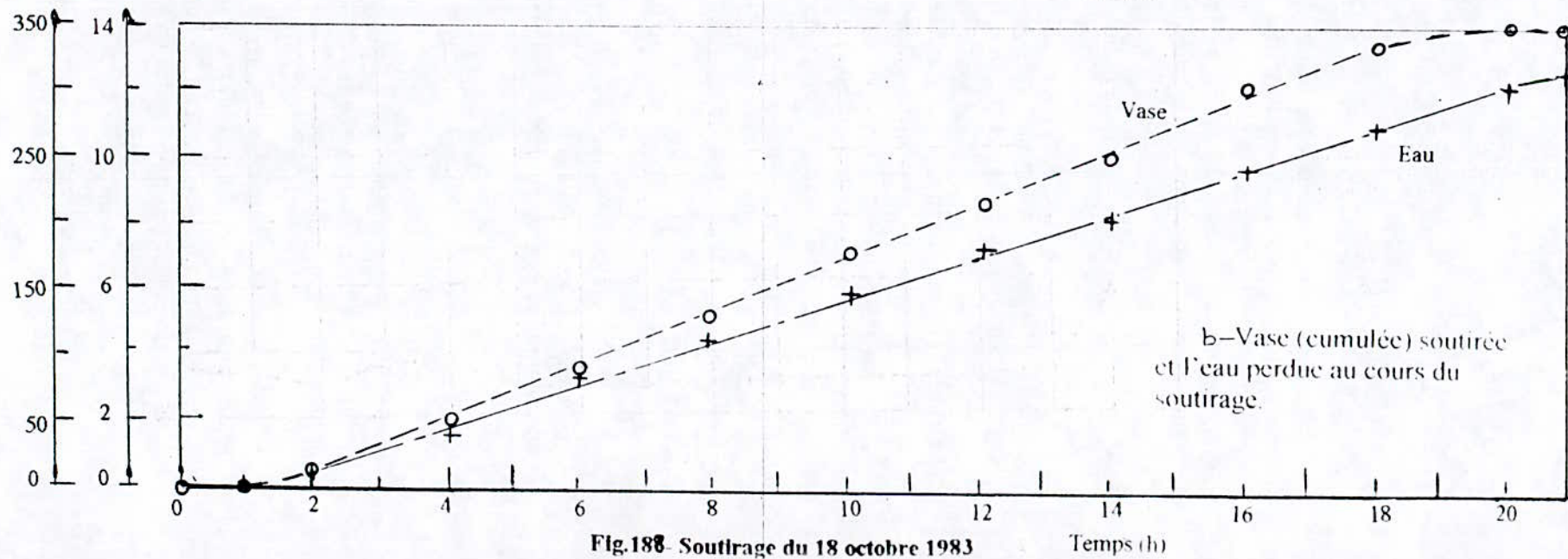
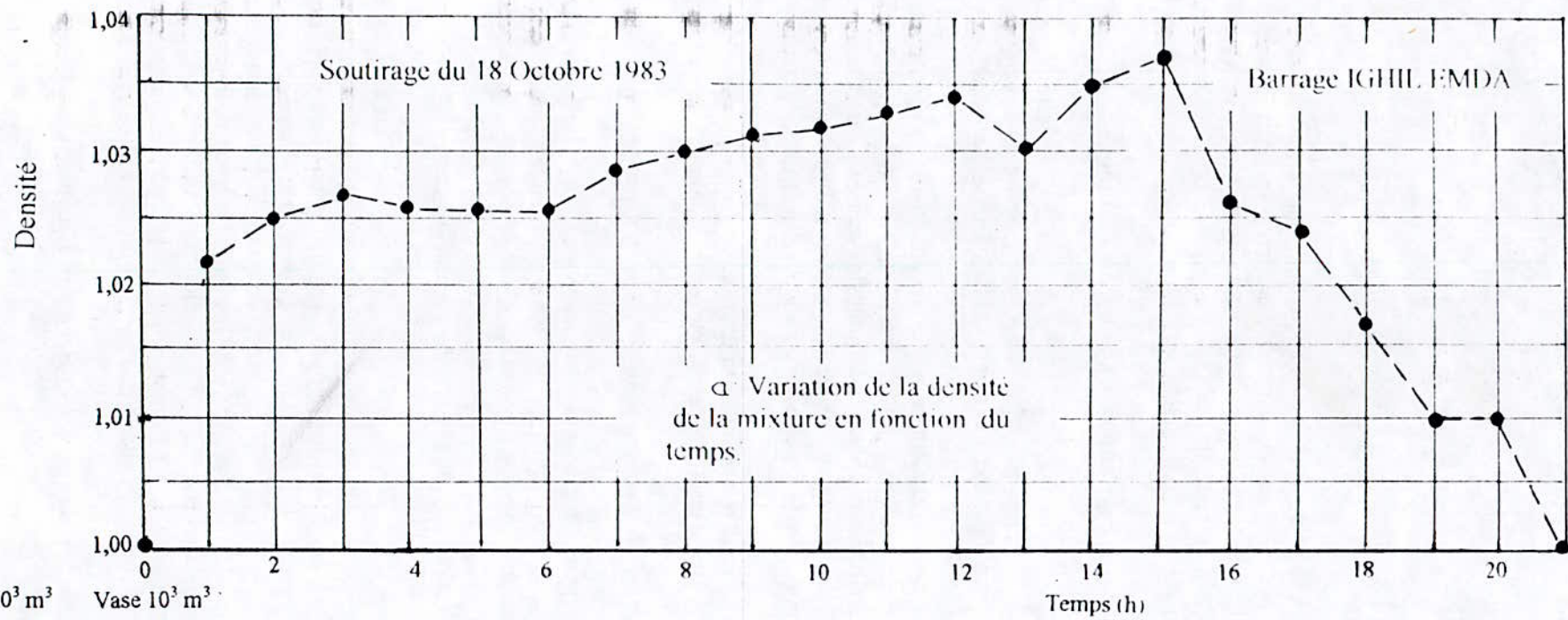
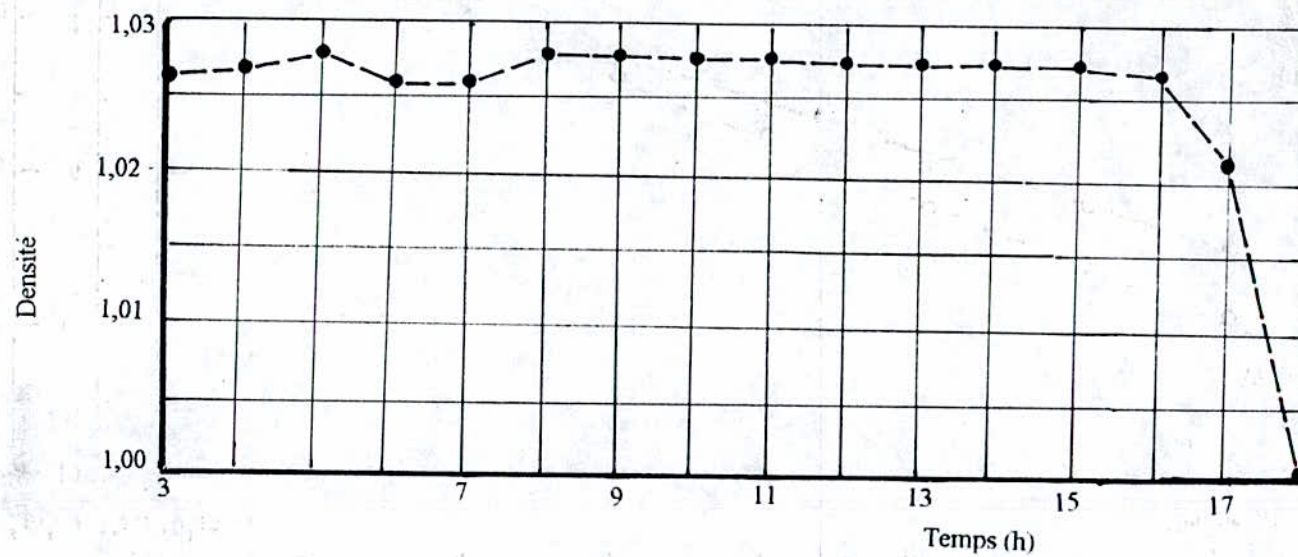
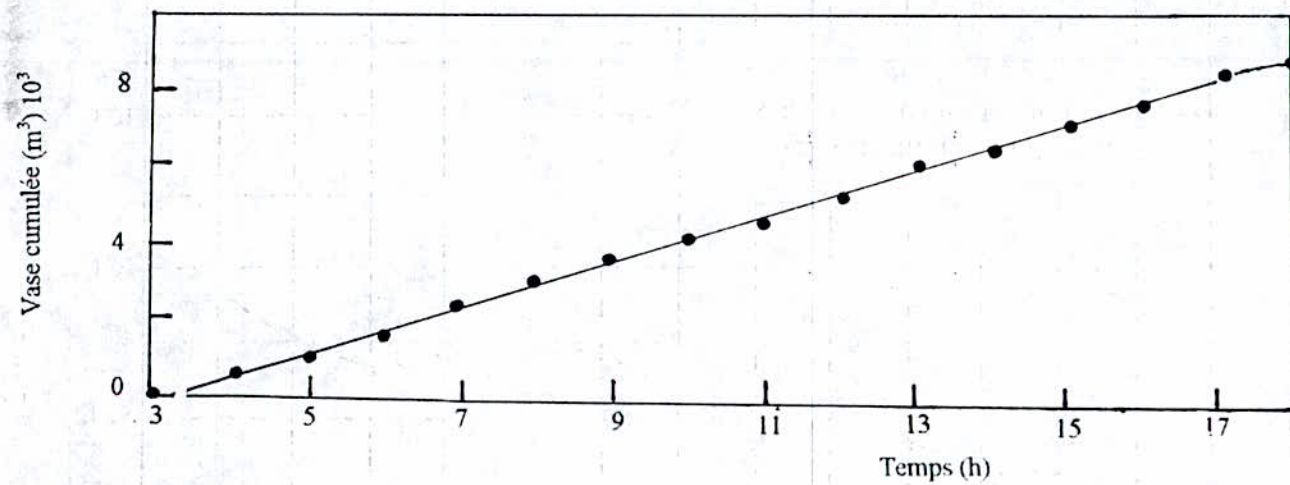


Fig.188- Soutirage du 18 octobre 1983



a) Variation de la densité de la mixture au cours du soutirage



b) Evolution temporelle de la vase soutirée

**Fig.189- Barrage d'IGHIL EMDA.
Soutirage du 18 juin 1983**

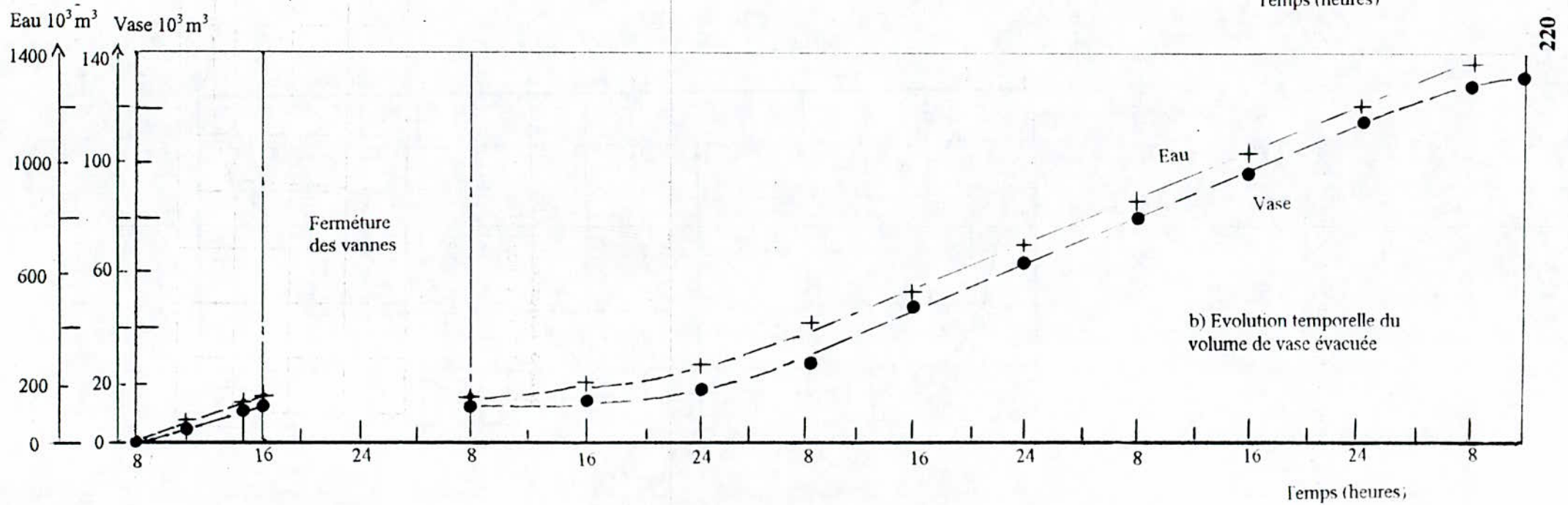
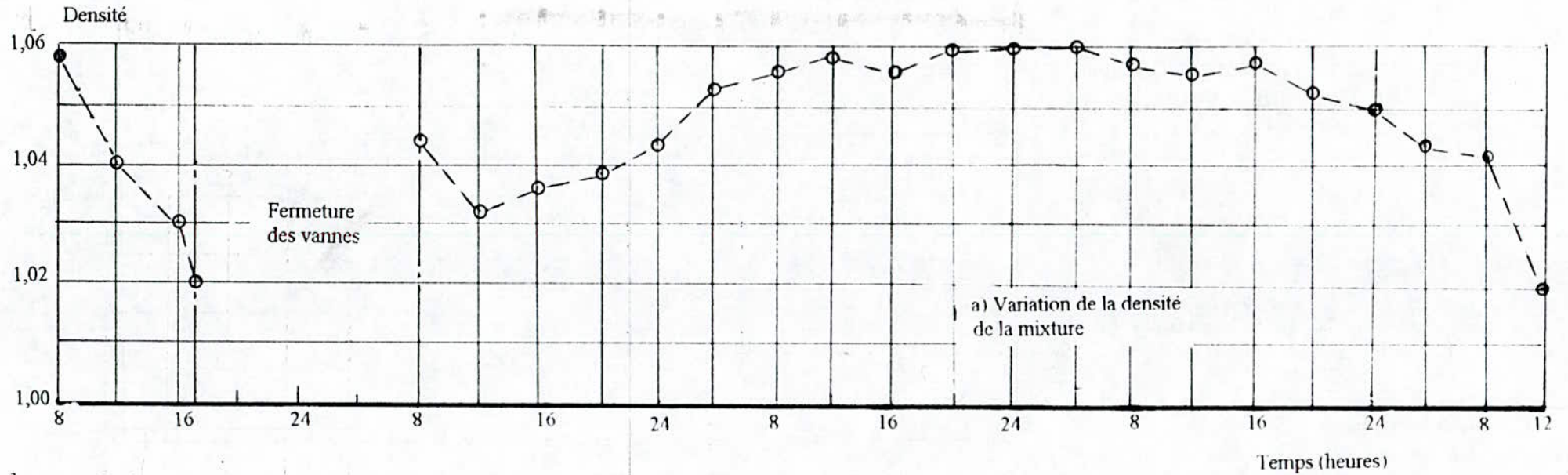
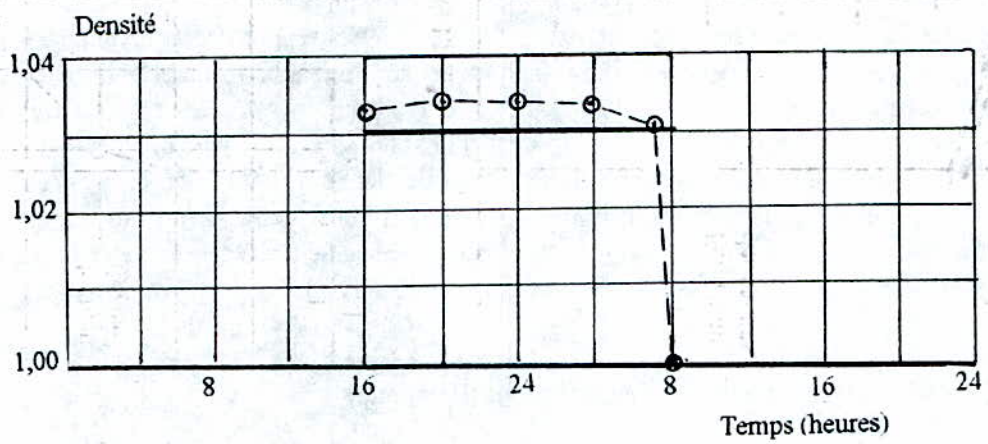


Fig.190-Soufrage du 14 au 18 mai 1966



a- Variation de la densité de la suspension soutirée

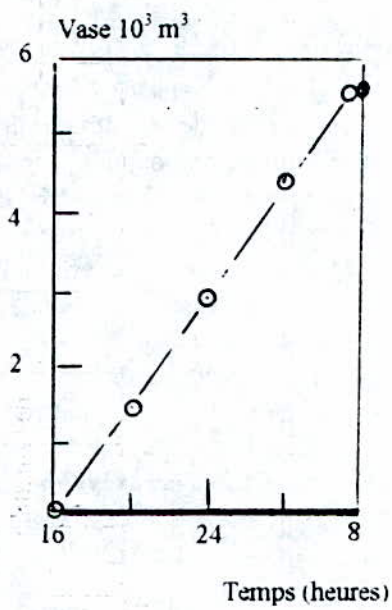


Fig. 191-Barrage d'IGHIL EMDA- Soutirage du 4 au 5 décembre 1965

-Soutirage du 9 au 15 Décembre 1965 (fig. 192 a et b)

Quatre jours après le soutirage du 4 au 5 décembre 1965, une crue est survenue du 9 au 15 décembre provoquant un débit solide important, qui a conduit à la formation d'un courant de densité dans la retenue.

Le soutirage du courant a duré exactement 148 heures sans arrêt avec une densité variant de **1,060** à **1,079** (située à l'extérieure de la zone optimale de Soutirage) (fig. 192 a). La mixture soutirée ne se comporte plus comme un liquide **Newtonien** mais plutôt **Bingham**. La quantité de vase évacuée est de $864 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ avec un volume d'eau claire égale à $6,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit un rapport de 13 % équivalent à 1 litre de vase pour 7,6 litres d'eau (fig. 192 b). Ce cas peut être classé comme « **mauvais** » soutirage.

-Soutirage du 2 au 3 Novembre 1983 (fig. 193 a et b)

Durant la crue du 2 au 3 novembre 1983, deux soutirages ont été effectués. En effet, le premier courant est arrivé au pied du barrage le 02 novembre 1983 à 1h30, son soutirage n'a duré que 6 h 30 avec une densité maximale égale à **1,035** (fig. 191 a) et un volume de vase évacué égal à **1300 m³** (fig. 193 b).

Les vannes ont été fermées durant 10 heures, mais le contrôle de la densité de l'eau est maintenu.

Le deuxième courant de densité a été détecté à 18 h 00, et son soutirage a duré environ 19 heures avec une fluctuation de densité entre **1,022** et **1,032**, avec une capacité de retenue récupérée égale à **5700 m³** et une perte d'eau égale à **115000 m³**, soit un rapport de 5 %.

Néanmoins, ce cas peut être considéré comme « **bon** » soutirage.

-Soutirage du 25 mai au 01 Juin 1966 (fig. 194 a et b)

Après une semaine de la première crue du mois de mai 1966, survenue du 14 au 18, une deuxième crue a duré 08 jours du 25 mai au 01 Juin durant laquelle 3 soutirages ont été effectués. Le premier courant de densité a été détecté près des vannes le 25 mai à 8 heures avec une densité de la suspension égale à 1,060. Aussitôt, les vannes ont été ouvertes et le soutirage a duré 19 heures (fig. 194 a). Le deuxième soutirage d'une durée de 03 heures a été pratiqué le 27 Mai de 8 h à 11h. Un troisième soutirage a eu lieu le 30 Mai à 8 heures après avoir détecté un nouveau courant de densité au pied du barrage avec une masse volumique de 1068 kg/m^3 . Le soutirage de ce courant a duré 72 heures sans interruption avec une densité de mixture variant de **1,052** à **1,062** durant 36 heures, ce qui donne un écoulement permanent de l'eau turbide et évidemment une évolution linéaire de vase (cumulée) soutirée en fonction du temps (fig. 194 b).

Ces trois opérations de soutirage ont permis d'évacuer un volume de vase égal à $174 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ avec une quantité d'eau égale à $1750 \cdot 10^3 \text{ m}^3$, soit un rapport de 10 % c'est à dire 1 litre de vase pour 10 litres d'eau. Il peut être classé comme « **bon** » soutirage.

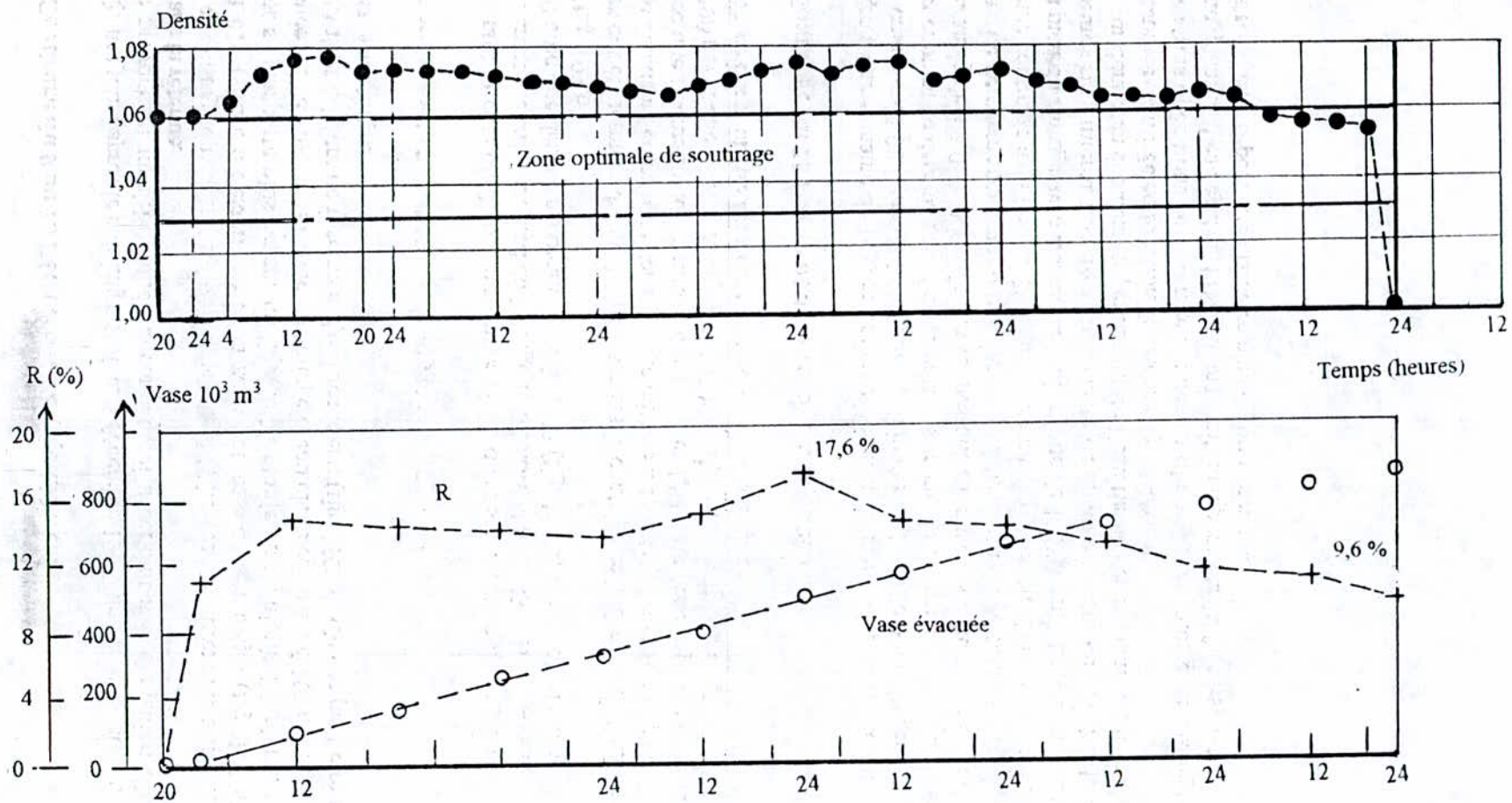


Fig.192- Barrage d'IGHIL EMDA.
Soutirage du 9 au 15 décembre 1965

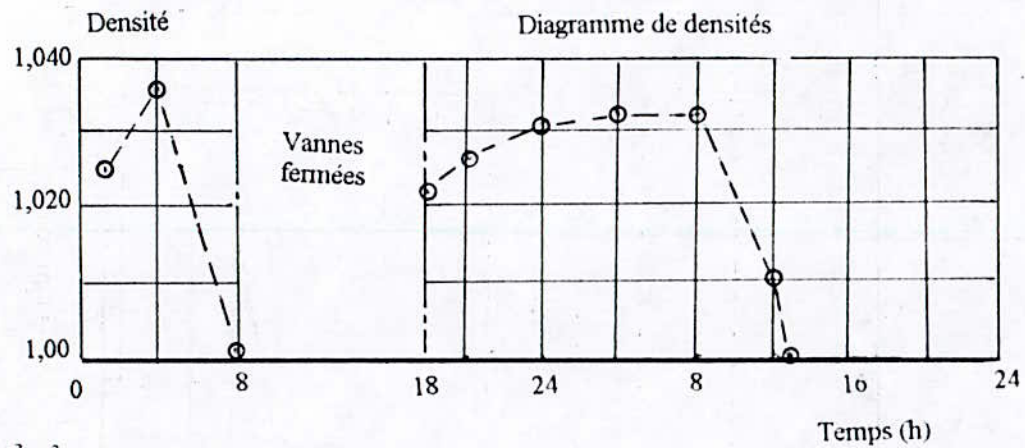
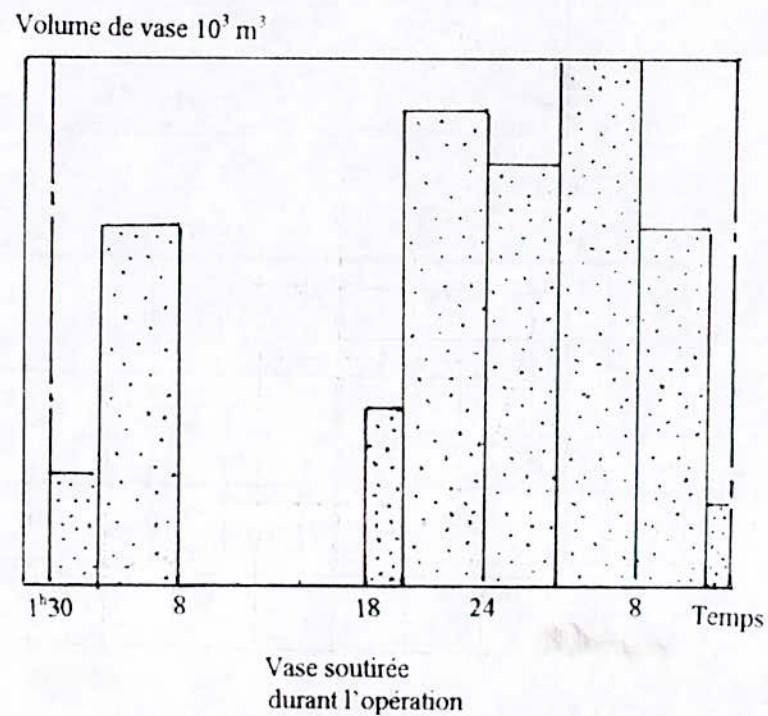
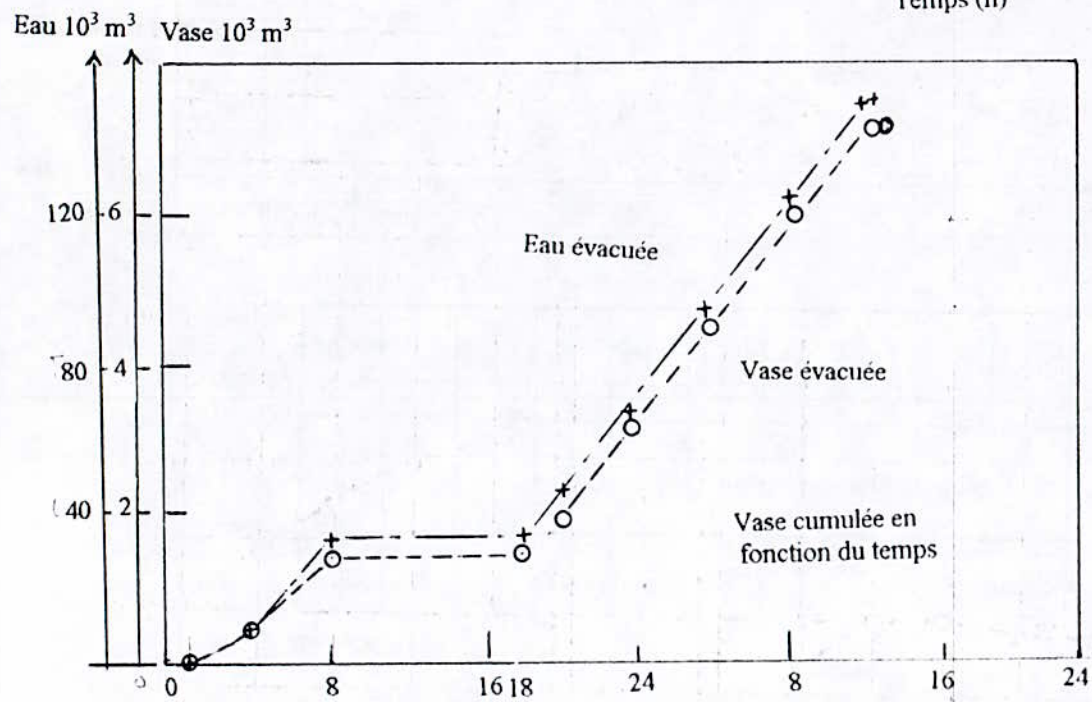
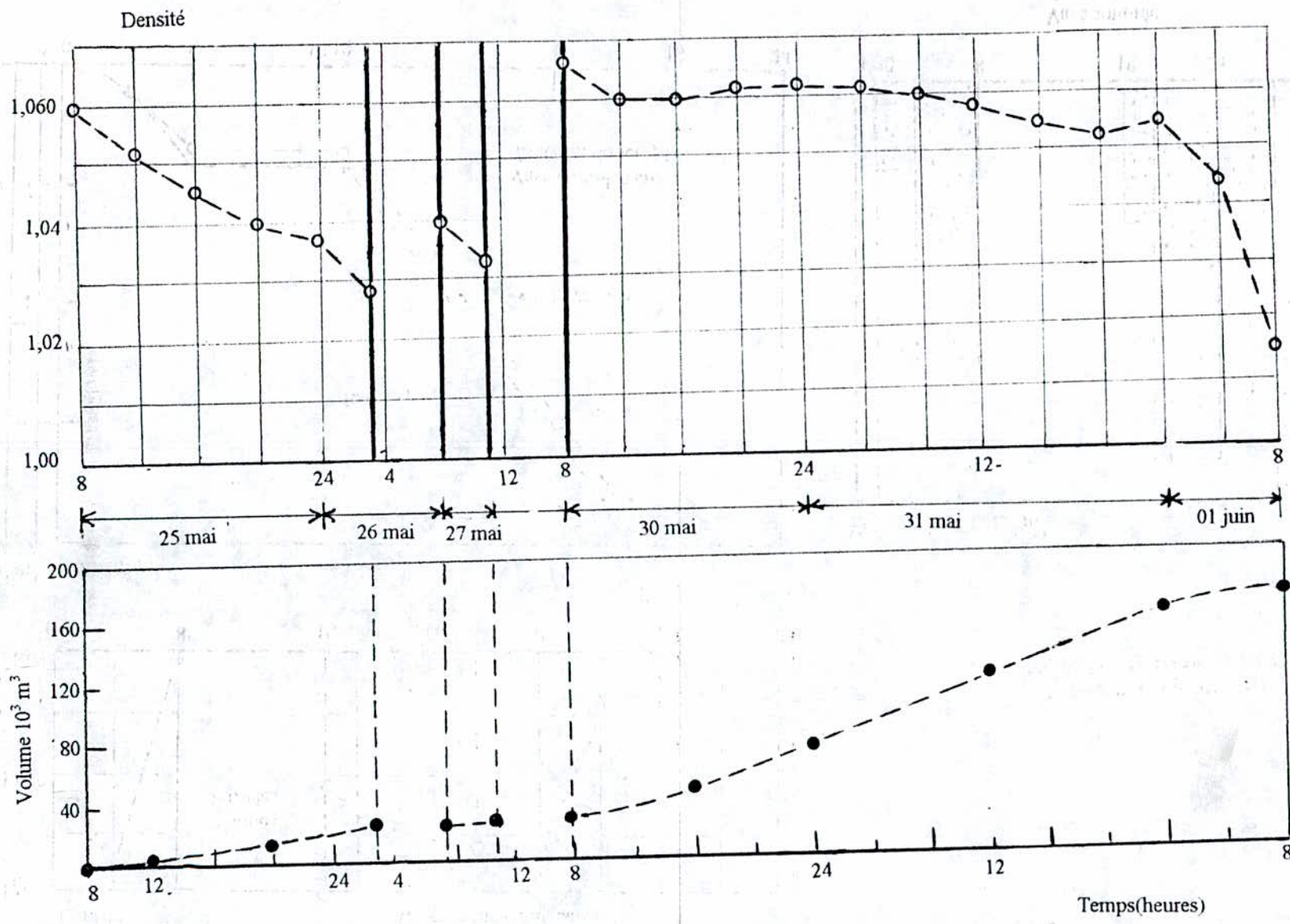


Fig.193- Barrage d'IGHIL EMDA.
Soutirage du 2/11/83 au 3/11/83





a) Variation des densité de la mixture au cours du soutirage

b) Evolution de la vase (cumulée) au cours du soutirage

Fig.194- Barrage d'IGHIL EMDA. Soutirage du 25/5 au 1/6/1966 .

b) Barrage d'ERRAGUENE

-Soutirage du 22 au 23 Avril 1970 (fig. 195 a et b)

Durant cette crue, le soutirage du courant de densité a duré 20 heures sans interruption avec une densité de mixture variant entre 1,033 et 1,04. Les manoeuvres des vannes ont été bien exécutées, puisque à 13 heures une densité de 1,066 a été enregistrée, après 03 heures la densité a été amenée à 1,04 pour qu'elle se stabilise ensuite entre 1,033 et 1,040. Ce cas peut être expliqué par le fait que le courant de densité est arrivé bien avant 13 heures, ce qui a provoqué un remous de l'eau turbide devant les vannes (fig. 196). La chute de la densité de la suspension de 1,066 à 1,040 durant les trois premières heures de soutirage, justifie l'existence d'un remous de courant de densité (fig. 197).

La stabilité (pratiquement) de la densité de la mixture (fig. 195 a) justifie que l'écoulement du courant de densité est permanent, ce qui a donné une évolution linéaire de la vase soutirée en fonction du temps. Le volume de vase total évacué est égal $4,250 \text{ m}^3$ (fig. 196 b).

-Soutirage du 21 au 22 Septembre 1981 (fig. 198 a et b)

Le soutirage a duré 13 heures, la densité de la mixture variant entre 1,02 et 1,03 (fig. 198 a) durant plus de 10 heures et le volume de vase évacué est égal à $16,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ (fig. 198 b).

Nous pouvons classer ce cas comme « **bon** » soutirage malgré une perte d'eau importante, mais néanmoins, on a évité la forte décantation pour cette densité.

-Soutirage du 24 au 25 Août 1981 (fig. 199 a et b)

L'opération du soutirage a duré environ 16 heures (soit du 24 août à 15 heures au 25 août à 7 heures) avec des densités de la suspension évacuée très variables dans le temps (presque chaque heure) allant de 1,020 à 1,040 (fig. 199 a), ce qui a pu favoriser le dépôt, et en même temps une perte d'eau considérable. Il en résulte une variabilité du débit des sédiments, ce qui a conduit à une évolution non linéaire de la vase (cumulée) soutirée (fig. 199 b). Le volume de vase évacué est égal à $28 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ pour une quantité d'eau 5 à 6 fois supérieure.

-Soutirage du 23 au 25 Décembre 1969 (fig. 200 a et b)

La crue du 23 au 25 Décembre 1969 a donné naissance à deux courants de densité. Le soutirage du premier a duré 16 heures à partir du 23 Décembre à 12 heures, il a été mal exécuté puisque la densité de la mixture n'arrivait pas à se stabiliser (fig. 201), elle a baissé progressivement de 1,055 à 1,000 (fig. 200 a).

Les vannes ont été fermées le 24 décembre à 4 heures après avoir soutiré le courant de densité. Le même jour, la réouverture des vannes a eu lieu à 10 heures, c'est le deuxième soutirage qui a duré 38 heures sans arrêt, et cette fois-ci la densité s'est stabilisée autour de 1,030 et 1,040 (fig. 200 a), ce qui a donné la forme linéaire de la fonction du volume de vase évacué, avec à la fin une quantité totale égale à $40 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ pour une perte d'eau de $944 \cdot 10^3 \text{ m}^3$, soit un rapport de 4,24 % (fig. 200 b).

Notons que cette crue a ramené une quantité d'eau égale à $150.872.24 \text{ m}^3$, soit un rapport de 6 % entre le volume évacué et le volume entré.

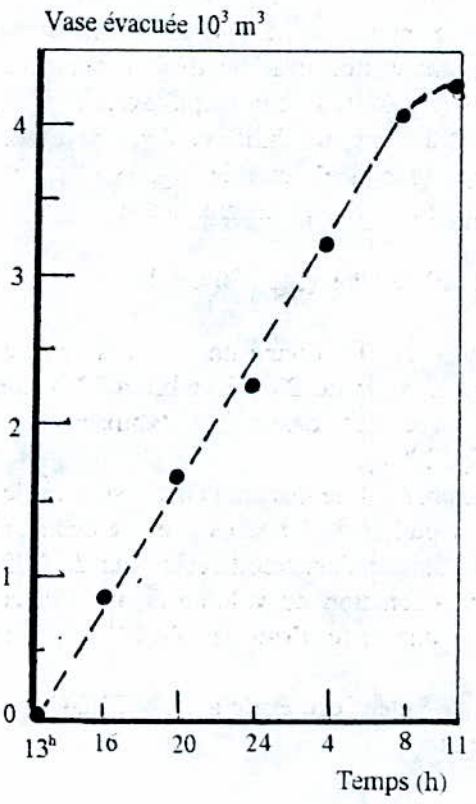
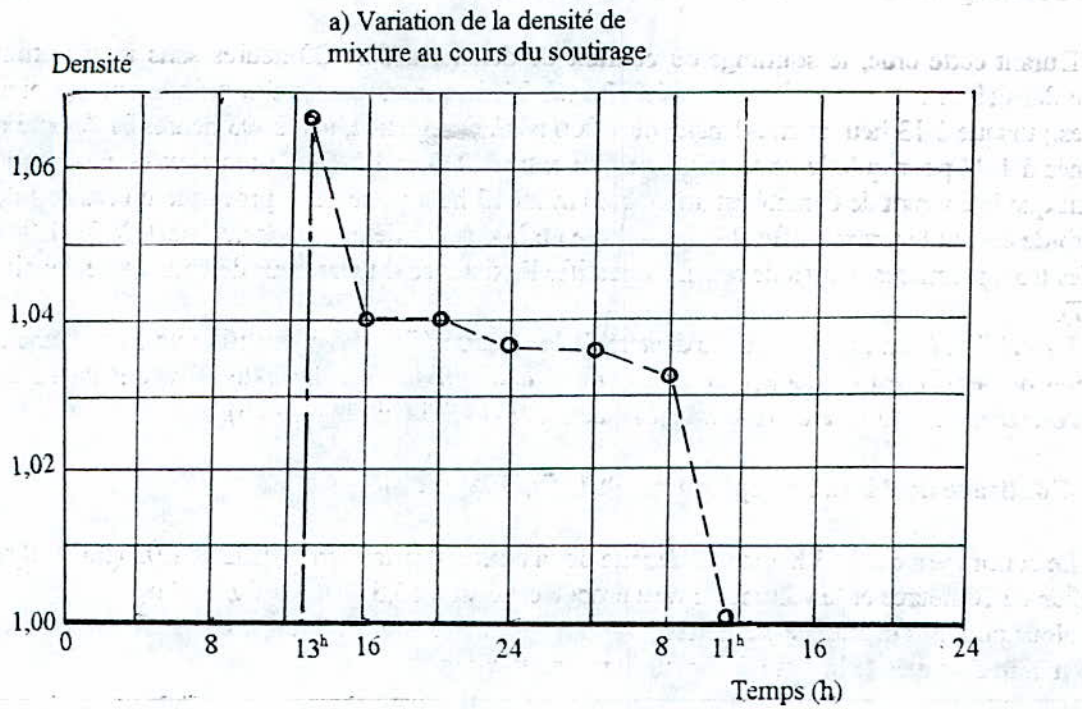


Fig.195- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage du 22 au 23 avril 1970

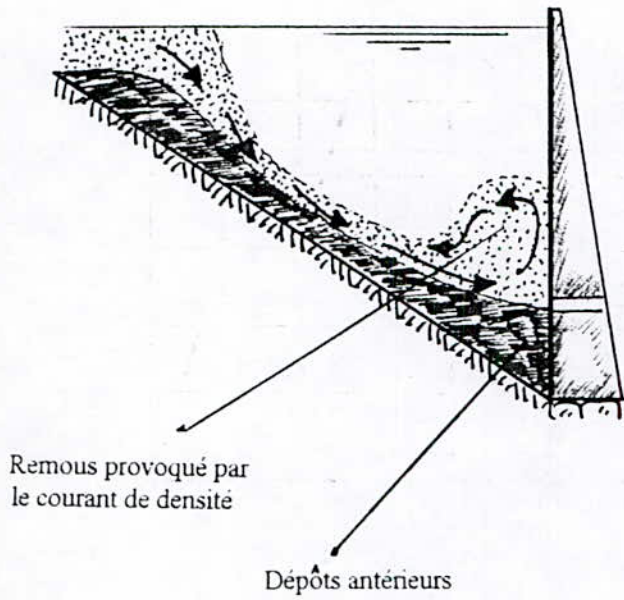
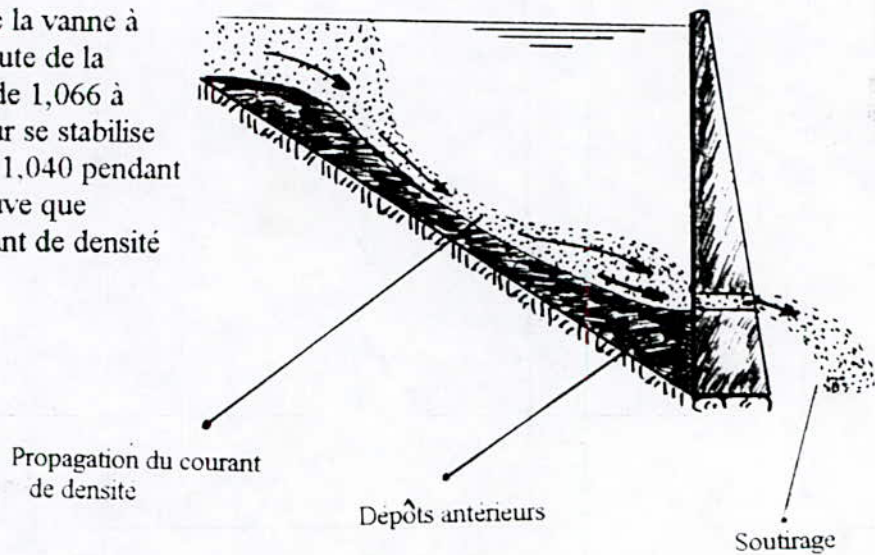
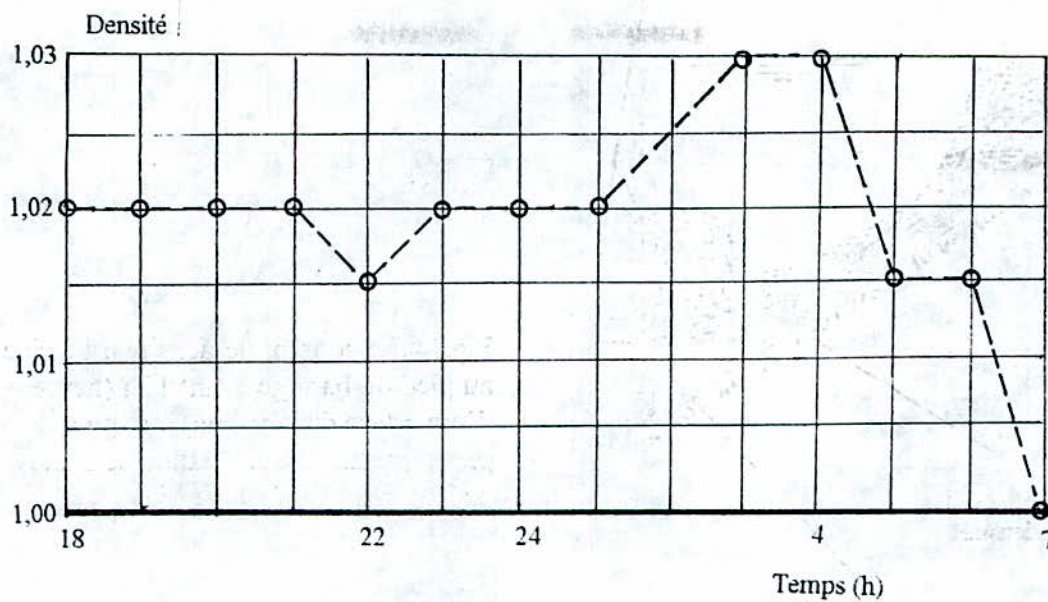


Fig. 196: Le courant de densité est arrivé au pied du barrage avant 13h (heure d'ouverture de la vanne), ce qui a provoqué une augmentation sensible de la densité de l'eau turbide (1,066).

Fig. 197: L'ouverture de la vanne à 13h, a provoqué la chute de la densité de la mixture de 1,066 à 1,040 en 3 heures pour se stabilise ensuite entre 1,033 et 1,040 pendant 16 heures, ce qui prouve que l'écoulement du courant de densité est permanent.





a) Variation de la densité de mixture au cours du soutirage

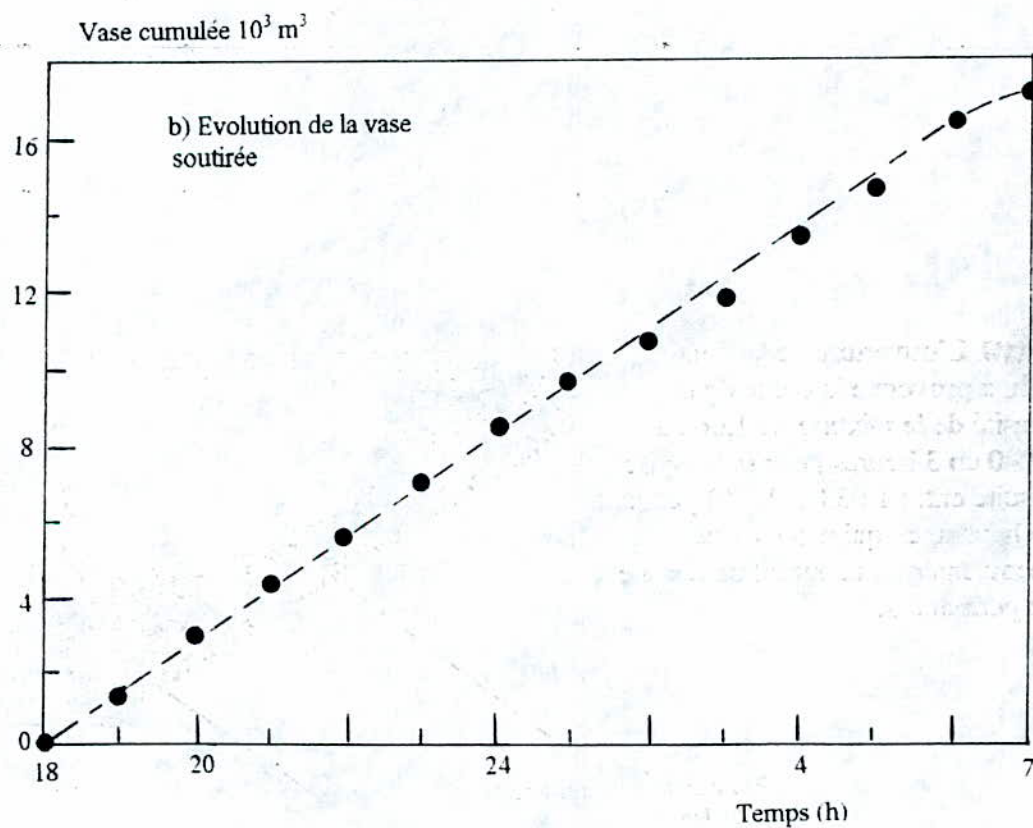


Fig.198- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage du 21 au 22/09/1981

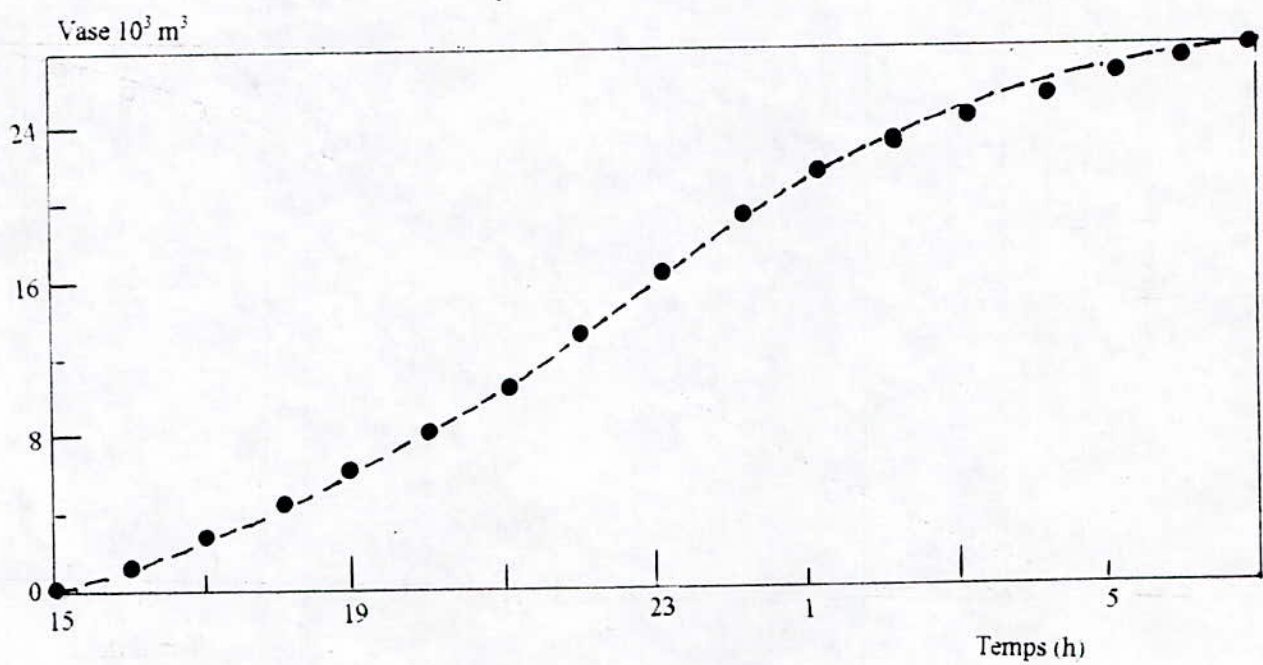
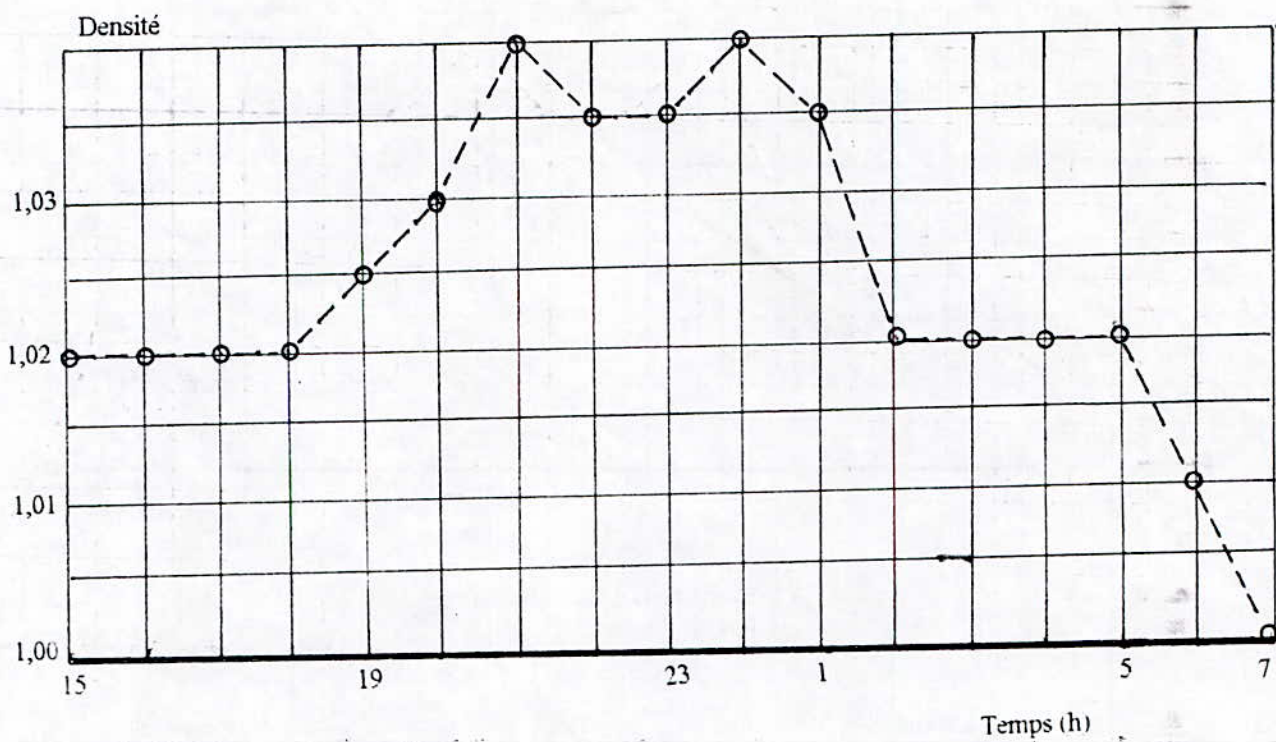


Fig.199- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage
du 24 au 25/08/1981

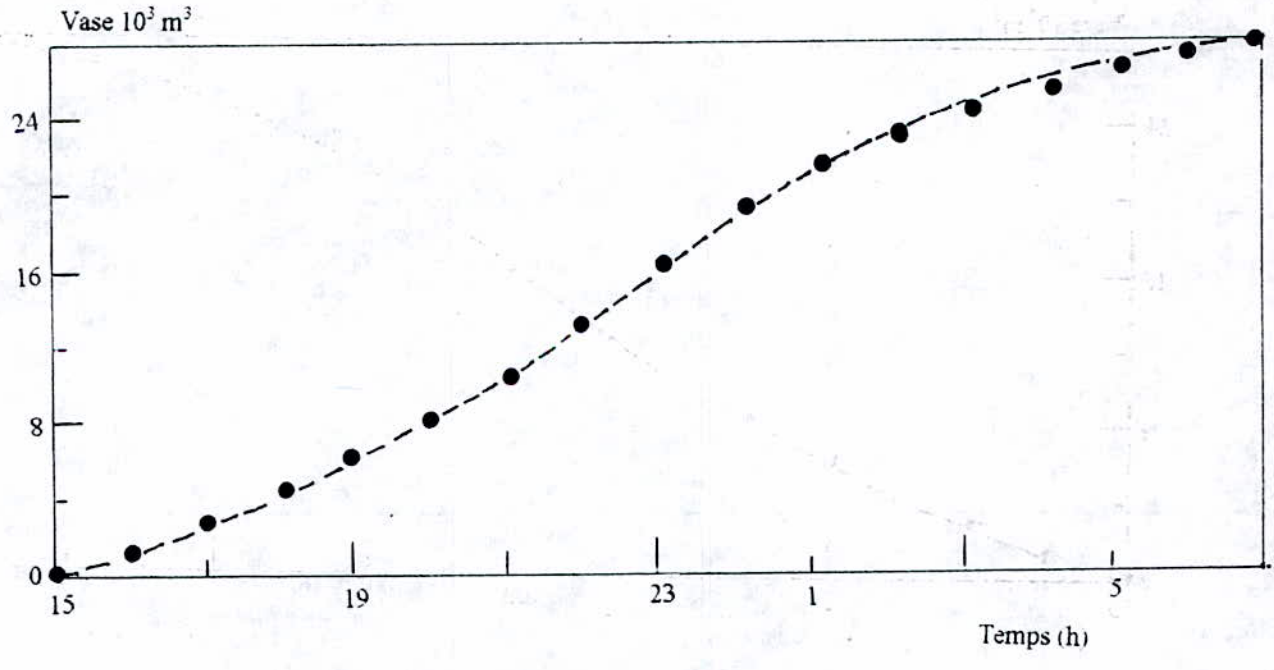
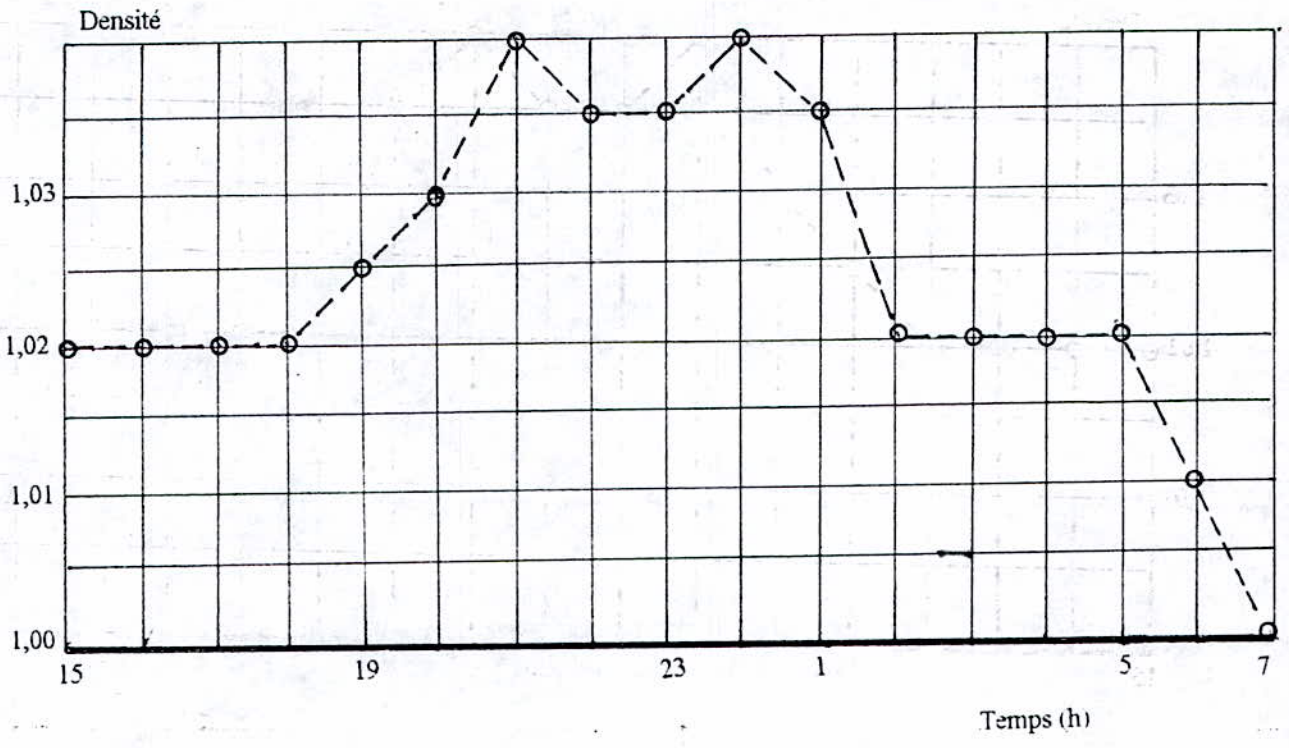
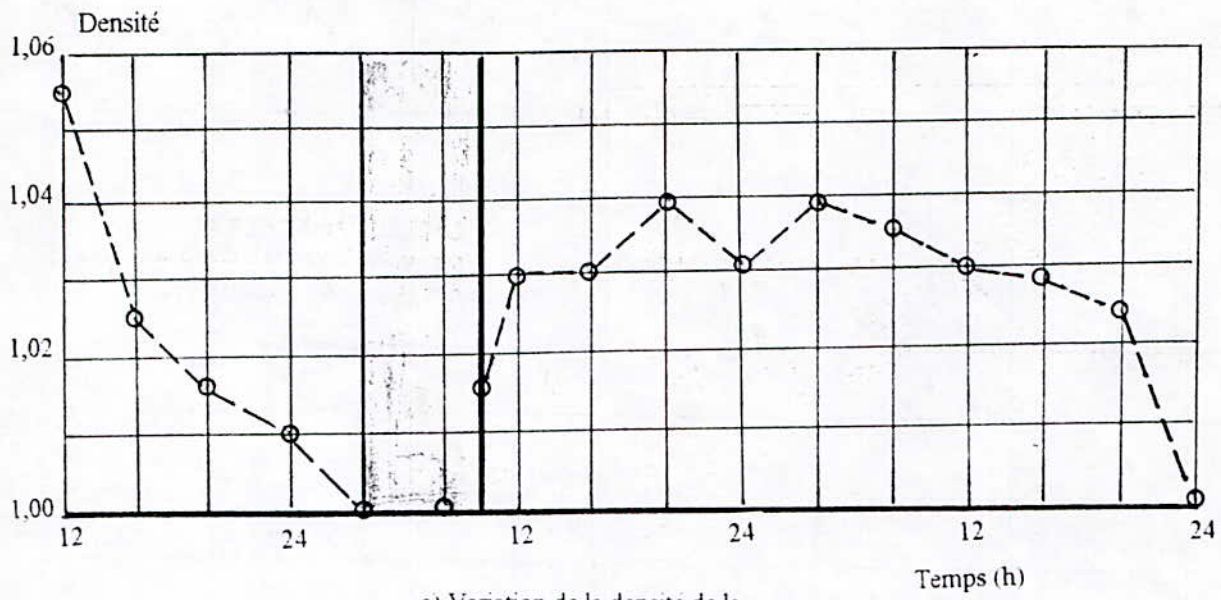
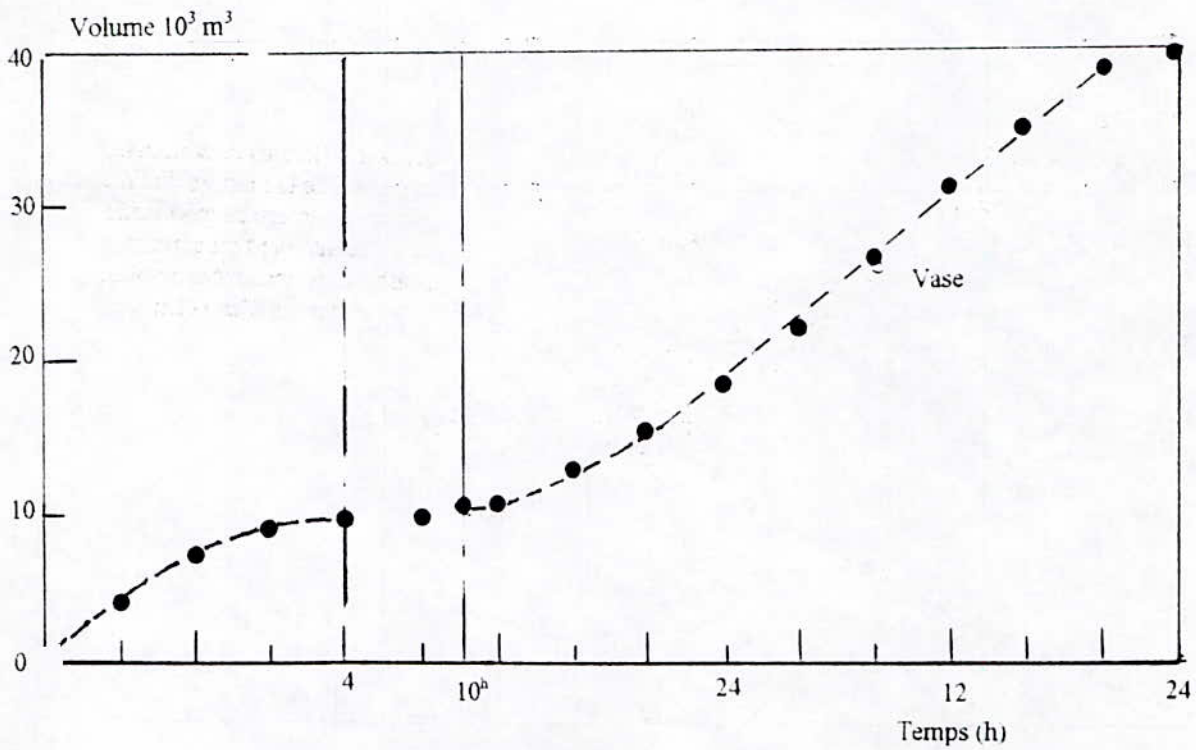


Fig.199- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage du 24 au 25/08/1981

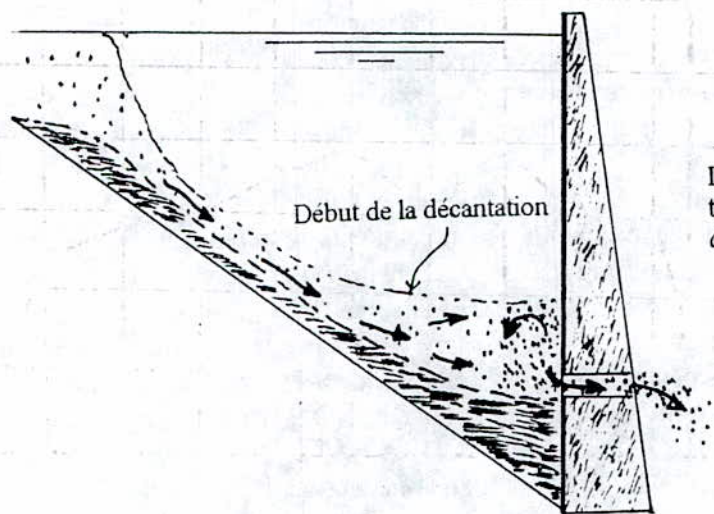


a) Variation de la densité de la mixture au cours du soutirage

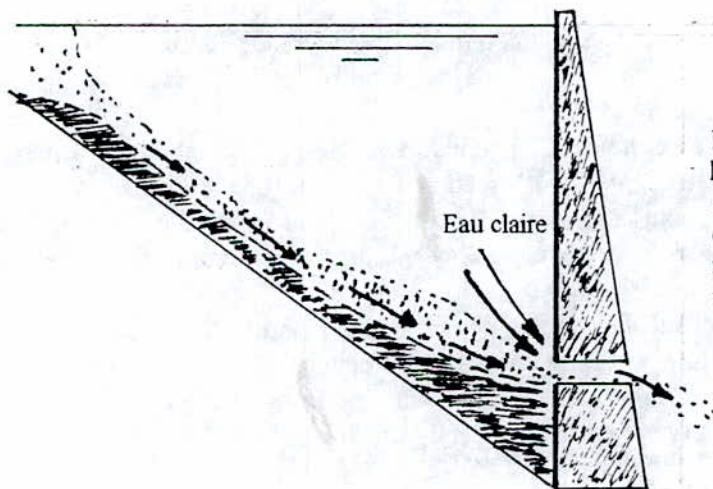


b) Evolution temporelle de la vase

Fig.200 - Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage du 23 au 25 décembre 1969



Le 23/12/69 à 10^h, l'ouverture tardive de la vanne a laissé la densité atteindre 1,055



Durant 16 heures de soutirage, la densité de la mixture diminue progressivement ce qui justifie que l'écoulement du courant n'est pas permanent et en plus, il y'a une perte d'eau claire.

Fig.201- Déroulement du premier soutirage de la crue de 23 au 25 décembre 1969

-Soutirage du 01 au 08 Décembre 1969(fig. 202 a et b)

La crue a duré exactement 08 jours par contre, on assiste à trois soutirages :

Le premier soutirage exécuté a duré 72 heures sans interruption du 01 décembre à 16 h au 04 décembre à 16h. La densité de la mixture est restée dans l'intervalle 1,045 - 1,056 pendant plus de 52 heures (fig. 202 a), ce qui confirme que le soutirage a été bien exécuté. Le graphe du volume de vase cumulée en fonction du temps est une droite linéaire(fig. 202 b). Ce cas peut être considéré comme « bon » soutirage.

Le courant de densité a été complètement épuisé le 4 décembre 1969 à 16 heures. Les vannes étant fermées, mais on contrôle toujours la densité de l'eau. La réouverture de la vanne a eu lieu le 05 décembre à 10 heures, le soutirage a duré environ 10 heures et la densité de la suspension n'a pas dépassé 1,025. Après trois jours de fermeture des vannes, une densité de 1,065 a été mesurée le 8 décembre à 8 heures. Aussitôt, la vanne a été ouverte et la densité a chuté en 4 heures pour atteindre 1,000. Nous pensons que ce dernier cas peut être soit un courant de densité de faible intensité, soit une érosion des derniers dépôts de vases dans la zone I non encore consolidées.

Un volume total de vase égal à $18,4 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ a été évacué avec une proportion d'eau égale à $2,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Soit un rapport de 7 %. Un volume égal à $29 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ d'eau a été apporté par la crue, soit un rapport de 1/10 entre l'eau perdue et l'apport.

-Soutirage du 18 au 22 décembre 1980(fig. 203 (a et b))

La crue a duré du 18 au 23 décembre, par contre les opérations de soutirage ont été arrêtées le 22 décembre à 9 heures. Durant cette crue, 4 soutirages ont été effectués, ce qui prouve que l'alimentation en débit solide n'a pas été continue.

Le premier soutirage a duré exactement 1 heure et demi (le 18 Décembre de 12 heures à 1 heure 30 mn) avec une faible densité de mixture n'excédant pas 1,020. La réouverture de la vanne a eu lieu le même jour à 19h30, le soutirage a duré 10 heures et demi avec une densité maximale égale à 1,040. Un autre courant de densité de faible concentration a été soutiré le 19 Décembre à 16 heures durant deux heures.

Par contre, le dernier courant de densité a duré plus de 60 heures. Le soutirage a été plus ou moins exécuté avec des densités de mixture variables durant les premières 35 heures (fig. 203 a). Les dernières 24 heures, l'écoulement de la suspension à travers le pertuis était permanent vu que sa densité est restée presque constante (varie entre 1,040 et 1,050). Le volume total de vase évacué au cours de cette opération est évalué à $185 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ (fig. 203 b).

-Soutirage du 01 au 06 octobre 1969 (fig. 204)

La violente crue survenue dans la retenue du 1 au 12 octobre 1969 a donné naissance à deux courants de densité de fortes concentrations.

Le premier soutirage a commencé le 01 Octobre à 7h après avoir détecté une densité de 1,100, aussitôt les 04 vannettes ont été ouvertes, la densité de la mixture a chuté de 1,100 à 1,020 en une heure ce qui justifie que le courant est bien arrivé avant 7 heures et la décantation des particules fines a bien débuté. La fermeture des deux vannes a augmenté la densité jusqu'à 1,070 durant 4 heures, pour ensuite décroître progressivement jusqu'à 1,040 durant 16 heures (fig. 204).

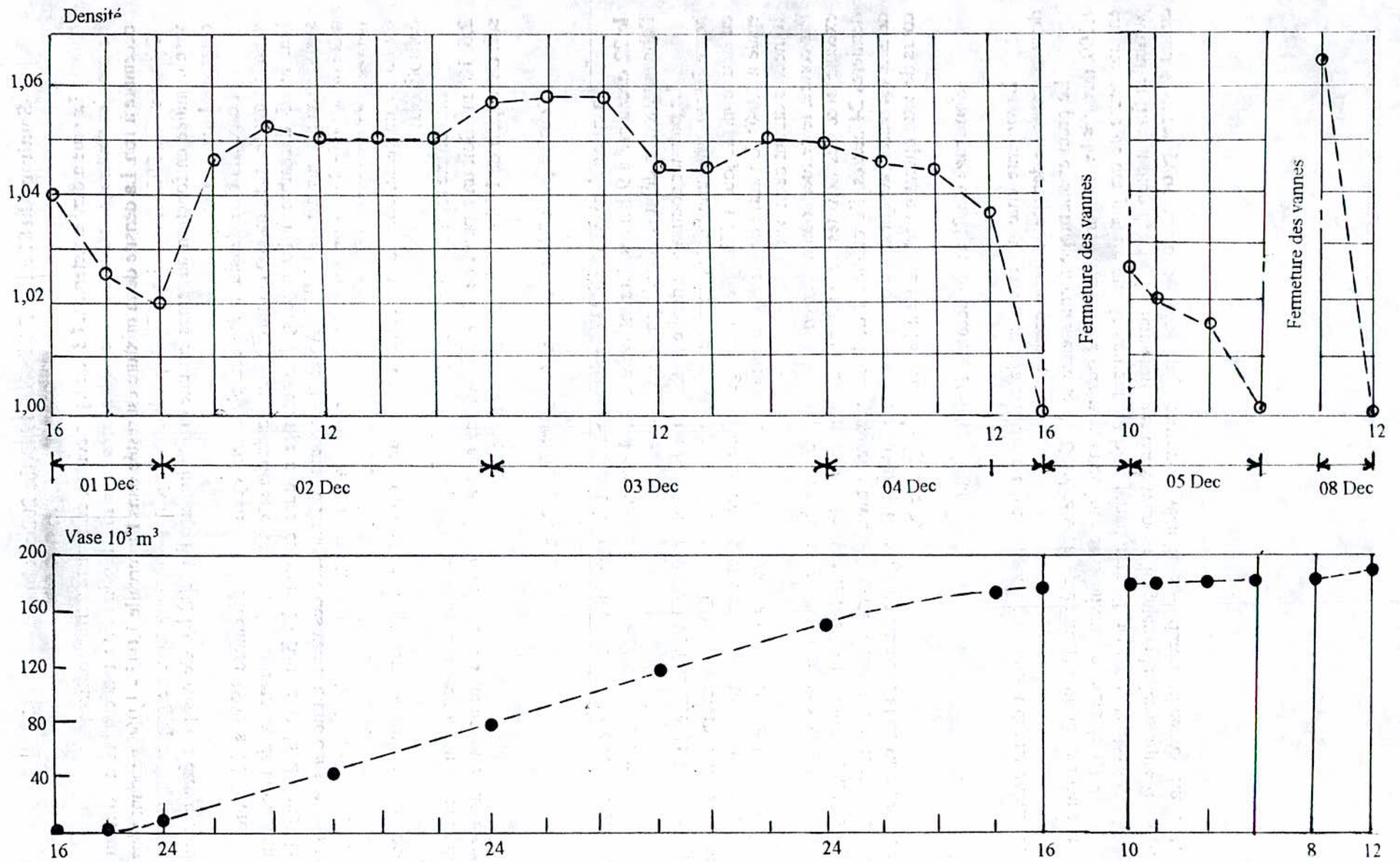


Fig.202- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage
 du 01 au 08 décembre 1969

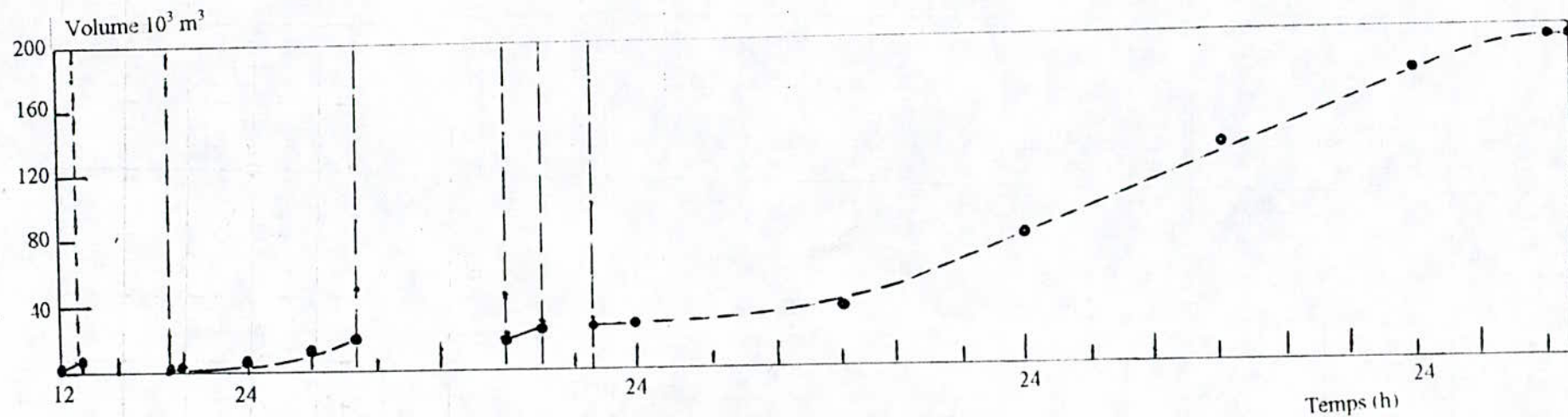
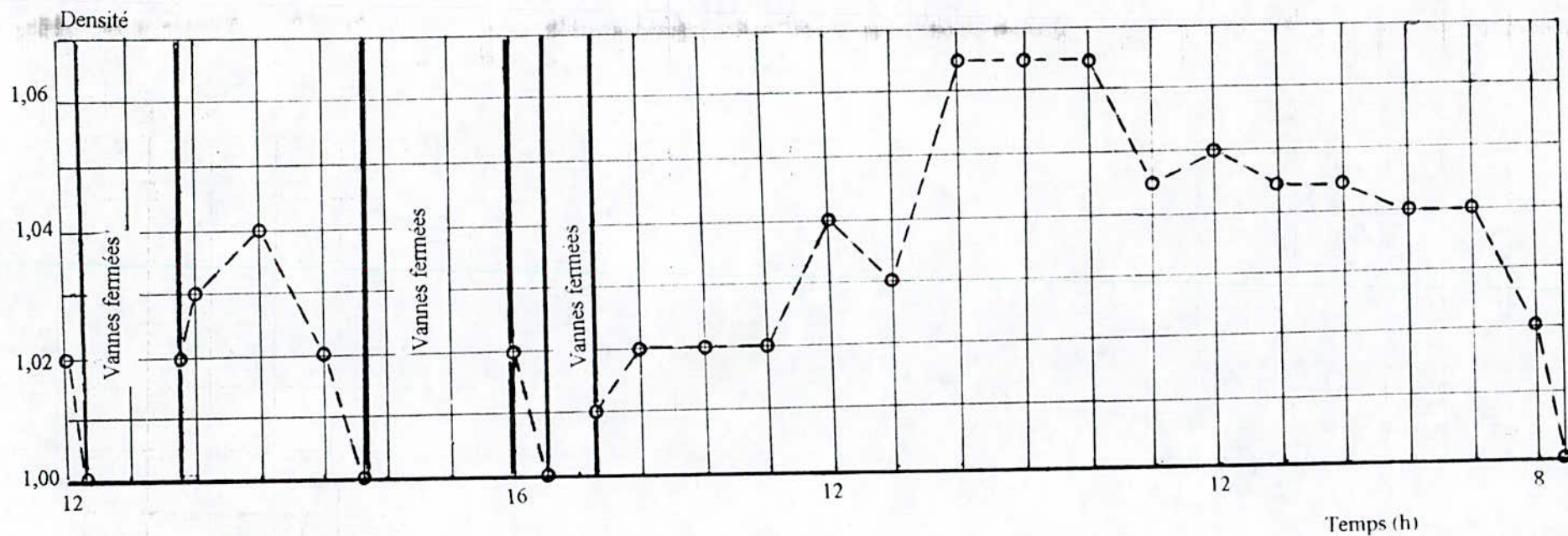


Fig.203- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage du 18 au 22 décembre 1980

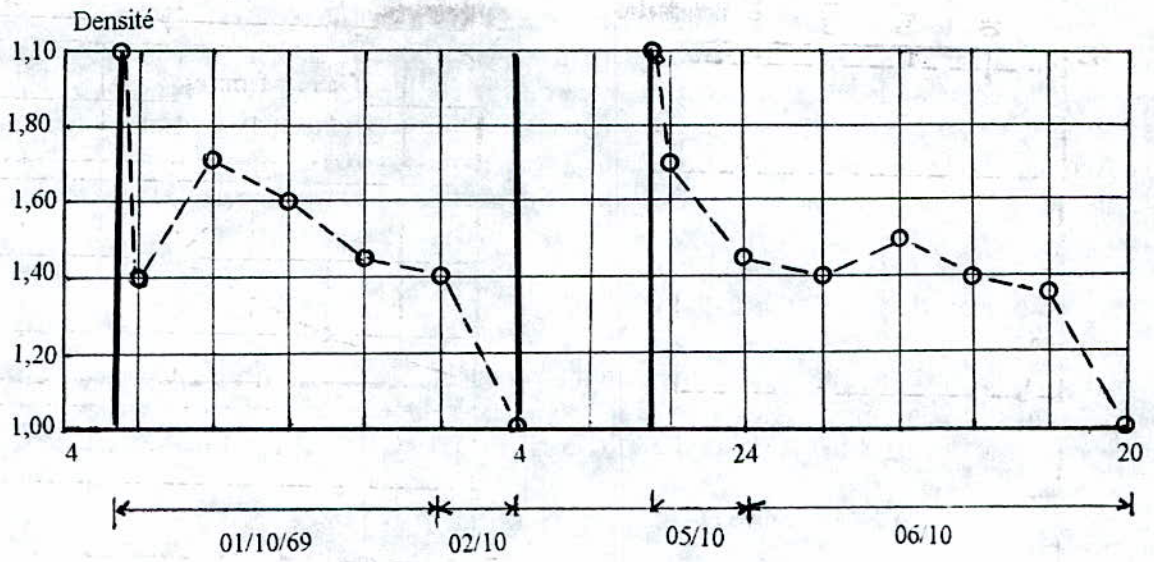


Fig.204- Barrage d'ERRAGUENE. Soutirage
du 01 au 06 octobre 1969

Le courant a été épuisé le 2 Octobre à 4 heures. Cette opération n'a pas été bien exécutée. Les vannes étaient fermées et le contrôle de densité de l'eau a continué jusqu'au 5 Octobre à 21 heures où le même phénomène s'est répété, une densité de 1,100 a été enregistrée mais cette fois-ci on a ouvert seulement deux vannes pour voir la densité baisser de 1,100 à 1,040 pendant 5 heures, et ensuite elle s'est stabilisée autour de 1,045 durant 16 heures. La fermeture des vannes a eu lieu le 6 Octobre à 20 heures, cette fois-ci l'opération a été réussie (fig. 204). Notons qu'aucun autre courant n'a été détecté près des vannes malgré que la crue s'est arrêtée le 12 Octobre.

-Soutirage du 2 au 5 Avril 1978 (fig. 203)

Le courant de densité est arrivé au pied du barrage le 2 Avril à 21 heures avec une densité de 1,015. Aussitôt, la vanne a été ouverte et le soutirage a duré environ 55 heures dont 36 heures avec une densité qui fluctue entre 1,04 et 1,055 (fig. 205), ce qui a enregistré un écoulement permanent de la lame turbide, nous pouvons dire que le courant de densité a été pratiquement évacué. Ce cas est un « **bon** » soutirage.

-Soutirage du 25 au 28 Septembre 1973 (fig. 206)

La crue du 25 au 28 Septembre 1973 a donné naissance à un courant de densité qui a drainé des sédiments dont la concentration est élevée. L'ouverture des vannes a eu lieu le 25 Septembre à 6 heures après avoir détecté une densité de l'eau turbide égale à 1,030. Le soutirage a duré plus de 76 heures durant lesquelles la densité de la mixture est restée constante égale à 1,060 pendant 16 heures et 1,045 durant 28 heures (fig. 206), ce qui explique bien que les vannes ont été bien manoeuvrées et le courant de densité a été bien soutiré. Ce cas peut être un « **bon** » soutirage.

-Soutirage du 15 au 18 Novembre 1990 (fig. 207)

Durant cette crue, le soutirage du courant de densité a duré 72 heures sans interruption et durant plus de 48 heures, la mixture a gardé une densité variable entre 1,035 et 1,055 (fig. 207) qui est comprise dans la zone optimale de soutirage. L'écoulement de la couche turbide est presque permanent avec évidemment absence de remous près des vannes. L'ensemble des sédiments drainés par ce courant ont été soutirés. Les manoeuvres des vannes ont été bien exécutées d'où l'obtention d'un « **bon** » soutirage.

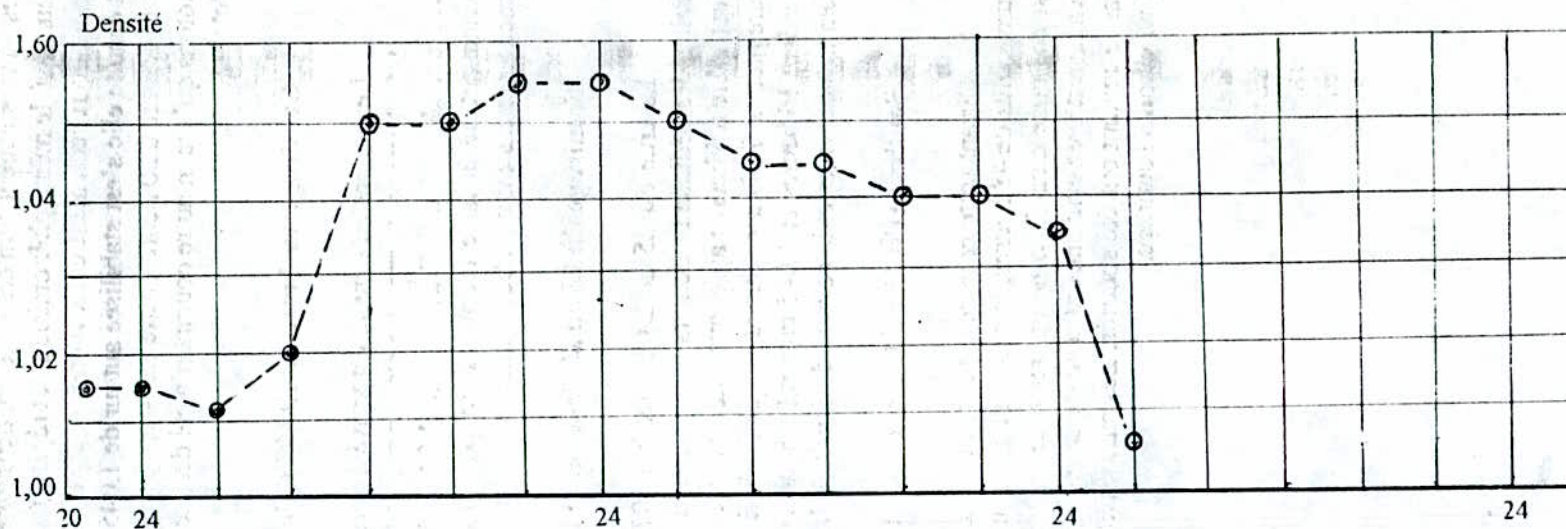


Fig 205 Barrage ERRAGUENE - variation de la densité de la mixture au cours du soutirage du 02 au 05/04/1978.

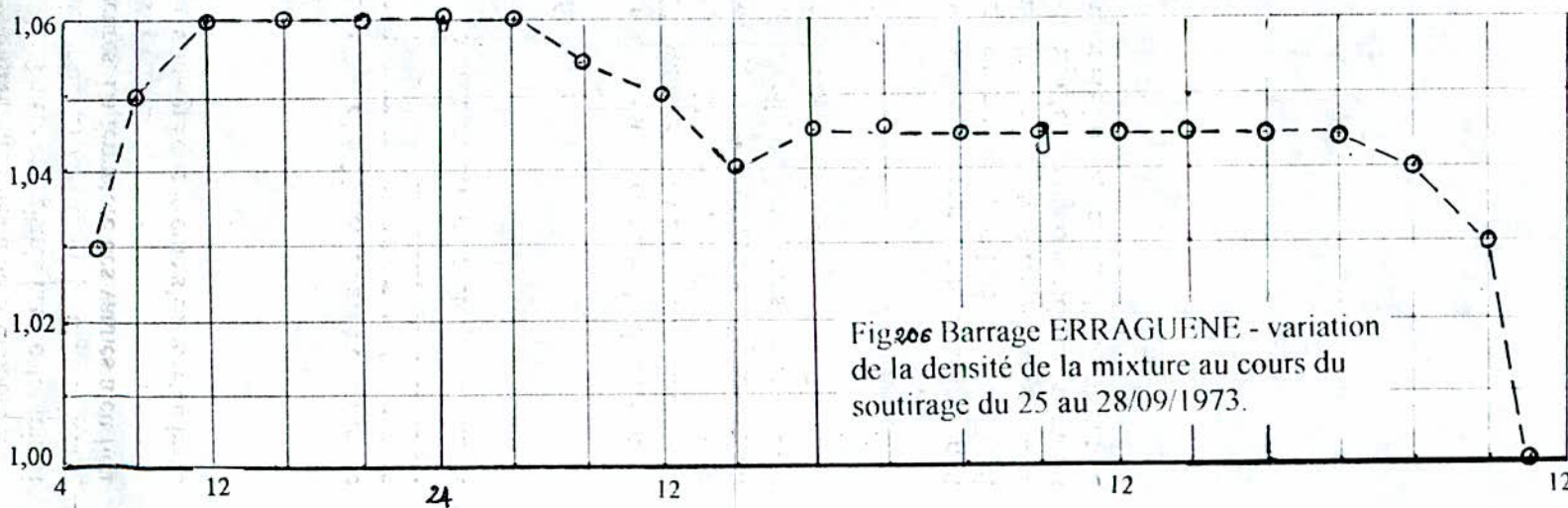


Fig 206 Barrage ERRAGUENE - variation de la densité de la mixture au cours du soutirage du 25 au 28/09/1973.

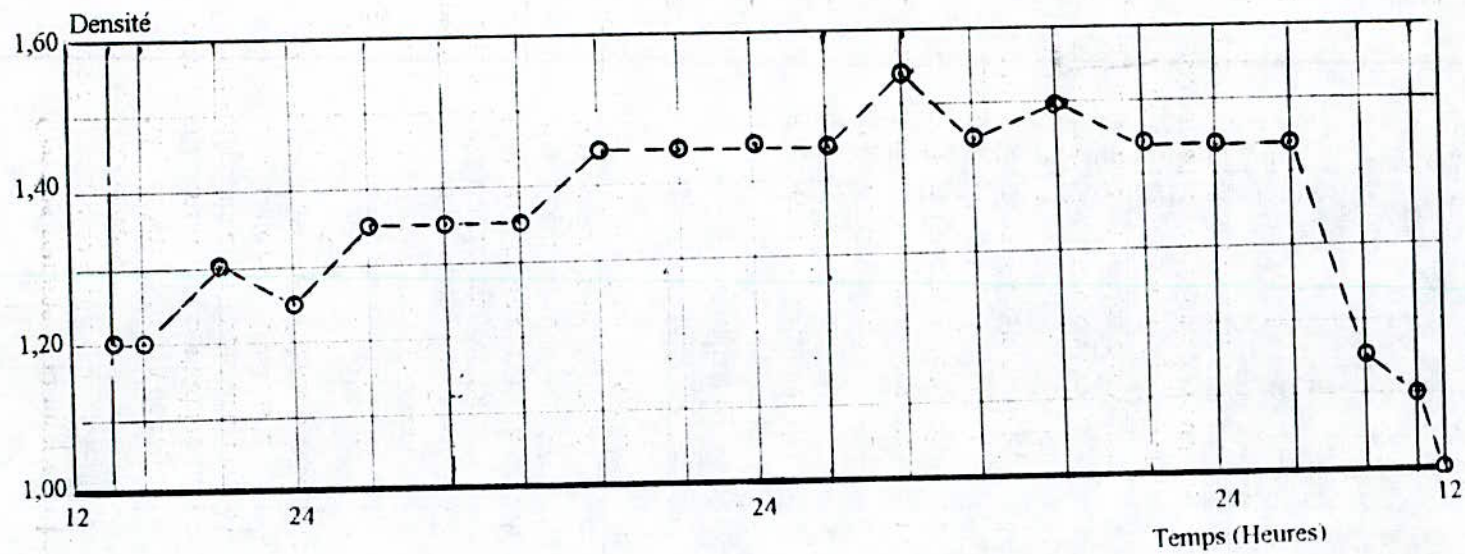


Fig.207- Barrage d'ERRAGUENE.
Soutirage du 15 au 18 novembre 1990.
Variation temporelle de la densité de mixture

c) Barrage de GHRIB

-Soutirage du 2 au 19 Avril 1939 (fig. 208)

Certains soutirages au niveau du barrage de GHRIB sont mieux pratiqués par rapport à ceux du barrage de OUED EL FODDA, mais ils restent toujours effectués avec des densités de mixtures très élevées.

La première opération de soutirage a eu lieu le 02 Avril à 7 heures (fig. 208) après avoir détecté une densité de l'eau turbide égale à **1,160**, le soutirage a duré uniquement 3 heures et la masse volumique de la suspension a chuté de **1,220** à **1,000** en deux heures. Ceci explique que le courant de densité est arrivé dans la zone I (près de la vanne) bien avant 7 heures, la consolidation des particules fines a été bien avancée et l'évacuation de la vase devient difficile. Il y'aura uniquement un cône de vase qui sera dégagé et entraîné par la vitesse de l'écoulement dû à l'ouverture de la vanne (fig. 209). 07 jours après, la réouverture de la vanne de fond a eu lieu le 09 Avril à 7 heures avec une densité de la mixture égale à **1,190**, ce qui justifie qu'une deuxième fois, la consolidation des matériaux fins ramenés par le deuxième courant de densité a été bien avancée. La réouverture de la vanne de fond a provoqué la chute brusque de la densité de la suspension de **1,190** à **1,045** en 1 heure, ce qui prouve qu'une quantité faible de vase se trouvant près de la vanne a été soutirée l'opération a été répétée plusieurs fois durant la période du 02 au 19 Avril. (fig. 208).

Nous considérons ce cas comme « **mauvais** » soutirage et peut provoquer rapidement le blocage de la vanne. Cette vitesse de consolidation dépend essentiellement de la nature de la vase (fig. 209).

d) Barrage de OUED EL FODDA

-Soutirage du 08 au 20 Décembre 1937 (fig. 210)

Durant cette crue d'une durée de 12 jours, le soutirage du courant de densité a été pratiqué d'une manière discontinue. Dix opérations d'évacuation ont eu lieu avec des temps faibles et une densité de la mixture trop élevée dépassant la valeur de **1,300**. Nous constatons d'après la figure 210, représentant la variation de la densité de la mixture au cours du soutirage que la majorité des opérations de soutirage durent 30 mn à 1 heure avec une chute de densité de **1,300** à **1,000**. De telles manoeuvres ont provoqué le blocage définitif de la vanne de fond en 1948 (fig. 211). Contrairement à la vase de GHRIB, celle de OUED EL FODDA se consolide plus rapidement. Malgré la mise en service des vannettes en 1961, installées spécialement pour le soutirage des courants de densité, on continue toujours à évacuer la suspension sous forme plastique avec des densités très élevées (photo. 59 et 60). Ce qui a favorisé l'augmentation de la vase dans la retenue. La continuité de telles manoeuvres va certainement provoquer l'obturation de ces vannettes (fig. 212).

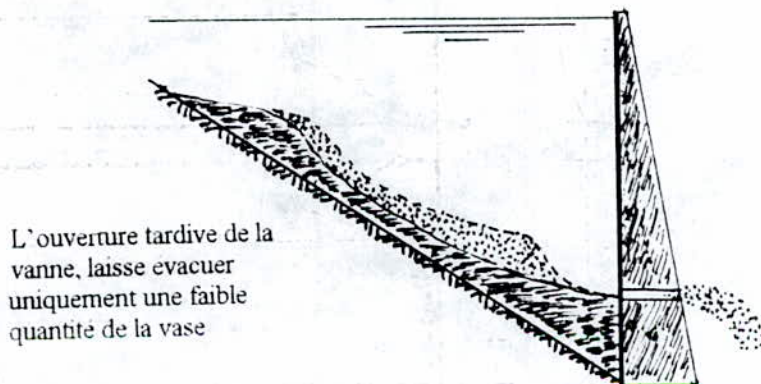
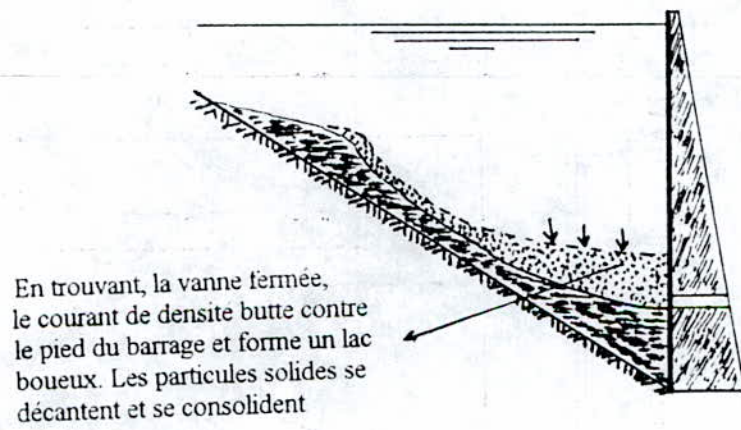
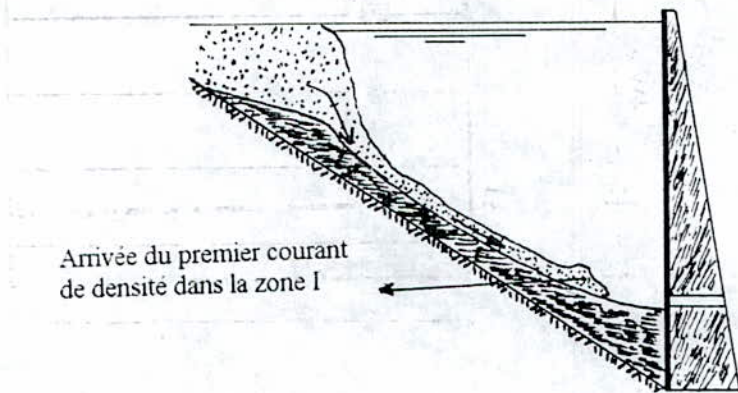
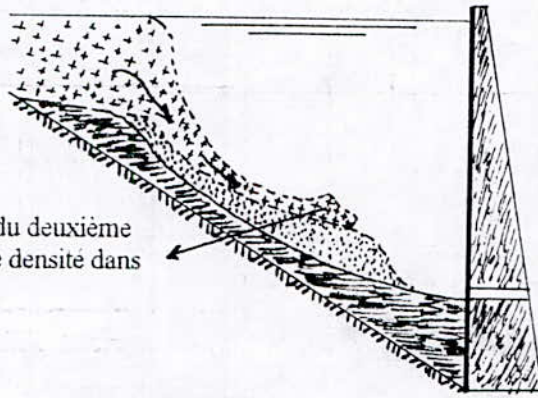
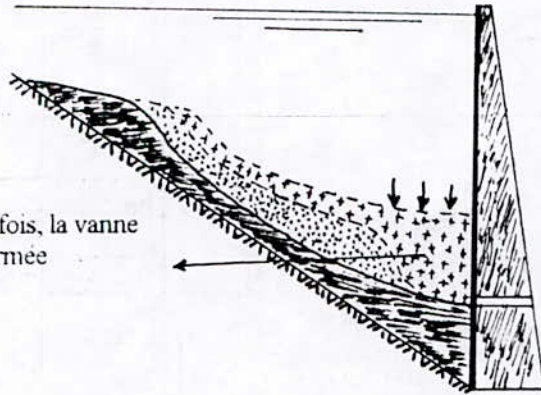


Fig.209- Les étapes de soutirage des sédiments au niveau du barrage de GHRIB

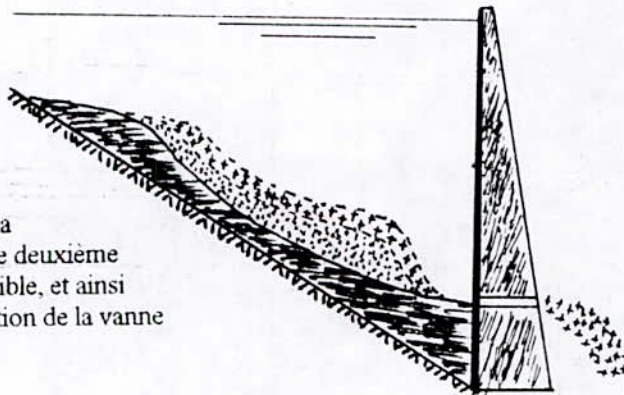
L'arrivée du deuxième
courant de densité dans
la zone I



Une nouvelle fois, la vanne
se trouvant fermée



L'ouverture tardive de la
vanne, laisse évacuer une deuxième
fois une quantité trop faible, et ainsi
de suite jusqu'à obturation de la vanne



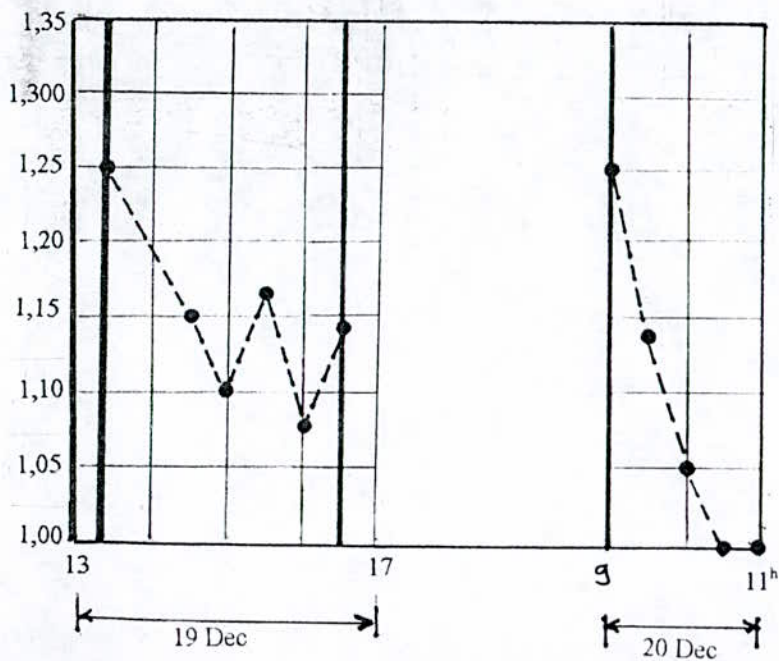
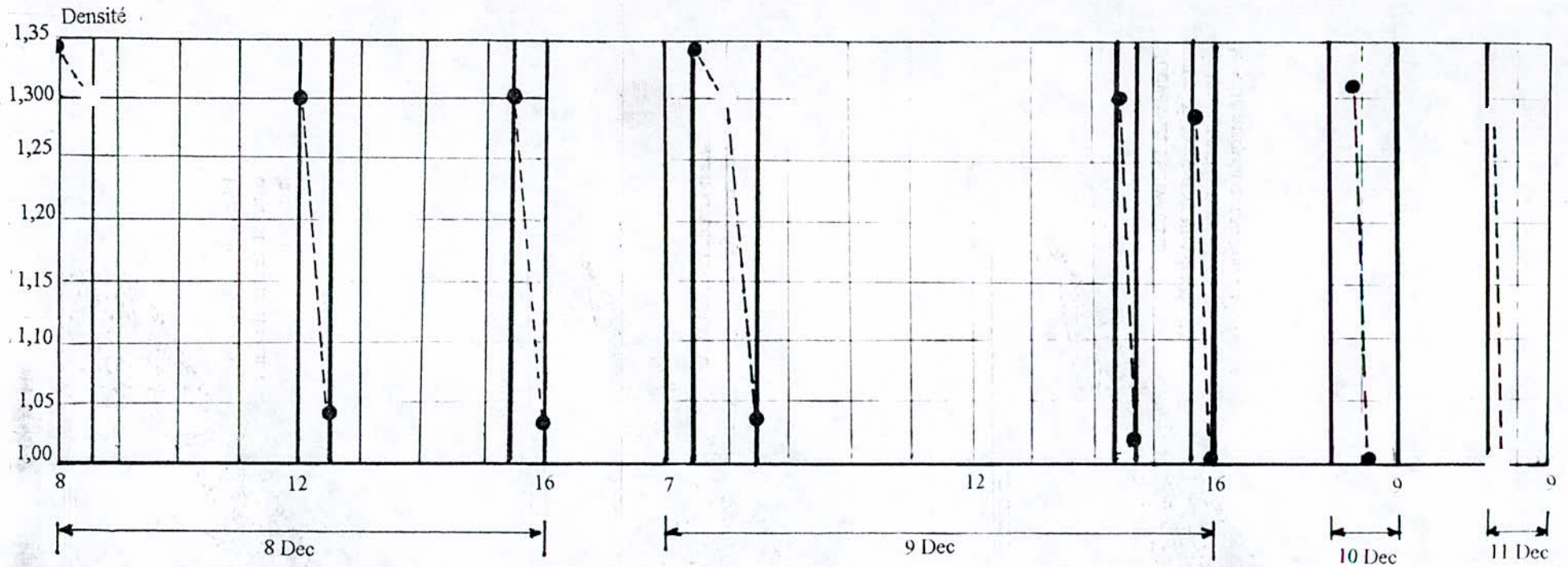
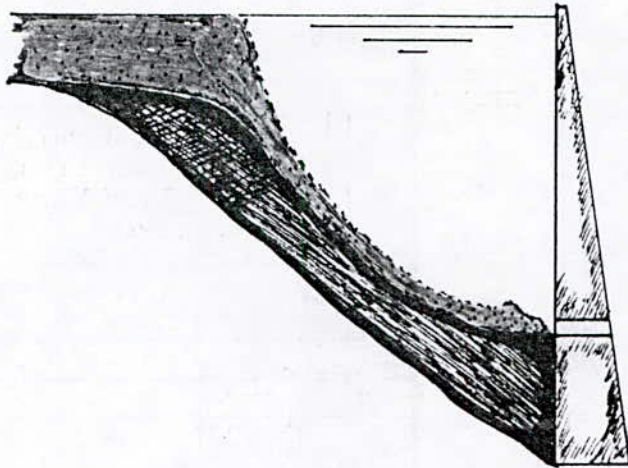
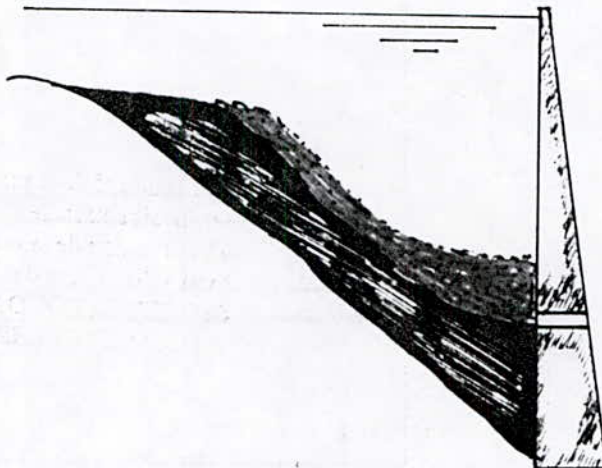
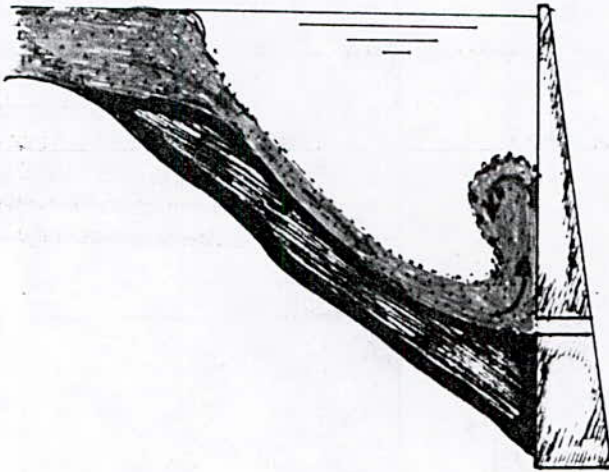


Fig.210- Barrage de OUED EL FODDA. Soutirage du 8 au 20 décembre 1937. Variation de la densité de la mixture au cours du soutirage.

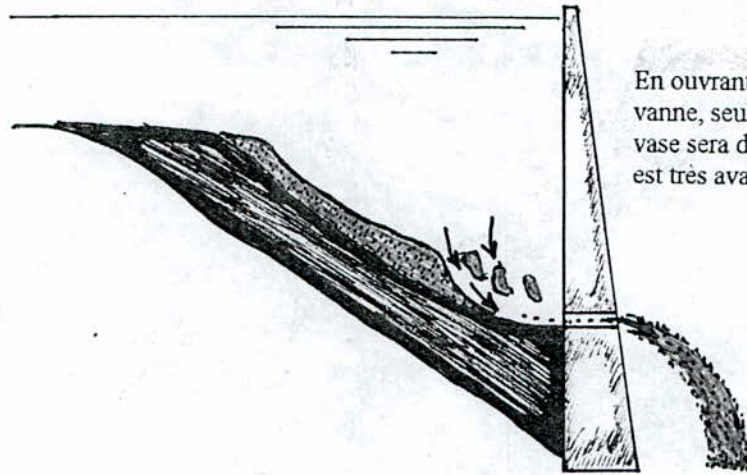


Trouvant la vanne fermée, le courant de densité butte contre elle et revient dans le sens inverse

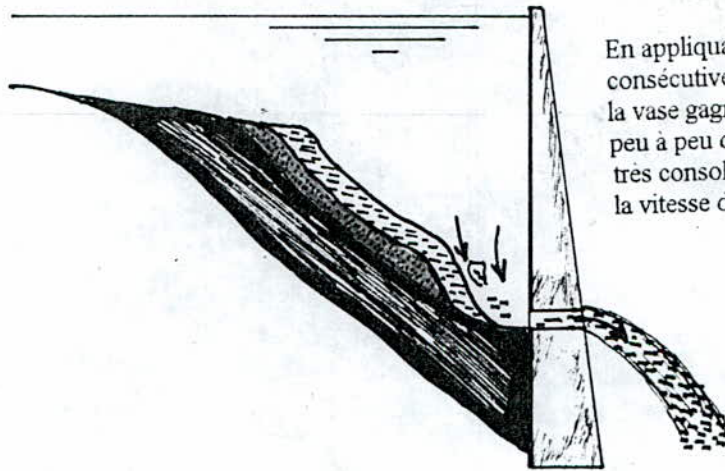


Le courant de densité se stabilise.
Décantation des particules fines

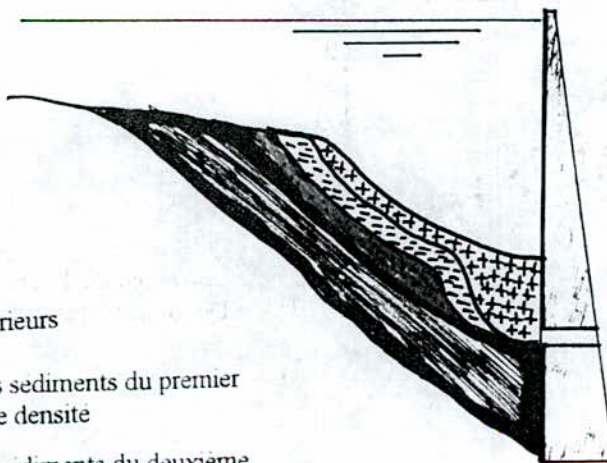
Fig.211- Schéma probable de l'obturation de la vanne de fond du barrage de OUED EL FODDA en1948







En ouvrant tardivement la vanne, seulement un cône de vase sera dégagé (la consolidation est très avancée)



En appliquant pour la deuxième fois consécutive le « mauvais soutirage », la vase gagne du terrain et se rapproche peu à peu de la vanne. Le talus des dépôts très consolidés ne peut pas être érodé par la vitesse du soutirage



La continuité de la pratique du « mauvais soutirage » conduira à l'obturation de la vanne de fond. C'est le cas des barrages de OUED EL FODDA (1948) et FOUM EL GHERZA (1982)

-  Dépôts antérieurs
-  Dépôts des sédiments du premier courant de densité
-  Dépôts des sédiments du deuxième courant de densité
-  Dépôts des sédiments du nième courant de densité

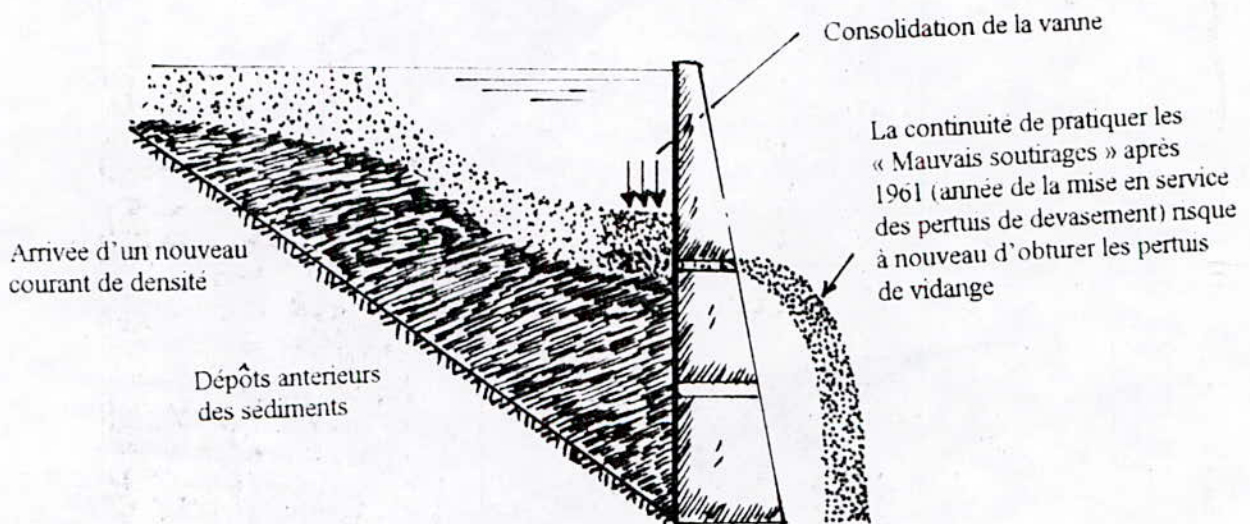
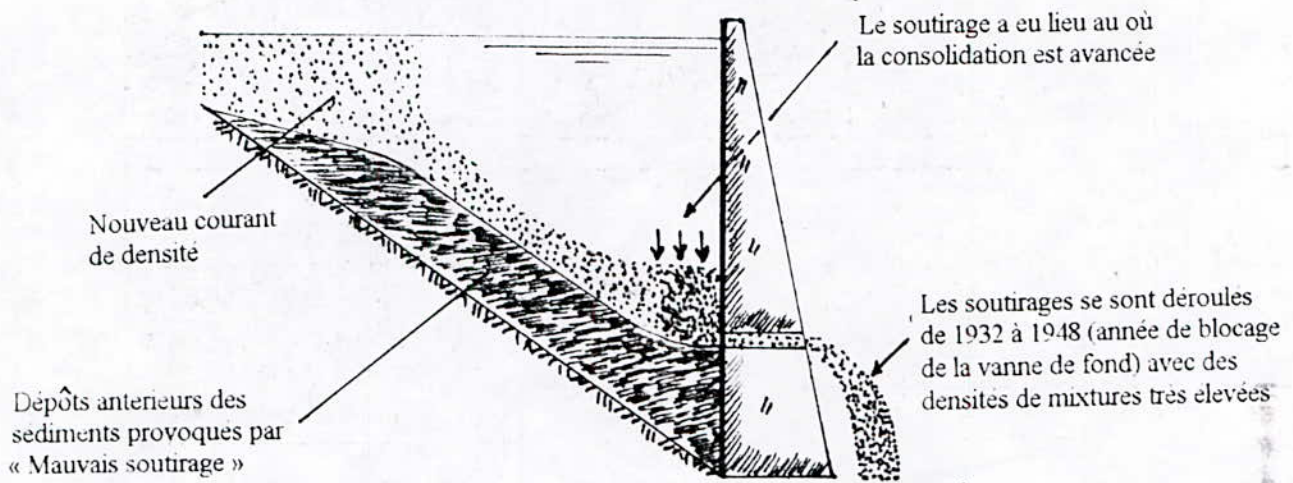


Fig.212- Barrage de OUED EL FODDA. Déroulement des opérations de soutirage

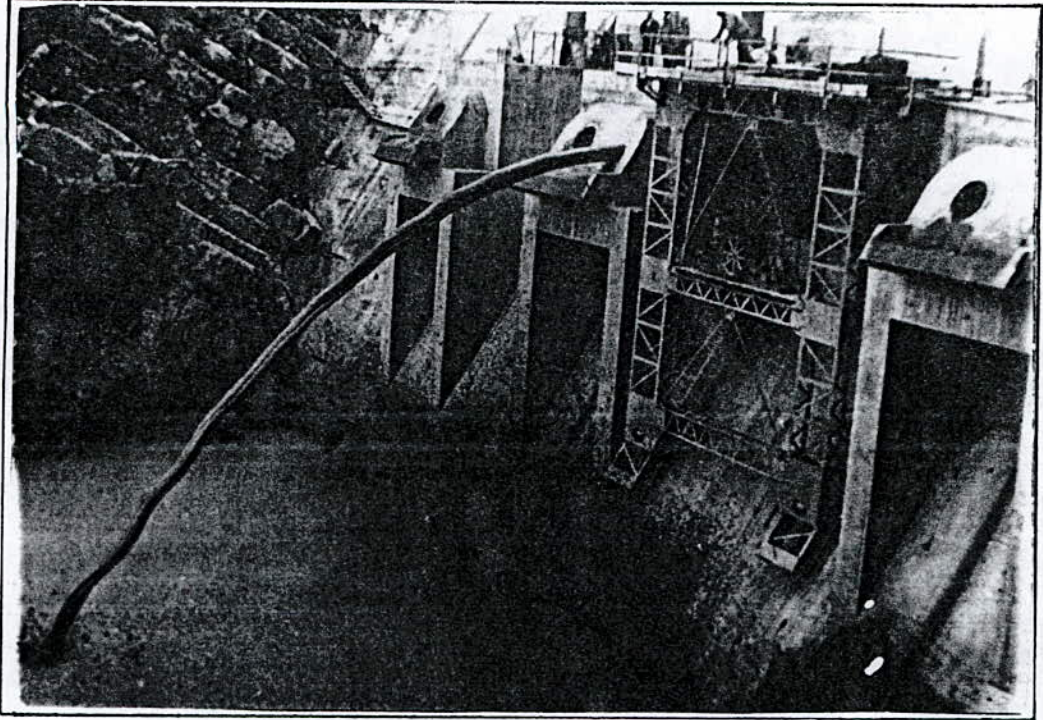


Photo.59- Barrage OUED EL FODDA. La pratique des soutirages s'est effectuée avec des densités très élevées

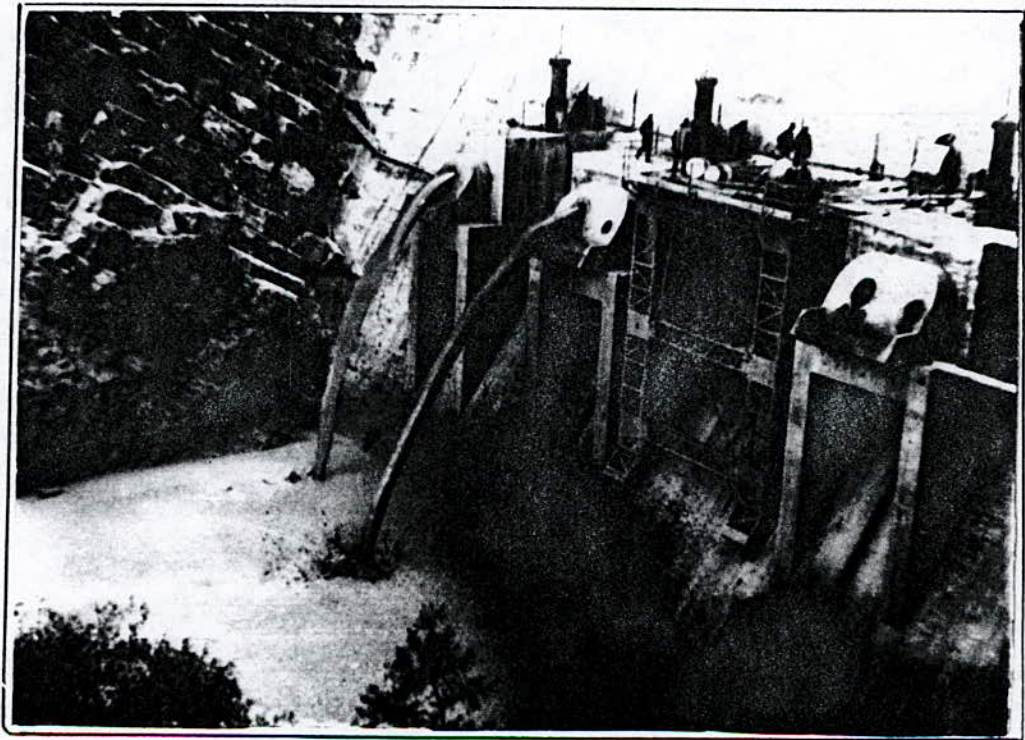


Photo.60- Barrage de OUED EL FODDA. Une fois que la consolidation a eu lieu que l'ouverture des vannettes se fait. C'est avec ces manoeuvres que la vanne de fond a été complètement obturée en 1948.

e) Barrage de K'SOB

-Soutirage du 01 au 02 Octobre 1985 (fig. 213)

Le soutirage a duré environ 31 heures sans arrêt, et la vanne de fond a été ouverte le premier octobre à 15 heures après prélèvement d'une densité de la mixture égale à **1,250**, valeur qui laisse supposer que le courant de densité est arrivé dans la zone I de la retenue bien avant 15 heures, puisque cette forte valeur est obtenue à la suite d'une décantation rapide des particules fines drainées par les courants de densité, et accélérée par la fermeture de la vanne de fond pendant un temps assez long.

Durant les trois premières heures du soutirage, la densité de la mixture a chuté de **1,250** à **1,120** pour ensuite se maintenir entre **1,050** et **1,100** durant environ **21 heures**. La vanne a été fermée le 02 Octobre à 21 heures, alors que l'eau évacuée était claire. Durant cette opération, un volume de **47.10³ m³** de vase a été soutiré pour un volume d'eau égal à **240.10³ m³**, soit un rapport eau / vase égal à **5**, ce qui peut classer ce cas comme « **mauvais** » soutirage.

V.11. Propositions pratiques pour un « bon » soutirage (fig. 214)

Dès l'arrivée d'une crue dans la retenue d'un barrage, on commence à faire des mesures de densité de l'eau (près des vannes) par la prise systématique d'échantillons (avec une bouteille) ou par l'emploi d'un appareillage spécial constitué par un ensemble de tubes de faible diamètre (fig. 168), qui détermine l'importance de la distribution verticale des densités des matières solides aux abords de la prise d'eau. A notre connaissance, les barrages d'IGHIL-EMDA et d'ERRAGUENE sont les seuls à être équipés d'un tel appareillage.

Dès que la densité se rapproche de celle de la zone optimale du soutirage (par exemple, pour le barrage d'IGHIL-EMDA, **DUQUENNOIS H.** a proposé la valeur de **1,020** qui est inférieure à la valeur minimale (**1,030**) de la zone optimale du soutirage), on ouvre une vannette (ou la vanne de fond à **1/4** pour les barrages non équipés d'un dispositif de soutirage) pour amorcer l'écoulement des couches inférieures, et éviter le remous du courant de densité et l'accumulation de vase concentrée devant les vannes, ce qui rendrait par la suite plus difficile le réglage du débit.

On mesure toutes les heures (éventuellement toutes les deux heures) la densité de la suspension soutirée: tant qu'elle ne dépasse pas la valeur de la densité correspondant à l'apparition de la rigidité initiale de la suspension (tableau 29), il n'ya pas lieu d'ouvrir d'autres vannettes (ou bien d'ouvrir la vanne de fond à **1/2** ou plus). Il est à noter que **DUQUENNOIS H. [72]** a proposé pour le cas d'IGHIL-EMDA l'intervalle de densité **1,040-1,050**. Si au contraire, la densité dépasse cette valeur du point d'inflexion du flux solide, on ouvre d'autres vannettes (ou la vanne de fond à **1/2** ou **3/4**) jusqu'à ce que la densité se stabilise à une valeur de la zone optimale du soutirage. Puis, on essaye de garder le plus longtemps possible l'écoulement du soutirage.

Enfin, dès que la densité commence à diminuer, on ferme les vannettes une par une (ou progressivement la vanne de fond) et on arrête les opérations lorsque la densité tombe à des valeurs inférieures à celle du flux solide maximum, mais on continue à faire des mesures de la densité jusqu'à la fin de la crue.

Il est à noter que les variations de densité sont assez lentes et des manoeuvres de vannes trop rapprochées risquent de donner des résultats très divergents. Selon **DUQUENNOIS H. [72]**: « la manoeuvre d'une vannette par heure suffit généralement à régler correctement la densité ».

Lorsqu'il ne reste plus qu'une vannette ouverte et que la densité descend au dessous de celle du flux solide maximum, il est préférable de laisser ouverte cette vannette (ou la vanne de fond ouverte à **1/4**) jusqu'à une valeur beaucoup plus faible (**1,020** par exemple) pour s'assurer que le courant de densité soit complètement soutiré. Une ouverture de courte durée pourra se faire après quelques heures de la fin de l'opération.

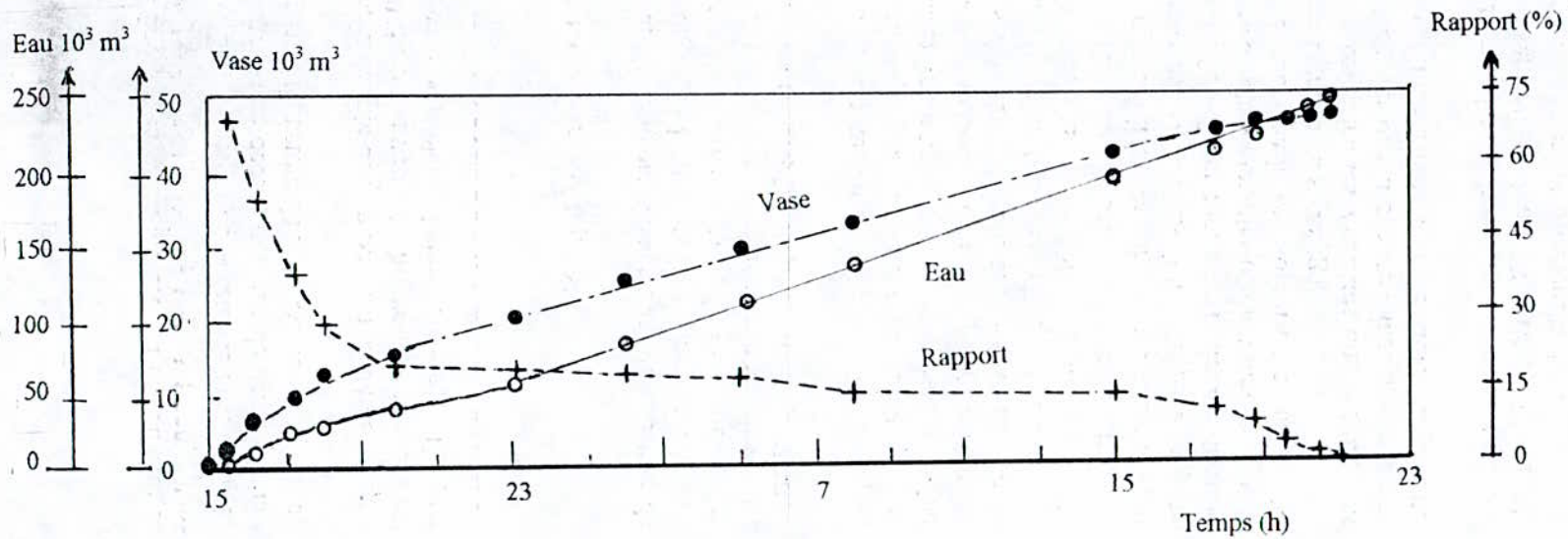
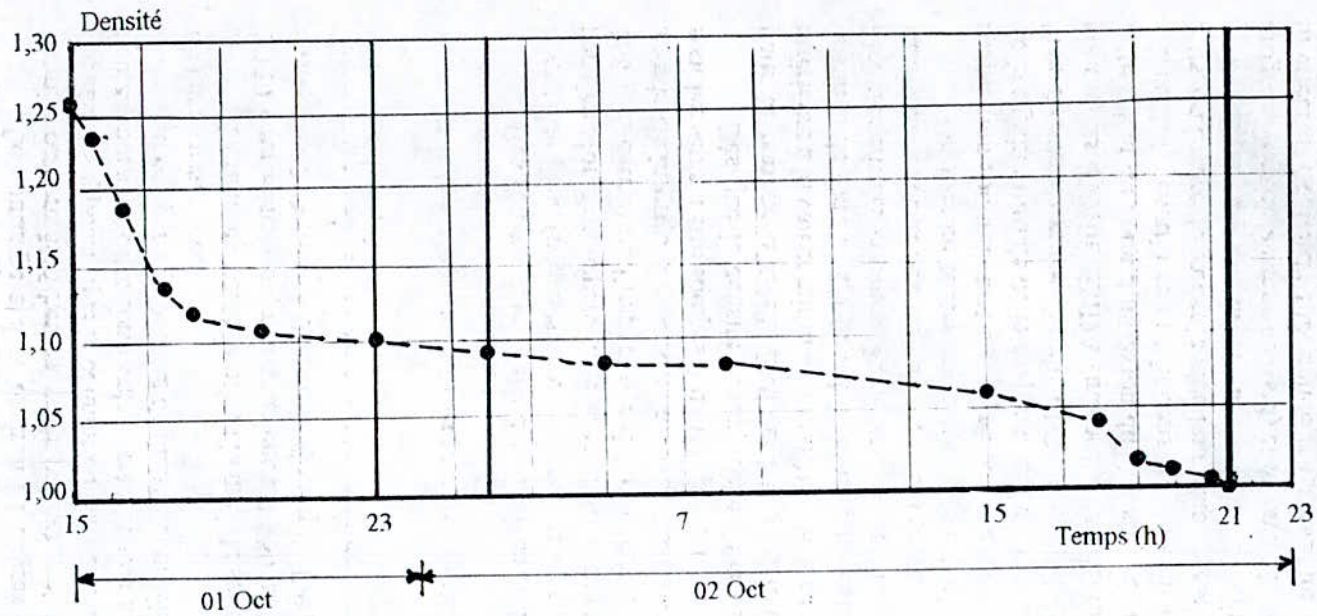
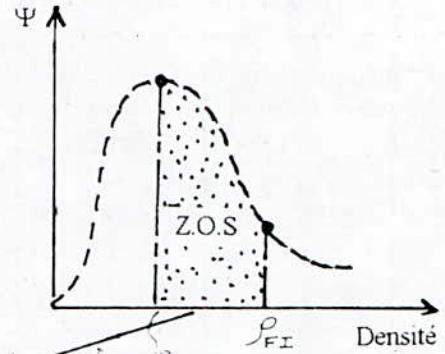
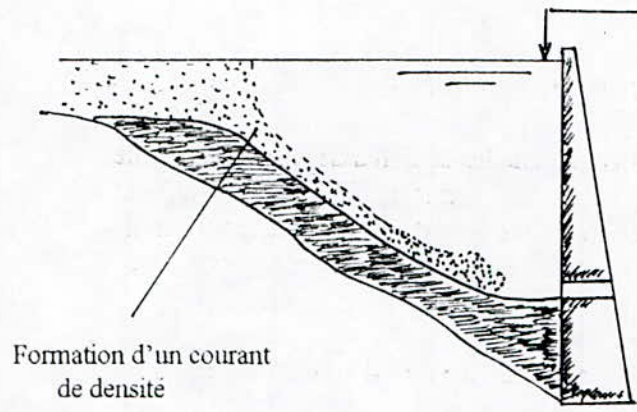


Fig.213- Barrage de K'SOB. Soufflage
du 01 au 02 octobre 1985

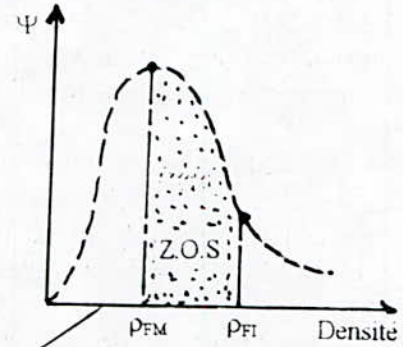
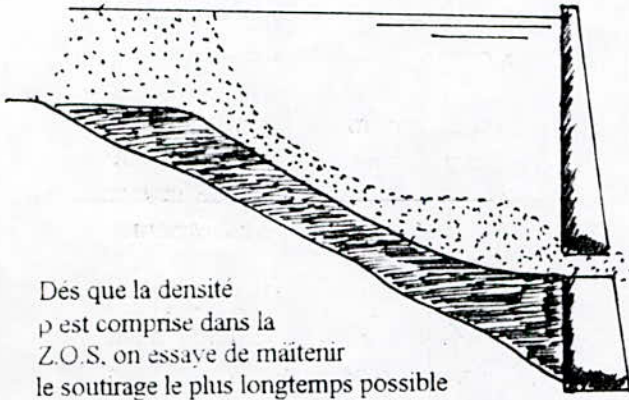
A l'arrivée d'une crue dans la retenue, on mesure la densité de l'eau

Formation d'un courant de densité



Dès que la densité ρ est comprise dans la Z.O.S. on essaye de maintenir le soutirage le plus longtemps possible

$$\rho_{FI} < \rho < \rho_{FM}$$



$$\rho < \rho_{FM}$$

Des que la densité de la mixture devient inférieure à ρ_{FM} , on arrête l'opération.

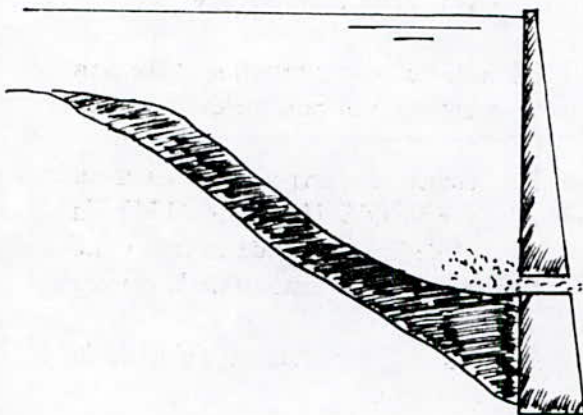


Fig.214- La pratique de la technique du soutirage

V.12. Résultats et relations

V.12.1. Formation des courants de densité de faible concentration

A partir des opérations de soutirage, on peut constater que les courants de densité de faible concentration ont pu atteindre la zone I des retenues de barrages d'IGHIL EMDA et ERRAGUENE. Certains soutirages ont été effectués avec des densités de la suspension ne dépassant pas **1,030**, ce qui veut dire qu'un courant de densité de faible concentration peut se former et se propager jusqu'au pied du barrage.

V.12.2. Apparition de deux à trois courants de densité au cours d'une même crue

On peut constater d'après les opérations de soutirage, que dans certains cas, lorsque l'apport de la crue est important, deux à trois courants de densité peuvent atteindre successivement la zone I de la retenue (fig. 215). Si par exemple, on ne pratique pas le soutirage au moment opportun, il y'aura des dépôts des sédiments successifs. A cet effet, le contrôle de la densité de l'eau (à coté des vannes) doit être maintenu durant toute la durée de la crue.

V.12.3. Remaniement des dépôts des sédiments par les courants de densité

on a constaté sur plusieurs opérations de soutirage que lorsqu'on pratique deux soutirages successifs (présence de deux courants de densité), le deuxième soutirage dure plus longtemps que le premier et avec des densités plus élevées, ceci est dû à notre avis au fait que les sédiments drainés par le premier courant de densité et qui ne sont pas encore très consolidés sont remaniés par le deuxième courant de densité (fig. 216).

Peu de chercheurs se sont intéressés à ce phénomène, en effet, **DUQUENNOIS H.** (1949) [134] a conclu sur les observations faites sur les courants de densité dans la retenue d'EL OULDJA que les dépôts en cours de route sont d'autant plus importants proportionnellement que le débit d'« underflow » est plus faible. Ces dépôts ne sont pas remobilisables par l'« underflow » suivant quelque soit son débit. Le même auteur [79] a observé en 1954 dans la retenue du barrage d'IGHIL EMDA que le dépôt de la vase au fond de la retenue en fin mars était de **20 cm** seulement, alors qu'il avait atteint **90 cm** en février, ceci semble montrer que la consolidation est relativement lente et que certains dépôts peuvent être remaniés.

V.12.4. Influence de la concentration des sédiments sur le débit de soutirage

Plus la densité de la suspension est élevée, plus la quantité de la suspension soutirée sera faible, et plus la densité de la suspension est faible, plus la quantité de la mixture évacuée sera importante.

Les courants de densité se manifestent dans une retenue à l'arrivée des crues et disparaissent à l'arrêt des crues comme il a été dit par **DUQUENNOIS H.** (1949) [134]: «la décroissance du débit solide de l'«underflow » est rapide et suit de près la fin de la crue ». Le même auteur a affirmé que le trajet de l'«underflow » est une fonction de la position de la montée du plan d'eau et la densité de l'«underflow » [134].

Nous avons examiné l'influence de la concentration des sédiments sur le débit de la mixture soutirée, que nous avons représenté par le nombre addimensionnel :

$$F_r = Q_m^2 / (g' \cdot H^5) \dots \dots \dots 31$$

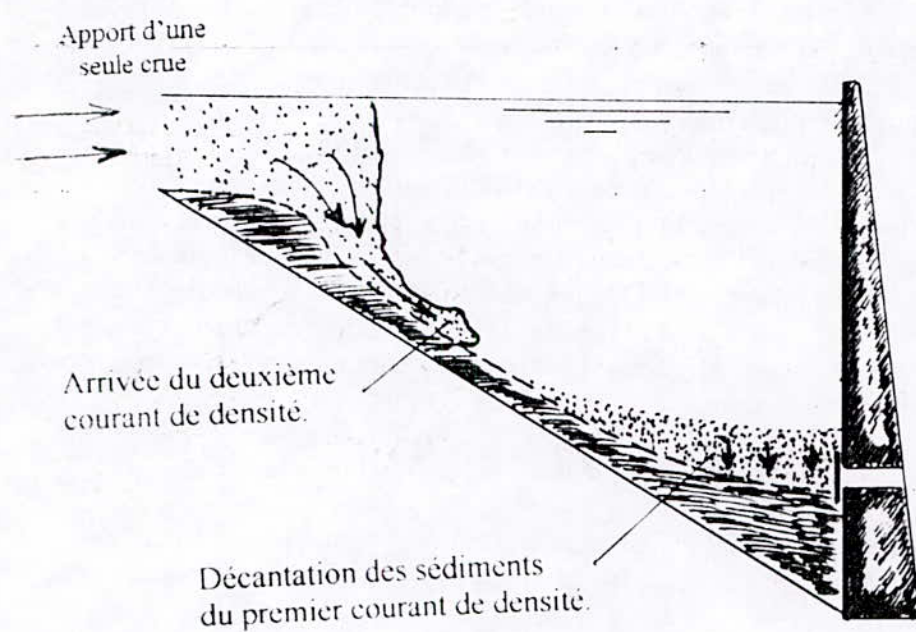
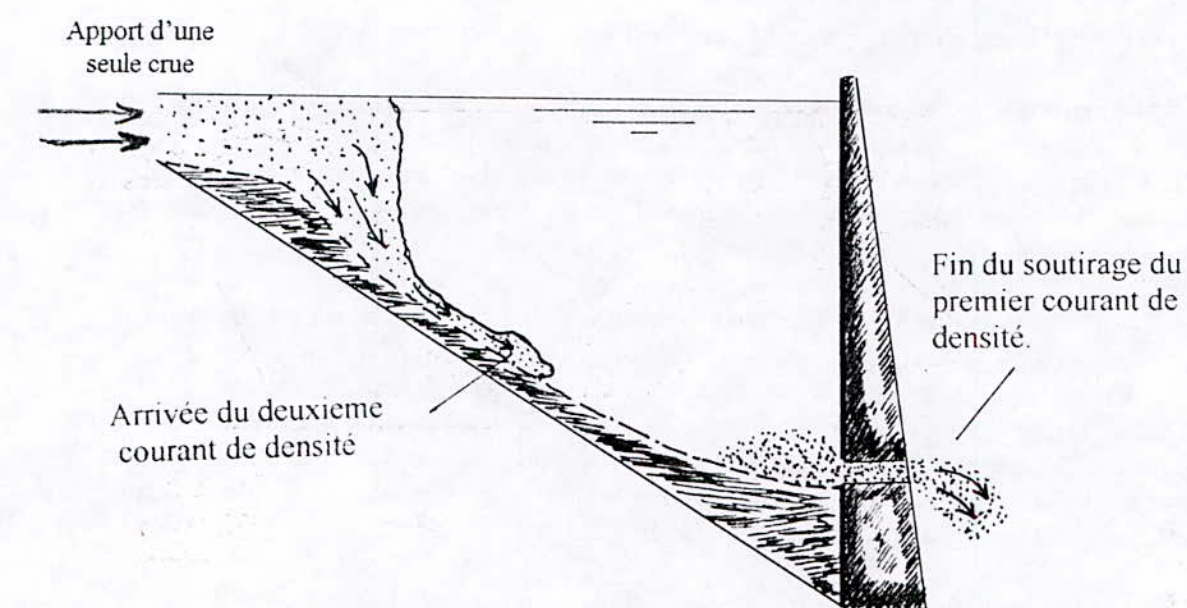


Fig.215- Au cours d'une crue, deux (ou trois) courants de densité peuvent se former successivement et atteindre le pied du barrage

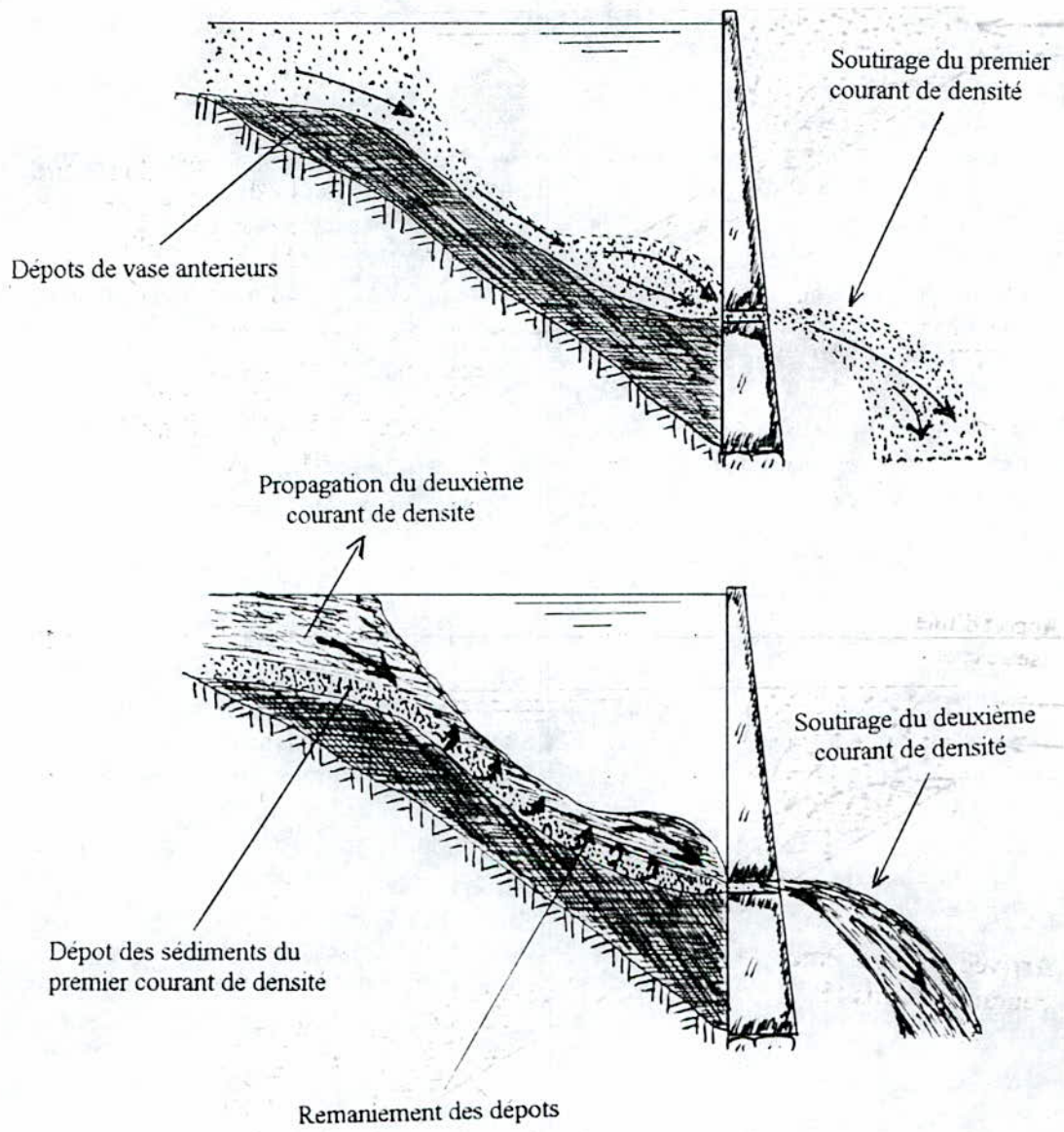


Fig.216- Remaniement de la vase par les courants de densité

L'étude a été faite sur les mixtures des retenues de barrages d'ERRAGUENE, IGHIL EMDA, K'SOB, FERGOUG, OUED EL FODDA et GHRIB. Nous constatons d'après les graphes de la figure 217 (a à f) qu'un nuage de points prend l'allure d'une hyperbole, donc plus on soutire la mixture avec des fortes concentrations plus le débit sera faible.

Analysons les barrages étudiés cas par cas

a) Barrage d'ERRAGUENE

Nous constatons d'après la figure 217 a, que la forte densité des points est comprise entre les concentrations 1 % et 10 %, ce qui est dû aux opérations de soutirages qui sont pratiquées généralement avec une gamme de densités de la mixture comprise entre 1,020 et 1,060. Ce qui confirme que l'ensemble des opérations de soutirages ont été exécutées pour des densités de mixtures ne dépassant pas la densité du changement rhéologique de la suspension (1,075).

b) Barrage d'IGHIL EMDA

Les mêmes remarques que celles du barrage d'ERRAGUENE peuvent être tirées. Les vannettes ont été bien manoeuvrées et l'ensemble des soutirages ont été effectués dans la zone optimale de soutirage (1,030 - 1,060) (fig. 217 b).

c) Barrage de K'SOB

D'après la figure 217 c, nous pouvons dire que l'ensemble des opérations de soutirages ont été mal menées. Les manoeuvres de la vanne de fond se sont déroulées avec des pertes d'eau claire considérables de la capacité de la retenue. La densité de la mixture soutirée varie entre 2 % et 50 % pour des valeurs de concentration de 20 % à 50 %, le nombre addimensionnel F_t est proche de zéro, ce qui explique qu'une faible quantité de vase à l'état plastique a été soutirée avec un faible volume d'eau.

d) Barrage de FERGOUG et de GHRIB

Les mêmes constatations que celles du barrage de K'SOB peuvent être tirées de la figure 217 (d et e). Des opérations de soutirage ont été effectuées avec des concentrations en sédiments de la mixture avoisinant les 40 %.

e) Barrage de OUED EL FODDA

De la figure 217 f, nous pouvons dire que les opérations de soutirage ont été effectuées avec des concentrations en sédiments dans la suspension allant jusqu'à 70 %, ce qui peut expliquer que l'évacuation de la vase a été effectuée à l'état purement plastique et avec une forte énergie et évidemment la quantité récupérée est faible, ce sont ces opérations qui ont mené à l'obturation de la vanne de fond en 1948, et comme nous l'avons déjà mentionné précédemment la poursuite de ces « mauvais » soutirages engendrera forcément le blocage des pertuis de dévasement dans les années à venir.

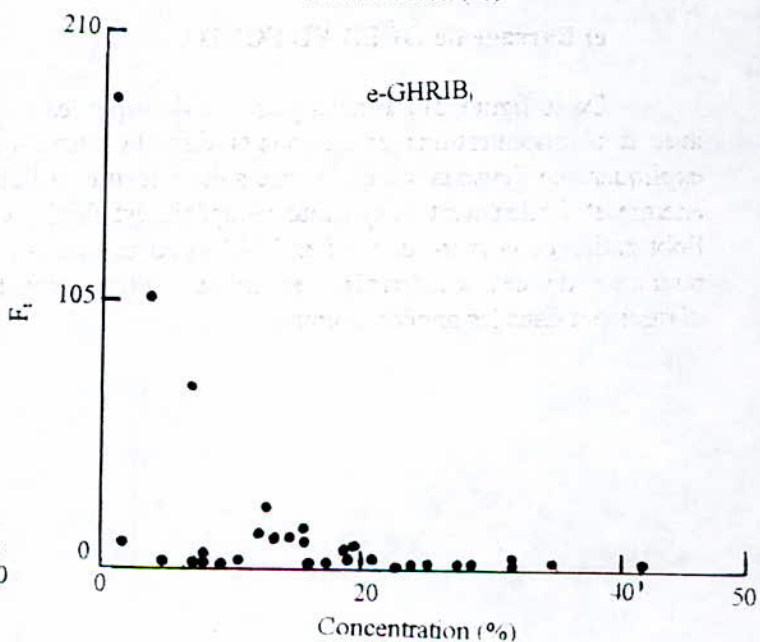
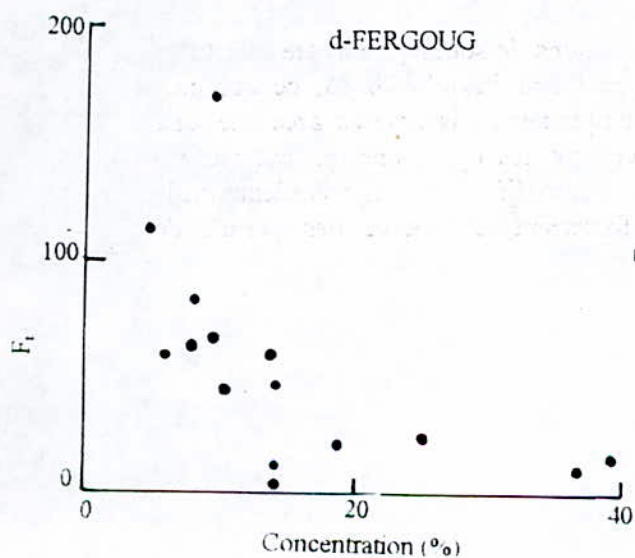
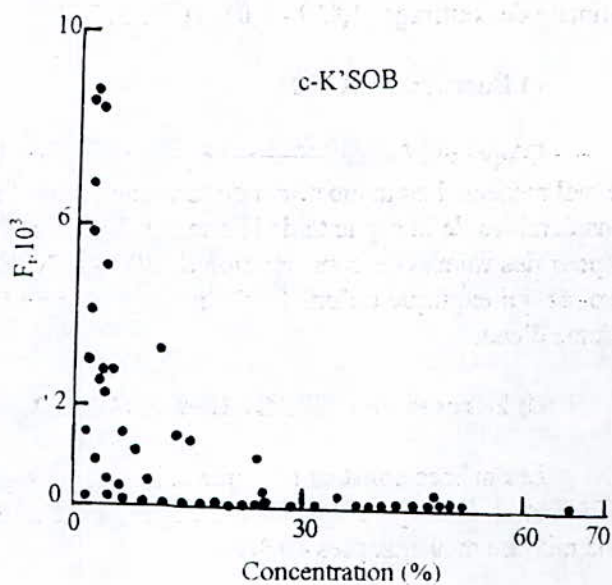
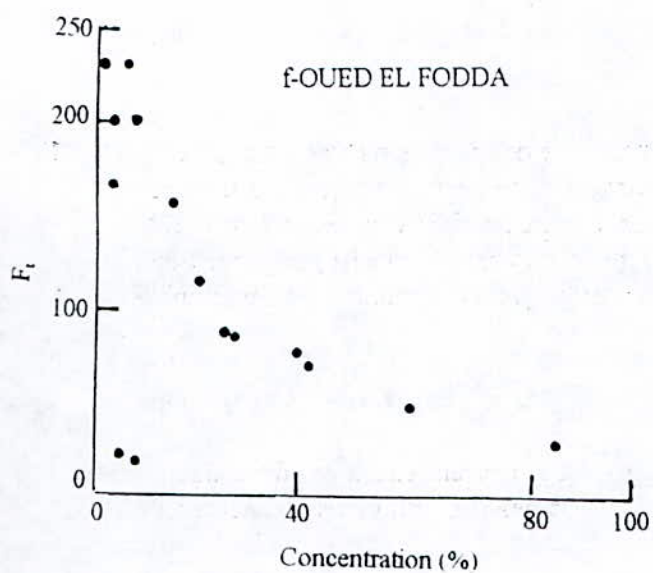
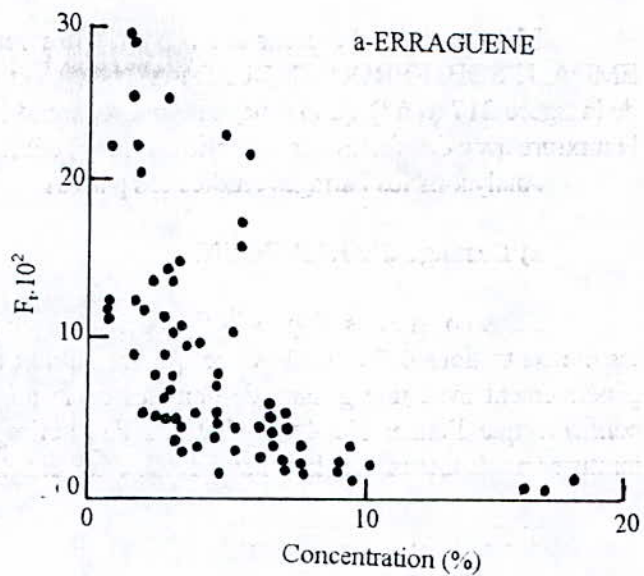
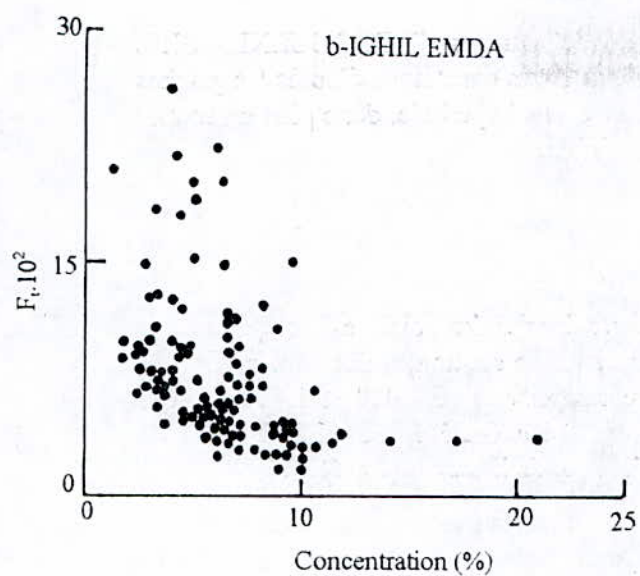


Fig.217- Variation du nombre adimentionnel (F_i) en fonction de la concentration de la mixture évacuée

V.12.5. Variation du facteur $(g'H)^{1/2}$ en fonction de la densité de la mixture

Selon DUQUENNOIS H. (1949) [134]: «plus le débit d'un « underflow » est grand, moindre est le risque de dépôt ». Le même auteur a affirmé en 1954 [79]: «le soutirage des apports libère pour la sédimentation une capacité de dépôts d'autant plus importante que le soutirage est plus rapide. La vitesse du soutirage est donc un élément essentiel dans la lutte contre l'envasement ».

Faisant suite à la relation précédente $Ft = Q_m^2 / (g'H^5) = f(c)$, nous avons représenté sur la figure 218 (a à f), la relation $(g'H)^{1/2} = f(\text{densité})$ pour les mêmes types de vases (ERRAGUENE, IGHIL EMDA, OUED EL FODDA, GHRIB, FERGOUG et K'SOB).

Nous constatons que pour les six cas, le facteur $(g'H)^{1/2}$ (caractérise la vitesse de soutirage de la mixture) croît en fonction de la densité de la mixture d'une façon polynomiale de second ordre. Pour les six barrages, le soutirage débute à partir des densités supérieures à **1,010** (correspond à $(g'H)^{1/2} = 1,4$ m/s). Pour des densités importantes (dépassant la valeur du changement rhéologique), la fonction $(g'H)^{1/2}$ enregistre un certain ralentissement et même une stabilisation (un palier), ceci est dû à ce que la mixture devient difficile et demande beaucoup d'énergie.

Finalement, nous disons que si le soutirage est exécuté pour des faibles densités de mixtures, la quantité évacuée sera importante, et pour des fortes densités de mixture, la quantité évacuée sera forte.

V.12.6. Relation entre le débit de vase évacué et le facteur $(\Delta\rho / \rho_m) (H)^{1/2}$

Afin d'estimer la quantité de vase évacuée durant chaque opération de soutirage, nous avons relié le débit de vase Q_v à la densité de la mixture ρ_m et la charge d'eau H dans la retenue. Pour cela, nous avons représenté sur la figure 219 (a à f) la variation du débit de vase en fonction du facteur $(\Delta\rho / \rho) (H)^{1/2}$ pour les mixtures des retenues d'IGHIL EMDA, ERRAGUENE, OUED EL FODDA, FERGOUG, GHRIB et K'SOB. Nous constatons bien que le débit de vase Q_v soutiré par les vannes varie linéairement en fonction du facteur $(\Delta\rho / \rho) (H)^{1/2}$. Les relations obtenues sont représentées dans le tableau 30.

Type de vase	Relation
GHRIB	$Q_v = 2,39 (\Delta\rho/\rho_m H^{1/2}) + 0,38$
FERGOUG	$Q_v = 4,23 (\Delta\rho/\rho_m H^{1/2}) + 0,29$
IGHIL EMDA	$Q_v = 0,46 (\Delta\rho/\rho_m H^{1/2}) + 0,005$
ERRAGUENE	$Q_v = 0,64 (\Delta\rho/\rho_m H^{1/2}) - 0,004$
OUED EL FODDA	$Q_v = 14,59 (\Delta\rho/\rho_m H^{1/2}) + 0,71$
K'SOB	$Q_v = 1,18 (\Delta\rho/\rho_m H^{1/2}) + 0,04$

Tableau 30- Relation débit de vase soutirée en fonction du facteur $(\Delta\rho/\rho_m H^{1/2})$

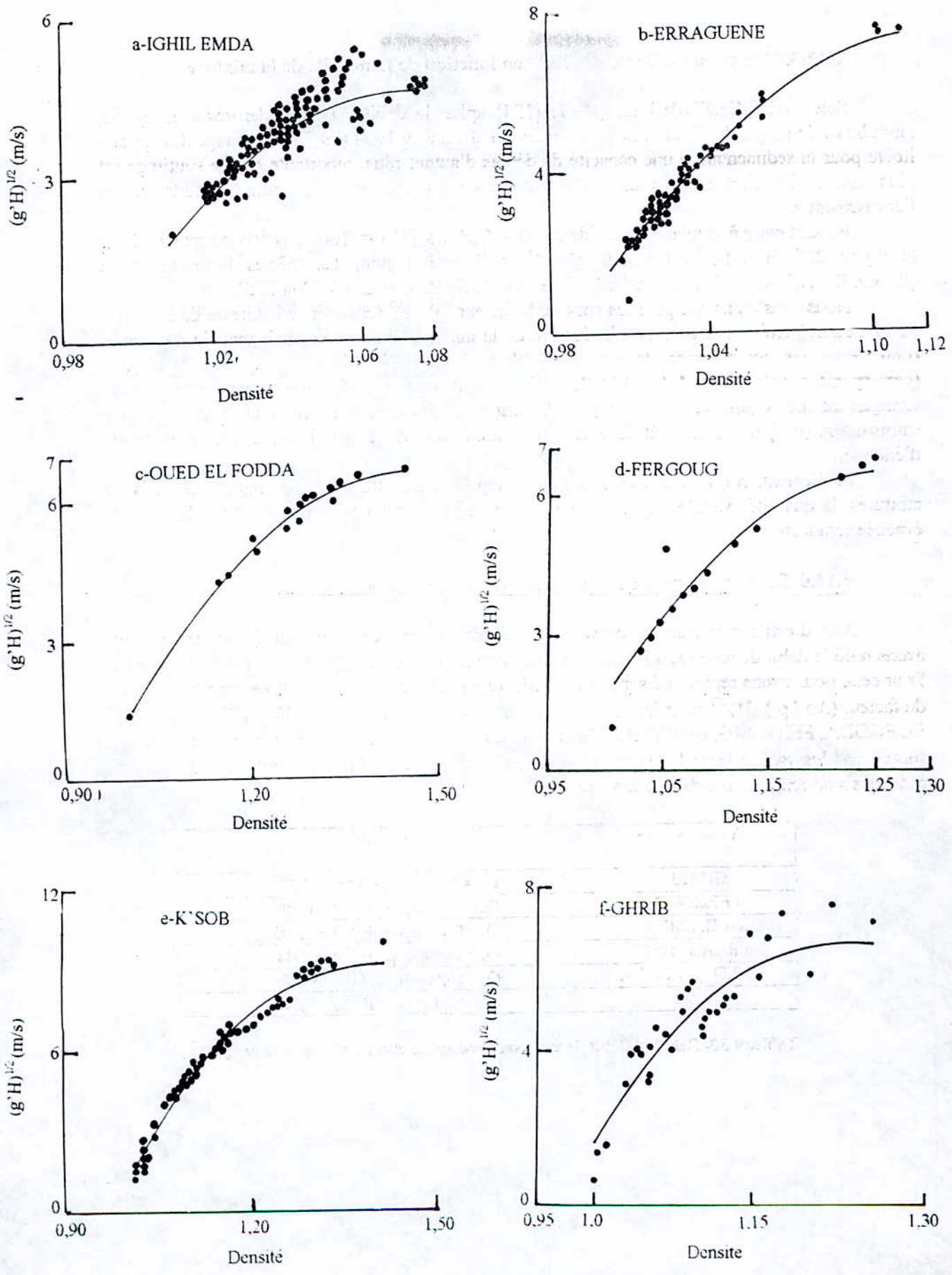


Fig.218- Variation du facteur $(g'H)^{1/2}$ en fonction de la densité de la mixture souflée

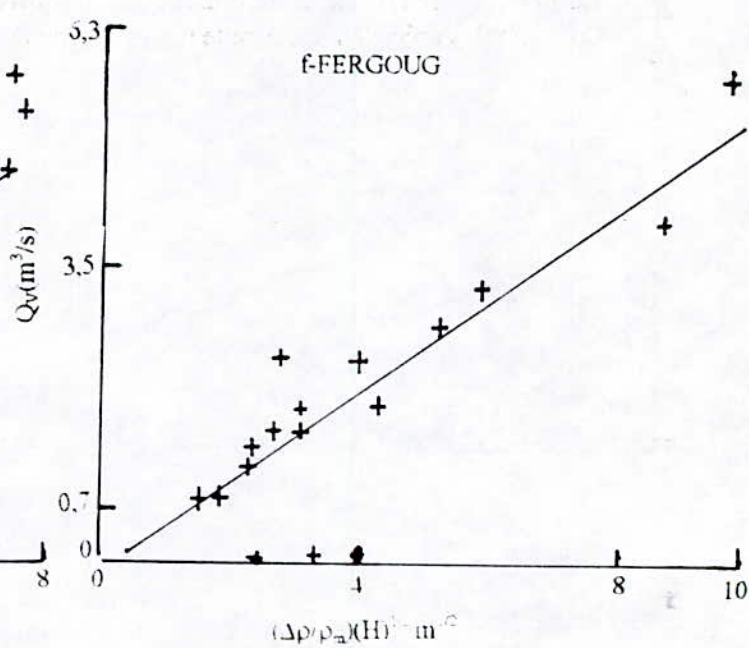
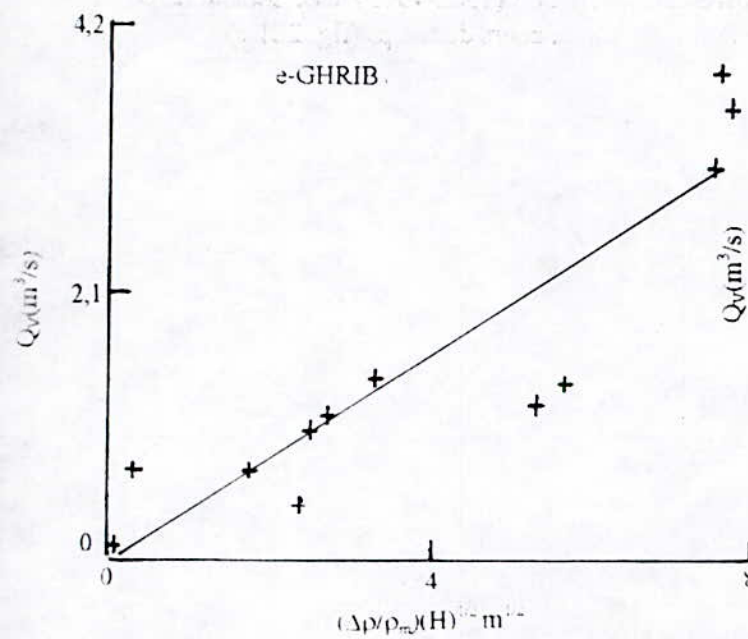
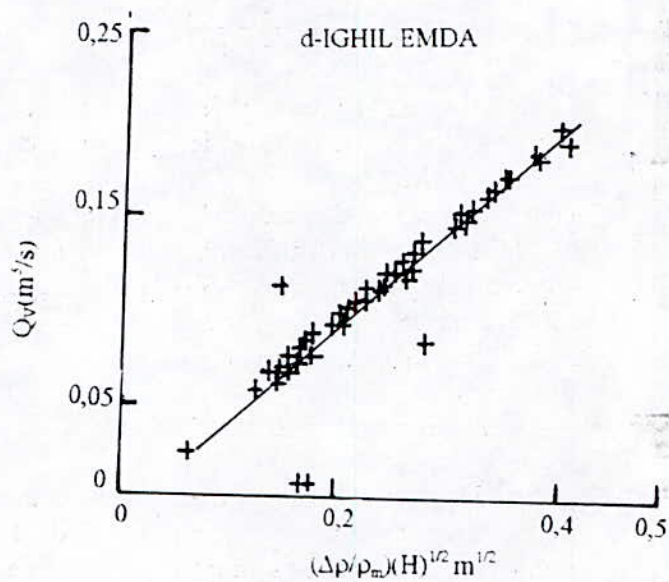
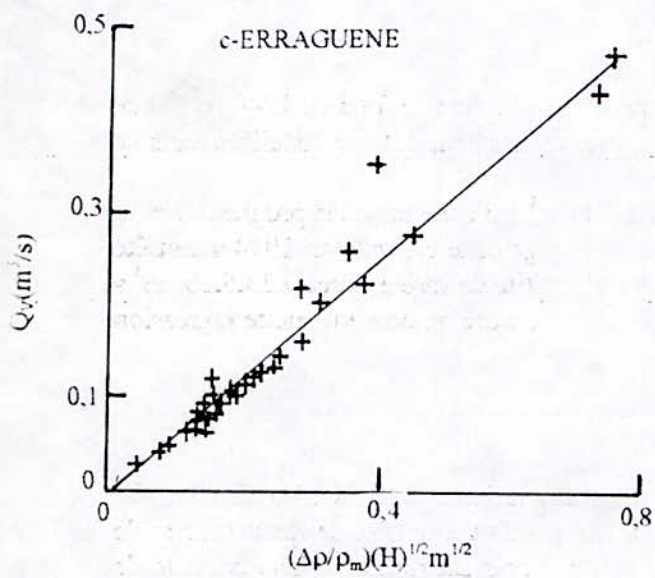
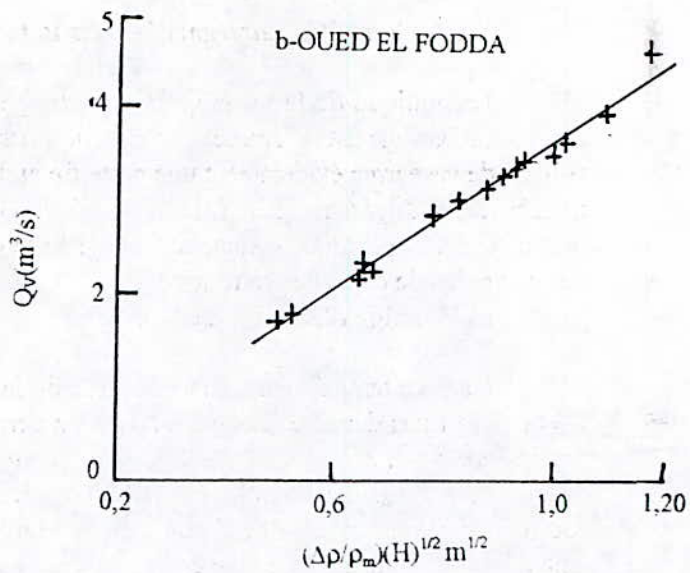
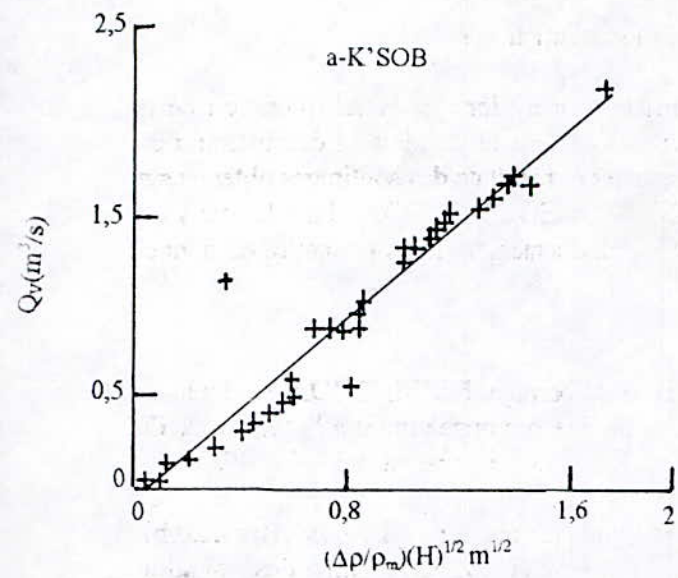


Fig.219- Variation du débit de vase soustrée en fonction du facteur $(\Delta\rho/\rho_m)(H)^{1/2}$

V.13. Capacités sauvegardées par la technique de soutirage

La pratique de la technique du soutirage, particulièrement lorsque la configuration de la retenue du barrage est favorable à l'apparition des courants de densité, conduit à l'évacuation d'un volume de vase avec évidemment une perte d'eau. L'examen des résultats des soutirages obtenus sur trois barrages Algériens (IGHIL EMDA, ERRAGUENE et OUED EL FODDA) dans lesquels est pratiquée cette technique comme moyen de lutte contre l'envasement va nous permettre de donner des exemples de capacités sauvegardées.

a) Barrage d'IGHIL EMDA

Compte tenu du comblement rapide de la retenue du barrage d'IGHIL EMDA, sa durée de vie ne devait pas dépasser **60 ans**, mais cette dernière a pu être prolongée grâce à la technique du soutirage et ainsi devait atteindre **117 ans**. La retenue avait initialement une capacité de **156.10⁶ m³** (1953) qui a été ramenée progressivement à **103.10⁶ m³** en 1992 (fig. 220 a), mais en l'absence de soutirage cette capacité en 1992 aurait été bien inférieure, puisque réduite à **58.10⁶ m³** (fig. 220 b). Une quantité importante de vase évaluée à **45,3.10⁶ m³** a ainsi été évacuée en **39 ans** d'exploitation avec par ailleurs une nette régression de l'envasement en fonction du temps (fig. 221 a).

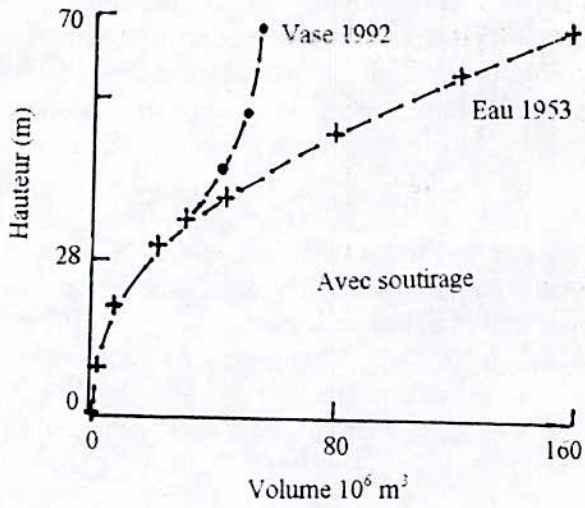
b) Barrage de OUED EL FODDA

Pour tenter de résoudre le problème de l'obturation de la vanne de fond en 1948 (et qui se trouve actuellement sous **45 m** de vase), cinq vannettes de dévasement ont été installées dans ce barrage en 1961.

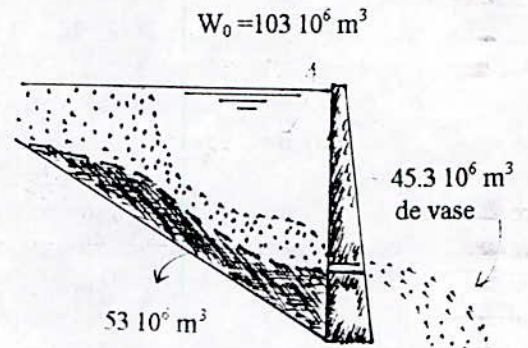
La retenue avait initialement (1932) une capacité de **228.10⁶ m³** qui a été ramenée progressivement à **124.10⁶ m³** en 1994 (fig. 222 a), mais en l'absence de soutirage cette capacité en 1994 aurait été inférieure puisque réduite à **100,5.10⁶ m³** (fig. 222 b). Une quantité de vase évaluée à **23,5.10⁶ m³** a ainsi été évacuée durant la période 1964-1994 (fig. 221 b). Ici encore on note une nette régression de l'évolution de l'envasement dans le temps.

c) Barrage d'ERRAGUENE

Malgré le faible taux d'envasement dans la retenue, le barrage d'ERRAGUENE a été équipé d'un système de soutirage composé de 4 vannettes de dévasement et de deux vannes de dégrèvement. Le suivi des soutirages est mené de façon à peu près satisfaisante. Une quantité de vase évaluée à **9.10⁶ m³** a été évacuée en **30 années** d'exploitation (1962-1992) avec comme dans les exemples précédents une nette régression de l'envasement au cours du temps (fig. 221 c).



a / Avec le soutirage



b / Sans le soutirage

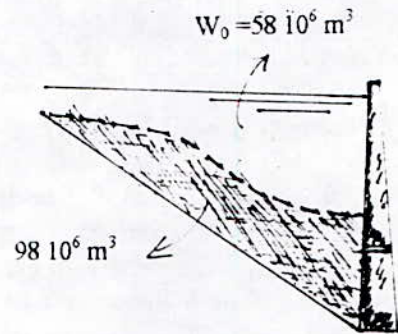
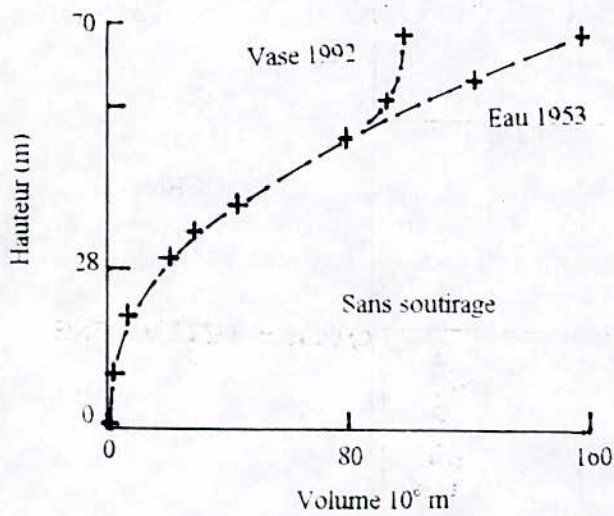


Fig.220 Evolution temporelle de l'envasement dans la retenue du barrage d'IGHIL EMDA

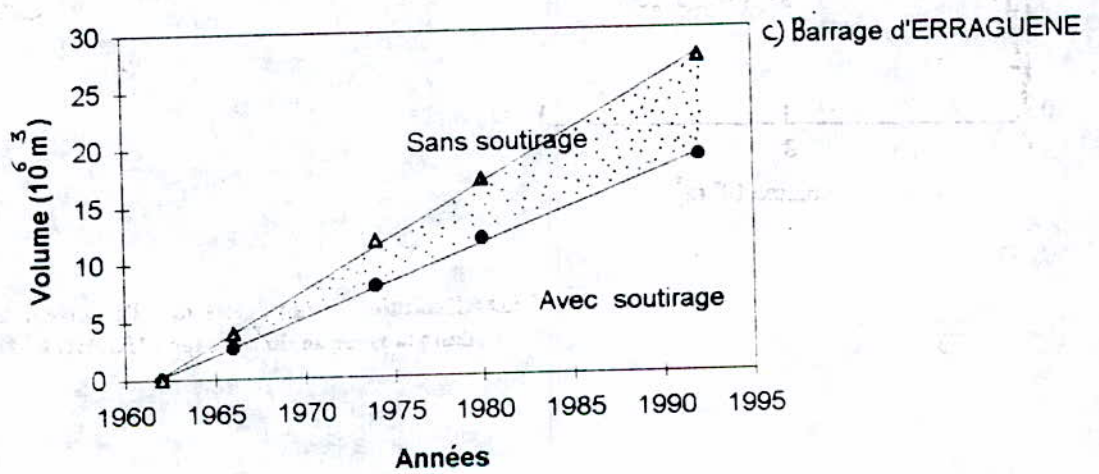
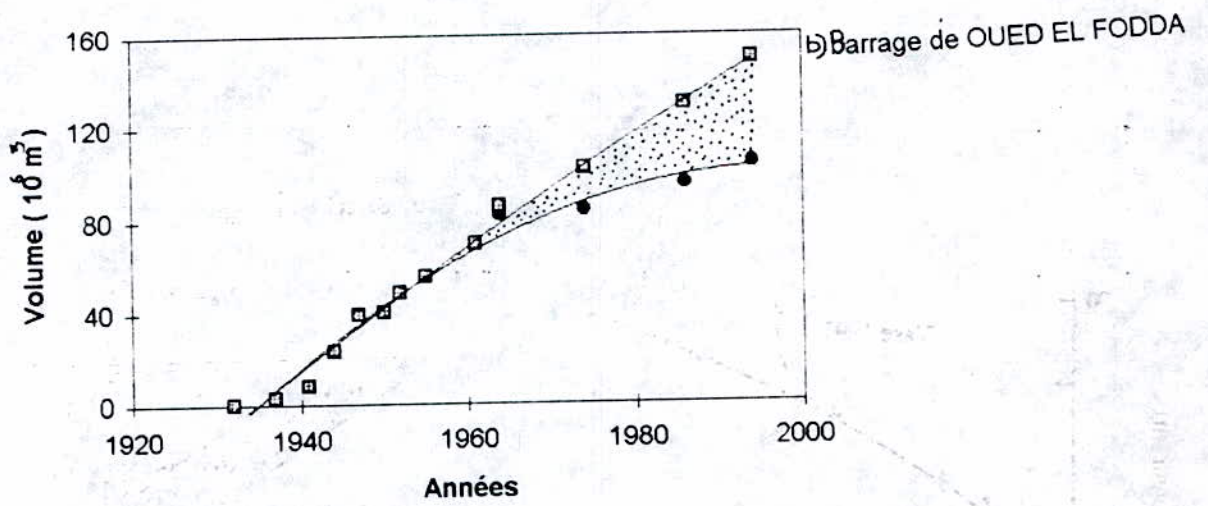
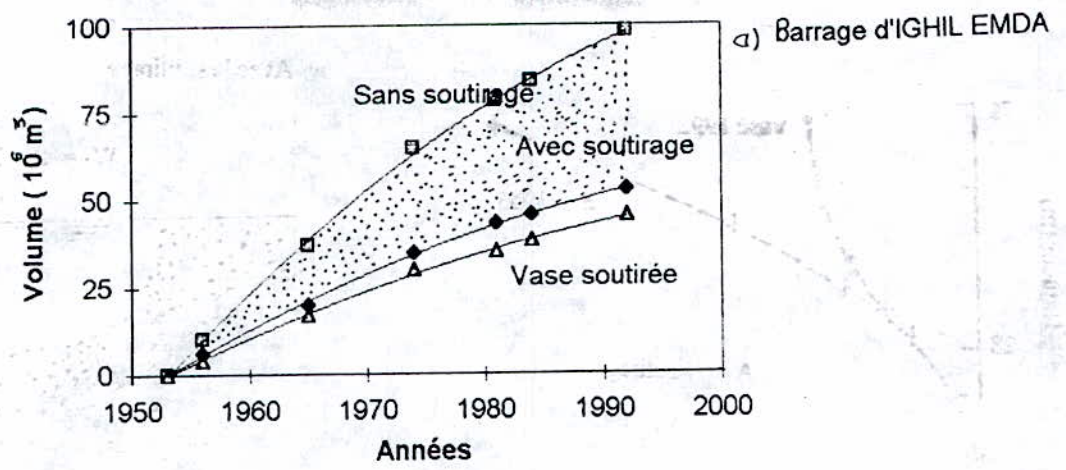


Fig.221-Evolution dans le temps de l'envasement

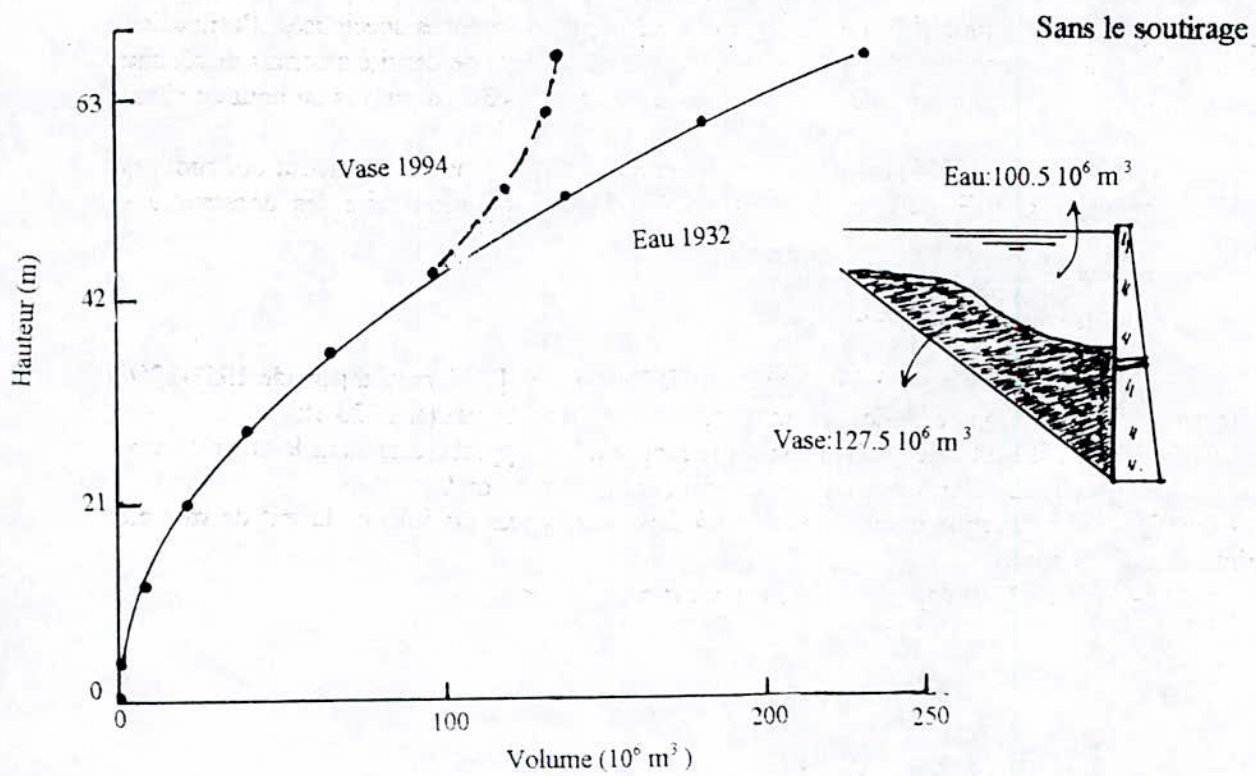
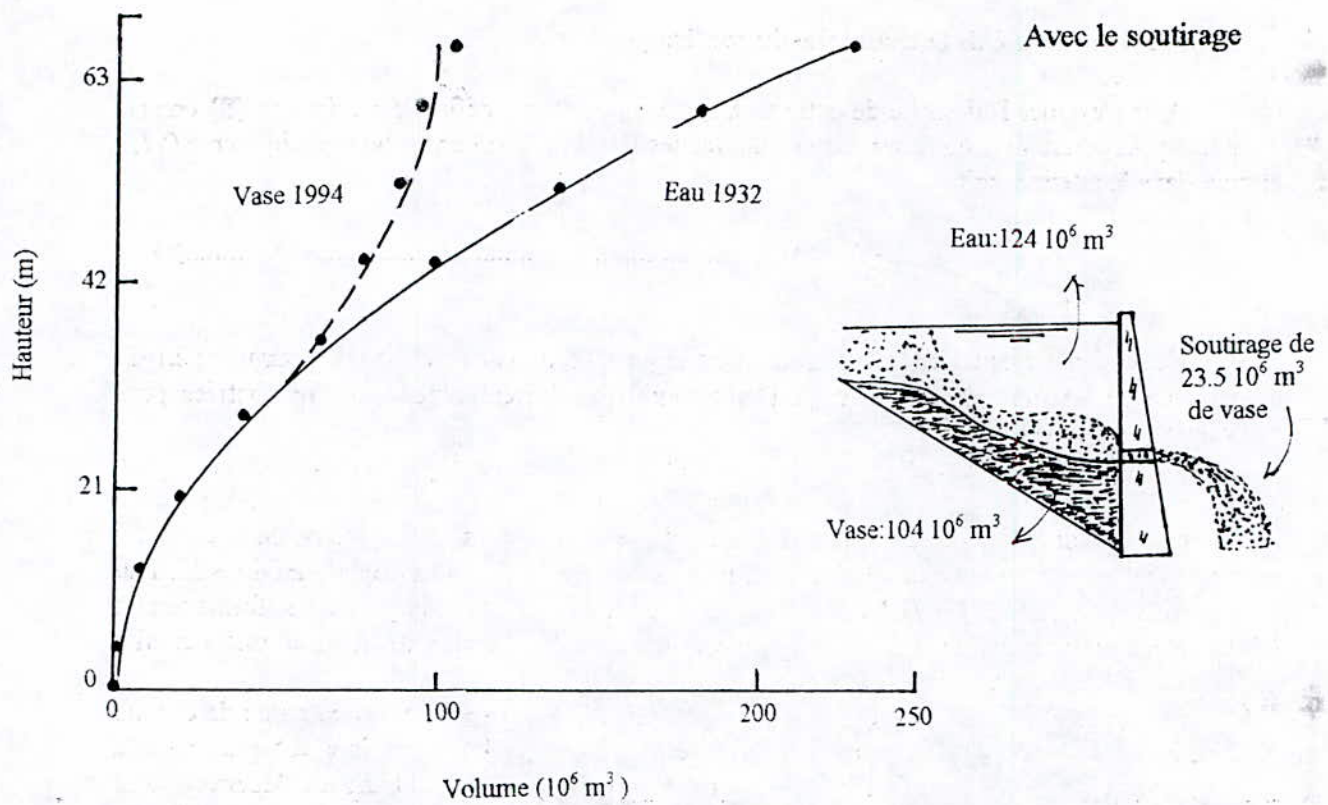


Fig.222- Evolution temporelle de l'envasement dans la retenue du barrage de OUED EL FODDA (période 1932-1994)

V.14. Efficacité de la technique du soutirage

Afin d'évaluer l'efficacité de cette technique, nous avons défini le rendement (S) comme étant le rapport entre le volume des sédiments évacués (W_{ss}), et le volume total des sédiments (W_{se}) entrant dans la retenue, soit

$$S = W_{ss} / W_{se} \dots\dots\dots 32$$

Ce rendement peut être calculé pour une simple opération de soutirage ou pour une période quelconque de l'exploitation du barrage. Deux conditions doivent cependant être vérifiées pour avoir un bon rendement:

-La présence de courants de densité dans la retenue: c'est ainsi que dans certaines retenues, l'absence de ce phénomène est un handicap sérieux pour la mise en oeuvre de cette technique. Peu d'études ont été faites sur la propagation des courants de densité dans les réservoirs: on peut citer à titre d'exemple celle réalisée sur un modèle réduit du barrage MOHAMED BEN ABDELKRIM au Maroc (KHABOTE et BOUTAYE -1980)[138] dont le but était d'agir sur la formation et l'écoulement du courant de densité par l'aménagement du fond afin de soutirer une quantité importante de sédiments.

-Les manoeuvres des vannes: nous pouvons dire que la « présence des courants de densité peut être bénéfique ou néfaste pour la retenue en fonction de la façon dont est pratiquée la manoeuvre des vannes ».Exception faite au barrage d'IGHIL EMDA, les barrages Algériens dont certains même sont équipés d'un système approprié au soutirage comme ceux de OUED EL FODDA, ERRAGUENE, ZARDEZAS enregistrent un rendement faible, par suite d'une absence de maîtrise des manoeuvres des vannes. A l'inverse, on peut constater que pour le barrage de SERRE PONCON, en France [5] qui ne dispose pourtant pas d'organes spécialisés, l'utilisation des vidanges de fond, conçues à favoriser l'écoulement des courants de densité a permis de réduire l'épaisseur de la vase dans la retenue de **5 à 15 cm**, à la place des **30 cm** prévus au bout de **vingt ans** (cf. tableau. 1).

Nous avons évalué l'efficacité de la technique du soutirage pratiqué au niveau des barrages d'IGHIL EMDA, ERRAGUENE et OUED EL FODDA, et pouvons faire les constatations suivantes:

a) Barrage d'IGHIL EMDA :

La première étude avait été faite par DUQUENNOIS H. [7] durant la période 1953-1956 avec examen de l'évolution de l'efficacité du soutirage selon trois étapes (fig. 223 a):

- En 1953-1954, le soutirage est faible si on le rapporte aux apports, ceci étant la conséquence d'une surélévation de six mètres du seuil des vannes par rapport au fond.
- En 1954-1955, les soutirages commencent à devenir efficaces du fait que le toit de vase ait atteint le seuil des vannes.
- En 1955-1956, **50 %** des apports solides sont évacués.

Nous avons mené une étude similaire à celle de DUQUENNOIS H. pour les périodes 1974-1981, 1981-1984 et 1984-1992 (fig. 223 b)] avec les résultats suivants:

-Période 1974-1981: une quantité de vase égale à 6.10^6 m^3 sur $14,3.10^6 \text{ m}^3$ de vase apportée par les courants de densité a été évacuée, soit un rendement **S** de **42 %** (fig. 224 a).

-Période 1981-1984: le rendement est de l'ordre de **54 %**.

-Période 1984-1992: le rendement est de **55 %**; en effet une quantité de vase de $8,3.10^6 \text{ m}^3$ a été évacuée pour un apport total de $15,3.10^6 \text{ m}^3$ dans la retenue (fig. 224 b).

Au total un rendement de **49 %** pour la période 1974-1992 puisque $17,2.10^6 \text{ m}^3$ ont été soutirés pour des apports solides totaux de 35.10^6 m^3 (fig. 224 c).

b) Barrage d'ERRAGUENE :

Nous avons évalué le rendement du soutirage en deux périodes, soit 1962-1974 et 1974-1992 (fig. 225 c).

- Pendant la période 1962-1974, une quantité de vase égale à $6,3.10^6 \text{ m}^3$ sur 12.10^6 m^3 de vase entrant dans la retenue a été évacuée, soit un rendement de **36 %** (fig. 225 a).

-Pendant la période 1974-1992, le rendement a atteint **29 %** puisqu'une quantité de vase égale à $4,6.10^6 \text{ m}^3$ sur les 16.10^6 m^3 de vase drainée par les courants de densité dans la retenue a été évacuée (fig. 225 b).

Ainsi, pendant la période globale 1962-1992 environ 9.10^6 m^3 de vase ont été évacués, alors que 19.10^6 m^3 se décantent dans la retenue, soit un rendement moyen de **32 %** (fig. 225 c).

c) Barrage de OUED EL FODDA :

Nous avons, pour ce barrage, décomposé le rendement du soutirage en quatre périodes (fig. 223 d):

-Période 1961-1974: le rendement enregistré est de **37 %**.

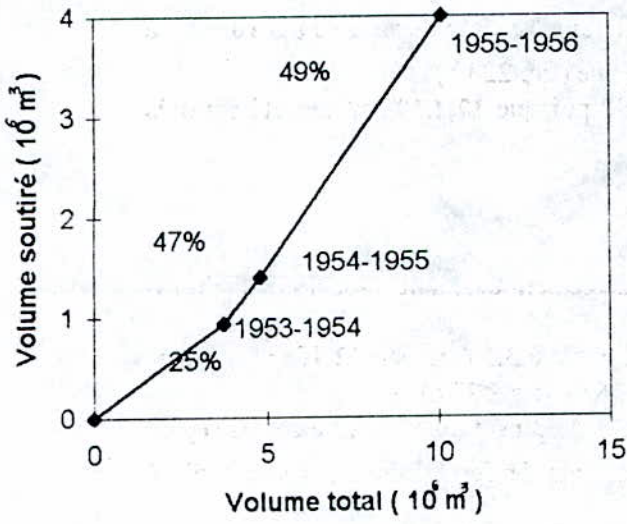
-Période 1974-1981: le rendement a progressivement évolué pour atteindre **41 %**. Ceci est le « fruit » des bonnes manoeuvres des vannettes. En effet, une quantité de 5.10^6 m^3 de vase a été soutirée sur les 12.10^6 m^3 de vase apportée par les courants de densité (fig. 226 b).

-Période 1981-1986: une mauvaise pratique de la technique du soutirage a fait diminuer le rendement qui a été de **37,5 %**.

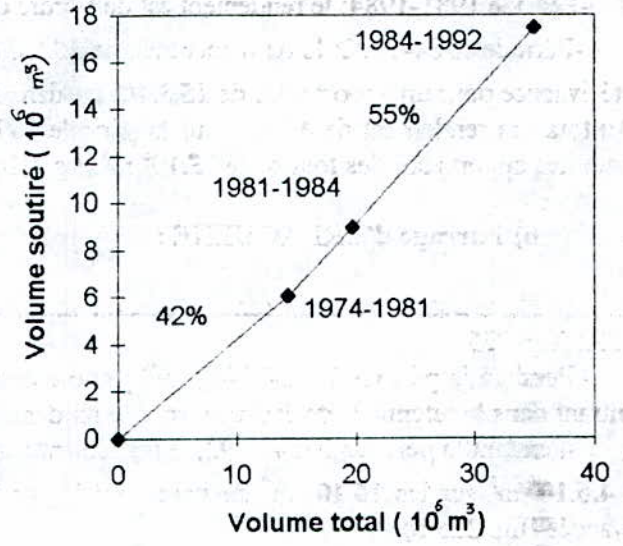
- Période 1986-1994: la poursuite d'une mauvaise pratique de cette technique a encore fait baisser le rendement qui n'est plus que de **33 %** (fig. 226 a). C'est ainsi qu'une quantité de $3,5.10^6 \text{ m}^3$ a été évacuée, tandis que 7.10^6 m^3 de vase s'est consolidée dans la retenue.

De 1961 à 1994, c'est donc une quantité de $57,5.10^6 \text{ m}^3$ de vase qui est arrivée dans la retenue, alors que seulement $21,5.10^6 \text{ m}^3$ de vase a été évacuée, soit un rendement de **37 %** (fig. 226 c).

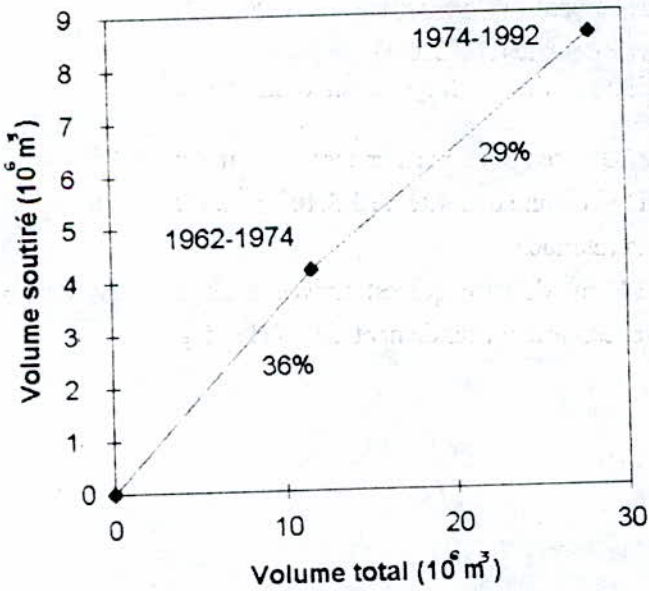
a) barrage d'IGHIL EMDA (période 1953-1956, d'après H.DUQUENNOIS)



b) Barrage d'IGHIL EMDA (période 1974-1992)



c) Barrage d'ERRAGUENE (période 1962-1992)



d) Barrage d'OUED EL FODDA (période 1961-1994)

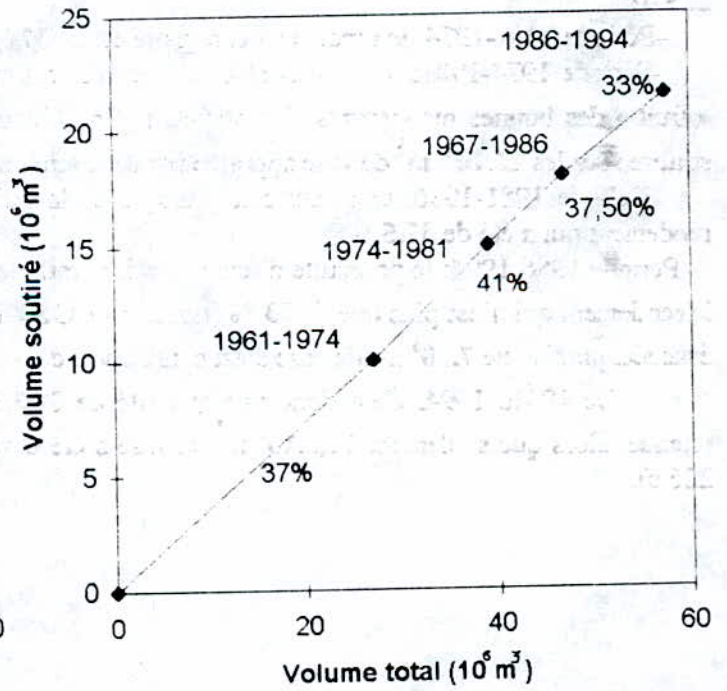

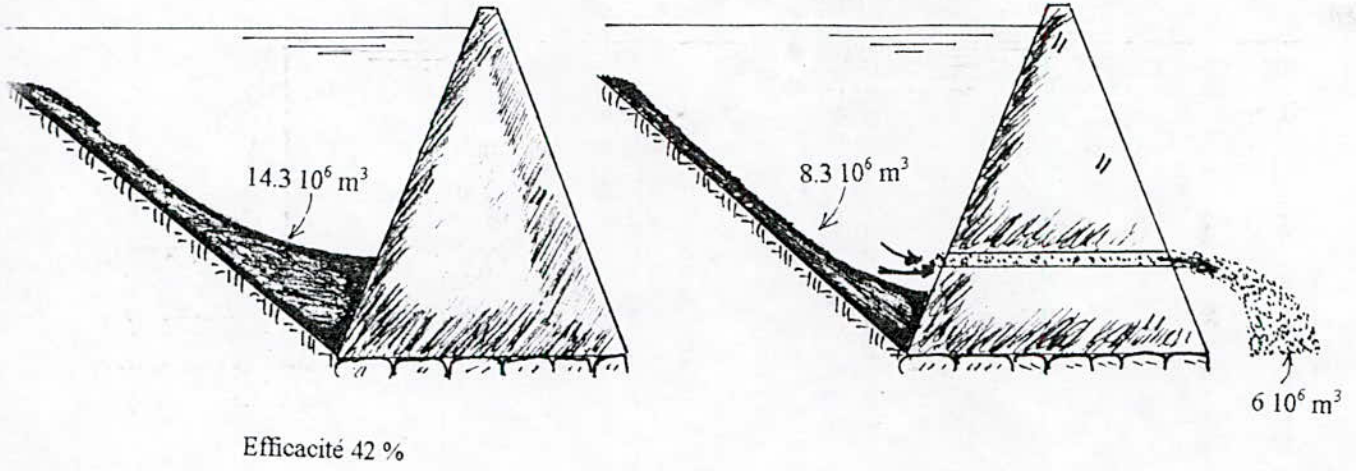
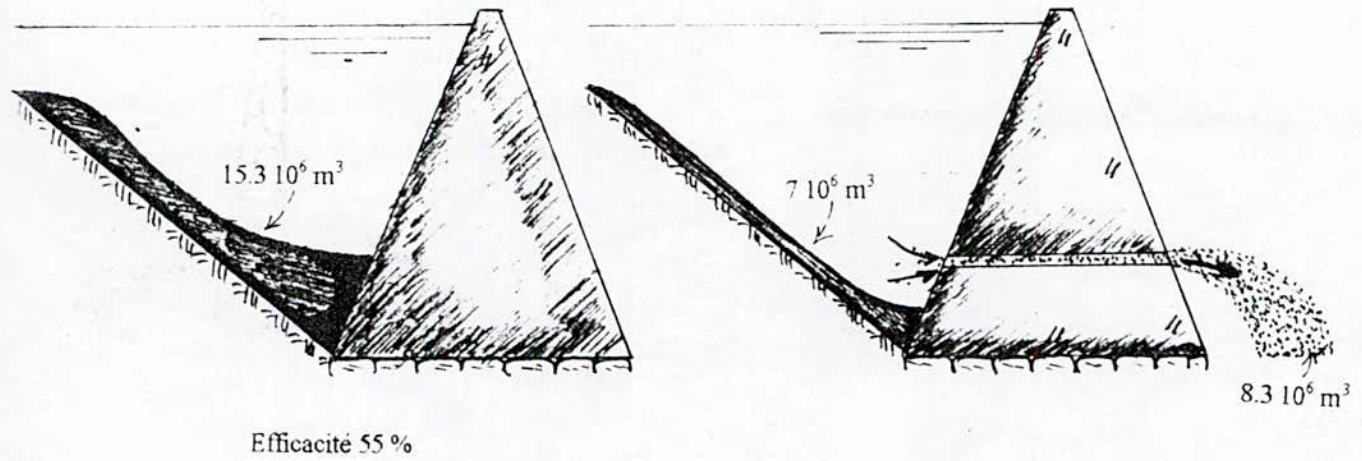


Fig 343 Evolution dans le temps du rendement du soutirage.

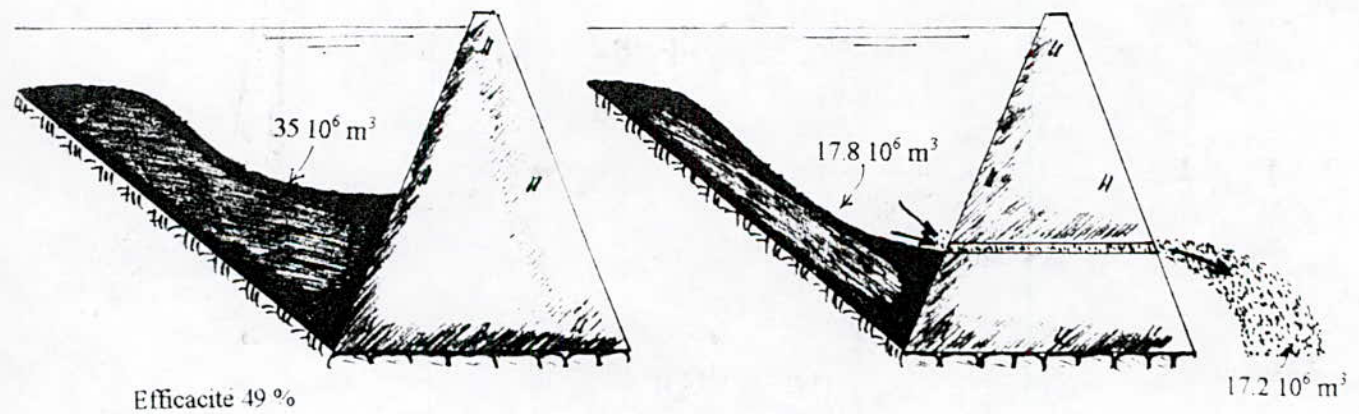

 Vase déposée
 Vase soustraite



a / Période 1974 -1981



b / Période 1984 -1992



c/ Période 1974 -1992

Fig. 64: Quantités de vase soustrées au barrage d'IGHIL EMDA

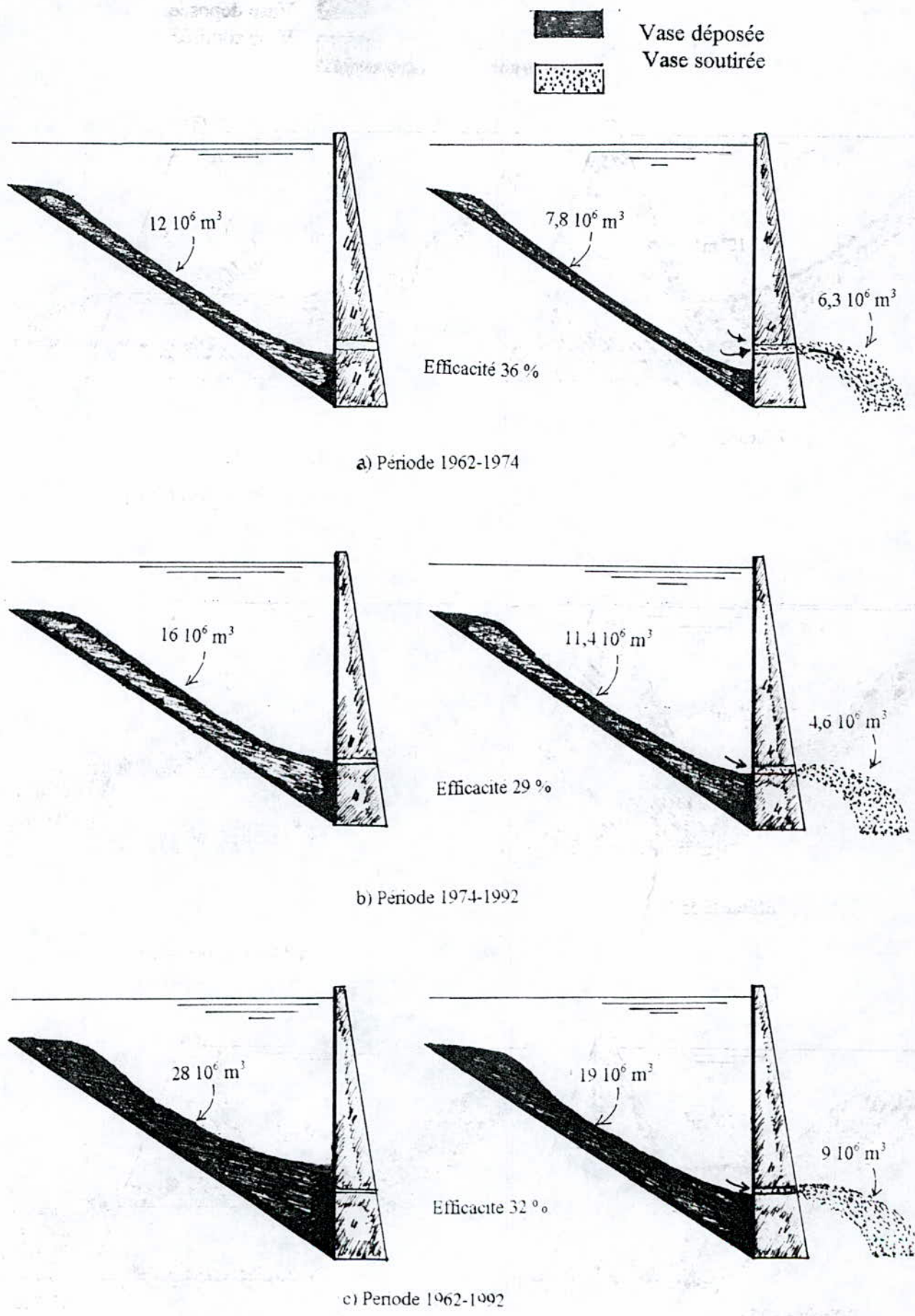
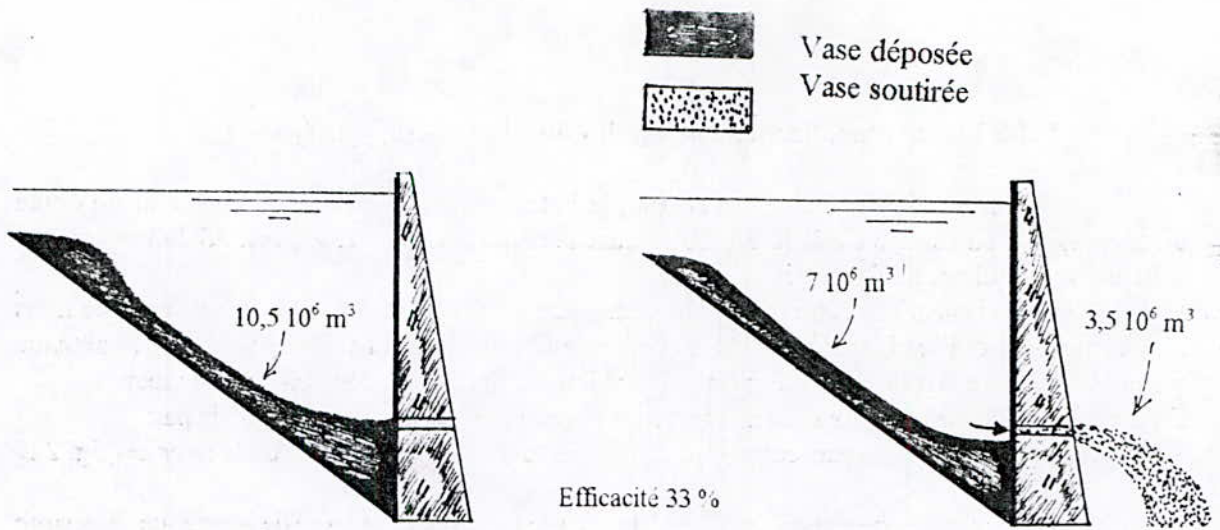
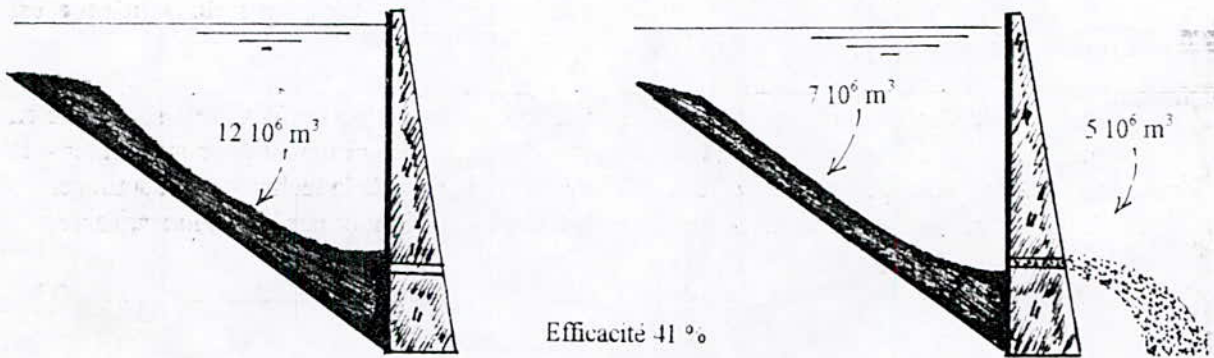


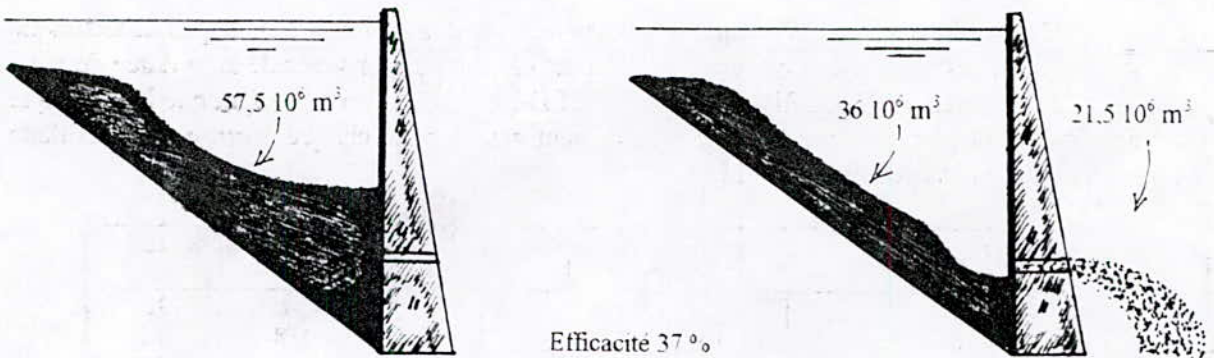
Fig.225- Quantités de vase soustrées au barrage d'ERRAGUENE



a) Période 1986-1994



b) Période 1974-1981



c) Période 1961-1994

Fig.226- Quantités de vase soustrées au barrage de OUED EL FODDA

V.14. Limite d'application de la technique du soutirage[127]

Le rendement le plus élevé atteint par la technique du soutirage, est sans aucun doute celui enregistré au barrage d'IGHIL EMDA durant la période 1984 - 1992, soit 55 % des apports solides totaux qui ont pu être évacués.

Ce rendement peut être amélioré, et atteindre 70% correspondant à une valeur que nous avons calculé et qui semble être une valeur limite de la technique du soutirage. Elle a été obtenue sur la base d'une étude de la granulométrie des sédiments évacués et déposés dans la retenue. En effet, les 30 % des apports solides qui restent dans la retenue seraient constitués par:

- une quantité de particules solides grossières déposées à l'entrée de la retenue (fig. 227 a).
- une quantité de sédiments qui s'est déposée dans la partie large de la retenue à la suite de l'évanouissement des courants de densité de faible concentration (fig. 227 b).
- une quantité de particules solides dont la vitesse de chute est supérieure à celle de l'écoulement de couche turbide au moment du soutirage (fig. 227 c).

On peut remarquer que DUQUENNOIS H. [7] avait prévu dès 1950, que les soutirages effectués dans la retenue du barrage d'IGHIL EMDA pourraient atteindre la valeur de $1,5.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$, ce qui correspond exactement au rendement que nous proposons (70 %) et confirme ainsi nos résultats.

V.16. « Durée de vie » d'un barrage dans lequel la technique du soutirage est pratiquée (fig. 228)[127]

Le rôle de l'ingénieur responsable d'un projet de régularisation (en Algérie) est de faire en sorte que la vitesse de comblement des réservoirs soit réduite au minimum pour augmenter « la durée de vie » de l'ouvrage, ce qui revient à améliorer le rendement de la technique de soutirage.

La durée de vie d'un barrage -désignée par la lettre T- est donnée par la relation suivante :

$$T = W_0 / W_{SDA} \dots\dots\dots 33$$

avec

$$W_{SDA} = W_{STA} - W_{SSA}$$

Si l'on considère que $T_0 = W_0 / W_{STA}$ représente la « durée de vie » d'un barrage sans la pratique de la technique du soutirage, on obtient la relation:

$$T = T_0 (1/1-S) \dots\dots\dots 34$$

Cette relation permet d'évaluer la « durée de vie » d'un barrage dans lequel la technique du soutirage est pratiquée avec un rendement S. A cet effet nous avons calculé la « durée de vie » des barrages d'IGHIL EMDA, ERRAGUENE et OUED EL FODDA en supposant que la technique du soutirage sera pratiquée avec le même rendement actuel pour chaque barrage. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 31.

Barrage	Capacité 1994 (W_0) (10^6)	W_{STA} ($10^6 \text{ m}^3/\text{an}$)	T_0 (an)	T(an)
IGHIL EMDA	102 m^3	2,49	41	91
ERRAGUENE	182 m^3	0,97	188	265
OUED EL FODDA	124 m^3	2,39	52	108

Tableau 31: Prolongation de la « Durée de vie » des barrages dans lesquels est pratiquée la technique du soutirage

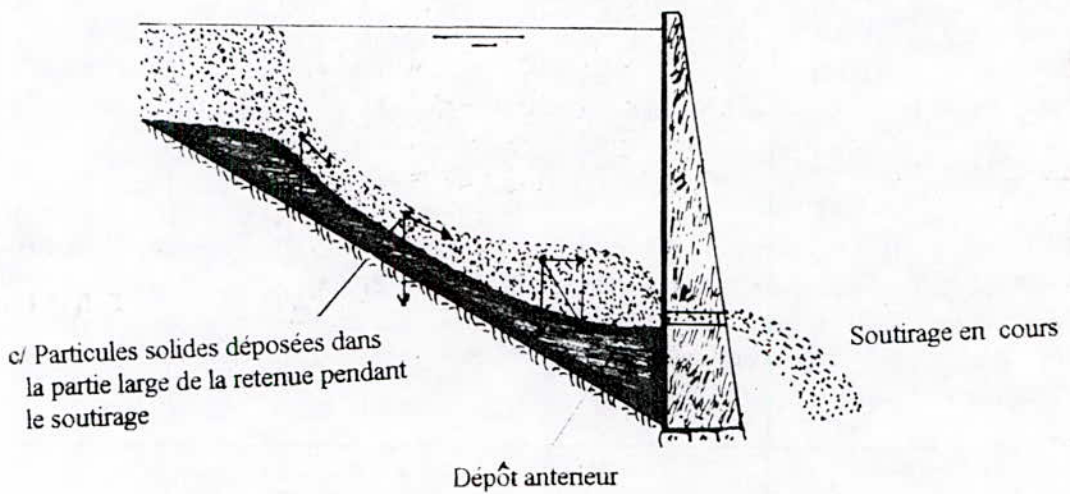
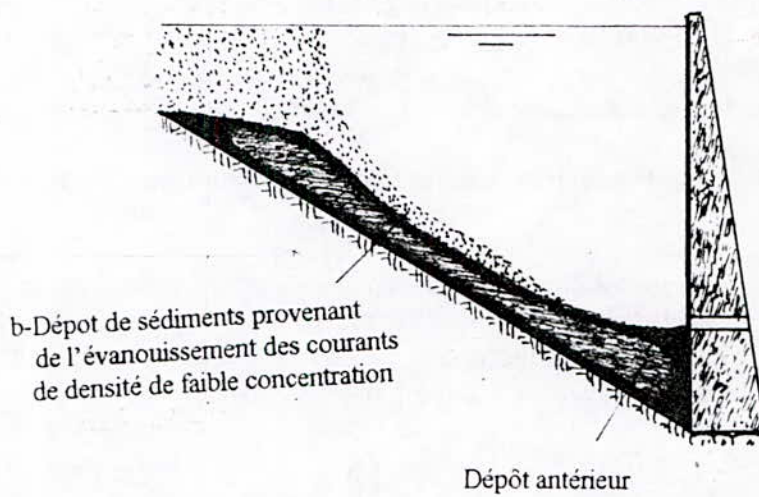
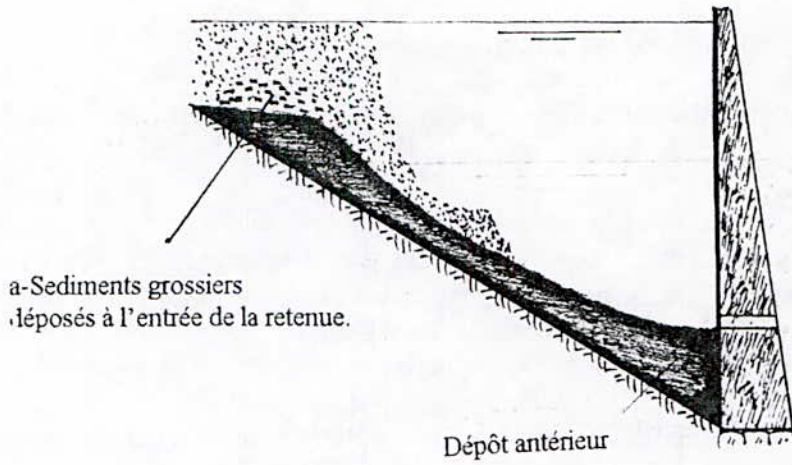


Fig.227: Sédiments déposés dans la retenue, qui ne seront pas évacués quelque soit le rendement du soutirage.

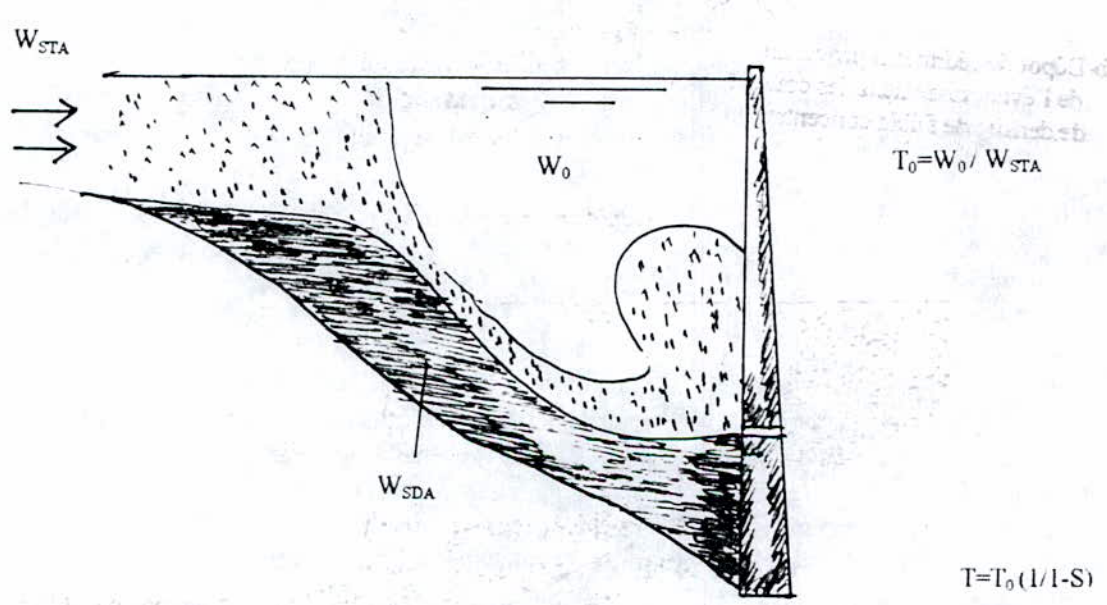
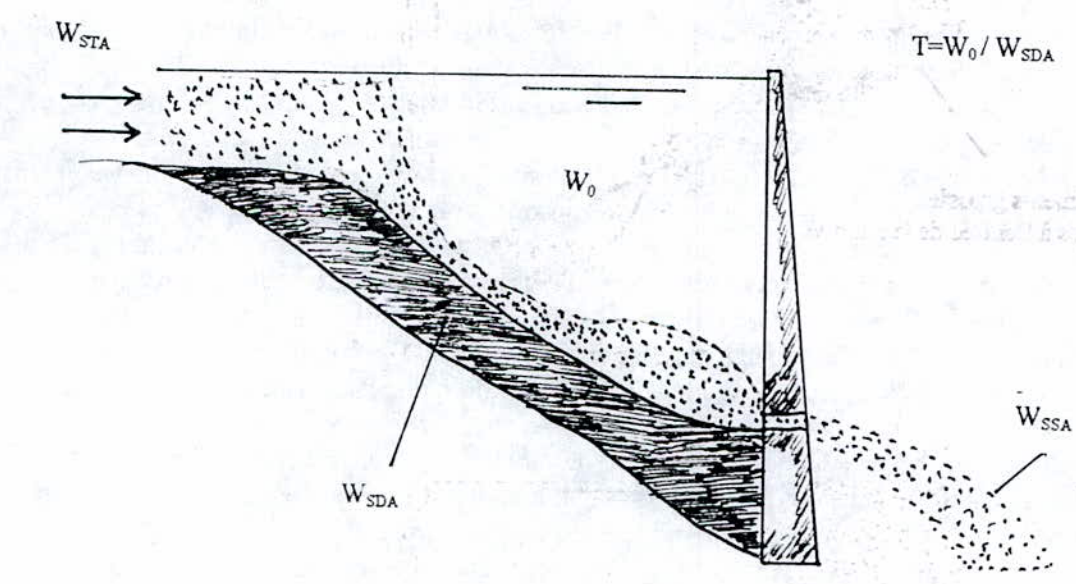


Fig.228- Durée de vie d'un barrage

Conclusion :

Les résultats enregistrés par la technique du soutirage pratiquée au niveau des barrages Algériens sont pratiquement faibles, à l'exception de celui d'IGHIL EMDA dont la « durée de vie » devrait être doublée. Cet échec est dû surtout à la méconnaissance du comportement des courants de densité dans les retenues: les services d'exploitation continuent toujours à confondre entre l'évacuation des sédiments par l'utilisation des courants de densité, et la méthode d'évacuation des sédiments par la vidange de fond à réserve pleine. C'est ainsi que sur l'ensemble des barrages, les manoeuvres des vannes se font toujours après que la consolidation de la vase soit commencée.

La technique du soutirage peut être un moyen efficace de lutte contre l'envasement des retenues de barrages en Algérie compte tenu de son faible coût, et surtout de la présence des courants de densité dans l'ensemble des retenues. Le rendement de cette technique peut atteindre 70 % des apports solides totaux entrants dans la retenue, c'est à dire que la « durée de vie » de l'ouvrage sera augmentée d'un tiers. A cet effet, l'installation d'un dispositif approprié au soutirage composé de vannettes de faible diamètre doit être un paramètre principal pour les nouveaux projets de construction de barrages en Algérie. Evidemment, le dimensionnement de cette batterie (nombre de vannettes) dépendra essentiellement de la concentration en éléments solides dans les cours d'eau débouchant dans la retenue. En définitif, nous pourrions dire que : « La technique du soutirage est une nécessité pour les barrages Algériens, alors qu'elle soit utilisée efficacement ! ».

V.17. « Transport approche » et de « dégravement »

Le rendement des opérations de soutirage peut être augmenté par la création d'ondes de crues artificielles provenant d'un barrage de chasse réalisé à l'amont du barrage à protéger. Cependant, la non maîtrise de cette technique peut être néfaste, et conduit forcément à un comblement rapide du barrage principal: la construction du barrage de chasse de BOUHANIFIA, en amont du barrage de FERGOUG avait pour but de minimiser la sédimentation dans ce dernier, mais finalement l'envasement a été extrêmement rapide.

Selon DUQUENNOIS H. [7] [139], l'opération doit comporter deux phases distinctes: le « transport approche » et le « transport de dégravement »:

V.17.1. Le transport " approche "

Le « transport approche » consiste à remettre en suspension les dépôts de la zone de marnage, et à les transporter par ondes de crues artificielles vers l'aval de la retenue. Les silts et argiles reemulsionnés se propagent sous forme d'un courant de densité jusqu'au pied du barrage, et seront soutirés par les pertuis de vidange de l'ouvrage. Par contre, les matériaux grossiers se remettent en mouvement, et viennent former un nouveau remous solide plus rapproché du barrage que le « delta » primitif. Pour cette classe granulométrique, il n'y a pas évacuation, mais simple transport d'amont en aval.

V.17.2. Le transport "dégravement"

Le « transport dégravement » permet d'évacuer les matériaux hors de la réserve au moyen de chasses faites avec un coefficient de remplissage décroissant, l'onde de crue artificielle parcourt toute la longueur de la retenue, et recrée par érosion régressive un chenal dans la masse des sédiments.

Dans cette ultérieure phase, la technique proposée rejoint donc la méthode Espagnole de dévasement, mais avec une efficacité accrue grâce à la possibilité de mettre en oeuvre des débits liquides considérables animés d'une grande puissance hydraulique.

La mise en application de cette technique (transport « approche » et « dégravement ») nécessite l'équipement du barrage principal par des organes de vidange constitués à la fois par des vannettes pour le soutirage des courants de densité et par des vannes de dégravement de grande section, l'auteur de la méthode préconise des vannes de 4 m × 4 m au minimum. Les réservoirs de chasse doivent permettre la libération quasi-instantanée, un débit très important susceptible de provoquer une forte onde de crue, et l'écoulement des sédiments dans la retenue de barrage (à protéger) se trouve modifié.

V.17.3. Principe de la technique (fig. 229)

Le barrage de chasse transforme les faibles débits en provenance de l'oued en ondes à grand débit au moyen des vannes de fond, qui provoquent d'une part un courant de densité de concentration élevée (formé par des particules fines filtrées-diamètre inférieur à 2 μ m- provenant de la retenue du barrage de chasse et des particules remaniées dans la retenue principale), d'autre part une érosion régressive des dépôts de sédiments grossiers (sables, graviers) dans les zones II et III, qui sont ainsi transportés vers la zone I.

Les manoeuvres des vannes du barrage principal à protéger doivent être exécutées au moment opportun, dans le cas contraire, toute la masse solide se consolide et les opérations de soutirage deviennent de plus en plus compliquées avec risque de voir une obturation des vannes.

Cette technique est envisagée surtout pour les réservoirs, qui ont atteint un degré avancé de l'envasement. Son inconvénient réside dans le choix du site de l'emplacement du barrage de chasse.

V.17.4. Projection pour la construction de barrage de chasse à l'amont de ceux d'IGHIL EMDA et de OUED EL FODDA [140] [141]

a) Amont du barrage d'IGHIL EMDA

La mise en place d'un barrage de chasse à l'amont de la retenue d'IGHIL EMDA ne pourra qu'être bénéfique pour l'amélioration du soutirage des sédiments, d'autant plus que cet ouvrage est équipé de 8 vannettes de dévasement, et 3 vannes de dégravement (fig. 230). Cette idée n'est pas nouvelle et DUQUENNOIS H. [7][139] avait déjà proposé la réalisation d'un barrage de chasse dans l'un des oueds Atteba, Embarek ou Berd (fig. 231 a).

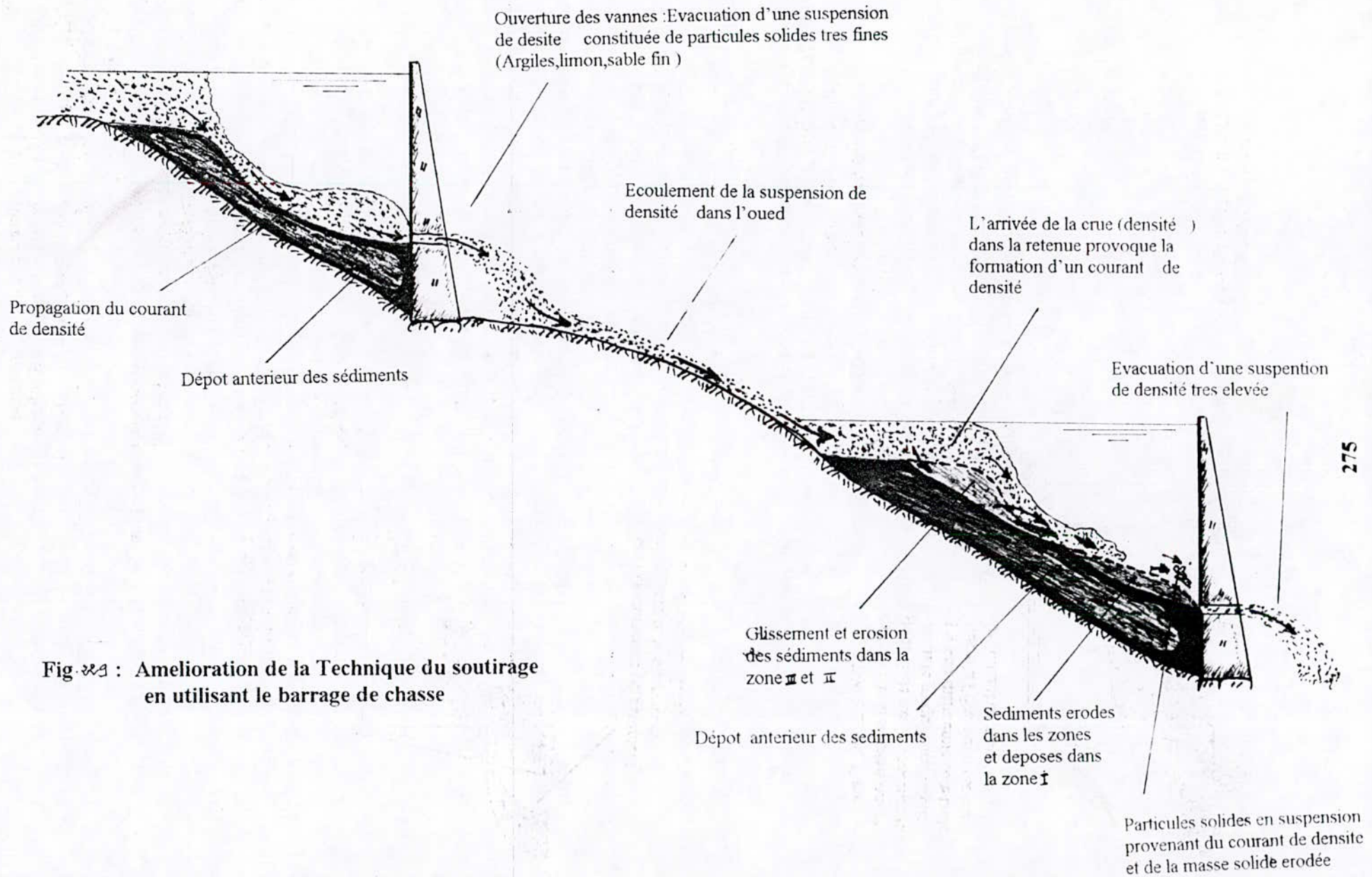


Fig 21 : Amélioration de la Technique du soutirage en utilisant le barrage de chasse

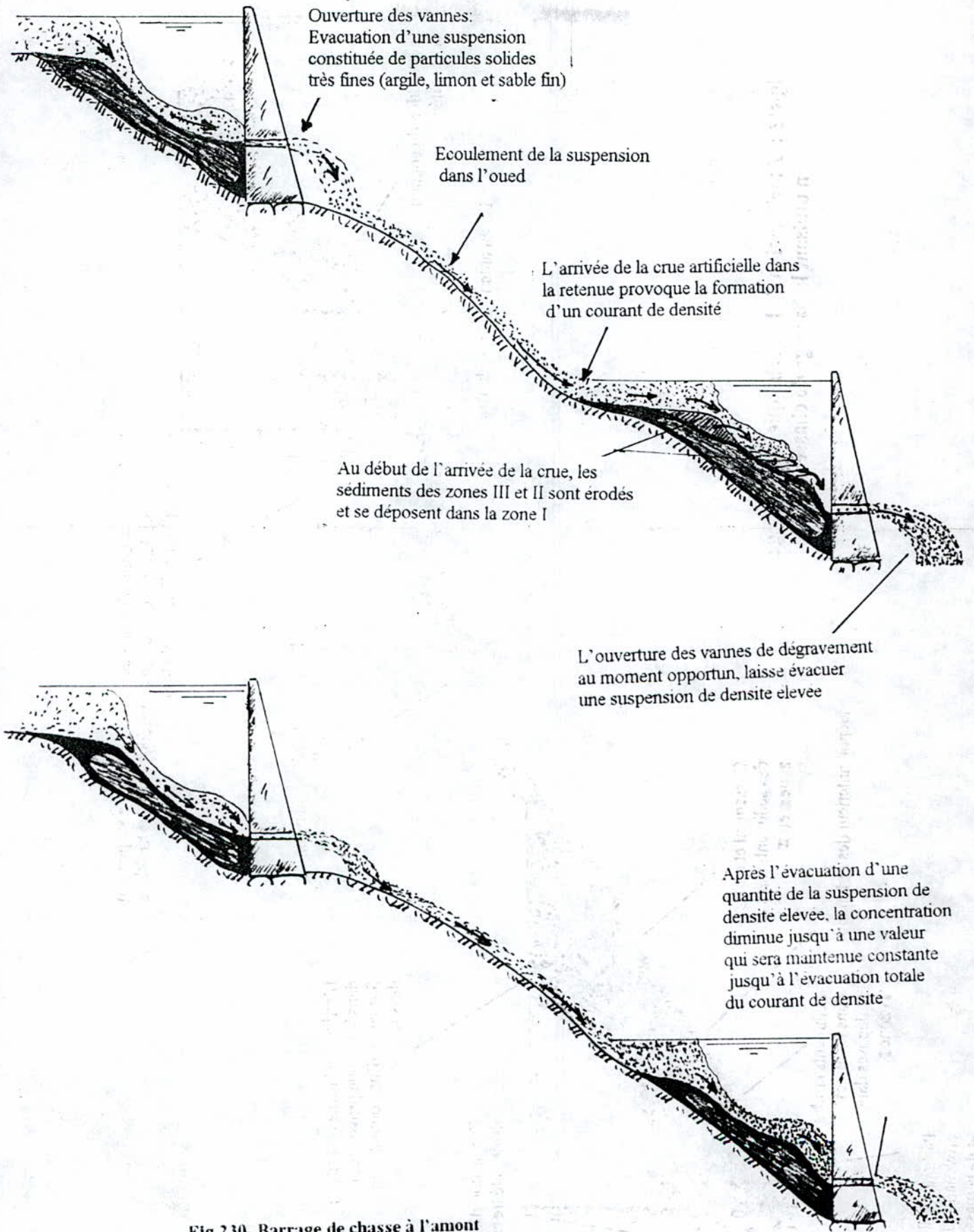


Fig.230- Barrage de chasse à l'amont de celui d'IGHIL EMDA

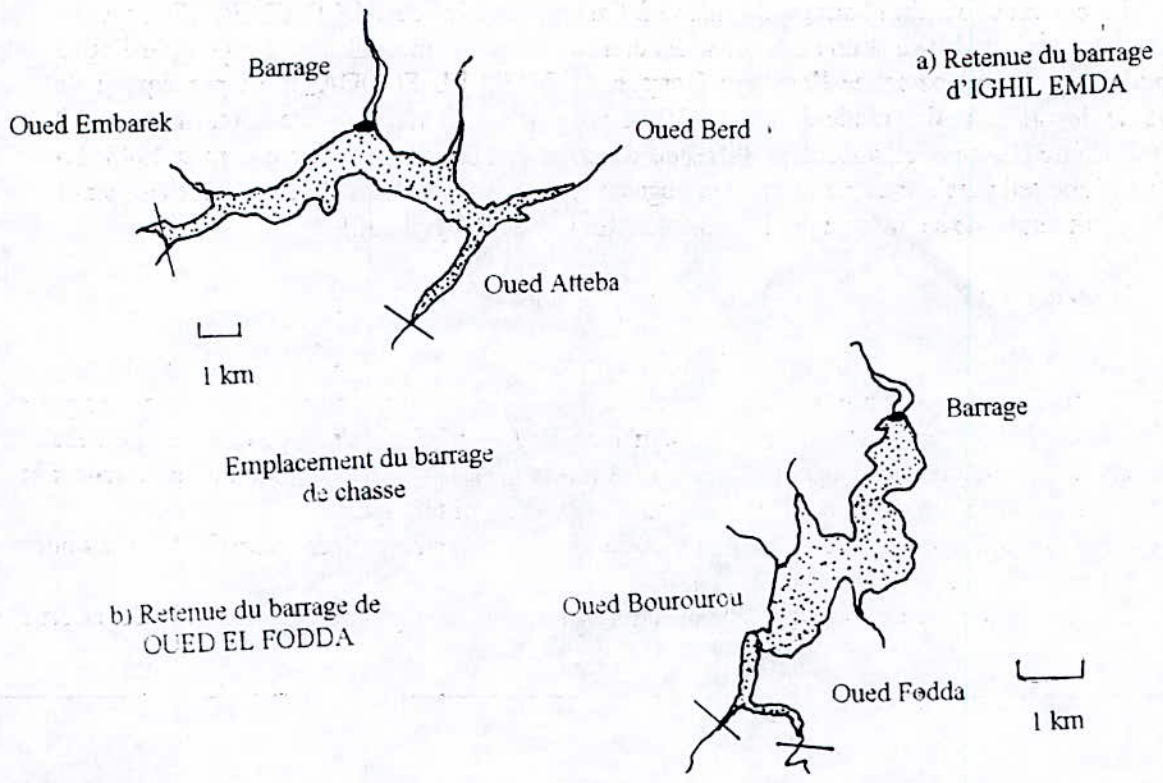


Fig.231- Possibilités de mise en place des barrages de chasse

b) Amont du barrage de OUED EL FODDA

La construction d'un barrage de chasse à l'amont de celui de OUED EL FODDA est par contre peu recommandée sur l'une des branches constituées par l'oued Bourrourou, ou par l'oued El Fodda (fig. 231 b) parce que l'ouvrage (barrage de OUED EL FODDA) n'est pas équipé de vannes de dégrèvement de grande dimension: il ne possède que 5 vannettes de dévasement de 40 cm de diamètre chacune, et surtout la vanne de fond est complètement obturée depuis 1948. La pratique d'une telle technique ne pourra qu'augmenter l'envasement dans la retenue, et risquerait même à court terme, de se traduire par l'obturation des vannettes (fig. 232).

Conclusion:

La création d'ondes de crues artificielles provenant d'un barrage de chasse est un moyen efficace d'éroder la vase, et de la transporter jusqu'aux vannes du barrage principal à protéger pour pouvoir ensuite la soutirer par les pertuis de vidange de ce dernier. Cependant, au delà de la difficulté de bien choisir le site de ce barrage de chasse, il est indispensable que la technique du soutirage soit parfaitement maîtrisée. En effet pour avoir une bonne efficacité, il faut que:

-Le barrage principal soit équipé de vannes de grandes dimensions (par exemple 4 . 4 m) pour permettre l'évacuation d'un maximum de sédiments;

-Les manoeuvres des vannes du barrage principal se fassent juste après l'arrivée de la crue artificielle.

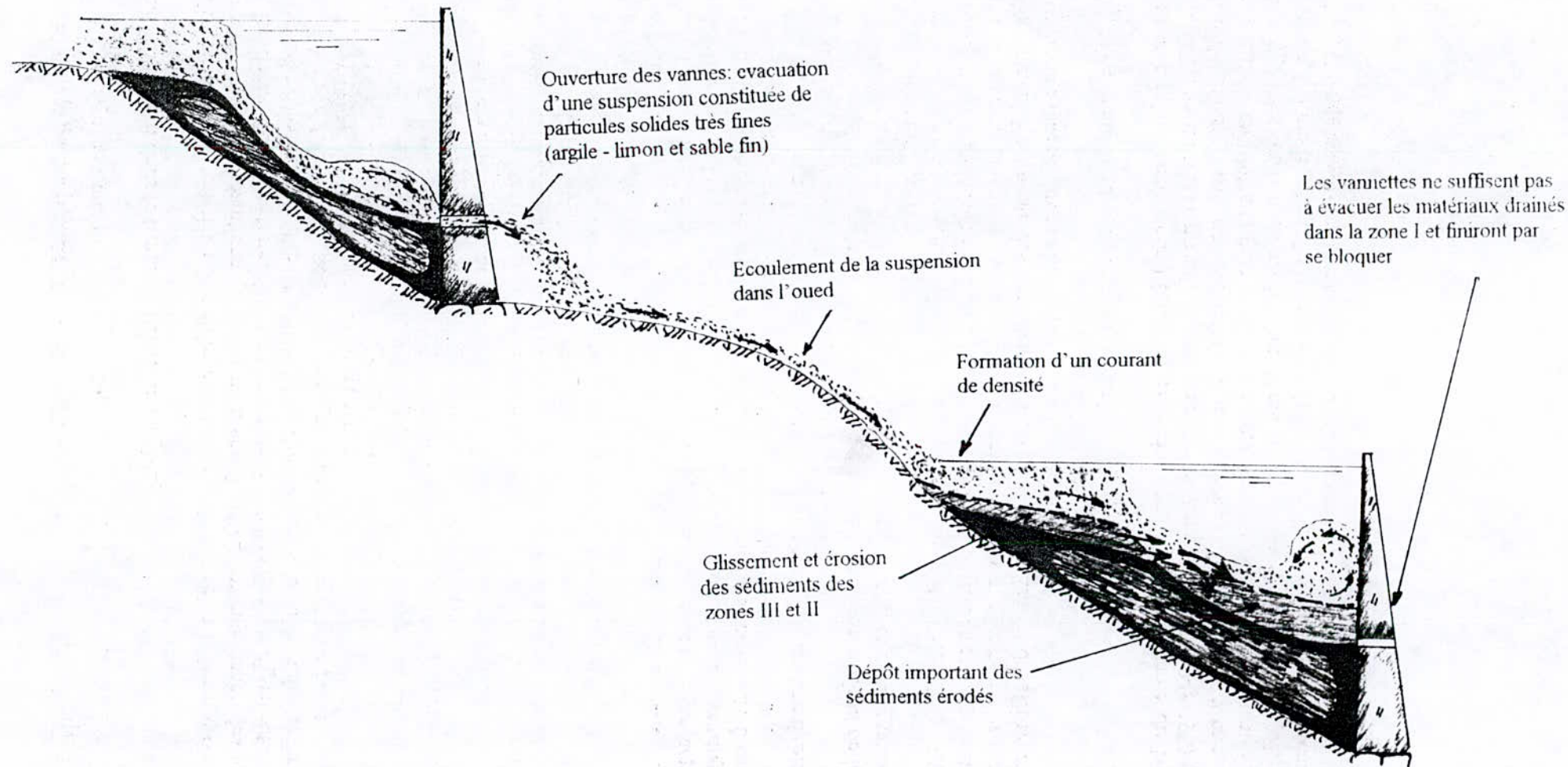


Fig. 232 : Barrage de chasse à l'amont de celui de OUED EL FODDA

Chapitre VI: Evolution de l'envasement dans la retenue d'un barrage dans lequel est pratiquée la technique du soutirage

VI.1. Evolution dans le temps de l'envasement[142]

L'utilisation de la technique du soutirage doit être différente selon le barrage considéré, et plus précisément selon les conditions qui président à son exploitation: importance des apports de sédiments, état de marche des systèmes de vidange, modifications apportées à la digue ...etc.

Il en résulte, que la détermination d'une loi d'évolution dans le temps des dépôts des sédiments dans une retenue de barrage dans lequel cette technique est pratiquée, est indispensable pour:

- La prévision de l'envasement de la retenue
- L'évaluation de l'efficacité de la technique du soutirage
- L'évaluation de la durée de vie de l'ouvrage

Quatre facteurs peuvent ainsi être retenus, et qui vont déterminer l'évolution dans le temps de l'envasement dans une retenue de barrage:

- Un faible taux de comblement
- Une vanne de fond complètement obturée
- Un taux de comblement important
- Une surélévation de la digue du barrage

VI.1.1. Faible taux de comblement

Durant les premiers temps de l'exploitation d'un barrage, les sédiments se déposent de manière uniforme sur toute la surface de la retenue. La pratique de la technique du soutirage est peu efficace, et il y'aura peu de sédiments évacués pour une proportion d'eau importante à cause de la hauteur des seuils des vannes par rapport au niveau du fond (fig. 233):

-Même si les pertuis de vidange sont ouverts au moment opportun, une faible quantité de vase sera évacuée, laissant un volume important de particules se décanter.

-Si les pertuis restent fermés, toute la masse solide se déposera au fond de la cuvette, c'est à dire que toutes les particules entrées dans la retenue sont piégées: il en résulte une évolution linéaire de l'envasement en fonction du temps.

C'est effectivement ce que montre l'étude des barrages de CHEFFIA, SARNO et MEFROUCH dont les taux de comblement sont faibles. Les résultats obtenus représentés sur la figure 234 (a, b et c) indiquent clairement que l'évolution de l'envasement dans le temps est linéaire. ce qui signifie qu'une quantité constante des apports solides est piégée annuellement dans la retenue, et un très faible volume de vase soutiré par les vannes de fond.

VI.1.2. Vanne de fond complètement obturée

Nous avons la chance, pour l'étude de cette situation, d'avoir l'exemple du barrage de l'OUED EL FODDA durant la période d'obturation de sa vanne de fond (1948-1961), période pendant laquelle aucune perte de sédiments n'a été enregistrée. En effet, la vanne avait été complètement obturée en 1948 à la suite de dépôt de vase, et les six pertuis de dévasement placés dans le corps du barrage pour son remplacement n'ont été mis en service que durant l'année 1961.

La figure 235 représentant l'évolution dans le temps de l'envasement dans la retenue durant cette période, montre qu'ici encore la fonction est une droite linéaire.

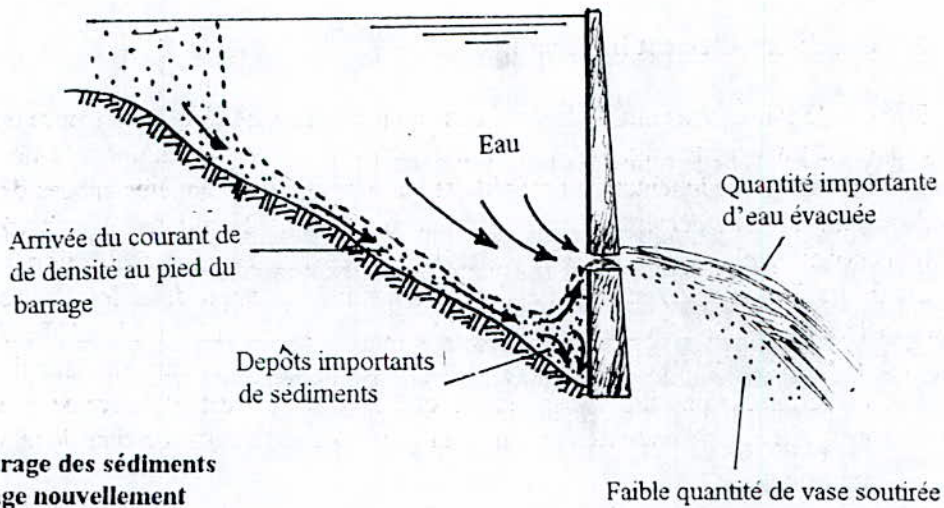


Fig.233- Soutirage des sédiments dans un barrage nouvellement mis en exploitation

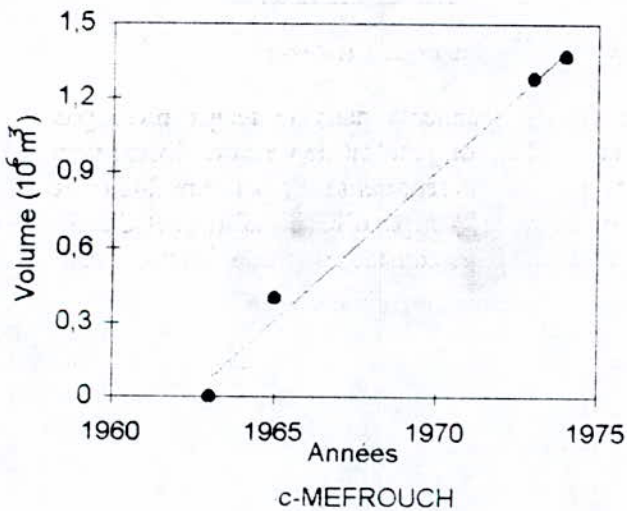
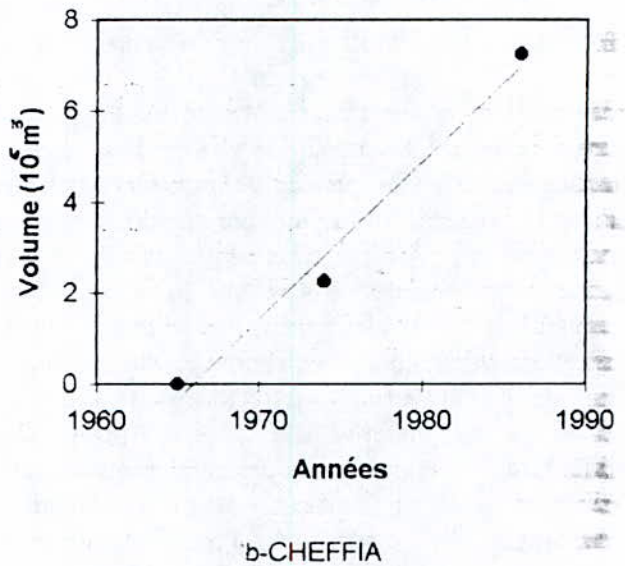
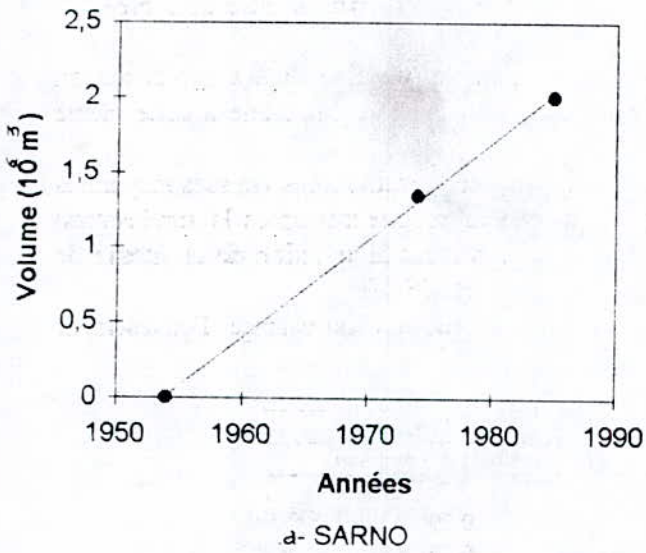


Fig.234- Evolution dans le temps de l'envasement des retenues de barrages à faible taux de comblement

3. Taux de comblement important

Dès que le toit de vase atteint le seuil des vannes, la couche turbide se trouve au dessus, et son soutirage devient plus facile (fig. 236), en conséquence une quantité importante de sédiments sera évacuée, et la vitesse de sédimentation sera réduite par rapport aux premières années de l'exploitation: ce ralentissement de l'envasement se traduira donc par une évolution dans le temps, qui ne sera plus linéaire mais polynomiale du deuxième degré, et liée à une tendance à la stabilisation.

La figure 237 (a à h) représente l'évolution dans le temps dans les retenues de barrages d'IGHIL EMDA, GHRIB, FOUM EL GHERZA, BENI BAHDELS, BOUHANIFIA, FERGOUG, CHEURFAS I utilisant habituellement la technique du soutirage, et qui ont enregistré un taux de comblement élevé: il est possible de constater que la fonction est effectivement polynomiale du deuxième degré, et liée à une nette régression de la vitesse de sédimentation dans le temps (fig. 238 a à e).

4. Surélévation de la digue d'un barrage [143]

Pour compléter cette approche, le cas d'un barrage dont la digue a été surélevée peut paraître intéressant, et nous avons à cet effet représenté sur la figure 239 (a à d) l'évolution dans le temps de l'envasement dans les retenues de ZARDEZAS, K'SOB, BOUGHZOUL et BAKHADA dont les digues ont été respectivement surélevées en 1975, 1977, 1960 et 1958 à la suite d'un comblement rapide des réservoirs (à l'exception de celui de BAKHADA dont le taux d'envasement était faible).

On peut constater que:

-Le graphe est composé de deux courbes, la première correspondant à une évolution de la sédimentation dans la retenue avant la surélévation de l'ouvrage, la deuxième à cette même évolution après surélévation,

-L'envasement augmente plus rapidement après la surélévation. Les vitesses moyennes de sédimentation dans les quatre retenues sont en effet nettement supérieures après la surélévation comme indiqué dans le tableau 32, et la figure 240 (a et b) représentant la variation de la vitesse de sédimentation dans le temps dans les barrages de BOUGHZOUL et K'SOB.

Ceci tendrait donc à prouver qu'au début de l'exploitation d'une réserve d'un barrage, l'envasement serait beaucoup plus important qu'après.

Barrages	Vitesse de sédimentation ($10^6 \text{ m}^3 / \text{an}$)	
	Avant surélévation	Après surélévation
ZARDEZAS	0,30	0,70
K'SOB	0,25	0,29
BOUGHZOUL	0,34	0,50
BAKHADA	0,05	0,15

Tableau 32 - Vitesses de sédimentation moyennes des barrages surélevés

A notre avis, le ralentissement dans le dépôt des sédiments dans le temps n'est pas uniquement dû à l'efficacité du soutirage, mais aussi au profil en long du toit de vase qui évolue vers un profil d'équilibre. Pour donner du poids à cette idée, nous avons représenté sur la figure 241 (a et b) l'évolution dans le temps de l'envasement dans ces retenues des barrages d'IGHIL EMDA et OUED EL FODDA en supposant qu'aucun soutirage n'a été effectué: nous constatons que la fonction reste toujours polynomiale du deuxième ordre.

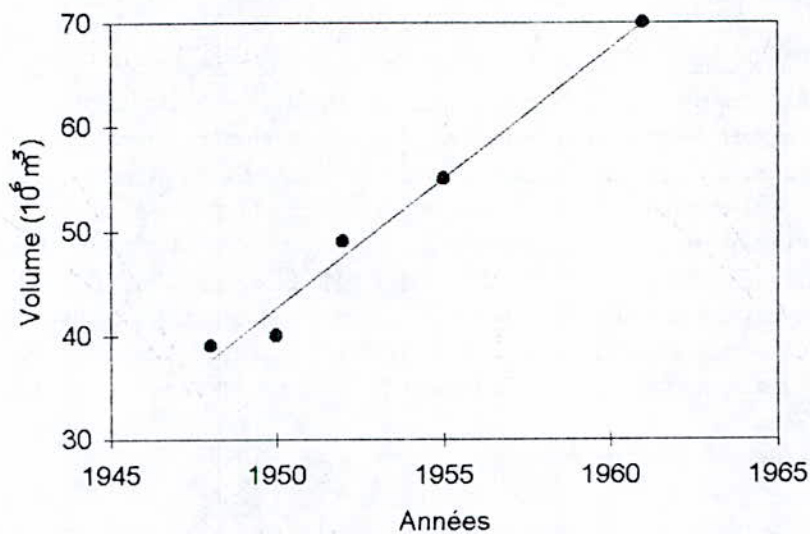


Fig.235- Evolution dans le temps de l'envasement dans la retenue du barrage de l'OUED EL FODDA durant la période du blocage de la vanne de fond (1948-1961)

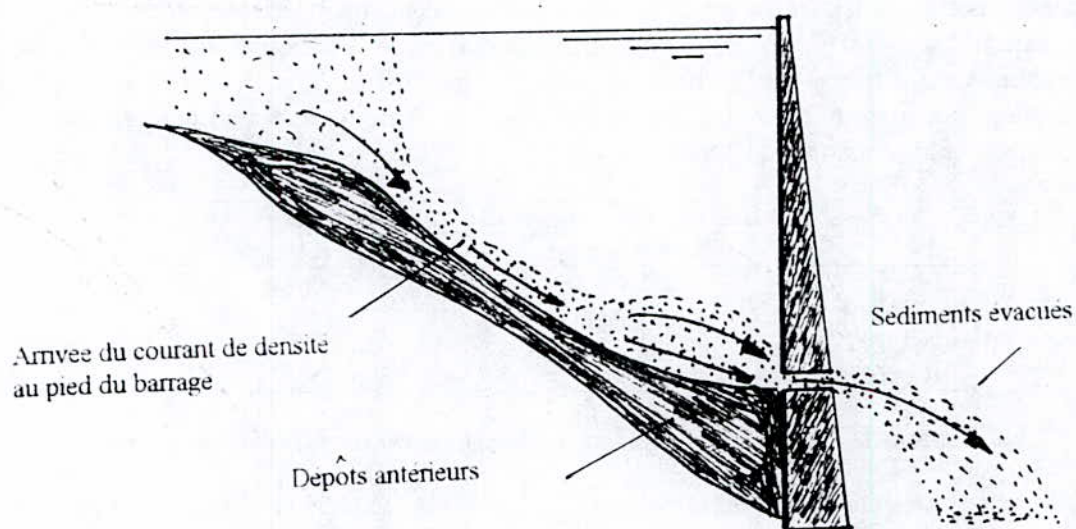


Fig.236- Soutirage des sédiments dans un barrage à fort taux de comblement

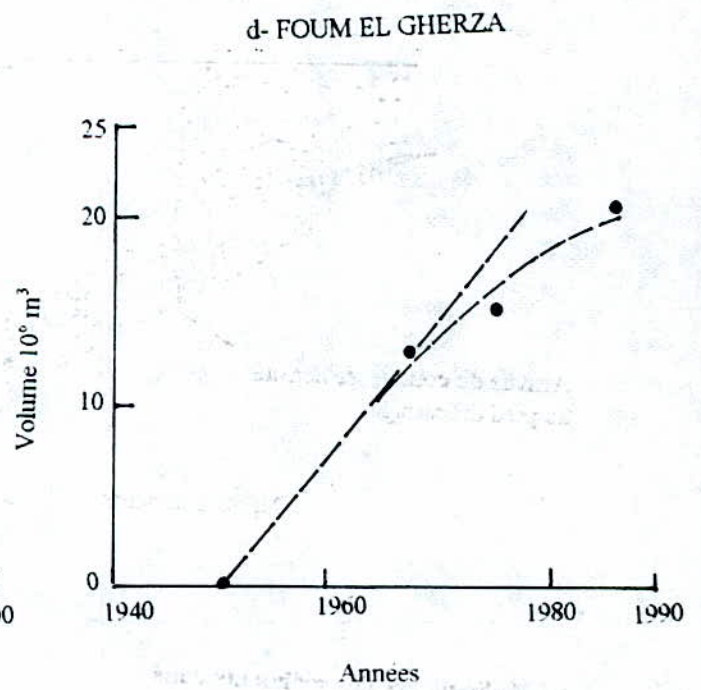
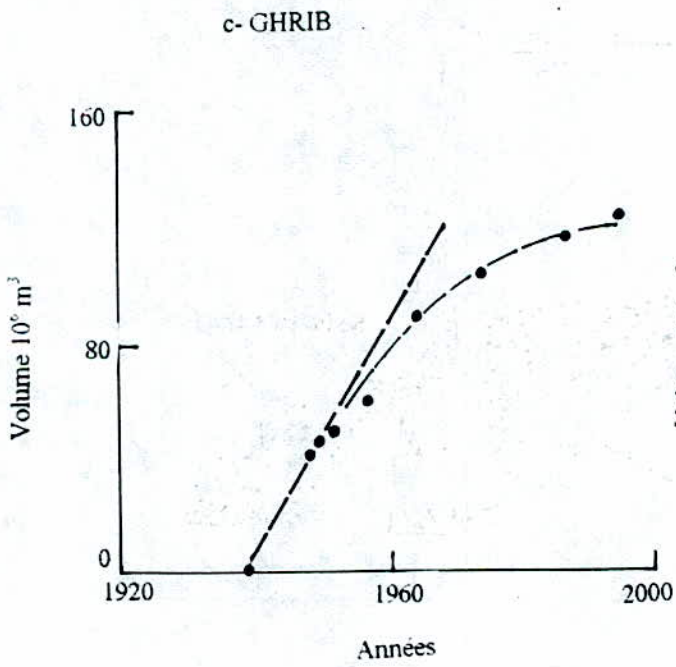
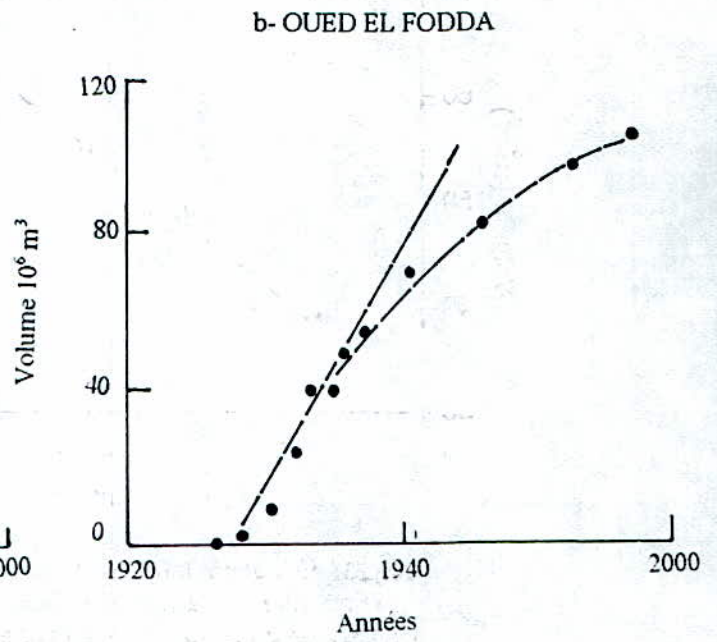
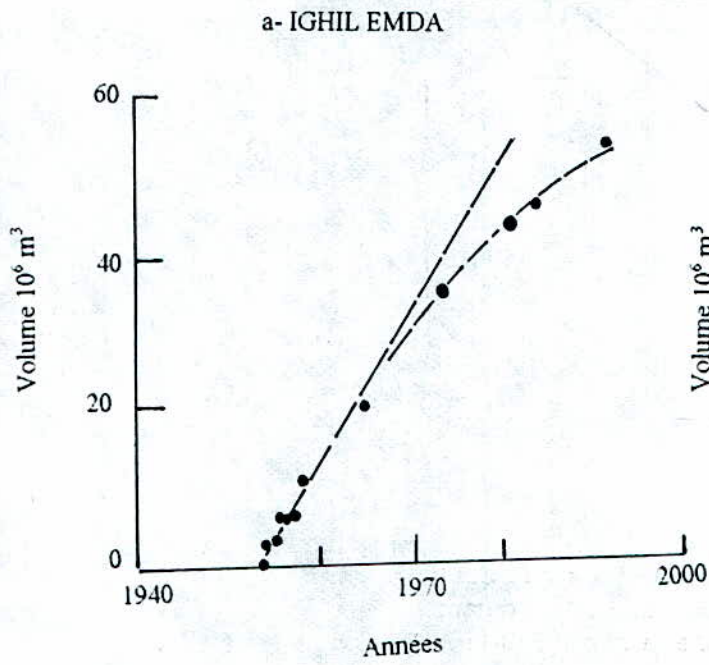
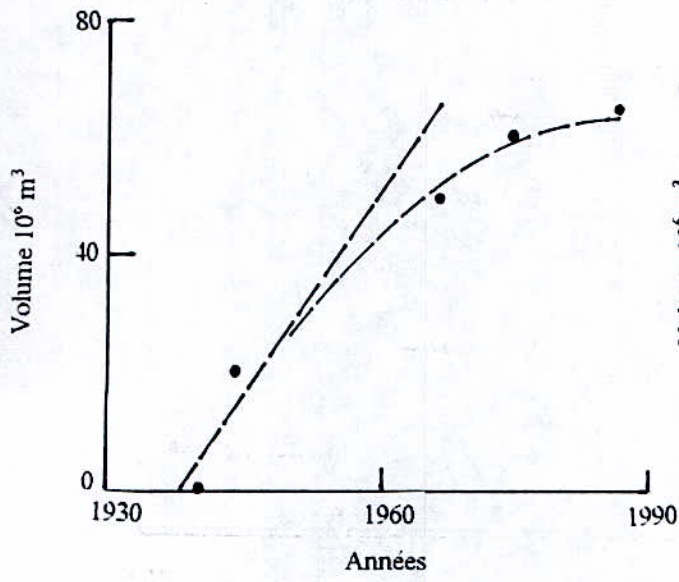
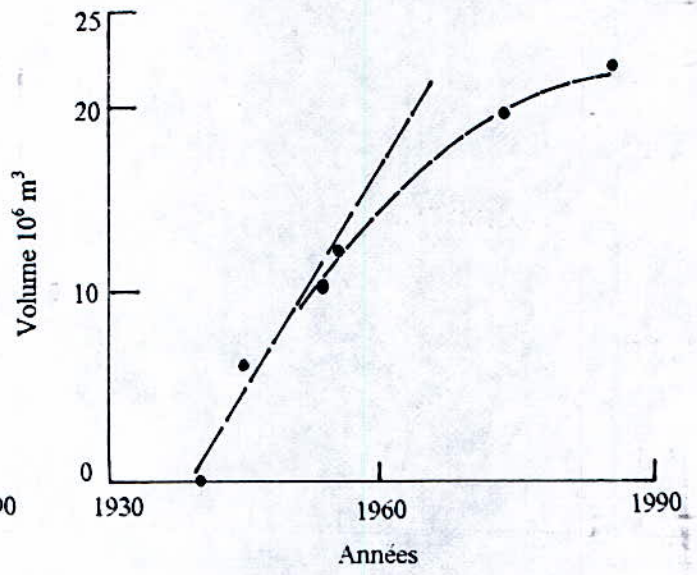


Fig.237- Evolution dans le temps de l'envasement dans les retenues à fort taux de comblement

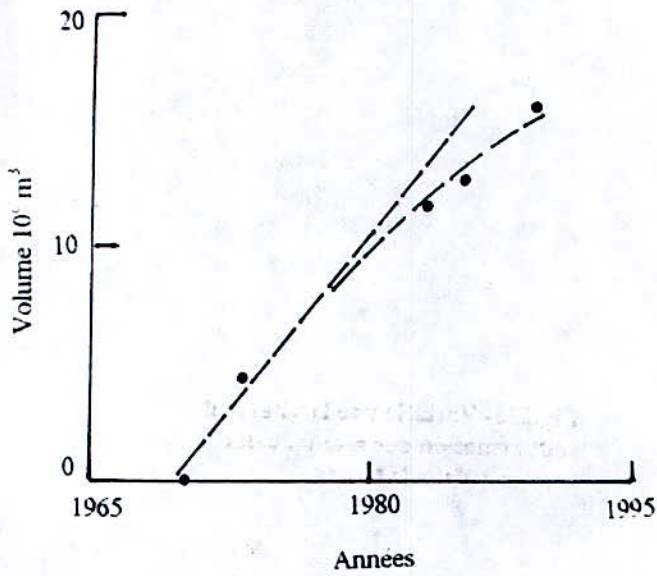
e- BENI BAHDELS



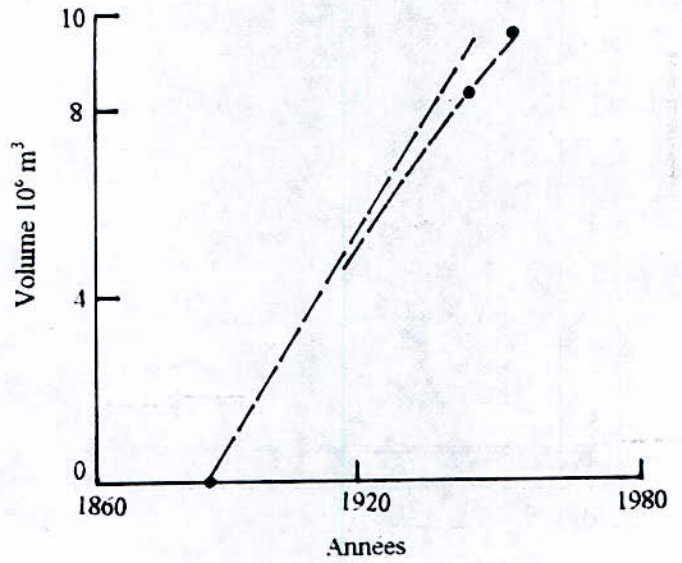
f- BOUHANIFIA



g- FERGOUG



h- CHEURFASI



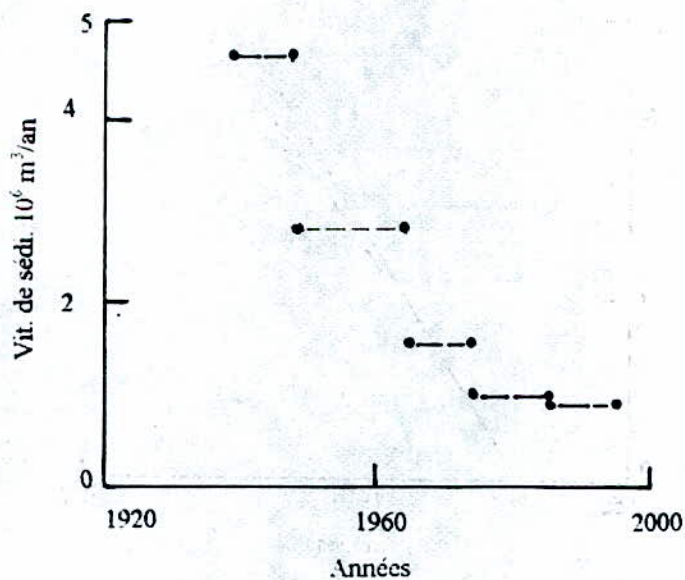
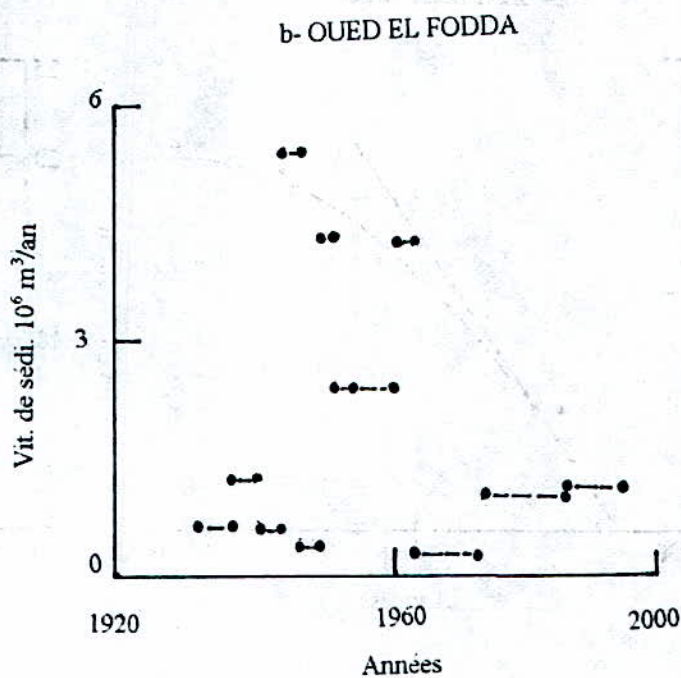
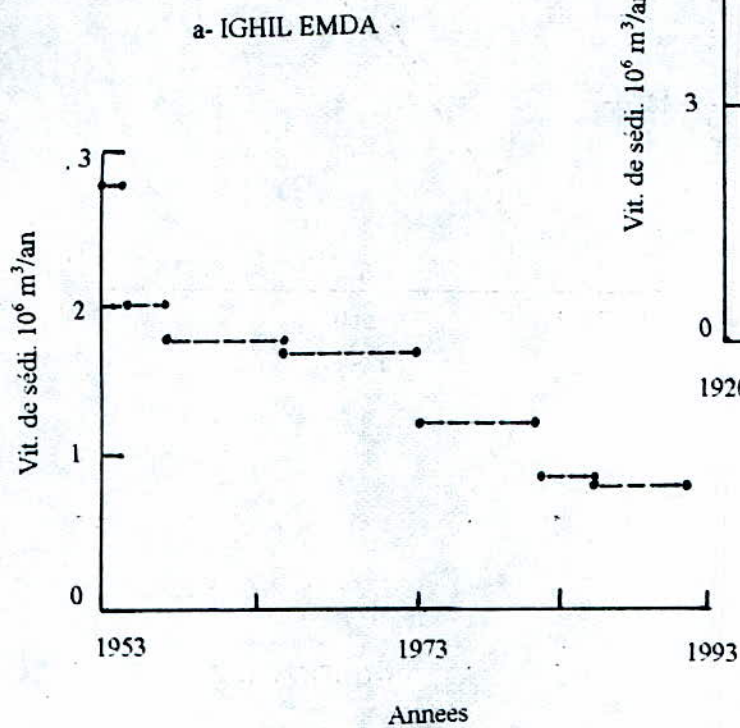
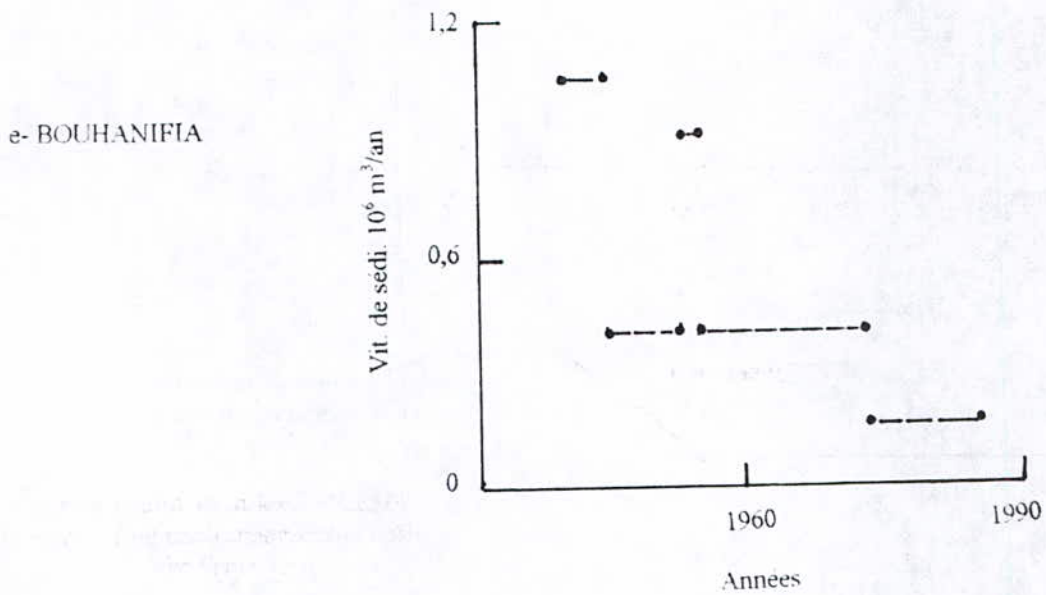
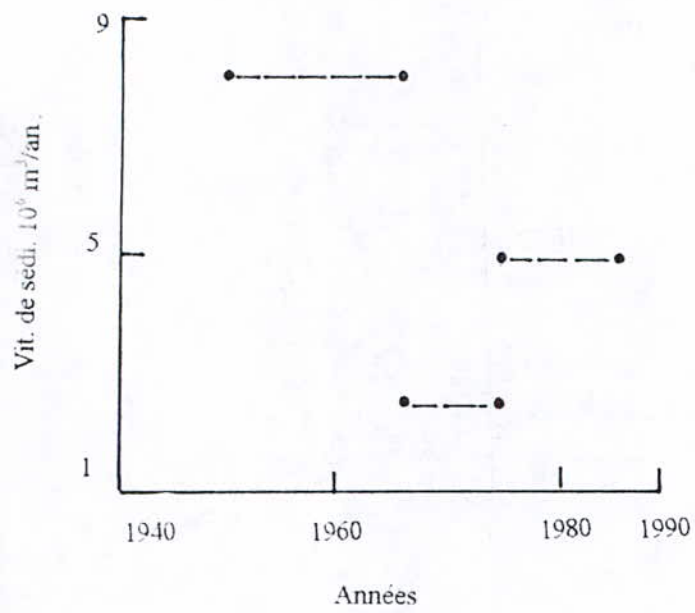


Fig.238- Variation de la vitesse de sédimentation des retenues des barrages dans le temps



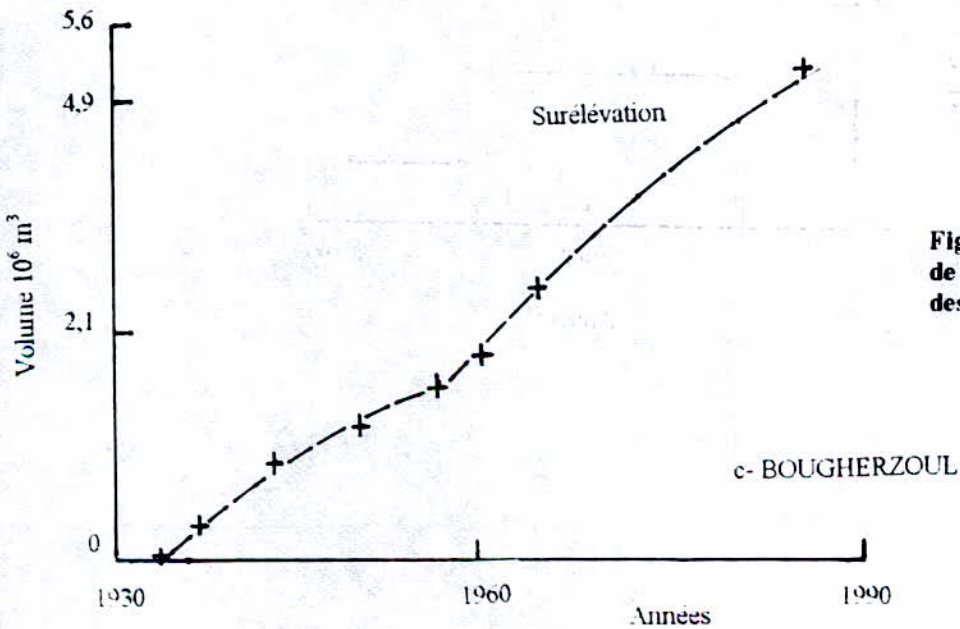
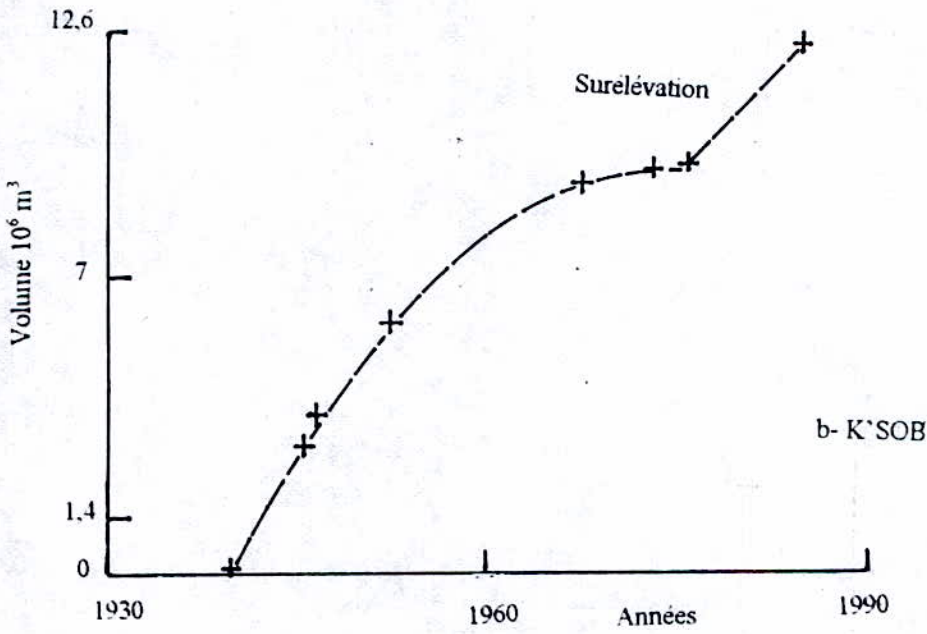
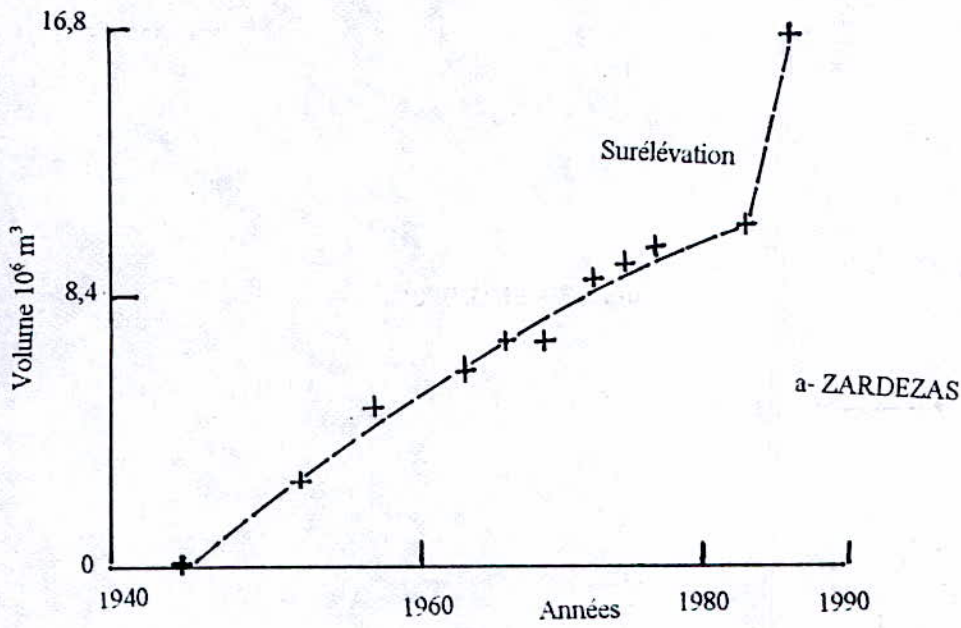


Fig.239- Evolution dans le temps de l'envasement dans les retenues des barrages surélevés

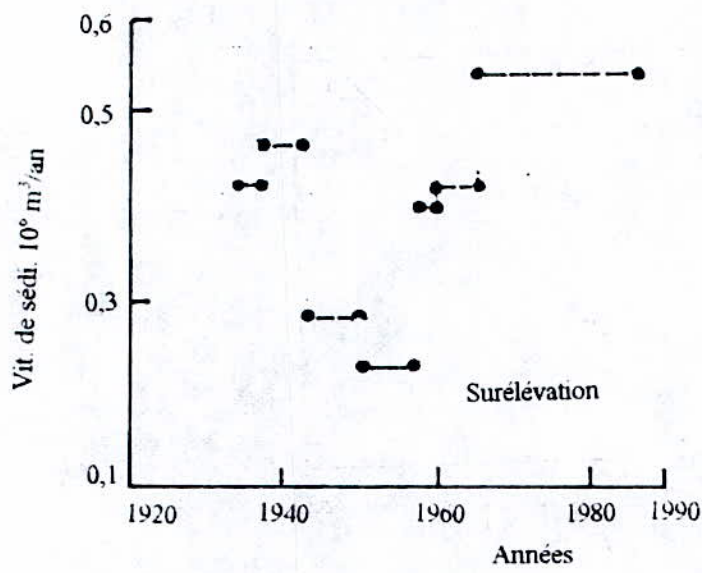
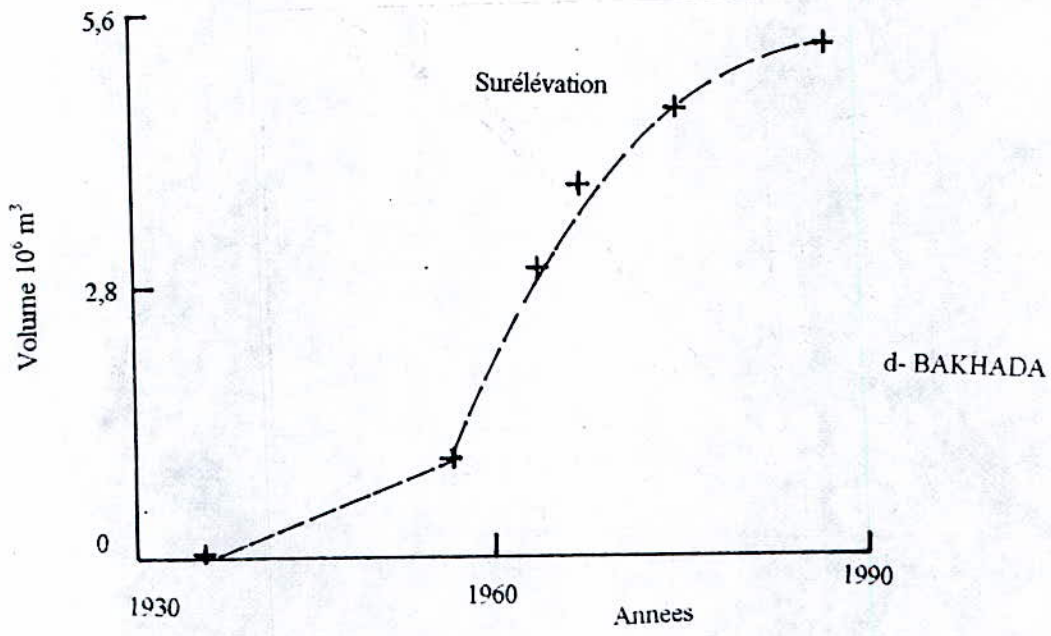
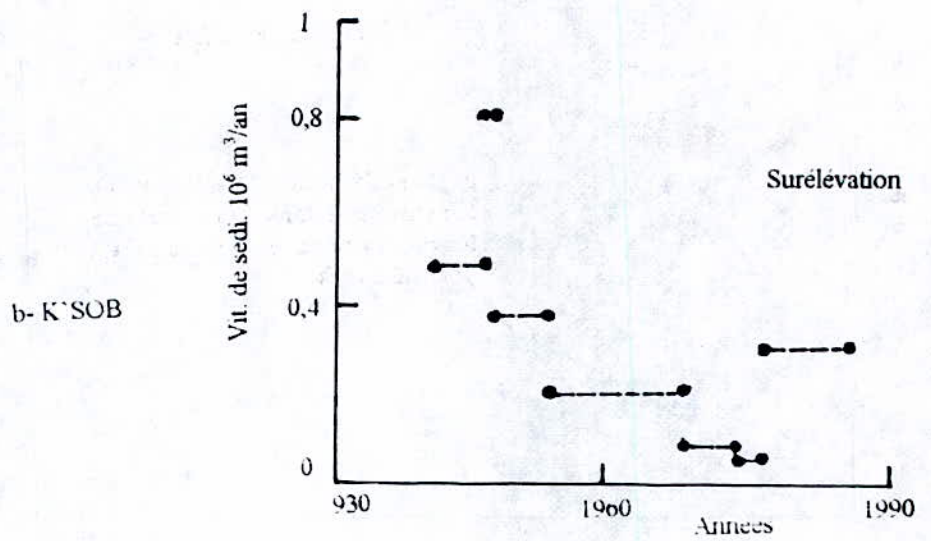
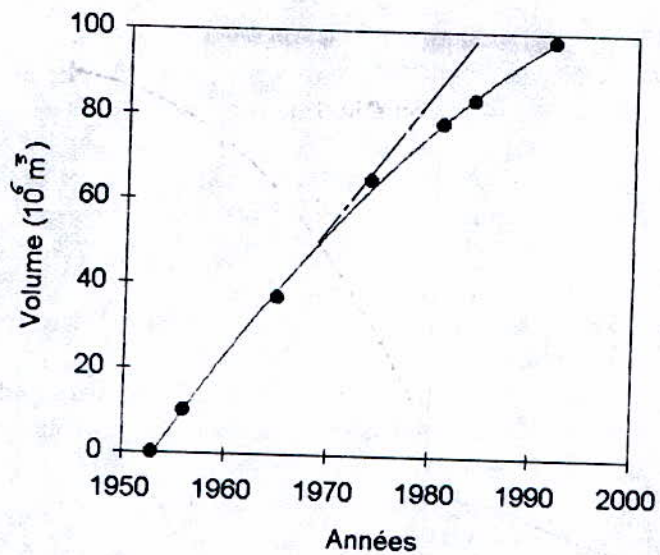
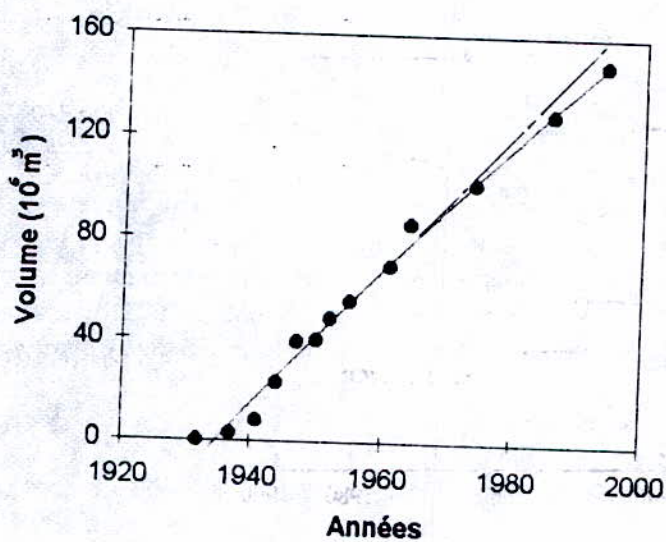


Fig.240- Variation de la vitesse de sédimentation dans le temps des retenues de barrages surélevés





a) IGHIL EMDA



b) OUED EL FODDA

Fig241- Evolution dans le temps de l'envasement dans les retenues de barrages en l'absence de soutirage des sédiments

Conclusion

L'utilisation courante des vannes de fond d'un barrage, comme moyen de réduction de l'envasement influe directement sur l'évolution du profil des dépôts de vase dans la cuvette. En effet, au début de l'exploitation d'un barrage, le remplissage de la retenue par les sédiments suit une loi linéaire en fonction du temps, et dès que le toit de la vase atteint le seuil des vannes, la loi devient polynomiale (du deuxième degré). Ce ralentissement n'est pas dû uniquement au soutirage, mais aussi au profil en long qui tend vers un profil d'équilibre.

VI.2. Evolution de l'envasement en fonction de la hauteur d'eau dans la retenue[144]

La détermination d'une loi de l'évolution des dépôts sédimentaires en fonction de la hauteur d'eau dans une retenue de barrage, dans lequel la technique du soutirage est pratiquée est indispensable pour permettre:

- la bonne gestion du volume utile d'eau du réservoir,
- l'évaluation de la technique du soutirage.

Quatre situations peuvent être retenues qui vont déterminer l'évolution des dépôts du matériau solide dans une retenue de barrage:

- un faible taux de comblement,
- un taux de comblement important,
- une surélévation de la digue du barrage,
- un approfondissement de la retenue.

VI.2.1. Faible taux de comblement

Nous avons étudié l'évolution des dépôts de sédiments suivant la hauteur d'eau dans les retenues des barrages de DJORF EL TORBA, CHEFFIA, ERRAGUENE et S.M.B.A dont les taux de comblement sont faibles. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 242 (a à d): on constate qu'il existe une relation linéaire entre les dépôts successifs des sédiments et la hauteur de l'eau dans la retenue, ce qui signifie que les sédiments se répartissent uniformément sur la totalité de la surface du fond de la retenue, et que le toit de la vase reste parallèle au fond du réservoir. Le même type de situation peut être observé dès les premières années de l'exploitation du barrage.

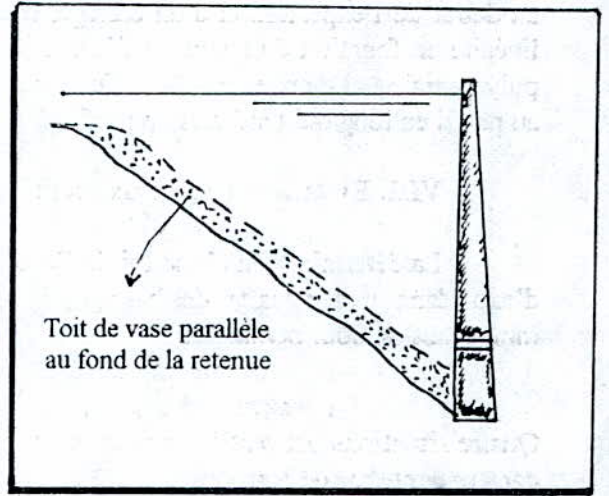
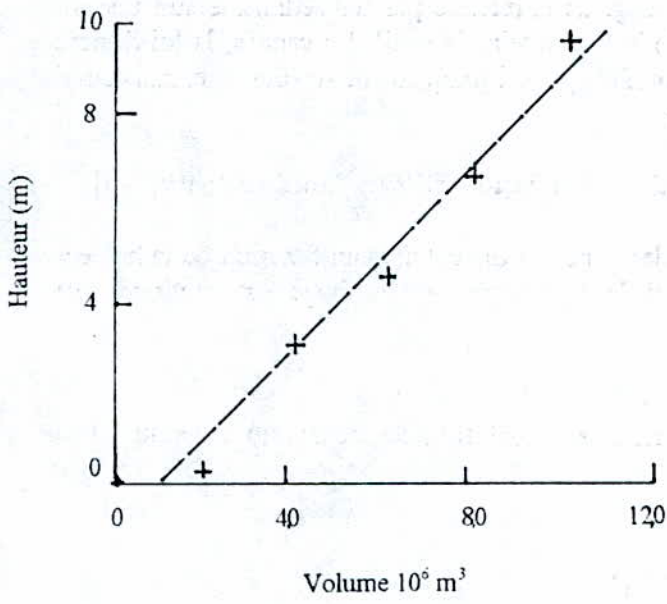
2. Taux de comblement important

Dès que le toit de la vase atteint le seuil des vannes de fond, les opérations de soutirage influent directement sur l'évolution des sédiments dans la retenue, et la loi de l'envasement en fonction de la hauteur d'eau n'est plus linéaire: d'une part les sédiments déposés dans la partie basse de la retenue sont remaniés par les manoeuvres des vannes, et d'autre part ceux de la partie haute sont saisonnièrement modifiés par l'arrivée de nouveaux apports.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons représenté sur la figure 243 (a à e) l'évolution de l'envasement en fonction de la hauteur d'eau dans les retenues des barrages de OUED EL FODDA, GHRIB, FERGOUG, BOUHANIFIA et FOUM EL GHERZA dans lesquels est pratiquée la technique du soutirage, et qui ont enregistré un taux de comblement élevé: il est possible de constater que la fonction n'est plus linéaire mais polynomiale du 3^{ème} degré.

Enfin, pour confirmer le type de fonction (linéaire ou polynomiale) qui est liée au taux du comblement (faible ou important) de la retenue, nous avons représenté sur la figure 244 (a et b), l'évolution des dépôts des sédiments en fonction de la hauteur d'eau dans la retenue du barrage d'IGHIL EMDA: nous constatons que la fonction est linéaire durant la première année d'exploitation (1953-1954) avec un taux de comblement de 2 %. et qu'après 39 années d'exploitation (1953-1992), la fonction est polynomiale du 3^{ème} degré avec un taux de comblement de 33 %.

a- DJORF EL TORBA



b- CHEFFIA

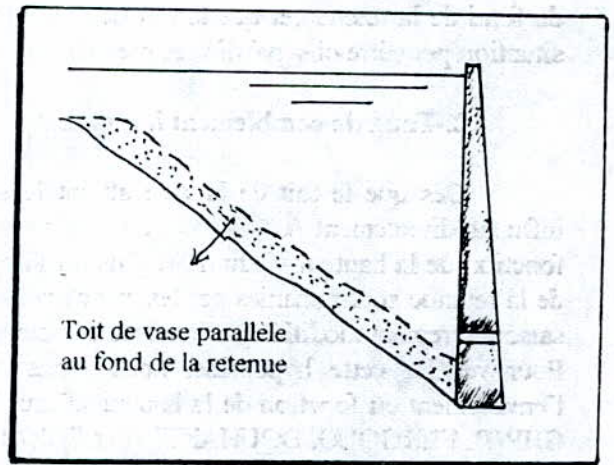
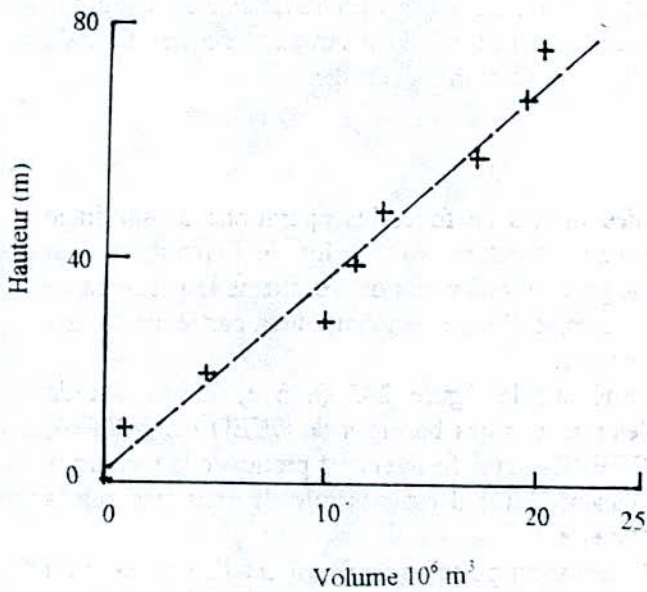
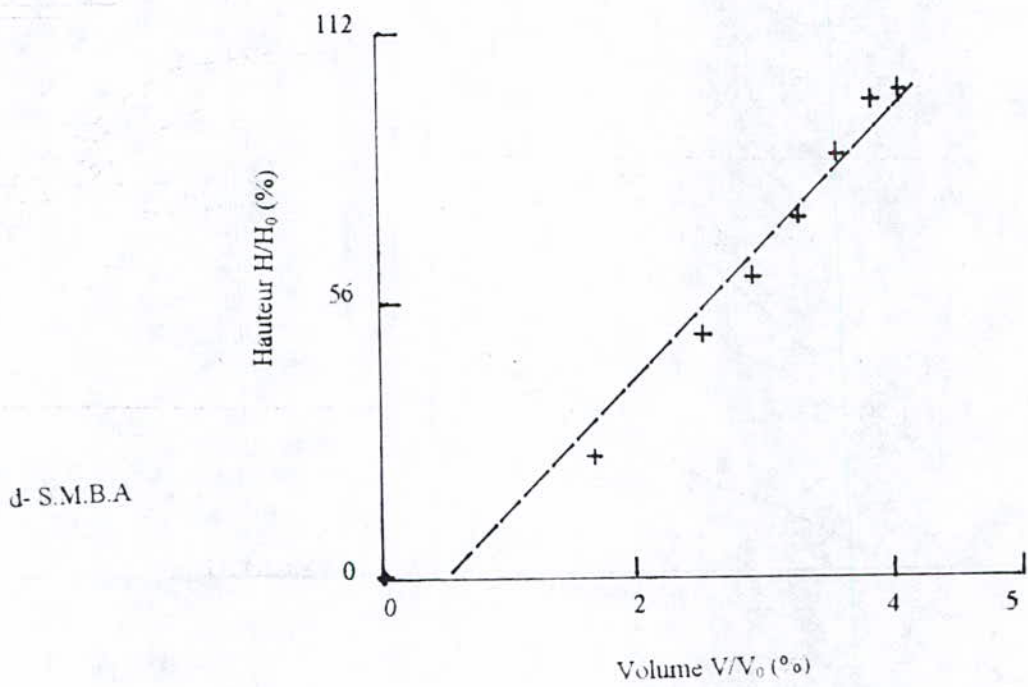
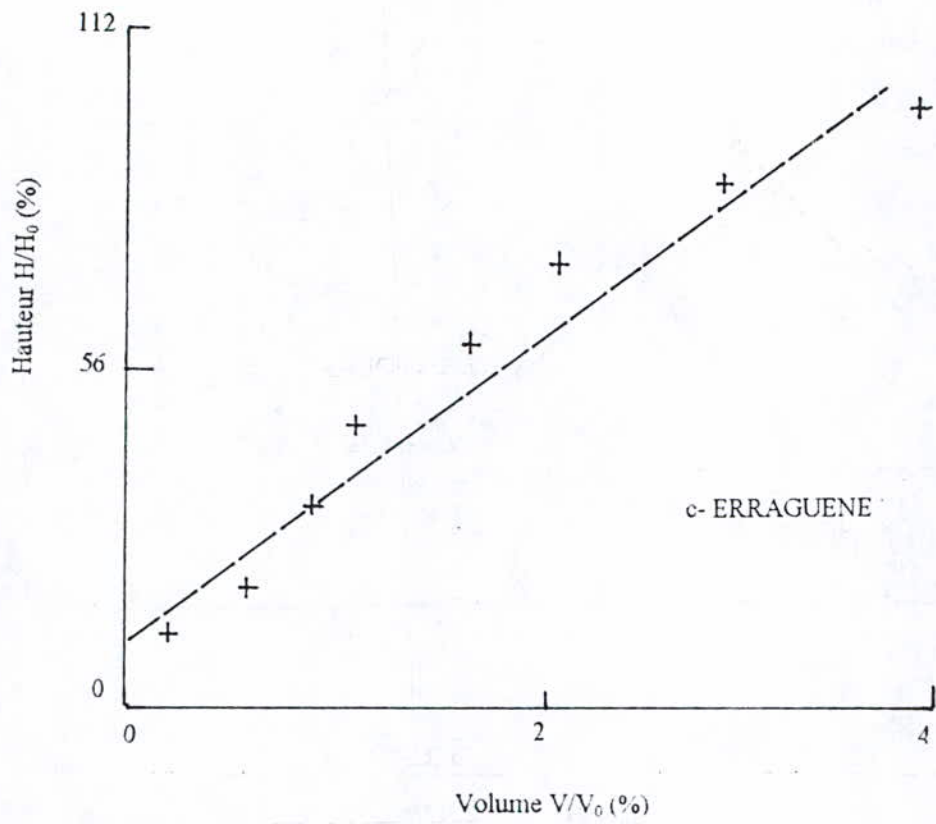
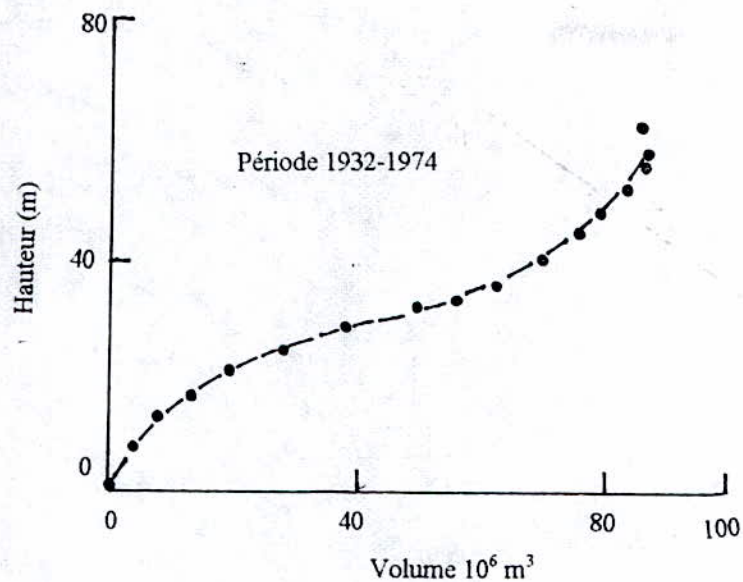
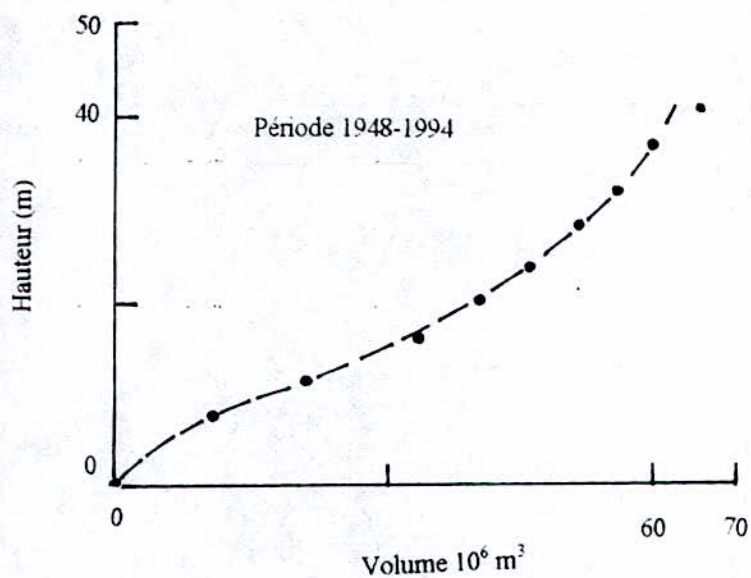


Fig.242- Evolution de l'envasement dans une retenue à faible taux de comblement

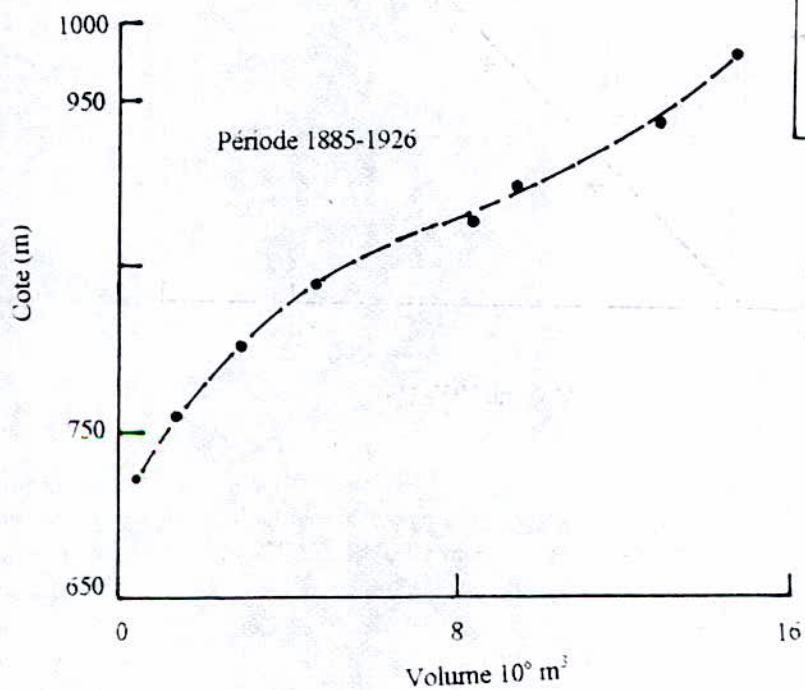




a- OUED EL FODDA



b- GHRIB



c- FERGOUG

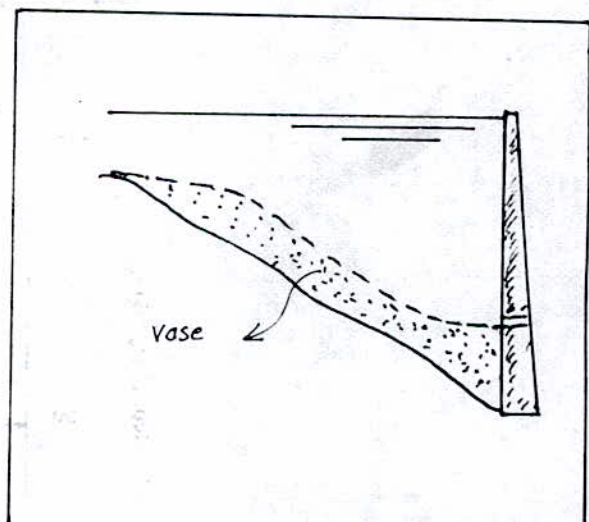
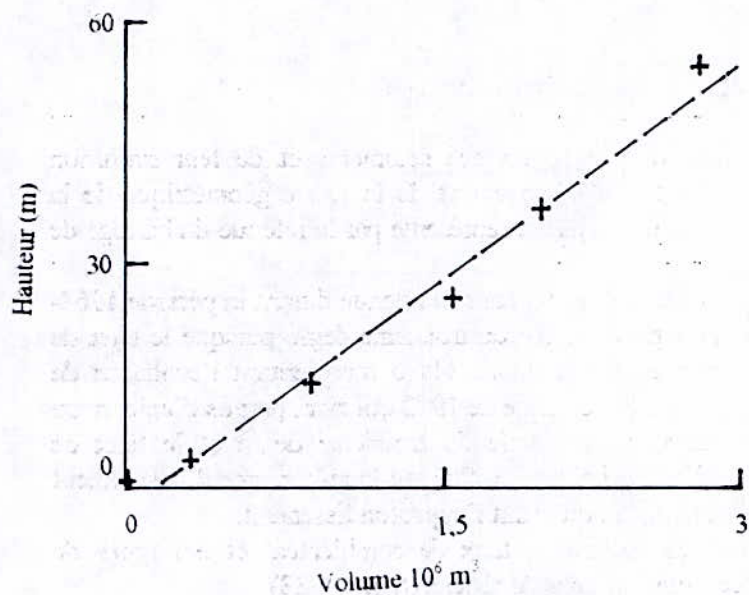
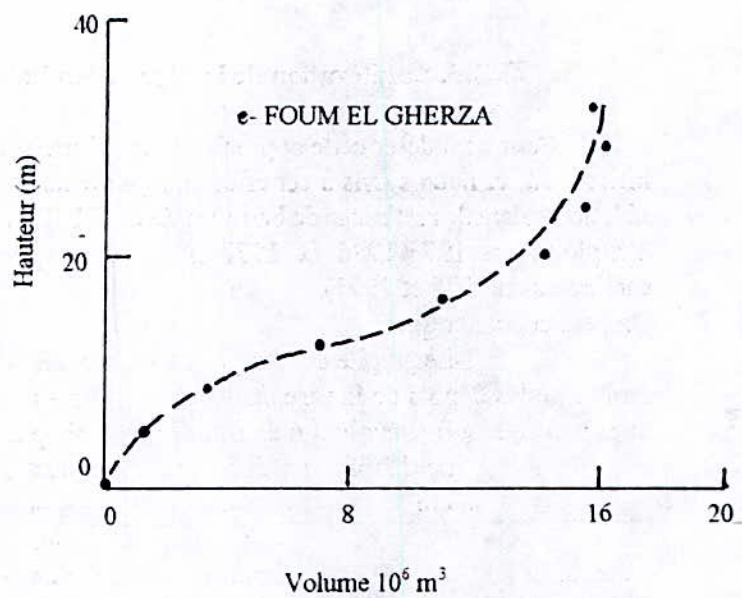
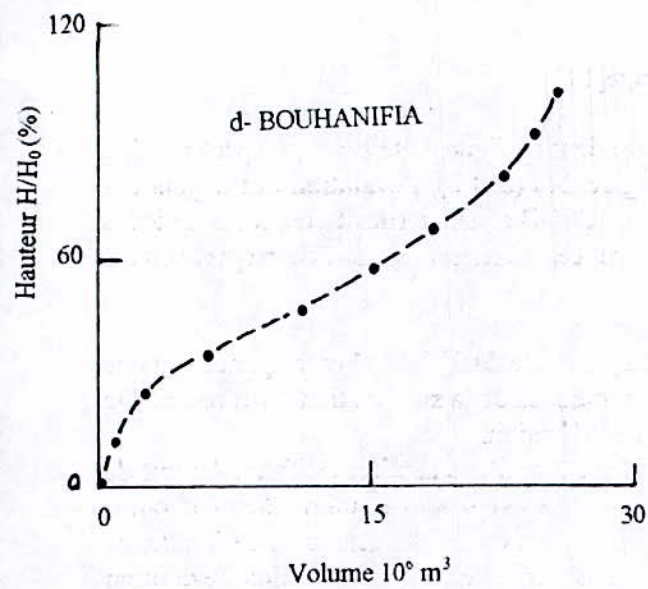


Fig.243- Evolution de l'envasement dans une retenue à fort taux de comblement



b- Periode 1953 - 1992

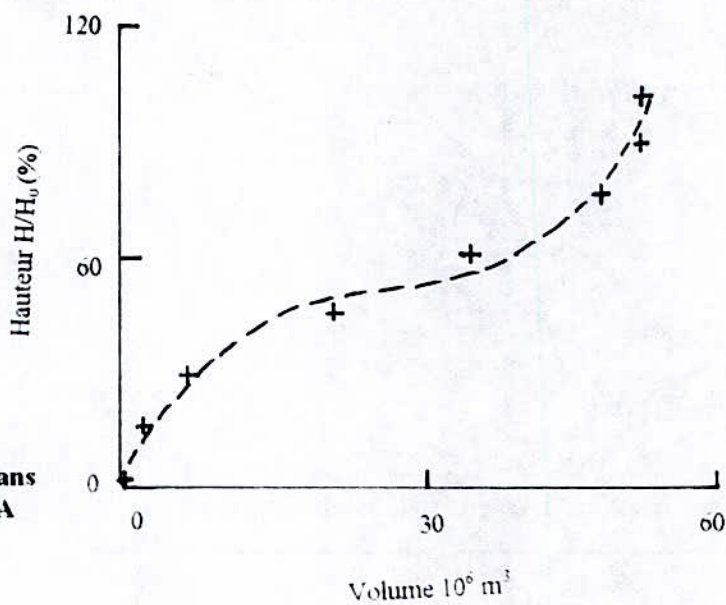


Fig.244 Evolution de l'envasement dans la retenue du barrage d'IGHIL EMDA

VI. 2. 3. Surélévation de la digue d'un barrage[143]

Pour compléter cette approche, le cas d'un barrage dont la digue a été surélevée peut paraître intéressant, et nous avons à cet effet représenté sur la figure 245 (a et b), l'évolution des dépôts des sédiments dans les retenues de barrages de ZARDEZAS et K'SOB respectivement durant les périodes d'exploitation 1975-1986 et 1977-1986, (les digues de ces barrages ayant été respectivement surélevées en 1975 et 1977).

On peut constater que:

-Le graphe est composé d'une fonction polynomiale du 3^{me} degré correspondant à une évolution des dépôts de la vase dans la retenue initiale (au dessous de la surélévation), et d'une droite linéaire à cette même évolution dans la réserve créée par la surélévation.

-Le dépôt des sédiments évolue plus rapidement et d'une manière uniforme (le toit de la vase est parallèle au fond de la retenue) dans la réserve créée par la surélévation. Ceci tendrait à confirmer que la surélévation d'une digue influe sur le mécanisme de la sédimentation de la retenue (puisque avant surélévation, la fonction était polynomiale mais que juste après surélévation l'évolution devient identique à celle du début d'exploitation d'un nouveau barrage), et qu'elle accélère l'envasement dans cette retenue.

La figure 246 illustre l'évolution des dépôts sédimentaires dans une retenue de barrage dont la digue a été surélevée.

VI. 2. 4. Evolution à la suite d'un dragage (approfondissement)[144]

Une autre modification des conditions de répartition des sédiments et de leur évolution pourrait être liée à l'approfondissement de la retenue (changement de la forme géométrique de la cuvette) après une première période d'exploitation. Ce cas est représenté par la retenue du barrage de HAMIZ.

La figure 247 a montre l'évolution des dépôts des sédiments dans la retenue durant la période 1964-1972 (avant le dragage de 1972). La fonction est polynomiale du troisième degré puisque le taux de comblement est de 27 %. Nous pouvons constater sur la figure 247 b représentant l'évolution de l'envasement durant la période 1964-1986 (contenant le dragage de 1972 qui avait permis d'enlever un volume de $8,65.10^6 \text{ m}^3$ de vase), que la fonction polynomiale du troisième degré et le taux de comblement est de 20 %, ce qui signifie que le décapage n'a pas influé sur le mécanisme d'envasement et que les dépôts continuent d'évoluer de la même façon qu'avant l'approfondissement.

Enfin, nous avons dressé un tableau des valeurs du taux de comblement et des types de fonctions d'évolution de l'envasement dans certains barrages Algériens (tableau 33).

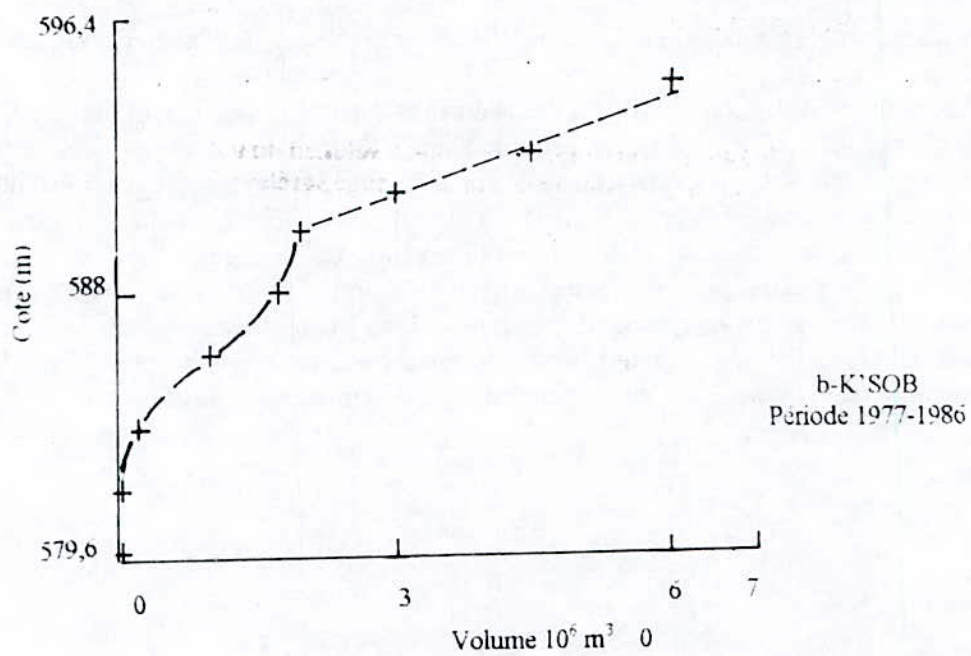
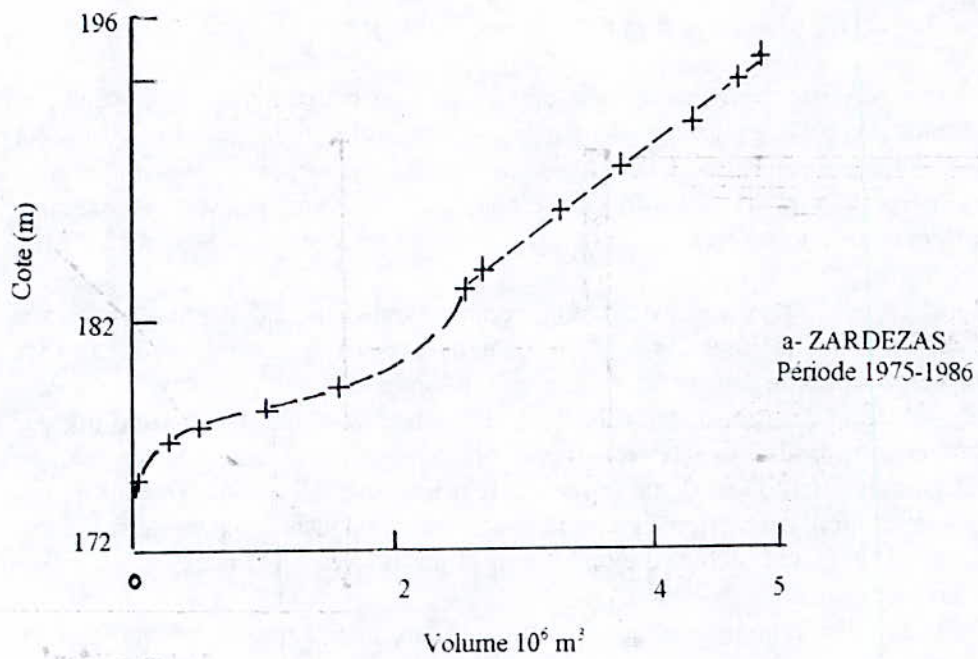


Fig.245- Evolution de l'envasement dans une retenue de barrage après surélévation de la digue

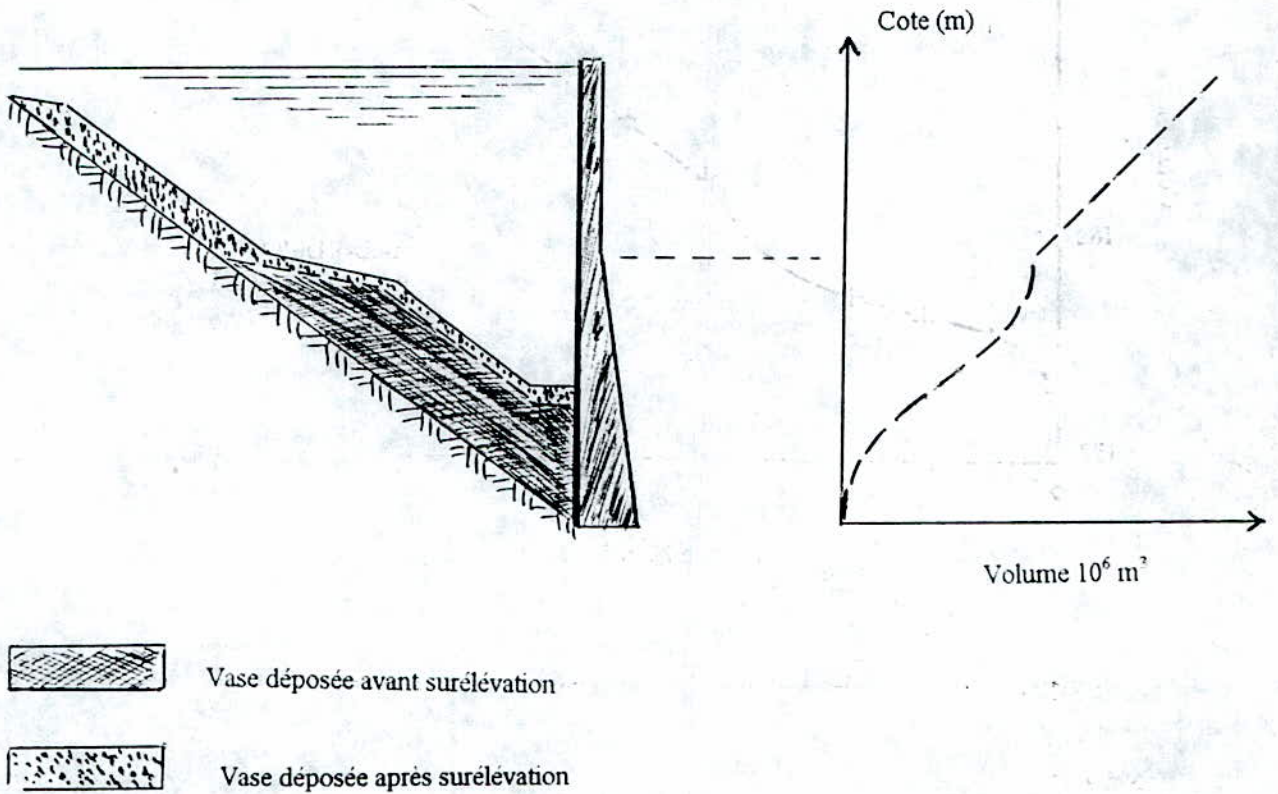


Fig.246- Schema approximatif de l'evolution du toit de la vase dans une retenue de barrage surélevé

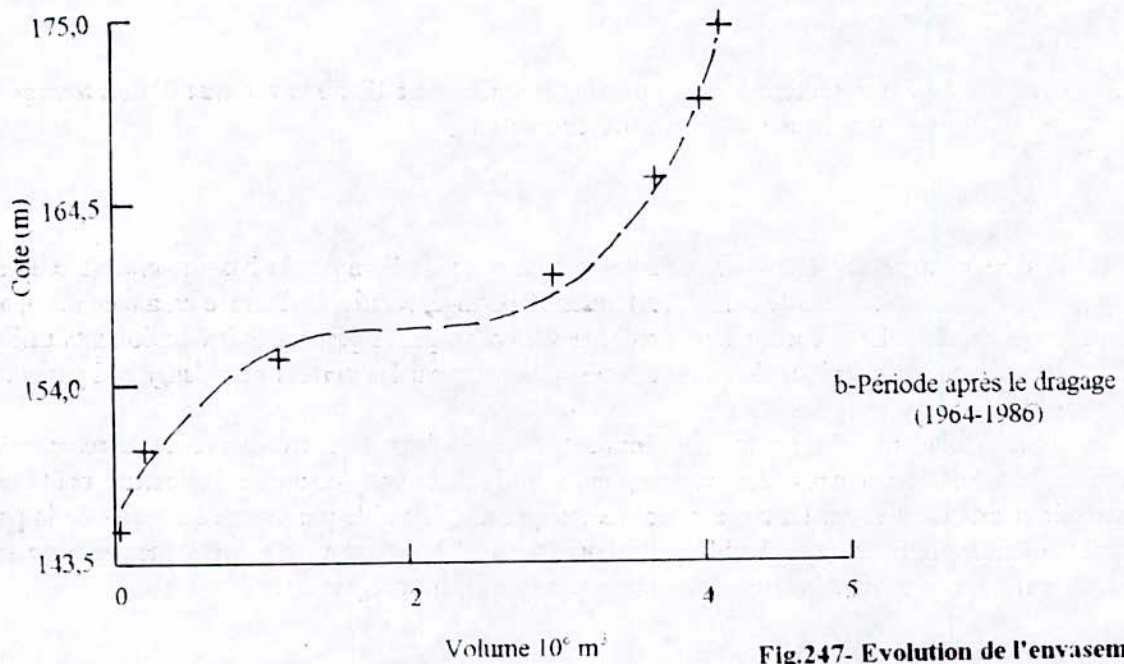
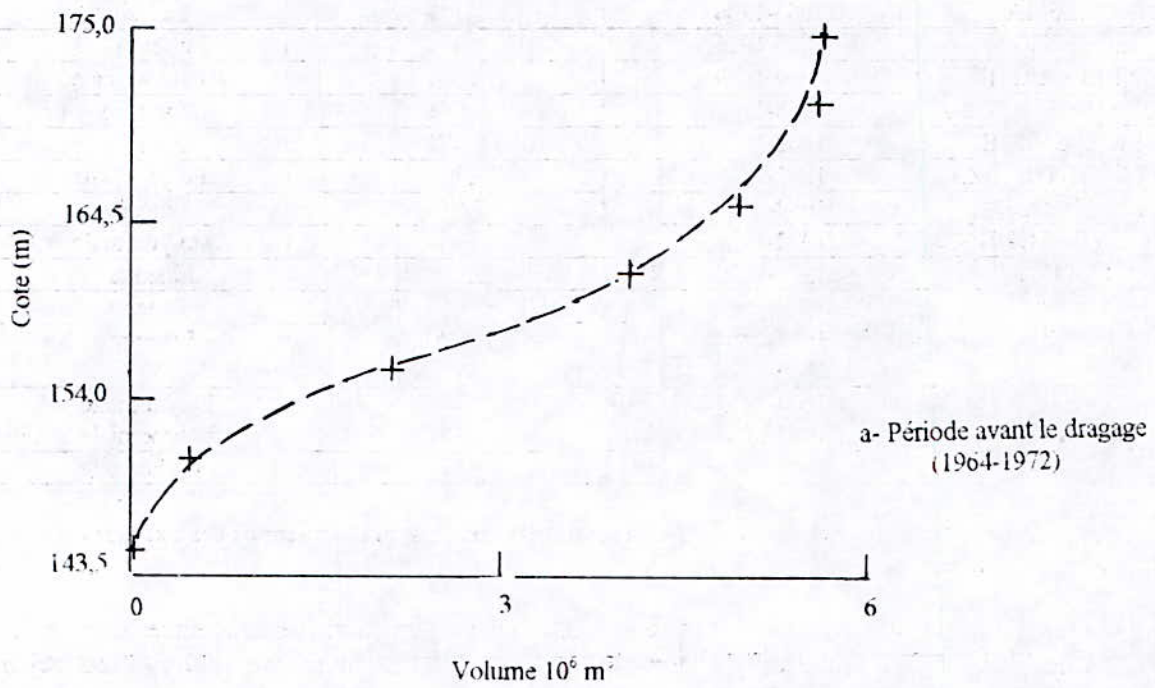


Fig.247- Evolution de l'envasement dans la retenue du barrage du HAMIZ

Barrages	Période d'exploitation	Taux de comblement (%)	Type de la fonction de l'évolution de l'envasement
BOUHANIFIA	1945-1986	40 %	Polynomiale
CHEFFIA	1965-1986	4 %	Linéaire
FERGOUG I	1885-1926	54 %	Polynomiale
FERGOUG III	1970-1973	27 %	Polynomiale
DJORF EL TORBA	1968-1986	9,6 %	Linéaire
ERRAGUENE	1962-1974	4 %	Linéaire
FOUM EL GHERZA	1950-1986	33,7 %	Polynomiale
MEFROUCH	1964-1974	7,5 %	Linéaire
OUED EL FODDA	1932-1974	37 %	Polynomiale
S.M.B.A	1978-1986	3,9 %	Linéaire
SARNO	1954-1986	2,3 %	Linéaire
IGHIL EMDA	1953-1954	2 %	Linéaire
	1953-1992	33 %	Polynomiale
HAMIZ	1964-1972*	27 %	Polynomiale
	1964-1986	20 %	Polynomiale
CHEURFAS I	1885-1955	98 %	Polynomiale

Tableau 33- Fonction de l'évolution des dépôts de sédiments dans certaines retenues des barrages Algériens.

On peut constater que le seuil du taux de comblement permettant de caractériser le type de la fonction de l'évolution (linéaire ou polynomiale) est situé dans la fourchette [9,6 % , 20 %] qui représente le volume mort d'un barrage.

Conclusion

Au regard de ce qui précède, il semble possible de dire qu'au début de l'exploitation d'un barrage, l'évolution des dépôts de la vase dans la retenue suit une loi linéaire en fonction de la hauteur d'eau dans le réservoir, et que dès que le toit de la vase atteint le seuil des vannes, la loi devient polynomiale (du 3^{ème} degré) dont la forme dépend du taux de comblement.

VI.3. Evolution de l'envasement dans la partie centrale (zone II) de la retenue d'un barrage dans lequel est pratiquée la technique du soutirage

Introduction

L'accumulation successive des sédiments provenant de l'amont du bassin versant, et pris en charge par les courants de densité dans les retenues de barrage, réduisent d'année en année la capacité en eau de ces derniers. Le phénomène n'épargne pas les ouvrages Algériens, et les exploitants utilisent mais maîtrisent mal la technique du soutirage des sédiments par les pertuis de vidange, qui permettrait de prolonger la durée de vie des ouvrages.

Il en résulte que d'une part, les sédiments déposés dans la partie basse de la retenue sont remaniés par les manoeuvres des vannes, et que d'autre part ceux de la partie haute sont saisonnièrement modifiés par l'arrivée de nouveaux apports. Il semble par contre que ceux de la partie centrale soient à l'abri de cette double perturbation, et que le volume de la vase augmente ainsi de manière uniforme au cours du temps, les sédiments se décantent progressivement

VL3.1. Remaniement des sédiments dans une retenue

Pour localiser les zones de remaniement des sédiments, nous avons effectué une étude sur les relevés bathymétriques pour des durées variables dans les retenues de barrages de OUED EL FODDA et ERREGUENE.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 248 (a et b). Il apparaît très nettement des zones de remaniement des sédiments dans les deux retenues.

a) Retenue de OUED EL FODDA

Comme le montre la figure 248 a, le remaniement des sédiments durant la période 1974-1986 est localisé dans la partie haute de la retenue, et concerne les éléments grossiers (graviers, sables) doués de rugosité, autrement dit ayant un angle de frottement non nul, ce mouvement des sédiments est dû à l'arrivée de nouveaux apports et plus particulièrement les apports d'Automne.

b) Retenue d'ERRAGUENE

Il est possible de constater sur la figure 248 b un remaniement important de vase localisé dans la partie basse de la retenue, qui est dû aux manoeuvres fréquentes des vannes de dégrèvement durant la période 1962-1974. Les modifications du toit de la vase dans la partie haute de la retenue (oued Labsat et oued Bahar) sont dues aux apports de crues.

VL3.2. Délimitation de zones à l'intérieur d'une retenue (fig. 249 (a et b))[145]

Compte tenu de ce qui précède, trois zones peuvent ainsi être délimitées dans une retenue.

a) Zone I: Partie basse de la retenue

Cette zone est généralement située à une hauteur relative ne dépassant pas **40 %** de la hauteur normale de la retenue: sur plus de dix cas étudiés, nous avons constaté qu'au delà de cette hauteur, les sédiments ne sont plus perturbés.

La granulométrie des sédiments de cette zone est fine avec généralement près de **70 %** de limon et **30 %** d'argile, on note aussi la présence en faible quantité de sable fin. Drainés par les courants de densité, ces particules se décantent et se consolident en l'absence de soutirage (fig. 249 a). Par contre lorsque les vannes sont manoeuvrées, l'évolution de la vase dépendra de l'efficacité du soutirage (fig. 249 b).

b) Zone II: Partie centrale de la retenue

Cette zone correspond approximativement aux hauteurs relatives comprises entre **40 et 80 %** du niveau normal de la retenue. Celle-ci est généralement plus large à cet endroit, ce qui favorise le ralentissement de la vitesse des courants de densité de forte concentration provoquant ainsi la décantation des particules de diamètre supérieur à **20 μ m** (essentiellement des limons grossiers et des sables fins). La présence d'une quantité d'argile et de limons est justifiée par l'évanouissement des courants de densité de faible concentration.

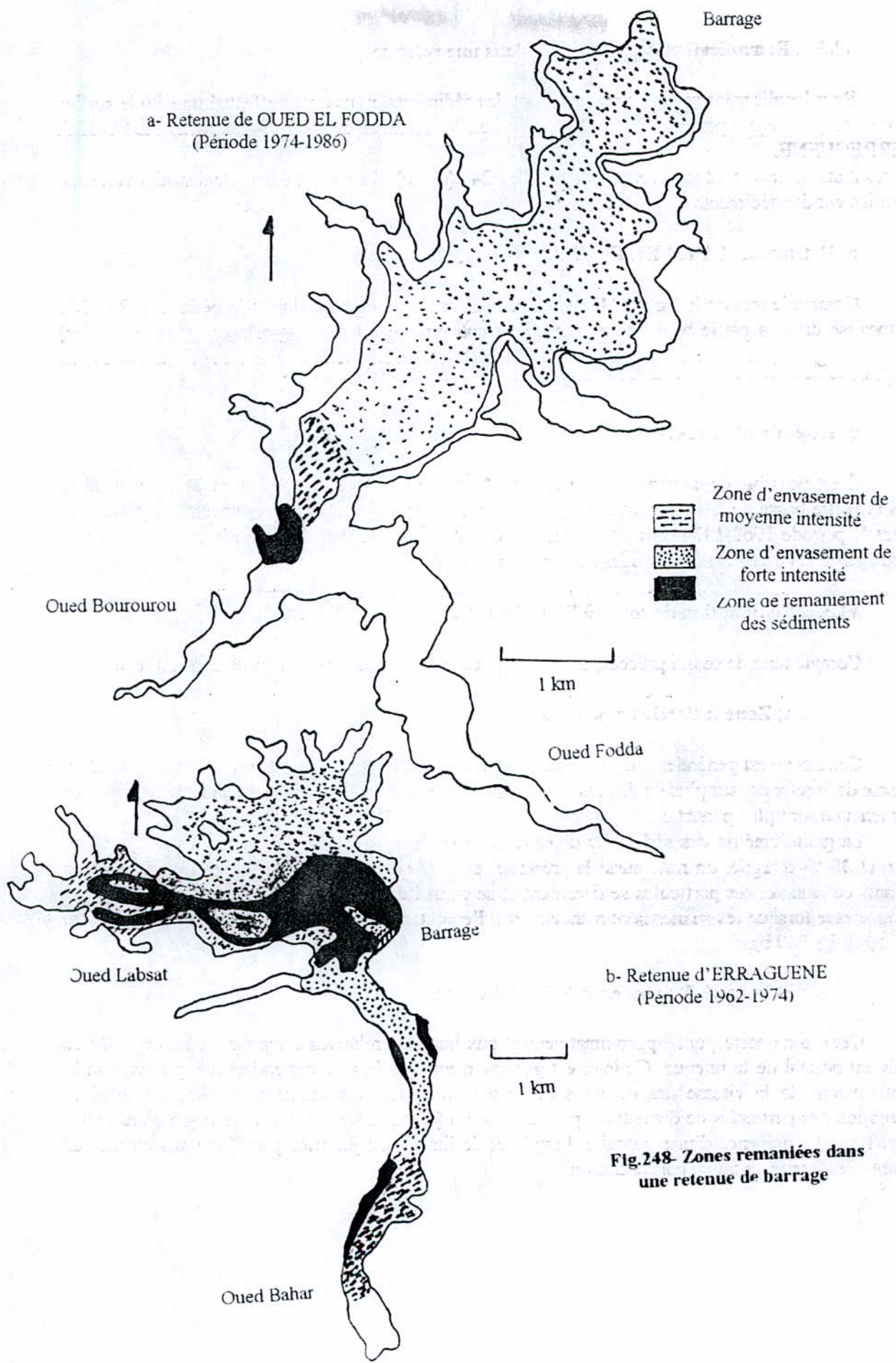


Fig.248- Zones remaniées dans une retenue de barrage

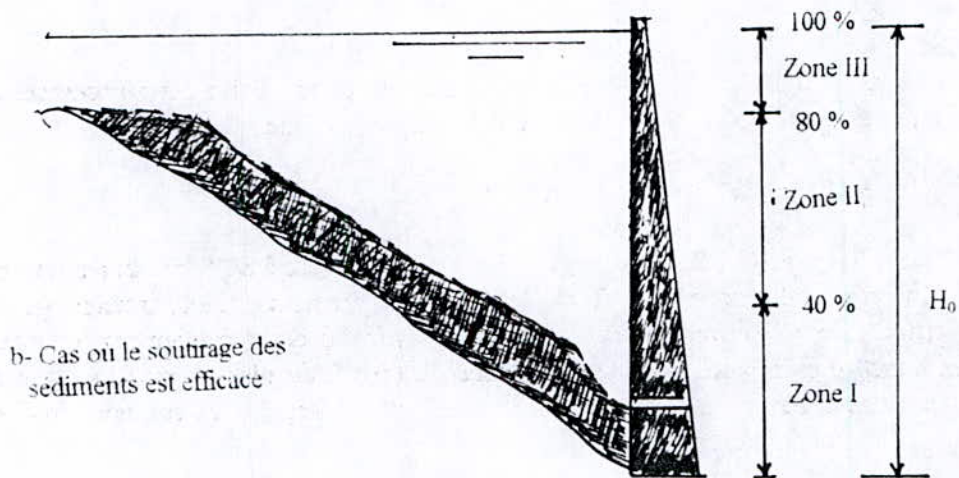
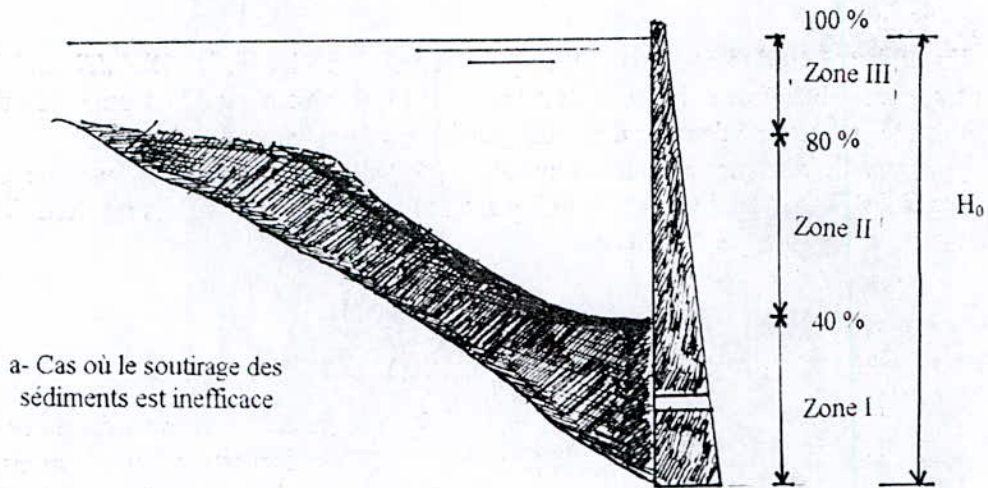
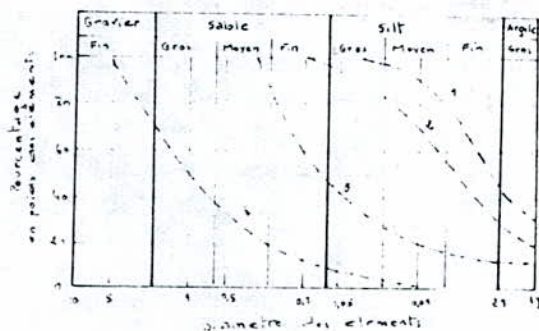


Fig.249- Délimitation de trois zones d'envasement dans la retenue

Selon une étude réalisée par MIGNIOT C. (1989) [146] [147] sur les particules transportées par les courants de densité dans un canal prismatique, il ressort que ces courants déposent leurs matériaux dès que le nombre de REYNOLDS de l'écoulement turbide devient inférieur à 2000 ($R_t = V \cdot h / \nu_m < 2000$).

En étudiant la sédimentation des barrages réservoirs en Algérie, DROUHIN et al (1951) [69] affirment que les sables fins et les silts sont facilement transportés par les courants de densité, et se déposent en presque totalité dans les deux tiers supérieurs de la retenue.

Les analyses granulométriques d'échantillons de dépôts prélevés en différents points de la retenue du barrage des CHEURFAS I [69] (fig. 250), indiquent l'allure générale de la distribution des sédiments dans les retenues des barrages Algériens.



- 1-Au voisinage du barrage
- 2-Dans la moitié aval du réservoir
- 3-Dans la moitié amont du réservoir
- 4-Immédiatement à l'amont du réservoir

fig.250.courbe granulométriques des dépôts solides accumulés dans la réserve des CHEURFAS I

La zone II, située loin du pied du barrage se trouve donc à l'abri des manoeuvres des vannes et les sédiments ne seront pas soutirés d'où leur répartition uniforme.

c) Zone III: Partie haute de la retenue

Cette zone généralement située à une hauteur supérieure à 80 % de la hauteur normale de la retenue, correspond à la partie occupée par les éléments grossiers (sables, graviers, galets...) charriés lors des crues. Elle est souvent « perturbée » et on assiste à des remaniements et mouvements des particules à mettre en relation avec les variations du niveau du plan d'eau (dûes généralement aux apports des crues et aux ponctions lors des opérations de vidange). Des courants de densité peuvent également apparaître dans cette zone.

VL3.3. Evolution de l'envasement dans le temps[145]

Pour confirmer l'impression visuelle d'une évolution du sommet de la vase parallèlement au fond de la retenue, nous avons effectué une étude sur les relevés de l'envasement pour des durées variables dans la zone II des retenues des barrages de FERGOUG, OUED EL FODDA, GHRIB, FOU M EL GHERZA, IGHIL EMDA et BOUHANIFIA. Le choix de ces barrages est justifié par:

- Leurs taux élevés d'envasement
- La pratique de la technique du soutirage

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 251 (a à g). Il apparaît très nettement que l'envasement suit une progression linéaire.

a) Barrage du FERGOUG

Le barrage du FERGOUG d'une capacité de 30.10^6 m^3 est l'un des plus anciens barrages réalisés en Algérie. Après 41ans d'exploitation (1885-1926), il a été abandonné à la suite d'une forte crue qui a endommagé la digue. Durant cette période, l'envasement a été très intense, une quantité de 10.10^6 m^3 de sédiments s'est déposée uniformément dans la zone II de la retenue puisque les dépôts successifs suivent une progression linéaire (fig. 251.a). Le toit de la vase en 1926 est représenté sur la figure 250 a.

A partir de 1970, un nouveau barrage (actuel) a été mis en exploitation, réalisé sur le même site que celui de l'ancien. Sur la figure 251.b, nous constatons que durant les périodes 1970-1973 et 1970-1983, l'évolution de l'envasement reste linéaire dans la zone II. Le taux de comblement de la retenue a atteint 70 % en 1983, raison pour laquelle la droite de la période 1970-1983 dépasse 80 % de la hauteur, ainsi une partie du toit de la vase de la zone III est parallèle au fond de la retenue [fig. 252 b].

b) Barrage de FOU M EL GHERZA

Il est possible de constater sur la figure 251.c, que la progression des dépôts des sédiments en fonction de la hauteur d'eau dans la partie centrale est linéaire durant les périodes 1950-1967, 1950-1974 et 1950-1986. La répartition des sédiments est ainsi uniforme avec un envasement accéléré entre 1974 et 1986 atteignant un taux de comblement de 27 % uniquement dans la zone II, ce qui a provoqué l'obturation de la vanne de fond du barrage en 1982. Ceci est corroboré par la mauvaise pratique de la technique de soutirage, puisque les dépôts des sédiments continuent à évoluer uniformément dans une partie de la zone I. Le schéma simplifié de l'évolution du toit de la vase est représenté sur la figure 252.c.

c) Barrage de GHRIB

Trois périodes d'envasement (1948-1974, 1948-1986 et 1948-1994) sont représentées sur la figure 251.d. Il est possible de constater que la progression des dépôts des sédiments est linéaire. Il apparaît que la droite 1948-1994 débute à partir d'une hauteur relative égale à 45 %: ceci est dû à un dépôt important dans la zone I engendré par une mauvaise pratique de la technique du soutirage durant la période 1986-1994 (fig. 252.d).

d) Barrage d'IGHIL EMDA

Comme le montre la figure 251.e, l'évolution du toit de la vase se fait parallèlement au fond de la retenue de 1953 jusqu'en 1992. Le taux de comblement a été réduit à 4 % dans la zone II durant la période 1984-1992 suite à une bonne pratique de la technique du soutirage. Le schéma de cette évolution du toit de la vase est représenté par la figure 252.e.

e) Barrage de l'OUED EL FODDA

La figure 251.f représente quatre périodes d'envasement: 1932-1950, 1932-1955, 1932-1961 et 1932-1974. Il apparaît que l'évolution des dépôts est linéaire, et il est intéressant de signaler que la sédimentation a atteint la valeur de $4,75.10^6 \text{ m}^3$ durant la période 1950-1955 uniquement dans la zone II. Ceci est dû à l'obturation de la vanne de fond en 1948 provoquée par la mauvaise pratique du soutirage entraînant un dépôt important dans la zone I, et même dans une partie de la zone III (épaississement relatif de 15 %). Le schéma simplifié de l'évolution du toit de la vase est représenté sur la figure 252.f.

f) Barrage de BOUHANIFLA

Il est possible de constater sur la figure 251.g, que la progression des dépôts des sédiments en fonction de la hauteur d'eau dans la zone II est linéaire durant les périodes 1940-1945, 1940-1953, 1940-1955, 1940-1967, 1940-1974 et 1940-1986. La répartition des sédiments est ainsi uniforme avec un envasement accéléré entre 1955 et 1974, atteignant un taux de comblement de 10 % uniquement dans la partie centrale à cause la mauvaise pratique de la technique du soutirage. Le schéma de cette évolution du toit de la vase est représenté sur la figure 252.f.

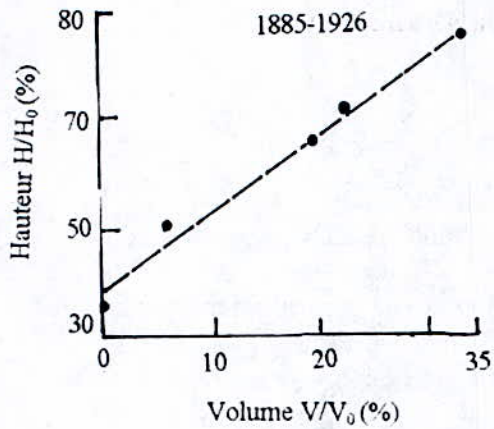
VI.3.4. Evolution à la suite d'un dragage[145]

En supposant qu'une quantité de vase ait été enlevée d'une retenue, la question qui se pose est de savoir si les apports dans la partie centrale (zone II) se feront de la même façon que précédemment. Pour répondre à cette hypothèse, il est possible de prendre l'exemple d'une retenue d'un barrage qui a subi un dévasement par le procédé de dragage et à cet effet, nous avons étudié l'évolution dans le temps de l'envasement de la zone II des retenues des barrages de CHEURFAS I et HAMIZ. Les résultats sont représentés sur les figures 253 et 254 (a et b) et il est possible de constater que:

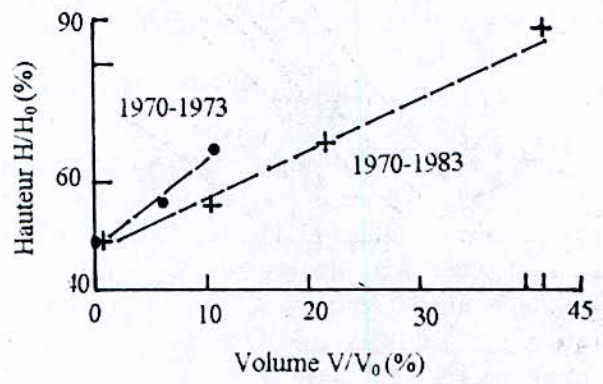
-l'évolution des dépôts dans la partie centrale des CHEURFAS I avant dévasement par dragage durant les périodes 1885-1933, 1885-1942 et 1885-1952 suit une progression linéaire de la hauteur (fig. 253 a) alors que cette progression reste linéaire après dragage durant les périodes 1885-1961 et 1885-1966 (fig. 253 b).

-Le même résultat est obtenu pour la retenue de HAMIZ (fig. 254 a et b), où l'évolution de l'envasement dans la zone II suit une progression linéaire aussi bien avant le dragage (1964-1986).

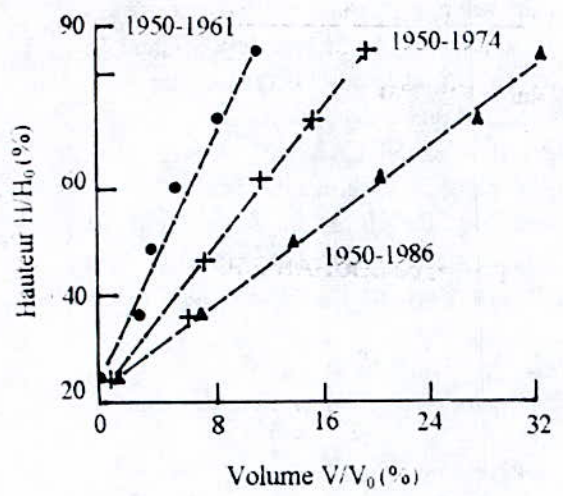
Ainsi, malgré la modification du fond de la retenue (enlèvement d'un volume de vase), les sédiments se déposent à nouveau uniformément dans la partie centrale et le profil supérieur de la vase évolue parallèlement au fond du lit.



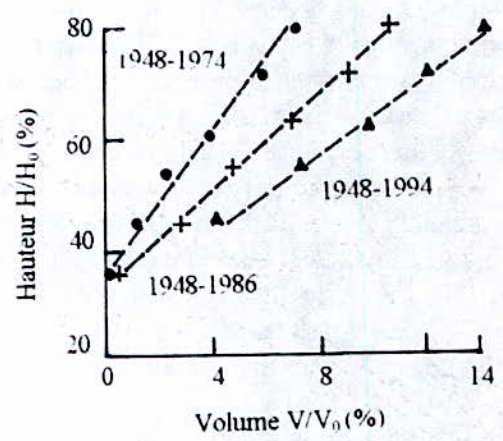
a- Barrage de FERGOUG (Ancien)



b- Barrage de FERGOUG (Actuel)

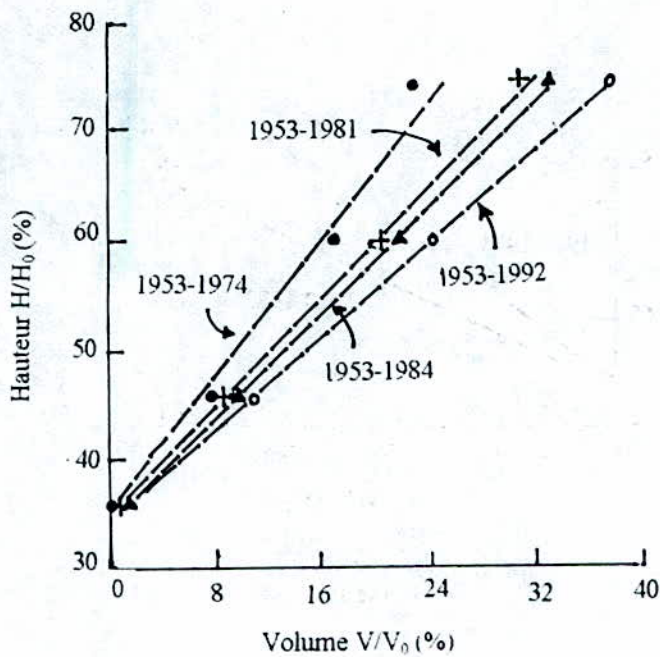


c- Barrage de FOUM EL GHERZA

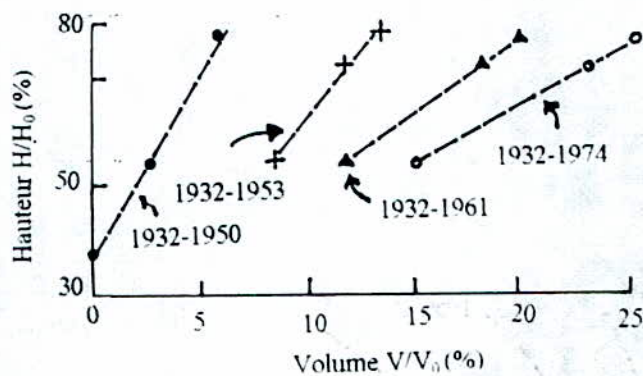


d- Barrage de GHRIB

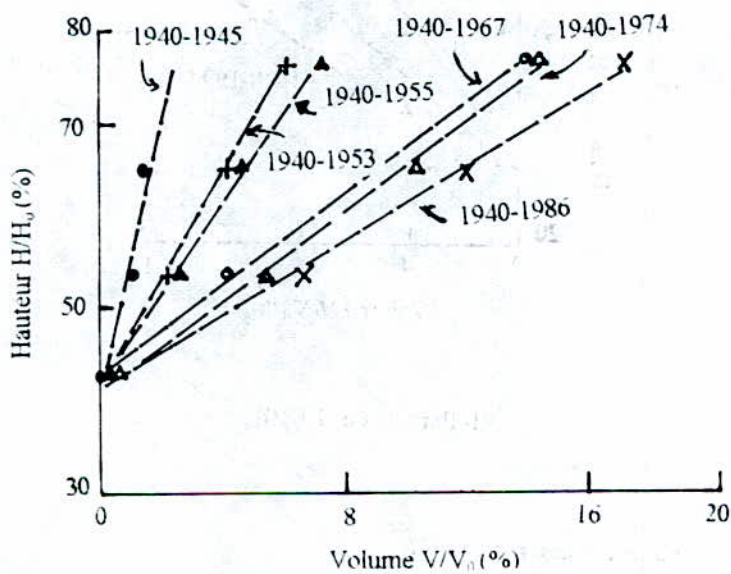
Fig.251- Evolution de l'envasement dans la zone II

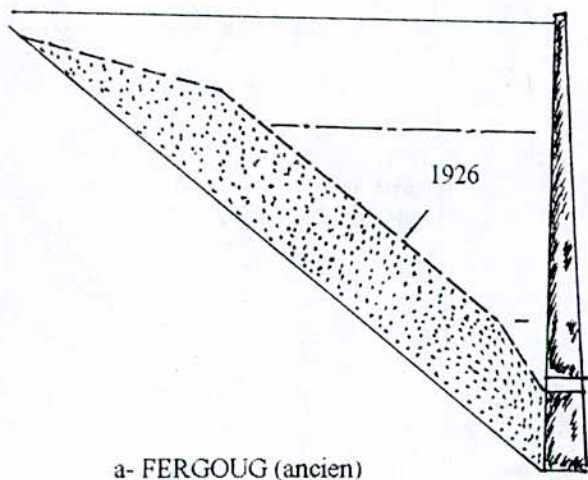


f- Barrage de OUED EL FODDA

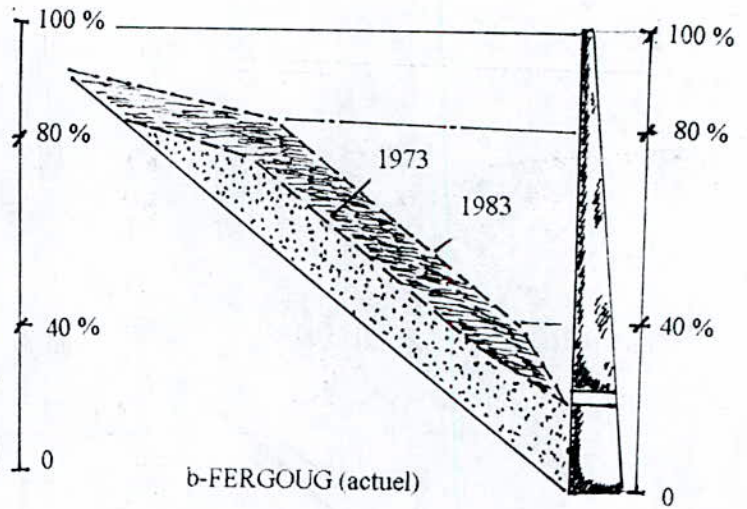


g- Barrage de BOUHANIFIA

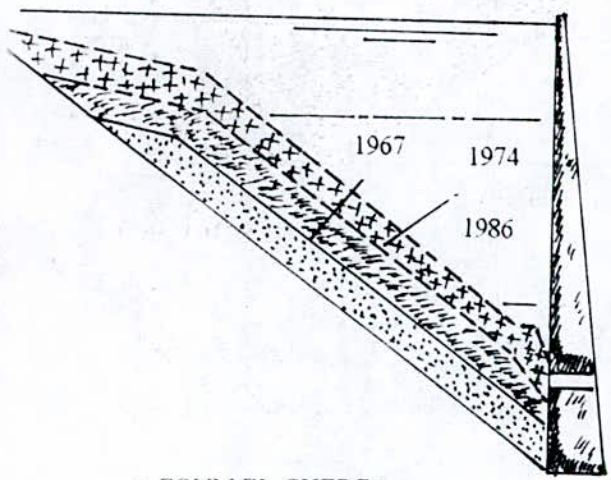




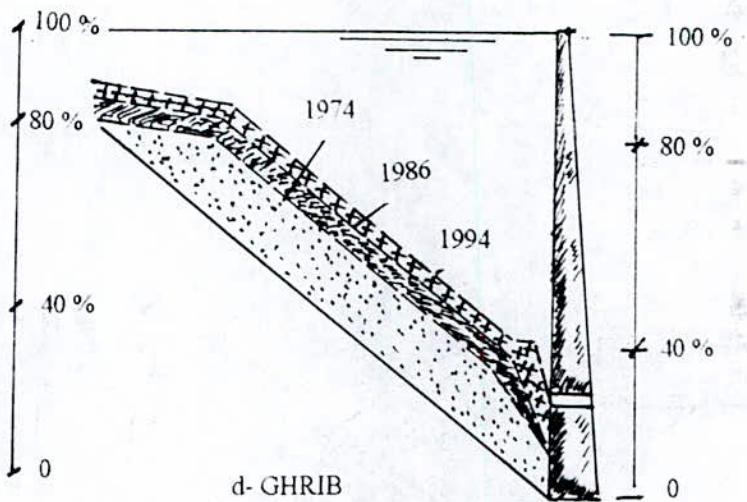
a- FERGOUG (ancien)



b- FERGOUG (actuel)

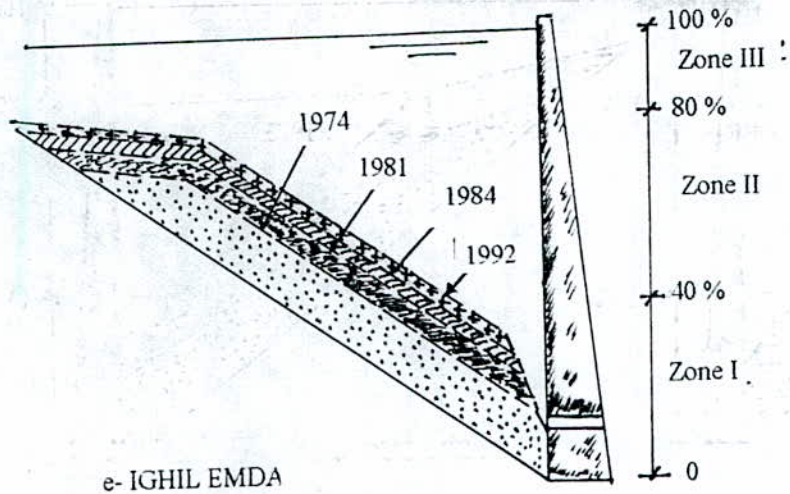


c- FOUM EL GHERZA

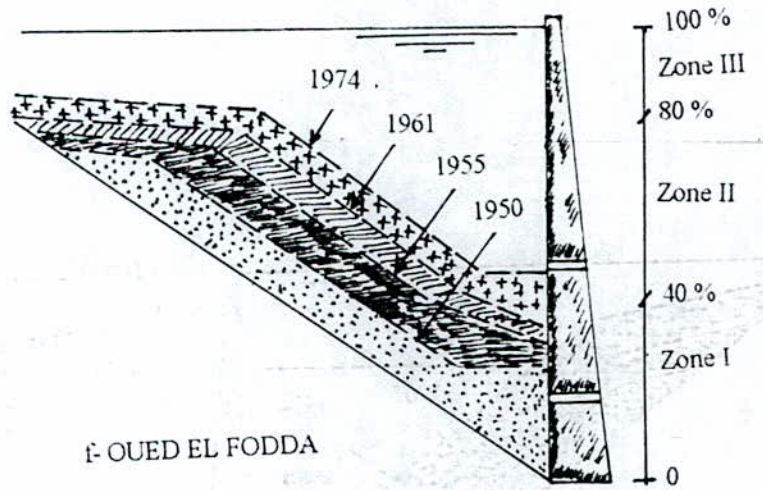


d- GHRIB

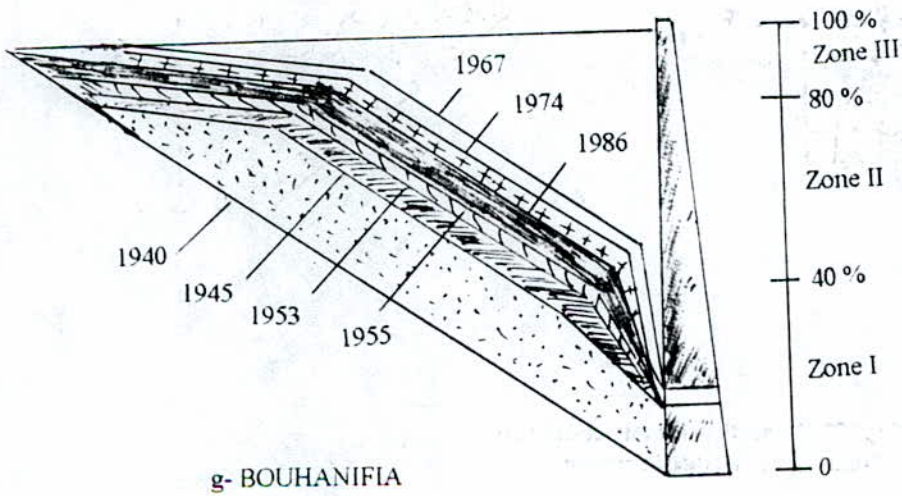
Fig.252- Evolution du toit de la vase dans la zone II de la retenue



e- IGhil EMDA

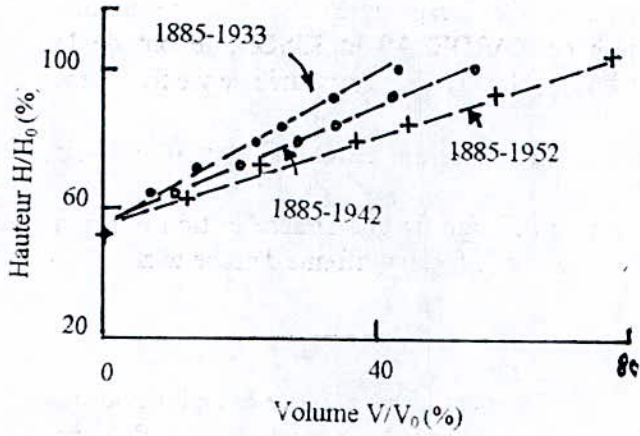


f- OUED EL FODDA



g- BOUHANIFIA

a- Avant le dragage



b- Après le dragage

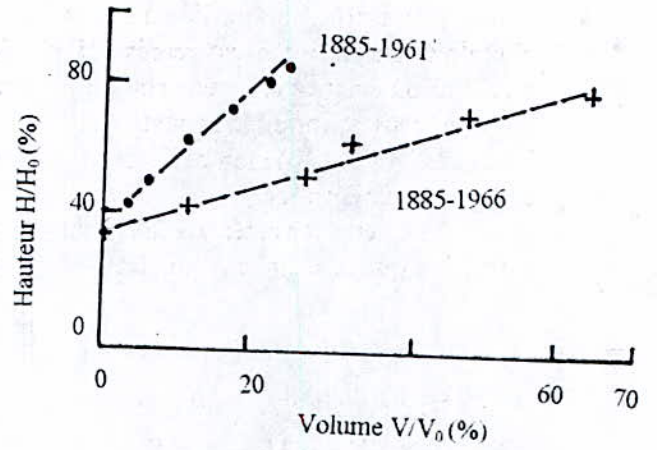
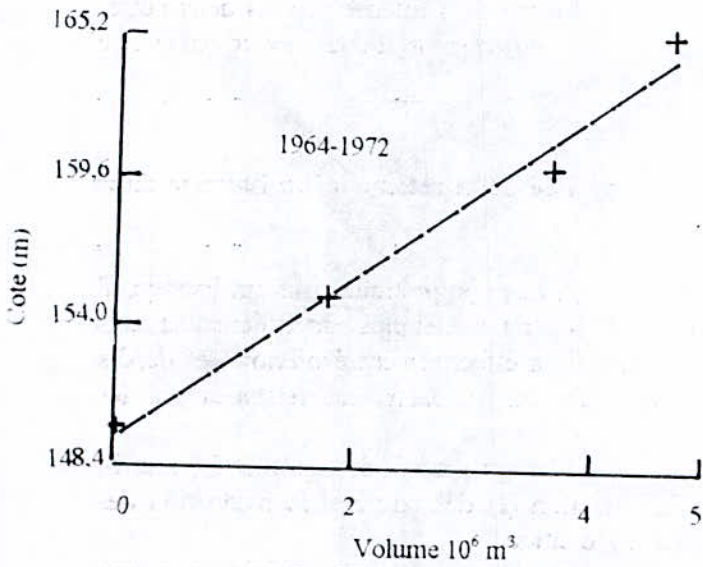


Fig.253- Evolution de l'envasement dans la zone II de la retenue du barrage de CHEURFAS I



a- Avant le dragage

b- Après le dragage

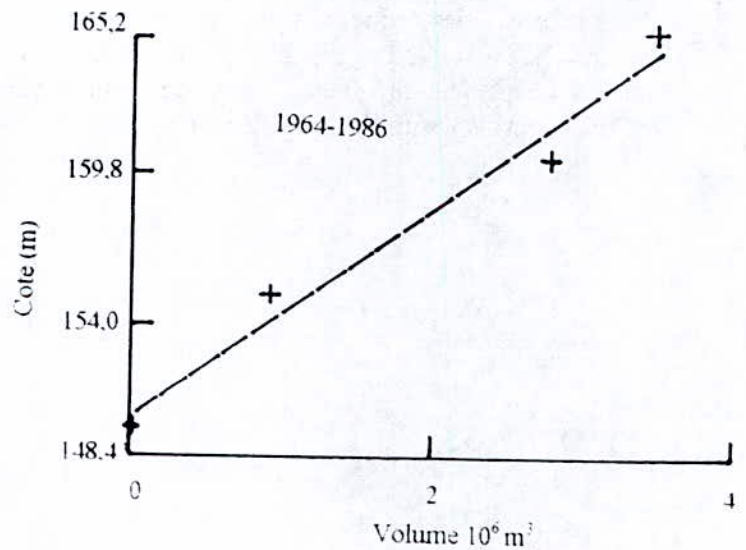


Fig.254- Evolution de l'envasement dans la zone II de la retenue du barrage du HAMIZ

VI.3.5. Evolution après surélévation de la digue du barrage

Une autre modification des conditions de dépôt des sédiments, et de l'évolution de l'envasement pourrait être liée à la surélévation de la digue du barrage après une première période d'exploitation. Ce cas est représenté par les barrages de ZARDEZAS et K'SOB, le but de la surélévation étant de créer une réserve supplémentaire, et de prolonger ainsi leur durée de vie fortement menacée par une forte sédimentation.

La figure 255 (a et b) montre l'évolution dans la zone II de la retenue initiale et du nouveau réservoir créé par la surélévation.

On peut constater que la fonction reste linéaire, ce qui signifie que la surélévation n'a rien modifié, et que la sédimentation des dépôts continue d'évoluer de façon uniforme dans cette zone.

Conclusion

La répartition des sédiments dans la retenue d'un barrage est un phénomène complexe qui ne peut être étudié de la même façon dans l'ensemble des réservoirs. Ainsi, nous proposons une division de la retenue en trois zones, chacune d'entre elles montrant des différences dans la granulométrie et le volume des sédiments. Notre étude s'appuie sur des résultats obtenus dans les retenues d'une dizaine de barrages Algériens.

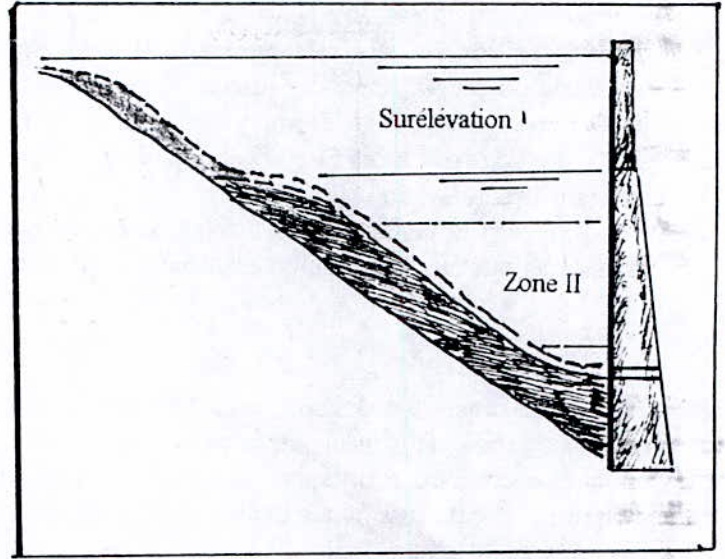
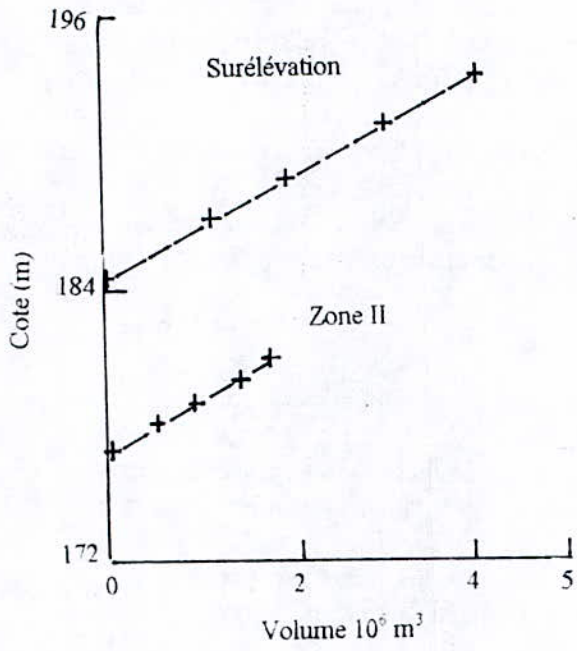
La partie centrale (zone II) est soumise à un envasement beaucoup plus intense que les deux autres (amont et aval), et la répartition des particules solides est uniforme avec un toit de la vase qui évolue parallèlement au fond de la retenue.

VI 4. Evolution de l'envasement dans la partie basse de la retenue d'un barrage dans lequel est pratiquée la technique du soutirage

Quelque soit le type du soutirage (« bon » ou « mauvais ») pratiqué dans un barrage, il y'aura toujours une quantité de sédiments qui sera piégée dans la retenue, et plus particulièrement dans les zones II et III. La question qui se pose est de savoir s'il ya effectivement évolution des dépôts sédimentaires dans la zone I, sachant que ces sédiments sont constamment remaniés par les manoeuvres des vannes.

Pour répondre à cette interrogation, nous proposons les graphes de la figure 256 (a et b) représentant la variation dans le temps du point d'intersection (I) des courbes de répartition des sédiments dans une retenue pour différentes périodes d'exploitation.

Dans le cas où le point (I) reste fixe dans le temps, ce qui signifie qu'il n'y a pratiquement pas d'évolution du toit de la vase dans la zone I (les dépôts des sédiments restent inchangés), et que les particules solides drainées par les courants de densité près des vannes ont été soutirées, on peut parler d'un « bon » soutirage (fig. 256.a). Dans le cas contraire, c'est à dire si le point (I) évolue dans le temps, ce qui veut dire que le sommet de la vase est en nette progression dans la zone I, on peut parler d'un « mauvais » soutirage (fig. 256 b).



a- ZARDEZAS

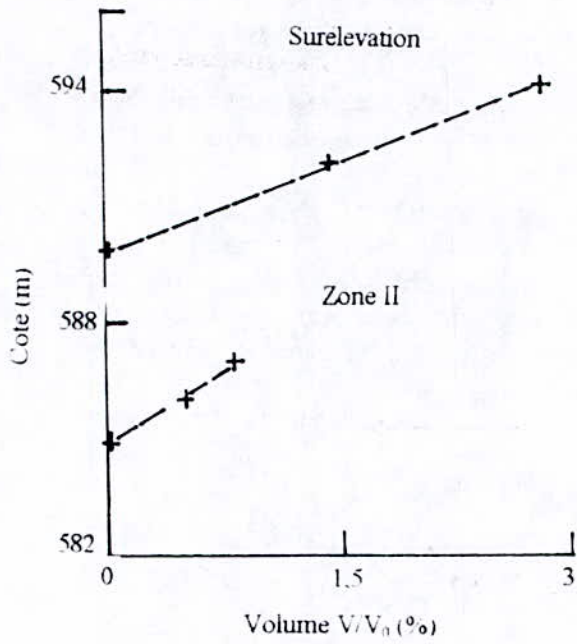
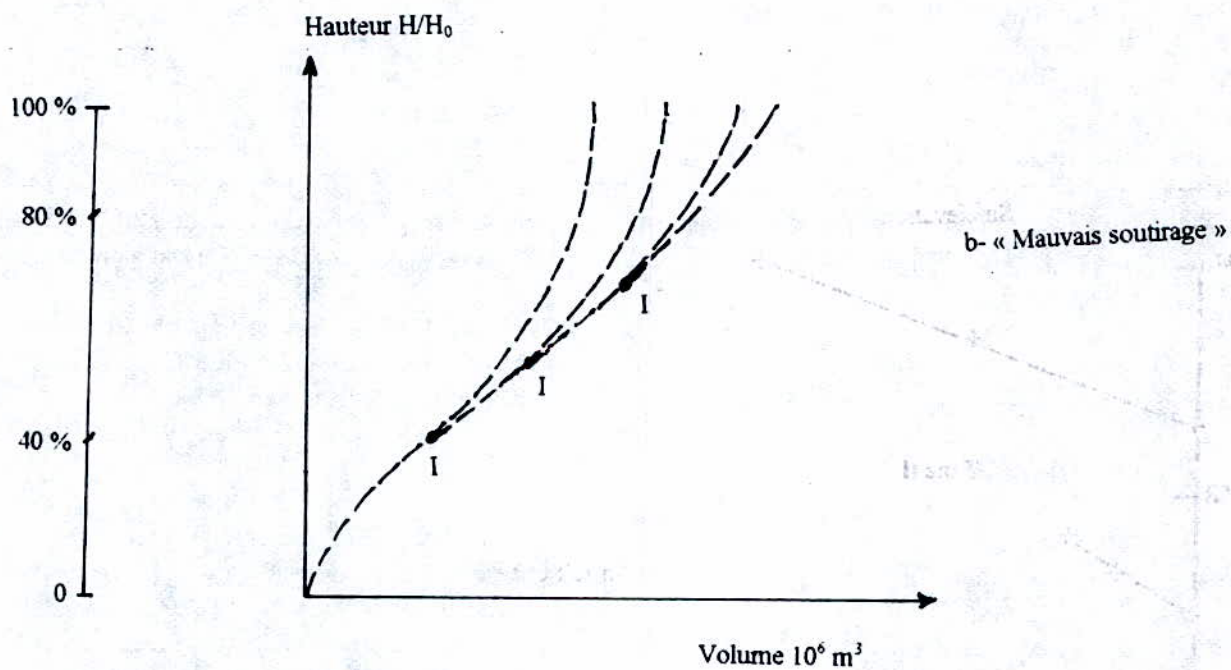
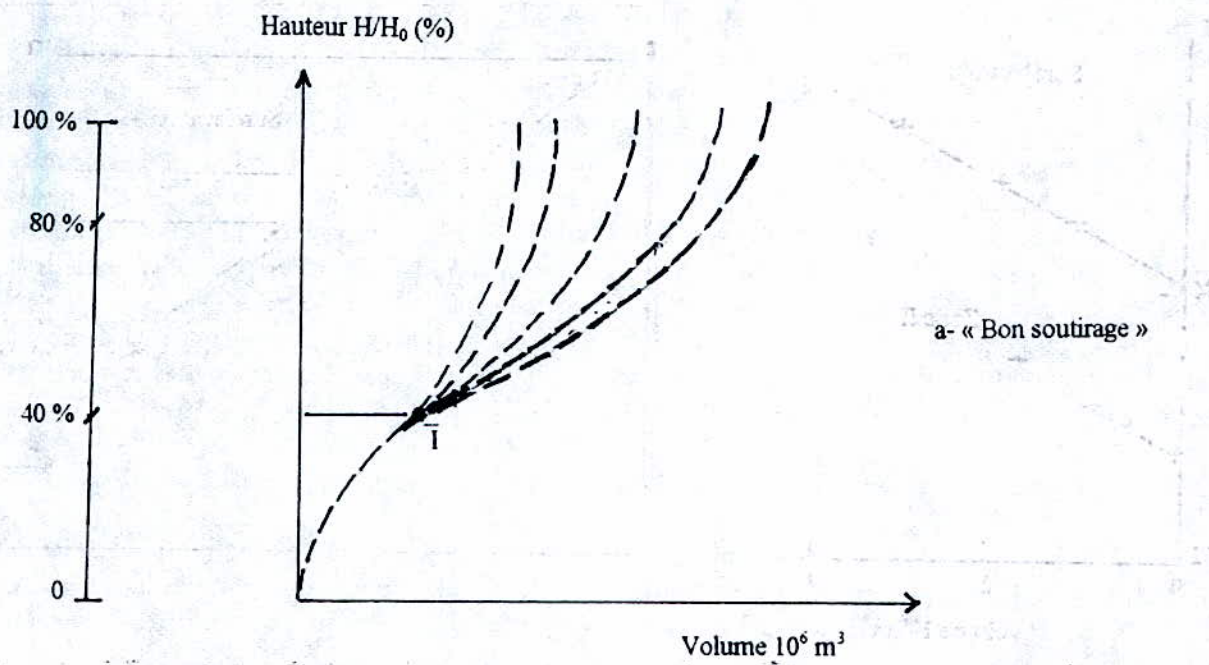


Fig.255- Evolution de l'envasement dans la zone II après surélévation de la digue

b-K'SOB



**Fig.256- Répartition des sédiments dans une retenue
durant la plusieurs périodes d'exploitation**

VL.4.1. Cas d'un barrage dans lequel est pratiqué un « bon » soutirage [137]

Pour confirmer ce qui précède, il est possible de prendre l'exemple d'un barrage qui a enregistré des résultats jugés encourageants lors de la pratique de la technique du soutirage. A cet effet, nous avons étudié l'évolution des dépôts de sédiments dans la zone I de la retenue du barrage d'IGHIL EMDA. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 257, et il est possible de constater que le point d'intersection (I) des courbes de répartition des sédiments durant les périodes 1953-1974, 1953-1981, 1953-1984 et 1953-1992 est fixe, avec pour coordonnées $V=10.10^6 \text{ m}^3$ (volume de vase) et $H/H_0=38 \%$, ce qui signifie que le dépôt de vase composé essentiellement de particules argileuses (diamètre inférieur à $2\mu\text{m}$) n'a pas évolué durant une période de 18 années (1974-1992), c'est à dire que les apports solides considérables provenant de l'érosion du bassin versant (photo. 61) et les berges de l'oued Berd (photo. 62), sont drainés par les courants de densité jusqu'au pied du barrage, et ont été évacués par les vannettes de dévasement.

Il apparaît nettement que l'évolution des dépôts des sédiments (essentiellement des limons grossiers et sable fin) dans la zone II est très faible, ce qui veut dire que l'écoulement des courants de densité à travers les pertuis s'est effectué d'une façon continue.

VL.4.2. Cas d'un barrage dans lequel est pratiqué un « Mauvais » soutirage [137]

Pour renforcer cette hypothèse, nous avons effectué une étude sur l'évolution du sommet de la vase dans la zone I des retenues des barrages de OUED EL FODDA, FOUM EL GHERZA, FERGOUG, CHEURFAS I, GHRIB et BOUHANIFIA. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 258 (a à f). Il apparaît très nettement que le point d'intersection (I) des courbes pour différentes périodes d'exploitation progresse dans le temps.

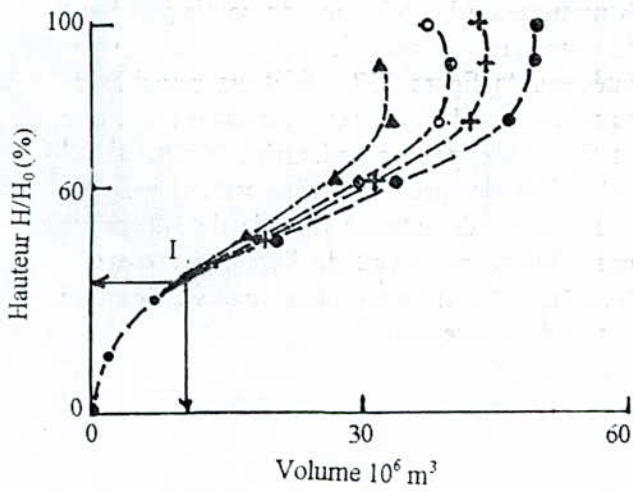
a) Barrage de OUED EL FODDA

La figure 258 a représente sept périodes d'envasement 1932-1950, 1932-1955, 1932-1961, 1932-1964, 1932-1974 et 1932-1994. Il apparaît que le point d'intersection (I) progresse dans le temps (contrairement à celui d'IGHIL EMDA), ce qui signifie que toute la zone I et même une partie de la zone II ont été remplies de sédiments, et il est intéressant de signaler que durant la période 1974-1994, le point (I) a évolué de 10m de hauteur, soit un volume de dépôt des sédiments de $22,8.10^6 \text{ m}^3$ (de $H/H_0=45 \%$ à 60%) qui a été drainé dans la zone II par les courants de densité, et déposé au moment où les vannettes ont été fermées (Photo. 63).

Durant la période 1986-1994, une quantité de 12.10^6 m^3 de matériaux solides s'est déposée dans la partie supérieure de la zone II (entre $H/H_0=60 \%$ et 80%) et la zone III, l'envasement a pris de l'ampleur et la retenue s'est envasée avec un taux de comblement atteignant les 50% .

b) Barrage de FOUM EL GHERZA

Trois périodes d'envasement (1950-1967, 1950-1974 et 1950-1986) sont représentées sur la figure 258 b où l'on peut constater, que le point (I) a progressé d'une hauteur relative de 24% à 36% (zone I) durant la période 1967-1986, soit un accroissement de la vase évalué à $2,8.10^6 \text{ m}^3$, et une vitesse de sédimentation égale à $0,16.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ dans la zone I provenant des particules fines arrachées au bassin versant par des pluies violentes et soudaines (photo. 64), et drainées par les courants de densité au fond de la retenue. Le taux de comblement dans les zones II et III est évalué à 30% du volume initial de la retenue en 1986.



- ▲ Période 1953-1974
- Période 1953-1981
- + Période 1953-1984
- Période 1953-1992

Fig.257- Evolution de l'envasement dans le temps dans une retenue de barrage dans lequel est pratiqué un « bon soutirage »
- Cas d'IGHIL EMDA-

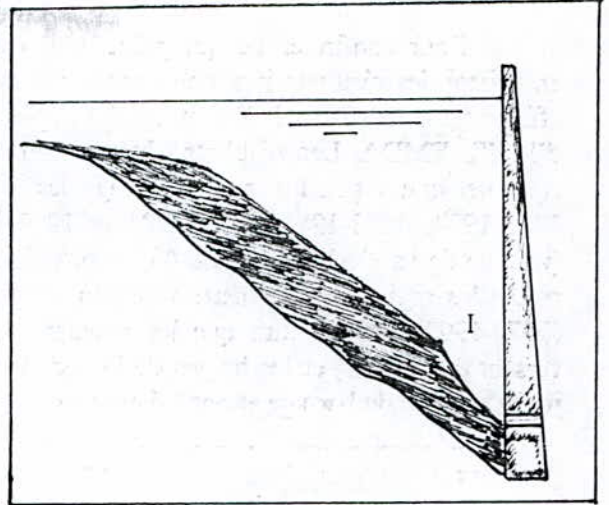
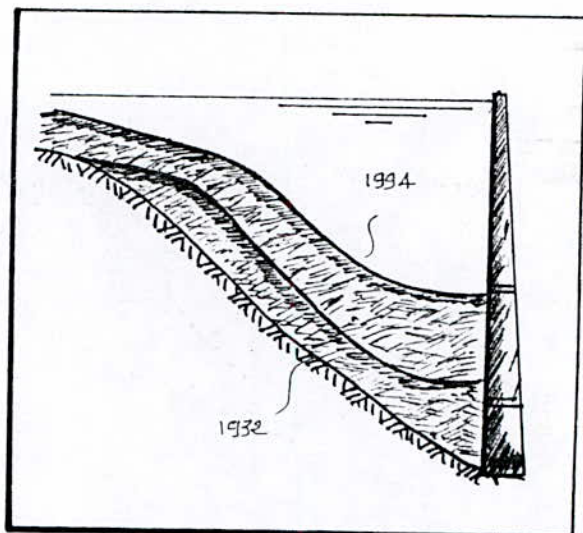
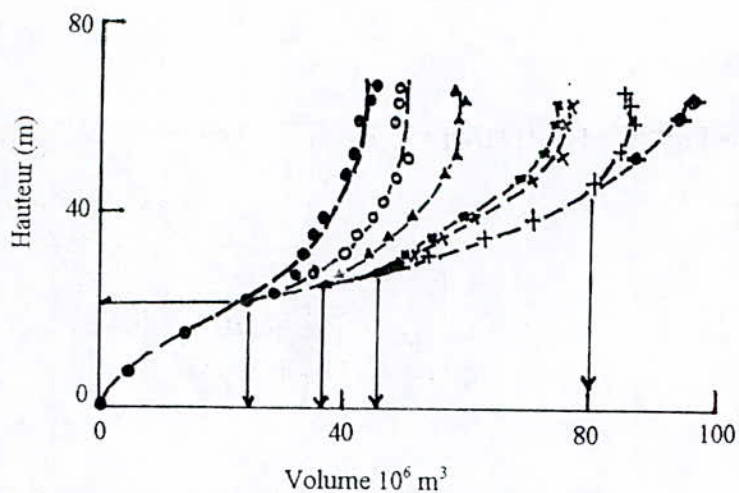


Photo 61- Une partie du bassin versant du barrage d'IGHIL EMDA. Une quantité considérable des terres sont drainées dans la retenue. La pratique des « bons soutirages » a permis de les évacuer à l'aval du barrage



Photo 62- Oued Berd. Une forte quantité de sédiments provient de l'érosion des berges de l'oued Berd, se dépose dans la retenue. La pratique des « bons soutirages » a permis d'augmenter la durée de vie du barrage



a- OUED EL FODDA

Fig.258- Evolution de l'envasement dans le temps dans une retenue de barrage dans lequel est pratiqué un « mauvais soutirage

- Période 1932-1950
- Période 1932-1955
- ▲ Période 1932-1961
- Période 1932-1964
- × Période 1932-1974
- + Période 1932-1986
- ◆ Période 1932-1994

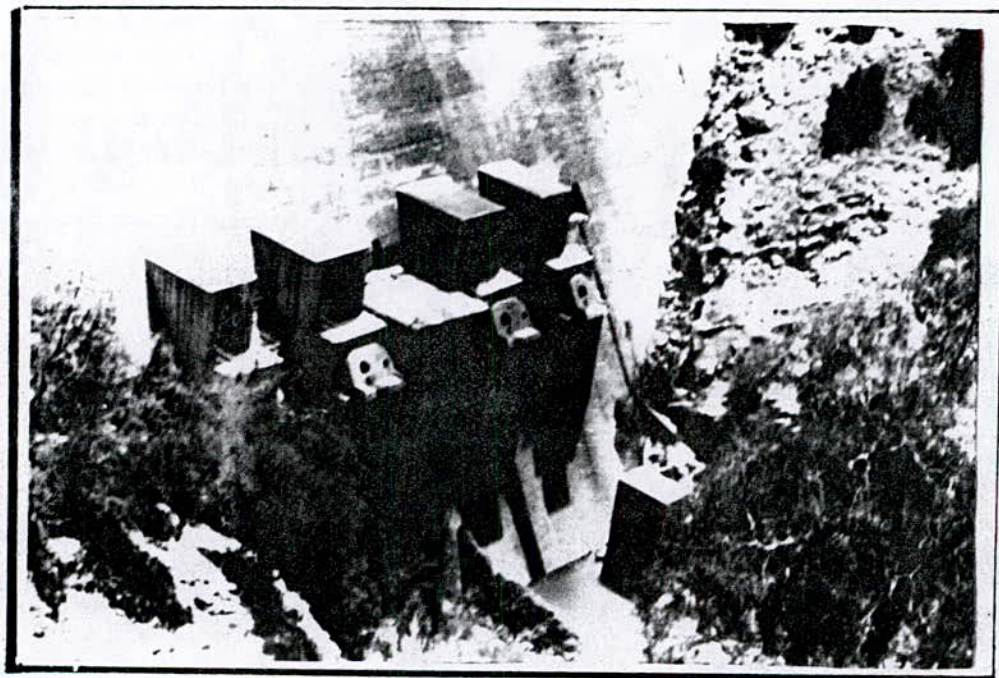


Photo 63- Vannettes de dévasement fermées durant les apports de crues

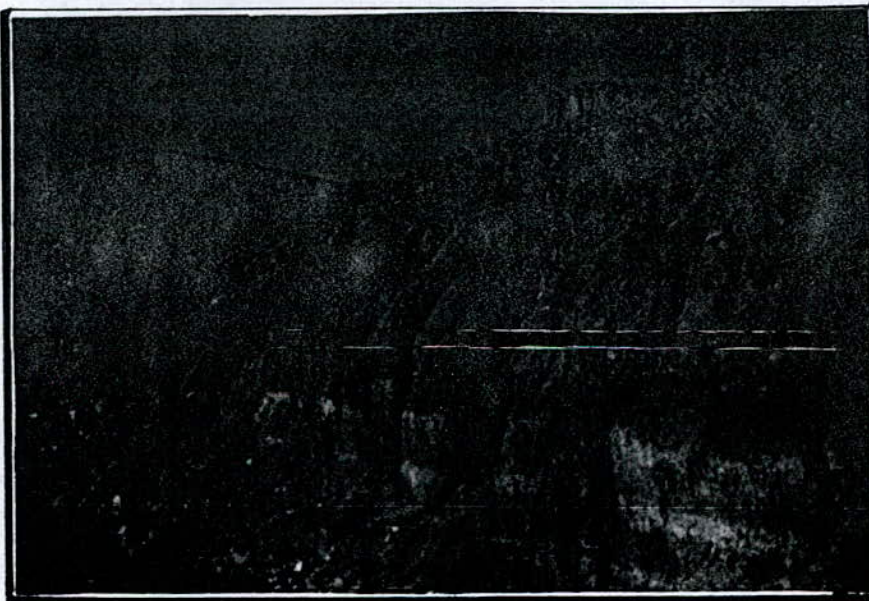
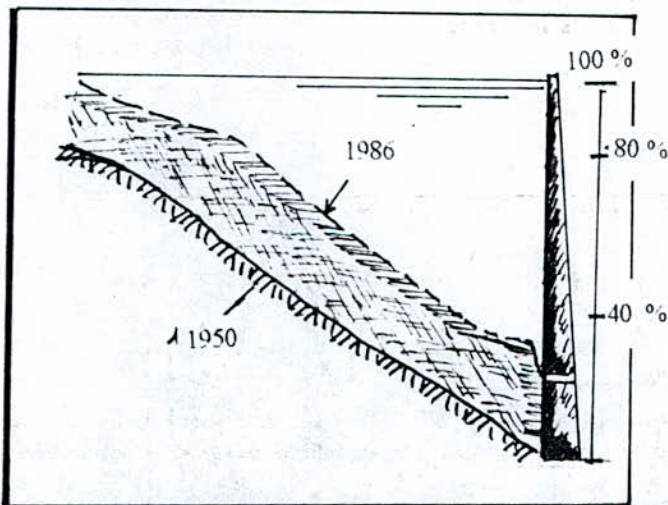
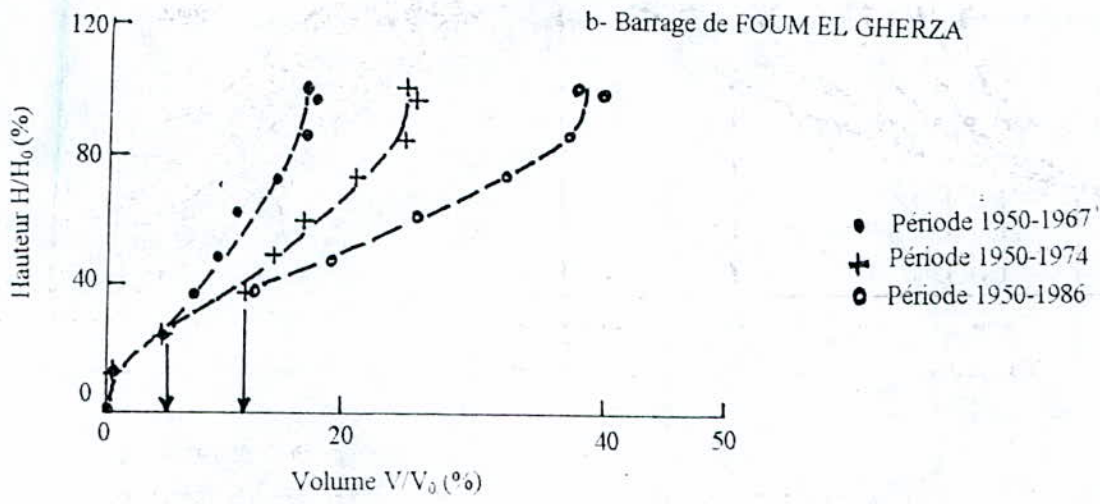


Photo 64- Bassin versant non boisé

c) Barrage de GHRIB

Comme le montre la figure 258 c, le point (I) a varié d'une hauteur relative de 8 % durant 20 ans (1974-1994) à la suite d'un dépôt des sédiments de 27.10^6 m^3 dans la zone I.

La sédimentation a été plus importante dans les zones II et III puisque le taux de comblement a atteint respectivement 12 % (soit un volume de 34.10^6 m^3) et 6 % (un volume de 17.10^6 m^3) en 1994

d) Barrage des CHEURFAS I

Il est possible de constater sur la figure 258 d, qu'en 1933 la retenue était comblée à 56 % et à 96 % en 1952. Durant la période 1933-1952, le sommet de la vase est passé de la hauteur relative de 30 % à 50 % suite à un dépôt de vase de 14 % du volume initial de la retenue. Il est intéressant de signaler que durant toute la durée d'exploitation du barrage, la vase est restée fluide, et c'est pour cette raison que la vanne de fond n'a jamais été obturée malgré l'état avancé de l'envasement.

e) Barrage de FERGOUG

Comme le montre la figure 258 e, le point d'intersection (I) a progressé de 4m de hauteur suite à un dépôt des sédiments de 2.10^6 m^3 dans les zones I et II.

Il apparaît nettement qu'en 1985, les deux zones sont complètement saturées et le taux de comblement de la retenue a dépassé 70 %.

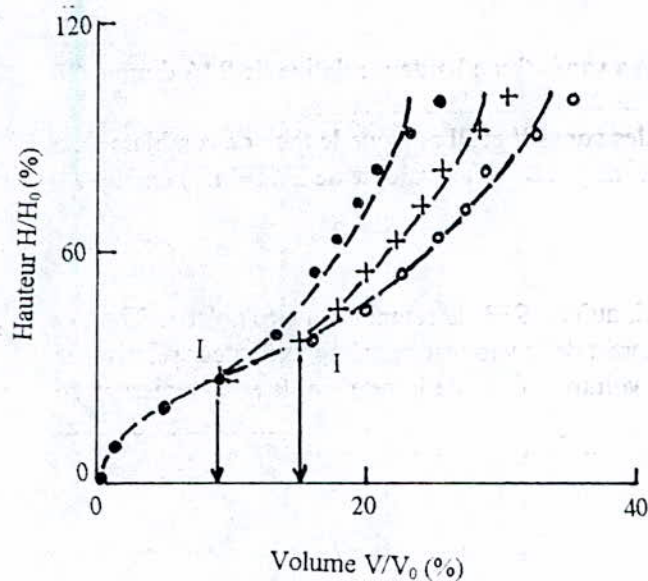
f) Barrage de BOUHANIFLA

La figure 258 f représente six périodes d'envasement 1940-1945, 1940-1953, 1940-1955, 1940-1967, 1940-1974 et 1940-1986. Il apparaît que le point (I) varie dans le temps, c'est ainsi que durant la période 1940-1945, une quantité de 5 % du volume initial s'est déposée dans la zone I de la retenue. Cette dernière a été comblée en 1967, soit un volume de sédiments de $6.2.10^6 \text{ m}^3$.

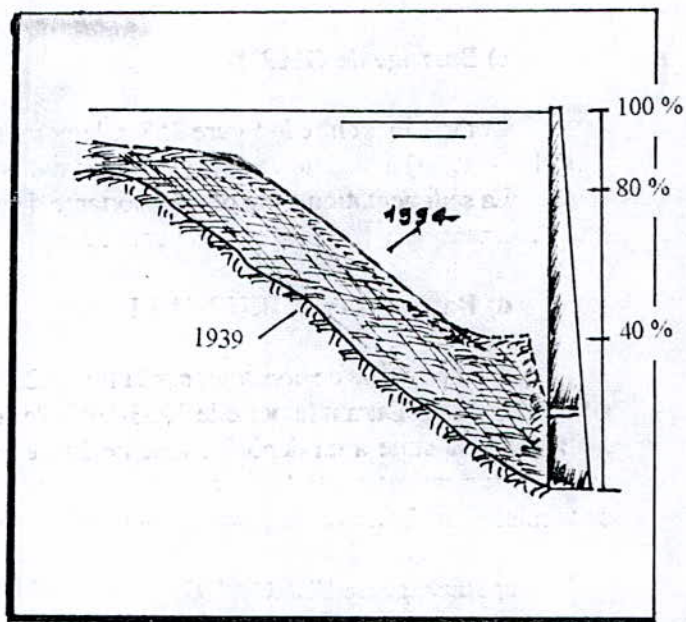
Conclusion.

Sur l'ensemble des barrages Algériens, les manoeuvres des vannes se font toujours après que la consolidation de la vase soit commencée. Ainsi, nous distinguons deux types de soutirages: les « bon » et « mauvais » soutirages, qui montrent chacun des différences dans la densité de la suspension soustraite, ce qui a pour conséquence une influence sur le régime (permanent ou non permanent) de l'écoulement de la suspension à travers les pertuis de vidange.

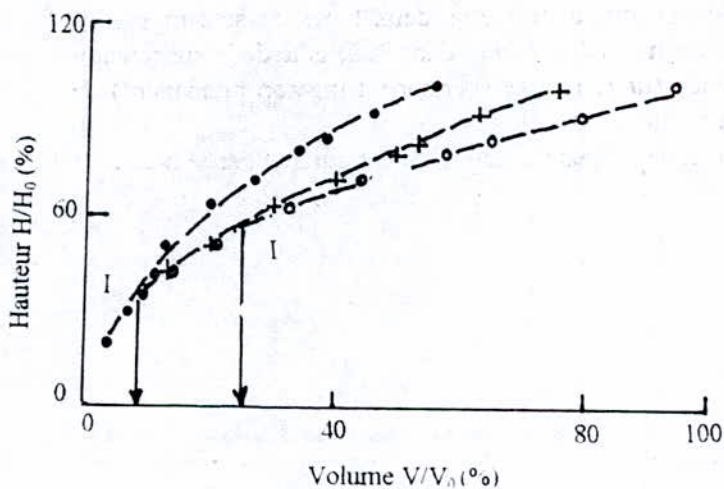
L'évolution des dépôts de vase dans la retenue, et plus particulièrement dans sa partie basse est dépendante du type de soutirage.



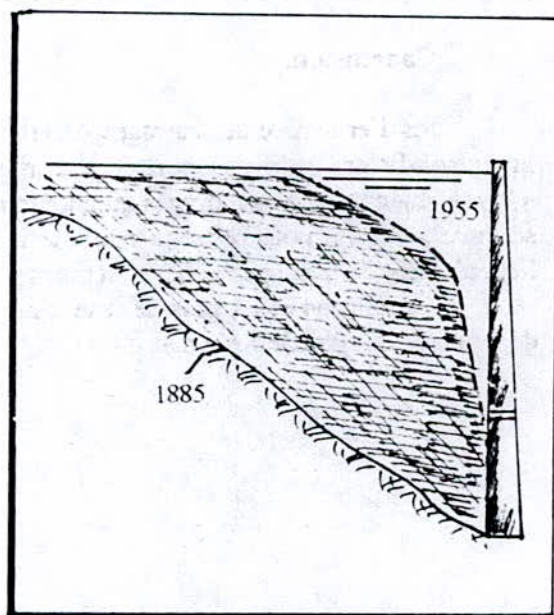
c- GHRIB



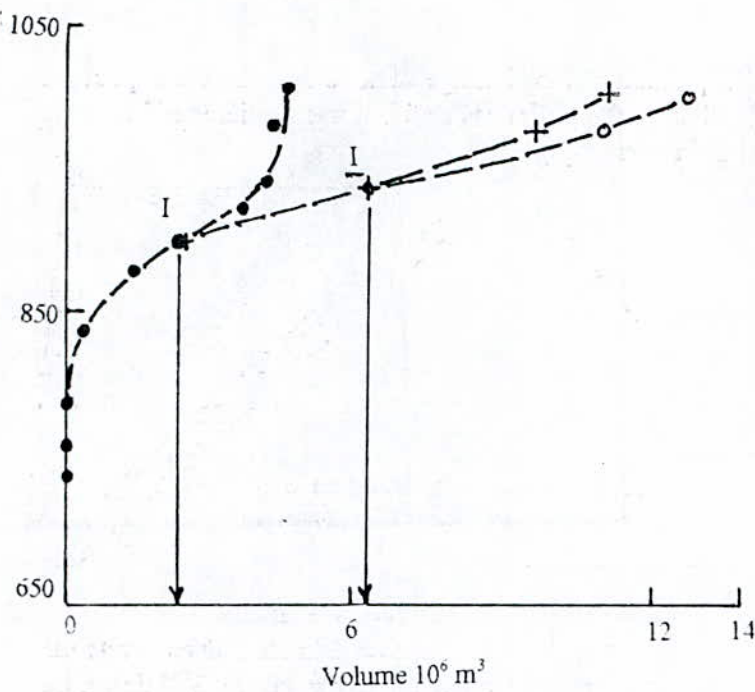
- Période 1948-1974
- + Période 1948-1986
- Période 1948-1994



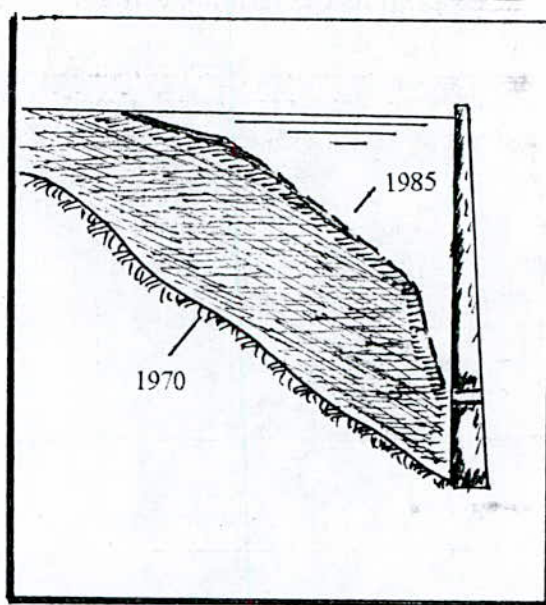
d- CHEURFAS I



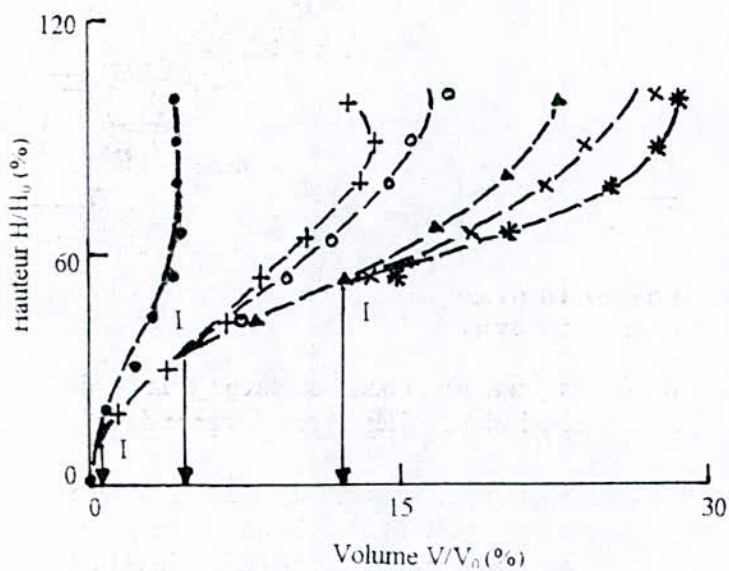
- Période 1885-1933
- + Période 1885-1942
- Période 1885-1955



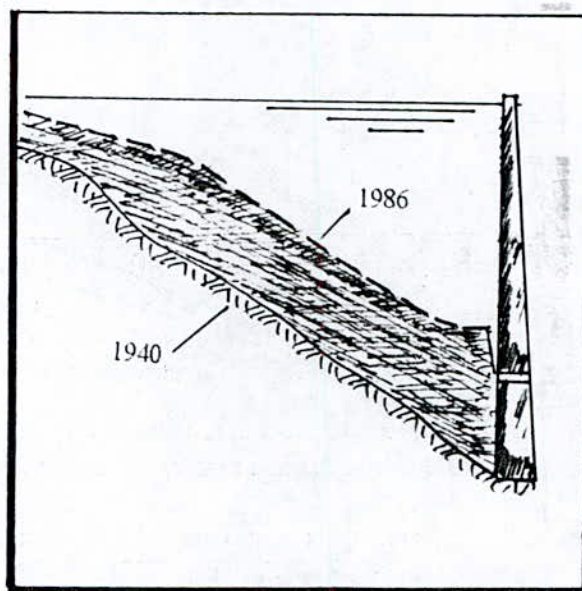
e- FERGOUG



- Période 1970-1973
- + Période 1970-1983
- ▴ Période 1970-1985



f- BOUHANIFIA



- Période 1940-1945
- + Période 1940-1953
- Période 1940-1955
- ▴ Période 1940-1967
- × Période 1940-1974
- * Période 1940-1986

VI.5. Description du comblement dans le temps d'une retenue de barrage dans lequel est pratiquée la technique du soutirage

Durant les premières années de l'exploitation d'un barrage dont la retenue est exposée à l'envasement par courants de densité, la distribution des sédiments se fait d'une manière uniforme. Le toit de la vase évolue parallèlement au fond de la retenue (fig. 259).

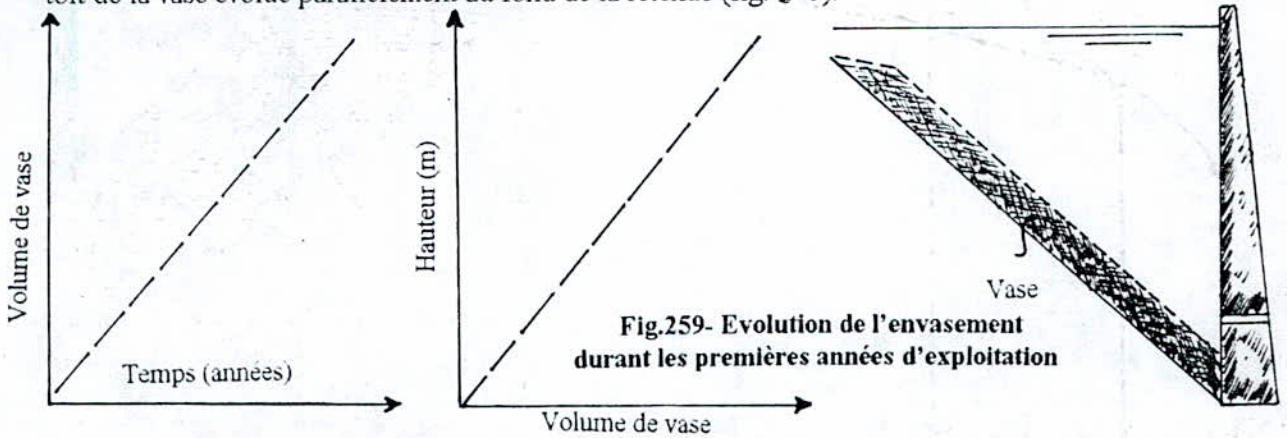


Fig.259- Evolution de l'envasement durant les premières années d'exploitation

La durée de cette évolution est tributaire du taux de comblement de la retenue.

Dès que le toit de la vase dépasse le seuil des vannes, trois zones se délimitent dans la retenue (zone I, II et III), et l'évolution de dépôt des sédiments prend la fonction polynomiale du 3^{ème} degré. La progression de l'envasement dans le temps est polynomiale du 2^{ème} degré (fig. 260).

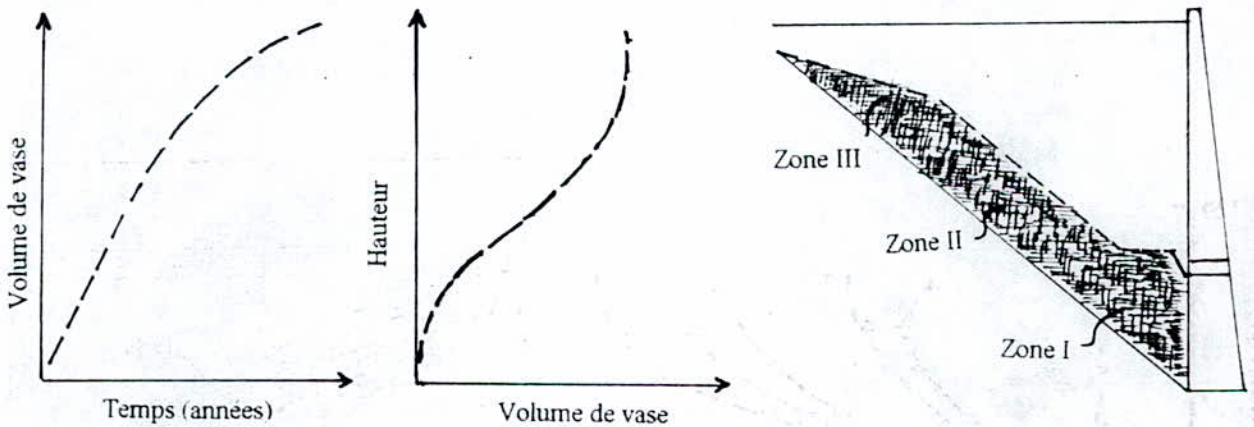
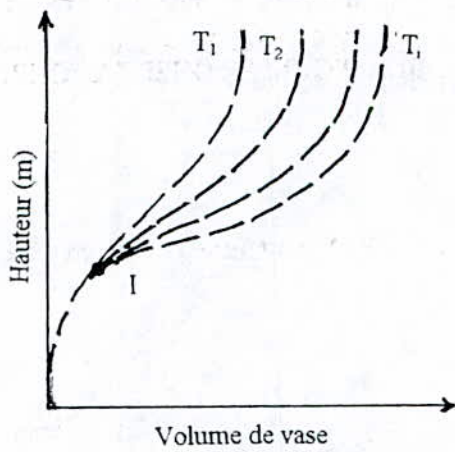


Fig.260- Evolution de l'envasement dans une retenue dont le taux de comblement est avancé

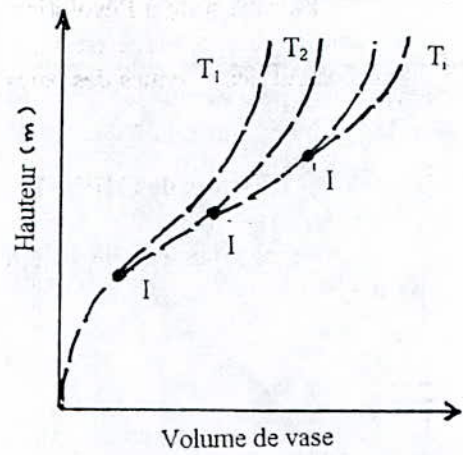
Dans le cas où la technique du soutirage a été bien pratiquée (« bon » soutirage), un dépôt important des sédiments sera évité dans la zone I, et ainsi son évolution (dépôt) reste stagnée dans le temps (fig. 261 a).

Dans le cas contraire où on continue de pratiquer le « mauvais » soutirage, la zone I ne sera plus épargnée des dépôts successifs des sédiments au cours du temps, et le toit de la vase se trouve en nette évolution (fig. 261 b). Dans la zone II, le toit de la vase évolue dans le temps parallèlement au fond de la retenue quelque soit les soutirages pratiqués (« bon » ou « mauvais »).

Dès que les sédiments déposés dans la zone III seront au dessus de la cote normale de la retenue, ce qui signifie que le taux de comblement a dépassé les 70 % (cas des retenues de FERGOUG (1985) et CHEURFAS I (1955)), la progression des dépôts de vase en fonction de la hauteur devient polynomiale du 2^{ème} degré (fig. 262).



a- Cas d'un « bon soutirage »



b- Cas d'un « mauvais soutirage »

Fig.261- Variation du volume de vase dans la zone I

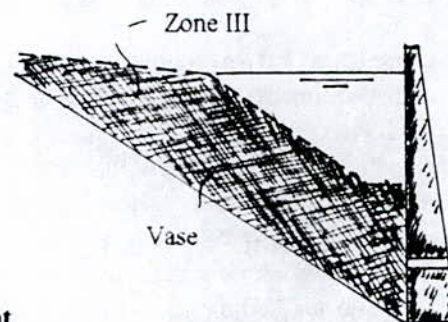
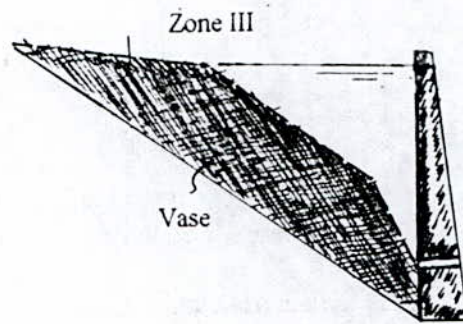
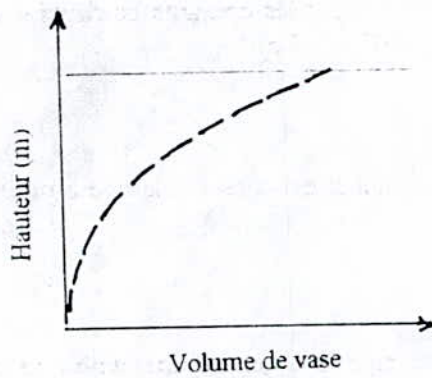


Fig.262- Cas d'une retenue dont l'état d'avancement est très avancé

VI.6. Schémas approximatifs des étapes de l'envasement d'une retenue.

Faisant suite à l'évolution des dépôts des sédiments dans une retenue de barrage dans lequel la technique du soutirage est pratiquée, nous avons représenté sur les figures 263 à 266, les étapes de comblement des retenues des barrages de OUED EL FODDA, FOUM EL GHERZA, IGHIL EMDA et CHEURFAS I.

a) Barrage de OUED EL FODDA

Le comblement de la retenue de OUED EL FODDA peut être réparti en cinq périodes principales:

-Période 1932-1937

Cinq années après la mise en exploitation du barrage, la distribution des sédiments dans la retenue est uniforme et le toit de la vase n'a pas dépassé le seuil de la vanne (fig. 263 a).

-Période 1937-1948

Cette période a été marquée par un envasement intensif de la cuvette dû surtout à la pratique d'un « mauvais » soutirage. On est arrivé à évacuer de la vase à une densité de **1,350**, ce qui a provoqué l'élévation du toit de la vase dans la zone I et l'obturation définitive de la vanne de fond en 1948 (fig. 263 b).

-Période 1948-1961

Durant cette période, tous les apports solides drainés par les courants de densité sont restés piégés dans la retenue. La zone I est complètement envasée (fig. 263 c).

-Période 1961-1986

La mise en service des pertuis de dévasement (6 vannettes) dans le barrage a plus ou moins réduit la progression rapide du toit de la vase.

-Période 1986-1994

La poursuite de la pratique du « mauvais » soutirage a engendré une évolution de la vase dans toute la retenue (fig. 263 d), et les vannettes de soutirage peuvent être bloquées dans les années à venir (fig. 263 e).

b) Barrage de FOUM EL GHERZA

L'envasement de la retenue de FOUM EL GHERZA peut être divisé en trois étapes principales:

-Période 1950-1982

Compte tenu du comblement rapide de la retenue et la pratique du « mauvais » soutirage, la vanne de fond a été obturée en 1982 (fig. 264 a).

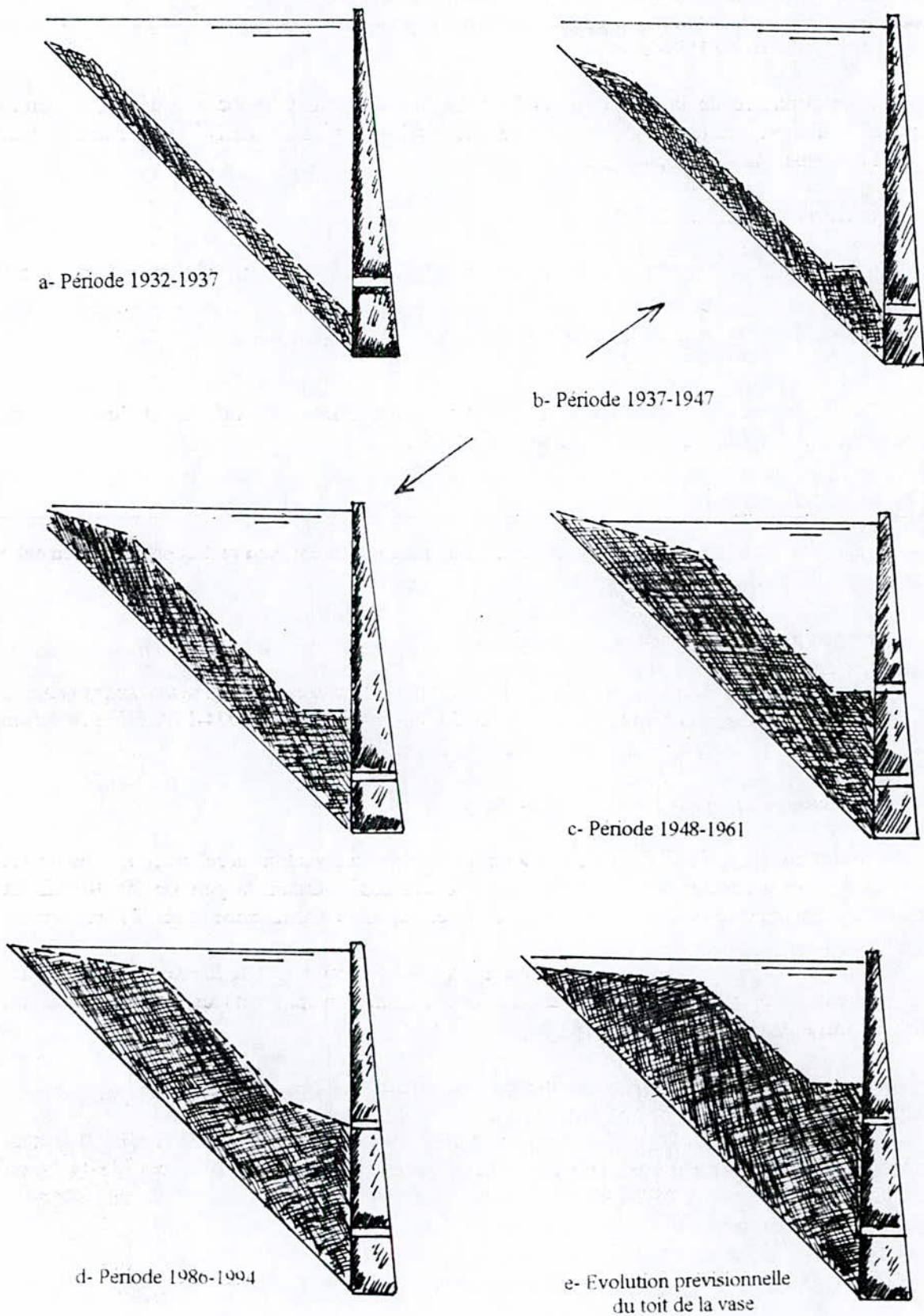


Fig.263- Etapes de comblement de la retenue
du barrage de OUED EL FODDA

-Période 1982-1989

Cette période ressemble à celle du barrage de OUED EL FODDA (1948-1961) pendant laquelle aucune perte en sédiments n'a été enregistrée (fig. 264 b).

-Période 1989-1994

La réouverture de la vanne de fond en 1989 grâce à une équipe spécialisée, a permis l'évacuation d'une quantité de vase (très concentrée) évaluée à plus de $0,5.10^6 \text{ m}^3$. Le toit de vase continue d'évoluer dans le temps (fig. 264 c).

c) Barrage d'IGHIL EMDA

Le comblement de la retenue du barrage d'IGHIL EMDA peut être réparti en trois étapes principales:

-Période 1953-1954

Durant une année d'exploitation, la répartition des sédiments est uniforme et l'évolution du toit de la vase est parallèle au fond de la retenue (fig. 265 a).

-Période 1954-1956

Malgré la forte intensité de l'envasement, les soutirages ont été bien pratiqués (le rendement a atteint 50 %)(fig. 265 b).

-Période 1956-1992

La pratique du « bon » soutirage a réduit beaucoup la vitesse de sédimentation, puisque le rendement de la technique du soutirage a atteint les 55 % durant la durée 1974-1992. Une évolution du toit de la vase a été enregistrée dans les zones II et III (fig. 265 c).

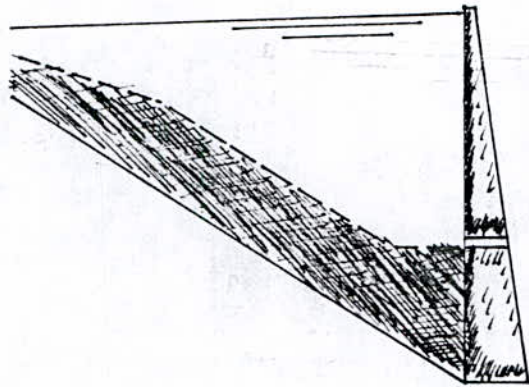
d) Barrage des CHEURFAS I (1885-1966)

La cuvette des CHEURFAS I a été soumise à une sédimentation accélérée, qui a incité les services concernés à dévaser (par dragage) une partie des dépôts durant la période 1959-1962. La retenue a été envasée de nouveau (78 %) en 1966, et fut alors abandonnée après 80 ans années d'exploitation.

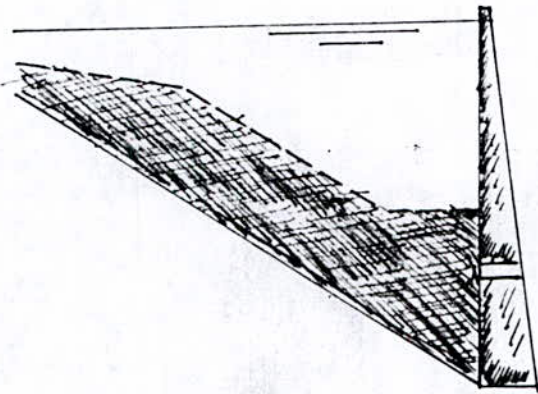
Nous proposons un schéma des différentes étapes de l'envasement de la retenue en se basant sur le graphe de la répartition des sédiments dans le temps, six principales étapes de comblement ont pu être dégagées.

– Envasement de la retenue en 1933 (fig. 266 a)

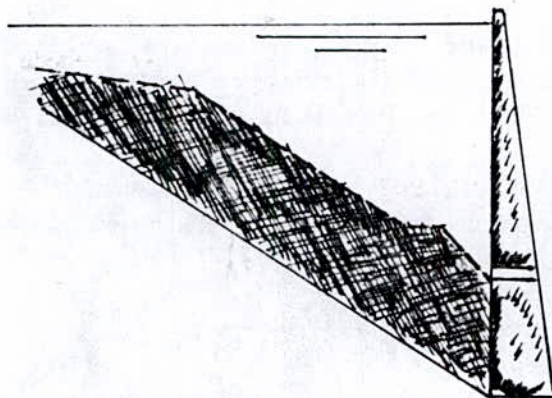
Pendant la période 1885-1933, l'envasement a été intense. Les sédiments de la zone III sont au dessus du niveau normal de la retenue, en effet la capacité utile du barrage n'est que de 44 % du volume initial.



Période 1950-1982



Période 1982-1989



Période après 1989

Fig.264- Etapes approximatives du comblement de la retenue du barrage de FOUM EL GHERZA

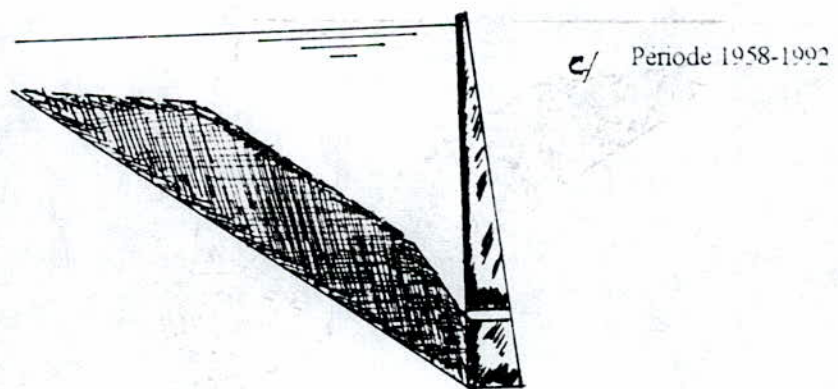
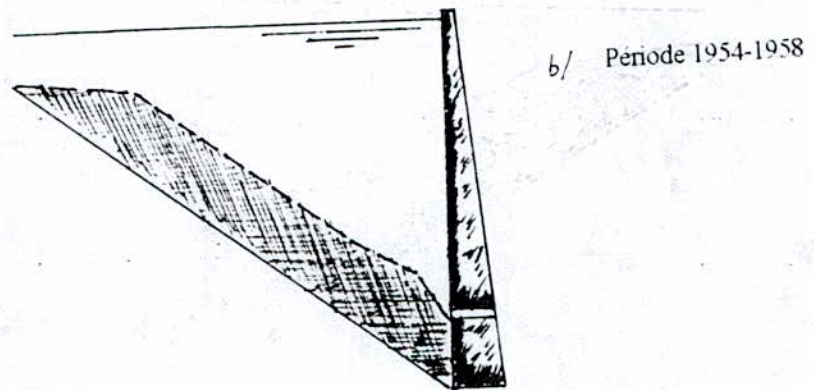
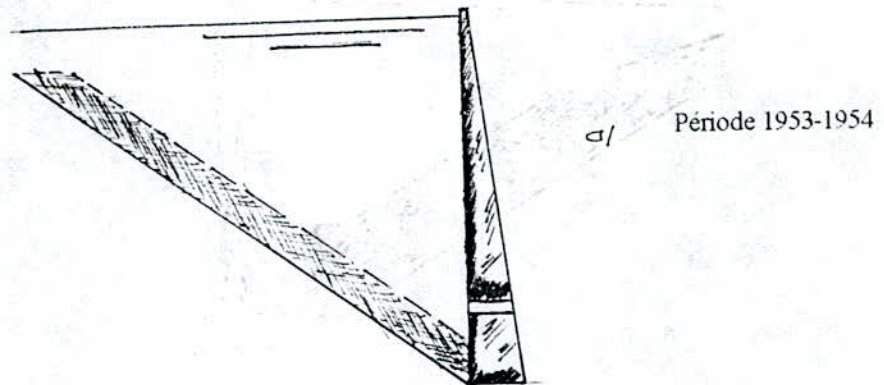


Fig.265- Etapes approximatives du comblement de la retenue du barrage d'IGHIL EMDA

- Envasement de la retenue en 1942 (fig. 266 b)

La non maîtrise de la technique du soutirage a accéléré l'envasement dans les trois zones.

- Envasement de la retenue en 1952 (fig. 266 c)

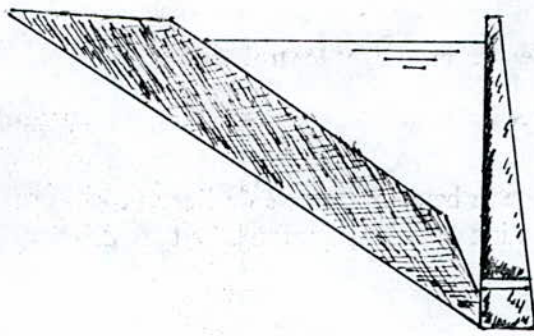
Le niveau de la vase dans la zone I a atteint les **60 %** de la hauteur normale de l'eau, et la vanne de fond ne s'était pas bloquée, ce qui a provoqué la formation d'un cône profond. Le taux de comblement a atteint les **96 %**.

- Etat de l'envasement en 1961 (fig. 266 d)

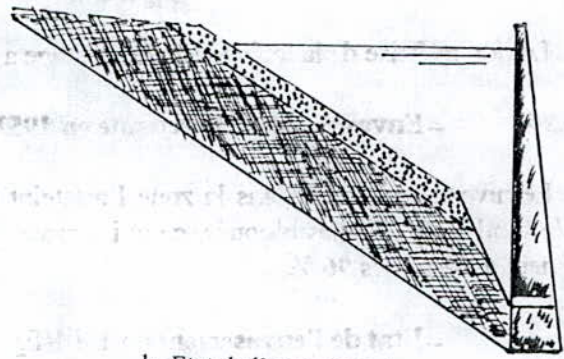
Devant cet état de comblement avancé, une quantité de sédiments a été dévasée par la drague « Lucien Dumay » diminuant ainsi le taux de comblement jusqu'à **56 %**.

- Etat de l'envasement de la retenue en 1966 (fig. 266 e)

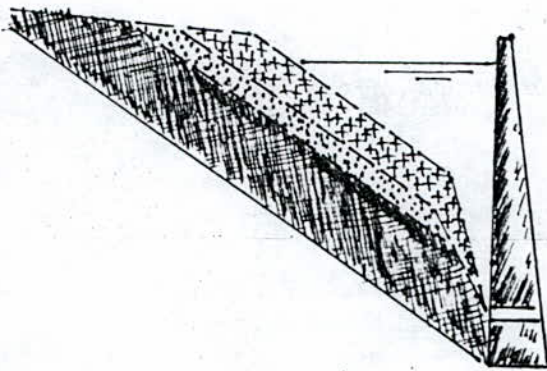
La retenue s'est envasée de nouveau et le taux de comblement a atteint **66 %**, et fut abandonnée après 80 années d'exploitation.



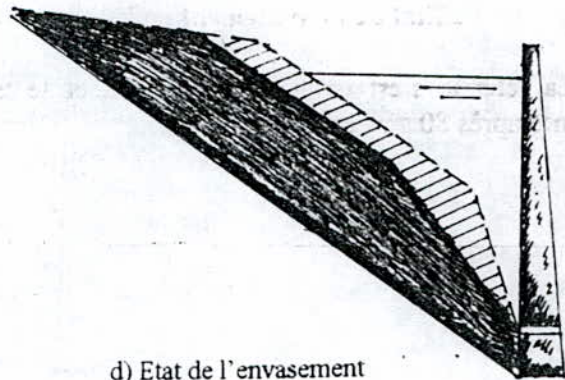
a- Etat de l'envasement
en 1933



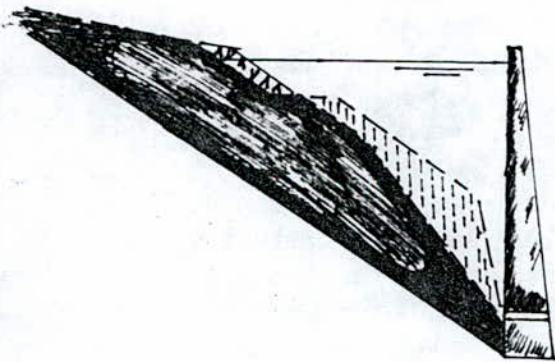
b- Etat de l'envasement
en 1942



c) Etat de l'envasement
en 1952



d) Etat de l'envasement
en 1961



e) Etat de l'envasement
en 1966




-  Vase déposée de 1885 à 1933
-  Vase déposée de 1933 à 1942
-  Vase déposée de 1942 à 1952
-  Vase enlevée entre 1952 et 1961
-  Vase déposée de 1961 à 1966
-  Remaniement des sédiments de 1961 à 1966
-  Vase déposée de 1885 à 1952
-  Vase déposée de 1885 à 1966

Fig. 266-Evolution probable du toit de la vase dans la retenue des CHEURFAS I.

Conclusion générale

Comme nous l'avons déjà défini au début de ce travail, notre but était d'étudier l'envasement des retenues de barrages: Importance, mécanisme et moyen de lutte par la technique de soutirage.

Nous avons abordé le problème de la façon suivante:

-Dans la première partie: Importance de l'envasement dans les retenues de barrages, nous avons donné une idée sur l'ampleur de ce phénomène dans certaines régions du monde et plus particulièrement en Afrique du Nord.

Il s'avère que plus de 100.10^6 m^3 de vase s'accumulent annuellement dans environ 150 barrages du Maghreb de capacité initiale de 17.10^9 m^3 .

Le constat établi sur une dizaine de barrages Algériens vis avis de leur envasement a montré, que ce phénomène est devenu aujourd'hui une menace réelle pour l'infrastructure hydrotechnique, tant sur la réduction rapide de la capacité utile, que sur la sécurité de l'ouvrage lui-même, il est intéressant de signaler que le taux de comblement de 98 barrages Algériens est estimé en 1996 à 12,5 %. Enfin, le phénomène de l'envasement doit être une partie prenante dans la préparation d'un projet de faisabilité d'un barrage.

Dans la deuxième partie intitulée: les mécanismes de l'envasement des retenues, nous avons dégagé dans une première approche, trois modes de distribution des sédiments dans les réservoirs à savoir:

-Distribution des sédiments par les courants de densité.

-Distribution des sédiments par l'avancement du « delta » des matériaux grossiers et décantation des particules fines.

-Distribution des sédiments dans « les petites retenues » par les « rouleaux de recirculation ».

L'étude des courants de densité s'est limitée dans un premier volet à l'examen du comportement et la vitesse de la tête du courant de densité dans un canal prismatique. Il en résulte que la vitesse reste constante (vitesse initiale) malgré les oscillations de la hauteur de la tête du courant de densité dans la première partie du canal, puis elles (la vitesse et la hauteur) régressent progressivement le long du canal;

Dans le deuxième volet concernant l'étude des courants de densité dans la retenue du barrage d'IGHIL EMDA, nous avons pu montrer que cette retenue est exposée à un envasement rapide dû essentiellement aux apports en provenance du bassin versant de l'oued Berd. Ces sédiments sont ensuite drainés par les courants de densité jusqu'au pied du barrage, et une partie seulement (particules fines de diamètre inférieur à 20μ) sera évacuée par les vannes de soutirage. Le reste sera ainsi déposé dans la retenue, ce volume a été évalué à 53.10^6 m^3 en 1992. Les conditions de concentration en éléments fins, de pente, et de forme de la retenue (type canal) ont favorisé l'apparition et la propagation des courants de densité dans cette branche de l'oued Berd en périodes de crues. C'est ainsi, que les observations faites en 1992 confirment l'existence de la zone de plongée de l' « underflow » dans la branche de l'oued BERD, et que celle-ci a avancé d'environ 3 km par rapport à celle observée par DUQUENNOIS H. en 1953, suite à l'évolution des dépôts des sédiments.

La distribution des sédiments fins dans les « petites » retenues de basse chute est loin d'être maîtrisée. L'étude expérimentale sur la répartition des sédiments menée sur le modèle réduit du barrage de BENI AMRANE à l'échelle 1/100, nous a permis de dégager une loi entre le débit d'apport et les rouleaux de recirculation qui apparaissent dans la retenue, et balayent toute sa surface, ce qui donne l'uniformité de la répartition des sédiments. Les analyses granulométriques faites sur les échantillons de vases évacuées par les vannes de barrage (site), ont donné plus de 57 % de sable (dont 14 % de sable moyen), ce qui justifie que le classement n'est pas respecté.

Dans la troisième partie consacrée à la « technique du soutirage », les résultats enregistrés par cette méthode au niveau des barrages Algériens sont relativement faibles à l'exception de celui d'IGHIL EMDA dont la durée de vie devrait être doublée. C'est ainsi, que grâce aux manoeuvres des vannettes de fond, la perte de capacité de la retenue est réduite de plus de la moitié, soit 0,85 % de la capacité totale au lieu de 1,6 % en moyenne par année.

Cet échec est essentiellement dû à la méconnaissance du comportement des courants de densité dans les retenues: les services d'exploitation continuent à confondre l'évacuation des sédiments par l'utilisation des courants de densité, avec la méthode d'évacuation des sédiments par la vidange de fond à réserve pleine. C'est ainsi, que sur l'ensemble des barrages, les manoeuvres des vannes se font toujours après que la consolidation de la vase soit commencée.

La technique du soutirage si elle est bien pratiquée peut être un moyen efficace de lutte contre l'envasement des retenues de barrages en Algérie, compte tenu de son faible coût et surtout de la présence des courants de densité dans l'ensemble des retenues. En effet, pour avoir un bon rendement au niveau du soutirage en évacuant le maximum de vase avec un minimum d'eau claire, nous avons montré qu'il existe une « zone optimale du soutirage », c'est à dire que l'évacuation des sédiments doit se faire avec des densités comprises dans cette zone, ainsi nous distinguons deux types de soutirage: les « bon » et « mauvais » soutirages montrant chacun des différences dans la densité de la suspension soutirée, ce qui a pour conséquence une influence sur le régime (permanent ou non permanent) de l'écoulement de la suspension à travers les pertuis de vidange.

L'utilisation courante des pertuis de vidange d'un barrage comme moyen de réduction de l'envasement, influe directement sur l'évolution du profil des dépôts de vase dans la cuvette. En effet, au début d'exploitation d'un barrage, le remplissage de la retenue par les sédiments suit une loi linéaire en fonction du temps, et dès que le toit de la vase atteint le seuil des vannes, la loi devient polynomiale (du deuxième degré). Ce ralentissement n'est pas dû uniquement au soutirage, mais le profil en long tend vers un profil d'équilibre.

L'évolution des dépôts de vase en fonction de la hauteur d'eau dans la retenue d'un barrage est un phénomène, qui ne peut pas être étudié de la même façon dans l'ensemble du réservoir, ainsi nous proposons une division de la retenue en trois zones, chacune d'entre elles montrant des différences dans la granulométrie et le volume des sédiments, notre étude s'appuyant sur des résultats obtenus dans les retenues d'une dizaine de barrages Algériens.

Au début de l'exploitation d'un barrage, l'évolution des dépôts sédimentaires suit une loi linéaire en fonction de la hauteur de la retenue, ce qui signifie que le profil de la vase est parallèle au fond de la retenue, et dès que le toit de la vase atteint le seuil des vannes, la loi devient polynomiale (du troisième degré) dont la forme dépend du taux de comblement.

La partie centrale (zone II) est soumise à un envasement beaucoup plus intense, que les deux autres parties (amont et aval), et la répartition des particules solides est uniforme avec un toit de vase, qui évolue parallèlement au fond de la retenue. Par contre, les sédiments déposés dans la partie basse de la retenue (zone I) sont remaniés par les manoeuvres des vannes, et l'évolution des dépôts sédimentaires se trouve dépendante de l'efficacité des soutirages. C'est ainsi, que dans le cas d'un barrage dans lequel est pratiqué un « bon » soutirage, l'évolution du toit de la vase stagne dans le temps, contrairement au cas du barrage dans lequel est pratiqué un « Mauvais soutirage » où l'évolution des dépôts de vase est très significative.

Les « Bon » soutirages ont été surtout enregistrés au niveau du barrage d'IGHIL EMDA dont le rendement le plus élevé a atteint 55 % durant la période 1984-1992, ce rendement pourrait encore être amélioré et atteindre la valeur de 70 %, ce qui correspond à la valeur limite de la technique du soutirage, c'est à dire que la durée de vie de l'ouvrage sera augmentée de trois fois. A cet effet, l'installation d'un dispositif approprié de soutirage composé de vannettes de faible diamètre et de vannes de dégrèvement, doit être le paramètre principal pour les nouveaux projets de construction de barrages en Algérie. La surélévation de la digue d'un barrage dans lequel est pratiquée la technique du soutirage influe sur le mécanisme de l'envasement, et accélère le dépôt des sédiments dans la retenue.

Enfin, nous pourrions dire que: «la technique du soutirage est une nécessité pour les barrages Algériens, alors qu'elle soit utilisée efficacement ! »

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **BERTHIER A. -1970-**
Quelques problèmes posés par la création de barrages sur une rivière transportant les débits solides.
X congrès Int. des grands barrages, Montréal (Canada), pp. 489-506.
- [2] **MEKERTA B. et TISOT J-P. -1993-**
Etude de la sédimentation dans les retenues des barrages, propriétés mécaniques des sols fins.
communication. 1^{er} congrès national des grands barrages. Alger 24 et 25 mai, pp. 1-9.
- [3] **DEMMAK A. -1982-**
Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale.
Thèse du Dr-Ing, Univ de pierre et Marie Curie. Paris XI.
- [4] **MECHIN Y. -1980-**
Rapport général introductif sur le dévasement des retenues.
Séminaire international sur le dévasement des retenues. Tunis (Tunisie) 1-4 juillet, 5p.
- [5] **KELLER P. et BOUCHARD J-P. -1983-**
Etude bibliographique de l'alluvionnement des retenues par les sédiments fins. Mécanisme physique et
moyen de lutte. Rapport int., juillet, E43/D46, 32 fig., 45 p., E.D.F., Direction des études et recherches.
- [6] **DUQUENNOIS H. -1956-**
Lutte contre la sédimentation des barrages réservoirs -barrage d'IGHIL EMDA.
Electricité et Gaz d'Algérie, Compte rendu n° 3, Année 1955 - 1956, 17 p.
- [7] **DUQUENNOIS H. -1957-**
Lutte contre la sédimentation des barrages réservoirs -barrage d'IGHIL EMDA.
Electricité et gaz d'Algérie, Compte rendu n° 4, Année 1956-1957, 22 p.
- [8] **MINISTERE DE L'HYDRAULIQUE-1983-**
Données générales pour l'élaboration d'un programme de lutte contre l'envasement des barrages.
Rapport. 13 pages.
- [9] **MINISTERE DE L'HYDRAULIQUE-1983-**
Note préliminaire sur le dévasement des barrages. Rapport, 8 p.
- [10] **GRAF.W.H -1983-**
« The hydraulics of réservoir sédimentation ». Water power et dam construction, .April, pp. 45-52.
- [11] **REMINI.B, J.M.AVENARD et A.KETTAB -1996-**
Evolution de l'envasement dans trois retenues des barrages en Algérie Revue Vecteur environnement de
l'association Québécoise de l'environnement (Canada). Vol.29, n° 30, juin, pp.43-48.
- [12] **HADJI T. -1993-**
Barrages et mobilisation des eaux de surface. Bulletin El Qundous. Numéro spécial, pp.4-9.
- [13] **TOUAT M. et al.-1991-**
Contribution à l'étude de la sédimentation des barrages en Algérie. Actes du colloque sur l'érosion des
sols et l'envasement des barrages. Alger 1-3 décembre, 7 p.
- [14] **SAIDI -1991-**
Erosion spécifique et prévision de l'envasement des barrages. Actes du colloque sur l'érosion des sols et
l'envasement des barrages. Alger 1-3 décembre, pp. 204-226.
- [15] **LAHLOU A. -1988-**
Etude actualisée de l'envasement des barrages du Maroc.
Revue science de l'eau, G(3), pp. 337-356.

- [16] **TALIB H.-1992-**
Evacuation des sédiments par des chasses à niveau bas .Cas du barrage SIDI DRISS.(Maroc).
La revue Marocaine du Génie Civil, n° 38 , avril, pp. 79-81.
- [17] **LAHLOU A.-1991-**
L'envasement des barrages au Maroc.
Actes du colloque su l'érosion des sols et l'envasement des barrages. Alger 1-3 décembre, 6 p.
- [18] **SAADAOUI M. -1991-**
Erosion et transport solide en Tunisie:Impact sur l'infrastructure.
Seminaire sur l'érosion et l'envasement des barrages. Alger 1-3 décembre, pp. 18-43.
- [19] **BOUZID A. -1991-**
L'expérience de la Tunisie dans la protection des sols et des barrages.
Séminaire sur l'érosion et l'envasement des barrages. Alger 1-3 décembre, pp. 160-170.
- [20] **CLAUDE J. et CHARTIER R. -1977-**
Mesure de l'envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie.
Cahier ORSTOM, série hydrologie, vol. XIX, n° 1.
- [21] **GHORBEL A. -1980-**
Les transports solides en Tunisie.
Séminaire Int des experts sur le dévasement des retenues.Tunis 1-4 juillet, pp. 1-6.
- [22] **CLAUDE.J et al -1977-**
les alluvions déposés par l'oued Medjerba lors de la crue exceptionnelle de mars 1973.
Cahier ORSTOM, série hydrologie, vol. XIX , n° 1, pp. 37-88.
- [23] **RAIS S. et ABIDI M.-1989-**
Prevision du transport solide sur un bassin versant .Application a l'envasement d'une retenue.
L a Houille blanch. n° ¾, pp. 296- 300.
- [24] **HEUSH.B et MILLIES.L -1971-**
Une methodologie pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin:application au Maghreb.
Revue mine et geologie (Rabat) n° 99, pp. 21-30.
- [25] **SOGREAH -1967-**
Etude générale des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie.
Dossier OMARA. Alger.
- [26] **C.I.G.B -1989-**
Maîtrise de l'alluvionnement des retenues.
Bulletin N° 67, 159 p.
- [27] **REMINI.B, AVENARD.J-M, KETTAB.A -1996-**
L'envasement des retenues des barrages:ampleur et conséquences. 23 pages, 21 fig.
Publication int. U.L.P. de Strasbourg. France.
- [28] **PEMBERTON E. -1980-**
« Surey an prédiction of sédimentation in reservoirs:applications of stochastic processes in sédiment transport ».Waters ressources publication.Colorado -U.S.A.
- [29] **TALEB A. -1987-**
Conception d'un barrage en vue de reduire l'envasement de la retenue.
Thèse de doctorat, Univ. de Liege (Belgique).
- [30] **QISHUN Z. et VIQIAN L. -1980-**
« Sediment problem of sanmenxia reservoir »
Proceeding Int.Symposium on river sedimentatio.Vol. 2, Beijung, China, march.

- [31] **HAO Z. et al -1976-**
« Régulation of sédiments in some médium and small size of réservoirs on heavily silt-laden streams in China ». Congrès des grands barrages, Mexique, Q. 41, R. 35.
- [32] **PAUL T-C. et DHILON G-S. -1988-**
« sluice dimensioning for desilting réservoirs ». Waters power et dam construction, may, pp. 40-44.
- [33] **AMINI A. et FOULARDI C. -1985-**
« Sédiment fluching at the Safidrud réservoir ». Proceeding second Int. Workshop on alluvial river problems, university of Rookee India, october.
- [34] **GALGALI V-G. -1986-**
« Control of sédiment option in small réservoirs ». Proceeding, 53 rd annual Rand D session, central board of irrigation and power, New-Delhi, India, publication n° 184, vol. II, 8-10 may.
- [35] **JAGG A-L. et KASHYP B-R. -1984-**
« Desilting Baira réservoir of Baira sivil project ». Irrigation and power, vol. 41, n° 4, october.
- [36] **EL FATIH S.A.T. -1985-**
« sédimentation et manoeuvres des chasses des retenues de Rosseires, Senna et Khashm El Girba ». Séminaire Int. sur le devasement des retenues. Tunis, 1-4 juillet.
- [37] **HWANG J-S. -1985-**
« The study and planning of réservoir desilting in Taiwan ». Waters Int., IWRA, vol. 90, n° 1, march.
- [38] **BROWN C-B. -1944-**
« The control of resvoir silting ». Publication n° 521 US. département of agriculture, pp. 1-20.
- [39] **KRUNDIECK A. et CHAMOI P. -1979-**
« sediment flushing at Santo Domingo réservoir ». Waters power et dam construction, décembre.
- [40] **CHADI A. -1990-**
« L'envasement des retenues de barrages ». Séminaire. Strategie de gestion des eaux. Horizon 2010. Alger 28-29 et 30, mai, 7 p.
- [41] **MATARI M. -1991-**
Evolution historique des methodes de lutte contre l'envasement des barrages. Proc. semi. sur l'érosion et l'envasement des barrages- Alger 1-3, 5 p.
- [42] **SECRETARIAT D'ETAT A L'HYDRAULIQUE -1973-**
Note hydrologique concernant le transport solide de l'oued CHELIFF, 4 p.
- [43] **REMINE B., KETTAB A. et AVENARD J-M. -1996-**
Evolution de l'envasement dans les retenues des barrages de FOUM EL GHERZA et GHRIB. Revue Algérie Equipement n° 22, nov/déc., pp 12-15.
- [44] **BOILLAT J-L. et DELLY P. -1992-**
Transformation de la prise d'eau de Malvaglia. Revue « Eau - Energie - Air », 84, Jahrang , Heft 7/8, CH - 5401, pp. 145-151.
- [45] **EVRARD J. -1980-**
Considerations sur l'alluvionnement dans les ouvrages hydrauliques d'E.D.F. Sem. Int des experts sur le devasement des retenues Tunis, 1-4 Juillet, 17 p.
- [46] **HADJI T. et CHADI A. -1991-**
Quelques aspects sur l'envasement des retenues Algeriennes. Colloquee sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages. Alger les 1,2 et 3 decembre, 18 p.

- [47] **CHADI A. et HADJI T. - 1992 -**
Erosion des sols et envasement des barrages. Revue Algerie Equipement n°5, juillet.
- [48] **BOUVARD M. -1983-**
Ouvrages de dérivation et transport solide. Revue la Houille blanche n° 3/4 . pp. 247-253.
- [49] **BINNIE et PATENERS W.S. ATTKINS INTERNATIONAL-1984-**
Barrage de BENI-AMRANE. Etudes des crues et de la sédimentation du réservoir. Rapport n° E3, 83 p.
- [50] **VALEMBOS J. et MIGNIOT C. -1975-**
Rejets des produits de dragages à l'aval d'un barrage sur oued EL HAMIZ. Revue la Houille blanche n° 2/3, pp. 155-172.
- [51] **MINISTERE DES TRAVAUX PUBLICS ET DE LA CONSTRUCTION- 1970 -**
Etats des études et réalisation pour la lutte contre l'envasement des barrages Algériens. Direction de l'hydraulique. Note de décembre, 88 p.
- [52] **B.N.E.F.-1983 -**
Etude de l'aménagement et de la mise en valeur du bassin versant de l'oued K'SOB. Rapport phase II-Etude du milieu, pp. 9-29.
- [53] **AMIRECHE H.-1984-**
Etude de l'érosion dans le bassin versant des ZARDEZAS-Tell constantinois. Thèse de troisième cycle Aix Marseille II.
- [54] **AMIRECHE H. -1991-**
L'érosion dans le tell nord constantinois-Cas du bassin versant du barrage des ZARDEZAS. Colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages. Alger 1 - 3 décembre, pp. 75-92.
- [55] **REMINE B. et KETTAB A. -1994 -**
Envasement des barrages-Cas de OUED EL FODDA. Revue Algerie Equipement n°15, sept., pp. 18-21.
- [56] **REMINE B. - 1992-**
Processus d'envasement des barrages et moyens de lutte. Revue Algerie Equipement n° 5, Juillet, 3p
- [57] **REMINE B. et KETTAB A.-1995-**
Les moyens de lutte contre l'envasement. Communication présentée au premier congrès de l'eau 21-23 mars, Benghazi (Libye), 10 p.
- [58] **KORSO K. -1986-**
Contribution à l'analyse du processus de la sédimentation dans le barrage retenue du FERGOUG. Thèse de Magister, U.S.T.O., 141 p.
- [59] **GUETTARNI -1991-**
Dragage du barrage de FERGOUG. Colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages. Alger 1-3 décembre, 6 p.
- [60] **OUNIS L. -1991-**
Etude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued EL ABIOD et la sédimentation de la retenue de FOUM EL GHERZA. Colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, 6p.
- [61] **SONELGAZ -1974-**
Barrage d'ERRAGUENE: mesure de la sédimentation dans la retenue. Rapport, août / sept., 8 p.
- [62] **C.I.G.B. -1976-**
Problèmes de sédimentation dans les retenues. 12^{ème} congrès, Mexico, Q47, pp. 1177-1208.

- [63] **ARABI M. -1991-**
Intensification de l'agriculture en Algérie, contraintes et espoirs.
Colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, pp. 96-104;
- [64] **ALQUIER M. -1977-**
Le transport solide dans les canaux découverts et les rivières naturelles.
E.N.S.E.E.I.H de Toulouse, 109 p.
- [65] **QUESNEL B. -1973-**
Traité d'hydraulique fluviale et torrentielle appliquée. Tome III.
Edition Eyrolles, 325 p.
- [66] **EAKIN H.M.-1936-**
Sédimentation des réservoirs-Bulletin technique n°524 du ministère de l'agriculture des Etats Unis,
Juillet, 22 p.
- [67] **REMENIERAS G. et BRAUDEAU G.-1951-**
Quelques observations sur l'alluvionnement dans les réservoirs Français. Quatrième congrès des grands barrages. New-Delhi, question n°14, pp. 197-235.
- [68] **BRUNE.G.M -1953-**
« Trap efficiency of reservoirs »
Transactions of the American geophysical union, vol. 3, pp. 407-418.
- [69] **DROUHIN et al. -1951-**
La sédimentation des barrages réservoirs en Algérie.
4th congrès des grands barrages. New Delhi Question n° 14, pp. 163-195.
- [70] **DU QUENNOIS H. -1954-**
Sédimentation et soutirage des vases au barrage d'IGHIL EMDA.
Electricité et gaz d'Algérie. Compte rendu n° 1, 6 p.
- [71] **DU QUENNOIS H. -1959-**
Sédimentation dans les réservoirs et moyens de lutte.
Colloque Int., université de Liège, 4 et 5 mai.
- [72] **DU QUENNOIS H. -1955-**
Lutte contre la sédimentation des barrages réservoirs.
Electricité et gaz d'Algérie. Rapport, août, pp. 13-18.
- [73] **JOHSON H. -1980-**
Mesures à prendre lors de la conception d'ouvrages de retenue pour lutter contre l'envasement.
Sem. Int. Sur le devasement des retenues de barrages, Alger, 8 p.
- [74] **PARZONKA W. -1986-**
Caractéristiques hydrauliques et rhéologiques du transport fluvial en suspension aux concentrations élevées entre deux réservoirs. Archiwum hydrotechnique, 10 p.
- [75] **SCHEURLEIN H. -1992-**
Le dessablement des réservoirs par la chasse.
Revue Marocaine du Génie civil n° 38, avril, pp. 54-59.
- [76] **REMINI B., AVENARD J-M. et KETTAB A.-1996-**
Le barrage d'IGHIL EMDA -I- Les courants de densité dans la retenue
Les Annales Maghrébines de l'Ingenieur, Tunis, avril, vol. 10, pp. 53-67.
- [77] **DU QUENNOIS H. -1956-**
« New methods of sediments control in reservoirs ».
Waters power, may, pp. 174-180

- [78] **FAN JIAHUA -1986-**
« Turbid density currents in réservoirs ».
Water.Int. 11, pp. 107-116.
- [79] **BAFOUR P. -1954-**
Lutte contre l'envasement des barrages réservoirs -Considérations sur l'évacuation permanente de la vase.
Société d'entreprises générales et de travaux publics. Rapport, 10 p.
- [80] **DUQUENNOIS H. -1954-**
Sédimentation et soutirage des vases au barrage d'IGHIL EMDA.
Compte rendu d'opérations de la période du 12.9.53 au 21.3.54. Elect et gaz d'Algérie, 23 p.
- [81] **DUQUENNOIS H. -1954-**
Sédimentation et soutirage des vases au barrage d'IGHIL EMDA. Période du 12.9.53 au 21.3.54. Considérations diverses. Electricité et gaz d'Algérie. Rapport, 6 p.
- [82] **SERVICE DE L'ELECTRICITE -1944-**
Etude de la sédimentation des réservoirs. Les vidanges contrôlées au barrage du GHRIB.
Rapport n° 2, novembre, 8 p.
- [83] **SERVICE DE L'ELECTRICITE-1944-**
Etude sur la sédimentation des réservoirs. Les vidanges contrôlées au barrage de l'OUED EL FODDA.
Rapport n° 2, novembre. 8 p.
- [84] **MINISTERE DE L'HYDRAULIQUE -1980-**
Envasement et devasement des retenues.
Direction d'exploitation et de contrôle des barrages, sem. nat., Alger, 3 avril, 7 p.
- [85] **ABID.A -1980-**
Apports solides et soutirages au barrage de NABEUR sur l'oued Mellegue.
Semi.Int. sur le devasement des barrages. Tunis 1-4 Juillet. 14 p.
- [86] **DUQUENNOIS H. -1952-**
Courants de densité au SAUTET.
Electricité et gaz d'Algérie. Rapport, 6 p.
- [87] **Groupe de travail du comité Français des grands barrages -1973-**
Les ouvrages d'évacuation définitifs des barrages.
Congrès des grands barrages, Madrid, Q 41, R 35, 7 p.
- [88] **BRITTER R-E et SIMPSON J-E. -1979-**
The dynamics of the head of a gravity current advancing over an horizontal surface.
J.Fluid, Mech, vol. 94, part. 3, pp. 477-495.
- [89] **BRITTER R-E. et LINDEN -1980-**
The motion of the front a gravity current travelling down an incline.
J.Fluid, Mech, vol. 99, part. 3, pp. 531-543.
- [90] **SIMPSON J. -1967-**
Gravity currents: In the environment and the laboratory.
Edition Ellis Howord Limited.
- [91] **RAYNAUD J-P. -1951-**
Etude des courants d'eau boueuse dans les retenues.
4^{ème} congrès des grands barrages. New Delhi, Q. n° 14, pp. 137-161.
- [92] **E.P.S.C -1986-**
Ecoulement des courants de densité.
Edition presse scientifique de la Chine, pp. 460-491.

- [93] **REMINE B., AVENARD J.M. et KETTAB A. -1994-**
Comportement et propagation du courant de turbidité.
In: Acts du 1^{er} sem. Nat d'hyd (5-7 Dec. 1994). C.U de Biskra. Institut d'hydraulique. pp. 39-62, 15 fig, 4 ph.
- [94] **REMINE B. et KETTAB A. -1992-**
Etude des courants de densité dans un canal rectangulaire.
Communication présentée aux journées sur l'hydraulique, 28-29 Juin, E.N.P.
- [95] **MIGNIOT C. -1958-**
Etude des lois de transport et de sédimentation des matériaux en suspension.
Rapport L.C.H.F, France, Juillet, 82 p.
- [96] **KEULEGAN G-H. -1950-**
Wave motion: internal waves, Engineering hydraulics, pp. 756-766.
- [97] **VALEMBOIS J. -1960-**
La question des courants de densité-
La houille blanche n° A, juillet / août, pp. 470-477.
- [98] **VALEMBOIS J. -1965-**
Travaux récents sur les courants de densité. La Houille blanche n° 1, pp. 15-19.
- [99] **YIH C-S. -1958-**
On the flow of stratified fluid.
Proc. third U.S. Nat. congress of applied Mech, Brown univ, Juin, pp. 857-861.
- [100] **BARR D-H. -1963-**
Densimetric exchange flow in rectangular channels. La Houille blanche, Juillet, pp. 739-753.
- [101] **ALLEN J.R.L. -1985-**
Principales of physical sedimentology. Edition London Allen.
- [102] **TIMOTY. Y -1977-**
Density currents and their application. J. hyd. div., vol. 103, n° 5, may, pp. 317-329.
- [103] **FRIEDMAN T. et SANDERS -1978-**
Principales of sedimentology. Edition Coll John Jilli et Sons.
- [104] **GRAF W-H. -1983-**
The behaviour of silt laden-current. water power et dam construction, sept, pp. 35-39.
- [105] **ALTINAKAR M-S. et al -1987-**
Hydraulics of the head of turbidity current. XXII congrès I.A.H.R. Lausanne, 4 p.
- [106] **LEBRETON J-C. -1975-**
Transport solide. Cours de l'école nationale des ponts et chaussées. MDF appliquée, Hug.M, pp. 455-548,
Edition Eyrolles.
- [107] **REMINE B. -1994-**
Influence des paramètres hydrauliques sur la vitesse du courant de turbidité. Revue Marocaine du Génie
civil. n° 50, pp. mai, pp. 2-10.
- [108] **ZERGUINI R. -1991-**
Erosion et sédimentation. Etude du barrage d'IGHIL EMDA. Communication présentée au colloque sur
l'érosion des sols et l'envasement des barrages, 1-3 décembre, 5 p.
- [109] **REMINE B., KETTAB A. et HAHAT H. -1995-**
Envasement du barrage d'IGHIL EMDA. La Houille blanche n° 2/3, pp. 23-28.

- [110] **B.N.E.F. -1986-**
Note sur l'étude d'aménagement et mise en valeur du bassin versant d'IGHIL EMDA.
- [111] **REMINE B., AVENARD J-M. et KETTAB A. -1995-**
Point de plongée des courants de densité dans les retenues. Revue Algérie Equipement n° 20, juillet / août, pp. 13-15.
- [112] **REMINE B., AVENARD J-M. et KETTAB A. -1996-**
Mesure de l'envasement dans la retenue d'IGHIL EMDA. Revue Marocaine de Génie civil. n° 62, mars, pp. 75-82.
- [113] **BHAMIDIPATY S. et SHEN H-V. -1971-**
Laboratory study of degradation and aggradation. Proceeding , American society of civil Engineers. Vol. 97 WW₄ . 9 p.
- [114] **SUGIO S. -1972-**
Laboratory study of degradation and aggradation a discussion. Proceeding , American society of civil Engineers, vol. 98., U.S.A.
- [115] **SUGIO S. et OKADE T. -1974-**
Sedimentation process in réservoirs to suspended sediments. Bulletin Faculty of Engineering. Takushima, university, vol. 11, Japon.
- [116] **YUCEL O. -1976-**
Investigation of réservoir delta formations in a laboratory flume.
Rapport de laboratoire d'hydraulique Miiddle East Technical University. Ankara, Turquie, 11 p.
- [117] **LING K-C. et al -1969-**
Sédiment problems and watershed management in Taiwan. Rapport Taiwan power, 12 p.
- [118] **PARTHENIADES.E -1971-**
Erosion and déposition of cohésive sédiment in Schen, River mechanics, 9 p.
- [119] **REMINE B. et BERKANI M. -1992-**
Etude hydrodynamique de l'envasement du barrage de BENI AMRANE par modélisation physique.
Communication présentée aux journées scientifiques sur l'hydraulique, E.N.P., 28 -29 juin., 6p.
- [120] **REMINE B. et BERKANI M. -1993-**
Etude hydrodynamique du mécanisme de l'envasement. Revue Arab Waters World., march/june, pp. 42.
- [121] **REMINE B., BERKANI M. et KETTAB A. -1996-**
Etude expérimentale du phénomène hydrodynamique du mécanisme de l'envasement des retenues. Blida journal scientific n° 1, nov., pp. 55-62.
- [122] **BERKANI M. et REMINE B. -1991-**
Mécanisme hydrodynamique de l'envsement. Approche préliminaire. Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages .Alger 1-3, décembre, 10 p.
- [123] **REMINE B. -1990-**
Etude hydrodynamique du mécanisme de l'envasement. Thèse de Magister .E.N.P. juin ,100 p.
- [124] **REMINE B., BERKANI M. et KETTAB A. -1992-**
Impact des rouleaux de recirculation sur l'envasement du barrage de BENI AMRANE.
Revue Algérie Equipement , n° 6, oct., pp. 12-16.
- [125] **REMINE B., AVENARD J-M. et KETTAB A. -1996-**
Distribution des sédiments dans les retenues. Revue Techniques sciences et Méthodes, Paris, n° 3 , mars, pp. 196-200.

- [126] **REMINE B., AVENARD J-M. et KETTAB A. -1995-**
Mécanisme des sédiments dans les retenues. Premier colloque Maghrébin de l'hydraulique, Alger 16-17 mai, pp. 301-309.
- [127] **REMINE B., AVENARD J-M. et KETTAB A.-1995-**
La technique du soutirage: un moyen de lutte contre l'envasement.
Publication Int.U.L.P. - CEREG de Strasbourg, 19 p. 10 fig.
- [128] **QIAN NING -1982-**
Institute on fluvial process, fort collins Colorado.
- [129] **RENE ARRUS -1985-**
L'eau en Algérie. Edition O.P.U., 388 p.
- [130] **REMINE B., AVENARD J-M., et KETTAB A. -1996-**
Barrage d'IGHIL EMDA. II- Le soutirage des courants de densité.
Revue Vecteur environnement (Canada), vol. 29, n° 4, août, pp. 27-32.
- [131] **REMINE B., AVENARD J-M. et KETTAB A. -1994-**
L'évolution de l'envasement et l'évacuation des sédiments par les vannes de fond dans le barrage d'IGHIL EMDA (Algérie). In: Acts du premier Sem.Nat.d'hyd (5-7 Décembre), C.U Biskra. Institut d'hyd. pp. 19-38. 11 fig.
- [132] **REMINE B., AVENARD J-M. et KETTAB A. -1995-**
Soutirage des sédiments par les vannes de fond. Communication présentée au 2° colloque Nat. climat environnement: « L'eau: une réalité, une urgence, un défi ». Asso pour la recherche sur le climat et l'environnement (A.R.C.E), Oran, 24-25 dec, 5 p., 5 fig.
- [133] **DESSOLIERS H. -1908-**
Contributions diverses à l'hydrogènes. Librairie polytechnique. ch. Beranger.Paris.
- [134] **DUQUENNOIS H. -1949-**
Le débit solide et les barrages réservoirs- Electricité et gaz d'Algérie. Rapport, mars, 25 p.
- [135] **REMINE B., AVENARD J-M. et KETTAB A. -1995-**
Zone optimale du soutirage. Publication int.U.L.P. de Strasbourg, 9 p., 3 fig.
- [136] **DUQUENNOIS H. -1944-**
Note sur les phénomènes observés et les enseignements à tirer pour lutter contre l'envasement des grands barrages réservoirs. Note du 30 Octobre. Service d'électricité, 2 p.
- [137] **REMINE B. -1996-**
« Bon » ou « Mauvais » soutirage ? Publication int.U.L.P. de Strasbourg, 14 p., 12 fig.
- [138] **KHABOTE A. et BOUTAYE N. -1980-**
Dispositif de protection du barrage MOHAMED BEN ABDELKRIM contre l'envasement. Sémin. Int. Tunis, 1-4 Juillet.
- [139] **DUQUENNOIS H. -1957-**
Etude de la sédimentation de la retenue d'IGHIL EMDA.Effet des crues d'automne 1956.
Electricité et gaz d'Algérie. Rapport, 3 p.
- [140] **REMINE B. -1996-**
La technique du barrage de chasse en Algérie. Publication int. U.L.P. de Strasbourg, 12 p. 12 fig.
- [141] **REMINE B. -1994-**
« The phenomenon of dams mud deposits in Algerien ». Revue Arab waters world. march/april.

- [142] **REMINE B., AVENARD J.-M. et KETTAB A. -1996-**
Evolution dans le temps de l'envasement dans une retenue de barrage dans laquelle est pratiquée la technique
(A paraître dans la revue int. La Houille Blanche) . nov., 8 p, 7 fig.
- [143] **REMINE B., AVENARD J.-M. et KETTAB A. -1996-**
Evolution de l'envasement dans la retenue d'un barrage surélevé.
Publication int. U.L.P. de Strasbourg, 5 p., 4 fig.
- [144] **REMINE B., AVENARD J.-M. et KETTAB A. -1996-**
Mode d'envasement d'une retenue de barrage en relation avec la technique du soutirage: quelques
exemples Algériens. Publication int. U.L.P. de Strasbourg, 9 p., 5 fig.
- [145] **REMINE B., AVENARD J.-M. et KETTAB A. -1996-**
Evolution de l'envasement dans la partie central d'une retenue de barrage dans laquelle est pratiquée la
technique du soutirage.
Communication présentée aux 24^{èmes} journées d'hydraulique, Paris, 18-19 sept., 7 p.
- [146] **MIGNIOT C. -1989-**
Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire, l'érosion et sédimentation du littoral. Première partie:
hydrodynamique sédimentaire.
SOGREAH - LCHF n° 51078 R₁.
- [147] **MIGNIOT C. -1977-**
Action des courants de la boue et du vent sur les sédiments.
La houille blanche n° 1.