

**Faculté Des Sciences de l'ingénieur**  
Département de Génie Rural

# **MEMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : Sciences des eaux

**QUANTIFICATION DU TRANSPORT SOLIDE  
DANS LE BASSIN VERSANT  
DE L'OUED EBDA**

Par

**DOUMA Fadhila**

Devant le jury composé de :

|               |                                    |           |
|---------------|------------------------------------|-----------|
| L. Zella      | Maître de conférence (U.S.T.Blida) | Président |
| M. Bessenasse | Chargé de cours (U.S.T.Blida)      | Examineur |
| M. Meddi      | Maître de conférence (C.U.Khemis)  | Examineur |
| H. Saad       | Professeur (C.U.Chelif)            | Examineur |
| B. Remini     | Professeur (U.S.T.Blida)           | Promoteur |

Blida, avril 2005



## RESUME

Cette étude est orientée vers l'application de deux modèles de quantification du transport solide en suspension, le premier consiste en la conception d'un modèle à partir des débits liquides, et le deuxième évalue exclusivement les apports solides au moyen de la concentration en matière en suspension, le rapport entre les résultats des deux méthodes est de 52%.

Généralement le charriage est évalué à l'estime (en pourcentage de la suspension), mais dans notre travail nous l'avons évalué en appliquant l'équation de Scheilds, et nous l'avons estimée à 15 % de la suspension.

Le calcul du transport solide nous permet d'évaluer le taux d'abrasion dans le bassin versant de l'oued Ebda, soit d'une valeur moyenne annuelle de 3200 t/km<sup>2</sup>, pour 12 ans, de 1983/1984 jusqu'à 1994/1995, période pendant laquelle les débits sont mesurés sur l'oued.

Les résultats des modèles régressifs établis dans cette étude, paraissent encourageants et doivent être précisés au fur et à mesure que de nouvelles données seront disponibles, dans le but de prévoir l'envasement et d'augmenter la durée de vie du future barrage de Sidi Ben Taiba.

**Mots clés :** bassin versant - Oued Ebda - transport solide – débit liquide - débit solide – charriage – érosion .

## ملخص

هذه الدراسة موجهة لتطبيق طريقتين لتقدير للمواد الصلبة العالقة، تعتمد الطريقة الأولى على إيجاد نموذج بدلالة المواد السائلة، أما الطريقة الثانية فتقدر المواد الصلبة فقط عن طريق التركيز بالمواد العالقة و النسبة بين نتائج الطريقتين هي 52%.

بصفة عامة، يتم تقييم المواد المجحفة نسبيا بالنسبة للمواد العالقة، لكن نحن حاولنا تقييمها بتطبيق معادلة الباحث شيلدرز و قد قدرت ب 15 ٪ بالنسبة للمواد العالقة.

حساب المواد الصلبة سمح لنا تقدير نسبة التعرية في الحوض المتدفق لواد ابدى، التي قدرت بمعدل 3200 طن في الكيلومتر مربع سنويا خلال 12 سنة، من 1984/1983 إلى غاية 1994/1995 و هي المدة التي تم خلالها قياس المواد الصلبة في الواد.

نتائج النماذج التراجمية المطبقة في هذه الدراسة تبدو مشجعة و يجب تدقيقها كلما توفرت لدينا معطيات أخرى بهدف ترقب توحد و مد مدة استعمال سد سيدي بن طيبة الذي هو في طور ألا نجاز.

**مفتاح الكلمات:** حوض متدفق – واد ابدى - المواد الصلبة - المواد العالقة - المواد المجحفة - الانجراف

## **ABSTRACT**

### **Quantification of the total sediment load in Ebda river basin.**

This study is oriented toward the application of two models of quantification of suspended sediment transport, the first tolerate a model from the flow discharge and the second, evaluate the fluxes of suspended sediment exclusively with suspended sediment concentration, the relation of the two procedures is 52 % .

Usually, the bed materiel is estimated in the percent of suspended sediment, but in our work it's obtain about 15 % off the later, by Sheilds equation.

The calculation of solid transport, allowed us to estimate the rate of erosion in Ebda river basin, it is 3200 t/km<sup>2</sup> for 12 years, going from 1983/1984 to 1994/1995, period while the sediments discharges are measured on river.

Results of regressing models show encouraging and should be precisely, when another Information's are available; so as to predict sedimentation and grow time of existence of future Sidi Ben Taiba's deam.

**Key words:** Basin - Ebda river – solid transport – sediment discharge – flow  
Discharge - erosion.

## **REMERCIEMENTS**

Je voudrais manifester ma reconnaissance tout d'abord à Monsieur Remini qui m'a encouragé et a suivi ce travail.

C'est un devoir très agréable de remercier profondément le président de jury, monsieur Zella L, et j'adresse également mes vifs remerciements à Messieurs Meddi M, Saad H et Bessenasse M, qui ont accepté d'analyser ce travail et de faire partie de ce jury.

Je voudrais remercier tout les responsables au niveau de l'institut de Génie Rural, des encouragements qu'ils m'ont prodigués tout au long de la réalisation de ce travail.

j'exprime aussi ma reconnaissance à monsieur Hadj Kaddour, Mlle Larfi et Melle Hadj Miloud de l'ABH de Chellif pour leur aide.

Je tiens également à remercier profondément tous ceux qui sont intéressés à cette étude et qui m'ont aidé à sa réalisation et en particulier, mon époux Salah Eddine et mon beau frère El Cheikh, ainsi que tous les membres de ma famille.

## TABLE DES MATIERES

|   |    |
|---|----|
| RESUME  | 2  |
| REMERCIEMENTS   | 5  |
| TABLE DES MATIERES  | 6  |
| LISTE DES ILLUSTRATION, GRAPHIQUES ET TABLEAUX  | 7  |
| LISTE DES SYMBOLES  | 9  |
| INTRODUCTION  | 10 |
| 1. EROSION ET TRANSPORT SOLIDE DANS LES BASSINS VERSANT                                       | 12 |
| 1.1. Définitions  | 12 |
| 1.2. Mécanisme de l'érosion hydrique  | 13 |
| 1.3. Conséquences de l'érosion  | 13 |
| 1.4. Mesure de l'érosion- esquisse sur quelques formules de quantification                    | 14 |
| 1.5. Travaux effectués en Algérie   | 20 |
| 2. METHODES DE MESURE ET DE QUANTIFICATION DU TRANSPORT SOLIDE DANS LE MONDE                  | 23 |
| 2.1. Historique   | 23 |
| 2.2. Généralités  | 24 |
| 2.3. Mesure du transport solide en suspension   | 24 |
| 2.4. Mesure du transport solide par charriage   | 27 |
| 2.5. Calcul du débit solide de fond   | 29 |
| 3. EVALUATION DU TRANSPORT SOLIDE TOTAL DANS L'OUED EBDA                                      | 33 |
| 3.1. Présentation de la zone d'étude  | 33 |
| 3.2. Analyse statistique des données hydro climatique   | 40 |
| 3.3. Calcul du transport solide en suspension dans l'oued Ebda                                | 43 |
| 3.3.1 Etablissement des corrélations $Q_s/Q_l$  | 44 |
| 3.3.2 Etablissement des corrélation $C/Q_l$   | 49 |
| 3.4. Calcul du transport solide de fond   | 54 |
| 3.5. Calcul du transport solide total et du taux d'érosion spécifique.                        | 63 |
| 4. RESULTATS ET DISCUSSIONS   | 64 |
| 4.1. Discussion des résultats sur le plan quantitatif et qualitatif                           | 64 |
| 4.2. Débat des résultats de deuxième méthode  | 69 |
| 4.3. Recherche de relations entre le transport solide et quelques paramètres hydro climatique | 78 |
| CONCLUSION  | 83 |
| REFERENCES  | 85 |

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

- Figure 3.1 Présentation géographique de la zone d'étude
- Figure 3.2 Courbe hypsométrique du bassin versant de oued ebda
- Figure 3.3 Les formations lithologiques de bassin versant
- Figure 3.4 Végétation dans le bassin versant
- Figure 3.5 Carte schématique du réseau hydro- pluviométrique du bassin versant de l'oued Ebda
- Figure 3.6 Ajustement à la loi normale des pluies annuelles
- Figure 3.7 Ajustement à une loi normale des pluies maximums journalières à la station Arib-Ebda
- Figure 3.8 Ajustement à une loi normale des débits maximums
- Figure 3.9 Corrélation débit liquide / débit solide en suspension pour toute la série
- Figure 3.10 Corrélation débit liquide / débit solide en suspension pour la série des crues
- Figure 3.11 Corrélation débit liquide / débit solide en suspension pour les crues de la saison d'automne
- Figure 3.12 Corrélation débit liquide / débit solide en suspension pour les crues de la saison d'hiver
- Figure 3.13 Corrélation débit liquide/débit solide en suspension pour les crues de la saison humide
- Figure 3.14 Corrélation débit liquide / débit solide en suspension pour les crues de la saison sèche
- Figure 3.15 Corrélation débit liquide / concentration en matière en suspension pour toute la série
- Figure 3.16 Corrélation débit liquide / concentration en matières en suspension pour la série des crues
- Figure 3.17 Corrélation débit liquide / concentration en éléments en suspension pour les crues de la saison humide
- Figure 3.18 Corrélation débit liquide / concentration en matière en suspension pour les crues de la saison sèche
- Figure 3.19 Corrélation débit liquide / concentration en éléments en suspension pour la saison du printemps
- Figure 3.20 Corrélation débit liquide / concentration en matière en suspension pour la saison d'été

- Figure 3.21 Corrélation débit liquide / concentration en matière en suspension pour la saison d'automne
- Figure 3.22 Corrélation concentration en matière en suspension/débit liquide pour la série d'hiver
- Figure 3.23 Carte de situation des prélèvements
- Figure 3.24 Corrélation débit liquide/ débit solide charrié pour la série des crues( $a=1$ )
- Figure 3.25 Corrélation débit liquide/débit solide charrié pour la série des crues (0.4)
- Figure 4.1 Dégradation spécifique annuelle selon Tixeront
- Figure 4.2 Comparaison des résultats du transport solide des deux méthodes
- Figure 4.3 Variation annuelle du transport solide en suspension
- Figure 4.4 Variation saisonnière du transport solide
- Figure 4.5 Variation mensuelle du transport solide en suspension
- Figure 4.6 Variation annuelle du transport solide en suspension et par charriage
- Figure 4.7 Variation mensuelle du transport solide en suspension et par charriage
- Figure 4.8 Variation annuelle de l'érosion spécifique
- Figure 4.9 Evolution du transport solide et pluies annuelles en fonction du temps
- Figure 4.10 Corrélation transport solide – pluies annuelles
- Figure 4.11 Evolution du transport solide et de l'apport annuel en fonction du temps
- Figure 4.12 Corrélation du transport solide – apport annuel
- Figure 4.13 Evolution du transport solide et débits maximums annuels en fonction du temps
- Figure 4.14 Corrélation transport solide-débit maximum annuel
- Tableau 1.1 Les valeurs du coefficient Z en fonction de degré d'évolution de l'érosion
- Tableau 3.1 Caractéristiques morpho métriques du bassin versant
- Tableau 3.2 Valeurs des moyennes mensuelles des températures
- Tableau 3.3 Pluviométrie mensuelle moyenne (mm)
- Tableau 3.4 Vitesse moyenne mensuelles des vents
- Tableau 3.5 Période de retour des pluies annuelles
- Tableau 3.6 Période de retour des pluies maximums journalières
- Tableau 3.7 Débits maximum annuels
- Tableau 3.8 Débits fréquents à la station d'Arib-Ebda
- Tableau 3.9 Echelles des tailles des particules (AGU)

- Tableau 3.10 Situation des prélèvements d'échantillons des matériaux solides
- Tableau 3.11 Résultats des analyses granulométriques
- Tableau 3.12 Distribution mensuelle et annuelle des transports solides en suspension et par charriage (deuxième méthode)
- Tableau 4.1 Comparaison des résultats des apports solides  
Et du taux d'érosion
- Tableau 4.2 Rapport entre le transport solide moyen annuel en suspension obtenu par les deux méthodes.
- Tableau 4.3 Rapport entre du transport solide par charriage et transport solide en suspension (deuxième méthode)
- Tableau 4.4 Taux d'érosion extrêmes
- Tableau 4.5 Calcul du taux d'érosion spécifique ( 1<sup>ère</sup> méthode )
- Tableau 4.6 Calcul du taux d'érosion spécifique (2<sup>ème</sup> méthode)

## LISTE DES SYMBOLES

- $A$  : Surface du bassin versant (km<sup>2</sup>)
- $A_{pps}$  : Apport solide moyen annuel (tonnes/an)
- $C$  : Concentration en matière en suspension (g/l)
- $CT$  : Coefficient de torrencialité.
- $Dd$  : Densité de drainage (km/km<sup>2</sup>)
- $Dm$  : Le déficit d'écoulement moyen annuel (mm)
- $D_{50}$  : Diamètre moyen des sédiments charriés (m)
- $E_s$  : Taux d'érosion spécifique (t/km<sup>2</sup>.an).
- $G_s$  : Débit solide charrié ( $G_s = g_s * b$ ) (kg/s)
- $H_{moy}$  : Altitude moyenne du bassin versant (m)
- $IL$  : Indice lithologique; superficie des formation marneuses et argileuses, exprimé en pourcentage de la superficie totale du bassin .
- $IP$  : Indice de précipitation érosives =produit du pourcentage de précipitation annuelles Tombées sous forme des pluies supérieurs à un seuil donné par la fréquence de ces Précipitations, le seuil considéré est égale à 20 mm pour les bassins imperméables ( $IL > 50\%$ ) ; et à 30 mm pour les bassins moyennement imperméable ( $IL < 50\%$ ).
- $J$  : Pente (%)
- $K$  : Coefficient de compacité
- $P$  : Périmètre (km)
- $Pa$  : La pluviométrie moyenne annuelle en (mm).
- $Q_l$  : Débit liquide (m<sup>3</sup>/s)
- $Q_{max}$  : Débit maximum annuel (m<sup>3</sup>/s)
- $Q_s$  : Débit solide en suspension (kg/s)
- $R$  : Lamme d'eau ruisselée (mm/an)
- $Rh$  ou  $y$  : Rayon hydraulique (m)
- $Ta$  : Taux d'abrasion de Tixeront (t/km<sup>2</sup>.an)
- $T_s$  : Transport solide moyen annuel en suspension obtenu par le premier modèle
- $T'_s$  : Transport solide moyen annuel en suspension obtenu par le deuxième modèle

$W_t$  : Transport solide total annuel dans le cas où la rugosité est négligeable  
 $W'_t$  : Transport solide total annuel supposé réel (tonnes/an)  
 $W_o$  : Volume initial de la retenue (m<sup>3</sup>)  
 $Z$  : Coefficient d'érosion relatif au bassin versant :  
 $a$  : Paramètre correspond au type de sol  
 $b$  ou  $L$  : Largeur du cours d'eau  
 $g$  : L'accélération terrestre.  
 $g_s$  : Débit solide charrié par unité de largeur (kg/s.m)  
 $k_s$  : Coefficient de Strickler dû à la rugosité du lit  
 $k_r$  : Coefficient de Strickler dû à la rugosité des particules seules  
 $t$  : Température moyenne annuelle (°C)  
 $a$  :  $(k_s / k_r)^{3/2}$  est un facteur correctif prend en compte la rugosité du lit de l'Oued  
 $h$  : Le nombre de Velikanov  
 $r$  : La masse volumique de l'eau (Kg/m<sup>3</sup>).  
 $r_s$  : La masse volumique des solides (Kg/m<sup>3</sup>).  
 $t$  : Contrainte de frottement de l'écoulement (kg/m<sup>2</sup>)  
 $t_c$  : Contrainte critique de début de charriage (kg/m<sup>2</sup>)  
 $u$  : Viscosité cinématique du fluide

## INTRODUCTION

Si l'eau est une source de vie et aussi une ressource indispensable au développement économique du pays, ne faut il pas tout faire pour la réserver ? Surtout dans les pays arides et semi aride dont fait partie l'Algérie.

L'Algérie a consentit d'énormes efforts pour la réalisation des infrastructures et grands projets, caractérisés par 100 barrages en exploitation et 27 en voie de construction afin de stocker plus de 4.5 milliard de mètres cubes dont 1.8 milliards de mètre cubes est un volume utilisable. Mais ceux-ci sont dangereusement menacés par l'envasement qui été estimé à 50 millions mètres cubes en 1997 et ce chiffre atteindra 920 millions de mètre cubes en l'an 2010.

Pour remédier à ce problème, plusieurs méthodes curatives ont été expérimentées mais leurs résultats étaient relativement faibles, cet échec est dû essentiellement à :

- l'importance de la quantité de la vase.
- manque de sites adéquats pour la construction des barrages.
- la possibilité de surélévation est limitée.

Tout le monde est d'accord, qu'il n'est pas économique de récupérer par dragage une capacité de stockage dans les grandes retenues. Le coût d'une opération de dragage revient environ à celui de la réalisation d'un nouveau barrage.

Le transport solide mesuré au niveau des stations hydrométriques et servant de base pour l'évaluation de l'envasement des barrages n'est pas représentatif.

Une évaluation correcte des débits solides dans l'oued permettra de déterminer l'évolution du volume d'eau stockable au cours du temps. Ainsi, nous allons obtenir une idée sur la durée de vie de l'ouvrage et son efficacité.

Dans la présente étude, nous ferons d'abord un rapide tour d'horizon de phénomène d'érosion hydrique et les formules d'estimation du transport solide dans les bassins versants (chapitre 1). Puis une partie des moyens de mesure et méthodes de calcul de débit solide en suspension et celui par charriage dans le monde est développée dans le chapitre 2. Le troisième chapitre traite de l'évaluation du transport solide dans l'Oued Ebda, afin de mener à bien ce chapitre nous avons procéder par :

\*Calcul du débit solide en suspension par l'établissement des corrélations débits liquides-débit solide en suspension ( $Ql/Qs$ ) et concentration en matières en suspension -débits liquides ( $C/Ql$ ).

\*calcul du débit solide par charriage.

Enfin le dernier chapitre présente la comparaison et l'interprétation des résultats obtenus.

## CHAPITRE 01

### EROSION ET TRANSPORT SOLIDE DANS LES BASSINS VERSANTS

#### 1.1. Définitions:

L'érosion est un phénomène naturel rencontré sur les bassins versants, qui résulte principalement, dans nos régions de l'action de la pluie.

La désagrégation, l'ablation et le transport des couches superficielles du sol, constituent l'ensemble des processus de l'érosion hydrique, sous l'effet de la pluie intense et du ruissellement.

On distingue plusieurs formes d'érosion hydrique :

- L'érosion en nappe .
- L'érosion linéaire .
- L'érosion en masse .

\* L'érosion en nappe : On parle d'érosion en nappe parce que l'énergie des gouttes de pluie s'applique à toute la surface du sol et le transport des matériaux détachés s'effectue par le ruissellement en nappe. cette forme d'érosion entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface.

de ce fait elle est peu visible d'une année à l'autre puisqu'une érosion de 15 à 30 t/ha/an correspond à une perte de hauteur de 1 à 2mm .

\* L'érosion linéaire : Lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol, il se forme d'abord des flaques ;ensuite ces flaques communiquent par des filets d'eau et lorsque ces filets d'eau ont atteint une certaine vitesse, 25cm/s d'après Hjulström (1935), ils acquièrent une énergie capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses, l'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement creuse des formes de plus en plus profondes. On parle de griffes lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur de rigoles lorsque les canaux dépassent 10cm de profondeur, de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de centimètres

(plus de 50 centimètres) et en particulier , lorsqu'ils ne sont plus effaçables par les techniques culturales, ou lorsqu'ils deviennent nuisibles au travail du sol . [1]

\* L'érosion en masse : se produit sur des sols mal drainé en pente du fait de l'infiltration des eaux de pluie, qui diminuent la cohésion entre la couche de formation superficielle meuble et le substratum imperméable. [2]

### 1.2. Mécanisme de l'érosion hydrique :

L'érosion hydrique est une forme de dégradation qui se déroule en deux phases principales :

- Première phase : attaque du sol par les gouttes de pluies ;
- Deuxième phase : action du ruissellement.

La pluie qui tombe arrache les particules du sol qui rejaillissent, c'est le premier stade de l'érosion, cette action de rejaillissement est liée à l'énergie cinétique des gouttes de pluie ; si la première phase joue un rôle en tant que facteur de modification de la surface du sol c'est le ruissellement qui va prendre la suite comme agent de transport [3], il se déclenche lorsque les gouttes de pluie causent de l'érosion en nappe, les rigoles, ravins, ruisseaux et rivières servent de couloir pour évacuer les sédiments, plus le débit ou taux d'écoulement est important plus la capacité de transport des sédiments est élevée.

### 1.3. Conséquences de l'érosion :

L'analyse des problèmes d'érosion hydrique, réalisée sur une superficie de plus de 22.7 millions d'hectare a fait ressortir que après de 54 % de cette superficie présente des risques majeurs d'érosion

Cette situation résulte de l'exploitation inadéquate des terres agricoles, de parcours et de forêts, accordée à des conditions physiologiques et climatiques particulièrement favorables à l'érosion.

Les principales conséquences de cette érosion sont :

- La diminution de la fertilité des terres est la conséquence principale de l'érosion des sols.
- La régression du patrimoine végétal national (forêts et parcours) .
- La perte du capital sol ; base de toute production. Les pertes dépassent 20T/ha/an dans le Rif et se situent entre 5 et 10T/ ha /an dans la région du Moyen Atlas .
- L'envasement des retenues des barrages. la capacité de ces retenues perdue chaque

année par envasement est estimée à 50 millions de m<sup>3</sup>, et la capacité perdue à nos jours à 820 millions de m<sup>3</sup>,

- La capacité perdue annuellement par envasement correspond au volume nécessaire à l'irrigation de près de 5000 ha.[4]

Devant l'ampleur de ces problèmes d'érosion, plusieurs recherches ont été effectuées dans ce domaines .

#### 1.4. Mesure de l'érosion - esquisse sur quelques formules de quantification

L'érosion hydrique est le déplacement des matières sous l'action de l'eau, Ce déplacement est plus important et dangereux dans les régions à fortes pentes ( supérieure à 6 % ). La hauteur d'eau dans le lit de la rivière est largement influencée par la quantité de sédiments transportées [5].

Selon l'AMERICAN SOCIETY OF ENGINEERS (1975) la production de sédiments est la quantité totale de matériaux à l'exutoire d'un bassin versant, mesurée en un point donnée de référence et sur un arc de temps déterminé. elle constitue, en effet la synthèse du complexe des phénomènes d'arrachement, de transport et de dépôt qui ont lieu dans le même bassin versant. [2]

La dénudation d'un bassin hydrographique (ou encore dégradation spécifique ) s'exprime en t / km<sup>2</sup>/an ou en m<sup>3</sup> /km<sup>2</sup>/ an (1m<sup>3</sup> =2.65 t).

Les valeurs de la dégradation spécifique rencontrées à la surface du globe varient entre 1 et plus de 50000 t /km<sup>2</sup> /an, la quantité totale de sédiments érodés à la surface du globe serait de  $20 \times 10^9$  t/km<sup>2</sup>/ an , 70 à 80 % provenant du continent asiatique. [6]

De 1994 à 1997, le réseau CLASSES ECO-FLEUVES, constitué de 44 établissements scolaires, a permis de mesurer les flux de MES dans 44 bassins de 200 km<sup>2</sup> à 53000 km<sup>2</sup>. Les taux d'exportation de MES mesurés à l'exutoire des bassins versants étudiés sont compris entre 3 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>, à l'aval des grands barrages de la Dordogne, et près de 150 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> sur le Tarn. [7]

Plusieurs formules sont utilisées pour l'estimation du transport solide des bassins versant, on cite parmi elles :

### 1. Formule de EKERN (1950)

Le phénomène du transport solide se manifeste par arrachement des particules du sol dû à l'énergie cinétique engendré par l'intensité de la pluie et le transport de ces particules par ruissellement.

Ekern (1950) a été le premier à mettre une relation linéaire entre le poids de matériaux arraché et l'énergie cinétique de pluie, en travaillant avec des sables calibrées et une pluie artificielle constituée de gouttes de dimensions identiques, dont il a fait varier la hauteur de chute il a obtenu la relation suivante :

$$E = -0.515 + 0.1Ec \quad (1.1)$$

Tel que :

E : quantité de matériaux arrachés

Ec : énergie cinétique produite en 5mm pour une pluie de 25mm/h [3]

### 2. Formule de TEXIRONT

Elle est basée sur des corrélations établies entre la lame d'eau ruisselée et la perméabilité du bassin versant à partir de données d'observation d'oued algériens et tunisiens[8].

$$Ta = a \cdot R^{0.15} \quad (1.2)$$

D'où :

Ta : taux d'abrasion (t/km<sup>2</sup>.an)

a : coefficient empirique varie en fonction de la perméabilité .

-bassin versant à perméabilité élevée.....3.5 <a< 75

- // // // moyenne.....75 < a < 350

- // // // moyenne à faible.....350 <a<1400

- // // // faible.....1400<a<3200

-bassin versant imperméable .....a >3200

R : lame d'eau ruisselée (mm/an), elle est donnée par la relation :

$$R = Po - Dm$$

Po : la pluviométrie moyenne annuelle en (mm).

Dm : le déficit d'écoulement moyen annuel (mm)

### 3. Formule de GAVRILOVIC :

Cette formule a fait l'objet d'une application en Algérie dans le cadre du projet de mise en valeur du bassin versant du Soummam. Elle fait intervenir un facteur climatique (Coefficient de température) et des caractéristiques physiques du bassin versant. Cette formule est mise en point en 1957 en Yougoslavie [8].

$$Q_s = T \cdot P_o \cdot p \cdot \sqrt{Z^3} \quad (1.3)$$

Avec ;  $T = \sqrt{(t/10) + 0.1}$

D'où :

t : température moyenne annuelle (°C)

Po : pluie moyenne annuelle (mm)

Z : coefficient d'érosion relatif au bassin versant :

Tableau 1.1: Les valeurs du coefficient Z en fonction de degré d'évolution de l'érosion

| catégorie | Degré d'évaluation de l'érosion | Types de processus d'érosion | Valeur de Z |
|-----------|---------------------------------|------------------------------|-------------|
| 1         | Terrains extrêmement érodés     | En profondeur                | 1.5         |
|           |                                 | En nappe                     | 1           |
|           |                                 | Mixte                        | 1.2         |
| 2         | Terrains fortement érodés       | En profondeur                | 0.9         |
|           |                                 | En nappe                     | 0.7         |
|           |                                 | Mixte                        | 0.8         |
| 3         | Terrains moyennement érodés     | En profondeur                | 0.5         |
|           |                                 | En nappe                     | 0.6         |
|           |                                 | Mixte                        | 0.4         |
| 4         | Terrains faiblement érodés      | En profondeur                | 0.2         |
|           |                                 | En nappe                     | 0.3         |
|           |                                 | Mixte                        | 0.25        |
| 5         | Terrains très faiblement érodés |                              | < 0.1       |

#### 4. Formule ANRH (1982)

$$T_s = 26.62 \cdot IL + 5.07 \cdot IP + 9.77 \cdot CT - 593.56 \quad (1.4)$$

$T_s$  : transport solide spécifique moyen annuel, exprimé en T/km<sup>2</sup>/an.

IL : Indice lithologique; superficie des formation marneuses et argileuses, exprimé en pourcentage de la superficie totale du bassin.

IP : Indice de précipitation érosives = produit du pourcentage de précipitation annuelles tombées sous forme des pluies supérieures à un seuil donné par la fréquence de ces précipitations, le seuil considéré est égale à 20 mm pour les bassins imperméables (IL > 50%) ; et à 30 mm pour les bassins moyennement imperméable (IL < 50%).

CT : coefficient de torrentialité. [9]

#### 5. Formule de SOGREAH (1969)

Dans le cadre d'une étude de synthèse sur les apports en Algérie (1969), la SOGREAH a tenté de définir l'importance du transport solide des Oueds Algériens en fonction de la perméabilité du bassin versant [4], cette formule est calquée sur la relation de Tixeront, la lame d'eau ruisselée (R) étant remplacée par l'apport moyen annuel. [2]

$$Ta = a \cdot A^{0.15} \quad (1.5)$$

#### 6. Formule de FOURNI :

L'auteur a établi des relations entre l'érosion hydrique ( $E_s$ ) et un coefficient ( $p^2/p_0$ ) ;

$$E_s = f(p^2 / P_0) \quad (1.6)$$

Où :

$E_s$  : l'érosion spécifique (t/km<sup>2</sup>.an).

$p_0$  : la pluie annuelle de l'année considérée(mm).

P : la pluie mensuelle maximale de l'année considérée(mm). [10]

L'utilisation de cette formule passe par la détermination des modules pluviométriques  $p^2 / p_0$  .Selon les limites suivantes :

\*pour les bassins versant à relief peu accentué :

$$8.1 < p^2 / p_0 < 20 \dots\dots\dots E_s = 6.14(p^2 / p_0) - 49.78$$

$$p^2 / p_0 > 20 \dots\dots\dots E_s = 27.12(p^2 / P_0) - 47.5$$

\*pour les bassins versants à relief accentué :

$$p^2/p_0 > 9.7 \dots \dots \dots E_s = 52.49(P^2 / P_0) - 513.21$$

$$8 > p^2/p_0 \dots \dots \dots E_s = 91.78(P^2 / P_0) - 737.72$$

### 7. Formule de SHYL :

Elle relie le taux d'abrasion à la pluviosité et au coefficient de torrentialité des bassins versants. [10]

$$E_s = K \cdot [44.9C_t + 73.2(P^2 / P_0) - 1442.8] \quad (1.7)$$

Avec :

$C_t$  : coefficient de torrentialité

$K$  : coefficient de compacité, est une caractéristique de forme,

$$K = 0.28 \cdot (P / \sqrt{S})$$

Avec ;

$P$  : périmètre du bassin versant (km)

$S$  : surface du bassin versant (km<sup>2</sup>)

### 8. Equation universelle de perte en sol (1959) :

Equation universelle de perte en sol est un outil largement utilisé pour la prédiction des pertes par érosion en nappe et rigole cette équation peut s'écrire [11]:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1.8)$$

Où

$A$  : perte annuelle moyenne en sol, en tonne par hectare.

$R$  : facteur d'érosivité de la pluie,

$K$  : facteur d'érodabilité du sol, qui est une mesure quantitative du taux d'érosion du sol exprimé en tonne par hectare.

$LS$  : facteur topographique.

$C$  : facteur de couvert végétal

$P$  : facteur de protection qui prend en compte les techniques de lutte contre l'érosion.

### 9. Formule de Velikanov (1953)

La formule du transport en suspension établie par Velikanov se base sur une approche énergétique. Elle est adaptée aux rivières larges à lit sableux ; son application sur des grandes rivières en ex-URSS et en Yougoslavie donné de bons résultats, ainsi que sur le bassin versant de l'Oued Zéroud en Tunisie. [5]

$$Q_s = h(r_s \cdot r / r_s - r) \cdot (V/W)SQ \quad (1.9)$$

Q : débit liquide (m<sup>3</sup>/s)

Q<sub>s</sub> : débit solide (kg/s)

h : le nombre de Velikanov, traduisant la capacité de l'écoulement et variant entre 0.0007 et 0.007.

V : la vitesse moyenne (m/s)

W : la vitesse de chute moyenne d'une particule (m/s).

S : la pente géométrique (%).

ρ : la masse volumique de l'eau et ρ<sub>s</sub> la masse volumique des solides (Kg/m<sup>3</sup>).

### 10. Formule de JAROCKI (1957) :

L'auteur reconnaît la difficulté de transposer au milieu naturel des équations fondamentales sur des mesures au laboratoire qui sont beaucoup moins représentatives de la réalité de la rivière. [5]

Jarocki a publié en 1957 la formule suivante :

$$R = 0.28QV^2g / g\sqrt{S} \quad (1.10)$$

Avec :

R : la quantité de sédiments en suspension.

Q : débit de l'écoulement.

V : vitesse de l'écoulement.

S : la surface du bassin (km<sup>2</sup>)

γ : le poids spécifique de l'eau.

g : l'accélération terrestre.

Morin et al ; (1983) précisent que cette formulation est valable quand le nombre de Froude est compris entre  $700 \cdot 10^{-7}$  et  $9000 \cdot 10^{-7}$ .

### 11. Formule de J. D Phillips (1991):

Selon J.D. Phillips la charge sédimentaire (y) d'un réseau hydrographique pour une période donnée (t), est donnée par l'équation :

$$Y = E_t A D_{s,t} D_{c,t} \quad (1.11)$$

Dans laquelle :

E : est la production sédimentaire moyenne par unité de surface.

A : la surface du bassin

D<sub>s,t</sub> : le rapport entre le volume des sédiments atteignant le chenal et celui des sédiments produits par les versants

D<sub>c,t</sub> : le rapport entre le volume des sédiments transportés dans le cours d'eau et le volume total des sédiments entrant dans le chenal. [6]

Aucune de ce fonction n'est vraiment universelle, mais pour une rivière donnée il existe toujours une ou plusieurs équations meilleures que les autres.

### 1.5. TRAVAUX EFFECTUES EN ALGERIE :

Nombreux sont les chercheurs qui se sont penchés et se sont intéressés et ont contribué ainsi à la compréhension de problème de l'érosion hydrique, parmi eux nous citons :

#### 1.5.1. DEMMAK (1982)

Demmak montre dans sa thèse (1982) que l'agressivité des pluies est faible en Algérie et par conséquent aussi l'érosion pluviale .Il a compris que la construction de banquettes anti-érosive et le boisement de grandes surface, qui étaient alors propagés dans toute l'Algérie, ont non seulement été un échec, mai ont aussi gêné l'agriculture et sont dangereusement en vue de l'érosion, voir même l'accélèrent. pour lui, ont déterminants pour le transport solide la lithologie des bassins versants, en particulier la proportion de marnes et d'argile affleurantes, les précipitations au-delà d'un certain seuil et la densité du réseau de collecteurs.[13]

### 1.5.2. ARABI (1991)

Arabi confirme la faiblesse de l'érosion pluviale et, par conséquent, le fait que le ruissellement constitue un facteur essentiel pour la détermination du transport solide dans les bassins versants. Il propose les mesures de protection suivantes :

- stocker les eaux d'écoulement ;
- favoriser l'infiltration au maximum ;
- limiter la concentration es eaux de ruissellement ;
- végétaliser ;
- travailler le sil chaque fois que possible ;
- améliorer la structure du sol ;
- corriger les ravines. [13]

### 1.5.3. D.GOMER et H. VOGHT .

Le travail de D. Gomer et H. Voght est consacré à l'élaboration d'un modèle pour décrire l'écoulement et l'érosion des sols de petits bassins marneux en climat semi aride méditerranéen.

Pour la description des processus, les grandeurs initiales suivantes ont été analysées et paramétrées :

- Les conditions climatiques, en particulier la distribution spatiale des précipitations extrêmes ;
- La dérivation d'une carte hydrologique des sols à partir de documents de télédétection.
- Une analyse numérique du relief ;
- L'infiltration et la formation de l'écoulement compte tenu de l'imperméabilisation par battante des sols marneux ;
- L'érosion des sols sous l'effet de l'impulsion cinétique en fonction des conditions hydrauliques ;
- Le transport solide en fonction du type de transport.

Le model a été validé par la comparaison des résultats de simulation et des mesures in situ. Ils trouvent que le transport des sédiments à l'exutoire des micro bassins est déterminé presque exclusivement par l'impulsion cinétique : le rôle direct de l'érosion pluviale est négligeable. L'écoulement, par conséquent l'ablation, se concentrent dans les entailles. Les surfaces agricoles ne contribuent que très peu à l'écoulement, même pour des

précipitations d'intensité extrême et peuvent donc être considérées comme stables vis-à-vis de l'érosion. Les sols salins généralement exposés au sud et sensibles à la météorisation tendent nettement plus à la formation d'écoulement et d'érosion que les sols agricoles, exposés en général au Nord.

Ils remarquent que les surfaces agricoles abandonnées ne peuvent être colonisées par une végétation naturelle dans les conditions climatiques et socio-économiques (Surpâturage) régionales et sont donc rapidement imperméabilisées par battance. Il en résulte une augmentation d'écoulement et de l'érosion qui aboutit en peu d'années à la dégradation irréversible des sol.

Ils trouvent aussi que le boisement par des pins et des eucalyptus en monoculture sur des marnes ne protège pas de l'érosion. C'est pour cela ils recommandent la combinaison de mesures techniques de correction torrentielle et de mesures biologiques dans les principaux ravins comme protection efficace. [13]

## CHAPITRE 2

### METHODES DE MESURE ET DE QUANTIFICATION DU TRANSPORT SOLIDE DANS LE MONDE

#### 2.1. Historique :

Les études scientifiques sur l'érosion n'ont commencé qu'au début du 20ème siècle; d'abord en Allemagne (Wollny), puis 40 ans plus tard, aux Etats Unis d'Amérique, à l'époque de la grande crise économique. Le Gouvernement américain, poussé par l'opinion publique affolée par les vents de sable obscurcissant le ciel en plein jour (Dust Bowl), chargea Bennet de monter le fameux Service de Conservation des Sols et de l'Eau américain et une dizaine de stations expérimentales pour mesurer au champ, le ruissellement et les transports solides. Il fallut encore attendre les années 1940 pour qu'un chercheur, confiné dans son laboratoire alors que les bombes pleuvaient sur l'Europe, découvre que l'énergie cinétique développée par la chute des gouttes de pluie était à l'origine de la dégradation de la surface du sol, du ruissellement et d'une bonne partie de l'érosion observée sur les terres cultivées (effet splash) (Ellison, 1944).

Ce n'est que dans les années 1950, après le Congrès de Madison de l'Association Internationale de Science du Sol, que les méthodes américaines de mesure du ruissellement et de l'érosion sur petites parcelles se sont répandues en Afrique francophone (F. Fournier) et anglophone (N.W. Hudson), puis en Amérique latine, et plus récemment, en Asie et en Europe.

L'Amérique avait donc 20 ans d'avance sur le reste du monde pour collecter des données et développer un premier modèle empirique de prévision des pertes en terre à l'échelle de la parcelle (Wischmeier et Smith, 1960 à 1978). [1]

## 2.2. Généralités :

La connaissance des évolutions sédimentaires constitue toujours un élément essentiel pour la prise de décisions concernant la conservation ou l'aménagement des cours d'eau.

Le transport solide est l'un des phénomènes les plus complexes de l'hydraulique qui est encore mal expliqué. Entre les différents modes de transport solide se pose souvent le problème des critères de définition, Gry (1983) donne une description des différents phénomènes :

« Une fois qu'une particule solide est arrachée (érosion), il peut y avoir roulement ou glissement sur le fond (charriage). Si la particule est petite et l'écoulement plus turbulent, elle peut quitter le fond (remise en suspension) et se déplace au cœur de l'écoulement (suspension) puis éventuellement retomber (décantation ou sédimentation) on parle également de saltation pour désigner les particules mises en suspension mais effectuent seulement de brefs sauts » [12]

Entre ces différents modes de transport solide, le transport solide en suspension et celui de fond constituent la source la plus importante de production de sédiments des bassins versants.

## 2.3. Mesure de transport solide en suspension :

Ce type de transport concerne les matériaux de très petites dimensions qui sont maintenus en suspension par la turbulence.

Le transport solide en suspension dans les cours d'eau en Algérie est très élevé. Il est mal quantifié en raison du manque de données et les erreurs et l'imprécision des mesures.

L'évaluation du transport solide en suspension se base sur la connaissance de la turbidité et les débits liquides et leurs variations en fonction du temps.

Dans un cours d'eau transportant une proportion appréciable quelconque de sable en suspension, un échantillon représentatif doit permettre de déterminer le transport jusqu'à proximité de fond. L'intégration sur une verticale est une bonne méthode car l'échantillon recueilli fournit une concentration moyenne pondérée par le débit le long d'une verticale.

On multiplie cette concentration par le débit liquide le long de chaque verticale en utilisant la formule suivante :

$$Q_s = C \cdot Q \cdot K \quad (2.1)$$

Où :

$Q_s$  : débit solide en suspension en t/j

$Q$  : débit liquide en m<sup>3</sup>/s

$C$  : concentration moyenne mg/l

$K$  : facteur de conversion de 0.0864 pour les concentrations inférieures à 15 mg/l. [11]

### 2.3.1. Mesure de la turbidité.

En pratique, la mesure de la turbidité (la concentration en matière solide en suspension) est basée sur la prise systématique d'échantillon et la connaissance correcte de sa variation temporelle nécessite d'augmenter la fréquence des prélèvements :

1- En crue, la fréquence des prélèvements est fixée pour chaque station en fonction de la vitesse de montée et de descente des crues, la surface du bassin et la durée des averses, en règle générale :

\* un prélèvement est effectué durant la montée des eaux ; si cette montée est lente (supérieure à une heure) on prélève un échantillon d'eau toutes les heures.

\* un prélèvement doit obligatoirement être effectué au maximum de la crue.

\* en décrue, et suivant la vitesse de cette décrue, on prélève un échantillon toutes les heures durant les six premières heures et toutes les deux heures ensuite.

2- En étiage, ou lorsque le débit est constant au cours de la journée, il y'a lieu d'effectuer un seul prélèvement généralement à 12h. [14]

On prélève des échantillons eau-sédiments en un point unique soit sur le bord, soit au centre à l'aide du récipient (bouteilles ) en matière plastique d'une contenance de 0.5 à 1 litre. On analyse généralement en laboratoire les échantillons. Pour déterminer la concentration des particules, les échantillons eau-sédiments sont filtrés sur des filtres (membrane poreuse dont la taille moyenne des pores est en général de 0,2 µm) pesés au préalable, séchés à 100°C à l'étuve, la concentration est le rapport entre les sédiments (poids sec) et le mélange total eau-sédiment exprimé en milligramme par litre (mg/l) ou (g/l).

Afin de déterminer le volume de matériaux transportés par un cours d'eau, on peut combiner les renseignements sur la concentration et sur le débit ou écoulement du cours d'eau, on obtient alors le débit solide qui correspond à la quantité totale de sédiments transportés pour une période donnée (l'heure, jour, mois, année) on a estimé de cette manière que le Saint-Laurent transportait en face de Montréal, 2.3 millions de tonnes de sédiments en suspension par année soit l'équivalent de 230000 camions de terre . Le débit solide à un instant donné (noté  $Q_s$  et exprimé en kg/s) est égal au produit de la concentration (noté  $C$  et exprimé en g/l) par le débit liquide (noté  $Q_l$  et exprimé en  $m^3/s$ ).

### 2.3.2. Appareils de prélèvement :

Un échantillonneur bien conçu est profilé de façon à éviter les perturbation et son ajutage d'admission est dessiné de façon à prélever à une vitesse identique à celle du courant (u s. National hand book, 1978). [11]

\*Les principaux types de préleveurs qui sont utilisée pour les sédiments en suspension :  
1 – Préleveur à intégration, est préféré pour la plupart des recherches, parce qu'il est utilisé pour recueillir des mélanges eau-sédiments pendant un certain intervalle de temps, ce qui contribue à réduire le variations dues aux fluctuations temporelles ; ce peut être un :

a – Préleveur à intégration ponctuelle qui est employé à recueillir des échantillons en plusieurs points par verticales

b – Préleveur à intégration sur une verticale qui fournit un échantillon intégré de la surface au fond obtenu en déplaçant l'appareil à vitesse constante dans un aller retour de la surface au fond .

2 – Préleveur à pompe est un embout formé d'un tube métallique faiblement coudé, fixé sur une perche permet d'effectuer, à l'aide d'un tuyau flexible et d'une pompe, des prélèvements en divers points de la section de mesure, on les utilise généralement lorsqu'il est important de recueillir un échantillon à des intervalles de temps déterminés au cour d'une crue par exemple.

3 – Préleveurs instantanés, tous fournissent un échantillon instantané du mélange eau-sédiments en un point donné, ils sont constitués d'un récipient largement ouvert qui peut se refermer, de façon quasi instantanée au moyen d'une commande appropriée.[11]

On analyse généralement en laboratoire les échantillons de sédiments en suspension, une fois ceux-ci prélevés pour déterminer la concentration et la taille des particules.

Au Canada, l'échantillonnage sert généralement à obtenir des données sur les sédiments en suspension, la majeure partie de l'échantillonnage est effectuée lors des périodes à débits élevés (tempêtes, de pluies de printemps, de l'été et de l'automne) au moments où la plus grande partie des sédiments sont transportés dans le réseau hydrographique. [16]

Les matériaux du lit peuvent être échantillonnés en été ou certaines portions du lit sont exposées parce que l'écoulement est faible ; l'échantillonnage est alors plus facile.

Ces données ont beaucoup servi à réaliser des études de la sédimentation des réservoirs, de transport du contaminant associé aux sédiments.

### 2.3.3. Difficulté de mesure :

La difficulté essentielle de la mesure réside dans la non uniformité de la concentration en sédiment dans la section de mesure et son extrême variation temporelle.

Prélevé en surface de l'oued, l'échantillon aura une teneur en suspension moindre que la teneur moyenne de la verticale (sauf zone de prélèvement extrêmement turbulente).[14]

### 2.4. Mesure du transport solide de fond :

Ce type de transport solide concerne les gros matériaux, ces derniers se déplacent sur le fond par roulement, glissement, saltation, et leur vitesse est inférieure à celle de l'écoulement.

\*La méthode de base d'échantillonnage du transport solide de fond est la prise directe d'échantillon, les appareils les plus répandus sont de genre capteur de fond.

Les mesures de transport de fond, à l'aide d'un capteur de fond, sont faites sur plusieurs verticales dans une section en travers. On choisit le nombre de verticales de mesure selon la longueur de la zone où se produit le transport de fond.

les mesures de chaque verticale fournissent le débit unitaire à cette verticale.

$$qsb = (m/l \cdot T) \cdot e \quad (2.2)$$

Où

$qsb$  : transport de fond par unité de largeur

$m$  : masse de sédiments piégés

$l$  : largeur de l'orifice d'entrée du capteur

$T$  : temps de prélèvement au point de mesure

$e$  : coefficient d'efficacité du capteur

On détermine le transport de fond total par l'équation :

$$Qsb = \sum_{i=1}^n (qsb1 + qsb2) \Delta bi / 2 \quad (2.3)$$

Avec :

$Qsb$  : débit solide de fond total

$\Delta bi$  : distance entre les points de mesure

#### 2.4.1. Appareils de prélèvement

N. Ya . Soloviev (1969) a conçu un appareil pour enregistrer le déplacement des sédiments grossiers sur le fond .le fonctionnement de l'engin repose sur l'enregistrement du choc des particules transportées sur le lit par une plaque réceptrice .l'engin de par de sa conception, permet d'étudier le déplacement de particules individuelles.

Heinrich (1970) a conçu un type d'échantillonneur combiné avec un hydrophone pour mesurer la charge de fond, l'hydrophone fournit simultanément des mesures du déplacement des sédiments de la charge de fond et également une surveillance acoustique du mouvement de la charge de fond.

Nordin et Skinner (1977) décrivent un appareil combiné comprenant une sonde de profondeur, un préleveur par intégration ponctuelle et un moulinet utilisé pour des recherches sur les sédiments de l'Amazone. [11]

Des échantillons du charriage sont généralement prélevés au moyen d'une trappe à sédiments, qui est déposée sur le lit du cours d'eau ; y sont emprisonnés les matériaux qui y entrent.

On peut prélever sur les rives des cours d'eau tout simplement à la main ou au moyen d'échantillonneurs déposés sur les lits des cours d'eau. Certains échantillonneurs permettent de prélever des sédiments par creusage dans le lit, alors que d'autres en extraient une carotte. [16]

Dans le lit des cours d'eau à fond sableux, toute mesure directe du transport de fond est impossible. [11] Dans ce cas, la meilleure méthode indirecte c'est le calcul de débit solide par les formules existantes

### 2.5. Calcul du débit solide de fond :

Les débits solides des transports par charriage peuvent être calculés par différentes formules empiriques. Pour appliquer ces formules il faut disposer d'informations sur les caractéristiques des matériaux du lit ou des particules se déplaçant au fond. La répartition granulométrique et la masse volumique des matériaux du fond sont les caractéristiques les plus importantes.

Le principe de la force tractrice, attribué à Du Boys, permet de traiter le problème de la détermination quantitative du débit solide de charriage, il est intéressant de constater l'analogie de la forme de la plupart de ces formules, Elles contiennent toutes la différence entre  $\tau$  et  $\tau'$  ou d'autres formes analogues telles que  $(Q - Q_{cr})$  ou encore  $(\omega - \omega_0)$ . [6]

#### 1 - Formule de Chang :

$$q_s = A \cdot t_0 \cdot (t_0 - t_c) \quad (2.4)$$

avec :

$q_s$  : débit solide par unité de largeur

$A$  : dimension du matériaux

$t_c$  : force tractrice critique correspond au début de mouvement des grains.

$t_0$  : force tractrice ( $t_0 = \gamma h I$ ). [17]

## 2 - Formule de Meyer- Peter :

L'auteur a proposé la formule suivante pour rivière à gravier

$$q_s = 45 \cdot D_{50}^{3/2} [t_*(D_{50}) - 0.138]^{3/2} \quad (2.5)$$

Tel que ;

$\tau_*$  : contrainte de Shields

$D_{50}$  : diamètre moyen des sédiments. [18]

## 3- Formule de Meyer- Peter et Müller (1948)

La formule de Meyer- Peter et Müller donne la capacité de transport solide par charriage, lorsque les sédiments ont une taille uniforme. [19]

$$q_s = 8 \sqrt{g} \cdot \sqrt{g_s/g_w - 1} \cdot (bt^* - 0.047)^{3/2} \cdot d^{3/2} \quad (2.6)$$

Avec :

$$t^* = R \cdot i / (g_s/g_w - 1) \cdot d$$

$q_s$  débit solide par unité de largeur m<sup>3</sup>/s

$\tau_*$  paramètre de Shields sans dimension

$d$  diamètre médian des sédiments (m)

$\gamma_s$  et  $\gamma_w$  poids volumique de l'eau et du matériau solide

$b = (0.06/t^* + 0.41 \cdot t^*)^{15/16}$  Paramètre dépend de la rugosité des grains et de la rugosité du fond.

Meyer- Peter et Müller ont établi leur formule dans les conditions suivantes :

-écoulement uniforme ;

-0.01 m < R < 1.20 m ;

-4 .10<sup>-4</sup> < i < 2 .10<sup>-2</sup>

-0.4 mm < d < 30 mm

- granulométrie uniforme.

#### 4 - Formule de Shields

$$q_s = 10 \cdot q \cdot i \cdot (t_o - t_{cr}) / [(r_s - r) - 1]^2 \cdot D_{50} \quad (2.7)$$

avec :

$q_s$  : débit charrié de fond par unité de largeur (kg/s.m)

$Q_l$  : débit liquide instantané (m<sup>3</sup>/s)

$i$  : pente (%)

$t_{cr}$  : contrainte critique de début de charriage pour laquelle Shields admet :

$$t_{cr} = 0.060 (\gamma_s - \gamma) d_{50}$$

$t_o$  : contrainte de frottement dépendant de l'écoulement.

#### 5- Formule de Engelund et Hansen (1967)

A partir d'une banque mondiale de 1900 données de laboratoire et 800 données de fleuves, des chercheurs portugais ont établi que la formule de Engelund et Hansen donnait de bon résultats. 66% des valeurs calculées sont entre la moitié et le double des valeurs mesurés

La formule empirique de Engelund et Hansen (1967) donne le transport solide totale pour des sédiments non cohésifs (charriage +suspension). [19]

$$q_s / \left( \sqrt{(g_s / g_w - 1) \cdot g \cdot d^3} \right) = 0.08 (k^2 \cdot y^{1/3} / g) \quad (2.8)$$

$k$  est le coefficient de Strickler global des parois incluant la rugosité des berges.

En remplaçant  $g$  par sa valeur, en supposant  $\gamma_s / \gamma_w = 2.6$  et tenant compte de la largeur du lit, nous obtenons la formule suivante :

$$Q_s = 0.032 \cdot k^2 \cdot L \cdot y^{1/3} \cdot \tau^{*5/2} \cdot d^{3/2}$$

Cette formule a été établie pour  $0.15\text{mm} < d < 5\text{mm}$

#### 6- Formule d'Einstein Brown (1950)

$$q_s = 3.13 \cdot [(r_s / r) - 1]^{1/2} \Phi \cdot F \cdot D_{50}^{3/2} \quad (2.9)$$

Cette formule est utilisable pour un transport solide se faisant soit uniquement par charriage, soit par charriage et suspension en même temps,

Elle est valable pour  $D > 0.3$  mm sans indication de limite supérieure.

Avec :

$$F = \sqrt{2/3 + 3.67 \cdot n^2 / (rs / r - 1) D_{50}^3} - \sqrt{3.67 \cdot n^2 / (rs / r - 1) D_{50}^3}$$

$$\Phi = 2.15 \cdot e^{-0.311 / t(D_{50})} \quad \text{si } t_*(D_{50}) < 0.2 \text{ (charriage seul)}$$

$$\Phi = 40 \cdot t_*(D_{50})^3 \quad \text{si } t_*(D_{50}) > 0.2 \text{ (charriage et suspension)}$$

$n$  est la viscosité cinématique du fluide.[18]

7- Formule de Sogreah-Lefort (1992) :

$$Q_s = 2.7 \cdot (d_{90} / d_{30})^{0.2} \cdot I^{1.5} \cdot [I - (Q_o / Q_l)^{0.375}] \cdot Q_l \quad (2.10)$$

Avec :

$$Q_o = 0.92 \cdot d_{50}^{5/2} I^{-13/6} (1 - 1.2 \cdot I)^{8/3}$$

Cette formule est établie dans les conditions suivantes :

$$0.2\% < I < 20 \%$$

$$d_{50} > 1\text{mm}$$

$$Q_o / Q_l < 25$$

## CHAPITRE 3

### EVALUATION DU TRANSPORT SOLIDE TOTAL DANS L'OUED EBDA

#### 3.1. Présentation de la zone d'étude

##### 3.1.1. Situation du bassin versant

Le bassin de l'Oued Ebda occupe une superficie de 273km<sup>2</sup> au droit de la station hydrométrique Arib Ebda, lieu d'implantation du futur barrage de Sidi Ben Taiba, il est situé à neuf kilomètres au Nord-est de la wilaya de Ain Defla, et présente une forme ramassée. (Voir figure 3.1)

##### 3.1.2. Relief

La topographie du bassin versant de 273km<sup>2</sup> est formée principalement de montagnes dont l'orientation est nord-est sud-ouest, le bassin versant s'élève d'une altitude de 270m au site du barrage, à 1507m à Djebel Zaccar Rherbi à l'est avec plusieurs sommets qui dépassent 1000m.

##### a. La courbe hypsométrique :

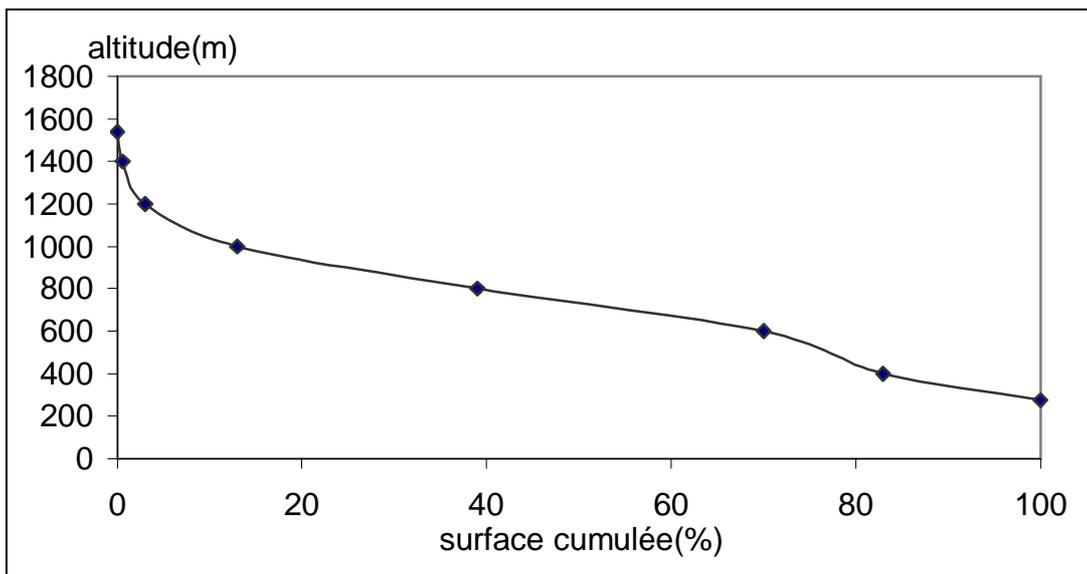


Figure 3.2. Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued- Ebda

# Légende



Limite de bassin versant

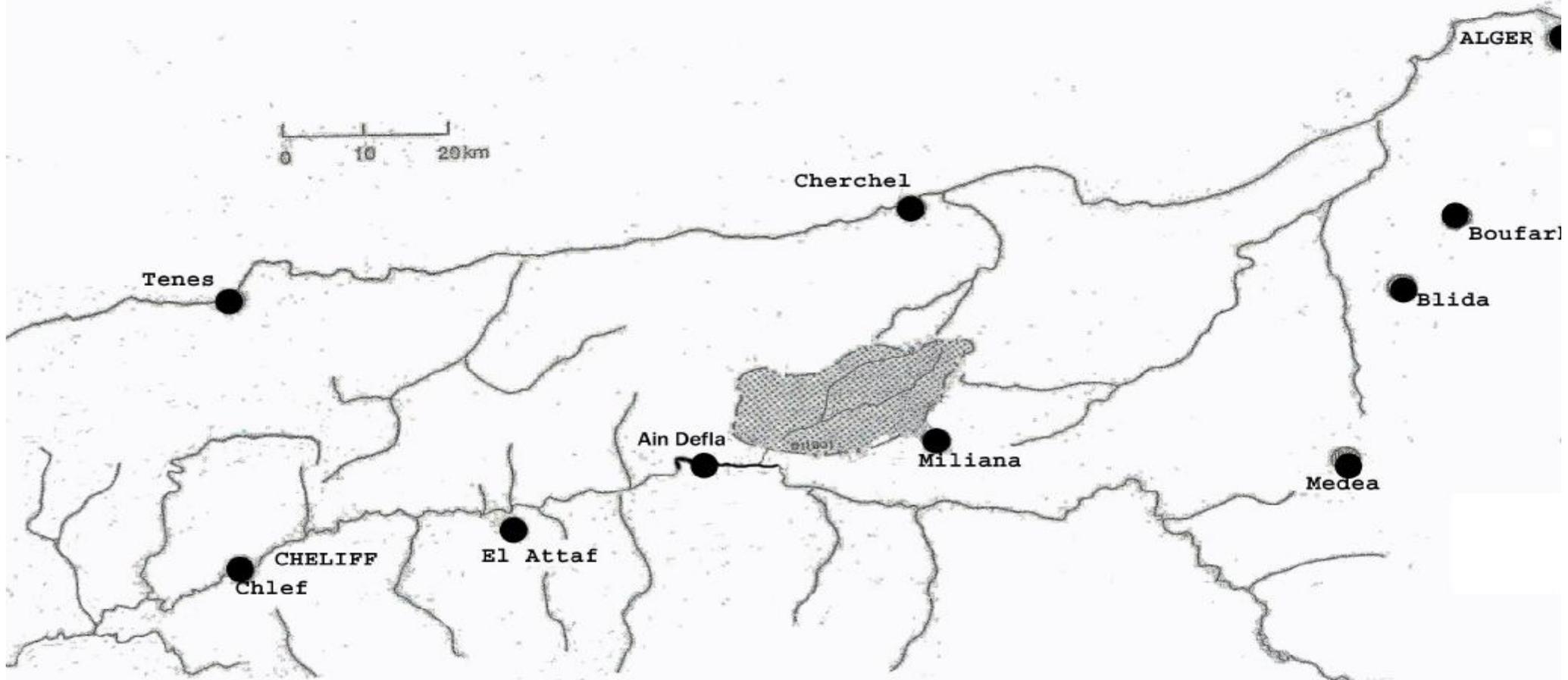


Figure 3.1. Présentation géographique de la zone d'étude [19]

La courbe hypsométrique indique l'absence de plaine alluviale (altitude <400m : 6%) pouvant freiner les crues de plus la pente assez forte et la forme ramassée du bassin laissant supposer un temps de concentration court et une vitesse d'écoulement élevée [20]. (Voir figure 3.2)

#### b. les altitudes caractéristiques :

\* les altitudes maximales et minimales : elles sont obtenues directement des cartes topographiques, l'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire.

Altitude minimale (m) : 275

Altitude maximale (m) : 1539

\* l'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique, elle correspond au rapport de l'air au dessous de la courbe, en utilisant comme altitude de départ l'élévation minimum de la courbe hypsométrique à la superficie du bassin versant, on peut la définir comme suit :

$$H_{moy} = \frac{\sum (h_i \cdot A_i)}{A}$$

Avec :

H<sub>moy</sub> : altitude moyenne du bassin versant (m)

h<sub>i</sub> : altitude moyenne entre deux courbe de niveau (m)

A<sub>i</sub> : aire comprise entre deux courbe de niveau (km<sup>2</sup>)

A : superficie du bassin versant (km<sup>2</sup>)

H<sub>moy</sub> = 736m

\*altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.

H médiane = 769m ; cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne donc la courbe hypsométrique du bassin de Oued-Ebda présente une pente plus au moins régulière.

#### 3.1.3. Lithologie

Le Nord de bassin est constitué exclusivement de bancs de calcaire à joint silicieux et de cal schistes marneux imperméables qui occupent près de 50 % de la superficie du bassin.

Les bancs de calcaires, se trouvent aussi au sud du bassin dans le Djebel Zaccar.

Le centre du bassin est constitué par le flysch du crétacé formant des collines molles, des inclusions marneuses dans les bancs calcaires provoquent de grands glissements de terrain ainsi que des ravines le long des versants présentant une forte sensibilité à l'érosion du bassin, les formations lithologiques rencontrées dans le bassin versant sont montrées sur la figure 3.3.

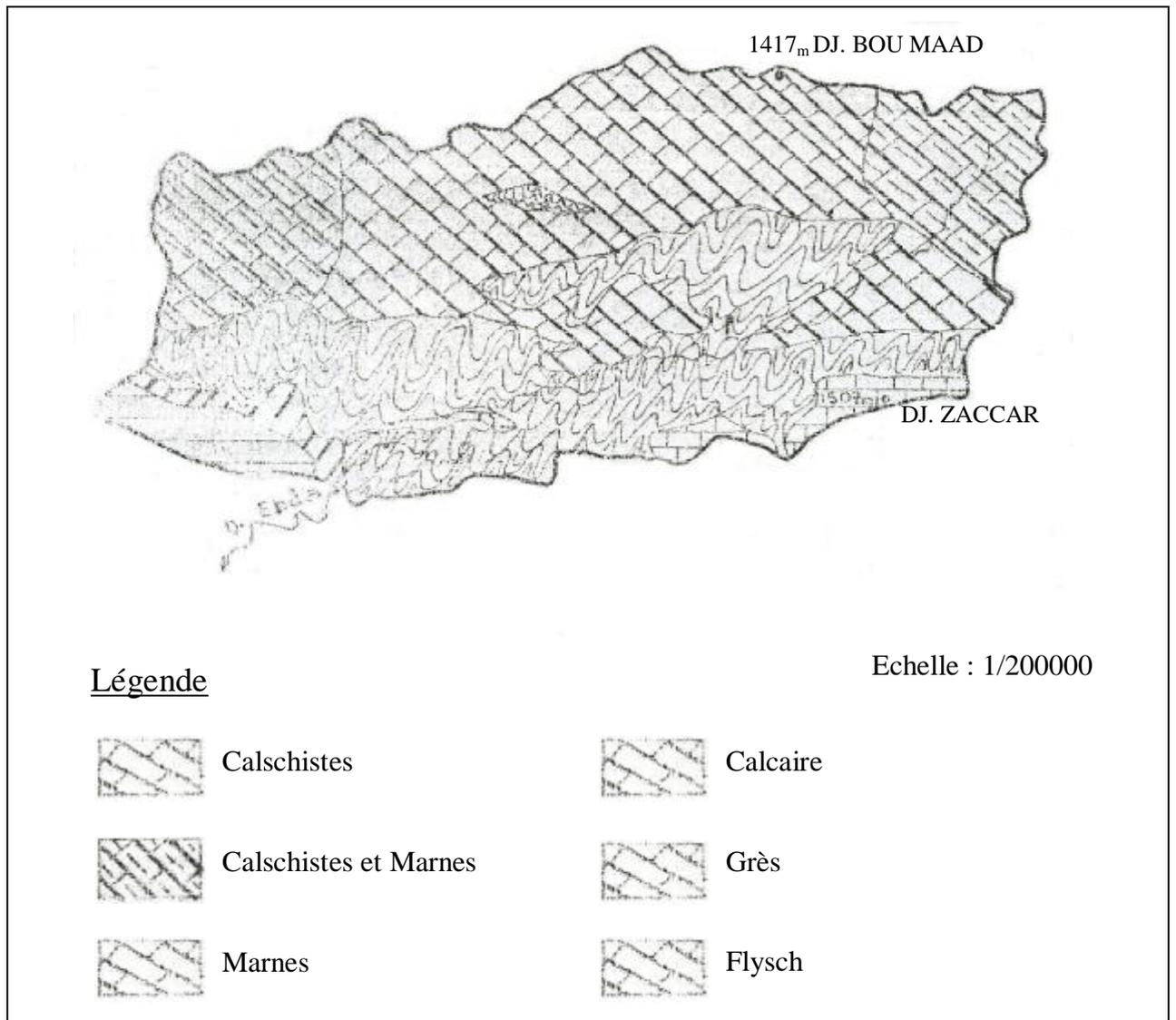


Figure 3.3 Carte des formations lithologiques du bassin versant de l'oued Ebda. [20]

### 3.1.4. Végétation

Le bassin dans l'ensemble est assez bien boisé, contrairement aux autres bassins alimentant le Cheliff, la végétation est bien conservée et couvre près de 60% du bassin.

Elle est généralement constituée de forêts sur les hauteurs et d'arbres et maquis en contrebas. (Voir figure 3.4)

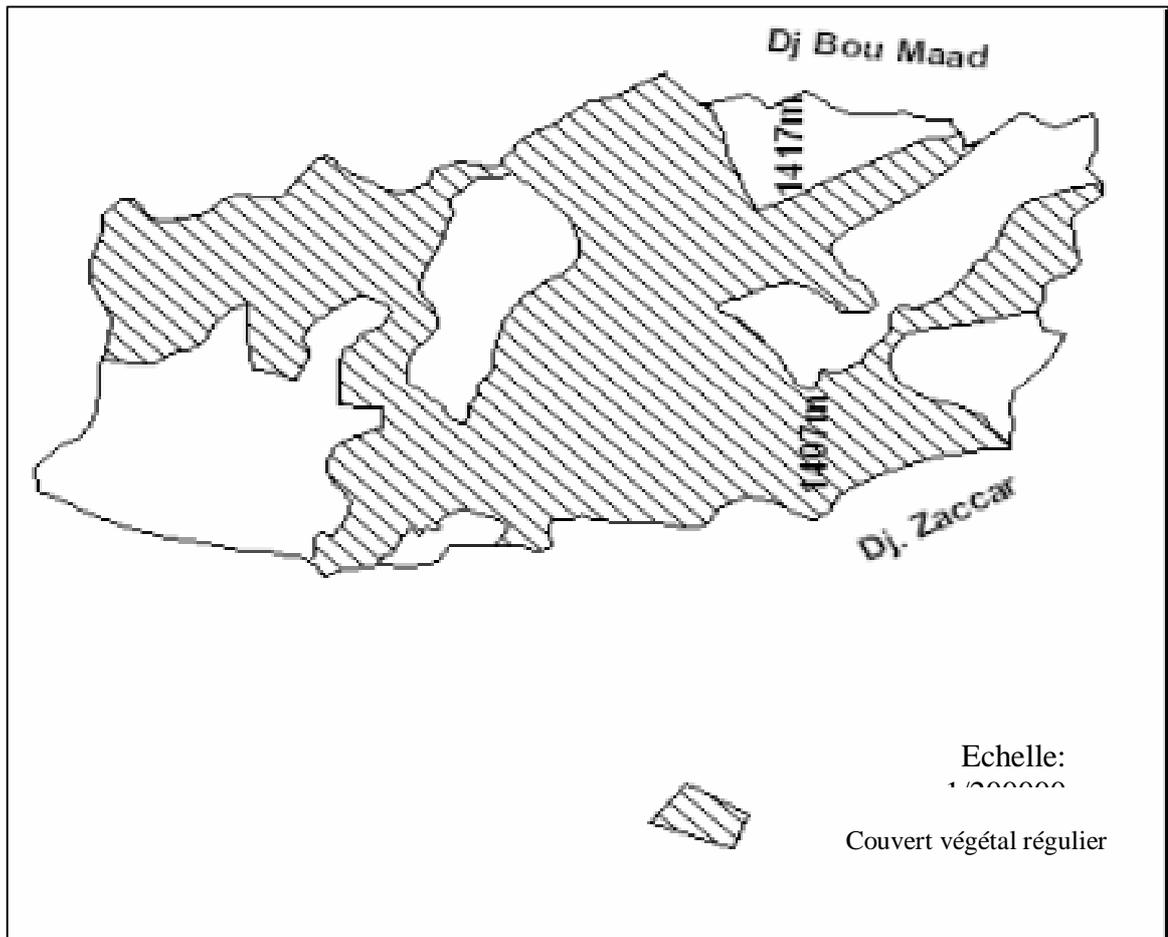


Figure 3.4 Carte de couvert végétal du Bassin Versant de l'oued Ebda

### 3.1.5. Morphométrie du bassin versant

Faisant le rapport du périmètre du bassin versant (km) à la racine carrée de la valeur de la surface de bassin versant (km<sup>2</sup>) multiplié par 0.28 on aura la valeur du coefficient de compacité de Gravilius du bassin qui caractérise la forme du bassin versant qui est dans notre cas une forme ramassée avec un indice de compacité de 1.19.

Tableau 3.1 : Caractéristiques morphométriques de bassin versant de l'Oued Ebda

| Oued Ebda                                 |      |
|---|------|
| Surface (km <sup>2</sup> )                | 2.70 |
| Périmètre (km)                            | 70   |
| Indice de compacité                       | 1.19 |
| Indice de pente                           | 0.20 |
| Coefficient de torrentialité              | 128  |
| Altitude min (m)                          | 275  |
| Altitude Max (m)                          | 1417 |
| Altitude moy (m)                          | 736  |
| Longueur du rectangle équivalent (km)     | 23.5 |
| Densité de drainage (km/km <sup>2</sup> ) | 5.4  |
| Longueur du thalweg principal (km)        | 37   |

### 3.1.6. Hydrographie du bassin versant

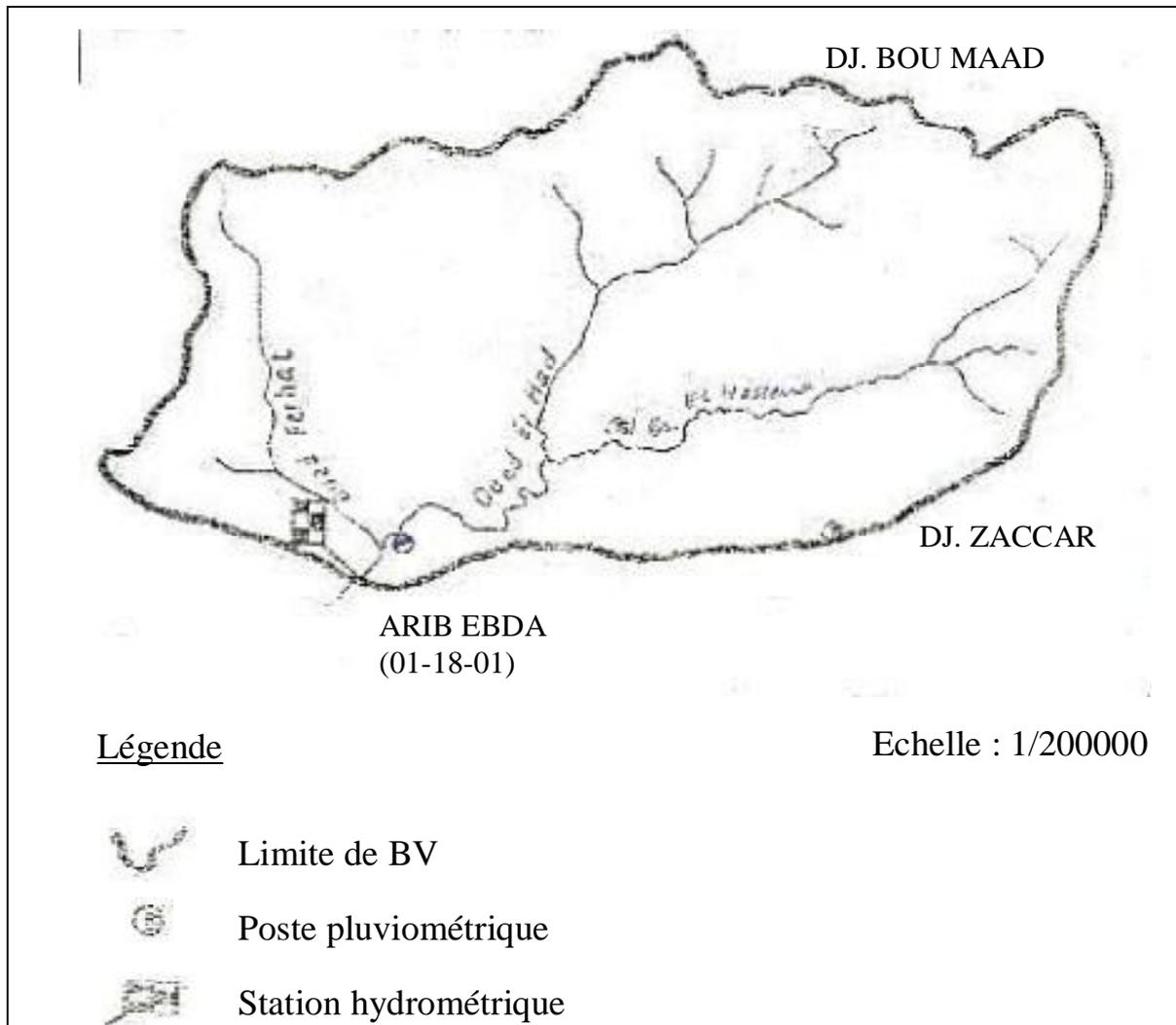


Figure 3.5: Carte schématique du réseau hydro- pluviométrique du bassin versant de l'oued Ebda

#### a. Réseau d'écoulement

Le bassin versant de l'oued Ebda dont la direction d'écoulement est Nord-sud est drainé dont toute sa partie orientale par l'affluent le plus important Oued Ben Hassan ce dernier se jète dans L'Oued EL Had qui draine la partie centrale du bassin (prés des 3/4 du bassin) .L'oued EL HAD à son tour se joint au dernier affluent du bassin, soit oued Ferhat, lequel draine la partie occidentale son nom change alors pour devenir Oued-Ebda .

### b. Station hydrométrique

Le bassin versant compte une seule station hydrométrique pour l'estimation des débits dans l'oued ; elle est située à

X =439.65km, Y=335.55km, Z=270km

Les données que nous avons retenues datent du 1974-1975 jusqu'à 1994-1995

### 3.1.7. Climatologie du bassin versant

Le bassin de L'oued Ebda est caractérisé par un climat méditerranéen, des étés secs et chauds et des hivers froids et humides.

#### a. Température :

Le tableau ci-dessous donne la répartition mensuelle des températures enregistrées en deux stations proches du bassin.

Tableau 3.2 : Valeurs des moyennes mensuelles des températures

| j   | f    | m    | a    | m    | j    | j    | a    | s  | o    | n  | d  |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|----|------|----|----|
| 9.2 | 10.6 | 12.8 | 15.8 | 18.3 | 25.5 | 29.5 | 29.3 | 25 | 19.8 | 14 | 10 |

Les températures moyennes mensuelles varient de 9.02 c°en janvier, mois le plus froid à 29.5c°en juillet.

#### b. Pluviométrie

Le bassin de l'oued ebda et caractérisé par un régime pluviométrique très irrégulier, en été particulièrement juillet et août, les précipitations sont très faibles souvent nulles.

Les mois de décembre et janvier sont généralement les plus pluvieux, quoiqu'en pratique la saison des pluies s'étale d'octobre à avril.

Tableau 3.3 : Pluviométrie mensuelle moyenne (mm)

| j   | f   | m   | a  | m  | j  | j | a | s  | o   | n   | d   |
|-----|-----|-----|----|----|----|---|---|----|-----|-----|-----|
| 158 | 109 | 101 | 89 | 56 | 20 | 2 | 4 | 31 | 115 | 103 | 155 |

La région de l'oued Ebda constitue le secteur le plus arrosé de tout le bassin de Chélif

### c. Vent

Tout comme pour l'ensemble du bassin du Chéelif, le climat au niveau du bassin de l'oued Ebda se caractérise par des vents d'une vitesse généralement inférieure à 10 km/h.

Tableau 3.4 : Vitesse moyenne mensuelles des vents

|   |   |     |   |     |     |   |     |     |   |   |   |
|---|---|-----|---|-----|-----|---|-----|-----|---|---|---|
| j | f | m   | a | m   | j   | j | a   | s   | o | n | d |
| 2 | 2 | 2.6 | 2 | 2.3 | 2.8 | 3 | 2.3 | 2.5 | 2 | 2 | 2 |

### 3.2. Analyse statistique des données hydrométriques.

#### 3.2.1. Etude des précipitations

On considère que pour avoir un ajustement statistique significatif, il faut disposer d'un nombre de données d'observation supérieur à 15 ou 20.

On peut parfois avoir un ajustement acceptable avec un nombre de données compris entre 10 et 15.[4]

#### a. Précipitation moyenne annuelle

La précipitation moyenne annuelle a été obtenue à partir de la carte pluviométrique d'Algérie de Nord ( ANRH . 1992) .elle est de 740 mm

b. Précipitation annuelle

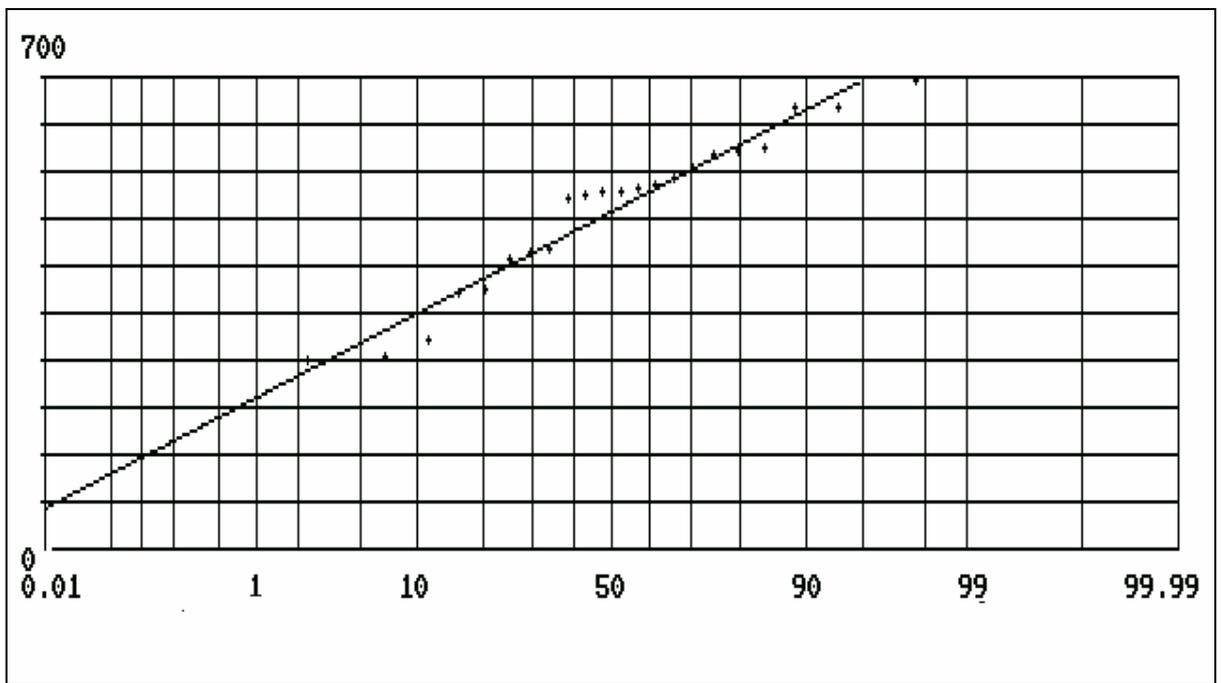


Figure 3.6: Ajustement à la loi normale des pluies annuelle

Tableau 3.5 : Période de retour des pluies annuelles

| Période de retour (ans) | 5   | 10  | 20  | 50  | 100 |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Pa (mm)                 | 600 | 651 | 708 | 743 | 776 |

d. Précipitations maximums journalières

Tableau 3.6 : Période de retour des pluies maximums journalières

| Période de retour (ans) | 5  | 10 | 20 | 50  | 100 |
|-------------------------|----|----|----|-----|-----|
| Pjmax                   | 61 | 74 | 87 | 105 | 119 |

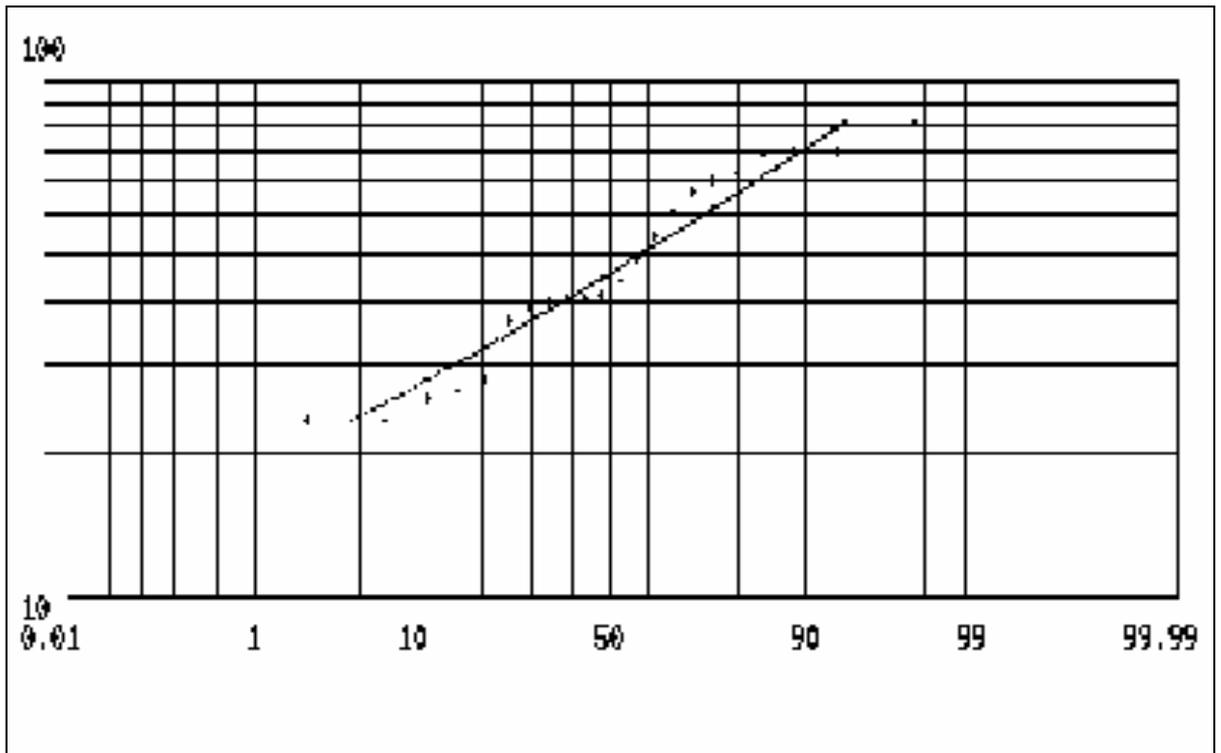


Figure 3.7 Ajustement à une loi normale des pluies maximums journalière à la station Arib-Ebda

### 3.2.2. Etude des écoulements :

#### a. Les débits maximums annuels

Nous disposons à la station Arib Ebda d'une série de données qui s'étale de 1968/1969 à 1994/1995.

Tableau 3.7 : Débits maximums annuels

| année | Qmax (m3/s) | année | Qmax(m3/s) | année | Qmax (m3/s) |
|-------|-------------|-------|------------|-------|-------------|
| 68/69 | 52          | 77/78 | 62         | 86/87 | 126.2       |
| 69/70 | 164         | 78/79 | 228        | 87/88 | 20.8        |
| 70/71 | 82          | 79/80 | 255        | 88/89 | 175         |
| 71/72 | 141         | 80/81 | 258        | 89/90 | 27.5        |
| 72/73 | 124         | 81/82 | 105.4      | 90/91 | 92          |
| 73/74 | 172         | 82/83 | 94.2       | 91/92 | 148.4       |
| 74/75 | 53          | 83/84 | 65         | 92/93 | 23.6        |
| 75/76 | 99          | 84/85 | 126.4      | 93/94 | 51          |
| 76/77 | 47          | 85/86 | 68         | 94/95 | 75          |

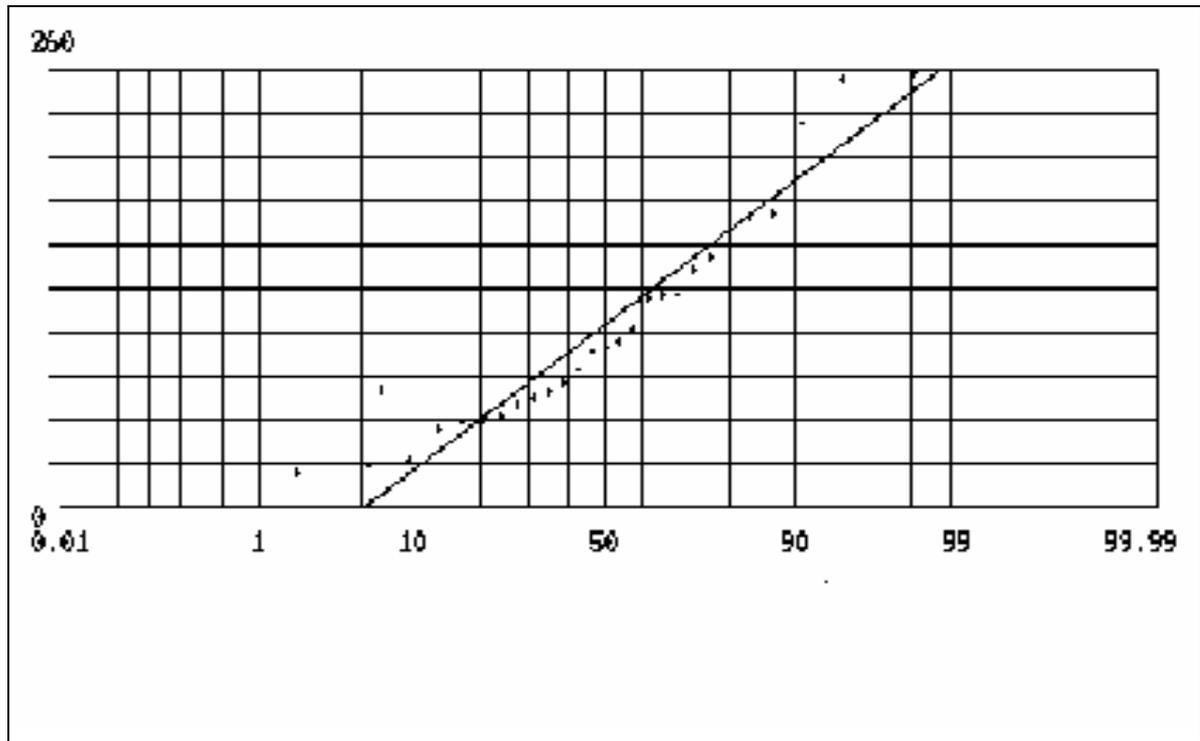


Figure 3.8: Ajustement à une loi normale des débits maximums

Tableau 3.8 : Débits fréquents à la station d'Arib-Ebda

| Période de retour (ans)    | 2   | 5   | 10  | 20  | 50  | 100 |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Q max. (m <sup>3</sup> /s) | 108 | 164 | 194 | 218 | 246 | 264 |

### 3.3. Calcul du transport solide en suspension dans l'oued Ebda.

Au niveau de la station de Oued Ebda, nous disposons d'une grande série de mesure; Environ 2266 valeurs de :

- Hauteurs d'eau (m)
- Débit liquide (m<sup>3</sup>/s)
- Concentration en matière en suspension (g/l)

Nous avons transformé les lectures des hauteurs d'eau en débit liquides grâce aux barèmes d'étalonnages établis par les services de l'agence nationale des ressources hydrique ( programme " CONCENTRE / BASHYD"

Le débit solide (kg/s) pour chaque hauteur d'eau est obtenu par la relation  $Q_s = C \cdot Q_l$

Dans le but de trouver une équation mathématique qui nous permettra de combler le manque de données, nous avons procédé comme suit :

\* Construction d'un fichier globale, sous forme d'un tableau comprenant :

- La date, l'heure
- Hauteur d'eau (m).
- Débit liquide (m<sup>3</sup>/s)
- Concentration en matière en suspension (g/l).de chaque prélèvement
- Débit solide (Kg/s)

\* Nous avons extrais le fichier des grandes crues à partir du fichier global :

\* Tenant compte de l'influence saisonnière sur le phénomène du transport solide, on a effectué des regroupements suivant les saisons.

### 3.3.1. Etablissement des corrélations débit solide – débit liquide ( $Q_s/Q_l$ )

\*Etablissement des corrélations entre le débit solide et le débit liquide pour tout les fichier. La relation puissance a donné le meilleure coefficient de corrélation, en particulier, pour les séries saisonnières des grandes crues (saison humide et sèche).

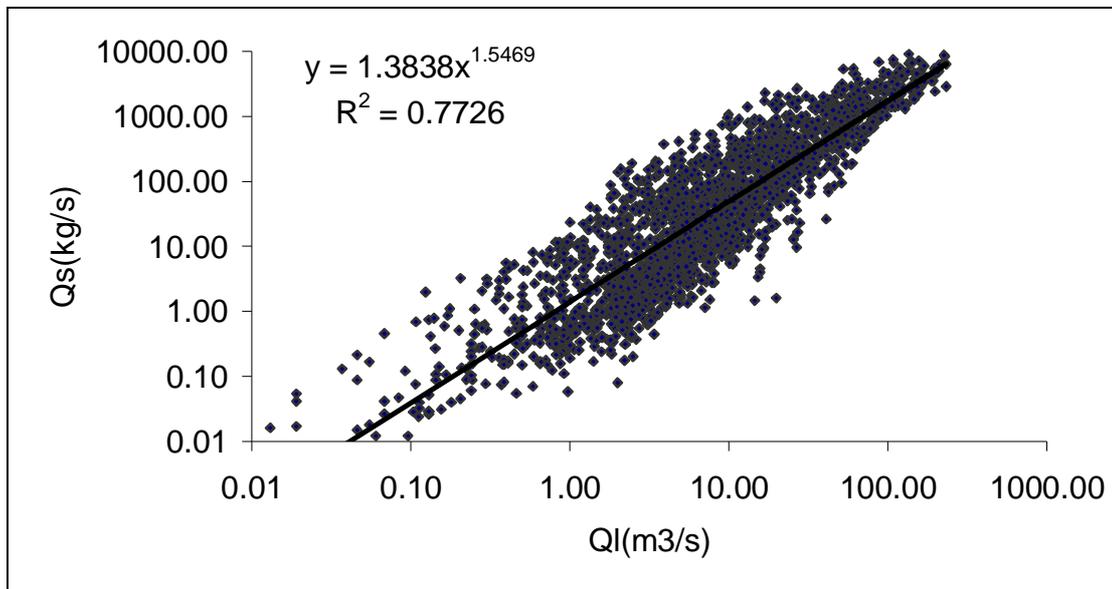


Figure 3.9 Corrélation débit liquide / débit solide en suspension pour toute la série

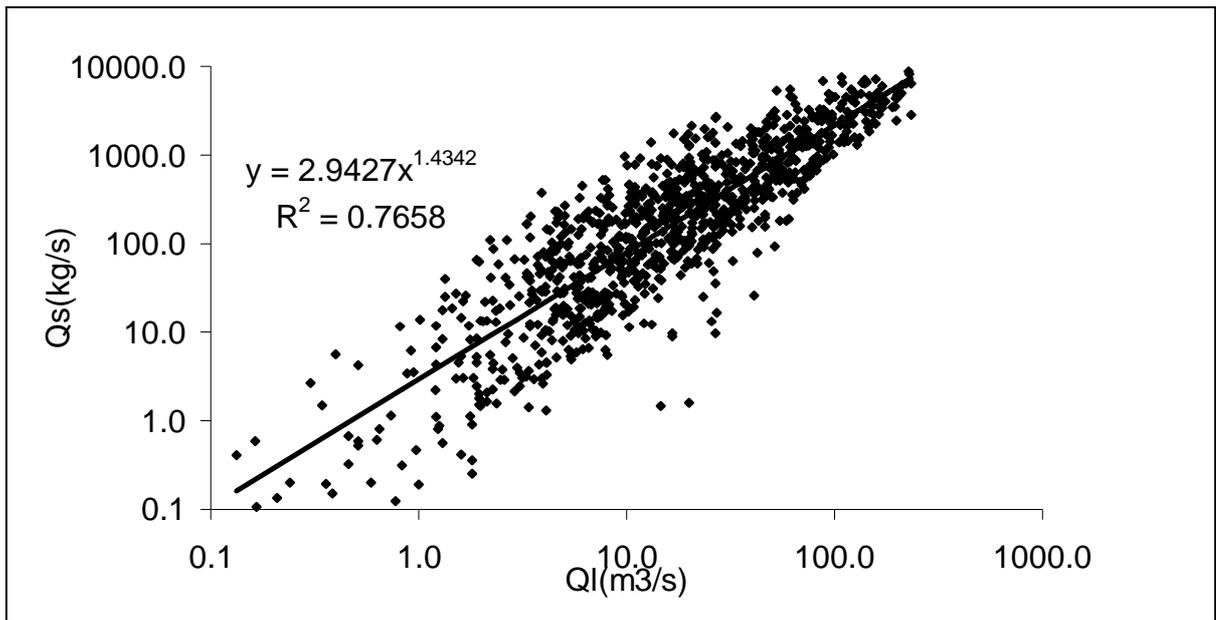


Figure 3.10 Corrélation débit liquide / débit solide en suspension pour la série des crues

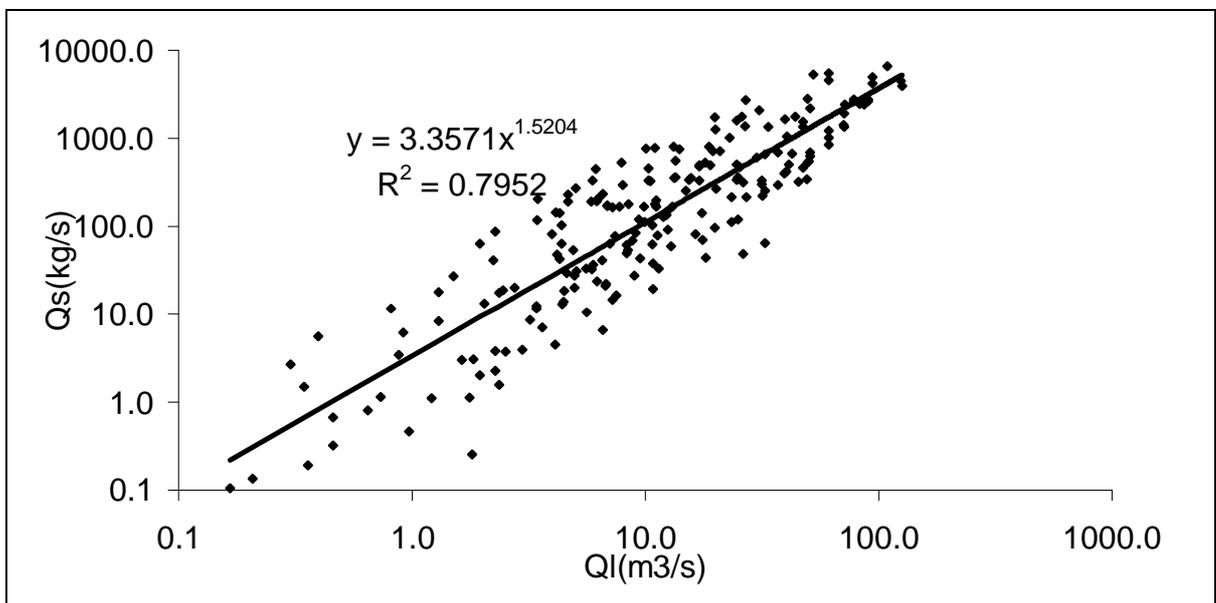


Figure 3.11 Corrélation débit liquide / débit solide en suspension pour les crues de la saison d'automne

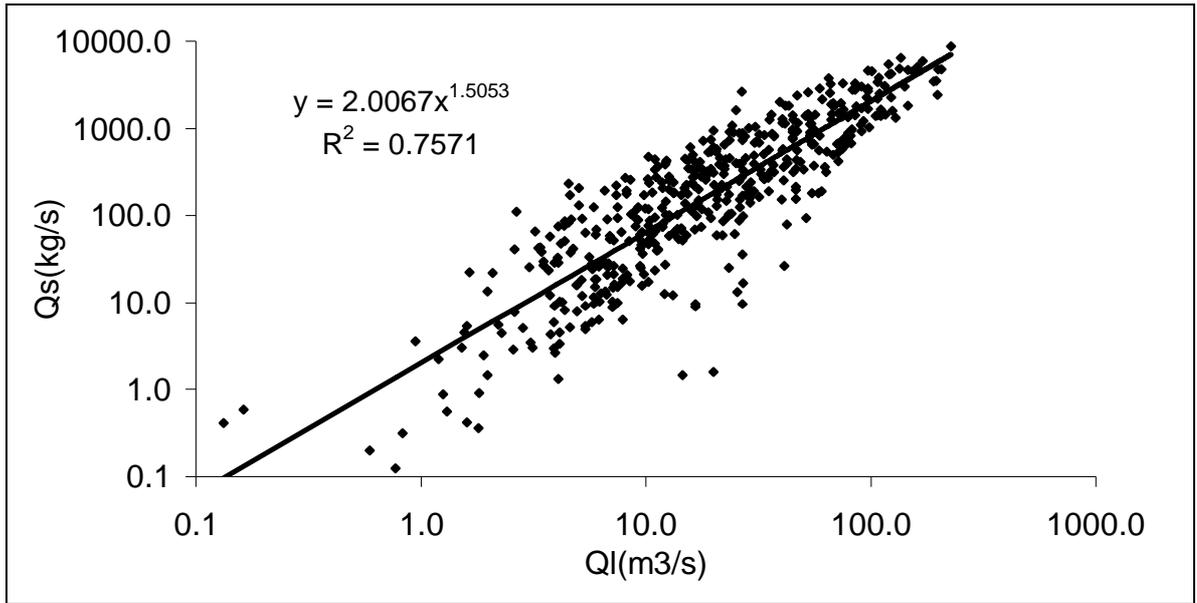


Figure 3.12 Corrélation débit liquide / débit solide en suspension pour les crues de la saison d'hiver

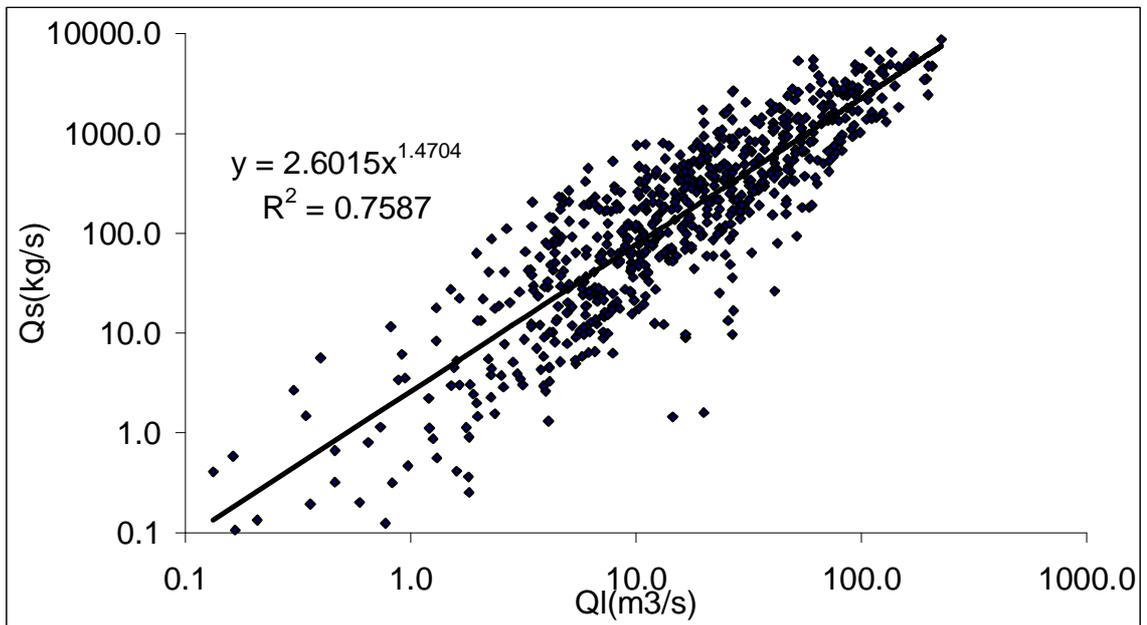


Figure 3.13 Corrélation débit liquide/débit solide en suspension pour les crues de la saison humide

Deux relations, très significatives, mettent en rapport le débit solide en suspension et le débit liquide sous la forme :

$$\text{Saison humide : } Q_s = 2.60 \cdot Q_l^{1.4} \quad (3.1)$$

$$\text{Saison sèche : } Q_s = 3.79 \cdot Q_l^{1.36} \quad (3.2)$$

Dont les coefficients de corrélation sont respectivement égaux à : 0.87 et 0.88

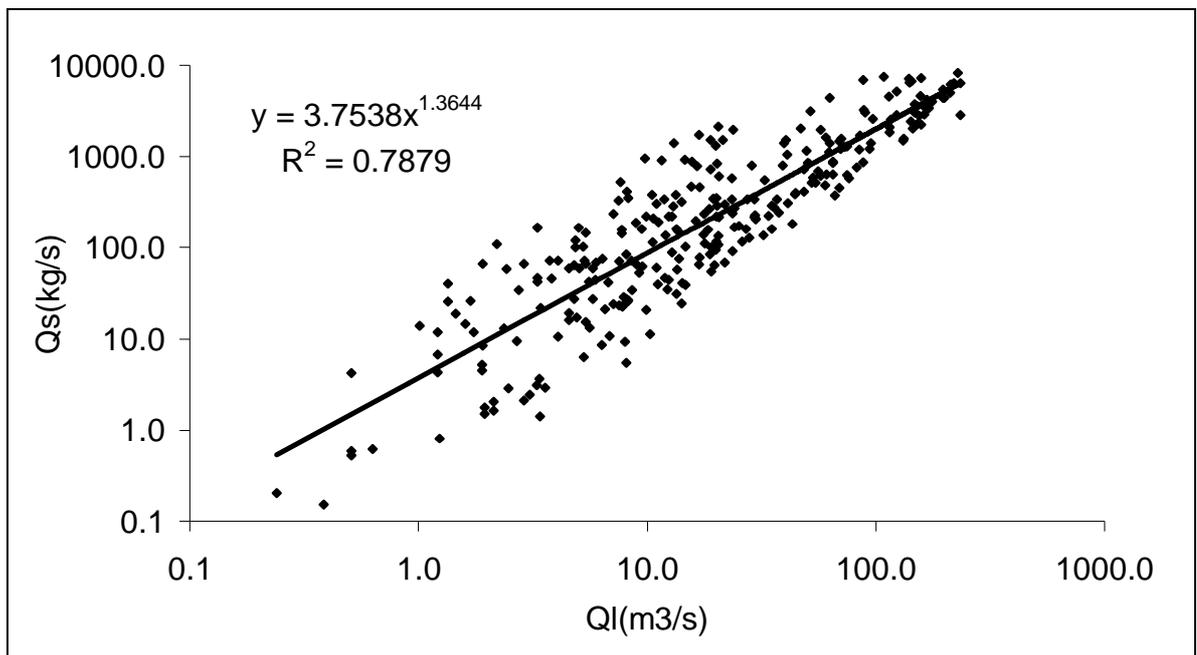


Figure 3.14 Corrélation débit liquide / débit solide en suspension pour les crues de la saison sèche

Sur la base des deux équations (3.1) et (3.2), nous avons calculé le débit solide en suspension journalier pour une période de 12 ans ; allant de 83/84 jusqu'à 94/95, les résultats sont présentés sur le tableau 3.9.

Tableau 3.9 : Distribution mensuelle et annuelle du transport solide en suspension (Qs)

| Ts (t) | sep   | oct    | nov    | déc    | jan    | fév    | mars   | avr    | mai   | juin  | juil | aou | Ts.10 <sup>6</sup><br>(t) |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|------|-----|---------------------------|
| 83/84  | 49    | 143    | 10381  | 11297  | 25872  | 46579  | 22022  | 12199  | 15792 | 11308 | 1337 | 466 | 0.16                      |
| 84/85  | 130   | 377219 | 109185 | 39051  | 25322  | 68993  | 89070  | 22249  | 15870 | 2970  | 599  | 208 | 0.81                      |
| 85/86  | 32    | 78     | 8736   | 2340   | 17471  | 200246 | 134046 | 15908  | 2101  | 5647  | 306  | 293 | 0.38                      |
| 86/87  | 311   | 1650   | 5063   | 182781 | 103235 | 585300 | 53402  | 8583   | 2684  | 937   | 476  | 350 | 0.94                      |
| 87/88  | 187   | 346    | 5333   | 4608   | 5915   | 1065   | 17782  | 2612   | 3600  | 1322  | 280  | 295 | 0.04                      |
| 88/89  | 2     | 465    | 1603   | 204812 | 15529  | 3811   | 151771 | 16731  | 5837  | 2158  | 290  | 501 | 0.40                      |
| 89/90  | 1158  | 388    | 896    | 985    | 5310   | 1131   | 2642   | 6411   | 2960  | 260   | 627  | 64  | 0.02                      |
| 90/91  | 0     | 10     | 630    | 7574   | 22577  | 54812  | 227852 | 48416  | 8922  | 4202  | 254  | 24  | 0.37                      |
| 91/92  | 24    | 538    | 6363   | 8988   | 438674 | 33467  | 155011 | 199132 | 53108 | 7792  | 2687 | 403 | 0.90                      |
| 92/93  | 31    | 893    | 2223   | 11394  | 5639   | 3020   | 15566  | 6354   | 6601  | 202   | 46   | < 1 | 0.05                      |
| 93/94  | 0     | 193    | 257    | 1360   | 27140  | 15894  | 1027   | 629    | 377   | 0     | 0    | 0   | 0.05                      |
| 94/95  | 12428 | 4456   | 2268   | 3111   | 119457 | 12130  | 212216 | 18101  | 12114 | 0     | 0    | 0   | 0.40                      |

(t) : tonne

3.3.2. Etablissement des corrélations débit liquide - concentration en matière en suspension (C/QI).

La relation entre la concentration en matière en suspension et le débit liquide d'un cours d'eau est une relation fondamentale dans le domaine du transport solide.

De l'établissement des corrélations C/QI de type linéaire, logarithmique, polynomiale, puissance et exponentielle pour les mêmes fichiers préparés auparavant, il ressort que les relations puissances et polynomiales donnent les meilleurs coefficients de corrélation.

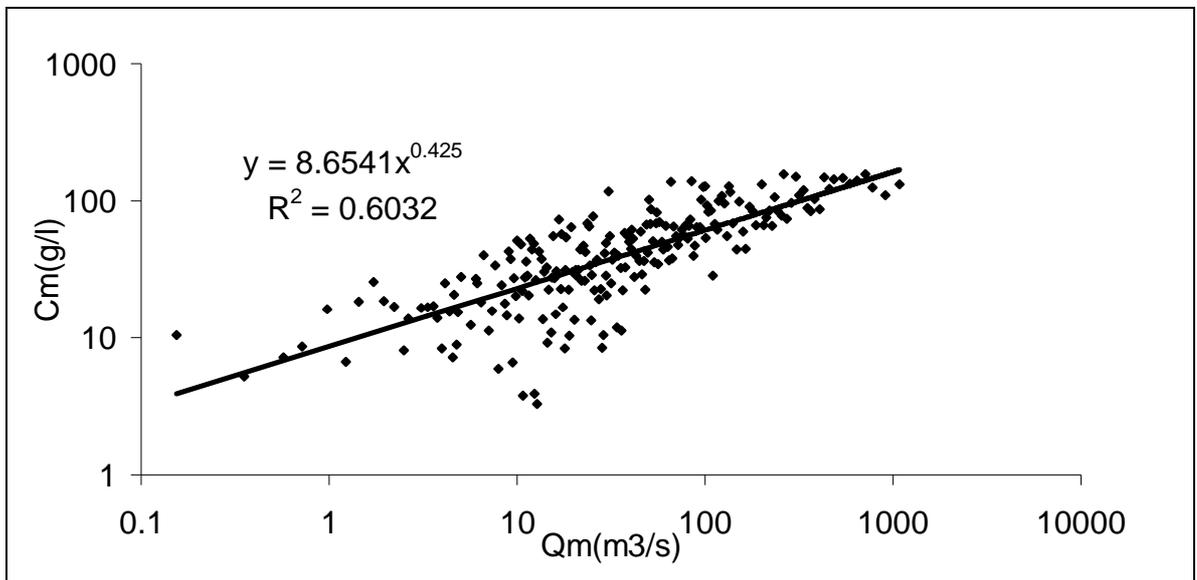


Figure 3.15 Corrélation débit liquide / concentration en matière en suspension pour toute la série

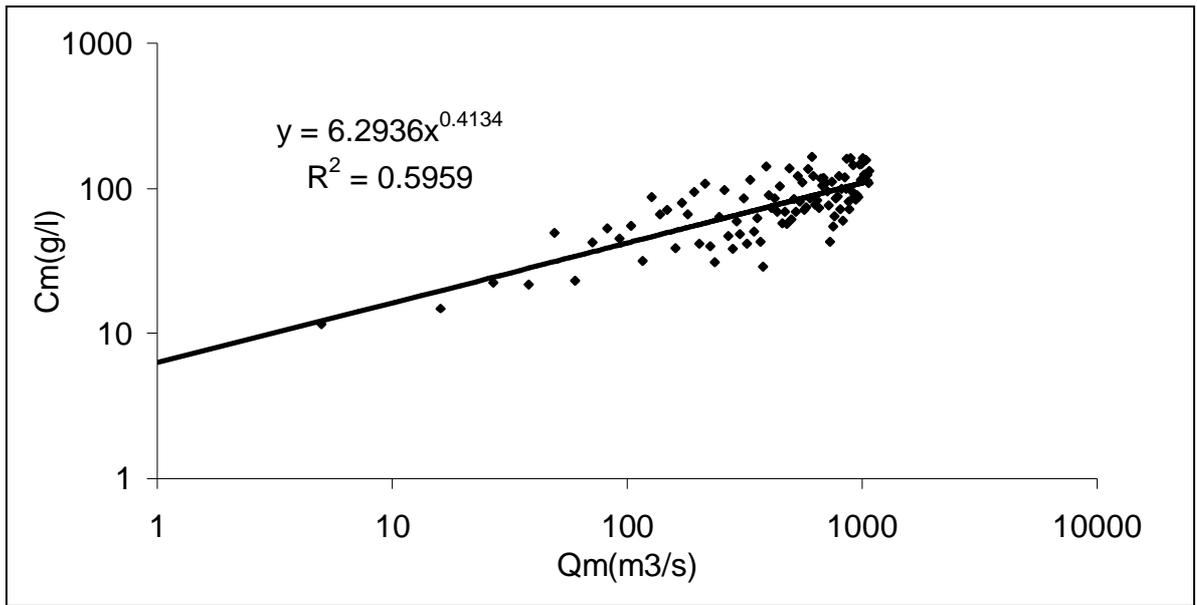


Figure 3.16 Corrélation débit liquide / concentration en matières en suspension  
Pour la série des crues

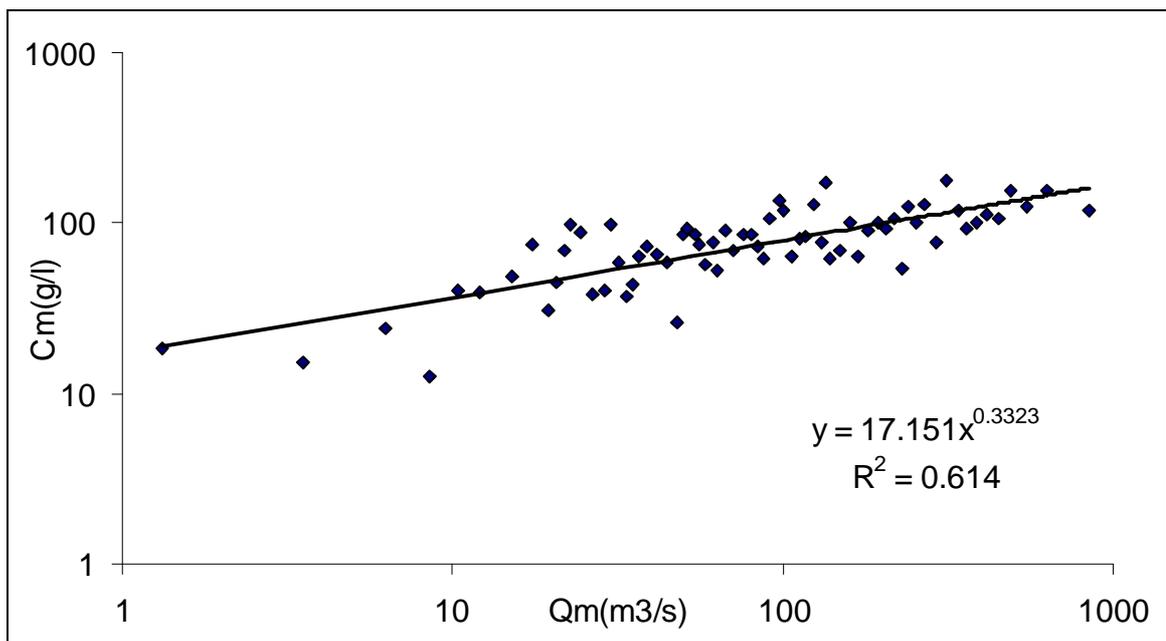


Figure 3.17 Corrélation débit liquide / concentration en éléments en suspension  
pour les crues de la saison humide

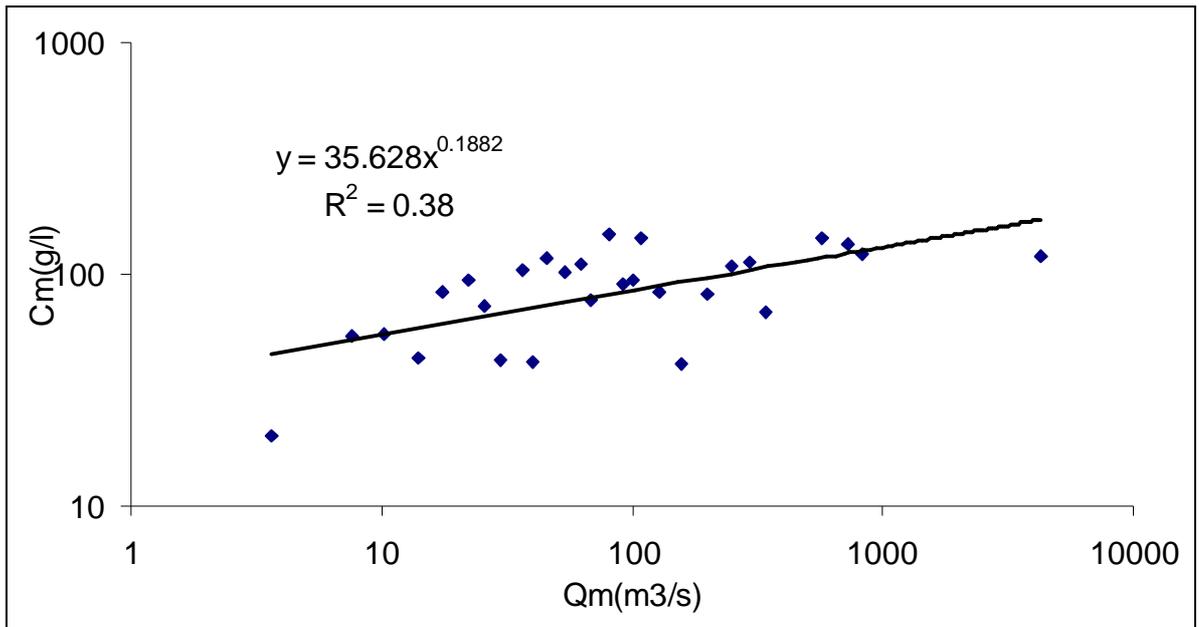


Figure 3.18 Corrélation débit liquide / concentration en matière en suspension pour les crues de la saison sèche

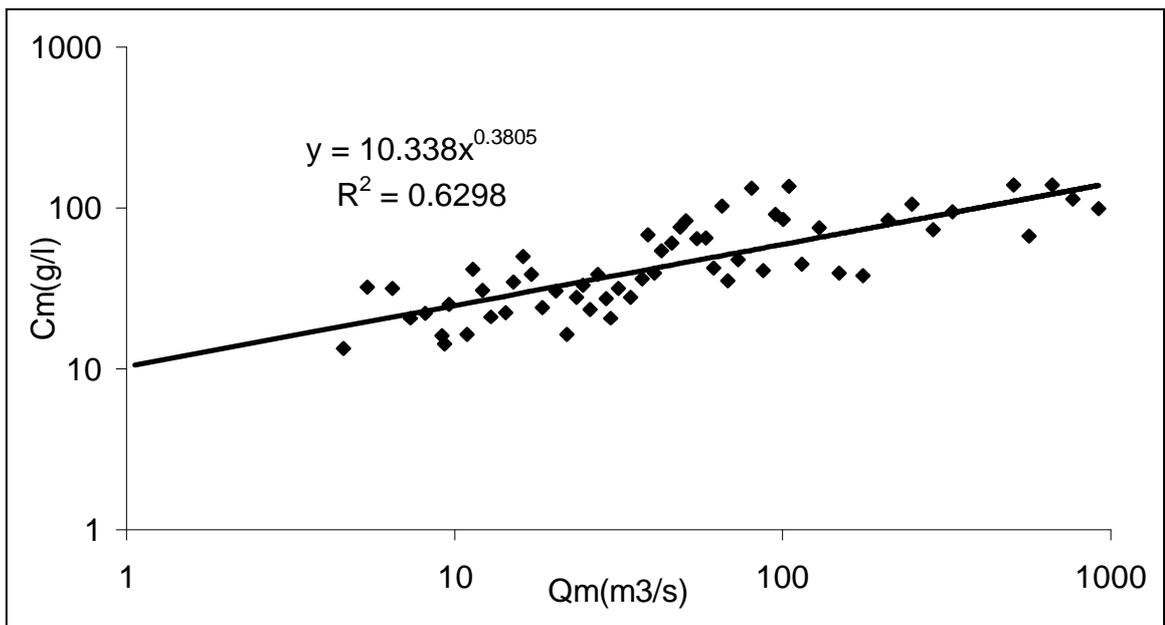


Figure 3.19 Corrélation débit liquide / concentration en éléments en suspension pour la saison du printemps

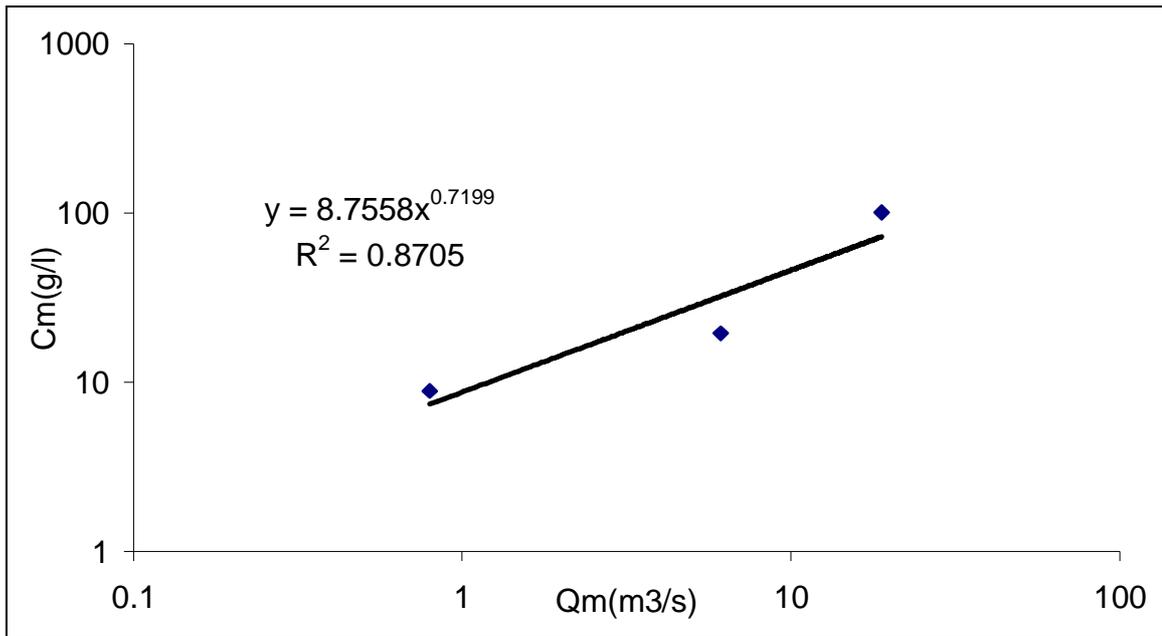


Figure 3.20 Corrélation débit liquide / concentration en matière en suspension pour la saison d'été

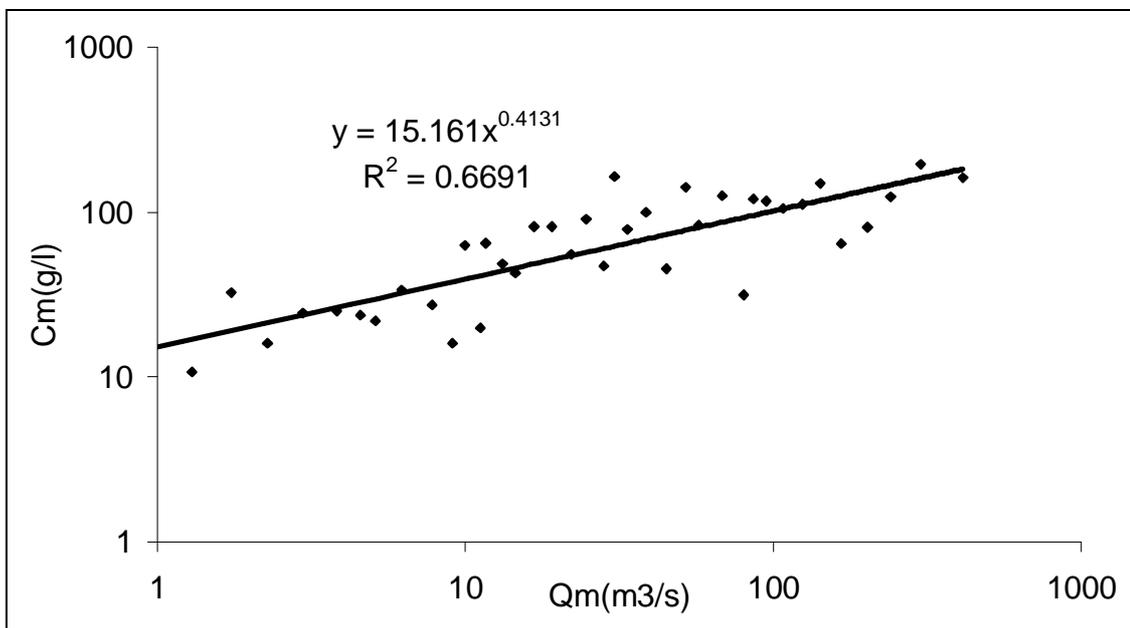


Figure 3.21 Corrélation débit liquide / concentration en matière en suspension pour la saison d'automne

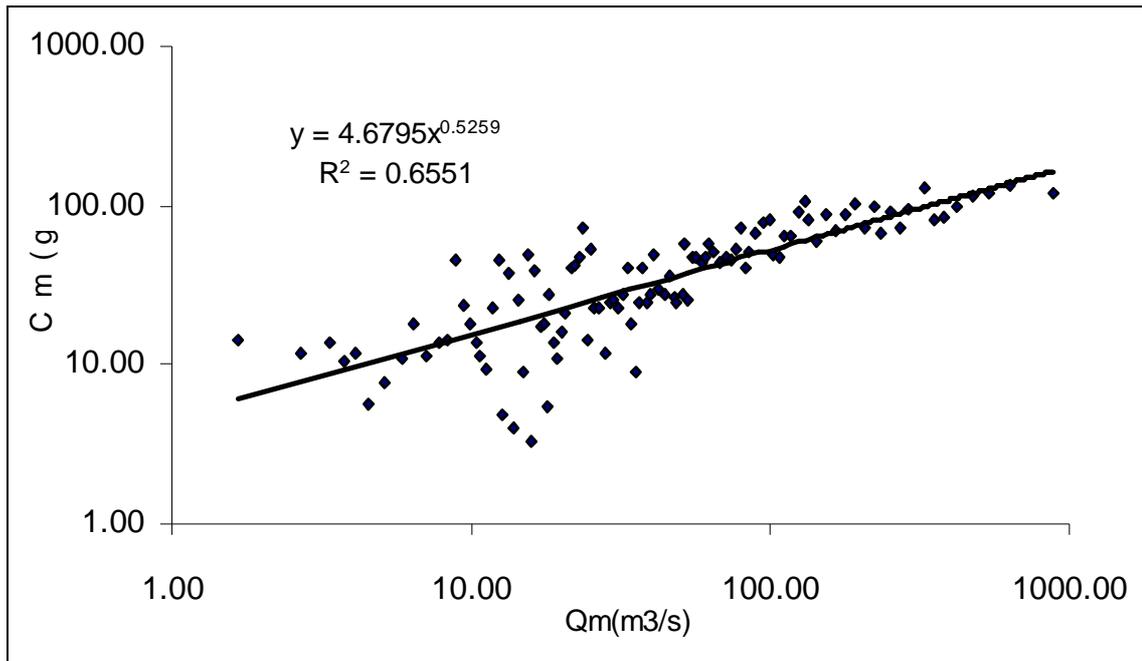


figure.3.22 Corrélation concentration en matière en suspension / débit liquide pour la série d'hiver

La concentration des sédiments en suspension et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance (ETCHANCHU et al. 1986 ; WALLING et al. 1981 ; WOOD, 1977).[21]

$$C = a \cdot Ql^b$$

La relation de type puissance qui donne le meilleur coefficient de corrélation est de la forme suivante :

$$C = 4.68 \cdot Ql^{0.52} \quad (3.3)$$

Avec  $R = 0.81$

Sur la base de cette équation nous avons calculé la concentration des sédiments en suspension journalière sur une période de 12 années de 83/84 à 94/95.

Le débit solide en suspension  $Qs$  est calculé par le produit de la concentration des sédiments en suspension  $C$  et le débit liquide durant la même période de référence (83/84 à 94/95). Les résultats sont illustrés sur le tableau 3.12

### 3.4 Calcul de transport solide de fond dans l'Oued Ebda

#### 3.4.1 Considérations générales

Généralement, le charriage est supposé égale à la capacité maximale de transport dans l'oued. Cette capacité dépend des caractéristiques des grains et des conditions hydrauliques de l'écoulement établi en régime uniforme.[18]

Le classement des granulats, d'American Geophysical Union est présenté sur le tableau suivant.

Tableau 3.9 : Echelles des tailles des particules ( AGU )

| Nom de la classe   |  | diamètre en (mm)   |
|--------------------|--|--|
| Grandes dimensions | Rochers : Très grands<br>Grands<br>Moyens<br>Petits                  | 4000 - 2000<br>2000 - 1000<br>1000 - 500<br>500 - 250              |
|                    | Galets : Gros<br>Petits  | 250 - 130<br>130 - 64  |
|                    | Graviers : Très grossier<br>Grossiers<br>Moyens<br>Fins<br>Très fins | 64 - 32<br>32 - 16<br>16 - 8<br>8 - 4<br>4 - 2                     |
| Petites dimensions | Sables : Très grossier<br>Grossier<br>Moyen<br>Fin<br>Très fin       | 2 - 1<br>1 - 0.5<br>0.5 - 0.25<br>0.25 - 0.125<br>0.125 - 0.062    |
|                    | Limon : Grossier<br>Moyen<br>Fin<br>Très fin                         | 0.062 - 0.031<br>0.031 - 0.016<br>0.016 - 0.008<br>0.008 - 0.004   |
|                    | Argile : Grossière<br>Moyenne<br>Fine<br>Très fine                   | 0.004 - 0.002<br>0.002 - 0.001<br>0.001 - 0.0005<br>0.0005-0.00024 |

AGU : American Geophysical Union [11]

Comparativement à la charge transportée en suspension, l'évaluation des quantités transportées par charriage présente beaucoup plus de difficultés. Ceci tient à la nature même du processus, mais également au fait que, le plus souvent, le charriage ne se produit qu'en période de crue. [6 ]

Une étude granulométrique, effectuée sur les éléments grossiers qui peuvent être charriés par l'oued a révélé que les particules grossières sont en pourcentage faible.

L'analyse granulométrique faite au laboratoire de l'A N B, pour la détermination du diamètre moyen charriés a donné une valeur de 10 mm pour le diamètre moyen (D50)

Tableau 3.10 : Situation des prélèvements d'échantillons des matériaux solides

| SECTION | ENDROIT   |
|---------|---|
| 1G/1D   | Sur oued El had à 200m en amont de la confluence oued El Had - oued ferhat  |
| 2G/2D   | Sur oued Ferhat à 2.5km en amont de la confluence oued El Had - oued Ferhat |
| 3G/3D   | Sur oued Ebda à 200m en amont du barrage (confluence)                       |
| 4G/4D   | Juste à l'amont du barrage (tour de prise)                                  |

L'analyse granulométrique faite au laboratoire de l'ANB donne les résultats suivants :

Tableau 3.11: Résultats des analyses granulométriques

| Section de prélèvement | 1G | 1D | 2G | 2D  | 3G   | 3D | 4G | 4D |
|------------------------|----|----|----|-----|------|----|----|----|
| D50 en mm              | 13 | 12 | 4  | 6.5 | 12.5 | 9  | 11 | 10 |

D'ou  $D_{50} \approx 10$  mm en prenant la moyenne des diamètres moyens de tous les échantillons

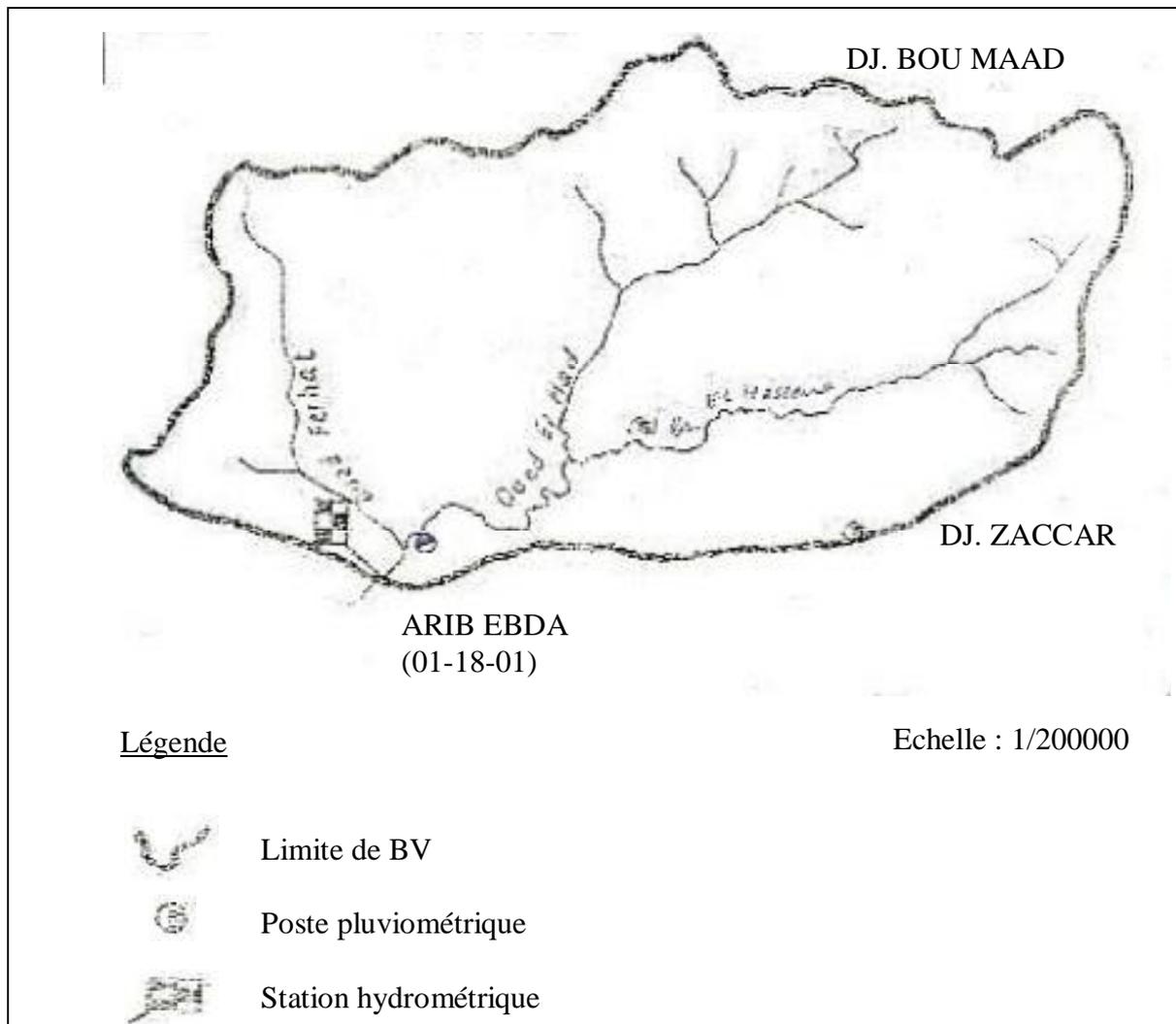


Figure 3.23 Carte de situation des prélèvements

### 3.4.2 Méthode de calcul :

Le charriage peut être calculé par les formules classiques du transport solide (Scheilds, Meyer Peter et Müller, Engeland-Hansen, Einstein, ...).

L'application de la formule de SDHEILDS pour le calcul du transport solide charrié dans l'Oued Ebda donne de bons résultats.

Cette formule se présente sous la forme suivante :

$$g_s = 10 \cdot q \cdot I(t - t_c) / ((r - r_s) - 1)^2 \cdot D_{50}$$

Avec :

$g_s$  : débit solide charrié par unité de largeur (t/s.m)

$q$  : débit liquide instantané (m<sup>3</sup>/s)

$I$  : la pente moyenne de l'Oued, exprimée en (%)

$\tau$  : la contrainte de cisaillement moyenne réelle (t/m<sup>2</sup>)

$$t = a \cdot r \cdot g \cdot R_h \cdot I$$

$\tau_{cr}$  : la contrainte de cisaillement sur le lit (t/m<sup>2</sup>)

$$t_{cr} = 0.06(g_s - g)D_{50}$$

$\rho$  : poids volumique de l'eau (t/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  : poids volumique du sédiment (t/m<sup>3</sup>)

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

$R_h$  : rayon hydraulique (m),

Pour un cours d'eau de largeur suffisamment grande par rapport à la profondeur, le rayon hydraulique est pratiquement égal à la profondeur.

En premier lieu nous allons voir ce que représente le paramètre ( $a$ )

$\alpha$  : est un facteur correctif prend en compte la rugosité du lit de l'Oued

La rugosité des berges et du fond entraîne des pertes de charge par frottement et celles-ci seront d'autant plus importantes que la rugosité sera grande; cette dernière dépend principalement de la nature des matériaux qui composent le lit . [6]

Différents formules prennent en compte la rugosité (Chezy, de Bazin, Darcy-Weisbach )mais la plus couramment utilisée est la formule de Manning –Strickler

La vitesse qui provoque le début de mise en mouvement (par charriage) est appelée vitesse de début d'entraînement.

$$V = K \cdot R_h \cdot I^{0.5}$$

$K$  : la rugosité de fond ( $k = k_r$ )

Lorsque le fond de l'oued devient mobile  $k$  prend une valeur inférieure à  $k_r$  notée  $k_s$  c'est la rugosité globale du lit .

Premier cas a = 1

$$\tau = \gamma \cdot Rh \cdot I$$

En utilisant les mêmes fichiers préparés au début de ce chapitre on peut évaluer les paramètres  $\tau$ ,  $\tau_{cr}$ ,  $g_s$ ,  $G_s$  sachant que  $G_s = g_s \cdot b$  ( $b = 54\text{m}$ , c'est la largeur de l'oued) La pente moyenne de l'oued égale à 0.0048 soit 0.48%.

Partant de l'hypothèse que le charriage ne se produit qu'en périodes de crues nous obtenons pour ce cas la relation liant le débit solide charrié au débit liquide de la forme :

$$G_s = 2.87 \cdot Ql^{1.21} \quad (3.4)$$

Avec  $R = 0.96$

Sur la base de cette relation, nous calculons le débit solide journalier charrié sur une période de 12 ans 1983/1984 à 1994/1995. Les résultats sont illustrés dans le tableau 3.12

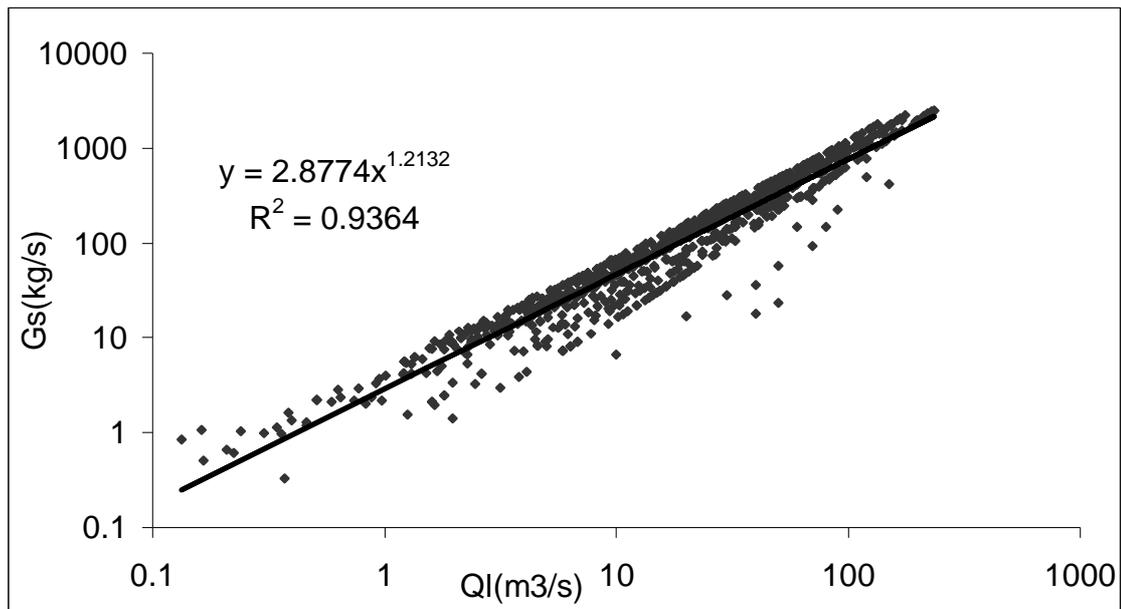


Figure 3.24 Corrélation débit liquide/ débit solide charrié pour la série des crues

Deuxième cas  $\alpha = (k_s / k_r)^{3/2}$

$$t' = a \cdot g \cdot Rh \cdot I$$

$k_s$  et  $k_r$  : les coefficients de Strickler du respectivement à la rugosité globale du lit et à celle des particules seules.

Kr est le coefficient de rugosité de fond est approché selon certains auteurs par les formules suivantes :

$$1- Kr = 26/(d_{90})^{1/6}$$

$$2- Kr = 26/(d_{50})^{1/6}$$

$$3- Kr = 26/(d_{65})^{1/6}$$

$$kr \text{ moy} = 40$$

$$\text{et } ks \text{ moy} = 22$$

D'ou  $a = 0.4$

Nous calculons :

$$gs' = 10 \cdot q \cdot I \cdot (t - tcr) / ((rs - r) - 1)^2 D_{50}$$

$$G's = b \cdot gs$$

Gs représente la quantité de charriage supposée réelle dans l'oued.

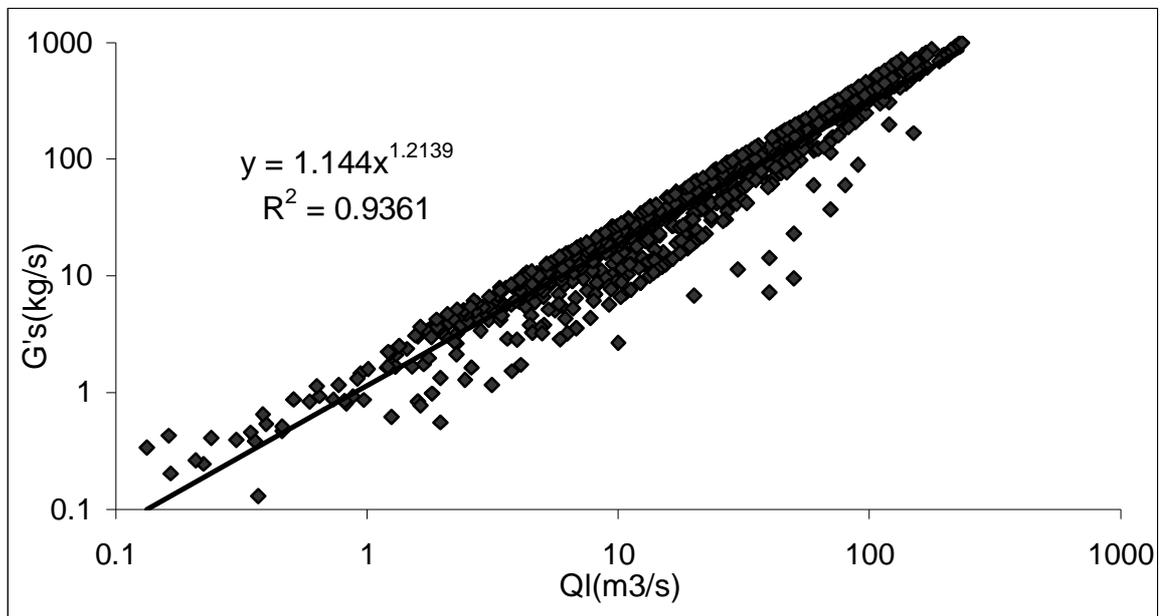


Figure 3.25 Corrélation débit liquide/débit solide charrié pour la série des crues ( $a=0.4$ )

Les corrélations  $G's/ Ql$  pour la série des crues bien observées, ont donné les meilleurs coefficients de corrélation, avec une relation de type puissance de la forme :

$$G's = 1.14 \cdot Ql^{1.21} \quad (3.5)$$

$R = 0.96$

Sur la base de cette relation, nous calculons le débit solide journalier charrié, supposé réel sur la même période 83/84 à 94/95, les résultats sont illustrés sur le tableau 3.12

Tableau 3.12 : Distribution mensuelle et annuelle des transports solides en suspension et par charriage (deuxième méthode : C/QI)

|       | Ts(t) | sep | oct    | nov    | déc    | jan    | fév     | mar    | avr   | mai   | jui   | juil | août | Ts*10 <sup>6</sup> (tonnes) |
|-------|-------|-----|--------|--------|--------|--------|---------|--------|-------|-------|-------|------|------|-----------------------------|
| 83/84 | Qs    | 71  | 187    | 20796  | 21373  | 50786  | 91581   | 31409  | 15955 | 21795 | 15563 | 1225 | 350  | 0.27                        |
|       | Gs    | 117 | 253    | 6877   | 9781   | 18725  | 33206   | 15665  | 9387  | 11392 | 8711  | 1120 | 418  | 0.11                        |
|       | G's   | 46  | 101    | 2736   | 3892   | 7450   | 13212   | 6233   | 3735  | 4532  | 3466  | 445  | 166  | 0.04                        |
|       | Wt    | 188 | 440    | 27673  | 31154  | 69511  | 124787  | 47074  | 25342 | 33187 | 24274 | 2345 | 768  | 0.38                        |
|       | W't   | 117 | 288    | 23532  | 25265  | 58236  | 104793  | 37642  | 19690 | 26327 | 19029 | 1670 | 516  | 0.31                        |
| 84/85 | QS    | 206 | 790159 | 221360 | 78628  | 168456 | 137620  | 180044 | 32402 | 21361 | 3080  | 470  | 138  | 1.63                        |
|       | Gs    | 267 | 192544 | 72044  | 24760  | 58659  | 45920   | 56050  | 17451 | 11526 | 2375  | 530  | 196  | 0.48                        |
|       | G's   | 106 | 76610  | 28665  | 9851   | 23339  | 18271   | 22301  | 6943  | 4586  | 945   | 211  | 78   | 0.19                        |
|       | Wt    | 473 | 982703 | 293404 | 103388 | 227115 | 183540  | 236094 | 49853 | 32887 | 5455  | 1000 | 334  | 2.11                        |
|       | W't   | 312 | 866769 | 250025 | 88479  | 191795 | 155891  | 202345 | 39345 | 25947 | 4025  | 681  | 216  | 1.82                        |
| 85/86 | QS    | 39  | 110    | 19701  | 4030   | 42506  | 415762  | 230591 | 21379 | 2259  | 7405  | 258  | 246  | 0.74                        |
|       | Gs    | 64  | 132    | 6999   | 3033   | 21290  | 107981  | 72926  | 10975 | 1886  | 4084  | 346  | 323  | 0.23                        |
|       | G's   | 25  | 52     | 2785   | 1207   | 8471   | 42964   | 29016  | 4366  | 750   | 1625  | 137  | 128  | 0.09                        |
|       | Wt    | 103 | 242    | 26700  | 7063   | 63796  | 523743  | 303517 | 32354 | 4145  | 11489 | 604  | 569  | 0.97                        |
|       | W't   | 64  | 162    | 22486  | 5237   | 50977  | 458726  | 259607 | 25745 | 3009  | 9030  | 395  | 374  | 0.83                        |
| 86/87 | Qs    | 456 | 2831   | 10268  | 379829 | 205445 | 1256709 | 80787  | 10594 | 2727  | 820   | 366  | 246  | 1.95                        |
|       | Gs    | 482 | 1970   | 4766   | 98734  | 68233  | 268360  | 32740  | 6839  | 2163  | 848   | 425  | 322  | 0.48                        |
|       | G's   | 192 | 784    | 1896   | 39285  | 27149  | 106777  | 13026  | 2721  | 860   | 337   | 169  | 128  | 0.19                        |
|       | Wt    | 938 | 4801   | 15034  | 478563 | 273678 | 1525069 | 113527 | 17433 | 4890  | 1668  | 791  | 568  | 2.43                        |
|       | W't   | 648 | 3615   | 12164  | 419114 | 232594 | 1363486 | 93813  | 13315 | 3587  | 1157  | 535  | 374  | 2.14                        |
| 87/88 | Qs    | 280 | 502    | 9894   | 8300   | 10716  | 1638    | 26764  | 2927  | 4521  | 1464  | 240  | 253  | 0.07                        |
|       | Gs    | 290 | 530    | 5162   | 5049   | 6270   | 1467    | 11401  | 2204  | 2718  | 1128  | 291  | 306  | 0.04                        |
|       | G's   | 115 | 210    | 2054   | 2008   | 2495   | 584     | 4536   | 877   | 1081  | 449   | 116  | 121  | 0.01                        |
|       | Wt    | 570 | 1032   | 15056  | 13349  | 16986  | 3105    | 38165  | 5131  | 7239  | 2592  | 531  | 559  | 0.10                        |
|       | W't   | 395 | 712    | 11948  | 10308  | 13211  | 2222    | 31300  | 3804  | 5602  | 1913  | 356  | 374  | 0.08                        |
| 88/89 | Qs    | 2   | 817    | 3176   | 452157 | 28884  | 6755    | 335221 | 23045 | 6851  | 2315  | 251  | 458  | 0.86                        |
|       | Gs    | 7   | 540    | 1570   | 96388  | 14408  | 4310    | 69729  | 11958 | 4594  | 1952  | 300  | 492  | 0.20                        |
|       | G's   | 2   | 215    | 622    | 38217  | 5712   | 1709    | 27647  | 4741  | 1821  | 774   | 119  | 195  | 0.08                        |
|       | Wt    | 9   | 1357   | 4746   | 548545 | 43292  | 11065   | 404950 | 35003 | 11445 | 4267  | 550  | 950  | 1.06                        |

|       |     |       |       |       |        |         |        |        |        |        |       |      |     |      |
|-------|-----|-------|-------|-------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|------|-----|------|
|       | W't | 4     | 1032  | 3798  | 490374 | 34596   | 8464   | 362868 | 27786  | 8672   | 3089  | 370  | 653 | 0.94 |
| 89/90 | Qs  | 1926  | 639   | 1413  | 1521   | 9570    | 1787   | 2729   | 8337   | 3379   | 184   | 515  | 40  | 0.03 |
|       | Gs  | 1494  | 501   | 1218  | 1363   | 5345    | 1511   | 2126   | 5551   | 2313   | 248   | 548  | 61  | 0.02 |
|       | G's | 592   | 199   | 483   | 540    | 2119    | 599    | 843    | 2201   | 917    | 98    | 217  | 24  | 0.01 |
|       | Wt  | 3420  | 1140  | 2631  | 2884   | 14915   | 3298   | 4855   | 13888  | 5692   | 432   | 1063 | 101 | 0.05 |
|       | W't | 2518  | 838   | 1896  | 2061   | 11689   | 2386   | 3572   | 10538  | 4296   | 282   | 732  | 64  | 0.04 |
| 90/91 | QS  | 0     | 12    | 999   | 14111  | 47299   | 106569 | 461961 | 77580  | 10844  | 4557  | 181  | 11  | 0.72 |
|       | Gs  | 0     | 20    | 847   | 6875   | 19934   | 40677  | 113295 | 38552  | 6746   | 3511  | 234  | 26  | 0.23 |
|       | G's | 0     | 8     | 336   | 2725   | 7904    | 16128  | 44920  | 15285  | 2674   | 1392  | 92   | 10  | 0.09 |
|       | Wt  | 0     | 32    | 1846  | 20986  | 67233   | 147246 | 575256 | 116132 | 17590  | 8068  | 415  | 37  | 0.95 |
|       | W't | 0     | 20    | 1335  | 16836  | 55203   | 122697 | 506881 | 92865  | 13518  | 5949  | 273  | 21  | 0.81 |
| 91/92 | QS  | 29    | 796   | 12380 | 16502  | 1328800 | 64131  | 283414 | 393304 | 87925  | 9436  | 2868 | 349 | 2.20 |
|       | Gs  | 51    | 789   | 6326  | 9535   | 222043  | 26767  | 83440  | 103203 | 31385  | 6237  | 2295 | 414 | 0.49 |
|       | G's | 20    | 313   | 2508  | 3780   | 88038   | 10613  | 33083  | 40919  | 12443  | 2473  | 910  | 164 | 0.19 |
|       | Wt  | 80    | 1585  | 18706 | 26037  | 1550843 | 90898  | 366854 | 496507 | 119310 | 15673 | 5163 | 763 | 2.69 |
|       | W't | 49    | 1109  | 14888 | 20282  | 1416838 | 74744  | 316497 | 434223 | 100368 | 11909 | 3787 | 513 | 2.39 |
| 92/93 | Qs  | 35    | 1393  | 4040  | 25555  | 10007   | 5180   | 21957  | 8353   | 8801   | 134   | 24   | 0.2 | 0.08 |
|       | Gs  | 67    | 1225  | 2485  | 9166   | 6119    | 3568   | 10529  | 4645   | 4875   | 204   | 47   | 1   | 0.04 |
|       | G's | 26    | 486   | 985   | 3634   | 2426    | 1415   | 4174   | 1842   | 1933   | 80    | 18   | 0.4 | 0.02 |
|       | Wt  | 102   | 2618  | 6525  | 34721  | 16126   | 8748   | 32486  | 12998  | 13676  | 338   | 71   | 1.2 | 0.12 |
|       | W't | 61    | 1879  | 5025  | 29189  | 12433   | 6595   | 26131  | 10195  | 10734  | 214   | 42   | 0.6 | 0.10 |
| 93/94 | Qs  | 0     | 194   | 373   | 2210   | 67275   | 30476  | 999    | 585    | 316    | 0     | 0    | 0   | 0.10 |
|       | Gs  | 0     | 222   | 394   | 1757   | 19031   | 12886  | 954    | 619    | 398    | 0     | 0    | 0   | 0.03 |
|       | G's | 0     | 88    | 156   | 696    | 7545    | 5109   | 378    | 245    | 157    | 0     | 0    | 0   | 0.01 |
|       | Wt  | 0     | 416   | 767   | 3967   | 86306   | 43362  | 1953   | 1204   | 714    | 0     | 0    | 0   | 0.13 |
|       | W't | 0     | 282   | 529   | 2906   | 74820   | 35585  | 1377   | 830    | 473    | 0     | 0    | 0   | 0.11 |
| 94/95 | Qs  | 28572 | 34801 | 4103  | 6240   | 334367  | 22687  | 488446 | 24100  | 16471  | 0     | 0    | 0   | 1.06 |
|       | Gs  | 9501  | 12206 | 2612  | 2955   | 83425   | 11121  | 120426 | 12732  | 9433   | 0     | 0    | 0   | 0.26 |
|       | G's | 3767  | 4839  | 1035  | 1171   | 33077   | 4409   | 47748  | 5048   | 3740   | 0     | 0    | 0   | 0.10 |
|       | Wt  | 38073 | 47007 | 6715  | 9195   | 517792  | 33808  | 608872 | 36832  | 25904  | 0     | 0    | 0   | 1.32 |
|       | W't | 32339 | 39640 | 5138  | 7411   | 467444  | 27096  | 536194 | 29148  | 20211  | 0     | 0    | 0   | 1.16 |

### 3.5. Calcul du transport solide total et du taux d'érosion spécifique :

#### 3.5.1. Calcul du transport solide total

Au niveau de chaque émissaire le débit solide total est égale à la somme de deux débits solides (en suspension et par charriage).

a. Cas :  $\tau = \gamma * Rh * I$

Le transport solide total est donné par :

$$Wt = Qs + Gs$$

b. Cas :  $\tau' = 0.4 * \gamma * Rh * I$

Le transport solide total supposé réel est donné par

$$W't = Qs + G's$$

Les résultats de calcul sont cités dans le tableau 3.12

Les valeurs de l'apport solide moyen annuel (supposé réel) sont estimée respectivement à : 469166 tonnes / an et 893802 tonnes / an pour la première et la deuxième méthode.

#### 3.5.2. Calcul du taux d'érosion spécifique

En appliquant la relation  $E's = W't / A$ , où A est la superficie du bassin et w't est le transport solide total (en suspension et par charriage) annuel supposé réel, nous pourrions estimer le taux d'érosion spécifique approprié au bassin versant de l'Oued Ebda pour la période 83/84 jusqu'à 94/95.

Pour la première méthode la dégradation spécifique moyenne est estimée à 1715 tonnes / km<sup>2</sup>.an ; et à 3274 tonnes / km<sup>2</sup>.an pour la deuxième méthode.

## CHAPITRE 4

### RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### 4.1. Discussion des résultats sur le plan quantitatif et qualitatif

Dans cette étude nous avons évalué le transport solide en suspension et celui de fond dans le bassin versant de l'oued Ebda.

\*Pour la suspension, nous avons appliqué deux modèles :

- 1- Etablissement d'un modèle régressif reliant le débit liquide au débit solide en suspension.
- 2- Etablissement d'un modèle régressif reliant la concentration en matière en suspension au débit liquide.

\*Pour le charriage, nous avons appliqué le modèle de Shields pour deux cas:

-Le premier  $a = 1 \Rightarrow \tau = \tau_{Max}$

-Le deuxième  $a = 0.4 \Rightarrow \tau = a * \tau_{Max}$

Dans le deuxième cas la quantité charriée est supposée réelle.

Les résultats obtenus peuvent être discutés à la fois sur le plan qualitatif et quantitatif :

##### 4.1.1. Sur le plan qualitatif.

Les résultats du modèle d'ajustement (débit liquide / débit solide) et (débit liquide / concentration en éléments en suspension) sont encourageants,

\*A l'échelle annuelle ; le coefficient de corrélation est significatif du fait que 87% de la variable des débits solide est expliquée par le modèle reliant le débit liquide au débit solide ; et 78 % de la variable des concentrations en matière en suspension sont expliquées par le modèle reliant le débit liquide au concentration en matière en suspension.

\*A l'échelle des crues ; les corrélations sont significatives, pour les deux modèles.

A l'échelle saisonnière, le degré de signification varie d'une saison à une autre mais les liaisons (débit liquide/ concentration en matière en suspension) et (débit liquide/ débit solide) restent en générale significatives ; excepté le cas des crues de la saison sèche, nous avons obtenus un coefficient de corrélation de 0.61 pour le deuxième modèle.

#### 4.1.2. Sur le plan quantitatif.

Avant d'interpréter les résultats sur le plan quantitatif il y'a lieu de faire une comparaison des résultats;

##### 4.1.2.1. Calcul du taux d'érosion par la méthode de Téxeront :

$$Ta = a * R^{0.15}$$

Tel que :

a = 1400 correspond aux sols à moyenne à faible perméabilité.

R : la lame d'eau ruisselée en (mm/an) ;

$R = Po - Dm$  ; Po est la pluviométrie moyenne annuelle en (mm).

Dm : le déficit d'écoulement moyen annuel (mm) est donné par la formule de M. Turc [15]

$$Dm = Po / \sqrt{0.9 + Po^2 / L^2}$$

Le paramètre L à pour expression:

$$L = 300 + 25 \cdot t + 0.05 \cdot t^3$$

$Ta = 2730$  tonnes / km<sup>2</sup>.an

Cette valeur indique seulement le transport solide en suspension ; la partie du charriage n'étant pas prise en compte.

Tableau 4.1 : Comparaison des résultats des apports solides et du taux d'érosion

| Méthodes<br>Paramètres     | 1 <sup>ère</sup> méthode<br>modèle Qs/Ql |        | 2 <sup>ème</sup> méthode<br>modèle C/Ql |         | APD* | Tixeront |
|----------------------------|--|--------|---|---------|------|----------|
|                            | a=1                                      | a=0.4  | a=1                                     | a=0.4   |      |          |
|                            | Apps(tonne/an)                           | 590772 | 469014                                  | 1025706 |      |          |
| Es (t/km <sup>2</sup> .an) | 2164                                     | 1718   | 3757                                    | 3274    | 3150 | 2730     |

APD\* : étude d'avant projet détaillés du barrage de Sidi Ben Taïba. [20]

Il ressort du tableau les remarques suivantes :

La valeur de l'apport solide moyen annuel supposé réel estimé par la deuxième méthode est presque le double de celle estimé par la première méthode.

L'apport solide moyen annuel obtenu par la deuxième méthode est de 894052 tonnes/an. Il correspond approximativement à la détermination effectuée dans l'étude d'avant projet détaillés du barrage de Sidi Ben Taïba.

Rappelant que l'apport solide moyen annuel déterminé dans le cadre de l'étude d'avant projet détaillée du barrage de Sidi Ben Taïba, correspond à la l'évaluation effectuée auparavant par le bureau d'étude SOGREAH dans l'étude de faisabilité du barrage.

L'érosion spécifique obtenue par la formule de Tixeront et celle trouvée dans l'étude d'avant projet détaillée semble très assimilable avec la valeur estimée réellement par les calculs de la deuxième méthode.

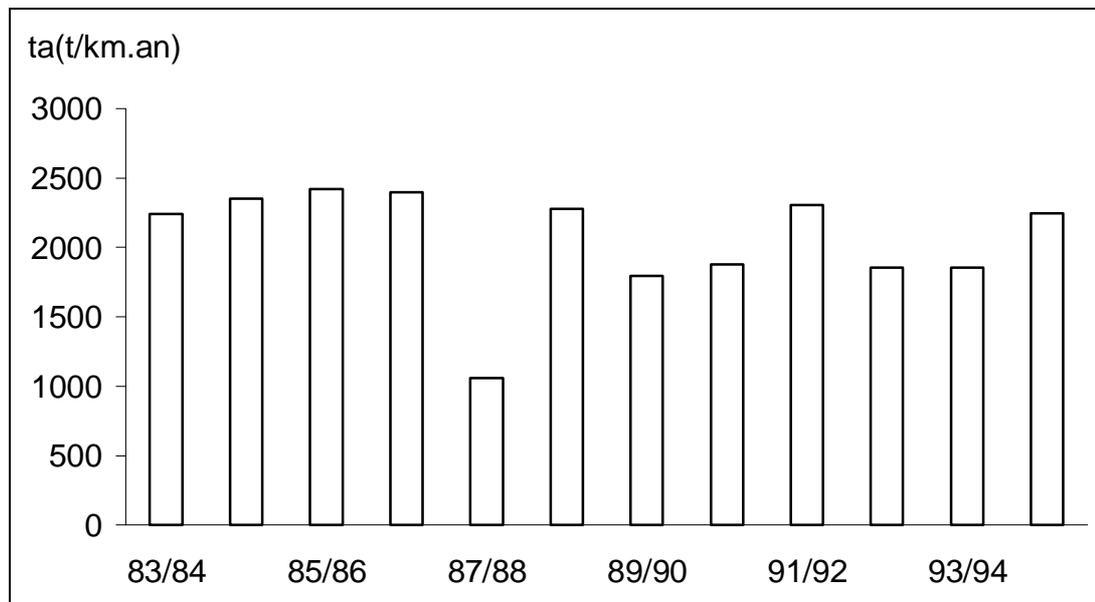


Figure 4.1 : Dégradation spécifique annuelle selon Tixeront

Tixeront tient compte de la pluviométrie et la perméabilité du terrain, et donne un taux d'érosion moyen qui s'approche de notre résultat,

Trois zones sont définies dans l'étude de Tixeront :

- Zone où la pluie annuelle est inférieure à 300 mm, elle est insuffisante pour causer une érosion importante.

- Zone où la pluie annuelle est comprise entre 300 et 700mm, l'érosion spécifique est très active ( $E_s > 1200\text{t/km}^2.\text{an}$ )
- Zone où la pluie annuelle est supérieure à 700 mm qui bénéficie d'un couvert végétal protecteur, l'érosion spécifique ( $E_s < 350\text{ t/km}^2.\text{an}$ )

Il admet que lorsque la pluie annuelle dépasse un certains taux, l'effet de substratum peut se trouver masqué par l'effet de la végétation qui assure une excellente protection quelle que soit la nature du terrain. [2]

La pluie annuelle dans notre bassin dépasse généralement 700 mm, et la dégradation spécifique est plus de 3000 t/km<sup>2</sup>.an, donc nous pouvons dire que le couvert végétal n'arrive pas à masquer l'effet du substratum.

Nous pouvons déduire que l'érosion pourrait varier en fonction de la perméabilité du terrain (lithologie), du relief et du climat (pluviométrie) ; la forme du bassin a aussi son influence sur le phénomène.

A l'examen du bassin versant de Oued-Ebda, nous constatons que :

La courbe hypsométrique du bassin indique très bien l'absence de plaine alluviale (altitude < 400 m : 6%) pouvant freiner ou laminer les crues ; la lithologie caractérisée exclusivement par des calcs schistes marneux imperméables qui occupent près de 50% de la superficie du bassin ; de plus, la pente assez élevée et la forme ramassée du bassin laissant supposer un temps de concentration court ; une vitesse d'écoulement élevée et une forte érosion ; ainsi que des ravines le long du versant présentent une forte sensibilité à l'érosion du bassin.

L'utilisation de la formule de GAVRILOVIC et l'estimation de la valeur du coefficient d'érosion ( $Z = 0.9$ ) ; nous a permis d'éprouvé le résultat du taux d'érosion élevé obtenu par le calcul, en évaluant le degré d'évolution de l'érosion qui correspond à un terrain fortement érodé en présence des processus de l'érosion en profondeur.

Il ressort de notre comparaison que le deuxième modèle estime mieux le transport solide dans l'oued Ebda que le premier modèle

Tableau 4.2 : Rapport entre le transport solide moyen annuel en suspension obtenu par les deux méthodes.

| année   | 83/84     | 84/85 | 85/86 | 86/87 | 87/88 | 88/89 | 89/90 | 90/91 | 91/92 | 92/93 | 93/94 | 94/95 |
|---------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| %Ts/T's | 0.58      | 0.49  | 0.52  | 0.48  | 0.64  | 0.46  | 0.71  | 0.51  | 0.41  | 0.6   | 0.45  | 0.48  |
| %moy    | <b>52</b> |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

On remarque du tableau 4.2 et de la figure 4.2 que le rapport moyen entre les transports solides moyens annuels en suspension obtenus par l'établissement du modèle Qs/Ql et ceux obtenus par l'établissement du modèle C/Ql ; avec  $Q_s = C \cdot Q_l$  est de 52% ;

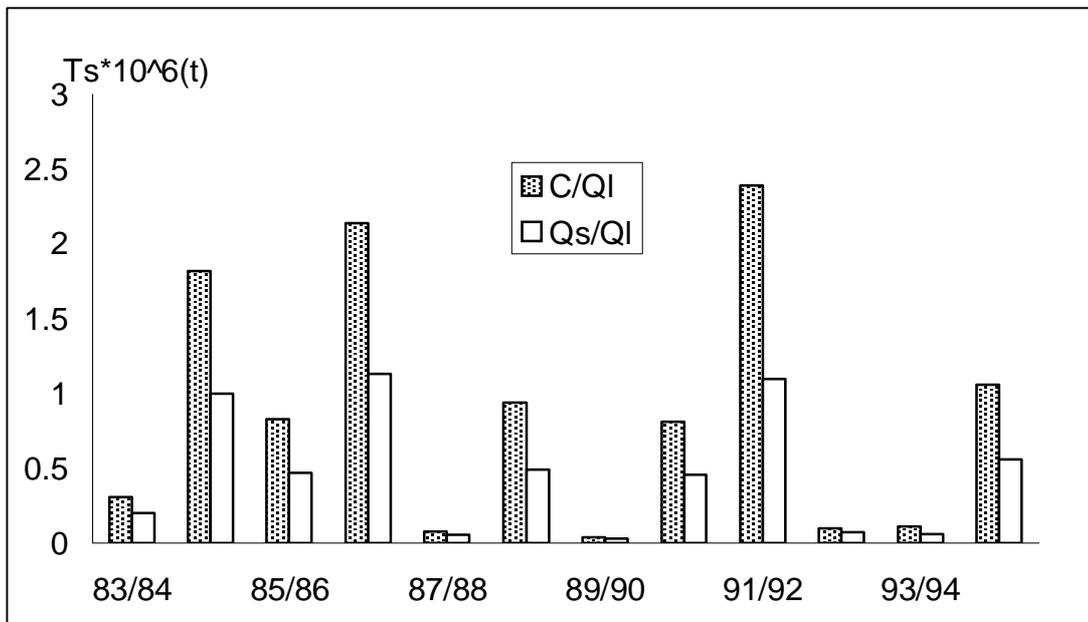


Figure 4.2 : Comparaison des résultats du transport solide des deux méthodes

De cette remarque on peut déduire que les modèles :  $Q_s = 2.6 \cdot Q_l^{1.4}$  et  $Q_s = 3.79 \cdot Q_l^{1.36}$  de la première méthode sous-estiment le débit solide jusqu'à 52% ;

FERGUSSON (1986) a démontré que l'équation  $Q_s = a \cdot Q_l^b$  sous estimait le débit solide jusqu'à 50% et a proposé un facteur correctif basé sur des considérations statistiques. [21]

Il faut aviser que le but recherché, à travers de faire ce calcul est la détermination d'un ordre de grandeur du taux d'érosion et du transport solide plus qu'un calcul précis.

#### 4.2. Débat des résultats de la deuxième méthode.

##### 4.2.1. Transport solide en suspension :

Les résultats obtenus par la deuxième méthode montrent que les volumes de sédiments en suspension les plus importants sont offerts par les années 84/85, 86/87, 91/92 avec un ordre d'augmentation double à triple même plus en comparaison aux autre années.

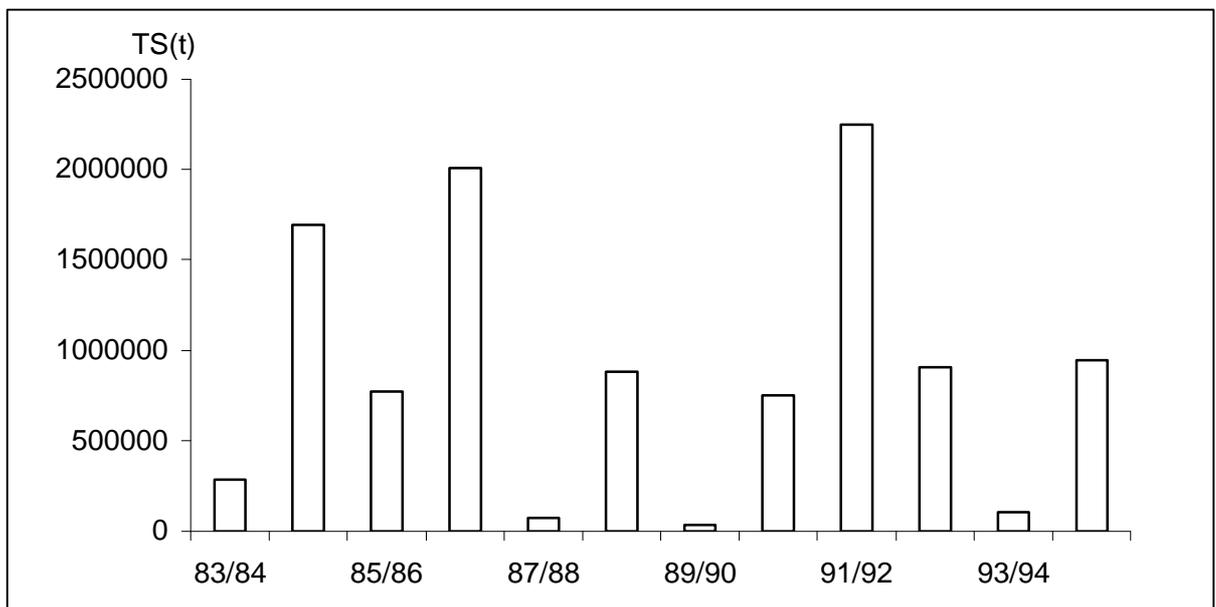


Figure 4.3 : variation annuelle du transport solide en suspension

La crue d'octobre 1984 offre un volume de sédiments en suspension de 0.8 millions de tonnes qui est équivalent à 48 % de volume total annuel de la suspension et 43 % du volume total de transport solide de la même année.

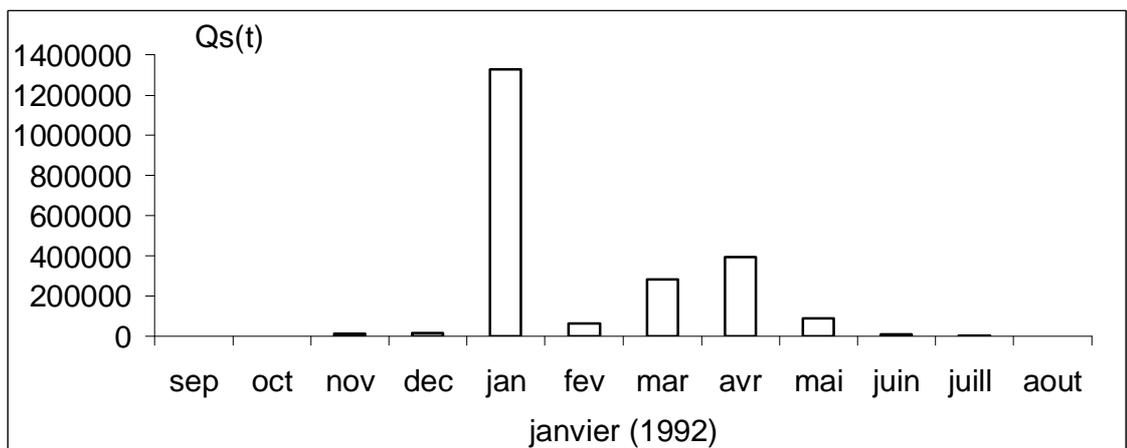
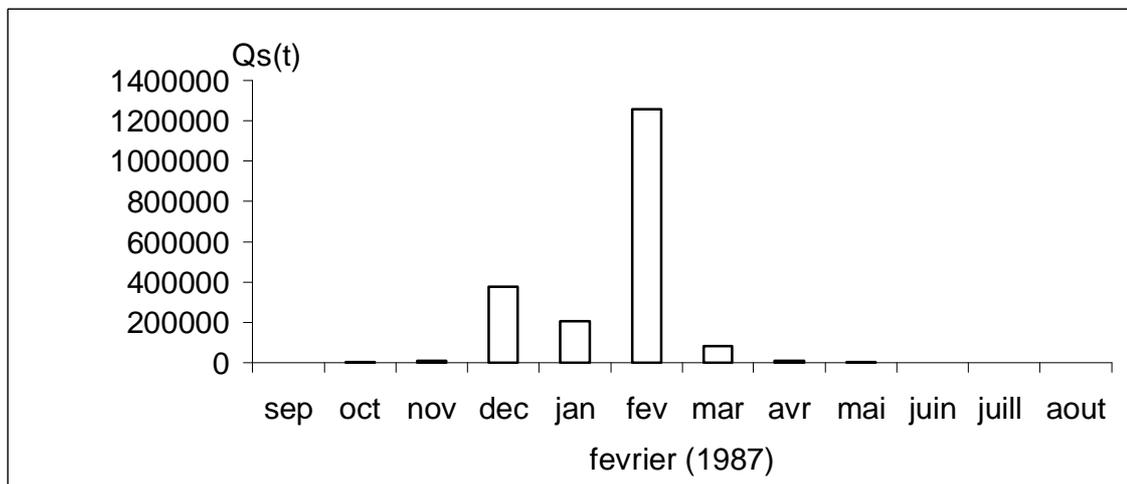
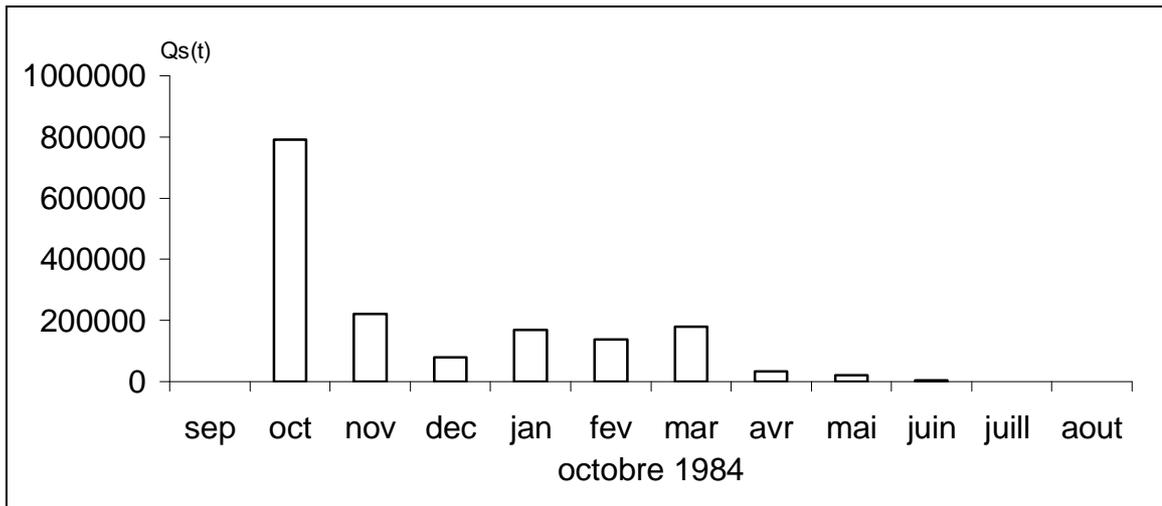


Figure 4.4 : Variation saisonnière du transport solide

En effet la crue de janvier 1992 avait totalisé un volume de l'ordre de 1.32 millions de tonnes soit 59 % du volume total annuel de la suspension et 55% du volume total annuel du transport solide (w't).

Nous constatons en général que les volumes les plus importants de transport solide en suspension se concentrent dans les mois d'octobre, décembre et de janvier jusqu'à mars.

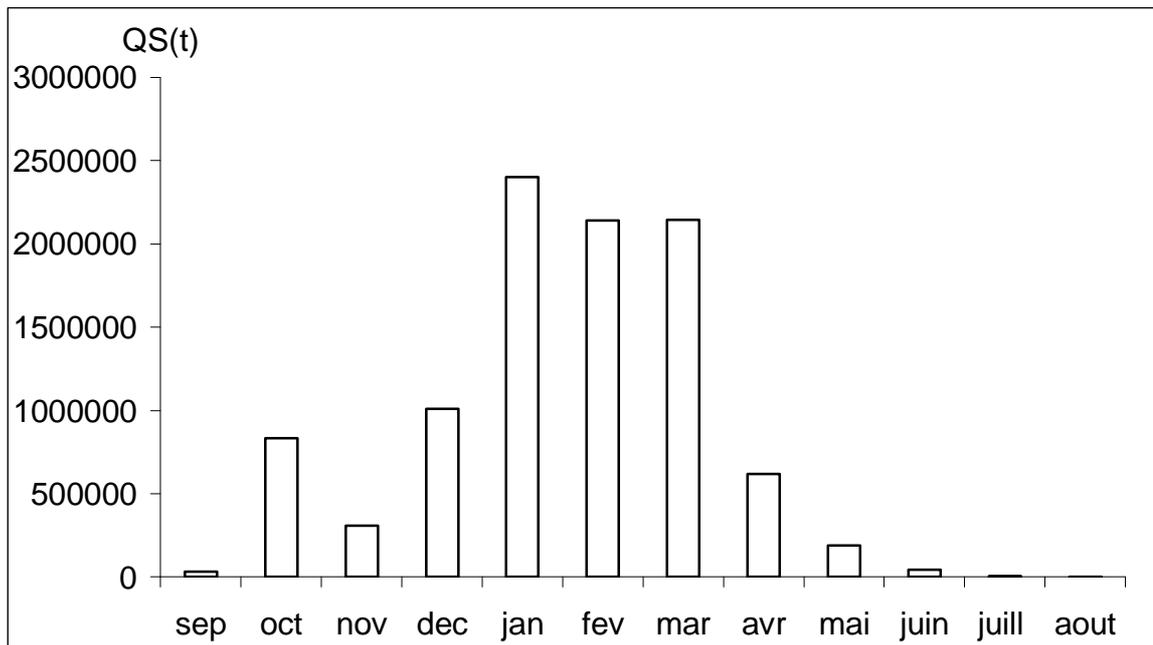


Figure 4.5 : Variation mensuelle du transport solide en suspension

#### 4.2.2. Transport solide par charriage :

Vue l'absence de mesure du transport solide par charriage, notre évaluation est basée sur l'analyse granulométrique des échantillons prélevés (l'estimation du diamètre moyen) et la connaissance de quelques paramètres propres à notre bassin versant.

A l'échelle annuelle le charriage est toujours inférieur à la suspension, donc les résultats obtenus par l'établissement du modèle de Scheilds sont bien confirmés.

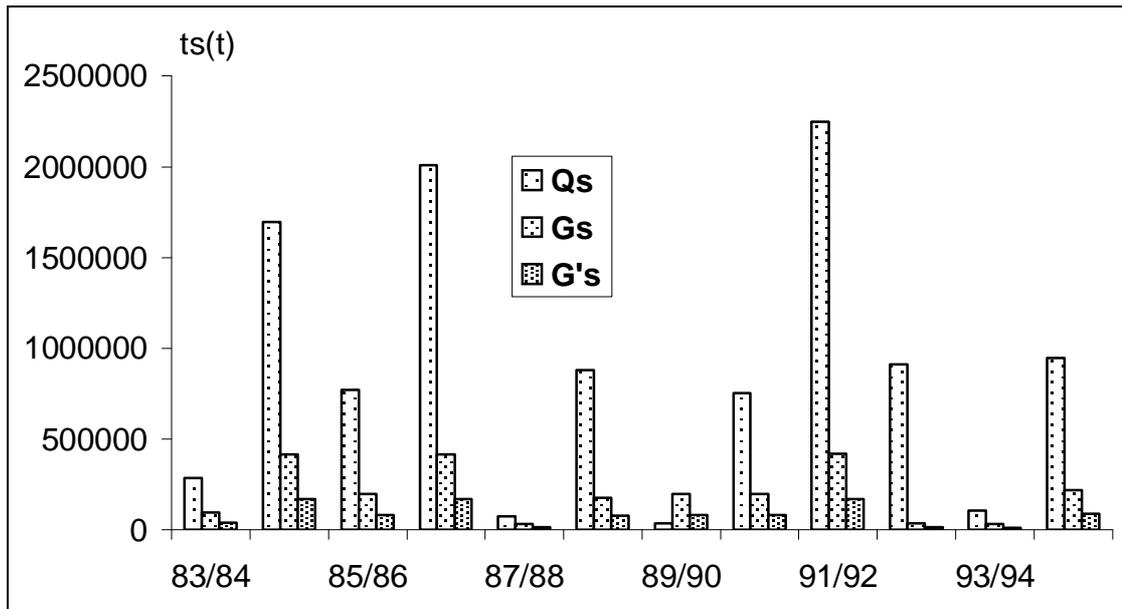


Figure 4.6 : Variation annuelle du transport solide en suspension et par charriage

Nous avons appliqué le modèle de Scheilds pour deux cas :  $a = 1$  et  $a = (ks/kr)^{3/2}$  ; le coefficient **a** est un facteur correctif de la force tractrice en fonction de la morphologie de l'oued.

Très généralement, dans un cours d'eau naturel, le débit solide en suspension est beaucoup supérieur au débit solide transporté en charriage, avec des rapports minimum entre les deux quantités de l'ordre de 1 à 10, et parfois beaucoup plus. Cette proportion découle simplement de résultats statistiques, et ne présente aucun aspect fondamental.

En premier cas (la rugosité n'étant pas prise en compte) :  $\tau = \tau_{\max}$ , le charriage est évalué à 35% du transport solide en suspension pour la période de référence 83/84 –94/95

En deuxième cas (on prend en compte la rugosité dans le lit de l'oued) :  $\tau = 0.4 * \tau_{\max}$  le charriage est estimé à 15% de la suspension, cette évaluation indique la quantité la plus plausible de charriage.

Donc, la diminution de l'effort tranchant réel  $\tau$  de 60%, a engendré un abaissement de 57% du charriage (figure 4.6)

Tableau 4.3 : Rapport entre du transport solide par charriage et transport solide en suspension (deuxième méthode)

| année    | Ts  | Ts*10 <sup>5</sup><br>(Tonnes) | %Gs/Qs | %G's/Qs | année | Ts  | Ts*10 <sup>5</sup><br>(Tonnes) | %Gs/Qs | %G's/Qs |
|----------|-----|--------------------------------|--------|---------|-------|-----|--------------------------------|--------|---------|
| 83/84    | Qs  | 2.70                           | 41     | 17      | 89/90 | Qs  | 0.30                           | 67     | 33      |
|          | Gs  | 1.10                           |        |         |       | Gs  | 0.20                           |        |         |
|          | G's | 0.46                           |        |         |       | G's | 0.10                           |        |         |
| 84/85    | Qs  | 16.3                           | 29     | 12      | 90/91 | Qs  | 7.20                           | 32     | 13      |
|          | Gs  | 4.8                            |        |         |       | Gs  | 2.30                           |        |         |
|          | G's | 1.9                            |        |         |       | G's | 0.90                           |        |         |
| 85/86    | Qs  | 7.4                            | 31     | 12      | 91/92 | Qs  | 22.0                           | 22     | 09      |
|          | Gs  | 2.3                            |        |         |       | Gs  | 4.90                           |        |         |
|          | G's | 0.9                            |        |         |       | G's | 1.90                           |        |         |
| 86/87    | Qs  | 19.5                           | 25     | 10      | 92/93 | Qs  | 0.80                           | 50     | 25      |
|          | Gs  | 4.8                            |        |         |       | Gs  | 0.40                           |        |         |
|          | G's | 1.9                            |        |         |       | G's | 0.20                           |        |         |
| 87/88    | Qs  | 0.67                           | 54     | 21      | 93/94 | Qs  | 1.00                           | 30     | 10      |
|          | Gs  | 0.36                           |        |         |       | Gs  | 0.30                           |        |         |
|          | G's | 0.14                           |        |         |       | G's | 0.10                           |        |         |
| 88/89    | Qs  | 8.60                           | 23     | 09      | 94/95 | Qs  | 10.6                           | 24     | 09      |
|          | Gs  | 2.00                           |        |         |       | Gs  | 2.60                           |        |         |
|          | G's | 0.80                           |        |         |       | G's | 1.00                           |        |         |
| % Gs/Qs  |     |                                | 35     |         |       |     |                                |        |         |
| % G's/Qs |     |                                | 15     |         |       |     |                                |        |         |

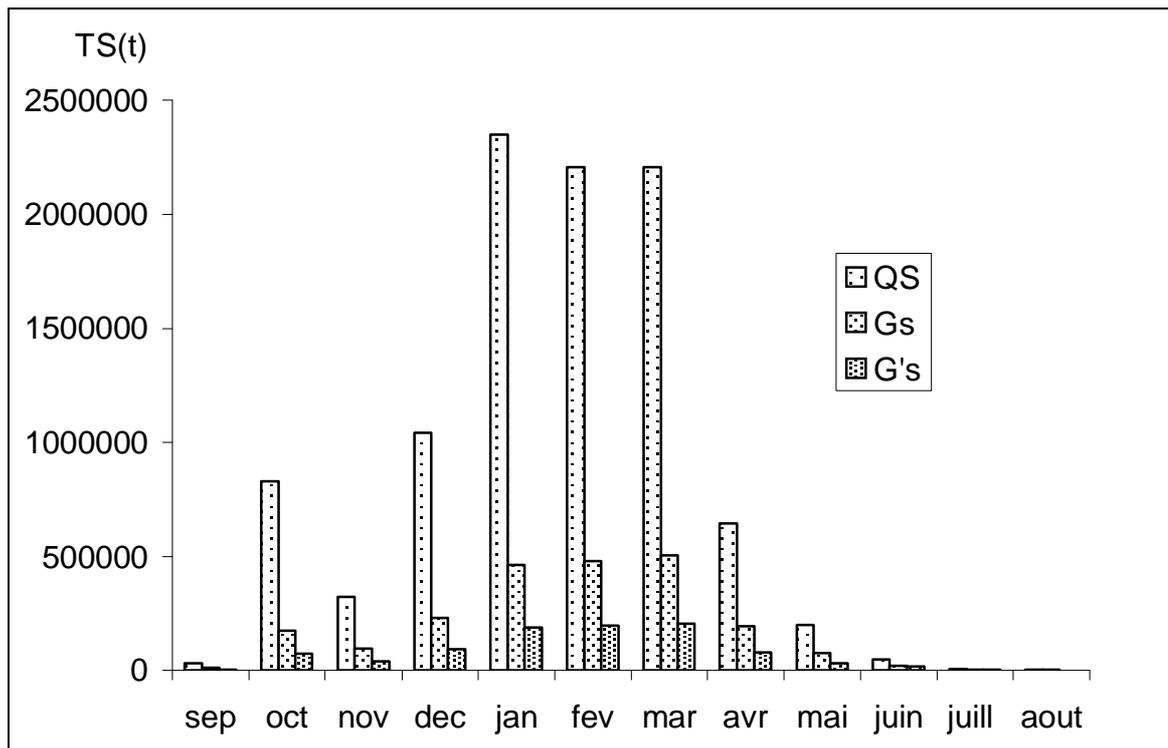


Figure 4.7 : Variation mensuelle du transport solide en suspension et par charriage

Nous remarquons qu'en saison sèche, de juin jusqu'en septembre, les valeurs de débits solides charriés journaliers sont pour la majorité supérieures à celles des débits solides en suspension. Ce ci est dû à ce que la lame d'eau s'y écoulant est considérée laminaire pour les versants.

Sachant que la suspension due en grande partie à la turbulence de l'écoulement, on remarque qu'en saison humide, d'octobre jusqu'à mai, les débits solides en suspension dans l'oued Ebda sont plus importants que les débits solide charriés.

#### 4.2.3. Les taux d'érosions spécifiques :

Tableau 4.4 : Taux d'érosion extrêmes

| Année | Taux d'érosion (t/km <sup>2</sup> .an) | Apport (t/an) | Débit max (m <sup>3</sup> /s) |
|-------|--|---------------|-------------------------------|
| 84/85 | 6666                                   | 1819818       | 126.2                         |
| 86/87 | 7838                                   | 2139774       | 126.4                         |
| 91/92 | 8754                                   | 2389842       | 148                           |
| 94/95 | 4249                                   | 1159977       | 75                            |

Tableau 4.6 : Calcul du taux d'érosion spécifique (1ère méthode)

| année                                  | Ts  | Ts*10 <sup>6</sup><br>tonnes | Es<br>(t/km <sup>2</sup> .an) | E's<br>(t/km <sup>2</sup> .an) | année | Ts  | Ts*10 <sup>6</sup><br>tonnes | Es<br>(t/km <sup>2</sup> .an) | E's<br>(t/km <sup>2</sup> .an) |
|--|-----|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------|-----|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|  | Wt  |                              |                               |                                |       | W't |                              |                               |                                |
| 83/84                                  | Wt  | 0.27                         | 989                           |                                | 89/90 | Wt  | 0.04                         | 146                           |                                |
|  | W't | 0.20                         |                               | 732                            |       | W't | 0.03                         |                               | 109                            |
| 84/85                                  | Wt  | 1.29                         | 4725                          |                                | 90/91 | Wt  | 0.60                         | 2197                          |                                |
|  | W't | 1.00                         |                               | 3663                           |       | W't | 0.46                         |                               | 1684                           |
| 85/86                                  | Wt  | 0.61                         | 2234                          |                                | 91/92 | Wt  | 1.39                         | 5091                          |                                |
|  | W't | 0.47                         |                               | 1721                           |       | W't | 1.10                         |                               | 4029                           |
| 86/87                                  | Wt  | 1.43                         | 5238                          |                                | 92/93 | Wt  | 0.09                         | 329                           |                                |
|  | W't | 1.13                         |                               | 4139                           |       | W't | 0.07                         |                               | 256                            |
| 87/88                                  | Wt  | 0.08                         | 293                           |                                | 93/94 | Wt  | 0.08                         | 293                           |                                |
|  | W't | 0.06                         |                               | 219                            |       | W't | 0.06                         |                               | 219                            |
| 88/89                                  | Wt  | 0.61                         | 2234                          |                                | 94/95 | Wt  | 0.60                         | 2197                          |                                |
|  | W't | 0.49                         |                               | 1794                           |       | W't | 0.56                         |                               | 2051                           |
| Es moy<br>(t / km <sup>2</sup> . an)   |     |                              | 2383                          |                                |       |     |                              |                               |                                |
| E's moy<br>(t / km <sup>2</sup> . an ) |     |                              | 1718                          |                                |       |     |                              |                               |                                |

Tableau 4.5 : Calcul du taux d'érosion spécifique (2<sup>ème</sup> méthode)

| année                                  | Ts  | Ts*10 <sup>6</sup><br>tonnes | Es<br>(t/km <sup>2</sup> .an) | E's<br>(t/km <sup>2</sup> .an) | année | Ts  | Ts*10 <sup>6</sup><br>tonnes | Es<br>(t/km <sup>2</sup> .an) | E's<br>(t/km <sup>2</sup> .an) |
|--|-----|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------|-----|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|  |     |                              |                               |                                |       |     |                              |                               |                                |
| 83/84                                  | Wt  | 0.38                         | 1391                          |                                | 89/90 | Wt  | 0.05                         | 183                           |                                |
|  | W't | 0.31                         |                               | 1135                           |       | W't | 0.04                         |                               | 146                            |
| 84/85                                  | Wt  | 2.11                         | 7728                          |                                | 90/91 | Wt  | 0.95                         | 3479                          |                                |
|  | W't | 1.82                         |                               | 6666                           |       | W't | 0.81                         |                               | 2967                           |
| 85/86                                  | Wt  | 0.97                         | 3553                          |                                | 91/92 | Wt  | 2.69                         | 9853                          |                                |
|  | W't | 0.83                         |                               | 3040                           |       | W't | 2.39                         |                               | 8754                           |
| 86/87                                  | Wt  | 2.43                         | 8901                          |                                | 92/93 | Wt  | 0.12                         | 439                           |                                |
|  | W't | 2.14                         |                               | 7838                           |       | W't | 0.10                         |                               | 366                            |
| 87/88                                  | Wt  | 0.10                         | 366                           |                                | 93/94 | Wt  | 0.13                         | 476                           |                                |
|  | W't | 0.08                         |                               | 293                            |       | W't | 0.11                         |                               | 402                            |
| 88/89                                  | Wt  | 1.06                         | 3882                          |                                | 94/95 | Wt  | 1.32                         | 4835                          |                                |
|  | W't | 0.94                         |                               | 3443                           |       | W't | 1.16                         |                               | 4249                           |
| Es moy<br>(t / km <sup>2</sup> . an)   |     |                              | 3757                          |                                |       |     |                              |                               |                                |
| E's moy<br>(t / km <sup>2</sup> . an ) |     |                              | 3275                          |                                |       |     |                              |                               |                                |

On constate de la figure 4.8 que l'intensité de l'érosion se manifeste, particulièrement, en période des crues ; les crues d'octobre 1984, février 1987 et janvier 1992 ont transité 3.5 millions de tonnes de sédiments à travers le bassin versant de l'Oued Ebda.

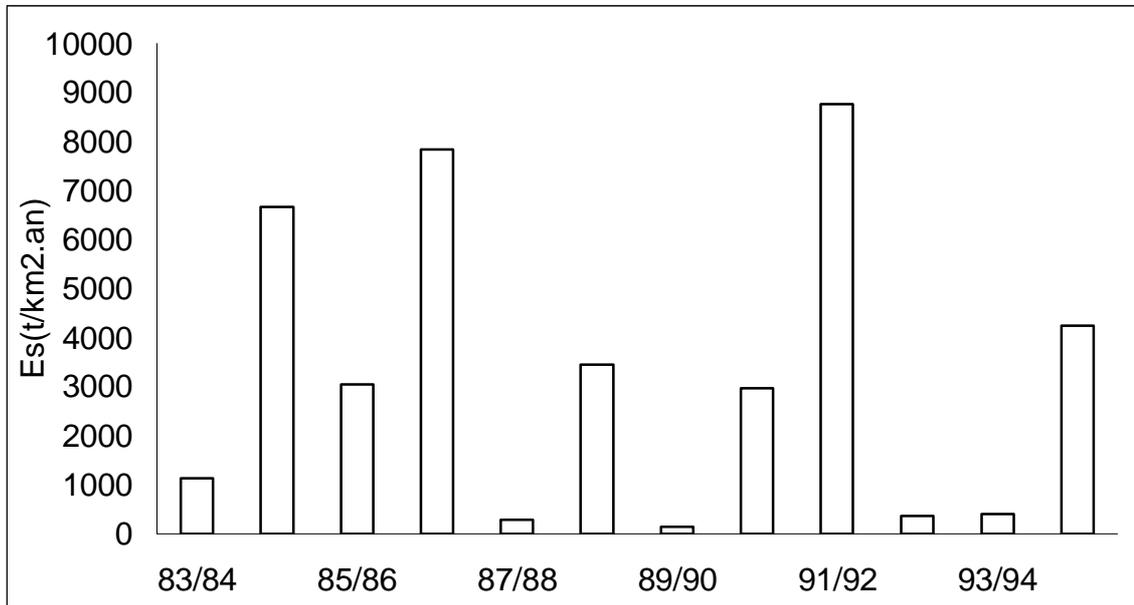


Figure 4.8 : Variation annuelle de l'érosion spécifique

#### Détermination de la durée de vie du barrage

Le barrage de Sidi Ben Taiba est destiné à :

- \* Satisfaire les besoins en eau potable, de la commune d'Arib et ses environs,
- \* L'irrigation de la plaine de El amra et El abadia ;
- \* L'aquaculture ;

Pour une capacité initiale du barrage de 75 millions m<sup>3</sup> et un apport solide annuel de 890000 tonnes/an, et densité volumique des sédiments, la durée du vie de barrage de Sidi Ben Taiba est donnée par la relation suivante :

$$T = W_0 \cdot g / Apps$$

Avec :

T : durée de vie du barrage

W<sub>0</sub> : volume initial de la retenue (m<sup>3</sup>)

apps : volume des sédiments déposés par année (m<sup>3</sup>/an)

$T = 130 \text{ ans}$

## Conclusion

Nous proposons dans cette étude d'évaluer le débit solide total (en suspension + charriage) transitant dans l'oued. Cela va nous permettre de quantifier le volume annuel de sédiments se déposant dans la retenue de barrage de Sidi Ben Taiba qui est actuellement en cour de réalisation

Cette étude a pour objectif de constituer une méthodologie correcte pour l'estimation du transport solide total (en suspension et par charriage) et également donné un ordre de grandeur pour les études futures.

Pour cela ; les moyens mis à notre disposition sont les données hydrométriques instantanées relatives aux débits instantanés et à la concentration en matière en suspension dans la station hydrométrique Arib- Ebda, sur une période de 21 ans allant de 1974 à 1995

Pour l'évaluation de la suspension nous avons préposé deux voies ; la première consiste en la conception d'un modèle de quantification des apports solides à partir des débits liquides, deux équations largement significatives, qui peuvent mettre en relation le débit solide en suspension et le débit liquide de type puissance :

Sur la base de ces deux relations nous avons calculé le transport solide en suspension journalier pour une période de 12 ans, allant de 83/84 jusqu'à 94/95.

Par contre la deuxième voie détermine exclusivement le transport solide au moyen de la concentration en matière en suspension.

Sachant que la relation entre la concentration des sédiments en suspension et le débit liquide d'un cours d'eau est une relation fondamentale dans le domaine du transport solide, nous avons tenté de trouver une équation reliant ces deux composantes.

On se basant sur les fichiers, préparés pour l'établissement des corrélations  $QI/Qs$ , on a sélectionné une nouvelle série des débits liquides médians et concentrations en matières en suspensions médianes.

Une équation de type puissance, mettant en relation la concentration en matière en suspension et le débit liquide avec un coefficient de corrélation égal à 0.81.

Nous avons utilisé cette relation pour le calcul des concentrations en élément en suspension journalières et sur la base de la relation  $Q_s = C \cdot Q_l$ , nous avons calculé le débit solide en suspension journalier pour la même période de référence 83/84 – 94/95.

La composante du charriage est généralement évaluée à l'estime (en pourcentage du transport solide en suspension), mais dans notre travail nous l'avons évaluée en appliquant le modèle de Shields pour deux cas : coefficient de rugosité étant pris en compte (charriage supposé réel) et lorsque la rugosité n'étant pas prise en compte.

Le transport solide total annuel dans l'Oued Ebda est estimé par la somme des volumes en suspension et ceux de charriage.

Le taux d'érosion spécifique est obtenu par le rapport du transport solide total annuel supposé réel à la superficie du bassin versant.

L'apport solide moyen annuel obtenu par le modèle  $C/Q_l$ , correspond approximativement à la détermination effectuée dans l'étude d'avant projet détaillés du barrage de Sidi Ben Taïba ; et à l'évaluation obtenue auparavant par le bureau d'étude Sogreah dans l'étude de faisabilité du même barrage.

L'érosion spécifique obtenue par la formule de Tixeront et celle trouvée dans l'étude d'avant projet détaillée semble très assimilable avec la valeur moyenne calculée par la deuxième méthode.

De ces remarques, nous déduisons que le deuxième modèle estime mieux le transport solide en suspension dans le bassin versant de L'oued Ebda

Le charriage est évalué à 35% de la suspension dans le cas où la rugosité serait négligeable, mais dans le cas contraire ce dernier est estimé à 15% de la suspension. Donc une diminution de 60% de l'effort tranchant réel a engendré un abaissement de 57% du quantité charriée, et par conséquent une diminution de 14% du transport solide total, cette évaluation présente le volume total réel du transport solide.

On constate aussi que le rapport entre les valeurs de l'apport solide moyen annuel estimé par la première méthode et celles estimées par la deuxième est de 52%.

L'apport solide moyen annuel fourni par le bassin versant paraît très important (890000 tonnes / an), même l'application de l'équation de Tixeront offre une valeur importante du taux d'érosion (2700t / km<sup>2</sup>.an.)

Le bassin de l'oued Ebda paraît très érodable avec un taux d'abrasion de 3270 t/km<sup>2</sup>.an, cela est dû au fait que près de 50% de la superficie du bassin est constituée de bancs calcaires et de calcschistes marneux imperméables et des inclusions marneuses dans les bancs calcaires provoquent de grands glissements de terrains ainsi que des ravines le long du versant présentent une forte sensibilité à l'érosion du bassin.

En utilisant la formule de Gavrilovic nous avons évalué le coefficient de l'érosion (Z=0.9) qui correspond à un terrain fortement érodé en présence de processus de l'érosion en profondeur, ce qui nous a permis de confirmer le taux d'érosion élevé obtenu par le calcul.

Nous pouvons déduire que :

Les modèles ;  $Q_s = 2.6 \cdot Ql^{1.4}$  et  $Q_s = 3.79 \cdot Ql^{1.36}$  sous-estiment le débit solide en suspension à environ de 52% ;

et que le modèle  $C = 4.68 \cdot Ql^{0.52}$  avec  $Q_s = C \cdot Ql$  estime mieux le transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued Ebda

Le modèle  $G'_s = 1.14 \cdot Ql^{1.21}$  obtenu par l'application de la formule de Shields évalue mieux la composante de charriage et la estimé à 15% de la suspension.

Avec un taux d'érosion spécifique de 3270 (t/km<sup>2</sup>.an) on peut classer le bassin versant de l'oued Ebda parmi les bassin les plus érodibles en Algérie.

L'établissement des corrélations entre le transport solide annuel calculé et quelques facteurs hydro- climatiques montre que ce dernier est bien corrélé avec la pluie annuelle ; l'apport annuel ; débit maximum annuel dont les coefficients de corrélations sont respectivement égaux à : 0.87 ; 0.97 ; 0.91.

Les résultats des modèles régressifs établis dans cette étude pour l'évaluation du transport solide total (en suspension et par charriage) dans l'oued Abda, paraissent encourageants et doivent être précisés au fur et à mesure que de nouvelles données seront disponibles.

## REFERENCES

1. Roose, E., "Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)", Service des sols – ressources, aménagement et conservation, Division de la mise en valeur des terres et des eaux, Bulletin pédologique de la FAO 70, 1994
2. Larfi, B., "Prévision du transport solide dans le bassin versant de l'oued Isser ; Application à l'envasement du barrage de Béni Amrane" ;Thèse de Magister (2001)
3. Mouzai, L., "Etude expérimentale de quelques relations pluie – érosion à l'aide d'un simulateur de pluie, Mémoire de fin d'étude, INA, Alger (1987)
4. Aménagement des bassins versants (121) ; Administration générale des eaux et forêts et de la conservation des sols ; Terre et vie, 27, janvier 1997.
5. M.Bessenasse, A. Kettab., "Etat de l'art des différents modèles concernant l'érosion hydrique". Colloque international sur l'eau «Gestion quantitative & qualitative des ressources en eau » (2002).
6. Jean-Paul Bavard et François Petit : "Les cours d'eau, dynamique du système fluvial"
7. Erosion mécanique des sols et transport fluviaux de matières en suspension, Thèse de l'université de Bordeaux 1, 1998, n° 1897, 254p.
8. Cours dispensés par Remini B., module « Hydraulique des cours d'eau » (1997-1998)
9. Demak, A., "Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale" .Thèse de docteur Ingénieur Université de Pierre et Marie Curie, France, (1982), 323p.
10. Boudjadja, A., "Estimation expérimentale- empirique du transport solide dans le sous bassin de la partie Ouest du Côtier Algérois", journée scientifique et technique du Génie rural (22 Novembre 1998).
11. UNESCO., "Problème d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants" ; Projet 5.3 du programme hydrologique international Rapport préparé sous la présidence de A. sund borg (1986).
12. Bessenasse.M., " Modélisation numérique du transport solide", première journée d'étude sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, Université de Blida (mai 1997).

13. Gomer, D., "Écoulement et érosion dans les petits bassins versants à sol marneux sous climat semi aride méditerranéen", Projet pilote d'aménagement du bassin versant de l'Oued Mina, c/o Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (1996).
14. Demmak, A., "Contribution à l'étude des écoulements solides des cours d'eau d'Algérie première partie ; mise en forme des données de base de bilan de 7 années de mesures" (1980).
15. Gaston, R., "L'hydrologie de l'ingénieur" Editions Eyrolles (1980)
16. Arnold, J.B., Wall, G., Moore, N., Baldwin, C.S. et Shelton, I.J., "L'érosion du sol – causes et effets" (janvier 1989)
17. Leliavsky, S., "précis d'hydraulique fluviale", Edition Dunod, Paris (1961)
18. Ramez, Ph., "Erosion et transport solide en rivières", Tome 1 : Guide pour la compréhension des phénomènes, Gestion des milieux aquatiques n°8, CEMGREF (1995)
19. Degoute, G., "transport solide en hydraulique fluviale" Chapitre 2
20. Taïbi, R et Larbi, T., "Etude d'avant projet détaillées du barrage de Sidi Ben Taïba", INRH juin 1986.
21. Ben Khaled, A et Remini, B., "analyse de la relation de puissance : débit solide- débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrân (Algérie)", Revue des sciences de l'eau, 16/03/2003

