



Département Hydraulique



Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau : LRS-EAU

Mémoire de Magister en Hydraulique

Présentée par :

CHENITI Naoual

Ingénieur d'Etat en Hydraulique (ENP)

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

THEME :

Contribution à la quantification du transport solide au droit de deux stations hydrométriques

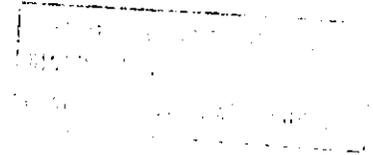
Mémoire soutenu publiquement le Mercredi 02 Juin 2004 à 10h00

devant le jury :

Présidente :	B. TOUAIBIA (ENSH de Blida)	Maître de conférence
Directeur de mémoire :	A. KETTAB (ENP)	Professeur
Co-directeur de mémoire :	B. REMINI (Université de Blida)	Professeur
Examineurs :	M. MEDDI (C.U. de Khemis Miliana)	Maître de conférence
	Y. MOULOUDI (ENP)	Chargé de cours
	M. BERKANI (ENP)	Chargé de cours

2003/2004

Remerciements



Tout d'abord, je tiens à remercier les directeurs du mémoire, *M. A. Kettab*, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour son aide et ses instructions qui m'ont permis de mener à bien et à terme le présent mémoire, *M. B. Remini*, Professeur à l'Université de Blida, pour ses connaissances qu'il m'a fournies ainsi pour son soutien et ses conseils durant le présent travail.

Je tiens à remercier très sincèrement *Mme B. Touaibia*, Maître de conférence à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique de Blida (ENSH), pour son aide et ses précieuses connaissances dans le domaine du transport solide, pour son précieux temps qu'elle m'a consacré et pour avoir accepté de présider le jury de la soutenance .

Mes sincères remerciements à *M. M. Meddi*, Maître de conférence au universitaire de Khemis Miliana, *M. M. Berkani*, chargé de cours à l'Ecole Nationale Polytechnique et *M. Y. Mouloudi*, chargé de cours à l'Ecole Nationale Polytechnique pour avoir accepté de lire et corriger ce travail et de faire partie des membres de jury.

Je tiens à remercier essentiellement *Mme Ait Oufroukh*, Ingénieur au département d'hydrologie à l'ANRH qui m'a fourni les données essentielles à ce travail, ainsi qu'à tous le personnel du département et des archives qui étaient à notre disposition. Et sans oublier *Melle S. Cherifi* du département pédologie, pour son soutien et son aide pour la fourniture de la documentation utile à la préparation de ce travail ; ainsi qu'à tout le personnel de la bibliothèque de l'Agence.

Je tiens à remercier profondément mon mari pour son soutien, son aide et son encouragement pour l'achèvement de ce travail.

Pour finir, je remercie tout le personnel de la bibliothèque et la périodique de l'Ecole ; ainsi qu'à toute personne qui a contribué de près ou de loin à ce modeste travail.

وأهداء

أهدي هذا العمل المتواضع إلى أمي العزيزة التي تعبت و سهرت على تربيتي
وهيأت لي كل الظروف من أجل الدراسة وطلب العلم والتي لم تتوقف عن
تشجيعي أبداً .

إلى والدي العزيز الذي عرس في حب العلم والتعلم والمثابرة ، فصورته وهو
بين كتبه و أوراقه لن تبرح ذاكرتي ، وكذا لتشجيعه المتواصل لي .
إلى زوجي العزيز الذي لم يتوقف عن تشجيعي ومساعدتي في إنهاء هذا العمل
على أحسن صورة .

إلى كل أخواني وأخوتي الأعزاء وكل عائلتي وعائلة رمضاني ، إليهم جميعاً
أهدي هذا العمل .

كما أهدي هذا العمل إلى ابنتي الصغيرة "ميحة" .

ملخص:

يقدم هذا العمل حوصلة شاملة لكل الأعمال المقدمة في ميدان الترسيبات وبالأخص الحت و التتقل الرسوبي. لهذا قمنا بدراسة شاملة و عميقة لكل الأعمال الخاصة بتقييم الحت و التتقل الرسوبي. ثم أنجزنا برنامجا معلوماتيا يعتمد على تركيبة رياضية لتقييم التتقل الرسوبي في الوديان الجزائرية. تشمل هذه التركيبة خصائص التدفق و السائل و الرسوبيات. و تعتمد كذلك على كيفية التتقل و هذا باستعمال تصنيف رامات Ramette.

Abstrat :

The present work is a summary of differents studies established in sediment domain (erosion and solid transport).

This study was achieved in two phases : first , a bibliography research on erosion and solid transport evaluation (using empirical, statistical and mathematical methods). Second , a mathematical model for evaluation of solid transport (bed load, suspended load or total) was developed for Algerians Oueds. This model is based on Ramette classification.

Résumé :

Le présent travail présente une synthèse des études élaborées dans le domaine de la sédimentation (érosion et transport solide).

En premier lieu nous avons entrepris une étude bibliographique très approfondie sur les travaux d'évaluation de l'érosion et du transport solide, empiriques, statistiques ou mathématiques, ainsi celles effectués en Algérie.

Puis nous avons élaboré un modèle mathématique qui permet d'évaluer le transport solide dans les oueds algériens. Ce modèle fait appel à des formules mathématiques qui tiennent compte des caractéristiques de l'écoulement, du fluide et des sédiments, et du mode de transport solide (par charriage, en suspension ou total) en se basant sur la classification de Ramette.

الكلمات المفتاحية : التتقل الرسوبي □ الرسوبيات □ التتقل الرسوبي الأرضي □ التتقل الرسوبي المحمول □ قوة الدفع □ معادلة دي بويس .

Keys words: Solid transport, sediment, bed load, suspended load, traction force, formula of Du Boys.

Mots clés : Transport solide, sédiment, charriage, suspension, force tractrice, formule de Du Boys.

Résumé :



Le présent travail présente une synthèse des études élaborées dans le domaine de la sédimentation (érosion et transport solide).

En premier lieu nous avons entrepris une étude bibliographique très approfondie sur les travaux d'évaluation de l'érosion et du transport solide, empiriques, statistiques ou mathématiques, ainsi celles effectués en Algérie. Nous avons exposé les formules les plus utilisées et acceptées comme universellement adéquates, parmi les quelles nous citons : MPM, Shen et Hung, Schoklitch, Ackers et White, et autres ...

Puis nous avons élaboré un programme mathématique qui permet d'évaluer le transport solide dans les oueds algériens. Ce modèle fait appel à des formules mathématiques qui tiennent compte des caractéristiques de l'écoulement, du fluide et des sédiments, et du mode de transport solide (par charriage, en suspension ou total) en se basant sur la classification de Ramette.

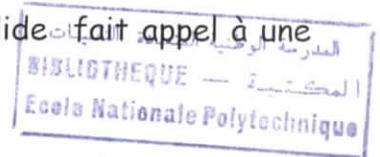
En Algérie l'ensemble des modèles de quantification concernent seulement le transport solide en suspension (moyennant un modèle statistique), le taux de charriage dans le transport solide globale est estimé, d'une façon approximative.

L'objectif de cette étude est la quantification ou la prévision du transport solide dans les oueds algériens en utilisant une formule mathématique qui tient compte du transport solide charrié, des caractéristiques de l'écoulement (débit, rayon hydraulique, pente du lit et rugosité), du fluide (masse volumique) et des sédiments (masse volumique et diamètre).

Les formules de prévision de transport solide peuvent être classées comme formules de transport solide par charriage, en suspension, ou total (en suspension et par charriage), et ce selon le régime d'écoulement qui correspond à la valeur de la force de frottement étoilée, τ^* :

- ◆ si $\tau^* < 0.25$: l'estimation du transport solide fait appel à une formule de charriage,
- ◆ si $0.25 < \tau^* < 2.5$: l'estimation du transport solide fait appel à une formule de transport total.

◆ si $2.5 < \tau^* < 10$: l'estimation du transport solide fait appel à une formule de transport en suspension.



Nous avons élaboré un programme informatique qui permet de déterminer le mode de transport puis d'estimer le débit solide par charriage et Total.

Le programme a été exécuté pour un cas réel (la Tafna et l'Isser). Les points essentiels tirés de cette étude sont :

- La Tafna a une tendance à charrier les sédiments car la force de frottement étoilée, τ^* est dans la plupart des cas inférieure à 0.25 .

- Contrairement à l'Isser, le transport solide s'effectue en suspension et par charriage car la force de frottement étoilée, τ^* est toujours supérieure à 0.5. Dans ce cas le transport solide est évalué par une formule de transport solide total et une formule de transport solide en suspension.

Mots clés : Transport solide, charriage, suspension, envasement, force tractrice.

Sommaire

Liste des symboles	4
Liste des figures	5
Liste des tableaux	7
Introduction	8
1ere Partie	
Chapitre I. Généralités et Définitions.....	11
Introduction	11
I- Mécanismes et milieux sédimentaires	12
I-1- Altération et érosion	12
I-2- Transport et dépôt des sédiments.....	12
II- Ecoulement d'un mélange	15
II-1- Ecoulement newtonien	15
II-2- Ecoulement quasi-newtonien	15
II-3- Ecoulement non-newtonien.....	16
III- Caractérisation de la phase solide	16
IV- Modes de transport.....	21
IV-1- Le transport actif.....	21
IV-2- Le transport en suspension.....	21
V- Le critère fondamental de l'érosion	24
V-1- Vitesse d'arrachement.....	24
V-2- La force tractrice	25
V-3- Cas des berges.....	27
V-4- La force tractrice critique.....	27
VII- Début d'entraînement des sédiments.....	30
VII-1- Début d'entraînement des sédiments en suspension.....	30
VII-2- Début d'entraînement des sédiments sur le fond.....	30
Chapitre II. Méthodes de quantification du transport solide.....	33
Introduction	33
I- Méthodes directes	33
II- Formules de quantification du transport solide.....	34
II-1- Transport par charriage	35
Quantification du Transport Solide.....	1

II-2- Transport en suspension	40
II-3- Transport total	44
II-4- Fiabilité des formules de transport solide.....	53
II-5- Tableaux : Domaine de validité.....	54

Chapitre III. Méthodes de quantification du transport solide en Algérie..... 57

Introduction	57
II- Etudes réalisées sur le transport solide et l'érosion en Algérie.....	61
II-1- Medinger (Mars 1960)	61
II-2- Tixeront (Août 1960)	61
II-3- Capolini (1965-1969)	62
II-4- Sogreah (1969).....	63
II-5- Demmak (1982)	63
II-6- Etude PNUD/OPE (1987)	64
III- Modèles de quantification de transport solide en Algérie	66
III-1- Formule de Fournier (1960).....	66
III-2- Formule de Tixeront (1960).....	67
III-3- Formule Sogreah (1969)	67
III-4- Formule de Gavrilovic	68
III-5- Formule de l'INRH (1982)	69

2eme Partie

Chapitre IV. Elaboration du programme mathématique..... 70

Introduction	70
I- Formules de transport solide utilisées.....	70
III- L'organigramme de calcul.....	73

Chapitre V. Présentation des régions d'études..... 75

V-1- Présentation du bassin versant La Tafna	75
V-1-1-Relief et topographie.....	75
V-1-2-Hydrographie et régime hydraulique	75
V-1-3-Géologie et végétation	75
V-1-4-Climat et pluviométrie	76
V-1-5-Granulométrie des sols	76
V-1-6-Mesures de l'envasement.....	76
V-2- Présentation du bassin versant L'Isser	79
V-2-1-Géologie et végétation	79
V-2-2-Hydrographie et régime hydraulique	79
V-2-3-Climat et pluviométrie	81
V-2-4-Granulométrie des sols	81
V-2-5-Mesures de l'envasement.....	81

Liste des symboles

- A : fonction de Shields
 b : largeur du lit (m)
 C : concentration (transport total)
 d : diamètre du grain (m)
 d_{50} : diamètre du grain, 50% sur la courbe granulométrique (m)
 d^* : diamètre adimensionnel (sédimentologique)
 Fr : nombre de Froude $Fr = U / \sqrt{gh}$
 g : accélération gravitationnelle (m/s^2)
 h : tirant d'eau (m)
 G_s : débit solide en poids (kg/s) $G_s = \rho_s g Q_s$
 G'_s : débit solide en poids dans l'eau (kg/s) $G'_s = (\rho_s - \rho)g Q_s$
 h : profondeur d'eau
 J_e : pente énergétique
 J_f : pente du fond
 K_s : coefficient de rugosité totale de Manning Strickler ($m^{-1/3} s^{-1}$)
 K'_s : coefficient de rugosité due aux granulats ($m^{-1/3} s^{-1}$)
 n : coefficient de Manning ($s/m^{1/3}$)
 p : porosité
 P_m : le périmètre mouillé
 Q : débit liquide (m^3/s)
 Q_s : débit solide (m^3/s)
 q_s : débit solide unitaire ($m^3/s/m$)
 q_{ss} : débit solide en suspension unitaire ($m^3/s/m$)
 R_h : rayon hydraulique
 R_* : nombre de Reynolds sédimentologique
 R_w : nombre de Reynolds de chute
 s : densité des grains
 S : la section mouillée
 U : vitesse d'écoulement (m/s) $U = K_s h^{2/3} J^{1/2}$
 u_c : vitesse moyenne critique (m/s)
 u^* : vitesse de cisaillement (m/s)
 u'^* : la vitesse de frottement due aux granulats (m/s)
 w : vitesse de chute d'une particule (m/s)
 ε : coefficient d'échange turbulent (m^2/s)
 ε_s : coefficient d'échange turbulent des particules solides (m^2/s)
 δ : épaisseur de la couche laminaire
 γ : poids spécifique de l'eau, $\gamma = \rho g$
 γ_s : poids spécifique du grain
 κ : constante de Karman : $\kappa = 0.4$
 ξ : coefficient de traînée
 ξ_M : paramètre de rugosité selon Meyer-Peter
 ρ : masse volumique de l'eau (kg/m^3)
 ρ_s : masse volumique des sédiments
 τ : force de cisaillement
 τ_c : force de cisaillement critique
 τ^* : force de cisaillement adimensionnelle
 τ_c^* : force de cisaillement adimensionnelle critique
 ν : viscosité cinématique l'eau ($= 1.186 \cdot 10^{-6} m^2/s$)
 ζ : l'exposant de Rouse



Liste des figures

Figure I 1-Domaine d'érosion, de transport et de dépôt selon la taille des particules et la vitesse de courant [Biju-Dval].	13
Figure I 2-Schéma des modes de transport [Graf, 1996].	23
Figure I 3-Exemple de diagramme de Shields [Lebreton, 1974].	29
Figure I 4-Domaine des modes de transport selon la taille des particules et la vitesse étoilée de l'écoulement] Belleudy, 1996.[31
Figure II 1-Intégral de $\int A_E (L)$, et de $\int A_E (L)$, utilisée dans la méthode d'Einstein (1950).	43
Figure II 2-Valeurs de la fonction f dans la formule de Laursen [Lebreton, 1974].	45
Figure II 3-Courbes de Colby [Lebreton, 1974].	46
Figure II 4-Valeurs des paramètres de la formule de Colby [Lebreton, 1974].	47
Figure IV -1-L'organigramme principal de calcul de transport solide.	73
Figure IV 2-L'organigramme détaillé de calcul de transport solide.	74
Figure V 1-Carte de situation du bassin versant Tafna.	77
Figure V 2-Profil en long de l'oued Tafna.	78
Figure V 3-Carte de situation du bassin versant Isser.	80
Figure V 4-Carte schématique de végétation du bassin versant Isser [Larfi, 2001].	82
Figure VI-1-a Variabilité du débit solide au cours de la crue du 120287.	87
Figure VI-2-a Variation du ΔQ au cours d'une crue de la crue du 120287.	87
Figure VI-3-a Evolution du débit solide pour chaque valeur du débit - crue du 120287.	87
Figure VI-1-b Variabilité du débit solide au cours de la crue du 230391.	88
Figure VI-2-b Variation du ΔQ au cours d'une crue de la crue du 230391.	88
Figure VI-3-b Evolution du débit solide pour chaque valeur du débit - crue du 230391.	88
Figure VI-1-c Variabilité du débit solide au cours de la crue du 250897.	89
Figure VI-2-c Variation du ΔQ au cours d'une crue de la crue du 250897.	89
Figure VI-3-c Evolution du débit solide pour chaque valeur du débit - crue du 250897.	89
Figure VI-4-a-1 Variation du débit solide en fonction du débit-crue 1 (C.T. puissance)	91
Figure VI-4-b-1 Variation du débit solide en fonction du débit-crue 2 (C.T. puissance)	91
Figure VI-4-c-1 Variation du débit solide en fonction du débit-crue 3 (C.T. puissance)	91
Figure VI-4-a-2 Variation du débit solide en fonction du débit-crue 1 (C.T. linéaire)	92
Figure VI-4-b-2 Variation du débit solide en fonction du débit-crue 2 (C.T. linéaire)	92
Figure VI-4-c-2 Variation du débit solide en fonction du débit-crue 3 (C.T. linéaire)	92
Figure VI 5-Sensibilité du débit solide par charriage à la valeur de Π_M .	94
Figure VI-6-a- 1 Courbe de tendance puissance du débit solide par charriage au cours de l'année 1974.	94
Figure VI-6-b- 1 Courbe de tendance puissance du débit solide par charriage au cours de l'année 1992.	94
Figure VI-6-a- 2 Courbe de tendance linéaire du débit solide par charriage au cours de l'année 1974.	95
Figure VI-6-b- 2 Courbe de tendance linéaire du débit solide par charriage au cours de l'année 1992.	95
Figure VI-6-c Variation du débit solide par charriage et de la force de frottement étoilée au cours de l'année 1992.	96
Figure VI-6-d Variation du débit solide par charriage et de la force de frottement étoilée au cours de l'année 1974.	96
Figure VI-7-a Variabilité du débit solide au cours de la crue du 191082-Isser.	98
Figure VI-7-b Variation du ΔQ au cours d'une crue de la crue du 191082-Isser.	98
Figure VI-7-c Evolution du débit solide pour chaque valeur du débit- crue du 191082-Isser.	98
Figure VI-8-a Variabilité du débit solide au cours de la crue du 020783-Isser.	99
Figure VI-8-b Variation du ΔQ au cours d'une crue de la crue du 020783-Isser.	99
Figure VI-8-c Evolution du débit solide pour chaque valeur du débit- crue du 020783-Isser.	99
Figure VI-9-a Variabilité du débit solide au cours de la crue du 250496-Isser.	100
Figure VI-9-b Variation du ΔQ au cours d'une crue de la crue du 250496-Isser.	100
Figure VI-9-c Evolution du débit solide pour chaque valeur du débit- crue du 250496-Isser.	100
Figure VI 10-Variation de la force de frottement étoilée $\Delta \tau$ pendant une période de dix ans (Tafna).	101
Figure VI 11-Variation de la force de frottement étoilée $\Delta \tau$ pendant une période de dix ans (Isser).	101
Figure VI-12-a Courbe d'ajustement en puissance Formule MPM – Tafna.	105

Figure VI-12-b *Courbe d'ajustement linéaire Formule MPM – Tafna* 105
Figure VI-13-a *Courbe d'ajustement en puissance: Formule Schoklitsch – Tafna* 106
Figure VI-13-b *Courbe d'ajustement linéaire: Formule Schoklitsch – Tafna* 106
Figure VI 1-14-*Courbe d'ajustement1: débit solide en suspension – Tafna* 107
Figure VI 2-15-*Courbe d'ajustement2: débit solide en suspension – Tafna* 107



Liste des tableaux

Tableau I 1- <i>Modes de transport selon Ramette</i>	32
Tableau I 2- <i>Classification de Ramette [Belleudy, 1996]</i>	32
Tableau II 1- <i>Valeurs des coefficients d'Ackers et White [Graf, 1996 ; Cardoso, 1994]</i>	49
Tableau II 2- <i>Domaine de validité des formules</i>	52
Tableau II 3- <i>Domaine de validité selon le diamètre des sédiments</i>	55
Tableau II 4- <i>Domaine de validité selon le régime de transport</i>	56
Tableau III 1- <i>Quelques valeurs mesurées dans le monde [Benhadj, 1994]</i>	58
Tableau III 2- <i>Quantification de l'alluvionnement de quelques barrages algériens [Kassoul, 1999]</i> ..	59
Tableau III 3- <i>Taux d'abrasion dans quelques barrages algériens [Kassoul, 1999]</i>	60
Tableau VI 1- <i>Valeurs des coefficients a et b des courbes de tendance en puissance</i>	90
Tableau VI 2- <i>Valeurs des coefficients a et b des courbes de tendance linéaire</i>	90
Tableau VI 3- <i>Tableau récapitulatif des coefficients a et b des courbes de tendance</i>	103
Tableau VI 4- <i>Débit solide annuel pour les différentes formules</i>	104

Introduction



L'érosion est le résultat d'actions dynamiques à l'interface sol-atmosphère qui produit le départ, la mise en mouvement des produits de l'altération. C'est le point de départ du transport solide.

L'érosion et le transport solide sont responsables de phénomènes de très grande ampleur en milieu naturel : Envasement des ouvrages hydrauliques entraînant la diminution de leurs potentialités, ensablement des ports, rehaussement des lits de cours d'eau entraînant un accroissement des risques d'inondation et appauvrissement des terres agricoles.

L'érosion hydrique est un phénomène complexe, très répandu en zone méditerranéenne, touchant particulièrement l'Algérie. Les conditions physiques, géomorphologiques, hydroclimatiques et socio-économiques sont particulièrement favorables au déclenchement et à l'accélération du phénomène (prédominance de formation marneuse peu résistantes, irrégularité climatique, torrentialité des écoulements, faible densité du couvert végétal, etc.).

L'érosion hydrique et le transport solide menacent gravement les potentialités en eau et en sol et devient de plus en plus dramatique. Du fait de l'envasement des retenues l'infrastructure hydraulique Algérienne est amputée annuellement d'un potentiel de réserve en eau équivalent à *20 millions de m³*. Ceci nous amène à intervenir rapidement et efficacement, et ce par la bonne quantification du transport solide en utilisant des formules mathématiques fiables.

Bien que l'estimation de l'érosion et du transport solide soient effectuées depuis plusieurs années, les connaissances sur ces phénomènes sont encore très partielles, les données peu fiables et beaucoup d'incertitudes subsistent.

La résolution de ce problème doit autant son importance à la prédiction ou à l'évaluation efficace de l'érosion et du transport solide.

L'irrégularité et la complexité du processus érosion-transport solide-sédimentation, la multitude de paramètres mis en jeu rendent difficile l'élaboration de modèles théoriques cohérents.

De nombreuses recherches ont été effectuées pour déterminer des méthodes d'estimation et de quantification du transport sédimentaire ou de trouver une théorie de la mécanique capable d'expliquer ce phénomène. Mais à cause de la complexité de ce phénomène et des différentes variables entrant en jeu, il est toujours resté l'un des problèmes hydrauliques qui demandent plus de développement.

Objectif du travail

Le transport de sédiments représente un phénomène très complexe et son étude ne peut être menée théoriquement que dans les cas simples ou simplifiés. Les formules obtenues se basent sur des résultats expérimentaux assez limités et sont utilisées avec beaucoup de prudence et dans les conditions hydrauliques pour lesquelles chacune a été établie.

Le grand nombre de formules a le caractère de la *non- universalité*, elles sont rares celles qui sont acceptées comme universellement adéquates.

En Algérie l'ensemble des modèles de quantification concernent seulement le transport solide en suspension (moyennant un modèle statistique), le taux de charriage dans le transport solide globale a été estimé, d'une façon approximative, à environ 50% dans les formations peu érodable jusqu'à 10-15% dans les formations très érodable [PNUD, 1987]. Notons que ces méthodes sont basées sur des modèles purement empiriques.

Ainsi, pour l'estimation des apports solides d'un cours d'eau, les ingénieurs ont toujours utilisés des formules empiriques dont la validité d'application est douteuse.

L'objectif de cette étude est la quantification ou la prévision du transport solide dans les oueds algériens en utilisant une formule mathématique qui tient compte du transport solide charrié, des caractéristiques de l'écoulement, du fluide et des sédiments.

Pour ce faire, on a divisé notre travail en deux parties principales :

La première partie du travail a consisté en une synthèse des connaissances acquises. Dans ce but, nous avons entrepris une étude

bibliographique très approfondie sur la théorie sédimentaire et sur les travaux antérieurs (*Du Boys, MPM, Einstein...*) concernant les méthodes de quantification du transport solide (*charriage et suspension*) notamment en Algérie.

Cette partie est composée de trois chapitres :

- ◆ Généralités et définitions.
- ◆ Méthodes de quantification du transport solide.
- ◆ Prévion des transports solides en Algérie.

En second lieu, nous avons élaboré un programme informatique qui permet de définir le type de transport puis d'estimer le débit solide par charriage ou Total.

A la fin, nous avons exécuté le programme pour un cas réel : Le bassin versant de la Tafna au droit de la station Pierre du Chat et le bassin de l'Isser au droit de la station de Lakhdaria.

Cette deuxième partie est composée de trois chapitres :

- ◆ Elaboration du programme mathématique.
- ◆ Présentation des zones d'études.
- ◆ Application du programme et discussion des résultats.

1ere Partie

Chapitre I. Généralités et Définitions

Introduction

De nombreuses recherches ont été effectuées pour déterminer des méthodes d'estimation et de quantification du transport sédimentaire ou de trouver une théorie de la mécanique capable d'expliquer ce phénomène.

Deux voies différentes ont été suivies. La première école s'attachait à déterminer les forces et les paramètres de la mécanique qui permettent à une particule solide immergée d'être maintenue en suspension pendant un temps non négligeable. La seconde recherchait une solution empirique ; et ce en essayant d'établir des formules empiriques qui relient la capacité de transport en sédiment de l'écoulement aux principales caractéristiques hydrauliques, moyennant des études statistiques sur des données et des mesures obtenues dans des canaux artificiels.

Bien que la seconde école n'a pas pu aboutir à une solution théoriquement satisfaisante, elle a fourni à l'ingénieur une méthode sûre pour établir des projets, tandis que la première n'a pu le faire. Et malgré les nombreuses tentatives de la première école pour trouver des solutions pratiques, aucune n'a pu être reconnue aussi largement et universellement que celles de la 2^e école.

De ce fait, toutes les formules existantes sont valables pour des cas précis ; dans les conditions hydrauliques pour lesquelles chacune a été établie. Aucune de ces formules n'est considérée comme universelle. L'utilisation de ces formules se fait avec beaucoup de prudence.

I- Mécanismes et milieux sédimentaires

I-1- Altération et érosion

L'altération (*weathering*) et l'érosion sont les mécanismes qui affectent les différentes roches parentales. On distingue les processus chimiques et les actions physiques ou dynamiques. Elles constituent l'étape initiale du cycle sédimentaire et principalement du transport solide.

L'altération est principalement le résultat de réactions chimiques. Le climat, la température, la surface spécifique des minéraux, le taux de CO_2 , l'activité biologique, etc. sont des facteurs qui conditionnent l'importance de l'altération chimique. Les produits de l'altération sont des *solutions* et des *minéraux* constituants des fragments solides ou particules lors de l'action de l'érosion.

L'érosion est le résultat d'actions dynamiques à l'interface sol-atmosphère qui produit le départ, la mise en mouvement des produits de l'altération. C'est le point de départ du transport particulaire. Les agents de l'érosion sont variés : vent, pluie et ruissellement, glace, eaux continentales et océaniques et organismes vivants.

I-2- Transport et dépôt des sédiments

Les principaux agents de transport sont l'eau, le vent et la glace dans des proportions très inégales. Toutes ces actions dynamiques auront un rôle important, si l'énergie est suffisante, pour déplacer les particules d'une certaine taille ou classe granulométrique. Parmi les paramètres qui interviennent sur le transport des particules sont : la vitesse de transport, la taille granulométrique des particules, la cohésion, les forces de frottement et la viscosité du milieu.

Hjulstrom [Biju-Dval] a élaboré un diagramme (figure I-1) qui rappelle que lorsque la vitesse est élevée l'action des courants est érosive et que lorsque la vitesse diminue le transport est actif puis cesse, aboutissant au dépôt des particules.

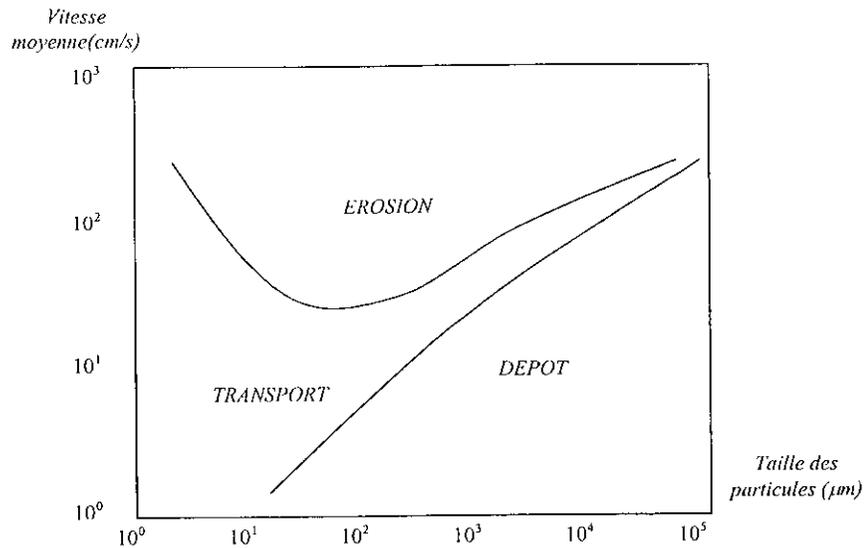


Figure 1-1 Domaine d'érosion, de transport et de dépôt selon la taille des particules et la vitesse de courant [Biju-Dval].

Le transport s'effectue selon deux modes : en *suspension* dans le milieu ou en *traction* sur le fond. Les proportions entre ces deux modes varient considérablement en fonction de différents paramètres, en particulier la turbulence. A noter que des événements très courts et énergiques peuvent conduire à un transport d'un volume considérable de sédiments (crue soudaine).

Lorsque la vitesse diminue, l'énergie n'est plus suffisante, les particules se déposent selon des couches ou lits élémentaires obliques (rides, vagues de sables, dunes, dépôts plans, antidunes) pour le transport actif.

Le second type de dépôt s'opère par chute verticale c'est la décantation, elle s'effectue lorsque la dynamique n'est plus suffisante pour maintenir les particules en suspension. Selon la taille des particules, leur chute sera plus ou moins lente. Ce mode de dépôt concerne les particules les plus fines.

Dans les lits naturels, d'amonts en aval et d'une manière générale, lorsque la pente diminue la vitesse du courant décroît, la charge solide de fond et en suspension est abandonnée progressivement, le plus grossier en position proximale, le plus fin en position distale avec un classement progressif. *Sternberg (1875)*[Leliavsky, 1961 ; Larras, 1972] a établi une loi : le diamètre de la particule diminue d'une façon exponentielle avec la distance L :

$$D = D_0 e^{-\alpha L}$$

I-1

II- Ecoulement d'un mélange

Pour l'écoulement gravitationnel d'un mélange eau-sédiment, on peut distinguer trois cas de mouvement (tableau I-1)[Graf, 1996] :

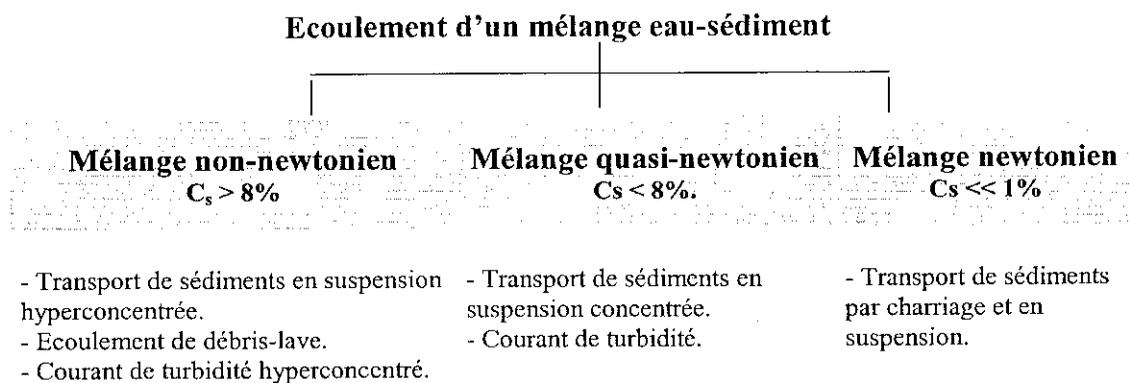


Tableau I-1 Classification des écoulements d'un mélange.[Graf, 1996]

Cette classification est très simplifiée car dans la réalité, les délimitations entre ces écoulements ne sont pas nettes et peuvent exister simultanément.

II-1- Ecoulement newtonien

Le mélange se comporte comme newtonien si la concentration (volumique) des particules solides demeure très faible, $C_s \ll 1\%$. La différence entre la densité du mélange et celle de l'eau reste faible elle aussi, $\Delta\rho \ll 16\text{Kg/m}^3$.

Le transport de sédiments *par charriage et en suspension* dans les cours d'eau entre dans cette catégorie.

II-2- Ecoulement quasi-newtonien

Le mélange se comporte comme quasi-newtonien si la concentration volumique reste faible, $C_s < 8\%$. La différence entre la densité du mélange et celle de l'eau devient importante, $\Delta\rho < 130\text{Kg/m}^3$.

Les types de transport de sédiments entrant dans cette catégorie sont, le transport de sédiments en *suspension concentré* ainsi que les *courants de turbidité*.

II-3- Ecoulement non-newtonien

Le mélange se comporte comme non-newtonien si la concentration volumique devient très importante, $C_s > 8\%$. La différence entre la densité du mélange et celle de l'eau est très importante elle aussi, $\Delta\rho > 130\text{Kg/m}^3$. Pour ce type d'écoulement, tous les concepts de l'hydraulique newtonienne sont modifiés.

Le transport de sédiments en *suspension hyperconcentrée*, les écoulements torrentiels de débris-lave (rocheux-boueux) ainsi que les *courant de turbidité hyperconcentrées* entrent dans cette catégorie.

III- Caractérisation de la phase solide

Le transport sédimentaire dépendra obligatoirement du type de matériaux en présence. De plus la granulométrie du sol, joue un grand rôle dans le phénomène du transport solide.

Nous allons nous intéresser aux sédiments et à la définition de leurs caractéristiques physiques et hydrauliques essentielles, à savoir :

- La taille des particules, donnée par la courbe granulométrique.
- La forme des particules.
- La masse volumique des particules, ρ_s .
- Vitesse de chute w .

Tous ces paramètres peuvent varier le long du canal. De plus, ils dépendent du type de prélèvement et d'analyses d'échantillon.

III-1- Classification des sédiments

Le sol d'un lit est très diversifié et est composé de limons et vases, argile, sable, gravier, galet et bloc. Leur classification est donnée selon le tableau (I-2) :

Diamètre	Désignation	Observation
$d < 0.5 \mu$	Colloïdes (vase et limons)	Cohérentes, compressibles, non élastiques, lisses, difficiles à éroder.
$0.5 \mu < d < 5 \mu$	Argile	
$5 \mu < d < 64 \mu$	Silt	
$64 \mu < d < 2 \text{ mm}$	Sable	
$2 \text{ mm} < d < 20 \text{ mm}$	Gravier	Morceaux de roche plus ou moins roulés.
$20 \text{ mm} < d < 300 \text{ mm}$	Galet	
$300 \text{ mm} < d$	Blocs	

Tableau I-2 Classification des sédiments d'un lit [Chow, 1964 ; Belleudy, 1996].

Les matériaux du fond sont remués et reclassés sans arrêt. Cependant, à partir d'un profil d'équilibre, on constate que suivant la morphologie des fonds, on trouvera une répartition différente des sédiments.

III-2- Granulométrie

Les sédiments non cohésifs (particule solide) qui forment le lit d'un cours d'eau sont en général de taille variable, représentés par une courbe granulométrique des matériaux du lit. Cette courbe représente les proportions en poids de granulats inférieurs à chacun des diamètres des mélanges de granulats.

La courbe granulométrique du lit est obtenue par échantillonnage. Il est recommandé de prendre plusieurs échantillons dans différentes sections du cours d'eau à l'étude, puis d'établir une courbe moyenne. Chaque échantillon doit être prélevé jusqu'à une profondeur d'érosion maximale anticipée, soit autour de 0.70m de profondeur.

A partir de cette courbe on peut tirer les différents diamètres caractéristiques d'un sol :

Le diamètre médian du mélange (d_{50}) : correspond au diamètre supérieur ou égal au diamètre de la moitié des granulats du mélange.

Le mode du mélange : le diamètre correspondant au sommet de la courbe de fréquence granulométrique du mélange.

Le diamètre moyen du mélange : la moyenne pondérée des diamètres individuels des granulats d'après leurs proportions respectives dans le mélange.

Le diamètre d_n : le diamètre pour lequel la courbe de répartition des granulats du mélange comporte $n\%$ de matériaux d'un diamètre inférieur.

II-3- Vitesse de chute

La vitesse de chute est considérée comme un paramètre de base dans les problèmes concernant l'action du courant sur le matériau granulaire du lit. Elle permet de caractériser le comportement hydrodynamique d'une particule dans un liquide.

Etudions cette vitesse de chute pour des sédiments non cohésifs en eau calme. En appliquant la loi fondamentale de la dynamique, une particule de grain (de forme sphérique) se déplaçant dans un fluide visqueux est soumise à l'action de trois forces : La pesanteur et la poussée d'Archimède qui constituent ensemble le poids apparent P de la particule :

$$P = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 (\rho_s - \rho)g = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_s - \rho)g \quad 1-2$$

et la traînée hydrodynamique F (ou la résistance exercée par le fluide), est égale d'après Newton à :

$$F = \xi \gamma \frac{\pi d^2}{4} \frac{w^2}{2g} \quad 1-3$$

On pose :

$$s - 1 = (\rho_s - \rho) / \rho \quad 1-4$$

d'où la formule de *Newton*:

$$w^2 = \frac{4}{3} \frac{(s - 1)g}{\xi} d \quad 1-5$$

On peut définir 2 paramètres adimensionnels :

❖ le *diamètre sédimentologique du grain* :

$$d^* = \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3} d \quad \text{I-6}$$

❖ et le *nombre de Reynolds de chute* :

$$R_w = \frac{dw}{\nu} \quad \text{I-7}$$

Le coefficient ξ dépend de la forme, des dimensions, de la nature de la particule et du nombre de Reynolds: $\xi = f(R, \text{nature de la surface, forme, dimension, ...})$.

□ *Pour un régime laminaire*

$$R_w < 1 \text{ on a } \xi = 24/R_w \text{ et } R_w = 1/18 d^{*3}$$

On obtient la solution de *Stokes* :

$$w = \frac{1}{18} \frac{(s-1)g}{\nu} d^2 \quad \text{I-8}$$

□ *Pour un régime turbulent:*

$R_w > 1000$, ξ est une constante et ne dépend plus de Reynolds :

$$\xi = 0.5 \text{ et } R_w = \frac{8}{3} d^{*3}$$

$$\text{et } w = \sqrt{\frac{8}{3} (s-1) g d} \quad \text{I-9}$$

□ *Pour $1 < R_w < 1000$:*

On est dans la zone de transition entre le régime laminaire et le régime turbulent: $\xi = f(R_w)$, cette fonction est plus complexe.

Oseen propose la formule empirique suivante, pour $R_w > 2$:

$$w = \frac{24}{R_w} \left(1 + \frac{3}{16} R_w \right) \quad \text{I-10}$$

Dans le domaine du transport solide, on admet les équations suivantes [Larras, 1972 ; Belleudy, 1997] :

$$\begin{array}{ll}
 d < 0.1 \text{ mm} & w = \frac{1}{18} \frac{(s-1)g}{\nu} d^2 \quad \text{Stocks} \\
 0.1 \text{ mm} < d < 1 \text{ mm} & w = 10 \frac{\nu}{d} \left[\sqrt{1 + \frac{0.01(s-1)}{\nu^2} g d^3} - 1 \right] \quad \text{Brudryk} \\
 1 \text{ mm} < d & w = 1.1 \sqrt{(s-1)g} d \quad \text{Van Rijn}
 \end{array} \quad \text{I-11}$$

Il faut remarquer que les grains sont considérés comme des sphères parfaites. Alors que la forme du grain peut être très différente.

De plus, une forte concentration de particule entraîne des interactions entre elles et donc une modification de la chute. Si la concentration augmente, la vitesse de chute libre devient la vitesse de chute entravée.

Notons qu'il peut apparaître des phénomènes de *floculations*. Les fines particules dont la vitesse de chute est très lente, voient alors leur vitesse de chute augmenter de façon considérable. Et finalement la vitesse de chute peut être influée par la température de l'eau.

IV- Modes de transport

Suivant les matériaux rencontrés et suivant les courants d'entraînement, nous n'observerons pas le même transport sédimentaire. En effet, il existe différents modes de transport solide : le transport actif et le transport en suspension.

IV-1- Le transport actif

Pour le transport actif, par charriage et saltation du fond, avec en général une faible mise en suspension, les particules sont véhiculées sur ou à proximité immédiate du fond sur une hauteur qui dépend de la tranche d'eau mais surtout de la vitesse. Lorsque la vitesse diminue, l'énergie n'est plus suffisante et les particules se déposent.

Le charriage de fond correspond aux éléments les plus gros des alluvions transportées qui glissent ou roulent sur le lit du chenal ou sautent de la crête d'une ride à une autre si la vitesse est suffisamment grande.

On peut distinguer plusieurs formes de charriage de fond :

- les éléments se déplacent sous forme de rides ;
- des particules sont soulevées individuellement par l'eau mais retombent presque instantanément, ce mouvement s'appelle «*saltation* » ;
- déplacement des plus gros éléments ou même les blocs de grandes dimensions par roulement ou glissement.

Ainsi, selon le régime, le charriage de fond peut s'effectuer sur le lit plat, sur des rides ou au-dessus de dunes.

IV-2- Le transport en suspension

Le transport en suspension peut être partiel, continu ou intermittent selon l'importance de la turbulence. En régime normal de suspension, les

particules se déplacent en pleine eau, parfois loin du fond. Le maintien en suspension suppose des mouvements ascensionnels provoqués par la turbulence. La suspension correspond aux éléments plus petits que l'écoulement arrache et soulève du lit du chenal ou de ses berges (talus) et restent en suspension pendant un temps très grand et qui sont alors transportés sur plusieurs kilomètres. Pour ce cas, les vitesses des particules et celles de l'eau sont égales. Le dépôt s'opère ensuite par chute verticale qui est la décantation. Les dépôts de décantation s'effectuent lorsque la dynamique n'est plus suffisante pour maintenir les particules en suspension.

Plusieurs idées ont été proposées pour expliquer théoriquement ce phénomène, la plus ancienne est celle du groupe *Dupuit-Flamant* qui a dominé pendant plusieurs années. Cette théorie est basée sur la différence de grandeur des vitesses des filets liquides adjacents, cette différence de vitesse est la cause du mouvement ascensionnel d'une particule solide immergée dans le courant. Mais la solution la plus utilisée actuellement et suggérée initialement par *H.E Hurst* en 1929 et par *O'brien* en 1933 s'appuie sur *la théorie statistique de la turbulence*.

Le transport en suspension peut être conçu comme le stade avancé du transport par charriage, mais les méthodes analytiques ne permettent pas de bien d'écrire les deux modes de transport par une relation unique.

La localisation de l'interface entre la partie concernée par le charriage et celle où se situe la suspension, n'est pas très distincte et est dure à déterminer.

Une autre classification [Graf, 1996] (figure 1-2) distingue le transport par *charriage* (bed load), en *suspension intermittente* (suspended load, saltation) et en *suspension prolongée* (wash load).

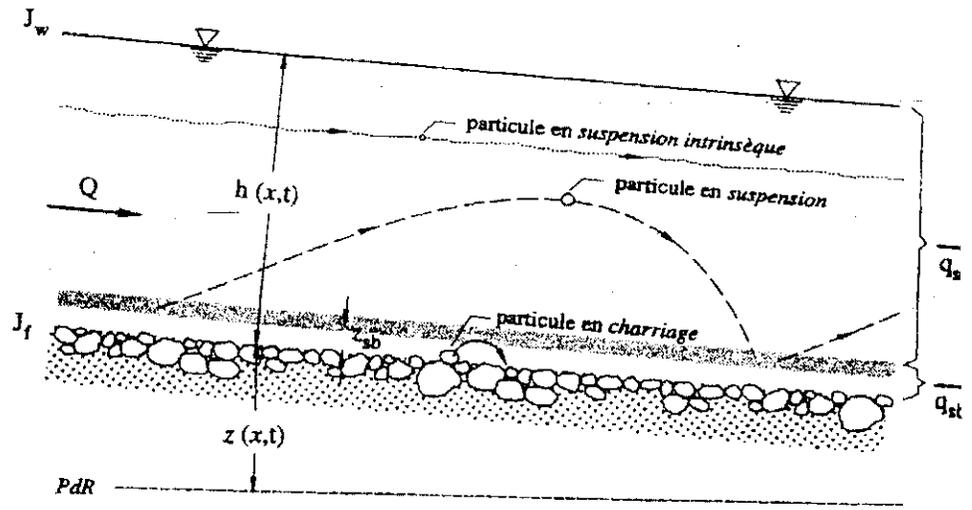


Figure I-2 Schéma des modes de transport [Graf, 1996].

V- Le critère fondamental de l'érosion

Plusieurs études ont montré que dans un écoulement, un débit minimum est nécessaire pour que les particules déposées au fond puissent commencer à se déplacer.

Il n'y aura érosion donc qu'à partir d'une certaine force de courant, pour une hauteur d'eau et pour une catégorie de matériaux donnée.

Le mouvement d'ensemble n'est pas toujours le même suivant le diamètre et la nature des matériaux.

Au départ, seuls les matériaux fins se mettent en mouvement et forment des rides qui progressent dans le sens de l'écoulement. Si la vitesse augmente, il y a formation de dunes qui progressent dans le sens de l'écoulement. Puis le lit s'égalise, il y a mise en suspension des particules après saltation. Enfin, on peut observer des antidunes qui remontent le courant.

V-1- Vitesse d'arrachement

La méthode de la vitesse d'arrachement était considérée pendant longtemps comme critère d'affouillement. En considérant que la vitesse provoquant l'érosion est fonction de la dimension et de la nature des éléments qui constituent le lit [Leliavisky, 1961].

Ainsi *Dubuat* a élaboré une liste des vitesses d'arrachement pour différents matériaux granulaires. En 1753, *A. Brahm*^{*} [Larras, 1972] avait conçu cette corrélation selon la formule suivante :

$$V_{cr} = k P^{1/6} \quad 1-12$$

tel que P représente le poids des particules dans l'eau et K un coefficient.

^{*} Cette formule peut être déduite en égalant les deux forces opposées : la traînée (la force exercée par le courant sur la particule) et la force de frottement qui s'oppose au mouvement.

Ultérieurement (1834) et indépendamment, *W. Airy* établissait la même équation [Leliavsky, 1961].

Cette façon d'envisager comme critère d'érosion la vitesse d'arrachement, reliée directement à la dimension moyenne du grain, soulève des objections :

- l'érosion serait totalement indépendante des caractéristiques dimensionnelles de la section, de la forme du plan du chenal, de la rugosité des parois, etc.
- la dimension moyenne du grain n'est pas suffisante pour définir la capacité de résistance à l'affouillement des alluvions du lit. En effet, le plus stable de deux mélanges de même diamètre moyen est celui qui possède la granulométrie la plus étendue car les éléments les plus fins combleront les vides et produiront un effet de colmatage sur les éléments les plus gros.

Ces insuffisances ont orienté les recherches vers d'autres critères d'érosion. Parmi eux le critère de la *force tractrice*.

V-2- La force tractrice

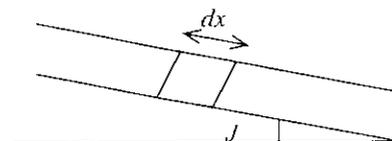
Elle représente le produit du tirant d'eau par la pente hydraulique et par le poids spécifique de l'eau. Cette formule a été pour la première fois proposée par *Du Boys* en 1879 [Leliavsky, 1961 ; Larras, 1972], mais elle resta dans l'ombre pendant longtemps.

Soit un écoulement permanent et uniforme, dans une section de surface mouillée S , de périmètre P , de pente J et de profondeur moyenne h :

Equilibre dynamique d'une tranche liquide :

$$\gamma S dx \sin J = \tau P_m dx$$

I-13



La partie gauche de cette équation représente le poids de l'eau et l'autre partie représente la force de frottement.

$$\Rightarrow \quad \tau = (\gamma S/P_m) \sin J \quad \text{I-14}$$

où :

τ : la contrainte tangentielle sur le fond ;

S : la section mouillée ;

P_m : le périmètre mouillé.

Si la pente est faible, alors $\sin J \approx J$ et :

$$\tau = \gamma h J \quad \text{I-15}$$

où h est le tirant d'eau (rayon hydraulique), $h = S/P_m$

Cette formule est l'équation de base de *la théorie de la force tractrice*.

τ est en général appelée force d'entraînement, mais c'est en fait la force passive exercée par le fond sur la tranche d'eau.

Plusieurs chercheurs ont confirmé la validité de cette théorie par des observations sur des phénomènes naturels, et par des expériences sur des fleuves naturels.

Le principe de la force tractrice de *P. Du Boys* a permis de traiter le problème de la détermination quantitative du débit solide de charriage d'une façon élémentaire et facile à comprendre mais approximative.

On peut définir la *vitesse de cisaillement* due aux granulats :

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad \text{I-16}$$

u^* est similaire à une vitesse mais elle n'a pas de sens physique réel.

Et le *Reynolds* de grain :

$$R^* = \frac{u^* d}{\nu} \quad \text{I-17}$$

V-3- Cas des berges

La formule de *Du Boys* ne s'applique, en effet, qu'à des fonds parfaitement horizontaux, dans ce cas τ est remplacé par [Larras, 1977] :

$$\tau' = \tau \left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \psi} \right)^{1/2} \quad \text{I-18}$$

tel que θ est l'angle que fait le talus avec l'horizontale et ψ est l'angle de frottement des agrégats dont sont constituées les berges.

V-4- La force tractrice critique

Bilan des forces appliquées à un grain :

- ❖ *Forces de gravité* : $\frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g$
- ❖ *Forces hydrodynamiques de traînée*: $\tau_c S$
- ❖ *Force de cisaillement* : négligée

où :

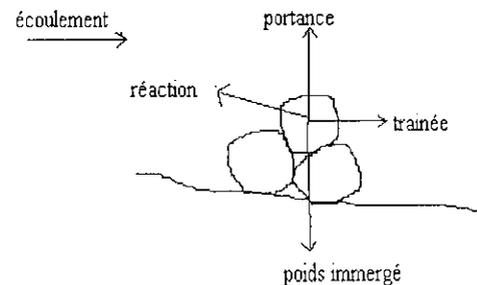
S est la surface exposée aux frottements ;

τ_c est la contrainte critique.

On ne fait pas apparaître clairement cette dernière force, mais certaines constantes liées à la rugosité sont mesurées expérimentalement et prennent donc en compte les effets de cisaillement.

S est de la forme $c d^2$ où d est le diamètre caractéristique du grain et c est l'angle de repos du grain.

Au début de l'entraînement, l'équation des moments s'écrit donc :



$$\frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g \sin(\theta - i) = c \tau_c d^2 \cos \theta$$

$$\text{d'où : } \tau_c = c, d (\rho_s - \rho) g \frac{\sin(\theta - i)}{\cos \theta} \quad \text{I-19}$$

$$\tau_c \approx c, d (\rho_s - \rho) g \tan \theta$$

τ_c est appelée la force tractrice critique, $\tan \theta$ et c' sont liés au sédiment.

On note $A = c' \tan \theta$, donc :

$$\tau_c = A (\rho_s - \rho) g d \quad \text{I-20}$$

A est un paramètre qui est déterminé expérimentalement et dépend de R^* , de la forme et de la nature des grains.

Il y aura entraînement si $\tau > \tau_c$:

$$\rho g h J > A (\rho_s - \rho) g d$$

donc si :

$$\frac{\rho g h J}{(\rho_s - \rho) g d} > A$$

$$\frac{hJ}{(\rho_s - \rho) d} > A \quad \text{ou} \quad \frac{hJ}{(s-1)d} > A$$

$$\tau^* > \tau_c^*$$

tel que τ^* et τ_c^* sont le coefficient de cisaillement adimensionnel et le coefficient de cisaillement adimensionnel critique.

Meyer-Peter et Muller (1948) ont proposé $A=0.047$ [Larras,1972 ; Graf,1996 ; Belleudy,1996] pour des sédiments de granulométrie étendue et pour $20 < R^* < 3500$:

$$\tau_c = 0.047(\gamma_s - \gamma) d_{50} \quad \text{I-23}$$

Selon la formule de *Ramette et Heuzel (1962)*, $A = 0.020$ [in Larras,1972] d'où :

$$\tau_c = 0.020(\gamma_s - \gamma) d_{95} \quad \text{I-24}$$

pour un mélange de galets et de sables qui ont une granulométrie très dispersée.

Il est important de préciser que toutes ses formules ont été établies en régime permanent uniforme en canal de forme géométrique régulière, qui ne représentent pas les conditions du phénomène réel.

Selon *Shields* A varie selon le diamètre des grains. En 1936, *Shields* [in Larras, 1972 ; Lebreton, 1972 ; Belleudy, 1996] a élaboré un diagramme qui exprime $\tau^* = \frac{\tau}{\rho(s-1)gd}$ en fonction de R^* , le diagramme détermine le seuil de mise en mouvement d'une particule solide pour un diamètre de grain donné.

La courbe de *Shields* est reconnue comme valable pour des *granulométries uniformes ou presque*. Si la granulométrie est étendue, le phénomène de début d'entraînement n'a plus de sens précis. En effet, il peut y avoir charriage partiel des éléments les plus fins sans que les gros éléments soient secoués. Il se produit alors un pavage de lit.

Le début de charriage dépend de la forme de la courbe granulométrique, dans le cas d'une granulométrie étendue qui est presque toujours le cas en nature, il y aura autant de courbes de *Shields* que de types de granulométrie. L'emploi d'une courbe moyenne avec une caractéristique unique (le diamètre moyen) est une approximation très grossière.

Le critère de *Shields* n'est pas valable pour des écoulements à très forte pente (*Froude* supérieur à 1), et pour des tirants d'eau $H < 100 d$.

DIAGRAMME DE SHIELDS

(GARONNE A SAINT-NICOLAS DE LA GRAVE)

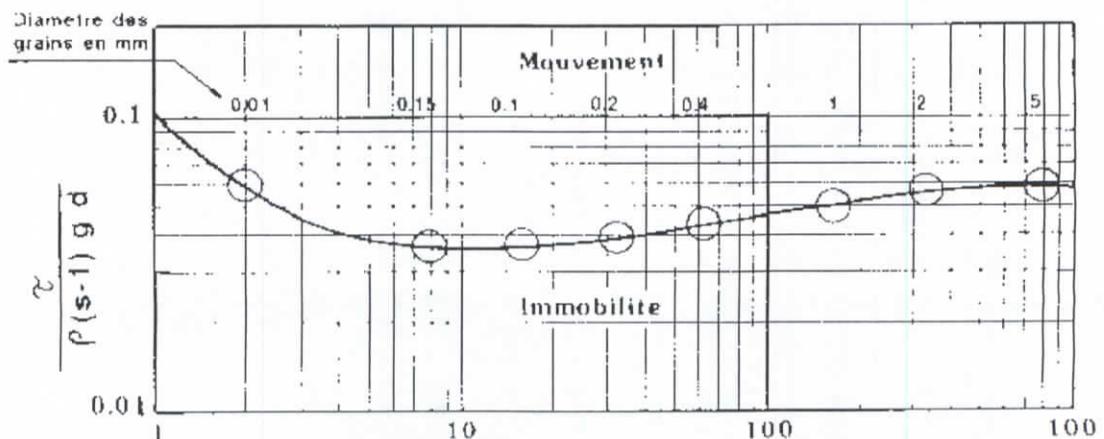


Figure I-3 Exemple de diagramme de Shields [Lebreton, 1974].

VII- Début d'entraînement des sédiments

VII-1- Début d'entraînement des sédiments en suspension

Le début de transport des particules en suspension est un problème plus complexe. Rappelons que ce mode de transport se base sur la théorie de la turbulence, et l'analyse de cette théorie montre le caractère aléatoire du mouvement des grains.

La plus part des critères se base sur la comparaison de la vitesse de frottement u_* à la vitesse de chute des particules solides w . En se basant sur des résultats expérimentaux et sur des considérations théoriques, *Bagnold (1954)* et *Engelund (1965)* indiquent que les particules solides ne peuvent être suspendues que si : u_* dépasse la vitesse de chute w [Larras, 1972], soit :

$$u_*/w \geq 1 \quad \text{I-25}$$

Graf (1971) suggère que le transport en suspension commence si [Hadj Rabia, 1994] :

$$u_*/w > 0.4 \quad \text{I-26}$$

Rijin (1984) propose ce qui suit [Graf, 1996] :

$$\begin{aligned} \frac{u_*}{w} &> \frac{4}{d^*} && \text{pour } 1 < d^* \leq 10 \\ \frac{u_*}{w} &> 0.4 && \text{pour } d^* > 10 \end{aligned} \quad \text{I-27}$$

VII-2- Début d'entraînement des sédiments sur le fond

Pour les différents modes de transport, il est utile, bien que compliqué, de faire la délimitation entre ces modes.

Ces types de transport ne concernent pas les mêmes particules. En fonction de l'écoulement, et plus particulièrement de la contrainte exercée sur le fond, il y aura soit du charriage soit de la suspension soit les deux modes.

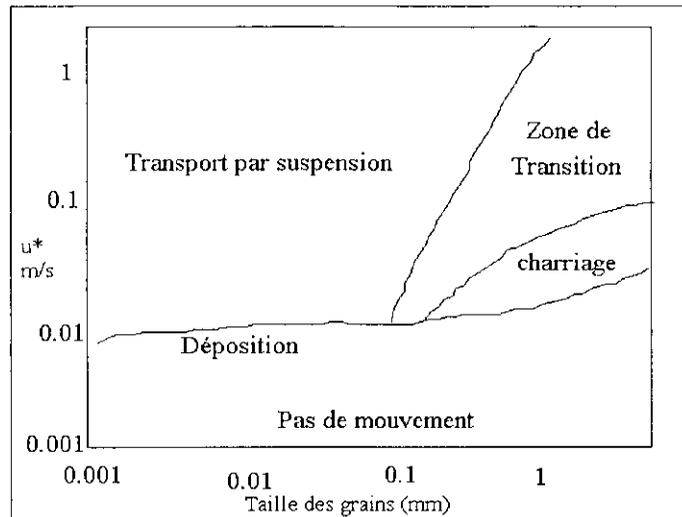


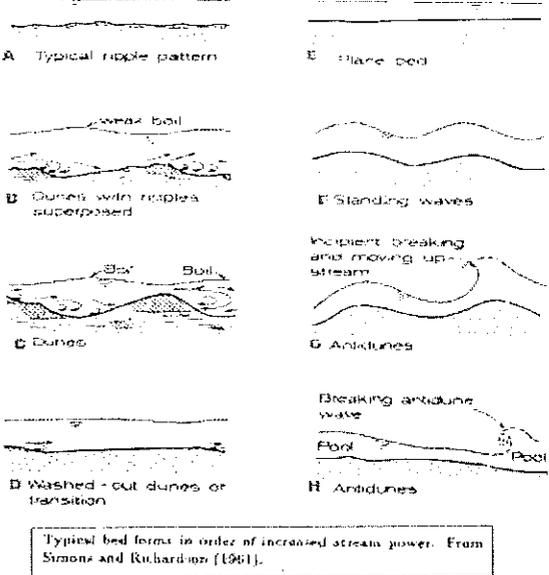
Figure I-4 Domaine des modes de transport selon la taille des particules et la vitesse étoilée de l'écoulement [Belleudy, 1996].

Au départ, seuls les matériaux fins se mettent en mouvement et forment des *rides* qui progressent dans le sens de l'écoulement. Si la vitesse augmente, il y a formation de *dunes* qui progressent dans le sens de l'écoulement. Puis le lit s'égalise, il y a mise en *suspension* des particules après *saltation*. Enfin, on peut observer des *antidunes* qui remontent le courant.

Ainsi, selon le régime, le charriage au fond peut s'effectuer sur le lit plat, sur des rides ou au-dessus de dunes.

Ramette [Belleudy,1996] a effectué une classification de début d'entraînement en fonction des paramètres R^* et τ^* :

Tableau I-1 *Modes de transport selon Ramette.*

Différents modes de transport	lit au repos	lit plat	rides	dunes	suspension
 <p>Typical bed forms in order of increased stream power. From Simons and Richardson (1961).</p>					
τ^*	< 0.03	0.03 - 0.055	> 0.03	> 0.055	début > 0.25 total > 2.5
R^*		> 10	> 10	> 16	

Finalement, grâce à une classification plus simple on peut déterminer le mode de transport solide selon les valeurs de τ^* :

Tableau I-2 *Classification de Ramette [Belleudy, 1996].*

τ^*	0.01 à 0.05	0.05 à 0.25	0.25 à 2.50	2.50 à 10
Mode de transport	Transport nul	Charriage prépondérant	Charriage et suspension	Suspension prépondérante

Chapitre II. Méthodes de quantification du transport solide

Introduction

Le transport de sédiments représente un phénomène très important de l'hydraulique fluviale. Toutefois, ce phénomène est très complexe et son étude ne peut être menée théoriquement que dans les cas simples ou simplifiés. Les formules obtenues se basent sur des résultats expérimentaux assez limités et sont utilisées avec beaucoup de prudence et dans les conditions hydrauliques pour lesquelles chacune a été établie.

Il existe deux méthodes de quantification du transport solide, celle qui utilise l'une des techniques de quantification sur terrain, et celle qui utilise l'une des formules existantes du transport solide.

I- Méthodes directes

Elle consiste à mesurer le débit solide par l'une des techniques de quantification sur terrain. Plusieurs techniques sont mises en œuvre pour apprécier les transports solides.

- Méthode classique : elle consiste à effectuer par un observateur des prélèvements d'échantillons à la bouteille, en déterminant les concentrations des débits solides en suspension.

- Pièges à sédiments multidirectionnels : plusieurs niveaux de collecteurs sont installés sur le piège. Le premier, à proximité du fond, mesure les débits de charriage. Les autres, à un niveau plus haut, permettent la mesure des transports en suspension.

- Technique nucléaire : c'est une mesure en continu de la concentration. Elle concerne seulement les transports solides en suspension, elle peut être inefficace si le charriage du fond est important [Harbi, 1990].

II- Formules de quantification du transport solide

Les formules de prévision du transport solide sont classées comme formules de transport solide par charriage, en suspension ou totale (en suspension et par charriage).

La première formule de transport solide a été proposée par *Du Boys*, en 1879. depuis, beaucoup de formules n'ont cessées d'apparaître.

Toutes ces formules ont le défaut de la non-universalité. En effet, ces formules ne sont valables que pour les conditions spécifiques qui ont servi de base à l'établissement de leurs coefficients empiriques.

II-1- Transport par charriage

Jusqu'à présent, les formules de détermination du débit solide charrié ne donnent de résultats satisfaisants que dans un domaine limité de valeurs des paramètres.

L'application de ces formules doit se faire avec beaucoup de prudence, en général, il faut rester dans le domaine de valeurs des paramètres pour les quels la formule utilisée a été établie.

Il existe un nombre considérable de formules qui permettent de calculer le débit charrié, mais elles sont rares celles qui donnent plus au moins de bon résultats dans le cas particulier des cours d'eau naturels.

II-1-1- Formule de Du Boys

Elle représente la première tentative de quantification du charriage de fond et la formule de base de presque toutes les formules empiriques trouvées par la suite, il est intéressant de citer cette formule [Leliavisky, 1961 ; Larras, 1972, 1977, Lebreton, 1974] :

$$g_s = \psi \tau (\tau - \tau_c) \quad \text{II-1-1}$$

où g_s est le débit solide en poids par unité de largeur du fond et ψ un coefficient caractéristique des propriétés physiques du granulat

Toutes les formules similaires donnent le débit solide égale à la différence $(q - q_c)$ ou la différence $(\tau - \tau_c)$ multipliée par une fonction de la pente et de la dimension du matériau. Citons par exemple [Larras, 1972] :

- la formule de *Mac Dougall* (1933) :

$$q_s = A J m (q - q_c) \quad \text{II-1-2}$$

- la formule de *Straub* (1935) :

$$q_s = C_c \tau (\tau - \tau_c) \quad \text{II-1-3}$$

- la formule de *Shields* (1936) :

$$q_s = \frac{10 q J}{(s - 1) \rho_s d} (\tau - \tau_c) \quad \text{II-1-4}$$

- la formule de *Chang* (1939) :

$$q_s = A n \tau (\tau - \tau_c) \quad \text{II-1-5}$$

Il faut noter qu'il était facile d'établir et de vérifier ces équations en laboratoire, mais il était très difficile de les appliquer aux cours d'eau naturels dont on ne peut mesurer avec précision la pente et le débit solide.

II-1-2- Formule de *Schoklitsch*

Schoklitsch a proposé deux formules empiriques, l'une en 1934 et l'autre en 1950, présentons la plus récente[Graf, 1996]:

$$q_s = \frac{2.5}{s} J_e^{3/2} (q - q_c) \quad \text{II-1-6}$$

q_c , le débit liquide critique caractérise le début de l'érosion, il est donné par la formule suivante :

$$q_c = 0.26 (s - 1)^{5/3} \frac{d^{3/2}}{J_e^{7/6}} \quad \text{II-1-7}$$

valable pour $d \geq 0.006[m]$. Pour un mélange de granulométrie non uniforme on prend $d = d_{40}$ comme diamètre équivalent.

La formule de *Schoklitsch* s'applique à des diamètres de grains plutôt importants $d \geq 6[mm]$, à peu près uniformes et pour des pentes du fond plutôt moyennes à importantes (0.003 à 0.1).

II-1-3- Formule de Meyer-Peter et Muller

En analysant plusieurs formules empiriques obtenues en laboratoire, mais en vérifiant les conditions de similitude de Froude, que Meyer-Peter et Muller ont obtenu en 1948 leur dernière formule en (Kg/s/m) [Leliavisky, 1961 ; Larras,1972, Lebreton, 1974 ; Graf, 1996, Belleudy, 1996]:

$$0.25\rho^{1/3}\left(g_s'\right)^{2/3} = \gamma R_h \xi_M J_c - 0.047(\gamma_s - \gamma) d \quad \text{II-1-8}$$

Cette formule présente l'avantage d'être homogène et de rester valable pour des matériaux de granulométrie largement étendue.

En posant :

$$\tau' = \xi_M \gamma R_h J_c \quad , \quad \tau_c = 0.047(\gamma_s - \gamma) d$$

il vient :

$$g_s' = 8 \sqrt{\frac{1}{\rho}} (\tau' - \tau_c)^{3/2} \quad (\text{Kg/s/m}) \quad \text{II-1-9}$$

où :

$g_s' = g_s(\gamma_s - \gamma)/\gamma_s$ est le débit solide en poids dans l'eau et $g_s/\gamma_s = q_s$ est le débit solide volumique net (m³/s/m) :

$$q_s = 8 \left(\frac{1}{\gamma_s - \gamma} \right) \sqrt{\frac{1}{\rho}} (\tau' - \tau_c)^{3/2} \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{m}) \quad \text{II-1-10}$$

ou sous la forme suivante :

$$q_s = 8 \sqrt{g(s-1)} d^3 (\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad \text{II-1-11}$$

R_h est le rayon hydraulique du lit ;

τ^* est la force tractrice adimensionnelle corrigée ;

τ_c^* est la tension adimensionnelle critique de frottement ;

ξ_M est un paramètre de rugosité donné par :

$$\xi_M = \left(K_s / K_s' \right)^{3/2} \quad \text{II-1-12}$$

où :

K'_s : est la rugosité due aux granulats, évaluée au moyen de la formule de *Strickler*,

K_s : rugosité totale du lit, évaluée avec la formule de *Manning-Strickler* :

$$K_s = \frac{U}{R_h^{2/3} J^{1/2}} \quad \text{et} \quad K'_s = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} = \frac{21.1}{d_{50}^{1/6}} \quad \text{II-1-13}$$

Pour une granulométrie non uniforme, on prend le diamètre moyen, $d = d_{50}$, comme diamètre équivalent.

Lorsque le fond est plat (s'il n'y a pas d'ondulations) $\xi_M = 1$, par contre, en présence d'ondulations (dunes ou rides) une partie de l'énergie se dissipe en rugosité de forme, on prend $0.35 < \xi_M < 1$ [Graf, 1996].

La formule a été établie en canal pour des écoulements uniformes de 1 à 5000 l/s sur des granulats de 0.4 à 30 mm, de granulométrie tantôt uniforme tantôt étendue, et pour des pentes comprises entre 0.0004 et 0.024. La profondeur du canal dans les expériences allait de 1 à 120 cm. La gamme de ρ_s/ρ couverte allait de 1.25 à 4.22.

La formule de *Meyer-Peter et Muller* a subi des extrapolations sur d'autres conditions pour représenter mieux le phénomène.

Plusieurs auteurs ont testé cette formule en l'appliquant sur des cours d'eau naturels ; sur le tiers central du *Rhône* par exemple, la formule s'accordait assez bien avec les faits, sur la partie française du *Rhin*, elle a donné de mauvais résultats, sur le fleuve *Mondago* à Coimbra (Portugal), elle était tout à fait conforme à la réalité, dans le cas de la *Gail* (Autriche), la formule *MPM* était complètement en désaccord avec les faits, et dans le cas de la rivière *Niobrara* (Nebraska, USA), elle conduisait à des débits solides jusqu'à 5 fois trop faibles.

Il est donc recommandé de n'utiliser cette formule que pour des granulats plutôt grossier, $d > 2$ [mm], à granulométrie uniforme et non uniforme, et pour une gamme de pentes de fond allant de 0.0004 à 0.024, et pour des régime de transport τ^* allant de 0.047 à 0.25.

II-1-4- Formule d'Einstein-Brown (1950)

Einstein étudia le problème du charriage par la méthode des paramètres hydrauliques significatifs. Il suppose que le mouvement d'un grain s'effectue par bonds dont la longueur et la fréquence dépendent de ses dimensions, le nombre et le volume des particules en mouvement donnent alors le débit solide de charriage. Il considère ensuite la probabilité pour qu'une particule commence à se déplacer dans un intervalle de temps donné [Lebreton, 1974].

La formule est donnée par:

$$\Phi = 40 \left(\frac{1}{\Psi} \right)^3 \quad \text{pour} \quad \frac{1}{\Psi} \geq 0.09 \quad \text{II-1-14}$$

avec :

$$\begin{cases} \frac{1}{\Psi} = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gd}, & \tau = \rho g R J \\ \Phi = \frac{g^s}{\rho_s g F \sqrt{g(s-1)d^3}} \end{cases} \quad \text{II-1-15}$$

$$F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{g(s-1)d^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{g(s-1)d^3}} \quad \text{II-1-16}$$

cette formule est confirmée pour des granulats de diamètre d allant de 0.3 à 7mm en laboratoire [Lebreton, 1974].

D'où la formule :

$$q_s = 40 F \sqrt{g(s-1)d^3} \tau^{*3} \quad \text{II-1-17}$$

II-2- Transport en suspension

Le concept le plus utilisé pour expliquer théoriquement le transport en suspension est le concept de diffusion-convection, qui donnera la distribution verticale de la concentration locale $C(z)$ de particules en suspension.

La concentration n'est jamais parfaitement uniforme. Mais l'équilibre entre le flux ascendant et le flux descendant des granulates brassées dans l'agitation turbulente du liquide lui donne une valeur moyenne constante, qui dépend de la cote z à laquelle on la mesure au dessus du fond.

La fonction $C(z)$ a été déterminée par *M.P. O'Brien* en 1933. L'échange verticale des particules solides dû à la diffusion turbulente (*vers le haut*) et le mouvement gravitationnel (*vers le bas*) exprimé pour la vitesse de chute W à la cote z est donné par l'expression suivante :

$$C W + \varepsilon_s \frac{dC}{dz} = 0 \quad \text{II-2-1}$$

Cette égalité est l'équation de base de la suspension des sédiments dans la théorie de la turbulence. Elle exprime que, à tout niveau, $z_s < z < h$, il y a équilibre (verticale) entre le mouvement dans le sens de gravité et le mouvement dû au gradient de concentration dans le sens contraire.

où ε_s est le coefficient d'échange turbulent qui caractérise l'aptitude des granulates à passer de part et d'autre d'un plan horizontal fictif. ε_s est analogue (mais pas forcément égal) au coefficient d'échange turbulent ε des molécules liquides.

Pour des faibles concentrations, il est admet en général que :

$$\varepsilon_s = \varepsilon \quad \text{II-2-2}$$

Il résulte des théories modernes de l'écoulement turbulent de *Prandtl* et de *Von Karman*, que la loi de répartition des vitesses dans la hauteur du liquide est une loi logarithmique :

$$\frac{du}{u} = \frac{dz}{\kappa z} \quad \text{II-2-3}$$

et que le coefficient d'échange turbulent des molécules liquides ε à pour valeur :

$$\varepsilon = u^2 \frac{du}{dz} \quad \text{II-2-4}$$

On obtient donc l'expression suivante :

$$\frac{dC}{C} + \frac{w}{\kappa u^*} \left(\frac{h-z}{h-z_0} \right) \frac{dz}{z} = 0 \quad \text{II-2-5}$$

En admettant qu'il y a peu de granulats en suspension pour qu'on puisse considérer que w est indépendante de la concentration, l'intégration de cette équation différentielle donne :

$$\frac{C}{C_0} = \left(\frac{h-z}{z} - \frac{z_0}{h-z_0} \right)^{w/\kappa u^*} \quad \text{II-2-6}$$

en désignant par h la hauteur du liquide qui s'écoule, et par C_0 la concentration à un niveau de référence z_0 au-dessus du fond.

Cette équation donne donc la distribution de la concentration relative, C/C_0 , pour une seule taille de particule, w .

II-2-1- Méthode de quantification de transport en suspension

Le débit volumique solide en suspension par largeur unitaire dans une région délimitée par $z_s < z < h$ est obtenu par :

$$q_{ss} = \int_{z_s}^h C u dz \quad \text{II-2-7}$$

où $C(z)$ est la concentration locale et $u(z)$ la vitesse locale. Cette relation est valable pour une seule taille de particule d ou w .

II-2-1-1- Formule d'Einstein

Il existe plusieurs méthodes pour calculer le transport en suspension, présentons celle qui est la plus utilisée : la formule d'*Einstein* (1950), [Graf, 1996].

Einstein a développé une formule qui permet de calculer le débit solide volumique en suspension en exprimant la distribution de la vitesse avec la formule logarithmique, et après plusieurs manipulations mathématiques il a pu obtenir la forme finale suivante :

$$q_{ss} = 11.6 C_0 u_* z_s \left[2.303 \log \left(30.2 \frac{h}{\Delta} \right) J_1 + J_2 \right] \quad \text{II-2-8}$$

où J_1 et J_2 sont des intégrales évaluées numériquement (abaques) pour déversent valeurs de A_E, ζ , tel que :

$$\begin{aligned} \zeta &= w/\kappa u_*' & \text{II-2-9} \\ A_E &= z_s/h \end{aligned}$$

où ζ : l'exposant de *Rouse*

Δ : un terme correcteur.

z_s : la côte du niveau au-dessous duquel se trouve le charriage.

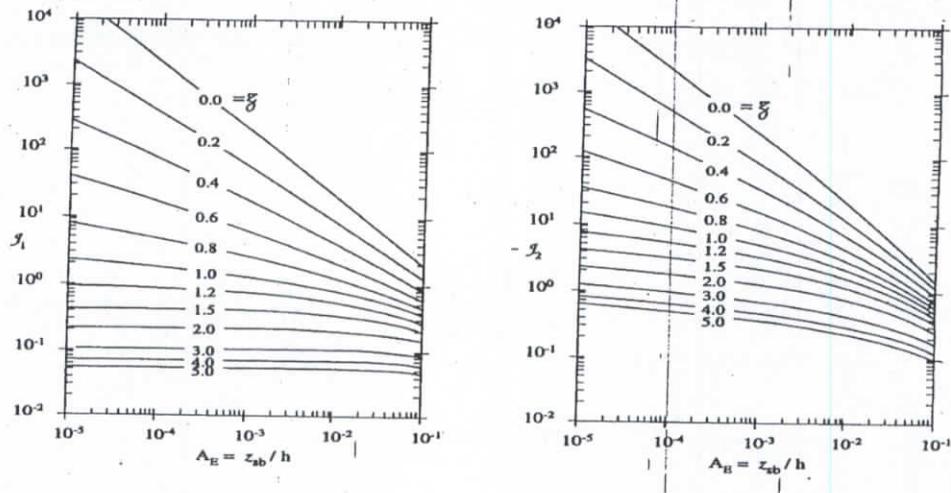


Figure II-1 Intégral de $I_1(A_E, \xi)$ et de $I_2(A_E, \xi)$ utilisée dans la méthode d'Einstein (1950).

II-2-2- méthode statistique

C'est une méthode de quantification automatique des apports solides à partir des débits liquides. Le principe de la méthode consiste en la recherche de relation entre le débit solide et le débit liquide.

Les recherches ont aboutit à une corrélation de type puissance entre les débits solides et liquides, de la forme :

$$q_{ss}(t) = a_0 q^{a_1}(t) \tag{II-2-10}$$

où q_{ss} est le débit solide en Kg/s , q est le débit liquide en m^3/s et a_0 et a_1 deux paramètres à déterminer à partir des séries observées[Benchabekh, 1995].

II-3- Transport total

On appelle transport solide total du fond le débit solide transporté par charriage et en suspension.

$$q_s = q_{sb} + q_{ss} \quad \text{II-3-1}$$

Il existe plusieurs formules qu'on peut utiliser pour prédire le transport solide totale du fond

Ces formules, comme celles du débit solide par charriage, ne donnent des résultats satisfaisantes que dans un domaine limité de paramètres. Leur application doit alors se faire avec beaucoup de prudence.

Il existe deux méthodes qui déterminent le transport total du fond :

- Les *méthodes indirectes* déterminent le transport total par l'addition d'une formule de transport par charriage et d'une formule de transport en suspension. Mais cette méthode laisse échapper toute la partie du transport en saltation qui n'est estimée ni dans les formules de transport par charriage ni dans les formules de transport en suspension. De plus on risque de superposer les erreurs de chaque formules au lieu de les compenser, et cela peut conduire à des erreurs considérables dans le cas de certains cours d'eau naturels.
- Les *méthodes directes* déterminent le transport solide total directement, sans faire une distinction entre les deux modes de transport.

II-3-1- Formule de Laursen (1958)

La formule de *Laursen* a été établie uniquement pour des sédiments de densité voisine de 2,65[Lebreton, 1974]. Elle s'écrit :

$$\begin{cases} C_m = 0.01 \rho g \sum_i P_i \left(\frac{d_{si}}{h} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_0}{\tau_{ci}} - 1 \right) f \left(\frac{u_*}{W_i} \right) \\ \tau'_0 = \frac{\rho U^2}{58} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{1/2} \\ \tau_{ci} = A (\rho_s - \rho) g d_{si} \\ g_s = C_m q \end{cases} \quad \text{II-3-2}$$

où :

P_i : fraction en % de sédiment de diamètre d_{si} .

$f \left(\frac{u_*}{W_i} \right)$: fonction donnée par la figure ci dessous.

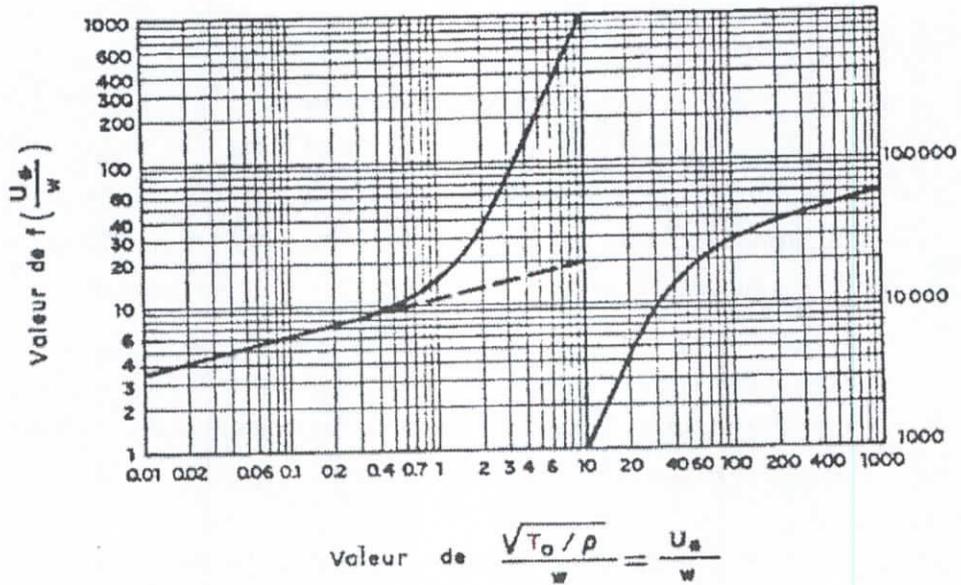


Figure II-2 Valeurs de la fonction f dans la formule de Laursen [Lebreton, 1974].

II-3-2- Formule de Colby (1964)

Les deux relations de Colby[Lebreton, 1974] ne valent que pour le sable. La première donne le débit non corrigé g_{s1} en fonction de U , h et d_{50} .

Elle est donnée sous forme de courbes (figure II-3.), elles sont valables pour une température de 15°C et des sédiments allant de $0,2$ à $0,3$ mm.

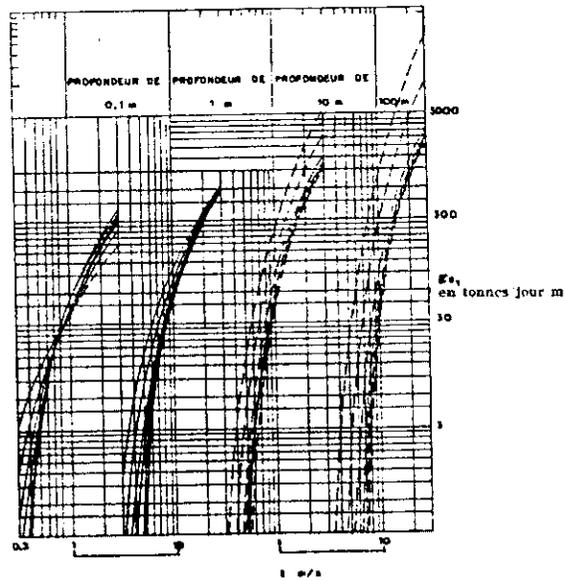


Figure II-3 Courbes de Colby[Lebreton, 1974]

Lorsque la température est différente ou lorsque des sédiments fins sont transportés deux facteurs de correction K_1 et K_2 sont introduits. La valeur exacte du débit solide est alors :

$$g_s = [1 + (K_1 K_2 - 1) 0.01 K_3] g_{s1} \quad \text{II-3-3}$$

K_3 est un facteur correctif lorsque le diamètre moyen des sédiments n'est plus compris entre $0,2$ et $0,3$ mm.

K_1 , K_2 et K_3 s'obtiennent à partir des figures suivantes :

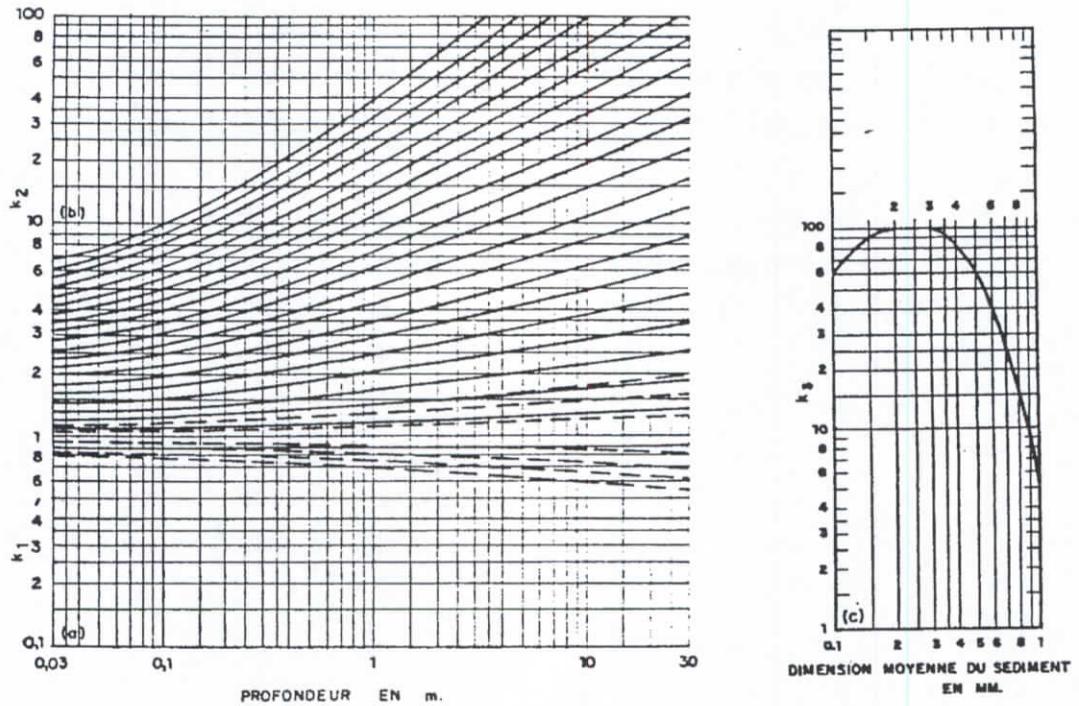


Figure II-4 Valeurs des paramètres de la formule de Colby[Lebreton, 1974].

Colby a synthétisé ses recherches en établissant des courbes qui permettent de déterminer le débit solide en fonction de la vitesse moyenne pour cinq cours d'eau américains et pour une température de 15°C. Cette étude est d'une grande utilité dans la pratique, car on peut utiliser ces courbes à chaque fois que le cours d'eau étudié se rapproche des cinq cours d'eau.

II-3-3- Formule d'Engelund et Hansen (1967)

Cette formule a été conçue pour des lits sableux, pour des diamètres de sédiments de l'ordre de 0,15 à 0.93mm. elle dérive d'expérience en canal[Lebreton, 1974 ; Larras, 1972 ; belleudy, 1996].

$$q_s = 0.05U^2 \sqrt{\frac{d}{g(s-1)}} \tau^{* \frac{3}{2}} \quad \text{II-3-4}$$

Il est recommandé pour l'utilisation de cette formule que $\tau^* > 0.15$ et $d_{50} > 2mm$.

II-3-4- Formule de Shen et Hung (1971)

En analysant 514 expériences en laboratoire et 63 observations dans la nature, *Shen et Hung* ont proposé leur formule et ce pour des lits sableux et pour de faible hauteur d'eau.

Le système d'équation est le suivant[Bellcudy, 1996 ; Cardoso, 1994] :

$$y = 2,2432 \frac{U J^{0,57}}{w^{0,32}}$$

$$\text{si } y < 0,1 \Rightarrow \log C = 4,450 + 0,769 \log y - 0,854(\log y)^2 \quad \text{II-3-5}$$

$$\text{si } y > 0,1 \Rightarrow \log C = 4,541 + 1,432 \log y - 0,307(\log y)^2$$

$$q_s = 10^{-6} C \frac{\rho}{\rho_s} q \quad (m^3 / s / m)$$

avec C en mg/l .

La formule a été élaborée pour des sédiments de $0,13 < d_{50} [mm] < 1,3$ et pour $0,7 < \tau^* < 2,9$.

II-3-5- Formule d'Ackers et White (1973)

La formule est basée sur une analyse adimensionnelle et des considération physiques. La détermination des nombreux coefficients numériques qui interviennent dans la formule est basée sur des données expérimentales.

Ackers et White ont proposé des paramètres sédimentologiques[Graf, 1996 ; Cardoso, 1994] :

Un paramètre de *mobilité de sédiments* est défini par :

$$F_{gr} = \frac{u_*^{n_w}}{\sqrt{(s-1)gd}} \left[\frac{U}{\sqrt{32} \log\left(\frac{10h}{d}\right)} \right]^{(1-n_w)} \quad \text{II-3-6}$$

qui devient $F_{gr} = \sqrt{\tau^*}$ (ou le nombre de *Froude* densimétrique de particule) pour les particules très fines, où $n_w=1$.

On pose ensuite un paramètre de *transport de sédiments* :

$$G_{gr} = C_w \left(\frac{F_{gr}}{A_w} - 1 \right)^{m_w} \quad \text{II-3-7}$$

le transport total se calcule par :

$$C = \frac{q_s}{q} = G_{gr} \frac{d}{h} \left(\frac{U}{u^*} \right)^{n_w} \quad \text{II-3-8}$$

$$q_s = C q \quad \text{II-3-9}$$

Les coefficients ont été déterminés par régression, en utilisant près de 1000 expériences en laboratoire et près de 250 expériences in situ avec des sédiments de granulométrie uniforme et non uniforme de $0,04 < d_{50} [mm] < 4,0$ et pour des écoulements à $Fr < 0,8$. Leurs valeurs sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau II-1 Valeurs des coefficients d'Ackers et White[Graf, 1996 ; Cardoso, 1994].

coefficient	$d_* > 60$ $d > 2,5[mm]$	$1,0 < d_* \leq 60$	$d_* < 1$ $d < 0,04[mm]$
n_w	0,0	$1,0 - 0,56 \log d_*$	1,0
m_w	1,50	$(9,66/d_*) + 1,34$	
A_w	0,17	$(0,23/d_*^{1/2}) + 0,14$	
C_w	0,025	$\text{Log } C_w = 2,86 \log d_* - (\log d_*)^2 - 3,53$	

Pour une granulométrie non uniforme, on prend comme diamètre équivalent d_{35} .

II-3-6- Formule de Karim et Kennedy (1981; 1990)

La première formule pour la prévision du transport solide total a été proposée en 1981[Cardoso, 1994], elle peut être écrite sous la forme :

$$\begin{aligned} \log \left[\frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)}d_{50}^3} \right] &= -2.279 + 2.972 \log \left[\frac{U}{\sqrt{g(s-1)}d_{50}} \right] \\ + 1.060 \log \left[\frac{U}{\sqrt{g(s-1)}d_{50}} \right] \log \left[\frac{u^* - u^*_{*c}}{\sqrt{g(s-1)}d_{50}} \right] & \quad \text{II-3-10} \\ + 1.060 \log \left(\frac{h}{d_{50}} \right) \log \left[\frac{u^* - u^*_{*c}}{\sqrt{g(s-1)}d_{50}} \right] & \end{aligned}$$

Plus récemment, en 1990, *Karim* et *Kennedy* ont suggéré une deuxième formule de transport solide total[Cardoso, 1994], sous la forme :

$$\frac{q_s}{\sqrt{g(s-1)}d_{50}^3} = 0.00151 \left[\frac{U}{\sqrt{g(s-1)}d_{50}} \right]^{3.369} \left[\frac{u^* - u^*_{*c}}{\sqrt{g(s-1)}d_{50}} \right]^{0.840} \quad \text{II-3-11}$$

où :

u^*_{*c} : la valeur critique de la vitesse de frottement sur le fond, définie sur la *courbe de shields*.

Selon les auteurs de ces formules, la deuxième formule est moins précise pour les écoulements avec des concentrations faibles de sédiments.

II-3-7- Formule de Van Rijn (1989)

Le débit solide total Q ($m^3/m/s$) est calculée comme la somme des transports par charriage et en suspension [Van Rijn, 1989] :

$$q = q_{sc} + C_a \quad \text{II-3-12}$$

Le transport en suspension est donné par :

$$C_a = 0.015 \frac{d}{a} \frac{T^{1.5}}{d^{0.3}} \quad \text{II-3-13}$$

Le transport par charriage est calculé par :

$$q_s = 0.053 \sqrt{g(s-1)d^3} \frac{T^{2.1}}{d^{0.3}} \quad \text{II-3-14}$$

T est un paramètre de transport sur le fond, donnée par :

$$T = \mu \frac{u^{*2}}{u_c^{*2}} - 1 \quad , \quad \mu = \left(\frac{18 \log \left(\frac{12h}{k} \right)}{18 \log \left(\frac{12h}{d_{90}} \right)} \right)^2$$

Les résultats de cette formule ont été comparés avec des mesures effectuées en canal pour des diamètres de grains de $10 \mu m$ et $200 \mu m$. Pour le charriage, le rapport entre les taux de transport calculés et mesurés varie de 1 à 2 pour les forts débits, et 5 à 10 pour les faibles débits. Pour les suspension, ce rapport est principalement compris entre 1 et 2.

II-3-8- Application des formules

Différentes formules pour calculer le transport solide ont été présentées. Cependant aucune formule ne peut traduire la complexité intrinsèque du transport solide.

Chaque formule ne doit pas être utilisées en dehors des conditions dans lesquelles elle a été établie. Le tableau ci-après résume la gamme des paramètres étudiés pour l'établissement de chaque formule par leur auteur, un élargissement de cette gamme par d'autres auteurs peut exister.

Les formules du transport solide sont en général établies avec des données expérimentales obtenues en laboratoire et moins souvent in situ.

La vérification de ces formules dans les cours d'eau naturels s'avère extrêmement délicate, car il est difficile de mesurer correctement le débit solide in situ. De plus, une évaluation est souvent subjective à cause de la délimitation entre les zones de mode de transport solide.

Tableau II-2 *Domaine de validité des formules.*

Formule	d[mm]	J_{d1} [-]	τ^* [-]	s[-]	d_x [mm]
Schoklitsch	6.0 à 44.0	0,003 à 0,1	0.05 à 0.25	-	d_{40}
MPM	2 à 28,6	0,0004 à 0,020	0.05 à 0.25*	1.25 à 4.22	d_{50}
Einstein - Brown	0,3 à 7,0**	-	0.09 à 0.25	-	d_{50}
Laursen	-	-	-	Voisine 2.65	-
Colby	0.05 à 2.0	-	-	-	-
Engelund et Hansen	0.15 à 0.93**	-	0.05 à 5 (> 0.15)	-	d_{50}
Shen et Hung	0.13 à 1.3**	-	0.7 à 2.9	-	-
Ackers et White	0,04 à 4,0	Fr < 0,8	0.25 à 2.5	-	d_{35}
Karim et Kennedy	-	-	-	-	-
Van Rijn	0.2 à 2.0	-	0.05 à 5	-	d_{50}

d_x est le diamètre équivalent pour granulats non uniforme.

* Il concerne le τ^* .

** Essais de laboratoire.

II-4- Fiabilité des formules de transport solide

La seule façon d'apprécier la validité des formules présentées est de comparer leurs résultats à des mesures directes de débit solide faites en nature.

De nombreuses études sur le débit solide ont été effectuées dans divers cours d'eau et comparées ensuite avec certaines formules, mais toutes ces études ont montrées qu'une validité vraiment objective n'est pas possible.

Dix-neuf formules pour calculer le transport total ont été étudiées par *White et al (1973)* et comparées avec le résultat d'expériences. Ces auteurs ont évalué près de 1000 expériences en laboratoire avec des sédiments uniformes et non uniformes et 270 expériences dans les cours d'eau naturels. Après avoir calculé le rapport des valeurs calculées C_c et observées C_o , où C est le transport total exprimé en concentration, ils ont établi le succès de prédiction (en %) pour différentes gammes de rapport C_c/C_o . D'après cette étude et pour une gamme de $1/2 < C_c/C_o < 2$, la formule d'*Einstein (1950)* par exemple a obtenu 44% de succès et celle d'*Ackers et White* 64% de succès[Graf, 1996].

Selon *Raju et al. (1981)* qui ont vérifié la validité de quelques formules, la formule de *Ackers et White* serait assez précise avec des erreurs inférieurs à 50% dans 80% des cas.

En 1989 *Gomez et al.* ont testé douze formules de transport solide sur des données de 4 cours d'eau naturels et de 3 laboratoires. Leur étude a montré que la formule de *Schoklitsch* serait mieux adaptée au transport de sables pour le cours d'eau Est Fork (EU).

Concernant l'étude *Cardoso et al. (1994)* effectuée aux cours d'eau Portugais, ils ont évalué l'applicabilité de quelques formules parmi des plus connues. Selon cette étude, la formule de *Karim et Kennedy 90* est celle qui produit les meilleurs prévisions, elle produit un pourcentage $[1/2 < C_c/C_o < 2]$ de 67.63 %. Aussi pour les formules de *Shen et Hung* et *Karim et Kennedy 81* et *Ackers et White* sont aussi très précises (63%, 60.92% et 60.63% respectivement).

De toutes ces études, on peut en conclure que parmi toutes les formules de transport solide il y a celles qui sont acceptées comme universellement adéquates puis il faut en tirer celles qui sont les meilleurs pour certaines conditions d'écoulement et caractéristiques des sédiments.

II-5- Tableaux : Domaine de validité

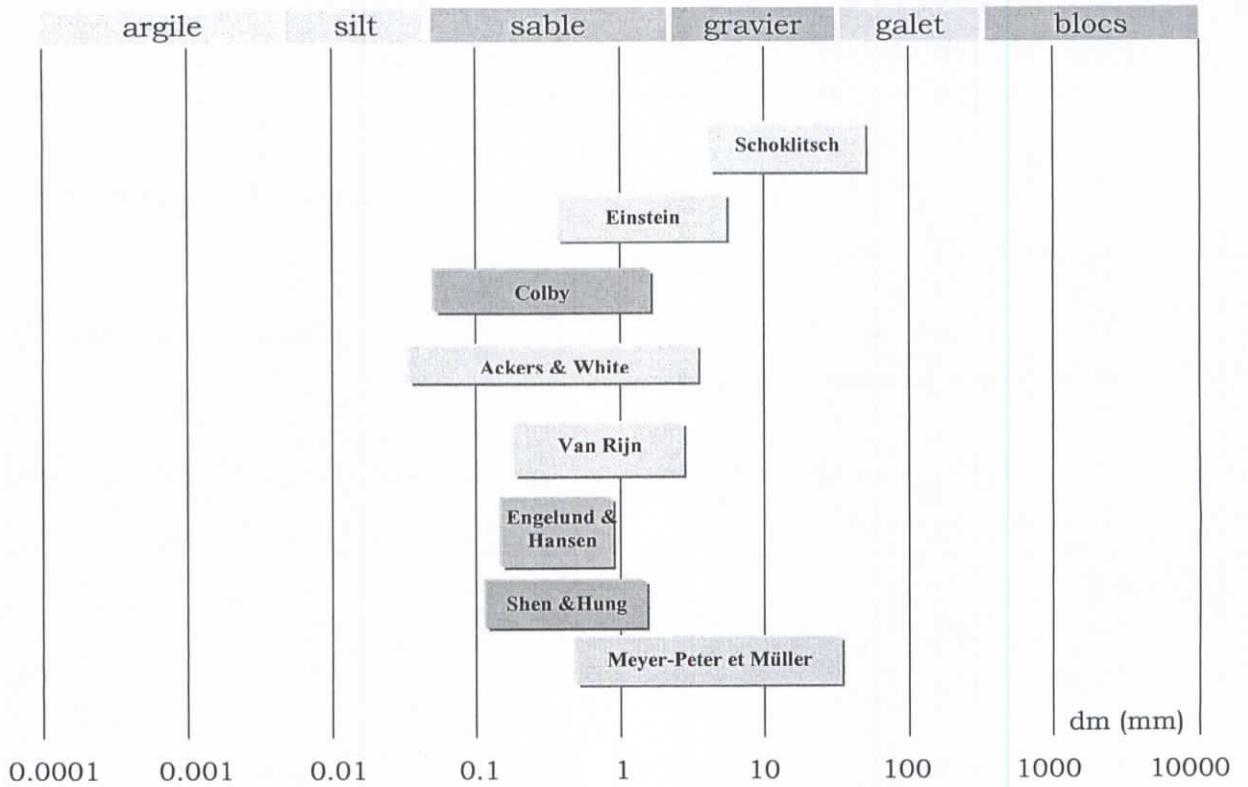
Dans les tableaux suivant, nous illustrons le domaine d'application de quelques modèles.

Le tableau II-3 représente le domaine d'application selon la granulométrie moyenne du lit.

Le tableau II-4 représente le domaine d'application selon la force d'entraînement étoilée.

1- Domaine de validité selon la granulométrie moyenne du lit

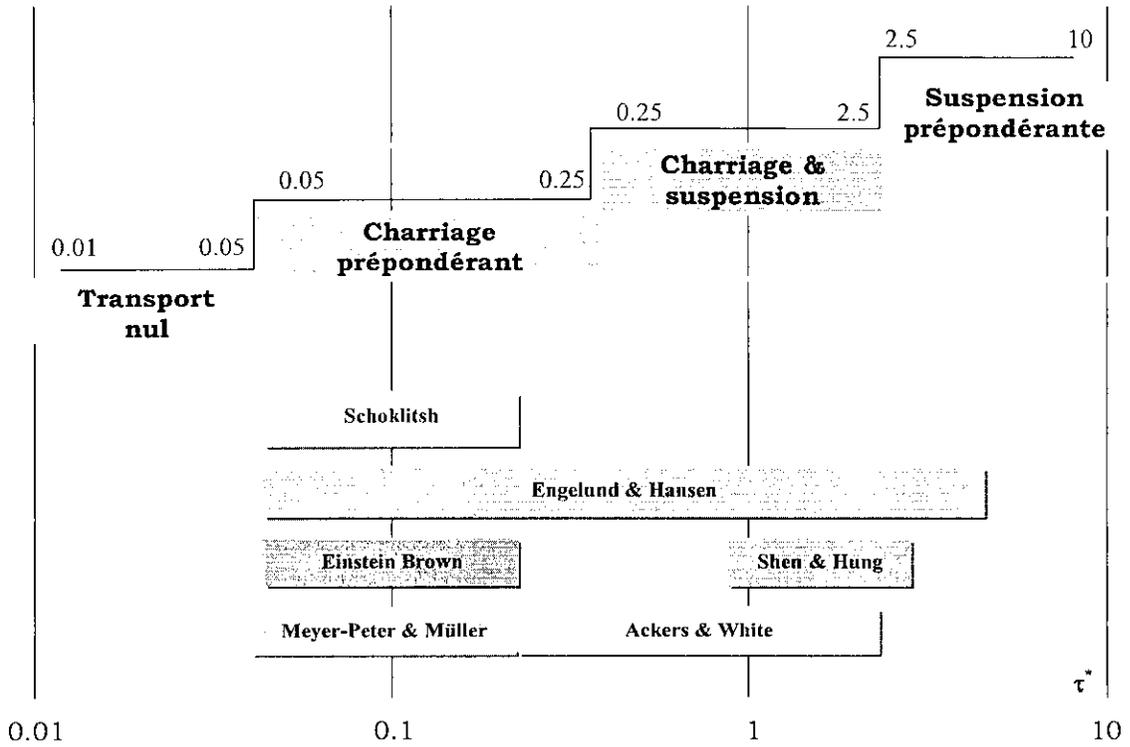
Tableau II-3 *Domaine de validité selon le diamètre des sédiments.*



dm	Meyer-Peter et Muller	Shen & Hung	Englund & Hansen	Van Rijn	Ackers & White	Eistein	Colby	Schoklitsc h
maxi	28.6	1.3	0.93	2.0	0.4	7.0	2.0	44.0
mini	0.4	0.13	0.15	0.2	0.04	0.3	0.05	6.0

2- Domaine de validité selon le régime de transport

Tableau II-4 Domaine de validité selon le régime de transport.



τ^*	Meyer-Peter et Müller	Schoklitsh	Einstein Brown	Shen & Hung	Ackers White	Englund & Hansen
maxi	0.25	0.25	0.25	2.9	2.5	5
mini	0.05	0.05	0.09	0.7	0.25	0.05

Chapitre III. Méthodes de quantification du transport solide en Algérie

Introduction

L'érosion et le transport solide sont responsables de phénomène de très grande ampleur en milieu naturel :

- Appauvrissement des terres agricoles ;
- Envasement des retenues de barrage, des ouvrages de prise et des canaux d'irrigation entraînant la diminution des potentialités hydrauliques ;
- Rehaussement des lits de cours d'eau entraînant un accroissement des risques d'inondation ;
- Ensablement des ports.

L'érosion hydrique est un phénomène complexe, très répandu en zone méditerranéenne, touchant particulièrement l'Algérie dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol.

Le phénomène menace les aménagements hydrauliques existants ou en projet, en limitant leur efficacité et leur durée de vie, et dégrade les terres agricoles.

Les conditions physiques, géomorphologiques, hydroclimatiques et socio-économiques sont particulièrement favorable au déclenchement et à l'accélération du phénomène d'érosion et du transport solide.

L'érosion spécifique, pour les pays de l'Afrique du nord, atteint des valeurs très importantes. Voici, pour comparaison, quelques valeurs mesurées dans le monde (tableau III-1).

Tableau III-1 Quelques valeurs mesurées dans le monde [Benhadj, 1994].

Pays	Cours d'eau	Superficie BV (Km ²)	Dégradation spécifique (t/km ² /an)
Chine	<i>Jaune</i>	715000	2640
	<i>Yang</i>	1025000	491
	<i>Ching</i>	57000	7190
Inde	<i>Damodar</i>	200000	1400
	<i>Kosi</i>	61000	2800
	<i>Mohunadi</i>	132000	465
Iran	<i>Sfid rud</i>	55000	750
Soudan	<i>Abbara</i>	1000000	650
Afrique du nord	<i>Agrioum</i>	657	3400
	<i>Sebaou</i>	3470	320
Etats Unis	<i>Colorado</i>	675000	200
	<i>Mississippi</i>	2977000	50
Italie	<i>Pô</i>	53500	300
France	<i>Isère</i>	11750	615
	<i>Eroc</i>	990	700
	<i>Durance</i>	3580	150

Les travaux de *Demmak (1982)* [Demmak, 1982] sur l'érosion et le transport solide ont montré que l'érosion spécifique dépasse $2000t/km^2/an$ sur la plupart des bassins versants de l'*Atlas Télien*. elle atteint $4000t/km^2/an$ sur la chaîne des côtières de *Dahra*.

La quantité moyenne annuelle du sol érodé en Algérie est environ de 180 millions de tonnes. Une quantité importante de ces sédiments est transportée progressivement à travers le réseau hydrographique jusqu'aux retenues où ils seront piégés, diminuant ainsi leurs capacités de stockage en eau. L'infrastructure hydraulique est amputée annuellement d'une capacité estimée à 5% de réserve totale. Certains barrages sont presque ou entièrement envasés en moins de 30 ans (le cas de *Cheurfa I*).

Le tableau III-2 montre l'envasement moyen de quelques barrages Algériens ainsi que leurs pertes en capacités.

Tableau III-2 Quantification de l'alluvionnement de quelques barrages algériens [Kassoul, 1999].

Barrage	Oued	Superficie du B.V. (km ²)	Capacité initiale (Mm ³)	Période de calcul	Envasement Moyen (Mm ³ /an)	Capacité en 1986 (Mm ³)	Perte en capacité (%)
Boughzoul	Nahr Ouassel	19740	55	1934/1986	0.570	20.38	62.94
Ghrib	Chlef	23300	280	1939/1986	2.490	138.57	50.51
O.Fodda	Fodda	790	228	1932/1986	2.246	132.30	41.97
Bakhadda	Mina	1275	56	1963/1986	0.082	45.44	18.85
SMBA	Mina	6100	235	1978/1985	1.170	227.40	3.23
Hamiz	Arbatache	137	21	1935/1986	0.155	8.49	59.57
Zardezas	Safsaf	346	31	1977/1986	0.450	14.78	52.32
Cheffia	Bounamoussa	575	171	1965/1986	0.124	168.40	1.52
Ksob	Ksob	1470	31	1977/1986	0.395	12.43	59.90
F. Elgherza	Elabioud	1300	47	1950/1986	0.590	25.76	45.19
F. Elgheiss	Gheiss	153	3	1939/1986	0.030	1.60	46.66
Sarno	Sarno	264	22	1954/1986	0.414	21.57	1.95
Fergoug	Elhammam	8274	18	1970/1986	0.881	3.90	78.33
Dj. Ettorba	Guir	22000	360	1967/1986	2.290	316.40	12.11
Benibahdel	Tafna	990	63	1944/1986	0.107	56.40	10.47
Maffrouche	Maffrouche	85	15	1940/1986	0.017	14.60	2.66

L'envasement moyen varie d'un bassin à l'autre et a atteint $2.490\text{Mm}^3/\text{an}$ (cas de *Ghrib*). Cela a entraîné une perte dans la capacité initiale qui arrive à la limite de la durée de vie de certains. On note que la durée de vie d'un barrage est la période durant laquelle sa capacité est supérieure à sa capacité initiale de 50%.

L'autre paramètre qui permet d'exprimer la sédimentation est le taux d'abrasion c'est à dire le volume des sédiments mesuré au niveau de la cuvette du barrage pendant une durée donnée et ramené à une unité de surface du bassin pour une année hydrologique moyenne (tableau III-3).

Tableau III-3 Taux d'abrasion dans quelques barrages algériens [Kassoul, 1999].

Barrage	Oued	Superficie du B.V. (km ²)	Pluviométrie interannuelle (mm)	Envasement Moyen (Mm ³ /an)	Volume spécifique d'abrasion (m ³ /km ² /an)
Boughzoul	Nahr Ouassel	19740	300	0.570	28.85
Ghrib	Chlef	23300	331	2.490	129
O.Fodda	Fodda	790	535.5	2.246	2233
Bakhadda	Mina	1275	430	0.082	76.23
SMBA	Mina	6100	330.8	1.170	160.41
Hamiz	Arbatache	137	790	0.155	2289
Zardezas	Safsaf	346	642	0.450	1825
Cheffia	Bounamoussa	575	798.5	0.124	217
Ksob	Ksob	1470	370.7	0.395	268
F. Elgherza	Elabiod	1300	388.2	0.590	454
F. Elgheiss	Gheiss	153	456.6	0.030	191
Sarno	Sarno	264	459	0.414	54
Fergoug	Elhammam	8274	460	0.881	104
Dj. Ettorba	Guir	22000	150	2.290	105
Benibahdel	Tafna	990	450	0.107	56
Maffrouche	Mafrouche	85	688.2	0.017	205

II- Etudes réalisées sur le transport solide et l'érosion en Algérie

De nombreuses études expérimentales avaient été consacrées au problème de l'érosion. Les principaux résultats ont permis d'appréhender, sur une base scientifique, le mécanisme de l'érosion.

II-1- Medinger (Mars 1960)

Medinger effectue une étude sur les méthodes de mesure et présente les données de mesure recueillies sur une trentaine de bassins versants durant la période 1946–1957.

Ses essais ont porté sur l'élaboration d'une relation entre débits et concentrations instantanées. Les résultats obtenus n'étaient pas satisfaisants.

II-2- Tixeront (Août 1960)

Les travaux de *Tixeront* sont basés de 32 bassins d'Algérie et 9 bassins de Tunisie. Les superficies varient de 90 à 22300km² et les observations portent sur une durée de 2 à 22 ans.

L'auteur a procédé à la correction et l'homogénéisation des séries qui figurent dans les annuaires hydrologiques de l'Algérie. Puis a regroupé les bassins en 3 classes suivant un critère régional, et pour chacune d'elles une relation débit solide et ruissellement.

Les principales conclusions des travaux de *Tixeront* sont résumés comme suit :

- Les teneurs en suspension des 3 groupes de bassins augmentent d'une façon générale, quand le ruissellement diminue.
- Les terrains des régions fortement plissées, fournissent des taux d'abrasion et des teneurs en suspension particulièrement élevés.

- La distribution régulière des précipitations avec un maximum en pleine saison végétative est favorable aux faibles teneurs. La distribution la plus favorable est celle qui emporte au maximum en automne.
- La répartition pluviométrique permet la différenciation de 3 zones :
 - ❖ Une zone où la pluviométrie (inférieure à 300 mm) est insuffisante pour causer une érosion appréciable.
 - ❖ Une zone de 300 à 700 mm où l'érosion est très active $1200\text{t}/\text{km}^2/\text{an}$.
 - ❖ Une zone de pluviométrie supérieure à 700 mm , mais qui bénéficie d'un couvert végétal protecteur où l'érosion est de l'ordre de $350\text{t}/\text{km}^2/\text{an}$.

II-3- Capolini (1965-1969)

L'auteur a effectué une étude géomorphologique régionale sur le bassin du Cheliff (physiographie, physométrie, pente, formation lithologique superficielle, couvert végétal).

L'étude a permis à *Capolini* de :

- de quantifier les débits solides en associant à chaque formation lithologique un débit solide spécifique.
- d'établir une relation statistique entre l'érosion spécifique des bassins versants et les coefficients de torrentialité.
- de suggérer une méthode de cartographie de la susceptibilité à l'érosion à partir de la cartographie du coefficient de torrentialité, en partant de l'hypothèse, vérifiée sur les bassins du *Fodda* et de *Rhiou*, que les zones fortement érodées coïncident avec les zones à coefficient de torrentialité élevé.

II-4- Sogreah (1969)

L'étude est basée sur les données recueillies dans 27 bassins, totalisant 282 années-stations. Les durées d'observation sont très variables.

Cette étude a montré que le transport solide des oueds est fonction du ruissellement annuel des crues et de la perméabilité des bassins versants, en admettant que le degré de perméabilité est un facteur qui intègre en 1^{ère} approximation les paramètres géomorphologiques.

Sur un bassin de nature géomorphologique donnée, le transport solide apporté par les crues croît avec le volume ruisselé.

II-5- Demmak (1982)

Demmak a mis en relief l'importance de cette érosion et ses conséquences, et a proposé une méthodologie d'étude et de lutte.

A cet effet, il a procédé à la sélection de 30 bassins versants représentatifs de l'Algérie du nord de différentes conditions physiques, géomorphologiques, climatiques et hydrologiques. Il a défini une corrélation multiple très significatif incluant plusieurs paramètres physiques pour un bassin versant côtier à très forte érosion, qui n'est valable que pour les bassins versants *Téliens* ayant un pourcentage marneux érodable supérieur à 10% et une pluviométrie supérieur à 300 mm.

Il a prédit que l'apport solide pour le barrage *El Ibtissam* sur l'oued *Deurdeur* serait de 6 Mm³ pour une période de 50 ans, avec une densité sèche des matériaux égale à 1,3 t/an et en y ajoutant 30% du charriage. La concentration moyenne inter-annuelle en suspension serait de 3,2 g/l, une érosion spécifique de 273,4 t/km²/an. Les résultats ont été calculés sur une période de 7 ans.

Les travaux de *Demmak* ont montré que l'érosion spécifique dépasse 2000t/km²/an sur la plupart des bassins versants de l'*Atlas Télilien*. Il atteint 4000t/km²/an sur la chaîne des côtiers de *Dahra*.

II-6- Etude PNUD/OPE (1987)

L'étude avait pour objectifs :

- d'améliorer la connaissance des causes de l'érosion hydrique en zone semi-aride.
- de quantifier les principales formes d'érosion susceptibles de se développer et de préciser les relations érosion-transport solide.
- de tester une méthode d'évaluation des transports solides à l'exutoire d'un grand bassin.
- de contribuer à la définition d'une stratégie de lutte contre l'érosion et les transports solides.

A cet effet, le bassin versant de l'oued *Isser* – station de *Lakhdaria* a été choisi pour l'exécution de l'étude durant trois années hydrologiques (1983/84 à 1985/86). Ainsi les différents paramètres de l'érosion ont été mesurés (pluie, ruissellement et débit solide).

L'étude a montré que l'érosion en Afrique du nord est essentiellement liée à l'énergie du ruissellement. Ce sont les épisodes pluvieux importants entraînant un ruissellement généralisé qui provoquent les pertes en terre les plus notables et contribuent à l'essentiel des transports solides à l'exutoire des bassins.

Les petites crues, résultant de précipitations intenses mais localisées et de courte durée, érodent, mais leurs capacités de transport sont limitées et leurs effets ne sont pas toujours ressentis à l'exutoire du bassin. Lors de fortes crues généralisées, les sédiments érodés sont systématiquement repris et transportés jusqu'à l'exutoire.

L'analyse globale des données a permis de mettre au point des relations entre :

- ❖ le ruissellement, la précipitation génératrice, durée de l'averse et la température.
- ❖ le débit maximal, le volume ruisselé et le temps de base de la crue.
- ❖ la concentration du débit solide en suspension et le débit maximal.

Cependant, ce modèle reste un outil provisoire, il devra être complété et affiné sur la base de données cartographiques et hydrologiques exhaustives. En effet, les trois années d'observation constituent une période trop courte pour obtenir des résultats significatifs et appréciables.

III- Modèles de quantification de transport solide en Algérie

L'ensemble des modèles de quantification concernent seulement le transport solide en suspension, le taux de charriage dans le transport solide globale est estimé, d'une façon approximative, à environ 50% dans les formations peu érodables jusqu'à 10-15% dans les formations très érodables.

Ces méthodes sont basées sur des modèles empiriques.

III-1- Formule de Fournier (1960)

Basée sur les données recueillies dans 104 bassins de superficie supérieure à 2000km² appartenant à différentes régions du globe, la formule fait intervenir la notion de contraste et d'abondance pluviométrique ainsi que l'orographie des bassins[Harbi, 1990].

$$E = \frac{1}{36} \left(\frac{P^2}{\bar{P}} \right)^{2.65} \left(\frac{h^2}{S} \right)^{0.46} \quad \text{III-1}$$

où :

E : Apports solides spécifiques moyens annuels ($t/km^2/an$) ;

P : Pluie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux (mm) ;

\bar{P} : Pluie moyenne annuelle (mm) ;

h : Dénivelée moyenne : $\bar{H} - H_{min}$ (m) ;

S : superficie du bassin (km^2).

Les apports incluent les transports solides par charriage.

L'utilisation de cette méthode n'a pas donné de satisfaction du faite peut être qu'elle ne tient pas compte du facteur lithologique qui semble être un facteur prépondérant de l'érosion et des transports solides

III-2- Formule de Tixeront (1960)

Basée sur les données recueillies dans 32 bassins d'Algérie et 9 bassins de Tunisie[PNUD, 1987].

Après avoir regroupé les bassins en 3 classes suivant un critère régional, *Tixeront* propose 3 relations :

$A = 354R^{0.15}$	Bassins Tunisiens	
$A = 92R^{0.21}$	Région de l'Est Algérien	III-2
$A = 2000R^{0.15}$	Région centre Algérie	

avec :

A : apports solides spécifiques moyens annuels ($t/km^2/an$) ;
 R : ruissellement annuel (mm).

III-3- Formule Sogreah (1969)

La relation *Sogreah* inspirée de la formule de *Tixeront*, donne les apports solides spécifiques A ($t/km^2/an$) en fonction du ruissellement annuel de crue et de la perméabilité des bassins[PNUD, 1987] :

$$A = a R^{0.15} \qquad \text{III-3}$$

$a = 8.5$	perméabilité élevée
$a = 75$	perméabilité moyenne à élevée
$a = 350$	perméabilité faible à moyenne
$a = 1400$	perméabilité faible
$a = 3200$	imperméables

III-4- Formule de Gavrilovic

Mise au point en Yougoslavie et utilisée en Algérie [PNUD, 1987].
 La dégradation spécifique ($m^3/km^2/an$) est le produit de deux fonctions :

$$D_s = P_e \cdot R_m \quad \text{III-4}$$

- La fonction donnant la production annuelle de sédiment en suspension et de charriage, P ($m^3/km^2/an$) :

$$P = T H_m \pi \sqrt{Z^3} \quad \text{III-5}$$

avec :

H_m : Pluie moyenne annuelle (mm) ;

T : Coefficient de température : $T = \sqrt{\frac{t^\circ}{10}} + 0.1$;

t° : Température moyenne annuelle ($^\circ C$) ;

Z : Coefficient empirique lié à l'érosion du bassin :

- Erosion très faible :	$0.10 < Z < 0.20$
- Erosion faible :	$0.20 < Z < 0.40$
- Erosion moyenne :	$0.40 < Z < 0.70$
- Erosion intense :	$0.70 < Z < 1$
- Erosion excessive :	$1 < Z < 1.5$

- La fonction R_m donnant le taux de rétention des sédiments produits par le bassin en tenant compte des discontinuités spatio-temporelles dans le flux des matériaux arrachés :

$$R_m = \frac{\sqrt{P_e} \bar{H}}{0.2(L + 10)} \quad \text{III-6}$$

avec :

P_e : Périmètre du bassin versant (km) ;

\bar{H} : Altitude moyenne (km) ;

L : Longueur du thalweg principal (km).

III-5- Formule de l'INRH (1982)

Elaborée à partir des données recueillies dans 30 bassins, de superficie comprise entre 100 et 3000 km², soumis à une pluviométrie comprise entre 300 et 1000 mm [PNUD, 1987] :

$$T_s = 26.62I_l + 5.07I_p + 9.77C_t - 593.56 \quad \text{III-7}$$

avec :

T_s : Transport solide spécifique moyen annuel (t/km²/an) ;

I_l : Indice lithologique ;

I_p : Indice des précipitations érosives ;

C_t : Coefficient de torrentialité, $C_t = Dd \cdot F_1$

où : Dd : densité de drainage ;

F_1 : Fréquence des thalwegs élémentaires.

Autre formule utilisée dans l'estimation des transports solides est l'*envasement moyen*, connaissant les apports solides et le poids spécifique des vases qui se déposent au fond du réservoir, l'*envasement moyen E* (Mm³/an) s'écrit :

$$E = \frac{A S}{P_s} \quad \text{III-8}$$

avec :

A : Apports solide spécifiques moyens annuels (t/km²/an) ;

S : Superficie du bassin (km²) ;

P_s : Poids spécifique des apports solides (t/m³).

2eme Partie

Chapitre IV. Elaboration du programme mathématique

Introduction

Selon le mode transport, il existe dans la littérature une multitude de formules de quantification du transport solide. Dans cette deuxième partie, nous avons élaboré un programme mathématique (langage Fortran) qui permet de définir le mode de transport pour un écoulement donné et selon les caractéristiques des grains (diamètre et masse volumique) et du lit (pente moyenne), puis de déterminer la formule à utiliser (soit une formule de transport solide par charriage soit une formule de transport solide total), finalement de quantifier le transport solide au droit d'une station hydrométrique.

Notre modèle est basé sur la classification de *Ramette*, le programme calcule la force d'entraînement étoilée en utilisant la formule I-15, puis il définit le mode de transport, à cette étape l'utilisateur choisit la formule de quantification du débit solide.

I- Formules de transport solide utilisées

Le transport solide se fait par charriage et en suspension, et pour chaque régime d'écoulement, le calcul de transport solide peut utiliser soit une formule de transport solide par charriage, soit une formule de transport solide en suspension, soit une formule de transport solide totale, la formule choisie doit être la plus appropriée aux données du problème.

Dans notre travail on a choisi la formule de *Meyer-Peter et Muller* :

$$q_s = 8 \sqrt{g(s-1)d^3} (\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad (\text{m}^3/\text{s/m})$$

$$\tau^* = \frac{\xi_M \rho R_h J_e}{(\rho_s - \rho)d}$$

$$\tau_c^* = 0.047$$

la formule de *Schoklitsch* ($\text{m}^3/\text{s/m}$):

$$q_s = \frac{2.5}{s} J_e^{3/2} (q - q_c) \quad \text{avec} \quad q_c = 0.26 (s-1)^{5/3} \frac{d^{3/2}}{J_e^{7/6}}$$

et la formule d'Einstein et Brown :

$$q_s = 40 F \sqrt{g(s-1)} d^3 \tau^{*3} \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$$

F est calculé par la formule II-1-16

pour le calcul du **charriage**.

La formule d'Engelund et Hansen :

$$q_s = 0.05 U^2 \sqrt{\frac{d}{g(s-1)}} \tau^{* \frac{5}{2}}$$

la formule de Shen et Hung :

$$y = 2,2432 \frac{U J^{0,57}}{w^{0,32}}$$

$$\text{si } y < 0,1 \Rightarrow \log C = 4,450 + 0,769 \log y - 0,854(\log y)^2$$

$$\text{si } y > 0,1 \Rightarrow \log C = 4,541 + 1,432 \log y - 0,307(\log y)^2$$

$$q_s = 10^{-6} C \frac{\rho}{\rho_s} q \quad (\text{m}^3 / \text{s} / \text{m})$$

et la formule d'Ackers et white :

$$q_s = G_{gr} \frac{d}{h} \left(\frac{U}{u^*} \right)^{n_w} q$$

pour le calcul de **transport total**.

Rappelons que la formule de *MPM* peut être utilisée pour les conditions suivantes:

- Des granulats de 2 à 28.6 mm de diamètre;
- Des pentes comprises entre 0.0004 et 0.024;
- La gamme de ρ_s/ρ couverte allait de 1.25 à 4.22 ;
- Pour des régimes de transport τ^* allant de 0.047 à 0.25 ;
- $d = d_{50}$, comme diamètre équivalent, pour une granulométrie non uniforme.

la formule de *Schoklitsch* s'applique pour :

- Des diamètres de grains de 6 à 44 mm;
- Des pentes du fond de 0.003 à 0.1 ;
- Pour des régimes de transport τ^* allant de 0.05 à 0.25 ;
- $d = d_{40}$ comme diamètre équivalent, pour un mélange de granulométrie non uniforme

la formule d'*Einstein-Brown* s'applique pour les conditions suivantes:

- Des granulats de 0.3 à 7.0 mm de diamètre;
- Pour des régimes de transport τ^* allant de 0.09 à 0.25 ;
- $d = d_{50}$, comme diamètre équivalent, pour une granulométrie non uniforme.

la formule d'*Engelund et Hansen* s'applique pour :

- Des granulats de diamètre $d_{50} > 2$ mm;
- Pour des régimes de transport τ^* allant de 0.05 à 5 (il est recommandé $\tau^* > 0.15$);
- $d = d_{50}$, comme diamètre équivalent, pour une granulométrie non uniforme.

la formule de *Shen-Hung* s'applique pour :

- Des granulats de 0.13 à 1.3 mm de diamètre ;
- Pour des régimes de transport τ^* allant de 0.7 à 2.9 ;

la formule d'*Ackers-White* s'applique pour :

- Des granulats de 0.04 à 4.0 mm de diamètre ;
- Pour des régimes de transport τ^* allant de 0.25 à 2.5 ;
- $d = d_{35}$, comme diamètre équivalent, pour une granulométrie non uniforme.
- Pour des écoulements à $Fr < 0,8$

Rappelons que toutes ces formules ont été établies en laboratoire.

III- L'organigramme de calcul

L'organigramme principal et détaillé de calcul de transport solide sont donnés comme suit :

Figure IV-1- L'organigramme principal de calcul de transport solide.

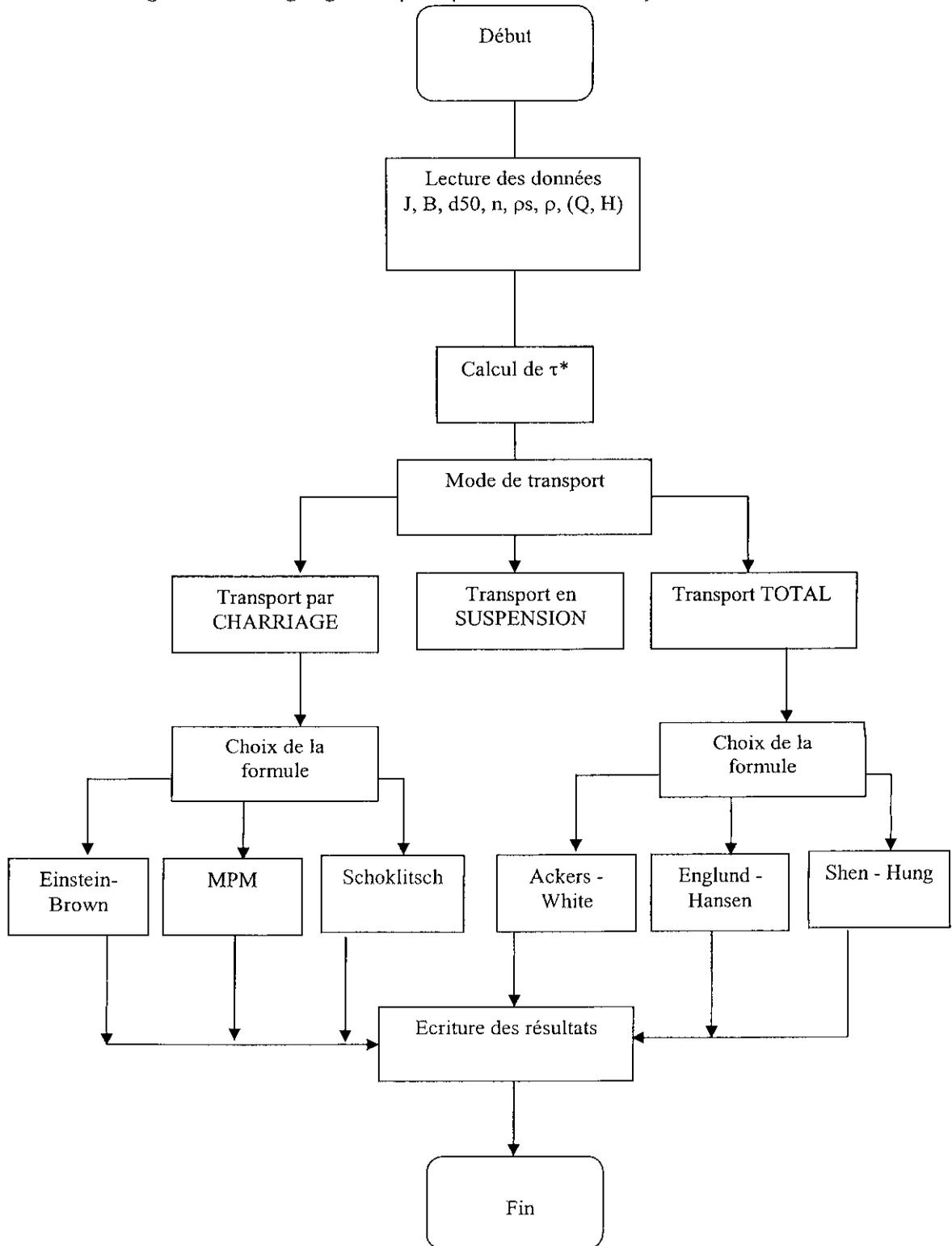
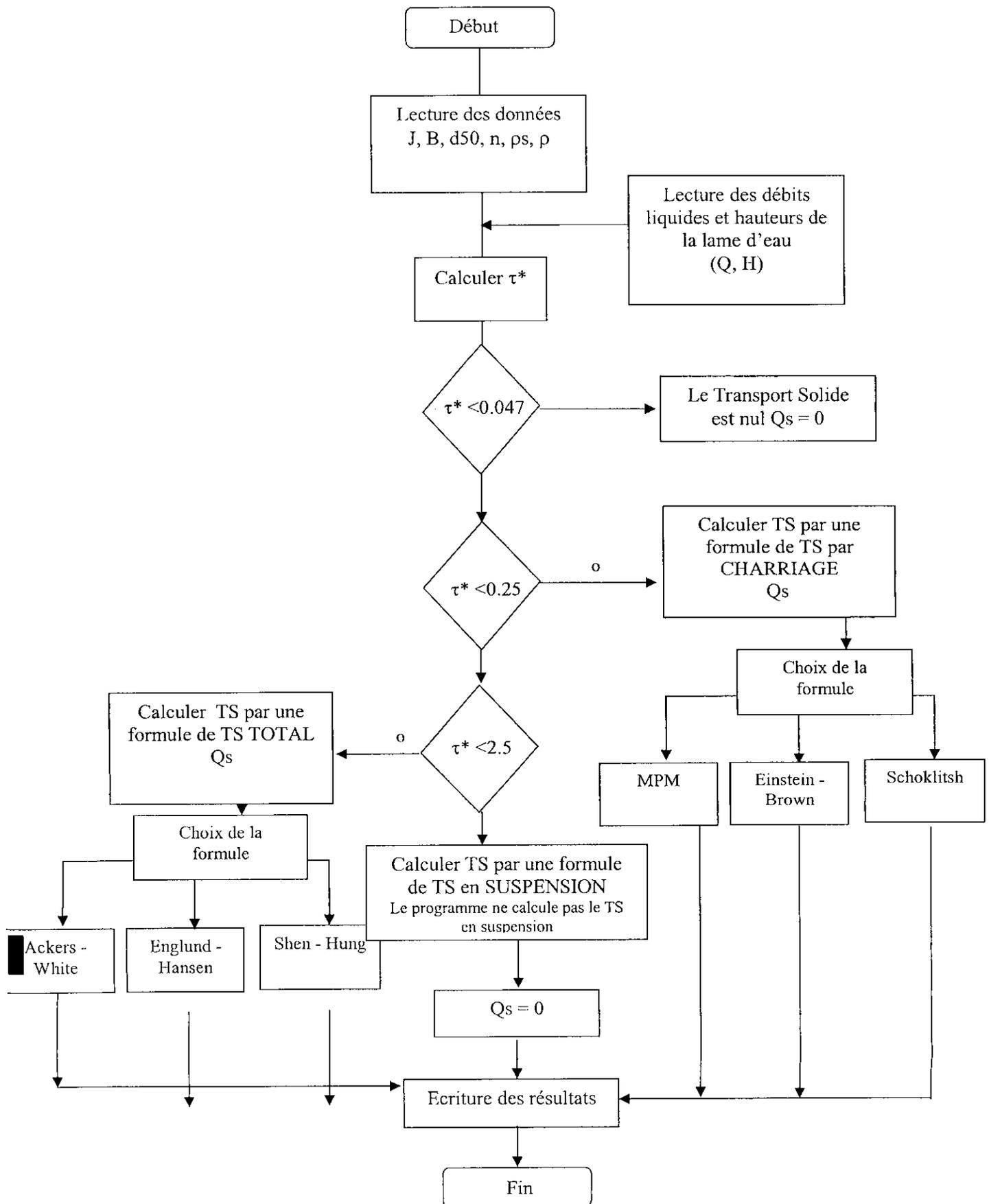


Figure IV-2 L'organigramme détaillé de calcul de transport solide.



Chapitre V. Présentation des régions d'études

Le programme mathématique a été appliqué à deux bassins versants : le bassin versant de la *Tafna*, au droit de la station *Pierre du chat* et au bassin versant de l'*Isser*, au droit de la station *Lakhdaria*.

V-1- Présentation du bassin versant La Tafna

Le bassin de la *Tafna* est situé à l'extrême nord-ouest du pays et s'étend jusqu'au territoire Marocain, entre les monts de Tlemcen au Sud, la chaîne de Traras dans la basse Tafna et au Nord le littoral (Beni Saf). il couvre une superficie de 6900 Km^2 .

V-1-1-Relief et topographie

La Tafna est partagée en 03 zones :

- la zone des hauts reliefs.
- La zone des reliefs moyens
- La zone des basses plaines.

V-1-2-Hydrographie et régime hydraulique

Le réseau hydrographique du bassin se présente sous forme de deux branches principales : oued Tafna à l'ouest et oued Isser à l'est. Leurs affluents sont disposés de manière à drainer tout le bassin (figure V-1).

Les oueds de la Tafna reçoivent en moyenne 04 à 05 crues pendant les périodes d'hiver et une crue en printemps et d'automne.

La pointe du débit journalier moyen est de $1487 \text{ m}^3/\text{s}$, l'écoulement moyen à la station hydrométrique est de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (période entre 1980-1996). La pointe des crues est égale à $2120 \text{ m}^3/\text{s}$ (observés entre 1952-1996) . La charge en suspension a été relevée entre 1977-1991. La concentration moyenne est de 18 - 25 g/l, la concentration maximale est de 132 g/l.[Benchabekh, 1995].

V-1-3-Géologie et végétation

Cette région est dominée par le massif jurassique des monts de Tlemcen constitué de calcaires dolomitiques perméables très résistants. Elle présente une texture de limon, argile et sable. Le lit du oued est essentiellement formé d'un mélange de sables et de graviers.

Le bassin est essentiellement occupé par des cultures maraîchères, vigne et agrumes.

V-1-4-Climat et pluviométrie

La Tafna représente un climat semi-aride, seul les versants septentrionaux des principaux massifs reçoivent annuellement une pluviométrie moyenne de 600 mm, la pluviométrie au niveau des basses plaines est au contraire inférieur à 600 mm. Le régime pluviométrique du bassin obéit aux périodes sèches et humides, qui caractérisent le climat méditerranéen

La période sèche : se situe entre Juin et Août avec des précipitations minimales en juillet dues à des perturbations locales (orages).

La période humide : s'étale de Septembre à Mai, se caractérise par trois mois de fortes pluviosités (Décembre, Janvier, Février).

V-1-5-Granulométrie des sols

L'analyse des échantillons prélevés dans l'oued à 2 km environ à l'amont de la station (figure VI-1) a révélé que le sol a les caractéristiques suivantes :

- Diamètre équivalent : $d_{50} = 12 \text{ mm}$
- Densité : $s = 2,7$

Rugosité des grains et du cours d'eau :

- Pour les grains on a utilisé la formule de *Strickler* :

$$\frac{1}{n'} = K_s' = \frac{21.1}{d_{50}}$$

$$n' = 0,0227$$

- Pour le cours d'eau, elle est représentée par le coefficient *Manning-Strickler* $[n]$ ($n=1/ks$), incorporant les effets de la nature du sol, de la végétation, des irrégularités de surface et du degré de courbature.

$$K_s = \frac{U}{R_h^{2/3} J^{1/2}}$$

on obtient : $n = 0.05$.

la pente moyenne du lit près de la station hydrométrique est $I = 2.28 \cdot 10^{-3}$.

V-1-6-Mesures de l'envasement

Selon des études antérieures, l'envasement moyen au réservoir *Benibahdel* a été estimé à :

- ✱ $0.107 \text{ Mm}^3/\text{an}$ [Kassoul, 1999] .
- ✱ $0.06 \text{ Mm}^3/\text{an}$ [Benhadj, 1994].
- ✱ $0.13 \text{ Mm}^3/\text{an}$ [Belkhiri, 1995].
- ✱ $0.2 \text{ Mm}^3/\text{an}$ [INRH].

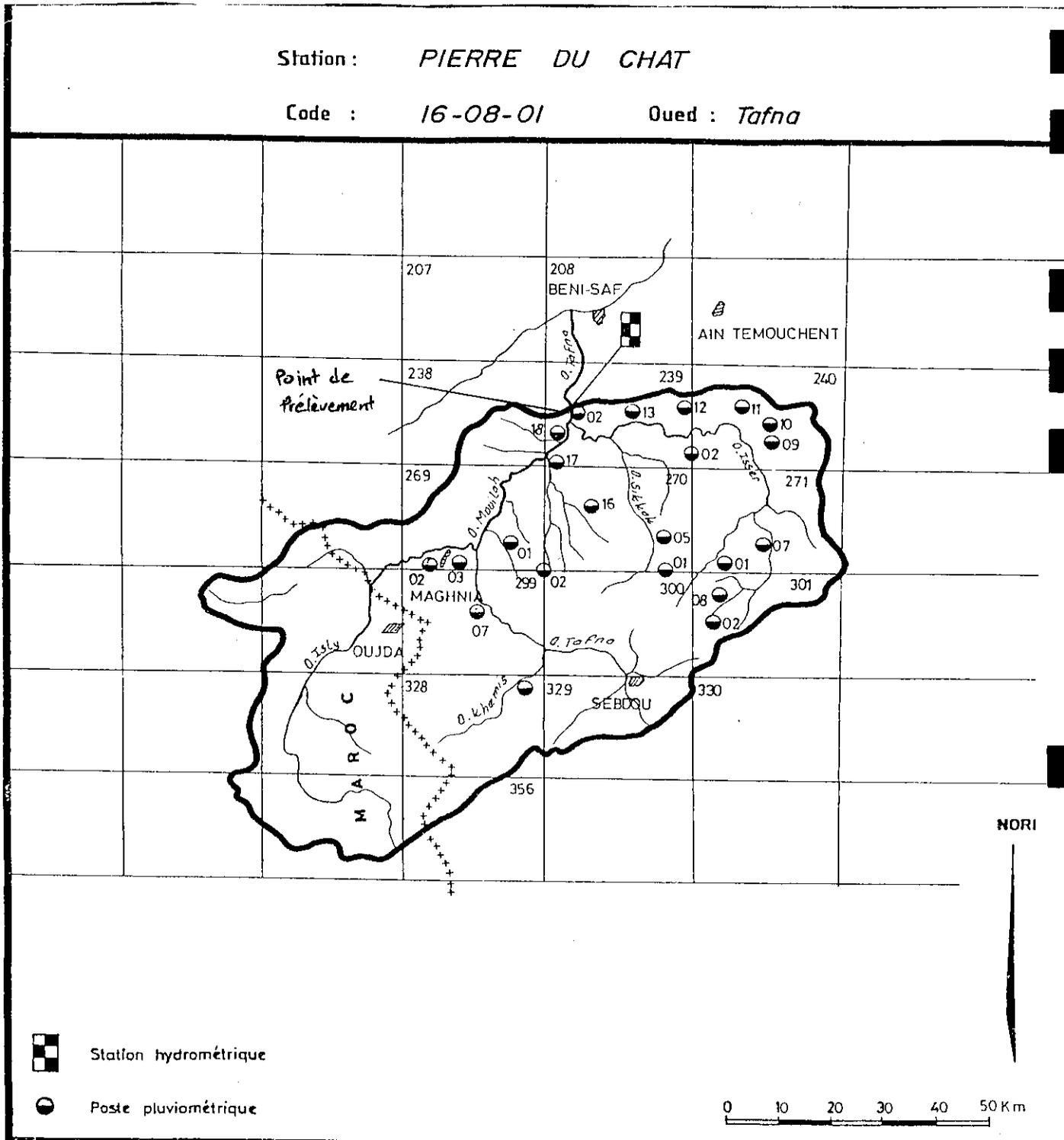


Figure V-1 Carte de situation du bassin versant Tafna.

V-2- Présentation du bassin versant L'Isser

Le bassin de L'Isser est situé à environ 70 km au Sud-Est d'Alger et s'étend sur 3615 Km² à la station hydrométrique de Lakhdaria. Le bassin est enclavé dans les contreforts de l'Atlas Telien.

Le bassin est constitué essentiellement de l'Atlas Telien Algérois au Nord et de la chaîne des Bibans au Sud. Ces deux chaînes sont séparées par la plaine des Aribes. Les reliefs sont généralement très importants.

Sur le cours d'eau supérieur, en amont de Lakhdaria, la pente moyenne de l'oued est de 4m/km contre 1m/km en aval de Beni Amrane. La figure V-3 présente la carte de situation du bassin versant de l'Isser.

V-2-1-Géologie et végétation

La majeure partie du bassin est constituée de formations tendres : marnes et argiles. Ce type de formations favorise l'érosion. Le bassin de l'Isser présente une structure fragile et une faible résistance aux forces érosives. Il a une forte densité de drainage et un coefficient de torrencialité assez important.

Le bassin se caractérise par un couvert végétal (bois et broussaille) peu dense et souvent dégradé (figure V-4), soit 19% de la superficie totale, le reste est occupé par des cultures céréalières et fourragères.

V-2-2-Hydrographie et régime hydraulique

Le bassin de l'Isser est drainé par deux cours d'eau principaux : oued Isser et oued Malah. Il présente un réseau hydrographique de type arborescent. Le bas Isser est drainé principalement par l'oued Isser. La station hydrométrique principale de l'oued Isser est située sur le tronçon supérieur des gorges près de la coupe 6 (figure V-5). Il s'agit de la station de Lakhdaria.

Le régime hydrique est irrégulier, c'est la caractéristique de nombreux oueds algériens. Pendant la saison sèche, l'oued est souvent à sec avec seulement un faible débit.

La pointe du débit journalier moyen est de 1600m³/s. La pointe de crue annuelle est égale à 839m³/s. L'écoulement moyen à la station hydrométrique est de 12.5m³/s les débits ont été observés sur une période de 43 ans (1946-1959 ; 1966-1979 ; 1983-96). La charge en suspension a été relevée entre 1972-1978 et entre 1983-1996. La concentration moyenne est de 16.2g/l. La concentration maximale observée atteint 265 g/l.[Binni Partner, 1984].

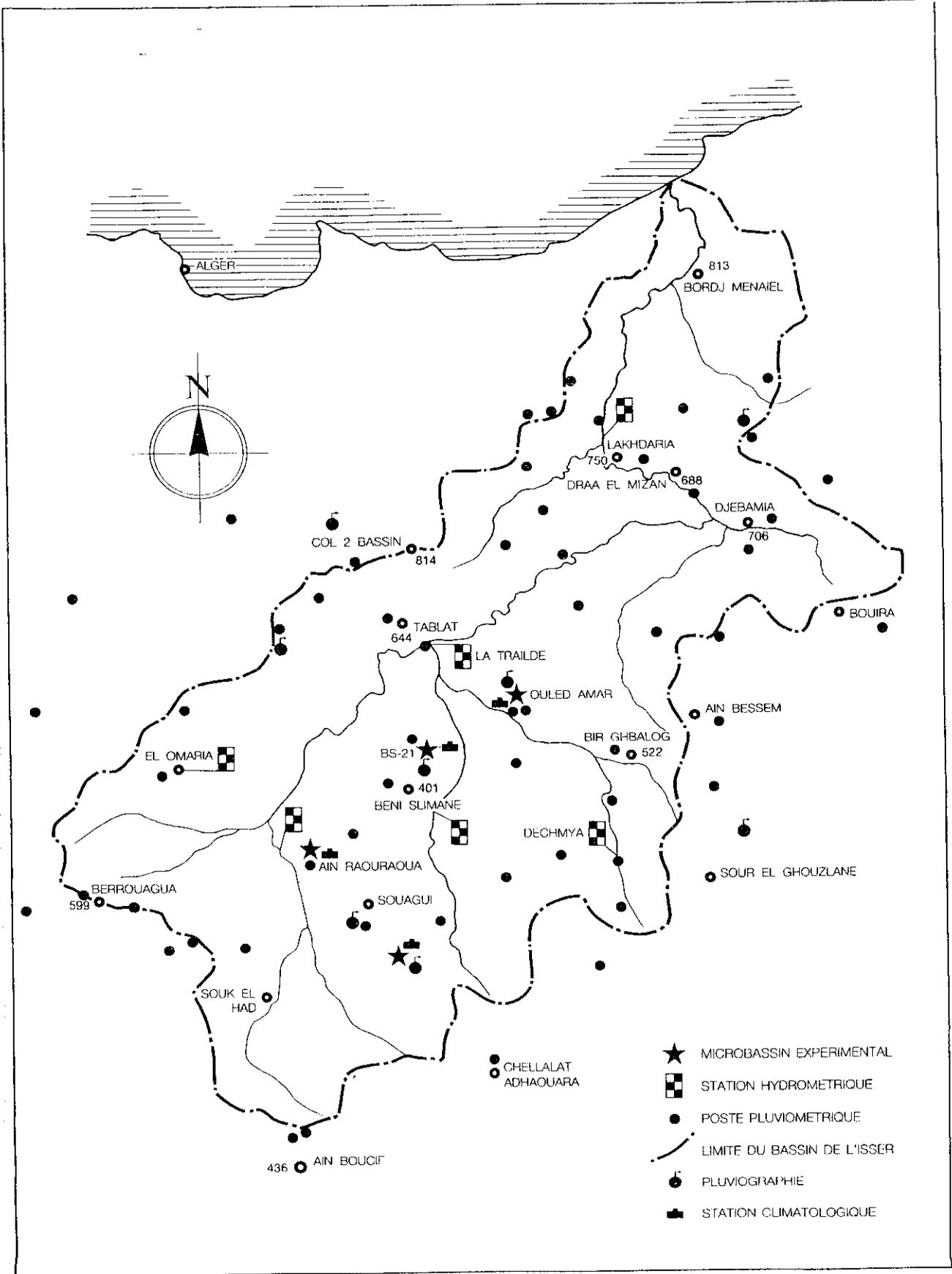


Figure V-3 Carte de situation du bassin versant Isser.

V-2-3-Climat et pluviométrie

Le régime climatique du bassin marque une tendance semi-aride, avec une diminution des précipitations du Nord au Sud, passant de 800 mm dans la zone Nord tellienne à 400 mm dans la région de Souagui.

V-2-4-Granulométrie des sols

L'analyse des échantillons prélevés dans l'oued près de la station hydrométrique (figure V-5), a révélé que le sol a les caractéristiques suivantes :

- *Diamètre équivalent* : $d_{50} = 8\text{ mm}$

- *Densité* : $s = 2.7$

Rugosité des grains et du cours d'eau :

- $n' = 0.02$

- $n = 0.05$

la pente moyenne du lit près de la station de Lakhdaria est $I = 9.1 \cdot 10^{-3}$.

V-2-5-Mesures de l'envasement

Selon INRH l'envasement moyen a été estimé à $4.1\text{ Mm}^3/\text{an}$.

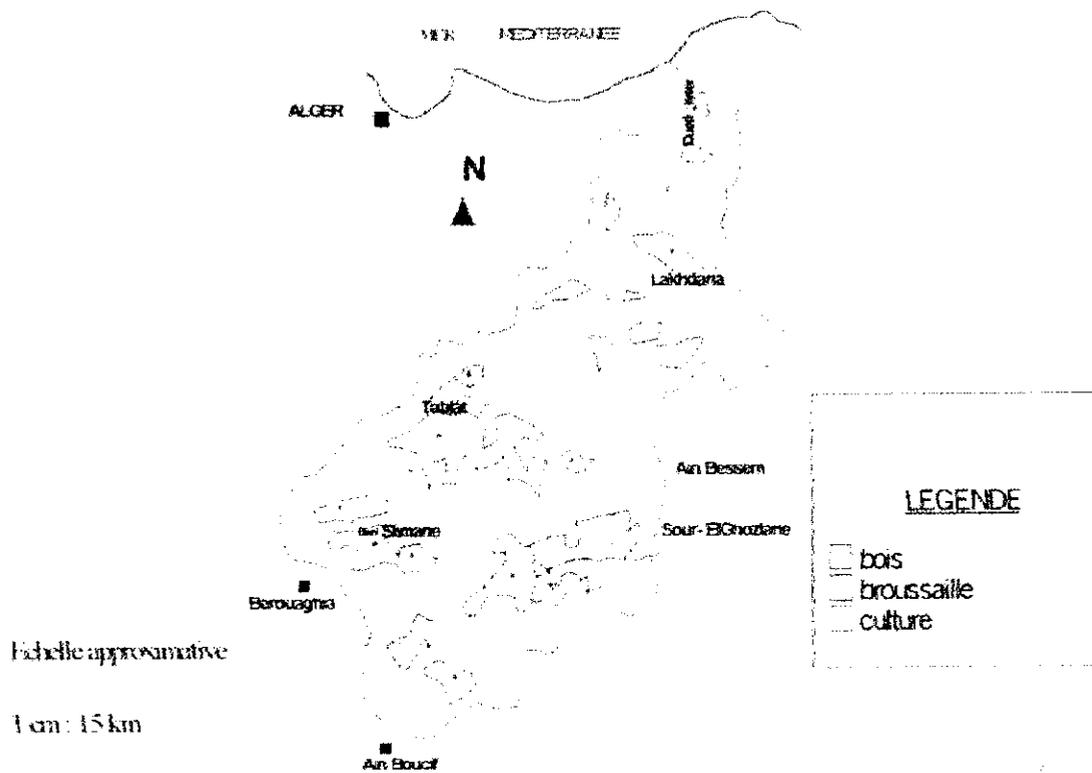


Figure V-4 Carte schématique de végétation du bassin versant Isser [Larfi, 2001].

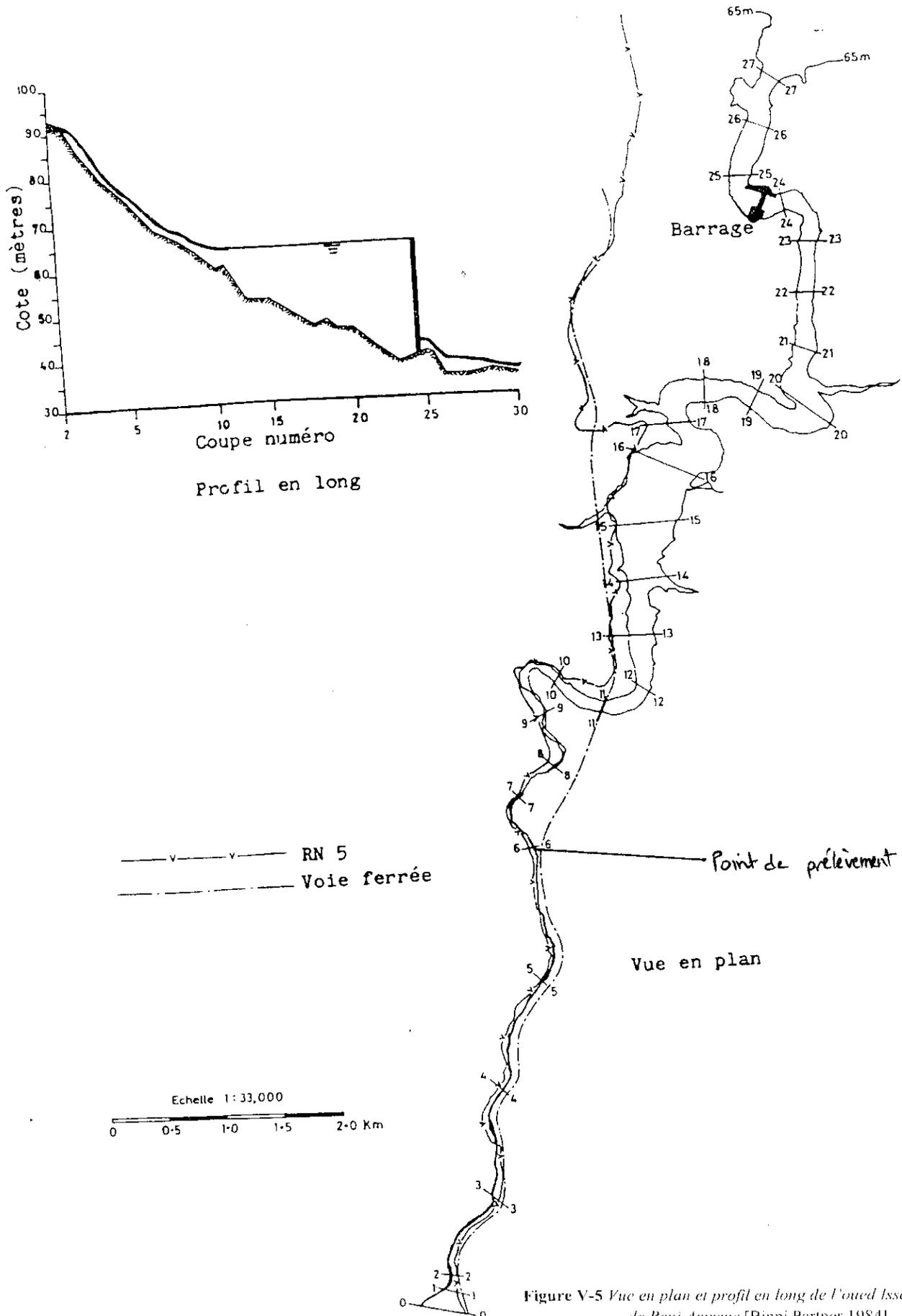


Figure V-5 Vue en plan et profil en long de l'Oued Isser à proximité de Beni Amrane [Binni Partner, 1984]

Chapitre VI. Application du programme et Discussion des résultats

VI-1 Données du programme

◆ La Tafna

- Diamètre équivalent : $d_{50} = 12 \text{ mm}$
- Densité : $s = 2.7$
- Rugosité des grains $n' = 0.0227$
- Rugosité du cours d'eau $n = 0.05$
- la pente moyenne du lit $I = 2.28 \cdot 10^{-3}$

◆ L'Isser

- Diamètre équivalent : $d_{50} = 8 \text{ mm}$
- Densité : $s = 2.7$
- Rugosité des grains $n' = 0.0212$
- Rugosité du cours d'eau $n = 0.05$
- la pente moyenne du lit $I = 9.1 \cdot 10^{-3}$

Données hydrologiques : l'analyse de la série débit-hauteur a permis de sélectionner des crues bien observées sur la base des critères suivants :

- Nombre de points suffisants en crue et décrue
- D'après leurs importances.
- Données plus récentes.

VI-2 Résultats et discussion

Après la sélection des crues de la série débits hauteurs, on injecte ces données au programme. Nous avons exécuté le programme pour les trois formules de charriage et les trois formules de transport solide totale. Les résultats ainsi obtenus sont présentés sous forme de graphes (présentés ci-après).

Le programme calcule la force de frottement étoilée, qui lui permet de déterminer le mode de transport. Une fois le mode de transport trouvé, le programme choisi entre une formule de charriage et une formule de transport solide totale. Finalement le programme calcul le débit solide par m³/s. Voici un exemple de calcul :

Les figures VI-1, VI-2, VI-3 présentent, pour les différentes crues :

- variabilité du débit solide au cours d'une crue (figures VI-1-a, VI-1-b, VI-1-c),
- variation du τ^* au cours d'une crue (figures VI-3-a, VI-3-b, VI-3-c),
- évolution du débit solide pour chaque valeur du débit (figures VI-3-a, VI-3-b, VI-3-c).

A partir de ces graphes, on peut remarquer que :

- Le début d'entraînement ou le débit critique de la formule d'*Einstein-Brown* est toujours inférieur à celui de la formule de *Schoklitsch* et de la formule de *MPM*.
- Le débit solide évalué par la formule d'*Einstein-Brown* est plus important à celui de la formule de *Schoklitsch* et de la formule de *MPM*.
- Les formules *MPM* et *Schoklitsch* donnent des valeurs rapprochés.
- Pour ces différentes crues la force de frottement étoilée τ^* ne dépasse pas 0.29.
- Les figures VI-3 montrent que lorsque le débit atteint une certaine valeur (99.1 m³/s), le transport solide est calculé par une formule de transport solide total. Cette valeur correspond à τ^* supérieur à 0.25.

Crue du 120287 - Tafna

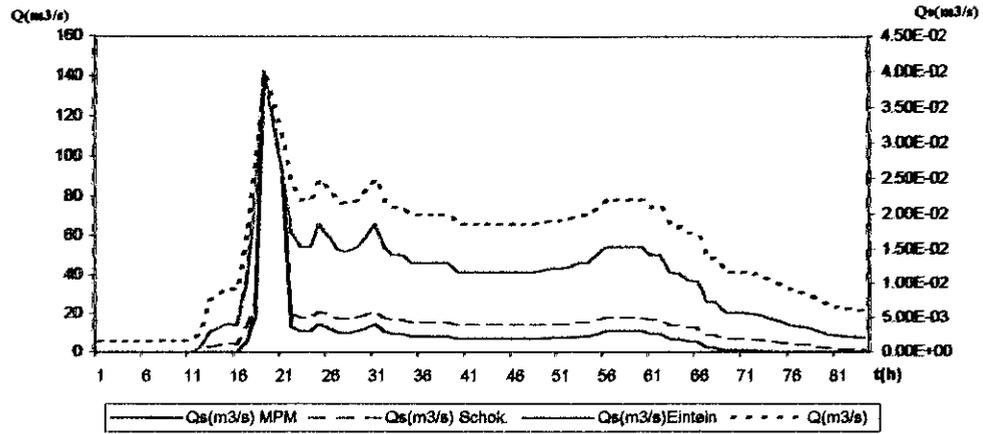


Figure VI-1-a Variation du débit solide par charriage au cours de la crue

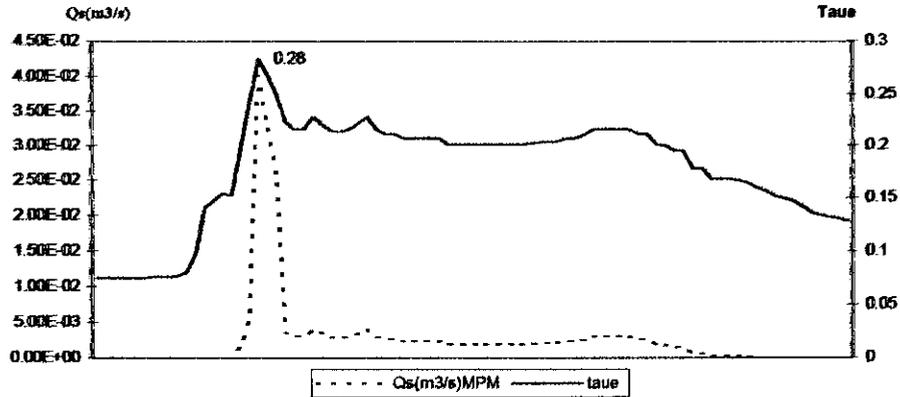


Figure VI-2-a Variation de la force de frottement τ^* et du débit solide Q_s au cours de la crue

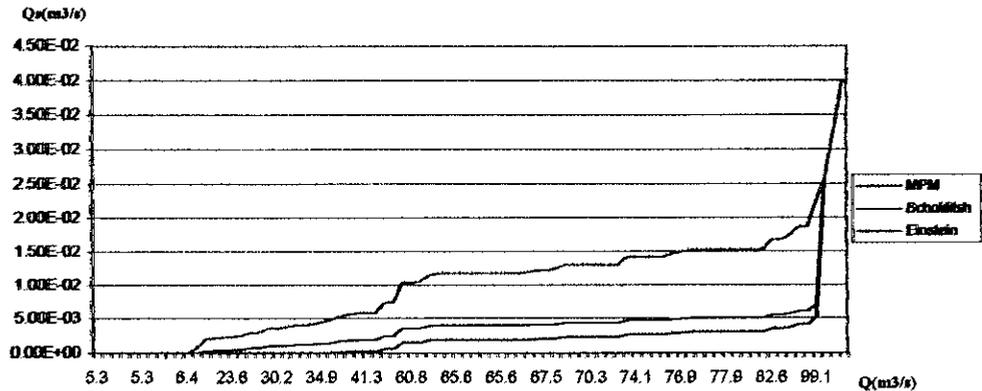


Figure VI-3-a Evolution du débit solide pour chaque valeur du débit

Crue du 230391 - Tafna

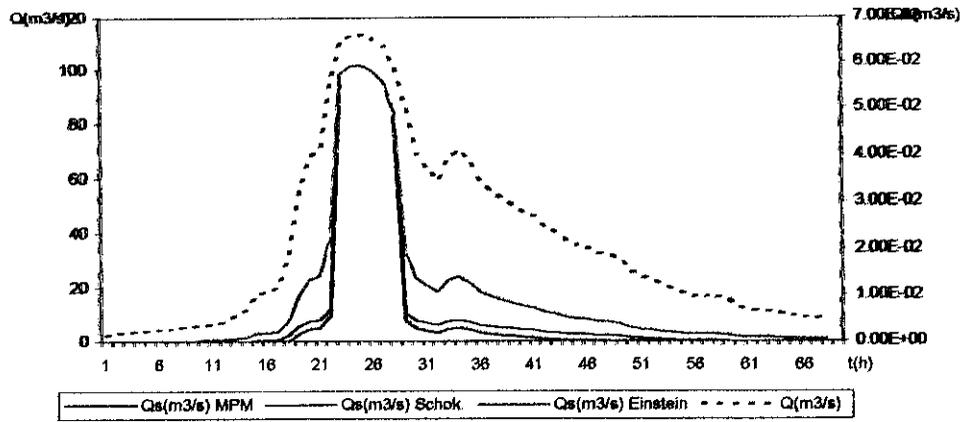


Figure VI-1-b Variation du débit solide par charriage et du débit liquide au cours de la crue

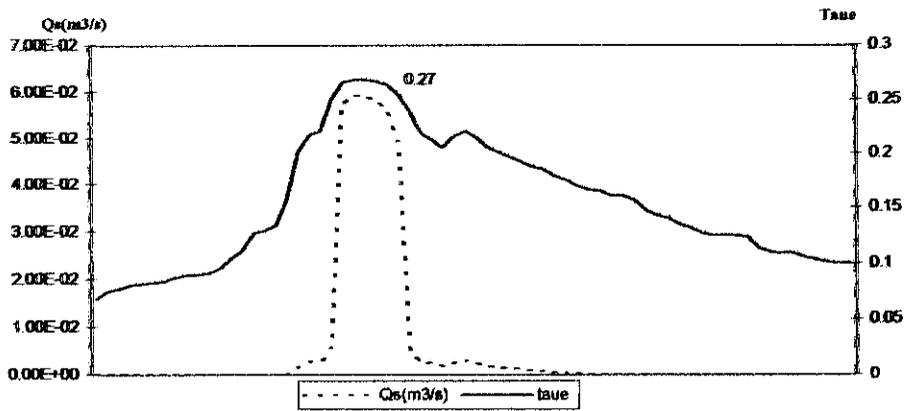


Figure VI-2-b Variation de la force de frottement τ^* et du débit solide Q_s au cours de la crue

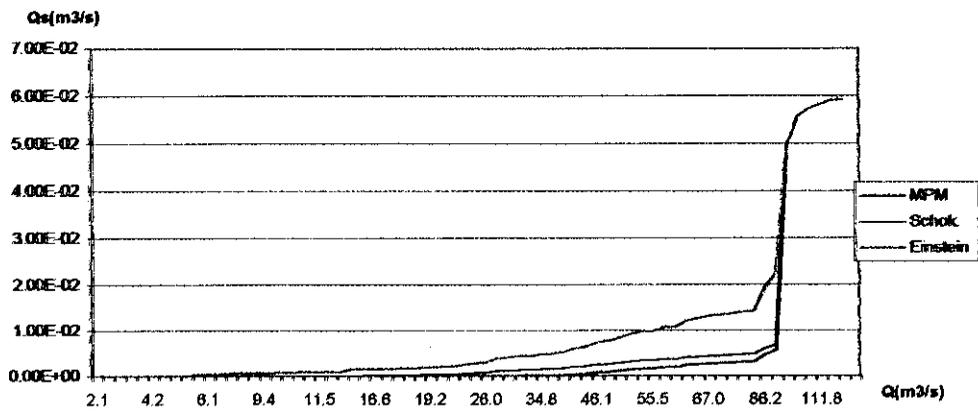


Figure VI-3-b Evolution du débit solide pour chaque valeur du débit

Crue du 250897 - Tafna

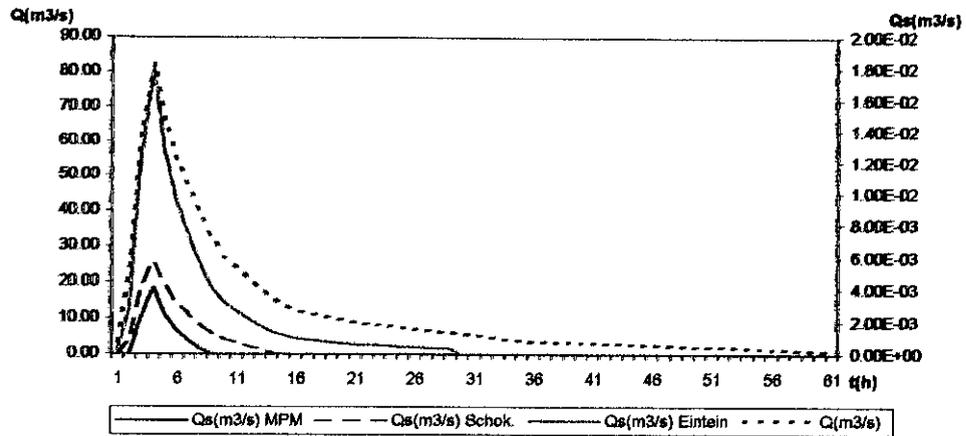


Figure VI-1-c Variation du débit solide par charriage et du débit liquide au cours de la crue

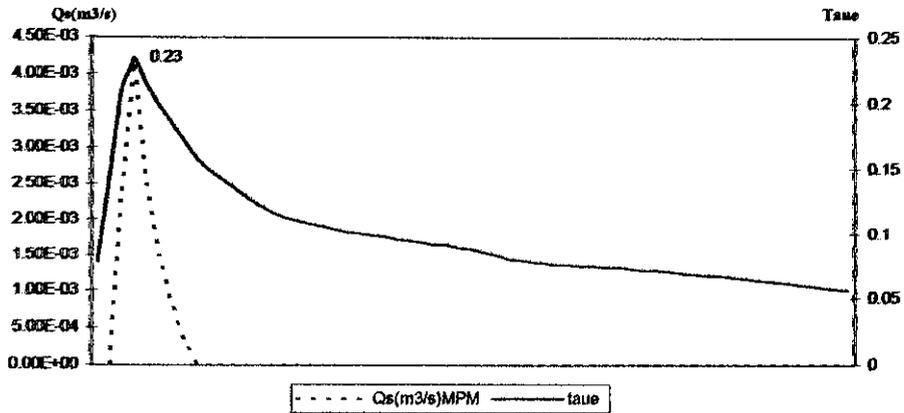


Figure VI-2-c Variation de la force de frottement τ^* et du débit solide Q_s au cours de la crue

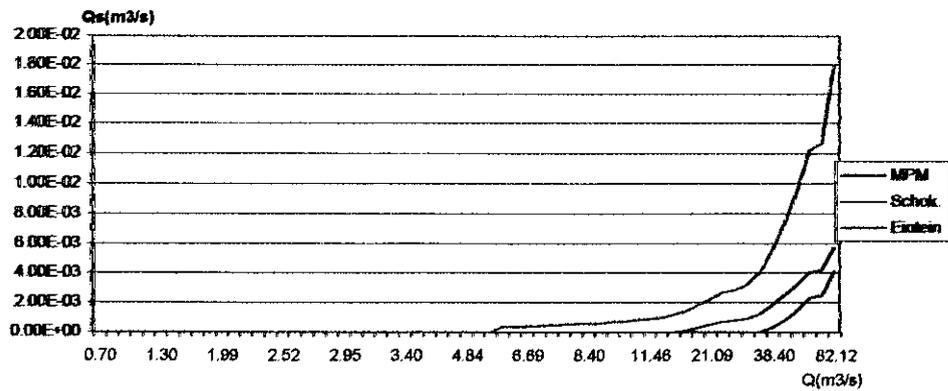


Figure VI-3-c Evolution du débit solide pour chaque valeur du débit

Nous avons tracé les courbes d'ajustement en puissance ($Q_s = a Q^b$) et linéaire ($Q_s = a Q + b$) de chaque formule après avoir enlevé les points correspondants aux formules de transport solide total, les courbes sont présentées dans les figures VI-4-a-1, VI-4-b-1, VI-4-c-1, VI-4-a-2, VI-4-b-2, VI-4-c-2.

La formule d'Einstein est mieux ajustée par une courbe en puissance, tandis que les autres formules sont plutôt ajustées par une courbe linéaire.

Pour les courbes d'ajustement en puissance, les coefficients a et b des différentes formules sont présentés dans le tableau VI-1. Nous remarquons que le coefficient b ne varie pas d'une façon considérable, il est pratiquement constant pour les différentes crues et pour chaque formule. Tandis que le paramètre a varie pour les formules *Schoklitsch* et *MPM*. On peut en conclure, pour ces deux formules, que le coefficient a est sensible aux caractéristiques de la crue.

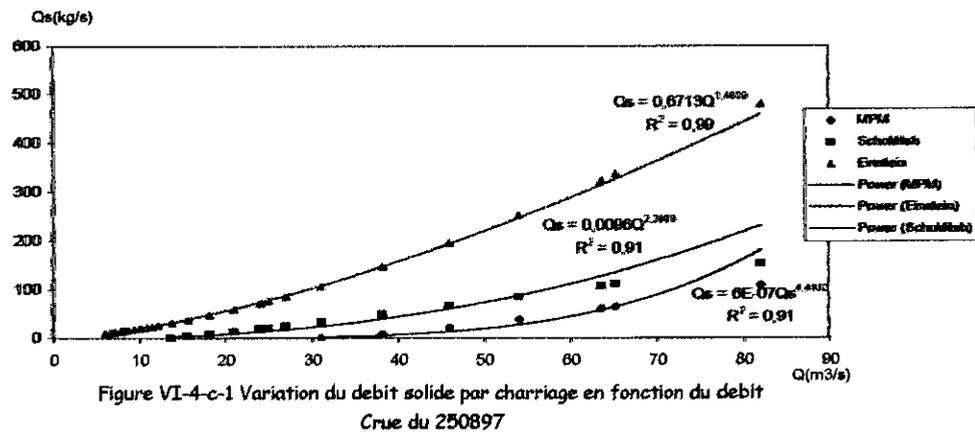
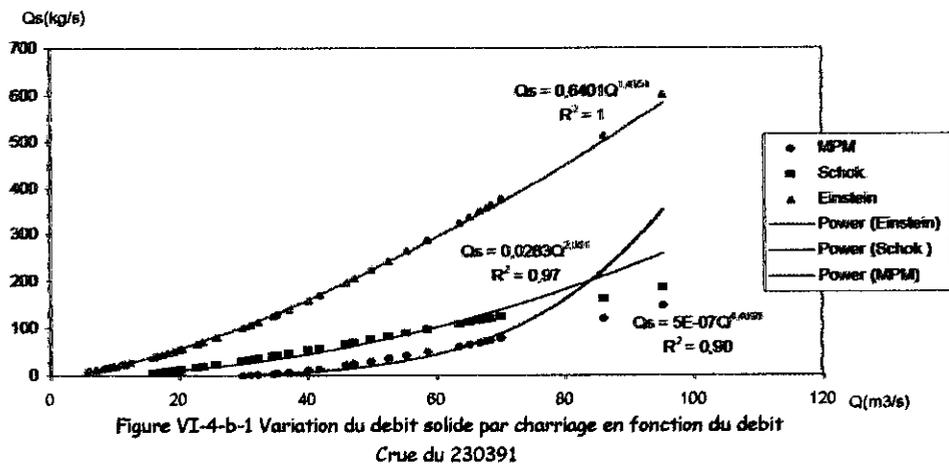
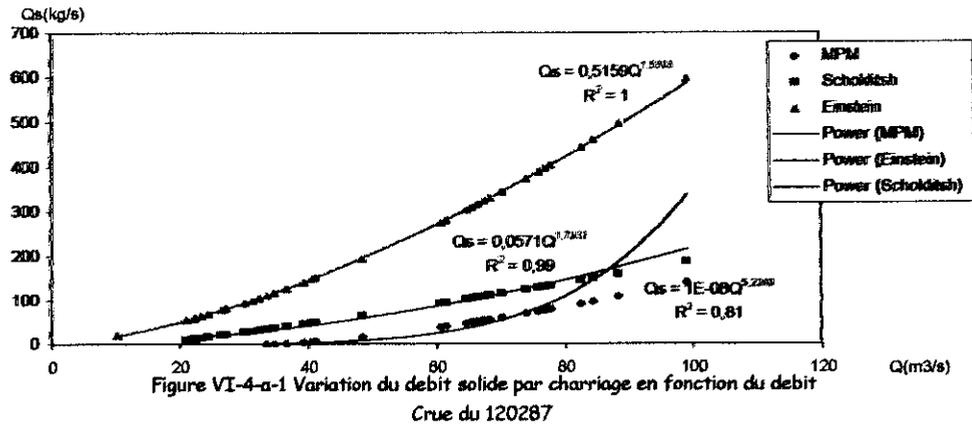
Tableau VI-1 Valeurs des coefficients a et b des courbes de tendance en puissance.

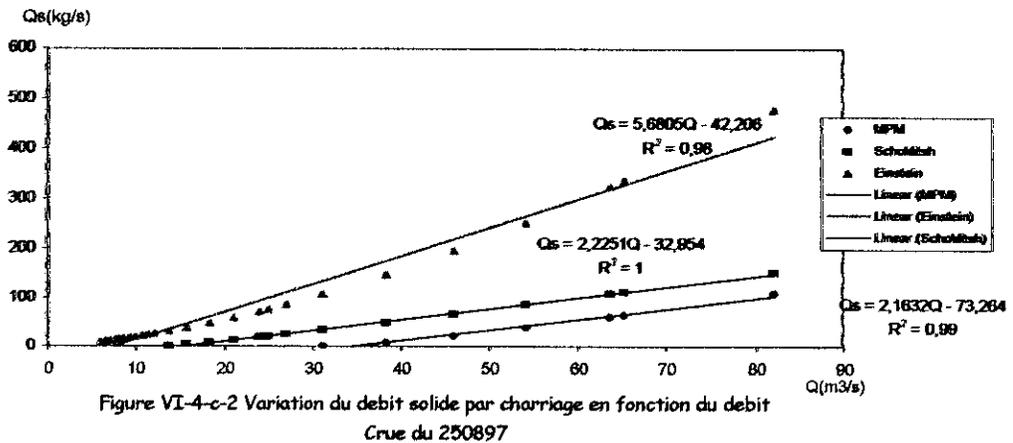
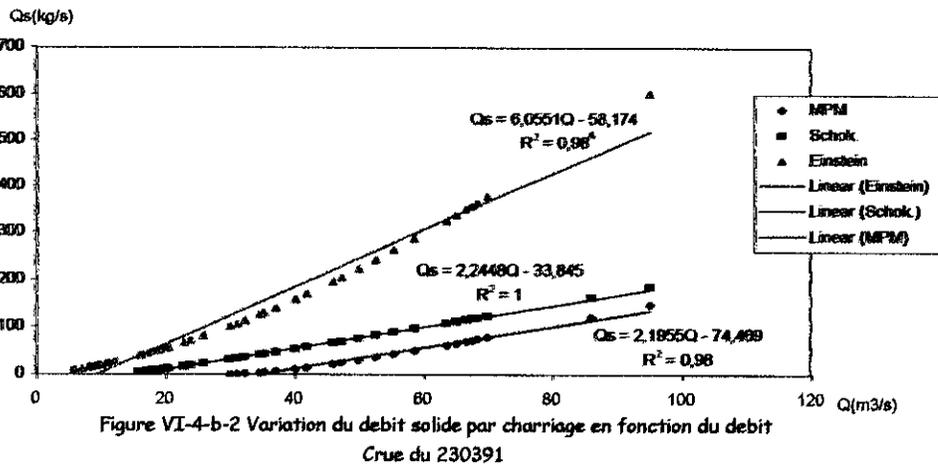
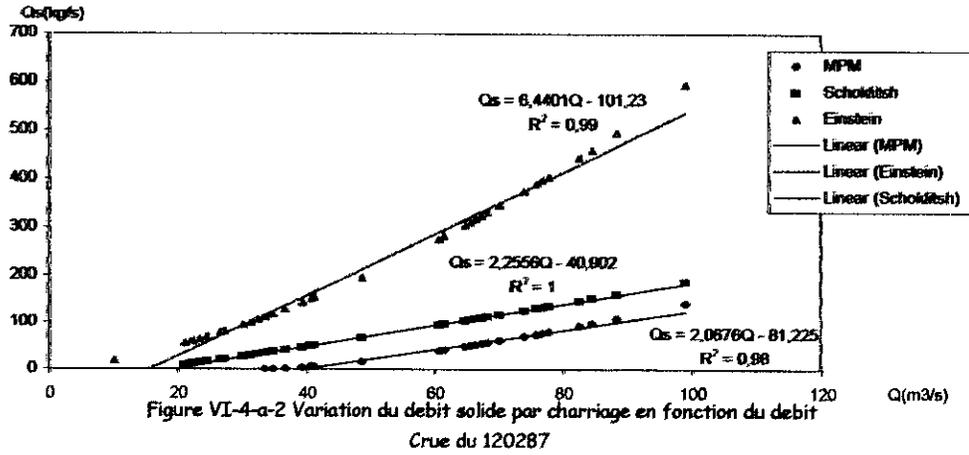
	a			b		
	Crue 1	Crue 2	Crue 3	Crue 1	Crue 2	Crue 3
Einstein-Brown	0.52	0.64	0.67	1.53	1.49	1.48
Schoklitsch	0.057	0.028	0.009	1.79	2.00	2.28
MPM	10^{-8}	5.10^{-7}	6.10^{-7}	5.22	4.46	4.4

Le tableau VI-2 présentent les coefficients des courbes de tendance linéaire pour les formules *MPM* et *Schoklitsch*. On remarque que le coefficient a ne varie pas d'une façon considérable pour les crues et pour les formules. Le coefficient b a presque la même valeur pour une même formule, celui de la formule de Schoklitsch est inférieur à celui de la formule de *MPM*, cela est dû probablement au fait que le débit critique de la formule de *Schoklitsch* est inférieur à celui de la formule de *MPM*.

Tableau VI-2 Valeurs des coefficients a et b des courbes de tendance linéaire.

	a			b		
	Crue 1	Crue 2	Crue 3	Crue 1	Crue 2	Crue 3
Schoklitsch	2.26	2.24	2.23	40.9	33.85	32.95
MPM	2.07	2.2	2.16	81.23	74.47	73.26





Nous avons testé la sensibilité du charriage au coefficient ξ_M de la formule de *MPM*, présentée dans la figure VI-5. Si le coefficient de rugosité augmente le charriage augmente jusqu'à atteindre les valeurs maximales qui correspondent au $\xi_M = 1$ (lit plat, ou rugosité négligée). La formule de *MPM* est sensible à la rugosité du lit..

Nous avons, ensuite, exécuté le programme pour deux années hydrologiques (1974 et 1992),. Nous avons présenté les courbes d'ajustement pour chaque formule, figures VI-6-a-1, VI-6-b-1, VI-6-a-2, VI-6-b-2. Les courbes de tendance en puissance donnent des coefficients (tableau VI-3) totalement différents à ceux correspondant aux crues. Les courbes de tendance linéaires donnent des coefficients **a** (tableau VI-3) presque de même ordre de grandeur à ceux correspondant aux crues, ils varient de 2.14 à 2.49. notons que la courbe d'ajustement linéaire est mieux adaptée que celle en puissance car son coefficient de détermination R^2 est plus grands et atteint 0.99.

Les figures VI-6-c, VI-6-d présentent la variation du débit solide et de la force de frottement étoilée au cours de l'année, le τ^* dépasse 0.25. l'année 74 a engendré un débit solide maximum de 25572 kg/s, tandis que l'année 92 a engendré un débit solide maximum de 4650 kg/s. cela est dû au fait que l'année 74 était plus humide.

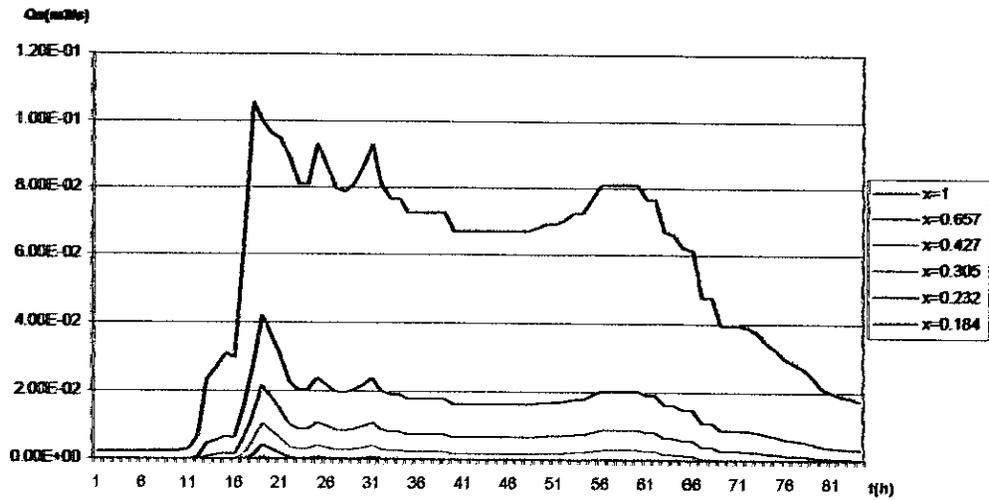


Figure VI-5 Variabilité du debit solide par charriage au cours d'une crue pour différentes valeurs de ϵM

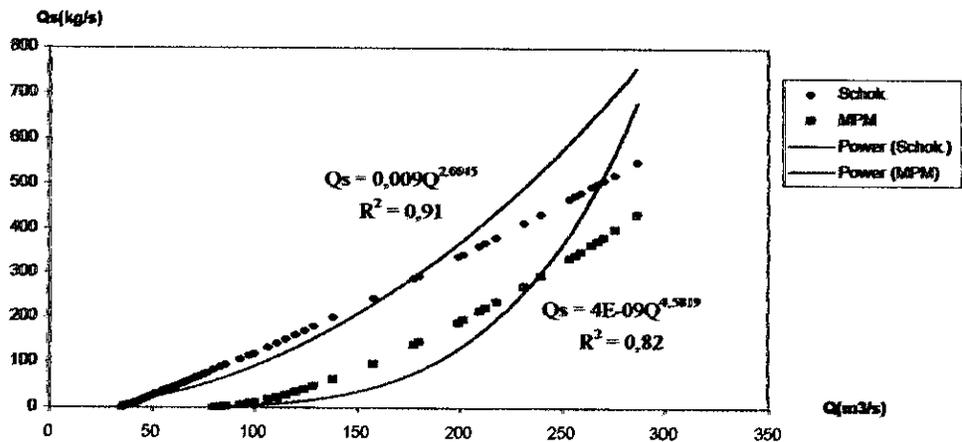


Figure VI-6-a-1 Variation du debit solide par charriage en fonction du debit annee 1974

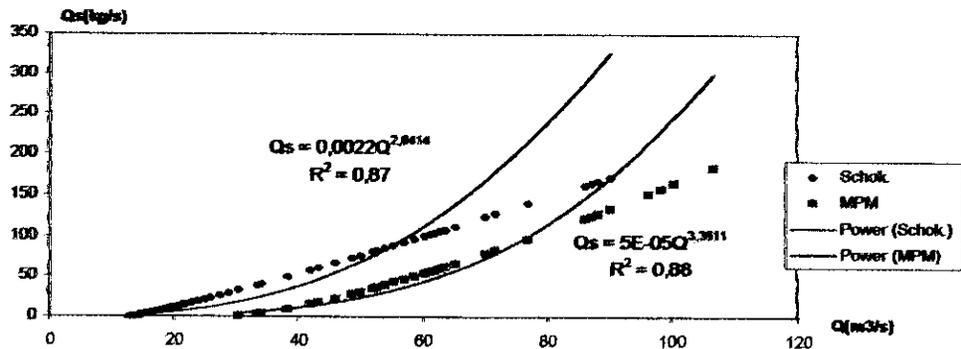


Figure VI-6-b-1 Variation du debit solide par charriage en fonction du debit annee 1992

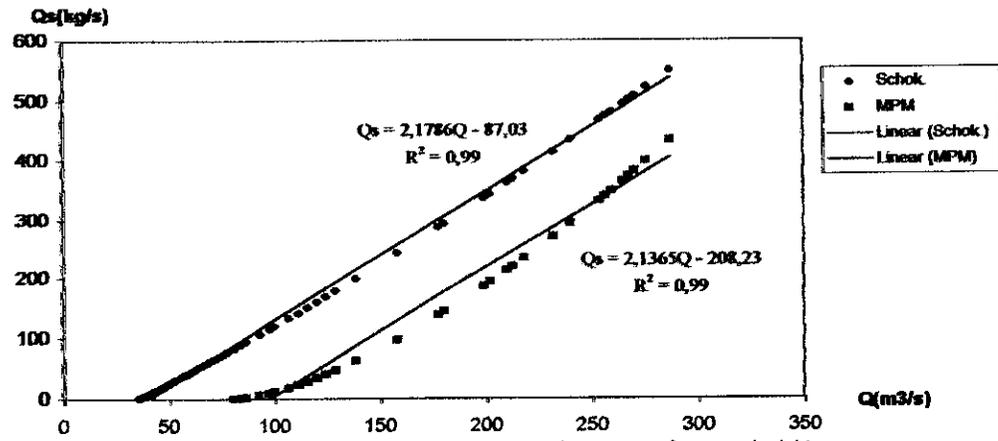


Figure VI-6-a-2 Variation du debit solide par charriage en fonction du debit annee 1974

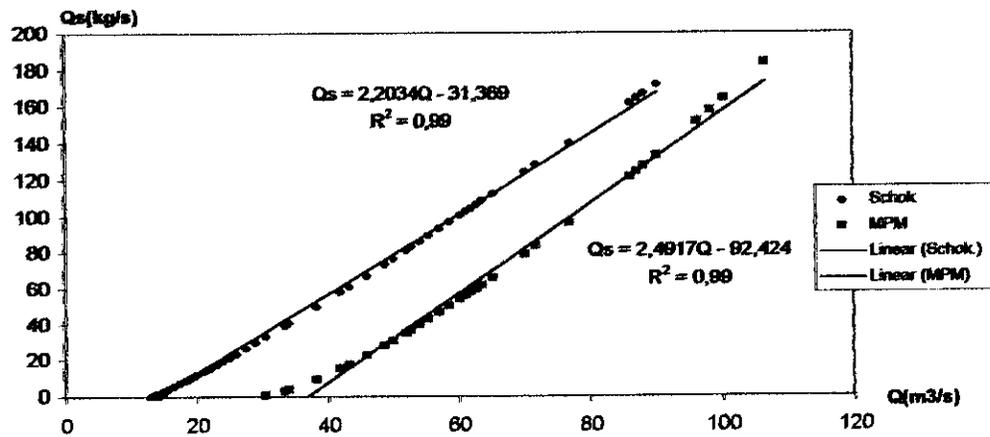


Figure VI-6-b-2 Variation du debit solide par charriage en fonction du debit annee 1992

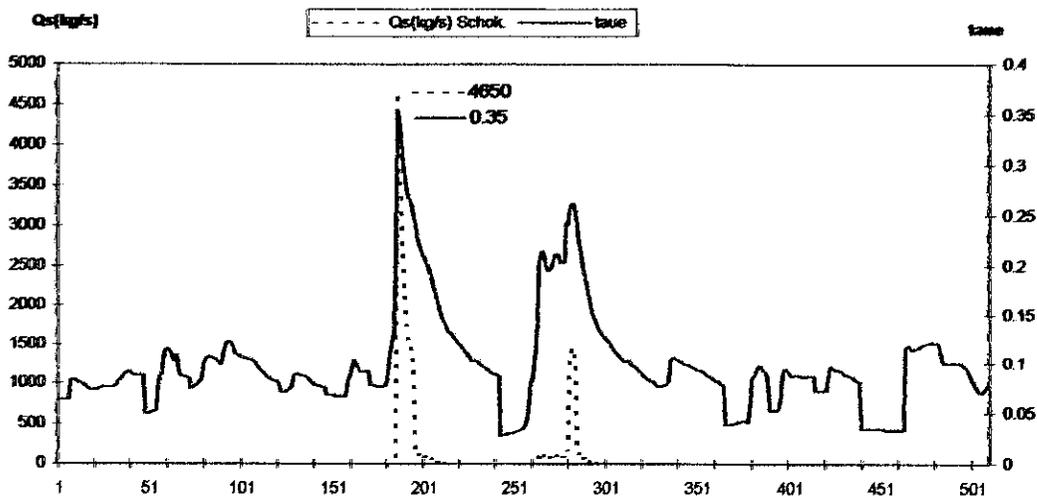


Figure VI-6-c Variation du débit solide par charriage et de la force de frottement étoilée au cours de l'année 1992

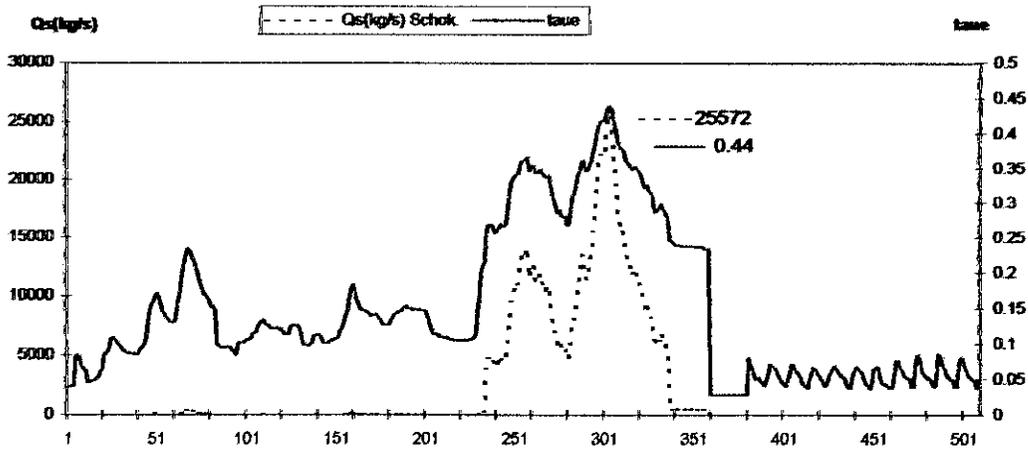


Figure VI-6-d Variation du débit solide par charriage et de la force de frottement étoilée au cours de l'année 1974

Concernant le bassin Isser, nous avons établis les figures VI-7, VI-8, VI-9, elles présentent, pour les trois formules de transport solide total et pour chaque crue :

- variabilité du débit solide au cours d'une crue (figures VI-7-a, VI-8-a, VI-9-a),
 - variation du τ^* au cours d'une crue (figures VI-7-b, VI-8-b, VI-9-b),
 - évolution du débit solide pour chaque valeur du débit (figures VI-7-c, VI-8-c, VI-9-c).
-
- Les trois formules du transport solide totale donne des valeurs différentes, celle de *Ackers-White* donne un débit solide très faible. Cette formule est donc exclu.
 - Le τ^* est toujours supérieur à 0.5 et dépasse 2.5. Le transport solide est donc calculé par une formule de transport solide total et une formule de transport en suspension. comme le programme ne calcule pas le transport solide en suspension, les courbes présentent des coupures.

Nous avons présenté la variation de τ^* au cours de dix années hydrologiques, de 1974 à 1983 pour la Tafna, de 1982 à 1991 pour l'Isser.

Dans le cas de la Tafna (figure VI-10) : le τ^* est dans la plus part des cas, inférieur à 0.25 (car il atteint 0.63 dans d'autres cas), ceci montre que le débit solide charrié est supérieure à celui en suspension, le charriage est prépondérant. Le transport solide est donc évalué par une formule de charriage et une formule de TS totale.

Pour l'oued *Isser* (figure VI-11), nous avons trouvé que $\tau^* > 0.5$. Le transport solide s'effectue soit par les deux modes de transport (charriage et suspension) soit en suspension. Le transport solide dans ce cas est évalué par une formule de *transport solide total* et une formule de *transport solide en suspension*.

Crue du 191082 - Isser

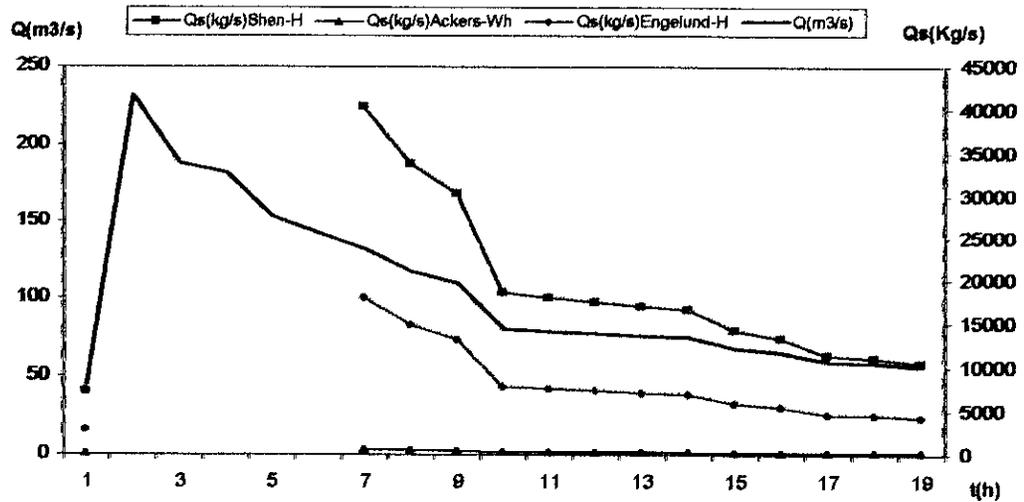


Figure VI-7-a Variabilité du débit solide par charriage au cours d'une crue

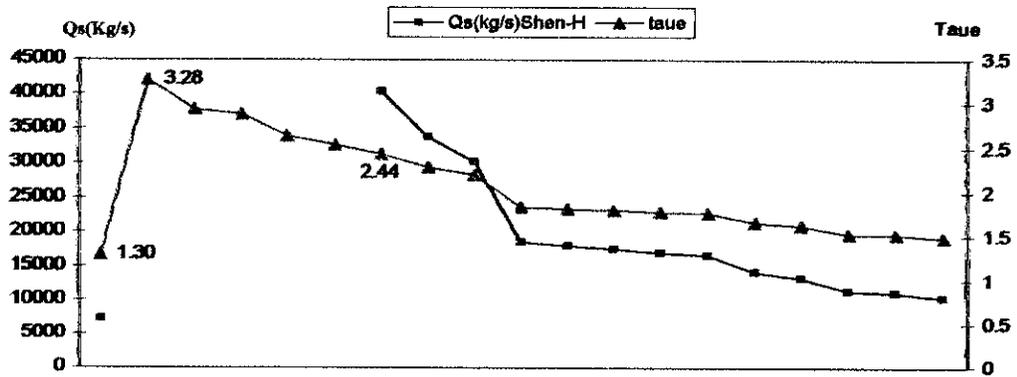


Figure VI-7-b Variation de la force de frottement τ^* et du débit solide Q_s

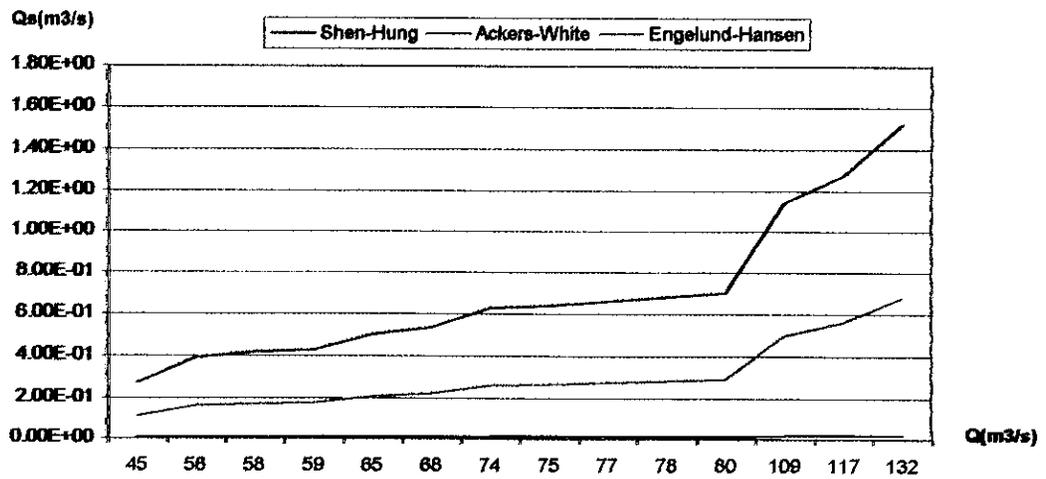


Figure VI-7-c Evolution du débit solide pour chaque valeur du débit

Crue du 020783 - Isser

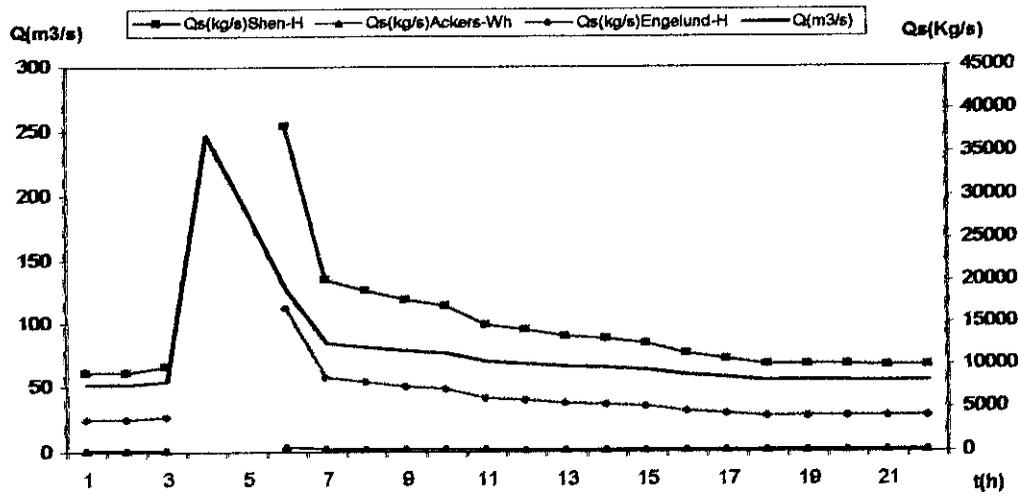


Figure VI-8-a Variabilité du débit solide par charriage au cours d'une crue

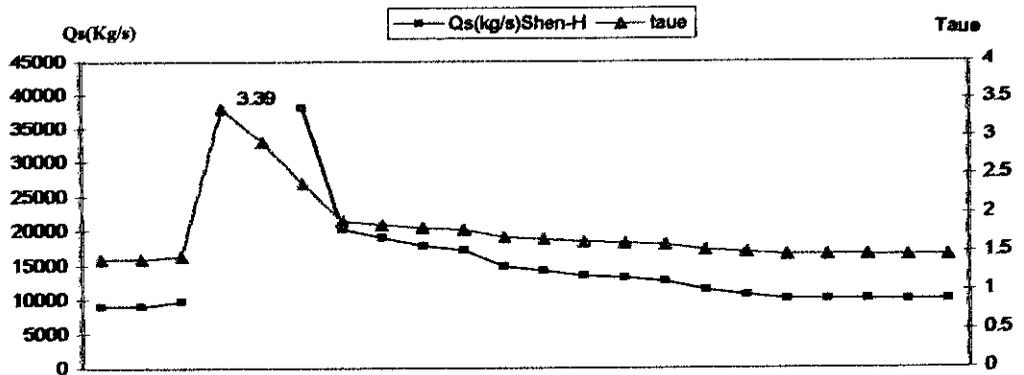


Figure VI-8-b Variation de la force de frottement τ^* et du débit solide Q_s

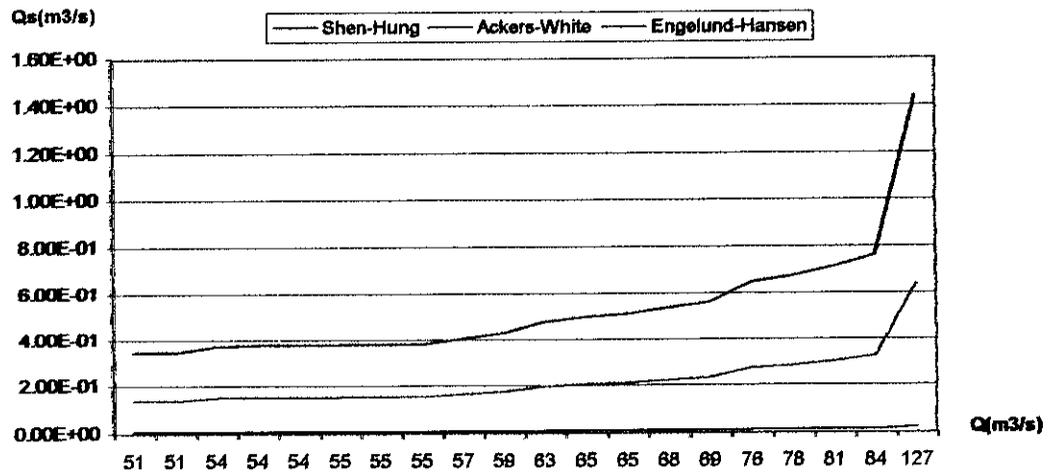


Figure VI-8-c Evolution du débit solide pour chaque valeur du débit

Crue du 250496 - Isser

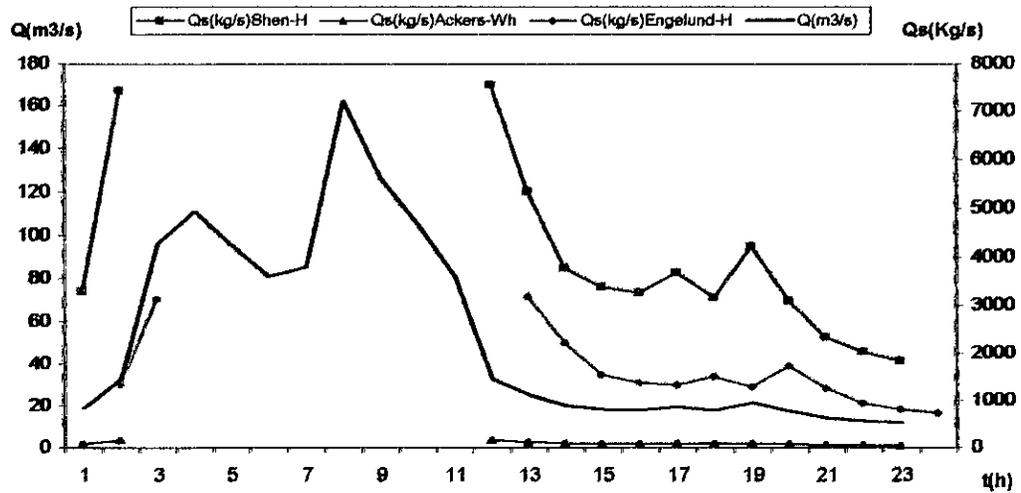


Figure VI-9-a Variabilité du débit solide par charriage au cours d'une crue

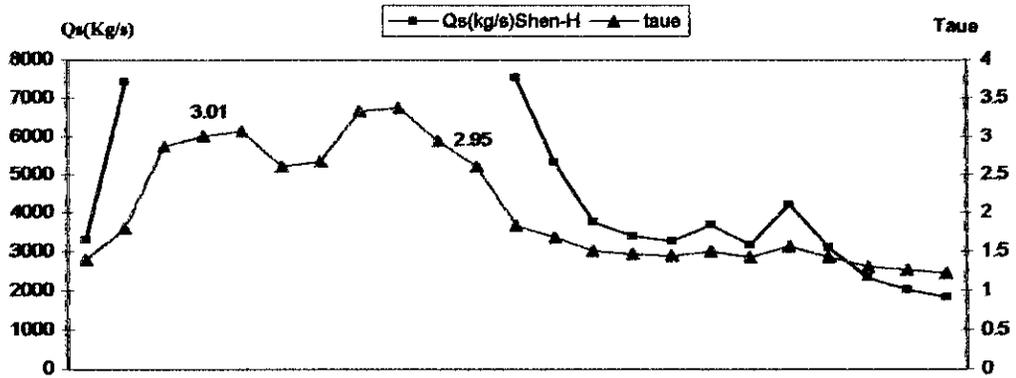


Figure VI-9-b Variation de la force de frottement τ^* et du débit solide Q_s

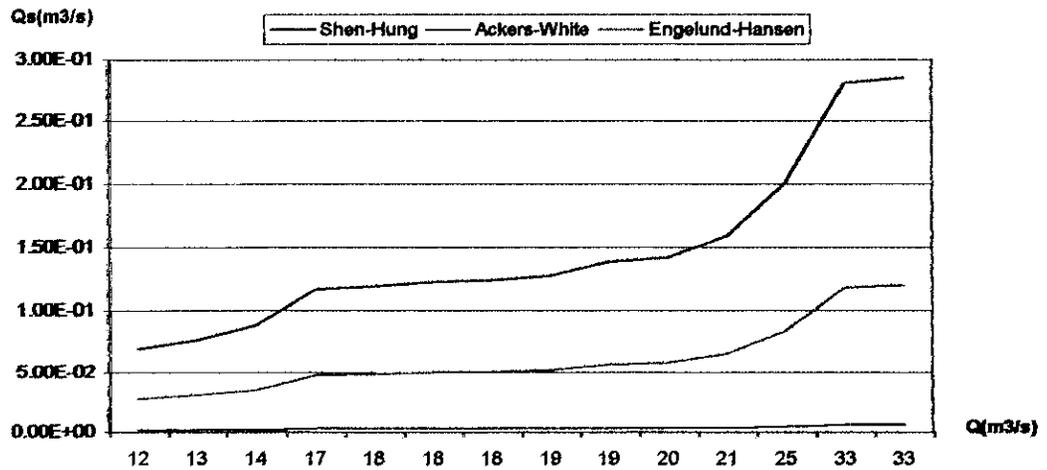


Figure VI-9-c Evolution du débit solide pour chaque valeur du débit

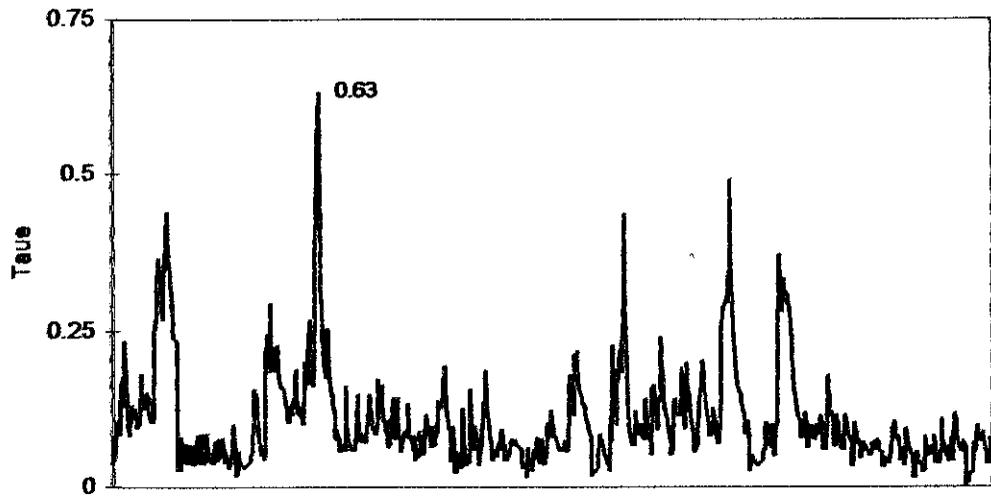


Figure VI-10 Variation de la force de frottement τ^* au cours des crues pendant une periode de 10 ans (Oued Tafna)

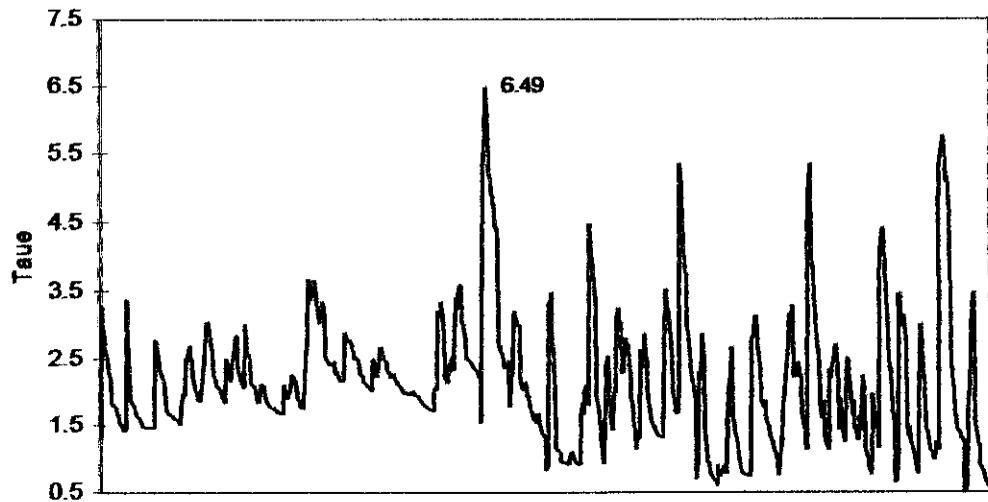


Figure VI-11 Variation de la force de frottement τ^* au cours des crues pendant une periode de 10 ans (Oued Isser)

Evaluation de l'envasement moyen annuel

Pour évaluer l'envasement moyen annuel, nous avons choisi une période de 10 ans¹, la série de la Tafna comporte 4859 enregistrements correspondant à 73 crues, la série de l'Isser comporte 749 enregistrements correspondant à 33 crues, puis nous avons calculé la somme des transports solides engendrés par l'ensemble des crues de cette période.

- Pour la Tafna, l'envasement moyen annuel est estimé par deux formules selon le type de transport, une formule de charriage si τ^* est inférieur à 0.25, une formule de transport solide total si τ^* est entre 0.25 et 2.5 (nous avons utilisé la formule de *Shen-Hung* car elle donne des débits solides plus importants par rapport à *Engelund-Hansen*):

a. *Schoklitsh* et *Shen-Hung* est : $E = 0.15 \text{ Mm}^3/\text{an}$

b. *MPM* est : $E = 0.020 \text{ Mm}^3/\text{an}$

c. *Einstein* et *Shen-Hung* est : $E = 0.166 \text{ Mm}^3/\text{an}$

Pour le *cas b.* le transport solide est toujours calculé par la formule *MPM* car le τ^* corrigé est toujours inférieur à 0.25.

- Pour l'Isser, l'envasement moyen annuel estimé par la formule de *Shen-Hung* est :

$$E = 1.5 \text{ Mm}^3/\text{an}$$

Notons que cette formule évalue le transport solide dans le cas où τ^* varie entre 0.5 et 2.9. cela implique qu'une partie de transport solide en suspension n'est pas estimé car pour l'Isser τ^* atteint 6.49.

¹ Pour la Tafna, la période de calcul est (1974 – 1983).
Pour l'Isser, la période de calcul est (1982 – 1991).

Ajustement par une courbe de tendance

Finalement nous avons tracé la courbe d'ajustement de la série de dix années correspondant à la Tafna (figure VI-12, VI-13) :

La courbe de tendance puissance de la formule de *MPM* (figure VI-12-a) est fiable pour des débits liquides inférieur à $700m^3/s$. Tandis que la courbe de tendance puissance correspondant à la formule de *Schoklitsch* (figure VI-13-a) est fiable pour des débits liquides inférieur à $180 m^3/s$

La courbe de tendance linéaire de la formule de *MPM* (figure VI-12-b) présente mieux la formule, le coefficient de détermination $R^2 = 0.97$. Alors que la courbe de tendance linéaire correspondant à la formule de *Schoklitsch* présente un faible coefficient de détermination $R^2 = 0.6$ (figure VI-13-b).

Voici, un tableau récapitulatifs des coefficients des courbes de tendance.

Tableau VI-3 Tableau récapitulatif des coefficients a et b des courbes de tendance.

		Schoklitsch		MPM	
		Puissance	linéaire	Puissance	linéaire
a	Crue 1	0.057	2.26	10^{-8}	2.06
	Crue 2	0.028	2.25	5.10^{-7}	2.2
	Crue 3	0.009	2.23	6.10^{-7}	2.16
	1974	0.009	2.18	4.10^{-9}	2.14
	1992	0.002	2.2	5.10^{-5}	2.49
	10 ans	0.0218	2.18	0.0019	3.49
	b	Crue 1	1.79	40.9	5.22
Crue 2		2.00	33.85	4.46	74.47
Crue 3		2.28	32.95	4.4	73.26
1974		2.0	87.03	4.58	208.2
1992		2.64	31.36	3.36	92.42
10 ans		1.85	69.89	2.13	363.4

En adoptons les courbes de tendance puissance on a :

- *MPM* est donnée par : $Qs = 0.0019 Q^{2.1263}$ (kg/s)
- *Schoklitsch* est donnée par : $Qs = 0.0218 Q^{1.8475}$ (kg/s)

A partir de ces formules on peut calculer le débit solide annuel moyen correspondant au débit liquide moyen annuel de 82.5 m³/s (tableau VI-4):

- *MPM* : $Q_s = 0.0269 \text{ Mm}^3/\text{an}$
- *Schoklitsch* : $Q_s = 0.0899 \text{ Mm}^3/\text{an}$

Tableau VI-4 Débit solide annuel pour les différentes formules.

Q annuel (m ³ /s)		Qs annuel (kg/s)	Qs annuel (Mtonnes/an)	Qs annuel (Mm ³ /an)
82.5				
Suspension ajusté		67.79	2.14	0.08
Schoklitsch ajusté		75.53	2.38	0.09
MPM ajusté		22.58	0.71	0.027

Le débit solide en suspension est calculé à partir de la formule de la courbe d'ajustement de la série enregistrée des débits solide en suspension (figure VI-14). En enlevant les trois points dispersés qui correspondent aux couples ($Q(m^3/s)$, $Q_s(kg/s)$) suivants : (133,364), (501,170) et (1503,601), on obtient le graphe de la figure VI-15. Les courbes de tendances ont toujours la même allure que précédemment avec une faible diminution du coefficient de détermination.

Le modèle d'ajustement de la formule de *MPM* donne un débit solide moyen annuel ($0.0269 \text{ Mm}^3/s$) de même ordre de grandeur de la valeur calculée précédemment ($0.020 \text{ Mm}^3/s$).

Le modèle d'ajustement de la formule de *Schoklitsch* donne un débit solide moyen annuel ($0.0899 \text{ Mm}^3/s$) de même ordre de grandeur du débit solide moyen annuel en suspension ($0.0807 \text{ Mm}^3/s$).

Ces valeurs sont faibles, cela prouve que le débit solide de la Tafna doit être estimé par une formule de charriage et une formule de transport solide totale.

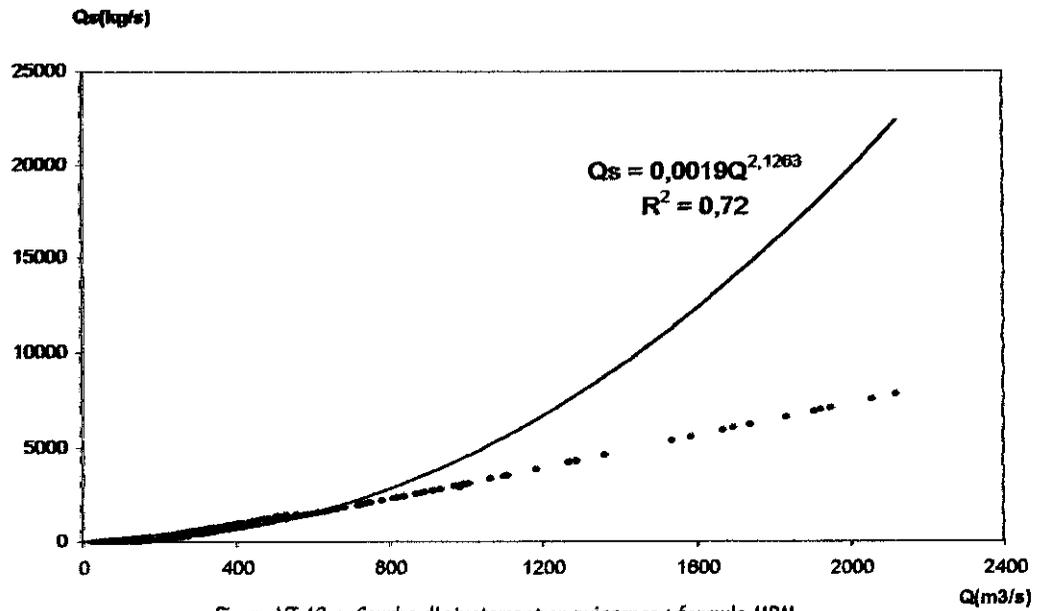


Figure VI-12-a Courbe d'ajustement en puissance : formule MPM
Tafna - 10ans (74-83) - n = 863

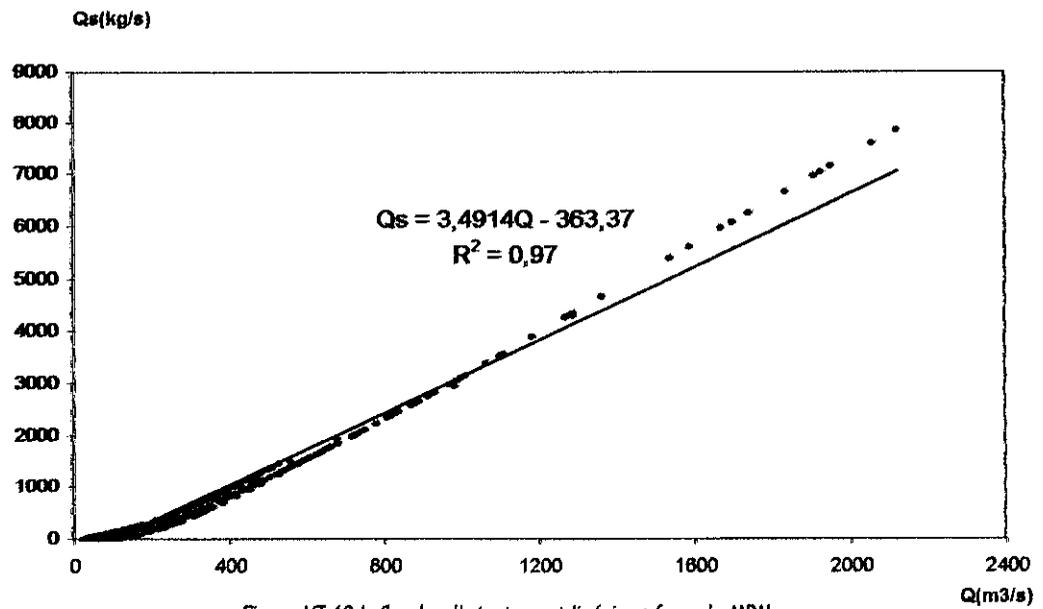


Figure VI-12-b Courbe d'ajustement linéaire : formule MPM
Tafna - 10ans (74-83) - n = 863

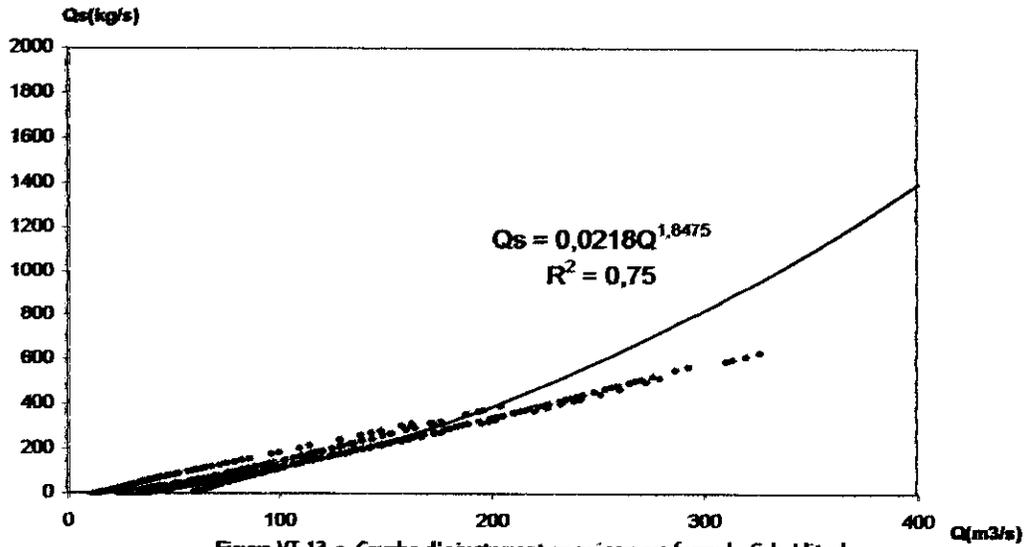


Figure VI-13-a Courbe d'ajustement en puissance: formule Schoklitsch
Tafna - 10ans (74-83)- n = 1497

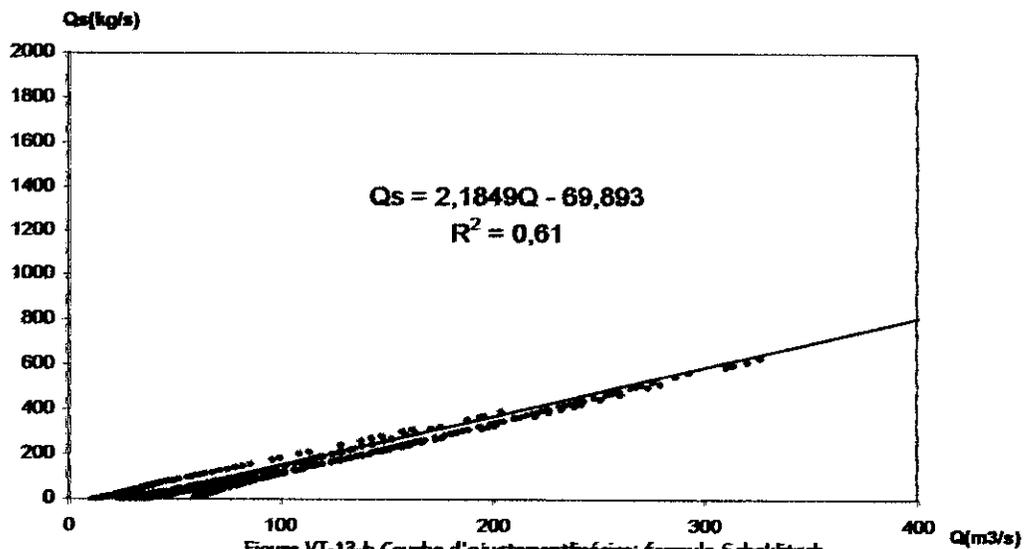
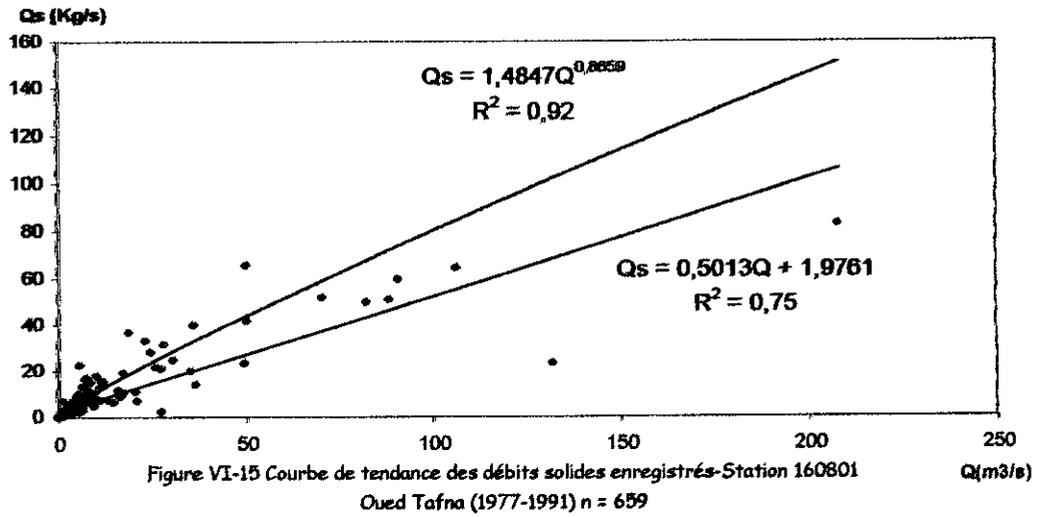
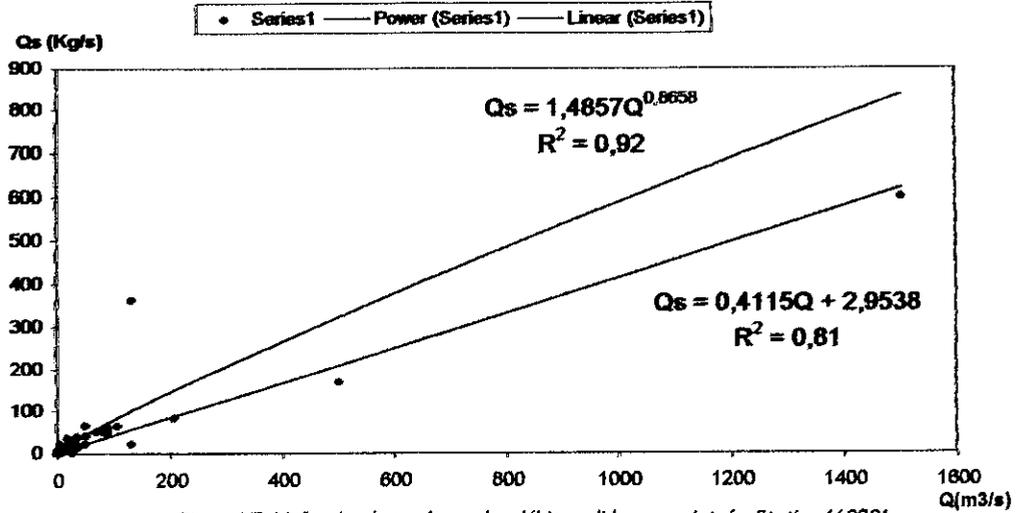


Figure VI-13-b Courbe d'ajustement linéaire: formule Schoklitsch
Tafna - 10ans (74-83)- n = 1497



Conclusion

L'érosion des terres agricoles et l'envasement des ouvrages hydrauliques (barrages, infrastructures portuaires,...) sont des problèmes importants dans le domaine hydraulique, particulièrement dans notre pays.

Ces phénomènes posent énormément de problèmes dans la conception, la maintenance et la gestion des ouvrages hydrauliques.

Par le présent travail nous avons essayé de faire une synthèse des études et recherches faite sur le phénomène de l'érosion et des transports solides, dans le monde puis en Algérie.

A ce jour, aucune formule n'est appliquée, *universellement*, avec succès. Chaque formule donne des résultats satisfaisants que dans un domaine limité de valeurs des paramètres. Cependant elles sont rares celles qui donnent plus au moins de bons résultats dans le cas des cours d'eau naturels. Cela est dû à la complexité du phénomène au fait de la multitude et de l'interdépendance des paramètres qui entrent en jeu.

En Algérie, toutes les formules utilisées sont des formules empiriques dont leur fiabilité est douteuse. De plus elles n'estiment que le transport solide en suspension, le transport solide charrié est estimé de 10 à 50%, selon les formations, du transport solide calculé.

De ce fait, nous avons élaboré un programme informatique qui permet de quantifier le transport solide dans le cas où le charriage est prépondérant et le transport solide dans le cas où il s'effectue par suspension et en charriage, nous avons choisi la formule de *Meyer-Peter et Muller*, la formule de *Schoklitsch* et la formule de *Einstein-Brown* pour l'évaluation du transport solide charrié et *Shen-Hung*, *Ackers-White* et *Engelund-Hansen* pour le transport solide total. Le programme permet de déterminer le mode de transport solide (par charriage, en suspension ou total) pour chaque oued, et ce, on se basant sur la classification de *Ramette*.

Les points essentiels tirés de notre étude sont :

✦ Le transport solide est un phénomène très complexe. Suivant les matériaux rencontrés et suivant les courants d'entraînement, nous n'observerons pas le même transport sédimentaire. En effet, il existe deux formes de transport sédimentaire : transport solide actif, transport solide en suspension. Mais il n'existe pas de délimitation nette entre ces deux formes de transport, alors que chaque forme de transport est basée sur une théorie différente.

✦ A leur tour, les formules de prévision de transport solide peuvent être classées comme formules de transport solide par charriage, en suspension, ou total (en suspension et par charriage), et ce selon le régime d'écoulement. Pour un régime d'écoulement donné :

- si $\tau^* < 0.25$: l'estimation du transport solide fait appel à une formule de charriage,
- si $0.25 < \tau^* < 2.5$: l'estimation du transport solide fait appel à une formule de transport total.
- si $2.5 < \tau^* < 10$: l'estimation du transport solide fait appel à une formule de transport en suspension.

✦ Il existe une multitude de formules de transport solide, le choix adéquat d'une formule est très délicat. Ces formules ne donnent de résultats satisfaisant que dans un domaine limité. Leur application doit se faire avec beaucoup de prudence.

✦ Aucune formule mathématique n'a été appliquée dans notre pays, les formules utilisées à ce jour sont des formules empiriques dont leur résultat est peu appréciable et leur fiabilité est douteuse. De plus elles ne donnent que le transport solide en suspension.

Dans notre étude nous avons essayé de contribuer à l'estimation du transport sédimentaire avec une méthode mathématique semi universelle. Nous ne pouvant pas la qualifier comme parfaite car elle présente une simple étape d'une étude plus poussée qui demande toute une politique de recherche et à tous les niveaux.

Notre contribution à la quantification des transports solides n'est qu'un premier pas qu'on doit lui ajouter plus d'études et travaux de recherche pour qu'on puisse évaluer avec plus de précision les quantités de sédiments transportées, et de modéliser le transport solide d'un bassin avec précision en le confrontant aux mesures effectuées sur terrain pour l'amélioration du modèle.

Bibliographie

Allard J. Chee P. (1989) Modélisation du charriage en écoulement fluvial, La houille Blanche N°3/4, p277-p280.

Belleudy Ph. (1996) Transport solide, cours par Internet.

Belleudy Ph. Schuttrumpf H. (1994) Modélisation de l'évolution morphologique du Danube et de l'Isar, La Houille Blanche N°4, p72-p77.

Ben Slama E. et al. (1994) TSAR : un modèle mono-dimensionnel de simulation des évolutions des fonds alluvionnaires des rivières, La Houille Blanche N°4, p87-p95.

Benchabekh A. (1995) Etude générale sur les transports solides, Rapport N°1 : Définition de la méthodologie d'approche et application au bassin versant de la Tafna, ANRH, Alger.

Benhadj A. (1994) Contribution à la modélisation statistique du transport solide en suspension, Projet de fin d'études, ENP.

Biju-Duval B. Mécanismes et milieux sédimentaires.

Binni Partner (1984) Schéma d'aménagement des ressources en eau dans la région d'Alger-Sebao. Rapport N E3, Barrage de Beni Amrane, Etudes des crues et de sédimentation des réservoirs, 83p.

Boukarta (1995) Mise au point d'une méthode de quantification automatique des apports solides à partir des débits liquides, Projet de fin d'études, ENP.

Cardoso A.H. Neves G.H. (1994) Prévision du transport solide total: Evaluation des formules existantes, La Houille Blanche N°4, p13-p22.

Chow (1964) Handbook of applied hydrology.

Demmak A. (1982) Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale, thèse de Doctorat, Paris6.

- Gomez b. Church M. (1989) An Assesment of bed load sediment transport formulae for gravel rivers, WRR, vol25, N°6, p1161-1181, June 1989.
- Graf W. H.(1996) Hydraulique fluviale T2 : Ecoulement non permanent et phénomène de transport, Presses polytechniques et universitaires romandes, 375p.
- Harbi (1990) Etude du transport solide et application des techniques nucléaire, Projet de fin d'études, ENP.
- Kassoul M. (1999) Prédétermination de la durée de vie de barrages en Algérie, La houille Blanche N°3/4, p89-p94.
- Larfi (2001) Etude de transport solide dans le bassin versant de oued Isser, Mémoire de Magister, Départ. Génie rural, Université de Blida.
- Larras J. (1972) Hydraulique et granulats, Eyrolles, 260p.
- Larras J. (1977) Fleuves et rivières non aménagés, Eyrolles, 187p.
- Lebreton J.C. (1974) Dynamique fluviale, Eyrolles, 235p.
- Leliavsky S. (1961) Précis d'hydraulique fluviale, Dunod, 256p.
- Levoy F. et al (1994) Transport sédimentaire sous l'interaction houle-courant : Validation des formules de transport, La Houille Blanche N°4, p29-p34.
- Nguyen T. D. et al. (1994) Modélisation numérique du transport solide en écoulement non permanent, La Houille Blanche N°4, p78-p86.
- PNUD (1987) Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du Nord, Guide Maghrébin pour l'exécution des études et des travaux de retenues collinaires, Partie 1 : Etude de l'érosion et du transport solide dans les zones semi-arides.
- PNUD (1987) Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du Nord, Rapport technique, Partie 1 : Etude de l'érosion et du transport solide dans les zones semi-arides, 33p.
- Rouas G. Monadier P. (1989) La modélisation du transport solide en rivière, La houille Blanche N°3/4, p259-p262.