

REPUBLIQUE ALGERRIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB - BLIDA

Département de Génie Rural



THEME

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DU CHARRIAGE ET SON
IMPACT SUR L'EVALUATION DU TAUX D'ABRASION
DU BASSIN VERSANT DE L'OUED HARREZA**

THESE DE MAGISTERE

Spécialité : Génie rural
Option : Sciences de l'eau

Présenté par : M^{me} Karima BOUCHENAF A ép.MEGUENNI

Encadré par : D^r REMINI B.

L'année : 2001 / 2002

Soutenue devant le jury composé de:

Pr. KETTAB A.	Pr.	E.N.P d'ALGER	Président
Dr. SAAD H.	M.C.	C.U. CHELEF	Examinateur
Mr GUENDOZ A.	C.C.	U. SAAD DAHLEB - BLIDA	Examinateur
Mr DJELFI M.	C.C.	U. SAAD DAHLEB - BLIDA	Examinateur
Dr REMINI B.	M.C.	U. SAAD DAHLEB - BLIDA	Promoteur

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui ont apporté une contribution à la réalisation de ce travail. Je voudrais exprimer ma profonde gratitude et reconnaissance à mon promoteur Dr REMINI B. Pour avoir dirigé particulièrement mon travail, ses conseils précieux et son aide ont été pour moi, un encouragement permanent.

Je voudrais remercier le Professeur KETTAB A. Pour l'honneur qu'il me fait en président mon jury.

Je remercie par la même occasion les membres de jury :

Dr SAAD H. pour avoir accepté de lire, d'analyser ce travail et de participer à ce jury.

Mr GUENDOUZ A. qui m'a fait profiter de ses conseils et ses connaissances, pour avoir accepté de juger ce travail et participer à ce jury.

Mr DJELFI M. d'avoir aimablement accepté de faire partie de ce jury.

J'adresse mes vifs remerciements à :

M^{lle} LARFI Bochra pour son soutien moral et sa disponibilité permanente ; le personnel de l'A.N.R.H d'Alger et en particulier M^{me} SERIDI Abda.

M^r le directeur de l'A.N.R.H de Blida ainsi que tout le personnel pour leurs aides ; mes enseignants de l'institut de Génie Rural sans oublier de remercier le personnel de l'Office National de Géologie pour leurs conseils.

RESUME

Le transport solide est l'un des phénomènes les plus complexes de l'hydraulique. Le présent travail peut être d'une grande utilité pour les services hydrauliques, il est consacré à l'approche de la quantification des apports solides par charriage et en suspension. Les équations de régressions basées sur des données observées ont permis l'obtention des résultats satisfaisants et ont servi de base pour l'évaluation des débits solides charriés représentant 34% du transport solide en suspension.

Ce résultat a permis de déduire un taux d'érosion spécifique du bassin versant de l'oued HARREZA de 470 t/km².an ; ainsi qu'une comparaison satisfaisante de ces résultats avec ceux obtenus par la méthode de RAMETTE.

Mots clés : Transport solide - Erosion – Bassin versant – charriage – suspension.

ABSTRACT

The sediment transport is one of the most complicated phenomenon of hydraulic. The present work can be very useful for hydraulic duties, it is devoted to approximate the quantification of sediments approach by bed load and by suspension.

The regression of equation based on observed data allowed us to get good results and they served as a basis to evaluate the new obtained sediment with a rate of 34% of solid transport in suspension.

This result allow us to deduce the rate of erosion specific to the versant basin of oued HARREZA of 470t/Km² year. In the save way a satisfactory comparison were obtained with those of RAMETTE method.

Key word: Transporting solid, erosion, watershed, bed load, suspension.

ملخص:

المواد الصلبة المتحركة تشكل إحدى الظواهر الأكثر تعقيدا في مجال الري، دراستنا هذه تستطيع أن تعود بفائدة كبيرة لمصالح الري. إنها مصخرة للتقرب من تقدير جيد للمواد الصلبة المتحركة سواء كانت معاقبة أم مجحفة في النهر.

المعادلات التراجعية المتأسسة على المعطيات تسمح الحصول على نتائج مرضية و التي استعملت في تقييم التدفق الزاحف الذي يشكل 34% من المواد العالقة.

هذه النتائج تمكننا من إستنتاج نسبة التعرية في الحوض المتدفق لوادي "حريزة" المقدرة 470 طن/كم² سنة، كذلك مقارنة هذه النتائج مع تلك المحصلة عليها بطريقة RAMETTE كانت مرضية.

مفتاح الكلمات : النقل الصلب، التعرية، حوض التغذية، الحمل القعري ، الحمل العالق.

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Abaque d'évaluation du débit de charriage en absence de dunes.....	32
Figure 2	Relation Y_{max} en fonction de X	33
Figure 3	Abaque d'évaluation du débit totale en présence de dunes.....	37
Figure 4	Présentation géographique de la zone d'étude.....	41
Figure 5	Carte du réseau hydro-pluviométrique du bassin versant.....	42
Figure 6	Ajustement à une loi normale des pluies annuelles à la station El Ababsa.....	46
Figure 7	Ajustement à une loi Log-normale des P_{jmax} à la station d'El Ababsa.....	48
Figure 8	Courbe Intensité –Durée-Fréquence.....	50
Figure 9	Ajustement à une loi Log –normale des Q_{max} de l'oued Harreza à la Station El Ababsa.....	52
Figure 10	Relation crue-averse du 20/21 mars 1989.....	53
Figure 11	Relation crue-averse du 28/29 septembre 1994.....	53
Figure 12	Corrélation débit liquide/débit solide pour toute la série d'observation.....	57
Figure 13	Corrélation débit liquide/débit solide pour la série d'automne.....	58
Figure 14	Corrélation débit liquide/débit solide pour la série d'hivers.....	58
Figure 15	Corrélation débit liquide/débit solide pour la série de printemps.....	59
Figure 16	Corrélation débit liquide/débit solide pour la série d'été.....	59
Figure 17	Corrélation débit liquide / débit solide en suspension de la série des grandes crues.....	60
Figure 18	Corrélation débit liquide / débit solide en suspension de la série des grandes crues.....	61
Figure 19	Corrélation débit liquide / débit solide en suspension de la série des grandes crues.....	61
Figure 20	Corrélation débit liquide / débit solide en suspension de la série des grandes crues.....	62
Figure 21	Corrélation débit liquide / débit solide en suspension de la série des grandes crues.....	62
Figure 22	Corrélation débit liquide / débit solide charrié pour la série globale.....	66
Figure 23	Corrélation débit liquide / débit solide charrié pour la saison d'automne...	67

Figure 24	Corrélation débit liquide / débit solide charrié pour la saison d'hivers.....	67
Figure 25	Corrélation débit liquide / débit solide charrié pour la saison de printemps.	68
Figure 26	Corrélation débit liquide / débit solide charrié pour la saison d'été.....	68
Figure 27	Corrélation débit liquide / débit solide charrié pour la série globale des crues.....	69
Figure 28	Corrélation débit liquide / débit solide charrié pour la série globale des crues d'automne.....	70
Figure 29	Corrélation débit liquide / débit solide charrié pour la série globale des crues d'hivers.....	70
Figure 30	Corrélation débit liquide / débit solide charrié pour la série globale des crues de printemps.....	71
Figure 31	Corrélation débit liquide / débit solide charrié pour la série globale des crues d'été.....	71
Figure 32	Variation annuelle de l'érosion spécifique.....	76
Figure 33	Corrélation entre débit solide charrié et débit liquide réduit.....	80
Figure 34	Corrélation entre débit solide total réduit et débit liquide réduit.....	80
Figure 35	Comparaison entre le débit solide total $G_{E,H}$ et le débit solide total.....	82
Figure 36	Comparaison entre le taux d'érosion spécifique et le taux d'abrasion de Tixeron.....	83
Figure 37	Variation de l'érosion spécifique et pluie annuelle.....	84
Figure 38	Evolution du taux d'érosion spécifique et de la pluie annuelle en fonction du temps.....	85
Figure 39	Variation du taux d'érosion spécifique et de l'indice de Fournier En fonction du temps.....	86
Figure 40	Corrélation -Taux d'érosion spécifique-Indice climatique de Fournier.....	86
Figure 41	Corrélation entre l'indice d'Arnoldus et le taux d'érosion spécifique.....	87
Figure 42	Variation du taux de l'érosion spécifique et de l'indice d'Arnoldus.....	88
Figure 43	Corrélation du taux d'érosion spécifique et la lame ruisselée.....	89
Figure 44	Evolution du taux d'érosion spécifique et la lame ruisselée.....	89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Différents aspects du transport des sédiments.....	6
Tableau 2	Répartition du taux d'érosion en fonction de la pluviométrie.....	21
Tableau 3	Réseau pluviométrique.....	45
Tableau 4	Ajustement à une loi de Gauss.....	46
Tableau 5	Ajustement à une loi Log-normale des P_{jmax}	48
Tableau 6a	Variable de Gauss en fonction des fréquences choisies.....	47
Tableau 6b	Pluies journalières maximales.....	49
Tableau 7	Valeurs de précipitations de courtes durées.....	50
Tableau 8	Ajustement à une loi Log-normale.....	52
Tableau 9	Données morphologiques au droit de la station El Ababsa.....	54
Tableau10	Classification et résultats de l'analyse granulométrique.....	63
Tableau11	Valeurs mensuelles et annuelles du transports solide par suspension en tonnes.....	73
Tableau12	Valeurs mensuelles et annuelles du transports solide par charriage en tonnes.....	74
Tableau13	Calcul du taux d'érosion spécifique.....	76
Tableau14	Comparaison du débit solide $G_{E.H}$ avec le débit solide Q_{ST}	81
Tableau15	Comparaison de l'érosion spécifique et les indices climatiques.....	90

LISTE DES SYMBOLES

- γ : poids spécifique du liquide
- J : pente de la ligne d'énergie
- I : pente moyenne de l'oued
- h : hauteur d'eau en écoulement
- d : diamètre des matériaux
- d_m : diamètre moyen des matériaux
- q : le débit liquide par mètre linéaire de largeur du lit
- B : largeur du lit [m]
- H : profondeur moyenne [m]
- R_H : rayon hydraulique
- q_0 : débit liquide limite au dessous duquel cessera le transport des matériaux de diamètre d
- Q : débit liquide total de la section d'écoulement
- V : vitesse d'écoulement [m/s]
- W : vitesse de chute du grain moyen en poids [m/s]
- C : concentration [mg/l]
- A : apport moyen annuel [mm]
- g : poids en Kg des matériaux transportés par seconde et par mètre linéaire de largeur du lit
- G : poids en Kg des matériaux transportés dans l'ensemble de la section d'écoulement
- m_b : débit solide par charriage
- m_b' : valeur de m_b pour une profondeur 0,1 m et la taille des particules égale à 1,1mm
- K : coefficient de rugosité de MANNING-STRICKLER
- τ : contrainte de cisaillement [$N.m^{-2}$]
- ω : puissance de l'écoulement [$N.m^{-1}.s^{-1}$]
- u^* : vitesse de frottement sur le fond
- γ_s : poids spécifique du matériau du fond
- ρ : masse volumique du fluide
- ν : viscosité cinématique du fluide
- δ : densité du sédiment
- Ta : taux d'abrasion [$t/Km^2.an$]



- R : lame ruisselée [mm/an]
P : pluie moyenne des mois les plus arrosés [mm]
P : pluie moyenne inter-annuelle [mm]
Ts : dégradation spécifique [t/Km².an]
I_L : indice lithologique
I_P : indice de précipitation érosives
I_A : indice d'ARNOLDUS
I_F : indice climatique de FOURNIER
C_T : coefficient de torrentialité
Q_L : débit liquide [m³/s]
Q_S : débit solide par suspension [Kg/s]
G_S : débit solide par charriage [Kg/s]
α : coefficient minorateur de la pente
Φ : coefficient d'entraînement des sédiment
X : débit liquide réduit
Y : débit solide charrié réduit
Z : débit solide par charriage et suspension réduit
Es : érosion spécifique [t/Km².an]

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : RECUEILS BIBLIOGRAPHIQUES ET THEORIQUES.....	4
I.1 TRANSPORT SOLIDE.....	4
I.1.1 Définition.....	4
I.1.2 Différents modes de transports solide.....	5
I.2 METHODES DE MESURE DU TRANSPORT SOLIDE.....	7
I.2.1 Transport solide en suspension.....	7
I.2.1.1 Mesures directes du taux de remplissage des retenues par de levées bathymétriques.....	7
I.2.1.2 Méthodes basées sur la mesure de la turbidité au niveau des stations hydrométriques.....	7
I.2.2 Transport solide charrié sur le fond.....	8
I.3 FORMULES THEORIQUES DES TRANSPORTS SOLIDES DU FOND DANS LE MONDE.....	9
I.3.1 Théorie de DU BOYS (1879) sur le mécanisme des charriages en appliquant la formule de CHANG.....	10
I.3.2 Formules de MEYER PETER et MULLER (1948).....	11
I.3.3 Formule d'EINSTEIN (1950).....	13
I.3.4 Formules et expériences de SELIM -YALIN.....	14
I.3.5 Formule de SCHOKLITSCH et SCHAFFERNAK.....	15
I.3.6 Travaux de MC DOWELL (1989).....	16
I.3.7 Formule de WHITE et ACKERS.....	18
I.3.8 Formules de KARIM et KENNEDY (1990).....	19
I.4 TRAVAUX MAJEURS DU TRANSPORT SOLIDE EN ALGERIE.....	19
I.4.1 MEDINGER (Mars 1960).....	20
I.4.2 TIXERONT (Août 1960).....	21
I.4.3 Formule de FOURNIER (1960).....	22
I.4.4 CAPOLINI (1965-1969).....	22
I.4.5 SOGREAH (Avril 1969).....	23
I.4.6 SARI (1977).....	23
I.4.7 DEMMAK (1982).....	24
I.4.8 SHEN et HUNQ (1987).....	25
I.4.9 ARABI (1991).....	26
I.4.10 MEDDI (1992).....	26
I.4.11 KOURI (1993).....	26
I.4.12 D.GOMER (1994).....	27
I.5 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	27

CHAPITRE II : TRAVAUX DE RAMETTE	29
II.1 RAPPEL SUR LES NOTATIONS UTILISEES.....	29
II.1.1 Paramètres.....	29
II.1.2 Coefficients sans dimensions.....	30
II.2 MORPHOLOGIE ET TRANSPORT SOLIDE DES RIVIERES (FONDS PLATS).....	30
II.2.1 Equations utilisées.....	30
II.2.1.1 Débit liquide.....	30
II.2.1.2 Débit solide.....	31
II.2.1.3 Représentation graphique.....	31
II.3 MORPHOLOGIE ET TRANSPORT SOLIDE DES RIVIERES (FOND DUNAIRE).....	34
II.3.1 Ecoulement liquide.....	34
II.3.2 Transport solide.....	34
II.3.3 Introduction des paramètres sans dimensions.....	34
II.3.4 Représentation graphique.....	35
II.3.5 Interprétation graphique.....	36
II.4 INFLUENCE DU TRANSPORT SOLIDE SUR LA MORPHOLOGIE DES COURS D'EAU.....	38
CHAPITRE III : PRESENTATION DU SITE ET ESTIMATION DU DEBIT SOLIDE DANS L'OUED HARREZA	40
III.1 PRESENTATION DE LA REGION.....	40
III.1.1 Situation géographique.....	40
III.1.2 La topographie.....	40
III.1.3 Réseau d'écoulement.....	42
III.1.4 Salinité.....	42
III.1.5 Végétation.....	43
III.1.6 Géologie.....	43
III.2 HYDROLOGIE DU BASSIN VERSANT.....	44
III.2.1 Réseau pluviométrique.....	44
III.2.2 Précipitation moyenne annuelle.....	45
III.2.3 Précipitations annuelles.....	45
III.2.4 Précipitations extrêmes journalières.....	45
III.2.5 Courbe - Intensité - Durée - Fréquence.....	47
III.2.6 Etudes des écoulements.....	49
III.3 MORPHOMETRIE DU BASSIN VERSANT.....	54
III.3.1 Données morphométriques.....	54
III.3.2 Station hydrométrique.....	54
III.3.3 Présentation des données hydrométriques.....	55
III.3.3.1 Collecte des données.....	55
III.3.3.2 Dépouillement des données.....	55
III.3.4 Traitement des données.....	56

III.4 ESTIMATION DU TRANSPORT SOLIDE DANS L'OUED HARREZA.....	56
III.4.1 Calcul du transport solide en suspension.....	56
III.4.2 Calcul du transport solide par charriage.....	63
III.4.2.1 Etude granulométrique.....	63
III.4.2.2 Calcul de la pente.....	64
III.4.2.3 Evaluation du charriage.....	64
CHAPITRE IV :RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	72
IV.1 EVALUATION DU TRANSPORT SOLIDE TOTAL ANNUEL.....	72
IV.2 CALCUL DU TAUX D'EROSION.....	75
IV.3 CALCUL DU TAUX D'EROSION SPECIFIQUE PAR LA METHODE DE RAMETTE.....	77
IV.3.1 Traduction graphiques des équations	77
IV.3.1.1 Introduction des paramètres sans dimensions.....	77
IV.3.1.2 Représentation graphique.....	78
IV.3.2 Evaluation du transport solide total (charriage + suspension) et comparaison avec le modèle.....	81
IV.4 CALCUL DU TAUX D'EROSION SPECIFIQUE PAR LA FORMULE DE TIXERONT	83
IV.5 COMPARAISONS ENTRE LE TAUX D'EROSION SPECIFIQUE ET QUELQUES PARAMETRES CLIMATIQUES.....	84
IV.5.1 Pluviométrie annuelle	84
IV.5.2 Indice climatique de FOURNIER	85
IV.5.3 Indice d'ARNOLDUS.....	87
IV.5.4 Corrélation de l'érosion spécifique et la lame ruisselée	88
IV.6 ESTIMATION DU TAUX D'ENVASEMENT DU BARRAGE HARREZA.....	91
IV.6.1 Présentation du barrage	91
IV.6.2 Calcul du taux d'envasement	91
CONCLUSION GENERALE.....	92
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	94

INTRODUCTION

Le transport solide est l'un des phénomènes les plus complexes de l'hydraulique régit par de nombreux facteurs :

- Le climat de type méditerranéen, caractérisé par une nette opposition entre saison sèche et humide, faisant succéder une période de précipitations intenses et abondantes à une longue période de chaleur et de sécheresse absolue.

- La lithologie des jeunes massifs des zones semi-arides et arides, généralement de formations marneuses et argileuses offrant une structure fragile et une faible résistance aux forces érosives.

- Les régimes des cours d'eau présentant une irrégularité saisonnière et inter annuelles des écoulements. [7]

Dans les cas les moins favorables, les particules arrachées au sol finiront en un temps plus ou moins long, par venir se déposer dans les barrages, provoquant ainsi leur envasement, limitant leur capacité de stockage et leur durée de vie.

Dans notre pays, plus de 110 barrages stockent environs 4500 million de mètres cube d'eau, avec un volume utile de 1800 millions de mètres cube, sont envasés de 25% en moyenne, à voir plus dans des régions de forte érosion [12] ; le taux d'érosion spécifique atteint en Algérie les valeurs les plus importantes d'Afrique du Nord, dépassant les 2000 t/km²an sur la plupart des bassins versants de l'Atlas tellien (Rhiou, Sly, Fodda, Mazafran, Isser, Soumam...), il atteint 4000 t/km²an sur

la chaîne des cotiers Dahra et 5000 t/km²an sur le bassin d'Irhilemda [7]. Ces chiffres donnent une idée sur l'ampleur du phénomène et la gravité de ces conséquences.

Pour faire face à cette situation, depuis plusieurs années, l'Algérie a entrepris un projet de restitution du volume de stockage du barrage réservoir de Fergoug en moyen de dragages par succion, la généralisation du procédé se heurte à un coût spécifique élevé, c'est pourquoi des mesures préventives et la mise au point d'une méthodologie de lutte anti-érosive s'imposent [12].

L'oued Cheliff est le seul cours d'eau algérien qui prenant sa source dans l'Atlas saharien, vient se jeter dans la méditerranée. Son régime est d'une extrême irrégularité, la construction des barrages s'impose.

Le barrage sur l'oued Harreza (affluent rive gauche de l'oued Cheliff) est destiné à l'irrigation d'une partie du périmètre du haut Cheliff. L'étude du transport solide dans le bassin versant de l'oued Harreza et son impact sur le barrage nous permettra d'améliorer la connaissance des causes et des mécanismes de l'érosion hydrique en zone semi-aride.

La première phase de notre étude consiste en une recherche bibliographique qui permettra de faire le point sur l'état des connaissances actuelles dans le domaine de l'érosion et des transports solides, les méthodes de mesures du transport solide par charriage et en suspension ont été passées en revue.

Nous développerons dans le deuxième chapitre, les différentes étapes de la méthode de RAMETTE évaluant le transport solide charrié ainsi que le transport solide total, dans les cours d'eau tenant compte des caractéristiques géométriques du lit.

L'étude des caractéristiques géomorphologiques et hydroclimatiques du bassin versant de l'oued Harreza et l'évaluation du taux d'érosion spécifique, ainsi que l'application de la méthode de RAMETTE pour la quantification du transport solide total aux données de notre cours d'eau ont fait l'objet de la troisième phase de notre travail.

Pour achever notre travail, nous procéderons à des corrélations entre érosion spécifique et différents paramètres climatiques, des confrontations des résultats, évaluation d'envasement du barrage Harreza, ainsi qu'une estimation de celui-ci sur quelques décennies avenir.

CHAPITRE I

RECUEILS BIBLIOGRAPHIQUES ET THEORIQUES

Depuis que l'homme a commencé à modifier le relief par des travaux d'aménagement, le transport de sédiments par les écoulements occupe une place très importante dans les études morphologiques des cours d'eau ; il est même devenu un problème d'actualité.

La première partie de notre travail consiste en une recherche bibliographique, qui a permis de faire le point sur l'état des connaissances actuelles dans le domaine de l'érosion hydrique et du transport solide dans le monde, et en particulier en Algérie.

I.1 TRANSPORT SOLIDE :

I.1.1 Définition :

L'élément principal du transport solide est l'érosion hydrique qui est génératrice de dégradation des terres arables, réduisant la production agricole, et provoquant l'envasement des canaux d'irrigation.

En générale l'érosion est l'usure de la partie superficielle de l'écorce terrestre, la cause principale de l'érosion hydrique est l'eau, plus particulièrement la pluie torrentielle qui provoque l'arrachement et le ruissellement des particules solides le long du bassin versant et finissent par se posés au fond des barrages provoquant le comblement de ces derniers diminuant ainsi leur capacité de stockage d'eau.

I.1.2 Différents modes de transports solides :

La vitesse de l'écoulement et la granulométrie sont les critères essentiels pour la dynamique et le transport des matériaux arrachés Au sol. Le transport solide se fait sous les formes suivantes :

- un transport des particules fines en suspension ;
- un transport des particules grossières par charriage ;

avec les cas intermédiaires tel que le flottage, la saltation...

- Suspension :

Les grains sont suffisamment petits pour qu'ils puissent être portés vers le haut par les petits tourbillons ou courants ascendants, leurs vitesses de chute étant très faibles, ils resteront ainsi brasés au sein du fluide. La gravité des grains est compensée par les forces dues aux fluctuations turbulentes du fluide, les transports en suspensions affectent une grande continuité, ils se font sans dépôts intermédiaires sur de longues distances.

- Charriage :

Les matériaux grossiers constituant le lit du cours d'eau, sont mis en mouvement par glissement ou par roulement, ces éléments restent en contact avec le fond en permanence roulants, glissants, basculants les uns des autres.

Pour le cas du mouvement de saltation, les éléments peuvent être enlevés par un petit tourbillon ou par un courant momentanément plus fort puis soulevés et portés sur une petite distance, ils rebondissent et se reposent plus loin.

La discrimination entre ces différents modes de transport sera parfois difficile ; telle particule peut, par exemple, se déplacer par roulement puis par saltation ; une saltation dont le trajet deviendra important pourra être confondue avec une suspension.

Le charriage est un mode de transport essentiellement discontinu dans l'espace et dans le temps, il comporte des bonds courts et successifs [21] . Ainsi l'entraînement des particules solides par un écoulement liquide est essentiellement fonction de la dimension de ces particules, le chercheur américain HUG (1975) a donné une classification des particules selon leur mode de transport :

Tableau 1 : Différents aspects du transport des sédiments [14] :

Dimensions des grains	Désignation	Zones concernée	Mode de transport
De 4 à 62 μm	Silt	Lacs, retenues de barrages...	Suspension et courant de densité
De 0.24 à 4 μm	Vases	Lacs, estuaires littoral	Suspension et courant de densité
De 0.002 à 2 mm	Sable	Littoral Cours d'eau	Suspension charriage
De 2 à 64 mm	Graviers	Cours d'eau	Charriage
De 64 à 250 mm	Galets	Plages, rivières à forte pente	Charriage
> 250mm	Blocs	Torrent à très forte pente	Charriage

I.2 METHODES DE MESURE DU TRANSPORT SOLIDE :

I.2.1 Transport solide en suspension :

I.2.1.1 Mesures directes du taux de remplissage des retenues par des levées bathymétriques :

Un barrage constitue une fosse à sédiments de grande taille, le contrôle du bilan hydraulique du barrage et de la turbidité des volumes d'eau déversés permet de déduire une valeur moyenne du transport solide, les mesures bathymétriques sont réalisées à l'aide d'un échosondeur qui enregistre en continu la profondeur.

I.2.1.2 Méthodes basées sur la mesure de la turbidité au niveau des stations hydrométriques :

Ces méthodes de mesure se basent généralement, sur la détermination par échantillonnage de la concentration du matériau solide en suspension en un nombre adéquat de points ; ces prélèvements, associés aux valeurs correspondantes du débit liquide, permettent de définir le débit solide.

Dans les mesures par échantillonnage direct, il est nécessaire d'opérer de façon que la présence de l'appareil altère le moins possible le champ de mouvement et en particulier la distribution de la vitesse correspondante au point de prélèvement. Parmi les instruments ayant ces caractéristiques nous pouvons citer : les échantillonneurs à bouteille, les échantillonneurs séparateurs et les échantillonneurs autonomes.

Ces méthodes de mesures sont conçues pour l'étude des phénomènes permanents ou très lentement variables dans le temps. Afin de surmonter cette limitation, pendant ces dernières années ont été proposés de nouveaux dispositifs de mesure capable de fournir des valeurs ponctuelles et instantanées de la concentration du matériau transporté. Le grand avantage de ces dispositifs de mesure réside dans le fait qu'ils ont la possibilité de fournir et de télé transmettre la donnée en forme

digitale à un compteur central, data logger ou enregistreur. La donnée, en outre peut être relevée en continu, même en l'absence d'opérateur. [17]



I.2.2 Transport solide charrié sur le fond :

L'entraînement des matériaux du fond se produit pendant les crues, lorsque la vitesse de l'eau atteint une certaine valeur ; pour déterminer le début d'entraînement des grains et leurs parcours, on utilise les moyens suivants :

a- l'écoute sonore :

Un microphone acoustique placé dans le fond permet de signaler la mise en mouvement des matériaux du fond.

b- Traceurs radio-actifs :

Cette méthode consiste à immerger les sédiments marqués (par irradiation nucléaire ou par peinture) représentatifs du stock sédimentaire présent sur la zone d'étude, leur dispersion par rapport au point d'immersion est suivie par le compteur Geiger qui signalera le passage des éléments radio-actif, seulement cette méthode est très coûteuse.

c- Nasses de prises en rivières :

La nasse est une ossature métallique, grillagée, de forme parallélépipède ouverte sur une de ces faces, ayant une largeur égale à 0.5m, une hauteur égale à 0.25m et de longueur 0.75m. La nasse est maintenue sur le fond du lit pour une durée d'une minute, puis ramener à la surface pour pouvoir mesurer les matériaux solides captés à l'intérieur de la nasse.

L'utilisation de la nasse est très limitée car elle ne résiste pas devant une vitesse supérieure à 3.5 m/s, alors que la grande partie du transport solide charrié se fait lors des grandes crues.

d- Les tranchées creusées :

Les tranchées creusées dans le lit de l'oued perpendiculairement au courant, reçoivent les matériaux en mouvement. La valeur du charriage sur le fond est déterminée en mesurant la quantité des matériaux recueillis en un temps donné.

e- Méthode cubature :

Méthode cubature, très sûre mais qui n'est pas toujours applicable car elle demande un grand travail topographique.

On fait un relèvement topographique du fond et on suit l'évolution en calculant les volumes creusés ou déposés, les relevés doivent se faire sur une distance en longueur du lit pouvant atteindre quelques kilomètres. Cette méthode doit être complétée par une étude des fonds de façon à déterminer les parties stables et celles susceptibles d'être mises en mouvement. [17]

Le charriage reste difficilement accessible aux mesures directes sur les cours d'eau à régime torrentiel ; en laboratoire, le charriage a fait l'objet de nombreuses études expérimentales, qui ont pu donner des résultats satisfaisants.

I.3 FORMULES THEORIQUES DES TRANSPORTS SOLIDES DU FOND DANS LE MONDE :

L'étude du débit solide dans les canaux expérimentaux est plus généralement dans les cours d'eau naturels a donné naissance à plusieurs formules de calculs du débit solide de fond.

Le grand nombre de formules disponibles est le symptôme d'absence de leur universalité ; en effet les prévisions de ces formules varient considérablement parce qu'elles ne sont valables que pour les conditions spécifiques qui ont servi de base à l'établissement de leurs coefficients empiriques. Le transport des sédiments non

cohérents par l'écoulement permanent dans un cours d'eau est un phénomène très complexe, le comportement mécanique de ce mouvement biphasique est encore mal compris. La recherche de précision dans ce domaine implique de plus en plus de paramètres, ce qui complique la résolution mathématique [26]. Cependant avec l'avènement et le développement de l'informatique et de ces moyens de calculs, de grands progrès ont été accomplis. Comme nous l'avons indiqué précédemment de nombreuses formules de calculs existent, ne pouvant pas les évaluer toutes, nous en avons choisis quelques-unes des plus utilisées.

I.3.1 Théorie de DU BOYS (1879) sur le mécanisme des charriages en appliquant la formule de CHANG :

DU BOYS expliquait les charriages par le glissement les unes sur les autres, à la façon de feuillets, des couches de sable constitutives du lit et d'épaisseur «e».

Soit V la vitesse relative (vitesse relative de la dernière couche) supposée constante, d'une couche par rapport à la couche sous-jacente et « n » le nombre des couches.

On a pour expression du débit solide par unité de largeur, γ_1 étant le volume apparent du sable [22]:

$$q_s = \gamma_1 \cdot e \cdot (V + 2V + \dots + nV) = \gamma_1 \cdot e \cdot [n(n-1)/2] \cdot V \quad (I.1)$$

En admettant que la force tractrice τ croît linéairement de la couche inférieure où elle est égale à τ_{cr} (minimum qui correspond à la mise en mouvement du sable) à la couche supérieure où elle est égale à :

$$\tau = n \cdot \tau_{cr} \quad (I.2)$$

d'où :

$$n = \tau / \tau_{cr} \quad , \quad n-1 = (\tau - \tau_{cr}) / \tau_{cr}$$

et, par suite on obtient :

$$q_s = \gamma_1 \cdot e \cdot (\tau / \tau_{cr}) \cdot [(\tau - \tau_{cr}) / \tau_{cr}] \cdot V / 2 = [\gamma_1 \cdot e \cdot V / 2 \tau_{cr}^2] \cdot \tau \cdot (\tau - \tau_{cr}) \quad (I.3)$$

CHANG a proposé la formule :

$$q_s = [k \cdot n / \tau_{cr}^2] \cdot \tau \cdot (\tau - \tau_{cr}) \quad (I.4)$$

τ_{cr} étant la force tractrice qui correspond au début de l'entraînement des matériaux de fond.

DU BOYS admettait par ailleurs pour expression de la force tractrice critique τ_{cr} , correspondant à la mise en mouvement des matériaux de fond :

$$\tau_{cr} = \gamma \cdot H \cdot j \quad (I.5)$$

Avec :

γ : poids spécifique du liquide ;

H : la hauteur d'eau sur le lit ;

j : pente de la ligne d'énergie.

Finalement en posant : $\psi_D = k \cdot n / (\gamma \cdot H \cdot j)^2$, l'équation devient :

$$q_s = \psi_D \cdot \tau \cdot (\tau - \tau_{cr}) \quad (I.6)$$

avec ψ_D : coefficient représentatif de la mobilité des granulats.

I.3.2 Formules de MEYER PETER et MULLER (1948) :

Ces formules, qui relient le poids des matières solides transportées par roulement aux caractéristiques hydrauliques de l'écoulement liquide, s'appliquent pour les seules rivières ou sections de cours d'eau dont le lit est constitué de matériaux transportés et déposés par elles, puisqu'elles peuvent reprendre au cours de leurs crues ordinaires. Elles ne s'appliquent donc pas aux cours d'eau qui coulent

sur un sol rocheux, sur un lit de conglomérats insensibles à l'érosion tant que n'interviennent pas des crues de caractère exceptionnel. Pour ce dernier genre de cours d'eau dans lequel rentrent en particulier les torrents, ce sont les apports des affluents qui constituent en fait l'origine des transport solides.

Les formules de MEYER PETER impliquent un régime permanent tant du débit liquide que du débit solide, c'est à dire le parallélisme du lit et de la ligne d'eau et par suite également de la ligne d'énergie.

Le domaine de validité de la formule, pour les caractéristiques hydrauliques tel que la pente ($0.4\% < i < 20\%$) et sédimentologique ($0.4\text{mm} < d_{50} < 20\text{mm}$).

L'équation conduisant à l'expression du débit solide g_s s'écrit :

$$0,047(\rho_s - \rho)g \cdot D_{50} + 0,25 \cdot \rho^{1/3} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \right)^{2/3} \cdot g_s^{2/3} = \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} \cdot \rho \cdot g \cdot R_{H,j} \quad (I.7)$$

De cette équation on peut aisément tirer :

$$g_s = 8 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho}} \cdot (\tau - \tau_c)^{3/2} \quad (I.8)$$

En posant :

$$K = \left(\frac{8}{\rho^{1/2}} \right) \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \right) \quad (I.9)$$

Le débit solide charrié par unité de largeur du lit de l'oued, exprimé en t/s.m, devient :

$$g_s = K \cdot (\tau - \tau_c)^{3/2} \quad (I.10)$$

Avec :

$\tau_c = 0,0047(\rho_s - \rho).D_{50}$: est l'effort tranchant critique du début de charriage (contrainte de cisaillement sur le lit exprimée en t/m²).

$\tau = a.\tau_{max}$: est l'effort tranchant moyen réel (ou contrainte de frottement dépendant de l'écoulement, exprimée en t/m²) ;

- $a = (K_r/K_s)^{3/2}$: est un facteur correctif de la rugosité du lit (K_s et K_r sont les coefficients de STRICKLER dus respectivement à la rugosité globale du lit et à celle des particules seules);

- $\tau_{max} = \gamma.R_H.I$

γ : poids volumique de l'eau ;

R_H : rayon hydraulique (m) ;

I : pente moyenne de l'oued (%).

Les sections droites du cours d'eau sont assimilées à des sections rectangulaires larges, on supposera donc que le rayon hydraulique $R_H = H$ en mètres.

I.3.3 Formule d'EINSTEIN (1950) :

Les travaux d'EINSTEIN (1950) ont contribué au problème de transport de charriage, représentant d'une manière une partie des travaux de DU BOYS.

L'équation de charriage décrite est basée sur la condition d'équilibre des particules [11]. Cela implique, que le taux de particules déposées par unité de temps et de largeur est égal au taux de particules charriées (transportées) par unité de temps et de largeur.

L'auteur a montré qu'il existe une relation entre l'intensité de transport des particules par charriage exprimé par Φ , et l'intensité de cisaillement des particules exprimé par ψ :

$$\Phi = f(\psi) \tag{I.11}$$

Avec :

$$\Phi = (g_s/\gamma_s) \cdot (\rho/(\rho - \rho_s) \cdot (1/g \cdot d^3))^{0.5}$$

$$\psi = (d/i \cdot R_H) \cdot (\rho - \rho_s)/\rho$$

Suite aux travaux d'EINSTEIN ; la relation évaluée par GRAF est donnée sous la forme [11]:

$$\Phi = 10,39 \cdot \psi^{-2,52} \quad (I.12)$$

d'où :

$$\frac{g_s}{\gamma_s} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \frac{1}{g d^3}} = 10,39 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d}{i \cdot R_H} \right)^{-2,52} \quad (I.13)$$

g_s : représente le taux de transport solide par unité de largeur.

I.3.4 Formules et expériences de SELIM -YALIN :

En se basant sur les études et expériences de SCHLICHTING, SEDOV et VELIKANOV, et analysant par ailleurs des mécanismes du début d'entraînement puis de transport par saltation des matériaux solides, la formule donnée pour la mise en mouvement des matériaux solides puis pour l'évaluation quantitative des charriages[22], (début d'entraînement des matériaux de fond) :

$$\tau_0 = \gamma \cdot h_i = A \cdot (\gamma_1 - \gamma) \cdot d_m \quad (I.14)$$

avec :

h : hauteur d'eau en écoulement ;

γ : poids spécifique de l'eau ;

γ_1 : poids spécifique des matériaux de fond ;

d_m : diamètre moyen des matériaux ;

A : coefficient déterminé par la granulométrie des matériaux de fond.

Le débit solide «q» est exprimée par mètre linéaire. Une fois franchi le seuil de charriage, «q»est donné par :

$$q = B. (g/\gamma)^{1/2}. (\gamma.h_i - A. (\gamma_1 - \gamma).d_m)^{3/2} \quad (I.15)$$

la constante B dépend, comme A , de l'allure de la courbe granulométrique.

I.3.5 Formule de SCHOKLITSCH et SCHAFFERNAK :

Cette formule [22] est déduite à partir d'essais des sur modèles réduits, applicable au régime permanent et uniforme. Soient :

d : le diamètre des éléments en m/m;

i : la pente superficielle selon laquelle se fait l'écoulement des eaux ;

γ : le poids spécifique du liquide en mouvement ;

q : le débit liquide par mètre linéaire de largeur du lit ;

b : la largeur du lit ;

q_0 : le débit liquide limite au dessous duquel cesserait le transport des matériaux de diamètre d ;

Q : le débit liquide total de la section d'écoulement ;

g : le poids en kg des matériaux transportés par seconde et mètre linéaire de largeur du lit ;

G : le poids en kg des matériaux transportés dans l'ensemble de la section d'écoulement.

Les équations sont données par :

$$q_0 = 0.00001944.d / i^{4/3} \quad (I.16)$$

on a pour expression du débit solide (par unité de largeur du lit):

$$g = (7000/\gamma.i.d^{0.5}).i^{3/2}.(q-q_0) \quad (I.17)$$

et par suite :

$$G = (7000/\gamma \cdot i \cdot d^{0.5}) \cdot i^{3/2} \cdot (Q - bq_0) \quad (I.18)$$

cette formule correspond à des sédiments allant de 0,3mm à 0,5mm (elle est donnée dans le système M.K.S), elle est appliquée seulement aux sédiments grossiers et non aux sables.

I.3.6 Travaux de MC DOWELL (1989) :

Mc DOWELL a développé une relation empirique donnant le débit solide à partir de la contrainte de cisaillement du coefficient de frottement au fond et des caractéristiques des particules [8]. Cette relation a été étalonnée sur des résultats expérimentaux de laboratoire et de terrain couvrant une étendue granulométrique limitée (depuis des vases non cohésives jusqu'à 300mm de diamètre moyen) l'élaboration de cette relation a été faite selon la voie tracée par BAGNOLD (1986), les paramètres de la relation peuvent être déterminées facilement à partir des données de terrains.

m_b : débit solide par charriage ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) ;

m'_b : valeur de m_b lorsque la profondeur est d_0 et la taille des particules est D_0 ;

d : profondeur de l'eau (m) ;

d_0 : profondeur de référence (égale à 0.1m) ;

D : taille moyenne des particules (m) ;

D_0 : taille de référence des particules (égale à 1.1mm)

D_{50} : diamètre moyen des sédiments (m) ;

A_1 : coefficient empirique égale à $1.54 \cdot 10^{-3}$;

Q : densité du liquide (kg/m^3)

g : force gravité (m/s^2) ;

k : coefficient de rugosité de MANNING-STRICKLER ;

τ : contrainte de cisaillement dans le lit ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$) ;

ω : puissance de l'écoulement ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

L'écoulement est donnée par :

$$m'_b = m_b \cdot (d/d_0)^{2/3} \cdot (D/D_0)^{1/2} \quad (\text{I.19})$$

l'auteur utilise les résultats des analyses données par BAGNOLD pour le coefficient de rugosité :

$$K \approx 0.04 K_s^{1/6} \quad (\text{I.20})$$

En utilisant l'équation de MANNING-STRICKLER donnée par :

$$U = (1/K) \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2} \quad (\text{I.21})$$

La contrainte de cisaillement dans le lit est donnée par:

$$\tau = Q \cdot g \cdot R \cdot i \quad (\text{I.22})$$

la puissance du courant (de l'écoulement) est donnée par :

$$\omega = U \cdot \tau = Q \cdot g \cdot k^{-1} \cdot R^{5/2} \cdot i^{3/2} \quad (\text{I.23})$$

or:

$$\omega = (Q \cdot g)^{-1/2} \cdot k^{-1} \cdot R^{1/6} \cdot \tau^{3/2} \quad (\text{I.24})$$

Finalement, l'équation du transport solide est donnée par :

$$m'_b = A_1 \cdot (Q \cdot g)^2 \cdot m_b \cdot n^4 \cdot \tau^6 \cdot (D_{50})^{1/2} \quad (\text{I.25})$$

l'équation mise à l'épreuve a donnée des résultats très satisfaisants d'après l'auteur.

I.3.7 Formule de WHITE et ACKERS :

La formule proposée par ACKERS et WHITE [1], en 1973, pour le transport solide total peut s'écrire de la façon suivante :

$$(u_*V)^{C_1} \cdot (\gamma/\gamma_s) \cdot (h/D_{50}) \cdot C = C_2 \cdot (q_s/C_3 - 1)^{C_4} \quad (I.26)$$

où :

$$q_s = \{u_*^{C_1} / ((\gamma - \gamma_s)/\rho)^{0.5} \cdot D_{50}\} \cdot \{V/[5.656 \log(10h/D_{50})]\}^{1-C_1} \quad (I.27)$$

les coefficients C_1 , C_2 , C_3 et C_4 dépendent de la valeur du paramètre d_*

$$d_* = ((\gamma - \gamma_s)/\rho v^2)^{1/3} \cdot D_{50} \quad (I.28)$$

pour $d_* > 60.0$: $C_1=0$, $C_2=0.025$, $C_3=0.17$ et $C_4=1.5$;

dans l'intervalle $1.0 \leq d_* \leq 60.0$: $C_1 = 1.0 - 0.56 \log d_*$

$$\log C_2 = 2.86 \log d_* - (\log d_*)^2 - 3.53$$

$$C_3 = 0.23/(d_*^{1/2} + 0.14)$$

$$C_4 = 9.66/(d_* + 1.34)$$

Avec :

u_* : vitesse de frottement sur le fond ;

γ : poids volumique du fluide ;

γ_s : poids volumique du matériau du fond ;

h : profondeur de l'écoulement ;

D_{50} : diamètre médian du matériau du fond ;

ρ : masse volumique du fluide ;

ν : viscosité cinématique du fluide.

I.3.8 Formules de KARIM et KENNEDY (1990) :

Ces deux auteurs ont proposé une première formule en 1981, pour la prévision du transport solide . Plus récemment, en 1990 , ils ont suggéré une nouvelle formule sous la forme :

$$\frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}} = 0,00151 \cdot \left[\frac{V}{\sqrt{g(s-1)D_{50}}} \right]^{3,369} \times \left[\frac{u^* - u^*_{*c}}{\sqrt{g(s-1)D_{50}}} \right]^{0,840} \quad (I.29)$$

où :

q_s est le débit solide total, en volume, par unité de largeur ;

g : accélération gravitationnelle ;

s : la densité des sédiments ;

u^*_{*c} est la valeur critique de la vitesse de frottement sur la fond, définie sur la courbe de SHIELDS.

Selon KARIM et KENNEDY [15], l'équation exposée est pratiquement aussi précise que la formule établie en 1981 pour les écoulements bien au-dessus de la situation critique de début de mouvement, et, moins précise qu'elle pour les écoulements avec des concentrations faibles de sédiments.

I.4 TRAVAUX MAJEURS DU TRANSPORT SOLIDE EN ALGERIE :

L'érosion hydrique est un phénomène très répandu en Algérie, il menace gravement les potentialités en eau et en sol, tels que l'appauvrissement des terres agricoles et l'envasement des barrages. Afin de lutter contre ce problème beaucoup de travaux ont été effectués sur des bassins versants algériens dont nous allons citer quelques-uns :

I.4.1 MEDINGER (Mars 1960) :

En 1960, MEDINGER a procédé au traitement des premières séries de mesures, recueillis en Algérie sur une trentaine de bassins pour une période allant de 1946 à 1957.

L'auteur a donné les estimations des précipitations et des écoulements liquides et solides ainsi que les concentrations moyennes et maximales [20], les premiers essais qu'il a tenté en vue d'établir des relations entre débits et concentrations instantanées n'ont pas donné de résultats satisfaisants d'après DEMMAK (1982).

I.4.2 TIXERONT (Août 1960) :

Le travail de TIXERONT [29] était basé sur des données de 32 bassins situés en Algérie et 9 bassins situés en Tunisie, les superficies de ces bassins varient entre 90 et 22300 Km².

Après corrélation et homogénéisation des séries de données hydrométriques de façon à réévaluer les parties incompatibles avec l'ensemble des observations des séries de débit ; et extension des séries courtes durées par corrélation avec les séries longues durées (sur des stations d'un même bassin ou de deux bassins voisins).

L'auteur regroupe les bassins en trois classes suivant un critère régional (Tunisie, département de Constantine, département d'Alger) ; ceci pour mettre en évidence l'effet relatif des facteurs qui entrent en jeu tels que :

- Précipitations et ruissellements annuels ;
- Facteurs géomorphologiques et lithologiques ;
- Répartition saisonnière des précipitations ;
- Climat et couverture végétale.
- Mise en valeur agricole.

TIXERONT a donné une estimation du taux d'abrasion en fonction de la perméabilité du bassin et du ruissellement annuel :

$$Ta = K.R^{0.15} \quad (I.30)$$

Avec : Ta = taux d'abrasion en [t/Km² an] ;

R : lame ruisselée en [mm].

K : paramètre empirique variant suivant le degré de perméabilité des bassins versants :

K = 75 pour les terrains à perméabilité élevée ;

K = 350 pour les terrains à perméabilité moyenne ;

K = 1400 pour les terrains à perméabilité faible ;

K = 3200 pour les terrains imperméables.

Les travaux de TIXERONT donnent les conclusions suivantes :

- e- les teneurs en suspensions augmentent quand le ruissellement diminue ;
- f- les terrains des régions jeunes sont les plus susceptibles à l'érosion ;
- g- les bassins à forte abrasion se situent dans des régions sismiques ;
- h- en se basant sur la répartition pluviométrique, l'auteur différencie trois zones :

Tableau 2 : Répartition du taux d'érosion en fonction de la pluviométrie.

Zone	Taux d'érosion
Pluviométrie inférieure à 300mm	Nul
Pluviométrie entre 300 et 700mm	>1200 t/km ² an
Pluviométrie supérieure à 700mm	< 350 t/km ² an *

* : l'effet du substratum est masqué un couvert végétal assurant une excellente protection quelle que soit la nature du terrain.

I.4.3 Formule de FOURNIER (1960):

FOURNIER a estimé le taux d'abrasion à partir de la pluie, en faisant intervenir le relief et le type de climat, la relation donnée pour un climat semi-aride et un bassin où le relief est accentué, s'écrit :

$$Ta = 52.49 (P^2/\bar{P}) - 513.21 \quad (I.31)$$

où :

Ta : taux d'abrasion (t/km² an) ;

P : pluie moyenne des mois les plus arrosés ;

\bar{P} : pluie moyenne inter-annuelles.

I.4.4 CAPOLINI (1965-1969) :

CAPOLINI a entamé une étude géomorphologique régionale sur le bassin de Chellif basée sur l'analyse morphométrique (densité de drainage, coefficient de torrentialité) ; Cette étude a donné des résultats satisfaisants sur les bassins versants de Rhiou et de Fodda, où il apparaît une bonne corrélation de torrentialité-géomorphologique . Les résultats ont été généralisés pour l'ensemble du bassin de l'oued Chellif. Capolini a proposé :

- une quantification des débits solides spécifiques à chaque formation lithologique ;
- une relation statistique entre l'érosion spécifique des bassins versants et le coefficient de torrentialité ;
- une méthode de cartographie des zones susceptibles à l'érosion à partir de la répartition spatiale du coefficient de torrentialité, en partant de l'hypothèse, vérifiée sur les bassins de Fodda et de Rhiou que les zones fortement érodées coïncident avec les zones à fort coefficient de torrentialité [7].



I.4.5 SOGREAH (Avril 1969) :

L'étude est basée sur les données d'observations recueillies au niveau de 9 barrages et 18 stations hydrométriques, les durées d'observations sont très variables. Le transport solide des oueds est défini en fonction du ruissellement annuel de crue et de la perméabilité des bassins versants. Les résultats inspirés de la formule de TIXERONT, sont représentés sous forme d'une relation graphique traduisant les relations de la forme :

$$T_s = \alpha \cdot A^\beta \quad (I.32)$$

Avec :

T_s : dégradation spécifique exprimée en t/km²an ;

A : apport moyen annuel exprimé en mm ;

$\beta = 0.15$;

α : paramètre empirique variant avec le degré de perméabilité des bassins versants , allant de 3,3 (bassin à perméabilité importante) à 3200 (bassin imperméable) [17].

L'estimation du degrés de perméabilité (rapport entre écoulement de crue annuel moyen et écoulement de base annuel moyen) présente une lacune pour cette étude.

I.4.6 SARI (1977) :

SARI, se basant sur les travaux de GRECO (1966), postule dès la préface de sa monographie 'l'homme et l'érosion dans l'ouarsenis' que l'érosion est due pour l'essentiel à l'agriculture de subsistance des paysans de montagne et se demande comment cette subsistance peut être garantie à la longue.

Il conclut que l'exploitation des sols telle qu'elle se pratique n'est pas compatible avec leur protection. Les mesures préconisées par SARI tendent à la reconstitutions de la forêt [27].

I.4.7 DEMMAK (1982) :

DEMMAK a démontré qu'il existe une corrélation entre la lithologie et les formes d'érosions, à chaque forme d'érosion peut être associée une concentration moyenne des charges en suspension, et que les apports solides ont lieu essentiellement au printemps lors des crues généralisées sur sol saturé.

En généralisant ces résultats aux données de débit solide recueillis sur 30 bassins versants représentatifs des différentes conditions physiques, géomorphologiques et climatiques de l'Algérie du Nord, DEMMAK a pu élaborer une relation empirique de la forme suivante :

$$\text{TSS} = 26.62 I_L + 5.07 I_P + 9.77 C_T - 593.56 \quad (\text{I.33})$$

- TSS : Transport solide spécifique moyen annuel ($t/\text{km}^2 \text{ an}$) ;
- I_L : Indice Lithologique =superficie des formations marneuses et argileuses du crétacé supérieur et la tertiaire, exprimée en pourcentage de la superficie du bassin.
- I_P : Indice de précipitations érosives égale au produit du pourcentage des précipitations annuelles tombées sous forme des pluies supérieures à un seuil donné par la fréquence de ces précipitations.
- C_T : Coefficient de torrentialité , donné par: $C_T = D_d \cdot F_1 = (\sum L_x/A) \cdot (N_1/A)$
 D_d : densité de drainage (longueur totale du réseau fluvial ramené à l'unité de surface) ;
 N_1 : Nombre des thalwegs élémentaires.

Basée sur des variables faciles à calculer et disponibles sur l'ensemble du territoire, la relation proposée par DEMMAK [7] permet de simuler correctement les transports solides spécifiques moyens annuels supérieurs à 500 t/km² an à l'exutoire de bassins allant de 100 à 3000 km².

Son utilisation doit rester cependant limitée aux bassins comportant un pourcentage de formations marneuses érodables supérieur à 10% et une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 300 mm [7].

Dans sa thèse DEMMAK montre que l'agressivité des pluies est faible en Algérie, et par conséquent l'érosion pluviale. D'après l'auteur la construction des banquettes anti-érosives et le boisement de grandes surfaces ont gêné l'agriculture et sont dangereuses en vue de l'érosion voire même l'accélèrent [12].

I.4.8 SHEN et HUNQ (1987) :

Parmi les formules appliquées en Algérie, celle de SHEN et HUNQ [21], ces derniers ont estimé le transport par charriage à partir des paramètres physiques tels que la vitesse d'écoulement (V) exprimée en mètre par seconde, la vitesse de chute du grain moyen en poids (W) exprimée en mètre par seconde et qui est liée au diamètre moyen des grains d₅₀ exprimé en millimètres :

- $W = 0.126.d_{50} - 0.0056$ si $0.05 < d_{50} < 1 \text{ mm}$;
- $W = 0.065 d_{50} + 0.055$ si $1 < d_{50} < 5 \text{ mm}$.

Ils calculent la grandeur :

$$Y = V.I^{0.57}/W^{0.32} \quad (I.34)$$

I : pente

Pour $Y > 0.1$: $\log_{10}C = -0.307(\text{Log}Y)^2 + 1.432(\text{Log}Y) + 4.541$

Pour $Y < 0.1$: $\log_{10}C = -0.854(\text{Log}Y)^2 + 0.769(\text{Log}Y) + 4.450$

C : étant la concentration exprimée en mg/l.

Cette formule a été appliquée sur des données de onze plus fortes crues observées depuis 1970 à la station de la Traille sur le bassin versant de l'Isser en 1987.

I.4.9 ARABI (1991) :

L'auteur confirme la faiblesse de l'érosion pluviale en Algérie, par conséquent, le fait que le ruissellement constitue un facteur essentielle pour la détermination du transport solide dans les bassins versants.

Pour la protection des sols contre l'érosion, il conviendrait d'après ARABI de favoriser l'infiltration, de végétaliser et corriger les ravins [2].

I.4.10 MEDDI (1992) :

MEDDI reprend les anciennes positions de SARI (1977) et GRECO (1966) dans la discussion des causes de l'érosion des sols, la méthode qu'il préconise se prête à la détermination générale des zones fournissant beaucoup ou peu de sédiment en suspension par les démarches du type boîte noire [19].

I.4.11 KOURI (1993) :

L'auteur étudie d'une manière détaillée l'évolution des ravins de la zone pilote Taassalet et décrit les processus d'érosion observables, il établit par analyse statistique une classification des ravins en fonction de la lithologie, de la pente, de la morphologie des ravins. Cinq types des ravins sont obtenus par cette classification ce qui permet pour des zones à précipitation et débits analogues, d'appréhender et d'évaluer qualitativement les formes d'érosions dominantes [16].

I.4.12 D.GOMER (1994) :

GOMER a donné un modèle opérationnel d'écoulement et d'érosion particulièrement robuste et, dont l'application exige un nombre relativement réduit de données d'entrée, ce modèle est donc applicable sur les bassins versants marneux en climat semi-aride.

Le modèle de GOMER est appliqué en Algérie dans la zone du bassin versant de l'oued Mina, ce qui a généré un résultat social essentiel puisqu'il a démontré que le boisement par des arbres tel que les pins et les eucalyptus sur des marnes ne protège pas le sol de l'érosion, plutôt le travail du sol par les paysans sur des cultures céréalières limite considérablement l'érosion[12].

I.5 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE:

Dans ce chapitre, nous avons voulu résumer les connaissances de base pour l'estimation quantitative du débit solide de fond et du débit solide total. Plusieurs méthodes connues ou récentes ont été citées ; l'analyse des formules, nous permet de conclure que les variables caractéristiques de l'écoulement sont pratiquement les mêmes. Le diamètre caractéristique utilisé est presque toujours le même (D_{50}), mis à part les formules de ACKERS et WHITE utilisent le diamètre (D_{35}).

Les formules comme celle de MEYER-PETER et MULLER, prévoient le transport solide par charriage, alors que les autres formules prévoient le transport solide total.

Lorsque le débit solide est une fonction de $(\tau - \tau_0)$ ou $(q - q_0)$, les formules du type «formule de DU BOYS» donnent un débit solide nul lorsqu'un seuil de début de transport n'a pas été franchi ($\tau < \tau_0$; $q < q_0$) ; d'autre part le travail de KARIM et KENNEDY donne une valeur continue de g_s au faible transport solide[18].

L'analyse des travaux effectués en Algérie, nous permet de classer ces derniers comme suit :

- Formules basées sur des paramètres climatiques, géomorphologiques, et hydrographiques, ces derniers considérés comme les facteurs principaux de l'érosion à l'échelle d'un bassin versant.
- Formules du type «SHEN et HUNQ» basées sur des paramètres physiques tels que la vitesse de l'écoulement et la vitesse de chute des grains moyens.

Les travaux réalisés sur différentes régions visent à affiner une méthodologie de lutte anti-érosive et de concevoir des méthodes adaptées aux conditions aride et semi-aride.

CHAPITRE II

TRAVAUX DE RAMETTE

Suite à de nombreuses études expérimentales, en tenant compte des caractéristiques géomorphologiques moyennes du lit (la largeur, la profondeur et la pente); RAMETTE a trouvé intéressant de confronter les relations expérimentales avec celles qui se déduisent des études théoriques morphologiques entreprises par ailleurs; un ajustement de certains paramètres et la prise en compte par charriage sur fond plat permettent d'obtenir une comparaison satisfaisante entre expérience et théorie.

Ces lois théoriques établies entre débits liquides et débits solides, associées aux études hydrologiques conduites par ailleurs, peuvent aider à définir l'ordre de grandeur des apports solides moyens annuels.

II.1 RAPPEL SUR LES NOTATIONS UTILISEES :

II.1.1 Paramètres :

Une rivière peut être schématiquement définie par des paramètres géométriques tel que : la profondeur, la largeur du lit; et des paramètres 'moteurs' tel que : le débit, la pente, le diamètre moyen des sédiments... Les paramètres utilisés sont notés par :

J : pente de la ligne d'énergie ;

Q_L : débit liquide (m^3/s) ;

Q_S : débit solide (m^3/s) ;

B : largeur du lit (m) ;

H : profondeur moyenne ;

K : coefficient de rugosité de MANNING STRICKLER ($m^{1/3} \cdot s^{-1}$) ;

d_m : (= d) diamètre moyen de la courbe granulométrique (m) ;

δ : densité du sédiment ;

R_H : rayon hydraulique = $(B \cdot H) / (B + 2H)$

II.1.2 Coefficients sans dimensions :

Dans son travail, RAMETTE introduit les coefficients sans dimensions suivants :

α : coefficient minorateur de la pente,

β : allongement = B/H ;

Φ : coefficient d'entraînement des sédiments = $R_H \cdot J / (\delta - 1) \cdot d_m$;

II.2 MORPHOLOGIE ET TRANSPORT SOLIDE DES RIVIERES (FONDS PLATS) :

II.2.1 Equations utilisées :

Le transport solide s'effectue par charriage et sur fonds plat, quel que soit le débit. L'expression du charriage est donnée par la relation de MEYER-PETER, en l'absence de dunes [24].

II.2.1.1 Débit liquide :

L'écoulement liquide obéit à une loi du type MANNING-STRICKLER :

$$Q_L = K \cdot B \cdot H \cdot (R_H)^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (\text{II.1})$$

avec K coefficient de rugosité donné par :

$$K = (21/d^{1/6}) \cdot (d/H)^{1/24} \quad (\text{II.2})$$

L'introduction des coefficients sans dimension données ci-dessus, conduit à l'expression suivante (en regroupant les données dans le 1^{er} terme) :

$$Q_L \cdot J^{13/6} / (\delta - 1)^{21/8} \cdot d^{5/2} = 21 \cdot \Phi^{21/8} \cdot (\beta + 2)^{47/24} / \beta^{23/24} \quad (\text{II.3})$$

d'où :

$$X = 21. \Phi^{21/8} . (\beta + 2)^{47/24} / \beta^{23/24} \quad (\text{II.4})$$

II.2.1.2 Débit solide :

Le débit solide est donnée par la formule de MEYER-PETER :

$$Q_s = 13,7. \delta. (\delta - 1)^{3/2} . B. d^{2/3} . [\alpha. \Phi - 0,047]^{3/2} \quad (\text{II.5})$$

L'introduction des coefficients sans dimensions, et en tenant compte de l'hypothèse de fond plat ($\alpha=1$), l'équation devient :

$$Q_s.J / \delta. (\delta - 1)^{3/2} . d^{5/2} = 13,7. (\beta + 2). \Phi. (\Phi - 0,047)^{3/2} \quad (\text{II.6})$$

d'où :

$$Y = 13,7. (\beta + 2). \Phi. (\Phi - 0,047)^{3/2} \quad (\text{II.7})$$

II.2.1.3 Représentation graphique :

L'abaque de RAMETTE (figure-1) traduit les expressions (II.4) et (II.7). Elle peut être tracé de la manière suivante :

- Tracer les courbes $X = f(\Phi)$ avec β comme paramètre en utilisant la formule du débit liquide (II.4) ;
- Tracer les courbes $X = f(\Phi)$ avec Y comme paramètre en utilisant l'équation $X = f(Y, \Phi)$ établie de la manière suivante :

$$X = (21. Y^{47/24} . \Phi^{13/8}) / 13,7. (\Phi - 0,047)^{3/2} . [Y - 27,4. \Phi. (\Phi - 0,047)^{3/2}]^{23/24} \quad (\text{II.8})$$

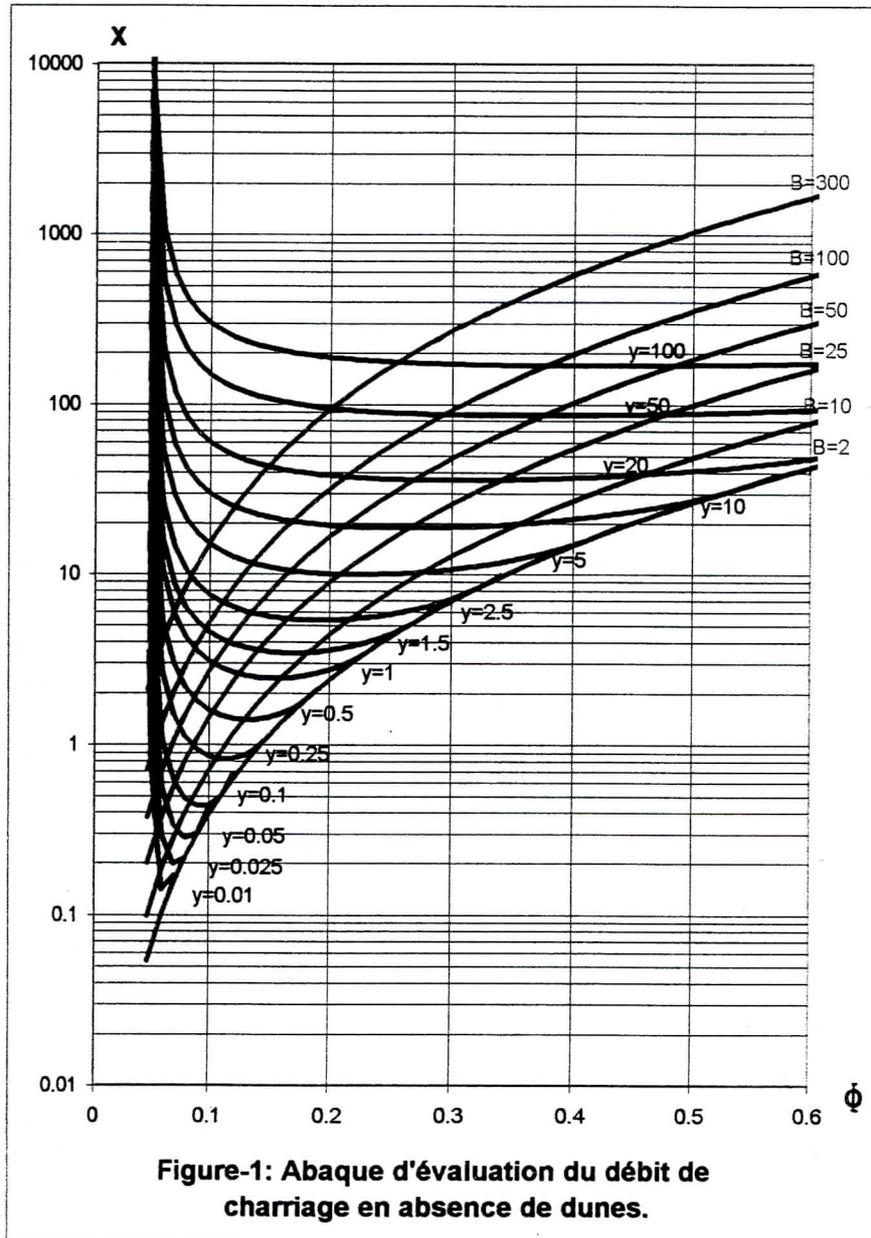
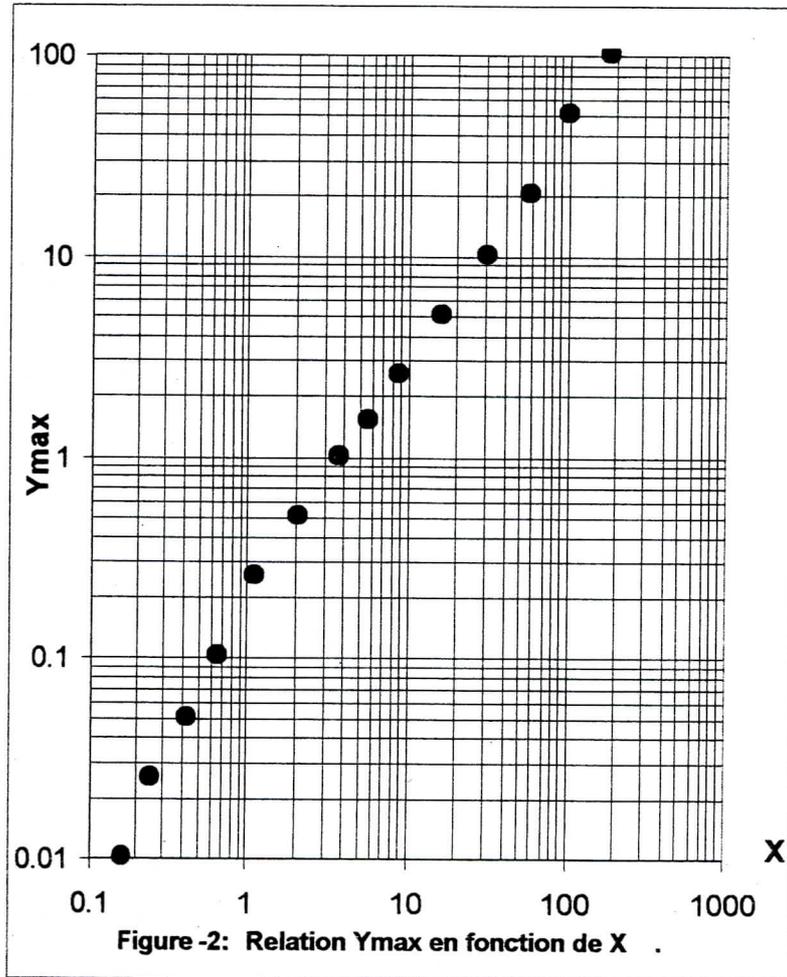


Figure-1: Abaque d'évaluation du débit de charriage en absence de dunes.

Finalement, on tire le débit solide maximum en fonction du débit liquide ; la variation ainsi que la relation entre ces deux débits (Y et X) seront données par la figure-2.



Nota : Les coefficients numériques 21 et 13.7 qui interviennent dans les expressions de K, X et Y respectivement dans les équations (II.2), (II.4) et (II.7) ont la dimension $L^{1/2}T^{-1}$. Les valeurs de ces coefficients peuvent donc être calculées dans un autre système d'unité n'utilisant pas le mètre comme de longueur (L) ou la seconde comme unité de temps(T).

II.3 MORPHOLOGIE ET TRANSPORT SOLIDE DES RIVIERES (FOND DUNAIRE) :

II.3.1 Ecoulement liquide :

Le débit liquide obéit à la loi du type MANNING-STRICKLER :

$$Q = K.(B.H)^{5/3} . J^{1/2} / (B+2H)^{2/3} \quad (II.9)$$

K est le coefficient de rugosité du lit que nous expliciterons plus loin.

II.3.2 Transport solide :

Deux types de lois sont à prendre en compte selon le transport solide s'effectue par charriage seul ou bien par charriage et suspension. Pour chacun de ces modes de transports, RAMETTE [23] a adopté les lois suivantes établies avec une densité du sédiment $\delta=2,6$.

- Débit solide charrié est donné par la formule de MEYER-PETER (M.P):

$$G_{MP} = 40,5.B.d^{3/2} . (\varepsilon\Phi - 0.047)^{3/2} \quad (II.10)$$

- Débit solide total (charriage et suspension) est exprimé par la formule d'ENGLUND HANSEN (E.H) :

$$G_{EH} = 0,032.B.K^2 . R_H^{1/3} . d^{3/2} . \Phi^{5/2} \quad (II.11)$$

II.3.3 Introduction des paramètres sans dimensions :

Les paramètres sans dimensions utilisés sont :

$$\beta = B/H, \quad \Phi = R_H . J / (\delta - 1) . d \quad \text{et} \quad \varepsilon = K/K_r$$

Dans le cas des dunes K/K_r peut être exprimé par l'équation suivante :

$$\varepsilon = K/K_r = (0,06 + 0,41 \Phi^2)^{5/8} / \Phi^{5/8} \quad \text{pour } 0,062 < \Phi < 2,5 \quad (\text{II.12})$$

Les équations citées ci-dessus deviennent :

- Débit liquide donné par MANNING-STRICKLER :

$$Q_L \cdot J^{13/6} / d^{5/2} = 91 \cdot (0,06 + 0,41 \Phi^2)^{5/8} \cdot \Phi^{2,04} \cdot (\beta + 2)^{47/24} / \beta^{23/24} \quad (\text{II.13})$$

- Débit solide charrié donnée par MEYER PETER :

$$G_{MP} \cdot J / d^{5/2} = 72 \cdot \Phi \cdot (\varepsilon \cdot \Phi - 0,045)^{3/2} \cdot (\beta + 2) \quad (\text{II.14})$$

- Débit solide par charriage et suspension d'ENGLUND HANSEN :

$$G_{E.H} \cdot J^{4/3} / d^{5/2} = 40,5 \cdot \Phi^{2,58} \cdot (0,06 + 0,41 \Phi^2)^{5/4} \cdot (\beta + 2) \quad (\text{II.15})$$

Le choix de l'équation de transport solide : équation II.14 (transport solide par charriage) ou équation II.15 (transport solide par charriage et suspension) reste indéterminé ; cette indétermination sera levée ultérieurement.

II.3.4 Représentation graphique :

Pour faire les tracés des courbes, on utilise les débits réduits suivants :

$$X = Q_L \cdot J^{13/6} / d^{5/2} \quad (\text{II.16})$$

$$Y = G_{MP} \cdot J / d^{5/2} \quad (\text{II.17})$$

$$Z = G_{E.H} \cdot J^{4/3} / d^{5/2} \quad (\text{II.18})$$

L'abaque de RAMETTE traduit les expressions (II.13), (II.14) et (II.15) ; elle est tracée de la manière suivante (figure -3) :

- Tracer les courbes $X = f(\Phi)$ avec β comme paramètre en utilisant la formule du débit liquide (II.13) ;
- Tracer les courbes $X = f(\Phi)$ avec Y comme paramètre en utilisant l'équation $X = f(Y, \Phi)$ établie de la manière suivante :

$$X = 91.(0.06+0.41\Phi^2)^{5/8} \cdot \Phi^{2.04} \cdot [Y/72\Phi(\epsilon\Phi - 0.045)^{3/2}]^{47/24} \cdot [1/[(Y/72\Phi(\epsilon\Phi - 0.045)^{3/2}) - 2]^{23/24}] \quad (II.19)$$

- Tracer les courbes $X=f(\Phi)$ avec Z comme paramètre, en utilisant l'équation $X=f(Z, \Phi)$ établie par la relation :

$$X = 91.(0.06+0.41\Phi^2)^{5/8} \cdot \Phi^{2.04} \cdot [Z/40,5\Phi^{2.58}(0.06+0.41\Phi^2)^{5/4}]^{47/24} \cdot [1/[Z/(40,5\Phi^{2.58}(0.06+0.41\Phi^2)^{5/4}) - 2]^{23/24}] \quad (II.20)$$

II.3.5 Interprétation graphique :

D'après la figure-3, RAMETTE déduit que pour les valeurs de Φ proche de 0,4 un phénomène de "déferlement" des dunes intervient, accompagné d'une mise en suspension des sédiments ; cette valeur sépare le domaine charriage seul du domaine ou la suspension apparaît :

$\Phi < 0,4$: domaine du charriage ; c'est l'équation de MEYER-PETER qui doit être prise en compte.

$\Phi > 0,4$: domaine du charriage + suspension ; c'est l'équation d'ENGELUND HANSEN qui intervient.

Ainsi l'indétermination liée au choix de l'équation du transport solide est levée.

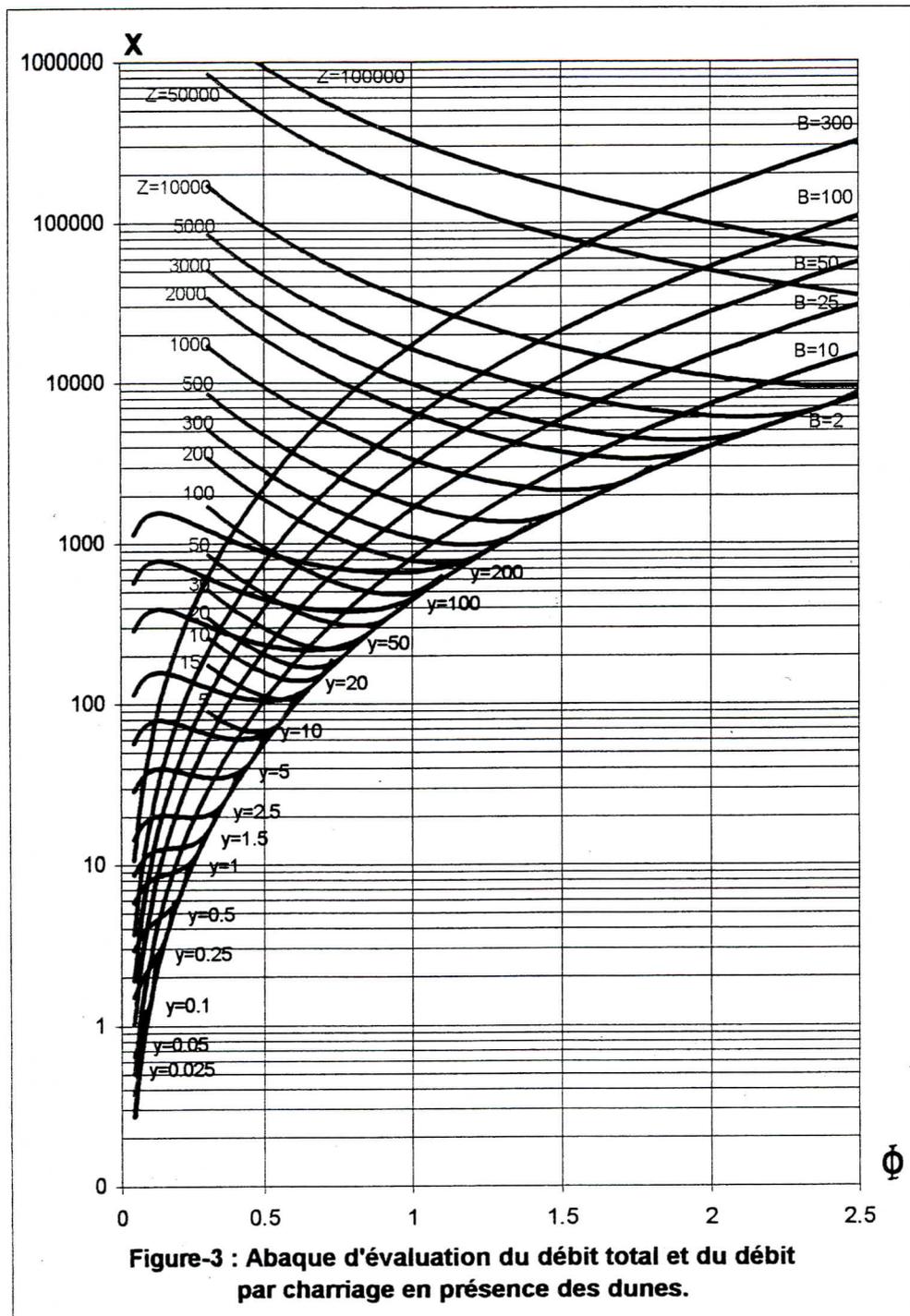


Figure-3 : Abaque d'évaluation du débit total et du débit par charriage en présence des dunes.

Sur la figure-3, nous pouvons aussi distinguer deux grandes catégories de lits morphologiquement stables séparées par :

- $Q_L \cdot J^{13/6} / d^{5/2} < 50$: domaine des rivières sans dunes et qui peuvent atteindre une très grande largeur vis-à-vis de leur profondeur.
- $Q_L \cdot J^{13/6} / d^{5/2} > 50$: domaine des rivières avec transport solide important généralement sous forme de dunes pour le charriage, mais avec une suspension intense.

II.4 INFLUENCE DU TRANSPORT SOLIDE SUR LA MORPHOLOGIE DES COURS D'EAU :

L'objectif de RAMETTE est de montrer que les configurations morphologiques les plus courantes des cours d'eau naturels : méandres, lits en tresses correspondent probablement à une 'dégénérescence' du lit rectiligne liée à une diminution relative du transport solide[25].

Un cours d'eau naturel ajuste sa morphologie pour évacuer, d'une part un débit liquide Q_L , d'autre part un débit solide Q_S correspondant au volume solide mis à disposition par érosion du bassin. Au transport solide initial peut s'ajouter l'érosion des berges et du fond, le lit ainsi saturé en débit solide présente des méandres.

Les équations utilisées sont :

- Equations de LACEY concernant le périmètre mouillé et le rayon hydraulique donné par : $P = 4,81 \cdot Q_L^{1/2}$
 $R = 0,127 \cdot Q_L^{1/2} / d^{1/6}$
- Equations de MEYER-PETER et d' ENGELUND HANSEN citées précédemment.

Tenant compte du fait que la pente d'un lit rectiligne est maximale car elle correspond à celle de la plaine dans laquelle il s'écoule ; un lit à méandre dans cette même plaine présente une pente moindre et à donc une capacité de transport solide plus faible.

CHAPITRE III

PRESENTATION DU SITE ET ESTIMATION DU DEBIT SOLIDE DANS L'OUED HARREZA

III.1 PRESENTATION DE LA REGION :

L'oued Cheliff est le seul cours d'eau algérien qui prenant sa source dans l'Atlas saharien, vient se jeter dans la méditerranée. L'oued Harreza est un affluent rive gauche du Chélif.

En raison de la disponibilité d'une longue série de données hydro-pluviométrique, nous avons choisi le bassin versant de l'oued Harreza pour nous servir de base d'étude sur le transport solide.

III.1.1 Situation géographique :

Le bassin versant de l'oued Harreza fait partie d'un ensemble de bassin plus vaste qui est le bassin de l'oued Cheliff (figure-4). Il se trouve à 120 Km à l'Ouest d'Alger, et est situé entre 2° et $2^{\circ}40'$ de longitude Est et entre 36° et $36^{\circ}40'$ de l'altitude Nord drainant une superficie de 142 Km^2 .

L'oued Harreza parcourt une distance de 17 Km avec une orientation Nord-Ouest.

III.1.2 La topographie :

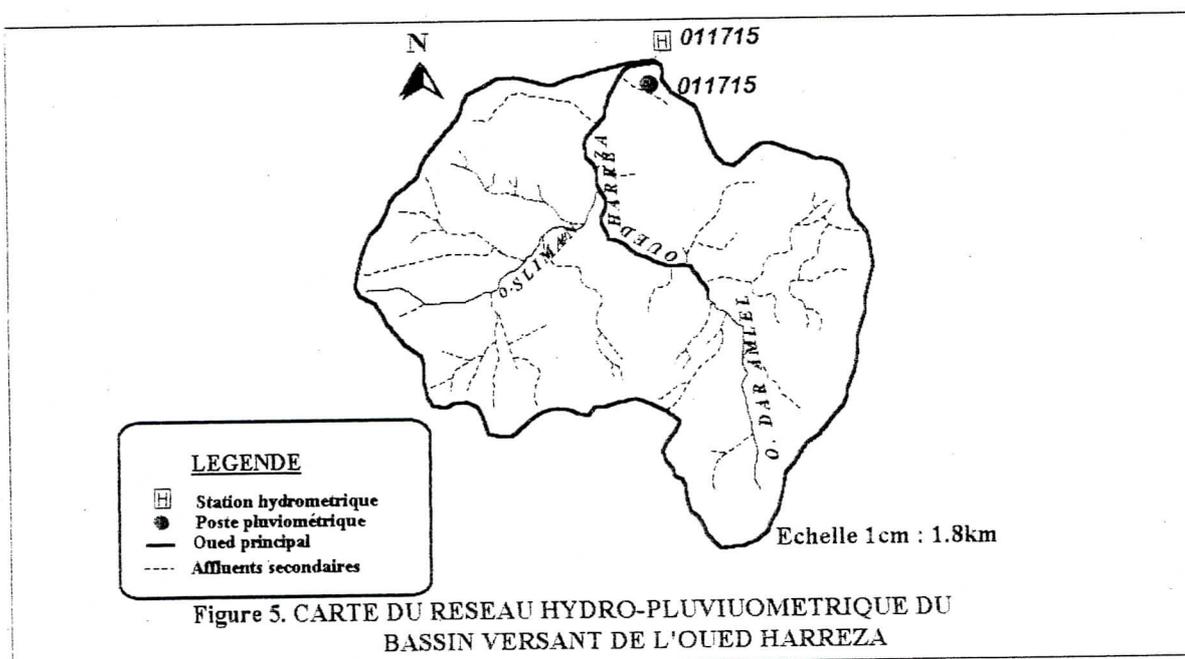
L'altitude moyenne du bassin versant est de 500 mètres, le relief devient plus important dans la partie sud du bassin jusqu'à atteindre une altitude de 765 mètres, le point le plus bas se trouve à l'exutoire ayant une altitude de 313 mètres.



III.1.3 Réseau d'écoulement :

Le bassin versant est drainé par l'oued Harreza et ces affluents (figure-5) ; de l'est l'oued Dar Emlal prenant sa source dans le relief de Beni zougzoug vient se jeter dans l'oued Harreza, pas très loin l'oued Slimane se joint à l'oued principal en drainant la partie ouest du bassin versant.

L'écoulement souterrain est caractérisé par une nappe phréatique repérée à une profondeur moyenne de 5 m dans la terrasse alluviale grâce à des puits de reconnaissance et aux excavations effectuées à droite du site du barrage [3].



III.1.4 Salinité :

Les valeurs de la salinité dans l'oued de Harreza données par le bureau des ressources hydraulique [13] sont :

- Salinité maximale mesurée : 2.04 g/l pour un débit de 0.2 m³/s.
- Salinité minimale mesurée : 0.14 g/l pour un débit de 0.1 m³/s.

III.1.5 Végétation :

La végétation se présente comme un facteur important et conditionnel du phénomène d'érosion. La couverture végétale dans le bassin versant de Harreza est assez importante, elle est estimée à la moitié de la superficie totale du bassin et s'étend plus particulièrement à sa la partie sud.

III.1.6 Géologie :

Le bassin versant de Harreza est situé dans la zone géologique comprise entre le massif schisteux de Boumaad et les premiers contreforts de l'Ouarsenis. Cette zone comprend les massifs montagneux des Zaccars, la partie orientale du Doui, la plaine de Cheliff et les collines occidentales des Beni-Menacer [10].

Les reliefs d'une altitude supérieure à 1500 mètres, sont formés de calcaire, de schistes métamorphisés et de roches éruptives profondément entaillées par les ravins abrupts, ils sont couverts de chênes verts et de quelques boisements et pins localisés. Des blocs ondulés de grés quartzites et schistes primaires reposent sur des formations éruptives, descendant vers la plaine par une série de contreforts[10].

Les formations schisteuses, secondaires et tertiaires s'enfoncent au sud sous la plaine du Chelif à des altitudes inférieures à 250 mètres. Un chevelu de ravineaux, souvent étroits encombrés d'éboulis, découpent les schistes et quartzites du crétacé, souvent couverts de broussailles, le crétacé est parfois complètement dénudé, sauf dans les régions forestières. Les marnes miocènes offrent de plus larges collines avec le modèle spécial des pays des argileux. Elles constituent, avec la plaine du Cheliff, les régions cultivées [9].

En limitant l'étude géologique au bassin versant drainé par l'oued Harreza, on remarque que le sommet de la colline est constitué d'un ensemble de plis affectant

l'épaisse série allant du quaternaire au primaire, recouvert de galets de quartzites disséminés et résidus des couches quaternaires.

Sur la rive droite nous avons une altération des schistes une formation datée l'albien, crétacé moyen, des galets roulés apparaissent ainsi que des argiles rouges. Sur la rive gauche, des matériaux argilo-détritique présentant parfois un faciès conglomératique.

Sous le substratum formé par des schistes très altérés de couleur jaune (causée par le dépôt de calcaire qui masque partiellement le substratum), des schistes beaucoup plus compacts de couleur gris sombre forment la base série, à l'intérieur de ces schistes se trouvent des petits niveaux de quartzites et même de gros bancs très plissés et tectonisés. Dans certaine zone, ces terrains sont surmontés par des matériaux détriques plus récents.[3]

Au fond de la vallée sont installés des limons argileux bruns, soit directement sur le substratum de l'albien, soit sur des alluvions appartenant au miocène [3]. La présence de marne et d'argile occupant la terrasse de la vallée en grand pourcentage nous permet de conclure que le sol du bassin versant est du type peu perméable.[13]

III.2 HYDROLOGIE DU BASSIN VERSANT :

Les précipitations et l'écoulement sont deux facteurs importants en ce qui concerne l'érosion du sol. L'intensité d'une pluie agit comme source d'énergie pour la séparation des particules du sol, et l'écoulement comme moyen de leur ruissellement.

III.2.1 Réseau pluviométrique :

Le réseau pluviométrique existant à l'intérieur du bassin se limite à deux stations dont l'une est équipée d'un pluviographe, comme le montre le tableau 3.

Pour les besoins de l'étude statistique des précipitations du bassin versant, nous avons utilisé les données du poste pluviométrique d'El Ababssa de code (011715) vu sa longue durée d'observation.

Tableau-3 : Réseau pluviométrique.

Station	Equipement	Altitude (z)	Mise en service	X	Y
El Ababssa	P.V	320	1972	443.95	318.05
Harreza Bge	P.V + P.G + Bac	312	1985	445.35	321.40

III.2.2 Précipitation moyenne annuelle :

La méthode des isohyètes appliquée à la carte de l'Algérie du nord par CHAUMON et PAQUIN [6] pour une période de calcul allant de 1913 à 1963, nous a permis de déterminer la précipitation moyenne annuelle égale à 450 mm.

III.2.3 Précipitations annuelles :

L'analyse statistique des précipitations annuelles, dans le bassin de HARREZA (tableau-4), l'utilisation du test de KHI DEUX pour la série d'observation de la station EL ABABSSA permet l'ajustement de cette dernière la loi de GAUSS, les résultats sont illustrés dans la figure 6.

III.2.4 Précipitations extrêmes journalières :

La même station pluviométrique a été étudiée pour les pluies extrêmes journalières, pour laquelle la loi Log-normale a été le mieux ajustée. La figure-7 montre l'ajustement graphique de la précipitation journalière maximale en fonction de la variable de GAUSS ; les valeurs correspondantes à cet ajustement sont regroupées dans le tableau 5.

Tableau 4 : Ajustement à une loi de Gauss

Moyenne=406.135
Ecart-type=72.977

Taille N=23
I.C. à (en%)=80%

U Gauss=1.282

Valeurs classées	m	Fréquence expérim	Variable réduite	Valeur expérim.	Valeur théorique	Borne inf.	Borne sup.
288	1	0.0217	-2.0195	288	258.8	218.0	288.6
288.9	2	0.0652	-1.5127	288.9	295.7	262.0	321.3
306.9	3	0.1087	-1.2336	306.9	316.1	285.9	339.6
325.7	4	0.1522	-1.0271	325.7	331.2	303.4	353.4
328.9	5	0.1957	-0.8571	328.9	343.6	317.6	364.9
335.8	6	0.2391	-0.7088	335.8	354.4	329.9	375.1
360.9	7	0.2826	-0.5747	360.9	364.2	340.8	384.5
370.1	8	0.3261	-0.4503	370.1	373.3	350.8	393.3
378.9	9	0.3696	-0.3326	378.9	381.9	360.2	401.7
389.4	10	0.4130	-0.2193	389.4	390.1	369.1	410.0
393.8	11	0.4565	-0.1089	393.8	398.2	377.6	418.2
424.3	12	0.5000	0.0000	424.3	406.1	385.9	426.4
424.4	13	0.5435	0.1089	424.4	414.1	394.1	434.7
425.3	14	0.5870	0.2193	425.3	422.1	402.3	443.2
429	15	0.6304	0.3326	429	430.4	410.5	452.1
437.1	16	0.6739	0.4503	437.1	439.0	419.0	461.4
441.8	17	0.7174	0.5747	441.8	448.1	427.8	471.5
470.9	18	0.7609	0.7088	470.9	457.9	437.2	482.4
484.7	19	0.8043	0.8571	484.7	468.7	447.3	494.7
486.3	20	0.8478	1.0271	486.3	481.1	458.9	508.9
506.1	21	0.8913	1.2336	506.1	496.2	472.7	526.3
509.3	22	0.9348	1.5127	509.3	516.5	491.0	550.2
534.6	23	0.9783	2.0195	534.6	553.5	523.7	594.2

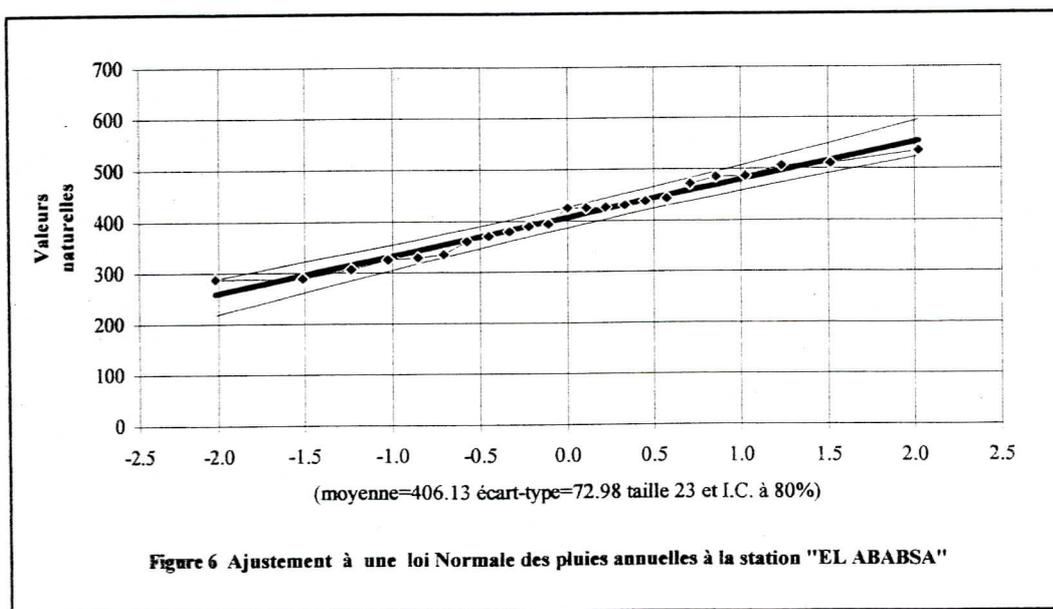


Figure 6 Ajustement à une loi Normale des pluies annuelles à la station "EL ABABSA"

III.2.5 Courbe - Intensité – Durée – Fréquence :

Pour l'établissement des courbes Intensité – Durée – Fréquence, il est nécessaire de calculer les pluies maximales de 24 heures et les pluies correspondants au temps « t » pour différente période de retour.

- Précipitation maximale de 24 heures :

La précipitation maximale de 24 heures ($P_{j\%}$), est exprimée pour différentes fréquences données comme une répartition de la loi Log-normale [4] ; elle est déterminée par :

$$P_{j\%} = \frac{\bar{P}_j}{\sqrt{C_v^2+1}} e^{u\sqrt{\ln(C_v^2+1)}} \quad (\text{III.1})$$

où

$P_{j\%}$: Pluie maximale journalière.

C_v : Coefficient de variation.

u : Variable réduite de GAUSS (tableau 6a).

Tableau 6a : Variable de GAUSS en fonction des fréquences choisies.

Fréquence	0.2	0.1	0.02	0.01	0.002	0.001
U_{Gauss}	0.842	1.282	2.054	2.327	2.879	3.091

A partir de la carte des isohyètes établie par K.BODY (1981) pour l'Algérie du nord, on peut tirer la valeur du coefficient de variation C_v . Pour notre bassin versant $C_v= 0.44$ et la valeur de P_j est égale à 63.7 mm.

Tableau 5 : Ajustement à une loi Log-normale des Pjmax.

Moy. $\log(x-x_0)=1.5305$ Taille N = 23 $X_0 = 0$
 E.T. $\log(x-x_0)=0.1308$ I.C. = 80% UGauss = 1.282

Valeurs classées	m	Fréquence expérim	Variable réduite	Valeur expérim	Valeur théorique	Borne inf	Borne sup
16.1	1	0.0217	-2.0195	16.1	18.47	15.61	20.89
23.2	2	0.0652	-1.5127	23.2	21.51	18.72	23.90
25.2	3	0.1087	-1.2336	25.2	23.40	20.66	25.78
25.4	4	0.1522	-1.0271	25.4	24.90	22.21	27.29
27.1	5	0.1957	-0.8571	27.1	26.21	23.55	28.62
28.9	6	0.2391	-0.7088	28.9	27.41	24.77	29.85
29.6	7	0.2826	-0.5747	29.6	28.54	25.91	31.03
30.2	8	0.3261	-0.4503	30.2	29.62	27.00	32.17
31.2	9	0.3696	-0.3326	31.2	30.69	28.07	33.32
31.5	10	0.4130	-0.2193	31.5	31.76	29.11	34.47
31.8	11	0.4565	-0.1089	31.8	32.83	30.16	35.65
33.5	12	0.5000	0.0000	33.5	33.93	31.21	36.88
34.7	13	0.5435	0.1089	34.7	35.06	32.28	38.16
35.1	14	0.5870	0.2193	35.1	36.24	33.39	39.53
35.7	15	0.6304	0.3326	35.7	37.50	34.55	41.01
38.5	16	0.6739	0.4503	38.5	38.85	35.77	42.62
39.0	17	0.7174	0.5747	39.0	40.34	37.10	44.42
42.1	18	0.7609	0.7088	42.1	42.00	38.56	46.47
42.4	19	0.8043	0.8571	42.4	43.91	40.21	48.88
44.6	20	0.8478	1.0271	44.6	46.22	42.17	51.83
48.6	21	0.8913	1.2336	48.6	49.19	44.64	55.71
56.5	22	0.9348	1.5127	56.5	53.50	48.15	61.48
63.7	23	0.9783	2.0195	63.7	62.32	55.11	73.72

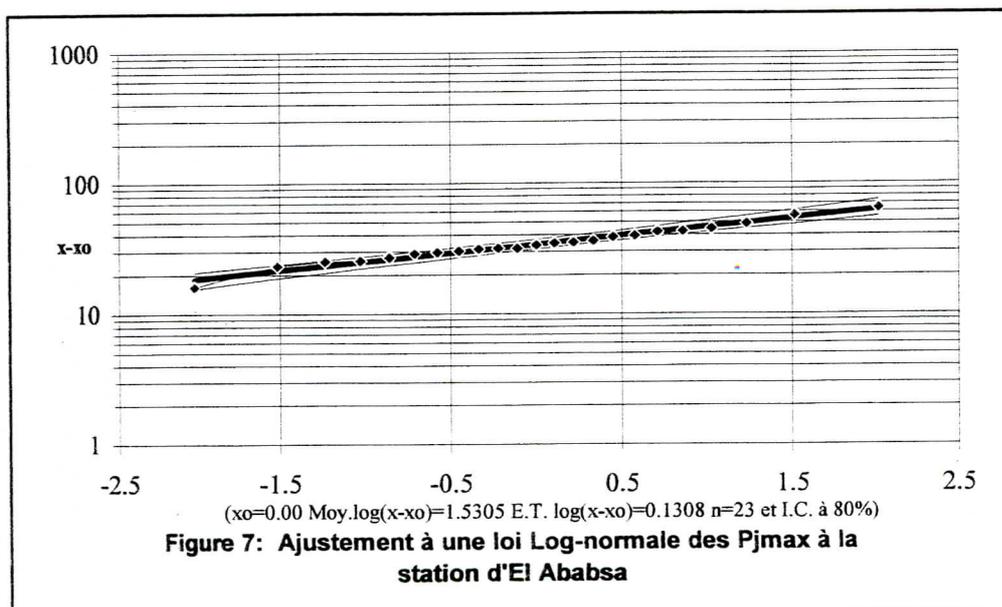


Figure 7: Ajustement à une loi Log-normale des Pjmax à la station d'El Ababsa

Ainsi les pluies journalières maximales, pour différentes périodes de retour sont déterminées et résumées dans le tableau 6b.

Tableau. 6 b : Pluies journalières maximales.

Période de retour	5 ans	10 ans	50 ans	100 ans	500 ans	1000ans
Pj% (mm)	83.07	99.97	138.36	155.17	195.71	213.97

• Pluie de durée t (Pt) :

Pour calculer les fréquences d'averses Pt% pour différentes durées t, nous utilisons la fonction de précipitation ci-dessous :

$$Pt\% = Pj\% \cdot (t/24)^b \quad (III.2)$$

t : représente la durée de la pluie et b l'exposant climatique dépendant de la position géographique.[30]

De la carte des isolignes établi par BODY (1981) pour l'Algérie du nord, on tire la valeur de l'exposant climatique égale à 0.37. La pluie de courte durée pour différentes périodes de retour a été calculée et résumée dans le tableau 7.

A partir des valeurs du tableau7 nous avons tracés les courbes d'intensité-durée- fréquence pour différentes périodes de retour (figure-8).

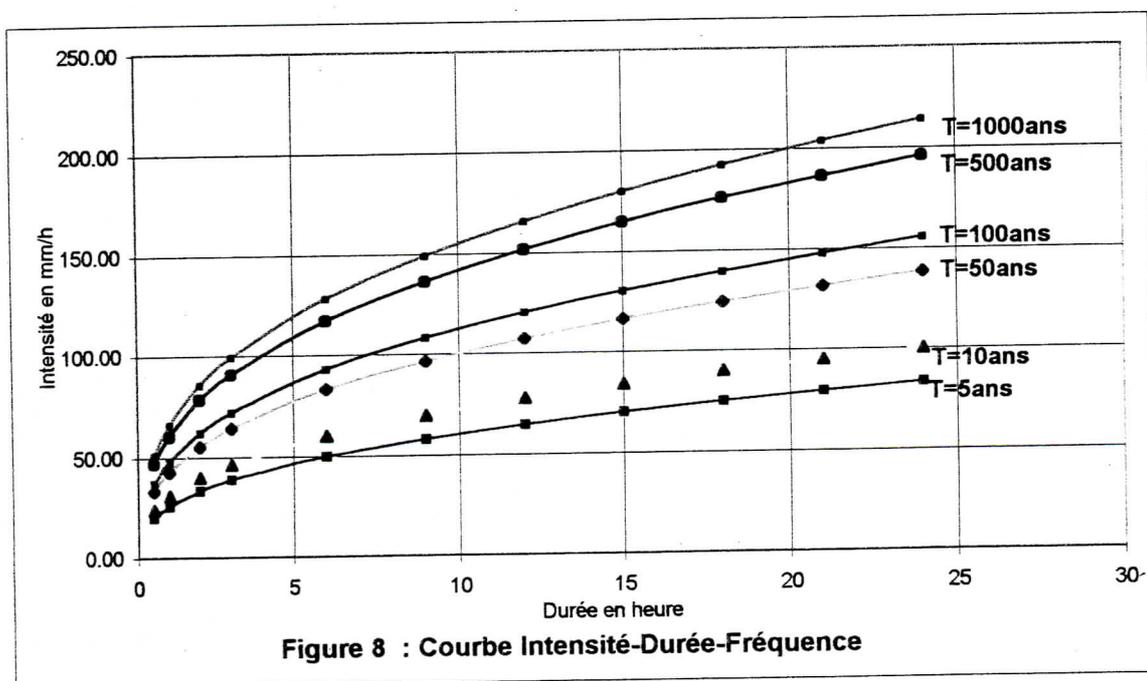
III.2.6 Etudes des écoulements :

• Caractéristiques des écoulements :

Les données hydrométriques de la station EL ABABSA présentent une grande fluctuation des débits aussi bien au cours des saisons qu'au cours des années ;

Tableau 7 : Valeurs de précipitations de courtes durées (en mm/heure).

Période	0.5	1	2	3	6	9	12	15	18	21	24
5 ans	19.83	25.63	33.12	38.49	49.74	57.79	64.28	69.81	74.68	79.07	83.07
10 ans	23.87	30.85	39.86	46.32	59.86	69.55	77.36	84.02	89.88	95.15	99.97
50 ans	33.03	42.69	55.17	64.10	82.84	96.25	107.06	116.27	124.39	131.69	138.36
100 ans	37.05	47.88	61.88	71.89	92.91	107.95	120.07	130.40	139.50	147.69	155.17
500 ans	46.73	60.39	78.04	90.67	117.18	136.15	151.44	164.47	175.95	186.28	195.71
1000 ans	51.08	66.02	85.32	99.13	128.11	148.85	165.56	179.81	192.36	203.65	213.97



c'est du à l'irrégularité du climat, à l'état de saturation des sols et à la nature géologique du bassin versant.

Nous disposons d'une série de donnée de débit maximum annuel de 26 compagnes décrites et analysées sur le tableau 8, la série des débits maximums est ajustée à une loi Log-normale (figure 9).

• Analyse des crues :

Après un examen de toutes les crues observées et au vu du tracé des hydrogrammes, l'ensemble des crues a été observé en deux groupes :

- Crue complexe, résultant d'une averse complexe à plusieurs pics ;
- Crue à pointe unique, provoquée en générale par une averse de courte durée et forte intensité.

Pour illustrer ceux-ci, nous avons étudié deux crues, sur deux années différentes, l'une observée au mois de septembre au début du cycle hydrologique et l'autre observée au mois de mars ; les données observées de ces crues se trouvent dans les figures 10 et 11, sur lesquelles nous avons représenté le débit liquide ainsi que l'intensité de l'averse en fonction du temps.

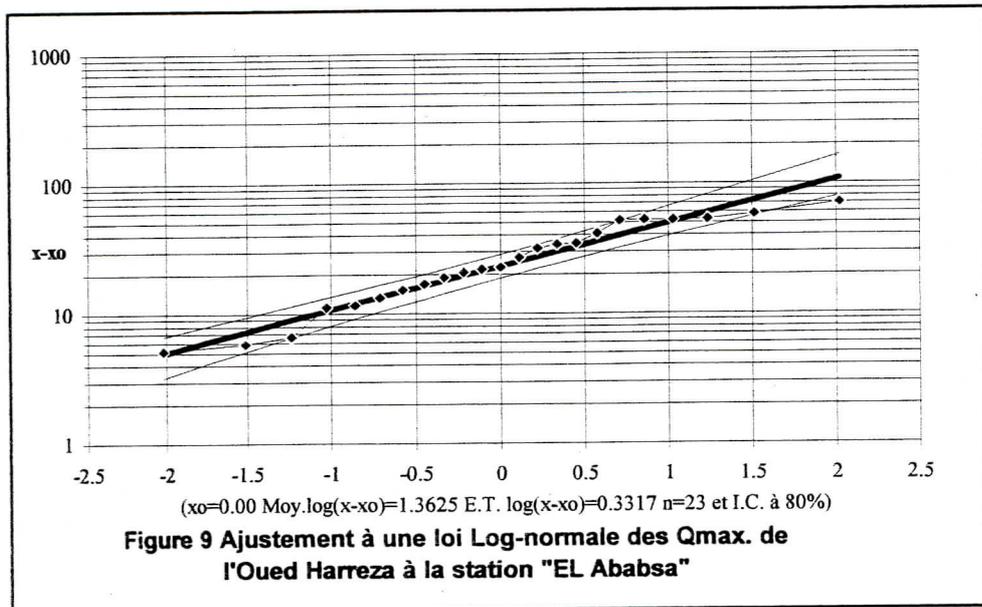
Les crues à pointe unique, représentées par des crues d'automne provoquées par des averses de début de saison, de type orageux, de courte durée, avec de fortes intensités. Ces averses sont généralement localisées dans l'espace et se produisent sur les sols secs d'où le temps de réponse est long et pourra dépasser huit heures, le temps de montée de l'hydrogramme est très court, le temps de décrue est plus prolongé.

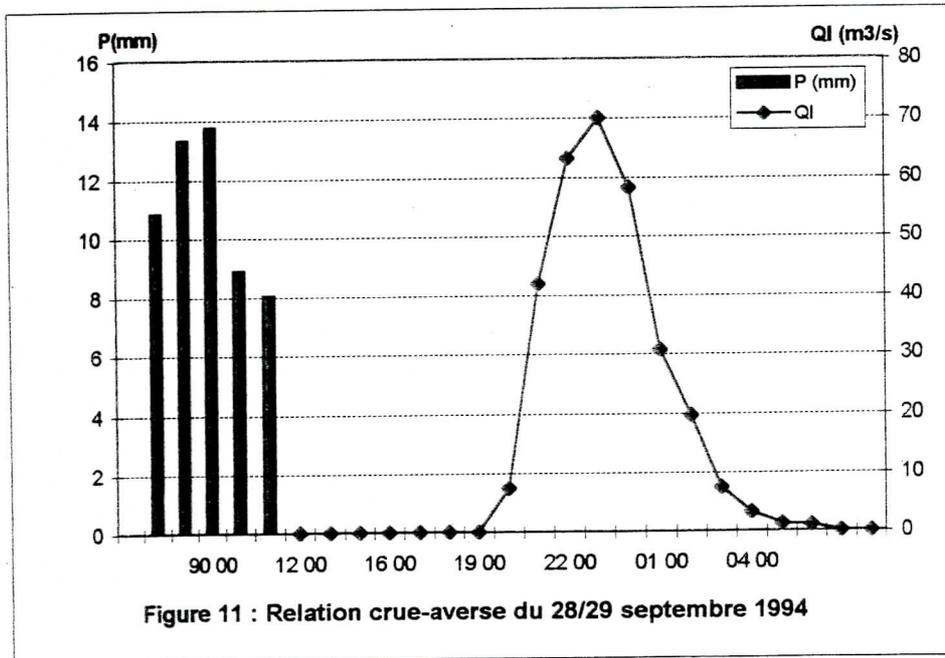
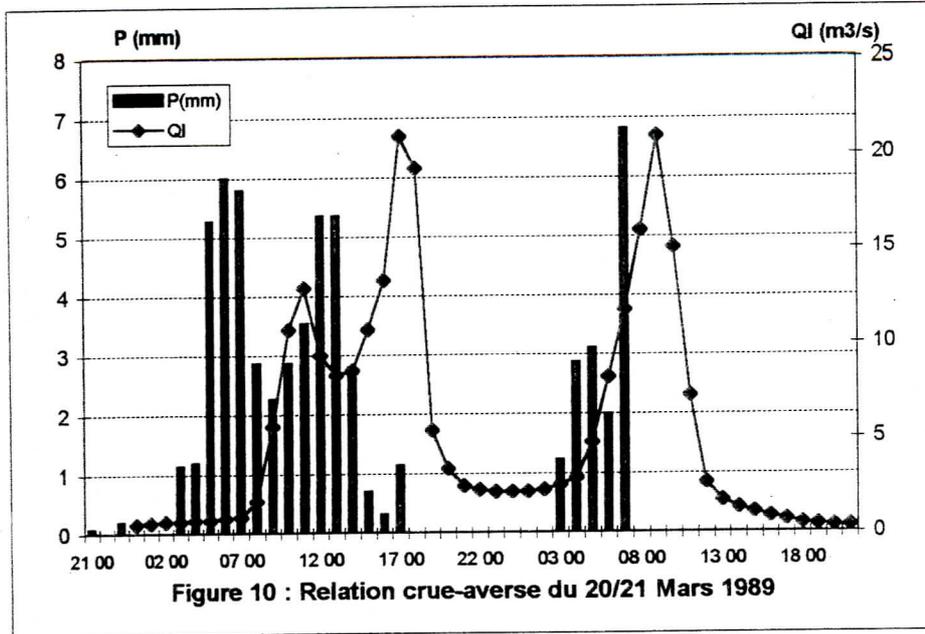
Les crues complexes parviennent généralement en hivers et en printemps, elles sont générées par des averses, longues, régulières et continues présentant des intensités faibles ou moyennes, généralisées dans l'espace, se produisent sur des sols saturés et imperméables d'où le temps de base est très long dépassant les 24 heures.

Tableau 8 : Ajustement à une loi Log-normale

$X_0=0$ Moy.log(x-x₀)=1.362 Taille N=23
 E.T. log(x-x₀)=0.332 I.C.= 80% U Gauss=1.282

Valeurs classées	m	Fréquence expérim.	Variable réduite	Valeur expérim.	Valeur théorique	Borne inf.	Borne sup.
5.19	1	0.0217	-2.0195	5.19	4.93	3.22	6.73
5.85	2	0.0652	-1.5127	5.85	7.26	5.10	9.48
6.64	3	0.1087	-1.2336	6.64	8.98	6.55	11.49
11.15	4	0.1522	-1.0271	11.15	10.52	7.86	13.27
11.56	5	0.1957	-0.8571	11.56	11.97	9.13	14.97
13.30	6	0.2391	-0.7088	13.30	13.41	10.37	16.65
15.18	7	0.2826	-0.5747	15.18	14.86	11.63	18.37
16.80	8	0.3261	-0.4503	16.80	16.34	12.92	20.14
19.00	9	0.3696	-0.3326	19.00	17.87	14.25	22.01
20.70	10	0.4130	-0.2193	20.70	19.49	15.63	23.99
22.04	11	0.4565	-0.1089	22.04	21.20	17.09	26.14
22.80	12	0.5000	0.0000	22.80	23.04	18.65	28.47
27.08	13	0.5435	0.1089	27.08	25.04	20.31	31.06
31.46	14	0.5870	0.2193	31.46	27.24	22.13	33.96
33.80	15	0.6304	0.3326	33.80	29.70	24.12	37.27
34.64	16	0.6739	0.4503	34.64	32.50	26.36	41.10
41.18	17	0.7174	0.5747	41.18	35.74	28.90	45.65
51.50	18	0.7609	0.7088	51.50	39.59	31.88	51.18
52.50	19	0.8043	0.8571	52.50	44.34	35.47	58.18
52.50	20	0.8478	1.0271	52.50	50.49	40.01	67.51
52.80	21	0.8913	1.2336	52.80	59.11	46.22	81.06
58.00	22	0.9348	1.5127	58.00	73.15	56.00	104.08
70.00	23	0.9783	2.0195	70.00	107.72	78.86	164.95





III.3 MORPHOMETRIE DU BASSIN VERSANT :

III.3.1 Données morphométriques :

Les caractéristiques géomorphologique du bassin versant de l'oued HARREZA au droit de la station hydrométrique d'EL ABABSSA [13] se résument dans le tableau 9 :

Tableau 9 : Données morphométriques au droit de la station EL ABABSSA.

S/Bassin	Cheliff Harreza
Oued	Harreza
Station	El ababsa
Coordonnée X	443.90 m
Coordonnée Y	318.50 m
Surface	142 km ²
Périmètre B.V	40.5 km
Longueur du Talweg	17.0 km
Longueur du rectangle équivalent	10.8 km
Altitude maximale	765.0 m
Altitude moyenne	479.0 m
Altitude minimale	313.0 m
Indice de compacité	1.12
Indice de pente	0.19
Densité de drainage	3.20
Coefficient de torrencialité	18.6

III.3.2 Station hydrométrique :

Le bassin versant est équipé d'une seule station hydrométrique gérée depuis Août 1972 par le service d'hydrologie de l'A.N.R.H, la station EL ABABSSA est équipée d'un limnigraphe sur l'oued HARREZA à 5 Km en amont du barrage elle représente une superficie de 142 Km² ayant pour coordonnées : X = 443.90 m ; Y = 318.50 m et Z = 320 m.

III.3.3 Présentation des données hydrométriques :

La collecte et la mise en forme des données hydrométriques constituent une étape très importante elles représentent la base de notre travail.

III.3.3.1 Collecte des données :

la collecte des données brutes recueillies auprès des services de l'Agence nationale des Ressources Hydrauliques était une phase très dure et délicate.

Les données disponibles consistent à établir des fichiers de :

- Débits liquides instantanées (m^3/s) à partir de la confrontation entre les hauteurs d'eau disponibles et la courbes des barèmes $Q=f(H)$.
- Concentration en (g/l), obtenue à partir des fichiers d'analyse des eaux.
- Débits moyens journaliers (m^3/s), à partir des annuaires.

III.3.3.2 Dépouillement des données :

Nous avons collecter le maximum des données disponibles afin de pouvoir établir un modèle pour l'estimation des apports solides.

Nous disposons d'une série de 25 ans, allant de septembre 1973 à décembre 1997, comportant 3225 valeurs de hauteurs d'eau, de débit liquide instantanée et de concentration en matière de suspension et une deuxième série de crues dépouillées comportant 31732 valeurs.

Les données d'observations sont classées dans un fichier contenant le numéro d'observation, la date, l'heure, la hauteur d'eau, la concentration, le débit liquide, le débit solide en suspension qui représente le produit de la concentration par le débit liquide.

III.3.4 Traitement des données :

Dans le but d'élaborer un modèle mathématique simulant la relation entre débit liquide et débit solide, les données sont tracées, et l'allure du graphe peut justifier l'existence d'une relation mathématique et orienter le choix du modèle.

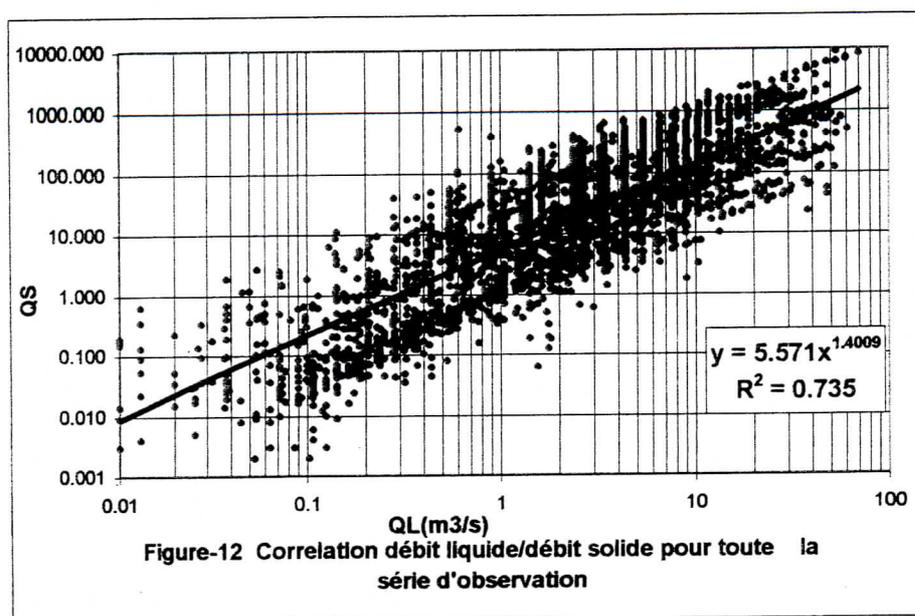
III.4 ESTIMATION DU TRANSPORT SOLIDE DANS L'OUED HARREZA :

Le transport solide total est caractérisé par deux types de transports, la suspension qui représente le transport des sédiments fins et le charriage qui représente le transport des éléments plus grossiers.

III.4.1 Calcul du transport solide en suspension :

Nous disposons d'une série d'observation de 3225 valeurs de hauteurs d'eau, lui correspondant des valeurs de débits liquide, de concentration ainsi que l'heure et la date du prélèvement. L'évaluation du débit solide en suspension se base sur la connaissance de la variation de la turbidité (concentration en matière de suspension) et les débits liquides en fonction du temps.

Le débits solide Q_s est égale au produit de la concentration C (g/l) par le débit liquide Q_L (m^3/s). Nous avons classé les valeurs dans un tableau suivant l'ordre chronologique pour former le fichier global qui nous permet de tracer la variation du débit solide en fonction du débit liquide, avec un intervalle de confiance de la moyenne de la série hydrométrique pris entre $[142, 177]$ m^3/s (figure-12) et d'approcher un modèle mathématique régressif.

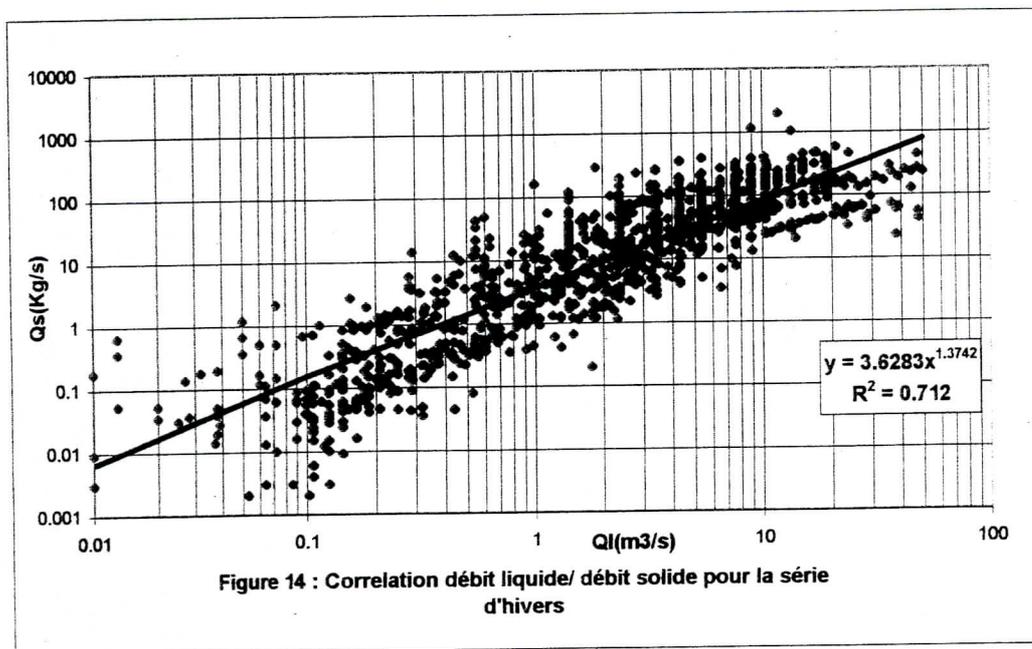
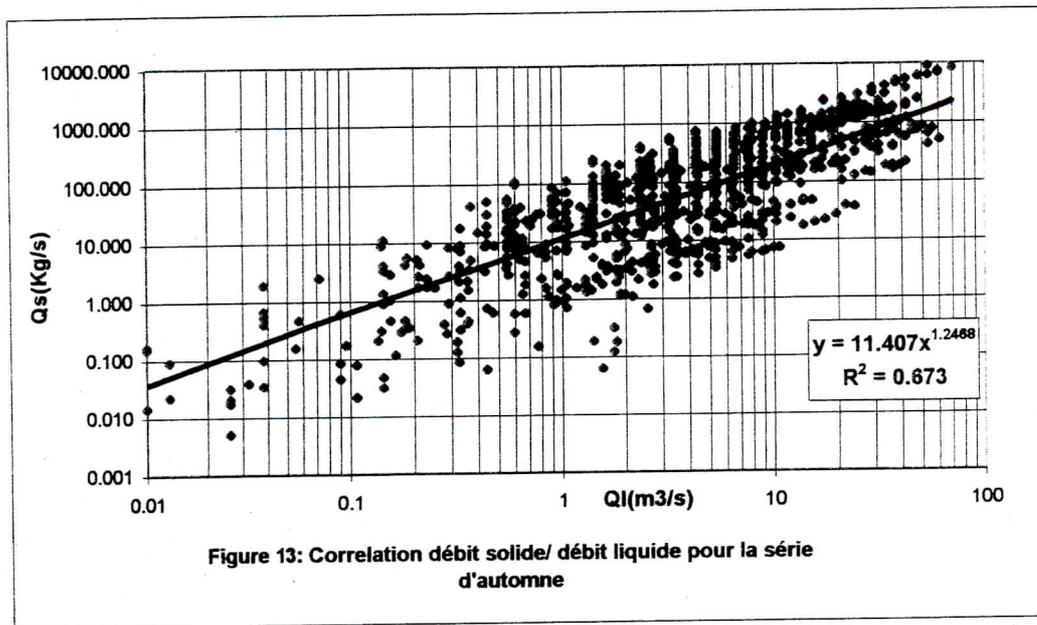


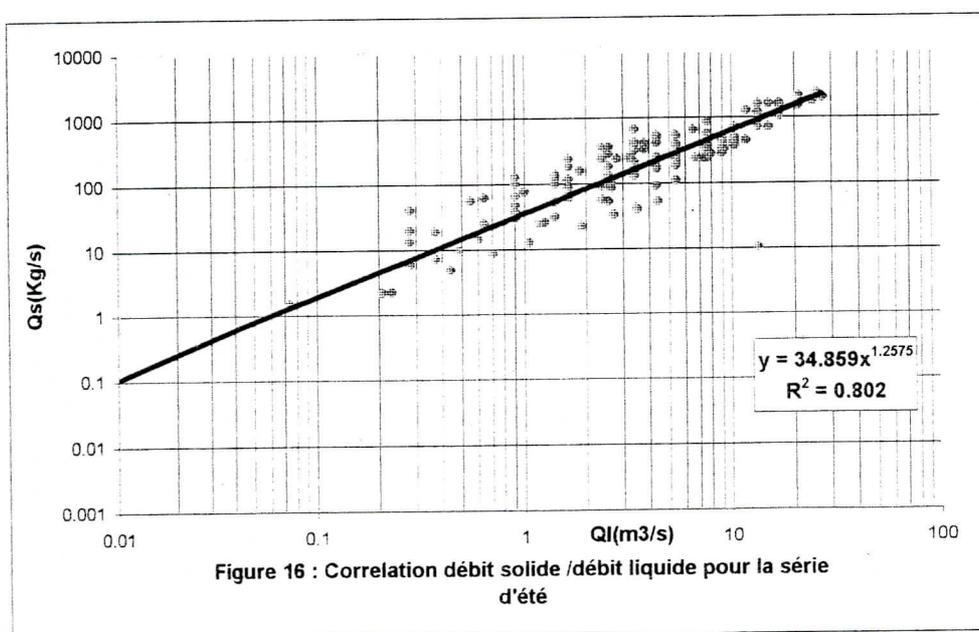
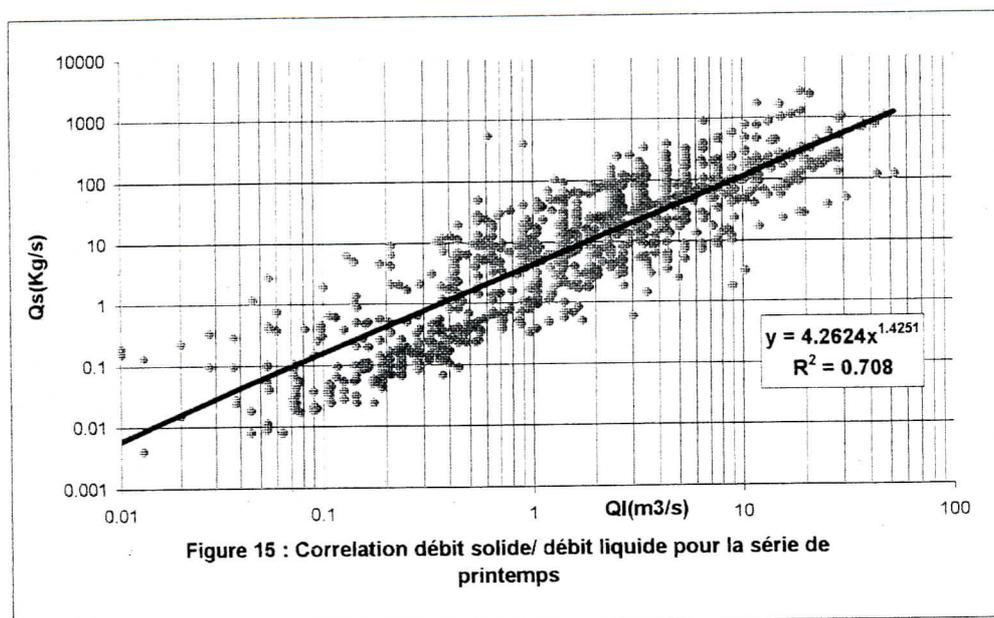
En tenant compte de l'influence saisonnières sur le phénomène transport solide, nous avons établi des fichiers saisonniers afin d'éviter les fortes dispersions et d'avoir une meilleure corrélation. Ainsi les données du fichier global sont sélectionnées par saison comme suit :

- Automne : Septembre - Octobre - Novembre.
- Hiver : Décembre - Janvier - Février.
- Printemps : Mars - Avril - Mai.
- Eté : Juin - Juillet - Août.

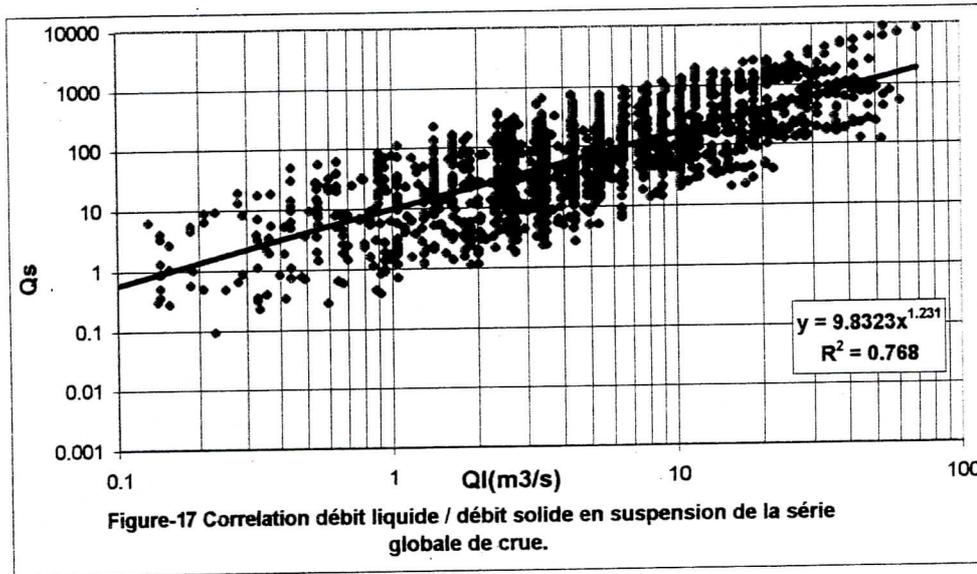
Les variations des fichiers saisonniers obtenus sont tracés respectivement dans les figures 13, 14, 15 et 16.

Une nouvelle tentative de traitement des données, serait le traitement des crues. Considérons que ce sont les crues qui charrient le plus de sédiments.





La première étape est de sélectionner à partir de la série globale toutes les crues existantes, donc toutes augmentations de la hauteur d'eau par rapport au niveau initial. A partir du nouveau fichier obtenu appelé « fichier des crues bien observées » nous avons tracé la variation du débit liquide en fonction du débit solide figure-17.

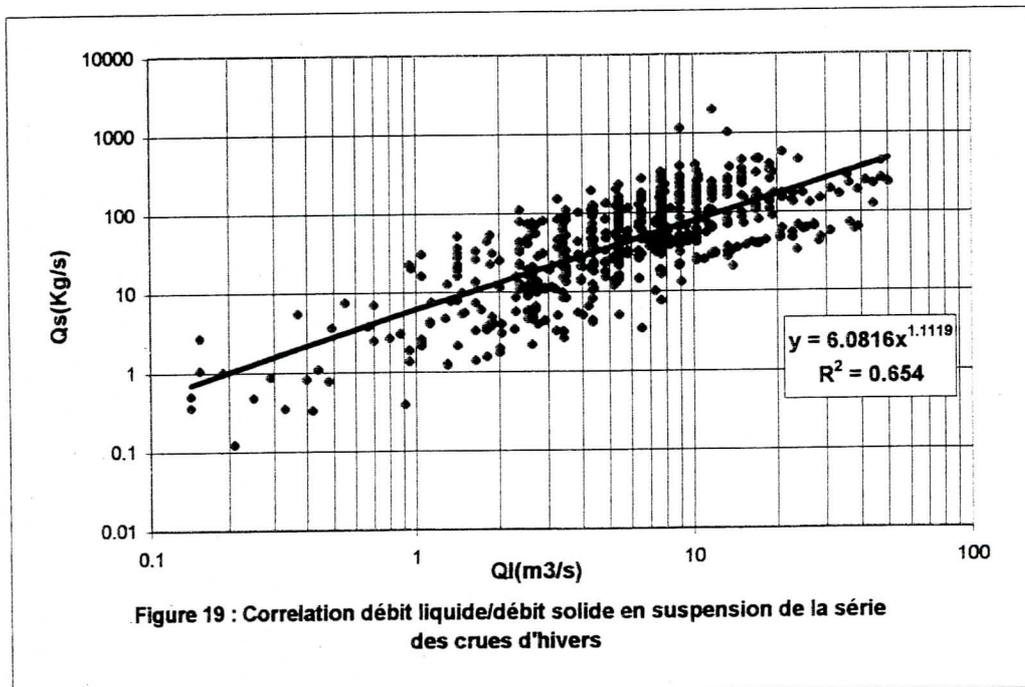
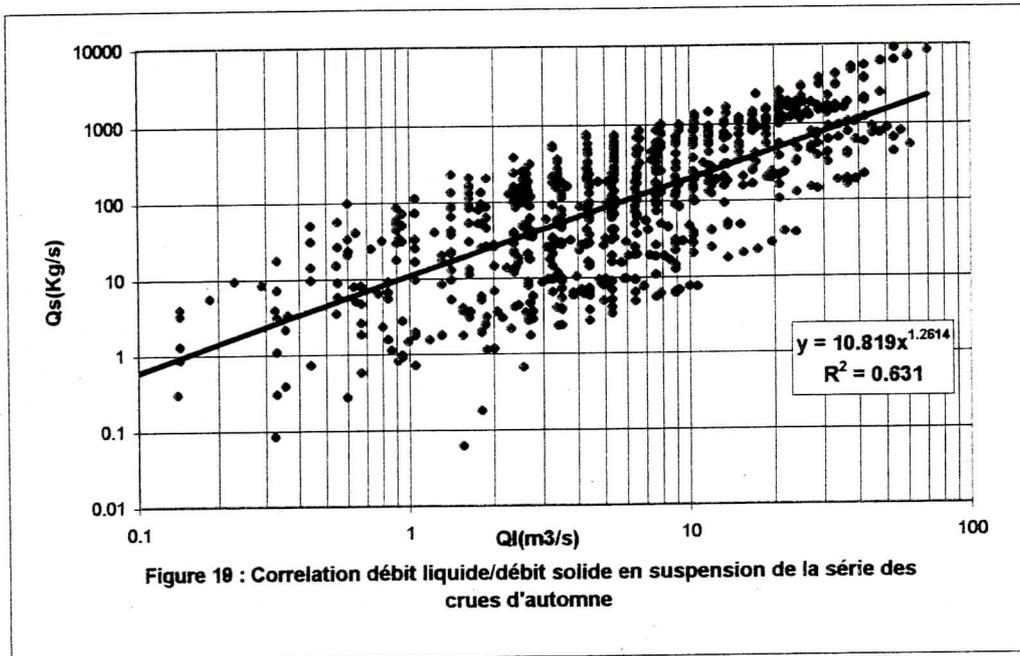


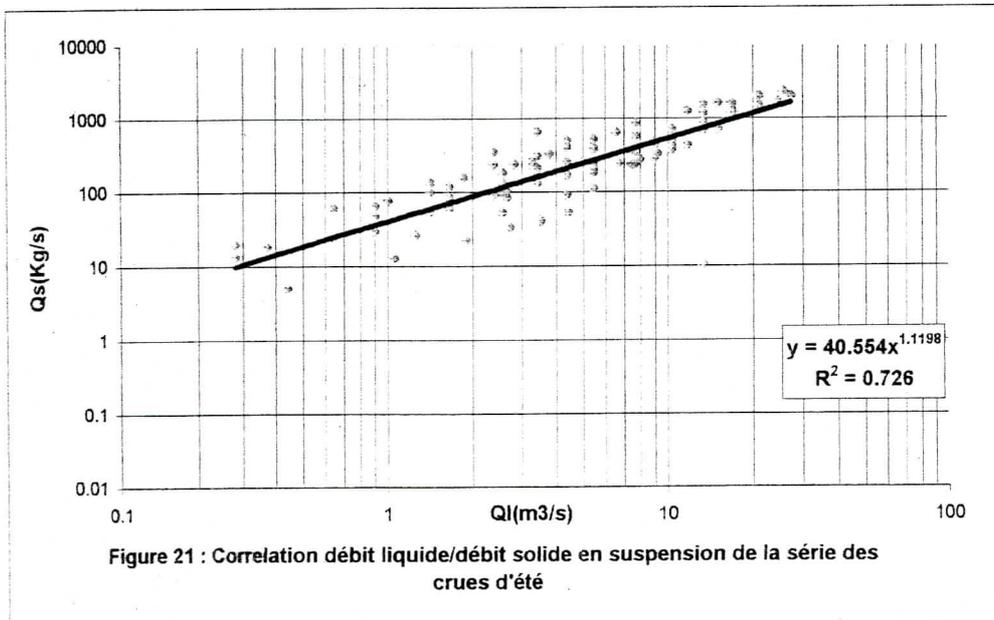
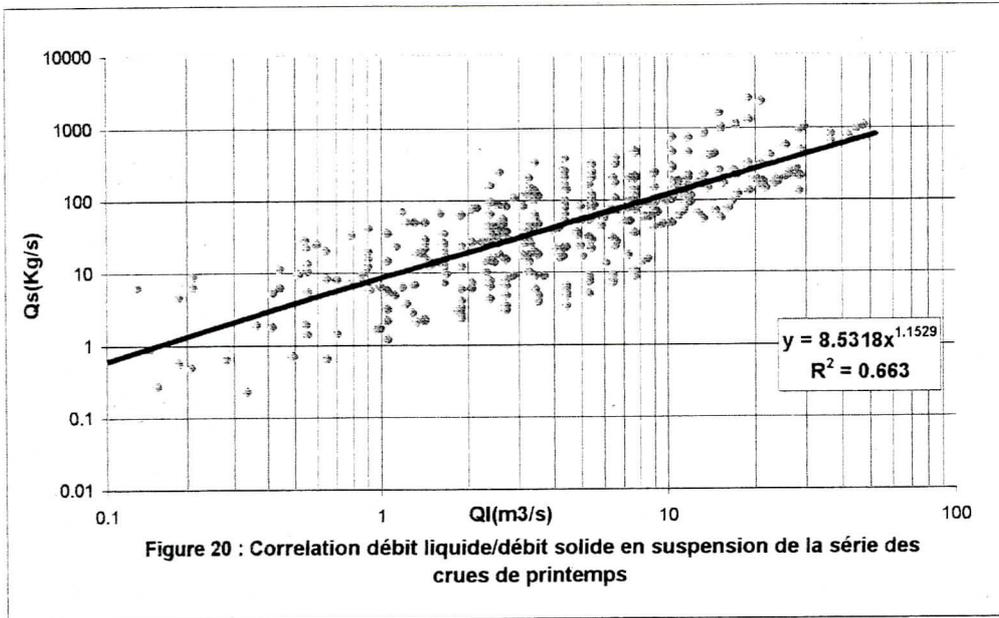
A partir des données du nouveau fichier de crues bien observées nous avons sélectionné les valeurs saisonnières, et tracer le débit solide en fonction du débit liquide pour chaque saison (figure 18, 19, 20 et 21).

Parmi les corrélations appliquées (linéaire, logarithmique, polynomiale, puissance et exponentielle), la corrélation puissance a donné de meilleurs résultats.

En comparant les équations obtenues, nous avons choisi l'équation de régression de la série globale des crues bien observées dont le coefficient de détermination est le plus élevé $R^2 = 0.768$. L'équation s'écrit :

$$Q_s = 9.832 * Q_L^{1.231} \quad (III.3)$$





III.4.2 Calcul du transport solide par charriage :

L'entraînement des matériaux arrachés au sol par un écoulement liquide est lié essentiellement à la dimension de ces particules.

III.4.2.1 Etude granulométrique :

Les prélèvements des échantillons sur le long de l'oued, ont été effectués sur différentes sections en amont du barrage Harreza. Les échantillons au nombre de dix ont été pris au fond de l'oued, en rive gauche et droite des sections choisies.

Dans le but de la détermination des diamètres médians (D_{50}), nous avons effectué l'analyse granulométrique au laboratoire de l'A.N.R.H sur des tamis de diamètres variant de $16.10^3 \mu\text{m}$ à $80 \mu\text{m}$. Les résultats de ces analyses sont illustrés dans le tableau 10.

Tableau 10 : Classification et résultats de l'analyse granulométrique

Nature	Numéro de l'échantillon										pourcentage		
	1D	2D	3D	4D	5D	1G	2G	3G	4G	5G	%D	%G	%
Gravier gros 32mm-16mm	0.0	14.1	13.9	9.3	3.3	31.0	10.2	14.5	15.4	0.0	8.1	14.3	11.2
Gravier moyen 16mm-8mm	4.2	32.9	34.0	23.8	7.0	13.4	12.4	34.3	11.7	19.0	20.4	22.2	21.3
Gravier fin 8mm-4mm	20.4	17.5	32.3	19.6	16.1	16.0	11.0	22.8	19.4	11.6	21.2	20.3	20.7
Gravier très fin 4mm-2mm	29.1	16.2	11.5	17.4	18.6	15.9	16.2	13.9	16.0	15.2	18.6	15.9	17.2
Sable très gros 2mm-1mm	34.9	14.8	5.3	17.5	33.1	15.7	24.2	8.5	17.5	25.5	21.1	17.3	19.2
Sable gros 1mm-0.5mm	10.4	4.1	2.2	9.8	19.5	7.0	19.9	4.3	12.5	22.7	9.2	8.5	8.8
Sable moyen 0.5 - 0.25	0.8	0.4	0.7	1.9	2.1	0.9	5.0	1.3	5.4	4.8	1.2	1.2	1.2
Sable fin 0.5 - 0.25	0.2	0.1	0.1	0.6	0.3	0.2	1.0	0.4	1.8	1.1	0.3	0.3	0.3
Limon 0.125 - 0.062	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.2	0.1	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1

On peut conclure que le sol en étude est constitué de mélange de gravier, de sable et de limons. Le diamètre moyen (D_{50}) est égale à 4.5 mm.

III.4.2.2 Calcul de la pente :

Connaissant la dénivelée séparant les deux points de prélèvement et la distance les séparant, nous avons calculé la valeur de la pente moyenne de l'oued HARREZA, elle est égale 0.4%.

III.4.2.3 Evaluation du charriage :

Le charriage a fait l'objet de nombreuses études expérimentales sur terrain et aux laboratoires dans le but de rechercher des formules les plus adéquates aux problèmes posés à l'aide d'estimation de quelques paramètres propres aux cas étudiés et déterminer théoriquement le taux de matériaux charriés qui transiteront dans une section donnée de l'oued.

Dans notre étude nous avons utilisé la formule de MEYER PETER pour la quantification du débit solide charriés.

Les caractéristiques hydrauliques (pente $I = 0.4\%$) et sédimentologiques ($D_{50} = 4.5\text{mm}$) s'inscrivent dans le domaine de validité d'application de la formule ($0.4\% < I < 20\%$ et $0.4\text{mm} < D_{50} < 30\text{mm}$).

La formule de MEYER PETER a été détaillée dans le chapitre I, nous rappelons brièvement le principe de calcul ; le débit solide charrié par unité de largeur exprimé en t/s.m est donnée par :

$$gs = K \cdot (\tau - \tau_{cr})^{3/2} \quad \text{(III.4)}$$

rappelons que :

$$\tau = \gamma \cdot R_h \cdot I$$

$$\tau_{cr} = 0.047 \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot D_{50}$$

$$K = 25$$

Le débit solide charrié en t/s s'exprimera comme suit :

$$G_s = g_s * B \quad (III.5)$$

Où B représente la largeur moyenne de l'oued, dans notre cas B est égale à 9m.

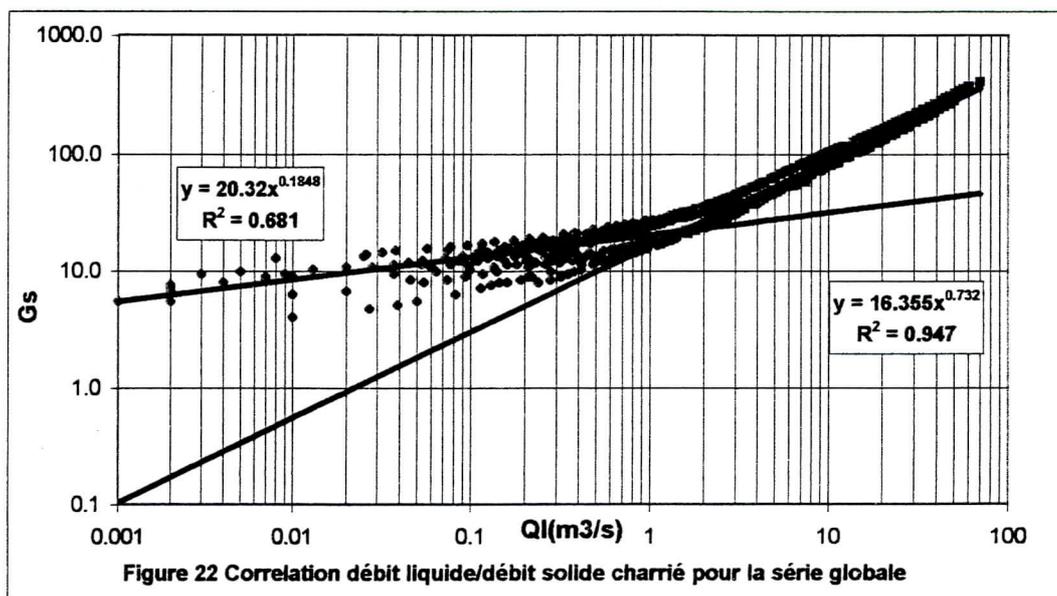
Les mêmes fichiers utilisés pour l'établissement du rapport débit liquide-débit solide en suspension ont servi de bases d'évaluation des contraintes τ et τ_{cr} , ainsi que le calcul du transport solide G_s .

Dans le but de déterminer un modèle mathématique régressif calculant le transport solide charrié en fonction du débit liquide, nous avons établi des corrélations $G_s=f(Q_L)$ pour la série globale ainsi que pour les séries saisonnières.

Le tracé graphique démontre un nuage de points pouvant être séparé en deux groupes de points, le premier présente une dispersion pour les petites valeurs de débit liquide ; par ailleurs le deuxième groupe donne un parfait alignement.

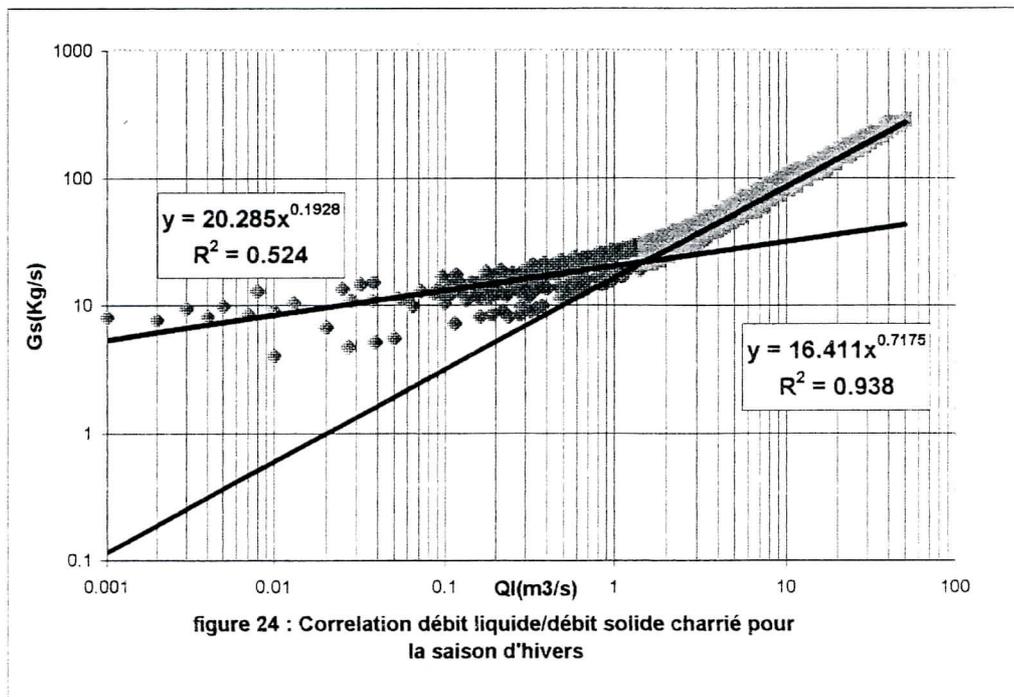
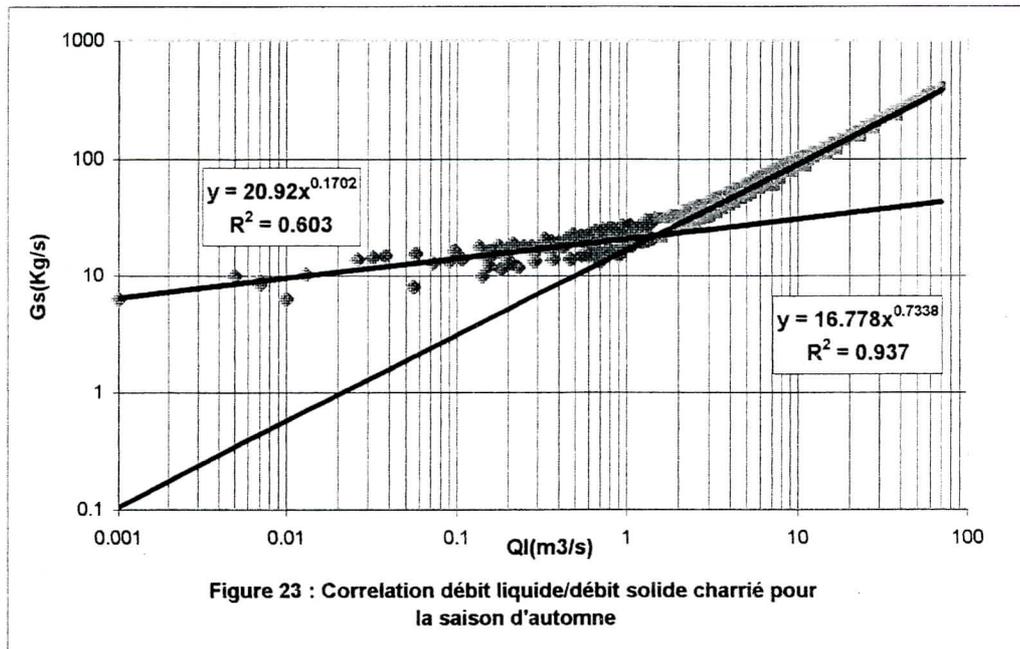
Pour mieux illustrer la qualité du modèle de régression et pour une meilleure approche de ce dernier, nous avons déterminé un débit liquide critique qui divise la variation globale en deux équations, la première correspondante aux valeurs de Q_L inférieure à $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ et la deuxième équation pour les valeurs de Q_L supérieure à $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$, d'où le coefficient de détermination s'améliore nettement voir figure 22.

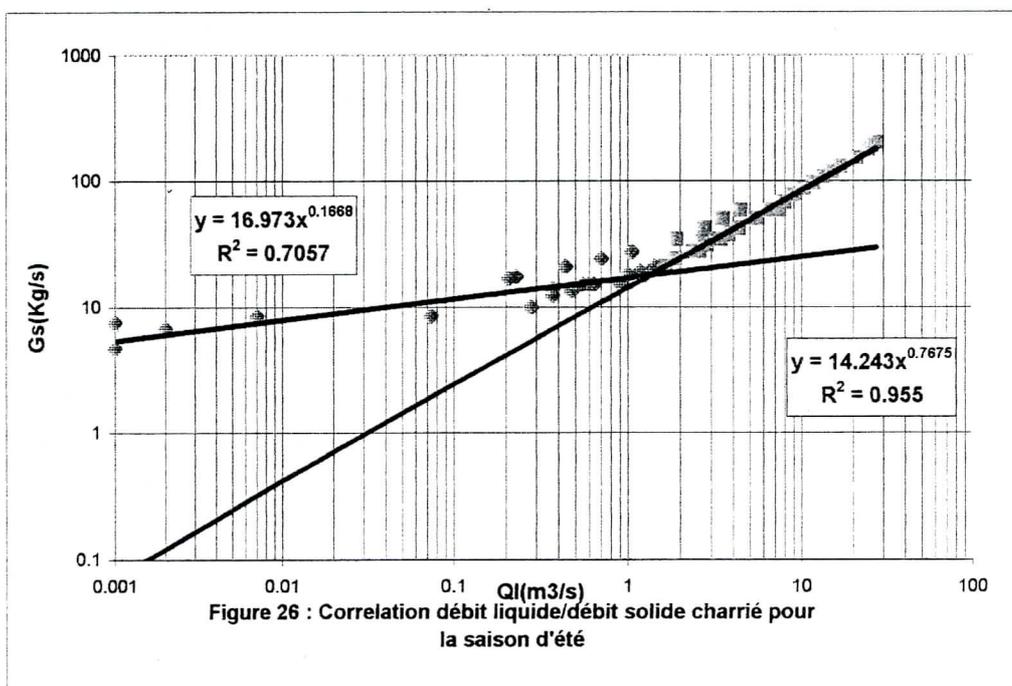
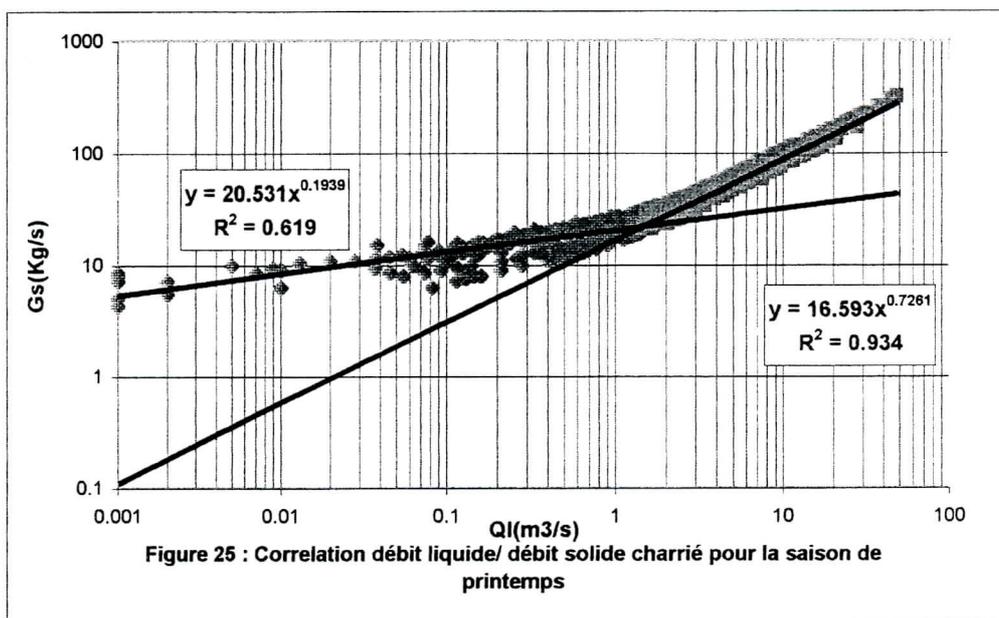
Nous obtenons alors l'équation du débit liquide en fonction du débit charrié avec une bonne corrélation correspondante à la fonction puissance.

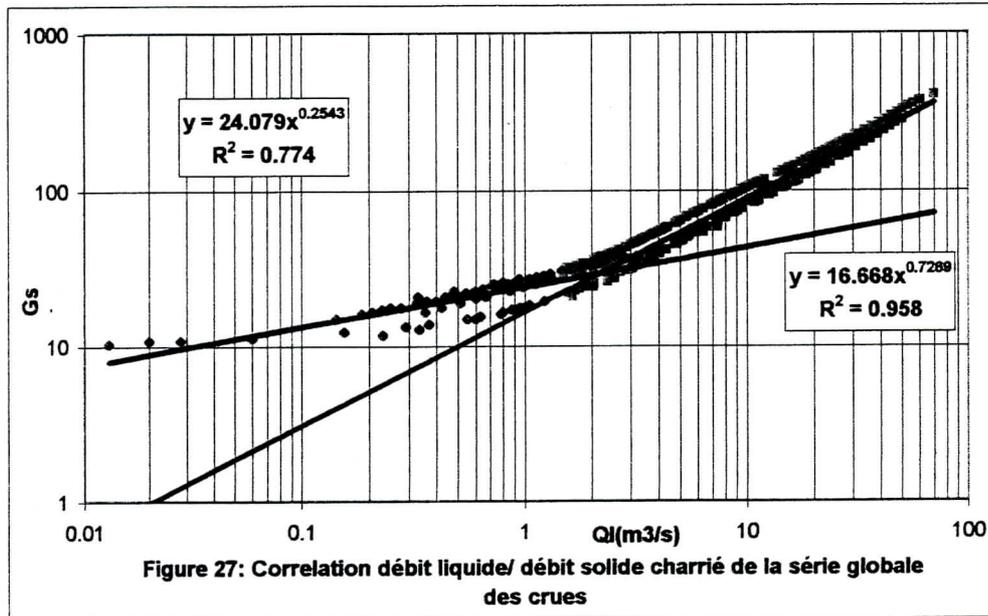


De même nous avons tracé les variations du transport solide charrié à l'échelle saisonnière sur les figures 23, 24, 25 et 26 . Pour améliorer la valeur du coefficient de détermination, le même travail a été fait que pour la série globale.

Le processus d'érosion et de transport solide sont particulièrement important au moment des crues, des matériaux de toutes tailles peuvent être transportés, mais dans des conditions instables ; ces derniers sont sédimentés à la moindre diminution de la vitesse du courant. Cela nous a poussé à faire une corrélation du débit solide charrié et du débit liquide au moment des crues bien observées (figure 27).





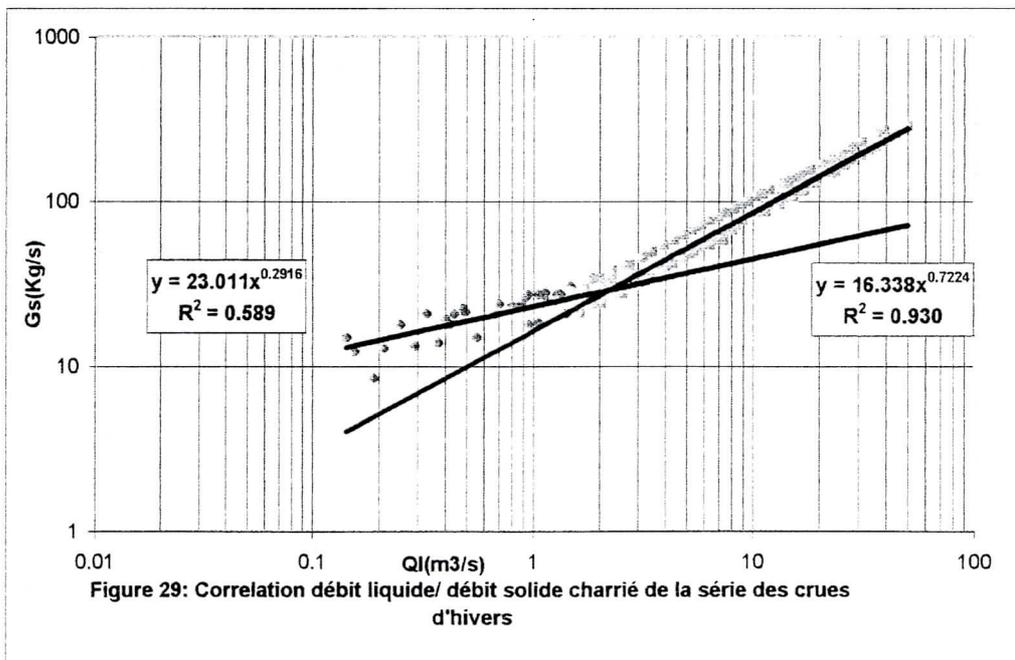
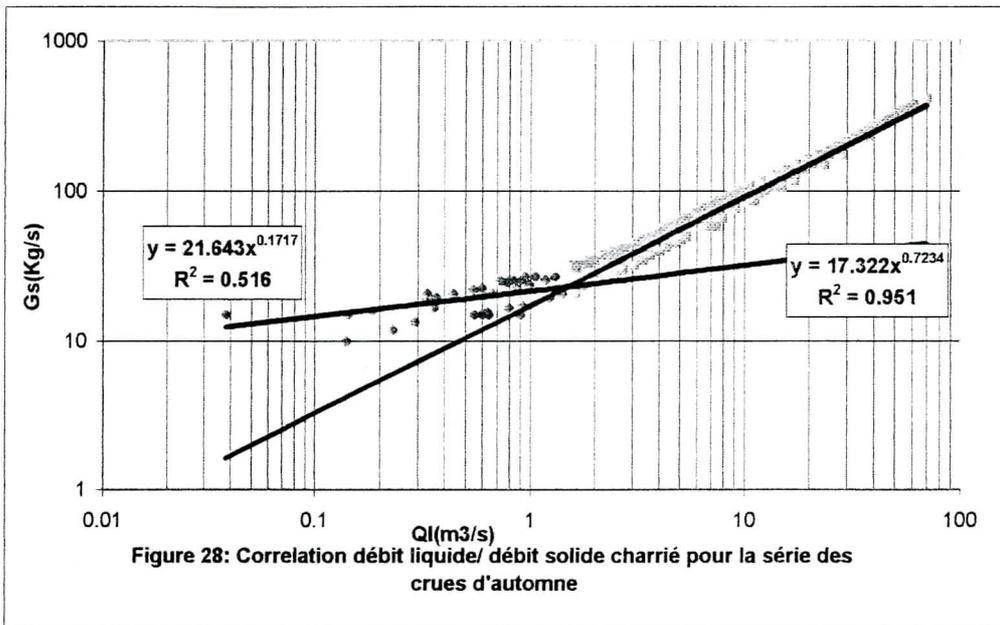


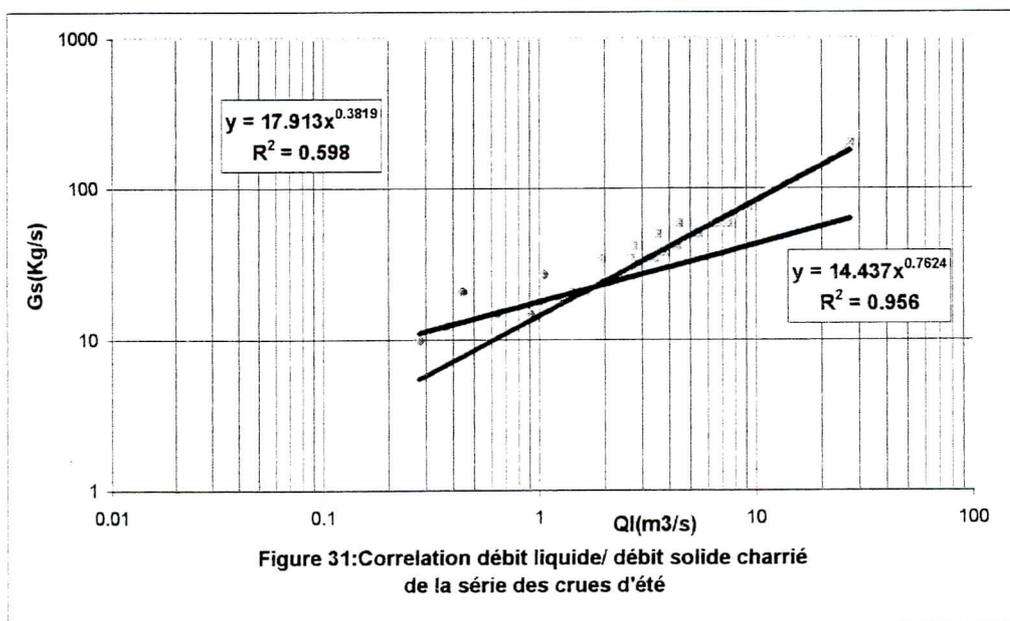
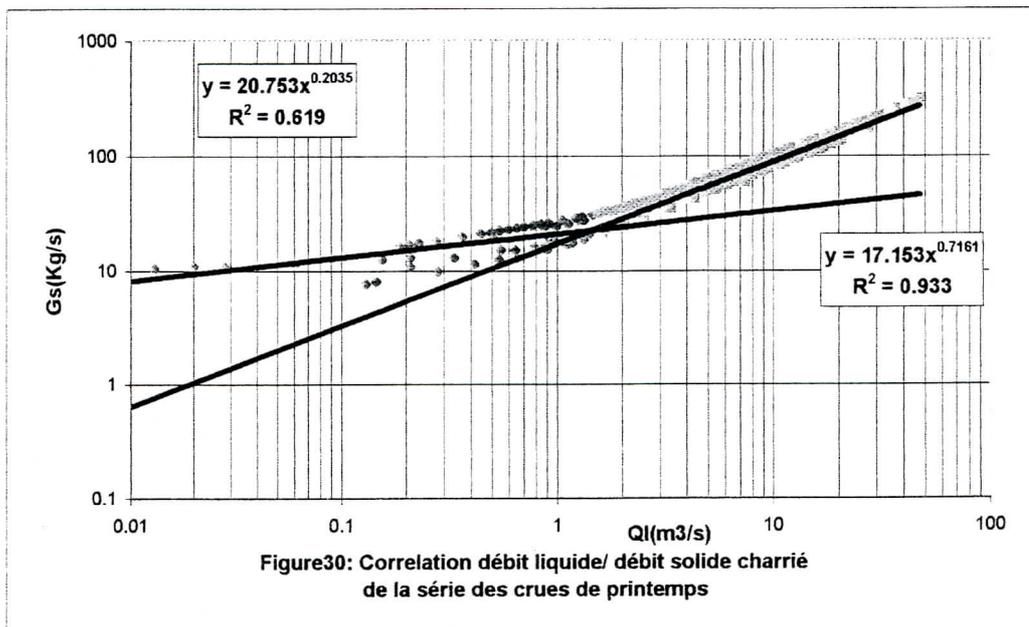
Afin de choisir le meilleur modèle de régression de la variation du débit solide en fonction du débit liquide, nous avons appliqué le même principe (celui du débit liquide critique) aux variations saisonnières sur les figures 28, 29, 30 et 31.

La meilleure corrélation obtenue pour l'évaluation du débit solide annuel, est celle correspondante à la série globale des crues, dont le coefficient de détermination présente la valeur la plus élevée ($R^2=0.958$) ; les équations retenues sont :

- $G_S = 24.08 * Q^{0.2543}$ pour $Q_L < 1.5$ (III.6a)
- $G_S = 16.67 * Q^{0.7269}$ pour $Q_L \geq 1.5$ (III.6b)

Il est intéressant de souligner que dans les conditions naturelles le charriage est expliqué par le débit maximum, l'analyse statistique des données hydrométriques de l'oued HARREZA nous permet de conclure que le débit supérieur à $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a un pouvoir explicatif significatif sur le débit charrié.





CHAPITRE IV

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1 EVALUATION DU TRANSPORT SOLIDE TOTAL ANNUEL :

Nous avons quantifié le transport solide total Q_{ST} au droit de la station El Ababssa qui représente la somme du transport solide en suspension Q_S (annuel) et du transport solide par charriage G_S (annuel), sur une durée allant de 1976 à 1995.

Nous avons utilisé pour la suspension un modèle régressif donné par l'équation [III.3], et pour le charriage les équations [III.6a] et [III.6b] correspondantes au débit Q_L inférieure et supérieure à $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement. Les résultats des débits solides mensuels et annuels en suspension et par charriage trouvés en tonnes sont illustrés dans les tableaux 11 et 12.

Les valeurs calculées de la quantité de sédiments en suspension nous ont permis de constater que les volumes les plus importants en transport solide se concentrent dans les mois des saisons humides, à l'exception des mois de novembre 1983 et Octobre 1990 où les taux du débit solide représentent plus de 50% du total annuel.

La crue de septembre 1979 a donnée un débit de transport en suspension dépassant 55% du débit total annuel, ceux-ci peut être expliquer par le fait que les derniers jours du mois précédent étaient suffisamment arrosés.

Tableau N°11 : Valeurs mensuelles et annuelles du transport solide par suspension en tonnes.

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total annuel
1976	1474.721	15771.981	3052.842	5183.558	5660.104	4642.255	2794.993	5519.337	3262.969	87.702	44.137	26.817	47521.415
1977	3.183	41.472	462.240	2867.998	13059.082	4461.767	6685.554	12279.610	2892.109	454.559	48.282	33.084	43288.940
1978	32.017	8246.980	1752.672	1216.545	2751.455	4404.506	46575.725	1195.125	261.870	2829.936	773.328	135.098	70175.258
1979	35040.891	3546.103	3465.898	5579.895	16610.262	1749.485	0.000	2813.443	860.954	31.702	27.521	0.000	69726.154
1980	0.000	1322.885	2440.298	13010.493	3776.249	5507.753	4205.992	4162.958	2617.900	1052.713	523.757	0.000	38620.988
1981	0.000	0.000	0.000	4547.900	4842.750	4099.775	4780.960	3220.819	28.745	11.232	0.000	0.000	21532.182
1982	13372.992	11928.986	8305.181	12058.362	3534.250	3132.042	4565.963	168.918	0.000	0.000	0.000	0.000	57066.694
1983	0.000	0.000	24135.168	2940.032	4688.980	4167.939	3097.481	1316.638	2498.622	4147.021	0.000	0.000	46991.881
1984	0.000	2699.456	5646.267	4617.306	2712.857	3417.689	3516.751	3744.020	4155.859	1040.269	5.009	0.000	31555.484
1985	1365.120	0.000	1511.136	366.336	26421.120	21654.832	21671.965	2740.667	1053.296	191.887	133.085	0.000	77109.444
1986	0.000	8885.376	3398.816	3062.745	13914.698	47783.365	6359.432	1172.532	89.557	957.345	1922.956	1245.001	88791.824
1987	0.000	1888.192	8385.120	0.000	1663.552	0.000	2728.352	2057.024	1138.240	2800.740	0.000	0.000	20661.220
1988	0.000	3377.376	0.000	13231.642	0.000	306.720	17801.558	303.355	0.173	1811.117	7865.856	0.000	44697.796
1989	0.000	0.000	0.000	0.000	530.833	0.000	11851.488	8101.728	443.372	1502.496	3603.744	1872.288	27905.948
1990	13503.400	33468.768	860.544	4862.592	745.632	447.552	8875.618	538.418	224.529	5503.342	0.000	0.000	69030.396
1991	0.000	5212.192	1191.584	0.000	9429.696	0.000	4940.398	6154.979	2622.841	2579.744	0.000	0.000	32131.433
1992	6095.712	3535.328	983.841	74.304	0.000	0.000	0.000	4488.836	962.496	0.000	0.000	0.000	16140.520
1993	312.768	3311.712	0.000	1122.509	727.536	7477.920	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12952.444
1994	25926.555	22965.301	1622.614	3976.140	8033.679	3899.874	8477.979	2824.355	3056.404	746.401	746.401	513.592	82789.294
1995	6374.752	24484.401	1068.576	1296.864	13215.037	19636.473	17046.345	8177.565	3152.634	3212.798	842.667	0.000	98508.112

Tableau N° 12 : Valeurs mensuelles et annuelles du transport solide par charriage en tonnes.

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total Gs(t)
1976	1053.344	3253.779	3699.159	2853.591	4396.657	1521.780	1018.193	2044.662	2332.772	775.041	713.688	483.145	24145.809
1977	307.205	168.480	478.656	1275.460	3120.076	2227.174	3615.575	4263.348	2745.383	495.979	747.801	622.721	20067.858
1978	1570.375	2612.231	1617.230	1370.341	2090.536	3364.154	5939.631	2239.620	2380.224	1133.440	633.383	482.142	25433.310
1979	3091.289	2999.048	3239.025	3444.475	4572.006	3362.309	0.000	3597.344	2808.859	1013.083	955.867	0.000	29083.305
1980	0.000	979.104	698.778	2845.412	1852.281	2630.731	2802.540	2657.302	836.554	718.177	881.090	0.000	16701.970
1981	0.000	0.000	0.000	779.354	718.797	1897.305	1458.934	828.100	316.166	77.760	0.000	0.000	6076.415
1982	6690.336	3193.991	3485.192	4930.431	3475.015	2953.179	2507.589	662.688	0.000	0.000	0.000	0.000	27898.420
1983	0.000	0.000	5296.864	1461.376	2150.711	2872.132	1359.575	696.628	1784.372	2333.596	0.000	0.000	17955.253
1984	0.000	623.808	1937.630	1362.293	410.367	2350.198	1787.367	1049.946	2769.312	615.431	332.876	0.000	13239.228
1985	677.376	0.000	495.936	163.296	1876.608	5196.701	5601.759	3930.152	3219.138	1241.757	1151.352	0.000	23554.075
1986	0.000	1159.488	2598.752	2461.583	4595.989	6617.401	4715.609	3137.317	1987.938	1368.406	1966.902	1098.198	31707.583
1987	0.000	1477.792	2120.608	0.000	1419.040	0.000	1394.848	1115.776	333.056	1533.814	0.000	0.000	9394.934
1988	0.000	708.480	0.000	1398.816	0.000	135.648	1670.766	712.031	36.288	382.752	421.632	0.000	5466.413
1989	0.000	0.000	0.000	0.000	693.577	0.000	1055.808	1142.208	2052.402	310.176	405.216	298.944	5958.331
1990	1633.545	952.128	197.856	1050.624	510.624	536.544	3143.621	2346.979	721.447	622.430	0.000	0.000	11715.799
1991	0.000	3594.432	1114.048	0.000	3002.168	0.000	2210.943	2117.167	1999.216	1177.984	0.000	0.000	15215.959
1992	1371.520	1326.592	112.827	63.072	0.000	0.000	0.000	2711.072	298.080	0.000	0.000	0.000	5883.163
1993	116.640	2246.582	0.000	300.672	346.646	870.048	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3880.588
1994	3845.150	3821.831	1933.918	1509.160	1352.276	3622.604	2916.180	1003.580	1336.649	839.351	839.351	776.971	23797.021
1995	1171.584	3804.083	664.416	227.232	2883.447	2633.837	3682.856	1869.882	966.360	1172.411	420.478	0.000	19498.576

Les valeurs des débits solides charriés en saisons sèches sont parfois supérieures à celles du débit solide en suspensions, ceci est dû à la faible turbulence de l'écoulement, il semble que pour les crues des saisons sèches le ruissellement reste localisé sur la partie imperméable du bassin versant entraînant les grosses particules.

Par ailleurs les sols présentant des fentes de retrait absorbent une grande partie des précipitations et ne pourront pas donner de ruissellement qu'après fermetures de ces fentes et saturation des sols, ce qui est le cas des saisons humides.

Nous remarquons qu'à l'échelle annuelle le transport solide charrié reste toujours inférieur à la suspension.

IV.2 CALCUL DU TAUX D'EROSION :

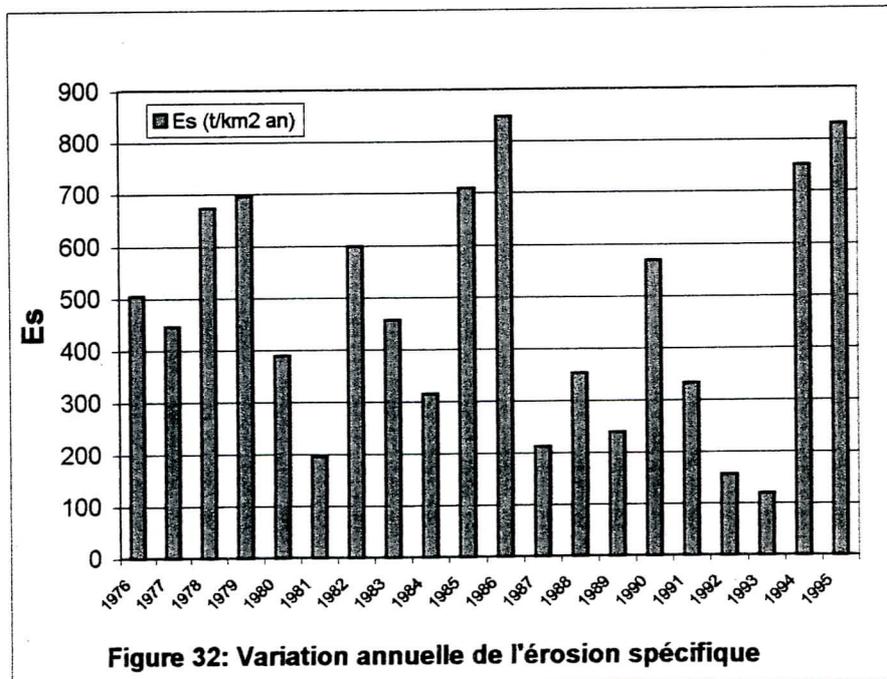
Le taux d'érosion spécifique E_s s'exprimant en tonne par Km^2 par an, donné par le rapport entre le transport solide total et la superficie totale au droit du barrage égale à 142Km^2 . Les résultats sont données dans le tableau 13.

L'érosion spécifique moyenne dans le bassin versant de HARREZA est de l'ordre de $470 \text{ t/Km}^2 \text{ an}$.

La variation du taux de l'érosion spécifique en fonction du temps (figure 32), explique que le rythme pluviométrique est assez régulier pour permettre une telle répartition annuelle, à l'exception des années des crues importantes.

Tableau 13 : Calcul du taux d'érosion spécifique.

Année	Qs (t)	Gs (t)	% Gs/Qs	Qs _T (t)	Es (t/Km ²)
1976	47521.415	24145.809	50.81	71667.225	504.699
1977	43288.940	20067.858	46.36	63356.798	446.175
1978	70175.258	25433.310	36.24	95608.568	673.300
1979	69726.154	29083.305	41.71	98809.458	695.841
1980	38620.988	16701.970	43.25	55322.958	389.598
1981	21532.182	6076.415	28.22	27608.597	194.427
1982	57066.694	27898.420	48.89	84965.114	598.346
1983	46991.881	17955.253	38.21	64947.134	457.374
1984	31555.484	13239.228	41.96	44794.712	315.456
1985	77109.444	23554.075	30.55	100663.519	708.898
1986	88791.824	31707.583	35.71	120499.407	848.587
1987	20661.220	9394.934	45.47	30056.154	211.663
1988	44697.796	5466.413	12.23	50164.209	353.269
1989	27905.948	5958.331	21.35	33864.279	238.481
1990	69030.396	11715.799	16.97	80746.195	568.635
1991	32131.433	15215.959	47.36	47347.392	333.432
1992	16140.520	5883.163	36.45	22023.683	155.096
1993	12952.444	3880.588	29.96	16833.032	118.542
1994	82789.294	23797.021	28.74	106586.315	750.608
1995	98508.112	19498.576	19.79	118006.688	831.033



IV.3 CALCUL DU TAUX D'EROSION SPECIFIQUE PAR LA METHODE DE RAMETTE :

Ramette a utilisé des lois théoriques établies entre débits liquides et débits solides associées aux études hydrologiques, afin de pouvoir définir l'ordre de grandeur des apports solides moyens annuels (Chapitre II travaux de Ramette).

IV.3.1 Traduction graphiques des équations :

IV.3.1.1 Introduction des paramètres sans dimensions :

Ramette a introduit les paramètres sans dimensions suivants :

$$\beta = B/H$$

$$\Phi = R_h \cdot J / (\delta - 1) \cdot d$$

$$K/K_r$$

K/K_r , peut être exprimé dans le domaine des dunes (cas du lit de l'oued HARREZA) par l'équation suivante (avec la densité des sédiments $\delta = 2.6$) :

$$\varepsilon = K/K_r = (0.06 + 0.41 \Phi^2)^{5/8} / \Phi^{5/8} \quad \text{pour } 0.062 < \Phi < 2.5 \quad (\text{IV.1})$$

L'introduction des coefficients sans dimensions donnés ci-dessus dans les équations (II.9), (II.10), et (II.11) du chapitre II, conduit aux expressions suivantes :

a- Le débit liquide est donné par l'équation de MANNING STRICKLER :

$$Q_L \cdot J^{13/6} / d^{5/2} = 91 \cdot (0.06 + 0.41 \Phi^2)^{5/2} \cdot \Phi^{2.04} \cdot (\beta + 2)^{47/24} / \beta^{23/24} \quad (\text{IV.2})$$

b- Le débit solide charrié est donnée par l'équation de MEYER-PETER :

$$G_M \cdot J / d^{5/2} = 72 \cdot \Phi \cdot (\varepsilon \cdot \Phi - 0.045)^{3/2} \cdot (\beta + 2) \quad (IV.3)$$

c- Le débit solide par charriage et suspension est donné par l'équation d'ENGLUND-HANSEN :

$$G_{E.H} \cdot J^{4/3} / d^{5/2} = 45.05 \cdot \Phi^{2.58} \cdot (0.06 + 0.41 \Phi^2)^{5/4} \cdot (\beta + 2) \quad (IV.4)$$

Les débits réduits (sans dimensions) sont notés par :

$$X = Q_L \cdot J^{13/6} / d^{5/2} \quad (IV.5)$$

$$Y = G_M \cdot J / d^{5/2} \quad (IV.6)$$

$$Z = G_{E.H} \cdot J^{4/3} / d^{5/2} \quad (IV.7)$$

IV.3.1.2 Représentation graphique :

L'abaque représenté sur la figure-3 traduisant les expressions (IV.2), (IV.3) et (IV.4) est tracé de la manière suivante :

- a- Tracer les courbes $X=f(\Phi)$ avec β comme paramètre, en utilisant la formule du débit liquide (IV.2).
- b- Tracer les courbes $X=f(\Phi)$ avec Y comme paramètre, en utilisant l'équation $X=f(Y, \Phi)$ établie par la relation :

$$X = 91.(0.06+0.41\Phi^2)^{5/8} \cdot \Phi^{2.04} \cdot [Y/72\Phi(\varepsilon\Phi - 0.045)^{3/2}]^{47/24} \cdot [1/[(Y/72\Phi(\varepsilon\Phi-0.045)^{3/2})-2]^{23/24}] \quad (IV.8)$$

A partir de cette équation (IV.8) nous tirons les valeurs du débit liquide réduit X, le tracé (figure33) de la variation Y=f(X) nous donne le débit solide charrié (réduit) par la relation suivante :

$$Y_{\max} = 15.97.X^{0.829} \quad (IV.9)$$

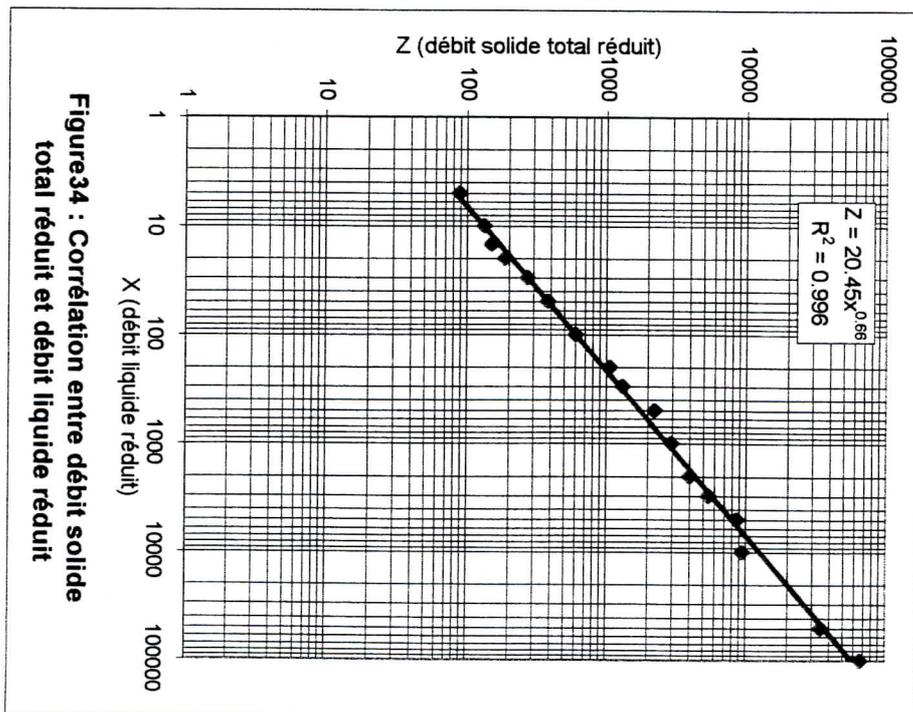
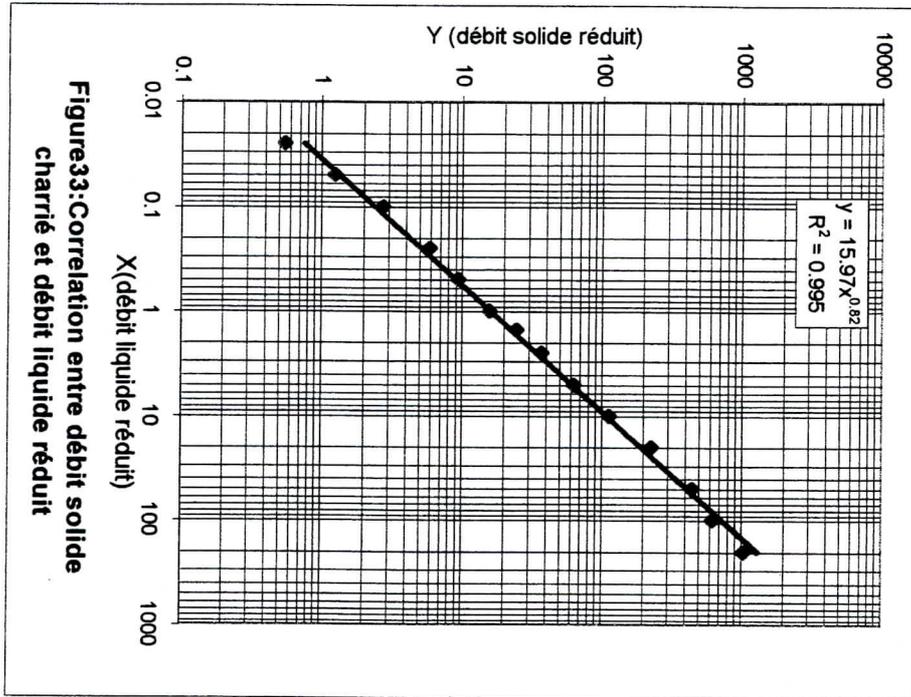
- c- Tracer les courbes X=f(Φ) avec Z comme paramètre, en utilisant l'équation X=f(Z,Φ) établie par la relation :

$$X = 91.(0.06+0.41\Phi^2)^{5/8} \cdot \Phi^{2.04} \cdot [Z/45.05\Phi^{2.58}(0.06+0.41\Phi^2)^{5/4}]^{47/24} \cdot [1/[Z/(45.05\Phi^{2.58}(0.06+0.41\Phi^2)^{5/4})-2]^{23/24}] \quad (IV.10)$$

De même pour cette équation, nous tirons la variation du débit solide par charriage et suspension (réduit) en fonction du débit liquide réduit, le tracé de cette relation (figure-34) , nous donne la corrélation suivante :

$$Z_{\max} = 20,456X^{0.662} \quad (IV.11)$$

Dans le cas de l'oued HARREZA le débit liquide réduit est supérieur à 50, à l'exception de trois années. Pour cela notre travail sera limité au calcul du transport solide total.



IV.3.2 Evaluation du transport solide total (charriage + suspension) et comparaison avec le modèle :

Pour l'évaluation du transport solide par charriage et suspension, nous utilisons la relation d'ENGLUND-HANSEN (IV.4), développée et traduite par RAMETTE en débit solide réduit ; le tableau 14 illustre les résultats obtenus par les étapes suivantes :

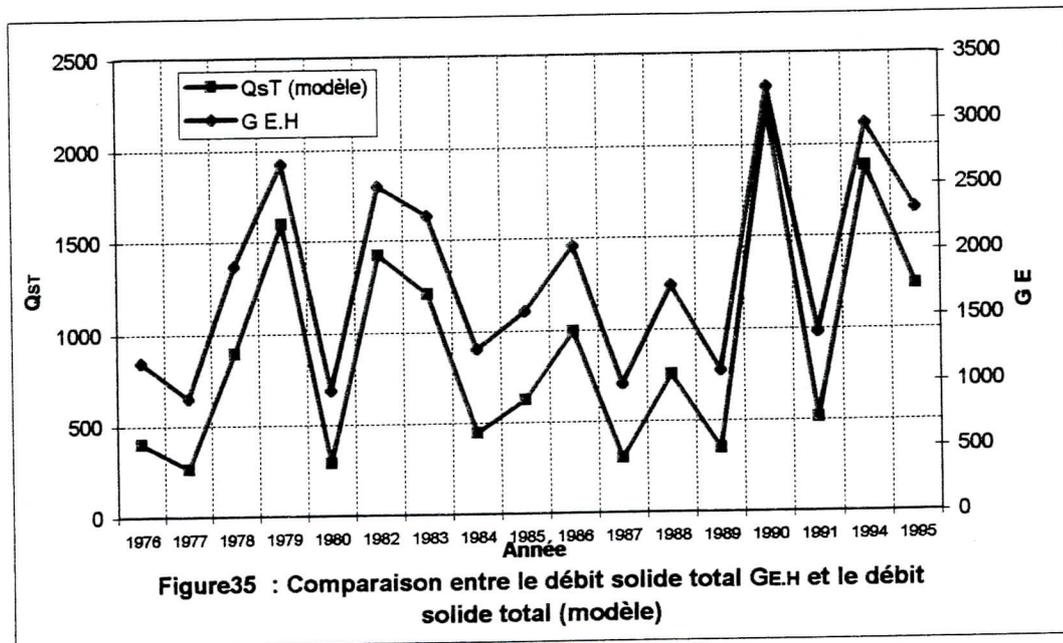
- a- Transformations des valeurs du débit liquide maximal en débit réduit (équation IV.5).
- b- Détermination des valeurs réduites du débit solide total par l'équation de corrélation (IV.11).
- c- En déduire le débit solide total $G_{E,H}$, à partir de l'équation (IV.7).

Les résultats sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 14 : Comparaison du débit solide $G_{E,H}$ avec le débit solide Q_{ST} (modèle)

Année	X(débit réduit)	QSTmodèle(Kg/s)	GE.H (Kg/s)
1976	71.224	400.130	1179.186
1977	50.858	261.647	906.304
1978	147.608	890.506	1910.279
1979	247.734	1595.576	2691.313
1980	52.315	287.544	961.339
1982	223.336	1418.468	2512.791
1983	193.214	1204.282	2282.984
1984	78.825	446.529	1261.058
1985	106.976	623.365	1543.595
1986	162.529	991.664	2036.015
1987	54.239	298.800	984.597
1988	127.058	753.784	1729.792
1989	62.403	347.082	1080.364
1990	328.436	2201.851	3243.660
1991	89.147	510.494	1368.092
1994	286.208	1880.900	2961.207
1995	197.061	1231.349	2312.978

La variation du transport solide par charriage et suspension $G_{E.H}$ et de Q_{ST} (modèle) en fonction du temps est représentée dans la figure 35 .



L'application de la méthode de Ramette nous a permis d'évaluer le transport solide par charriage et suspension ($G_{E.H}$) pour les débits liquides maximums sur la série d'observation choisie à l'exception des années 1981, 1992 et 1993 où le débit liquide réduit était inférieur à 50, domaine qui correspond au phénomène du charriage seul.

Les débits maximums ont servi de base pour l'application des équations de régressions permettant le calcul du transport solide total (Q_{ST} modèle).

Nous remarquons nettement que les débits solides $G_{E.H}$ et Q_{ST} (modèle) suivent la même variation dans le temps. Seulement le taux des transports solides calculé semble supérieur à celui du modèle.

Le rapport entre $G_{E.H}$ et Q_{ST} est donnée par le coefficient $r = 0,54$.

IV.4 CALCUL DU TAUX D'EROSION SPECIFIQUE PAR LA FORMULE DE TIXERONT :

Le taux d'érosion spécifique est donnée par la formule suivante :

$$E_{Tix} = K R^{0.15} \tag{IV.12}$$

Où :

E_{Tix} : taux d'érosion (t/km².an) ;

$K = 350$ pour les sols de faible à moyenne perméabilité [5] ;

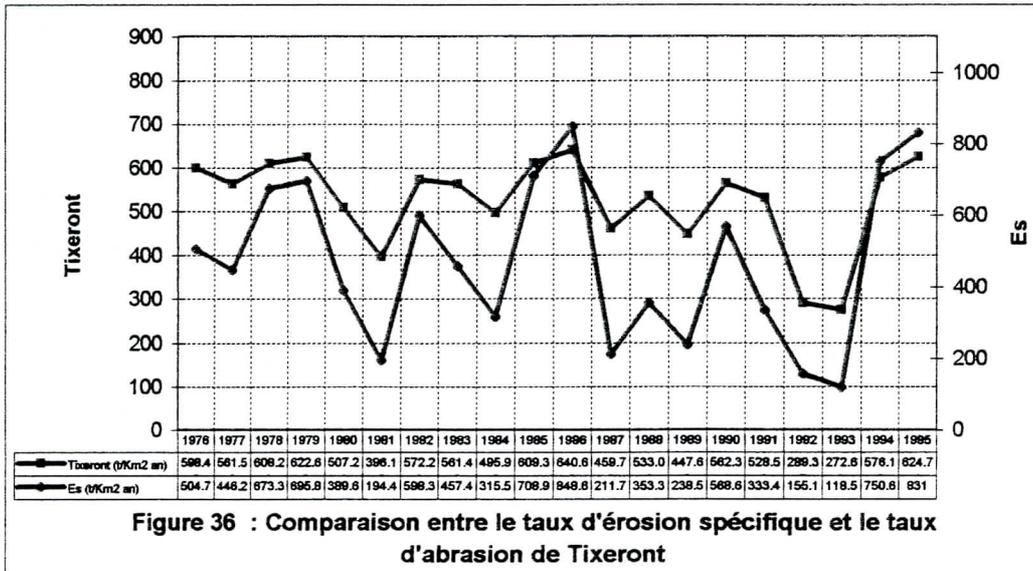
R : lame d'eau ruisselée en mm/an ; $Lr = P_0 - D_m$, où P_0 est la pluviométrie moyenne annuelle en mm ; D_m est le déficit annuel de l'écoulement en mm :

$$D_m = P_0 / \sqrt{0.9 + P_0^2/L^2} ; \text{ avec :}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 = 904.8;$$

$$T_{moy} = 16^\circ C.$$

La valeur moyenne de l'érosion spécifique donnée par la formule de TIXERONT est de l'ordre de 510 t/km².an, on peut dire qu'elle est comparable avec la valeur moyenne estimée par les calculs qui est égale à 470 t/km².an (figure 36) .



IV.5 COMPARAISONS ENTRE LE TAUX D'EROSION SPECIFIQUE ET QUELQUES PARAMETRES CLIMATIQUES :



Pour déterminer et proposer un modèle simple fondé sur une approche statistique, la démarche repose sur l'analyse de corrélation, la variable à expliquer étant l'érosion spécifique.

IV.5.1 Pluviométrie annuelle :

La pluie est l'agent principal de l'érosion, l'énergie des gouttes précipitées désagrège les fines particules du sol qui peuvent ensuite être entraînées par le ruissellement en fonction de sa capacité de transport.

Dans le but de trouver une équation reliant la pluie annuelle et l'érosion spécifique, nous avons tracé la variation de ces dernières (figure 37) qui donne un coefficient de corrélation $R^2=0.89$.

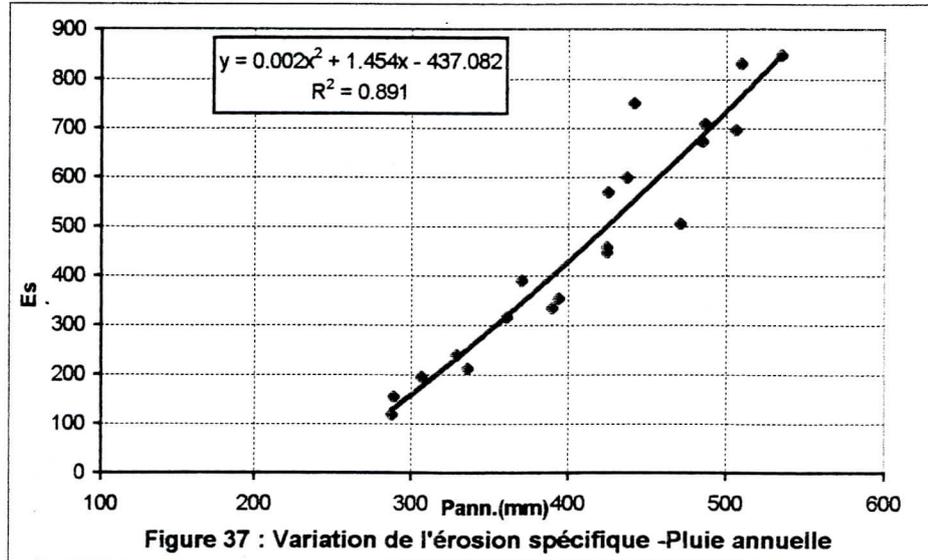


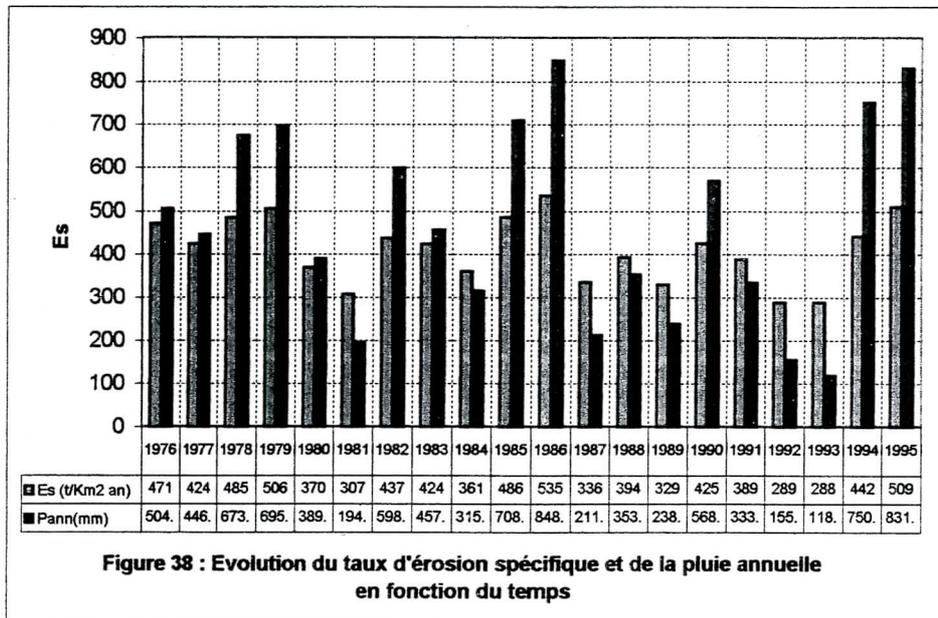
Figure 37 : Variation de l'érosion spécifique -Pluie annuelle

La relation trouvée entre la pluie annuelle et l'érosion spécifique est donnée par l'équation polynomiale suivante :

$$Es = 0.002 P_{ann}^2 + 1.454 P_{ann} - 437.08 \quad (IV.13)$$

D'après TIXERONT, une zone où la pluie annuelle est comprise entre 300 mm et 700 mm, l'érosion spécifique est très active ($E_s > 1200 \text{ t/km}^2 \cdot \text{an}$).

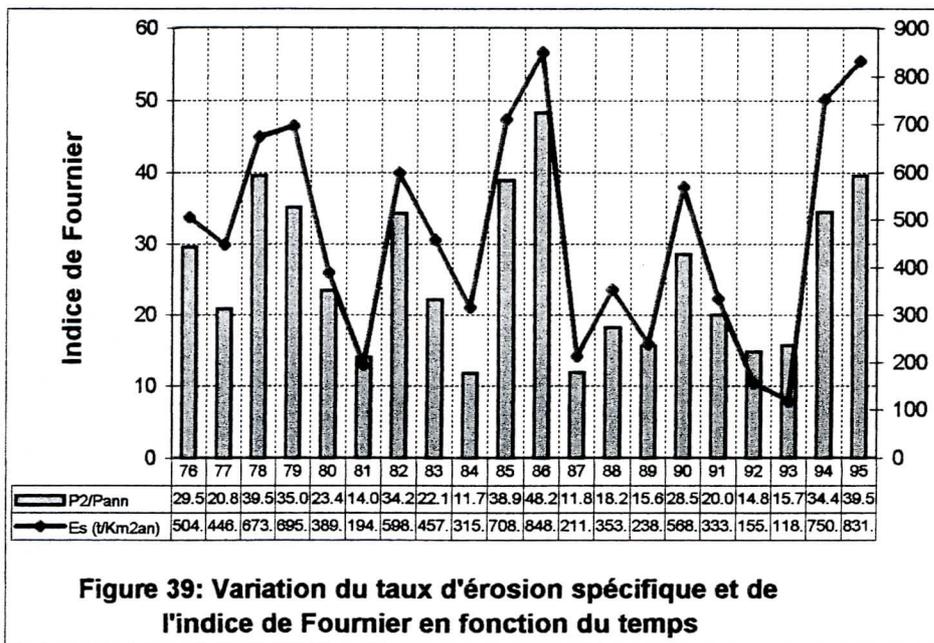
Dans le cas de notre bassin versant la pluviométrie moyenne est de 450 mm, l'érosion spécifique est de $470 \text{ t/km}^2 \cdot \text{an}$; n'atteignant pas la moitié de la valeur donnée par TIXERONT. Ceci est dû au couvert végétal qui assure une excellente protection des terrains. La variation de l'érosion spécifique et la pluie annuelle est donnée par la figure 38.



IV.5.2 Indice climatique de FOURNIER :

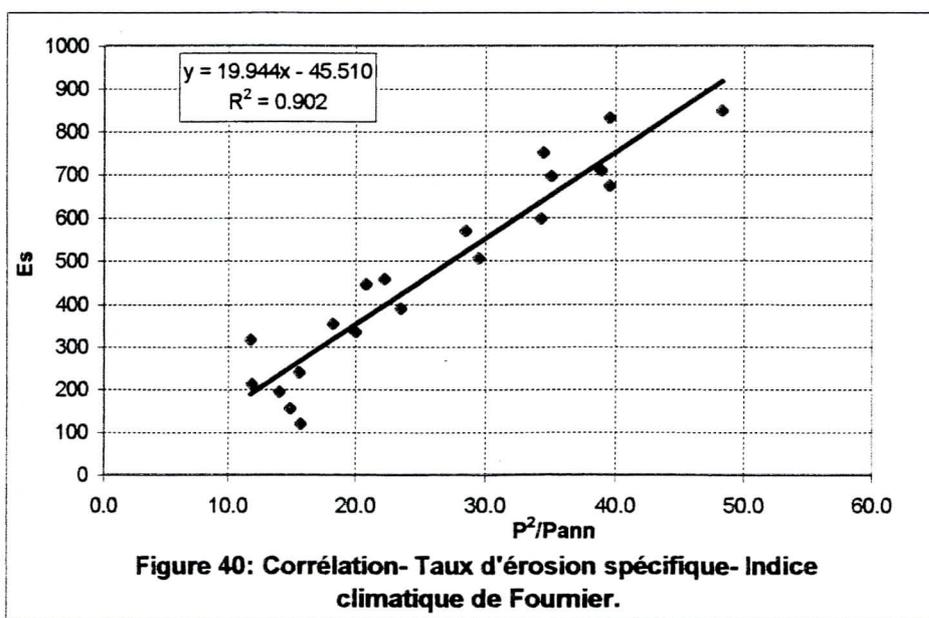
L'indice de FOURNIER est basé sur des données généralement disponibles, il traduit le contraste saisonnier des précipitations, ce contraste très marqué en Algérie septentrionale, contribue fortement à accroître le pouvoir érosif des précipitations.[7]

L'indice climatique est le rapport du carré de la pluviométrie du mois le plus arrosé à la pluviométrie moyenne annuelle ; la variation entre cet indice et l'érosion spécifique en fonction du temps est donnée sur la figure 39.



L'analyse graphique du taux d'érosion spécifique en fonction de l'indice climatique de FOURNIER (figure 40), donne un coefficient de corrélation $R^2=0.90$ avec la variation linéaire suivante :

$$E_s = 19.94 I_F - 45.51 \tag{IV.14}$$



Nous avons remarqué une amélioration entre le coefficient de corrélation de la pluviométrie annuelle et celui de l'indice climatique de FOURNIER.

IV.5.3 Indice d'ARNOLDUS :

ARNOLDUS (1978) reprend l'indice de FOURNIER en le modifiant de manière à englober les précipitations mensuelles de tous les mois, sans se limiter au mois de la pluviométrie maximale [7]. Cet indice se calcule par la relation suivante :

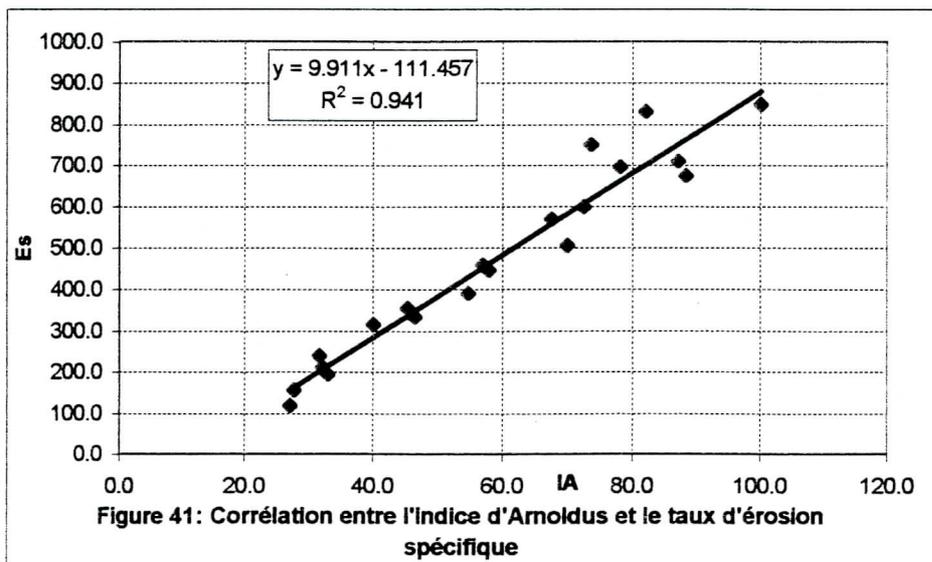
$$I_A = \sum_{i=1}^{12} P_i^2 / P \tag{IV.15}$$

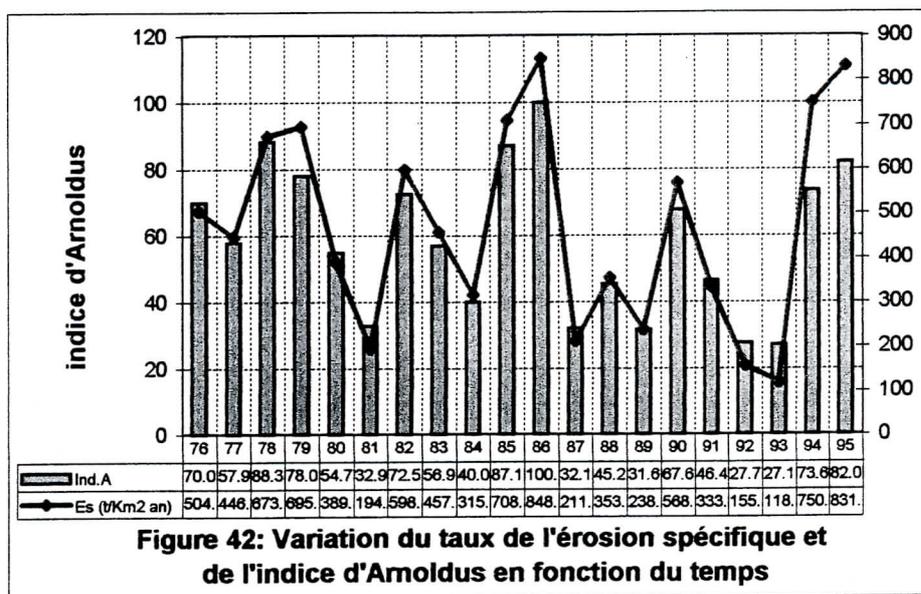
où : P_i : pluviométrie moyenne mensuelle ;

P : pluviométrie moyenne annuelle.

Les tests de corrélation appliqués à l'érosion spécifique annuelle (figure 41 et 42) montrent une augmentation importante du coefficient de détermination qui passe de 0.90 pour l'indice de FOURNIER à 0.94 pour l'indice d'ARNOLDUS. L'érosion spécifique est donnée par la relation :

$$Es = 9.91 I_A - 111.457 \tag{IV.16}$$



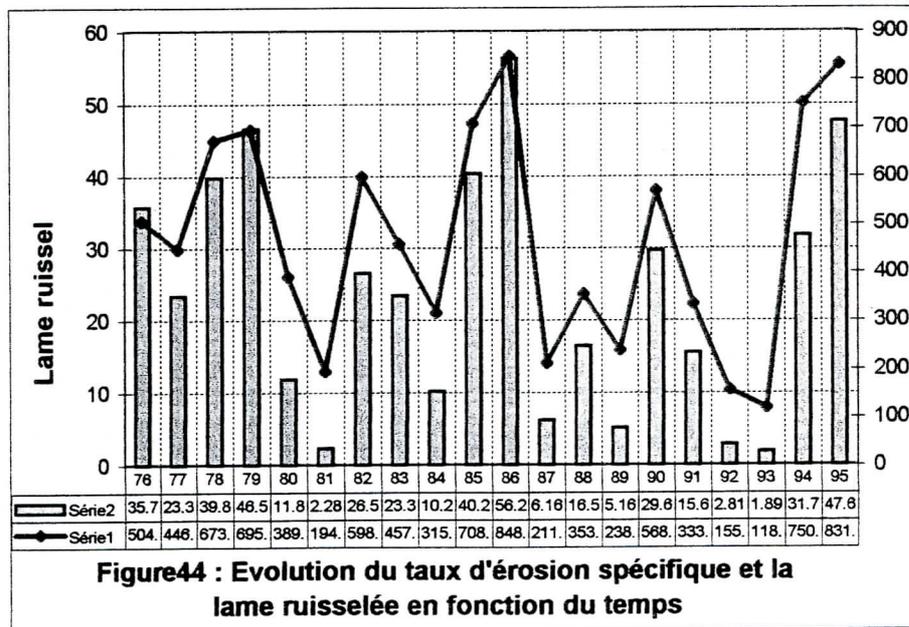
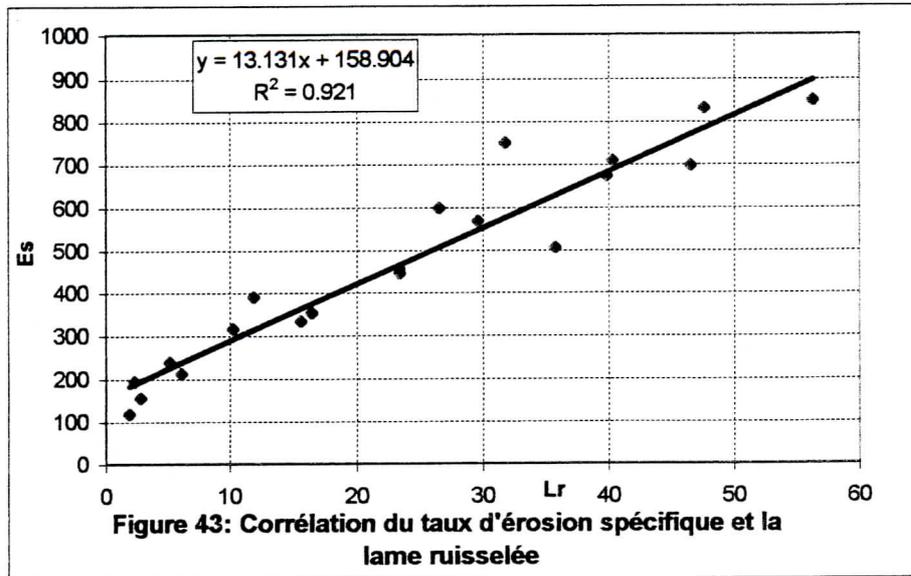


IV.5.4 Corrélation de l'érosion spécifique et la lame ruisselée :

La majorité des événements pluvieux sont entièrement absorbés par le sol et le ruissellement ne débute qu'après un seuil de pluie qui dépend des conditions d'humidité préalable. La lame ruisselée dépend de la pluviométrie et de la température moyenne annuelle du bassin versant, la mise en graphe de l'érosion spécifique et la lame ruisselée (figure 43) permet l'obtention d'une bonne corrélation de coefficient de détermination égale à 0.92 avec la relation linéaire suivante :

$$Es = 13.13 Lr + 158.9 \quad (IV.17)$$

Le tracé de la variation de l'érosion spécifique et la lame ruisselée en fonction du temps conclu que le ruissellement contribue parfaitement l'allure de l'érosion spécifique (figure 44).



Nous résumons finalement dans le tableau 15 comportant les résultats annuels des différents indices climatiques ainsi que l'érosion spécifique.

Tableau 15 : Comparaison de l'érosion spécifique et les indices climatiques.

Année	pluviométrie	Ind.FOURNIER	Lr	ARNOLDUS	Es (t/km ² an)
1976	470.9	29.512	35.714	70.054	504.699
1977	424.4	20.824	23.382	57.901	446.175
1978	484.7	39.525	39.810	88.314	673.300
1979	506.1	35.063	46.554	78.079	695.841
1980	370.1	23.472	11.861	54.789	389.598
1981	306.9	14.051	2.284	32.957	194.427
1982	437.1	34.249	26.524	72.580	598.346
1983	424.3	22.198	23.360	56.974	457.374
1984	360.9	11.781	10.214	40.089	315.456
1985	486.3	38.907	40.298	87.165	708.898
1986	534.6	48.284	56.267	100.068	848.587
1987	335.8	11.883	6.162	32.168	211.663
1988	393.8	18.207	16.509	45.296	353.269
1989	328.9	15.610	5.161	31.674	238.481
1990	425.3	28.502	29.600	67.600	568.635
1991	389.4	20.020	15.602	46.423	333.432
1992	288.9	14.877	2.814	27.700	155.096
1993	288	15.727	1.894	27.143	118.542
1994	441.8	34.423	31.730	73.682	750.608
1995	509.3	39.525	47.603	82.032	831.033
Coefficient de détermination	0.89	0.90	0.92	0.94	

On remarque qu'une progression du coefficient de corrélation apparaît en passant de la pluviométrie moyenne annuelle à l'indice d'ARNOLDUS, ce qui permet de conclure que l'indice d'ARNOLDUS traduisant au mieux la répartition mensuelle et annuelle des précipitations contribue parfaitement à expliquer le transport solide.

IV.6 ESTIMATION DU TAUX D'ENVASEMENT DU BARRAGE HARREZA :

IV.6.1 Présentation du barrage :

La retenue du barrage HARREZA permet de satisfaire partiellement les besoins en eau d'irrigation de la haute plaine rive gauche du Cheliff, mise en service en fin d'année 1984.

Le remplissage de la retenue se fait par stockage et accumulation des apports naturels de l'oued HARREZA ainsi que par pompage de débits de l'oued Cheliff à partir de la station de pompage d'El Khemis. Il est à noter que cette station n'assure plus son rôle pour cause de mauvais fonctionnement des pompes.

L'apport moyen de l'oued HARREZA est estimé à 7.5 Hm^3 la capacité du réservoir à la côte de la retenue normale (313 m) est de 75 Hm^3 dont 50 Hm^3 de volume utile [3].

IV.6.2 Calcul du taux d'envasement :

L'estimation du taux de sédiments arrivés au niveau de la retenue du barrage pour une érosion spécifique de $470 \text{ t/km}^2 \text{ an}$, une durée de vie du barrage $T=26 \text{ ans}$, une densité sèche des sédiments ρ_s égale à 1.6 t/m^3 , et une surface du bassin versant au droit du barrage $S=142 \text{ km}^2$, le volume des sédiments serait de $1,08 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, ce qui permet de dire qu'à l'horizon 2010 le barrage HARREZA serait envasé de 14.5% de sa capacité totale.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail est consacré à l'approche de la quantification des apports solides par charriages et en suspensions et de prévenir l'envasement du barrage HARREZA sur l'oued HARREZA destiné à l'irrigation d'une partie des terres du haut Cheliff.

Tout au long de ce travail, nous avons essayé d'exploiter au maximum les informations mises à notre disposition ayant pour objectif prioritaire, l'estimation correcte de l'importance des apports solides.

En se basant sur la série des données observées, nous avons remarqué pour les corrélations des débits liquides en fonction des débits solides charriés instantanés, une valeur du débit liquide qui divise la variation globale en deux équations ; la première correspondante aux débits liquides inférieurs à $1,5\text{m}^3/\text{s}$ ($G_{S1}=24,08.Q_L^{0.245}$) et la deuxième équation correspond aux débits liquides supérieurs ou égales à $1,5\text{m}^3/\text{s}$ ($G_{S2}=16,67.Q_L^{0.727}$) pour un coefficient de corrélation $R=0.978$. Ces équations de régressions ont permis l'obtention des résultats satisfaisants et ont servi de base pour l'évaluation des débits solides charriés annuels représentant 34% du transport solide en suspension.

L'érosion spécifique annuelle ainsi déduite est de l'ordre de $470\text{ t/km}^2\text{an}$; dans la variation annuelle de celle-ci on peut nettement remarquer les années qui ont contribuées d'une manière potentielle au comblement du barrage HARREZA.

Une comparaison satisfaisante a été obtenue, en appliquant la méthode de RAMETTE aux données de l'oued HARREZA, nous constatons que le transport solide total calculé par la méthode de RAMETTE et celui de notre modèle suivent la même variation temporelle, seulement les valeurs du transport solide calculées approchent légèrement celles du modèle. Nous pensons que les résultats obtenus sont encourageants et doivent être améliorés au fur et à mesure que des nouvelles données seront disponibles.

Par ailleurs, Le taux d'érosion spécifique déduit à partir de la formule de TIXERONT est comparable à la valeur moyenne calculée. Parmi les indices climatiques étudiés nous remarquons que l'indice d'ARNORLDUS explique au mieux l'érosion spécifique.

Nous souhaitons que notre travail a permis une bonne compréhension du mécanisme de l'érosion et du régime des écoulements dans les cours d'eau, et qui servira de base pour la définition d'une méthodologie de lutte contre l'érosion en vue de l'accroissement de la durée de vie des aménagements hydrauliques et la sauvegarde du milieu physique.

Il est admis que la meilleure protection des bassins versants est le couvert végétal adéquat qui limiterait certainement le processus d'érosion ; les expériences montrent que la céréaliculture améliore la structure du sol et diminue la battance et donc l'érosion.

Notre modeste travail laisse les voies tracées devant les intéressés, afin de pouvoir mieux combattre le phénomène de l'érosion. Une prise de conscience de la gravité du phénomène, de ces conséquences ainsi qu'une coordination des travaux sur ce domaine sont indispensables dans notre pays car il s'agit de l'avenir et de la survie des générations futures.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ACKERS P. et WHITE W.R (1973) "Sediment Transport : new approach and analsis". ASCE, Hydraulics Division, VOL.99.N°Hy11.
- [2] ARABI M.(1991) : Hydropluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina. Thèse unique, Université Louis pasteur.
- [3] BENABDELOUAHAB M. (1992) : « Etude et conception du comportement du barrage de HARREZA » E.N.S.H. Blida.
- [4] BODY K. (1979) : « Calcul des intensités des pluies et des débits de crues ».
- [5] BONNARD et GARDEL (1974) : « Etude hydrologique du barrage de HARREZA ». Etude D.E.M.R.H./Shyl N°74/26.
- [6] CHAUMONT. M. C. PAQUIN (1971) : Carte pluviométrique de l'Algérie. Alger (A.N.R.H.).
- [7] DEMMAK A. (1982) : « Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale ». Thèse de Docteur-Ingénieur. Université de Pierre et Marie Curie. France 323p.
- [8] Mc. DOWELL D.M. (1989): "A general formula for estimation of the rate transport of non-cohesive bed-load". Journal de recherches hydrauliques, vol.27 , N°3 , pp355-361.
- [9] GENTIL L.(1903) : Etude géologique du bassin de la Tafna. 428p.
- [10] GENTIL L.(1904) : Première édition de la feuille de Miliana.
- [11] GRAF W.H. (1971) : "Hydraulics of sediment transport". Tome 1- 319 p. Edition Mc Graw-Hill Book Company. New York.
- [12] G.T.Z (1996) : Projet pilote d'aménagement intégré du bassin versant de l'oued Mina . « Ecoulement et érosion des petits bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen ». A.N.R.H

- [13] HOROVITZ E. (1974) : « Etude hydrologique pour le barrage en projet sur l'oued HARREZA » . Service Hydrologie A.N.R.H.
- [14] HUG M. : Mécanique de fluide appliquée. Edition Dunod, Paris France.
- [15] KARIM H.F & KENNEDY J.F.(1990) : « Menu of couple velocity and sediment discharge relation for rivers ». Journal of Hydraulic Engineering, vol.116. N°8.
- [16] KOURI L. (1993) : « l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'oued Mina – Etude des processus et types de fonctionnement de ravins dans la zone des marnes tertiaires ». L.E.C.T, Université Louis Pasteur, Strasbourg., France.
- [17] LARFI B. (2001) : « Prévision du transport soàlide dans le bassin versant de l'oued Isser », application à l'envasement bu barrage de Béni-Amrane ; Thèse de Magister, N)05/2001, 90p. Institut de Génie Rural . Université de Blida.
- [18] LEBRETON J.C. (1974) : « Dynamique fluviale ». Edition Eyrolles Paris 209p.
- [19] MEDDI M. (1992) : « Hydropluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina ». Thèse unique, université Louis Pasteur.
- [20] MEDINGER G. (1960) : « Barrage du Koudiat Acerdoune sur l'oued Isser » rapport d'étude du débit régularisé A.N.R.H.
- [21] PNUD / O.P.E. (1987) : « Ressource en eau dans les pays de l'Afrique du nord ». Projet RAB/80/011. Rapport technique ; volume 1.
- [22] QUESNEL B. (1973) : « Traité hydraulique fluviale appliquée ». Edition Eyrolles ; Paris.273p.
- [23] RAMETTE M. (1984) : « Réflexions sur les lois de la morphologie fluviale » . Rapport Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou E40/84.03 ; 22p.

- [24] RAMETTE M. (1988) : « Morphologie et transport solide de rivière à forte pente ». Revue : la houille blanche, N°3/4 – pp315-321.
- [25] RAMETTE M. (1990) : « Essai d'explication et de quantification des morphologies fluviales à partir de la théorie du régime ». Revue : houille blanche, N)1, pp43-60.
- [26] SADOK A. et MARCHE C. (1994) : « Une contribution pratique à l'estimation du transport des sédiment dans l'écoulement fluviale », CAN.J.CIV.ENG. Volume 21, pp490-498.
- [27] SARI D. (1977) : « L'homme et l'érosion dans l'ouarsenis », SNED Alger.
- [28] STEPHAN M. (1974) : « Volume régularisable pour le barrage de HARREZA sur l'oued HARREZA », Rapport A.N.R.H, Etude N°31/SHYL/74.
- [29] TIXERONT J. (1960) : « Taux d'abrasion et teneur en suspension des cours d'eau d'Algérie et de Tunisie ». Secrétariat d'état à l'agriculture Tunis.
- [30] TOUAIBIA B. (1986) : « Quantification de la salinité et du transport solide – cas du bassin versant de l'oued Deurdeur ». Institut National Agronomique El Harrach Alger . Thèse de Magister 119p.