

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

Année 2008/2009

Faculté Sciences de l'Ingénieur
Département d'Hydraulique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER

**Contribution à l'étude du transport solide en suspension
Bassin de l'Oued Cheliff - Ghrib**

Option

Hydrologie et Construction Hydraulique

Par

MOKHTARI ELHADJ

DIRECTEUR DE MEMOIRE : AMARCHI Hocine M.C Université Badji Mokhtar- Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : OUERDACHI Lhabassi M.C Université Badji Mokhtar- Annaba

EXAMINATEURS : DJEMILI Lakhdar M.C Université Badji Mokhtar- Annaba

MEZA Noureddine M.C Université Oum El Bouaghi

MEKSAOUINE Mohamed M.C Université Badji Mokhtar- Annaba

SOMMAIRE

	Page
Remerciements	04
Résumé	05
خلاصة	06
Summary	07
Liste des figures	08
Liste des tableaux	10
Introduction générale	14
Chapitre. I. Synthèse Bibliographique	
I. L'érosion et le transport solide	19
I.1. L'érosion.....	20
I.1.1.Généralités.....	20
I.1.2.Définition.....	20
I.1.3.La tolérance en perte de sol.....	21
I.1.4.Types d'érosion.....	21
I.1.5.Causes d'érosion et facteurs de résistance du milieu.....	25
I.1.6. L'impact De L'érosion Dans Différentes Régions.....	26
I.1.7.Quantification de l'érosion	29
I.2. Le transport solide.....	37
I.2.1.Généralités.....	37
I.2.2.Transport Par Charriage	37
I.2.3.Transport En Suspension.....	39
I.2.4. Apport solide annuel.....	40
I.2.5.Mesure du débit solide.....	41
I.3. Caractérisation de la relation concentration en sédiments en suspension – débit liquide ..	46
I.4.Rappel Bibliographiques des travaux sur le transport solide en Algérie.....	52
I.5.Des études faites dans la région méditerranéenne et en Afrique.....	55
Conclusion.....	55
Chapitre II. Le bassin versant	
II.1.Introduction.....	57
II.2.Présentation générale.....	57
II.3.Situation Géographique.....	57
II.4. Morphologie du bassin.....	59
II.4.1 Caractéristiques physiques	59
II.4.2 Végétation du bassin versant.....	60
II.4.3 Caractéristiques climatique.....	60
II.4.4 Caractéristiques De Forme.....	63
II.4.5. Caractéristiques De Relief.....	64
II.4.6. Paramètres Du Réseau Hydrographique.....	66
II.5.Les données et systèmes d'information géographique utilisés.....	68
II.5.1 .Les données utilisées.....	68

II.5.2. Les systèmes d'informations géographiques utilisés.....	68
II.6. Production et traitement du modèle numériques de terrain (MNT) du bassin de Cheliff-Ghrib.....	69
II.6.1 Numérisation de courbes de niveau et calcul du modèle numérique du terrain (MNT)..	70
II.6.2. Opération sur les grilles.....	74
II.6.2.1. Création d'une carte hypsométrique (Altitude).....	74
II.6.2.2. Elaboration des produits dérivés du MNT (Pente & orientation).....	77
II.7. Conclusion	83

Chapitre III : Analyse des pluies et des écoulements

III.1. Analyse des pluies.....	84
III.1.1 Aperçu sur le climat de l'Afrique du Nord	84
III.1.2 Aperçu sur le climat de l'Algérie	85
III.2. Etude des précipitations.....	85
III.2.1. Analyse des pluies sur l'ensemble du bassin versant.....	87
III.2.2. Analyse en composantes principales (A.C.P).....	89
III.2.3. Ajustement des précipitations à une loi de probabilité	94
III.2. Analyse des écoulements.....	100
III.2.1. Introduction.....	100
III.2.2. Débits Moyens Annuels	100
III.2.2.1. Variations des débits annuels moyens bruts	100
III.2.2.2. Variations des débits annuels moyens spécifiques.....	102
III.2.2.3. L'irrégularité inter annuelle de module et leur répartition statistique.....	103
III.2.3. Etude statistique des modules	104
Conclusion.....	106

Chapitre IV : Analyse des paramètres de la relation débit solide – débit liquide

IV.1 Mise en forme des données	109
IV.1.1. Relation : Débit liquide instantané – Débit solide instantané	109
1.1. Ensemble des données (Relation interannuelle)	109
1.2. Ensemble des données (Relation annuelle)	109
1.3. Relation saisonnière	118
1.5. Relation saison sèche – saison humide.....	120
IV.2. Discussion des résultats	122
Conclusion.....	122

Chapitre V. Quantification des Apports solides et l'érosion spécifique

V.1. Quantification des apports solides et l'érosion spécifique.....	126
V.2. Estimation des apports solide probables à l'échelle mensuelle.....	137
V.3. Estimation d'érosion spécifique probable	139
V.4. Estimation des apports solide probables à l'échelle saisonnière.....	140
V.5. Estimation d'érosion spécifique probable (échelle saisonnière).....	142
V.6. Recherche de relations entre le taux d'érosion spécifique annuel et quelques paramètres hydro-climatologique.....	143
V.6.1 Corrélation entre l'érosion spécifique et la lame d'eau ruisselée.....	143
V.6.2. Corrélation entre l'érosion spécifique et le débit moyen annuel	144
Conclusion.....	145

Chapitre VI : Analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation concentration-débit liquide

VI.1 Introduction.....	147
VI.2 Données et méthodologie.....	147
VI.3 Identification des classes de relation C-Q.....	149
VI.4.Caractérisation des boucles d'hystérésis.....	158
VI.5. Interprétation	159
VI.5.1 Variabilité de la concentration des sédiments en suspension.....	159
VI.5.2 Analyse de l'hystérésis.....	160
VI.5.3 Sources de l'hystérésis.....	161
Conclusion	163
Conclusion générale	164
Références Bibliographiques	168

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
I.1	Formes d'érosion hydrique.....	24
I.2	Formes de dégradation et d'érosion, causes, facteurs de résistance du milieu	25
I.3	L'état d'envasement de quelques barrages algériens.....	28
I.4	Types de boucles d'hystérésis (d'après Williams, 1989).....	48
II.1	La température de l'air de la station de ELKhemis.....	60
II.2	Les fréquences de la grêle pour une période de deux ans (90/91).....	61
II.3	Les fréquences de la gelée blanche (sur une période de deux ans).....	61
II.4	Les fréquences d'humidité.....	61
II.5	Les fréquences de Sirocco.....	61
II.6	Les fréquences des vents.....	62
II.7	Caractéristiques géométriques et hydromorphométriques du bassin.....	66
II.8	Les classes d'altitudes du bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib.....	75
II.9	Les classes de pentes du bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib.....	76
II.10	Les Classes d'orientation du bassin de Cheliff-Ghrib.....	79
III.1	Précipitations annuelles (mm) aux différentes stations pluviométriques (n=29ans).....	84
III.2	Pluie annuelle et la surface d'influence pour chaque station.....	85
III.3	Moyenne, écart type des variables initiales.....	86
III.4	Matrice des coefficients de corrélation entre les variables.....	87
III.5	Valeur propre, variances expliquées et variances cumulées.....	87
III.6	Projection des variables actives.....	87
III.7	Projections des observations.....	88
III.8	Ajustement à la loi normale du vecteur régional (C1).....	89
III.9	Code des stations représentatives.....	90
III.10	Précipitations annuelles et leurs fréquences expérimentales : Station Ghrib amont(011407).....	92
III.11	Equations d'ajustement des précipitations annuelles à la loi log-normale des différentes stations.....	93
III.12	Précipitations annuelles (mm) pour différentes périodes de retour	93
III.13	Equation d'ajustement des précipitations mensuelles à la loi log-normale Station Ghrib-Amont (011407).....	94
III.14	Précipitations maximales journalières en mm aux stations représentatives.....	95
III.15	Précipitations maximales journalières et leurs fréquences expérimentales : Station Ghrib-Amont 011407.....	96
III.16	Equation de la droite de Galton : Précipitation maximales journalières.....	97
III.17	Précipitations maximales pour différentes périodes de retour.....	97
III.18	Débits moyens annuels de l'oued cheliff (station Ghrib-Amont)	98
III.19	Valeurs caractéristiques de module au niveau du bassin versant.....	98
III.20	Débit spécifique et lame d'eau écoulée	99
III.21	Hydraulicité d'oued cheliff-Ghrib.....	100

III.22	Débit moyen journalier et leurs fréquences expérimentales :Station Ghrib-Amont 011407.....	101
III.23	Ajustement à une loi log-normale des modules annuels.....	102
III.24	Modules caractéristiques en m ³ /s pour des périodes de récurrence données.....	102
IV.1	Valeurs R ² calculées à l'échelle interannuelle.....	104
IV.2	Valeurs de R ² calculées à l'échelle annuelle.....	105
IV.4	Valeurs de R ² calculées à l'échelle mensuelle.....	110
IV.5	Valeurs de R ² calculées à l'échelle saisonnière.....	114
IV.6	Valeurs de R ² à l'échelle saison Sèche-Humide.....	116
IV.7	Modèles retenus pour différentes échelles temporelles.....	118
V.1	Variation interannuelle des sédiments transportés en Tonnes : (Modèle mensuelle).....	120
V.2	Variation interannuelle de l'érosion spécifique (t/km ² .an) : (Modèle mensuelle)..	121
V.3	Variation interannuelle des sédiments transportés en Tonnes : (Modèle saisonnière).....	122
V.4	Variation interannuelle de l'érosion spécifique (t/km ² .an) : (Modèle saisonnière).....	123
V.5	Variation interannuelle des sédiments transportés en Tonnes : (Modèle saison humide et sèche).....	124
V.6	Variation interannuelle de l'érosion spécifique (t/km ² .an) : Modèle saison humide et sèche.....	125
V.7	Apport solide et érosion spécifique pour différents modèles.....	126
V.8	Transport solide en suspension, total et l'érosion spécifique.....	129
V.9	Ajustement des apports solides à la station Ghrib –Amont (Echelle Mensuelle)..	130
V.10	Apports solides pour différentes périodes de retour.....	131
V.11	Ajustement d'érosion spécifique à la station Ghrib –Amont (Echelle Mensuelle).....	132
V.12	Erosion spécifique probable à la station Ghrib –Amont (échelle mensuelle).....	133
V.13	Ajustement des apports solides à la station Ghrib –Amont (Echelle Mensuelle)..	134
V.14	Apports solides pour différentes périodes de retour.....	135
V.15	Ajustement d'érosion spécifique à la station Ghrib –Amont (Echelle saisonnière).....	135
V.16	Erosion spécifique probable à la station Ghrib –Amont (saisonnière).....	120
VI.1	Chronologie des crues sélectionnées.....	124
VI.2	Paramètres statistiques des crues sélectionnées.....	133
VI.3	Classement et caractéristiques des crues.....	134
VI.4	Rapport de variation de la concentration.....	136

Liste des figures

N°	Titre	Page
I.1	Abaque d'Erodabilité de sol K	31
I.2	Facteur topographique en fonction de la longueur de la pente et de son inclinaison.	33
I.3	Couvert végétal (Roose (1994 ,).....	34
I.4	Section de mesure.....	43
I.5	Epure des débits solides élémentaires.....	43
I.6	Modèle de relation C-Q.....	47
I.7	Modèles de boucles d'hystérésis.....	50
II.1	Situation du bassin d'étude (oued Cheliff-Ghrib).....	57
II.2	Carte du bassin de l'oued Cheliff-Ghrib.....	57
II.3	Modèle numérique du terrain (MNT) du bassin de l'Oued Cheliff-Ghrib.....	72
II.4	Carte d'Altitude du bassin de l'oued Cheliff-Ghrib.....	73
II.5	La courbe hypsométrique du bassin oued Cheliff-Ghrib.....	74
II.6	Courbe de répartition des pentes en fonction du % de surface du bassin oued Cheliff-Ghrib.....	76
II.7	Carte des pentes du bassin de l'oued Cheliff-Ghrib.....	77
II.8	Carte d'orientation du bassin de l'oued Cheliff-Ghrib.....	79
III.1	Le polygone de Thiessen du bassin versant du Cheliff-Ghrib.....	85
III.2	Ajustement du vecteur régional C1 à une loi Normale.....	90
III.3	Projection des variables sur le plan 1-2.....	91
III.4	Projection des variables sur le plan 1-3.....	91
III.5	Ajustement des précipitations annuelles à la loi log-normale : station 011407.....	93
III.6	Ajustement des précipitations maximales journalières à la loi log-normale (Station Ghrib-amont 011407).....	97
III.7	Variations interannuelles de module d'oued cheliff (Station Ghrib-Amont).....	100
III.8	Ajustement des débits moyens journaliers à la loi log-normale (Station Ghrib-amont 011407).....	103
IV.1	Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont (Echelle interannuel).....	105
IV.2	Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont (Echelle annuelle).....	108
IV.3	Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont Echelle Mensuelle.....	113
IV.4	Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont (Echelle Saisonnière).....	116
IV.5	Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont (Echelle saison Sèche-Humide).....	117
V.1	Variation annuelle de l'érosion spécifique (Modèle mensuelle).....	128
V.2	La variation annuelle du transport solide (modèle mensuelle).....	129
V.3	La variation Mensuelle du transport solide (modèle mensuelle).....	129
V.4	La variation Mensuelle du transport solide (modèle saisonnière).....	130

V.5	La variation Mensuelle d'érosion spécifique (modèle saisonnière).....	130
V.6	Ajustement des apports solide à la station Ghrib-Amont (Echelle Mensuelle).....	132
V.7	Ajustement d'érosion spécifique à la station Ghrib-Amont (Echelle Mensuelle)....	134
V.8	Ajustement des apports solide à la station Ghrib-Amont (Echelle saisonnière).....	135
V.9	Ajustement d'érosion spécifique à la station Ghrib-Amont (Echelle saisonnière)....	137
V.10	Variation du taux d'érosion spécifique en fonction de la lame d'eau ruisselée.....	138
V.11	Variation du taux d'érosion spécifique en fonction de débit moyen annuel.....	138
VI.1 (1-2)	Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff durant les crues. (crue 1 -2)	142
VI.1 (3-5)	Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff durant les crues. (crue 3 -5)	143
VI.1 (6-8)	Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff durant les crues. (crue 6 -8)	144
VI.1 (9-11)	Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff durant les crues. (crue 9 -11)	145
VI.1 (12-14)	Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff durant les crues. (crue 12 -14)	146
VI.1 (15-17)	Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff durant les crues. (crue 15 -17)	147
VI.1 (18-20)	Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff durant les crues. (crue 18 -20)	148
VI.1 (21-22)	Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff durant les crues. (crue 21-22)	149
	Photos	
I.1	Erosion en nappe.....	24
I.2	Erosion linéaire	24
I.3	Transport en charriage.....	38
I.4	Transport en suspension.....	39

Dédicaces

A mes parents

*A ma femme **B. BOUKHARI** qui, avec son dévouement et ses sacrifices, ce travail a pu voir le jour.*

*A ma petite fille **HANANE***

A toute ma famille et ma belle famille

A mes amis

Je dédie ce mémoire.

MOKHTARI ELHADJ

Remerciements

Avant tous, je remercie Dieu tout puissant qui m'a guidé tout au long de ma vie, qui m'a permis de m'instruire et d'arriver aussi loin dans mes études, qui m'a donné courage et patience pour passer tous les moments difficiles, et qui m'a permis d'achever ce travail.

Je tiens à présenter mes humbles et sincères remerciements ainsi que toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude à mon promoteur Monsieur **AMARCHI Hocine**, pour tout son dévouement lors de mon encadrement, pour tout son aide et ses précieux conseils et ses encouragements incessants, et surtout pour sa patience et sa compréhension.

Mon profond respect à Monsieur **REMINE Boualem**, Professeur, université de Blida, pour tout son aide et ses précieux conseils et ses encouragements incessants, et surtout pour sa compréhension.

Mes remerciements vont également à **M OUERDACHI Lahbassi** pour m'avoir fait l'honneur et l'immense plaisir d'accepter de présider le jury.

Je remercie chaleureusement **M MEZA Noureddine** qui a accepté de faire partie du jury.

Je tiens également à remercier **M MEKSAOUINE Mohamed** qui a bien voulu être membre de ce jury.

Je remercie également **M DJEMILI Lakhdar** qui a accepté d'examiner ce travail.

Mon profond respect va à mes enseignants de la post-graduation, en particulier, Madame KHERICI, Monsieur MEKSAOUINE, Monsieur GUERZIZ, Monsieur AMARCHI, Monsieur DJEMILI et Monsieur HAMAR. Pour leurs conseils, orientations et aides.

Mes sincères remerciements vont à mes confrères Messieurs MAROUF N., SEKIOU F., LAKHEL M., KCHIDA S., EL KENDJ Y., BOUSSEKINE M., Pour leurs services et encouragements.

Je tien aussi à remercier tous ceux qui m'ont facilité le long travail nécessité par cette étude à savoir :

Mme ABDA, chef de service de l'ANRH d'Alger et monsieur BOUCHOUL, ANRH d'Alger
Monsieur BENMASSOUD, ANRH de Blida pour avoir mis à ma disposition la documentation technique,

Mme Mokhtari, ainsi que tous les membres de ma famille pour le soutien moral même lors des moments difficiles.

MOKHTARI El hadj.

خلاصة

أن تحليل الحمل العالق في حوض ينتمي إلى منطقة شبه جافة يكتسي أهمية كبيرة. هذه الظاهرة ما تزال لم تستوفي كل جوانبها، نظرا لتعقدها و نوعية المعطيات المتوفرة لدراستها، خاصة تلك المتعلقة بالحمل العالق.

هدف هذه الأطروحة هو إدراك أحسن لمفهوم الحمل العالق و كذلك حسابه. المنهجية المتبعة تحليلية بالدرجة الأولى. النتائج المحصل عليها والخاصة بالتغير الزمني للحمل العالق، في الفترة الممتدة بين سنوات 77 -1994 ، أظهرت أن عددا كبيرا من العينات المحصل عليها من الحملات الدورية لقيس الحمل العالق، غير مجدي و أن قياس الحمل العالق عند تدفقات كبيرة أساسي لتكوين و استعمال بيانات أو منحنيات التقديرات.

دراسة حوصلة الحمل العالق تصنف حوض واد شلف غريب في منطقة الشمال الجزائري الذي يتميز بنسبة حمل عالق مرتفع. يقدر الانجراف الظاهري السنوي ب 2541 طن في الكلم² . عند تحليل الحمل العالق بالنسبة لتدفقات متساوية، تبين أن الشكل الغالب هو في الاتجاه اليميني. إن دراسة العلاقة الآسية تصرف الحمل العالق- التدفق، باعتماد سلم زمني متغير، أمكن من تحديد سلم زمني ممثل و مميز لإطار حوض شبه جاف ألا وهو السلم الفصلي. دراستنا هذه اهتمت كذلك بتحديد المتغيرات المؤثرة في الحمل العالق.

مفتاح الكلمات: واد شلف غريب - الحمل العالق - منحنيات التقديرات - علاقة آسية- التدفق

Résumé

L'analyse du transport solide en suspension dans un bassin de zone semi-aride présente un grand intérêt. Ce processus est mal quantifié en raison du caractère complexe et aléatoire ainsi que du manque de données et particulièrement celles relatives à la concentration des sédiments en suspension. L'objectif de cette étude est d'améliorer la compréhension du phénomène et son estimation. L'approche adoptée est analytique. Les résultats d'analyse de la variabilité temporelle des concentrations sur la période 77/94, ont montré qu'un grand nombre d'échantillons est insignifiant et que la mesure des concentrations à des débits élevés est primordiale pour le tracé et l'emploi des courbes d'estimation. L'étude du bilan sédimentaire situe le bassin versant de l'oued Cheliff dans une des régions de l'Algérie du Nord marquée par un taux de transport solide élevé. Nous estimons à $2541T/km^2.an$, l'apport solide spécifique au droit de la station Ghrib-Amont.

En analysant la tendance de la concentration à des valeurs identiques de débit, le schéma d'hystérésis, de la relation concentration- débit, dominant est de sens dextre.

L'étude à différentes échelles temporelles, de la relation puissance débit solide – débit liquide a permis de retenir que l'échelle saisonnière est très représentative du contexte semi- aride du bassin étudié. Notre travail a envisagé également l'étude de l'influence des paramètres hydro pluviométriques sur le transport solide.

Mots clés : oued Cheliff, transport solide en suspension, courbes d'estimation, Hystérésis C-Q, échelles temporelles, relation de puissance

Summary

Suspended sediment transport analysis in a semi arid basin is of great interest. This process is badly known and is badly quantified because of the complex and random character of the processes as well as lack of data and particularly those relating to suspended sediment concentrations.

The objective of this study is to improve comprehension of the phenomenon and its estimate. We adopted an analytical approach. The results of analysis of temporal variability of the concentrations over the period 1977-1994, showed that a great number of samples is not significant and that the sediment sampling in high flow-rate is crucial in constructing a rating curve.

The study of the sediment loads show that the catchment area of Cheliff river is one of the basins of North Algeria marked by a rate of high sediment transport. We estimate at 2541 T/km².year the sediment yield in this basin. By analyzing the trend of the sediment concentration at the same flows, the main hysteresis loop is clockwise. The study on various temporal scales, of the power relation sediment discharge-flow discharge show that seasonal scale is very representative of the semi-arid basin. Our work also considered the study of the influence of the rainfall parameters on sediment transport. The peak flow is the significant factor which explains variations of the sediment yield.

Key words: suspended sediment transport – rating curve – hysteresis loop – temporal scales
– power relationship – peak flow

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Depuis les années 70, un intérêt particulier est donné à l'estimation du transport solide. Les raisons sont nombreuses et diverses, et incluent le transport de contaminant, les tendances de qualité aquatique, la sédimentation de réservoir. L'envasement de canaux et de ports, l'érosion et la perte de sol, aussi bien que les impacts écologiques. Cet intérêt est motivé par l'importance des aspects quantitatifs et qualitatifs du transport solide.

Pour l'ensemble du monde, tous continents réunis, la quantité totale des sédiments évacués en suspension est aujourd'hui de $13.5 \cdot 10^9$ tonnes par an sur une aire de drainage externe de $88.6 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ (contre $148.9 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ pour l'ensemble des continents), ce qui correspond à un transport spécifique de 152 tonnes par km^2 et par an (Milliman et Meade, 1983). Cependant, la distribution est très variable d'un point à l'autre. Les taux élevés de transport de sédiments sont concentrés dans les régions proches de l'équateur et dans des régions arctiques. Sur les grandes îles du pacifique (Indonésie), le transport spécifique est près de six fois supérieure à la moyenne globale ($1000 \text{ t}/\text{km}^2 \cdot \text{an}$).

L'érosion façonne la Terre depuis qu'elle est émergée... Et depuis plus de 7000 ans, l'homme s'acharne à lutter contre l'érosion pour protéger ses terres contre l'agressivité des pluies et du ruissellement.

Cependant, les études scientifiques sur l'érosion n'ont commencé qu'au début du 20ème siècle; d'abord en Allemagne. 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 est 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 (**Fournier, 1960**) et anglophone (**Hudson, 1957**), puis en Amérique latine et plus récemment en Asie et en Europe.

En Algérie, l'inventaire systématique des ressources n'est pas encore achevé malgré les nombreuses études menées au cours du siècle dernier. Toutefois, on en connaît les grandes lignes. Ces ressources ne sont pas réparties équitablement, que ce soit au niveau de leur répartition géographique, de leur quantité ou de leur nature (eaux de surface ou souterraines). La majeure partie du pays (87%) est un désert où les précipitations sont quasi nulles, mais

qui recèle d'importantes ressources fossiles d'eaux souterraines. La partie Nord du pays est caractérisée par son climat méditerranéen ; elle dispose de ressources en eau renouvelables, tant pour les eaux de surfaces que pour les nappes phréatiques. Les 90% des eaux de surface sont situées dans la région du Tell qui couvre environ 7% du territoire. Le pays est également caractérisé par une forte disparité entre l'Est et l'Ouest. La région Ouest bien dotée en plaines est peu arrosée. La partie Est du pays est une zone montagneuse où coulent les principaux oueds. Les bassins occidentaux reçoivent 10% seulement des flux, pour une surface représentant le tiers de celle du Nord du pays. Les bassins orientaux drainent 40% des flux, alors qu'ils ne représentent que 20% de la superficie totale et les bassins du centre en drainent 50% pour une surface totale représentant les 50% restants. On estime à 1,6 milliards leur volume annuel moyen. Le pays compte 115 barrages, dont 45 ont une capacité supérieure à 10 millions de m³ et 65 sont de capacité inférieure. Il y a 16 barrages en cours de construction à l'heure actuelle, et 20 nouveaux barrages sont prévus à l'horizon 2010. En ce qui concerne l'avenir, 17 autres barrages sont à l'étude (A.R.C.E, 2001).

L'importance de cette ressource qui est l'eau dans l'activité socio-économique et sa rareté d'une part et le problème de l'envasement d'ouvrages de stockage d'autre part, nous pousse à prendre des dispositions nécessaires afin d'assurer la pérennité de cette ressource et sa bonne gestion.

Dans le bassin versant de l'Oued Cheliff ainsi que dans de nombreux bassins de la zone semi – aride de l'Algérie du Nord, le transport de sédiments est l'un des problèmes économiques et environnementaux graves dus à l'érosion des sols. Ce bassin de 1378 km² appartient à une région très fragile où toutes les conditions se trouvent réunies (Sari, 1977 ; Demmak, 1982 ; Rosse, 1999) à savoir :

- Un climat méditerranéen caractérisé par des fluctuations thermiques très variées et des pluies fines très irrégulières et torrentielles pouvant atteindre une grande fréquence de 30 mm par 24 heures
- Un relief accidenté aux pentes raides
- Un couvert végétal présent dans les hautes altitudes.
- Un régime hydrologique très irrégulier des cours d'eaux où l'on observe des signes de dégradation poussée et généralisée tels que la divagation des oueds, le sapement des berges et l'alluvionnement des lits.

Cette problématique a fait l'objet de travaux de recherche de bon nombre d'ingénieurs et chercheurs Algériens et étrangers. En plus des aspects environnementaux de l'érosion, ils ont aussi étudié les conséquences à prévoir sur le côté social et particulièrement la vie des

populations vivant à l'amont de ces bassins versants. La protection contre l'érosion en milieux marneux a constitué le problème le plus sensible dans la zone de l'Algérie du Nord.

Le caractère complexe du transport solide a été mis en exergue à travers les nombreuses études effectuées dans divers pays. Plusieurs points restent encore non élucidés à savoir :

- la discontinuité spatio-temporelle du processus érosion – transport solide – sédimentation, implique l'existence d'une relation lointaine et variable entre la quantité de matériel arrachée aux interfluves et celle qui est transportée par le cours d'eau.
- L'irrégularité du phénomène rend difficile la mise au point d'une technique de mesure précise, fiable et opérationnelle. Les méthodes de prélèvements automatiques et d'enregistrement continu se sont avérées inapplicables sur les cours d'eau fortement chargées.
- Les prélèvements sporadiques d'échantillons effectués par un observateur sont insuffisants et correspondent rarement aux périodes convenables.
- Le nombre de variables mises en jeu dans les relations de transport solide n'est pas représentatif de la diversité des variables réelles caractérisant le milieu.

Il faut ajouter à cela le problème de données. Dont l'abondance semble parfois induire une vision globale satisfaisante du bassin versant. Cela paraissait un atout précieux au moment où l'on s'est engagé dans ce travail, en fait, les choses ne sont pas si simples et les mesures dont on dispose, ainsi que les interprétations qui en découlent sont parfois complexes.

La diversité des caractéristiques hydrologiques et sédimentologiques dans les différentes parties du bassin implique des dynamiques différentes mais liées entre elles. A l'exutoire du bassin, le transport solide dépend étroitement de la charge solide provenant de l'amont et des conditions d'entraînement. La mesure effectuée à ce point n'est que la résultante de toute l'hétérogénéité du bassin. La variabilité spatiale du bassin versant exige une discrétisation fine.

Cette complexité et l'insuffisance des méthodes quantitatives employées nécessitent à ce stade des connaissances acquises dans ce domaine la contribution d'une démarche naturaliste, simpliste.

On s'est intéressé aux mécanismes de transport solide dans un cours d'eau. Un des objectifs de ce travail est de donner un sens qualitatif et quantitatif à la dynamique du transport sédimentaire dans un bassin semi – aride.

La méthodologie suivie dans le cadre de ce travail repose sur trois phases essentielles.

- La première phase : axée sur la collecte d'un certain nombre de documents :
a-Cartes Topographiques du bassin d'étude.

Pour réaliser une modélisation, il est bon d'avoir une bonne connaissance du milieu physique plutôt que des caractères globaux souvent représentés par des indices. On va tenter de donner une représentation spatiale du relief à travers un modèle numérique du terrain (MNT). Cette information peut constituer ensuite une des couches d'un S.I.G. On va donc, au départ, élaborer le MNT du bassin d'étude. Et en vue de vérifier sa conformité à la topographie du bassin versant, on effectuera son exploitation pour déterminer les caractéristiques morphologiques.

b- Les fichiers de données des paramètres hydrométéorologiques mesurables. La charge en suspension avait fait l'objet d'une collecte synoptique et continue à la station de mesure de débit et de concentration des sédiments en suspension pour la période d'étude. Les contraintes qui ont souvent limité la collecte de données s'apparentent aux problèmes classiques de logistique, de personnel et d'équipement.

- La deuxième phase : porte sur l'aspect quantitatif du transport solide, c'est – à-dire le calcul et l'estimation de la charge en suspension.
- La troisième phase : elle concerne l'aspect qualitatif gérant les mécanismes nécessaires à la compréhension de l'analyse du transport solide.

Chapitre I.

Synthèse Bibliographique

Chapitre. I. Synthèse Bibliographique

I. L'érosion et le transport solide

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement « Hortonien »), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation). Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux (**Cros-Cayot, 1996**). Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : l'érosion de versant diffuse ou en rigoles parallèles et l'érosion linéaire ou concentrée de talweg.

Comme le suggèrent ces définitions, les processus érosifs dépendent d'une multitude de facteurs interagissant entre eux et sont de ce fait, complexes à modéliser. Les facteurs de l'érosion devant être pris en compte pour étudier les phénomènes érosifs font maintenant l'objet d'un consensus et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (**Wischmeier et al, 1978**).

L'érosion hydrique est la principale forme de dégradation dans les zones semi-arides et les régions subhumides sèches, tandis que l'érosion éolienne domine dans les zones arides. En Afrique, on estime que 500 millions d'hectares ont subi une dégradation depuis les années 1950 environ, portant sur 65% des terres agricoles de la région. La dégradation des terres concerne quelque 300 millions d'hectares en Amérique latine. En Europe, 157 millions d'hectares souffrent de l'érosion hydrique et éolienne. En Amérique du Nord, environ 95 millions d'hectares sont touchés. (**FEM et FIDA, 2002**).

La Chine a perdu au cours de la période 1957-1990 des terres arables d'une superficie égale à celle de toutes les terres de culture d'Allemagne, du Danemark, de France et des Pays-Bas réunis, principalement suite à la dégradation des terres. (**FEM et FIDA, 2002**).

Les problèmes de dégradation de l'environnement sont intimement liés au développement des populations et des civilisations. Ils concernent autant les agronomes, les forestiers, les géographes, les hydrologues, les sédimentologues que les socio-économistes. Mais chacun dans sa discipline a développé un langage propre, si bien que les mêmes mots n'ont pas la même portée selon les professions.

Les conséquences de l'érosion : les nuisances

L'érosion hydrique est un phénomène naturel qui est accéléré par diverses pratiques de gestion agricole. L'érosion entraîne la perte ou le déplacement d'une dégradation du sol et une diminution de la qualité et du rendement des cultures, de plus les sédiments sont transportés dans les cours d'eau. Ils peuvent provoquer un accroissement de la turbidité et de la sédimentation. En outre, les éléments nutritifs, les pesticides et les bactéries peuvent être fixées aux particules de sol érodé, ce qui contribue à détériorer encore plus la qualité des eaux. L'envasement trop rapide des barrages, la destruction d'ouvrages d'art, des routes et des villages ne sont pas à négliger.

I.1. L'érosion

I.1.1. Généralités

Les études récentes sur la vulnérabilité au changement climatique dans la région méditerranéenne indiquent une tendance à un accroissement à l'aridité qui accélère l'érosion hydrique (**Shabban et al, 1998**).

L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène largement répandu dans les différents pays de la méditerranée. Il continue à prendre des proportions considérables en particulier sur les pentes à cause de la torrencialité des pluies, de la forte vulnérabilité des terrains (roches tendre ; sols fragiles ; pentes raides et couvert végétal souvent dégradé) et de l'impact défavorable des activités agricoles, selon la FAO (**1990**), la situation continue à se dégrader ; En Tunisie 45% de la superficie totale est menacée par l'érosion hydrique (**Chevalier, 1995 ; Boussama, 1996**), au Maroc 40% (**Celik, 1996**) et en l'Algérie 45% des zones telliennes sont touchées , soit 12 millions d'hectares (**Chebbani, 1999**).

I.1.2. Définition

Erosion vient de "*ERODERE*", verbe latin qui signifie "ronger". L'érosion ronge la terre comme un chien s'acharne sur un os. D'où l'interprétation pessimiste de certains auteurs qui décrivent l'érosion comme une lèpre qui ronge la terre jusqu'à ne laisser qu'un squelette blanchi: les montagnes calcaires qui entourent la Méditerranée illustrent bien ce processus de décharnement des montagnes dès lors qu'on les défriche et que l'on brûle leur maigre végétation (ex. Grèce). En réalité, c'est un **processus naturel** qui certes, abaisse toutes les

montagnes (d'où le terme de "dénudation rate", vitesse d'abaissement du sol des géographes anglophones) mais en même temps, l'érosion engraisse les vallées, forme les riches plaines qui nourrissent une bonne partie de l'humanité. Il n'est donc pas forcément souhaitable d'arrêter toute érosion, mais de la réduire à un niveau acceptable tolérable.

C'est aussi l'ensemble des actions chimique et organique qui aboutit à la destruction des roches et au nivellement progressif du terrain plus simplement; l'érosion est l'usure de la partie superficielle de l'écorce terrestre, l'eau et le vent sont les principaux agents naturels. **(Greco 1966).**

L'érosion est un phénomène naturel qui affecte l'ensemble de la couverture terrestre géopédologique et c'est l'un des facteurs important de formation et l'évolution des milieux naturels **(Dutil, 1984).**

I.1.3. La tolérance en perte de sol

Dans le domaine de l'érosion, la tolérance a d'abord été définie comme la perte en terre tolérée car elle est équilibrée avec la formation du sol par l'altération des roches. Elle varie de 1 à 12 t/ha/an en fonction du climat, du type de roche et de l'épaisseur des sols. Mais on s'est bien vite rendu compte que la productivité des horizons humifères, riches en éléments biogènes est bien supérieure à celle des altérites, roches pourries, quasiment stériles. De plus, cette approche nie l'importance de l'érosion sélective des nutriments et des colloïdes qui font la fertilité des sols.

I.1.4. Types d'érosion

Il y a trois types d'érosion

I.1.4.1. L'érosion éolienne

Le vent exerce sur les particules solides au repos une pression sur la surface exposée au flux d'air, appliquée au-dessus du centre de gravité, auquel s'oppose un frottement centré sur la base des particules. Ces deux forces constituent un couple tendant à faire basculer et rouler les particules lourdes (0,5 à 2 mm), de plus, la différence de vitesse entre la base et le sommet des particules provoque leur aspiration vers le haut. Les particules les plus légères s'élèvent à la verticale jusqu'à ce que le gradient de vitesse ne les porte plus. Elles retombent alors, poussées par le vent, suivant une trajectoire sub -horizontale. En retombant, ces grains

de sable transmettent leur énergie à d'autres grains de sable (comme dans un jeu de boules) ou se dégradent les agrégats limono-argileux en dégageant de la poussière (**Heusch, 1988**).

L'érosion éolienne prend de l'importance en Afrique de l'Ouest dans les zones tropicales sèches, là où la pluviosité annuelle est inférieure à 600 mm, où la saison sèche s'étend sur plus de six mois et où la végétation de type steppique laisse de larges plaques de sol dénudé. Ailleurs, elle peut aussi se développer dans des conditions de préparation du sol qui amènent une pulvérisation importante des matériaux superficiels secs.

I.1.4.2. L'érosion aratoire ou mécanique sèche

Ce phénomène d'érosion n'est pas dû à l'intervention de l'eau, c'est le travail du sol qui arrache les particules, les transporte et les dépose soit en bas de parcelle, soit en talus.

- **Facteurs d'érosion mécanique**

Les facteurs influençant la quantité de terre déplacée sont :

- Le type d'outil
- La fréquence des passages
- La pente

Plus la pente est forte, plus les mottes de terres détachées roulent vers le bas. C'est ce qui explique que les sommets des collines sont souvent décapés.

- **L'orientation du travail du sol**

Celui ci peut être orienté soit en courbes de niveaux, soit du haut de la parcelle vers le bas (ce qui est le cas pour les tracteurs travaillant sur des pentes supérieures à 15 %), soit du bas de la parcelle vers le haut (pour le travail manuel notamment). Il est très rare que la terre soit remontée par les outils. Par contre, il arrive qu'en montagne et dans les zones où la terre est rare, que l'on récupère mécaniquement ou dans des petits paniers de la terre dans la plaine pour la remonter dans la montagne, c'est le cas sur les vignes. On constate aussi que l'aller et le retour des outils peuvent réduire considérablement la vitesse du décapage par l'érosion mécanique sèche (**Revel , 1989**).

I.1.4.3. L'érosion hydrique

L'élément déclencheur de ce type d'érosion est la pluie, qui provoque le détachement des particules élémentaires du sol.

Erosion en nappe

Elle est caractérisée par une eau de ruissellement sans griffes ou rigoles visibles. Sous l'effet de l'impact des gouttes de pluies (effet splash), les particules sont arrachées et transportées. Ce phénomène est observé sur les pentes faibles où l'eau ne peut pas se concentrer.

Dans un premier temps, c'est l'impact des gouttes qui va arracher les particules. La battance des gouttes de pluie va envoyer des gouttelettes dans toutes les directions. Seulement, sous l'effet de la gravité les gouttelettes auront une vitesse plus importante vers l'aval que vers l'amont. Si l'on réalise une moyenne sur l'ensemble des gouttelettes, la vitesse sera dirigée de l'amont vers l'aval. A partir de là, il y aura formation de flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre ce qui entraînera un ruissellement en nappe.

L'érosion en nappe dépend de:

- L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement
- L'énergie cinétique des pluies qui détachent les particules
- La durée des pluies et/ou l'humidité avant les pluies, c'est à dire l'état du sol.

Les signes qui permettent de caractériser l'érosion en nappe sont l'apparition de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés et la remontée de cailloux à la surface du sol, les conséquences de l'érosion en nappe sont:

- Le nivellement de la surface du sol.
- La squelettisation des horizons superficiels.
- Le décapage entraînant l'apparition de taches claires.



Photo I.1 : Erosion en nappe (Bassin Cheliff-Ghrib, 2009)

Erosion linéaire, en griffes ou en rigoles

Ce type d'érosion intervient à la suite du ruissellement. Dans un premier temps, des flaques se forment. En débordant, les flaques communiquent entre elles et des lignes d'écoulement limitées dans l'espace apparaissent selon la ligne de plus grande pente: selon la profondeur de ces lignes, le vocabulaire employé est différent. Dans le tableau I.1, nous donnons les différentes formes d'érosion hydrique.



Photo I.2 : Erosion linéaire (Oued Cheliff, 2009)

Tableau I.1. Formes d'érosion hydrique

Appellation des lignes d'écoulement (d'après Roose.1994)	
Profondeur	Appellation
Quelques centimètres	Griffes
>10 cm	Rigoles
10 à 20 cm quelques mètres de large	Nappe Ravinante
>50 cm	Ravines

Tout comme l'érosion en nappe, il existe une méthode pour mesurer l'érosion linéaire. Cette méthode est basée sur la méthode des volumes (**Ludwig, 1992**).

I.1.5. Causes d'érosion et facteurs de résistance du milieu

Le tableau I.2 présente les processus de dégradation, les causes ainsi que les facteurs de résistance du milieu.

Tableau I.2. Formes de dégradation et d'érosion, causes, facteurs de résistance du milieu

Les processus de dégradation et d'érosion et leurs formes	Les causes : différentes sources d'énergie	Les facteurs de résistance du milieu
<p><u>Erosion mécanique sèche</u> Forme : creeping</p>	<p>Gravité et poussée par les outils de travail du sol</p>	<ul style="list-style-type: none"> - fonction de l'intensité du travail du sol, c'est-à-dire de la fréquence des travaux et du type d'outil - fonction de la pente et de la cohésion du terrain
<p><u>Erosion en nappe</u> Forme: nappe de sable, pellicule de battance ou de sédimentation, "demoiselle coiffée", micro-falaise</p>	<p>Battance des gouttes de pluie</p>	<ul style="list-style-type: none"> - le couvert végétal, - la pente, - le sol, - les techniques et structures anti-érosives
<p><u>Erosion linéaire</u> Formes: griffes, rigoles, ravines</p>	<p>L'énergie du ruissellement dépend du volume du ruissellement et de sa vitesse au carré $1/2MV^2 = 1/2MGH$</p>	<ul style="list-style-type: none"> - la vitesse du ruissellement est fonction de la pente et de la rugosité, - le volume ruisselé est fonction de la surface du bassin versant et de la capacité d'infiltration, - résistance du profil du sol et des racines

(**Roose, 1994**)

I.1.6. L'impact De L'érosion Dans Différentes Régions

L'érosion est un problème dont la gravité varie beaucoup d'un site à un autre. **Kanwar (1982)** a montré au congrès de l'Association Internationale des Sciences du Sol à New Delhi que sur 13.500 millions d'hectares de surface exondées dans le monde, 22 % sont cultivables et seulement 10 % sont actuellement cultivés (soit 1.500 millions d'ha). Ces dix dernières années, les pertes en terres cultivables ont augmenté jusqu'à atteindre 7 à 10 millions d'ha/an, suite à l'érosion, à la salinisation ou à l'urbanisation. A ce rythme, il faudrait trois siècles pour détruire toutes les terres cultivables. L'érosion est donc un problème sérieux à l'échelle mondiale mais il est bien plus préoccupant dans certaines régions du monde, comme c'est le cas au Magreb et plus particulièrement en Algérie.

Aux Etats-Unis, vers 1930, 20 % des terres cultivables ont été gravement endommagées par l'érosion suite à la mise en culture inconsidérée des prairies de la Grande Plaine par les colons européens, peu habitués à ces conditions semi-arides. C'est l'époque sombre des "dust bowl", nuages de poussières qui obscurcissaient complètement l'air dans la Grande Plaine. Ces phénomènes, impressionnant l'opinion publique, ont poussé le Gouvernement américain à former un grand service de conservation de l'eau et des sols mettant à la disposition des agriculteurs volontaires un appui technique et financier dans chaque canton. Parallèlement, un réseau de stations de recherche a été mis en place, qui, trente ans plus tard, aboutit à la formulation de l'équation universelle de perte en terre, connue sous le nom de USLE (**Wischmeier , 1978**). **En 1986, Lovejoy et al** remarquent qu'après cinquante ans d'investissement massif en hommes et en moyens, encore 25 % des terres cultivées perdent plus de 12 t/ha/an, limite reconnue tolérable. Le problème reste donc à l'ordre du jour, même si aujourd'hui on s'intéresse plus à la pollution et à la qualité des eaux qu'à la conservation des sols.

Pour l'ensemble de la Communauté Economique Européenne (CEE), **De Ploey (1990)** estime que 25 millions d'hectares ont été gravement affectés par l'érosion. La France totaliserait 5 millions d'hectares et le coût des nuisances occasionnées par l'érosion s'élèverait à 10 milliards de FF sans compter la valeur intrinsèque des sols perdus, difficilement chiffrables.

Plus sérieux que ces affirmations dramatiques, sont les résultats des mesures de pertes en terre sur parcelle (100 m²) mises en place sous l'impulsion du Professeur Frédéric Fournier depuis les années 1950, par l'ORSTOM et les Instituts du CIRAD (**Roose, 1967**). Ces pertes en terre varient de 1 à 200 t/ha/an (jusqu'à 700 tonnes en montagne, sur des pentes de 30 à 60 %) sous des cultures propres aux régions forestières à pentes moyennes (4 à 25 %), des pertes en terre de 0,5 à 40 t/ha sous mil, sorgho, arachide, coton sur les longs glacis ferrugineux tropicaux des régions soudano-sahéliennes (**Roose et al, 1984**).

Si on accepte une densité apparente des horizons de surface variant de 1,2 à 1,5, les ablations correspondantes par érosion varient de 0,1 à 7 (et même 15 mm en montagne), en fonction de la topographie, du climat et des cultures. Ceci correspond à 1 à 70 cm (150) cm/siècle ou 0,2 à 14 mètres depuis le début de l'ère chrétienne.

La durée de vie des sols peut aussi être estimée à partir des pertes en terre annuelles moyennes, de l'épaisseur du sol explorable par les racines, de la vitesse de la régénération de la fertilité du sol et de la courbe de rendement du sol en fonction de l'épaisseur de la couche arable (**Elwell et al, 1984**). En milieu forestier, où les pluies sont agressives et les pentes fortes, les pertes en terre peuvent être importantes et la dégradation des terres est très rapide (quelques années). Cependant, la régénération des sols y est également rapide, car un sol dégradé est rapidement envahi par la végétation.

En milieu semi-aride, la durée de vie peut atteindre quelques dizaines d'années, malgré la modestie des pentes et de l'agressivité des pluies, mais la restauration de la fertilité des sols est d'autant plus lente que la production de biomasse est faible en zone aride et que les sols sont profondément épuisés.

L'analyse des transports solides de centaines de rivières américaines et européennes, montre qu'il existe une zone climatique semi-aride (pluies annuelles moyennes variant de 350 à 700 mm, en fonction de la continentalité des bassins) où la dégradation spécifique des bassins est maximale. En zone plus aride, le transport solide spécifique diminue avec l'énergie des pluies (**Fournier, 1955**). En zone plus humide, le couvert végétal intercepte une part importante de l'énergie des pluies et du ruissellement (**Fournier, 1955 et 1960**). Ce qui est vrai statistiquement sur un grand échantillon de bassins versants, ne l'est plus à l'échelle du terroir et encore moins à l'échelle de la parcelle. Le mode de gestion particulier de chaque

parcelle, entraîne des différences locales très importantes et c'est ce qui justifie la mise au point de techniques culturales de lutte antiérosive.

En Algérie, L'érosion hydrique affecte de plein fouet les ouvrages hydrauliques, conséquence d'un envasement rapide, face à cet épineux problème l'Algérie tente bien que mal d'y remédier. Cependant des mesures ont été effectuées au niveau de ces ouvrages dans le but de mesurer l'ampleur de ce phénomène qui est l'envasement. Des chiffres alarmants de l'état d'envasement des barrages algériens sont présentés dans la tableau I.3.

Tableau I. 3. L'état d'envasement de quelques barrages algériens

Barrage	Mise en eau	Capacité Initiale ($10^6 m^3$)	Envasement moyen annuel ($10^6 m^3/an$)
	Année	Mm ³	Mm ³
OUED FODDA	1932	228	2.66
GHRIB	1939	280	3.2
DJORF EL TORBA	1934	350	1.3
S.B.M.A	1978	235	1
LACHEFFIA	1965	175.68	0.17
EGHIL EMDA	1953	154.8	1.6
BOUHANIFIA	1944	73	0.78
BENI BAHDELS	1940	63	0.2
BAKHADA	1936	37.6	0.27
FOUM EL GHERZA	1950	47	0.8
ZERDEZAS	1936	14.9	0.25
HAMIZII	1935	21	0.35
MEFROUCH	1936	16	0.12
K'SOB	1940	11.6	0.3
FOUM EL GUEISS	1939	3	0.03

(Remini et als, 2003)

I.1.7. Quantification de l'érosion

L'importance de l'érosion hydrique et ces préjudices pour l'activité humaine d'un coté (pertes en sol), ont poussé l'homme à chercher et à proposer les méthodes pour y remédier à ce phénomène crucial. Pour ce faire, il a été procédé à la quantification de cette érosion par des méthodes empiriques.

-Quantification de l'érosion

Plusieurs formules et méthodes qui impliquent tous les paramètres physiques sont utilisées pour la quantification de l'érosion hydrique.

a) Formule de Henin "1950"

Cette formule symbolise la relation existante entre l'érosion et les facteurs susceptibles de la favoriser ou de la limiter. La quantification de l'érosion spécifique "Es" est donnée par la formule I.1

$$E_s = \frac{I_p I_s}{K V_e} \quad (\text{I.1})$$

Avec : I_p : Intensité des précipitations;

I : Pente du bassin versant;

Les facteurs " I_p " et " I " favorisent l'érosion

Et S : Susceptibilité des sols;

K : Perméabilité;

V_e : Végétation.

Les facteurs S , K et V_e limitent l'érosion et en plus, les facteurs S et V_e semblent les plus difficiles à quantifier.

b) Formule universelle de Wischmeier "1959"

Vingt ans après la mise en place des essais d'érosion en parcelles dans une bonne dizaine d'Etats d'Amérique du Nord, il existait une accumulation d'un grand nombre de données sur l'érosion dont il convenait de faire la synthèse. En 1958, Wischmeier, statisticien du Service de Conservation des Sols fut chargé de l'analyse et de la synthèse de plus de 10.000 mesures annuelles de l'érosion sur parcelles et sur petits bassins versants dans 46 stations de la Grande Plaine américaine. L'objectif de Wischmeier et Smith (1978 ;1960) était d'établir un modèle empirique de prévision de l'érosion à l'échelle du champ cultivé pour permettre aux techniciens de la lutte antiérosive de choisir le type d'aménagement nécessaire

pour garder l'érosion en-dessous d'une valeur limite tolérable étant donné le climat, la pente et les facteurs de production.

- Analyse des principes du modèle

Selon ce modèle, l'érosion est une fonction multiplicative de **l'érosivité des pluies** (le facteur **R**, qui est égal à l'énergie potentielle) que multiplie **la résistance du milieu K** (l'érodibilité du sol), **SL** (le facteur topographique), **C** (le couvert végétal et les pratiques culturales) et **P** (les pratiques antiérosives). C'est une fonction multiplicative, de telle sorte que si un facteur tend vers zéro, l'érosion tend vers 0.

Ce modèle de prévision de l'érosion est le suivant:

$$E = R \times K \times SL \times C \times P \quad (\text{I.2})$$

1° l'indice d'érosivité des pluies R

Il est égal à E, l'énergie cinétique des pluies, que multiplie I_{30} (l'intensité maximale des pluies durant 30 minutes exprimée en cm par heure). Cet indice correspond aux risques érosifs potentiels dans une région donnée où se manifeste l'érosion en nappe sur une parcelle nue de 9 % de pente.

$$R = \sum EI_{30} / 100 \quad (\text{I.3})$$

$$E = 200 + 89 \log I \quad (\text{I.4})$$

E = énergie cinétique de la pluie exprimée en tonne métrique x mètre/ha/cm de pluie.

$$E = 11,9 + 8,73 \log(I) \quad (\text{I.5})$$

E en J/m²/mm de pluie

I l'intensité moyenne de la pluie (mm/h).

R peut-être déterminé pour des périodes variables (1 averse à 1 année).

Lorsqu'il est utilisé comme paramètre du modèle de Wischmeier, l'indice R est généralement calculé comme la moyenne de plusieurs années.

2° Erodibilité du sol, K

Fonction de la quantité de matières organiques, de la texture, de la structure, et de la perméabilité du sol, l'érodibilité du sol est déterminée pour une parcelle de 22.2 m de long, travaillée dans le sens de la pente (9 %), sans apport de matières organiques depuis trois ans. (Roose, 1994)

La formule de Wischmeier et Smith (1978) permet de déterminer K.

$$100 \cdot K = 2.1 \times 10^{-4} \times M^{1.14} (12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3) \quad (\text{I.6})$$

M : produit du pourcentage de limon compris entre 0.1 et 0.002 mm par le pourcentage de tout ce qui n'est pas de l'argile.

a : pourcentage de matière organique

b : code de structure du sol utilisé dans la classification

c : classe de perméabilité du profil

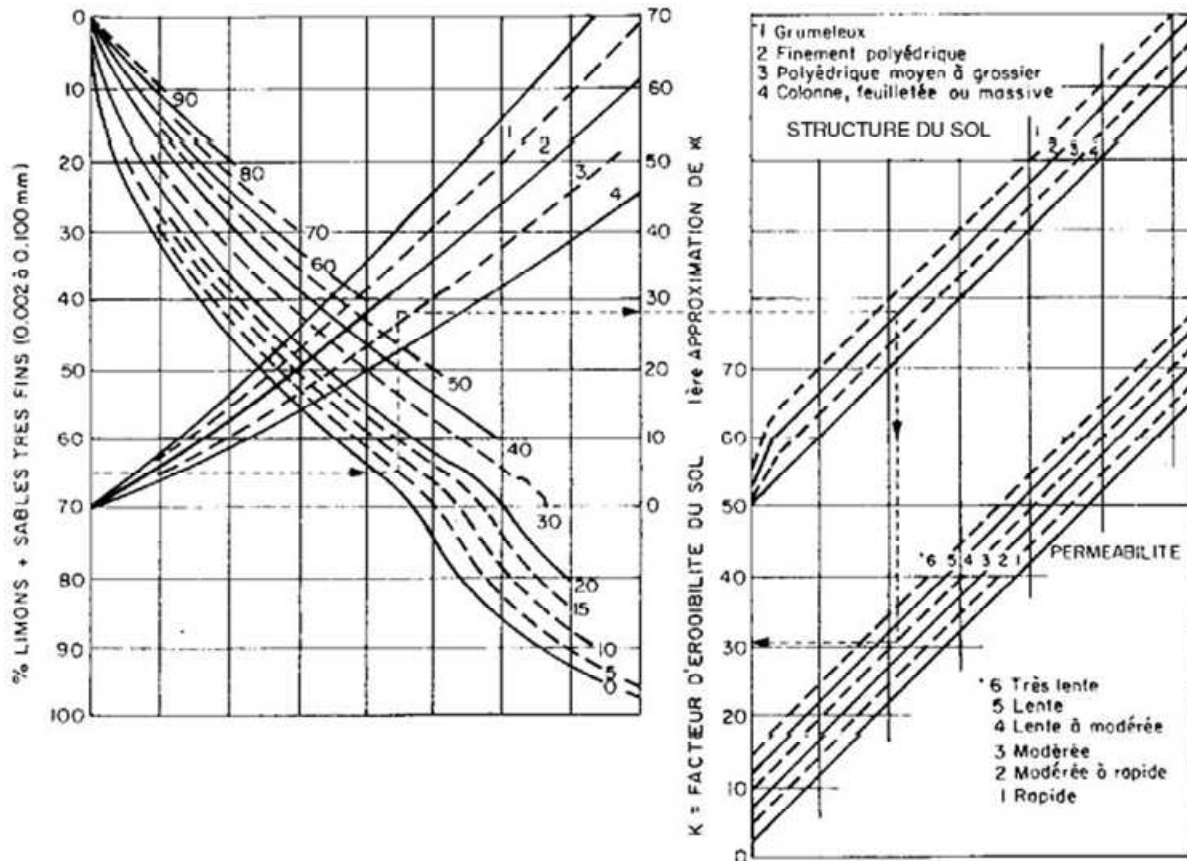


Figure I.1 Abaque d'érodabilité de sol K

Limon et sable fin=65%; sable=5%; matière organique=2.8%; structure du sol=2 ; perméabilité=4
 $K = 31\%$

3° Facteur topographique

L'influence de la pente sur l'évolution des versants est bien connue des géomorphologues, au point que certains d'entre eux, caractérisent l'âge du paysage par l'inclinaison et la forme des pentes. De fortes pentes et des vallées encaissées se rencontrent dans un relief jeune comme celui des Alpes, tandis que dans un relief adulte ou sénile comme on en trouve sur le vieux continent africain, ce sont des plateaux, des glacis à pentes douces et de vastes pénéplaines qui offrent des paysages dégradés.

La pente intervient dans les phénomènes d'érosion du fait de sa forme, de son inclinaison et de sa longueur.

-La forme du versant

D'après Wischmeier (1974), une pente concave diminue les transports solides (par sédimentation localisée) tandis qu'une pente convexe l'augmente en fonction de l'inclinaison du segment le plus pentu. La présence de pentes concaves dans le paysage indique qu'il doit y avoir des piégeages, des colluvions et d'alluvions dans la vallée.

L'inclinaison de la pente

Lorsque la pente augmente, c'est l'énergie cinétique du ruissellement qui augmente et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies lorsque les pentes sont supérieures à 15 %. De plus, ce sont les particules fines qui sont les plus sensibles et qui seront arrachées les premières avec la matière organique.

Les formes d'érosion changent selon l'inclinaison de la pente. Ainsi, pour des pentes inférieures à 4%, ce sont les particules fines qui migrent. Pour des pentes supérieures à 7 %, des rigoles apparaissent. Des particules plus importantes sont transportées à l'intérieur de griffes. Enfin, au delà de 20 %, les rigoles se creusent et deviennent de plus en plus profondes (5 à 20 cm), ce qui se traduit par une surface très accidentée. **(Roose, 1994).**

Aux Etats-Unis, **Wischmeier et Smith(1960)** ont montré que l'on pouvait exprimer l'érosion de parcelles soumises à des pluies naturelles pendant 17 ans, et dont la pente est comprise entre 3 et 18 %, sous la forme d'une équation du second degré :

$$E = \frac{\sqrt{L}}{100} (0.76 + 0.53S + 0.076S^2) \quad \text{(I.7)}$$

E : Erosion en T/ha

S : Pente exprimée en pourcentage

L : longueur exprimée en pieds.

-Longueur de la pente

La vitesse étant proportionnelle à la distance parcourue, plus la longueur de la parcelle est grande, plus la vitesse augmente. Les particules d'eau qui ruissellent emmagasinent donc une énergie plus importante qui se traduit par la création et le creusement de rigoles. Cependant, il est très difficile de connaître précisément l'exposant qui relie l'érosion et la longueur de la pente.

Cependant, le facteur topographique de Wischmeier & Smith donné sur le graphe ci-dessous permet de donner des résultats satisfaisant :

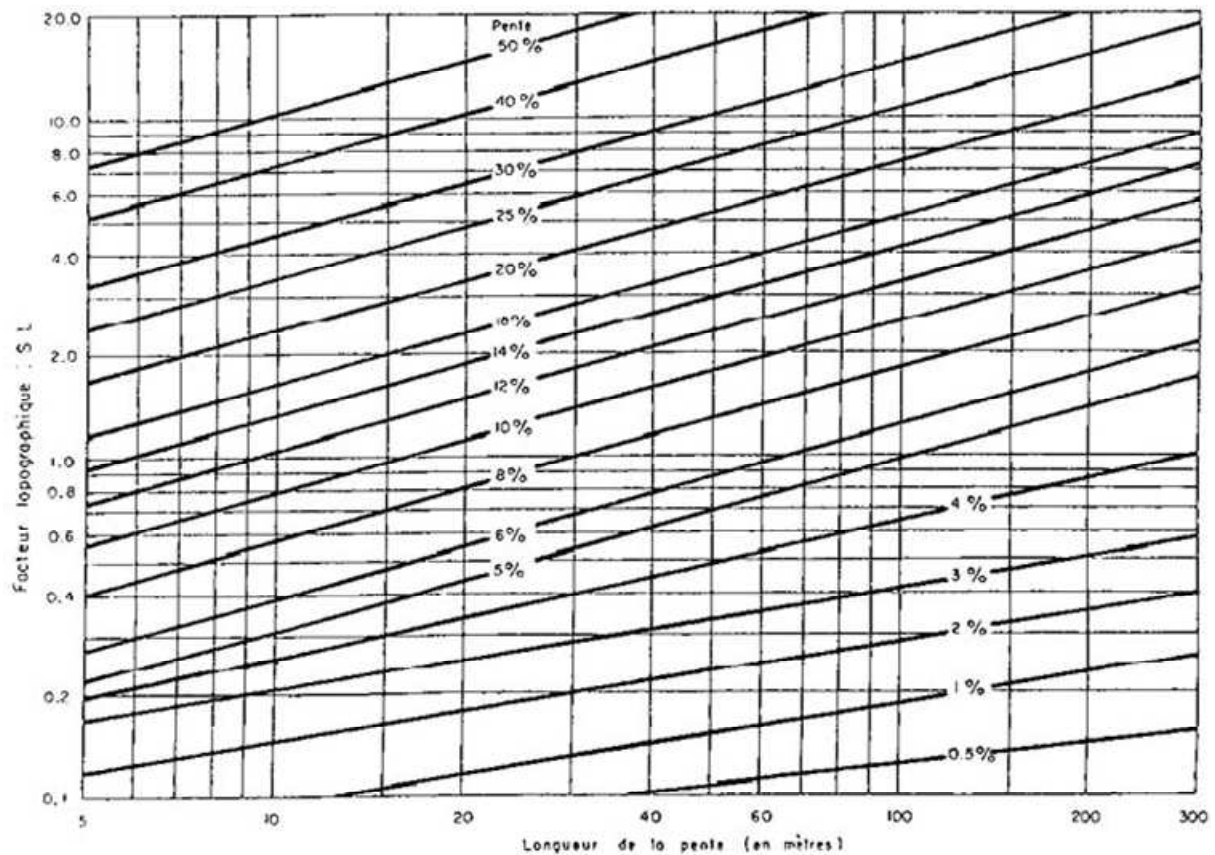


Figure I.2:Facteur topographique en fonction de la longueur de la pente et de son inclinaison

4° Couvert végétal

Le type de couvert végétal est absolument à prendre en compte puisque c'est de lui que va dépendre l'amortissement des gouttes de pluies, le ralentissement du ruissellement, et l'infiltration. Le facteur C tenant compte de la couverture dépend de:

- Le pourcentage de sol à nu : l'érosion intervient majoritairement sur des sols à nus lors d'épisodes pluvieux agressifs.
- La hauteur du couvert végétal : si celui-ci est trop élevé, l'amortissement des gouttes de pluies n'interviendra plus. En effet, après une première interception, les gouttes seront de nouveau rejetées vers le sol.
- l'architecture des plantes : des plantes en forme d'entonnoir (ananas) auront tendance à drainer l'écoulement et à provoquer des ravinements. A l'inverse, les plantes dites "parapluie" vont disperser les gouttes d'eau et donc diminuer leur énergie. (babanier).

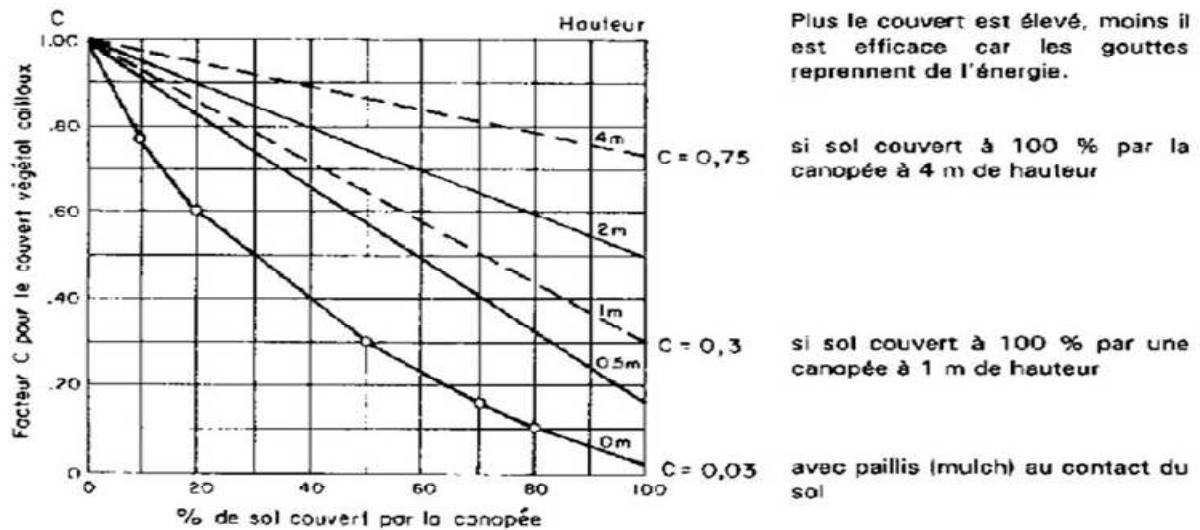


Figure I.3 : Couvert végétal (Roose (1994,))

Par exemple, lorsque le couvert végétal est de 100 % mais qu'il se trouve à 4 m de hauteur, l'érosion sera de l'ordre de 75 % d'une parcelle nue. Si le couvert est à deux mètres, l'érosion sera de l'ordre de 50 %. S'il est à 50 cm, l'érosion sera encore de l'ordre de 18 %. Par contre, au cas où l'on a une litière, l'érosion sera réduite à 3 %. Si on regarde la baisse de l'érosion en fonction du pourcentage du sol couvert par le mulch, on observe une baisse très rapide de l'érosion pour une surface couverte relativement réduite. Par exemple, pour 10 % de sol couvert, l'érosion n'est plus que de 78 %, pour 20 %, l'érosion n'est plus que de 60 %, pour 50 % de sol couvert, l'érosion est réduite à 30 % de celle mesurée sur la parcelle nue témoin.

c). Formule de Grivilovic (1960)

Il a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnelle à la température, à la pluie et à un coefficient d'érosion, l'équation est donnée par l'expression I.8:

$$E_s = 3,14 \cdot T \cdot P_0 \sqrt{Z^3} \quad (\text{I.8})$$

Où

E_s : érosion spécifique dans le bassin versant ($T/\text{km}^2 \cdot \text{an}$)

T : coefficient de température

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0.1 \quad (\text{I.9})$$

Avec :

t_0 : température moyenne annuelle en $^{\circ}\text{C}$.

P_0 : pluie annuelle en (mm).

Z : coefficient d'érosion.

Avec

$$Z = y.[x.a](\delta + \sqrt{I_{\text{moy}}}) \quad (\text{I.10})$$

Où

y : valeur du coefficient de la résistance du sol dû à l'érosion. Il dépend de la roche mère, le type du sol et du climat.

[x.a] : Coefficient de régularisation du bassin versant, se rapportant à la protection des sols, des influences des phénomènes atmosphériques des forces érosives liées aux conditions naturelles. Il est aussi tabulé.

δ : équivalent numérique des processus visibles et nettement prononcés dans le bassin versant.

I_{moy} : indice de pente moyenne du bassin versant.

d) Formule de L'A.N.R.H (1970)

$$T_{\text{ss}} = 26.62 I_e + 5.071 I_p + 9.77 C_t - 593.59 \quad (\text{I.11})$$

T_{ss} : transport solide spécifique moyen annuel (T/Km².an)

I_e : indice lithologique (%).

I_p : indice des précipitations (%).

C_t : coefficient de torrentialité. $C_t = D_d \cdot F_1$

D_d : Densité de drainage $D_d = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{A}$

L_i : longueur de tous les cours d'eau d'ordre « 1 » (K m).

F_1 = nombre de talweg/ surface fréquence des talwegs élémentaire

Cette formule est applicable dans les conditions suivantes :

$$I_e > 10\%$$

$$I_p > 300$$

e) Formule de Tixeront (1960)

$$E_s = [S_1 \cdot Ta_1 + S_2 \cdot Ta_2 + S_3 \cdot Ta_3 + \dots + S_n \cdot Ta_n] \quad (\text{I.12})$$

Avec :

E_s : Erosion spécifique (t/Km².an).

Ta_1, Ta_2, Ta_n : Taux d'abrasion en fonction de la perméabilité du sol dans les sous Bassin (T/Km²).

S : superficie totale du bassin (Km²).

S₁, S₂, S_n : Superficie des sous bassins(Km²).

Maintenant, si on suppose que la totalité du bassin possède une même perméabilité,

$$\text{On a } E_s = K \cdot L_e \quad (\text{I.13})$$

L_e : Lamé d'eau ruisselée moyenne interannuelle (mm).

K : constante

K : coefficient qui tient compte de la perméabilité des terrains.

K = 8,5 pour les terrains d'une perméabilité élevée.

K = 75 pour les terrains d'une perméabilité moyenne élevée.

K = 350 pour les terrains d'une perméabilité faible à moyenne.

K = 1400 pour les terrains d'une perméabilité faible.

K = 3200 pour les terrains perméables.

F). Formule de Fournier (1960)

$$Q_s = \frac{1}{36} \cdot \left[\frac{P}{P_a} \right]^{2,65} \cdot \left[\frac{H_{\text{moy}}}{S} \right]^{0,46} \quad (\text{I.14})$$

Q_s : l'apport solide moyen inter annuel (T/Km².an).

P : la pluviométrie du mois le plus arrosé (mm).

H_{moy} : l'altitude moyenne (mm).

P_a : la pluviométrie moyenne inter annuelle (mm).

S : la superficie du bassin versant (Km²).

I.2. Le transport solide

I.2.1. Généralités

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion, la dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés par le réseau d'écoulement dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement et de la granulométrie.

L'eau trouve la puissance nécessaire pour ce transport dans la perte de charge qu'elle subit. Le champ d'exploitation de vitesse varie tout au long du profil de l'oued d'amont en aval.

L'eau met en jeu deux types de mécanisme : le charriage et la suspension qui sont les principaux types de transport solide.

La capacité de charriage est liée à la nature granulométrique des matériaux et varie dans le temps et dans l'espace avec le débit liquide.

La répartition entre le charriage et la suspension dépend essentiellement de la dimension des matériaux rapportés à la vitesse de l'eau et à la turbulence de l'écoulement.

En tout point d'une rivière, l'alimentation en débit solide est définie par les caractéristiques hydrologiques de son bassin versant.

I.2.2. Transport Par Charriage

I.2.2.1. Définition : le transport par charriage est l'un des principaux types de transport solide dans un cours d'eau, il concerne les plus gros matériaux qui contribuent à la formation et l'équilibre du lit, principalement la pente.

Ces éléments sont transportés par le fond par roulement, glissement ou saltation. La direction du mouvement est en gros parallèle au fond et les accélérations verticales sont faibles.

Le charriage dit transport de fond, constitue un sérieux problème en régularisation des débits de cours d'eau et dans la construction des ouvrages hydrotechniques.

Plusieurs recherches ont été entamées et axées sur le transport des sédiments en régime fluvial, aussi bien par voie théorique que par voie expérimentale, mais il n'existe pas encore une théorie générale du mécanisme et il est difficile de donner une définition universelle acceptable de la charge du fond.

Du Boys (1879) a été l'un des pionniers de cette recherche sur le charriage. Ce n'est que vers 1930 que cette recherche s'intensifie avec Meyer- Peter, Einstein ... Ils ont basé leurs

travaux sur l'équilibre d'une particule ou sein d'un liquide en mouvement en régime fluvial, pour un canal de forme régulière.

Mais ces études ne peuvent pas s'appliquer directement à des transports de particules non homogènes pour des formes de lits d'oueds non régulières.

Einstein a dressé une liste de caractéristiques qui y sont généralement associées:

1. Il y'a échange de particules, permanent et intense entre la charge du fond en mouvement et le lit.
2. La charge du fond se déplace lentement vers l'aval et le mouvement de chaque particule, individuellement, se fait à coups rapides séparés par des intervalles de repos relativement longs.
3. Le saut moyen d'une particule est à peu près indépendant des conditions d'écoulement, de l'intensité du transport solide et de la composition des sédiments.
4. Les vitesses de déplacement des différentes particules varient selon qu'elles se déplacent plus ou moins souvent.



Photo I.3: Transport en charriage (Oued Cheliff-Ghrib, 2009)

I.2.2.2. Description du phénomène

Sur le lit des matériaux sans cohésion, les grains isolés sont soumis aux forces de pesanteur et aux forces hydrauliques.

- Les forces de pesanteur sont des forces stabilisatrices;
- Les forces hydrauliques sont des forces déstabilisatrices dues à l'écoulement (traînée et portance).

La grandeur physique explicative de ce mode de transport (charriage) est la contrainte hydrodynamique critique " τ_c ".

Donc les grains constituant l'interface solide- liquide, ayant un poids et un coefficient de frottement fini, ne peuvent être mis en mouvement par l'action du fluide que si la contrainte sur le fond " τ " dépasse la valeur de la contrainte critique " τ_c "

Ce mouvement de granulats se traduira par un transport de fond dans le sens de l'écoulement.

La contrainte sur le fond de la rivière est exprimée par :

$$\tau = \rho g R_h J \quad (\text{I.15})$$

J : Perte de charge régulière de l'écoulement;

R_h : Rayon hydraulique.

Pour cela, on dit que le charriage est un phénomène à seuil et l'analyse très simplifiée pour le début de mouvement, revient à comparer directement la force déstabilisation due à l'écoulement et à la capacité de résistance au mouvement des matériaux, qui tapissent le fond.

I.2.3. Transport En Suspension

I.2.3.1. Définition

Le transport par suspension est le deuxième type de transport solide dans un cours d'eau. Il concerne les éléments fins qui progressent dans le sens du courant au sein même du liquide.

Ces éléments fins sont maintenus en suspension par la turbulence et la quantité de ces matériaux dépend essentiellement des éléments fins, qui proviennent de l'érosion du bassin, suite au ruissellement des eaux de pluie.



Photo I.4 : Transport en suspension (Khanchoul, 2008)

I.2.3.2. Description du phénomène

Au fur et à mesure que la vitesse du courant s'accroît dans le cours d'eau, l'intensité de la turbulence s'accroît également jusqu'au stade où les particules en saltation atteignent une hauteur au-dessus du fond où les forces extensionnelles fluctuantes dues à la turbulence dépassent le poids des particules.

A partir de ce moment, les particules ne suivent plus une trajectoire définie, mais elles suivent des trajectoires aléatoires dans l'épaisseur du fluide.

Le critère d'apparition des phénomènes de suspension qui consiste à définir la vitesse "U" d'écoulement du liquide, par laquelle la poussée de ce dernier sur les grains de diamètre "D" permet la mise en suspension des grains quartzeux de 0,2 à 0,85 millimètres de diamètre dans des écoulements naturels de rivières est définie par la formule I.16 de W.Kresser :

$$U^2 = 360 \cdot g \cdot D \quad (\text{I.16})$$

$$\text{Avec } U = C\sqrt{hJ} \text{ et } \tau = \gamma J \cdot h \text{ d'où } \tau = 360 \left(\frac{\gamma g}{C^2} \right) D$$

τ : Tension tangentielle de l'écoulement;

γ : Poids volumique du liquide;

C : Coefficient de Chezy;

h : Hauteur du liquide;

J : Perte de charge régulière.

Selon Roose (1987), la présence d'élément solide en suspension dans un cours d'eau est due à la turbulence de l'écoulement. Les particules solides subissent l'action des composantes transversales des vitesses de turbulence ($v = \bar{v} + v'$) qui s'opposent à la pesanteur pour maintenir les particules en suspension.

I.2.4. Apport Solide Annuel

C'est l'un des problèmes de l'envasement des barrages qui présente une variabilité dans l'espace et dans le temps. La capacité de piégeage dépend de nombreuses variables. Cependant des formules ont été proposées et prenant en considération le volume de la retenue.

- Pour les sédiments 'grossiers', **Levaindier (1989)**

$$\frac{\psi}{1-\psi} = 77 \left[\frac{V}{Q_a} - 0.001 \right]^{0.83} \quad (\text{I.17})$$

- Pour les sédiments 'Fin'

$$\frac{\psi}{1-\psi} = 26 \left[\frac{V}{Q_a} - 0.004 \right]^{0.84} \quad (\text{I.18})$$

Qa : Apport annuel en liquides (m^3)

V : Volume de la retenue exprimée (m^3)

-Evaluation du transport solide

Le transport solide se fait en deux modes, en suspension et en charriage. Dans le souci de mieux quantifier ce transport, plusieurs formules ont été proposées que certaines sont à utiliser avec précaution vu que les conditions de leur élaboration et conditions d'application sont différentes. Le premier à s'investir dans ce domaine fut **Dubois** 1879, puis **Moyer et Peter** 1934 ; en 1936, c'est **Shields** qui établit une formule du débit liquide en fonction de la pente hydraulique, de la tension tangentielle, de la tension tangentielle critique ainsi que du diamètre médian des granulats. A l'instar d'**Englund** (1967) et **Leviandier** (1989), plusieurs auteurs viendront, par la suite, porter un plus. Cependant ces formules n'ont pas été utilisées dans ce travail, puisque nous nous sommes intéressés qu'au traitement des couples débits liquide et solide.

I.2.5. Mesure du débit solide

I.2.5.1. Charriage

Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer le débit solide par charriage. La plus directe d'entre elles est de disposer d'une trappe sur la largeur du lit de l'oued (transversalement), qui va piéger des sédiments et à l'aide d'un pompage, on connaîtra le volume charrié.

- **Détecteur hydrophoniques**

C'est un dispositif composé d'une boîte, équipée d'une plaque vibrante sur la face amont qui est orientée normalement à la courante grâce un gouvernail. A l'intérieur de cette boîte se trouve un microphone qui transmet les percussions reçues par la plaque vibrante à l'aide d'un câble.

- **Traceur radio actif**

En mesurant la vitesse des traceurs radio actifs, on peut estimer la vitesse de déplacement des particules.

- **Procédés Topographiques**

Par des mesures topographiques, la différence entre deux levés nous donnera la quantité des sédiments déposés au niveau de la retenue. Toutefois par le moyen de cette méthode, on mesure aussi le transport en suspension.

I.2.5.2. Transport en suspension

- **Méthode rapprochée**

Elle consiste à effectuer des prélèvements en bordure d'un cours d'eau. Ainsi, dans un laboratoire, nous mesurerons la concentration «C » de l'échantillon prélevé par filtration, le passage à l'étuve et enfin la pesée. La relation du débit solide (Q_s) est exprimée par la formule I.19 :

$$Q_s = C.Q_l \text{ en (kg/ s).} \quad \text{(I.19)}$$

Remarque :

La répartition de la charge en suspension, dans la section transversale d'une rivière dépend de la dimension du matériau. Les particules dont le diamètre est inférieur à 60 micron montre en général une répartition homogène selon la profondeur et la largeur (suspension uniforme). Il n'est pas de même pour les éléments grossiers qui se présentent selon un gradient de concentration en fonction de la profondeur (suspension graduée).

- **Méthode par exploration de champs de vitesse**

La méthode consiste à explorer à travers une section droite d'un cours d'eau, le champ de concentration de matières en suspension et de déterminer le débit solide par intégration. Nous prélevons des échantillons aux différents points de la section transversale et en différentes profondeurs, par la suite on détermine le champ de concentration et le champ de vitesse (Figure I.4).

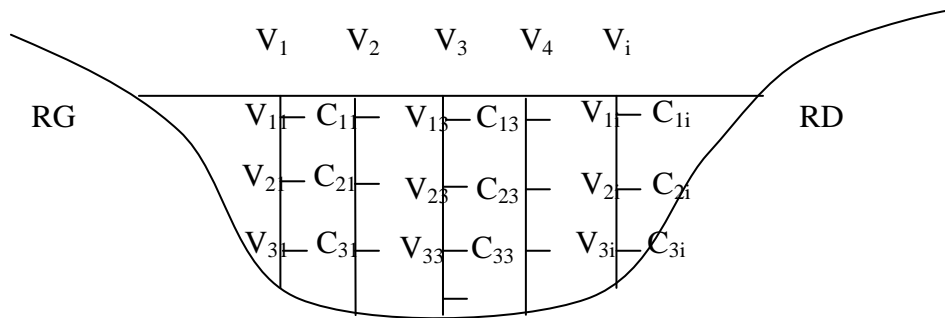


Figure I.4. Section de mesure

Le dépouillement d'un jaugeage de débit solide se fait de la même manière que celui de débit liquide. Un certain nombre de points est réparti sur plusieurs verticales, pour lesquelles on dispose d'une mesure de vitesse (V) et d'une mesure de concentration des matériaux en suspension (C).

Pour une verticale i nous reporterons $C.V$ en fonction de la profondeur h_i . Nous traçons les épures de vitesse de chaque verticale (Figure I.5).

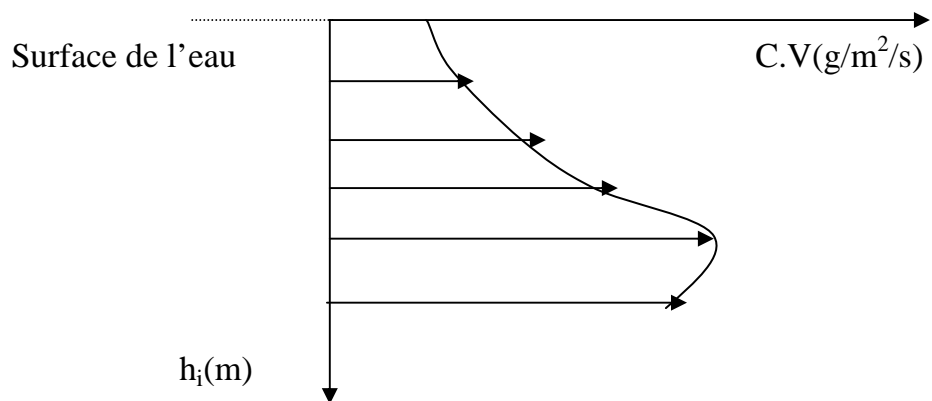


Figure I.5. Epure des débits solides élémentaires

D'où

$$q_s = \int_0^{h_i} CVdh \quad (\text{I.20})$$

C: concentration des matériaux en suspension au niveau d'un point de mesure en (g/l).

V : vitesse au niveau d'un point de mesure en (m/s).

hi : profondeur de la vertical i en (m).

Pour avoir le débit solide au niveau de la section de l'oued (section de mesure) , on intègre le débit solide unitaire sur toute la largeur de l'oued (largeur de la section de mesure) , qui sera donnée par la formule I.21 :

$$Q_s + \int_0^L q_s \cdot dl = \int_0^L \int_0^{h_i} C v \cdot dh \cdot dl \quad (\text{I.21})$$

avec :

Li : largeur totale de la section de mesure.

Qs : débit solide à travers toute la section exprimée en Kg/s ou bien en Tonne /an.

Il est à noter l'existence d'autres méthodes de mesure de concentration, telle que la mesure directe de la concentration en utilisant l'absorption et la diffusion des rayonnements par les matières en suspension et aussi la méthode de mesure de concentration par prélèvement selon (Guillot , 1987)

▪ Détermination de la concentration des matériaux en suspension par des formules

➤ Formule d'obrien (1933)

Cette formule s'appuie sur le fait que le taux de concentration dépend directement de la côte Z des points prélèvement.

$$\frac{C}{C_0} = \left[\frac{h-Z}{Z} \cdot \frac{Z_0}{h-Z_0} \right]^{\frac{w}{ku^0}} \quad (\text{I.22})$$

Avec :

C : taux de concentration volumique à la côte Z (g/l).

C₀ : taux de concentration volumique à la côte Z₀ (g/l).

h: hauteur du liquide (m).

W : vitesse de décantation des grains (m/s).

K : constante universelle de Karman.

U* : vitesse moyenne de l'écoulement (m/s).

$$U^* = (\tau g / \delta)^{1/2}$$

Avec :

τ : tension de frottement (Kg/m²)

δ : poids spécifique de l'eau

Cependant cette formule présente des limites d'application, elle est appliquée pour des écoulements rigoureusement uniformes et ne comptant aucune sorte de fluctuation plus au moins aléatoire de la vitesse.

➤ **Formule d' Abalianz (1958)**

$$\bar{C} = 26. \frac{\bar{U}}{h^{3/4} \cdot W} \quad \text{(I.23)}$$

\bar{C} : Valeur moyenne du taux de concentration des matériaux (g/l).

\bar{U} : vitesse moyenne de l'écoulement (m/s).

W : vitesse de décantation des grains dans l'eau (m/s).

H : hauteur du liquide(m).

I.3. Caractérisation de la relation concentration en sédiments en suspension – débit liquide :

Les problèmes posés par la mesure du transport solide en suspension de part leur nature, incitent les hydrologues à s'intéresser à l'étude des variations de C et Q au cours d'une crue. En effet, la nature complexe du phénomène de crue, la conception de nouveaux, échantillonneurs et de nouvelles techniques de mesure, ainsi que les difficultés rencontrées lors des mesures par observateurs, sont les éléments clé de cet intérêt.

Dans les petits cours d'eau, les concentrations des sédiments en suspension sont directement liées au débit. Les concentrations des sédiments en suspension augmentent généralement très rapidement pendant les montées des crues, produisent une pointe avant le débit maximal puis diminuent plus lentement pendant la décrue.

Autrement le débit liquide et la concentration instantanée des sédiments en suspension peuvent ne pas avoir une relation stationnaire pendant un écoulement simple dû à une averse. La tendance pour que la concentration en sédiment ait différentes valeurs à des débits identiques est l'effet d'hystérésis.

La figure montre le caractère cyclique de la relation C-Q. Trois périodes peuvent être distinguées dans cette boucle :

- (a) La première période est caractérisée par une forte augmentation de la concentration de sédiments en suspension et du débit. Cette phase est définie par l'arrivée successive des premières quantités de matériaux en suspension produites essentiellement par l'effet « splash » des pluies érosives dans les zones de ruissellement proches de l'exutoire du bassin. Cette période peut aussi correspondre à la remobilisation des matériaux déposés sur le fond lors des basses eaux (**Kattan et al., 1987**).
- (b) La seconde période est caractérisée par une diminution de la concentration des sédiments en suspension et une forte augmentation du débit. Cette phase de transport correspond à la dilution de la concentration des sédiments et peut également être attribuée à l'érosion des berges du cours d'eau (**Kattan et al., 1987 ; Dinehart, 1992**).
- (c) La troisième période est caractérisée par une diminution de la concentration des sédiments en suspension et du débit. Cette phase correspond au dépôt des matériaux sur le lit des cours d'eau et dans les zones alluviales du bassin.

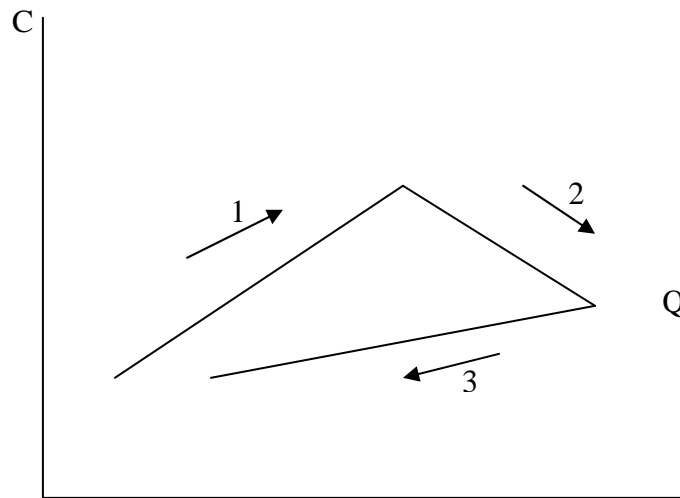


Figure I. 6: Modèle de relation C-Q
 1-Erosion 2- Transport 3- Dépôt

Les boucles d’hystérésis de la relation C-Q identifiées dans la bibliographie sont représentées ci-dessous (Tableau I.4). Bien qu’il existe d’autres formes de boucles, ce tableau représente probablement la majorité des boucles d’hystérésis relevées à travers les différentes recherches effectuées dans plusieurs bassins du monde.

Les effets de la combinaison des différents paramètres statistiques (mode, aplatissement et asymétrie) peuvent constituer une approche adimensionnelle et qualitative beaucoup plus importante que les méthodes avec calculs détaillés.

Dans cette caractérisation, les parties montée et décréue représente les deux zones de base pour l’analyse des classes d’hystérésis. Le critère rapport C/Q , est un critère simple, objectif mais fiable. Il est considéré comme étant le premier critère de base.

Tableau I.4 : Types de boucles d'hystérésis (d'après Williams, 1989)

Type de classe	Forme de boucle	Rapport C/Q	Référence auteur
1	Ligne droite	Rapport C/Q de la montée égal à celui de la décrue	Wood (1977)
2	Sens des aiguilles d'une montre	Rapport C/Q de la montée supérieur à celui de la descente, pour toute valeur de Q.	Wood (1977)
3	Sens contraire des aiguilles d'une montre	Rapport C/Q de la montée inférieur à celui de la descente pour toute valeur de Q	Axelsson (1967)
4	Forme de huit	(a) Rapport C/Q de montée supérieur à celui de la descente pour une partie des valeurs de Q. (b) Rapport C/Q de montée inférieur par rapport à la descente pour une autre partie des valeurs de Q	Arnborg et al. (1967)

La relation la plus simple est la droite (figure I.7 a) dont l'unique caractéristique est que le rapport C/Q lors de la montée de la crue est le même que celui lors de la décrue. D'autres formes peuvent dériver de ce premier cas (figure (1.7 (b) et (c)). Cette situation se produit lorsque les graphiques chronologiques de C et Q présentent des pics simultanés ainsi que les coefficients d'aplatissement et d'asymétrie identiques.

Le modèle représenté à la figure (figure I. 7(d)) est le plus répandu et le plus étudié.

Leopold et Maddock (1953), Sundborg (1956), Wood (1977), Paustian et Beschta (1979) ; L'hystérésis est selon le sens des aiguilles d'une montre. Cette forme est obtenue lorsque le pic de la concentration arrive à l'exutoire avant la pointe du débit et les deux graphiques chronologiques ont pratiquement le même coefficient d'asymétrie.

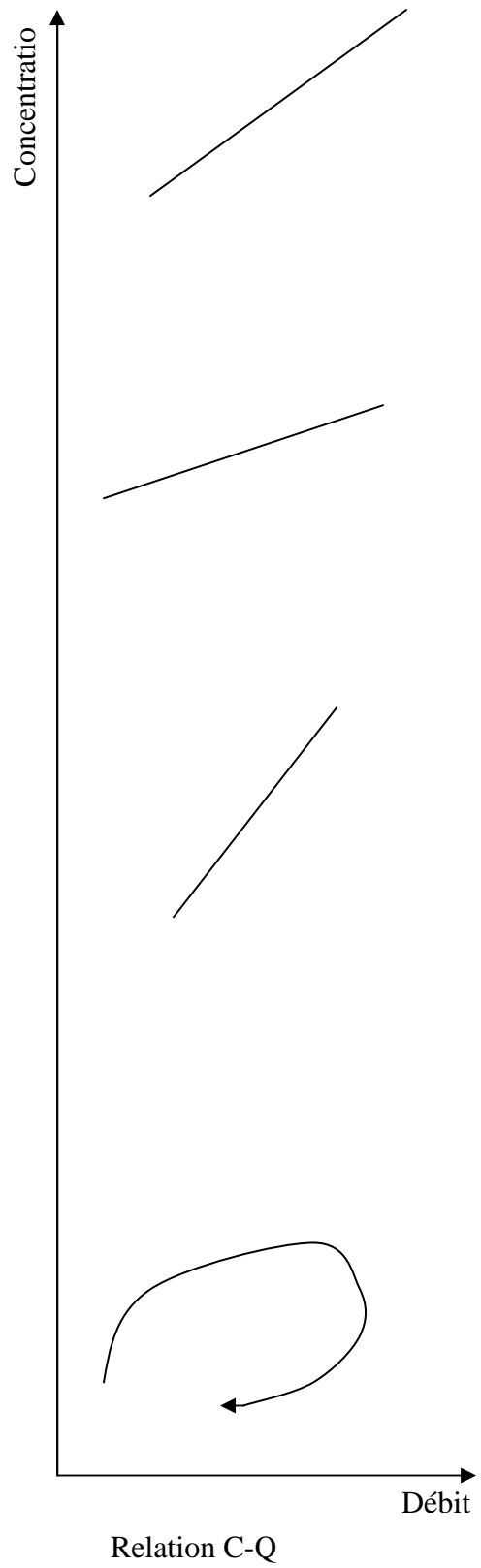
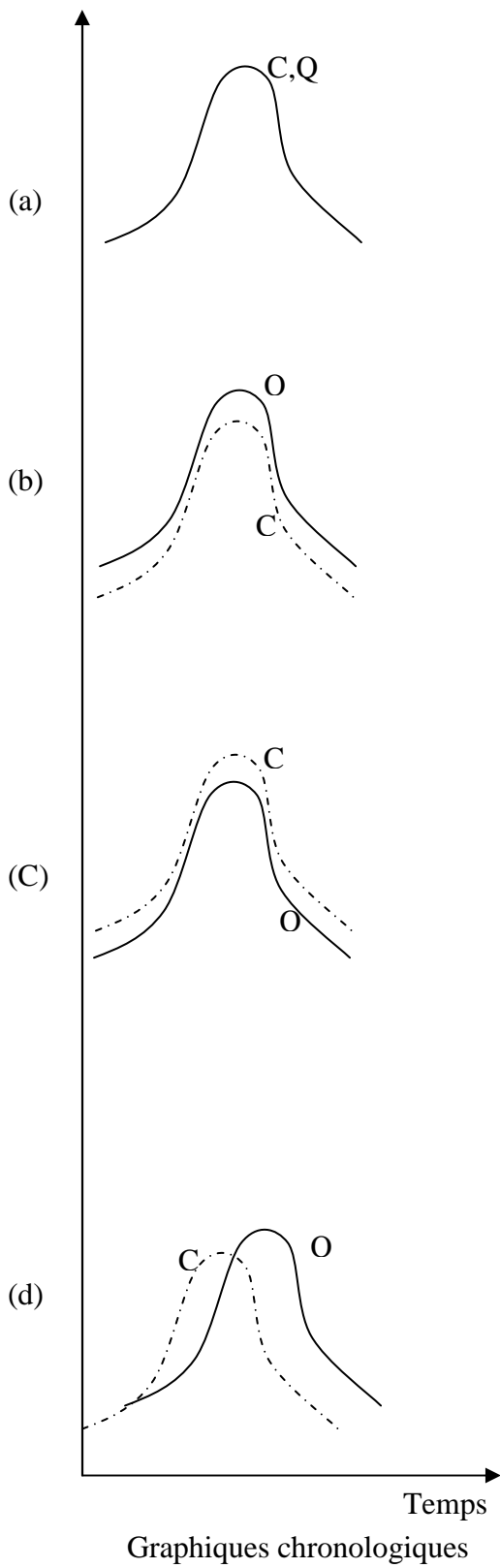
Ce schéma classique de l'hystérésis ne se répète cependant pas lors de toutes les crues. L'hystérésis peut être inverse (figure I.7 (e)). Le pic de la concentration arrive après celui du débit. Les valeurs de la concentration dans la partie montée sont inférieures à celles de la décrue, pour des valeurs données de débit. Cette forme est peu connue et peu de travaux ont été publiés.

L'hystérésis type sens des aiguilles d'une montre peut se produire également lorsqu'il y a arrivée simultanée des deux pics (C et Q) et donne une autre forme de boucles (figure I. 7 (f)). Les différences croissantes en ce qui concerne l'envergure des graphiques chronologiques peuvent affecter la boucle C-Q et donner une forme asymétrique (Figure I. 7(g)).

Sous certaines conditions, une boucle en forme de huit se développe sans considération de la variable dont le pic atteint le premier exutoire. Les deux parties de la boucle se forment selon des directions opposées (figure I.7(h)). Les rapports C/Q à différentes valeurs de Q expliquent pourquoi certains graphes chronologiques fournissent des relations C-Q en forme de huit.

Pour la majorité des types de boucles décrites, il est parfois difficile de trouver une explication à ce phénomène, quand le bassin est hétérogène du point de vue lithologique et du point de vue de la répartition spatiale des pluies (**Benkhaled et Remini, 2003**).

Les différentes relations entre charge solide et débit liquide visualisent les déphasages qui existent entre la propagation des ondes de crue et des ondes de matériel sédimentaire en suspension associées.



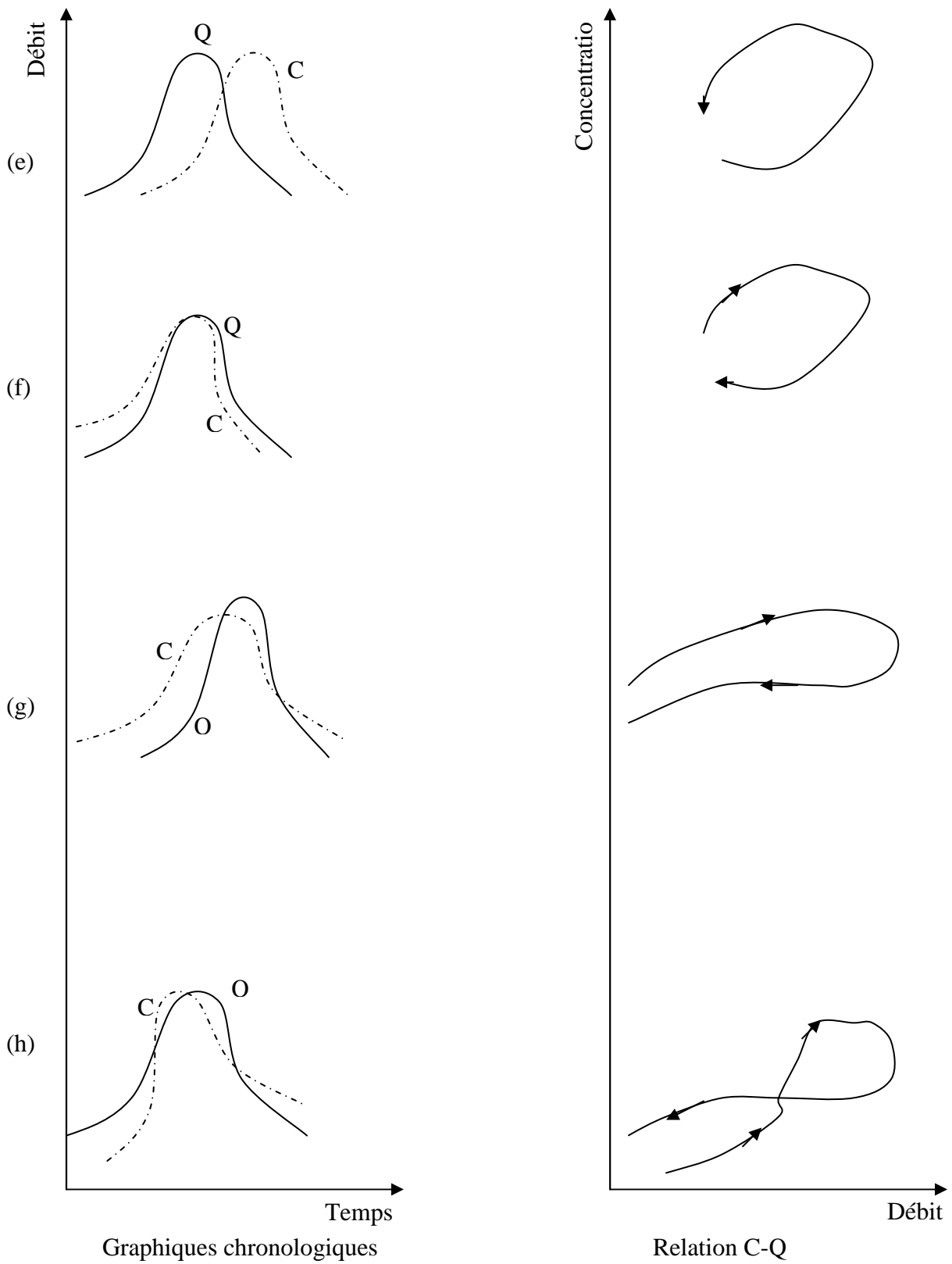


Figure I.7 Modèles de boucles d'hystérésis

I.4. Rappel Bibliographiques des travaux sur le transport solide en Algérie

Le phénomène d'érosion et l'envasement sont une véritable calamité en Algérie. La nature et la morphologie des terrains en pente, la fragilité du couvert végétal, le manque de boisement et l'urbanisation en amont des barrages engendrent une forte érosion qui réduit la capacité de stockage des barrages de 2 à 3% chaque année, suite à l'envasement dû au transport et au dépôt de sédiments par les eaux de ruissellement.

Touaïbia (2000) : le caractère irrégulier, aléatoire de l'érosion hydrique et sa discontinuité spatio-temporelle la rendent complexe.

Touaïbia (2001) : dans ces études sur le bassin Oued Mina, les zones marneuses sont sensibles à l'érosion hydrique et ont dépassé le seuil tolérable de 10 t/Ha.an.

Les rivières drainent souvent des collines et des montagnes marno-argileuses. Le courant provoque une érosion multiforme, avec la formation de ravins profonds et hiérarchiques, caractéristiques de mauvaises terres.

En Algérie, le taux d'érosion spécifique atteint les valeurs les plus élevées d'Afrique du Nord. Les éléments de quantification concernant les taux et les concentrations d'érosion spécifique, issus des travaux de **Demmak** (1982), donnent des chiffres allant de 20 à 500 tonnes/km²/an, avec une turbidité comprise entre 16 et 28 g/l. Le taux d'érosion spécifique atteint les 5.000 tonnes/km²/an dans le bassin de l'Agrioun qui alimente le barrage d'Ighil Emda (Bejaia). 120 millions de tonnes de sédiments sont rejetées chaque année dans la mer. L'irrégularité du climat influence directement les flux, qui sont caractérisés par :

- L'irrégularité saisonnière et interannuelle des flux d'eau ;
- La violence et la soudaineté des inondations : le débit du Cheliff peut dépasser les 4200 m³/s ;
- La sévérité et la durée des périodes basses eaux.

En Algérie, un effort louable a été entrepris depuis les années 1945 pour reforester les vallées (50.000 ha), les "bad-lands" ; fixer les ravines et corriger les oueds ; aménager 300.000 ha de terres cultivées en banquettes d'absorption ou de diversion (construites par les services de DRS) puis par la Direction Nationale des Forêts. Depuis 1978, la construction de banquettes a été suspendue, suite aux critiques des chercheurs, au rejet des paysans, et surtout, aux difficultés économiques. La lutte antiérosive a été restreinte à la protection des ouvrages d'art, à la reforestation, à la végétalisation des ravines et à la construction des grands barrages.

Pour les paysans, les seules actions de l'Etat concernent aujourd'hui l'amélioration foncière (c'est-à-dire, sous-solage des sols à croûte calcaire, qui augmente la productivité des céréales) et la création de petites retenues collinaires, fournissant de l'eau en tête de vallée pour le bétail, l'habitat et quelques hectares d'irrigation. Même cette politique est remise en

cause par des hydrologues qui font remarquer que l'envasement des barrages n'a pas diminué depuis l'effort consenti par l'aménagement des hautes vallées.

Heusch (1970) et Demmak (1982) : montrent que la majorité des sédiments piégés dans les réservoirs proviennent du ravinement, des glissements de terrain, des éboulements des berges et de la divagation des oueds. En fonction des objectifs des projets de lutte antiérosive en vue de réduire les nuisances à l'aval ou de préserver le capital foncier des versants, on cherchera un compromis permettant d'intervenir dans les vallées pour piéger les sédiments et stabiliser les berges tout en aménageant les versants pour réduire et retarder le ruissellement (améliorations foncières, talus enherbés.). Des méthodes de calcul économique existent, qui permettent de choisir les interventions de lutte antiérosive les plus efficaces, en se basant sur les coûts des traitements antiérosifs, des nuisances auxquelles on peut s'attendre en l'absence d'intervention.

Touaïbia (2003) : la couverture végétale, le coefficient d'écoulement, la surface et la densité de drainage sont autant d'éléments qui influent directement sur l'érosion hydrique sur les bassins versants, un modèle a été établi dans ce sens dans le cas du bassin versant de l'oued Mina dont la formulation est donnée par la formule I.24

$$E_s = 34,12 * S^{0,164} . Dd^{-0,284} . C_e^{0,573} . C_v^{-0,329} \quad \text{(I.24)}$$

Avec un coefficient de corrélation multiple de 0,95

F.A.O (1980) ; Demmak (1982) : les divers types de roches et leurs structures donnent une indication précieuse sur la capacité d'infiltration des zones occupées par des roches et par les sols , en conséquence sur la quantité du sol susceptible d'être érodée. Une faible infiltration des roches affleurant indique qu'une grande quantité de sédiment d'eau ruisselée par conséquent une grande quantité de terre peut être emportée.

Chebbani (1999) : Les sols marneux lorsqu'ils sont secs restent non érodables, mais dès qu'ils atteignent une certaine humidité leur sensibilité à la détectabilité et au ruissellement augmente.

Roose (1994) : Les argiles, les marnes, les schistes, les basaltes, les gneiss sont très vulnérables au ravinement, les transports solides dans un bassin versant dépendent de la surface en roche de différents types (argileuses, marneuses, schisteuses..).

Tixeront (1960) : Ses travaux sont basés sur les données de 32 bassins d'Algérie et 6 bassins de Tunisie, dont la superficie varie de 90 à 22300 km².

L'auteur à procédé à la correction et l'homogénéisation des séries qui figurent dans les annuaires hydrologiques de l'Algérie. Après avoir regroupé les bassins en trois classes, suivant un critère régional, il a essayé de mettre en évidence le rôle des facteurs suivants : précipitations, écoulement annuel, répartition saisonnière des pluies, le couvert végétal et les facteurs géomorphologiques dans la dégradation du sol.

Il a trouvé que :

- Les teneurs en suspension des trois groupes de bassins augmentent d'une façon générale lorsque le débit liquide diminue,
- Le substratum joue un rôle considérable,
- Le crétacé inférieur, Jurassique, les terrains primaires, cristallins et cristallophylliens manifestent un taux d'abrasion négligeable,
- Les bassins à plus forte abrasion se situent dans les régions sismiquement actives,
- La répartition régulière des pluies avec un maximum en saison végétative est favorable aux faibles teneurs.
- Une zone de 300 à 700 mm ou' l'érosion est très active (1200 Tonnes.km⁻² .an⁻¹).

Capolini (1965-1969) :L'auteur a entrepris une étude géomorphologique régionale sur le bassin de Cheliff, afin de mettre en clair le processus d'érosion qui conditionne les transports solides des principaux affluents de l'Oued Cheliff.

Il a basé son étude sur l'analyse morphométrique des réseaux (densité de drainage, coefficient de torrentialité) mise au point par les géographes Américains Schumm et Horton. L'application a permis de trouver des résultats encourageants sur les bassins du Rhiou et du Fodda. A partir de ces résultats, l'auteur a généralisé la méthode à l'ensemble du bassin de l'Oued Cheliff.

Les résultats ont permis à Capolini de :

- Proposer une quantification des débits solides en associant à chaque formation lithologique un débit spécifique,
- D'établir une relation statistique entre l'érosion spécifique des bassins et le coefficient de torrentialité,
- De suggérer la cartographie des sonnes susceptibles à l'érosion à partir de la carte du coefficient de torrentialité.

Sogreah (1969) :L'étude est basée sur les données d'observations recueillis au niveau de 9 barrages et 18 stations hydrométriques.

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

Leurs résultats ont été présentés sous forme d'une relation graphique traduisant des relations de la forme :

$$T = a R^b$$

Ou : T est la dégradation spécifique exprimée en $T.km^{-2}.an^{-1}$,

R : la lame d'eau annuelle moyenne écoulee exprimer en mm,

$$b = 0,15$$

a : est un paramètre empirique variant avec le degré de perméabilité des bassins de 3,3 (perméabilité élevée) à 3200 (bassins imperméables).

I.5. Des études faites dans la région méditerranéenne et en Afrique :

Delhoume (1981), dans les régions méditerranéennes semi-arides, les sols sous forêts bien entretenus sont considérés comme non sensible à l'érosion.

Roose (1994), La litière et les végétations basses favorisent l'infiltration.

D'après **Razafiniaina (2002)**, la couverture végétale agit de façon positive sur la réduction de la formation des croûtes donc sur l'amélioration de la rugosité, la limitation de la compacité et par conséquent une amélioration de l'infiltration. Les travaux de labour favorisent également l'infiltration par amélioration de la rugosité mais l'effet n'est pas durable car il suffit de deux pluies successives pour la réduire.

Conclusion

Après cette recherche bibliographique, plusieurs modèles ont été proposés dont chacun à son domaine d'application. Nonobstant, le modèle le plus fiable reste la quantification du transport solide au droit des stations hydrométriques.

Chapitre II.

Le Bassin Versant

Chapitre II. Le bassin versant

II.1.Introduction

Le bassin versant de l'Oued Cheliff- Ghrib a été choisi comme bassin d'application de notre travail pour la diversité des données qui y sont disponibles, et malgré l'absence quasi-totale d'études sur ce bassin.

L'abondance des données semble parfois induire une vision globale satisfaisante du bassin versant. En fait, les choses ne sont pas si simples et les mesures dont on dispose, ainsi que les interprétations qui en découlent sont parfois complexes.

Nous présentons ici les principales caractéristiques du bassin, les données du milieu physique dont nous disposons, et l'interprétation que nous pouvons en faire quant au fonctionnement hydrologique de notre site d'étude.

II.2. Présentation générale

Le bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib est de forme allongée dans l'axe du cours d'eau principal. L'oued est un affluent de l'oued Cheliff. L'exutoire se trouve à environ 20 Km au Sud-ouest de la wilaya de Médéa.

II.3. Situation Géographique

Le bassin versant de l'oued Cheliff Ghrib fait partie du bassin de l'oued Cheliff (Figure II.1). Il se situe à 100 km au Sud-ouest d'Alger, entre 2°25' et 3°45' de longitude Est et entre 35°45' et 36°00' de l'altitude Nord. D'une altitude moyenne de 895 mètres, il draine une superficie de 1378,67 km². L'oued Cheliff Ghrib parcourt une distance de 79,9 km suivant une orientation Sud-est à l'Ouest du bassin versant, le relief atteint une altitude de 1500 mètres, tandis que le point le plus bas est à l'exutoire avec une altitude de 400 mètres.

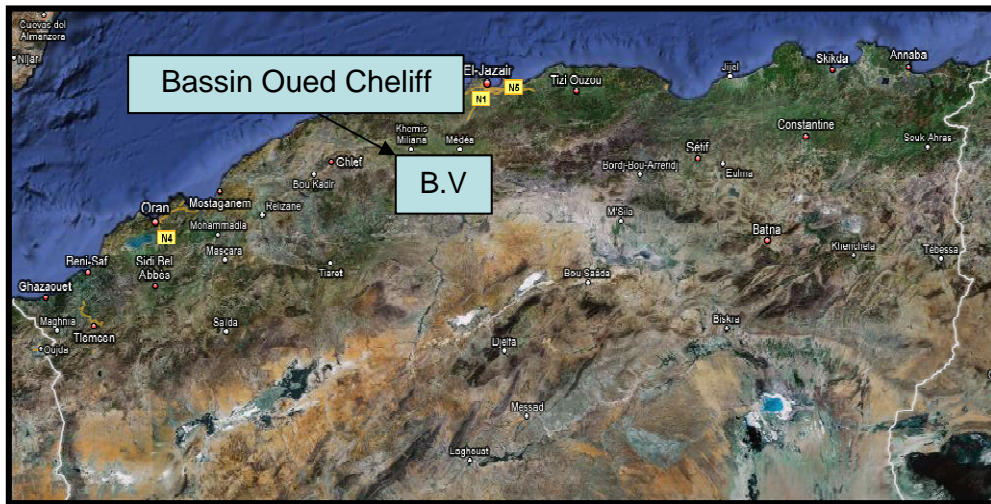


Figure II.1. Situation du bassin d'étude (oued Cheliff-Ghrif)

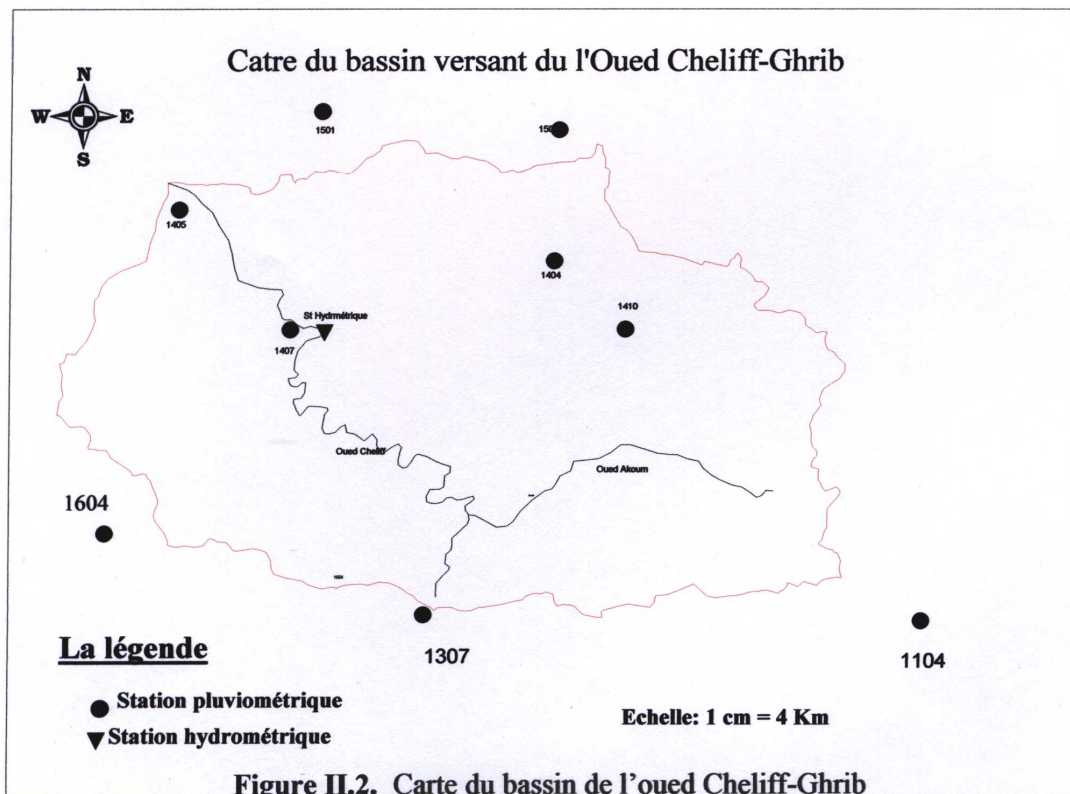


Figure II.2. Carte du bassin de l'oued Cheliff-Ghrif

II.4. Morphologie du bassin

II.4.1 Caractéristiques physiques

- **Géologie du bassin**

La structure tectonique joue un rôle prépondérant dans la morphologie de cette région (Berouaghia). A l'allochtone correspond des sommets élevés mais au relief assez mou et à l'architecture anarchique. Par contre, à l'autochtone crétacé correspond des reliefs orientés généralement Est-West, parallèles aux axes et replis tectoniques, cet ensemble est dominé par la terminaison occidentale des Bibans dont la masse de flysch culmine à 1249 m. Seule la vallée de l'Oued El Akoum est orientée Nord-Sud, constituant une excellente voie de passage pour la grande route Alger-Laghout. A l'Est de Berrouaghia, une dépression topographique correspondant aux marnes du Crétacé supérieur sépare les Bibans de la zone sud –tellienne, et facilite les communications en direction de l'Est.

Le quaternaire est assez réduit. Outre quelques placage d'éboulis sur les pentes, il est constitué essentiellement de remplissage d'alluvions plus ou moins fins dans les lits des oueds, avec localement des restes de terrasses plus anciennes témoignant d'une reprise d'érosion actuelle.

Le Miocène affleurant dans la partie Nord de la feuille constitue la bordure méridionale du grand bassin de Médéa, qui se prolonge à l'Ouest par le bassin du Chélif et à l'Est vers Bouira.

Une série oligocène de même faciès que celle connue plus à l'Est sur la feuille Souagui au Draâ el Mensdjel, ou l'on observe sur plusieurs centaines de mètres des grès grossiers à huitres, des marnes sableuses grises et des calcaires détritiques, attribués à l'Oligocène.

Sénonien autochtone – on distingue du bas en haut :

Épaisse série (460m) de marnes grés –bleuté, à petit intercalations calcaires (calcaires sublithographique brun-clair et calcaire argileux gris) avec au milieu de la série, une passé (70m) de marnes grises à boudins et miches calcaires abondants ; les marnes sont ferrugineuses au dessus de cette passée.

Cuesta de calcaire bien lités, gris calcaires dont l'épaisseur varie du 8 à 15 m du sud au Nord. Au niveau des calcaires organogènes à Bryozoaires.

Gros bancs massifs de calcaires gris-clair à pâte fine, et avec à la base de rares niveaux marneux à débit schisteux.

II.4.2 Végétation du bassin versant

Aux nappes telliennes, généralement dépourvues de toute végétation, s'oppose le Crétacé des Biban. Celui-ci est inégalement recouvert d'espèces différentes :

- au flysch Albien correspond une végétation où dominent les épineux et les chênes verts, accompagnés de rares chêne-liège ;
- sur les marnes cénomaniennes, formant la dépression de Berrouaghia, se cultivent la vigne et un peu de céréales ;
- sur les séries marneuses du Sénonien poussent, là où elle n'a pas été détruite par les chèvres et les moutons ou par le feu pendant la guerre, une maigre forêt de pins.
- Les pins d'Alep et les genévriers couvrent la majeure partie de la zone crétacée où ne se rencontrent que de maigres cultures de céréales dans les clairières ou dans l'étroite vallée du Cheliff.
- Par contre, dans le reste du pays, si les massifs gréseux ne supportent que des broussailles éparses, les dépressions marneuses et les grandes vallées alluviales sont couvertes par de riches cultures de céréales (blé et orge).

II.4.3 Caractéristiques climatique

Le climat d'une région est influencé par de nombreux paramètres climatologiques qui sont :

- la température
- les précipitations
- les vents
- l'évapotranspiration
- l'humidité

Ces données sont prises soit de l'étude de (SELTZEIR) : « climat d'Algérie » à l'A.N.RH de Blida ou de l'O.N.M de Dar el Beida.

- la climatologie a essentiellement pour but :
- L'analyse complète des éléments météorologiques qui déterminent le climat
- La recherche des causes qui expliquent les différents climats et les fluctuations qui les accompagnent.

1. Température de l'air :

C'est l'un des éléments les plus importants de la radiation solaire. Un certain nombre de phénomènes physiques tels-que l'évaporation, le dégel de l'eau, la gelée blanche. La dilatation et la concentration de certains matériaux : phénomène physiologique ou pathologique tel que la transpiration sont liées à la température de l'air. La température dont il s'agit est la température de l'air mesurée à l'ombre dans un abri météorologique.

Le tableau ci dessous donne les valeurs de la température de l'air de station d'EL-Khmis sur une période de trois ans.

Les différents paramètres sont présentés par :

-m : la moyenne de tous les minimums (sur une période de « ans)

-M : la moyenne de tous maximums (sur une période de « ans)

-(M+m)/2 : c'est la moyenne mensuelle (demi-sommes)

-M-m : c'est la différence de la température (Maximum et minimum)

D'après les observations recueillies auprès de la région d'Elkhemis

On remarque la température moyenne mensuelle varier de 10,9⁰C en janvier jusqu'à 29⁰C en Aout.

La température moyenne mensuelle de la région d'EL-Khmis est de 18,5⁰C

La température maximale correspondant au mois d'Aout est de 37,9⁰C alors que le minimum est de 6,02⁰C en janvier

D'autre part, les moyennes annuelles des températures minimales sont de 10,6⁰C et maximal de 28,9⁰C ; l'écart le plus faible pour la station d'EL-Khmis est de 9,4⁰C

Tableau II.1 La température de l'air de la station d'EL-Khmis

station	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	T moy ann
ELkhemis	M	15,6	19	20,15	23,5	25,86	31,13	34,11	37,9	32,91	25,64	18,04	17,36	28,9
	m	6,2	4,9	3,8	6,7	10,6	14,5	19,98	19,8	18,09	15,56	8,05	6,02	10,6
	M+m/2	10,9	11,95	11,97	15,1	18,23	22,81	27,04	28,85	25,5	25,6	13,04	11,69	19,7
	M-m	9,4	14,1	16,35	16,8	15,26	16,63	14,13	18,1	14,82	20,08	9,99	11,34	18,3

2. La grêle :

La grêle a des effets négatifs sur l'agriculture, surtout pour les petites plantes, à El khemis, les fréquences les plus élevées sont remarquées en janvier, février et mars. (1,6, 1,8, 1,4), alors qu'à Djendel elles sont de (1,4, 1,7, 1,1).

Tableau II.2: les fréquences de la grêle pour une période de deux ans (90/91)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
El Khemis	1,6	1,8	1,4	1,1	0,7	0,3	0	0	0,1	0,1	0,3	0,5	7,9
de Djendel	1,4	1,7	1,1	1,1	0,5	0,2	0,1	0	0,1	0	0,3	0,7	7,2

3. La gelée blanche :

La gelée blanche est nuisible pour les cultures, à cet effet une étude sur les fréquences s'avère nécessaire pour avoir une bonne idée sur le genre de culture qu'on devrait pratiquer. Les fréquences les plus élevées sont remarquées en juin, juillet pour El Khemis et pour Djendel

Tableau II.3 : Les fréquences de la gelée blanche (sur une période de deux ans)

Mois / station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
El Khemis	0	0,1	0,3	1,1	2,0	3,3	6,6	4,7	1,4	0,2	0,1	0,1	19,8
Djendel	0	0,1	0,4	0,2	0,6	3,3	6,2	4,6	1,6	0,1	0	0,1	19

4. L'humidité :

Les mois les plus humides de l'année s'étalent de juin jusqu'à septembre avec des fréquences maximales de 10,3 ; 11 ; 11,3 ; 11,9.

Tableau II.4 : Les fréquences d'humidité

Mois/ Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
Médéa	5,8	5,4	6,6	6,9	8,9	10,3	11,0	11,3	11,9	8,9	6,8	5,9	8,2

5. Le Sirocco :

C'est un vent sec, chaud chargé de poussières, il influe sur la nature du climat. Dans la région on remarque que les fréquences les plus élevées sont de Juillet et Aout.

Tableau II.5: Les fréquences de Sirocco

Mois/ Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
El Khemis	0	0,1	0,3	1,1	2,0	3,3	6,6	4,7	1,4	0,2	0,1	0	19,8

6. Le vent :

Le vent est un air en mouvement qui se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression.

Dans la région, en général il est faible puisque sa force est comprise entre 1,4 et 2.

(Pour $1 < F < 2$ donc vent faible avec F : la force de vent)

Tableau II.6 : Les fréquences des vents

Mois/ Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
El Khemis	1,5	1,8	2	1,8	1,9	1,4	1,5	1,6	1,5	1,4	1,6	1,5	19,5

II.4.4 Caractéristiques De Forme

La forme du bassin versant est la configuration géométrique telle qu'elle est projetée sur un plan horizontal. Elle influence directement le temps de réponse du bassin, c'est à dire sur le temps de parcours des eaux à travers le réseau de drainage et par conséquent sur l'hydrogramme de crue (Llamas, 1992).

- **Indice de compacité ou indice de Gravélius**

Il est défini par la relation II.2

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (\text{II-2})$$

Avec :

P : Périmètre du bassin en Km
S : Surface du bassin en Km²

Si, Kc tend vers 1 : le bassin est ramassé

Si, Kc > 1 le bassin est allongé

- **Coefficient de forme « Rf »**

Selon Horton, ce paramètre est le rapport entre la superficie du bassin et le carré de la largeur (Lm):

$$Rf = \frac{A}{Lm^2} \quad (\text{II-3})$$

Avec :

A : surface du bassin en Km²

Lm : distance entre l'embouchure et le point le plus éloigné du bassin suivant le cours d'eau principale en Km

- **Coefficient de forme « Kf »**

Il exprime le rapport entre la largeur moyenne et la longueur axiale.

$$K_f = \frac{B_m}{L_a} \quad (\text{II-4})$$

Avec :

B_m : largeur du cours d'eau principal en Km

L_a : longueur axiale du bassin en Km.

- **Elancement « Re »**

Ce rayon de circulation entre la superficie du bassin et celle du cercle dont la circonférence est égale au périmètre du bassin, soit :

$$Re = \frac{4\Pi A}{P^2} = 12.56 \cdot \frac{A}{P^2} \quad (\text{II-5})$$

Sa valeur est 1 pour un bassin circulaire et de 0.78 pour un bassin carré.

- **Rectangle équivalent**

Il est défini par sa longueur "L" et sa largeur "l" et par la même surface du bassin versant "S".

Les dimensions de ce rectangle sont données par les formules suivantes :

$$\text{La longueur} : L = \frac{K_c \cdot \sqrt{S}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (\text{II-6})$$

$$\text{La largeur} : l = \frac{K_c \cdot \sqrt{S}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (\text{II-7})$$

II.4.5. Caractéristiques De Relief

- **Hypsométrie des bassins**

La variation d'altitude à l'intérieur d'un bassin ainsi que l'altitude moyenne sont des données essentielles aux études de la température et des précipitations (Llamas,1992).

La description détaillée de l'élévation d'un bassin est donnée par les courbes hypsométriques, et à partir de celles –ci, nous pouvons déterminer les caractéristiques de relief, à savoir.

L'altitude maximale (H_{max}).

L'altitude minimale (H_{min}).

L'altitude médiane correspond à 50% de la surface ($H_{50\%}$).

L'altitude moyenne (H_{moy}) déterminée par l'expression II.8.

L'altitude correspond à 5% de la surface ($H_{5\%}$)

L'altitude correspond à 95% de la surface ($H_{95\%}$)

La dénivelée (D= H5% - H95%).

$$H_{\text{moy}} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i \cdot H_i}{A} \quad (\text{II-8})$$

avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin(m)

S_i : surface comprise entre deux courbes de niveaux i et i+1 (Km²)

h_i : altitude entre ces deux courbes de niveaux (m)

A : surface totale du bassin versant en Km²

- **Indice de pente**

Selon Dudreuil (1974), le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant pour permettre des comparaisons et des classifications entre bassins. Ils sont déterminés à partir de la connaissance des courbes hypsométriques.

- **Indice de pente de roche « I_p »**

Il permet de déterminer la pente moyenne avec les données réelles du bassin versant, il est calculé par l'expression II.9.

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^N \sqrt{B_i(a_i - a_{i-1})} \quad (\text{II-9})$$

Avec :

I_p : indice de pente de roche en %

B_i : fraction de surface comprise entre l'altitude a_i et a_{i+1} (a_i, a_{i+1}) altitude des courbes de niveau du bassin (m).

L : longueur du rectangle équivalent en Km.

a_{i+1}, a_i : Côtes de ligne de niveaux du bassin en m.

- **Indice de pente globale I_g**

Il est utilisé pour la classification des bassins versants, cet indice est déterminé par la formule II.10 :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad \text{en \%} \quad (\text{II-10})$$

Avec :

D : Dénivelée en m.

L : Longueur du rectangle équivalent en Km.

- **Pente moyenne d'un bassin versant « I_m »**

La pente moyenne d'un bassin versant peut se calculer par l'expression II.11.

$$I_m = \frac{H(0.5L_{1+} + L_2 + L_3 + \dots + 0.5L_n)}{A} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

I_m : pente moyenne du bassin en (%).

H : hauteur entre deux courbes de niveaux consécutives (m).

L_i : longueur de la courbe de niveau en (Km).

A : superficie du bassin versant (Km^2).

L : longueur du rectangle équivalent en (Km).

II.4.6. Paramètres Du Réseau Hydrographique

- **Densité de drainage D_d**

C'est le rapport de la longueur totale des talwegs à la surface du bassin versant, elle est exprimée en Km/Km^2 , soit :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{S} \quad (\text{II-12})$$

Avec : $\sum_{i=1}^n l_i$: Longueur totale cumulée des talwegs

S : Surface du bassin versant (Km^2).

- **Coefficient de torrentialité (C_t)**

$$C_t = F_t \times D_d \quad (\text{II-13})$$

Avec :

F_t : Fréquence des talwegs élémentaires : $F_t = \frac{N}{S}$.

N : Nombre des talwegs d'ordre 1.

- **Temps de concentration**

C'est le temps que met une goutte de pluie la plus éloignée pour arriver à l'exutoire. Il peut être calculé par la formule de Giandotti.

$$t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L}{0,8\sqrt{H_{\text{moy}} - H_{\text{min}}}} \quad (\text{II-14})$$

Avec :

L : longueur du talweg principal qu'est égale à 79,9 Km

Tous les résultats de calcul sont résumés dans le tableau II.7

Tableau II.7 Caractéristiques géométriques et hydromorphométriques du bassin

Paramètres	Symbole	Unité	Valeur
Superficie	A	Km ²	1378,63
Périmètre	P	Km	175,67
Indice de compacité	K _c	/	1,32
Longueur du rectangle équivalent	L _R	m	66,92
Largeur du rectangle équivalent	l _R	m	20,6
Indice de pente de Roche	I _p	%	5,39
Indice de pente global	I _g	%	9,26
Dénivelée spécifique	D _s	m	344
Type de relief	/	/	fort
Altitude moyenne	H _{moy}	m	895
Altitude maximale	H _{max}	m	1500
Altitude minimale	H _{min}	m	400
Altitude à 5%	H _{5%}	m	943
Altitude à 95%	H _{95%}	m	814
Longueur des thalwegs retenus	L _{pt}	Km	1246,18
Longueurs des thalwegs permanents	L _p	Km	79,91
Longueurs des thalwegs temporaires	L _t	Km	1166,27
Densité de drainage totale	D _d	Km/Km ²	0,90
Densité de drainage permanente	D _d	m/Km ²	56
Densité de drainage temporaire	D _d	Km/Km ²	0,84
Pente moyenne de l'oued cheliff-Ghrib	I _{c moy}	%	29,63
Coefficient de torrentialité	C _t	/	0,08
Temps de concentration	T _c	Heures	15,07
Classification de Horton	Ordre	/	06

II.5. Les données et systèmes d'information géographique utilisés

II.5.1 .Les données utilisées

Pour cette étude un seul type de données sera utilisé, il s'agit de données cartographiques. Les cartes utilisées sont les cartes topographiques dites d'états major au 1/50.000. Sept feuilles sont requises pour couvrir tout le bassin versant de l'Oued Cheliff-Ghrib. Il s'agit de :

- La carte de Djendel est NJ-31-III-7 .1985
- La carte de Berouaghia Ouest NJ-31-III-8 .1987
- La carte de Berrouaghia Est NJ-31-III-8 .1987
- La carte de Beni slimane Est NJ-31-IV-7.1987
- La carte de Ksar El Boukhari Ouest NI-31-XXI-2.1991
- La carte de Ksar El Boukhari Est NI-31-XXI-2.1991
- La carte de Chellalat el Oudaoura Ouest NI-31-XXII-1.1991

Les données de ces cartes qui intéressent cette étude sont surtout les données hypsométriques, On y prendra donc les courbes de niveau qui traduisent le relief et la morphologie du bassin versant de Cheliff-Ghrib.

II.5.2. Les systèmes d'informations géographiques utilisés

Deux systèmes d'informations géographiques seront utilisés dans cette étude. Le premier s'appelle Mapinfo et le deuxième Vertical Mapper

- Présentation de Mapinfo et Vertical Mapper:

Les systèmes d'information géographique tirent leur spécificité des liens qu'ils établissent entre informations caractéristiques des composants d'un territoire et ce territoire.

La définition de chacun des composants, système d'information et information géographique contribue à en préciser le contour :

- Système d'information : ensemble de composants inter reliés qui recueillent de l'information, la traitent, la stockent et la diffusent à fin de soutenir la prise de décision et le contrôle au sein de l'organisation.

- Information géographique : L'information est dite géographique lorsqu'elle se rapporte à un ou plusieurs lieux de la surface du globe terrestre. Cette information possède la caractéristique d'être localisée, repérée ou géocodée.

Un système d'information géographique a donc comme finalité de renseigner sur un territoire en localisant les informations pour aboutir à un processus de décision.

D'autres organismes définissent les SIG comme un système informatique de matériels, de logiciels, et de processus conçu pour permettre, la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion.

L'acquisition des données se fera par numérisation des cartes citées, qui nécessite un traitement pour la réalisation des différentes couches d'information en la rendant exploitable en format numérique. Les logiciels utilisés sont:

Le logiciel MAPINFO est un outil de type Système d'Information Géographique qui sert à créer, traiter et à cartographier l'information géographique. Il compile, assemble, croise des données thématiques professionnelles avec des données génériques vecteurs ou raster.

Le logiciel VERTICAL MAPPER est un logiciel complémentaire important de MapInfo. Les principaux apports de Vertical Mapper concernent la mise à disposition de nouvelles techniques d'analyse des informations localisées qui varient de manière continue dans l'espace ; la capacité de comparaison et d'analyse sur de multiples couches de données ; et des visualisations originales. Outre les types de données connues sous Map Info que sont les Points, les Polygones et les Polygones, Vertical Mapper introduit un nouveau type le grid-file mieux adapté pour représenter des données qui varient de manière continue dans l'espace comme l'ensoleillement, la pollution, la température ou l'altitude.

II.6. Production et traitement du modèle numérique de terrain (MNT) du bassin de Cheliff-Ghrib

De nos jours, on ne peut parler de caractérisation morphologique d'une région donnée sans faire intervenir la notion de modèles numériques du terrain (MNT). Un modèle numérique de terrain est une représentation numérique d'une région donnée par un champ d'altitudes. Cette représentation peut être sous forme d'un semis de points caractéristiques de la région, soit sous forme d'un vecteur constituant une planche de courbes de niveau, soit sous forme d'une grille régulière à mailles carrées connue sous le nom de représentation « raster » (Derouiche, 1994). Par abus de langage les gens ont tendance à donner le nom de modèle numérique de terrain à cette seule dernière représentation parce qu'elle est la plus utilisée.

Dans la suite, il vous sera présenté la méthodologie qui a été utilisée pour le calcul du MNT, du bassin versant d'oued Cheliff-Ghrib. Ensuite, on passera à son exploitation pour des fins morphologiques, morphométriques, hydrologiques, et hydrométriques.

II.6.1 Numérisation de courbes de niveau et calcul du modèle numérique du terrain (MNT)

1. Numérisation des courbes de niveau :

La saisie de la planche de courbes de niveau du bassin versant du Cheliff-Ghrib a été effectuée à l'aide de Mapinfo. Etant donné l'étendue du bassin ($\approx 1380 \text{ Km}^2$), l'échelle des cartes (1/50.000) utilisées et la surface active de la table a scanné (305 x 457 mm), plusieurs sessions de saisie ont été nécessaires pour couvrir tout le bassin versant. En tout, on a utilisé sept (07) sessions de saisie. Une session correspondant à chaque feuille topographique.

Toutes les courbes de niveau ont été saisies (avec une variation d'équidistance entre 20 m et 100 m selon le relief du bassin versant).

2. Corrections et traitements de courbes numérisées :

- Corrections :

Pendant et après la saisie quelques corrections ont été éventuellement apportées aux courbes de niveau numérisées. Elle concerne essentiellement les géocodes des courbes et suppression des courbes mal saisies.

- Traitements :

Deux principaux types de traitements ont été effectués pour les courbes de niveau numérisées. D'une part il ya la généralisation, et d'autre part l'assemblage. Le premier consiste à éliminer les points peu utiles saisis en continue. Quant à l'assemblage, il en existe deux catégories. La première catégorie est l'assemblage de toutes les sessions en un seul et unique fichier (ONIBON, 1995). Cela nécessite, au préalable, la création pour chacune des sessions d'un fichier de calage dans lequel on définit ses quatre (04) points de calage.

3. Elaboration du Modèle Numérique de Terrain (MNT)

A l'image de la carte topographique pour la cartographie traditionnelle, le MNT est devenu l'une des couches d'information les plus utilisées dans un SIG-numérique pour les sciences de la terre. Les raisons sont les mêmes qu'au paravent, car l'altitude apparaît comme paramètre explicatif pour de très nombreux phénomènes (ruissellements, inondations, érosions, etc..).

- **Acquisition des données**

L'acquisition des données altimétriques a été numérisée à partir des courbes de niveau sur écran à partir de la carte existante au 1/50000^{ème} (voire la procédure ci-après).

Pour obtenir un fichier d'interpolation (le GRID[.GRD]) on a besoin des points connus en XYZ. A cet effet, il était nécessaire de transformer les lignes en points. L'une des fonctions du logiciel VERTICAL MAPPER est «poly2point». Cette fonctionnalité nommée «Poly to Point» crée une table de points, à partir d'une table d'objets de type «poly ligne» ou «polygone». Les attributs attachés aux tables en entrée sont conservés au niveau des objets ponctuels dans la table créée.

Exécuter l'application POLY2POINT du logiciel VerticalMapper :

Cliquez «GO» et donnez le chemin de la table des courbes de niveau. Ensuite donnez un nom au fichier de point extrait à partir de celui des courbes.

La possibilité de générer des grids à partir des lots de données des utilisateurs est une des fonctionnalités importante de Vertical Mapper. En général le processus de création de grille crée un maillage imaginaire rectangulaire. L'interpolation est alors faite à partir des cellules de ce maillage. Choisir une technique de création de grille parmi les différentes solutions possibles dépend de plusieurs facteurs, tels que les caractéristiques des données, leur distribution, l'utilisation postérieure attendu du résultat et de savoir si l'on veut obtenir un grid numérique ou un grid classifié.

Le logiciel VERTICAL MAPPER pour MAPINFO met à disposition plusieurs méthodes d'interpolation. Nous allons utiliser la triangulation avec lissage (*TIN -based*) qui est une triangulation de Delaunay.

La triangulation de Delaunay est appliquée pour construire des grids avec des données qui ne nécessitent pas de moyennes locales. La triangulation irrégulière utilise un réseau de triangles aussi équilatéraux que possible qui vont connecter les points du lot de données. Cette triangulation est appelée triangulation de Delaunay. Cette solution est très utile pour travailler sur des lots de données de répartition spatiale quelconque où l'on souhaite faire participer chaque information à la constitution du résultat.

Cette triangulation est produite par un procédé qui connecte tous les points originaux par un réseau de triangles réguliers, aussi équilatéraux que possible. C'est la règle de Delaunay qui fixe que chaque triangle formé définit un cercle circonscrit qui ne contient aucun autre sommet de triangle. Une expression polynomiale calcule l'attribut de chaque point (X et Y) de chaque face en résolvant l'équation linéaire du plan (option «Linear Solution»).

- Ouvrir la table des points à interpoler.
- Choisir VerticalMapper >>Grid Creation >>Interpolation >>Triangulation with smoothing»
- Choisissez la table et la colonne à traiter dans le dialogue suivant.
- Choisir le Mètre comme unité de travail dans la fenêtre « Unit Type » et cliquez OK>>
- Choisissez « Create TIN and Grid Files » pour créer le réseau de triangle et la grille du MNT à partir de ce dernier.
- Diminuer le plus grand côté des triangles dans « Max. Triangle Side Length (Set) » pour ne pas extrapoler dans les bords de la carte.
- choisir un nom au fichier du réseau des triangles (*.tri) et enregistrer.
- Changer la taille de la maille de la grille suivant vos objectifs et la capacité de vos machines. Et n'oubliez pas de cocher « create Mif from Tin surface » pour que vous puissiez visualiser la triangulation de « delaunay ».
- Choisir un nom au fichier de la grille (*.grd) et enregistrer.
- Une fois la grille (le fichier grid) créée. Vertical mapper offre quatre (04) possibilité de la visualisation.
- En couleur continue (colour and display grid)
- En couleur estompé (hill shade and display grid)
- En trois dimensions (3D) (run 3D grid viewer)
- Le résultat sera de la manière suivante :

- **Extraction du MNT de la zone d'étude**

Avant de commencer. Fermer tous dans Mapinfo, et ouvrez la table du MNT et celle de limite de la zone d'étude (limite d'un bassin versant...). Et sélectionner la zone.

Choisissez Vertical Mapper >> Grid Tools >> Trim Grid To Boundary et ouvrez la grille du MNT (MNT.grd)

Ensuite entrez un nom pour le fichier grille du résultat. Et visualiser le résultat (toujours avec « colour and display »).

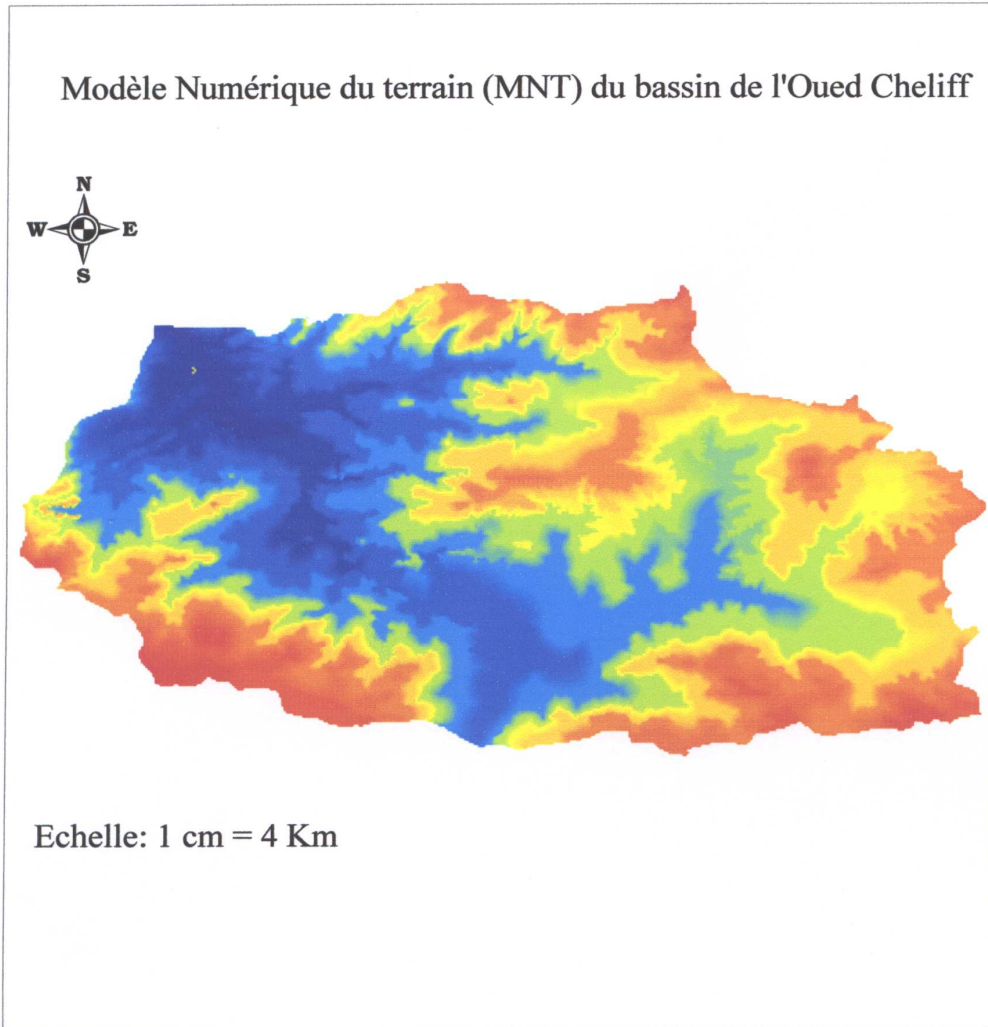


Figure II.3. Modèle numérique du terrain (MNT) du bassin de l'Oued Cheliff-Ghrib

II.6.2. Opération sur les grilles

II.6.2.1. Création d'une carte hypsométrique (Altitude)

Pour créer une telle carte avec le Vertical Mapper il faut que vous disposiez d'un fichier « Grid » et suivre ces étapes :

-Choisir VerticalMapper >>contour existing grid >>create region contour.

-Ouvrir la grille du MNT (*.grd).

-Définir les intervalles de cette « régionalisation » en définissant le minimum, le maximum et l'intervalle des tranches d'altitude.

-Enfin, donner un nom à la table résultante et un autre à la légende. Et vous obtiendrez le résultat suivant :

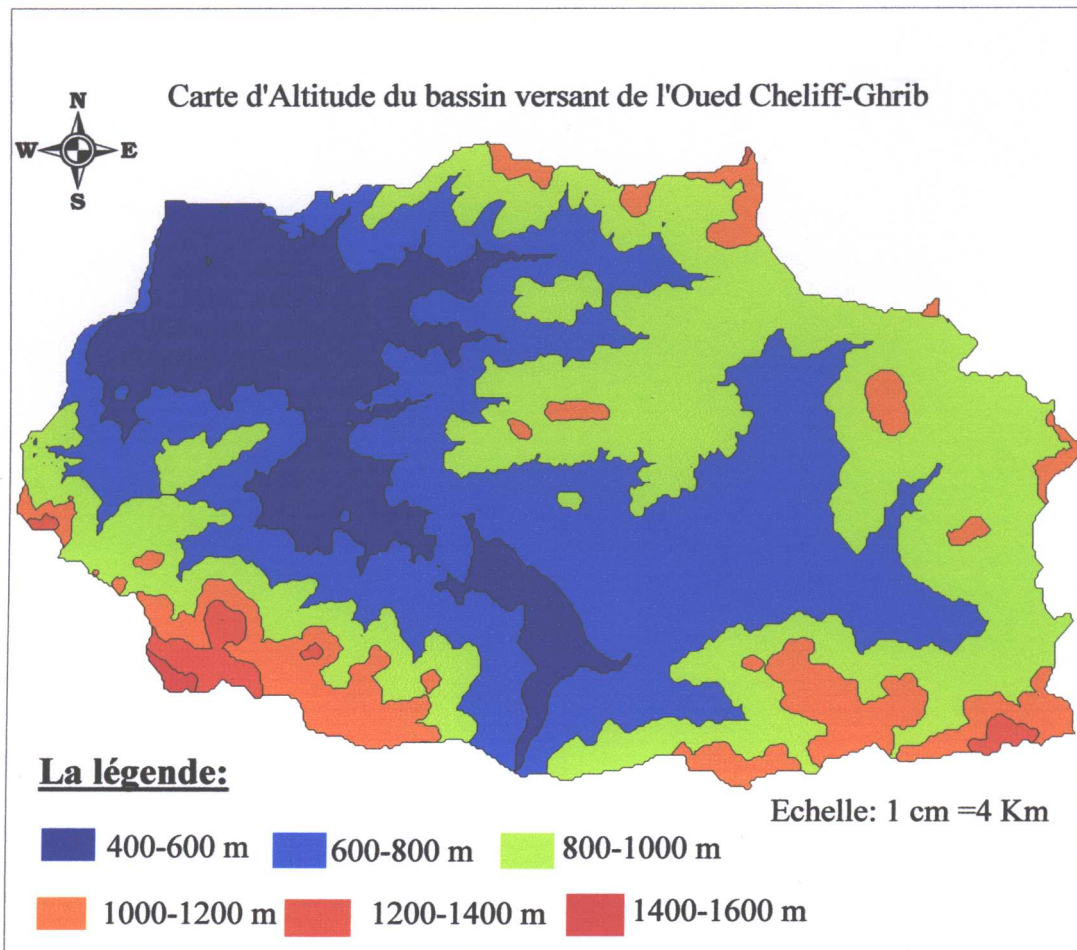


Figure II.4 Carte d'Altitude du bassin de l'oued Cheliff-Ghrib

Tableau II.8 : Les classes d'altitudes du bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib

Classes	Altitudes (m)	Surface (Km ²)	Surface (%)
1	1600-1400	02,5	0,18
2	1400-1200	20,5	1,49
3	1200-1000	134,5	9,75
4	1000-800	503,5	36,53
5	800-600	498,13	36,13
6	600-400	219,5	15,92
Total		1378,63	100

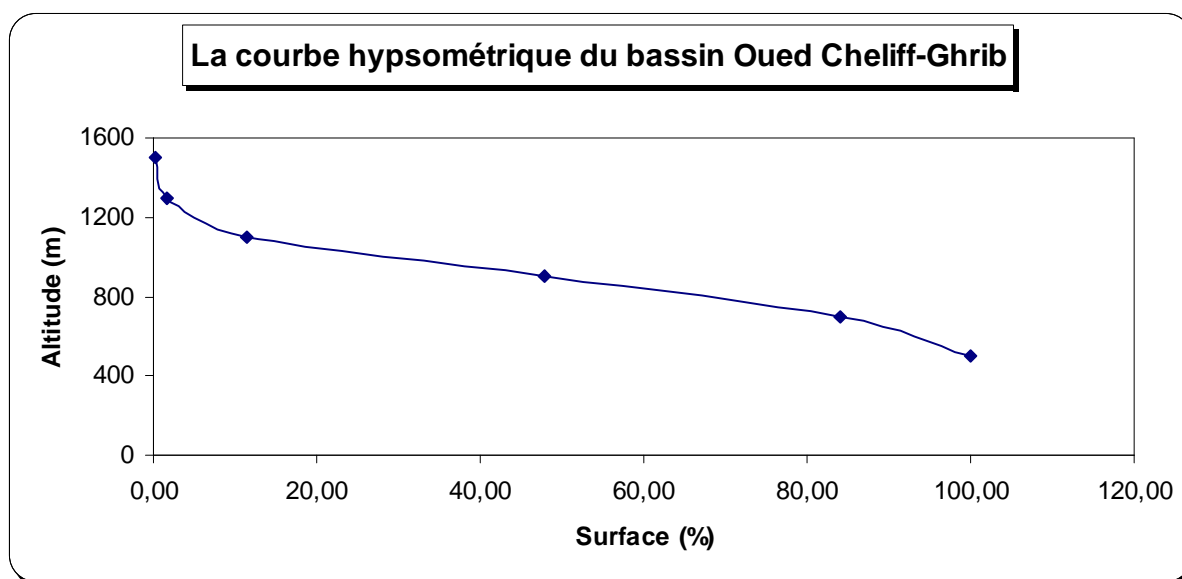


Figure II.5 La courbe hypsométrique du bassin oued Cheliff-Ghrib

II.6.2.2. Elaboration des produits dérivés du MNT (Pente & orientation)

Le logiciel VERTICAL MAPPER permet la création automatique de la carte des pentes à partir du MNT à l'aide de la fonctionnalité (create slope&aspect).

Choisir Vertical Mapper >>Grid Analysis >>create slope &aspect grid

- Ouvrir la grille du MNT que vous voulez dériver ses produits.
- Sélectionner dans la fenêtre suivante les paramètres de la carte des pentes et celle des aspects
- Ensuite donnez des noms aux fichiers grids des pentes et des aspects
- Enfin vous pouvez visualiser les deux grilles avec « colour and display »

- Le fichier des pentes

Le fichier des pentes met en exergue, sur l'ensemble du bassin les différentes formes de relief.

Les grandes pentes sont constatées sur les formations montagneuses du bassin. Les faibles pentes sont constatées à l'aval du bassin (juste en face du barrage Ghrib) (figure II.7).

Le tableau II.9. Contient les classes de ce fichier, dont les valeurs extrêmes sont 0 et 36°, représentées sur la carte des pentes (figure II.7.).

A partir de ce fichier on a déterminé la répartition des pentes en fonction du % de superficie du bassin qu'elles occupent.(tableau II.9. et figure II.7).

Tableau II.9 : Les classes de pentes du bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib

Classes	Pentes (Degré)	Surfaces (Km ²)	% de surfaces
1	0-5	721	52,30
2	5-10	466,5	33,84
3	10-15	176,03	12,78
4	15-20	11,5	0,83
5	20-25	2,5	0,18
6	25-30	0,6	0,04
7	>30	0,5	0,03

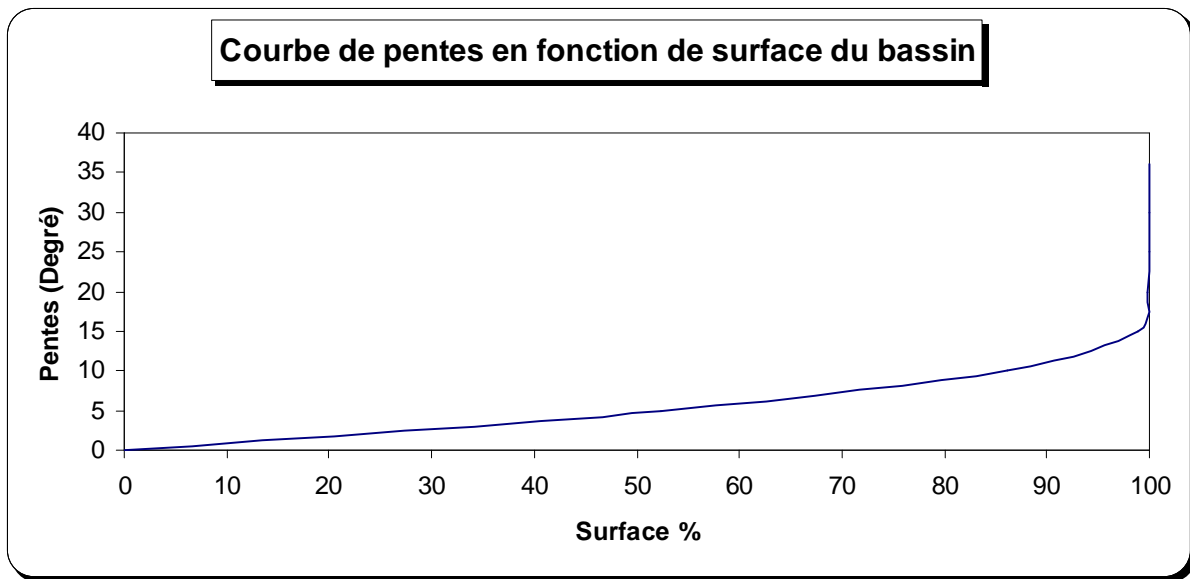


Figure II.6. Courbe de répartition des pentes en fonction du % de surface du bassin oued Cheliff-Ghrib

La courbe ci-dessus (figure II.6.) montre qu'il y a prédominance de pentes faibles sur le bassin de Cheliff-Ghrib. En effet plus de 52 % du bassin ont une pente inférieure à 5° et plus de 85 % du bassin ont une pente inférieure à 10°. Cela peut traduire que les pentes jouent un rôle important dans le transport solide de ce bassin.

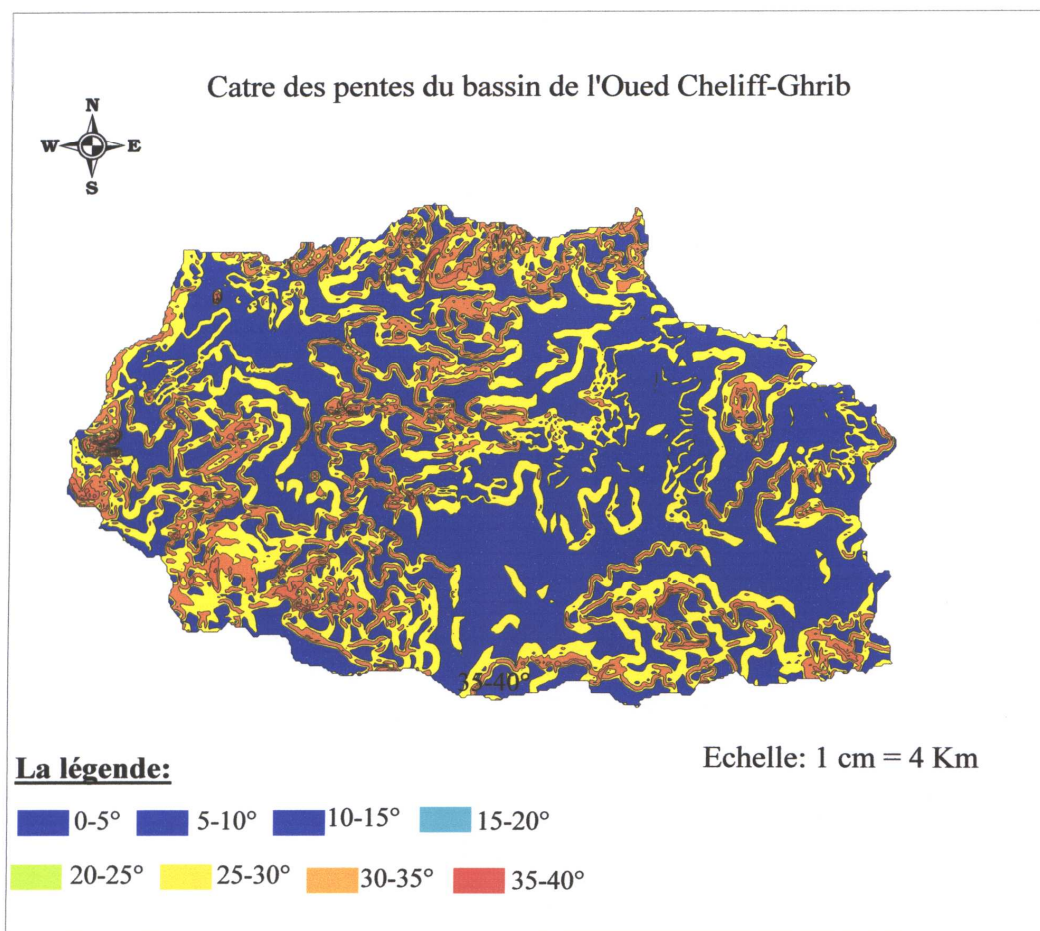


Figure II.7 Carte des pentes du bassin de l'oued Cheliff-Ghrib

- Le fichier d'Orientation du bassin

Ce fichier rend compte des orientations de la surface du bassin de Cheliff-Ghrib. Cinq cas sont possibles; l'orientation vers le nord, vers le sud, vers l'est, vers l'ouest et sans orientation quand la pente est nulle.

On constate que sur le bassin de l'oued Cheliff-Ghrib les orientations dominantes sont celles vers l'Est et vers le Sud. D'une part, vers l'Est parce que c'est l'orientation du cours d'eau principal. Et d'autre part, vers le Sud parce que l'oued Cheliff débutera du Sud-Est vers l'Ouest. Les valeurs de ce fichier sont comprises entre 0 et 360° et ont été divisées en 4 classes qui figurent dans le tableau II.10. Et représentées sur la carte d'Orientation du bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib (figure II.8).

Tableau II.10 Les Classes d'orientation du bassin de Cheliff-Ghrib

Classe	Orientation	Valeurs d'angle	% Superficie
1	OUEST	0-90	15.08
2	NORD	90-180	19.15
3	EST	180-270	26.11
4	SUD	270-360	39.66

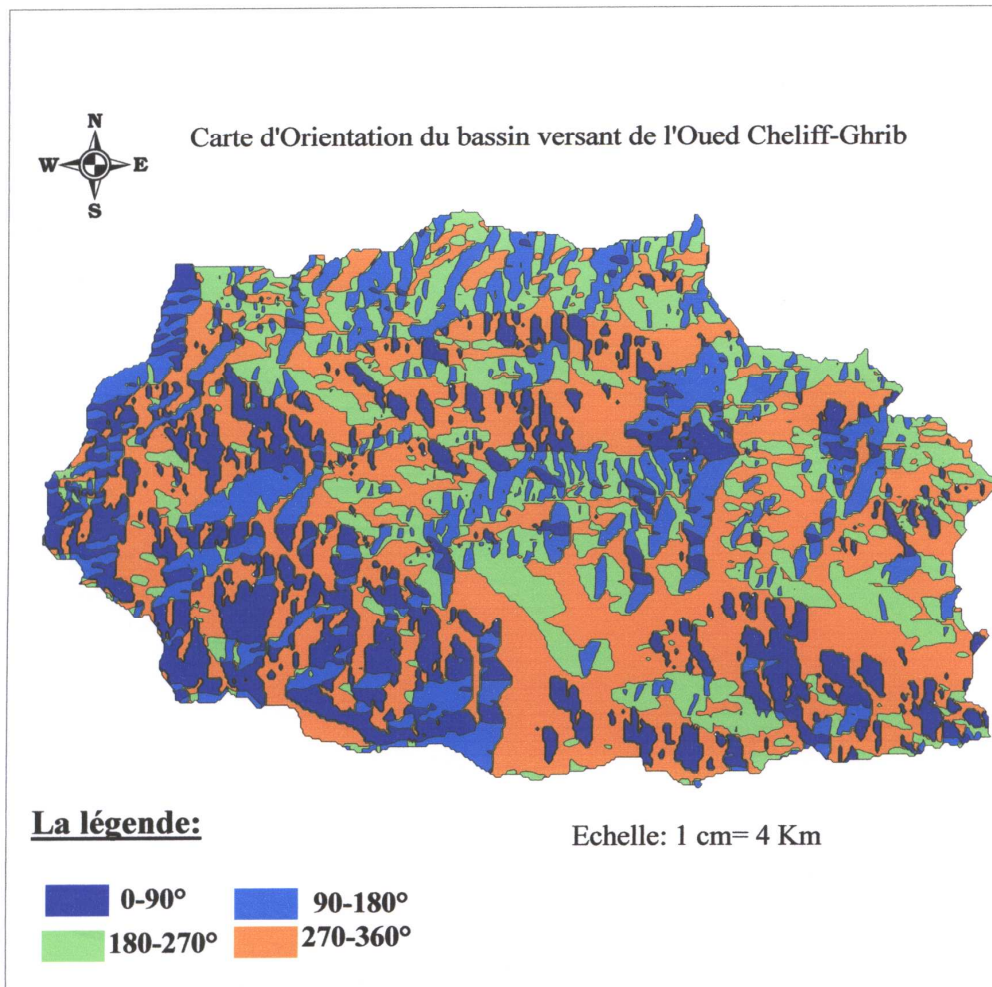


Figure II.8 Carte d'orientation du bassin de l'oued Cheliff-Ghrib

Conclusion :

Le bassin versant de l'oued Cheliff- Ghrib a une superficie de l'ordre 1379 Km². Il est caractérisé par un relief fort car la dénivelée spécifique est comprise entre 250 et 500 m.

Le modèle numérique du terrain calculé pour ce bassin, a donné de bons résultats. A partir de ce dernier, on a pu caractériser morphologiquement le bassin de Cheliff-Ghrib. Cette caractérisation a donné une idée plus précise sur la morphologie du bassin versant de notre étude.

Chapitre III.

Analyse des pluies et des écoulements

Chapitre III : Analyse des pluies et des écoulements

III.1.Introduction

Plus encore que les facteurs morphologiques, lithologiques et biogéographiques, les conditions climatiques du bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau (Roche 1963, Cosande 2001...). Ce sont les précipitations, surtout liquides, qui constituent le facteur essentiel intervenant par :

- leur hauteur totale annuelle qui détermine l'abondance fluviale,
- leur répartition mensuelle et saisonnière qui influence directement les régimes hydrologiques,
- leurs totaux journaliers et surtout les averses génératrices de crues.

Ces différents aspects des précipitations sont plus ou moins modifiés selon l'effet combiné des autres paramètres physiques cités plus haut et climatiques (températures et évapotranspiration). Mais, contrairement aux paramètres proprement physiques permettent une interprétation seulement qualitative du comportement hydrologique des bassins, les précipitations et les facteurs climatiques dans leur ensemble, variables aléatoires dans le temps et dans l'espace, permettent d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique dans sa conception la plus large.

L'équipement climatologique du bassin est cependant loin d'être satisfaisant. Le manque de documentation est flagrant, les longues séries d'observation sont rares. Toutefois, nous allons tenter de faire ressortir les caractères généraux du climat méditerranéen du bassin, ses nuances spatiales et ses irrégularités temporelles à partir de la documentation disponible. Les séries pluviométriques qui présentaient des lacunes ont été largement homogénéisées avant leur utilisation ; cela est essentiel pour arriver à une série longue et continue. Il reste qu'en dépit de données limitées, il est possible de saisir l'importance et la variabilité des précipitations sur l'alimentation de l'oued.

III.1.1 Aperçu sur le climat de l'Afrique du Nord :

Par sa position en Afrique du Nord, donc en latitude, l'Algérie correspond à la zone de contact entre les masses d'air d'origine ou d'affinités polaires et arctiques d'une part et les masses tropicales d'autres part (Seltzer,1946).

L'avancée des masses d'air froides vers le Sud peut être enregistrée à tout moment de l'année. Mais l'observation a montré qu'elles n'influent avec l'efficacité sur l'évolution du temps qu'entre le début de l'automne et la fin du printemps.

Les masses d'air tropical, peuvent provenir de l'Atlantique ou du continent Africain par des courants dirigés vers le Nord, le Nord-Ouest ou le Nord-est.

Les différentes situations météorologiques perturbées qui sont susceptibles d'affecter l'Afrique du Nord correspondent à une circulation des masses d'air orientées d'une manière zonale (approximativement d'Ouest en Est) suivant le flux de Westerlies.

Le climat de la Méditerranée eurafricaine est étroitement bloqué entre un domaine tempéré plus frais au Nord et le désert au Sud. Excepté en bordure même de la mer où l'on n'observe pas un véritable climat maritime, mais plutôt un climat contrasté traduisant plus d'influences continentales qu'océaniques et reflétant avant tout leur double appartenance aux franges de la zone tempérée et de la zone tropicale.

III.1.2 Aperçu sur le climat de l'Algérie :

Selon Seltzer (1946), le climat de l'Algérie est de type méditerranéen caractérisé par une période pluvieuse allant en moyenne de Septembre à Mai et un été sec et ensoleillé.

L'Atlas tellien joue le rôle d'un rempart qui provoque la condensation et les précipitations d'une partie de la vapeur d'eau amenée par les vents soufflant de la mer. L'altitude entraîne une diminution générale de la température, l'éloignement de la mer, une augmentation des amplitudes diurnes et annuelles.

Le climat de l'Atlas tellien présentera donc tous les degrés intermédiaires entre un climat de montagne pluvieux, froid à amplitude thermique relativement faible avec chutes de neige et un climat de plaines plus sec relativement chaud et à forts écarts thermiques.

III.2. Etude des précipitations

La Pluviométrie en Algérie à été étudié par plusieurs auteurs, (P.Seltzer, 1913-1938, H.Gaussen, 1918-1947, G.Medinger, 1913-1953, M.Chaumont et C.Paquin, 1913-1963). La plupart des stations du bassin ont été arrêtées pendant la guerre d'Algérie, d'autres ont subi des modifications après 1962. Ceci se traduit par des résultats entachés d'erreurs et le nombre élevé de lacunes à l'échelle mensuelle et annuelle. D'autre part bon nombre de stations ont été installées lors de la restructuration du réseau pluviométrique algérien et leurs données sont très utiles pour l'établissement d'une série pluviométrique récente (1970-1998). L'intérêt et le but de cette série et de permettre la confrontation avec l'écoulement correspondant afin de dégager une étude hydro pluviométrique et d'estimer la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin.

Tableau III.1 : Précipitations annuelles (mm) aux différentes stations pluviométriques
(n= 29ans)

	11407	11405	11404	11104	11501	11509	11301	11604
1976/77	394,10	409,20	510,70	409,30	463,40	491,50	271,50	152,00
77/78	353,50	432,00	474,60	407,60	452,50	566,40	249,55	314,50
78/79	453,30	457,70	573,00	350,40	471,45	749,80	288,90	314,70
79/80	531,60	604,40	641,00	274,10	629,28	874,10	355,60	109,30
80/81	394,20	429,20	530,90	403,40	383,40	608,00	249,90	429,60
81/82	458,70	422,00	536,00	419,60	238,40	536,90	335,30	614,20
82/83	353,70	405,20	439,30	355,60	176,90	600,80	198,30	231,60
83/84	260,70	430,50	353,10	238,20	458,10	459,20	188,30	303,90
84/85	460,80	595,10	598,40	91,34	359,60	718,48	403,48	277,50
85/86	369,80	498,50	526,90	107,70	370,50	611,40	328,34	165,00
86/87	448,50	544,80	617,10	131,10	406,80	685,20	348,90	86,50
87/88	211,50	330,60	355,50	137,10	342,30	485,50	253,60	51,00
88/89	343,60	467,60	522,70	45,20	425,60	625,02	292,50	280,50
89/90	423,60	316,70	532,30	36,90	309,20	412,30	332,70	413,50
90/91	271,60	390,70	475,30	68,50	287,90	612,70	346,16	350,50
91/92	376,10	508,40	486,00	336,00	491,60	705,70	333,45	497,00
92/93	228,30	305,00	260,30	252,45	273,11	444,20	180,83	207,50
93/94	215,40	251,10	240,20	174,10	296,90	450,80	184,22	217,50
94/95	582,70	483,50	453,60	463,10	441,60	713,50	278,92	380,50
95/96	888,10	676,90	609,00	557,10	664,10	751,40	355,36	501,50
96/97	528,90	331,50	359,10	458,80	225,40	372,00	192,11	314,10
97/98	678,90	457,30	604,70	471,50	498,86	780,20	333,59	428,00
98/99	492,60	433,80	348,20	543,55	434,23	590,70	201,48	349,50
99/00	322,10	237,50	345,80	236,40	216,65	377,10	272,00	247,00
00/01	505,40	494,00	529,60	399,90	459,51	626,30	237,10	348,00
2001/2002	335,00	246,00	311,10	198,20	236,87	370,50	178,90	207,00
2002/2003	739,20	555,70	665,70	540,30	612,79	865,00	391,20	351,00
2003/2004	651,00	524,10	718,40	223,90	359,13	730,90	509,40	676,00
2004/2005	313,40	367,60	238,40	229,70	281,38	479,10	290,50	258,00
moyenne	434,01	434,71	477,82	295,21	388,53	596,37	289,04	313,00
max	888,10	676,90	718,40	557,10	664,10	874,10	509,40	676,00
min	211,50	237,50	238,40	36,90	176,90	370,50	178,90	51,00
Ecart-type	160,61	109,23	131,39	158,14	125,41	144,86	79,13	145,89
variance	25794,37	11931,38	17262,77	25007,68	15726,53	20985,41	6262,35	21283,12
Coef assy	0,986	0,030	-0,282	-0,014	0,386	0,115	0,561	0,530

III.2.1. Analyse des pluies sur l'ensemble du bassin versant

- Spatialisation de la pluviométrie (méthode de Thiessen)

Si on dispose d'un réseau de stations pluviométrique qui est connu en coordonnées (lambert ou UTM). On doit d'abord les cartographier (les dessiner) sur Mapinfo par la fonction « créer points ». Puis établir les étapes suivantes sous Vertical Mapper pour spatialiser la pluviométrie par la méthode de Thiessen:

- Ouvrir la table des stations pluviométriques.
- Choisir VerticalMapper >>natural neighbour analysis >>create regions from points (Voronoi)
- Sélectionner la table de points à spatialiser.
- Sélectionner le champ à spatialiser (exemple la moyenne annuelle de précipitation)

Vous obtenez une table des polygones de thiessen de votre série de pluviométrie

Tableau III.2. Pluie annuelle et la surface d'influence pour chaque station

Station	011404	011405	011407	011501	011509	011604	011301	011104
Pan (mm)	477.82	434.71	434.01	388.53	596.37	313.00	289.04	295.21
S (Km ²)	435.6	94.96	287.8	53.88	27.4	97.09	253.5	128.4

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} p_i \times S_i}{S_{bv}}$$

$$P_{moy} = 401 \text{ mm}$$

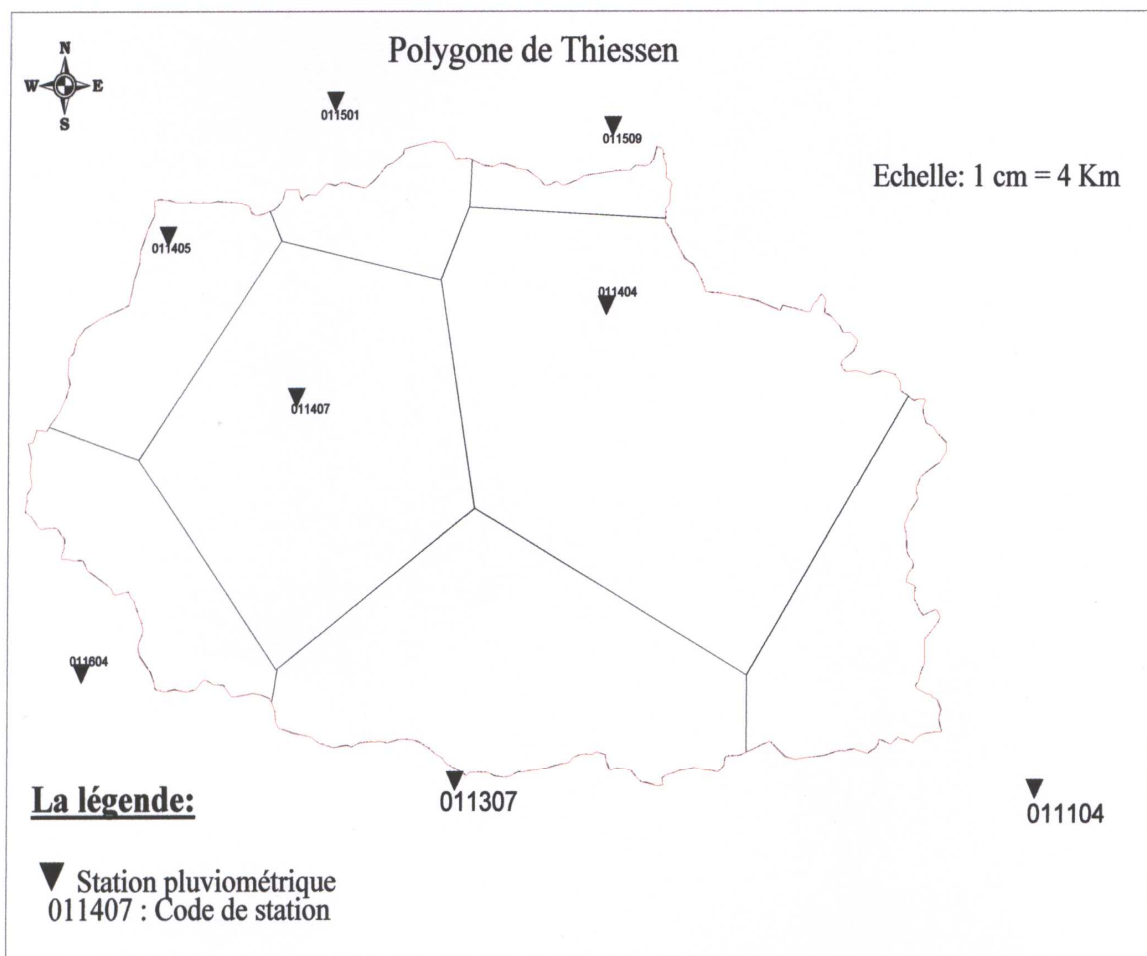


Figure III.1 Le polygone de Thiessen du bassin versant du Cheliff-Ghrib

III.2.2. Analyse en composantes principales (A.C.P)

L'analyse en composantes principales permet de visualiser l'information contenue dans un tableau de données quantitatives et de concentrer l'information dans un nombre réduit de nouvelles variables.

Cette méthode est appliquée sur des données des précipitations annuelles dont nous avons à notre disposition en formant une matrice initiale rectangulaire avec en ligne les valeurs des précipitations annuelles de huites stations (08) et en colonne les 29 années d'observations.

Les étapes de l'analyse en composantes principales sont :

- Création de la matrice des données brutes ;
- Calcul des paramètres statistiques ;
- Transformation des données brute en données centrées réduites ;
- Détermination de la matrice de corrélation des données centrées-réduites ;
- Détermination des valeurs propres et des vecteurs propres à partir de la matrice de corrélation des données centrées-réduites ;
- Détermination des composantes principales (C.P) ;
- Détermination des composantes principales réduites (CP') ;
- Détermination du coefficient de régression.

Analyse des résultats de l'A.C.P :

Les résultats obtenus par l'analyse en composantes principales sont résumés dans les tableaux III.3 ; III.4 ; III.5 ; III.6 ; III.7 ; III.8

Tableau III.3. : Moyenne, écart type des variables initiales

Station	Ghrib amont 011407	Ghrib Barrage 011405	Mongorno 011404	Ain boucif 011104	Harbil 011501	Médéa 011509	K.E.B 011301	Kherbat helale 011604
Moyenne	434,01	434,71	477,82	295,21	388,53	596,37	289,04	313,00
Ecart type	160,61	109,23	131,39	158,14	125,41	144,86	79,13	145,89

Tableau III.4: Matrice des coefficients de corrélation entre les variables

Stations	Ghrib amont 011407	Ghrib Barrage 011405	Mongorno 011404	Ain boucif 011104	Harbil 011501	Médéa 011509	K.E.B 011301	Kherbat helale 011604
011407	1,00	0,69	0,68	0,61	0,61	0,65	0,54	0,51
011405	0,69	1,00	0,78	0,27	0,76	0,87	0,64	0,25
011404	0,68	0,78	1,00	0,13	0,57	0,79	0,80	0,37
011104	0,61	0,27	0,13	1,00	0,41	0,29	-0,13	0,37
011501	0,61	0,76	0,57	0,41	1,00	0,74	0,36	0,10
011509	0,65	0,87	0,79	0,29	0,74	1,00	0,65	0,24
011301	0,54	0,64	0,80	-0,13	0,36	0,65	1,00	0,42
011604	0,51	0,25	0,37	0,37	0,10	0,24	0,42	1,00

Tableau III.5: Valeur propre, variances expliquées et variances cumulées

Axes	C1	C2	C3
Valeurs propres	4,70	1,35	1,07
Variances expliquées	59%	17%	13%
Variances cumulées	59%	76%	89%

Tableau III.6 : Projection des variables actives

Stations	C1	C2	C3
Ghrib amont 011407	0,86	0,32	0,10
Ghrib Barrage 011405	0,91	-0,13	-0,21
Mongorno 011404	0,88	-0,29	0,10
Ain boucif 011104	0,42	0,88	-0,10
Harbil 011501	0,77	0,11	-0,49
Médéa 011509	0,90	-0,14	-0,21
K.E.B 011301	0,75	-0,50	0,35
Kherbat helale 011604	0,47	0,32	0,76

Tableau III.7: Projections des observations :

Année	C1	C2	C3
1976/77	-0,17	0,32	-1,01
77/78	-0,07	0,60	-0,46
78/79	0,54	0,02	-0,50
79/80	1,31	-1,05	-2,11
80/81	0,09	0,66	0,38
81/82	0,18	0,69	2,31
82/83	-0,68	0,37	-0,07
83/84	-0,71	0,31	-0,68
84/85	0,70	-1,83	0,16
85/86	-0,02	-1,45	-0,53
86/87	0,42	-1,68	-1,05
87/88	-1,16	-0,89	-1,06
88/89	-0,05	-1,33	-0,26
89/90	-0,48	-1,01	1,62
90/91	-0,36	-1,40	0,88
91/92	0,59	0,08	0,37
92/93	-1,44	0,36	-0,36
93/94	-1,57	0,11	-0,27
94/95	0,56	1,01	-0,18
95/96	2,11	1,37	-0,24
96/97	-0,86	1,61	0,58
97/98	1,15	0,77	0,19
98/99	-0,08	1,82	-0,54
99/00	-1,29	0,01	0,77
00/01	0,37	0,72	-0,43
01/02	-1,53	0,30	0,11
02/03	1,85	0,57	-0,62
03/04	1,54	-0,99	2,80
04/05	-0,97	-0,07	0,20

Tableau III.8 : Ajustement à la loi normale du vecteur régional (C1)

Taille n= 29, Moyenne=-1,8793E-07, Ecart-type=0,99982759, I.C. à(en %)=95et
u Gauss=1,9604

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
-0,17	-1,57	1	0,0172	-2,115	-1,57	-2,11	-2,97	-1,56
-0,07	-1,53	2	0,0517	-1,629	-1,53	-1,63	-2,34	-1,15
0,54	-1,44	3	0,0862	-1,365	-1,44	-1,36	-2,00	-0,92
1,31	-1,29	4	0,1207	-1,172	-1,29	-1,17	-1,76	-0,75
0,09	-1,16	5	0,1552	-1,014	-1,16	-1,01	-1,57	-0,61
0,18	-0,97	6	0,1897	-0,879	-0,97	-0,88	-1,40	-0,48
-0,68	-0,86	7	0,2241	-0,758	-0,86	-0,76	-1,25	-0,37
-0,71	-0,71	8	0,2586	-0,647	-0,71	-0,65	-1,12	-0,26
0,70	-0,68	9	0,2931	-0,544	-0,68	-0,54	-1,00	-0,16
-0,02	-0,48	10	0,3276	-0,446	-0,48	-0,45	-0,89	-0,07
0,42	-0,36	11	0,3621	-0,352	-0,36	-0,35	-0,78	0,02
-1,16	-0,17	12	0,3966	-0,262	-0,17	-0,26	-0,68	0,12
-0,05	-0,08	13	0,4310	-0,173	-0,08	-0,17	-0,58	0,21
-0,48	-0,07	14	0,4655	-0,086	-0,07	-0,09	-0,48	0,30
-0,36	-0,05	15	0,5000	0,000	-0,05	0,00	-0,39	0,39
0,59	-0,02	16	0,5345	0,086	-0,02	0,09	-0,30	0,48
-1,44	0,09	17	0,5690	0,173	0,09	0,17	-0,21	0,58
-1,57	0,18	18	0,6034	0,262	0,18	0,26	-0,12	0,68
0,56	0,37	19	0,6379	0,352	0,37	0,35	-0,02	0,78
2,11	0,42	20	0,6724	0,446	0,42	0,45	0,07	0,89
-0,86	0,54	21	0,7069	0,544	0,54	0,54	0,16	1,00
1,15	0,56	22	0,7414	0,647	0,56	0,65	0,26	1,12
-0,08	0,59	23	0,7759	0,758	0,59	0,76	0,37	1,25
-1,29	0,70	24	0,8103	0,879	0,70	0,88	0,48	1,40
0,37	1,15	25	0,8448	1,014	1,15	1,01	0,61	1,57
-1,53	1,31	26	0,8793	1,172	1,31	1,17	0,75	1,76
1,85	1,54	27	0,9138	1,365	1,54	1,36	0,92	2,00
1,54	1,85	28	0,9483	1,629	1,85	1,63	1,15	2,34
-0,97	2,11	29	0,9828	2,115	2,11	2,11	1,56	2,97

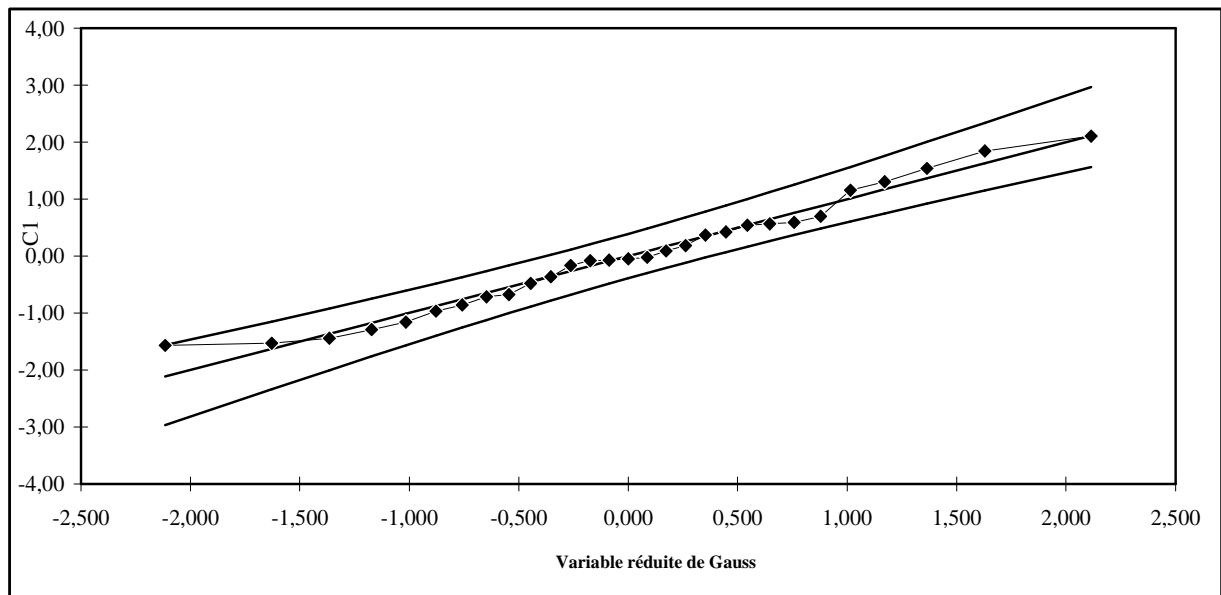


Figure III.2 : Ajustement du vecteur régional C1 à une loi Normale

L'analyse de corrélation montre une régionalisation des précipitations au niveau du bassin versant. Au vu les figures III.3 et III.4, les stations pluviométriques s'organisent en deux (02) groupes.

- Le premier groupe est composé des stations (011405, 011407, 011404, et 011509), ce regroupement met en exergue l'influence de sa position géographique, à savoir son altitude et la distance entre eux.
- Le deuxième groupe composé des stations (011104, 011604, 011301, 011501), se situe autour du bassin versant de l-oued Cheliff-Ghrib avec une pluviométrie moyenne comprise entre 250 et 350mm.
- **Stations représentatives du bassin versant :**

L'analyse en composantes principales a permis de dégager les stations représentatives du bassin versant de l'Oued Cheliff-Ghrib, les noms et les codes des stations représentatives sont donnés dans le tableau III.9

Tableau III.9.Code des stations représentatives

Stations	Code de station
Ghrib Amont	011407
Ghrib Barrage	011404
Mongorno	011405
Médéa	011509

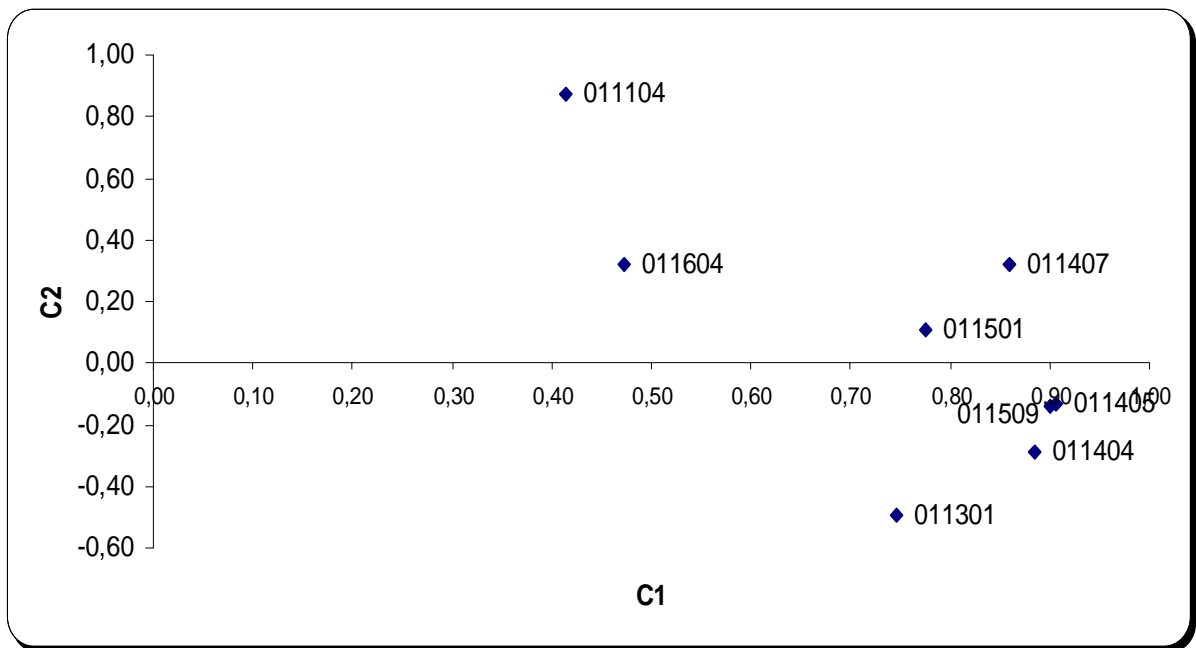


Figure III.3.Projection des variables sur le plan 1-2

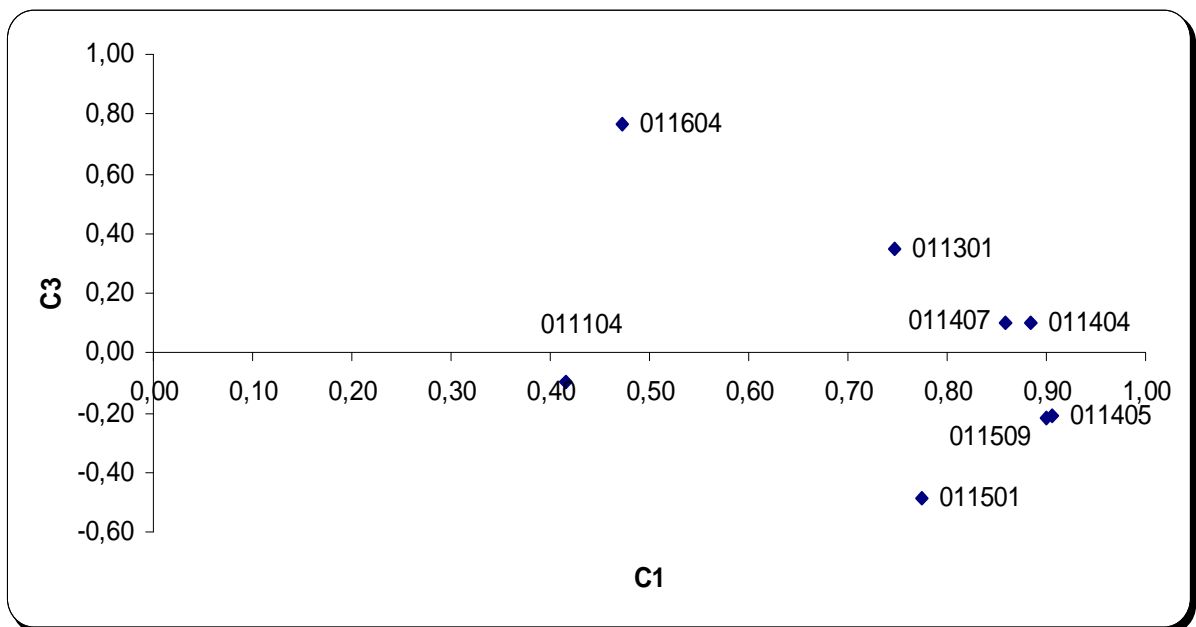


Figure III.4.Projection des variables sur le plan 1-3

III.2.3. Ajustement des précipitations à une loi de probabilité :

L'analyse statistique des précipitations est réalisée à l'échelle annuelle, mensuelle et journalière, elle est portée uniquement sur les stations représentatives du bassin versant.

-A l'échelle annuelle :

L'analyse statistique des précipitations annuelles à permis d'ajuster les séries d'observations des stations représentatives à la loi log normale.

Tableau III.10 : Précipitations annuelles et leurs fréquences expérimentales : Station Ghrib amont(011407)

Taille n= 29, Moy $\log(x-x_0)=2,61$ et E.T $\log(x-x_0)=0,156$, I.C à (en %)=95 u Gauss=1,96

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
394,10	211,50	1	0,017	-2,115	211,50	190,39	140,13	232,18
353,50	215,40	2	0,052	-1,629	215,40	226,80	175,63	269,48
453,30	228,30	3	0,086	-1,365	228,30	249,40	198,18	292,73
531,60	260,70	4	0,121	-1,172	260,70	267,35	216,24	311,34
394,20	271,60	5	0,155	-1,014	271,60	282,92	231,95	327,65
458,70	313,40	6	0,190	-0,879	313,40	297,05	246,22	342,64
353,70	322,10	7	0,224	-0,758	322,10	310,27	259,53	356,85
260,70	335,00	8	0,259	-0,647	335,00	322,89	272,18	370,60
460,80	343,60	9	0,293	-0,544	343,60	335,13	284,37	384,13
369,80	353,50	10	0,328	-0,446	353,50	347,14	296,24	397,61
448,50	353,70	11	0,362	-0,352	353,70	359,04	307,91	411,19
211,50	369,80	12	0,397	-0,262	369,80	370,95	319,46	425,00
343,60	376,10	13	0,431	-0,173	376,10	382,95	330,99	439,16
423,60	394,10	14	0,466	-0,086	394,10	395,14	342,56	453,79
271,60	394,20	15	0,500	0,000	394,20	407,61	354,24	469,03
376,10	423,60	16	0,534	0,086	423,60	420,48	366,14	485,03
228,30	448,50	17	0,569	0,173	448,50	433,87	378,33	501,98
215,40	453,30	18	0,603	0,262	453,30	447,91	390,94	520,09
582,70	458,70	19	0,638	0,352	458,70	462,76	404,07	539,61
888,10	460,80	20	0,672	0,446	460,80	478,63	417,87	560,86
528,90	492,60	21	0,707	0,544	492,60	495,78	432,53	584,28
678,90	505,40	22	0,741	0,647	505,40	514,56	448,32	610,45
492,60	528,90	23	0,776	0,758	528,90	535,50	465,60	640,20
322,10	531,60	24	0,810	0,879	531,60	559,33	484,91	674,81
505,40	582,70	25	0,845	1,014	582,70	587,28	507,09	716,31
335,00	651,00	26	0,879	1,172	651,00	621,46	533,66	768,35
739,20	678,90	27	0,914	1,365	678,90	666,18	567,59	838,36
651,00	739,20	28	0,948	1,629	739,20	732,60	616,56	946,00
313,40	888,10	29	0,983	2,115	888,10	872,69	715,61	1185,66

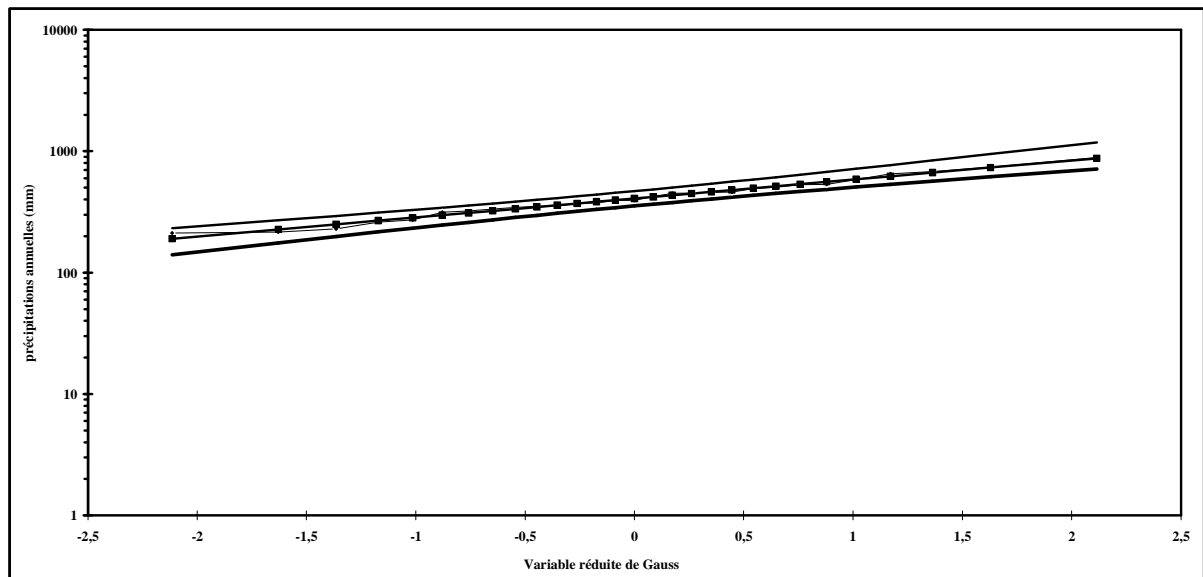


Figure III.5 : Ajustement des précipitations annuelles à la loi log-normale : station 011407

Tableau III.11 : Equations d’ajustement des précipitations annuelles à la loi log-normale des différentes stations

Stations	Droite de Galton
011407	$\text{Log } X_{p\%} = 2,61 + 0,156 \text{ up\%}$
011405	$\text{Log } X_{p\%} = 2,62 + 0,116 \text{ up\%}$
011404	$\text{Log } X_{p\%} = 2,66 + 0,133 \text{ up\%}$
011509	$\text{Log } X_{p\%} = 2,76 + 0,110 \text{ up\%}$

Tableau III.12 : Précipitations annuelles (mm) pour différentes périodes de retour

Période de retour	10	25	50	100	250	500
011407	646,58	765,59	853,84	941,88	1059,03	1148,80
011405	593,14	672,70	729,67	785,02	856,67	910,20
011404	678,60	783,55	859,80	934,70	1032,78	1106,84
011509	799,00	899,07	970,25	1039,07	1127,73	1193,67

-A l’échelle mensuelle :

Dans le but de mettre en exergue la variation de précipitations à l’échelle mensuelle, nous avons dès le départ, déterminer les paramètres statistiques des stations représentatives du bassin versant et l’ajustement des données mensuelles à une loi de probabilité. Il est à noter que les précipitations mensuelles s’ajustent beaucoup mieux à la loi log-normale ; Le tableau III.13 donne les équations de Galton pour la station de Ghrib Amont (011407)

Tableau III.13 : Equation d'ajustement des précipitations mensuelles à la loi log-normale
Station Ghrib-Amont (011407)

Mois	Equation de la droite de Galton
Septembre	$\text{Log } X_{p\%} = 1,11 + 0,55 \text{ up\%}$
Octobre	$\text{Log } X_{p\%} = 1,38 + 0,52 \text{ up\%}$
Novembre	$\text{Log } X_{p\%} = 1,51 + 0,48 \text{ up\%}$
Décembre	$\text{Log } X_{p\%} = 1,68 + 0,38 \text{ up\%}$
Janvier	$\text{Log } X_{p\%} = 1,53 + 0,64 \text{ up\%}$
Février	$\text{Log } X_{p\%} = 1,45 + 0,60 \text{ up\%}$
Mars	$\text{Log } X_{p\%} = 1,35 + 0,64 \text{ up\%}$
Avril	$\text{Log } X_{p\%} = 1,52 + 0,44 \text{ up\%}$
Mai	$\text{Log } X_{p\%} = 1,18 + 0,67 \text{ up\%}$
Juin	$\text{Log } X_{p\%} = 0,50 + 0,67 \text{ up\%}$
Juillet	$\text{Log } X_{p\%} = 0,47 + 0,85 \text{ up\%}$
Août	$\text{Log } X_{p\%} = 0,34 + 0,56 \text{ up\%}$

-A l'échelle journalière :

L'étude des précipitations journalières s'avère nécessaire pour pouvoir mettre en exergue l'irrégularité des précipitations. Le tableau III.14 donne les pluies maximales des stations représentatives.

L'ajustement des précipitations maximales a donné les résultats présentés dans le tableau III.15 pour les stations représentatives du bassin versant

Tableau III.14 : Précipitations maximales journalières en mm aux stations représentatives

stations	011407	011405	011404	011509
1976/77	27,1	30,1	34	32,5
77/78	19,8	31,2	28	51,7
78/79	35,4	57,9	40	75,6
79/80	54	67	44	100,5
80/81	39,6	44,1	64	71,6
81/82	44,1	56,8	72	37,9
82/83	52,8	40,4	32,3	55,2
83/84	35,6	34,1	30	33
84/85	67,8	84,8	72,3	101,4
85/86	41,1	39,3	43	39,1
86/87	31,6	44,7	48	66,4
87/88	17,5	28,4	26	42,1
88/89	40,8	38,2	37	71
89/90	62,5	47,3	29	43,4
90/91	29,2	27,8	32	56,5
91/92	48	75,3	35	147
92/93	27,5	29,2	27,5	30
93/94	22,3	24,8	24	77,5
94/95	58	45,8	24	67
95/96	37,8	57,9	37	45,4
96/97	42,3	26,2	23	25,5
97/98	63,8	30,6	20	41,5
98/99	51,6	31	17	42,3
99/00	38,3	21,5	36	43,5
00/01	33,7	60,5	44	63,9
01/02	34,1	14,5	20	20,6
02/03	56,1	33,1	91,5	60,2
03/04	27,7	33	40	47,5
04/05	26,2	52	20	66,5
La moyenne	40,22	41,64	37,61	57,11
Le maximum	67,80	84,80	91,50	147,00
Le minimum	17,50	14,50	17,00	20,60
Ecart-type	13,64	16,70	17,63	26,51
La variance	186,14	278,99	310,71	703,02
Coef Asymétrie	0,36	0,86	1,55	1,56

Tableau III.15: Précipitations maximales journalières et leurs fréquences expérimentales :
Station Ghrib-Amont **011407**

Taille n= 29, Moy log (x-xo)=1,58, E.T log(x-xo)=0,153, I.C (en %)=95% u Gauss=1,96
xo=0

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
27,10	17,50	1	0,017	-2,115	17,50	17,94	13,26	21,80
19,80	19,80	2	0,052	-1,629	19,80	21,31	16,57	25,25
35,40	22,30	3	0,086	-1,365	22,30	23,39	18,66	27,39
54,00	26,20	4	0,121	-1,172	26,20	25,05	20,33	29,10
39,60	27,10	5	0,155	-1,014	27,10	26,49	21,78	30,60
44,10	27,50	6	0,190	-0,879	27,50	27,79	23,10	31,98
52,80	27,70	7	0,224	-0,758	27,70	29,00	24,33	33,28
35,60	29,20	8	0,259	-0,647	29,20	30,17	25,50	34,55
67,80	31,60	9	0,293	-0,544	31,60	31,29	26,62	35,79
41,10	33,70	10	0,328	-0,446	33,70	32,39	27,71	37,02
31,60	34,10	11	0,362	-0,352	34,10	33,49	28,79	38,27
17,50	35,40	12	0,397	-0,262	35,40	34,58	29,85	39,53
40,80	35,60	13	0,431	-0,173	35,60	35,68	30,91	40,83
62,50	37,80	14	0,466	-0,086	37,80	36,80	31,97	42,17
29,20	38,30	15	0,500	0,000	38,30	37,94	33,05	43,56
48,00	39,60	16	0,534	0,086	39,60	39,12	34,14	45,02
27,50	40,80	17	0,569	0,173	40,80	40,34	35,26	46,57
22,30	41,10	18	0,603	0,262	41,10	41,63	36,41	48,22
58,00	42,30	19	0,638	0,352	42,30	42,99	37,62	50,00
37,80	44,10	20	0,672	0,446	44,10	44,44	38,88	51,94
42,30	48,00	21	0,707	0,544	48,00	46,00	40,22	54,08
63,80	51,60	22	0,741	0,647	51,60	47,72	41,67	56,46
51,60	52,80	23	0,776	0,758	52,80	49,63	43,25	59,17
38,30	54,00	24	0,810	0,879	54,00	51,80	45,01	62,31
33,70	56,10	25	0,845	1,014	56,10	54,35	47,04	66,08
34,10	58,00	26	0,879	1,172	58,00	57,46	49,46	70,81
56,10	62,50	27	0,914	1,365	62,50	61,53	52,56	77,15
27,70	63,80	28	0,948	1,629	63,80	67,56	57,01	86,89
26,20	67,80	29	0,983	2,115	67,80	80,26	66,02	108,52

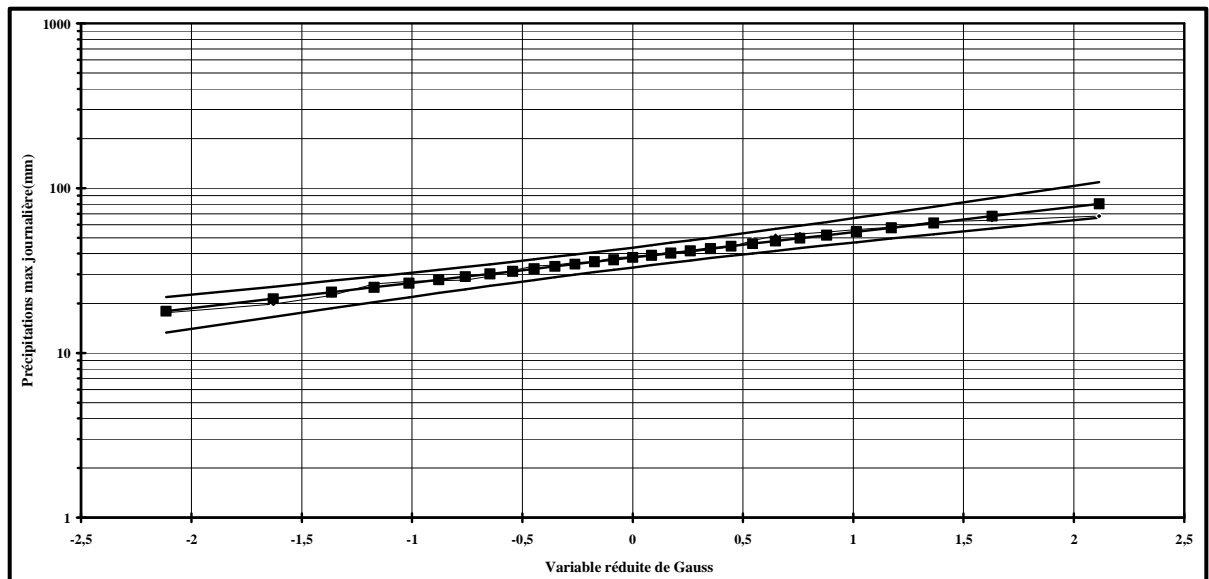


Figure III.6: Ajustement des précipitations maximales journalières à la loi log-normale (Station Ghrib-amont 011407)

Les équations de la droite de Galton sont données dans le tableau III.16

Tableau III.16: Equation de la droite de Galton : Précipitation maximales journalières

Stations	Equation de la droite de Galton
Ghrib-amont 011407	$\text{Log } X_{p\%} = 1,58 + 0,15 \text{ up}\%$
Ghrib-barrage 011405	$\text{Log } X_{p\%} = 1,59 + 0,17 \text{ up}\%$
Mongorno 011404	$\text{Log } X_{p\%} = 1,54 + 0,18 \text{ up}\%$
Médéa 011509	$\text{Log } X_{p\%} = 1,72 + 0,19 \text{ up}\%$

Les quantiles sont résumés dans le tableau III.17

Tableau III.17: Précipitations maximales pour différentes périodes de retour

Période de retour	10	25	50	100	250	500
011407	59,75	70,55	78,55	86,52	97,10	105,20
011405	64,35	77,59	87,56	97,61	111,15	121,63
011404	58,55	71,12	80,64	90,29	103,33	113,48
011509	90,64	111,01	126,54	142,35	163,85	180,65

III.2. Analyse des écoulements

III.2.1. Introduction :

Par suite du caractère aléatoire des variables d'entrée (précipitations), l'écoulement a tendance à varier dans le temps. Il est important de connaître l'étendue de ces variations afin d'établir les caractéristiques de la dynamique fluvio-sédimentaire dans un bassin versant situé en zone semi-aride.

La répartition de l'écoulement dans l'année dépend des variations climatiques saisonnières. Dans la plupart des applications, la distribution mensuelle des débits est suffisante et peut se déduire des variations des paramètres météorologiques. Pour quelques problèmes, il peut être nécessaire de considérer la répartition des débits à l'échelle journalière. Comme l'apparition des crues est aléatoire, il faut évaluer, d'une part, les contributions respectives des écoulements superficiels aux crues et, d'autre part, quantifier les charges solides résultant du ruissellement superficiel.

III.2.2. Débits Moyens Annuels :

L'écoulement moyen annuel est une notion fondamentale en hydrologie. C'est le volume d'eau écoulé en 365 jours à la sortie d'un bassin. Le module brut ou absolu est généralement exprimé en m^3/s et le module spécifique se traduit en $\text{l/s}/\text{km}^2$.

Nous disposons de série de données hydrométriques (maximisation intrinsèque de l'information au sens de P. Dubreuil, (1974), car il semble préférable de baser notre analyse sur des données réellement observées et non théoriquement extrapolées, d'autant plus que l'étendue des échantillons et la forte irrégularité du régime hydrologique des bassins justifient guère une telle opération.

III.2.2.1. Variations des débits annuels moyens bruts (m^3/s)

La variation annuelle des modules (Tableau III.18) au niveau de station est illustrée par la figure d. Le tableau, montre que l'oued cheliff débite $4,567 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une aire de réception de $1378,67 \text{ km}^2$.

Tableau III.18 : Débits moyens annuels de oued cheliff (station Ghrib-Amont) :

Année	Débit moyen Annuel Q (m ³ /s)	Module spécifique Q (L/s/km ²)
1977/78	4,587	3,327
1978/79	5,984	4,341
1979/80	7,081	5,136
1980/81	5,157	3,741
1981/82	6,060	4,396
1982/83	4,590	3,329
1983/84	3,288	2,385
1984/85	0,830	0,602
1985/86	5,931	4,302
1986/87	3,239	2,349
1987/88	0,920	0,667
1988/89	1,015	0,736
1989/90	10,820	7,848
1990/91	3,252	2,359
1991/92	11,940	8,661
1992/93	2,894	2,099
1993/94	2,432	1,764
Moyenne	4,707	3,414
Ecart-type	3,145	2,281
Cv	0,668	0,668

Tableau III.19 : Valeurs caractéristiques de module au niveau du bassin versant

Station	Q _{Moy} (m ³ /s)	Q _{Max} (m ³ /s) (année)	Q _{Min} (m ³ /s) (année)	Nbre d'années > Q _{moy}	Coef .Immodération R=Q _{Max} /Q _{Min}	Coef Variation Cv
Ghrib- Amont	4,707	11,940 (91/92)	0,830 (84/85)	07 sur 17	14,380	0,668

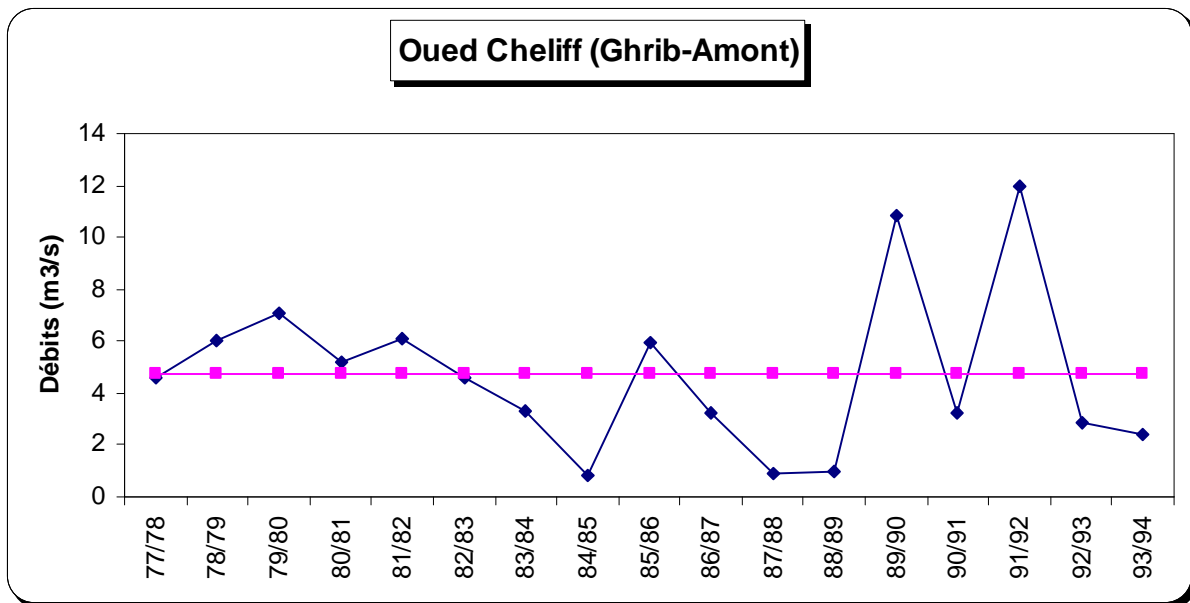


Figure III.7: Variations interannuelles de module d'oued cheliff (Station Ghrib-Amont)

III.2.2.2. Variations des débits annuels moyens spécifiques (l/s/km²) :

A fin de mieux cerner la variation de l'écoulement dans le bassin, nous utiliserons le module spécifique, car ce dernier permette de le comparer avec les autres sous bassin en ramenant le débit à l'unité de surface. L'abondance spécifique de bassin varie d'une part en fonction de la distribution des précipitations et d'autre part en fonction des caractéristiques physiographiques de chaque bassin, à savoir la lithologie, le couvert végétal. C'est donc un élément purement géographique.

Tableau III.20: Débit spécifique et lame d'eau écoulée :

Bassin	Cours d'eau	Q (m ³ /s)	q(l/s/km ²)	E (mm)
Ghrib-Amont	oued cheliff	4,707	3,414	107,673

Q : module annuel (m³/s) ; q : débit spécifique (l/s/km²) ; E : lame d'eau écoulée (mm)
 Le bassin versant d'Oued cheliff-Ghrib, s'étend sur 1378,63 km². Son débit spécifique est de 3,414 l/s/km² correspondant à une lame d'eau écoulée de 107,673 mm. Cette valeurs relativement importante de débit spécifique au niveau de bassin, sont dues à la taille et à lithologie de bassin ; le karst très développé permet aux circulations d'eaux souterraines de soutenir l'écoulement en période d'étiage.

III.2.2.3. L'irrégularité inter annuelle de module et leur répartition statistique

L'irrégularité inter annuelle de l'écoulement peut être mesurée par les variations de l'hydraulicité, c'est-à-dire le rapport du débit d'une année particulière Q_i au débit moyen d'une longue série d'observation (Q_{moy}). Elle peut être complétée par d'autres critères statistiques simples tels que le coefficient de variation, ainsi que le coefficient d'immodération (R) donné par le rapport des modules extrêmes ($R=Q_{Max}/Q_{Min}$).

1. L'hydraulicité

Tableau III.21 : Hydraulicité d'oued cheliff-Ghrib

Bassin	Cheliff-Ghrib
Station	Ghrib-Amont
Année	Q_i/Q_{moy}
77/78	0,975
78/79	1,269
79/80	1,502
80/81	1,094
81/82	1,285
82/83	0,973
83/84	0,697
84/85	0,176
85/86	1,258
86/87	0,687
87/88	0,195
88/89	0,215
89/90	2,295
90/91	0,690
91/92	2,532
92/93	0,614
93/94	0,516
Max	2,532
Min	0,176

La série hydrométrique permette de cerner l'évolution des débits sur des années successives. La courbe de variation inter annuelle des modules (fig III.7), montrent des fortes fluctuations de débits d'une année à l'autre. En témoignent les valeurs de l'hydraulicité qui sont en majorité inférieures à la moyenne annuelle(1). Tableau (III.21)

En effet, plus de 50% des années hydrologiques sont déficitaires. Certaines valeurs des modules annuels sont élevées, conséquence aux fortes crues de saison qu'avait connue ce bassin.

2. Coefficient d'immodération

Le coefficient d'immodération (Tableau III.19) est élevé (14,38), cette valeur montre l'irrégularité accentuée des débits inter annuels.

3. Coefficient de variation :

La variation inter annuelle peut être aussi précisée par le coefficient de variation (Cv) (tableau III.18). La valeur de coefficient de variation est élevée.

III.2.3. Etude statistique des modules :

L'étude statistique des modules présente un intérêt indéniable dans le cadre des projets d'aménagements hydrauliques et permet de compléter la connaissance du phénomène d'irrégularité de l'écoulement annuel. Le choix de la période de retour du débit dépend de la taille de l'échantillon et de projet à réaliser.

La forte dispersion des débits annuels mise en évidence par la valeur de coefficient de variation (Cv), Laisse supposer une distribution dissymétrique de l'échantillon, cette dissymétrie apparaît nettement en portant les points représentatifs des Log de Q en face de leurs fréquences expérimentales sur un papier Gausso-arithmétique (Figure III.8)

Tableau III.22:Débit moyen journalier et leurs fréquences expérimentales :

Station Ghrib-Amont **011407**

Taille n= 17, Moy log (x-x₀)=0,56, E.T log(x-x₀)=0,34, I.C (en %)=95% u Gauss=1,96
x₀=0

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
4,587	0,830	1	0,029	-1,890	0,8301	0,82616	0,33706	1,384402
5,984	0,920	2	0,088	-1,352	0,9201	1,26337	0,61403	1,980279
7,081	1,015	3	0,147	-1,049	1,015	1,60452	0,85242	2,445419
5,157	2,432	4	0,206	-0,821	2,432	1,92176	1,08479	2,886298
6,060	2,894	5	0,265	-0,629	2,894	2,23637	1,32113	3,335891
4,590	3,239	6	0,324	-0,457	3,239	2,55991	1,56699	3,814243
3,288	3,252	7	0,382	-0,299	3,252	2,90126	1,82672	4,338930
0,830	3,288	8	0,441	-0,148	3,28792	3,26909	2,10464	4,929125
5,931	4,587	9	0,500	0,000	4,587	3,67332	2,40582	5,608613
3,239	4,590	10	0,559	0,148	4,58992	4,12754	2,73747	6,411206
0,920	5,157	11	0,618	0,299	5,15692	4,65085	3,10982	7,386647
1,015	5,931	12	0,676	0,457	5,931	5,27102	3,53761	8,610986
10,820	5,984	13	0,735	0,629	5,98432	6,03357	4,04489	10,21345
3,252	6,060	14	0,794	0,821	6,05992	7,02132	4,67495	12,43861
11,940	7,081	15	0,853	1,049	7,08052	8,40957	5,51779	15,82943
2,894	10,820	16	0,912	1,352	10,82	10,6804	6,81384	21,97487
2,432	11,940	17	0,971	1,890	11,94	16,3325	9,74667	40,03202

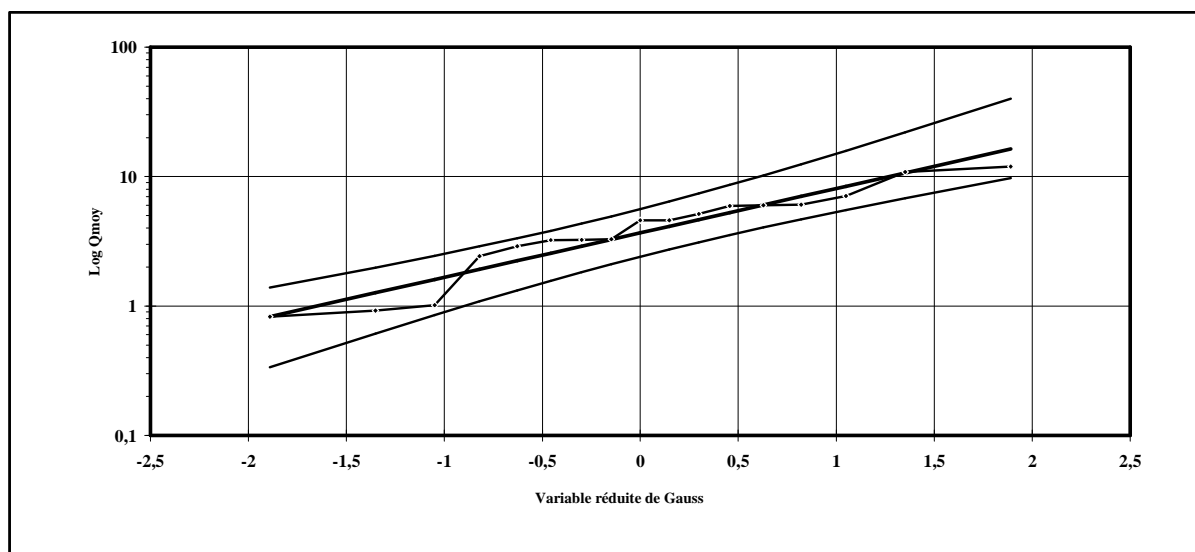


Figure III.8 : Ajustement des débits moyens journaliers à la loi log-normale
(Station Ghrib-amont 011407)

L'ajustement à une distribution de type Galton ou Log normale à notre bassin versant donne les résultats du tableau (III.23) suivant :

Tableau III.23: Ajustement à une loi log-normale des modules annuels

Bassin	Paramètres statistiques		Droite d'Henry
	Moy log Q	E.T logQ	
Cheliff-Ghrib	0,565	0,342	Log Q =0,565+0,342 u

Tableau III.24 : Modules caractéristiques en m³/s pour des périodes de récurrence données

Période	02 ans	05 ans	10 ans	20 ans	100 ans	1000 ans
Cheliff-Ghrib	3,673	7,137	10,104	13,463	23,058	42,140

Conclusion :

L'étude pluviométrique a montré que la variation des précipitations est de direction de Nord-est au Sud-ouest du bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib.

L'analyse en composantes principales a permis de dégager les stations représentatives du bassin versant de l'Oued Cheliff-Ghrib.

L'ajustement graphique d'une droite de distribution moyenne et le calcul de l'intervalle de confiance à 95% permet de faire des estimations correctes des précipitations annuelles et maximales pour différentes fréquences sur le bassin versant.

L'étude des écoulements montre que le plus grand débit enregistré est observé durant l'année 91/92 avec un débit moyen de $11,94 \text{ m}^3/\text{s}$ et le plus faible débit enregistré en 83/84 avec $0,83 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'ajustement graphique d'une droite de distribution moyenne et le calcul de l'intervalle de confiance à 95% permet de faire des estimations correctes des débits probables pour différentes période de retour sur le bassin versant.

Chapitre IV.
Analyse des paramètres de la relation
débit solide – débit liquide

Chapitre IV : Analyse des paramètres de la relation débit solide – débit liquide

IV.1 Mise en forme des données :

Dans le but de l'homogénéisation des données, nous avons recherché des modèles régressifs entre deux paramètres de mesure le débit liquide et le débit solide. A cet effet les données sont mises en graphe et leur allure oriente le choix du modèle régressif.

L'approche consiste au traitement des valeurs des débits liquides instantanés (Ql inst) et des débits solides instantanés (Qs inst) pour différentes échelles temporelles (annuelle, mensuelle, saisonnière, saison humide et saison sèche).

IV.1.1. Relation : Débit liquide instantané – Débit solide instantané :

1.1. Ensemble des données (Relation interannuelle) :

Les couples débit liquide Ql inst – débit solide Qs inst sont mis en graphe (Figure IV.1), en vue de la recherche d'un modèle de régression le plus adéquat au vu du coefficient de détermination R^2 (Tableau IV.1)

Tableau. IV.1 : Valeurs R^2 calculées à l'échelle interannuelle

Echelle Temporelle	Type de modèle	Station Ghrib- Amont
Relation interannuelle	Linéaire	0,46
	Logarithmique	0,21
	Polynomiale	0,47
	Puissance	-
	Exponentielle	-

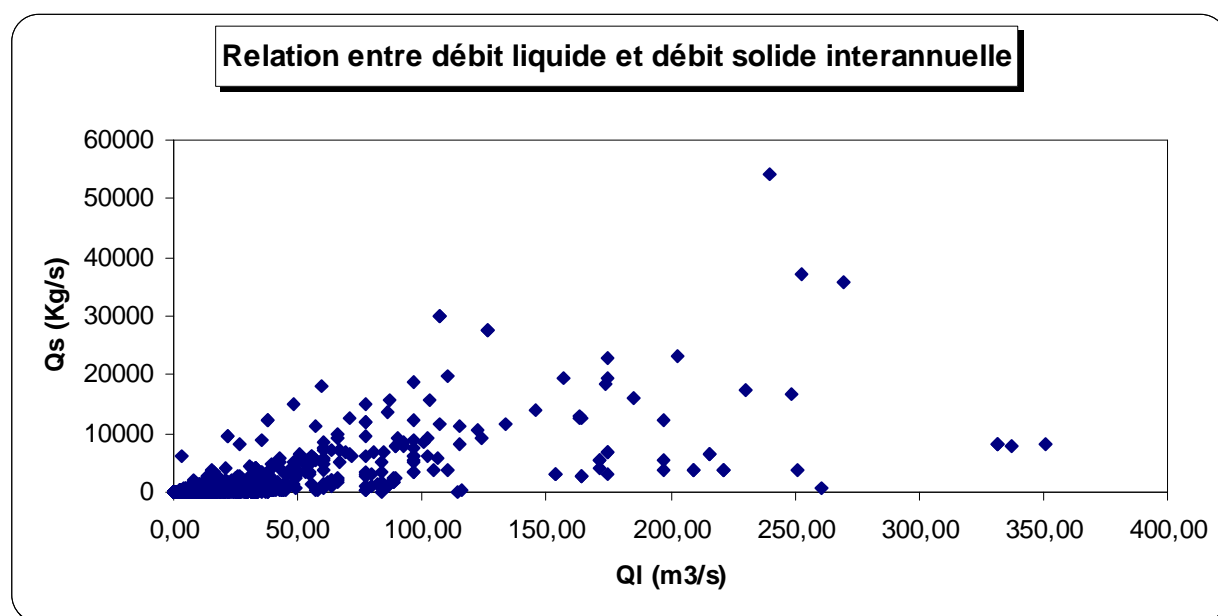


Figure IV.1. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont (Echelle interannuel)

1.2. Ensemble des données (Relation annuelle) :

A l'échelle annuelle nous avons pris les couples débit liquide – débit solide pour chaque année observée et recherché une relation fonctionnelle ($Q_s = f(Q_l)$). Le tableau IV.2 donne les résultats de valeurs de R^2 à l'échelle annuelle.

Tableau IV.2. Valeurs de R^2 calculées à l'échelle annuelle

Echelle Temporelle	Type de modèle	Station Ghrib- Amont (R^2)
1977/78	Linéaire	0,19
	Logarithmique	0,17
	Polynomiale	0,22
	Puissance	0,74
	Exponentielle	0,42
78/79	Linéaire	0,84
	Logarithmique	0,31
	Polynomiale	0,89
	Puissance	-
	Exponentielle	-
79/80	Linéaire	0,57
	Logarithmique	0,24
	Polynomiale	0,59
	Puissance	0,70
	Exponentielle	0,50
80/81	Linéaire	0,88
	Logarithmique	0,40
	Polynomiale	0,91
	Puissance	0,81
	Exponentielle	0,66
81/82	Linéaire	0,77
	Logarithmique	0,39
	Polynomiale	0,79
	Puissance	0,86
	Exponentielle	0,62
82/83	Linéaire	0,42
	Logarithmique	0,29
	Polynomiale	0,44
	Puissance	0,78
	Exponentielle	0,59
83/84	Linéaire	0,97
	Logarithmique	0,74
	Polynomiale	0,97
	Puissance	-
	Exponentielle	-
84/85	Linéaire	0,92
	Logarithmique	0,39
	Polynomiale	0,95
	Puissance	0,80
	Exponentielle	0,37

85/86	Linéaire	0,53
	Logarithmique	0,35
	Polynomiale	0,53
	Puissance	0,67
	Exponentielle	0,35
86/87	Linéaire	0,89
	Logarithmique	0,29
	Polynomiale	0,98
	Puissance	0,72
	Exponentielle	0,42
87/88	Linéaire	0,56
	Logarithmique	0,38
	Polynomiale	0,71
	Puissance	0,81
	Exponentielle	0,67
88/89	Linéaire	0,61
	Logarithmique	0,41
	Polynomiale	0,61
	Puissance	0,84
	Exponentielle	0,61
89/90	Linéaire	0,62
	Logarithmique	0,39
	Polynomiale	0,62
	Puissance	-
	Exponentielle	-
90/91	Linéaire	0,18
	Logarithmique	0,18
	Polynomiale	0,19
	Puissance	0,35
	Exponentielle	0,25
91/92	Linéaire	0,82
	Logarithmique	0,28
	Polynomiale	0,91
	Puissance	0,41
	Exponentielle	0,34
92/93	Linéaire	0,71
	Logarithmique	0,60
	Polynomiale	0,71
	Puissance	-
	Exponentielle	-
93/94	Linéaire	0,85
	Logarithmique	0,49
	Polynomiale	0,94
	Puissance	-
	Exponentielle	-

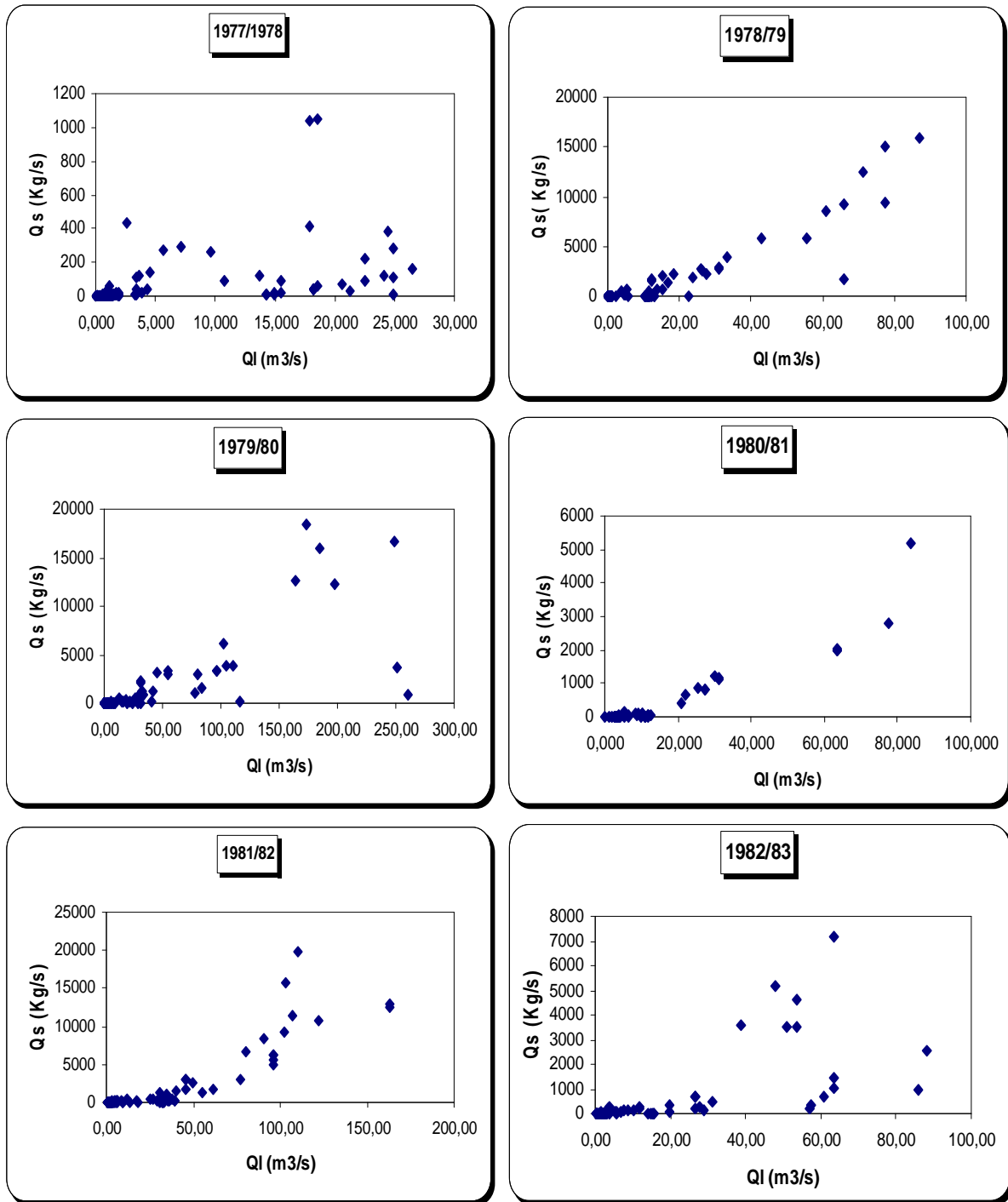


Figure IV.2. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont (Echelle annuelle)

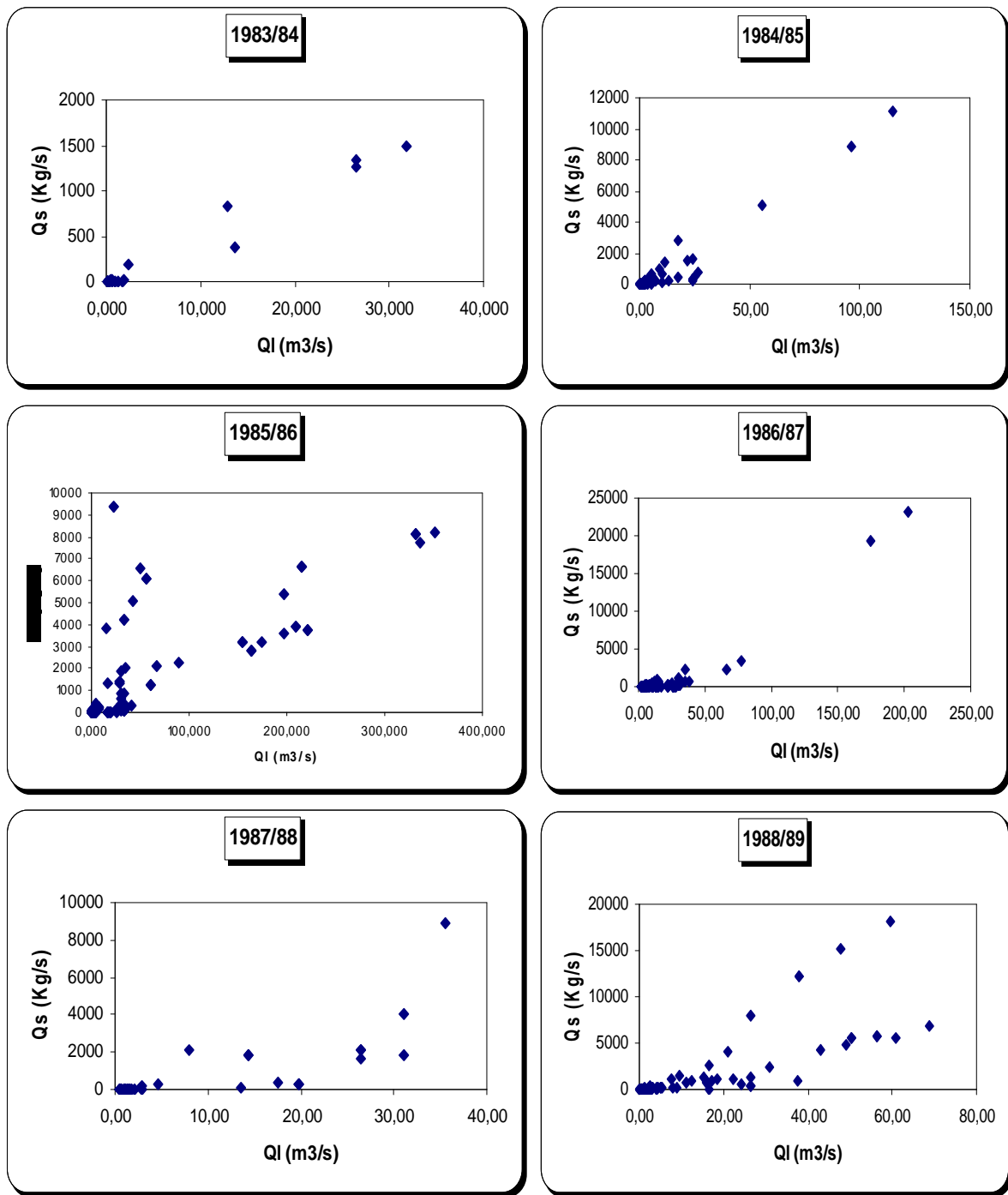


Figure IV.2. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont
Echelle annuelle (Suite)

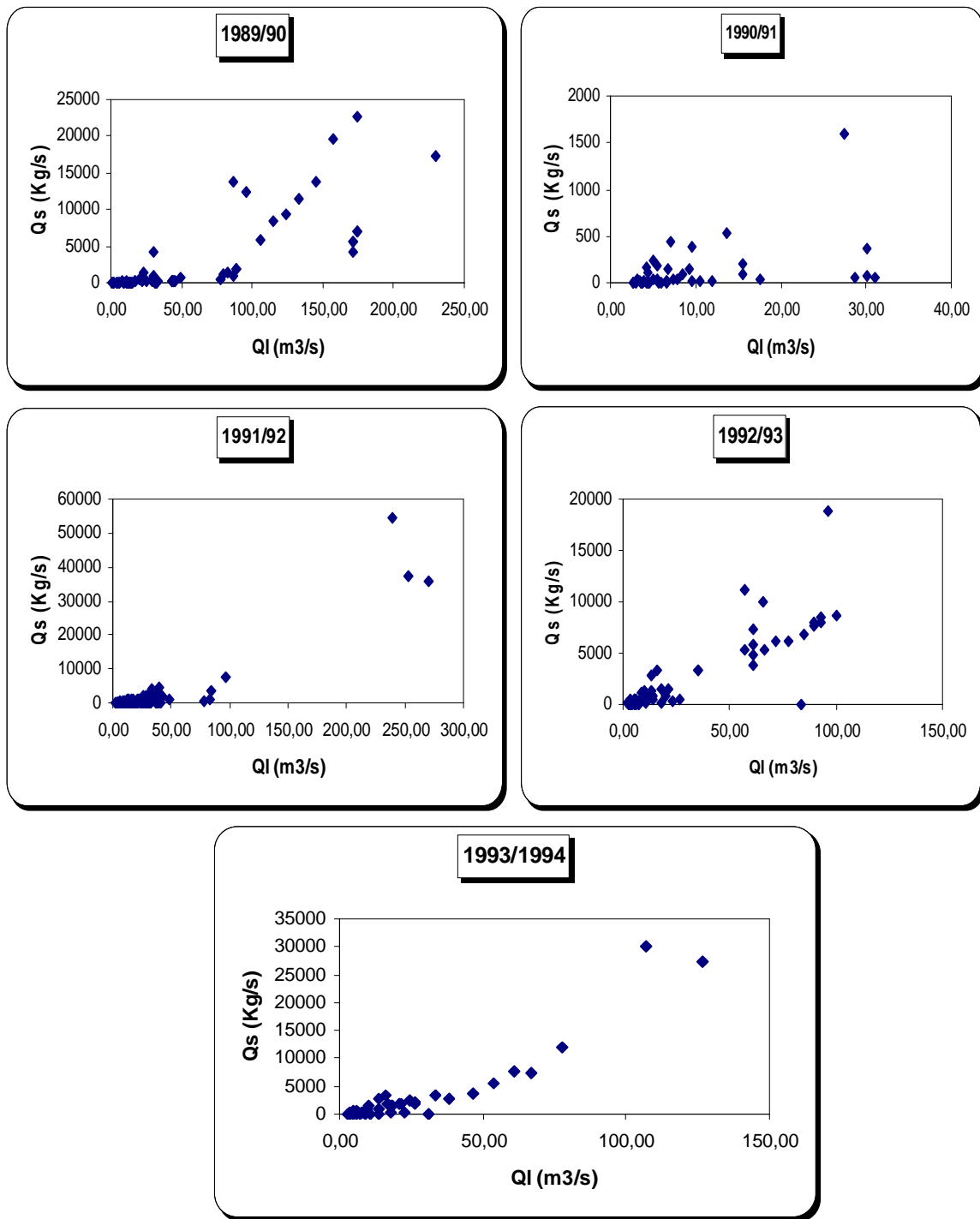


Figure IV.2. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont
Echelle annuelle (Suite)

Tableau IV.3. Valeurs de R^2 calculées à l'échelle mensuelle

Echelle Temporelle	Type de modèle	Station Ghrib- Amont
Septembre	Linéaire	0,86
	Logarithmique	0,56
	Polynomiale	0,93
	Puissance	0,88
	Exponentielle	0,65
Octobre	Linéaire	0,80
	Logarithmique	0,25
	Polynomiale	0,91
	Puissance	0,86
	Exponentielle	0,40
Novembre	Linéaire	0,57
	Logarithmique	0,33
	Polynomiale	0,66
	Puissance	0,75
	Exponentielle	0,56
Décembre	Linéaire	0,85
	Logarithmique	0,27
	Polynomiale	0,92
	Puissance	0,77
	Exponentielle	0,47
Janvier	Linéaire	0,83
	Logarithmique	0,24
	Polynomiale	0,87
	Puissance	0,69
	Exponentielle	0,44
Février	Linéaire	0,45
	Logarithmique	0,21
	Polynomiale	0,71
	Puissance	0,69
	Exponentielle	0,50
Mars	Linéaire	0,70
	Logarithmique	0,40
	Polynomiale	0,71
	Puissance	0,79
	Exponentielle	0,49
Avril	Linéaire	0,79
	Logarithmique	0,27
	Polynomiale	0,85
	Puissance	0,70
	Exponentielle	0,51
Mai	Linéaire	0,62
	Logarithmique	0,58
	Polynomiale	0,62
	Puissance	0,94
	Exponentielle	0,81

Juin	Linéaire	0,10
	Logarithmique	0,10
	Polynomiale	0,11
	Puissance	0,77
	Exponentielle	0,71
Juillet	Linéaire	0,01
	Logarithmique	0,017
	Polynomiale	0,15
	Puissance	0,18
	Exponentielle	0,06
Août	Linéaire	0,98
	Logarithmique	0,82
	Polynomiale	0,99
	Puissance	0,99
	Exponentielle	0,83

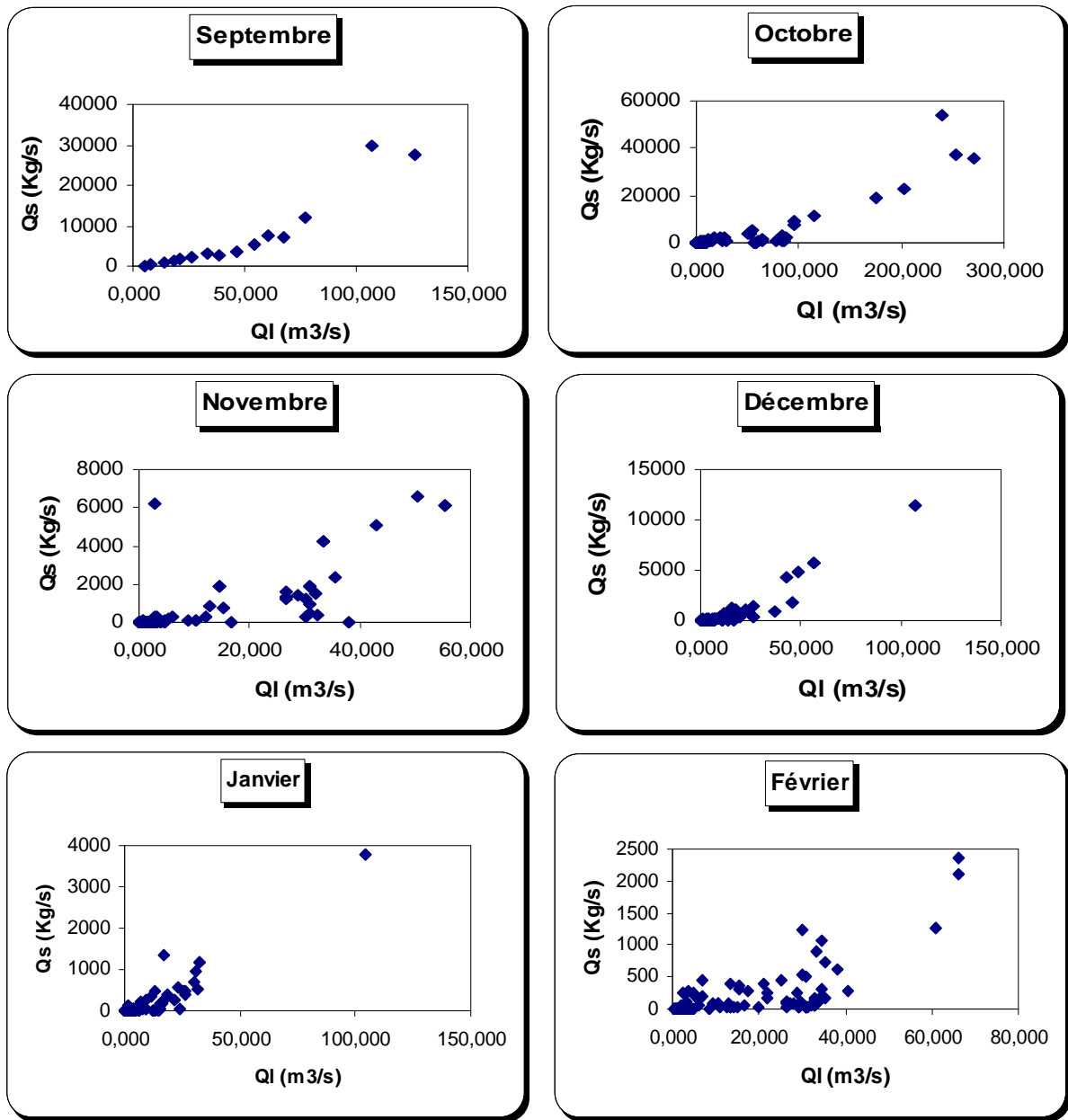


Figure IV. 3. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont
Echelle Mensuelle

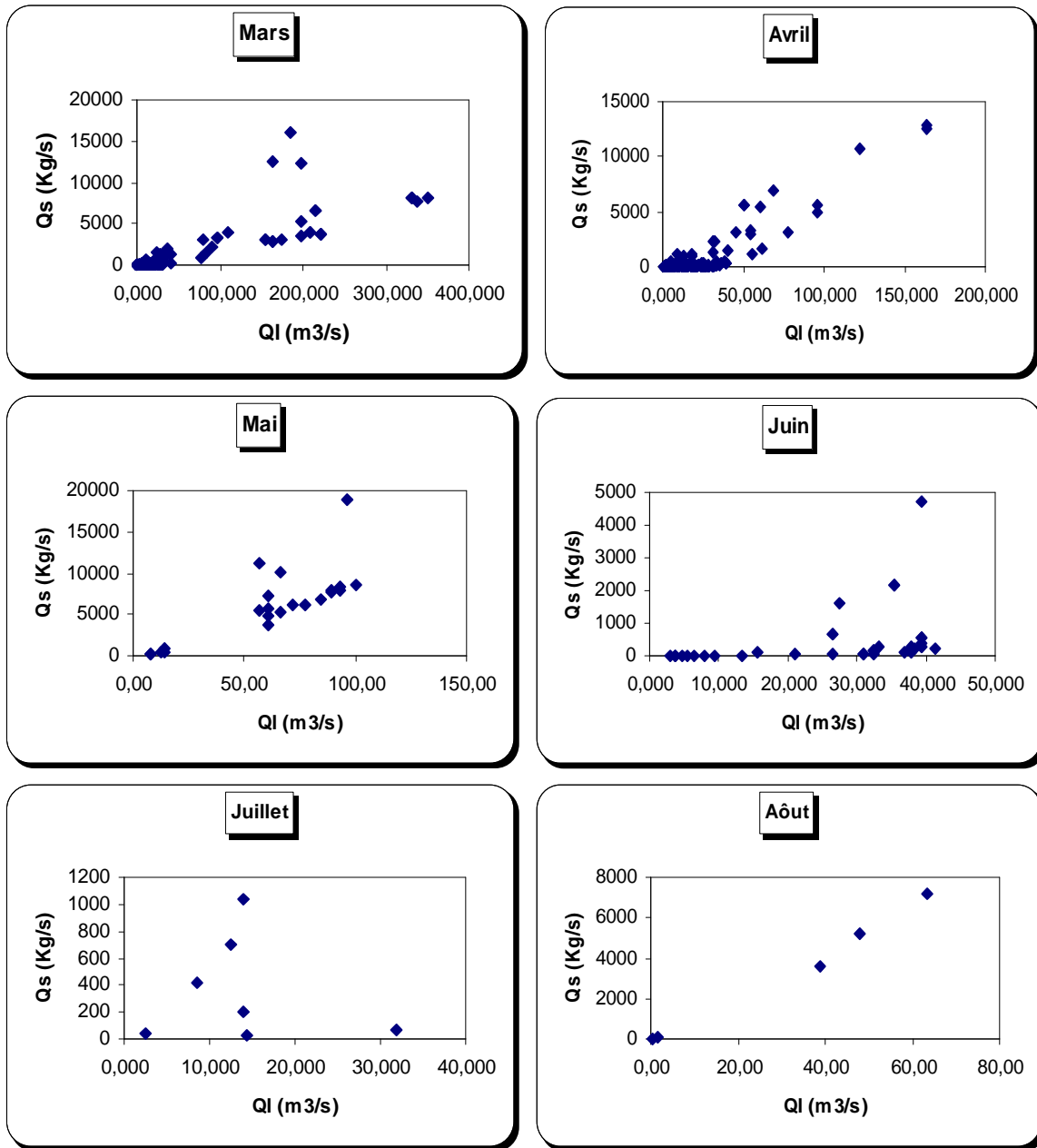


Figure IV.3. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont
Echelle Mensuelle (Suite)

1.3. Relation saisonnière :

Quatre saisons sont prises en considération, à savoir :

- **Automne** : Septembre, octobre, novembre.
- **Hiver** : Décembre, janvier, février.
- **Printemps** : Mars, avril, mai.
- **Eté** : Juin, Juillet, août.

Cette approche permet de mettre en exergue l'effet de l'irrégularité du climat sur le transport solide. Les résultats sont récapitulés dans le tableau IV.4. La figure IV.4 illustre les relations débit liquide- débit solide instantanés à la station Ghib-Amont.

Tableau IV.4 : Valeurs de R^2 calculées à l'échelle saisonnière

Echelle Temporelle	Type de modèle	Station Ghib- Amont
Automne	Linéaire	0,86
	Logarithmique	0,56
	Polynomiale	0,93
	Puissance	0,88
	Exponentielle	0,65
Hiver	Linéaire	0,45
	Logarithmique	0,14
	Polynomiale	0,73
	Puissance	0,68
	Exponentielle	0,47
Printemps	Linéaire	0,62
	Logarithmique	0,58
	Polynomiale	0,62
	Puissance	0,94
	Exponentielle	0,81
Eté	Linéaire	0,008
	Logarithmique	0,008
	Polynomiale	0,09
	Puissance	0,55
	Exponentielle	0,47

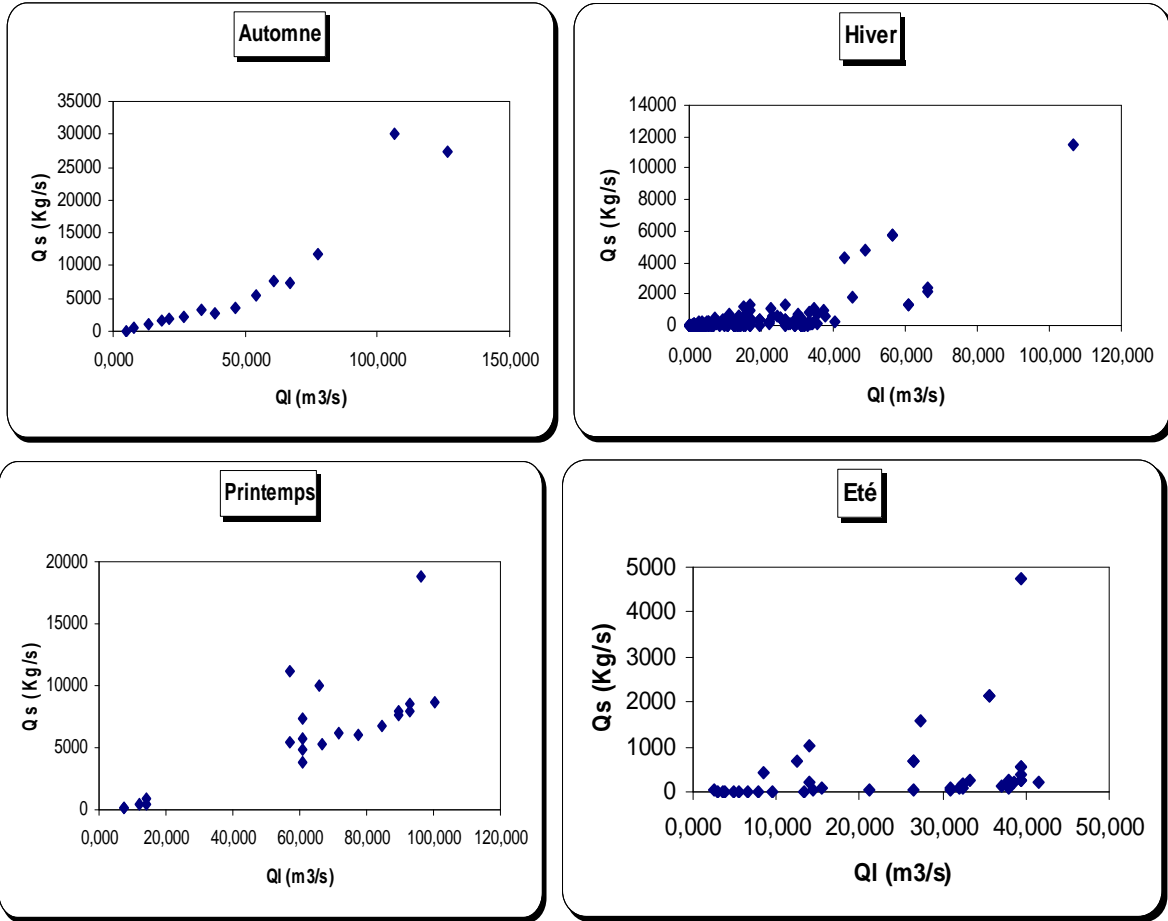


Figure IV.4. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont (Echelle Saisonnière)

1.4. Relation saison sèche – saison humide

Cette approche permet d'étudier la relation débit liquide- débit solide sur deux grandes saisons : Sèche et Humide. A cet effet, la totalité des observations à été subdivisée en deux parties et, après l'analyse de la régression, les modèles, aussi bien puissance que parabolique sont toujours les meilleurs comme le montre le tableau IV.5. La figure IV.5 met en relief ces relations à la station Ghrib-Amont.

Tableau IV. 5. : Valeurs de R^2 à l'échelle saison Sèche-Humide

Echelle Temporelle	Type de modèle	Station Ghrib- Amont
Humide	Linéaire	0,86
	Logarithmique	0,56
	Polynomiale	0,93
	Puissance	0,88
	Exponentielle	0,65
Sèche	Linéaire	0,62
	Logarithmique	0,59
	Polynomiale	0,62
	Puissance	0,94
	Exponentielle	0,81

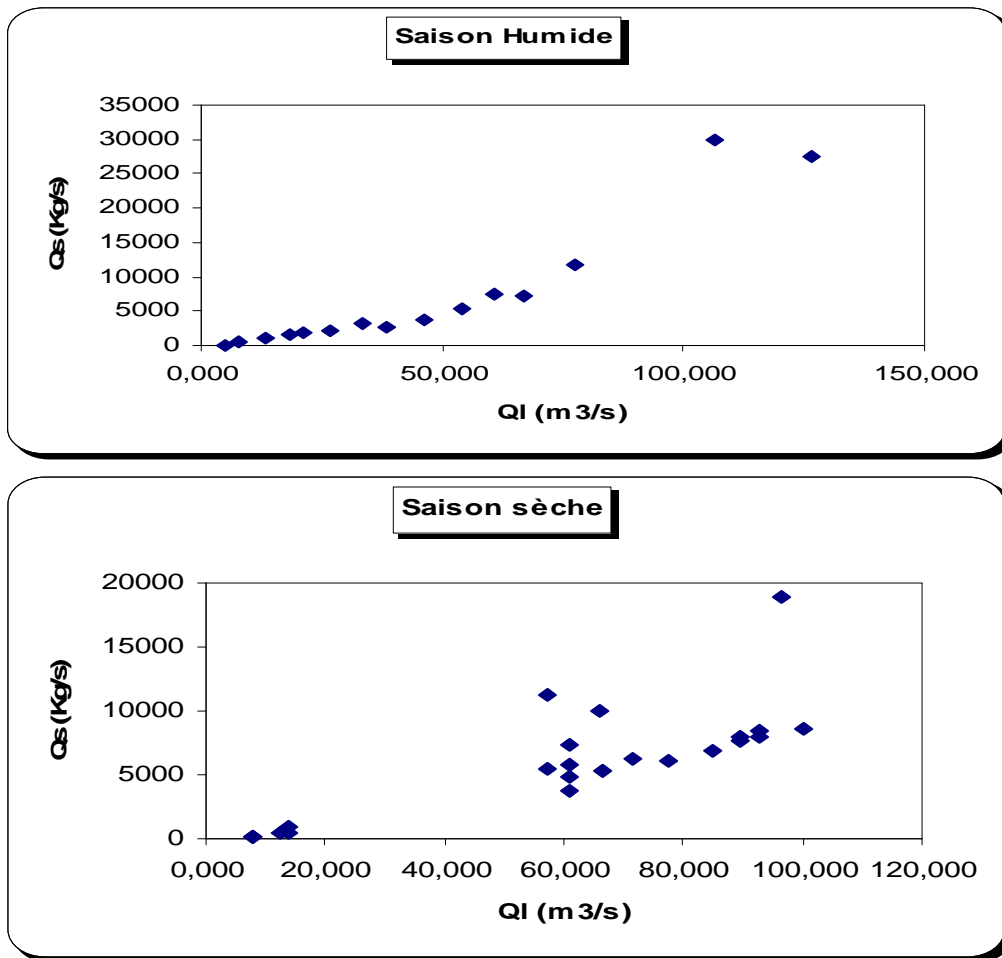


Figure IV.5. Relation débit liquide – débit solide instantané à la station Ghrib-Amont (Echelle saison Sèche-Humide)

Tableau IV.6 : Modèles retenus pour différentes échelles temporelles

Echelle Temporelle	Modèle de station Ghrib-Amont
Interannuel	$Q_s = -0,1386 Q_1^2 + 90,609 Q_1 - 524,39$
1977/1978	$Q_s = 2,1598 * Q_1^{1,4045}$
1978/1979	$Q_s = 1,576 * Q_1^2 + 31,766 Q_1 - 25,941$
1979/1980	$Q_s = 11,817 * Q_1^{1,0227}$
1980/1981	$Q_s = 0,8382 * Q_1^{1,852}$
1981/1982	$Q_s = 0,4885 * Q_1^{2,0467}$
1982/1983	$Q_s = 1,4337 * Q_1^{1,6509}$
1983/1984	$Q_s = 0,013 * Q_1^2 + 48,25 Q_1 - 18,501$
1984/1985	$Q_s = 2,1373 * Q_1^{2,031}$
1985/1986	$Q_s = 4,2967 * Q_1^{1,285}$
1986/1987	$Q_s = 0,3164 * Q_1^{2,0859}$
1987/1988	$Q_s = 5,5273 * Q_1^{1,7999}$
1988/1989	$Q_s = 4,4818 * Q_1^{1,8418}$
1989/1990	$Q_s = 0,1 * Q_1^2 + 53,063 Q_1 - 843,07$
1990/1991	$Q_s = 1,4386 * Q_1^{1,5242}$
1991/1992	$Q_s = 1,2304 * Q_1^{1,6003}$
1992/1993	$Q_s = 0,1469 * Q_1^2 + 86,296 Q_1 - 217,83$
1993/1994	$Q_s = 1,8714 * Q_1^2 + 10,377 Q_1 + 250,25$
Septembre	$Q_s = 3,2238 * Q_1^{1,9175}$
Octobre	$Q_s = 6,8512 * Q_1^{1,4863}$
Novembre	$Q_s = 3,2273 * Q_1^{1,7067}$
Décembre	$Q_s = 2,2181 * Q_1^{1,7586}$
Janvier	$Q_s = 2,3579 * Q_1^{1,42}$
Février	$Q_s = 1,6652 * Q_1^{1,378}$
Mars	$Q_s = 0,8185 * Q_1^{1,6194}$
Avril	$Q_s = 1,6345 * Q_1^{1,5605}$
Mai	$Q_s = 6,0571 * Q_1^{1,6461}$
Juin	$Q_s = 0,0795 * Q_1^{2,3119}$
Juillet	$Q_s = 1,456 * Q_1^{1,567}$
Août	$Q_s = 34,484 * Q_1^{1,2979}$
Automne	$Q_s = 3,2238 * Q_1^{1,9175}$
Hiver	$Q_s = 1,8181 * Q_1^{1,5172}$
Printemps	$Q_s = 6,0571 * Q_1^{1,6461}$
Eté	$Q_s = 0,4701 * Q_1^{1,8258}$
S.Humide	$Q_s = 3,2238 * Q_1^{1,9175}$
S.Sèche	$Q_s = 6,0571 * Q_1^{1,6461}$

IV.2. Discussion des résultats :

A travers cette étude, nous avons essayé de voir quelle est la relation existe entre le débit liquide et le débit solide et notamment le degré de cette relation, le but principal étant d'établir les modèles les plus appropriés dans le cadre de l'évaluation du transport solide au niveau du bassin étudié.

Les relations établies nous serviront, par la suite, pour combler les périodes lacunaires et, éventuellement, étendre des séries courtes.

Conclusion :

La régression s'est présentée dans ce travail comme une solution plus proche de la réalité. En effet le taux d'explication de la variance à différentes échelles temporelles, aussi bien pour le modèle puissance que parabolique, s'est avéré significatif, R^2 étant supérieur à R^2 critique. Donc, nous pouvons conclure que les modèles puissance et polynomiale sont les plus performants.

Chapitre V.
Quantification des apports solides et
l'érosion spécifique

Chapitre V. Quantification des Apports solides et l'érosion spécifique

Les différents résultats obtenus dans le chapitre précédent permettront de quantifier les apports solides et calculer l'érosion spécifique à différentes échelles temporelles (interannuelle, mensuelle, saisonnière).

V.1. Quantification des apports solides et l'érosion spécifique :

Nous utilisons les relations établies $Q_s=f(Q_l)$, à différentes échelles temporelles. Nous déterminons les apports solides de toute la période d'observation. La méthode de la régression est utilisée pour l'homogénéisation des données.

Soit :

$$Q_{smj} = a(Q_{lmj})^b \quad (\text{V.1})$$

Où :

Q_{smj} : Débit solide moyen journalier (kg/s) ;

Q_{lmj} : Débit liquide moyen journalier (m^3/s) ;

a et b : coefficient d'ajustement du modèle.

$$A_{sj} = Q_{smj} \cdot T \quad (\text{V.2})$$

Avec :

A_{sj} : Apport solide moyen journalier (Tonne) ;

Q_{smj} : Débit solide moyen journalier (Kg/s) ;

T : temps (s).

L'apport solide mensuel est :

$$A_{sm} = A_{sj} \cdot N \quad (\text{V.3})$$

Avec :

A_{sm} : Apport solide mensuel (tonne) ;

A_{sj} : Apport solide journalier (tonne) ;

N : Nombre de jours dans le mois.

La quantité totale transportée annuellement est :

$$A_{sann} = \sum_{i=1}^{12} A_{sm} \quad (\text{V.4})$$

Où :

A_{sann} : Apport solide annuel (tonne) ;

A_{sm} : Apport solide mensuel (tonne) ;

L'apport solide moyen interannuel est déterminé par la relation suivante :

$$A_{\text{sin ter}} = \frac{\sum_{i=1}^{12} A_{\text{sann}}}{N} \quad (\text{V.5})$$

Avec :

$A_{\text{sin ter}}$: Apport solide moyen interannuel (tonne)

N : Nombre d'années d'observations.

L'érosion spécifique moyenne (E_s) d'un bassin versant est définie comme étant le rapport entre l'apport solide « A_s » et la surface « S » du bassin versant.

Soit :

$$E_s = \frac{A_s}{S} \quad (\text{V.6})$$

La quantification de l'apport solide moyen interannuel et de l'érosion spécifique moyenne interannuelle donne une idée sur l'importance du transport solide et l'état de la dégradation du sol du bassin.

Les résultats de calcul pour la station Ghrib-Amont à différentes échelles temporelles sont données dans les tableaux V.1 ; V.2, V.3, V.4, V.5 et V.6

Tableau V.1. Variation interannuelle des sédiments transportés en Tonnes : Station Ghrib – Amont
Modèle mensuelle

Mois	Septe	Octobre	Nove	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total
77/78	42538,722	475321,853	87626,884	42531,563	29484,430	71438,109	59065,195	32790,752	200098,86	3535,8040	11736,790	106979,01	1163147,98
78/79	68019,974	860527,641	158422,84	67902,404	51206,470	104783,02	95430,753	51868,016	454657,45	7946,0995	28660,380	186655,513	2136080,57
79/80	89248,255	1211124,13	225664,06	91311,504	70530,271	133264,39	128443,00	68931,427	707855,38	12871,253	45393,368	255589,442	3040226,5
80/81	52697,177	623485,921	114420,91	52266,129	37919,608	84618,125	73098,178	40195,790	294125,68	5094,593	17989,356	138252,179	1534163,67
81/82	69459,303	883535,146	162760,93	69427,254	52485,227	106694,57	97595,717	52993,445	470761,99	8244,482	29728,636	191266,498	2194953,21
82/83	42591,223	476066,998	87760,110	42580,525	29527,157	71505,860	59136,046	32828,292	200556,06	3543,172	11767,131	107138,634	1165001,22
83/84	20957,366	192068,256	38181,508	23675,007	12884,042	43884,552	31585,634	18059,796	44256,821	1127,1374	1651,177	43789,8542	472121,154
84/85	10,5932	106801,798	139,32374	1489,3615	6564,7390	2057,1595	16091,844	1125,5106	7017,8333	0,3217675	0,0658	8,69880662	141307,25
85/86	5914,575	1636,18011	132874,85	714,8527	4374,056	250587,94	647143,57	50539,821	58182,097	3810,1942	575,768	18889,1021	1175243,02
86/87	50130,164	1638,65413	132199,20	711,5021	27274,188	261654,66	30202,675	2127,6242	1134,7382	0,0008695	67,901	32,4035191	507173,721
87/88	8798,619	169624,942	18604,594	5121,700	2401,249	1122,976	714,7618	890,53074	5939,6938	86,210050	13,0348	0	213318,314
88/89	1170,727	12617,7166	3032,6491	106525,66	2477,783	2172,9338	625,1273	10762,325	2443,2011	267,19558	714,5889	20104,8827	162914,798
89/90	252619,33	892016,993	413037,35	372839,20	219222,81	91259,116	103558,08	39916,224	2522281,2	8628,7905	196500,05	493715,563	5605594,74
90/91	80684,696	66261,0703	40380,513	55452,495	24509,678	21904,460	31572,636	30357,617	84002,945	4336,1409	6328,3769	154819,801	600610,433
91/92	21696,032	7153819,84	352215,27	61861,777	40672,268	157954,58	56620,693	271817,91	823082,19	111373,96	28482,967	527740,691	9607338,2
92/93	27402,773	105881,51	49543,737	45576,447	35154,649	21850,063	15298,904	29069,954	249345,12	1021,1512	5826,1970	69659,0164	655629,535
93/94	45743,379	121217,22	39382,385	41798,571	22053,917	27366,480	13601,855	17611,466	54512,915	1021,1512	5882,8265	69659,0164	459851,185
Moy	51746,053	785508,581	120955,71	63634,469	39337,797	85536,412	85869,687	44228,618	363544,36	10171,039	23018,742	140252,959	1813804,44

Tableau V.2. Variation interannuelle de l'érosion spécifique (t/km².an) : Station Ghrib – Amont
Modèle mensuelle

Mois	Septe	Octobre	Nov	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total
77/78	30,856	344,778	63,561	30,851	21,387	51,818	42,843	23,785	145,143	2,565	8,513	77,598	843,698
78/79	49,339	624,190	114,913	49,254	37,143	76,005	69,221	37,623	329,789	5,764	20,789	135,392	1549,423
79/80	64,737	878,498	163,687	66,234	51,160	96,664	93,167	50,000	513,448	9,336	32,926	185,394	2205,252
80/81	38,224	452,250	82,996	37,912	27,505	61,378	53,022	29,156	213,346	3,695	13,049	100,282	1112,818
81/82	50,383	640,879	118,060	50,360	38,071	77,392	70,792	38,439	341,471	5,980	21,564	138,737	1592,126
82/83	30,894	345,319	63,657	30,886	21,418	51,867	42,895	23,812	145,475	2,570	8,535	77,714	845,043
83/84	15,202	139,318	27,695	17,173	9,346	31,832	22,911	13,100	32,102	0,818	1,198	31,763	342,457
84/85	0,008	77,470	0,101	1,080	4,762	1,492	11,672	0,816	5,090	0,000	0,000	0,006	102,498
85/86	4,290	1,187	96,382	0,519	3,173	181,766	469,411	36,659	42,203	2,764	0,418	13,701	852,472
86/87	36,362	1,189	95,892	0,516	19,784	189,793	21,908	1,543	0,823	0,000	0,049	0,024	367,882
87/88	6,382	123,039	13,495	3,715	1,742	0,815	0,518	0,646	4,308	0,063	0,009	0,000	154,732
88/89	0,849	9,152	2,200	77,269	1,797	1,576	0,453	7,807	1,772	0,194	0,518	14,583	118,172
89/90	183,239	647,031	299,600	270,442	159,015	66,196	75,117	28,954	1829,556	6,259	142,533	358,120	4066,062
90/91	58,525	48,063	29,290	40,223	17,778	15,889	22,901	22,020	60,932	3,145	4,590	112,300	435,657
91/92	15,737	5189,079	255,482	44,872	29,502	114,574	41,070	197,165	597,029	80,786	20,660	382,801	6968,758
92/93	19,877	76,802	35,937	33,059	25,500	15,849	11,097	21,086	180,864	0,741	4,226	50,528	475,566
93/94	33,180	87,926	28,566	30,319	15,997	19,850	9,866	12,775	39,541	0,741	4,267	50,528	333,557
Moye	37,534	569,775	87,736	46,158	28,534	62,045	62,286	32,082	263,700	7,378	16,697	101,734	1315,657

Tableau V.3. Variation interannuelle des sédiments transportés en Tonnes : Station Ghrib – Amont
Modèle saisonnière

Mois	Septe	Octobre	Nove	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total
77/78	113213,932	574965,289	116340,719	26663,021	25342,596	104513,885	463178,107	136981,272	200098,861	11381,852	4526,308	1546,577	1778752,42
78/79	240087,562	1236472,385	225966,751	39937,203	45757,863	159372,046	755028,231	222483,997	454657,454	21541,850	12766,682	3371,403	3417443,42
79/80	370926,854	1921574,197	335960,514	51579,381	64462,739	207696,420	1021820,44	300567,781	707855,388	31500,502	21778,741	5234,963	5040957,92
80/81	159530,744	815940,568	156901,083	31857,565	33175,490	125941,062	575489,346	169899,491	294125,686	15177,050	7432,841	2214,595	2387685,52
81/82	248275,387	1279284,094	232914,830	40710,579	46982,093	162577,366	772477,809	227593,121	470761,994	22176,677	13321,008	3488,574	3520563,53
82/83	113437,791	576128,334	116539,032	26689,528	25381,909	104623,065	463744,002	137147,148	200556,068	11400,537	4539,901	1549,809	1781737,12
83/84	36435,200	178636,094	45843,057	16076,146	10446,980	61106,469	244834,078	72891,711	44256,821	4624,047	463,947	442,870	716057,420
84/85	0,192	83785,247	84,789	1474,702	5076,144	2099,969	123186,844	3870,568	7017,833	7,455	0,004	0,003	226603,749
85/86	4804,342	382,006	185534,281	782,332	3286,874	416386,963	5304813,91	216462,608	58182,097	12072,207	136,474	136,474	6202980,57
86/87	147268,754	382,751	184476,977	779,164	23314,550	436686,208	233920,136	7590,573	1134,738	0,071	11,397	0,018	1035565,33
87/88	9075,674	152177,712	20475,951	4285,198	1729,795	1078,065	5165,051	3021,389	5939,694	610,126	1,676	0,000	203560,330
88/89	358,945	5327,567	2679,668	58922,103	1788,876	2230,508	4506,134	42160,115	2443,201	1487,585	175,389	148,928	122229,019
89/90	1963155,64	1295149,082	661598,844	173841,940	217021,503	136870,247	820571,057	168649,900	2522281,20	22987,188	119439,558	13158,94	8114725,11
90/91	315593,971	45260,175	48813,076	33528,080	20794,294	28424,498	244731,463	126254,177	84002,946	13366,909	2208,898	2594,840	965573,327
91/92	38513,552	18998921,7	553399,832	36849,580	35759,807	250458,586	443661,384	1282861,63	823082,193	172459,922	12674,940	14445,82	22663089
92/93	55979,473	82855,057	61390,989	28303,725	30592,904	28346,757	117007,161	120596,988	249345,129	4277,920	2006,647	848,246	781550,996
93/94	127179,582	98650,979	47462,492	26265,700	18572,198	36323,522	103801,746	70979,178	54512,916	4277,920	2029,318	848,246	590903,797
Moye	231990,447	1608581,96	176257,817	35208,585	35852,154	133219,743	688113,936	194706,568	363544,366	20549,989	11971,396	2942,960	3502939,92

Tableau V.4. Variation interannuelle de l'érosion spécifique (t/km².an) : Station Ghrib – Amont
Modèle saisonnière

Mois	Septe	Octobre	Nove	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total
77/78	82,121	417,056	84,389	19,340	18,382	75,810	335,970	99,360	145,143	8,256	3,283	1,122	1290,232
78/79	174,149	896,885	163,907	28,969	33,191	115,602	547,666	161,380	329,789	15,626	9,260	2,445	2478,869
79/80	269,055	1393,829	243,692	37,414	46,759	150,654	741,185	218,019	513,448	22,849	15,797	3,797	3656,498
80/81	115,717	591,849	113,809	23,108	24,064	91,352	417,436	123,238	213,346	11,009	5,391	1,606	1731,926
81/82	180,088	927,939	168,947	29,530	34,079	117,927	560,323	165,086	341,471	16,086	9,662	2,530	2553,668
82/83	82,283	417,899	84,532	19,359	18,411	75,889	336,380	99,481	145,475	8,269	3,293	1,124	1292,397
83/84	26,429	129,575	33,253	11,661	7,578	44,324	177,592	52,873	32,102	3,354	0,337	0,321	519,398
84/85	0,000	60,774	0,062	1,070	3,682	1,523	89,355	2,808	5,090	0,005	0,000	0,000	164,369
85/86	3,485	0,277	134,579	0,567	2,384	302,030	3847,888	157,013	42,203	8,757	0,099	0,099	4499,380
86/87	106,823	0,278	133,812	0,565	16,911	316,754	169,676	5,506	0,823	0,000	0,008	0,000	751,155
87/88	6,583	110,383	14,852	3,108	1,255	0,782	3,747	2,192	4,308	0,443	0,001	0,000	147,654
88/89	0,260	3,864	1,944	42,740	1,298	1,618	3,269	30,581	1,772	1,079	0,127	0,108	88,660
89/90	1423,990	939,446	479,896	126,098	157,418	99,280	595,208	122,332	1829,556	16,674	86,636	9,545	5886,079
90/91	228,919	32,830	35,407	24,320	15,083	20,618	177,518	91,579	60,932	9,696	1,602	1,882	700,386
91/92	27,936	13781,016	401,413	26,729	25,939	181,672	321,813	930,534	597,029	125,095	9,194	10,478	16438,848
92/93	40,605	60,100	44,530	20,530	22,191	20,562	84,872	87,476	180,864	3,103	1,456	0,615	566,904
93/94	92,251	71,557	34,427	19,052	13,471	26,348	75,293	51,485	39,541	3,103	1,472	0,615	428,617
Moye	168,276	1166,797	127,850	25,539	26,006	96,632	499,129	141,232	263,700	14,906	8,684	2,135	2540,885

Tableau V.5. Variation interannuelle des sédiments transportés en Tonnes : Station Ghrib – Amont
Modèle saison humide et sèche

Mois	Septe	Octobre	Nove	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total
77/78	42538,722	574965,289	116340,719	73616,840	69049,039	419525,160	463178,107	136981,272	200098,861	118910,780	51699,810	19528,94	2286433,539
78/79	68019,975	1236472,385	225966,751	122539,188	145477,546	714257,952	755028,231	222483,997	454657,454	212036,729	132360,606	39582,69	4328883,509
79/80	89248,255	1921574,197	335960,514	169196,218	224137,451	997499,148	1021820,44	300567,781	707855,388	299247,324	214806,471	58987,23	6340900,422
80/81	52697,177	815940,568	156901,083	92144,787	96978,089	530769,013	575489,346	169899,491	294125,686	154355,533	81054,831	27041,90	3047397,505
81/82	69459,303	1279284,094	232914,830	125539,445	150403,345	732422,573	772477,809	227593,121	470761,994	217693,970	137560,454	40827,87	4456938,813
82/83	42591,223	576128,334	116539,032	73709,151	69184,156	420077,957	463744,002	137147,148	200556,068	119087,738	51840,548	19565,93	2290171,292
83/84	20957,366	178636,094	45843,057	38892,013	22582,802	213202,658	244834,078	72891,711	44256,821	52549,706	6555,685	6285,100	947487,093
84/85	10,593	83785,247	84,789	1911,657	9087,638	3037,929	123186,844	3870,568	7017,833	154,465	0,153	0,126	232147,842
85/86	5914,575	382,006	185534,281	859,388	5252,927	2398148,48	5304813,91	216462,608	58182,097	125431,374	2161,908	2161,908	8305305,473
86/87	50130,164	382,751	184476,977	855,002	62154,477	2546523,64	233920,136	7590,573	1134,738	2,261	227,664	0,668	3087399,055
87/88	8798,619	152177,712	20475,951	7339,635	2337,749	1310,324	5165,051	3021,389	5939,694	8377,765	40,046	0,000	214983,936
88/89	1170,727	5327,567	2679,668	200119,663	2438,894	3278,001	4506,134	42160,115	2443,201	18794,739	2714,028	2340,027	287972,763
89/90	252619,332	1295149,082	661598,844	783231,879	1036103,62	589504,197	820571,057	168649,900	2522281,20	224894,905	1004903,90	136042,3	9495550,273
90/91	80684,697	45260,175	48813,076	98279,774	53803,831	81204,869	244731,463	126254,177	84002,946	137568,121	26978,825	31219,48	1058801,432
91/92	21696,032	18998921,7	553399,832	110714,061	106600,749	1263151,75	443661,384	1282861,63	823082,193	1397758,98	131498,012	148050,7	25281397
92/93	27402,774	82855,057	61390,989	79375,235	87555,650	80924,867	117007,161	120596,988	249345,129	48970,764	24729,422	11329,06	991483,097
93/94	45743,379	98650,979	47462,492	72236,014	46656,609	110634,879	103801,746	70979,178	54512,916	48970,764	24982,583	11329,06	735960,602
Moy	51746,054	1608581,96	176257,817	120621,173	128812,034	653263,142	688113,936	194706,568	363544,366	187341,525	111418,526	32605,47	4317012,57

Tableau V.6. Variation interannuelle de l'érosion spécifique (t/km².an) : Station Ghrib – Amont
Modèle saison humide et sèche

Mois	Septe	Octobre	Nov	Déc.	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total
77/78	30,856	417,056	84,389	53,399	50,085	304,306	335,970	99,360	145,143	86,253	37,501	14,165	1658,482
78/79	49,339	896,885	163,907	88,885	105,523	518,093	547,666	161,380	329,789	153,802	96,009	28,712	3139,989
79/80	64,737	1393,829	243,692	122,728	162,580	723,544	741,185	218,019	513,448	217,061	155,812	42,787	4599,421
80/81	38,224	591,849	113,809	66,838	70,344	384,997	417,436	123,238	213,346	111,963	58,794	19,615	2210,453
81/82	50,383	927,939	168,947	91,061	109,096	531,268	560,323	165,086	341,471	157,906	99,781	29,615	3232,875
82/83	30,894	417,899	84,532	53,466	50,183	304,707	336,380	99,481	145,475	86,381	37,603	14,192	1661,194
83/84	15,202	129,575	33,253	28,211	16,381	154,648	177,592	52,873	32,102	38,117	4,755	4,559	687,267
84/85	0,008	60,774	0,062	1,387	6,592	2,204	89,355	2,808	5,090	0,112	0,000	0,000	168,390
85/86	4,290	0,277	134,579	0,623	3,810	1739,516	3847,888	157,013	42,203	90,983	1,568	1,568	6024,318
86/87	36,362	0,278	133,812	0,620	45,084	1847,141	169,676	5,506	0,823	0,002	0,165	0,000	2239,469
87/88	6,382	110,383	14,852	5,324	1,696	0,950	3,747	2,192	4,308	6,077	0,029	0,000	155,940
88/89	0,849	3,864	1,944	145,158	1,769	2,378	3,269	30,581	1,772	13,633	1,969	1,697	208,883
89/90	183,239	939,446	479,896	568,123	751,546	427,601	595,208	122,332	1829,556	163,129	728,915	98,679	6887,671
90/91	58,525	32,830	35,407	71,288	39,027	58,903	177,518	91,579	60,932	99,786	19,569	22,645	768,010
91/92	15,737	13781,016	401,413	80,307	77,324	916,237	321,813	930,534	597,029	1013,875	95,383	107,390	18338,058
92/93	19,877	60,100	44,530	57,575	63,509	58,699	84,872	87,476	180,864	35,521	17,938	8,218	719,180
93/94	33,180	71,557	34,427	52,397	33,843	80,250	75,293	51,485	39,541	35,521	18,121	8,218	533,835
Moye	37,534	1166,797	127,850	87,494	93,435	473,850	499,129	141,232	263,700	135,890	80,818	23,651	3131,379

Tableau V.7. Apport solide et érosion spécifique pour différents modèles

Bassin versant oued cheliff station Ghrib- Amont			
Echelles temporelles	Mensuelle	Saisonnière	Humide et sèche
As (tonne)	1813804,44	3502939,92	4317012,57
Es (t/km².an)	1315,657	2540,885	3131,379

L'analyse des tableaux V.2, V.4, V.6 et V.8 et la figure V.1 de la station de Ghrib-Amont montre clairement une variation à l'échelle annuelle de l'érosion spécifique. A titre d'exemple pour l'échelle mensuelle, elle passe d'une valeur de 102,5 t/km².an en 84/85 à 4066,062 t/km².an en 89/90. Cela peut être expliqué par la très grande variation du transport solide à différentes modèles temporelles.

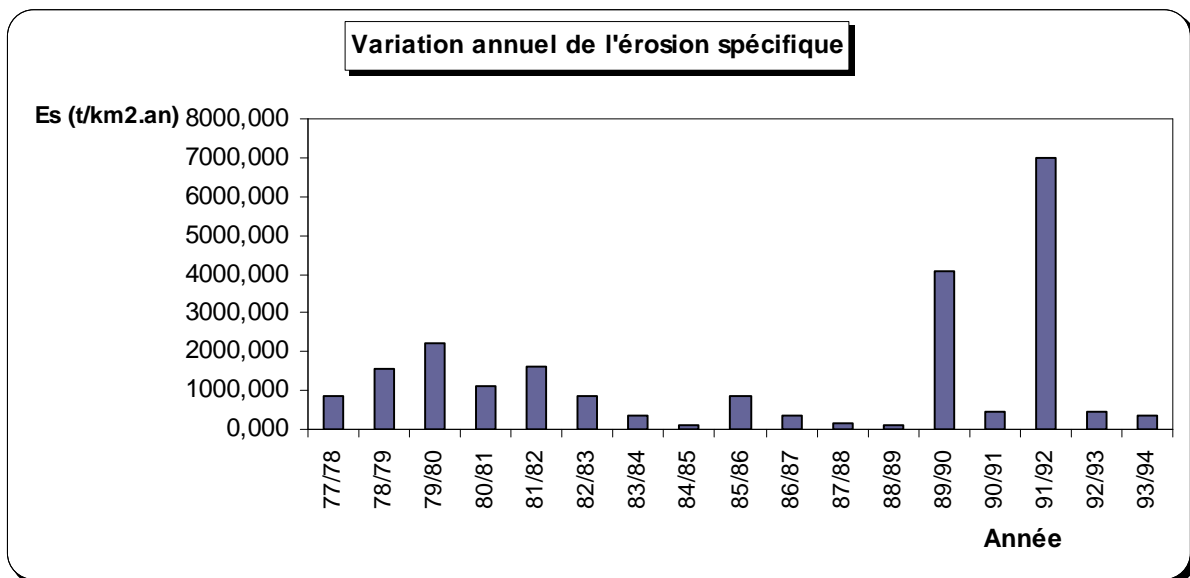


Figure V.1. Variation annuelle de l'érosion spécifique (Modèle mensuelle)

Dans le tableau V.7, les valeurs de l'érosion spécifique à l'échelle mensuelle et saisonnière (Automne, Hiver, Printemps et l'Eté), sont légèrement différentes pour les deux modèles, par contre pour les autres modèles (saisonniers et saison humide -sèche), les résultats sont assez proches.

La figure V.2 représente la variation annuelle du transport solide à l'échelle temporelle mensuelle pour la station hydrométrique Ghrib-Amont. Nous remarquerons une valeur importante du transport solide durant l'année 89/90, alors que dans les autres années (83/84 à 88/89) la quantité du transport solide est faible.

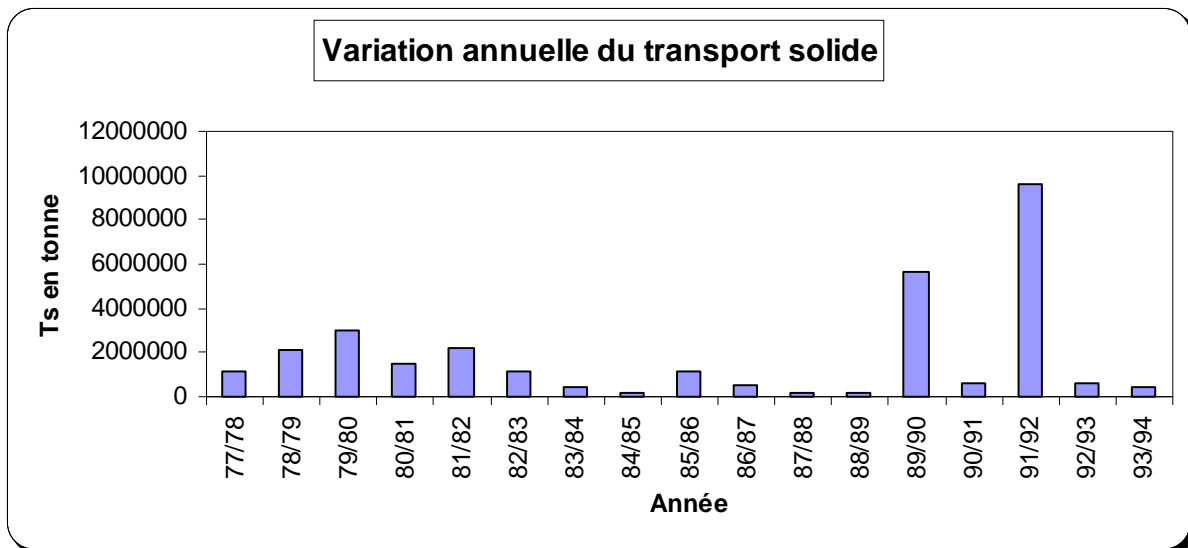


Figure V.2. La variation annuelle du transport solide (modèle mensuelle)

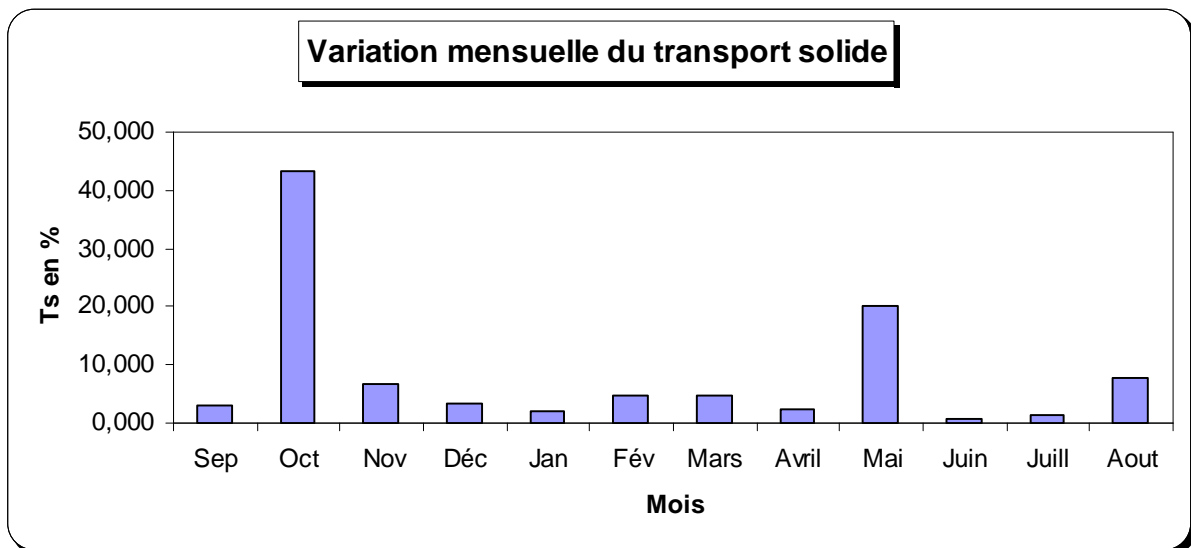


Figure V.3. La variation Mensuelle du transport solide (modèle mensuelle)

Dans la figure V.3, un taux important du transport solide est enregistré au mois d'Octobre (43% du transport solide annuelle) et 20% du transport solide annuelle est enregistré au mois de mai, par contre le pourcentage du transport solide est faible pour les autres mois. Il varié entre 0,5 % et 07 %.

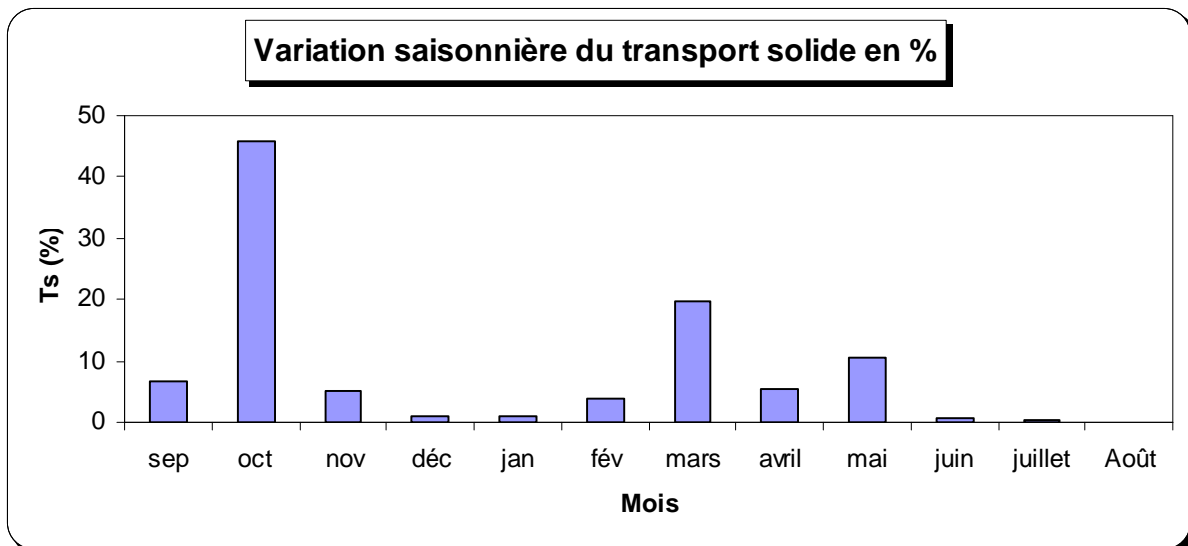


Figure V.4. La variation Mensuelle du transport solide (modèle saisonnière)

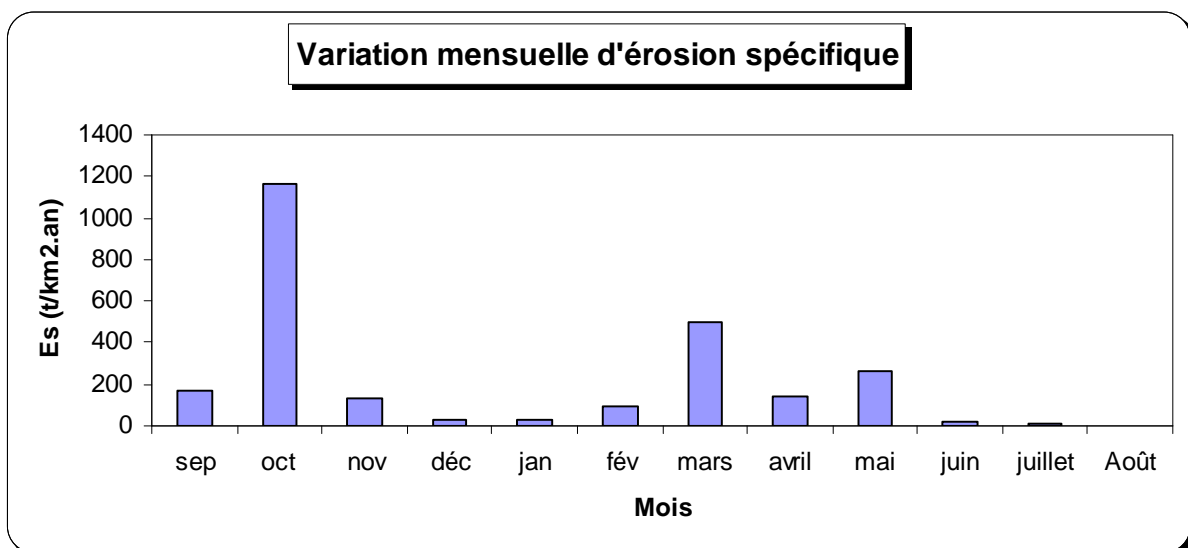


Figure V.5. La variation Mensuelle d'érosion spécifique (modèle saisonnière)

Dans la figure V.4, un taux important du transport solide est enregistré au mois d'Octobre (45% du transport solide annuelle) et 20% du transport solide annuelle est enregistré au mois de mars, par contre le pourcentage du transport solide est faible pour les autres mois. Il varie entre 0,5 % et 10 %.

Dans la figure V.5, la variation de l'érosion spécifique est variable d'un mois à l'autre. Nous remarquons que les valeurs d'érosions sont très importantes pour la saison d'automne et le printemps.

Il est à noter que pour le calcul du charriage, nous ne disposons d'aucune mesure, nonobstant le transport solide par charriage est pris en moyenne égal à 20% du transport solide en suspension d'après certains travaux.

Tableau V.8. Transport solide en suspension, total et l'érosion spécifique

Bassin versant	Transport solide en suspension (Tonne)	Transport solide total (Tonne)	Erosion spécifique (T/Km².an)
Station Ghrib-Amont	3502939,92	4203527,90	2540,885

Nous remarquerons une érosion spécifique importante du bassin versant de oued cheliff au droit de la station Ghrib –Amont, celle-ci peut être expliquée par les caractéristique hydro-morphométrique du bassin versant.

D'après TIXERONT 1960, dans son étude, défini trois zones :

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

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

Dans notre zone d'étude l'érosion spécifique calculée est supérieur à $1200 \text{ t/km}^2 \cdot \text{an}$, et la pluviométrie annuelle est comprise entre 300mm et 700 mm. Donc notre valeur d'érosion spécifique est convenable avec l'étude de Tixeront (Zone deux).

V.2.Estimation des apports solide probables à l'échelle mensuelle

Un ajustement des données du transport solide à une loi de distribution de fréquence théorique est réalisé. Le meilleur ajustement est donné par la loi log normale. La formulation de l'équation de Galton est de :

$$\text{Log } A_s = 5,97 + 0,51 \text{ Up}\%$$

Tableau V.9. Ajustement des apports solides à la station Ghrib –Amont (Echelle Mensuelle)

Taille n=17, Moy.log(x-x₀)=5,97 E.T.log(x-x₀)=0,51 I.C à (en %)=95 U Gauss=1,96

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
1163148	141307	1	0,029	-1,890	141307,2502	101749	26624,4	220189,54
2136081	162915	2	0,088	-1,352	162914,7977	192035	65284,3	376080,54
3040227	213318	3	0,147	-1,049	213318,3138	274553	106622	515586,45
1534164	459851	4	0,206	-0,821	459851,1853	359584	152900	660622,85
2194953	472121	5	0,265	-0,629	472121,1543	451092	205312	820297,88
1165001	507174	6	0,324	-0,457	507173,7213	552098	265006	1002304,7
472121	600610	7	0,382	-0,299	600610,4332	665749	333318	1215359,9
141307	655630	8	0,441	-0,148	655629,5348	795856	411944	1470726,6
1175243	1E+06	9	0,500	0,000	1163147,976	947438	503151	1784035,6
507174	1E+06	10	0,559	0,148	1165001,221	1127892	610337	2179032,9
213318	1E+06	11	0,618	0,299	1175243,023	1348315	738579	2693044,3
162915	2E+06	12	0,676	0,457	1534163,667	1625869	895575	3387245,5
5605595	2E+06	13	0,735	0,629	2136080,57	1989926	1094285	4372069
600610	2E+06	14	0,794	0,821	2194953,208	2496326	1358777	5870754,5
9607338	3E+06	15	0,853	1,049	3040226,502	3269452	1741007	8418878,1
655630	6E+06	16	0,912	1,352	5605594,744	4674343	2386828	13749701
459851	1E+07	17	0,971	1,890	9607338,198	8822115	4076667	33714894

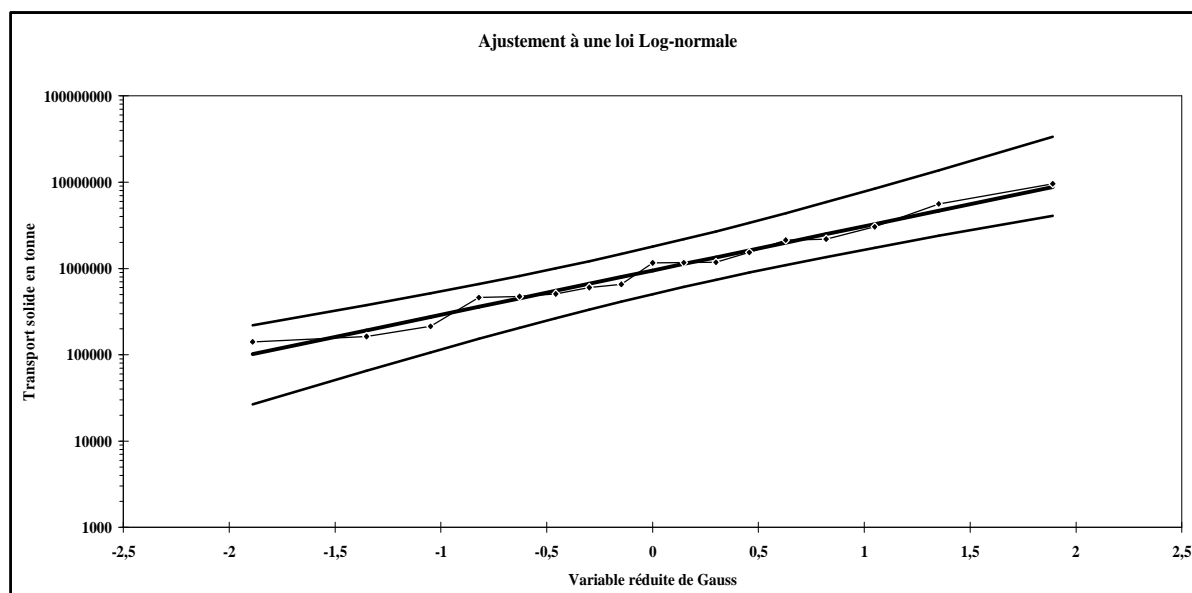


Figure V.6. Ajustement des apports solide à la station Ghrib-Amont (Echelle Mensuelle)

Les quantiles pour différentes périodes de retour sont donnés dans le tableau V.10.

Tableau V.10. Apports solides pour différentes périodes de retour

Bassin	2	5	10	20	50	100
Station Ghrib-Amont	947438,4674	2558526,958	4302591,565	6608427,606	10710074	14776128,32

V.3.Estimation d'érosion spécifique probable

Un ajustement des données d'érosions spécifiques à une loi de distribution de fréquence théorique est réalisé. Le meilleur ajustement est donné par la loi log normale. La formulation de l'équation de Galton est de :

$$\text{Log Es} = 2,84 + 0,51 \text{ Up}\%$$

Tableau V.11. Ajustement d'érosion spécifique à la station Ghrib –Amont (Echelle Mensuelle)

Taille n=17, Moy.log(x-x₀)=2,84 E.T.log(x-x₀)=0,51 I.C à (en %)=95 U Gauss=1,96

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
843,7	102,5	1	0,029	-1,890	102,498	73,804	19,312	159,716
1549,4	118,2	2	0,088	-1,352	118,172	139,294	47,354	272,793
2205,3	154,7	3	0,147	-1,049	154,732	199,149	77,339	373,985
1112,8	333,6	4	0,206	-0,821	333,557	260,827	110,907	479,188
1592,1	342,5	5	0,265	-0,629	342,457	327,203	148,925	595,009
845,0	367,9	6	0,324	-0,457	367,882	400,469	192,224	727,030
342,5	435,7	7	0,382	-0,299	435,657	482,906	241,775	881,571
102,5	475,6	8	0,441	-0,148	475,566	577,280	298,807	1066,803
852,5	843,7	9	0,500	0,000	843,698	687,232	364,965	1294,064
367,9	845,0	10	0,559	0,148	845,043	818,125	442,713	1580,578
154,7	852,5	11	0,618	0,299	852,472	978,011	535,734	1953,421
118,2	1112,8	12	0,676	0,457	1112,818	1179,337	649,613	2456,965
4066,1	1549,4	13	0,735	0,629	1549,423	1443,408	793,748	3171,314
435,7	1592,1	14	0,794	0,821	1592,126	1810,729	985,600	4258,397
6968,8	2205,3	15	0,853	1,049	2205,252	2371,523	1262,853	6106,699
475,6	4066,1	16	0,912	1,352	4066,062	3390,571	1731,304	9973,453
333,6	6968,8	17	0,971	1,890	6968,758	6399,190	2957,042	24455,361

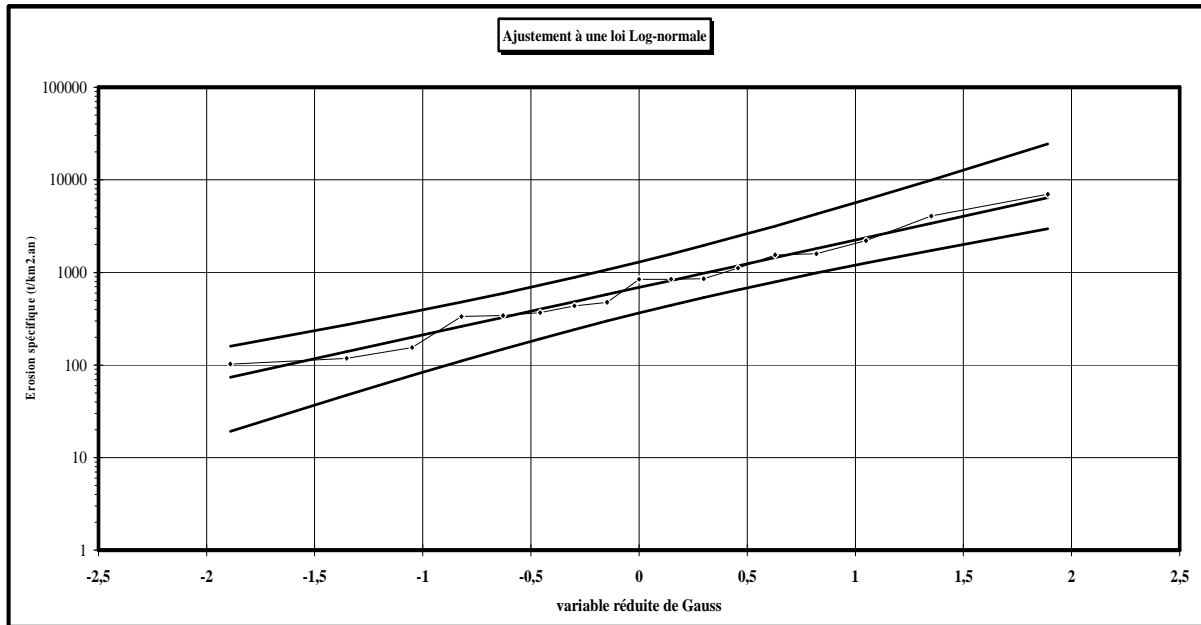


Figure V.7. Ajustement d'érosion spécifique à la station Ghrib-Amont (Echelle Mensuelle)

Les quantiles pour différentes périodes de retour sont donnés dans le tableau V.12.

Tableau V.12. Erosion spécifique probable à la station Ghrib –Amont (échelle mensuelle)

Bassin	2	5	10	20	50	100
Station Ghrib-Amont	687,232	1855,847	3120,918	4793,474	7768,636	10717,98

V.4.Estimation des apports solide probables à l'échelle saisonnière

Un ajustement des données du transport solide à une loi de distribution de fréquence théorique est réalisé. Le meilleur ajustement est donné par la loi log normale. La formulation de l'équation de Galton est de :

$$\text{Log } A_s = 6,17 + 0,61 U_p\%$$

Tableau V.13. Ajustement des apports solides à la station Ghrib –Amont (Echelle Mensuelle)

Taille n=17, Moy.log(x-x₀)=6,17 E.T.log(x-x₀)=0,61 I.C à (en %)=95 U Gauss=1,96

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
1778752	122229	1	0,029	-1,890	122229,0185	106144	21623,6	265315,81
3417443	203560	2	0,088	-1,352	203560,3303	225556	62688,7	500791,05
5040958	226604	3	0,147	-1,049	226603,7491	344736	112204	728218,28
2387686	590904	4	0,206	-0,821	590903,7971	474831	172108	977269,6
3520564	716057	5	0,265	-0,629	716057,4204	621425	244179	1263535,2
1781737	781551	6	0,324	-0,457	781550,9958	789814	330556	1602748,5
716057	965573	7	0,382	-0,299	965573,3275	986275	433956	2014651,1
226604	1E+06	8	0,441	-0,148	1035565,337	1218981	557956	2526342,9
6202981	2E+06	9	0,500	0,000	1778752,42	1499172	707422	3177051,8
1035565	2E+06	10	0,559	0,148	1781737,125	1843767	889633	4028126
203560	2E+06	11	0,618	0,299	2387685,521	2278794	1115586	5179133,9
122229	3E+06	12	0,676	0,457	3417443,427	2845629	1402289	6799205,3
8114725	4E+06	13	0,735	0,629	3520563,533	3616717	1778753	9204379,1
965573	5E+06	14	0,794	0,821	5040957,923	4733299	2299792	13058785
2,3E+07	6E+06	15	0,853	1,049	6202980,576	6519530	3086323	20030688
781551	8E+06	16	0,912	1,352	8114725,112	9964355	4487934	35852000
590904	2E+07	17	0,971	1,890	22663088,98	2,1E+07	8471101	103938008

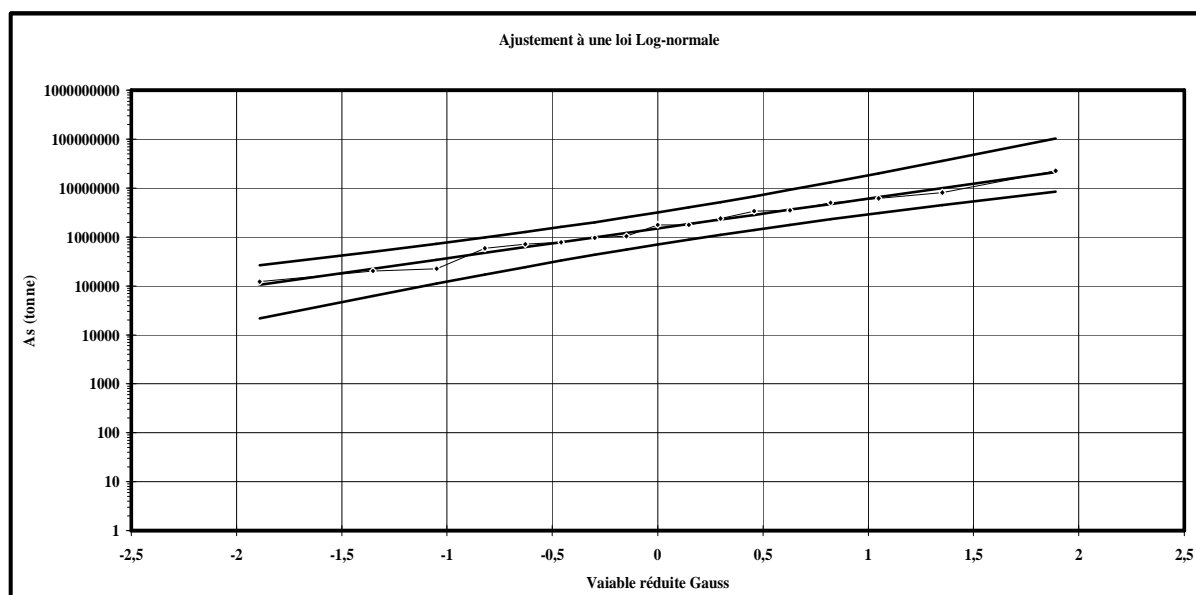


Figure V.8. Ajustement des apports solide à la station Ghrib-Amont (Echelle saisonnière)

Les quantiles pour différentes périodes de retour sont donnés dans le tableau V.14.

Tableau V.14. Apports solides pour différentes périodes de retour

Bassin	2	5	10	20	50	100
Station Ghrib-Amont	1499172,33 6	4873584,34 9	9031057,91 8	15028136,4 8	26653449,5 5	39049817,7 2

V.5. Estimation d'érosion spécifique probable (échelle saisonnière)

Un ajustement des données d'érosions spécifiques à une loi de distribution de fréquence théorique est réalisé. Le meilleur ajustement est donné par la loi log normale. La formulation de l'équation de Galton est de :

$$\text{Log As} = 3,03 + 0,60 \text{ Up\%}$$

Tableau V.15. Ajustement d'érosion spécifique à la station Ghrib –Amont (Echelle saisonnière)

Taille n=17, Moy.log(x-x₀)=3,03 E.T.log(x-x₀)=0,60 I.C à (en %)=95 U Gauss=1,96

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
1290,23	88,66	1,00	0,03	-1,89	88,66	76,99	15,68	192,45
2478,87	147,65	2,00	0,09	-1,35	147,65	163,61	45,47	363,25
3656,50	164,37	3,00	0,15	-1,05	164,37	250,06	81,39	528,22
1731,93	428,62	4,00	0,21	-0,82	428,62	344,42	124,84	708,87
2553,67	519,40	5,00	0,26	-0,63	519,40	450,76	177,12	916,52
1292,40	566,90	6,00	0,32	-0,46	566,90	572,90	239,77	1162,57
519,40	700,39	7,00	0,38	-0,30	700,39	715,40	314,77	1461,34
164,37	751,16	8,00	0,44	-0,15	751,16	884,20	404,72	1832,50
4499,38	1290,23	9,00	0,50	0,00	1290,23	1087,44	513,13	2304,50
751,16	1292,40	10,00	0,56	0,15	1292,40	1337,39	645,30	2921,83
147,65	1731,93	11,00	0,62	0,30	1731,93	1652,94	809,20	3756,73
88,66	2478,87	12,00	0,68	0,46	2478,87	2064,10	1017,16	4931,86
5886,08	2553,67	13,00	0,74	0,63	2553,67	2623,41	1290,23	6676,47
700,39	3656,50	14,00	0,79	0,82	3656,50	3433,34	1668,17	9472,29
16438,85	4499,38	15,00	0,85	1,05	4499,38	4728,99	2238,69	14529,42
566,90	5886,08	16,00	0,91	1,35	5886,08	7227,72	3255,36	26005,53
428,62	16438,85	17,00	0,97	1,89	16438,85	15358,91	6144,58	75392,24

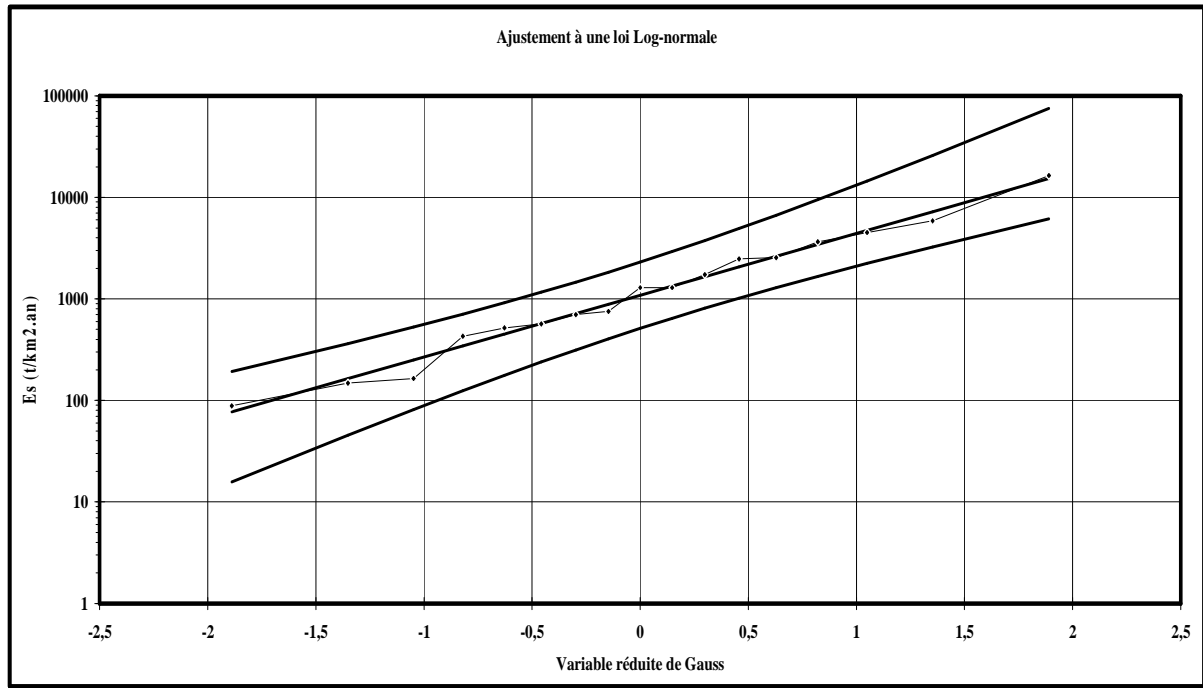


Figure V.9. Ajustement d'érosion spécifique à la station Ghrib-Amont (Echelle saisonnière)

Tableau V.16. Erosion spécifique probable à la station Ghrib –Amont (saisonnière)

Bassin	2	5	10	20	50	100
Station Ghrib-Amont	1087,4	3535,1	6550,7	10900,8	19333,3	28325,1

V.6. Recherche de relations entre le taux d'érosion spécifique annuel et quelques paramètres hydro-climatologique

V.6.1 Corrélation entre l'érosion spécifique et la lame d'eau ruisselée

La majorité des événements pluvieux sont entièrement absorbés par le sol et le ruissellement ne débute qu'après un seuil de pluie qui dépend des conditions d'humidité préalable. La lame d'eau ruisselée dépend de la pluviométrie et de la température moyenne annuelle du bassin versant (Meguenni et Remini.2008). La représentation graphique de l'érosion spécifique E_s en fonction de la lame d'eau ruisselée L_r (Figure V.10) nous a permis de proposer, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,93$, la relation puissance suivante :

$$E_s = 0,5488 \cdot L_r^{1,7132}$$

Où : E_s : s'exprime en $t/km^2.an$ et L_r en millimètres

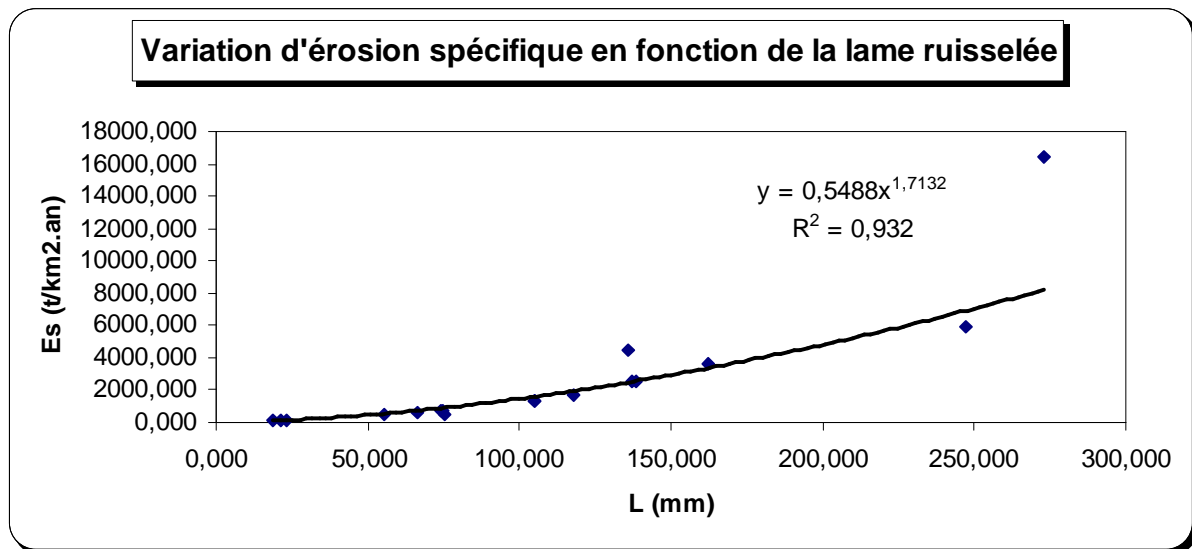


Figure V.10.variation du taux d'érosion spécifique en fonction de la lame d'eau ruisselée

V.6.2. Corrélation entre l'érosion spécifique et le débit moyen annuel :

La représentation graphique de l'érosion spécifique E_s en fonction de débit moyen annuel (Figure V.11) nous a permis de proposer, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,93$, la relation puissance suivante :

$$E_s = 117,04 Q^{1,7132}$$

Où : E_s : s'exprime en $t/km^2.an$ et Q en m^3/s

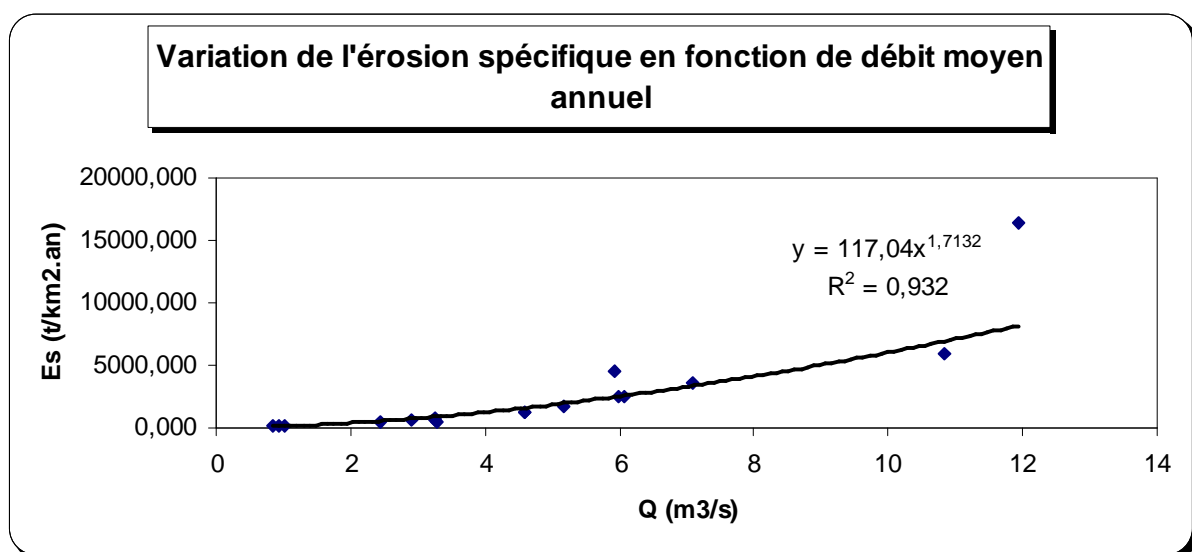


Figure V.11.variation du taux d'érosion spécifique en fonction de débit moyen annuel

Conclusion

La quantification des apports solide en suspension de l'Oued Cheliff-Ghrib est de **3502939,92 tonnes** et une érosion spécifique **2540,885t/km².an**, une densité sèche des matériaux = **2.7 tonnes /m³** et une surface du bassin versant $S = 1378,67 \text{ km}^2$, l'apport aux matériaux solides aboutissant dans la cuvette est de : **$1,3.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$** .

Un ajustement des données du transport solide et de l'érosion spécifique à une loi de distribution de fréquence théorique est réalisé. Le meilleur ajustement est donné par la loi log-normale.

Chapitre VI.
**Analyse de l'effet d'hystérésis sur la
relation concentration-débit liquide**

Chapitre VI : Analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation concentration-débit liquide

VI.1 Introduction

La relation entre la concentration des sédiments en suspension, C , et le débit liquide, d'un cours d'eau est une relation fondamentale dans le domaine du transport solide en rivière. Les types de relation C - Q , dans leur ensemble restent mal connus. Dans cette étude, on cherche à caractériser la relation C - Q à travers une série d'événements chronologiques (crues). L'analyse à mener est orientée beaucoup plus vers l'aspect graphique que donnerait la mise en graphe selon l'ordre chronologique de C et de Q . Il s'agit d'une méthode, entre autres, qui permettrait un approfondissement de la connaissance de cette relation à l'échelle locale. (Benkhaled et Remini, 2003).

La dispersion des points est une caractéristique très importante qui, avec d'autres caractéristiques liées à l'allure du graphe (asymétrie et aplatissement), permettra d'effectuer des combinaisons en liaison avec le phénomène, et tentera enfin d'élaborer une esquisse de classification de cette relation, et d'en ressortir le modèle de boucle d'hystérésis dominant. L'analyse s'effectue principalement en deux étapes :

- L'identification et classement des principaux types de la relation C - Q ;
- L'analyse et la discussion de chaque type de relation.

VI.2 Données et méthodologie

Les 23 crues analysées (tableau VI.1) représentent des épisodes caractéristiques de la période d'étude. Elles ont été choisies sur la base des critères suivants :

- La réalisation d'un hydrogramme complet et non complexe ;
- La prise en compte des fortes et faibles crues ;
- La fréquence d'échantillonnage ;
- Le temps de montée ;
- La côte maximale atteinte.

Tableau VI.1: Chronologie des crues sélectionnées

Crue N°	Date	Nombre d'observation
01	03/04/1978	10
02	20 -22/10/1978	07
03	20-22/09/1979	07
04	11-22/01/1980	17
05	6-14/03/1980	20
06	22-26/12/1981	10
07	18-21/04/1982	15
08	4-22/05/1982	21
09	6-30/03/1985	15
10	21/05-02/06/1985	08
11	02/10-20/11/1985	10
12	6-22/02/1986	18
13	8-12/03/1986	18
14	17-19/09/1987	05
15	18-22/10/1988	07
16	14-15/12/1988	09
17	11-13/04/1989	09
18	1-14/05/1990	08
19	5-8/10/1991	07
20	7-8/05/1992	07
21	25-28/09/1992	16
22	23-24/09/1994	18

Léopold et al. (1964) ont analysé les enregistrements concentration des sédiments en suspension –débit liquide dans plusieurs bassins des Etats Unis et ont constaté qu'une grande partie de la charge annuelle de sédiments s'est produite durant des crues modérées avec répétition fréquente.

De plus les périodes de crue sont de courte durée si on les rapporte à l'échelle annuelle, et la durée cumulée de tous les événements de crue représente, en effet, un faible pourcentage de temps annuel. L'objectif de cette sélection n'est pas exhaustif, mais il permet de fournir le maximum d'informations sur la relation C-Q, en identifiant le modèle dominant par exemple et en montrant l'existence ou non de l'effet saisonnier.

La démarche d'obtention des relations C-Q est purement graphique. Elle présente en trois étapes :

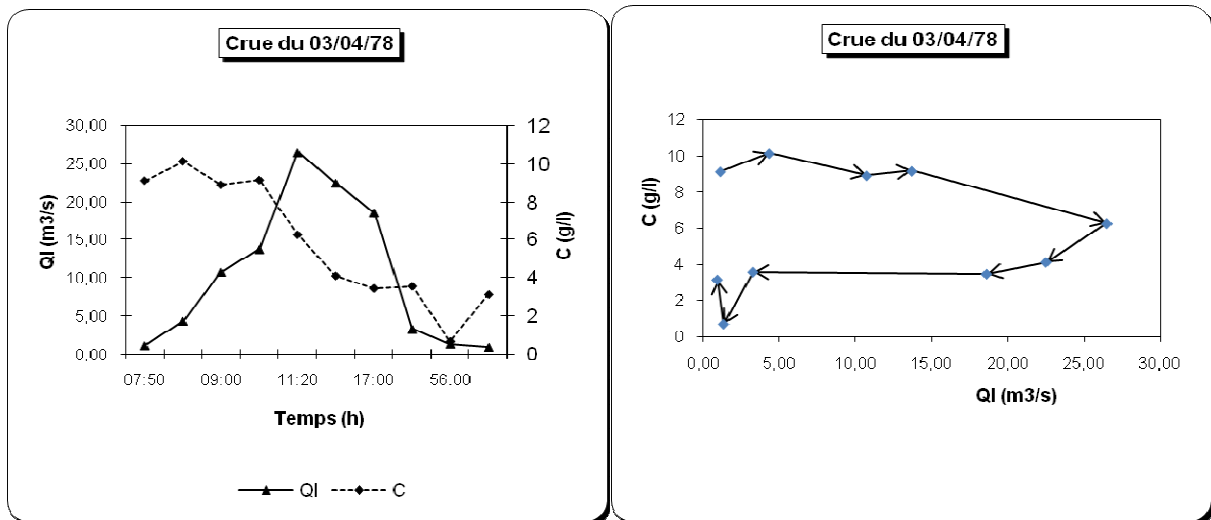
1. Les données de débits et de concentration sont mises en graphe avec en ordonnée la concentration en g.l^{-1} et le débit en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, et en abscisse le temps comme variable indépendante. On obtient les graphes temporels de C et de Q. Pour la représentation graphique de l'hystérésis, la concentration C en g.l^{-1} est prise en ordonnée et le débit Q en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ en abscisse.

2. Un graphique chronologique idéal est établi, en faisant varier l'étalement ;
3. Les associations idéales C-Q réalisées sont retenues et analysées.

VI.3 Identification des classes de relation C-Q

L'identification des différentes classes de relations C-Q est élaborée sur la base des résultats graphiques et statistiques des deux variables mises en relation. La figure représente respectivement les graphes temporels et l'hystérésis des événements sélectionnés. Le tableau VI.2. Présente les grandeurs statistiques des crues retenues dans cette analyse. Ces paramètres fournissent des informations très importantes pour l'identification des classes d'hystérésis.

Crue 01



Crue 02

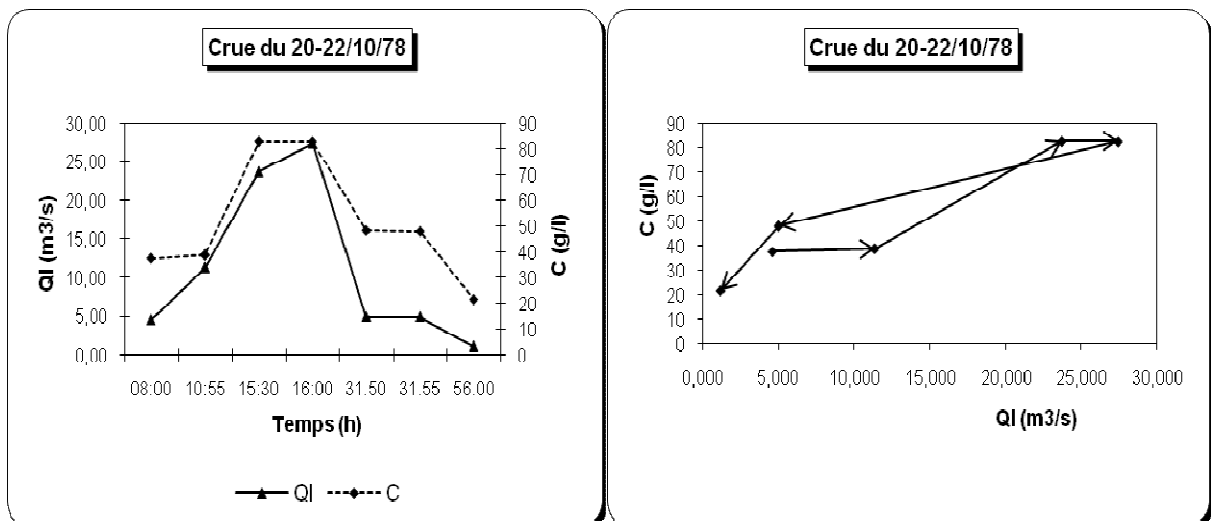
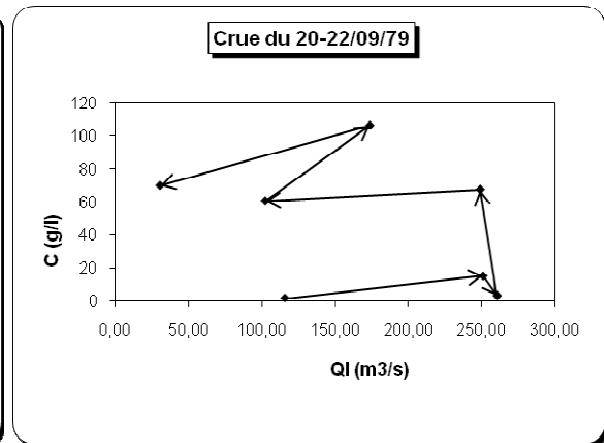
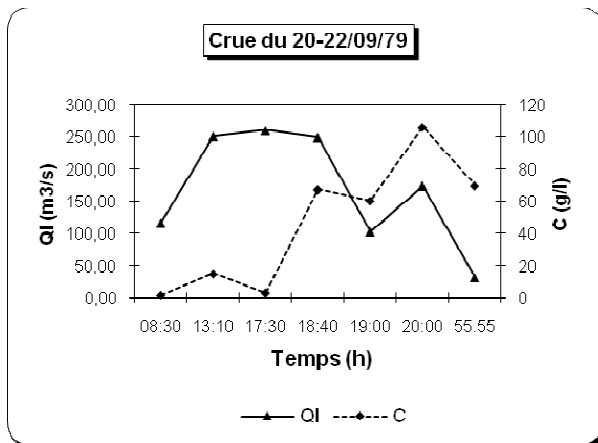
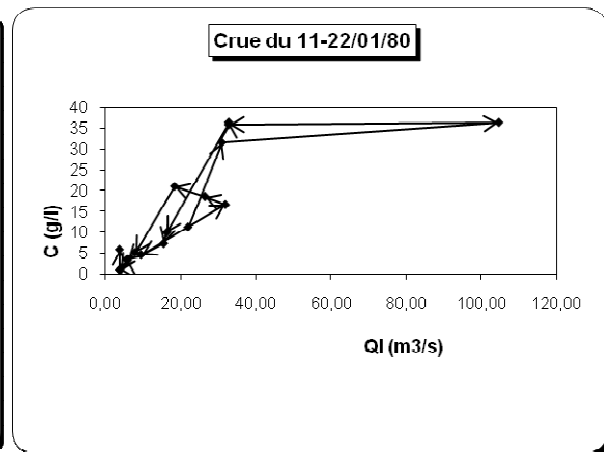
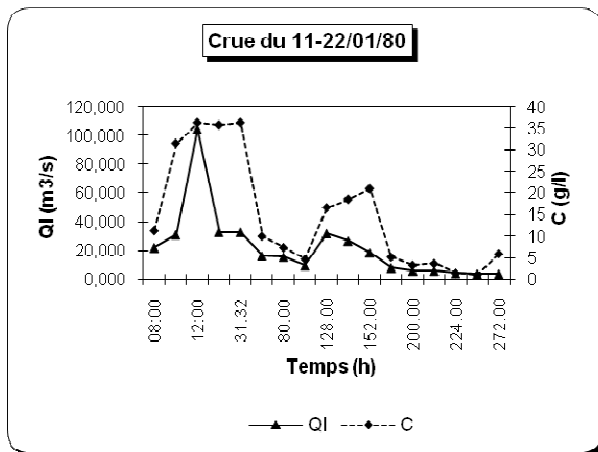


Figure VI.1 (1-2): Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff
 Durant les crues. (À gauche sont représentés les graphes temporels et à droite l'hystérésis de C et Q).

Crue 03



Crue 04



Crue 05

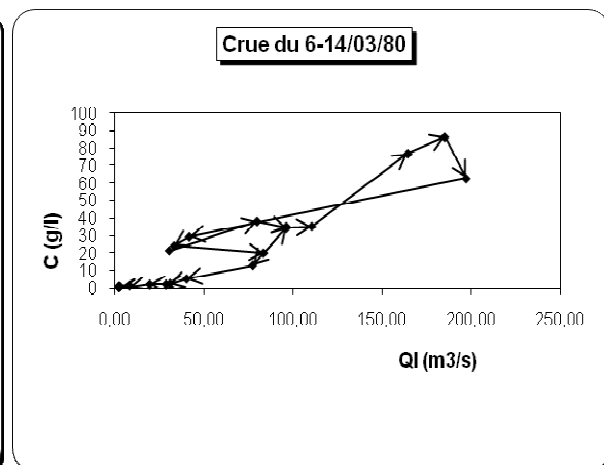
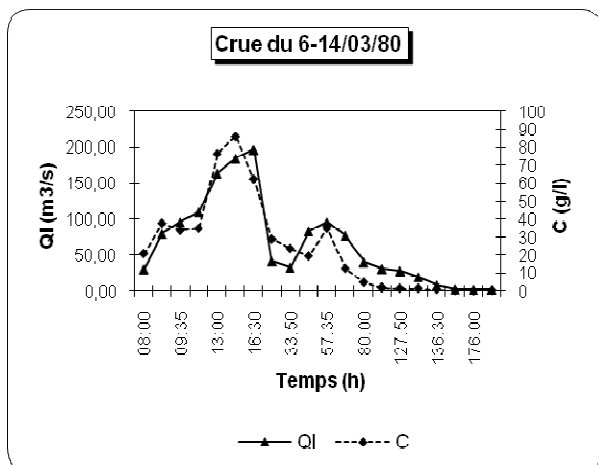
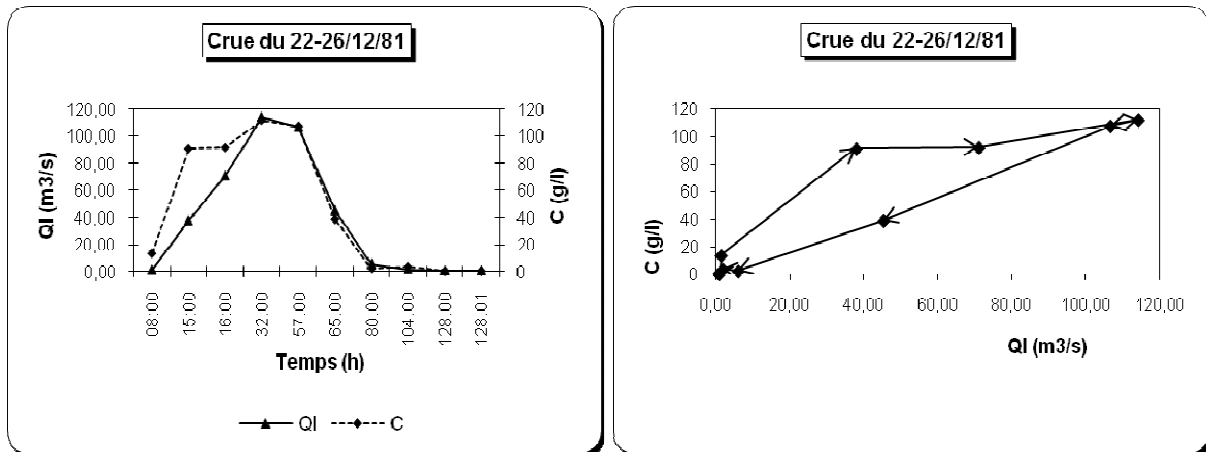
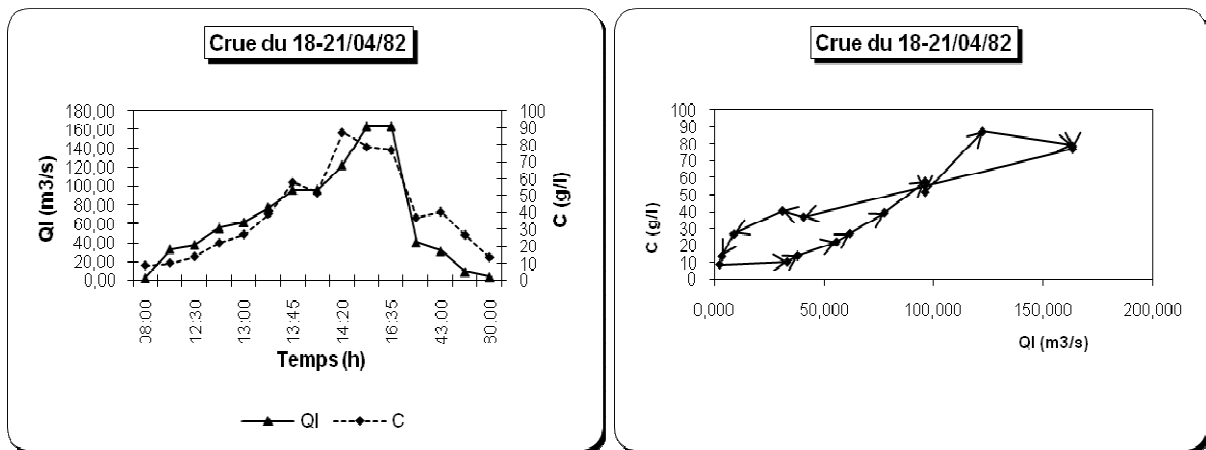


Figure VI.1 (3-5): Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff
 Durant les crues. (À gauche sont représentés les graphes temporels et à droite l'hystérésis de C et Q).

Crue 06



Crue 07



Crue 08

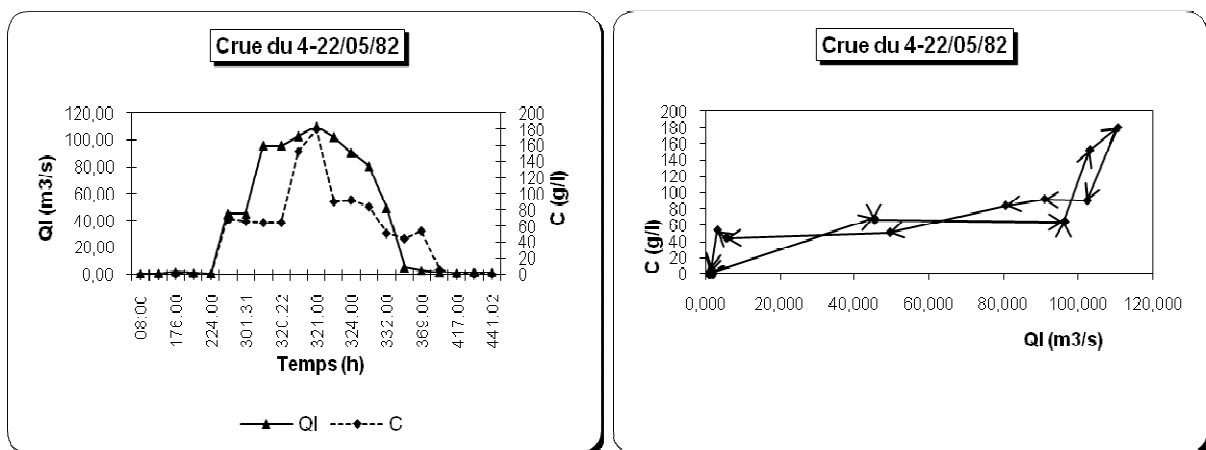
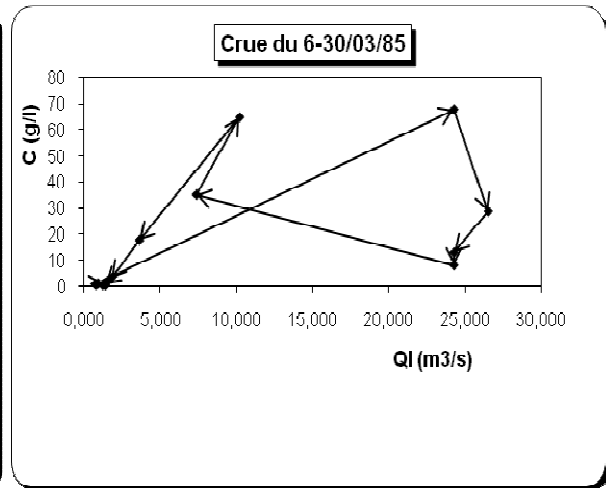
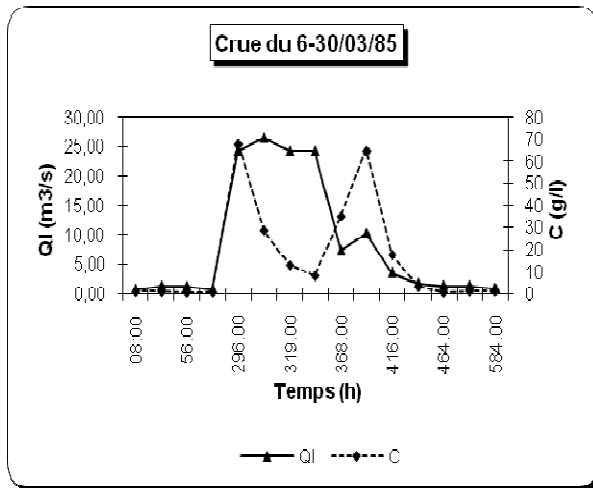
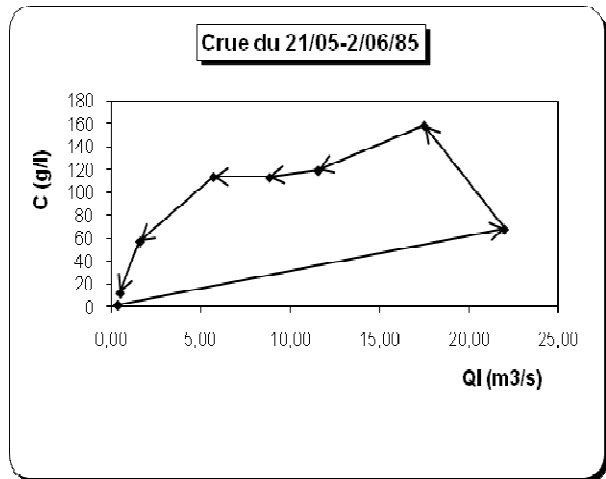
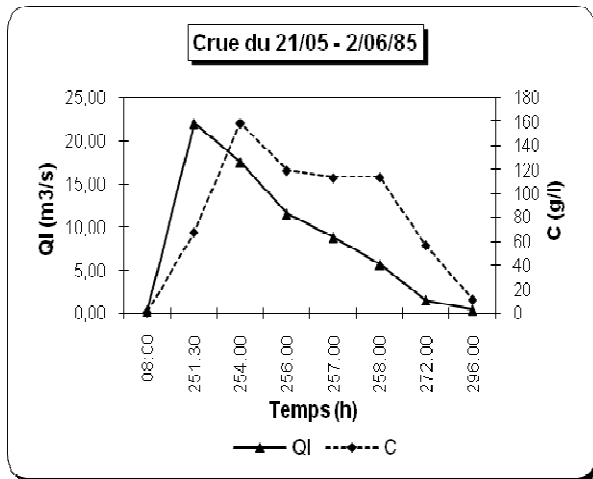


Figure VI.1 (6-8) : Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff
 Durant les crues. (À gauche sont représentés les graphes temporels et à droite l'hystérésis de C et Q).

Crue 09



Crue 10



Crue 11

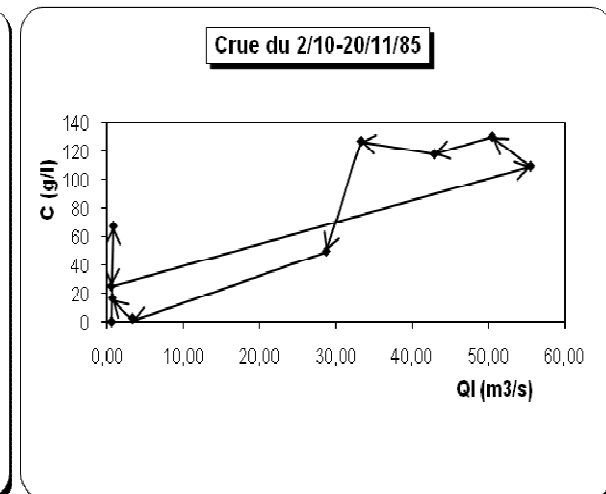
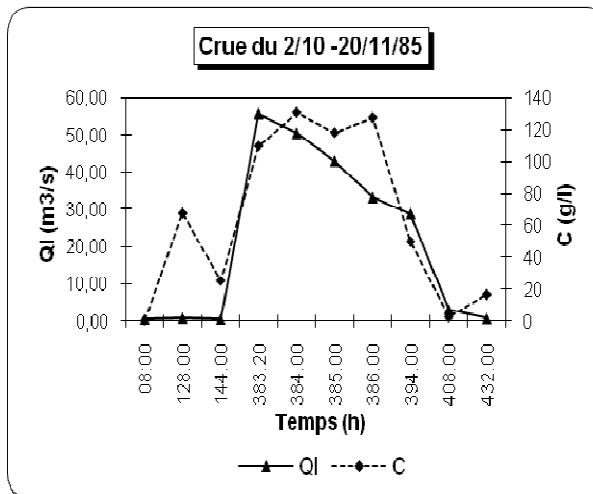
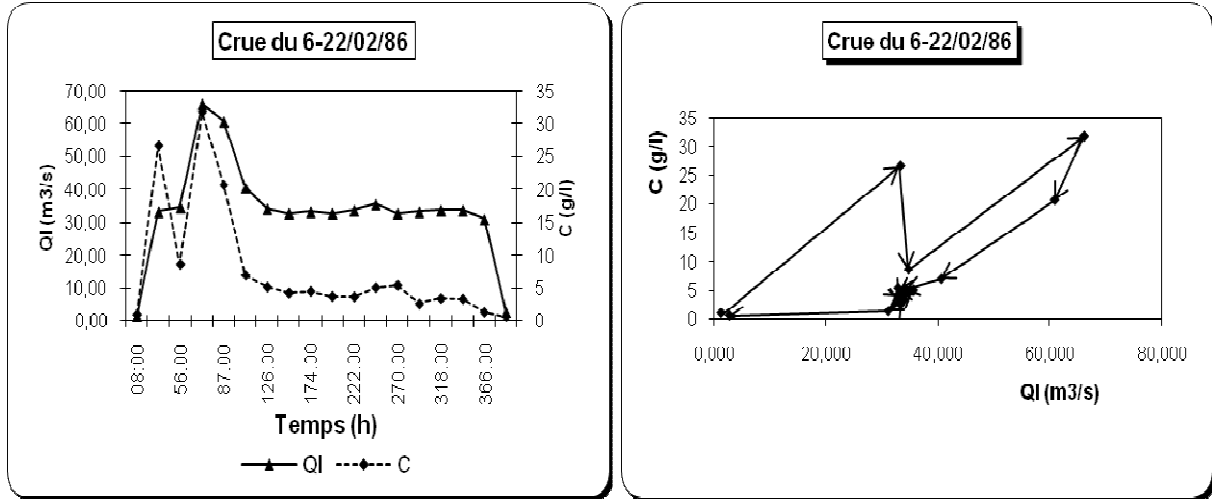
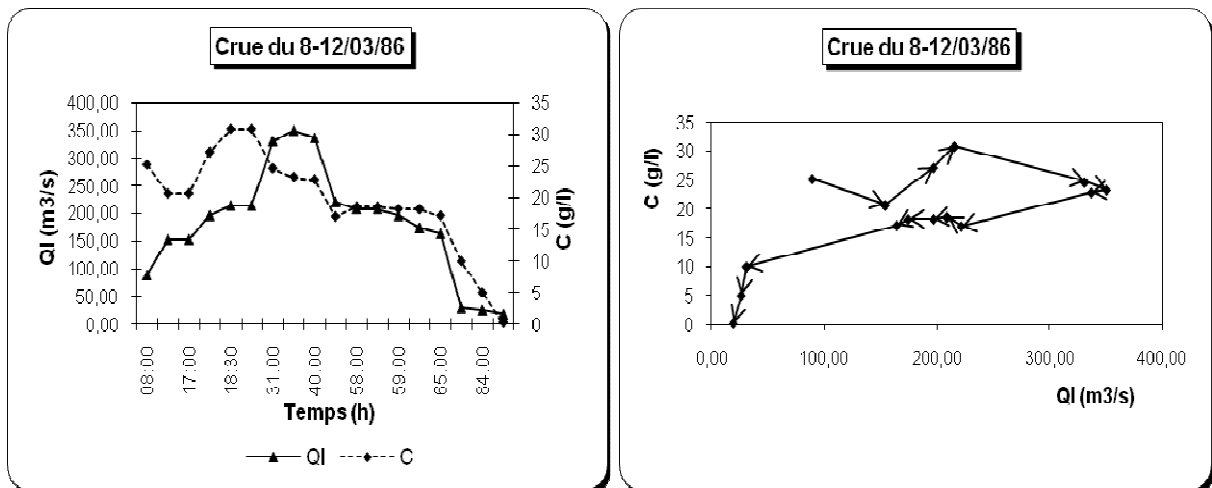


Figure VI.1(9-11) : Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff Durant les crues. (À gauche sont représentés les graphes temporels et à droite l'hystérésis de C et Q).

Crue 12



Crue 13



Crue 14

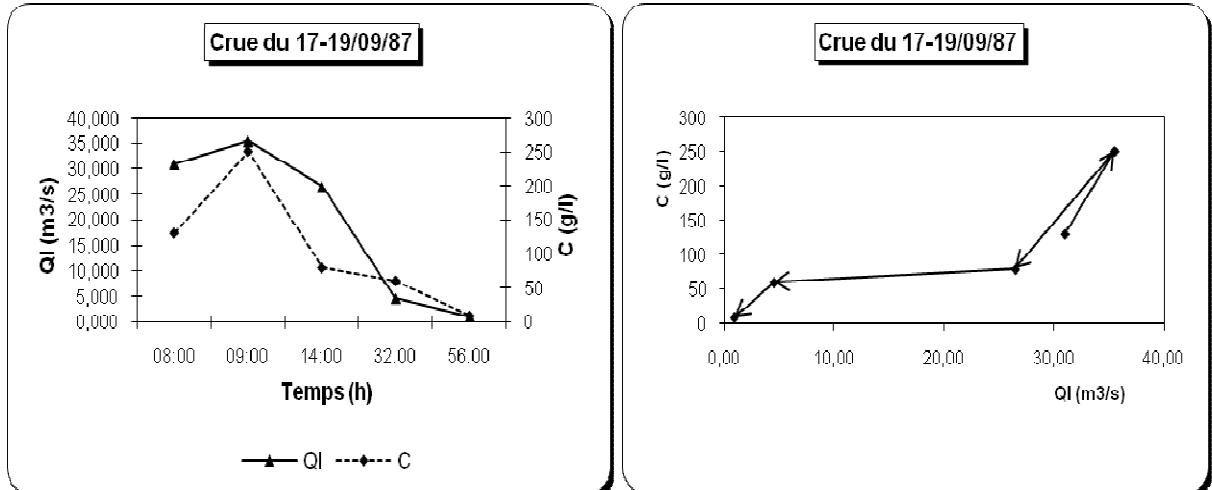
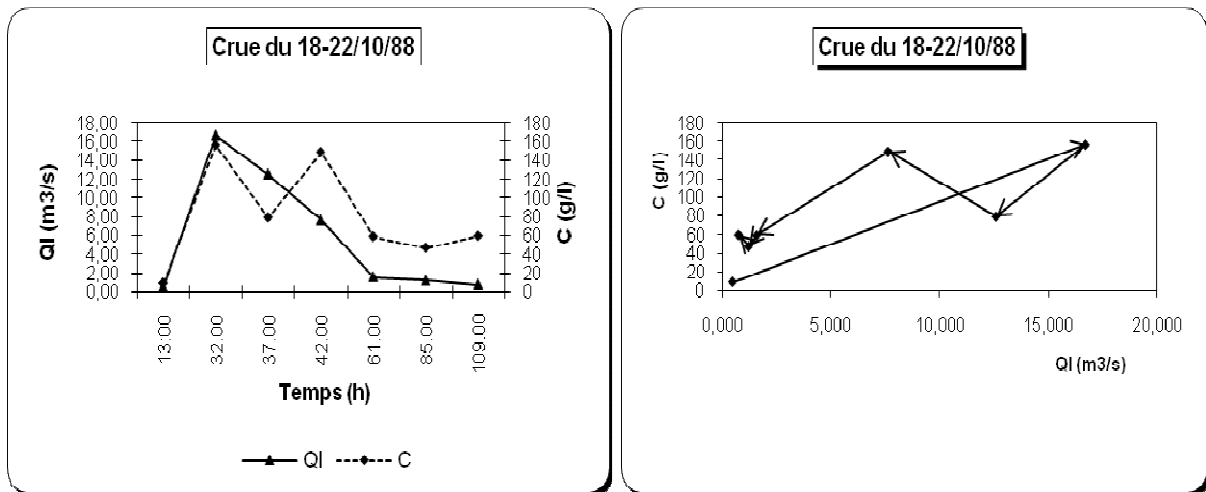
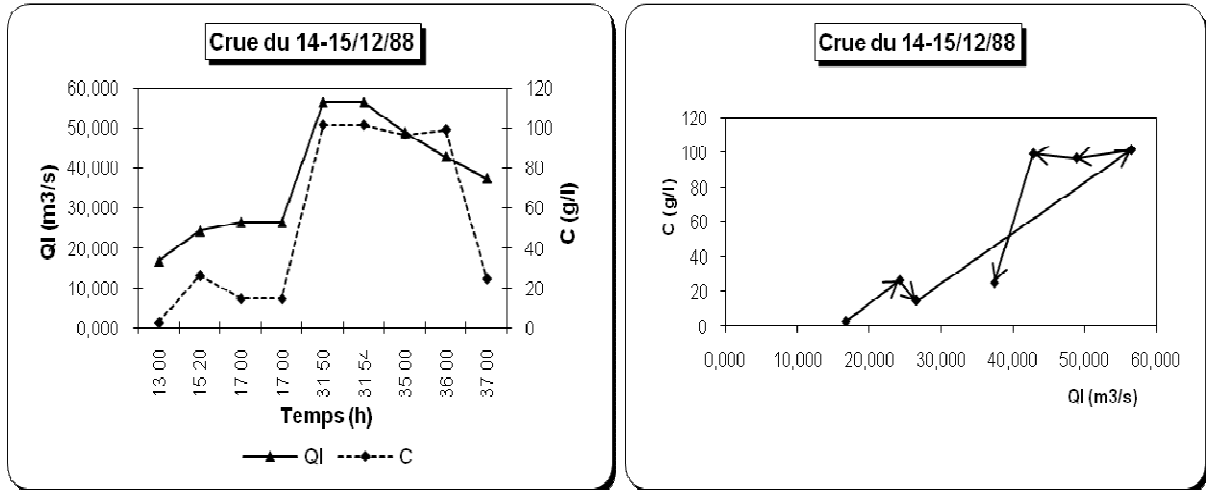


Figure V.1(12-14) : Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff
 Durant les crues. (À gauche sont représentés les graphes temporels et à droite l'hystérésis de C et Q).

Crue 15



Crue 16



Crue 17

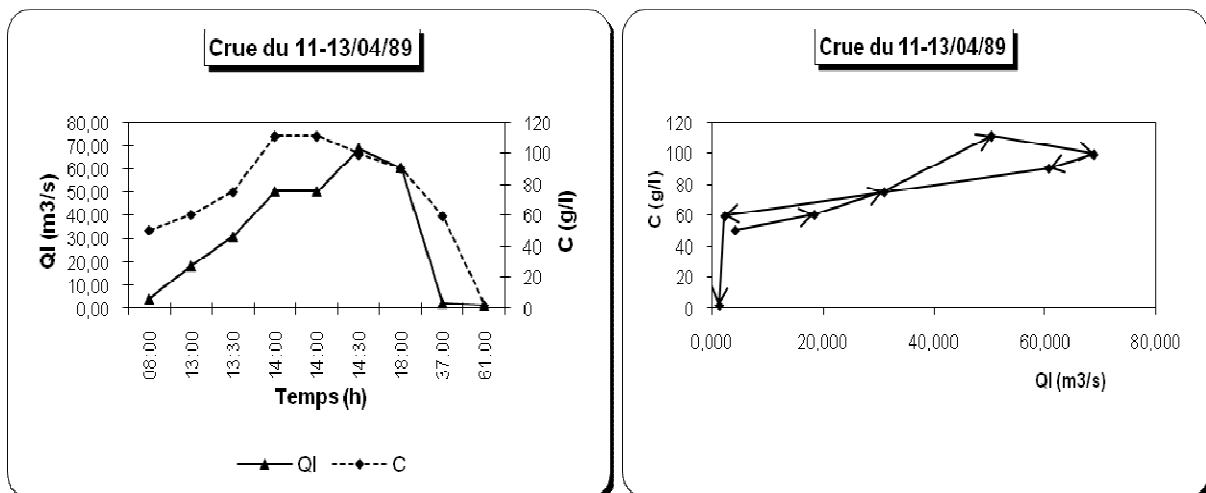
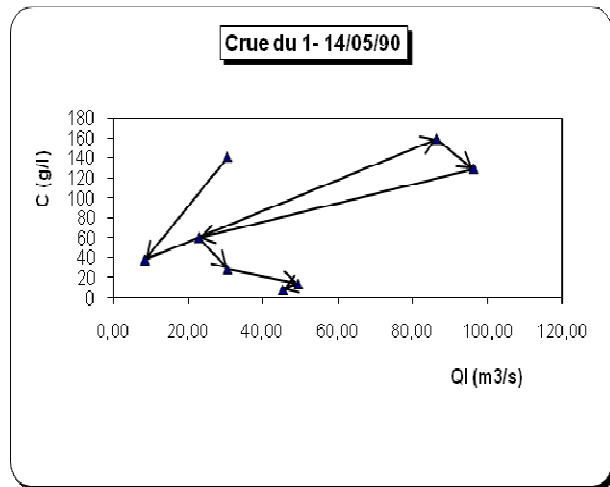
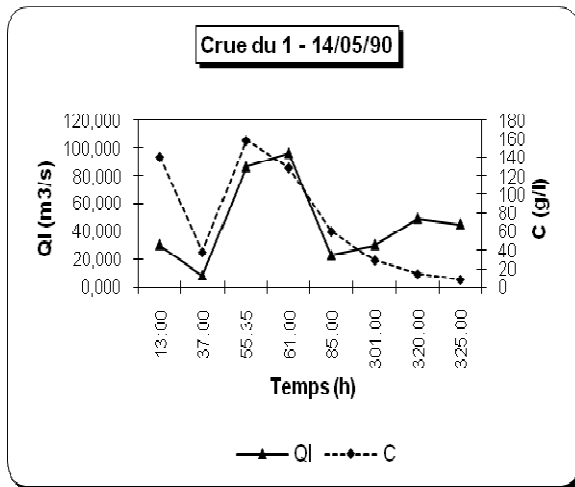
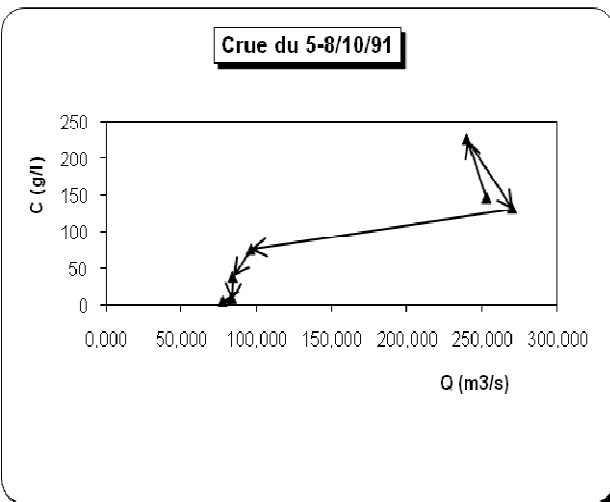
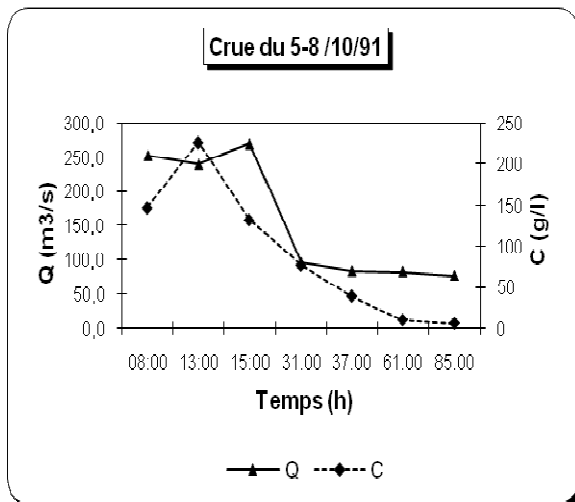


Figure VI.1 (15-17): Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff Durant les crues. (À gauche sont représentés les graphes temporels et à droite l'hystérésis de C et Q).

Crue 18



Crue 19



Crue 20

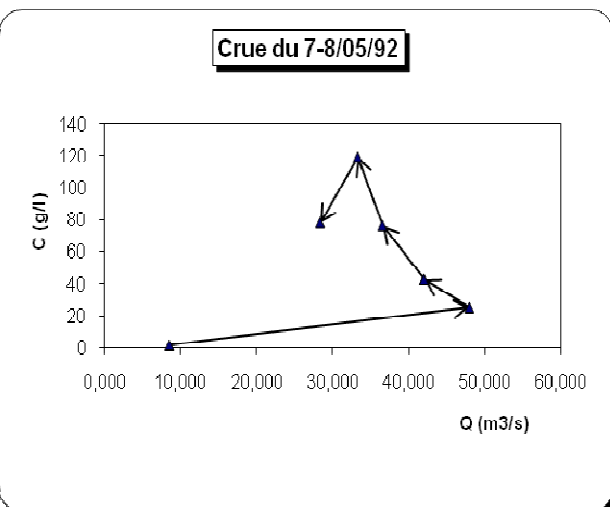
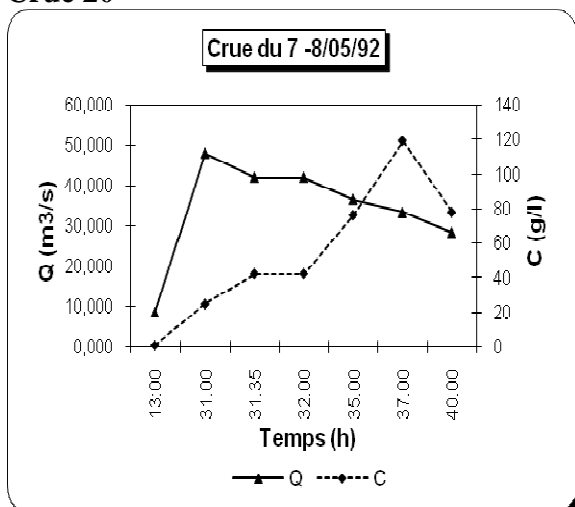
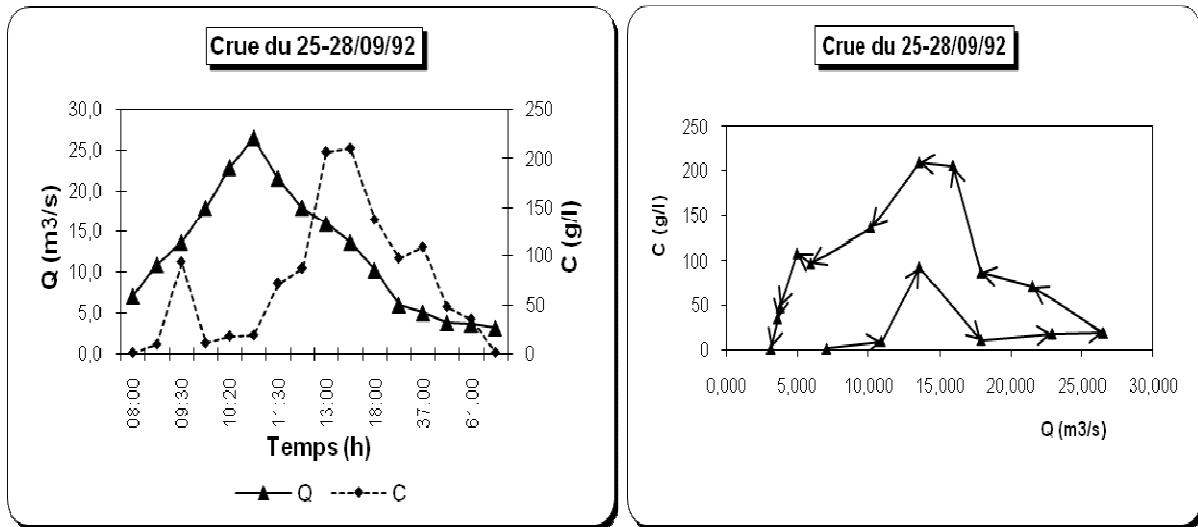


Figure VI.1 (18-20): Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff Durant les crues. (À gauche sont représentés les graphes temporels et à droite l'hystérésis de C et Q).

Crue 21



Crue 22

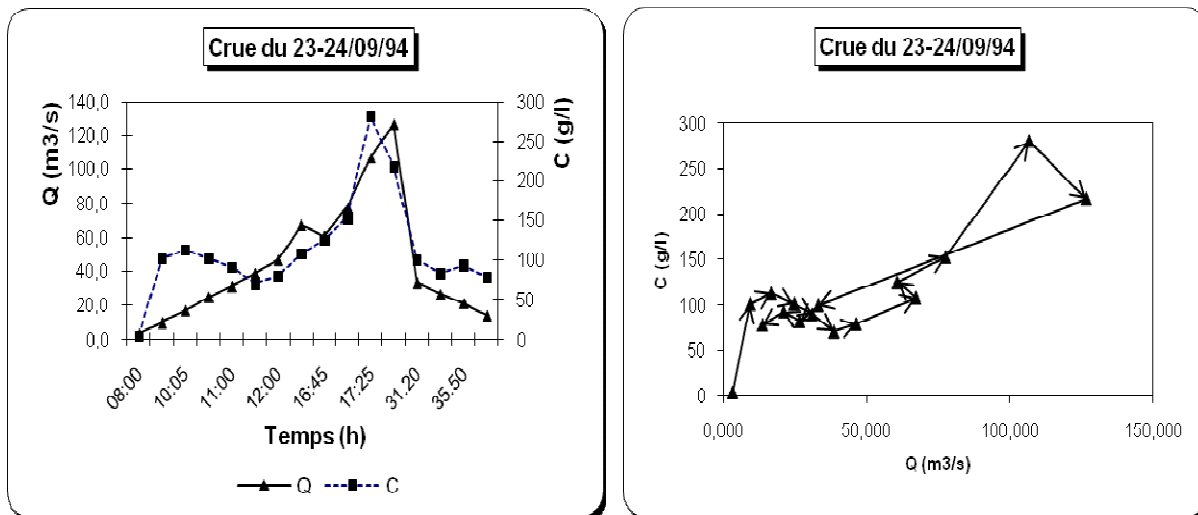


Figure VI.1 (21-22) : Dynamique du transport solide en suspension sur l'Oued Cheliff durant les crues. (À gauche sont représentés les graphes temporels et à droite l'hystérésis de C et Q).

Tableau VI.2 Paramètres statistiques des crues sélectionnées

Crue	Variables	Ecart-type	Moyenne	Coef Variation	Coef Aplatissement	Coef Asymétrie
01	Q	9.594	10.31	0.930	-1.233	0.596
	C	3.299	5.85	0.564	-1.562	-0.043
02	Q	10.338	11.156	0.927	-0.938	0.950
	C	23.062	51.529	0.448	-0.903	0.569
03	Q	89.162	169.032	0.527	-1.374	-0.414
	C	39.941	46.151	0.865	-1.434	0.155
04	Q	23.946	21.936	1.092	9.368	2.767
	C	12.983	14.715	0.882	-0.950	0.772
05	Q	60.333	66.609	0.906	0.046	0.974
	C	26.096	24.287	1.074	0.640	1.145
06	Q	44.861	38.664	1.160	-0.879	0.828
	C	48.643	46.149	1.054	-2.058	0.380
07	Q	52.879	66.235	0.798	-0.455	0.693
	C	26.067	39.479	0.660	-0.795	0.631
08	Q	44.383	40.110	1.107	-1.636	0.493
	C	52.334	48.708	1.074	0.730	1.014
09	Q	10.445	8.648	1.208	-0.950	0.982
	C	23.084	16.234	1.422	1.354	1.553
10	Q	8.105	8.497	0.954	-0.858	0.646
	C	55.251	80.335	0.688	-1.129	-0.246
11	Q	22.89	21.673	1.056	-1.861	0.355
	C	52.816	64.726	0.816	-1.942	0.080
12	Q	15.069	33.637	0.448	2.367	-0.193
	C	9.028	7.689	1.174	2.756	1.941
13	Q	98.384	183.206	0.537	-0.231	-0.061
	C	8.011	19.394	0.413	0.966	-0.892
14	Q	15.845	19.702	0.804	-2.907	-0.457
	C	91.864	105.870	0.868	1.345	1.084
15	Q	6.604	5.843	1.130	-0.891	0.917
	C	54.438	79.747	0.683	-0.841	0.543
16	Q	14.728	37.379	0.394	-1.561	0.108
	C	44.316	53.619	0.827	-2.432	0.190
17	Q	26.595	31.955	0.832	-1.853	0.066
	C	35.197	73.611	0.478	0.940	-0.930
18	Q	30.693	46.261	0.663	-0.527	0.763
	C	61.153	71.920	0.890	-1.899	0.475
19	Q	90.865	157.713	0.576	-2.649	0.397
	C	81.318	91.353	0.890	-0.617	0.620
20	Q	12.970	34.048	0.381	2.383	-1.411
	C	39.197	54.977	0.713	-0.112	0.392
21	Q	7.478	12.477	0.599	-1.016	0.359
	C	67.902	71.968	0.943	0.049	0.929
22	Q	33.845	43.080	0.786	1.025	1.221
	C	59.375	109.808	0.541	3.914	1.557

VI.4. Caractérisation des boucles d'hystérésis

Le tracé des 22 graphes temporels de la concentration et du débit permet de constater les caractéristiques types pour chaque crue. La procédure de classement des crues sélectionnées est effectuée de la manière suivante :

- (a) Regrouper les boucles qui ont la même orientation et la même forme ;
- (b) Séparer les boucles d'une même classe ayant différentes formes en analysant les critères retenus dans la bibliographie

Les caractéristiques des crues classées sont présentées dans le tableau VI.3.

Tableau VI.3. Classement et caractéristiques des crues

Classe	Sous classe	Crue	Caractéristiques	Forme et caractéristiques de la boucle
I	1	1, 2, 5, 6,13, 17, 18,19	$C/Q(\text{montée}) > C/Q(\text{décrue})$ C_{\max} avant Q_{\max} $C_s > 0$ et $A_p < 0$	Sens des aiguilles d'une montre
	2	14,12	$C/Q(\text{montée}) > C/Q(\text{décrue})$ C_{\max} avec Q_{\max} C_s varie de C et Q et A_p varie de C et de Q	Sens des aiguilles d'une montre
II	1	3, 10, 20,21	$C/Q(\text{montée}) < C/Q(\text{décrue})$ C_{\max} avant Q_{\max} $C_s > 0$ et $A_p < 0$	Sens contraire des aiguilles d'une montre La boucle assez large et nette pour la crue 10
	2	4, 15,16	$C/Q(\text{montée}) < C/Q(\text{décrue})$ C_{\max} avec Q_{\max} $C_s > 0$ et A_p varie de C et Q	Sens contraire des aiguilles d'une montre
III	1	22,7, 8, 09,11	$C/Q(\text{montée}) < C/Q(\text{décrue})$ pour des valeurs de Q $C/Q(\text{montée}) > C/Q(\text{décrue})$ pour d'autres valeurs de Q C_{\max} avant Q_{\max} $C_s > 0$ et $A_p > 0$	Boucle sous forme de huit incomplet

VI.5. Interprétation :

Cette analyse est menée beaucoup plus sur les aspects graphique et statistique des relations C-Q obtenues. Les résultats des Tableaux (VI.2 et VI.3) confirment bien que le rapport C/Q est le critère fondamental dans l'identification des boucles d'hystérésis. Les autres paramètres n'apportent que des détails concernant la largeur et l'orientation de la boucle. Les crues de mars 1980 et d'avril 1982 présentent beaucoup de similitude dans leur aspect statistique. L'asymétrie n'affecte en rien ni la forme de la boucle ni son orientation. Les crues de la classe II (sens contraire des aiguilles d'une montre) sont caractérisées par une pente de la partie montante des deux graphes temporels plus élevée que celle de la partie descendante. Pour la classe I, cette caractéristique est plus modérée.

VI.5.1 Variabilité de la concentration des sédiments en suspension

En visualisant les valeurs des concentrations des sédiments en suspension, et particulièrement les plus fortes dans le tableau VI.4, le rapport des concentrations maximales aux concentrations minimales durant la montée de la crue ainsi qu'en décrue est très indicatif. Les crues 8, 09 et 21 ont des rapports de variation durant la montée et la décrue plus élevés, Par contre les crues 10, 11 et 20 ont des rapports de variation durant la montée plus élevés. Ainsi que pour les crues 5, 6, 13 ont des rapports très élevés pour la décrue.

L'obtention de la valeur de C est très rapide pour les crues 1, 4, 6, 11, 12, 13,17 et 18. Elle se produit avant celle de Q_{max} . Pour les crues 16,20 et 21 le contraire qui est observé. L'évolution vers la valeur maximale de C est lente. Après la pointe de C, la diminution est forte. Les valeurs de C_{max} des crues 14 et 22 sont assez identiques (environ de 250 g/l). De plus, elles appartiennent à la même saison (automne). Les crues 7 et 9 sont caractérisées par un rapport de variation de C_{max}/C_{min} égal au double et appartiennent également à une même saison.

Tableau VI.4. Rapport de variation de la concentration

Crue	C_{\max}/C_{\min} lors de la montée	C_{\max}/C_{\min} lors de la décrue
1	1	15
2	2	4
3	62	3
4	3	36
5	4	196
6	8	468
7	10	6
8	1801	439
9	74	147
10	100	13
11	395	49
12	31	55
13	1	114
14	2	28
15	18	3
16	36	4
17	2	59
18	4	21
19	2	35
20	98	2
21	209	179
22	70	4

VI.5.2 Analyse de l'hystérésis

Deux principales classes d'hystérésis sont analysées ici et comparées qualitativement

Classe I. C'est le modèle le plus répandu et le plus étudié. L'obtention de C_{\max} avant Q_{\max} pour les boucles ayant le sens des aiguilles d'une montre est due essentiellement à l'existence d'une couche de pavage formée sur le lit de l'oued antérieurement à la crue (Arnborg et al. 1967). Colby (1963) note que la concentration maximale des matériaux fins se produisant avant le maximum de l'écoulement est conforme à l'idée que des particules lâches de sol au début d'une averse sont érodées par le premier ruissellement direct en quantité appréciable. Cette situation peut être aussi obtenue lorsqu'il y a une réduction des matériaux en suspension juste avant l'obtention du débit maximal (Arnborg et al., 1967, Wood, 1977 ; Battala & Sala, 1992 ; Benkhaled et Remini, 2003) ou une limitation d'approvisionnement en matériaux (Moog & Whiting, 1998). De plus elle est considérée comme une caractéristique commune aux petits bassins (Emmett, 1970 ; Walling, 1974). A titre d'exemple les crues 6 et 12 illustrent cet effet. L'oued cheliff est caractérisé comme la plupart des cours d'eau algériens par un régime hydrologiques irrégulier. L'oued est souvent à sec en été. La période de sécheresse s'étale parfois sur cinq ou six mois de l'année allant d'avril à septembre ou octobre. L'exemple le plus frappant est celui de l'année. Mais il est remarquer que la

diminution de la concentration, expliquant une faible production de sédiments ou une faible disponibilité de matériaux, concernerait des crues durables et/ ou très intenses (Arnborg *et al*, 1967). La crue 3 est un exemple en ce sens.

Classe II. Cette forme est peu connue et peu de travaux ont été publiés. D'une manière générale les crues de cette classe sont caractérisées par un temps de montée inférieur au temps de concentration du bassin et une concentration en sédiments très élevée (environ de 200 g/l). Cela peut être indicatif quant à l'érodabilité du sol du bassin de l'oued Cheliff. Une cause certaine semble expliquer l'origine de cette forme de boucle : L'existence des stations pluviométriques au niveau de bassin versant, différentes de par leur positionnement et de par les quantités de pluie observées. Celles-ci, bien qu'elles appartiennent au même bassin, illustrent de manière très nette la variabilité spatiotemporelle de la précipitation. Pour la crue du décembre 88, on remarque qu'il tombe 343 mm à Ghrib-Amont, 467mm à 011405 et 522 à 011404, valeurs définissant des pluies érosives. Un autre exemple est celui de la crue de septembre 92 où il tombe 228 mm à Ghrib Amont, 305mm à 011405 et 260mm à 011404.

Plusieurs auteurs ont confirmé l'existence de cet effet (Williams, 1989 ; Zhang *et al.*, 1990).

L'analyse par classe rapporte les observations suivantes :

- Les crues ayant un temps de montée inférieur au temps de concentration du bassin présentent des boucles assez nettes
- Il ya un effet de l'envergure du graphe temporel de C par rapport à celui de Q sur le rétrécissement de la boucle Crue 5,8 et 22

VI.5.3 Sources de l'hystérésis

La concentration des sédiments en suspension mesurée en une section transversale résulte de la mobilisation, la rétention, la réduction et l'épuisement des sédiments dans le bassin fluvial amont.

L'origine des sédiments dans le réseau d'écoulement sont le lit, les berges et les affluents. Les sources majeures des sédiments directement mobilisés par les oueds lors des fortes crues se trouvent au niveau des ravinements, des éboulements en masse des versants entaillés par la divagation des oueds. Il est communément admis que les sources de sédiments dans les cours d'eau sont l'érosion du sol et l'érosion des berges (Colby, 1963). Les quantités relatives de ces deux sources dans un cours d'eau donné sont rarement connues.

Les escarpements argileux sont les plus sollicités par l'érosion, en particulier en période de crue ou l'on enregistre les charges sédimentaires les plus fortes. Pour un débit moyen maximal de $80 \text{ m}^3/\text{s}$, la concentration moyenne maximale avoisine 500 g/l pour tous les événements considérés.

Les matériaux du lit, transportés lors d'une crue, caractérisés par des quantités et des diamètres différents, laissés par des crues et étiages précédents, peuvent être influencés par la capacité de la crue à briser ou rompre la couche de pavage. Les débris organiques peuvent également avoir une influence, si de tels débris piègent ou libèrent des sédiments. L'homme joue un rôle non négligeable dans le processus de genèse des sédiments par les pratiques culturelles.

Conclusions

La variation de la concentration à l'échelle d'une crue est très grande. Les caractéristiques morphologiques et hydrologiques du bassin d'Oued Cheliff en sont les principaux inducteurs. Le modèle sens des aiguilles d'une montre est très dominant sur le bassin considéré. L'analyse de l'hystérésis par classes montre relativement l'effet saisonnier sur la forme de boucle obtenue. La saison d'automne présente une hétérogénéité de classes à cause d'une irrégularité du régime pluviométrique et hydrologique du bassin et de l'étalement de la période d'été.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette étude, nous pensons avoir contribué à la connaissance des problèmes de transport solide en suspension en particulier dans le bassin d'Oued Cheliff. On parvient aux conclusions suivantes :

-Tout d'abord, en ce qui concerne la synthèse bibliographique et qui a traité les différents aspects relatifs au transport solide en suspension. Au travers de cette étude bibliographique nous avons donc pu nous rendre compte des connaissances acquises dans ce domaine. Mais des lacunes subsistent dans la connaissance des processus de transport solide. Il apparaît que le transport solide dans le cours d'eau ne correspond pas à une propriété facilement mesurable. Il est maintenant considéré comme une combinaison de réponses complexes influencées par les caractéristiques intrinsèques des sols et des variables extrinsèques environnementales (pluviométrie, lithologie, couvert végétal, pente).

-L'objectif principal de l'étude étant la compréhension du phénomène et l'estimation du transport solide en suspension, ce travail, basé sur les données observées, durant la période 77/94, a été conduit sur le bassin d'oued Cheliff. Ce bassin représente un échantillon des bassins du Nord de l'Algérie qui sont caractérisés par un taux de transport solide élevé en raison de nombreux facteurs mis en jeu.

-Le modèle numérique du terrain (MNT) du bassin versant de l'oued Cheliff-Ghrib a donné des résultats plus ou moins satisfaisants. Cependant, il y a lieu de dire qu'on en aurait eu meilleurs si on avait utilisé les cartes topographiques, plus récentes et à grande échelle.

Les altitudes du bassin données par le modèle cadrent bien avec celles qu'on relève sur les cartes. Le fichier des pentes donne une idée assez précise de ce que représente la morphologie du bassin. Cependant, on constate que les fortes valeurs de pentes sont amoindries dans les sites accidentés par le fait qu'on n'y numérise seulement les courbes maîtresses.

Du point de vue altimétrie, le bassin est caractérisé par des altitudes variant de 400m à 1500 m et des pentes favorables à l'écoulement par endroit.

-L'analyse climatique a révélé et particulièrement la répartition pluviométrique à révélé l'existence d'une variation de la pluviométrie faible au niveau des stations pluviométriques.

Le régime hydrologique de L'oued Cheliff est caractérisé par deux saisons bien distinctes : la période pluvieuse qui s'étend d'Octobre à Mai. Les conditions hydrogéologiques indiquent l'absence de nappe et l'oued est souvent à sec pendant la période estivale.

La période d'étude 1977-1994 était caractérisée par deux années à écoulement très important, les années 89/90 et 91/92 qui ont enregistré un coefficient de l'hydraulicité très élevés par rapport les autres années.

A l'échelle des crues, l'échantillon reconstitué sur la période d'étude est faible mais apporte beaucoup de réponses quant à la forte irrégularité annuelle de l'écoulement et confirme le caractère aléatoire du régime méditerranéen du bassin d'oued Cheliff.

-La difficulté principale dans le calcul et l'estimation du transport solide, est dû à l'insuffisance et la qualité des données disponibles. Il faut dire que les conditions climatiques sont très aléatoires et cela incombe à l'application stricte des consignes des données aux observateurs.

La méthode d'échantillonnage systématique du transport solide sur la plupart des cours 'd'eau algériens est l'échantillonnage uni-ponctuel. Cette technique d'acquisition est souvent objet de critique. Mais malgré son caractère empirique, cette méthode a fournit des résultats et des données exploitables sur la période 77-94.

L'approche suivie a consisté au traitement des couples débits liquides-débits solides en vue de l'établissement des modèles de régression pour différentes échelles temporelles.

Dans cette partie, nous avons constaté que les modèles paraboliques et puissance présentent un taux d'explication de la variance supérieur à 70 %. De fait, le modèle puissance a été retenue pour la suite du travail.

L'exposant **b** est bien relié aux caractéristiques de l'écoulement, tandis que **a** est considéré comme paramètre représentatif de l'état du sol, constatant pour un même bassin et une même saison.

A l'échelle des crues, les faibles valeurs de **a** signifieraient un état de saturation du sol, alors que les fortes valeurs de **b** caractériseraient l'écoulement durant la saison d'automne.

Par ailleurs, nous avons constaté que le bassin versant de l'oued Cheliff a une dégradation spécifique très élevée ($E_s = 2541 \text{ T/km}^2 \cdot \text{an}$). Cette dégradation des sols est très visible sur le terrain. Elle est due aux caractères favorables à l'érosion des sols et au sapement des berges. L'ampleur de ce chiffre est aussi admise par Demmak (1982) qui rapporte que 15 bassins des régions Cheliff et Cotiers Algérois, dont l'oued Allalah, bassin limitrophe de l'oued Ouahrane, produisent des débits solides spécifiques supérieurs à $1000 \text{ T/km}^2 \cdot \text{an}$.

L'analyse de l'effet d'hystérésis montre relativement l'effet saisonnier sur la forme de boucle obtenue. Le modèle sens des aiguilles d'une montre est très dominant sur le bassin considéré. L'arrivée du pic de la concentration avant celui du débit liquide, comme ceux se produisant simultanément, et une caractéristique de ce bassin de zone semi – aride.

Tout au long de ce travail, nous avons essayé d'exploiter le maximum de données d'observations et de Bibliographie. Des lacunes existent, nous en sommes conscients. Beaucoup d'efforts et de progrès ont été accomplis dans ce domaine en Algérie. Une méthodologie de travail existe.

Nous pensons que les résultats obtenus, doivent être améliorés en augmentant la taille des séries de données disponibles et au fur et à mesure que de nouvelles techniques de mesure et d'analyse apparaissent. Nous recommandons :

- D'étudier le processus d'épuisement des sédiments, à la condition qu'un grand nombre de données concernant les surfaces ou états de sol soient disponibles (donc implantation de bassins expérimentaux et disponibilité d'images satellitaires).
- Une estimation du transport solide total par la mesure du charriage.
- Un effort supplémentaire doit être fait en matière de qualité des données par l'utilisation d'échantillonneurs automatiques et l'emploi de la méthode d'exploration du champ de vitesse.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- ABALIANZ, 1958** : comptes rendus saniri, N°96 Russie.
- ANDERSON H.W.(1949)** : Flood frequencies and sedimentation from forest watersheds .Trans.American Geophysical Union ,Vol 30 ,n°4.(1954) : Suspended sediment discharge related to steamflow, topography, soil and land use, Trans American Geophysical Union, vol 35 n°2.
- A.N.R.H, 1970** : Etude de transport solide dans le Nord Algérie. Rapport de l'Agence Nationale des ressources hydrique. Alger.
- A.R.C.E, 2001** : Rapport de l'Association pour la Recherche sur le Climat et l'Environnement, Oran, Algérie.
- AXELSSON.V,1967** : The laitaure Delta. A study of deltaic morphology and processes. Geogr.Ann. 49A.pp 1-127.
- BENKHALED.A., REMINI.B, 2003** : Influence des paramètres hydrométéorologiques sur l'estimation des apports solides dans un bassin versant de zone semi-aride. L'oued Ouahrane. Colloque International Oasis, Eau et Population. Biskra.22-23 et 24 Septembre.
- BENKHALED.A., REMINI.B, 2003** : Analysis of a sediment rating curve in Wahrane river basin (Algéria). Revue des sciences de l'Eau N°16/3.pp 333-356.
- BENKHALED.A., REMINI.B, 2003** : Tomporal variabilty of sediment concentration and hysteresis in the Wadi Wahrane basin. Algéria. Hydrological Science Journal. N° 48 (2). Pp 243-255.
- BOBEE.B, 1990** : Eléments de statistiques. Univ.P et M. Curie. Laboratoire de Géologie Appliquée. France
- BOUSSEMA, 1996** : Système d'information pour la conservation et la gestion des ressources naturelles ; Colloque International sur le rôle des technologies de télécommunication et de l'information en matière de protection de l'environnement, Tunis, 1-2 Novembre 1994, P.P.64-70.
- CELIK.I, AYDINE.M, YAZICLI.U, 1996**: A review of the erosion control studies during the republic in Turkey. In Kapur.S,Akça.E,Eswaran.H,Kelling.G,Vita-Finzi,Mermut A6R,Ocal A-D, editor 1st international conference on land degradation, Adan. Turkey.10-14 june 1996, 175-18
- CHEBBANI. R, DJELIL.K, ROSSE.E, 1999**: Etude des risques d'érosion dans le bassin versant Isser, Algérie. Bulletin Réseau Erosion 19 : 85-95.
- CHEVALIER.J.J, POULIOT.J, THOMSON.K, BOUSSEMA.M-R, 1995** : Système d'aide à la planification pour la conservation des eaux et des sols (Tunisie). Système d'information géographique utilisant les données de télédétection. Act du colloque scientifique international, Hammamet. Tunisie, 1-2 Novembre 1994, 4-12
- COLA R.(1980)** : Presupposti teorici et tecnica della ricerca sperimentale in idraulica .Atti del XVII convegno di idraulica et costruzioni idrauliche pp.129-184
- CROS-CAYOT, 1996** : Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte armoricain. Thèse de Docteur de l'ENSAR, 218p.+annexe.
- DELHOUME J-P, 1981** : Etude en milieu méditerranéen semi-aride : ruissellement et érosion en zone montagneuses de Tunisie (Djebel Semmama). Compagne 1975-1979. Tunis, Orstom/ DRE. 185p.

- DEMMAK.A.(1982)** : Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale .Thèse de docteur –Ingénieur.Université de Pierre et Marie Curie ,France .p 323
- DE PLOEY, 1990** : L'érosion pluviale : Expérience à l'aide de sable traceurs et bilan morphogénique. Acta géog. Lovaniensia, Vol VII, p1-89
- DU BOY M.P. (1879)** : Le rohne et les rivières à lit affouillable.Mem .et Doc, Annales des ponts et chaussées .Ser 5 Vol .XVIII.
- DEROUICHE A., 1994**: Tests et limites d'application d'un modèle numérique de terrain de type DEMIURGE à des fins hydrologiques. Mémoire de fin d'étude d'ingénieurs, ESIER / ORSTOM.
- DUTIL, P., 1984** : L'érosion en grande culture, revue technique des agriculteurs dynamique, N°169, France.
- ELLISON W.D.(1947)** : Erosion studies. Parts I to VII .Agric .Engng.
- ENGELUND,F et HANSEN,E 1967** : A monograph on sediment transport in alluvial streams,Teknisk for lag, Compenhagen, Danemark
- FEM et FIDA,2002**. Publication FIDA. Edition GMS GRAFICHE,Rome , juillet 2002.
- FOA,1990** : Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides. Bulletin.
- FOURNIER,F.,1960**: Climat et érosion : La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques.PUF,Paris,France.
- FOURNIER,F.,1969** : Transport solides effectués par le cours d'eau, Bull. Assoc . Int. Hydrol. Scient ; t.13, N°3.
- GRAVILOVIC ,S. , 1972** : Ingénierie des cours d'eau torrentiels et de l'érosion.Yougoslavie.
- GRECO,J.,1966** : L'érosion , la défense et la restauration des sols , le reboisement en Algérie.MARA.Alger.
- HEUSCH B.(1971)** : Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin versant .Aplication au Maghreb.mines et géologie, Rabat .
- HUDSON N.W., 1957** : Erosion control Research Progress Report on Experiments at Henderson Research Station 1953-1956, Rhod. Agric.J,54 (4); P297-230.
- KHANCHOU,2008** : Cours de transport solide.
- KINGUMBI .A,** Caractérisation morphométrique Du bassin versant du merguellil Application a la simulation des Ecoulements de surface et a l'érosion. Projet de Fin d'études d'ingénieurs.
- LABORDE,2003** : Hydrologie de surface. Univ de Nice –Sophia Antipolis
- LEVAINDIER,1989** : L'hydrologie Appliquée aux petits Bassins Versants Ruraux, CEMAGREF, France.
- LEOPOLD.L.B, MADDOCK.T.G.,1953** :The hydraulic geomertry of sream channels and some physiographic implications. Waschington D.C.U.S. Geological.Survey. Proffessional Paper.252p.
- LIAMAS,J, 1992** : L'Hydrologie Générale . application et principe. Edition Gaetan morin. Canada.
- LUDIWG, 1992** : L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du bassin parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire. Thèse de doctorat, université de Strasbourg I, 201p.

- MEDDI M.(1992)** : Hydropluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina .Thèse unique , Université Louis Pasteur.
- MEGUENNI K.et REMINI B, 2008** : Evaluation du débit dans Le bassin versant de harreza (algerie). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 07, Juin 2008, pp. 7-19
- MEYER –PETER,1934** : Formulas for bed –load transport preceding of second meeting of IHAR , Stockholm
- MOOG,D.B.,WHITHING,P.J.1998**. Annual hysteresis in bed load rating curves. Water resources research N°34(9).pp 2393-2399.
- ONIBON H.; 1995**: Caractérisation des zones homogènes du bassin versant de l'oued EZZIOUD à des fins de modélisation hydrologique. Mémoire de fin d'études d'ingénieurs, ESIER/ORSTOM.
- PAUSTIAN.S.J ; BESCHTA.R.L, 1979** : The suspended sediment regime of an oregon coast range stream . Water Ressources Bulletin.v. 15 N° 1. pp 144-154
- KATTAN.Z et al,1987** : Suspended se sdiment load and mechanical erosion in the Senegal basin. Journal of hydrology. N°92.pp59-76.
- RAZAFINIAINA, 2002** : Etude expérimentale de l'érosion hydrique inter rigole sous culture de MIL et d'ARACHID au Sénégal. DAKAR.
- REMINI, AVENARD et KHETTAB,2003**: Envasement des barrages, EDOC, ALGER.
- ROCHE,M ;1960**. Hydrologie du surface. Gauthier VILLARS. Paris.430 p
- ROOSE, 1994** : Introduction à la GCES. Bulletin pédologique FAO.76,420p
- ROSSE, 1967** : Dix années de mesures de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. Agronomie tropicale (France), volume 22, n°2, p 123-152
- ROOSE et PIOT, 1984** : Runoff, erosion and soil fertility restoration on the mossi plateau (central zone of upper- volta).Symp. Intern challenge in African Hydrology and water ressource. Harare Symposium I.A.N.S publ, 144, p 485-498.
- ROOSE, 1937**: Modern conception of the mechanic of fluid turbulence. Trans-ASCE.U.S.A.
- SAUGREAH, (1969)** : Etude de syntèse sur les apports solides en Algérie
- SHABBAN .A,KHAWLIE.M,1998**. Ceoenvironmental assessment of riparian zones under extreme climatic events ; a case study of representative rivers in lebanon.Mediterranean rivers and riparian zones- processes and management symposium, Zaragosa, Spain, 21 September-2October,1998 ,25per A hnlichkeitsmechanik und turbulenz forshung. Mitteil preuss, versuchants wasser und schiffsbou, Berlin n°26, Allemagne.
- SHILEDS.A,1936**. Anwendung d
- TIXERONT J .(1960)** : Taux d'abrasion et teneur en suspension des cours d'eau d'Algérie et de Tunisie .Secretariat d'état à l'agriculture Tunis.
- TOUAIBIA B , ACHITE.M,2003** : Contribution à la carthographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale. Journal des sciences hydrologique p 235.
- TOUAIBIA.B, 2000** : Erosion – Transport solide- envasement des barrages . cas du bassin versant Mina, Thèse de Doctorat d'etat , INA, EL-Harrache, Algérie.
- TOUAIBIA.B, GOMER.D, AIDAOUIA et ACHITE, 2001**. Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi aride, de l'Algérie du Nord . journal des science hydrologique. 46(1), 41-53.

WILLIAMS.G.P,1989: Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers.J.Hydrol.N°111.pp89-106.

WISCHMEIER, 1978 : Predicting rainfall erosion losses, aguide to conservation planning. Agricultur Hand- Book. N°537.USA.

WOOD.P.A, 1977: Controls of variation in suspended sediment concentration. Revue Sedimentol. N° 24.pp 437-445.

Références des cartes topographiques utilisées

-INCT : Carte d'état Major de l'Algérie, 1/50 000, feuille de Djendel est NJ-31-III-7 .1985

- INCT : Carte d'état Major de l'Algérie, 1/50 000, feuille de Berouaghia Ouest NJ-31-III-8 .1987

- INCT : Carte d'état Major de l'Algérie, 1/50 000, feuille de Berrouaghia Est NJ-31-III-8 .1987

- INCT : Carte d'état Major de l'Algérie, 1/50 000, feuille de Beni slimane Est NJ-31-IV-7.1987

- INCT : Carte d'état Major de l'Algérie, 1/50 000, feuille de Ksar El Boukhari Ouest NI-31-XXI-2.1991

- INCT : Carte d'état Major de l'Algérie, 1/50 000, feuille de Ksar El Boukhari Est NI-31-XXI-2.1991

- INCT : Carte d'état Major de l'Algérie, 1/50 000, feuille de Chellalat el Oudaoura Ouest NI-31-XXII-1.1991

INCT : Institut National de Cartographie et de Télédétection d'Alger.

Logiciels utilisés

- S.I.G : Système d'information géographique, Map Info Professional version 7.5

- Vertical Mapper version V 2.6 Logiciel complémentaire de Mapinfo.

- HYDROLAB, version 98.2 pour EXCEL4, EXCEL5 et EXCEL97