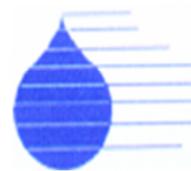


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université ABOU BEKR BELKAID



Faculté des sciences de l'ingénieur



Département d'Hydraulique

THESE

Présentée par monsieur : **BOUCHELKIA Hamid**

Pour l'obtention du diplôme de **Doctorat en Hydraulique**

Thème

**ETUDE DU TRANSPORT SOLIDE DANS UN BASSIN VERSANT
ET SON IMPACT SUR L'ENVASEMENT DES BARRAGES
- CAS DU BASSIN VERSANT DE CHELLIF -**

Soutenue publiquement le 04 / 07 / 2009 devant le jury :

BOUANANI A.....	MC....	Univ de Tlemcen.....	Président
REMINE B.	Pr.....	Univ de Blida.....	Directeur de thèse
MEDDI M.....	Pr.....	C.U de Khemis Miliana.....	Examineur
SAAD HAMOUDI A.....	Pr.....	Univ de Chlef.....	Examineur
HABI M.....	MC...	Univ de Tlemcen.....	Examineur

RESUME

La quantification du transport solide est d'une importance capitale pour les gestionnaires, les exploitants et les projeteurs d'ouvrages hydrauliques, ainsi donc un outil de prévision simple, facile à mettre en oeuvre a été mis au point. Le principe adopté, est basé sur des données hydrométriques des stations de jaugeages, et des analyses saisonnières et annuelles, qui nous ont permis de définir deux approches d'estimation des apports solides en suspension. La première à une corrélation "MUD" et la deuxième à double corrélation "MDC".

L'étude est menée par analyses des débits moyens journaliers, par l'intégralité des crues et enfin par dissociation des crues pour les deux approches.

La station de SIDI BEL-ATAR à l'exutoire du bassin versant de CHELLIF, a été choisie comme application. Les résultats obtenus sont assez satisfaisants du fait que les coefficients de corrélations des modèles sont entre 87% et 95% en première approche et entre 61% et 91% pour la première corrélation et entre 74% et 97% pour la seconde corrélation en deuxième approche.

La quantité du transport solide en suspension retrouvée se situe entre 2.35 et 37.73 millions de tonnes par an, elle paraît énorme sans doute due à la vulnérabilité du bassin de CHELLIF face à l'érosion et à l'importance de sa superficie, ainsi que l'importance des apports liquides de l'oued CHELLIF et son régime turbulent et torrentiel.

Ces deux approches une fois affinées peuvent être généralisées à l'ensemble des bassins versant du nord de l'Algérie.

Mots clés:

Transport solide - Bassin versant – oued Cheliff - Données hydrométriques - Débit - Corrélation - Modèle - Estimation - CHELLIF.

_____:

إحصاء كمية النقل الصلب (الوحد) ذو أهمية عالية لمستغلي و مديري ومنجزي الهياكل الهيدروليكية،
آلية للإحصاء سهلة الفهم و الاستعمال أعدت في هذه الدراسة.

المبدأ الأساسي المتبع هو استغلال المعطيات الحقيقية المنتقاة في محطات مراقبة الوديان، و التحليل
السنوي و الموسمي الذي مكننا إلى التوصل إلى تحديد طريقتين لإحصاء كمية الوحد، الأولى بتنسيق واحد
و الثانية بتنسيقين

هذه الدراسة اتبعت بتحليل التدفق اليومي المتوسط، و بتحليل الفيضانات في مجملها، ثم بتقسيم
الفيضانات (صعود الفيضان و نزول الفيضان) لكلا المنهجيتين.

محطة سيدي بلعطار في الحوض الساكب(الشلف) اتخذت كتطبيق في هذه الدراسة. النتائج المحصل عليها
جد مشجعة معاملات الترابط الموجودة في كل التطبيقات تتراوح بين 87% و 95% بالنسبة للأولى و بين
61% و 91% للتنسيق الأول و 74% و 97% للتنسيق الثاني بالنسبة للمنهجية الثانية.

أما كمية الوحد المحصل عليها تتواجد بين 2.35 و 37.73 مليون طن في السنة. تظهر عظمة هذا راجع
إلى أهمية الانجراف في هذا الحوض و مساحته المعتبرة (43700 كم²) و كذا أهمية التدفق السائل في وادي
الشلف.

هاتين المنهجيتين بعد تعديلتهما و تسويتهما، بإمكانهما أن تعمم على جميع الأحواض الساكبة
الجزائرية.

النقل الصلب - الحوض الساكب - واد الشلف - المعطيات الهيدرومترية - تدفق - ترابط - منهاج -
إحصاء - الشلف.

Abstract :

Estimate of quantity of the solid transport have a capital importance for managers and projectors of hydraulics infrastructures, a simple and easy tool to make in work has been set up. The adopted principal based on hydrometric data of measuring stations. Saisonery and annual analyses have permitted to define too estimating methods of suspended sediments rat, the first with one correlation "MUD" and the second with double correlations "MDC".

The study has been bought by analysing delivered daily means, by integral floods and finally by decomposition of floods for the too tools.

SIDI BEL-ATAR station to the exutory of a watershed of CHELLIF has been selected as an application. The obtained results are satisfactory enough because of the fact of the correlating coefficients of the models are between 87% and 95% in the fist method and between 61% and 91% for the first correlation and 74% and 97% for the second correlation in the second method. The quantity the founded suspended sediment are situated between 2.35 and 37.73 millions tans per year, which appear huge without doubts due to the vulnerability of CHELLIF basin in a relation to its erosion and the importance of its oued CHELIFF bringing liquid and turbulent torrential regime.

Thus methods once set; they can be generalized for the whole watersheds of the north Algeria.

Key words

Solid transport – Watershed – Oued Cheliff - Hydrometric data – Flow – Correlation – Model – Estimate - CHELLIF

Dédicaces

A ma mère, à mon père

A ma femme, ma petite princesse Sofia et mes adorables jumeaux

Rayane et Sami

A mon frère Chafik à mes sœurs et leurs maris

A toute ma famille

A tous (tes) mes amis (es)

B Hamid

REMERCIEMENTS

J'exprime mes sincères reconnaissances à monsieur REMIN Boualem Professeur au département de Génie rural de l'université de BLIDA pour m'avoir inspirer ce sujet et m'avoir guider le long des années nécessaires pour mener à terme cette thèse. Sans oublier les membres de jury qui ont acceptés de juger ce modeste travail ; Qu'ils trouvent ici l'expression de mes profondes gratitudes.

Je suis très reconnaissant à m'égard de tous les enseignants qui ont contribués à ma formation en particulier ceux de département d'hydraulique de l'école nationale polytechnique d'ALGER et ceux des départements de tronc commun technologie et de Génie rural de l'université de BLIDA, sans oublier l'ensemble du personnel (enseignants et travailleurs) de la faculté des sciences de l'ingénieur de l'université de Tlemcen.

Je remercie l'ensemble du personnel de l'A.N.R.H de BIR MOURAD RAIS (Alger) en particulier « BELAID, DJAMILA et EL-HADI » du département d'hydrologie et « SALIMA et FARIDA » du département de pédologie pour leurs collaboration pour avoir les données nécessaires à cette étude.

Mes sincères remerciements s'adresse aux Professeurs MARC COTE et Jean-louis BALLAIS de l'université d'AIX en Provence qui m'ont aidé et orienté dans ce travail lors des stages de courte durée effectués à AIX en Provence.

Sans oublier ma femme FADILA qui ma aidé et ma incité a finir cette thèse.

Ma profonde gratitude s'adresse en particulier à monsieur REMAOUN M enseignant à l'Université de Chlef et monsieur HADIDI du ministère des ressources en eau qui m'ont fourni les documents nécessaires pour la correction de cette thèse.

Que toute les personnes non citées qui m'ont aidé de près ou de loin, trouvent ici mes salutations distinguées.

À toutes et à tous, je vous dis Merci
Thanmirth

NOTATIONS

D: Diamètre des grains.

d_{50} : diamètre médian

U: Vitesse moyenne d'écoulement.

V : Vitesse d'écoulement.

U^* : Vitesse de frottement

W : vitesse de chute d'une particule

τ : Tension tangentielle.

τ_c : Contrainte critique

τ^o : Contrainte adimensionnelle (contrainte de SHIELD)

τ_k^o : Contrainte critique adimensionnelle de la classe k,

τ_m^o : Contrainte critique adimensionnelle moyenne

R_{ep} : nombre de Reynolds particulaire

d_c : diamètre critique des grains .

d_i : diamètre représentatif de la classe i

ν : Viscosité cinématique de l'eau

γ : Poids volumique du liquide.

c: coefficient de CHEZY.

h: Hauteur du liquide.

J: Pente de la ligne d'énergie.

R_h : Rayon hydraulique.

ρ : Masse volumique du liquide.

ρ_s : masse volumique des

e_b : coefficient d'efficacité du charriage

A' : Surface du bassin versant.

Q_{S1} : apport annuel moyen.

A_1 : lame d'eau ruisselée.

R_c : Ruissellement annuel moyen de crue.

IL: Indice lithologique.

IP: Indice des précipitations érosives.

CT: Coefficient de torrencialité.

D_d : Densité de drainage.

N_1 : Nombre des talwegs élémentaires.
 Q : Débit liquide.
 Q_s : Débit solide.
 q : Débit liquide par unité de largeur
 q_s : Débit solide par unité de largeur
 X : abscisse.
 Y : Ordonnée.
 X, Y : Moyenne.
 σ, S : Ecart type.
 σ^2, S^2 : Variance.
 N, n : Etendu de l'échantillon.
 S_{xy} : Covariance.
 v_i : Degré de liberté.
 χ^2 : Variable de KHI-DEUX.
 α : Niveau de confiance.
 t_i : Variable de STUDENT.
 U_i : Variable normale centré réduite.
 ε : Résidu de approximation.
 A, B : paramètres du modèle $Y=A.X+B$.
 k : paramètre du modèle $Q_s=k Q^A$
 R : coefficient de corrélation.
 F : variable de FISHER-SNEDECOR.
 E_c : Ecart dû à la régression.
 E_R : Ecart résiduel.
 E_T : Ecart total.
 q_0 : Débit d'étiage.
 Q_0 : Débit max.
 K : nombre de classes.
 H : Amplitude des classes.
 M : Nombre de sous-intervalles de fréquences.
 E : Etendu de l'intervalle de fréquence.
 $Q_s=f(Q), C_s=f(Q), Q_s=f(C_s)$: modèles.
 Q_{moy} : moyenne de la série des débits liquides.

T_s : Apport spécifique des sédiments en suspension (dégradation spécifique).

C_m : Concentration moyenne.

C_{sm} : Concentration solide moyenne interannuelle.

Q_{sm} : Débit moyen solide interannuel.

Q_m : Débit moyen liquide interannuel.

Q_{ss} : Charge annuelle en sédiments en suspension.

(M): montée de crue.

(D): Descente de crue.

ABREVIATION

MUC : Modélisation à une corrélation

MDC : Modélisation à double corrélation

ANRH : agence nationale des ressources hydrauliques

ANB : Agence nationale des barrages (actuellement ANBT « T: transferts »)

ABH : Agence de bassin hydrographique Cheliff-Zahrez

PNE : Plan nation de l'eau

P.N.U.D : Programme des nations unies pour le développement.

O.M.M : Organisation mondiale de la météorologie

O.N.I.D : Office nationale de l'irrigation et drainage

P.L : Poste pluviométrique

S.A.U : Surface agricole utile

G.P.I : Grand périmètre d'irrigation

P.M.H : Petite et moyenne hydraulique

LISTE DES FIGURES

Figure I.2.1 : Mode de transport des sédiments	8
Figure I.3.1. Schématisation des domaines respectifs du transport solide par charriage et en suspension	12
Figure I.4.1: courbe de Shields	13
Figure. I.5.1. Bouteille de prélèvements fixée sur une perche avec système d'ajustage	17
Figure I.5.2. Turbidisonde	19
Figure I.5.3. Schéma d'une jauge	19
Figure I.5.4. Exemples d'échantillonneurs Helley- Smith	20
Figure I.5.5. Echantillonneurs de charge de fond (piege	21
Figure.II.2.1 Comportement des sédiments grossier	25
Figure.II.2.2 Comportement des sédiments fins	26
Figure II.6.1: Schéma de l'installation du siphon évacuateur	54
Figure : III.2.1 Schéma d'un système	61
Figure.III.3.1 : Construction géométrique de la courbe des débits classés	66
Figure.III.3.2 : courbe des débits classés relative à N années	67
Figure.III.3.3 : histogramme des fréquences	68
Figure IV.1.1. Le bassin de Chellif au sein du CHELIF-ZAHREZ	86
Figure IV.1.2. Situation du bassin du Chélif	87
Figure IV.1.3. Données Morphométriques	88
Figure IV.2.1. Profil géologique de la zone d'étude	90
Figure IV.2.2. Cadre géologique de la région étudiée (Perrodon 1967-Mattauer 1958)	91
Figure IV.2.4 Profil en long de la terrasse du Cheliff. (Selon J.BOULAIN 1955)	92
Figure IV.4.1 Distribution spatiale des stations utilisées dans l'étude	95
Figure IV.4.2. Carte des isohyètes du bassin de CHELIF ZAHREZ	96
Figure IV.4.3. Carte numérisée par l'ABH chellif-Zahrez	97
Figure IV.4.4. Distribution mensuelle des précipitations pour le Chellif	99
Figure IV.4.5 Distribution saisonnière des précipitations pour le Chellif	99
Figure IV.4.6 répartition saisonnière des précipitations du Chellif	100
Figure IV.5.1 Localisation des stations de mesure de température	100
Figure IV.5.2. Variation de la température moyenne mensuelle dans le Chellif	101

Figure IV.6.1. Localisation des stations hydrométriques dans le Chellif	102
Figure IV.6.2 Répartition saisonnière des ressources en eau au Chellif	104
Figure IV.7.1 les grands périmètres irrigués la région d'étude	106
Figure IV.6.1. Localisation des différents barrages dans la zone d'étude	108
Figure.V.2.1 : Droite de régression débit solide – débit liquide (toute l'année) « MUC »	113
Figure.V.2.2 : Courbe des débits classés (toute l'année) « MUC »	113
Figure.V.2.3 .Bassin versant de Chellif - corrélation saisonnière entre débit solide et débit liquide « MUC ».	117
Figure.V.2.4.Courbes des débits classés à l'échelle saisonnière « MUC »	119
Figure.V.2.5 : SOLIDOGRAMME DE LA CRUE DU 02 AU 05/02/1979	121
Figure.V.2.6 : HYDROGRAMME ET TURBIDIGRAMME DE LA CRUE DU 02 AU 05/02/1979	121
Figure.V.2.7: Droite de régression débit solide – débit liquide (Crues entière, toute l'année)	123
Figure.V.2.8. Corrélation saisonnière entre débit solide et débit liquide (crues entières) « MUC »	124
Figure.V.2.9 : Droite de régression débit solide – débit liquide (montée des crues, toute l'année) « MUC »	127
Figure.V.2.10 : Droite de régression débit solide – débit liquide (descente des crues, toute l'année) « MUC »	127
Figure.V.2.11. Corrélations saisonnières entre débit solide et débit liquide (Dissociation des crues) « MUC »	129
Figure.V.3.1. corrélation annuelle entre concentration solide et débit liquide « MDC »	135
Figure.V.3.2.corrélation saisonnière entre Concentration solide et débit liquide « MDC ».	136
Figure.V.3.3 corrélation annuelle entre débit solide et concentration solide « MDC »	138
Figure. V.3.4.Corrélation saisonnière entre Concentration solide et débit liquide « MDC »	139
Figure. V.3.5. Corrélation annuelle entre concentration solide et débit liquide (Crues entières) « MDC »	142
Figure V.3.6. Corrélation saisonnière entre concentration solide et débit liquide (Crues entières) « MDC »	143
Figure. V.3.7.Corrélation annuelle entre concentration solide et débit liquide (Crues entières) « MDC »	145

Figure. V.3.8. Corrélation saisonnière entre concentration solide et débit liquide (Crues entières) « MDC »	146
Figure. V.3.9 : Droite de régression concentration solide – débit liquide (montée des crues, toute l’année) « MDC »	149
Figure. V.3.10: Droite de régression concentration solide – débit liquide (descente des crues, toute l’année) « MDC »	149
Figure. V.3.11. Corrélation saisonnière entre concentration solide et débit liquide (Dissociation des crues) « MDC »	151
Figure. V.3.12. Corrélation semestrielles entre concentration solide et débit liquide (Dissociation des crues) « MDC »	152
Figure. V.3.13 : Droite de régression débit solide – concentration (montée des crues, toute l’année) « MDC »	154
Figure. V.3.14 : Droite de régression débit solide – concentration (descente des crues, toute l’année) « MDC »	154
Figure. V.3.15. Corrélation saisonnière entre débit solide et concentration (Dissociation des crues) « MDC »	155
Figure. V.3.16. Corrélation semestrielles entre débit solide et concentration (Dissociation des crues) « MDC »	156

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.II.1.1 : Bilan Sédimentaire à l'échelle continentale	23
Tableau.II.1.2 : Bilan sédimentaire à l'échelle continental	24
Tableau II.2.1 : Envasement de quelques barrages Algériens	29
Tableau II.2.2: Statistiques sur la sédimentation des barrages algériens en exploitation	30
Tableau II.4.1 : Apport spécifique en suspension au Mghrab	44
Tableau II.6.1 : Dragage des barrages algériens	52
Tableau.III.3.1 : Tableau de fréquences	68
Tableau .IV.1.1 : Pluviométrie mensuelle moyenne (1972 1994)	89
Tableau IV.4.1: Précipitations moyennes mensuelles de 39 stations du Bassin versant de Chellif (1972/2002)	98
Tableau IV.5.1 : Températures moyennes mensuelles de quelques stations de Chellif (1975-1996)	101
Tableau IV.6.1 : Caractéristiques des stations hydrométriques (ANRH)	102
Tableau IV.6.2 : Paramètres hydrologiques de oued Cheliff	103
Tableau.IV.6.3 : Apport moyen mensuel (hm ³ /an) des stations hydrométriques dans le Chellif	103
Tableau.IV.7.1 : Périmètres exploités pendant la campagne d'irrigation 2005	105
Tableau.IV.8.1 : Barrages du bassin versant de Chellif	107
Tableau.V.2.1 : Résultats de calcul	112
Tableau.V.2.2 : Calcul des débits liquide et solide moyen interannuel « MUC »	114
Tableau.V.2.3 : Caractéristiques des échantillons (Q, QS) « MUC »	116
Tableau.V.2.4 : Relations saisonnières « MUC »	116
Tableau.V.2.5 : Séries saisonnières des débits liquides moyens journaliers « MUC »	118
Tableau.V.2.6 : Apports saisonnier en sédiments en suspension « MUC »	118

Tableau.V.2.7 : Caractéristique des échantillons (Q, QS) « Crues Entières » « MUC »	122
Tableau.V.2.8 : Relations annuelles et saisonnières « Crues Entières » « MUC »	125
Tableau.V.2.9 : Apports saisonnier en sédiments en suspension « MUC »	125
Tableau.V.2.10 : Caractéristiques des échantillons (Q, QS) « Crues dissociées» « MUC »	126
Tableau.V.2.11 : Relations annuelles et saisonnières « Crues dissociées » « MUC »	130
Tableau .V.2.12 : Charges en sédiments « Crues Dissociés » « MUC »	130
Tableau.V.3.1 : Caractéristiques des échantillons (Q, CS) « Crues Entières » « MUC »	134
Tableau.V.3.2 : Différentes relations et coefficients de corrélation « MUC »	135
Tableau.V.3.3 : Concentration moyenne interannuelle de l'oued Chellif « MUC »	137
Tableau.V.3.4 : Différentes relations et coefficients de corrélation « MUC »	138
Tableau.V.3.5 : Valeurs des apports solides « MDC »	140
Tableau.V.3.6 : Caractéristique des échantillons (Q, CS) « Crues Entières » « MDC »	141
Tableau.V.3.7 : Différentes corrélations « MDC »	142
Tableau.V.3.8 : Concentration moyenne interannuelle « MDC »	144
Tableau.V.3.9 : Secondes corrélations–annuelle et saisonnières (crues entières) « MDC »	144
Tableau.V.3.10 : Valeurs des apports solides « MDC »	147
Tableau.V.3.11 : Caractéristiques des échantillons (Q, CS) « Crues dissociées» « MDC »	148
Tableau.V.3.12 : Relations (Q,CS) annuelles et saisonnières «Crues dissociées» «MDC»	150
Tableau.V.3.13 : Concentration moyenne interannuelle «Crues Dissociés » « MDC »	152
Tableau.V.3.14 : Relations (Cs,Qs) annuelles et saisonnières «Crues dissociées» «MDC»	153
Tableau.V.3.15 : Charges en sédiments « Crues Dissociés » « MDC »	157

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE.I. EROSION ET TRANSPORT SOLIDE	4
I.1.PROCESSUS D'EROSION DANS LES BASSINS VERSANTS	4
I.1.1.Generalites	4
I.1.1.1.Les types d'érosions	4
I.1.1.2.Caractéristiques des bassins versants	4
I.1.2.les interfluves:	5
I.1.2.1.Le processus d'altération	5
I.1.2.2.Influence du climat	6
I.1.2.3.Facteurs topographiques	6
I.1.2.4.Facteurs géologiques et pédologiques	6
I.1.2.5.Le couvert végétal	7
I.1.2.6.L'occupation des terres	7
I.1.3.RESEAU DE DRAINAGE	7
I.2 TRANSPORT SOLIDE	7
I.2.1.Le transport par charriage (bed load)	8
I.2.1.1.Description du phénomène :	9
I.2.2.Transport par suspension (suspended load) :	11
I.2.2.1.Description du phénomène :	11
I.3. SEPARATION ENTRE SUSPENSION ET CHARRIAGE	11
I.4. CONTRAINTE CRITIQUE DE MISE EN MOUVEMENT	12
I.4.1 EN GRANULOMETRIE UNIFORME (DIAGRAMME DE SIELDS)	12
I.4.2. EN GRANULOMETRIE ETENDUE	14
I.5. MESURE DU TRANSPORT SOLIDE DANS LES COURS D'EAU	15
I.5.1 Mesure du transport en suspension	16

a. Matériel de prélèvements	16
b. Calcul du débit solide en suspension	17
c. Mesures en continu	18
I.5.2 mesure du transport de fond	20
I.6. TRI GRANULOMÉTRIQUE, PAVAGE	22
CHAPITRE.II. CONSEQUENCE, METHODES DE PREVISIONS ET DEFENCES	23
II.1. DISTRIBUTION DU TRANSPORT SOLIDE SPECIFIQUE À TRAVERS LE MONDE :	23
II.2.ALLUVIONNEMENT DES RETENUES	24
II.2.1.Mécanisme de l'envasement	25
II.2.1.1.Comportement des sédiments grossiers	25
II. 2.1.2.Comportement des sédiments fins	27
II.2.2.Effet de l'alluvionnement des retenues :	28
II.2.3. ampleur de l'alluvionnement des retenues en ALGERIE :	28
II.3.METHODES DE PREVISION DES APPORTS SOLIDES :	31
II.3.1. Méthodes empiriques	31
II.3.2. Méthodes d'application des équations du transport solide :	31
a. Formule de charriage de Meyer-Peter et Muller	32
b. Formule de Vélikanov	33
c. Formule de transport total de Bagnold	33
d. Formule de transport total de Engelund et Hansen	34
II.3.3. Méthodes de modélisation	35
a. Le modèle mathématique:	35
b. Le modèle physique :	35
II.3.4.Méthodes de quantification en ALGERIE	36
a. Modèle de TIXERONT (1960)	36
b. Modèle de SOGREAH (1969)	36
c. Modèle de DAMMAK (A.N.R.H. 1982)	37

II.4. QUELQUES TRAVAUX EFFECTUES EN ALGERIE SUR LE TRANSPORT SOLIDE	37
II.4.1. Qulques données sur le transport solide	44
II.4. METHODES DE DEFENCES CONTRE L'EROSION ET LE TRANSPORT SOLIDE :	46
II.4.1. Les interfluves :	46
II.4.1.1. Procédés agrotechniques :	46
II.4.1.2. Restauration des forêts :	47
II.4.1.3. Procédés hydrotechniques :	47
II.4.2. Les cours d'eau	47
II.4.2.1. Revêtement des berges	47
II.4.2.2. Freinage de l'écoulement	48
II.4.2.3. Guidage de l'écoulement	48
II.4.2.4. Aménagements hydrauliques	48
II.5. METHODES DE LUTTE CONTRE L'ENVASEMENT DES RETENUES	48
II.5.1 MOYENS PREVENTIFS	48
II.5.1.1. La chasse par vidange	48
II.5.1.2. évacuation des courants de densité	49
II.5.1.3. Vidanges de fond	50
II.5.2 MOYENS CURATIFS :	50
II.5.2.1 La chasse des sédiments	50
II.5.2.2 Le dragage	51
II.5.2.3 L'extraction par siphonnement	53
II.5.2.4 La surélévation du barrage :	54
CHAPITRE III. MODELISATION ET ANALYSE STATISTIQUE	55
III.1. POSITION DU PROBLEME ET ANALYSE STATISTIQUE	55
III.1.1. Notion de l'échantillonnage	56
III.1.2. Recueil des données	58

III.1.3.Traitement des données	58
III.1.3.1.Homogénéité et stationnarité	59
III.1.3.2.Indépendance et stationnarité	59
III.1.3.3.Détection des valeurs hors position	60
III.2.ELABORATION D'UN MODELE PAR APPROXIMATION DES DONNEES	61
II.2.2.Modélisation	62
III.2.3.Modèle statistique	62
III.2.4.Avantage d'un modèle	62
III.2.5.Estimation des paramètres du modèle	63
III.2.6.Validité du modèle	64
III.2.6.1.Coefficient de corrélation	64
III.2.6.2.Test de corrélation	64
III.2.7.Precision d'une corrélation " Intervalle de prédiction"	65
III.3.REGIME DES DEBITS LIQUIDES	65
III.3.1.Courbe des débits classés	66
III.3.1.1.Construction géométrique de la courbe des débits classés	66
III.3.1.2.Courbe relative à N années	67
III.3.2.Estimation des lois de probabilités des variables causes	68
III.3.2.1.Répartition de la statistique d'observation en classes	68
III.3.2.3.Courbes de fréquences des débits	69
III.3.3.Ajustement à une courbe de distribution théorique des fréquences	69
III.4.ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSIONS	69
III.4.1.ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSIONS PAR MODELISATION STATISTIQUE A UNE CORRELATION	70
III.4.1.1. Etapes à suivre	70
III.4.1.2. apport solide en suspension	70
III.4.1..ORGANIGRAMME DE TRAVAIL	71
III.4.2.ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSIONS PAR MODELISATION STATISTIQUE A DOUBLE CORRELATION :	79

III.4.2.1. Etapes à suivre	79
III.4.2.2. Evaluation du transport solide en suspension	79
III.4.2.3. Organigramme du travail	80
CHAPITRE IV. RESENTATION DE LA ZONE	
D'APPLICATION	85
IV.1. SITUATION DE BASSIN VERSANT DE CHELLIF	85
IV.2. GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT DE CHELLIF	89
IV.2.1. PROFIL EN LONG DE LA TERRASSE DE CHELIFF	91
IV.3. SOLS	92
IV.4. ANALYSE DES PRECIPITATION DU BASSIN VERSANT DE CHELLIF	94
IV.4.1. DISTRIBUTION SPATIALE DES PRECIPITATIONS	94
IV.4.2. PRECIPITATIONS MENSUELLES	97
IV.4.3. PRECIPITATIONS SAISONNIERES	99
IV.5. TEMPERATURE	100
IV.6. RESSOURCES EN EAU SUPERFICIELLE	102
IV.7. VEGETATION ET AGRICULTURE	104
IV.8. INFRASTRUCTURE DE MOBILISATION DES EAU DE SURFACE	106
CHAPITRE V. ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES A L'EXUTOIRE DU BASSIN VERSANT DE CHELLIF	109
V.1. COLLECTE ET DEPOUILLEMENT DE DONNEES	109
V.1.1. Collecte de données et Estimation des apports solides	109
V.1.2. Estimation des apports solides	110
V.4. ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSIONS PAR MODELISATION STATISTIQUE A UNE CORRELATION	111

V.4.1. ESTIMATION DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION A PARTIR DES DEBITS MOYENS JOURNALIERS	111
V.4.1.1. Données sur les sédiments :	111
V.4.1.2. Données sur les débits liquides du cours d'eau :	111
V.4.1.3. Recherche de relation entre débits solides en suspension et débits liquides	111
V.4.1.4. Courbe des débits classés :	112
V.4.1.5. Estimation de l'apport solide en suspension :	112
V.4.1.6. application à l'échelle saisonnière :	115
V.4.2. ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSION A PARTIR DES CRUES	120
V.4.2.1. Sélection de crues :	120
V.4.2.2. Tracés de crues (hydrogramme, solidogramme et turbidigramme)	120
V.4.2.3. Estimation des apports solides à partir des crues (dans leurs intégralités)	122
a. Données sur les sédiments :	122
b. Caractéristiques des échantillons de couples (Q, QS) :	123
c. Relation entre débit liquide et débit solide, $Q_S=f(Q)$:	123
d. Apport solide en suspension :	125
V.4.2.4. Estimation des apports solides par dissociation de crues « en montée et descente de crue » :	125
DONNEES SUR LES SEDIMENTS :	126
V.4.3. DISCUSSION DES RESULTATS :	130
V.5. ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSION PAR DOUBLE CORRELATION	133
V.5.1. DONNEES SUR LES SEDIMENTS	133
V.5.2. EVALUATION A PARTIR DES DEBITS MOYENS JOURNALIERS	134
a) Corrélation concentration solide-débit liquide (première corrélation)	134
b) Etude fréquentielle des débits liquides	137

c) Evaluation des concentrations moyenne interannuelles	137
d) Corrélation entre débit solide-concentration (seconde corrélation)	137
e) Apports solide en suspension	140
V.5.3. EVALUATION A PARTIR DU DEBIT DE CRUE	140
V.5.3.1. A partir de l'intégralité des crues	141
a) Première corrélation	141
c) Concentration moyenne interannuelle	144
d) seconde corrélation	144
e) Apports solide en suspension	147
V.5.4. ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES PAR DISSOCIATION DE CRUES « EN MONTEE ET DESCENTE DE CRUE »	147
V.4.5. DISCUSSION DES RESULTATS	157
CONCLUSION	163
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le transport solide est un phénomène complexe, en particulier, la chute des vitesses à l'entrée de la retenue qui entraîne par la diminution de sa capacité du transport, un dépôt immédiat des alluvions grossiers, par contre les éléments fins, plus légers poursuivent leurs chemins en suspension jusqu'à se déposer en eaux mortes où ils se décantent lentement.

L'intensité de ces phénomènes varie beaucoup avec l'environnement général : la géologie, le degré d'altération des roches, l'hydrologie, le couvert végétal, le climat, etc.... L'ampleur du phénomène est sans commune mesure en zones semi-arides ou dans les régions à climat tempéré. Ainsi donc l'ALGERIE est un des pays les plus touchés par ce phénomène et ces conséquences, alors que l'eau cette richesse incontestable se qualifie par sa rareté et sa mauvaise répartition sur le territoire national.

L'Algérie est un pays semi-aride, voire même Aride (200 à 400 mm de pluie par an) et les ressources en eau renouvelables sont faibles, irrégulières, et localisées dans la bande côtière. Les potentialités en eau du pays sont estimées à un peu moins de 20 milliards de m³, dont 75% seulement sont renouvelables (60% pour les eaux de surface et 15% pour les eaux souterraines). Les ressources non renouvelables concernent les nappes du Sahara septentrional qui seraient exploitées comme un gisement. Les ressources en eau dépendent du climat, elles sont donc peu abondantes et correspondent globalement à 12.4 milliards de m³ pour les eaux de surface et 2.8 milliards de m³ d'eaux souterraines dont 800 millions de m³ dans le Sud (ressources en eau renouvelables). Seuls 6 milliards de m³ d'apport en eau de surface sont mobilisables techniquement. La consommation en eau potable et industrielle en 2020, est estimée de à environ 5 milliards de m³ alors que la mobilisation actuelle est à peine de 2 milliards de m³. Il faudrait donc ici la mobiliser 3 milliards de m³, en excluant les eaux d'irrigations et les fuites dans les conduites soit plus de 11 milliards de m³ d'eau, alors que nos capacités théoriques sont de 6 milliards, un réel défi à relever? [1]. Actuellement l'Algérie avec sa centaine de barrages (toute taille confondue) ne mobilise que 6 10⁹ m³. A cette fin l'agence Nationale des barrages (ANB) compte réaliser, à partir de 2004 et jusqu'à l'horizon 2012, 43 barrages d'une capacité totale de 3,515 milliards de m³ et un volume régularisé global de 1,607 milliard de m³. Au titre des activités de l'année 2003, l'ANB compte à son actif 53 grands barrages en exploitation d'une capacité globale de 6,207 milliards de m³ [2].

Avec un taux d'érosion spécifique se situant entre 2000 et 4000T/Km²/an [3][4][5] chaque année l'infrastructure hydraulique algérienne est amputée d'une capacité de 30 millions de m³ (équivalent à un barrage tel que KRAMIS à Mostaganem) suite à l'envasement [3][5].

L'ingénieur pour conditionner et gérer ces ouvrages, doit tenir compte de la nature et de la quantité des sédiments transportés par l'eau, car les problèmes posés par l'érosion et le transport solide peuvent atteindre une ampleur susceptible de stériliser complètement les efforts d'aménagement des eaux et des rivières. Pour progresser dans cette connaissance il s'est mis à l'école de l'expérience, il a simulé au laboratoire les comportements des phénomènes, il a tenté d'en déduire des lois qu'il tache d'appliquer aux problèmes réels, mais de plus en plus, la modélisation mathématique et statistique prennent le relais, car elles sont moins coûteuses et surtout plus rationnelle dans le temps qui privilégie le calcul et même la conception automatique [6].

Afin d'améliorer la compréhension scientifique du processus érosion et transport solide, une étude de quantification a été entreprise en ALGERIE au cours de la période 1983-1987 dans le cadre d'un projet P.N.U.D consacré à l'étude des ressources en eau dans les pays d'Afrique du nord, (in [7][8]); un premier travail a été effectué sur la base d'une étude de micros - bassins expérimentaux, tel que le projet "RAB 80/O11" ou une étude sur «l'érosion et les transports solides en zone semi-aride » a été entreprise sur le bassin versant de l'oued Isser (Centre du Pays), mais elle s'est avérée insuffisante pour différentes raisons [8].

Devant l'importance que revêt ce problème, nous avons essayé, avec la présente étude d'élaborer un outil facile à mettre en œuvre et directement applicable pour l'estimation des apports solides à l'exutoire des bassins versants; l'avantage qu'elle présente est l'intégration du ruissellement comme facteur principalement influençant l'érosion, en exploitant les données hydrométriques des stations de jaugeages.

La station de SIDI BEL-ATAR à l'exutoire du bassin de CHELLIF a été choisie comme application dans cette étude pour les raisons suivantes :

- La station de SIDI BEL-ATAR contrôle la totalité des affluents drainants le bassin de CHELLIF.
- Le bassin de CHELLIF est le plus grand du NORD du pays (43700Km²) est d'une forte érodabilité.

- Oued CHELIFF contrôlé par cette station est le plus important des oueds algériens (en apports et en longueur).
- Disponibilité des données hydrométriques (notamment en périodes de crues) sur une période assez longue (1972 à 1996 soit 24 ans).
- Le bassin versant de CHELLIF comporte un nombre important de barrage (14barrage)[9][10].

L'estimation des apports solides en suspensions a été menée en utilisant deux approches d'estimation toutes les deux sont basées sur l'utilisation des données hydrométriques recueillies à la station contrôlant l'oued en question, la première approche est l'estimation des apports solide en suspension par modélisation statistique à une seul corrélation "MUC"[11] et la seconde est l'estimation des apports solides en suspension par modélisation statistique à double corrélation "MDC". Les deux approches sont menées initialement par analyse des débits moyens journaliers puis par analyse de crues car elles sont les sources essentielles des apports, le tout est précédé par une synthèse bibliographique sur l'érosion, le transport solide et l'envasement des barrages. La présentation des deux approches et leurs applications sur la zone d'étude est achevée par une conclusion.

EROSION
ET
TRANSPORT SOLIDE

EROSION ET TRANSPORT SOLIDE

I.1.PROCESSUS D'EROSION DANS LES BASSINS VERSANTS :

I.1.1.GENERALITES :

L'érosion est définie comme étant le détachement de fragments ou de particules de sol ou de roche de leur position initiales par l'eau et les autres agents géologiques, tels que, le vent, la glace, etc [12].

I.1.1.1.Les types d'érosions:

Bien que les activités humaines influent particulièrement sur l'érosion des berges ou du fond du lit et quelque fois sur l'érosion des sols, l'homme a subi et ressenti l'effet de toutes les formes d'érosion et de dépôts de sédiments.

L'érosion géologique est celle qui sculpte la surface de la terre, créant des montagnes, des vallées et les plaines d'inondation, dans des conditions naturelles ou relativement perturbées. L'érosion des sols est étroitement liée aux terres agricoles, car par définition, le sol est constitué des matériaux minéraux ou organiques, non consolidés qui sont propre au développement de cultures. A la surface des terres agricoles, forestières ou à pâturages, les particules de sols sont détachées par le ruissellement.

L'érosion du réseau de drainage, c'est l'érosion des berges et du fond de chenaux par l'eau. Un fleuve ou cours d'eau transporte les sédiments provenant du ruissellement de surface des parties amonts par l'érosion géologique ou l'érosion des sols [13].

I.1.1.2.Caractéristiques des bassins versants :

Dans un bassin versant, l'arrachement des particules sédimentaires de leurs emplacements d'origine, leurs déplacements et leur dépôt, dépendent de nombreuses caractéristiques de ce bassin. Ces dernières peuvent être soit physiques, soit hydrologiques et sont fortement interpellantes [13].

- Les caractéristiques physiques d'un bassin qui influent sur l'érosion et le transport solide sont : le relief, la nature géologique, les sols, la végétation, l'occupation des terres, la morphologie du réseau de drainage.
- Les caractéristiques hydrologiques comprennent les facteurs climatiques tels que la précipitation et la température. Le volume et l'intensité des précipitations jouent tous deux un rôle important dans le processus d'érosion par la suite de leurs effets dans la dynamique de détachement des particules par l'écoulement. Les autres caractéristiques hydrologiques à prendre en considération sont : le déplacement des lignes de grains ou les orages convectifs, l'accumulation des neiges et l'évaporation.

I.1.2.LES INTERFLUVES:

Ils ont été définis comme étant tout ce qui n'est pas du réseau hydrographique. Ils représentent en général 95% au plus de la surface totale. Les particules du sol sont délogées par le choc des gouttes de pluie à la surface du sol avec des vitesses atteignant 9 m/s[28]. L'impact des gouttes de pluie à la surface fournit une intense force hydrodynamique au point d'impact. Une fois détachée, la particule est mise en mouvement par le jaillissement de la goutte de pluie sur la surface du sol et entraînée par l'écoulement le long de la pente. L'efficacité de ces processus est déterminée par les facteurs suivants :

I.1.2.1.Le processus d'altération :

Les altérations qui se produisent dans les interfluves conduisent éventuellement à la formation des sols. Quoique l'eau et la roche soient considérées comme des éléments de base du phénomène d'altération, d'autres paramètres interviennent : minéraux, éléments chimiques, matières organiques, température et relief. En bien des endroits, le stade de formation de ces sols est difficile à préciser car les particules de roches sont continuellement soumises à des nouvelles fragmentations par altération. L'altération peut être qualifiée de mécanique, c'est la désintégration de la roche par l'eau et le vent, ou chimique, c'est la décomposition de la roche par l'eau et par l'action chimique.

I.1.2.2. Influence du climat :

Les changements de température, la hauteur de précipitation et le vent ont des effets prépondérants sur l'altération mécanique, la pluie est essentiellement à l'origine de l'érosion par son impact sur les particules du sol qu'elle détache ainsi que des matériaux de surface. Il s'ensuit par conséquent que l'intensité de la pluie est un facteur clé pour déterminer la quantité des sédiments arrachés au sol. Une fois les particules détachées, la quantité de pluie qui ruisselle détermine le mouvement des sédiments des interfluves vers le réseau hydrographique. Les autres facteurs climatiques exerçant une influence sur l'érosion des sols par la pluie et les ruissellements sont, la température, les variations saisonnières des orages, leur localisation, leur fréquence et le régime des vents. L'influence du climat sur l'érosion est difficile à évaluer à cause des variations des paramètres climatiques, aussi bien que de celle des autres caractéristiques des bassins versants.

I.1.2.3. Facteurs topographiques :

Les facteurs topographiques essentiels sont la pente du bassin versant, le relief, la densité de drainage, l'importance des vallées et des plaines d'inondation, l'orientation et la taille du bassin. Les fortes pentes avec un écoulement rapide sont généralement à l'origine d'une érosion excessive dont l'importance dépend de la géologie des sols et de la protection de la couverture végétale. Le relief d'un interfluve est défini comme étant la dénivelée entre point haut et point bas divisée par la distance en ligne droite entre ces deux points. L'orientation du bassin influence l'érosion car dans l'hémisphère nord, les pentes exposées au sud s'érodent plus rapidement que celles exposées au nord [13].

La taille du bassin versant est le facteur le plus communément utilisé pour l'estimation de l'érosion spécifique.

I.1.2.4. Facteurs géologiques et pédologiques :

Ce sont les facteurs géologiques relatifs aux roches de surface qui sont importants en matière d'érosion. Si les roches sont exposées à la pluie, au vent et aux forces de gravités, il peut y avoir désagrégation. La répartition granulométrique des sols, leur perméabilité, la présence de certains éléments chimiques et matières organiques, conditionnent l'érodabilité des sols et tous les chercheurs ont mis en évidence les trois propriétés essentielles pour déterminer l'érodabilité [14] :

- 1) La teneur en argile et limon.
- 2) La matière organique qui assure la cohésion.
- 3) Les caractéristiques minéralogiques et chimiques des sols qui ont un rapport avec la cohésion du sol.

I.1.2.5. Le couvert végétal :

Un bon couvert végétal limite l'érosion en dissipant l'énergie de pluie, favorise l'infiltration et s'oppose à toutes les formes d'érosion. Le couvert végétal peut être classé en trois types généraux : végétation arbustive des zones désertiques, prairies et forêts.

I.1.2.6. L'occupation des terres :

L'occupation des terres, sauf en des lieux éloignés et inhabités est en rapport direct avec les activités humaines qui sont : l'agriculture, l'élevage, les exploitations minières, l'abattage du bois, la construction de routes et l'urbanisation, vu que la suppression de la végétation; entraînent une modification de la densité du couvert végétal qui agira sur les phénomènes d'érosion. Certaines modifications de l'occupation des terres peuvent ne pas modifier l'érosion ou même la réduire comme l'aplatissement d'une zone fortement ravinée.

I.1.3. RESEAU DE DRAINAGE :

L'érosion, le transport solide et le dépôt sont des phénomènes naturels permanents dans les cours d'eau. Dans le haut des bassins, les cours d'eaux sont pentus et les vitesses sont élevées, il se produit une érosion locale et un creusement naturel du lit qui s'atténue, mais les berges sont vulnérables à l'érosion.

Les différences de résistance conduisent à des modifications localisées du réseau hydrographique, les chenaux peuvent s'élargir ou se realigner. L'érosion dans le sens de l'écoulement et éventuellement accompagné d'une déformation à grande échelle du lit.

I.2. LE TRANSPORT SOLIDE

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion. L'eau trouve la puissance nécessaire pour ce transport dans la perte de charge qu'elle subit, ensuite, elle met en jeu deux types de mécanismes : le charriage et la suspension, qui sont les deux types principaux du transport solide (figure I.2.1)

La répartition entre ces deux types de mécanismes dépend essentiellement de la dimension des matériaux, rapportés à la vitesse de l'eau et 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 [15].

Comme valeurs indicatives permettant de délimiter les deux modes de transport, le rapport entre la vitesse d'écoulement sur le lit du cours d'eau V et la vitesse de chute des particules W [16]

$$\frac{V}{W} > 0.1 \quad \dots\dots\dots \text{Début du transport par charriage,}$$

$$\frac{V}{W} > 0.4 \quad \dots\dots\dots \text{Début du transport en suspension.}$$

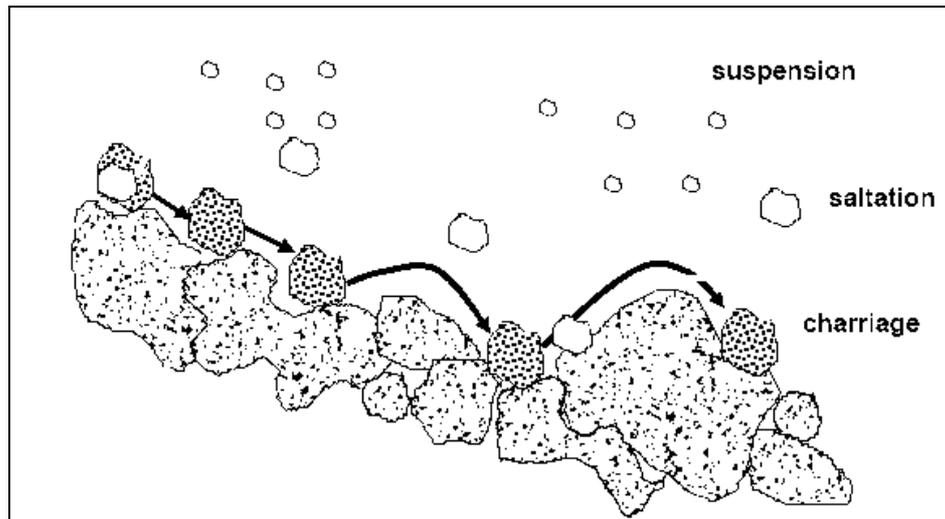


Figure I.2.1 : Mode de transport des sédiments

I.2.1.LE TRANSPORT PAR CHARRIAGE (*BED LOAD*) [17][18]:

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

Ces éléments sont transportés sur le fond par roulement, glissement et par saltation, la direction du mouvement est en gros parallèle au fond et les accélérations verticales sont faibles [15].

Il est difficile de donner une définition universelle acceptable de la charge de fond, mais EINSTEIN a dressé une liste de caractéristiques [15][19] qui y sont généralement associées :

- 1) Il y a échange de particules, permanent et intense entre la charge de 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 au moins souvent.

I.2.1.1.Description du phénomène :

Sur le lit des matériaux sans cohésion, les grains isolés sont soumis aux forces de pesanteur et aux forces hydrauliques [15][18].

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

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, ayants un poids et un coefficient de frottement fini ; ils 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 sur le fond dans le sens de l’écoulement.

La contrainte (composante longitudinale du poids de l’eau) sur le fond de la rivière [15] [19] [20][21][22] est exprimé par:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot J \dots \dots \dots (I.1)$$

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 déstabilisatrice due à l'écoulement à la capacité de résistance au mouvement des matériaux, qui tapissent le fond.

Des critères ont été émis à ce sujet, nous citons parmi eux celui de Meyer-Peter et Muller (1948) et celui de Parker (1982) (cités en [16])

✓ **Critère Meyer-Peter et Muller :**

Il a été établi pour une granulométrie uniforme avec le diamètre moyen d_{50}

- $\tau^o < 0,03$ Pas de mouvement
- $0,03 < \tau^o < 0,047$ apparition des premiers mouvement sans avoir de débit solide
- $\tau^o > 0,047$ Production d'un débit solide par charriage.

✓ **Critère de Parker**

Etabli pour une granulométrie étendue.

- $\tau^o < 0,0876$ Pas de mouvement
- $0,0876 < \tau^o < 0,138$ mouvement de quelque sédiments
- $\tau^o > 0,138$ Production d'un débit solide par charriage

τ^o : contrainte adimensionnelle $\tau^o = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)d_{50}}$ (1.2).

I.2.2.TRANSPORT EN SUSPENSION (SUSPENDED LOAD) :

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 du transport solide sont maintenus en suspensions par la turbulence et la quantité de ces matériaux dépend essentiellement des éléments fins; qui proviennent de l'érosion du bassin versant, suite au ruissellement des eaux de pluies [23].

I.2.2.1.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 et l'épaisseur de la couche limite turbulente s'accroissent également. On arrive finalement à un stade où les particules en saltation atteignent une hauteur au-dessus du fond où les forces ascensionnelles 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.

La formule de W. KRESSER (cité en [7][16][24]), définit le critère d'apparition des phénomènes de suspensions 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.

$$U^2 = 360 \cdot g \cdot D \dots\dots\dots(1.3)$$

Puisque : $U = c \cdot \sqrt{h \cdot J} \dots\dots\dots(1.4)$ et $\tau = \gamma \cdot J \cdot h \dots\dots\dots(1.5)$

On pourra la mettre sous la forme :

$$\tau = 360 \cdot (\gamma \cdot g / c^2) \cdot D \dots\dots\dots(1.6)$$

τ : Tension tangentielle de l'écoulement correspondant à l'apparition de la suspension.

γ : Poids volumique du liquide.

c : Coefficient de CHEZY.

h : Hauteur du liquide.

J : perte de charge régulière (pente de la ligne d'énergie).

I.3. SEPARATION ENTRE SUSPENSION ET CHARRIAGE

Certainement le mode de transport d'une particule solide dans un liquide en mouvement est intimement lié aux caractéristiques physiques de celle-ci (taille et densité). Mais la répartition d'un matériau de granulométrie, transporté par un cours d'eau entre transport en suspension et transport en charriage dépend étroitement des caractéristiques de l'écoulement qui le met en mouvement ; un même matériau peut être en suspension si la turbulence est forte, ou en charriage si celle-ci est faible.

On dit par contre qu'il y'a saltation quand il y'a une suite d'envols et de retombées successives à l'intérieur de la masse liquide d'un grain solide. Donc ces particules en saltation peuvent faire partie alternativement de la charge en suspension et de la charge de fond.

Il est clair que la distinction entre ces deux phénomènes n'est pas simple. Cette distinction est très commode dans l'études du transport solide car les deux phénomènes qui coexistent ne se comporte pas physiquement de la même manière d'ailleurs même au niveau de leurs mesures sur terrain, on procède séparément et de manière différentes (piégeage pour le charriage et mesure des concentration en sédiments pour le transport en suspension) le figure qui suit illustre la séparation entre suspension et charriage

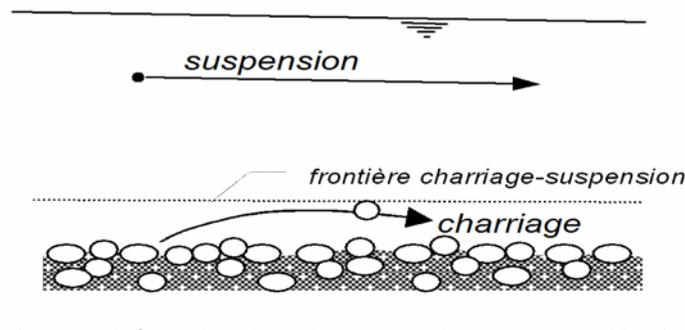


Figure I.3.1. Schématisation des domaines respectifs du transport solide par charriage et en suspension

I.4. CONTRAINTE CRITIQUE DE MISE EN MOUVEMENT

I.4.1 EN GRANULOMETRIE UNIFORME (DIAGRAMME DE SHIELDS):

Shields a montré en 1936 que pour une granulométrie uniforme représenté par le diamètre d_{50} , la loi de mise en mouvement des grains pouvait s'exprimer par une simple relation entre la

contrainte adimensionnelle $\tau^0 = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho) d_{50}}$ (I.7)

Et le nombre de Reynolds particulaire $R_{ep} = \frac{U^* \cdot d_{50}}{\nu}$ (I.8)

La vitesse de frottement $U^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$ (I.9)

τ : Contrainte hydrodynamique, ρ : Masse volumique de l'eau, ρ_s : masse volumique des sédiment, ν : viscosité cinématique de l'eau.

Le diagramme de Shields a été déterminé expérimentalement et calé à partir de mesures de débit solide en canal rectangulaire à fond plat, composé de sédiment pseudo-sphériques et mono-disperses (d_{50} entre 0.36 et 3.44mm). La courbe de Shields représente donc un seuil moyen de contrainte critique [18][25][26][27].

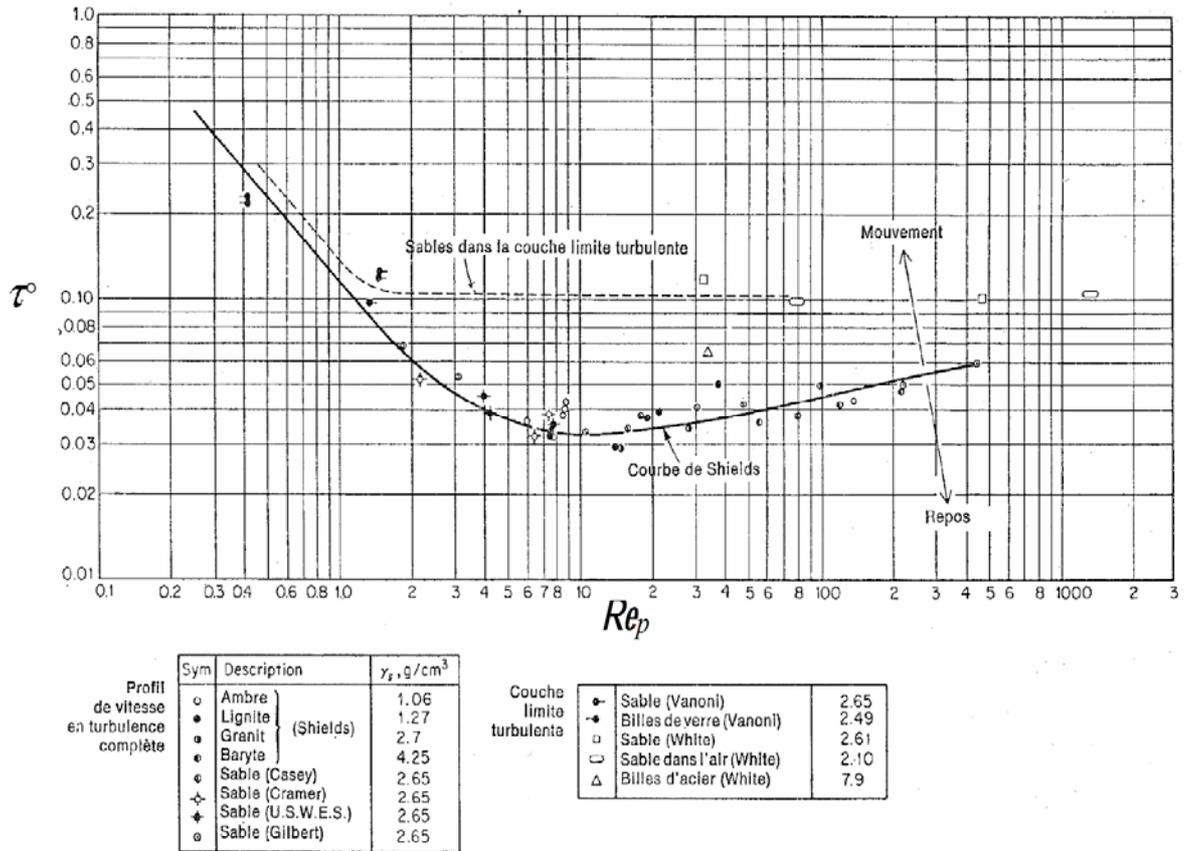


Figure I.4.1: Courbe de SHIELDS (in [26]).

L'emploi de ce diagramme est malaisé car la vitesse de frottement U^* apparaît à la fois en abscisse et en ordonnée. Il est alors plus pratique d'en tirer une expression du diamètre critique en fonction de la contrainte ou du produit ($J.R_h$). Ainsi, pour des diamètres de particules compris entre 1 et 10 mm, plusieurs auteurs prennent :

$$d_c = 10,9 J.R_h + 4 \cdot 10^{-4} \text{ pour } \rho_s = 2,5 \text{ Kg/m}^3 \dots\dots\dots(I.10)$$

$$d_c = 9,9 J.R_h + 5,1 \cdot 10^{-4} \text{ pour } \rho_s = 2,7 \text{ Kg/m}^3 \dots\dots\dots(I.11)$$

d_c : diamètre critique des grains (m).

En granulométrie étendue, on peut être tenté d'appliquer un seuil de mise en mouvement de ce type pour chaque classe de grains prise séparément. Ce faisant, on néglige le phénomène de masquage. Il est alors préférable d'employer l'une des méthodes spécifiques à la granulométrie étendue exposées plus bas. En revanche, l'abaque de Shields convient parfaitement pour déterminer le seuil d'arrêt des particules en mouvement [26].

I.4.2. EN GRANULOMETRIE ETENDUE

En granulométrie étendue, on peut être tenté d’appliquer ce diagramme pour chaque classe de grains prise séparément. Ce faisant, on néglige le phénomène de masquage. En effet, les gros éléments sont plus exposés et les particules fines sont abritées mais soumises à la turbulence créée par les gros. La mise en mouvement d’un grain ne dépend donc pas seulement des conditions hydrauliques et de son diamètre propre, mais aussi largement de l’appui de ce grain sur la surface et donc sur un ou plusieurs autres grains [26].

Buffington et Montgomery (1997) (in [26]) ont réalisé une synthèse de toutes les formules empiriques qui traitent de la contrainte critique de mise en mouvement en granulométrie étendue. Cette synthèse a mis en évidence la diversité des formules et les limites de chacune d’elles. Aucune relation universelle n’existe pour calculer la contrainte critique en cas de granulométrie étendue.

Ainsi donc plusieurs formule de correction de la contrainte critique sont présentées nous citerons parmi elles : la formule de d’Egiazaroff (1965), la formule de Wang (1977), la formule de Gessler (1971) et la formule de Patel et ranga Raju (1999) (citées en [26])

Formule d ‘Egiazaroff

Egiazaroff (1965) (in [26][27]) a élaboré une théorie simplifiée dans le cas des lits plats. Il propose une formule de correction de la contrainte critique de chaque classe granulométrique k:

$$\tau_k^o = \tau_m^o \cdot \left(\frac{\log(19)}{\log(19 \cdot \frac{d_k}{d_m})} \right)^2 \dots\dots\dots(I.12)$$

τ_k^o : Contrainte critique adimensionnelle de la classe k, τ_m^o : contrainte critique adimensionnelle moyenne, souvent prise égale à 0,047, d_k : diamètre représentatif de la classe k (m), d_m : diamètre moyen de l’ensemble des grains, i.e. barycentre des diamètres représentatifs des différentes classes, pondéré par leur contribution en masse (m).

Les diamètres d_k et d_m sont en principe évalués à partir de la courbe granulométrique globale (solides mobiles et couche superficielle du dépôt). Comme ceci est assez compliqué, en pratique on utilise la granulométrie du dépôt. De plus, pour étudier la stabilité générale du lit, Egiazaroff indique que le diamètre d_k doit être remplacé par le diamètre médian d_{50} .

Formule de Wang

Dans la même logique, Wang (1977) (in [26]) a proposé une formule un peu plus récente. Elle a servi de base à Gladki, Michalik et Bartnik (1981) (in [26]) pour proposer une loi de transport et est recommandée par Lin (1993) (in [26]). Cette formule illustre une correction de la relation d'Egiazaroff, courante pour les classes plus fines que le diamètre moyen.

$$\checkmark \quad \tau_k^o = \frac{\tau_m^o}{1,786 \cdot \left(\frac{d_k}{d_m}\right)^{0,947}} \quad \text{pour } (d_k/d_m) < 0,4 \dots\dots\dots(I.13)$$

$$\checkmark \quad \tau_k^o = \frac{\tau_m^o}{\left(\frac{d_k}{d_m}\right)^{0,314}} \quad \text{pour } (d_k/d_m) \geq 0,4 \dots\dots\dots(I.14)$$

I.5. MESURE DU TRANSPORT SOLIDE DANS LES COURS D'EAU [A] [28] [29], [30],[31]

La quantité de sédiments (ou, flux solide, charge solide, débit solide) transportée par un cours d'eau à une section donnée pendant un temps Δt ($\Delta t=1$ jour, 1 mois, 1 année) est composé de la charge en suspension (suspended load) et du transport de fond (glissement ou roulement sur le fond et saltation).

Différentes méthodes de mesures sont possibles :

- **Collectes d'échantillons à hauteur d'une section de mesure** pour suivre dans le temps les variations du transport solide, puis mesures par filtration au laboratoire.
- **Levers topographiques et bathymétriques** de lacs ou de retenues artificielles pour évaluer l'apport global de sédiments pendant une période déterminé (entre deux instants connus).
- **Utilisation de traceurs** de sédiment ou d'éléments dont les signatures permettent d'étudier surtout les taux de sédimentation (exemple Pb^{218} , Cs^{137}).

On s'intéresse ici particulièrement aux mesures sur les cours d'eau. Signalons que la question sempiternelle dans tous les programmes de surveillance du transport solide est de savoir comment peut-on estimer celui-ci avec un coût non prohibitif, sachant que le bilan exact des matériaux en suspension transportés demeure inaccessible ? La majeure source d'erreur dans la mesure de la charge solide d'un cours d'eau est en relation avec la variabilité des concentrations

en sédiment à travers le temps et la possibilité du programme d'échantillonnage de caractériser précisément cette variabilité. Ce dernier point peut être déterminé dans une large mesure par la fréquence d'échantillonnage adoptée.

I.5.1 Mesure du transport en suspension [28][29][30][31]

En pratique, on mesure une concentration en matières en suspension (MES) qui correspond à la quantité de matériaux en suspension recueillie à travers une membrane poreuse (la taille moyenne des pores est en général de 0,2 μm). Elle s'exprime en milligrammes par litre d'eau brute.

Une large gamme d'options est aujourd'hui disponible pour mesurer la quantité de sédiments en suspension transportée par un cours d'eau. La méthode la plus rigoureuse pour obtenir une estimation de la charge solide en suspension consiste à procéder, comme pour la mesure du débit liquide, à une intégration de différentes concentrations et des vitesses sur plusieurs verticales.

Cette technique nécessite un matériel de prélèvement adapté aux caractéristiques de la section de mesure. Le contrôle en continu de la charge solide est possible grâce aux programmes d'échantillonnages intensifs avec des pompes automatiques ou, de manière indirecte, avec l'installation de turbidimètres.

a. Matériel de prélèvements

Outre les prélèvements manuels réalisés dans des récipients généralement en polypropylène, il existe du matériel de prélèvements plus ou moins automatisé qui peut être classé en trois catégories principales :

- ✓ **Les préleveurs instantanés:** Ils sont constitués d'un récipient largement ouvert qui peut se refermer, de façon quasi instantanée, au moyen d'une commande appropriée.
- ✓ **Les préleveurs à pompe:** Un embout formé d'un tube métallique faiblement coudé, fixé sur un lest ou une perche, permet d'effectuer, à l'aide d'un tuyau flexible et d'une pompe, des prélèvements en divers points de la section de mesures.
- ✓ **Les préleveurs par intégration** - Ils prélèvent des échantillons durant un intervalle de temps suffisamment long pour atténuer les fluctuations de concentrations. Ils peuvent selon les modèles, fonctionner point par point ou par intégration le long d'une verticale. Dans ce dernier cas l'échantillon recueilli permet de mesurer la concentration moyenne pondérée par les débits sur toute une verticale. Le plus simple d'entre eux est constitué d'une bouteille à large col fixée à une perche (figure.I.5.1)[32].

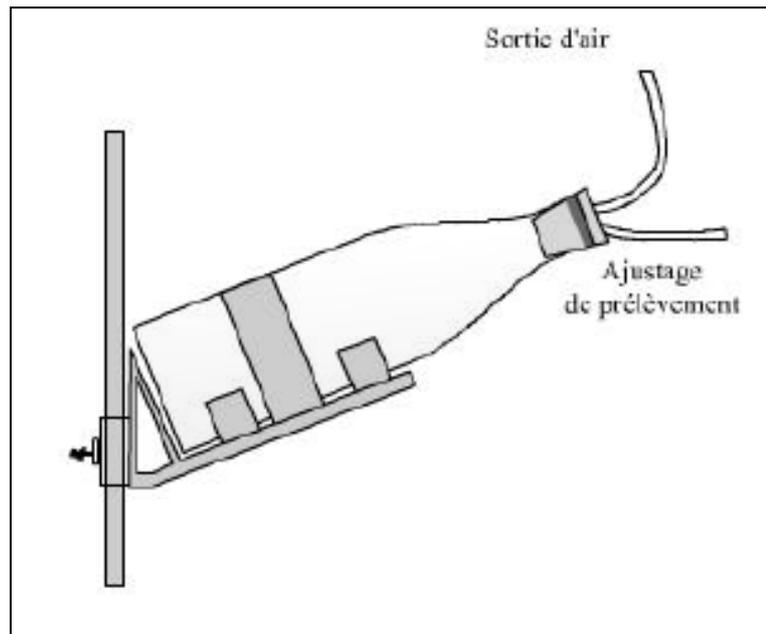


Figure. I.5.1. Bouteille de prélèvements fixée sur une perche avec système d'ajustage [29].

b. Calcul du débit solide en suspension [29]

En considérant la section "s" d'un cours d'eau de largeur L, chaque verticale peut être définie par son abscisse (distance à l'une des 2 rives), et sa profondeur totale P. Si en un point d'une verticale, situé à la profondeur p, sont mesurées à la fois la vitesse du courant V et la concentration C de matériaux en suspension, le débit solide sur la surface "ds" de la section "s" s'écrit : $q_s=C.V.ds$. Le débit solide total sur l'ensemble de la section S s'obtient par intégration :

$$Q_s = \iint_S q_s = \iint_S C \cdot V \cdot ds = \int_S C \cdot V \cdot dl \cdot dp \dots\dots\dots(I.15)$$

Avec : Q_s : débit solide du cours d'eau [kg/s] ;

La concentration moyenne dans la section est définie par le rapport :

$$C_m = Q_s / Q_L \dots\dots\dots(I.15)$$

$$Q_L \text{ Le débit liquide total sur la section } s : Q_L = \iint_S V \cdot ds \dots\dots\dots(I.16).$$

Cette méthode de mesure de la quantité de sédiments transportés par un cours d'eau est évidemment très coûteuse. Les mesures sont donc généralement simplifiées. Elles sont surtout utiles pour valider les protocoles d'échantillonnages des réseaux de surveillance du transport en suspension.

c. Mesures en continu

L'échantillonnage en continu est en fait basé sur deux types de mesures :

- **Mesure des matières en suspension** : à l'aide de préleveur d'échantillon automatique réglé pour un certain pas de temps. Ce type d'instrument comprend un dispositif de programmation, une pompe, un tuyau d'aspiration et de transfert entre la crépine (au bout) et la série de flacons. Pour être significatifs, les prélèvements doivent être proportionnels au débit ou effectués à des intervalles de temps prédéterminés lorsque le débit est constant. Si le débit est variable, on peut coupler le préleveur à un débitmètre. Dans ce cas, le préleveur peut être programmé pour fonctionner selon un volume prédéterminé.
- **Mesure de la turbidité** : à l'aide de turbidimètres. La turbidité correspond à la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de particules en suspension. Elle se mesure en faisant passer un faisceau lumineux à travers l'échantillon à tester et en déterminant la lumière qui est diffusée par les particules en suspension. Cette mesure nécessite en générale un calibrage préalable. Les appareils de mesure de turbidité (turbidimètres) sont très nombreux sur le marché.
- **La turbidisonde** (figure I.5.2) se compose d'un corps métallique de forme aérodynamique doté d'ailettes de queue pour s'orienter selon le courant. Un tuyau collecteur de diamètre approprié émerge de la tête du moulinet. Un tuyau d'échappement orienté vers l'aval permet d'évacuer l'air du récipient qui se trouve dans le corps métallique. L'opérateur commande électriquement des soupapes placées en tête pour déclencher et interrompre l'échantillonnage [31].

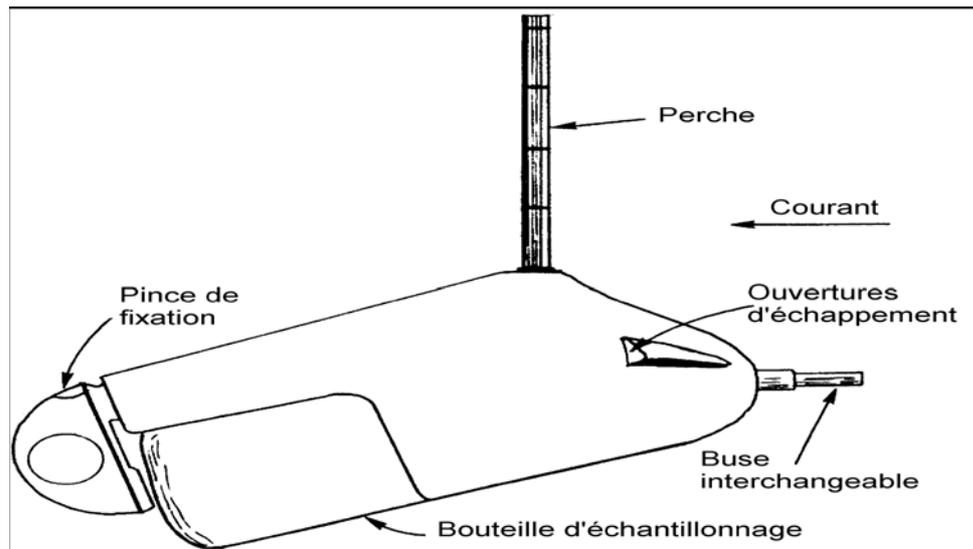


Figure I.5.2. Turbidisonde [31]

- **jauges optiques, à ultrasons ou nucléaires** (figure I.5.3) constitue une méthode de détermination sur place de la concentration de sédiments en suspension. Le faisceau de rayons lumineux, de rayons-X, d'ultra-sons ou de radiations nucléaires émis par une source d'intensité constante est dispersé et/ou absorbé par les particules en suspension. La diminution de l'intensité du faisceau mesurée par un détecteur ou capteur approprié situé à une distance constante de la source est proportionnelle à la concentration des sédiments à condition que les autres caractéristiques de l'eau et des sédiments (composition chimique, minérale), restent inchangées.

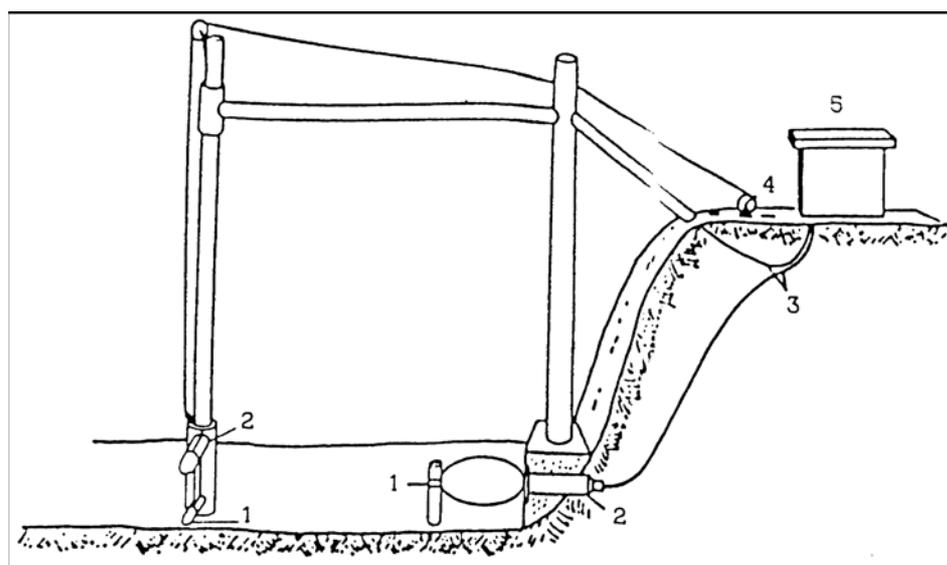


Figure I.5.3. Schéma d'une jauge [31]

I.5.2 Mesure du transport de fond

Depuis près de 50 ans, de nombreux chercheurs ont tenté de mettre au point des échantillonneurs de charge alluviale de fond (charriage). Il en existe aujourd'hui de nombreux types. Parmi les équipements de mesures actuellement disponibles on peut décrire très sommairement :

- **Les nasses** : constituées d'une poche de grillage montée sur un cadre métallique qui laisse passer les matières en suspension, mais retiennent les matériaux grossiers. Le plus connu et le plus utilisé dans le monde est le préleveur Helley-Smith (Figure I.5.4) dont il existe de nombreux modèles, fonction notamment de la granulométrie des sédiments à prélever et des vitesses d'écoulement. [30]

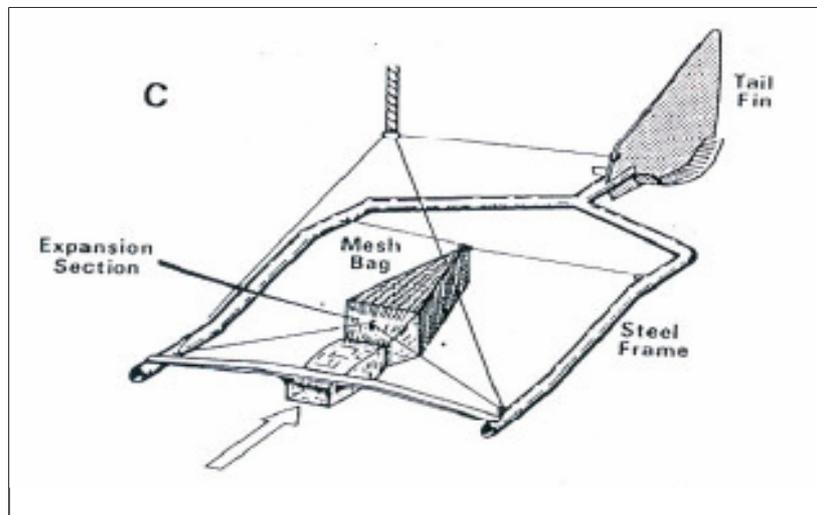


Figure I.5.4. Exemples d'échantillonneurs Helley- Smith[30]

- Les pièges constitués de récipients très aplatis de section longitudinale triangulaire dont le bord correspondant au sommet du triangle est dirigé vers l'amont. A l'opposé dans la partie supérieure aval du récipient, une série de petites cloisons inclinées vers l'aval constitue le piège (Figure I.5.5) où viennent se prendre les matériaux (sable essentiellement) [30][28].

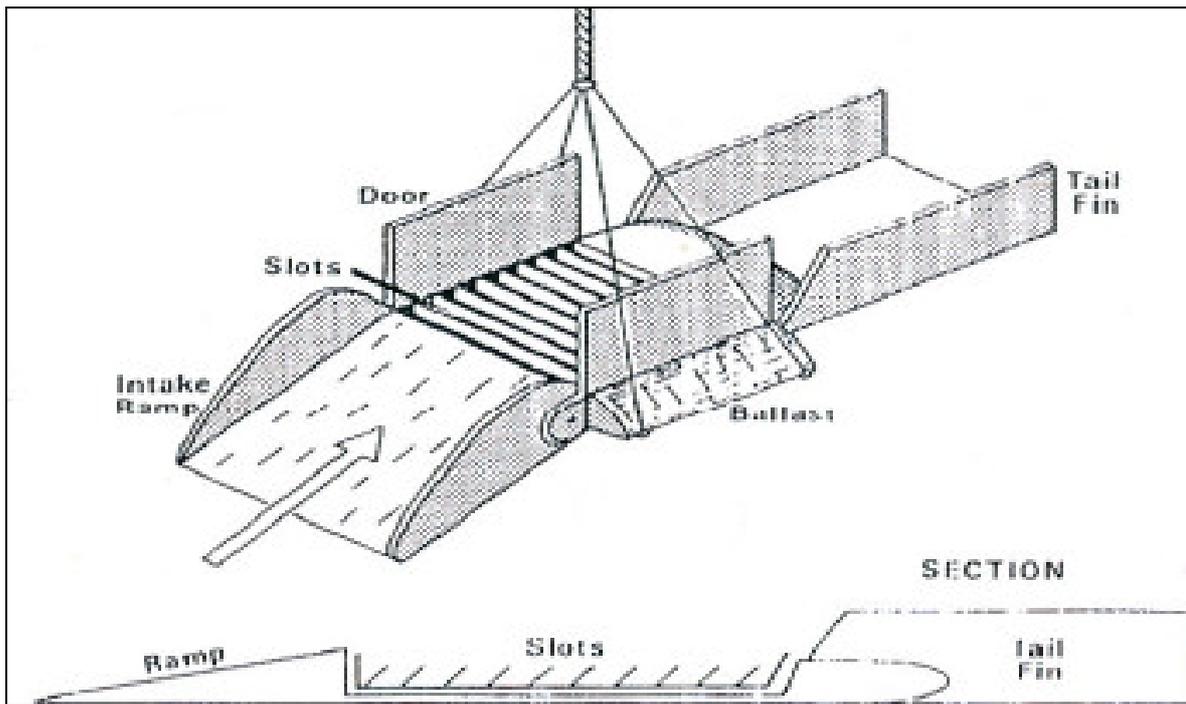


Figure I.5.5. Echantillonneurs de charge de fond (piège)[30].

- **Les sondeurs à ultrasons** permettent de suivre le déplacement des dunes dans les fonds sableux à faibles pentes.

Hors des parcelles et des petits bassins versants dont les exutoires peuvent être équipés de pièges ou de fosses à sédiments, la mesure du transport de fond reste imprécise. Les dispositifs communément utilisés perturbent en effet de manière non négligeable le régime du transport de fond.

Quel que soit le type d'échantillonneur utilisé, ce principe de mesure de la charge de fond en transit pose de nombreux problèmes [30]:

- Suivant le lieu de mesure (généralement un transect perpendiculaire à l'écoulement général), on peut ne rien mesurer ou mesurer un transport énorme (si l'on est dans la zone de propagation journalière de la dune).
 - ⇒ Une bonne stratégie d'échantillonnage est donc fondamentale
- Il est inadapté aux grands cours d'eau car les échantillons sont très petits (quelques litres alors que le débit solide journalier peut être de plusieurs centaines voire milliers de m³)

I.6 - TRI GRANULOMÉTRIQUE, PAVAGE

En considérant le cours de la rivière de l'amont vers l'aval, la pente décroît (en moyenne), ce qui entraîne un dépôt des éléments les plus grossiers dans le cours amont alors que les éléments les plus fins continuent à transiter vers l'aval. Ainsi, dans les parties amont, l'étendue granulométrique est large (par exemple blocs, cailloux, graviers, sables et même limons). Lorsque la plaine est atteinte, l'étendue granulométrique se resserre. C'est la raison pour laquelle, les formules de transport solide, qui ne font intervenir qu'un paramètre de taille médiane des sédiments, y donnent a priori de meilleurs résultats.

Dans les parties amont où les rivières sont torrentielles, le charriage de tous les jours enlève les parties fines, et laisse en surface une couche de matériaux grossiers, qui constitue peu à peu une protection des sédiments sous jacents. D'autre part, en observant bien le rôle de chaque grain en fonction de sa forme, et de sa position, on constate que les gros blocs jouent un rôle déterminant. Ils se comportent en fait comme des seuils qui abritent des grains plus petits à leur amont et qui induisent une petite fosse à leur aval, laquelle se remplira en décrue de petits grains. A la prochaine crue, les grains amont seront protégés et les grains aval seront emportés, même s'ils ont une taille égale. Donc, certains gros grains en fonction de leur position et de leur taille ont un rôle structurant pour l'ensemble des classes de taille et permettent que s'organise une armature de surface, appelée pavage. Seule une forte crue pourra détruire la couche pavée et permettre la saturation en débit solide. Lorsqu'une rivière est pavée, le transport solide peut être très inférieur à celui qui est calculé sans en tenir compte, sauf toutefois pour les très gros épisodes.

Le pavage affecte plus particulièrement les rivières à pente forte ou moyenne, et par voie de conséquence, le pavage affecte peu les rivières à sable. Sur ces dernières, les formules de transport solide donnent une approximation correcte du transport réel [33].

**CONSEQUENCES,
METHODES DE PREVISION
ET DEFENSES**

CONSEQUENCES, METHODES DE PREVISION ET DEFENSES

II.1. DISTRIBUTION DU TRANSPORT SOLIDE SPECIFIQUE À TRAVERS LE MONDE :

Pour l'ensemble du monde, tout continent confondus, la quantité totale des sédiments évacués en suspension est aujourd'hui d'un peu plus de 13000 de tonnes par an pour une surface de drainage d'environ 86 millions de Km²[32]. La répartition des sédiments est toute comme celle de l'eau ou des grandes distributions climatiques, inégalement répartie sur la planète. Des îles du pacifique ≥ 30 T/Km²/an on remarque une forte érosion mécanique en HIMALAYA 380 T/Km²/an (une moyenne) contre environ 50 T/Km²/an en Europe [32]

Tableau.II.1.1. Bilan Sédimentaire à l'échelle continentale (tiré de GLEIR 1993 cités en [31])

	Charge sédimentaire (t/Km ² /an)	Masse de sédiment 10 ⁶ tonnes/an
Europe	49.9	230
Afrique	32.6	500
Asie	376.7	6349
Amérique du nord	83.5	1469
Amérique du sud	99.9	1788
Australie et Océanie	588.8	3062
Reste du monde	7.5	84
Total	116	13 475

Un second élément pertinent consiste à comparer par les grands fleuves de la planète, ceci permet de mieux représenter l'importance du charriage par les fleuves le long desquels vivent des millions de gens.

Tableau.II.1.2. Bilan sédimentaire à l'échelle continental [32]

Nom	Pays	Surface du BV (10 ⁶ Km ²)	Charge sédimentaire (t/Km ² /an)
Haihe	Chine	0.05	1620
Huanghe	Chine	0.77	1403
Gange-Brahmaputre	Bangladesh	1.48	1128
Indus	Pakistan	0.97	454
Yiangzijiang	Chine	1.94	146
Orinoque	Venezuela	0.99	212
Mékang	Vietnam	0.79	203
Amazone	Bresil	6.15	146
Mississippi	USA	3.27	107
Tigre-euphrate	Irak	1.05	50
Nil	Egypte	2.96	38
Niger	Nigeria	1.21	33
Amour	Russie	1.85	28
Zair	R.D. Congo	3.82	11

Sur ce terme la contribution des îles Océaniques est de loin la plus importante car elle représente environ 3000Millions de tonnes de sédiments par contre 62 millions seulement pour l'Australie [32].

II.2.ALLUVIONNEMENT DES RETENUES :

En aménageant les cours d'eau par la construction des barrages on modifie le transit des sédiments qui se piègent dans les eaux calmes des retenues qu'elles comblent progressivement avec le temps.

A l'entrée d'une retenue, le transport de ces sédiments diminue par suite de la chute de la vitesse du cours d'eau ; les plus grossiers s'y déposent immédiatement, quand aux plus fins ; plus légers, continuent leurs trajets en suspension jusqu'à se déposer aux eaux mortes, où ils se décantent lentement là où les vitesses d'écoulement deviennent nulles «au pied amont du barrage» [34].

Ce phénomène constitue, actuellement une des préoccupations majeures qui met les services d'exploitation, de gestion et de mobilisation des ressources hydrauliques devant des difficultés; du fait que les procédés de luttés préconisés sont sous deux formes : préventifs (reboisement, décantation) ou curatif (surélévation, construction de nouveaux barrages ou évacuation de vases)[13][24][35].

II.2.1.MECANISME DE L'ENVASEMENT :

La construction de barrages modifie les conditions d'écoulements du débit solide, que ce soit pour le charriage ou pour le transport en suspension.

II.2.1.1.Comportement des sédiments grossiers:

C'est les sédiments transportés par charriage ; ils s'y déposent en forme d'un delta qui s'érige à l'embouchure du réservoir et progresse vers le barrage au fur et à mesure des apports (figure.II.2.2) [36].

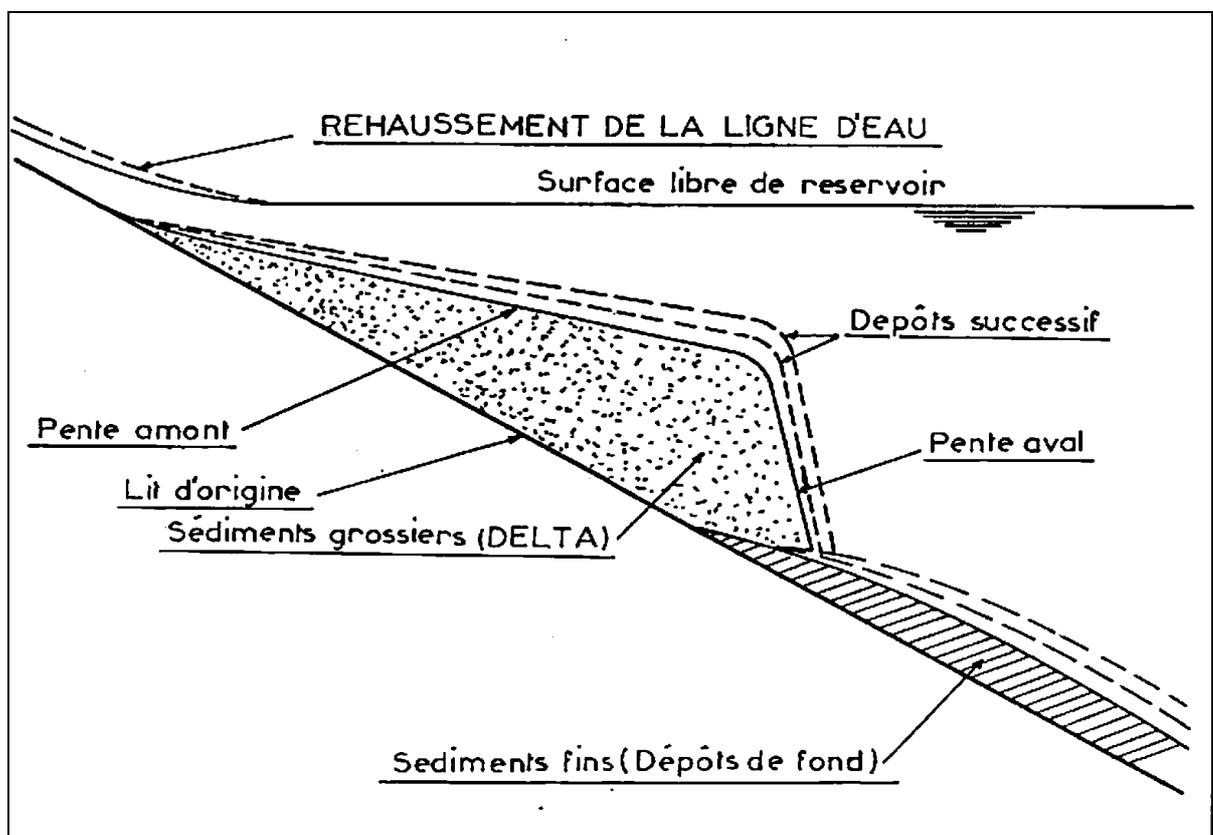


Figure.II.2.1 Comportement des sédiments grossier

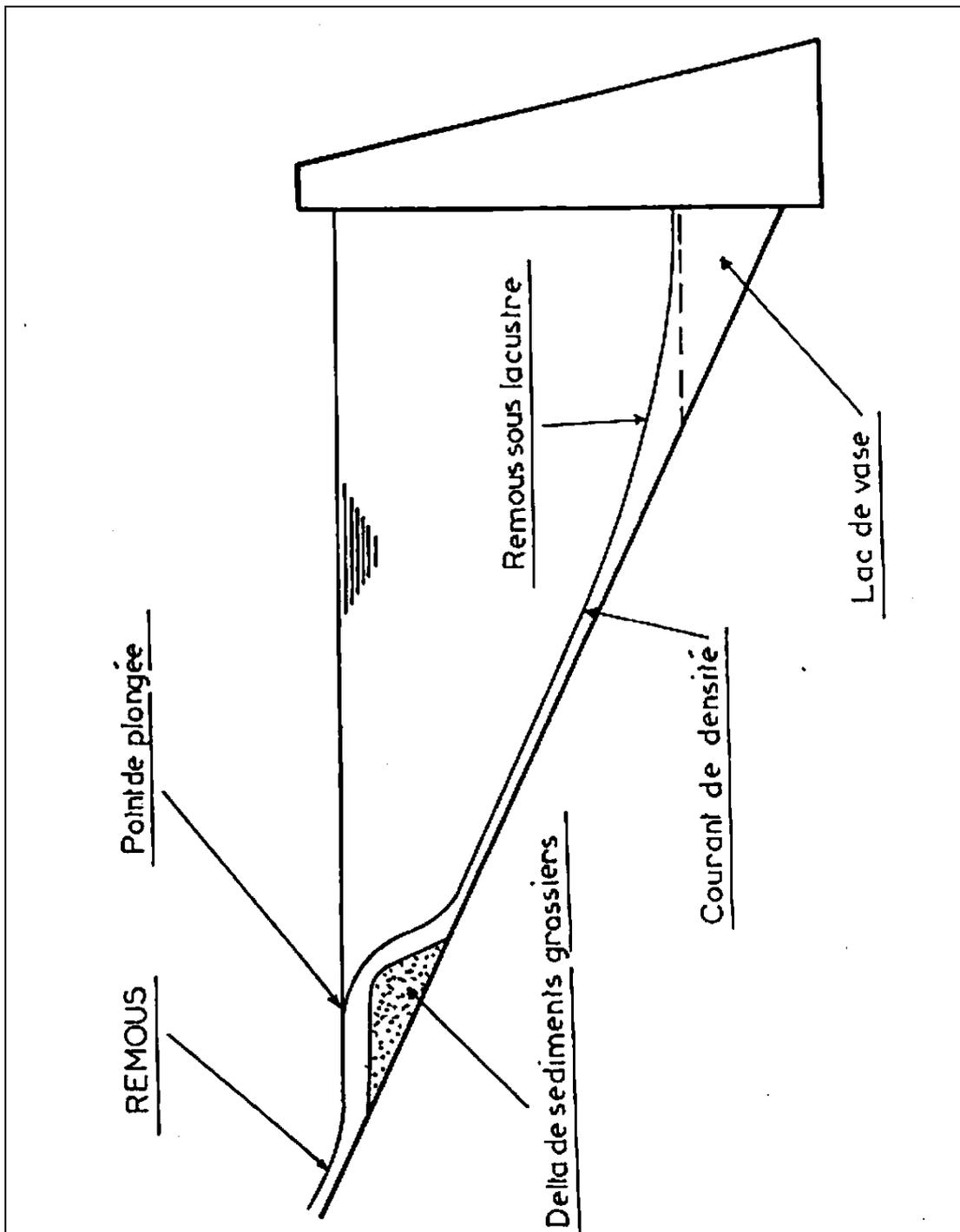


Figure.II.2.2 Comportement des sédiments fins

II. 2.1.2. Comportement des sédiments fins :

Ces matériaux sont transportés en suspension plus loin dans la retenue, pour se déposer au fond de cette dernière en couches relativement planes. Leur dépôt se fait, soit par décantation sur place, soit après leurs transports par les courants de densités (figure.II.2.2) [36].

DUQUENNOIS [37] a distingué qu'ils sont en fonction du régime d'écoulement en amont [19] :

- S'il est torrentiel ; les eaux chargées plongent au fond de la retenue et s'y écoulent sous forme d'un courant de densité
- S'il est fluvial ; il ne se forme de courant de densité que pour des débits et des concentrations dont les apports sont suffisamment élevés.

Si ces apports sont faibles et en outre à des températures voisines à celle de la retenue le courant de densité ne se forme pas, et les sédiments fins sont tributaires de la gravité, de la turbulence et des écoulements dans la retenue. Une fois déposés au fond ; les vases sont susceptibles de former des coulées boueuses vers les parties les plus basses du réservoir, lorsqu'elles sont stabilisées et en absence de mouvement dans celui-ci ; les dépôts se consolident en se débarrassant de leurs eaux interstitielles [4][36].

Ce sont essentiellement les mesures de la charge en suspension des affluents qui permettent d'évaluer la charge d'un courant de densité dans la retenue. Les observations faites vont de 0.7 à 36.4 g/l [0.026 à 1.374 %] pour des bassins versants en Algérie et de 0.3 à 27.8 g/l [0.011 à 1.049 %] aux Etats-Unis, selon Thévenin (1960). Marzouki (1992) mentionne des observations faites sur 17 barrages en Maroc allant jusqu'à 144 g/l [5.434 %], avec des moyennes de 3 à 21 g/l [0.113 à 0.792 %]. Des concentrations de sédiments jusqu'à 400 g/l [15.094 %] ont été mesurées dans la rivière jaune en Chine, valeur donnée par Hu (1995) (in [36]).

II.2.2.EFFET DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES :

Les principaux facteurs dont dépend l'alluvionnement des retenues à savoir : « les apports solides, le temps de rétention de ces apports, la densité des dépôts et le volume des sédiments déposés » réduisent la capacité de stockage disponible et affectent directement la durée de vie de l'ouvrage. Les eaux très chargées en matériaux solides compromettent le bon fonctionnement des infrastructures hydrauliques (prises d'eau, réseaux d'irrigations, ouvrages hydroélectriques...) [19][34]. L'envasement des retenues est sans aucun doute la conséquence la plus dramatique de l'érosion des bassins versants engendrant des pertes non négligeables des

capacités de nos barrages, surtout dans un pays comme le notre ; où l'eau cette richesse incontestable se distingue par son insuffisance et sa mauvaise répartition.

II.2.3. AMPLEUR DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES EN ALGERIE :

Les travaux de DEMMAK 1982 ; sur l'érosion et le transport solide, ont montrés que le taux d'érosion spécifique atteint des valeurs les plus élevées du Maghreb dépassant 2000 t/Km²/an, sur la plus part des bassins de l'ATLAS TELLIEN (oued RHIOU, Oued SLY, MAZAFRAN, ISSER, SOUMAM...) et de 4000 t/Km²/an sur la chaîne côtière de DAHRA ; soit environs 180 millions de tonnes de sols érodés par an [3]. Ces énormes quantités ont des conséquences directes sur l'importance des pertes en capacité de nos barrages, le même auteur estime à 600 millions de mètres cubes la perte en capacité des retenues durant les quarante (40) précédentes années [3].

Prés de 2000 t/km²/an de sédiments sont arrachés des bassins versants de l'Atlas Tellien et que 120 millions de tonnes de sédiments sont rejetés annuellement à la mer [38][39]. L'envasement des barrages est la conséquence de cette érosion. Il représente 11.2 % de la capacité initiale des barrages recensés en Algérie. Trois barrages (Foum el Gherza, Biskra et El Guers) ont plus de 50 % de vases. Le taux d'envasement est supérieur à 50 % en zones arides et 30-40 % en zones telliennes. L'envasement annuel moyen est évalué en 2002, à 34 millions de m³/an [38].

Le tableau (II.2.1) nous donne un petit aperçu sur la durée d'envasement total de quelque barrages algérien et par conséquence une idée sur l'importance du phénomène en Algérie et le tableau (II.2.2) donne une idée sur la situation de nos barrages de point de vu capacité suivant certaines périodes d'exploitation.

Les retenues étants souvent irremplaçables, les perspectives de surélévations très réduites et les techniques de dragages très onéreuses et très consommatrices d'eau ; seule une exploitation dynamique rationnelle pourra contribuer à maintenir une capacité de régularisation satisfaisante [7].

Tableau II.2.1 : Envasement de quelques barrages Algérien [40]

Bassins	Oued	Barrage	Superficie du bassin (km ²)	Pluie moyenne (mm)	Teneur en MES Te (g/l)	TS (t/ha/an)	Durée d'envasement total
Saf Saf	Saf Saf	Zardezas	300	863	5,0	12,50	20 ans
Garaet el Tarf	Guïess	Foum el Guïess	156	520	9,3	6,70	27 ans
Djen Djen	Djen Djen	Erraguène	134	1350	23,0	22 0	3 ans
Chellif	Mina	Bakhadda	1300	500	5,6	3,10	16 ans
Chellif	Cheliff	Ghrib	2800	345	33,0	1 7	29 ans

(Source : Y. Veyret, 1998 (158)(in [40])

Te représente les teneurs moyennes en matières en suspension (MES) des eaux arrivant au barrage

TS la dégradation spécifique est le volume de l'érosion moyenne annuelle dans le bassin versant.

Tableau II.2.2: Statistiques sur la sédimentation des barrages algériens en exploitation [6]

Barrage et période D'exploitation	surface de BV (Km ²)	capacité (Hm ³)	Apport moyen (Hm ³)	Capacité résiduelle (Hm ³)	Volume envasé (hm ³)	envasement spécifique m ³ /Km ² .an	OBS.
1- Ghrib (1935-1986)	23.300	278.23	153	165.6	112.6	111	
2- Djouf torba (1969-1986)	22.000	350	200	33.6	33.6	85	
3- Boughzoul (1934-1986)	20.500	11.7 33.0*	83	6 20.3*	22.3	21	*
4- Bou hanifia (1940-1986)	7.000	73	137	21.4	21.4	59	
5- S.M.B.A (1978-1986)	4.890	235	120	225.6	9.4	213	
6- K'sob (1940-1986)	1.310	11.6	50	12.2	12.2	198	*
7- Bakhdda (1936-1986)	1.300	37.6 50.3*	73	- 45.1*	8.1	122	*
8- Foum el ghera (1950-1986)	1.28	74	21	26.5	20.5	433	
9- Beni Bahdels (1940-1986)	1.016	63	74	56.5	6.5	136	
10- Oued fouda (1953-1986)	800	225	94	132.7	92.3	2098	
11- La Cheffia (1965-1986)	575	175.68	140	168.4	7.3	573	
12- Zardesas (1936-1986)	345	14.9	53	- 20.2*	16.5	938	*
13- Foum el gueis (1939-1986)	156	3	12	1.6	1.4	187	
14- Mefrouch (1936-1986)	90	16	18	14.6	1.4	648	
15- Hamiz I (1890-1914) Hamiz II (1935-1986)	139 139	14.6 21	54 54	12.31 16.4	2.05 4.6	560 649	

* Après surélévation.

(Source ANB 1997)

II.3.METHODES DE PREVISION DES APPORTS SOLIDES :

Plusieurs méthodes sont utilisées pour prévoir la quantité des solides aux retenues. La plus part d'entre elles se fondent, soit directement soit indirectement sur des mesures par prélèvement d'échantillon, ou sur des levés topographiques dans les retenues. Ces méthodes sont classées en trois types [7][13]:

- 1) Méthodes empiriques.
- 2) Application des équations du transport solide.
- 3) Méthodes par modélisation.

II.3.1. METHODES EMPIRIQUES :

Ces méthodes sont très utilisées pour la prévision car ce sont des procédés qui s'appuient sur la prise en compte de tous les processus complexes rencontrés dans le bassin versant. Elles reposent sur des données expérimentales recueillies au bassin. En conséquence, les avantages de ces méthodes sont : qu'elles sont faciles à comprendre; on leur trouvera des inconvénients, si les caractéristiques hydrologiques et physiques agissant sur certaines des données expérimentales utilisées pour établir les relations empiriques sont aléatoires et ne peuvent être correctement exploitées en vue des prévisions attendues. Il est à signaler que l'appel à des études statistiques pour l'établissement des méthodes pour une prévision plus générales est appréciable [25].

II.3.2. METHODES D'APPLICATION DES EQUATIONS DU TRANSPORT SOLIDE :

On utilise de nombreuses formules de transport solide pour estimer le taux d'apports solides. Toutes ces formules donnent une évaluation du débit solide total ou du débit solide de charriage dans des conditions d'écoulement bien précises. Les équations prédisant les changements dus aux forces érosives sont généralement désignées par l'expression « équation de transport de fond ». La plus ancienne entre elles, est celles de BOYS(1879), suivie par la suite des équations de nombreux chercheurs dont celle développée par EINSTEIN (1956) (in [7][15][34][22]).

Pour la prévision à l'aide de ces formules il faut disposer des données du terrain sur l'hydraulique du chenal et matériaux du lit, qui sont des facteurs primordiaux. Le type de données disponibles sont très souvent déterminants pour choisir une équation convenable [15].

Parmi ces formules nous citerons :

- Formule de BOYS (1879)
- Formule de MEYER-PETER et MULLER (1948) « pour le transport par charriage »
- Formule d'EINSTEIN-BROWN (1950) « pour le transport par charriage »
- Formule de FRILINK « pour le transport par charriage »
- Formule de VELIKANOV (1953) « pour le transport en suspension »
- Formule d'ENGLAND et HANSEN (1967) « pour le transport total »
- Formule de GRAF (1968) « pour le transport total »
- Formule de SHEN et HUNG (1971) « pour le transport total »
- Formule de YANG (1979) « pour le transport total »
- Formule de RAJU et AL (1981) « pour le transport total »
- Formule de BROWNLIE (1981) « pour le transport total »
- Formule de KARIM ET KENNEDY (1981) « pour le transport total »
- Formule de VAN RIJN (1984) « pour le transport total »
- Formule de KARIM ET KENNEDY (1990) « pour le transport total »

(Ces formules sont citées en [15],[16],[18],[19],[20],[22],[26],[27],[30],[33],[41],[42],[43],[44],[45],[46],[47],[48],[49],[50],[51])

La difficulté essentielle pour l'ingénieur sera la sélection d'un petit nombre de formules et d'adopter la moyenne des résultats obtenus tout en excluant des résultats douteux; à cause de ce l'usage de ces formules reste limité quelque soit leur justifications physiques, nécessitant une vérification de leur résultats avec des mesures directes du débit solide [15].

Nous citons ici quelque formule d'évaluation du transport solide :

a. Formule de charriage de Meyer-Peter et Muller (citée en [26][27][47][48]) :

La très classique formule de Meyer-Peter et Muller (1948) a été établie à partir d'une multitude de mesures en canaux dans les conditions suivantes:

- débit liquide par unité de largeur comprise entre 2 et 4000 m³/m.s;
- tirant d'eau compris entre 0,01 et 1,20m;

- écoulement uniforme avec une pente d'énergie comprise entre 0,4 et 20 mm/m;
- transport par charriage seul;
- granulométrie uniforme de diamètre compris entre 0,4 et 30 mm;
- masse volumique des sédiments uniforme comprise entre 1250 et 4200 kg/m³.

Cette loi lie la capacité de transport par unité de largeur à la différence entre les facteurs de Shields local et critique. Dans les expériences de Meyer-Peter et Muller, le seuil de mise en mouvement adimensionnel est de $\tau_c = 0,047$.

$$q_s = \frac{8 \cdot \rho_s}{g(\rho_s - \rho)\sqrt{\rho}} (\rho \cdot g \cdot h \cdot J - 0,047(\rho_s - \rho)gd_{50})^{3/2} \dots\dots\dots(\text{II.1})$$

q_s débit solide par unité de largeur en Kg/m/s

b. Formule de Vélikanov (citée en [41]):

Formule du transport solide en suspension basée sur une approche énergétique, et s'applique mieux aux rivières large à lit sableux. Simplifiée cette formule donne le débit solide en suspension (Kg/m³):

$$Q_s = \eta \left(\frac{\rho \cdot \rho_s}{\rho_s - \rho} \cdot \frac{U}{w} \cdot J \right) \cdot Q \dots\dots\dots(\text{II.2})$$

Ou :U est la vitesse moyenne d'écoulement, w est la vitesse de chute moyenne d'une particule solide considérée, Q est le débit liquide et η est le nombre de Vélikanov traduisant la capacité de transport de l'écoulement et varie pour un écoulement naturel de $7 \cdot 10^{-4}$ à $7 \cdot 10^3$.

c. Formule de transport total de Bagnold (in [26][47][48]) :

Cette formule s'appuie sur le concept de puissance de l'écoulement ("stream power"). Bagnold (1966) l'obtient en exprimant la relation entre le travail absorbé par le transport et l'énergie disponible dans l'écoulement. Cette loi de transport total ne comporte pas de seuil; les deux termes entre parenthèses expriment respectivement la partie en charriage et la partie en suspension.

$$q_s = \frac{\rho_s}{\rho \cdot g} \cdot \tau \cdot U \left(\frac{e_b}{\text{tg}\alpha} + 0,01 \frac{U}{w} \right) \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

$\tau \cdot U = \rho \cdot g \cdot J \cdot q$: “stream power” par unité de largeur (kg/s^3), e_b : coefficient d’efficacité du charriage, $\text{tg } \alpha$: ration de la contrainte tangentielle sur la contrainte normale (borné entre 0,32 et 0,75) et w : vitesse de chute des particules en suspension (m/s).

" e_b " reste à peu près constant, avec une valeur proche de 0,17 [26].

d. Formule de transport total de Engelund et Hansen (in [26][43][47][48][50])

La loi d’Engelund et Hansen (1967) est inspirée du concept de puissance de l’écoulement introduit par Bagnold. Pour l’élaboration de cette formule, les auteurs tiennent compte de l’éventuelle présence de dunes par le biais d’une relation de perte d’énergie légèrement différente de celle de Manning-Strickler; il n’y a donc pas lieu de faire appel à une correction de la force tractrice.

Elle a été validée sur de nombreuses mesures expérimentales (canal de 50m de longueur pour 2,40m de largeur, sédiments de 0,19 à 0,93 mm) et de terrain. Les auteurs précisent son domaine de validité et ses caractéristiques:

- écoulement uniforme ;
- paramètre de Shields $0,15 < \tau^{\circ} < 2,5$;
- $d_{50} > 2\text{mm}$ et granulométrie assez peu étendue: $(d_{84}/d_{16})^{1/2} < 2,0$.

$$q_s = \rho_s \cdot \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho \cdot g}} \cdot c^2 \cdot \tau^{\circ 5/2} \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

c : coefficient de frottement de Chézv ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$).

Remarque :

Les formules de transport solide, de même que de nombreuses autres formules disponibles dans la littérature sont entachées d’une très forte marge d’erreur liée à leur caractère empirique et à l’évaluation des différentes variables : pente, granulométrie,... Or, l’évaluation de ces paramètres est extrêmement délicate car très variable d’une section à l’autre, d’un point à l’autre sur une même section. Les résultats donnés par ces formules ne doivent donc être pris que comme des ordres de grandeur des phénomènes [47].

II.3.3. Méthodes de modélisation :

Deux sortes de modèles sont à distinguer: mathématique et physique.

a. Le modèle mathématique:

Grâce à l'ordinateur, la modélisation a pris un grand essor, vue ces possibilités de calcul à grande vitesse donnant ainsi des moyens de simuler les processus par « modélisation mathématique ». Toute fois, l'utilisation de cette modélisation pour le calcul de l'érosion de sol et les transports solides reste limitée, à cause de la complexité de quelques solutions numériques des équations mathématiques décrivant le phénomène. L'objectif recherché par la modélisation mathématique de l'érosion des sols, est de donner la quantité provenant d'un bassin versant en un temps donné ainsi que sa composition. Le modèle mathématique présente l'avantage, de faire varier les conditions climatiques ainsi que les facteurs d'érodabilité [7] [13].

Les différents éléments nécessaires à l'élaboration d'un modèle de transport de sédiments ont été successivement analysés:

- ✓ la modélisation de l'écoulement liquide;
- ✓ les différents seuils de transport de sédiments, avec quelques éléments pour la granulométrie étendue;
- ✓ le calcul de la capacité de transport;
- ✓ la prise en compte de la non uniformité de l'écoulement qui entraîne une inertie de la phase solide sur la phase liquide.

Enfin, Il ressort que les modèles sédimentaires sont soit assez sommaires, fondés sur une vision géomorphologique, soit très complexes avec une approche mécaniste de découpage en fractions granulométriques. Une voie intermédiaire peut sans doute être trouvée, avec un modèle capable de représenter l'évolution des caractéristiques sur le linéaire, mais s'appuyant sur une description synthétique des sédiments [18] [25] [26] [30] [42] [43] [44] [46] [55].

b. Le modèle physique :

Le modèle réduit est encore un outil pour simuler les processus physiques. La nécessité d'employer un modèle réduit résulte en générale suite à une difficulté de résolution des équations mathématiques décrivant un phénomène d'étude. Il reste coûteux devant le modèle mathématique, et la transposition des résultats à la réalité nécessite le respect des règles de similitudes qui peuvent limiter les possibilités d'études d'un objet en modèle réduit [7] [51]:

Alors la simulation de l'évolution du profil d'un système rivière - réservoir du point de vue physique et mathématique est une tâche nécessaire, mais délicate. L'aspect principal auquel un modèle physique ou mathématique doit répondre est de présenter, avec le plus précis possible, la physique des phénomènes intervenants dans l'écoulement bi-phasique (liquide - solide).

De nombreuses approches du transport solide ont permis, à l'aide de données expérimentales obtenues sur modèle réduit (canaux, conduites) ou sur site (rivières, torrents), d'établir des formules "semi empiriques" de débit. Cependant, ces formules, très utiles en ingénierie, sont peu précises et ne sont utilisables en général que dans les conditions pour lesquelles elles ont été obtenues [48].

II.3.4.METHODES DE QUANTIFICATION EN ALGERIE:

a. Modèle de TIXERONT (1960) (in[12][52][53]):

Ce modèle est basé sur les corrélations établies entre l'apport moyen annuel liquide « A » et l'apport moyen solide; à partir de données d'observations de 32 bassins ALGERIENS et 09 bassins TUNISIENS dont les superficies sont de 90 à 22300 Km².

$$Q_S = a \cdot A_1^b \quad (\text{tonnes/Km}^2/\text{an}) \dots\dots\dots(\text{II.5}) \quad \text{et} \quad b = 0.15$$

A_1 : lame d'eau ruisselée en mm/an.

a : coefficient empirique qui varie en fonction de la perméabilité du bassin, il est de : 8.5 à 74 pour une perméabilité élevée, de 75 à 349 pour une perméabilité moyenne, de 350 à 3199 pour une perméabilité moyenne à faible, de 1400 à 3199 pour une perméabilité faible et $a > 3200$ Quand c'est imperméable.

b. Modèle de SOGREAH (1969) (in [12][52][53]):

Il est inspiré du modèle de TIXERONT ; l'apport moyen étant remplacé par le ruissellement de crues « R_c »:

$$Q_S = a \cdot R_c^b \quad (\text{tonnes/Km}^2/\text{an}) \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

R_c : Ruissellement annuel moyen de crue (mm).

a : Coefficient variant de 3.3 à 3200 selon la perméabilité du bassin en question.

c. Modèle de DAMMAK (A.N.R.H. 1982) (in [3][24][53]):

Fondé à la base des données de 30 bassins versants, exprimant le transport solide en fonction de la lithologie, le pourcentage et la fréquence des précipitations journalières et la densité de drainage du réseau hydrographique.

$$Q_s = 26,62 IL + 5,07 IP + 9,77 CT - 593,56 \dots \dots \dots (II.7)$$

Q_s : Transport solide spécifique moyen annuel en tonnes/Km²/an.

IL : Indice lithologique = produit des pourcentages des précipitations annuelles tombées sous forme de pluies supérieures à un seuil donné par la fréquence de ces précipitations. Le seuil considéré est égale à 20 mm pour les bassins perméable (IL>50%) et de 30mm pour les bassins imperméables (IL>50%).

CT : Coefficient de torrentialité qui est une mesure de l'intensité de chevelu hydrographique. Il est le produit de la densité de drainage "Dd" par la fréquence des talwegs d'ordre 1 "F1".

$$CT = \frac{\sum L_x}{A'} \cdot \frac{N1}{A'} = Dd \cdot F1 \dots \dots \dots (II.8)$$

Dd : Densité de drainage (longueur totale du réseau fluvial ramené à l'unité de surface).

ΣL_x : Longueur totale des talwegs

N1 : Nombre de talwegs élémentaires.

A' : Surface du bassin.

II.4. QUELQUES TRAVAUX EFFECTUES EN ALGERIE SUR LE TRANSPORT SOLIDE

Plusieurs travaux ont été effectués sur l'érosion et le transport solide. Nous nous limitons à quelques travaux importants :

MEDIDGER (1960) (in [03]) :

En 1960, il regroupe ses travaux effectués sur les méthodes de mesure et présente les données de mesures recueillis sur une trentaine de bassins versants durant la période 1946-1957.

L'auteur discute les méthodes de mesures et présente les données mensuelles des écoulements solides spécifiques des 30 stations observées ainsi que les caractéristiques physiques et climatiques principales des bassins contrôlés. Dans un tableau récapitulatif

de ses travaux, l'auteur donne les estimations des précipitations et écoulements liquides et solides ainsi que les concentrations moyennes et maximales. Les premiers essais qu'il tente alors en vue d'établir les relations entre débits et concentrations instantanées ne donnent pas de résultats satisfaisants.

TIXERONT (1960) (in [12] [52] [53]) :

Ses travaux sont basés sur les données de 32 bassins d'Algérie et six bassins de Tunisie, dont la superficie varie de 90 à 22300 Km².

L'auteur a procédé à la correction et l'homogénéisation des séries qui figurent dans les annuaires hydrologique 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 l'écoulement annuel, répartition saisonnière des pluies, du couvert végétal et les facteurs géomorphologiques dans la dégradation du sol

Il a trouvé que :

- Les teneurs en suspension des trois groupes de bassin augmentent d'une façon générale lorsque le débit liquide diminue ;
- Le substratum joue un rôle considérable
- Le crétacé inférieur, jurassique, les terrains primaires cristallins, cristallophylliens, manifestant 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 700mm où l'érosion est très active (1200 tonne/ km²/an)

CAPOLINI (1965-1969) (in [56] [57]) :

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 effluents de l'oued Cheliff

Il a basé son étude sur l'analyse morphométrique des réseaux (densité de drainage, coefficient de turbidité) mises au point par les géographes américains SCHWNNM et HORTON. L'application a permis de trouver des résultats encourageant sur les bassins de Oued Rhiou et de 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 zones susceptibles à l'érosion à partir de la carte du coefficient de torrentialité.

SOGREAH « société générale de la recherche et études des aménagements hydrauliques » (1969) (in [12][52][53]):

L'étude est basée sur les données d'observation recueillies au niveau de 9 barrages et 18 stations hydrométriques, totalisant 282 années stations.

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

JACCON. G (1974) [58] :

En 1974 dans une note technique, l'auteur a entamé une étude de quantifications du transport solide à l'exutoire du grand bassin versant de Chellif en utilisant les données de la station hydrométrique de SIDI BEL ATAR à base d'observation, s'étalant sur la période de 1947 à 1960, il retiendra en définitive un apport solide moyen interannuel de 40 millions de tonnes. Il conclue que les valeurs citées dans cette note (données d'observations ou résultats) peuvent paraître énormes et il pense que dans le domaine des transports solides en Afrique du Nord, la tendance a toujours été vers une sous estimation (quelquefois énorme) de leur importance et souhaite que la valeur de 40 Millions de tonne retenue dans cette note ne soit pas elle aussi sous estimée pour d'éventuelle existence de retenues.

DEMMAK (1982) [03] :

En se basant sur les données observées, durant la période 1972/1979, sur 30 bassins versants de l'Algérie du nord, particulièrement touchée par l'érosion est négligeable. L'érosion en nappes n'apporte qu'une faible part (0.2 à 1 tonnes/ha/an) au transport solide des oueds. Pour lui l'essentiel se passe autour des oueds. Le sapement des berges est une source majeure de sédiments directement mobilisés par les oueds lors des fortes crues.

Il confirme l'inaptitude en Algérie des techniques de lutte anti-érosives. Il a démontré que le pourcentage de marnes et d'argiles affleurantes, le pourcentage des précipitations journalières supérieures à un certain seuil (20 ou 30 mm) et le coefficient de torrentialité, sont

déterminant pour le transport solide. Il synthétisa ses travaux par une relation empirique valable pour les bassins de l'Atlas Tellien liant les apports solides spécifiques moyens annuels à des indices lithologiques, pluviométriques et géomorphologiques.

TOUIBIA (1986) [59] :

Son travail consiste à quantifier des apports en sel et en sédiments avec des différents modèles en se basant sur des données hydrométriques observées sur une période de 1971-1979 afin de prévenir la salinisation et l'envasement du barrage EI-IBTISSAM sur l'oued DEURDEUR.

ARABI (1991) (in [56]) :

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

- stocker les eaux d'écoulement,
- Favoriser l'infiltration au maximum, limiter la concentration des eaux de ruissellement,
- travailler le sol chaque fois que possible,
- améliorer la structure du sol,
- corriger les ravins.

PROBST J. L. et AMIOTTE SUCHET P. (1992) [60] :

L'examen des données disponibles sur les transports fluviaux de sédiments de 130 bassins versants au Maghreb a permis aux auteurs de proposer une nouvelle estimation de l'apport en sédiments du Maghreb à l'océan Atlantique et à la mer méditerranée. Ils analysèrent l'influence de plusieurs facteurs de l'environnement (précipitation, drainage, taille des bassins et lithologie) sur l'érosion mécanique et les transports solides fluviaux. Ils proposent enfin un modèle de régression multiple pour estimer les transports fluviaux spécifiques de matières en suspension au Maghreb. Au terme de leur étude il trouve l'apport spécifique au Maghreb est de l'ordre de 420 à 504 t/Km²/an

BOUROUBA.M (1998) (in [56]) :

Il montre que les périodes de crues de l'automne et du printemps pour les régions semi-aride, sont responsables de la majeure partie de transport solide. Le reste de l'année est à érosion faible.

ACHITE. M ET TOUIBIA. B (2000) [61] :

Ils montrent que étude de l'érosion et le transport solides dans les zones semi-arides permet

de prédire les apports solides pour différentes périodes de retour, afin de pouvoir protéger la cuvette du barrage de Sidi M'HAMED BEN AOUDA.

LARFL.B (2000) [62] :

Elle montre que la quantification du transport solide dans le bassin versant de l'oued ISSER, dont les résultats semblent très cohérents avec les mesures directes de l'envasement dans la retenue de BENI AMRANE, (par les essais bathymétriques de février 1995 et l'estimation de l'envasement ,supposé juste, de mars 2000), nous incite à laisser les portes de la recherche et de l'expérimentation grande ouvertes sur : « la définition des diverses formes d'érosion et une stratégie de lutte anti-érosive en vue de l'accroissement de la durée de vie des aménagement hydrauliques».

GHENIM.A (2001) [63] :

Il effectua une analyse de comportement de trois sous-bassins (haute Tafna, oued Isser et oued Mouilah) vis-à-vis de l'écoulement et du transport solide, ainsi que la détermination des volumes solide et liquide apportés par les réseaux hydrographiques de ces trois sous-bassins. Les résultats obtenus montre que la haute Tafna connaît la dégradation la plus importante que oued Isser et oued Mouilah et que le transport solide étant très actif en automne et en printemps.

TERFOUS. A, MEGNOUNIF. A ET BOUANANI. A (2001) [64] :

Les auteurs ont analysé graphiquement les valeurs instantanées des débits solides en suspension de Oued Mouilah et leurs relations avec les débits liquides sur la périodes d'observation allant de 1977 à 1993 soit 16 ans ce qui leurs à permis de montrer l'existence de deux périodes d'érosion actives, .une première période en automne et la seconde à plus faible ampleur, au printemps.

La dégradation spécifique moyenne annuelle sur les 16 années est de 126 tonnes par Km², Les auteurs estiment que cette valeur est relativement faible par rapport à celles retrouvées pour d'autres régions à régime hydrologique similaires.

BENKHALED ET REMINI (2003) [65] :

Qui ont étudié la variabilité et les caractéristiques des différentes relations qui existent entre la concentration et le débit, de oued Ouahran et ils ont montré que La dispersion des points de C et Q est une caractéristique très importante qui, avec d'autres aspects liés à l'allure du graphe, permet d'effectuer des combinaisons, en liaison avec le phénomène d'hystérésis.

MEGNOUNIF. A, TERFOUS. A et BOUANANI. A (2003) [66] :

Les auteurs se sont intéressés dans leur travail aux sédiments transportés en suspension par oued Tafna à Beni-Bahdel. Pour la période allant de septembre 1988 à août 1993, l'analyse de la variabilité de la charge en suspension montre une production très forte en automne mais d'une faible ampleur au printemps. En automne le flux des matières solides en suspension représente 44% de flux annuel estimé à 28600 tonnes, au printemps malgré l'augmentation des débits (60% de l'apport annuel) la charge en suspension diminue considérablement. La production du ruissellement superficiel en matières solides représente 62% du flux annuel alors que l'érosion du cours d'eau contribue par 38%.

BOUANANI.A (2004) [12] :

Son travail constituait une première contribution dans l'analyse des phénomènes hydrologiques, du transport solide et de la modélisation du bassin versant de la Tafna (NW Algérie). Il apporte beaucoup d'éléments de base à une recherche de modèles hydrologiques, régissant l'écoulement superficiel et le transport solide en suspension dans ce bassin.

ACHIT.M ET MEDDI. M (2004) [67] :

Les auteurs ont adopté une méthodologie qui consiste à rechercher un modèle régressif pouvant expliquer le débit solide par le débit liquide mesuré au niveau de la station de Sidi Abdelakader El Djillali, à différentes échelles : annuelles, saisonnières, mensuelles et journalières pour trouver la meilleure relation représentative du phénomène. L'ensemble des données disponibles couvre les années 1973/1974 à 1994/1995, soit 22 années. Les résultats montrent que le modèle puissance explique la plus grande partie de la variance (plus de 70 % de la variance). Les modèles obtenus à l'échelle journalière et instantanée (regroupés par mois) ont donné le meilleur coefficient de corrélation. Le débit liquide explique, à ces échelles, la variation du débit solide dans le temps. Aussi, compte tenu de la disponibilité des données à l'échelle journalière, le transport solide a été évalué en utilisant le modèle ainsi obtenu à cette échelle. Leur résultat confirme ceux trouvés par différents chercheurs en Algérie et au Maroc.

ACHIT.M ET MEDDI. M (2005) [68] :

Les données de cinq sous bassins du bassin versant de Oued Mina sur une période de 22ans (1973à 1995) ont été utilisées pour développer une approche statistique de quantification des apports solides. Les valeurs du transport solide retrouvées en automne sont les plus élevées suite à la pauvreté du couvert végétal et l'agressivité des pluies d'automne. Les résultats des charges spécifiques obtenus pour les différents bassins sont comme suite :

- 212 t/Km²/an pour le bassin versant de oued Haddad
- 191 t/Km²/an pour le bassin versant de oued Taht
- 117 t/Km²/an pour le bassin versant de oued El abd à Ain al Hamra
- 65 t/Km²/an pour le bassin versant de oued El abd à Takhmaret
- 187 t/Km²/an pour le bassin versant de oued Mina

En fin des modèles mathématiques liants l'apport solide au coefficient d'écoulement ont été proposés pour ces cinq sous-bassins.

TOUAHIR.S (2007)[57] :

Elle a entamé une étude comparative du transport solide en suspension entre deux sous bassin à savoir le bassin de oued ZEDDINE et le bassin de oued TIKAZALE (CHELLIF), pour délimiter le nombre de facteurs qui régissent le transport solide. Au terme de son étude, l'auteur trouve que l'action érosive est très différente entre les bassins étudiés. Elle est plus accentuée au niveau du bassin de Zeddine (1368 t/km²/an) malgré qu'il ne soit pas beaucoup plus grand (1,5 fois environ) que celui de Tikazale (227 t/km²/an).

MEGNOUNIF. S (2007) [69] :

Son étude consistée à fournir aux gestionnaires les éléments de réflexion nécessaire à la conception et l'innovation de solutions alternative de solutions alternatives dans la gestion des phénomènes de l'érosion, de transport et les dépôts de sédiments. Il s'est intéressé à deux bassins versant très affecté par l'érosion hydrique de caractéristiques physiographiques différentes à savoir le bassin versant de oued SEBDOU et le bassin versant de oued MOUILAH, ou il s'est intéressé à l'identification des principaux processus qui optèrent dans les bassins versants et conditionne l'intensité du système. L'étude aborde aussi la quantification des la charge solide en suspension et un model empirique fut proposé. Afin d'amélioré l'outil de gestion environnementale, l'approche proposé par l'auteur est basé sur deux aspects; le première aborde une méthodologie dans la recherche et la compilation de l'information (appuyée par l'analyse systémique) définissant les étapes à entreprendre dans l'élaboration d'une base de données permettant de comprendre la nature et la distribution des processus du système "érosion-transport-dépôt" et le second aborde la conception et l'innovation de solution de gestion. Le bassin versant de oued SEBDOU produit 1120 t/Km²/an valeur nettement supérieure à 126 t/Km²/an produite par le bassin de oued MOUILAH qui d'une superficie plus grande. L'auteur souligne que le potentiel érosif est plus intense en automne et en fin de printemps.

GHENIM A, SEDDINI A et TERFOUS A (2007) [70] :

Pour essayer de comprendre l'influence de ces facteurs sur la genèse et le cheminement des Particules en suspension dans les cours d'eau des zones semi-arides méditerranéennes, les auteurs se sont intéressés à l'Oued Mouilah, considéré comme le plus important affluent de la Tafna. Pour ce faire et ils ont étudié les différents épisodes de crue, leur rôle dans l'amplification du transport solide ainsi que le comportement du bassin lors de ces événements exceptionnels. Au terme de leurs étude ils affirment que ces crues sont source d'apports liquides non négligeables aux barrages qui souffrent parfois d'un taux de remplissage insignifiant et malheureusement, la plus grande part des sédiments qui atterrissent dans les cuvettes de barrages est amenée par les crues.

II.4.1 QUELQUES DONNEES SUR LE TRANSPORT SOLIDE :

Les bassins versants du Tell algérien dominés par un climat semi-aride sont caractérisés par une pluviométrie saisonnière et interannuelle irrégulière. Cette irrégularité a un impact direct sur l'action érosive et notamment sur le transport solide en suspension. Ce dernier dépend de plusieurs facteurs dont l'agressivité des averses, l'état du sol et la turbulence de l'écoulement.

DEMMAK 1982 a montré que le taux d'érosion spécifique atteint des valeurs les plus élevées du Maghreb dépassant 2000 t/Km²/an, sur la plus part des bassins de l'ATLAS TELIEN et de 4000 t/Km²/an sur la chaîne côtière de DAHRA ; soit environs 180 millions de tonnes de sols érodés par an [3]. Le tableau II.4.1 qui suit résume les différents résultats des apports spécifiques relatifs au Maghreb retrouvés par différents auteurs :

Tableau II.4.1, Apport spécifique en suspension au Maghreb (in [60])

Auteur	Apport spécifique en suspension (t /km ² / an)
Fournier (1960)	60 à 600
Strakhov (1967)	10 à 50
Heusch & Milliès-Lacroix (1971)	265 à 2569
Milliman & Meade (1983)	100
Dedkov&Mozzherin(1984)	100 à 250
Walling (1984)	1000 à 5000
Walling & Webb (1987)	> 500
Probst et	420 à 504

Les valeurs de la dégradation spécifique varient d'un bassin à un autre et d'une région à l'autre Nous citons à titre d'exemple, 2400 t/km²/an pour oued Fodda, 1160 t/km²/an pour l'oued Mazafran (côtiers algérois), 2300 t/km²/an pour l'Isser à Lakhdaria,. 2306 t/km²/an pour Deurdeur ,490 t/km²/an pour oued Soummam à Sidi Aich. 336 t/km²/an pour Sidi M'hammed Ben Aouda et 680 t/km²/an pour oued Medjerda à Souk Ahras (d'après Bourouba 1991 in[57]). Pour le bassin versant de oued Mina Meddi et Achite 2005 [68] montre que les dégradation

spécifique des sous bassin étudiés varie de 65 t/Km²/an (bassin versant de oued El abd à Takhmaret) à 212 t/Km²/an (bassin versant de oued Haddad) et une moyenne de 187 t/Km²/an pour le bassin versant de oued Mina. Terfous. A, Megnounif. A et Bouanani. A (2001) [64] estime la dégradation spécifique moyenne annuelle sur les 16 années à 126 tonnes par Km² dans le bassin versant de Oued Mouillah. Megnounif (2007) [69], montre que le bassin versant de oued SEBDOU produit 1120 t/Km²/an et le bassin de oued Mouillage produite 126 t/Km²/an. Lors de notre projet de fin d'étude pour le bassin versant de la Tafna nous avons trouvé une dégradation spécifique relative aux apports solides en suspension de l'ordre de 197 t/Km²/an à 255 t/Km²/an. Benhamidi et Hammas 2001 que nous avons encadré en projet de fin d'étude trouvent pour le bassin versant de Oued Mouillah une dégradation allant de 146 t/Km²/an à 156 t/Km²/an [71].

Les crues de l'automne et du printemps sont responsables de l'essentiel du transport solide. En effet, pendant l'été connu pour ces chaleurs intenses, le sol se dessèche, se fissure, se fragmente et voit son couvert végétal réduit, ce qui permet aux premières averses de l'automne de laver le sol de ces éléments fins détacher. Pendant le printemps qui succède à la saison hivernale froide et pluvieuse, les crues coïncident avec des versants saturés et déblayés.

L'activité érosive dépend alors des mouvements de masses et des sapements de berges qui se produisent dans les zones mal protégés au bas des versants. On assiste alors pendant ces crues à une croissance rapide du volume ruisselé et de la turbidité. Pour la crue du 17 avril 1979 à oued Medjerda supérieur, le débit liquide et la concentration enregistrés sont 8 fois supérieurs aux valeurs moyennes mensuelles (Bourouba, M. 1998) (in[57]).

Ces périodes de crues de l'automne et du printemps représentent une courte période de forte érosion qui dure entre 2 et 4 mois mais responsable de la majeure partie du transport solide. Le reste de l'année est à érosion faible

Annuellement, le comportement morphologique irrégulier des bassins versants algériens passerait d'une année à l'autre d'un régime méditerranéen à érosion élevée et à écoulement abondant au régime de la zone tempérée caractérisée par un écoulement abondant et une érosion faible ou encore au régime de la frange aride à érosion élevée et à faible écoulement.

II.5. METHODES DE DEFENCES CONTRE L'EROSION ET LE TRANSPORT SOLIDE :

L'érosion accélérée et le dépôt des sédiments posent souvent de sérieux problèmes et sont la cause des modifications de l'environnement dans le bassin versant. Le couvert végétal détruit, les sols sont emportés, la fertilité des zones agricoles est endommagée. Du fait que l'érosion des sols est étroitement corrélée avec le ruissellement, la maîtrise de ce dernier est particulièrement importante [52].

Les méthodes de lutte contre l'érosion et la sédimentation reposent sur l'étude de leur nature et leur évolution; afin de prévoir des dispositifs adéquats, dont le but est de réduire ou d'éliminer les effets négatifs des processus observés, ces dispositifs nécessitent des interventions, dans les interfluves au sein même du cours d'eau [7].

II.5.1.LES INTERFLUVES :

Les moyens de lutte contre l'érosion dans les interfluves peuvent être classés dans les catégories suivantes [13]:

- 1) Procédés agrotechniques.
- 2) Restaurations des forêts.
- 3) Procédés hydrotechniques.

II.5.1.1.Procédés agrotechniques :

Les méthodes agrotechniques spécialisées de protection contre l'érosion consistent surtout en procédés de cultures appropriées pour retenir l'eau. On parvient à une bonne rétention en travaillant le sols selon les courbes de niveaux ou en utilisant des techniques entraînant une perturbation minimum des sols. Le travail selon les courbes de niveaux est réservé aux pentes douces est aux régions de pluies modérées. Sur les terrains pentus et dans les régions où il peut se produire de fortes crues brutales, l'eau de ruissellement peut être retenue par des cultures en bandes associées à des travaux de terrassements.

II.5.1.2.Restoration des forêts :

Lorsque la reforestation est possible, c'est un moyen efficace de conservation des sols. Les différents types de plantation ci-après sont particulièrement importants [7] [13]:

- 1) Ceintures forestières sur les terres agricoles pour régulariser le ruissellement, améliorer l'infiltration et protéger de l'érosion éolienne.
- 2) Bandes de forêt et bouquets d'arbres à l'intérieur du réseau hydrographique le long des ravines pentus et des vallées soumises à une forte érosion.

Les ceintures forestières protègent les sols de différentes façons ; elles contribuent à la réduction de la vitesse du vent et améliorent le micro-climat; elles sont très efficaces lorsqu'elles sont plantées en lignes perpendiculaires au ruissellement, car l'écoulement sera dispersé et l'infiltration favorisée. Cependant une mauvaise disposition des ceintures peut être la cause d'une intensification du ruissellement et de la formation des ravines.

II.5.1.3.Procédés hydrotechniques :

Les procédés hydrotechniques de protection comportent certains types de structures et ne sont utilisés que si cela se justifie économiquement, ou si d'autres procédés se sont révélés inefficaces. Ces procédés comprennent les fossés d'infiltrations avec banquettes pour empêcher la formation des ravines, les barrages pour la rétention des sédiments ; des terrasses le long des courbes de niveaux, des ouvrages de retenue et de déversions au sommet des ravines, etc...

II.5.2.LES COURS D'EAU :

L'érosion, le transport et dépôts sont des phénomènes naturels permanents dans les cours d'eau. L'érosion du réseau hydrographique est souvent la cause de difficultés et de pertes financières. Il n'y a pas de méthode universelle et l'on doit en tenir compte de nombreux facteurs, notamment du prix et de la disponibilité sur place des matériaux de construction ainsi des risques encourus. Ci-après un bref résumé des méthodes disponibles:

II.5.2.1.Revêtement des berges :

Le mode de protection des berges le plus courant est la mise en place d'un revêtement de protection fait d'un matériau résistant à l'érosion (les enrochements, le béton, etc...) et déposés directement sur le talus de la berge.

II.5.2.2.Freinage de l'écoulement :

On peut obtenir un freinage de l'écoulement en mettant en place des structures perméables parallèlement à la base des berges. La diminution de la vitesse réduit les risques d'érosion et facilite, lorsque les conditions sont favorables, le dépôt des sédiments et la croissance de la végétation le long des berges.

II.5.2.3.Guidage de l'écoulement :

Jetée, épis ou chicane sont souvent employés pour écarter les courants et les vagues des zones sensibles. La déflexion du courant modifie les processus de transport des sédiments et l'effet habituel est la formation de dépôts le long des berges menacées. On peut utiliser des structures perméables ou imperméables.

II.5.2.4.Aménagements hydrauliques :

Les barrages modernes et d'autres ouvrages hydrauliques sont souvent de très grande taille, nécessitant la maîtrise de débits très élevés sous une forte charge. On doit mettre en place des dispositifs efficaces pour empêcher des affouillements indésirables du lit à l'aval de l'ouvrage, On utilise souvent :

- 1) Bassins de tranquillisation
- 2) Sauts de ski.
- 3) Correction torrentielle.

II.6. METHODE DE LUTTE CONTRE L'ENVASEMENT DES RETENUES :

Les ouvrages hydrauliques qui souffrent directement des conséquences de l'érosion et le transport solide (envasement ou sédimentation) étant les barrages, qui voient leurs capacités diminuées sous l'effet de ces phénomènes, donc nous ne pouvons nous abstenir sur l'énumération des moyens de lutte contre l'envasement des barrages. Ces moyens de luttés contre l'envasement des retenues peuvent être classés en deux genres : les moyens préventifs et le moyen curatif :

II.6.1 MOYENS PREVENTIF

Ils regroupent tous les moyens de lutte cotre l'érosion et le transport solide cité en haut à qui s'ajoute les méthodes d'évacuation des matériaux solide et les vidange de fonds

II.6.1.1 La chasse par vidange

La vidange d'une retenue est une méthode fréquemment employée pour freiner la sédimentation ou pour encourager une érosion des sédiments afin de récupérer du volume. L'efficacité de la chasse des sédiments dépend de la situation topographique de la retenue, de la capacité d'évacuation des vidanges, de la hauteur des vidanges, des caractéristiques des matériaux solides entrants, du type d'exploitation, de la durée de l'opération de chasse, du débit de la chasse, etc...

Le barrage de Khashm El Girba situé sur la rivière Atbara au SOUDAN, a été achevé en 1964. Sa capacité d'origine était de 950.10^6 m³. L'eau était destinée à l'irrigation, à la production d'électricité, et aux besoins en eau potable. La capacité de la retenue a été considérablement diminuée par l'envasement (environ 84.10^6 tonnes). Les opérations de chasse par vidange ayant été effectuées en Juillet 1971 et en 1973 [54]. D'après El Hag (1960) et El Fatih Saad (1980) (in[54]). La quantité de sédiments évacuée pendant chacun des deux mois de Juillet (1971 et 1973), a été de 86.10^6 tonnes, ce qui dépasse la quantité moyenne annuelle estimée d'apports solides [54].

II.6.1.2 évacuation des courants de densité

L'évacuation des courants de densité est considérée depuis longtemps comme une méthode efficace pour diminuer le taux d'envasement d'une retenue. Dans les années 20, on a effectué des essais qualitatifs afin d'étudier la possibilité d'évacuer des courants de densité. Ces expériences s'accordaient à des événements réellement observés dans des lacs et des retenues

Lorsque l'existence des courants de densité a été reconnue, des chercheurs ont effectué des observations in situ pour de nombreuses retenues. Certains courants de densité ont parcouru plus de 100 km avant d'être évacués par la vidange de dérivation au barrage du lac Mead, aux ETATS-UNIS, ce qui montre le rôle potentiel que peut jouer l'évacuation des courants de densité dans la lutte contre l'envasement d'une retenue. La retenue de Sautet en FRANCE, les retenues de Metka et de Groshnitza en YOUGOSLAVIE, et la retenue de Nulek en U.R.S.S. (Mihailova et alia, 1975 ; Pyrkin et alia, 1978) illustrent ce phénomène [54].

Le barrage D'IGHIL EMDA a été construit sur l'Oued Agrioun en ALGERIE afin de produire de l'électricité. Il mesure environ 61 m de haut, et son volume est d'environ 150.10^6 m³. La mise en eau du barrage date de Septembre 1953. Huit petites vannes de 400 mm de diamètre, qui contournent les principaux pertuis de chasse, sont ouvertes en alternance afin d'éviter une utilisation fréquente des pertuis de chasse [5][55].

D'après Duquennois (1959)(in [54][55]), entre 1953 et 1958, de 45 a-60 % des apports solides entrants ont été évacués. Pendant la première année d'exploitation, seulement 25 % des apports solides entrants ont été évacués, ce qui était dû en partie au fait que le seuil des vannes se trouvait à 7 m au-dessus du fond. Entre 1953 et 1992, 45.10^6 m³ de vases ont été évacuée par cette technique [37][55], les opérations de soutirage sont systématiquement lancées dès que l'on détecte l'arrivée du courant de densité [4][35].

II.6.1.3 VIDANGES DE FOND

Dans chaque retenue menacée par le problème de la sédimentation, il est souhaitable lors de la conception du barrage d'envisager une évacuation des matériaux solides par des vidanges de fond. Il faut également prendre en compte les méthodes d'exploitation de la retenue. Parmi toutes les méthodes employées pour évacuer des matériaux, l'utilisation des vidanges de fond semble être la plus efficace.

1 - Les vidanges de fond peuvent être utilisées pour évacuer une crue, ou pour vidanger une retenue dans des cas d'urgence où une vidange très rapide est nécessaire.

2 - Les vidanges de fond peuvent également servir à chasser des sédiments, en abaissant le niveau d'eau afin de chasser des dépôts de limon, de sable et de graviers, qui sont donc érodés par la force tractrice de l'écoulement. D'une façon analogue, on peut évacuer des courants de densité de retenues servant au stockage.

3 - Quand les vidanges de fond sont situées en-dessous des prises d'eau, elles empêchent les matériaux solides de pénétrer dans la prise d'eau, et elles minimisent ainsi l'usure des turbines.,

La vidange de fond dite "espagnole" est probablement une des plus anciennes qui existent. Elle consiste en une ouverture proche de l'ancien lit de rivière ou de la base du barrage, l'évacuation des crues à travers ce type de vidange a préservé l'efficacité de certaines retenues pendant une centaine d'années [4][5][35][54]. Un des exemples les plus célèbres est celui de l'ancien barrage d'Assouan situé sur le Nil, près de Haifa, en EGYPTE. Les eaux de crue chargées en matériaux traversaient la retenue en 'diminuant à peine leur vitesse. Le barrage comportait 180 vidanges installées en 4 groupes à des niveaux différents, et capables ensemble d'évacuer une crue maximale de 14 200 m³/s[54].

II.6.2 MOYENS CURATIFS :

Le but de ces moyens est la récupération d'une partie de la capacité de la retenue comblé par les apports solides du bassin versant. Nous citerons :

II.6.2.1 La chasse des sédiments

On peut avoir recours à des vidanges totales périodiques dans des petites retenues qui perdraient leur capacité utile après quelques années d'exploitation. Puisqu'une grande partie de la capacité utile d'une petite retenue est située près du barrage, les sédiments peuvent être chassés par l'écoulement d'une crue, à condition que les vannes de vidanges restent ouvertes pendant un certain temps. Le lit ainsi creusé par ces chasses s'incorpore dans la capacité de la retenue.

Des opérations de vidange et de chasse sont utiles dans des retenues où il n'est pas possible d'équilibrer la sédimentation et l'érosion seulement en chassant les sédiments pendant la saison des crues et en stockant l'eau plus claire pendant les autres saisons [4][5][35][54].

La retenue de Hengshan est l'exemple d'une retenue dans laquelle sont effectuées des opérations de vidange et de chasse. La retenue est petite et encaissée, mesurant 1 km en longueur, et elle a une capacité de $13,3 \times 10^6 \text{ m}^3$. Le barrage mesure 69 m de haut. Il comporte d'une part, une petite vidange de fond avec une capacité d'évacuation de $17 \text{ m}^3/\text{s}$ située à 2,6 m au-dessus de l'ancien lit de la rivière, et d'autre part, une vidange d'évacuation de crue située à 14,5 au-dessus de l'ancien lit, qui a une capacité maximale d'évacuation de $1\,260 \text{ m}^3/\text{s}$. La retenue est destinée à l'écrêtement des crues et à l'irrigation [54].

II.6.2.2 Le dragage

On a recours au dragage pour enlever les sédiments d'une retenue si :

- a) les opérations de chasse ne sont pas efficaces,
- b) la construction d'une galerie de dérivation est impossible,
- c) l'abaissement de la retenue pour la chasse est impossible pour des raisons de conservation de l'eau,
- d) le barrage est irremplaçable et ne peut être surélevé,
- e) la quantité d'énergie requise pour réduire l'envasement en vidangeant la retenue représente une trop grande perte économique.

Elle coûte cher, à moins que les sédiments puissent être recyclés de façon intéressante.

Certains sédiments grossiers peuvent être récupérés pour les besoins des travaux publics.

On effectue le dragage dans une retenue dans des situations différentes. En voici quelques exemples :

1- Le dragage peut servir à récupérer la capacité de petites retenues, de petites retenues de débits réservés, ou de bassins de rétention de graviers ; ou alors à récupérer partiellement la capacité de retenues moyennes.

En ALGERIE on entreprend des opérations de dragage en période d'irrigation afin de récupérer la capacité d'origine. La drague Lucien Demay est une drague à succion et à refoulement comportant une tête coupante à rotation. Elle est capable en théorie de draguer 1 m^3 de vase in situ (avec une densité d'environ 1,6) en utilisant environ 5 m^3 d'eau claire. Le volume de vase draguée par mois est estimé à environ $340\,000 \text{ m}^3$. Lorsque les tuyaux à succion et à refoulement se bouchent, la machine consomme davantage d'eau, allant jusqu'à 9 fois le volume de vase [4][5][35][54]. Le dragage effectué par l'appareil Lucien Demay entre 1957 et 1968 est chiffré dans le tableau.II.5.1 suivant :

Tableau II.5.1 dragage des barrages algériens [54]

Année	Barrage	Vase draguée (10 ⁶ m ³)
1958-1961	Cheurfas	10
1962-1964	Sig	1
1965-1966	Fergoug	3
10/11/1967- 30/04/1968	Hamiz	1.2

Pendant une période de dragage dans la retenue de Hamiz d'une durée de 5 mois et demie, 2300 heures de pompage ont été réellement effectuées, et 730 heures d'arrêt ont été enregistrées. Les principales causes d'arrêt étaient des incidents mécaniques et de tuyauterie, des "bouchons" dans les tuyaux, des changements d'emplacement, et le rallongement ou le raccourcissement du tuyau flottant. 25 % des arrêts étaient dus aux "bouchons". Ils apparaissent lorsque des morceaux de vase se mélangent à des corps étrangers, tels que des troncs d'arbres, dans le tuyau. Afin de dégager le tuyau, il est nécessaire de faire remonter de l'eau claire dans le tuyau à succion pour séparer les morceaux. Le tuyau à refoulement peut également se boucher si les morceaux de vase ne se dissolvent pas dans l'eau [4] [35] [54].]. Le programme de dragage des retenues algériennes implique généralement le creusement d'aval en amont d'un chenal dans la couche de sédiments afin de faciliter la circulation des courants de densité vers les vidanges de fond. Les courants de densité présentent de gros débits par unité et de fortes vitesses une fois dans le chenal nouvellement creusé.

Dans la retenue de débit réservé de Palagnedra [54] en Suisse, une drague flottante est capable d'évacuer des matériaux très fins accumulés autour de la prise d'eau, dans des profondeurs allant jusqu'à 50 m. Les matériaux aspirés sont acheminés jusqu'au barrage dans un tuyau flottant, puis ils traversent le barrage et sont ensuite évacués à l'aval

II.6.2.3 L'extraction par siphonnement

Les siphons évacuateurs sont également employés pour extraire des sédiments de retenues. Ils diffèrent du dragage par aspiration en ce qu'ils utilisent la différence de cote à l'amont et à l'aval du barrage comme source d'énergie motrice [4][5][35][54]. Voici quelques exemples:

1- Un des appareils Les plus simples et les plus efficaces est le siphon hydraulique installé au barrage de Rioumajou en France [54]. Le siphon enjambe le barrage poids-voûte de 21 m de haut. L'embouchure du siphon est située entre la prise d'eau et la vidange de fond située 4 m en dessous, car chaque année les sédiments obstruaient la vidange de fond et menaçaient la prise

d'eau. Dès que le barrage déverse, le fonctionnement du siphon intervient automatiquement. Il est équipé d'un pot de désamorçage automatique complété par une conduite de désamorçage manuel pour les mises au point. La branche aval mesure 450 mm de diamètre et 20 m de long, et elle est équipée d'un bec d'amorçage vers la sortie. La branche amont mesure 400 mm de diamètre et 24 m de long. Cet appareil peut évacuer $1 \text{ m}^3/\text{s}$, et il entraîne des éléments solides dont la masse unitaire atteint 15 kg. Le siphon du barrage de Rioumajou est d'une efficacité remarquable, et il a été amorti pratiquement en une année [54].

2- Des siphons évacuateurs ont également été employés dans des petites retenues dans le nord et le nord-ouest de la Chine pour récupérer la capacité d'origine. Un exemple est le siphon évacuateur expérimental installé dans la retenue de Tianjiawan. La retenue de Tianjiawan a été aménagée en 1960 sur la rivière Fenghe, un affluent du Fleuve Jaune. Sa capacité est $9,42 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Les apports annuels sont de $3,95 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et les apports solides annuels sont de $250 \cdot 10^3 \text{ m}^3$. Pendant la période entre 1960 et 1973, $4,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de sédiments se sont accumulés dans la retenue. Une analyse granulométrique des sédiments a démontrée que sur les 500 premiers mètres à l'amont du barrage, le diamètre moyen des particules est de 0,006 à 0,008 mm. 40 à 48 % des sédiments se constituaient de particules ayant un diamètre inférieur à 0,005 mm, et 44 à 58 % des sédiments se constituaient de particules ayant un diamètre entre 0,05 et 0,005 mm. Le siphon évacuateur fonctionne depuis 1975. Entre Juin 1977 et Juin 1978, un volume total de $298 \times 10^3 \text{ m}^3$ de sédiments a pénétré dans la retenue, tandis que le siphon en a extrait $320 \cdot 10^3 \text{ m}^3$. Le siphon a fonctionné pendant un total de 695 heures, avec une évacuation moyenne de $460 \text{ m}^3/\text{heure}$. La boue évacuée avait une concentration moyenne en éléments solides de 15,6 % du volume [54].

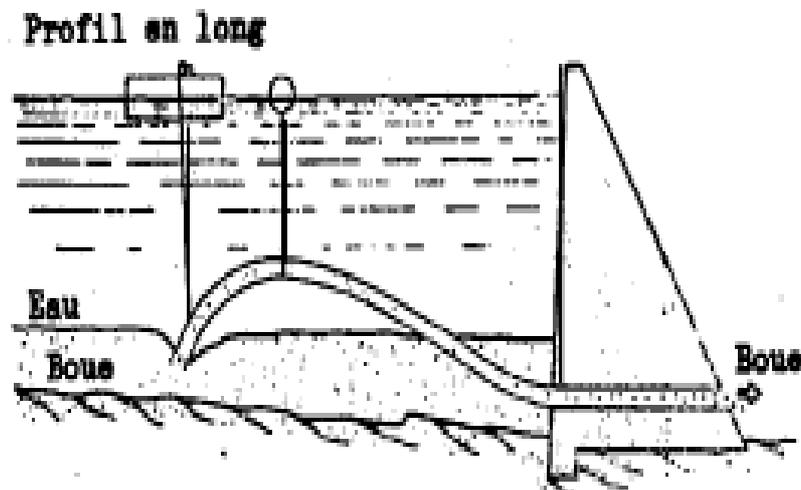


Figure II.4.1: Schéma de l'installation du siphon évacuateur [54]**II.6.2.4 La surélévation du barrage :**

A tous ces moyens s'ajoute dans la mesure où la topographie des lieux le permet, la surélévation des barrages pour compenser la capacité occupée par les sédiments. Cette technique s'avère dans certains cas une solution viable [4][5][35]. Vue l'envasement accéléré des barrages de Hamiz et de Zardezas en Algérie le premier en 1983 il a été surélevé de 7m pour porter sa capacité à 23 millions de m³ le second 1977 et il été surélevé de 12.5m pour porter sa capacité à 31 millions de m³ [5].

MODELISATION

ET

ANALYSE STATISTIQUE

MODELISATION ET ANALYSE STATISTIQUE

III.1.POSITION DU PROBLEME ET ANALYSE STATISTIQUE

Les premières mesures systématiques et standardisées du transport solide en suspension ont débuté en 1946 à la station de TRAILLE, qui contrôle le bassin de oued Isser. Par la suite, ces mesures ont été étendues à une trentaine de stations sur les bassins des côtières Constantinois, Seybousse, Côtier Algérois, Cheliff, Macta, Hodna, Soummam. Après une interruption d'une dizaine d'années, ces mesures ont été reprises en 1970 et étendues à l'ensemble du réseau hydrographique national [7].

A partir des années soixante dix, un nombre important de données sur le transport solide en suspension, qui ont permis d'entreprendre une étude générale sur l'érosion, les écoulements solides et l'envasement des retenues de barrages.

Le principal but à atteindre avec la présente étude est l'exploitation de cette richesse de données des cours d'eau pour l'estimation de la masse des sédiments en qui transitent à travers le cours l'eau considéré au cours du temps. A cet effet une démarche générale à été mise au point, comprenant les actions suivantes [6]:

- Collecte des données contribuant au phénomène en question.
- Traitement statistique et informatique de ces données.
- Filtration de ces données et l'information doit être représentée par un modèle adéquat présentant le lien entre les variables causes et les variables conséquences Etude du régime des débits liquides du cours d'eau par une analyse fréquentielle (Courbe des fréquences cumulées).
- En fin une estimation de la masse des sédiments en suspension transportés; par combinaison entre le modèle et la courbe des fréquences cumulées des débits liquides.

III.1.1. NOTION DE L'ECHANTILLONNAGE [72][73][79][80]:

III.1.1.1. Population et échantillon :

Nous souhaitons souvent, en pratique, pouvoir tirer des conclusions valides à propos d'une population. Au lieu de considérer le groupe entier, ce qui est impossible en hydrologie statistique, vu la taille infinie de la population, nous sommes conduit à envisager qu'une partie de cette dernière, appelée échantillon.

En général un échantillon de taille N peut-être décrit par les variables aléatoires X_i , $i=1$ à N.

III.1.1.2. Caractéristiques de la population:

Il ne saurait être question dans les calculs de toujours de conserver la totalité des réalisations de la variable formant l'échantillon. On peut caractériser un échantillon (population) par certaines variables centrales et de dispersion qui sont estimées à partir d'un échantillon représentatif.

A . LA MOYENNE DE L'ECHANTILLON:

La moyenne d'un échantillon est la variable aléatoire \bar{X} tel que

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N} \dots\dots\dots (III.1)$$

On note \bar{X} la moyenne d'un échantillon d'une population de moyenne μ .

B. LA VARIANCE :

La variance σ^2 d'une population étant inconnue en pratique, à partir d'un échantillon de taille N et de moyenne \bar{X} , on peut estimer la variance de la population considérée par S^2 tel que

$$S^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N} \dots\dots\dots (III.2)$$

C. L'ECART TYPE :

L'écart type S étant la racine carrée de la variance. L'écart type σ d'une population peut être estimé à partir d'un échantillon par S:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N}} \dots\dots\dots (III.4)$$

REMARQUE: L'échantillon ne donne qu'une image déformée de la population ses caractéristiques empiriques convergent vers celles de la population quand l'échantillon est grand; cette déformation représente les erreurs d'échantillonnage.

D. COVARIANCE :

La covariance est une autre grandeur qui apparaît dans le cas de deux variables aléatoires X et Y (ou plus)

$\sigma_{xy} = \text{cov} (X,Y)$: la covariance d'une population à deux variables aléatoires, elle est inconnue. A partir d'un échantillon de taille N elle peut être décrite par les couples de variables aléatoires (X_i, Y_i) ; $i=1$ à n ; et de moyennes, \bar{X}, \bar{Y} estimées respectivement à partir de X et Y, on peut estimer la covariance de la population considérée par S_{xy} tel que :

$$S_{xy} = \frac{\sum (X_i - \bar{X}).(Y_i - \bar{Y})}{N} \dots\dots\dots(III.5)$$

III.1.1.3. Estimation par intervalles de confiances [72][73]72]:

A. INTERVALLE DE CONFIANCE DE LA MOYENNE :

- **Echantillon étendu ($N \geq 30$):**

En fixant l'erreur à α on peut déterminer un intervalle $|\bar{X}_{\alpha/2} - \bar{X}_{1-\alpha/2}|$ contenant \bar{X} à un niveau de confiance ($1-\alpha$), l'intervalle est déterminé par la formule :

$$\bar{X} \pm U_{1-\alpha/2} \cdot \frac{S}{\sqrt{N}} \dots\dots\dots(III.6)$$

Où $U_{1-\alpha/2}$ est une variable normale centrée réduite.

- **Petits échantillons ($N < 30$) « Test de STUDENT »:**

Dans ce cas, on utilise la distribution de STUDENT :

$$\bar{X} \pm t_{1-\alpha/2} \cdot \frac{S}{\sqrt{N}} \dots\dots\dots(III.7)$$

Où t est une variable déterminée dans le tableau de STUDENT pour une erreur α de degré de liberté $\bar{V} = N - 1$.

B. INTERVALLE DE CONFIANCE DE LA VARIANCE:

- **N≤100** : Pour cela on effectue le test de KHI-DEUX :

$$\frac{S \cdot \sqrt{N}}{\chi_{1-\alpha/2}} \leq \sigma \leq \frac{S \cdot \sqrt{N}}{\chi_{\alpha/2}} \dots\dots\dots(III.8)$$

Où χ^2 est une variable déterminé dans le tableau de KHI-DEUX pour une erreur α et un degré de liberté $\bar{v} = N - 1$.

- **N>100** : pour cela : $\sigma \pm U_{1-\alpha/2} \cdot \frac{S}{\sqrt{2N}}$

Où $U_{1-\alpha/2}$ est une variable centrée réduite pour une erreur α .

III.1.2.RECUEIL DES DONNEES :

On utilise les données recueillies dans le but de prédire l'effet, de la sédimentation et pour établir des relations empiriques entre les facteurs contribuant au phénomène. Pour notre présente étude deux échantillons sont nécessaires [11].

- Un échantillon représentatif des couples de valeurs :
 - a) Couples (débit liquide-débit solide en suspension) nécessaire pour l'établissement d'un modèle représentant le lien entre les variables causes et les variables conséquences.
 - b) Couples (débit liquide-concentration solide) nécessaire pour l'établissement d'un modèle représentant le lien entre les variables causes et les variables conséquences.
- ✓ La taille de l'échantillon pour la définition du modèle doit être suffisamment large.
- Un échantillon assez large de débits liquide constituée à partir d'une série des observation des débits à la station de contrôle considérée sans lacunes, relatif à une période aussi longue que possible ; pour une meilleur étude du régime des débits liquides (variables causes) du cours d'eau [11].

III.1.3.TRAITEMENT DES DONNEES :

Une analyse comportant des méthodes statistiques exige que les données soient bien organisées et bien stockées pour parvenir à une décision ou une conclusion. Lors de la collecte et de l'analyse des données, on doit toujours avoir à l'esprit, un fait primordial; la valeur de la variable mesurée est inconnue [75].

La plupart des données recueillies constituent des échantillons nécessaires à une définition approximative de cette vraie valeur.

Dans les échantillons, ainsi sélectionnés en forme de série de données, doivent satisfaire à certains critères statistiques suivant le cas de leurs utilisations; à savoir l'indépendance, la stationnarité.

III.1.3.1.Homogénéité et stationnarité:

Le test de MANN-WHITNEY (in[6][74][76][77]) pour l'homogénéité et la stationnarité consiste à partager la série à contrôler en deux sous-échantillons de taille P et G (P ≤ G).

L'échantillon combiné de taille N=P+G est rangé dans l'ordre croissant.

Le test de M-W considère les quantités : $V=R-P.(P+1)/2.....(III.9)$

$$W=P.G-V..... (III.10)$$

R la somme des rangs des éléments du premier échantillon (taille P) pris dans la série combinée. V et W sont calculés à partir de R, P et G. W peut se calculer de la même manière que pour l'échantillon 1.

La statistique U du test de M-W est définie par le Min (V, W).

Lorsque N>20 et P>3 et sans aucune hypothèse que les deux échantillons dérivent de la même population, U est approximativement normalement distribuée avec:

$$\text{Var}(u) = \left[\frac{P.G}{N.(N-1)} \right] \left[\frac{N^3 - N}{12} . \Sigma T \right](III.11)$$

Avec $T=(J^3-J)/12$, ou J est le nombre d'observations ayant le même rang. La somme ΣT s'effectue pour les deux échantillons. Pour un test de degré de signification α , la quantité $|U| = |(U - \bar{U}) / \sqrt{\text{Var}(U)}|$ est comparée à la variable $U_{\alpha/2}$ de la normale N(0,1) correspondant à la probabilité au dépassement $\alpha/2$.

Si $|U| < U_{\alpha/2}$ Le test d'homogénéité à α % du niveau de signification.

III.1.3.2.Indépendance et stationnarité :

Le test de WALD et WILFOTVITZ (in[6][74][78]) pour l'indépendance et la stationnarité. Soit un échantillon de taille N(X_1, X_2, \dots, X_n); le test de W-W considère la statistique R définie par

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} X_i . X_{i+1} + X_1 . X_N(III.12)$$

Dans ce cas, si les éléments de l'échantillon sont indépendants, alors R suit une distribution normale de moyenne et de variance respectivement :

$$\bar{R} = \frac{S_1^2 - S_2}{N - 1} \dots\dots\dots(III.13) \quad \text{avec} \quad S_j = \sum (X_i - \bar{X})^j \dots\dots\dots(III.14)$$

et
$$\text{Var}(R) = \frac{S_2^2 - S_4}{N - 1} - \bar{R}^2 + \frac{S_1^4 - 4.S_1^2.S_2 + 4.S_1.S_3 + S_2^2.2.S_4}{(N - 1).(N - 2)} \dots\dots\dots(III.15)$$

La quantité $U = \frac{R - \bar{R}}{\sqrt{\text{Var}(R)}}$ suit la distribution normale standard N (0,1) et peut être utiliser pour tester l'hypothèse d'indépendance au niveau α , en comparant $|U|$ avec le déviateur $U_{\alpha/2}$ de la normale N(0,1) correspondant à la probabilité de dépassement $\alpha/2$.

Si $|U| < U_{\alpha/2}$ L'hypothèse d'indépendance à $\alpha\%$ du niveau de signification.

III.1.3.3.Ditection des valeurs hors position:

Pour appliquer le test de SEVRUK et GEIGER (in[4][73][74]), il faut faire l'hypothèse que les logarithmes des valeurs de l'échantillon sont normalement distribués. Pour appliquer le test de (S-G), deux quantités sont calculées :

$$X_H = \text{EXP}(\bar{X} + K_N.S) \dots\dots\dots (III.16)$$

$$X_L = \text{EXP}(\bar{X} - K_N.S) \dots\dots\dots (III.17)$$

Où \bar{X} et S sont respectivement la moyenne et l'écart type du logarithme naturel de l'échantillon.

K_N est la statistique de (G-B) tabulé pour différent tailles d'échantillons .Pour un même niveau de signification de 10% le polynôme suivant proposé par PILTON et AL (1985), est utilisé dans le logiciel H.F.A pour l'estimation des valeurs tabulées.

$$K_N = -3,62201 + 6,28446.N^{1/4} - 2,49835.N^{1/2} + 0,491436.N^{3/4} - 0,037911.N \dots\dots\dots(III.18)$$

Où N est la taille de l'échantillon.

En appliquant le test de (S-G) quelques valeurs de l'échantillon supérieures à X_N sont considérées être des grandes hors position et d'autres inférieures à X_L sont considérées des petites hors position.

REMARQUE: Ce dernier test est utilisé dans le cas d'ajustement à une courbe de distribution théorique des fréquences.

III.2.ELABORATION D'UN MODELE PAR APPROXIMATION DES DONNEES :

Un phénomène hydraulique (système), peut se concevoir comme étant une relation entre des causes (variables d'entrées) et des conséquences (variables de sorties) que l'on peut schématiser comme suit :

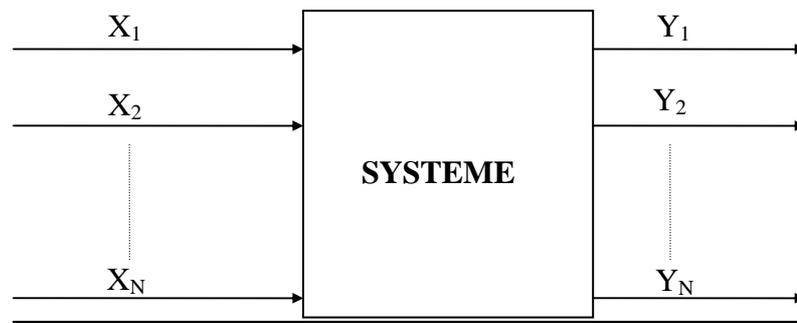


Figure.III.2.1 Schéma d'un système

Généralement, l'étude d'un tel phénomène consiste à prévoir l'état ou l'évolution des grandeurs de sortie en réponse à une valeur ou une variation des grandeurs d'entrée à l'aide d'un modèle. Ce chapitre, sera consacré à l'élaboration d'un modèle permettant une représentation adéquate d'un phénomène dont le comportement est décrit par les données statistiques [7].

En pratique cette élaboration du modèle dépend essentiellement du décideur qui doit définir quelques caractéristiques de son échantillon statistique [7], on cite entre autre :

- La précision de mesure des données.
- Les raisons pour lesquelles le décideur s'est basé pour confirmer l'existence d'une relation fonctionnelle entre les variables qui entrent en jeu.
- Possibilité de proposer un modèle précis et de faire des hypothèses a priori sur les données.

En effet, toutes les caractéristiques vont nous permettre de définir la méthode la plus efficace pour la manipulation de ces données ainsi :

- La précision des mesures permet le choix entre une interpolation et une approximation.
- La nature de la relation fondamentale entre les variables permet le choix entre un modèle de connaissance ou statistique.

II.2.1.MODELISATION :

L'ingénieur a souvent à prendre des décisions au sujet des phénomènes dont il ne connaît pas le comportement sauf par des données mesurées. La connaissance fondamentale des

phénomènes en question nous permet de proposer un modèle précis, déterministe que l'on nomme modèle de la connaissance, qui exprime la relation existante entre les variables d'entrée et de sortie du système.

Mais, malheureusement dans la plus part des cas on ignore les mécanismes précis du phénomène ou encore, les mesures effectuées sur ce dernier peuvent être influencées par des variations aléatoires incontrôlables. On peut alors proposer un modèle statistique dont on cherchera à estimer les paramètres à partir de l'échantillon de mesure [6].

III.2.2.MODELE STATISTIQUE :

Les mesures effectuées sur les grandeurs réagissant un phénomène, sont soumises à des perturbations qui sont difficiles à synthétiser et l'information qu'elles contiennent sont difficilement utilisables sans une technique de représentation algébrique de ces données. Alors on doit proposer une relation empirique et on parle souvent d'un modèle statistique du système représentatif de la relation entre les variables d'entrée et celles de sortie. Un modèle statistique est de la forme :

$$Y = F(x) + \varepsilon \quad \dots\dots\dots (III.19)$$

Il est caractérisé par l'existence d'un résidu (ε) dû à des fluctuations aléatoires. Ainsi, l'amélioration du modèle exige la recherche; soit d'autres variables qui influent sur le comportement du phénomène ; soit d'autre part imposer d'autres opérateurs de transformation des variables causes en variables conséquences [6].

III.2.3.AVANTAGE D'UN MODELE :

Parmi les avantages d'un modèle on cite :

- L'exploitation des données expérimentales, exprimant le mieux possible un problème donné.
- Réduction de l'ensemble de données au nombre de modèle, tout en gardant l'information continue dans les données.
- Simulation du comportement de système.
- Exploitation des conséquences logiques des hypothèses.
- Amélioration de la conception de la réalité.

L'élaboration d'un modèle nécessite un critère ou une procédure de décision sur l'acceptation ou le rejet du modèle.

III.2.4.ESTIMATION DES PARAMETRES DU MODELE :

En pratique, avant de procéder à l'estimation, il est intéressant de vérifier si le modèle proposé est linéaire ou linéarisable. En fait, un modèle est linéaire s'il peut s'écrire sous la forme :

$$Y = A \cdot X + B \quad (III.20)$$

Un modèle est linéarisable s'il peut être ramené à la forme (III.20) par un changement de variables (le cas de notre étude). En général, pour les modèles linéaires ou linéarisables la méthode des moindres carrés est la plus utilisée pour l'estimation des paramètres, mais concernant les modèles non linéarisables, le recours aux méthodes de programmation non linéarisable est inévitable.

III.2.4.1.Méthode des moindres carrés [72][79][80][81]:

La méthode des moindres carrés est un outil mathématique permettant de faire une approximation de données par une fonction analytique.

Définition : La droite qui approche un ensemble de points, obéissant à la norme euclidienne ($\|Y-Y^*\| = \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_i^*)^2$) est la meilleure droite d'ajustement avec Y^* est une fonction analytique [72].

La droite présentant cette propriété est dite, s'ajuster aux données au sens des moindres carrés, et elle est appelée « droite de régression des moindres carrés ». En appliquant la définition, nous pourrions montrer que la droite des moindres carrés approche l'ensemble des points (X_i, Y_i) et à pour équation, l'équation (III.20). Où les constantes A et B sont données par :

$$A = \frac{\sum (X - \bar{X}) \cdot (Y - \bar{Y})}{\sum (X - \bar{X})^2} \dots\dots\dots(III.21) \quad \text{et} \quad B = \bar{Y} - A \cdot \bar{X} \dots\dots\dots (III.22)$$

L'équation de la droite s'écrit : $Y = A \cdot X + B = A \cdot (X - \bar{X}) + \bar{Y} \dots\dots\dots(III.23)$

Ceci montre que la droite passe par le point (\bar{X}, \bar{Y}) ; centre de gravité des données. En fonction de la variance et de la covariance, la droite des moindres carrés pour Y et X s'exprime :

$$Y - \bar{Y} = \frac{S_{XY}}{S_X^2} \cdot (X - \bar{X}) \quad (III.24)$$

III.2.5.VALIDITE DU MODELE [72] [79]:

III.2.5.1.Coefficient de corrélation :

On est amené à déterminer statistiquement le degré de validité d’une relation de régression par la détermination d’un coefficient de corrélation, et l’étude de sa signification. Par définition,

on appelle coefficient de corrélation la quantité R telle que : $R = \frac{S_{XY}}{S_X \cdot S_Y}$ (III.25)

De l’équation (III.21), on aura : $\frac{Y - \bar{Y}}{S_Y} = R \cdot \frac{X - \bar{X}}{S_X}$ (III.26)

Le coefficient de corrélation R est toujours compris entre -1 et +1, il vaut (±1) dans le cas d’une liaison fonctionnelle parfaite, il vaut (0) dans le cas contraire.

III.2.5.2.Test de corrélation :

Suivant la figure.III.2.2, on peut calculer les variances :

$$V_r = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{N-1} \dots\dots(III.27) \quad \text{et} \quad V_c = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{1} = R^2 \cdot \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \dots\dots(III.28)$$

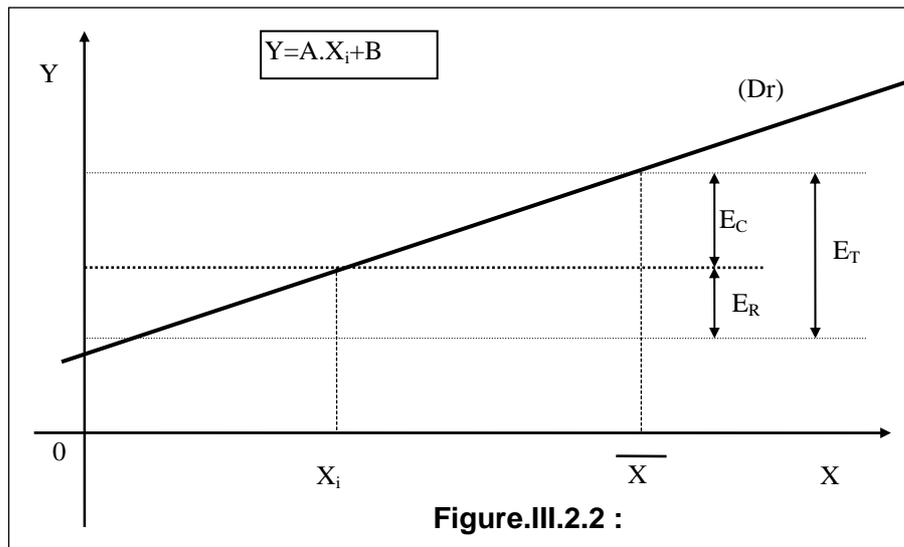
$$V_r = \frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{N-2} = \frac{(1-R^2) \cdot \sum (Y_i - \bar{Y})^2}{N-2} \dots\dots\dots(III.29)$$

Si les variables aléatoires X et Y sont normales, le rapport : $F = \frac{V_c}{V_r} = \frac{R^2 \cdot (N-2)}{1-R^2}$ (III.30)

F est une variable de FISHER-SNEDECOR à $v_1 = 1$ et $v_2 = N-2$ degré de liberté.

On peut donc tester l’adéquation du modèle (signification de la régression) avec un risque α quand : $F > F_\alpha(1, N-2)$

E_C : Ecart dû à la régression.



E_R : Ecart résiduel.

E_T : Ecart total.

(Dr): Droite de régression.

III.2.6.PRECISION D'UNE CORRELATION "INTERVALLE DE PREDICTION" [73][79]:

En fixant l'erreur à α , on peut déterminer un intervalle contenant Y_i à un niveau de confiance de $(1-\alpha)$, l'intervalle pour les grandes valeurs de N , dont les limites de confiances de cette population théorique sont données part:

$$Y_i \pm U_{1-\alpha/2} \cdot \sqrt{V_R} \dots \dots \dots (III.31)$$

$U_{1-\alpha/2}$: est une variable normale centrée réduite pour une erreur α .

V_R : variance résiduelle, préalablement calculée.

III.3.REGIME DES DEBITS LIQUIDES :

Les relevés de débits effectués pendant une longue période à une station de jaugeage, forment un grand ensemble de chiffres et de graphiques qu'il faudra dépouiller et classer selon les méthodes existantes pour faciliter leur analyse et permettre à l'hydrologue d'en tirer le maximum de profit [82].

Il est souvent utile de visualiser une distribution au moyen d'une représentation graphique. On peut avoir recours à différentes sortes de diagrammes selon le type de variables étudiées et l'utilisation de celle-ci (les diagrammes en escalier, polygonaux, cumulatifs...)[75].

Une autre technique utilisée notamment en hydrologie, qui fait interpréter les observations d'un événement hydrologique en terme de probabilité d'apparition, cette méthode statistique est basée sur l'analyse de la fréquence [75] [82].

En cas de la présentation des débits moyens journaliers l'emploi de la série complète serait justifié pour des études tendant à déterminer le nombre de jours ou le pourcentage de temps pendant lequel le débit de cours d'eau s'est maintenu au-dessus d'une valeur déterminée (courbe des débits classés) [82].

III.3.1.COURBE DES DEBITS CLASSES [75][83][84]:

Si on enregistre, chaque jour dans une station de jaugeage, le débit moyen journalier, au terme, on obtient une série de 365 valeurs qui présentent le classement chronologique des débits moyens journaliers.

Cependant pour l'étude statistique des débits liquides un autre classement monotone par valeurs décroissantes est utilisé, la courbe obtenue est dite «courbe des débits classés».

III.3.1.1.Construction géométrique de la courbe des débits classés [75]:

Si on considère la courbe des débits classés par valeurs décroissantes, le premier point représentera le débit maximum de l'année. Le dernier point correspondra au débit d'étiage.

Un point quelconque de la courbe, sera tel que son ordonné « q » sera la valeur du débit journalier atteint ou dépassé pendant un nombre de jours « j » en abscisse.

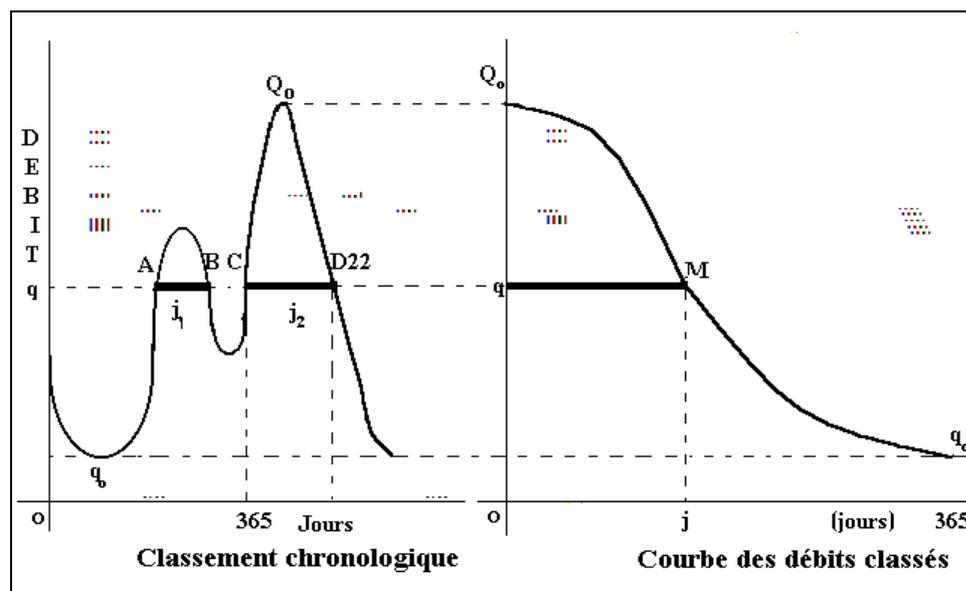


Fig.III.3.1 : Construction géométrique de la courbe des débits classés [75]

On peut tracer directement la courbe des débits classés à partir de la courbe du classement chronologique, comme le montre la figure : III.3.1. La courbe chronologique intercepte sur l'horizontal l'ordonné « q », un certain nombre de segments AB, CD,..., dont la longueur totale est $J=J_1+J_{i+1} + \dots J$: représentent le nombre de jours pendant lesquels les débits journaliers ont été supérieurs à « q ». D'où le point M (q, J) de la courbe des débits classés [75].

III.3.1.2.Courbe relative à N années [75][83]:

Nous pouvons classer les débits relatifs à une période de N années d'observation. La courbe correspondante des débits classés, nous fera savoir, en partons d'un très grand nombre de cas observés, la probabilité pour que le débit de la rivière soit supérieur à un débit donné q (compris entre q_0 et Q_0). En effet, si « t » est l'abscisse relative au débit « q » et « T » l'abscisse maximum, relative au débit q_0 , on voit que la probabilité pour que le débit soit supérieur à « q » est « t/T » (rapport du nombre de cas favorables au nombre de cas observés).

Nous pouvons graduer les abscisses en pourcentage qui permet la lecture de la probabilité figure III.3.2.

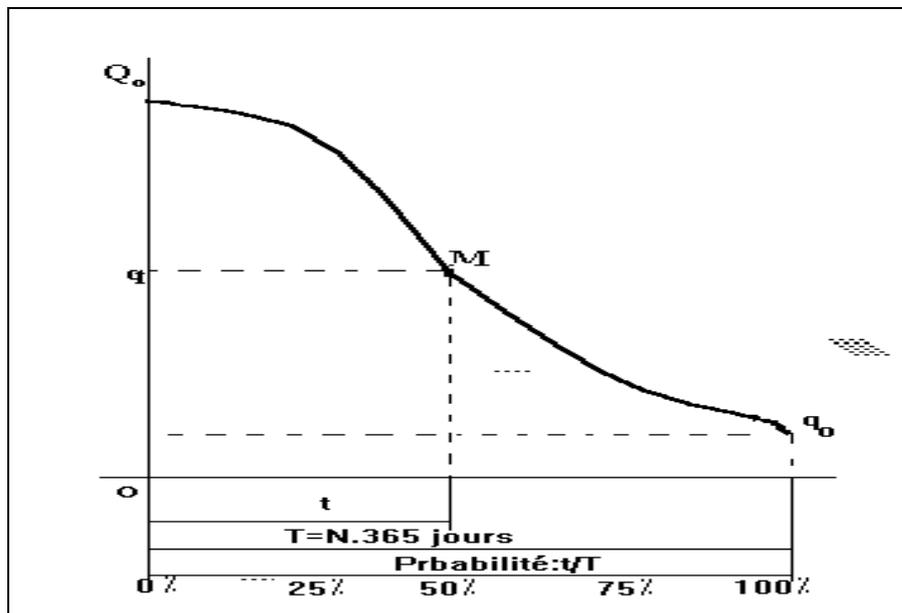


Fig.III.3.2 : courbes des débits classés relative à N années

III.3.2.ESTIMATION DES LOIS DE PROBABILITES DES VARIABLES CAUSES :

Elle se fait en plusieurs étapes :

III.3.2.1.Répartition de la statistique d’observation en classes [85][86]:

En générale le nombre de classes est estimé par la formule suivante :

$$K = \langle \text{Log}_2(N) \rangle + 1 \dots \dots \dots \text{(III.32)}$$

N : Taille de l’échantillon.

$\langle X \rangle$: partie entière de X.

L’amplitude des classes (Intervalle de classe) est donné par :

$$H = \frac{\text{Max}(X_i) - \text{Min}(X_i)}{K} \dots \dots \dots \text{(III.33)} \quad i = 1 \text{ -- } N$$

On classe les débits X_i observés par groupes (classes); tous les débits compris entre X_i et $X_i + H$, leur nombre est N_i (effectif). On obtient ainsi K rectangles juxtaposés de même largeur H et de hauteurs différentes f_i avec : $f_i = n_i / N$ probabilité pour qu’un débit soit constaté entre X_i et X_{i+1} (in[72][85]).

On visualise la représentation au moyen d’un histogramme fig.III.3.3.

III.3.2.2.TABLEAU DE FREQUENCES :

<i>Classe</i>	<i>Effectif</i>	<i>FREQUENCE</i>
$[X_1, X_2]$	n_1	f_1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$[X_K, X_{K+1}]$	n_K	f_K

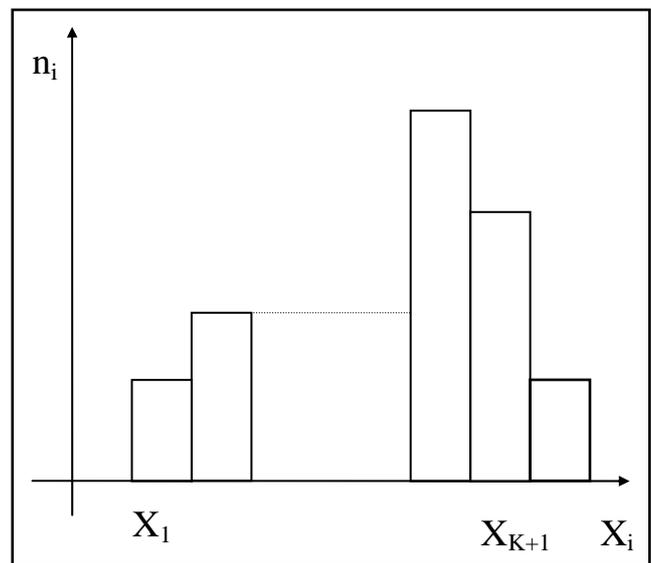


Figure.III.3.3 : histogramme des fréquences

III.3.2.3.Courbes de fréquences des débits :

Nous pouvons tracer, en joignons les milieux des cotes des rectangles une ligne polygonale dite : « polygonale de fréquences ».

Même chose, si nous présentons les fréquences cumulées F_i au lieu de f_i , nous aurons le polygonale des fréquences. Pour H très petit et N très grand, nous obtenons une courbe de fréquences et une courbe des fréquences cumulées [86].

Nous pouvons estimer ces deux courbes par un lissage, avec comme critère : « La surface sous la courbe de lissage doit être égale à la surface sous l'histogramme, ou bien l'histogramme cumulatif pour la courbe des fréquences cumulées » [86].

REMARQUE : La courbe des fréquences cumulées pour les débits liquides moyens journaliers est dite courbe des débits classés.

III.3.3.AJUSTEMENT A UNE COURBE DE DISTRIBUTION THEORIQUE DES FREQUENCES:

D'une utilisation très répandue aujourd'hui ; des méthodes d'ajustement à la courbe des fréquences des débits observés à une courbe de distribution théorique telle que celles de : GALTON, PEARSON, GUMBEL,... La meilleure répartition théorique de probabilité représentant l'échantillon sera adoptée [84][85][86].

REMARQUE :

- ◆ Pour les débits moyens journaliers GIBRAT a montré que la distribution de GALTON s'adapte mieux pour de nombreuses rivières [83].
- ◆ L'ajustement est indispensable dans le cas où la période d'observation est relativement étroite (< 20 ans) [75] [83].

III.4.ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSIONS :

Dans ce modeste travail nous proposons deux approches simples pour l'estimation des apports solides en suspension qui sont :

- Une estimation par modélisation statistique à une seule corrélation.
- Une estimation par modélisation statistique à doubles corrélations

Les deux approches sont basées sur l'exploitation des données hydrométriques recueillies aux stations de jaugeages contrôlant des oueds à l'exutoire des bassins versants

III.4.1.ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSIONS PAR MODELISATION STATISTIQUE A UNE CORRELATION :

Dans cette approche l'estimation se basera sur les débits liquides et les débits solides calculés à la base des données collectées à la station de jaugeage (hauteur, concentration)

III.4.1.1. ETAPES A SUIVRE [11][87][88][89]

1. collecte de données nécessaires à l'étude :
 - a. un fichier de débits moyen journalier (série assez longue sans lacune) satisfaisant le critère d'homogénéité
 - b. Un fichier de couple de valeurs (débit liquide, débit solide) série aussi longue que possible satisfaisant les tests d'homogénéité et d'indépendance.
2. élaboration de la courbe des fréquences cumulées
3. corrélation débit liquide – débit solide et détermination du modèle $Q_s = F(Q)$
4. Confrontation du modèle $Q_s = F(Q)$ avec la courbe des fréquences cumulées et détermination de la concentration moyenne interannuelle (Q_{sm})
5. Evaluation de l'apport solide en suspension

III.4.1.2. APPORT SOLIDE EN SUSPENSION [11][87][88][89]

L'estimation de la masse des sédiments en suspension se fait selon les étapes suivantes:

- ⇒ Deviser la courbe de fréquences cumulées des débits liquides en plusieurs intervalles de fréquences $[f_i, f_{i+1}]$.
- ⇒ Calculer des débits liquides atteints ou dépassés Q_i ; correspondant à la médiane de chaque intervalle de fréquences.
- ⇒ Pour chaque débit liquide Q_i ; on calcule le débit solide en suspension Q_{si} ; en utilisant le modèle statistique $Q_s = f(Q)$ « préalablement déterminé ».

- ⇒ Evaluer le débit solide moyen interannuel par : $Q_{sm} = \sum_{i=1}^n Q_{si} \cdot (f_{i+1} - f_i)$

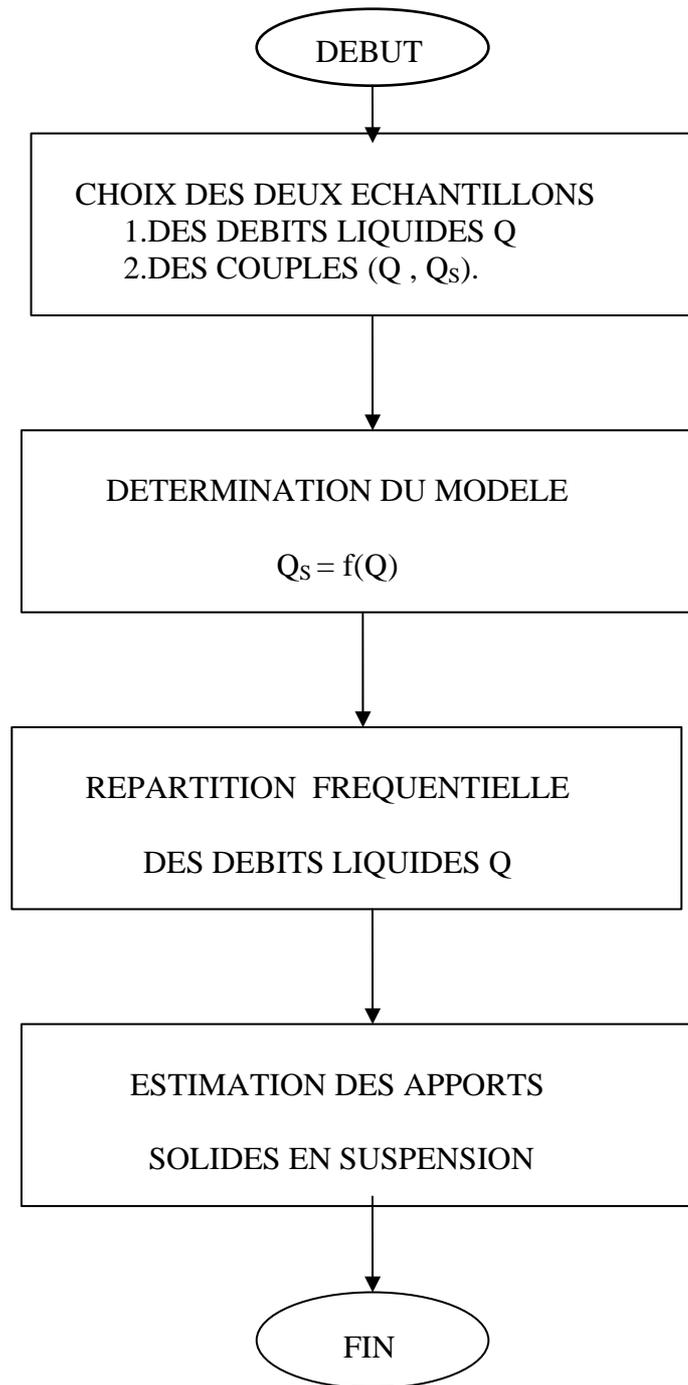
REMARQUE: Cette estimation se fera après avoir testé les fichiers de données vis à vis des tests statistiques cités auparavant.

III.4.1.3. ORGANIGRAMME DE TRAVAIL :

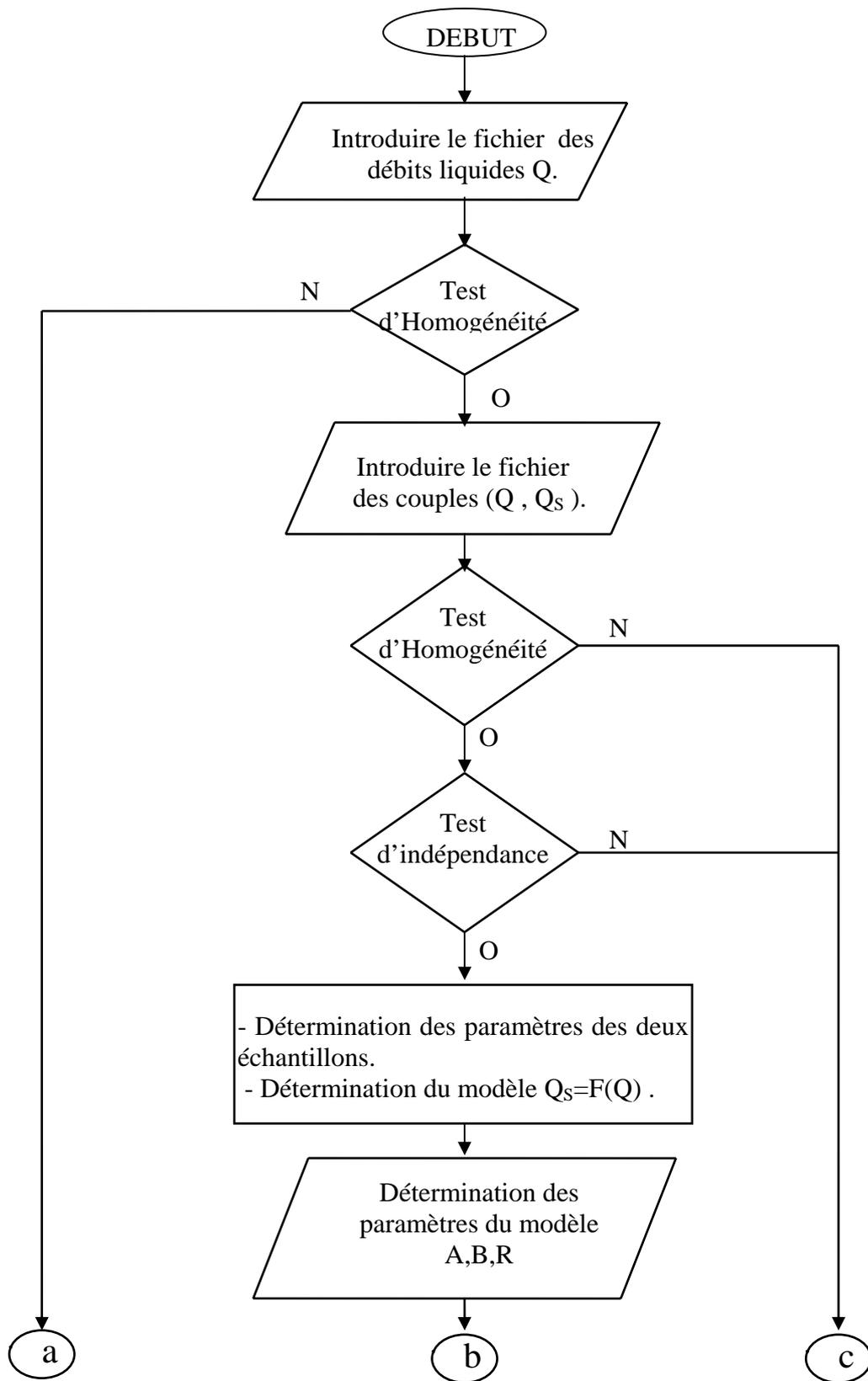
Vu l'importance des tailles des fichiers des données contribuant au phénomène en question ainsi que les modes d'estimation envisagés ; un programme de calcul automatique a été spécialement conçu dont les organigrammes ci-dessous :

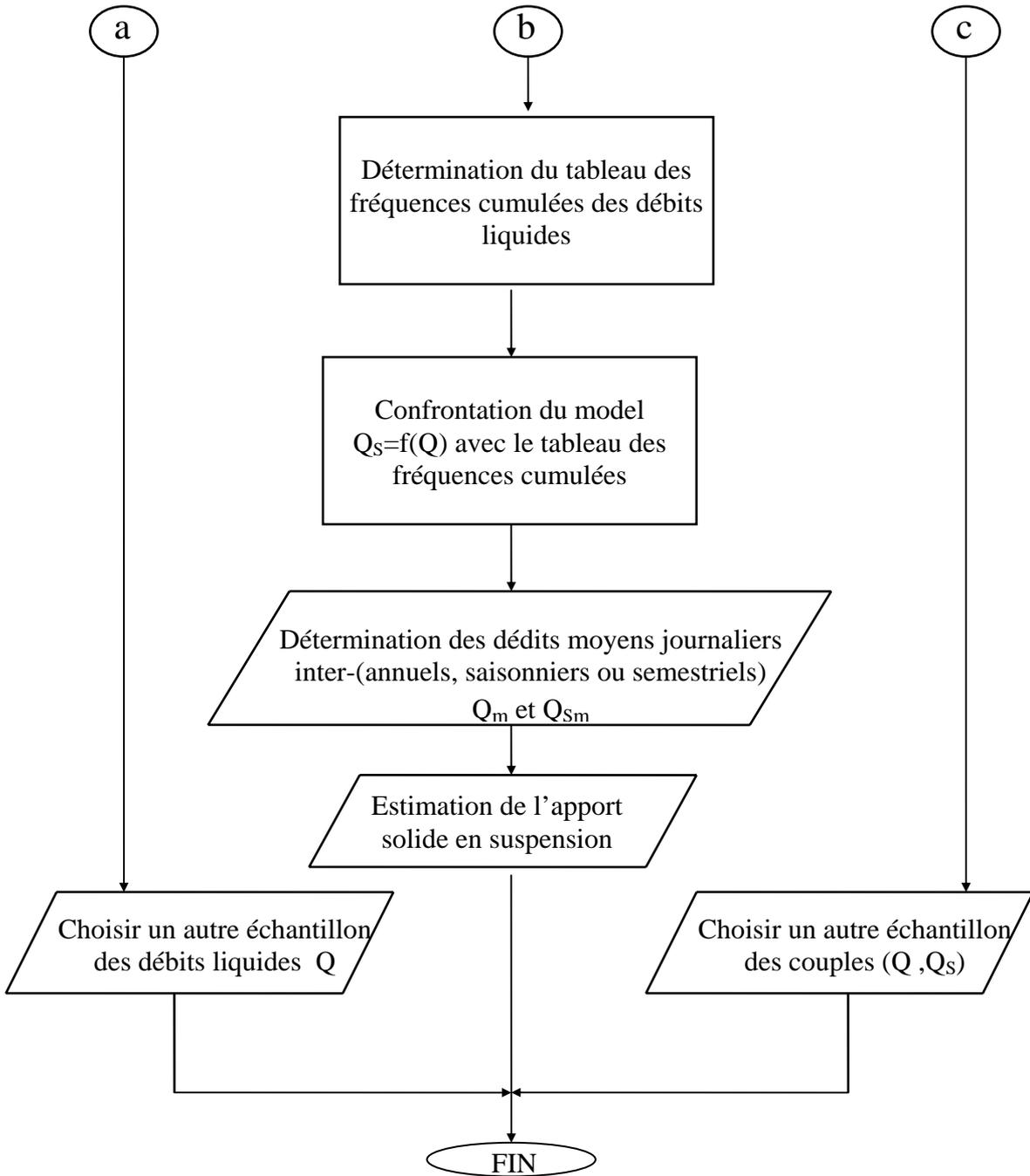
- a) Organigramme sommaire.
- b) Organigramme général.
- c) Organigramme de choix des échantillons.
- d) Organigramme d'élaboration d'un modèle.
- e) Organigramme d'étude fréquentielle des débits liquides.
- f) Organigramme d'estimation des apports solides en suspension.

A. ORGANIGRAMME SOMMAIRE :

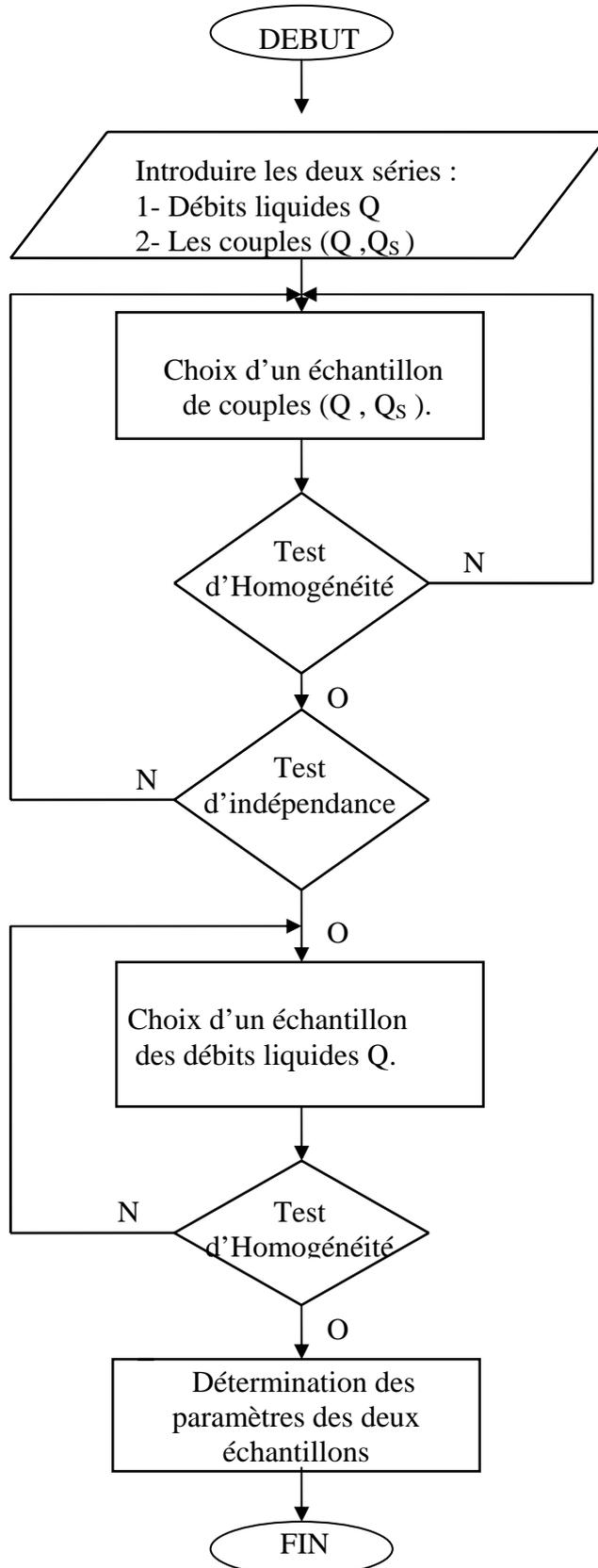


B. ORGANIGRAMME GENERAL [11][87][88]:

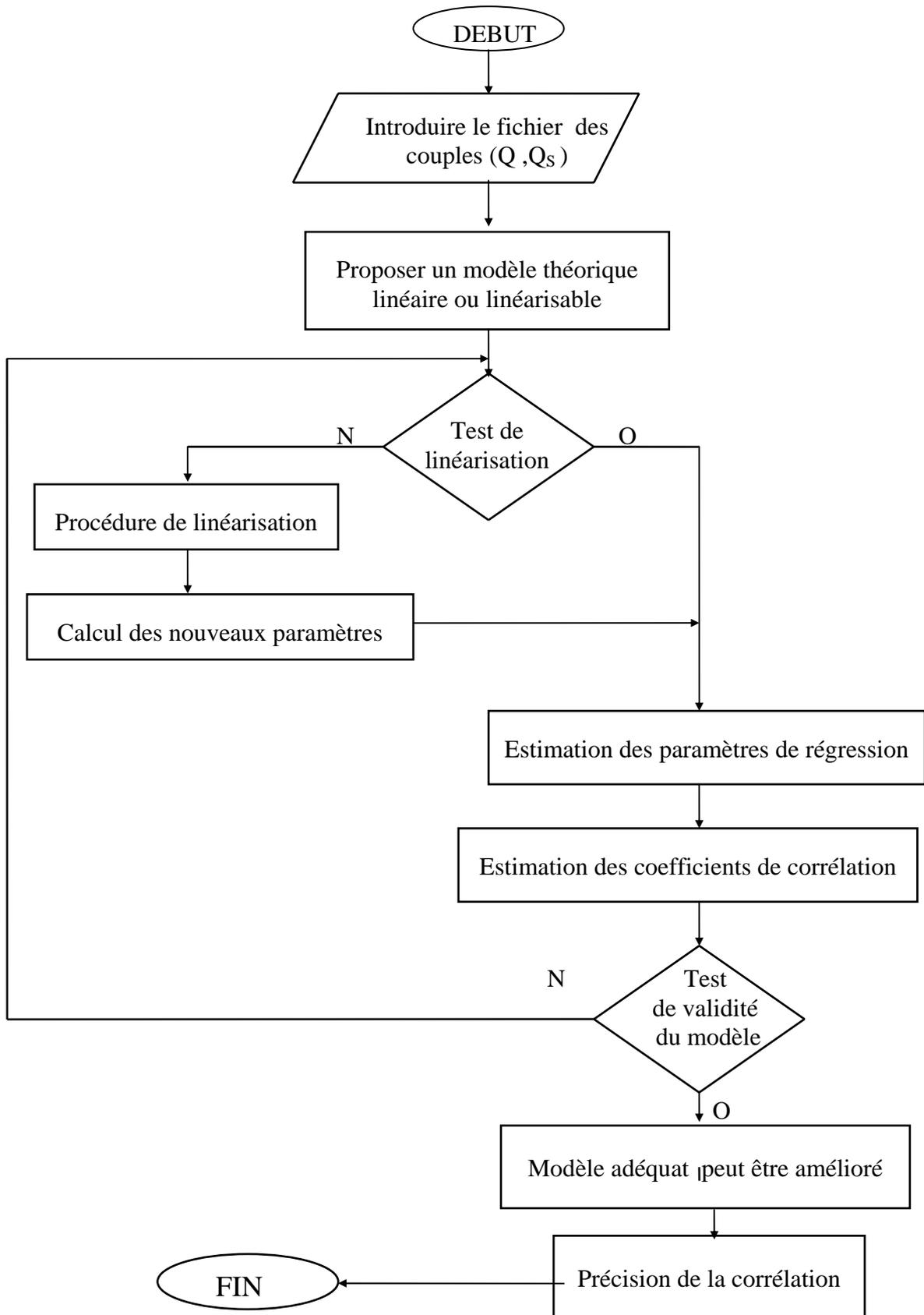




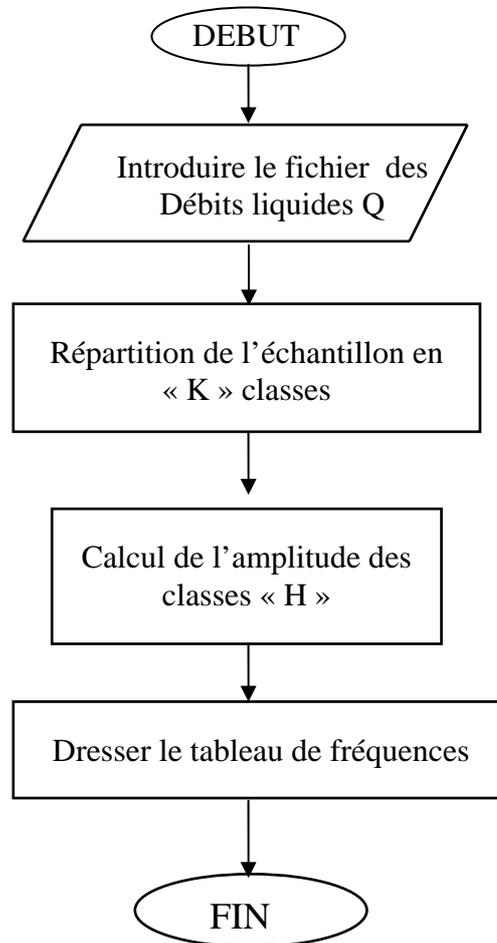
C. ORGANIGRAMME DE CHOIX DES ECHANTILLONS [6]:



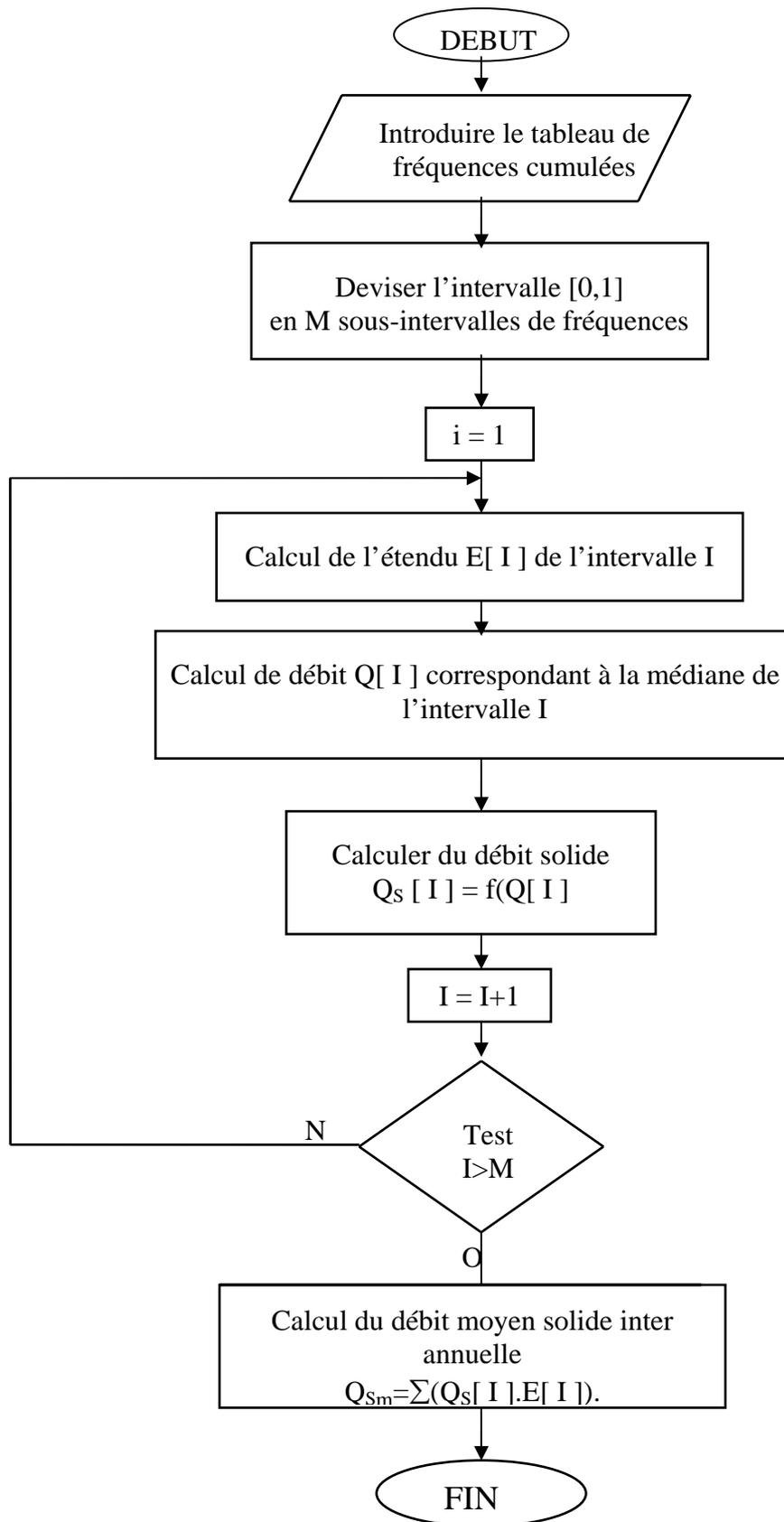
D. Organigramme d'élaboration d'un modèle.



E. ORGANIGRAMME D'ETUDE FREQUENCIELLE DES DEBITS LIQUIDES [6]



F. ORGANIGRAMME D'ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSION



III.4.2. ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSIONS PAR MODELISATION STATISTIQUE A DOUBLE CORRELATIONS :

afin d'utiliser directement les données disponibles brutes (débit liquide et concentration) nous avons jugé intéressant d'entreprendre une approche d'estimation à la base de ces données brutes, qui sera complétée par une seconde corrélation entre débit solide et concentration cette fois-ci.

III.4.2.1. ETAPES A SUIVRE

- 1) collecte de données nécessaires à l'étude :
 - a. Un fichier de débits moyen journalier (série assez longue sans lacune) satisfaisant le critère d'homogénéité
 - b. Un fichier de couple de valeurs (débit liquide, concentration) série aussi longue que possible satisfaisant les tests d'homogénéité et d'indépendance.
 - c. Un fichier de couple de valeurs (concentration, débit solide) série aussi longue que possible satisfaisant les tests d'homogénéité et d'indépendance.
- 2) élaboration de la courbe des fréquences cumulées
- 3) corrélation débit liquide – concentration et détermination du modèle $C_s = F(Q)$
- 4) Confrontation du modèle $C_s = F(Q)$ avec la courbe des fréquences cumulées et détermination de la concentration moyenne inter-annuelle (C_{sm})
- 5) corrélation concentration – débit solide et détermination du modèle $Q_s = F(C_s)$
- 6) Evaluation de l'apport solide en suspension

III.4.2.2. EVALUATION DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION

L'estimation de la masse des sédiments en suspension se fait selon les étapes suivantes:

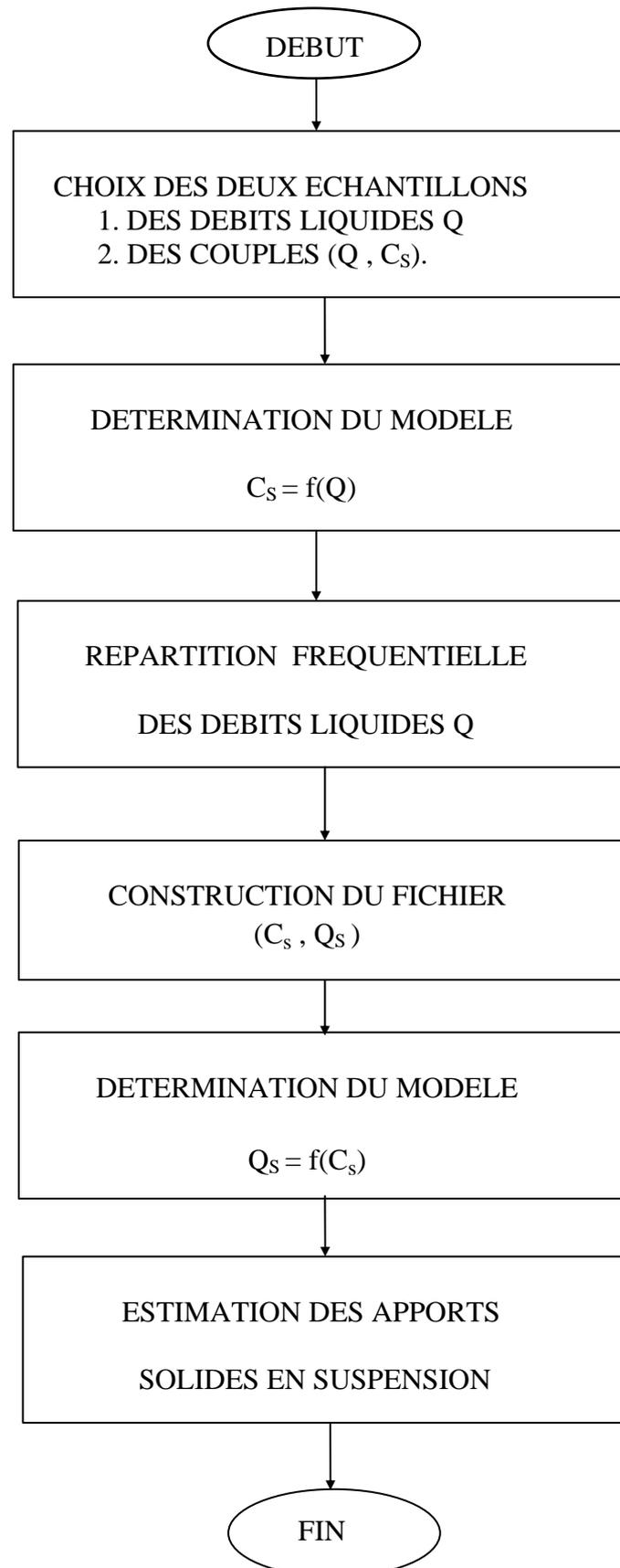
- ❖ Division de la courbe de fréquence cumulée des débits liquides en plusieurs intervalles de fréquences $[f_i, f_{i+1}]$.
- ❖ Détermination des débits liquides atteints ou dépassés Q_i correspondant à la médiane de chaque intervalle de fréquence.
- ❖ Pour chaque débit liquide Q_i , on calcule la concentration en matière solide correspondante en utilisant le modèle statistique $C_s = f(Q)$
- ❖ Evaluation de la concentration moyenne inter annuelle par : $C_{sm} = \sum_{i=1}^n C_{si} \cdot (f_{i+1} - f_i)$
- ❖ Evaluation de l'apport solide moyen inter annuel par le modèle préalablement déterminé : $Q_s = F(C_s)$.
- ❖ Estimation des apports solides drainés par ce cours d'eau en question sur une période donnée

III.4.2.3.ORGANIGRAMME DE TRAVAIL :

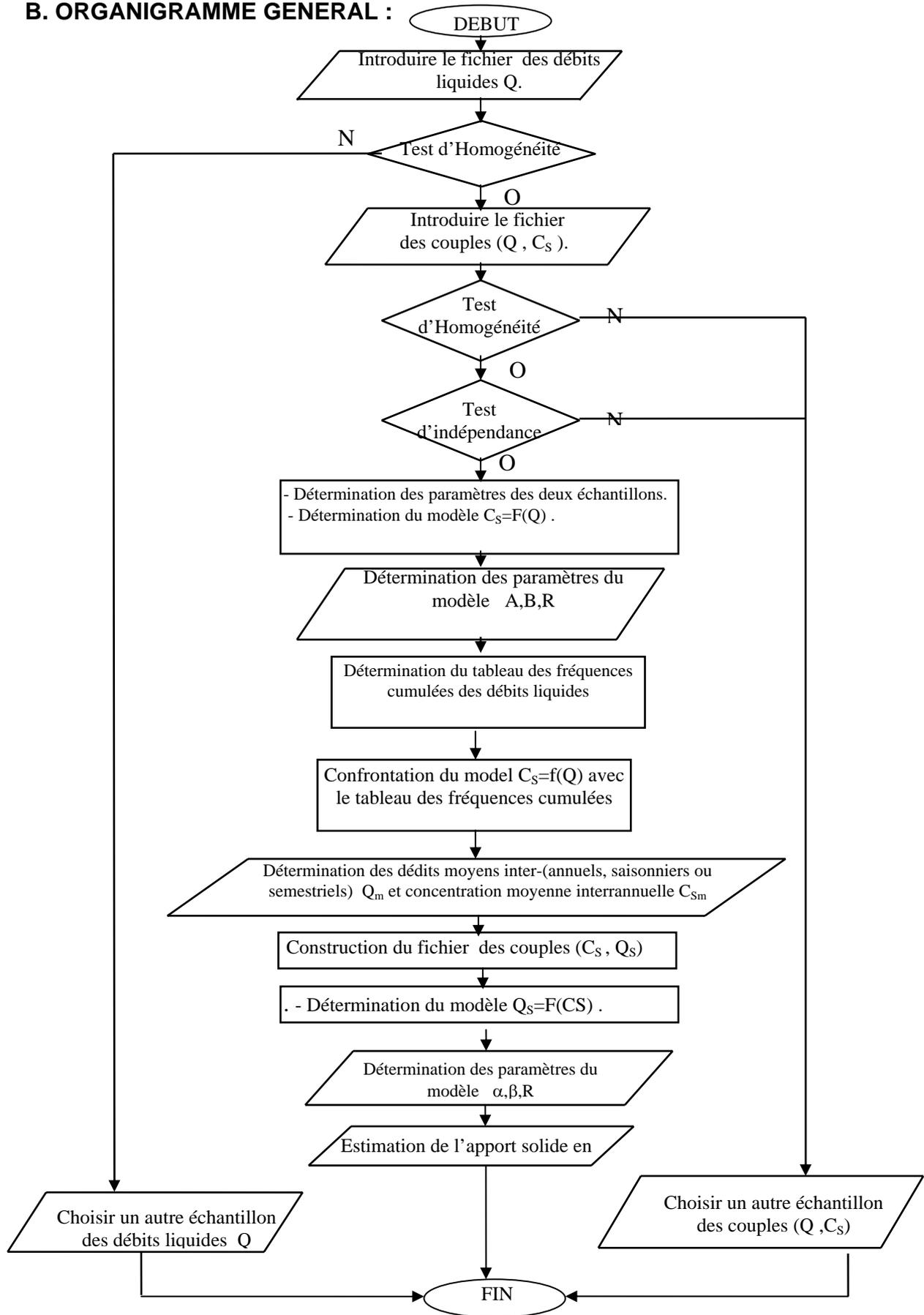
Vu l'importance des tailles des fichiers des données contribuant au phénomène en question ainsi que les modes d'estimation envisagés ; un deuxième programme de calcul automatique a été spécialement conçu suivant les organigrammes ci-dessous :

- a) Organigramme sommaire.
- b) Organigramme général.
- c) Organigramme de choix des échantillons.
- d) Organigramme d'élaboration d'un modèle (même organigramme que la précédente approche).
- e) Organigramme d'étude fréquentielle des débits liquides (même organigramme que la précédente approche).
- f) Organigramme d'estimation des apports solides en suspension.

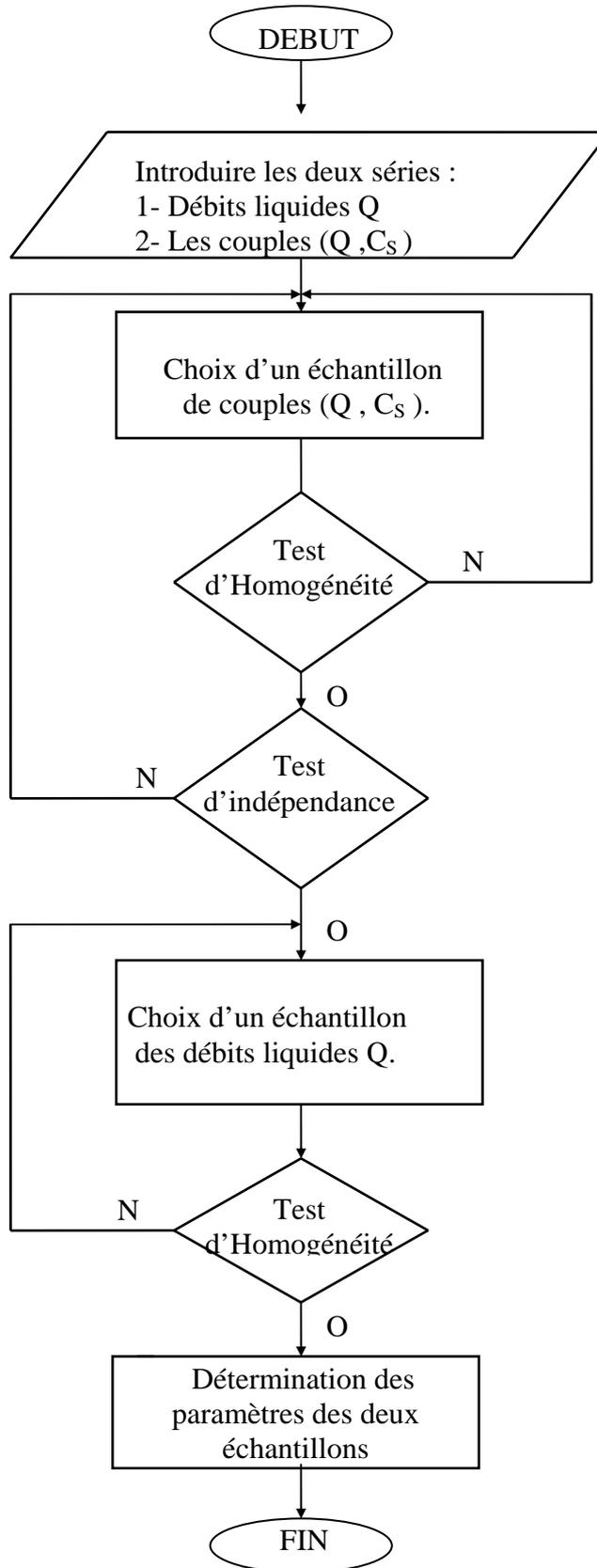
A. ORGANIGRAMME SOMMAIRE :



B. ORGANIGRAMME GENERAL :



C. ORGANIGRAMME DE CHOIX DES ECHANTILLONS :



PRESENTATION
DE LA
ZONE D'APPLICATION

PRESENTATION DE LA ZONE D'APPLICATION

Le bassin versant de CHELLIF a été choisi comme exemple d'application dans cette thèse, suite à l'importance de ce dernier, du fait qu'il est le plus important bassin versant de nord du pays, il est d'une érodabilité non négligeable, il comporte un nombre important d'infrastructures hydrauliques susceptibles d'être affectées par le phénomène du transport solide, ainsi que pour la disponibilité de données nécessaires à l'étude (débits liquide, concentrations solides et débits solide).

IV.1. SITUATION DE BASSIN VERSANT DE CHELLIF

Le bassin de CHELLIF est situé au Nord-Ouest de l'Algérie, il est le plus grand bassin du Nord. De point de vue administratif, il dépend du bassin hydrographique du CHELIF-ZAHREZ géré par une agence de bassin hydrographique portant le nom (ABH Cheliff-Zahrez). La région du Cheliff - Zahrez est limitée au Nord par la mer méditerranée, à l'Ouest par la région Oranie - Chott - Chergui, au Sud par le désert et à l'Est par la région de l'Algérois-Chott-Hodna, la région est bordée par deux chaînes principales, l'Atlas tellien au Nord et l'Atlas saharien au Sud. Englobant treize (13) Wilayas dont trois (3) en totalité (CHLEF, TISSEMSILT et RELIZANE) et dix wilayas en partie (MEDEA, TIARET, AIN DEFLA, MOSTAGANEM, MASCARA, TIPAZA, DJELFA, LAGHOUAT, SAIDA et M'SILA). Le bassin versant de Cheliff étant le plus important, son étendue est assez importante, interjeté par son découpage classique (Haut, Moyen et Bas Cheliff). La figure IV.I montre la situation de bassin versant de CHELLIF au sein de bassin hydrographique de Cheliff-Zahrez.

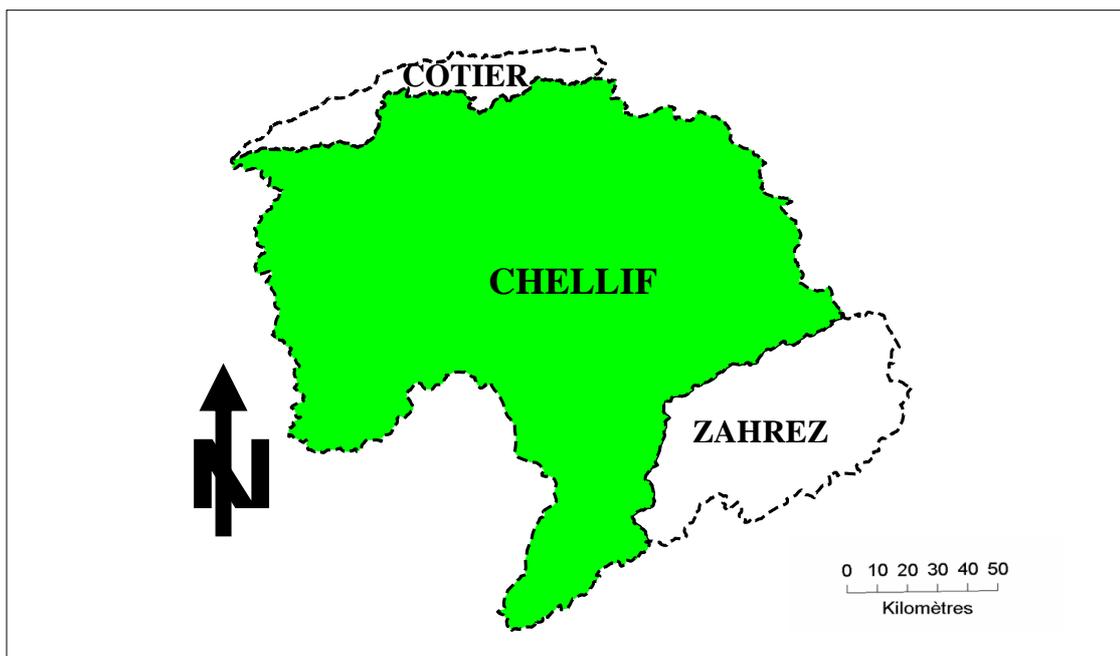


Figure IV.1.1. LE bassin de Chellif au sein du CHELIFF-ZAHREZ [9][10][90]

Le bassin de CHELLIF est l'un des plus érodés de l'ALGÉRIE, avec une superficie totale de 43700 Km², il est situé entre 34° et 36°30' de latitude Nord, 0° et 3°30' de longitude Est et affecte en gros la forme d'un fer de hache d'axe Nord-Sud [9][10].

Toute cette région est limitée au nord par les crêtes de l'atlas tellien littoral et occupe successivement et parallèlement du Nord au Sud la dépression inter tellienne, l'Atlas Sud Tellien, les hautes plaines, soulevées en leur milieu par l'aire anticlinale des monts du Nador et de Chellala, sa limite Sud coïncide avec les crêtes de l'atlas Saharien. A l'Est et à l'Ouest, les limites du bassin sont liées aux aléas du ruissellement : l'Atlas Sud Tellien a été soulevé au centre (massif de l'Ouarsenis), entre les vallées de l'oued Rhiou et de l'Oued Deurdeur; seuls deux oueds, dont la position est encore excentrique, l'oued Mina et l'Oued Cheliff, ont pu franchir cette barrière et capter dans leur cours supérieur les eaux de ruissellement du versant Sud ainsi qu'une partie des eaux tombées sur les hauts plateaux [56][90].

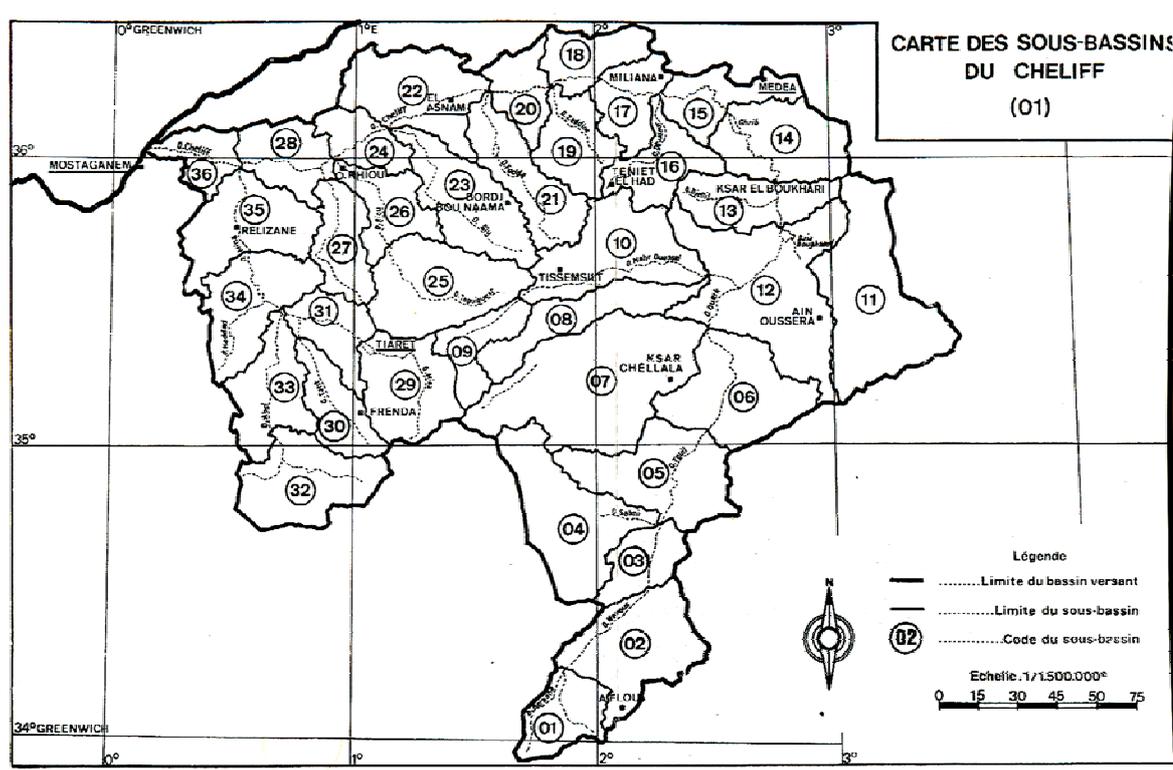


Figure IV.1.2. Situation du bassin du Chélif (in [56])

La Mina draine les eaux du plateau de Frenda et le Cheliff draine celles du Sersou par l'intermédiaire de l'oued Nahar - Ouassel. Le bassin versant comporte encore une dernière zone où les eaux du plateau de l'Oued Touil, issues du Djebel Amour, massif le plus élevé de l'Atlas Saharien franchissent l'aire anticlinale des Nador - Chellala et drainent au profit du Cheliff la partie des hauts plateaux qui partout ailleurs en Algérie est occupée par les chotts: le Chott Ech-Chergui à l'Ouest et les Zahrez au Centre. Le Cheliff est parmi les grands oueds nord-africains; c'est le seul qui draine une partie des hauts plateaux, et c'est un de ceux qui possèdent le cours le plus long et le débit le plus élevé [9][56].

Les bassins versants du Chellif et de ses affluents se répartissent en cinq groupes [9][90]:

- a) Les hauts plateaux.
- b) Les bassins versants du Chellif en amont de Mohamadia.
- c) Les bassins versants des affluents de la rive droite.
- d) Les bassins versants des affluents de la rive gauche.
- e) le bassin versant de la Mina

Ils sont classiquement subdivisés en trois grands ensembles :

- Les bassins versants du bas Chélif.
- Les bassins versants du moyen Cheliff.
- Les bassins versants du haut Chélif.

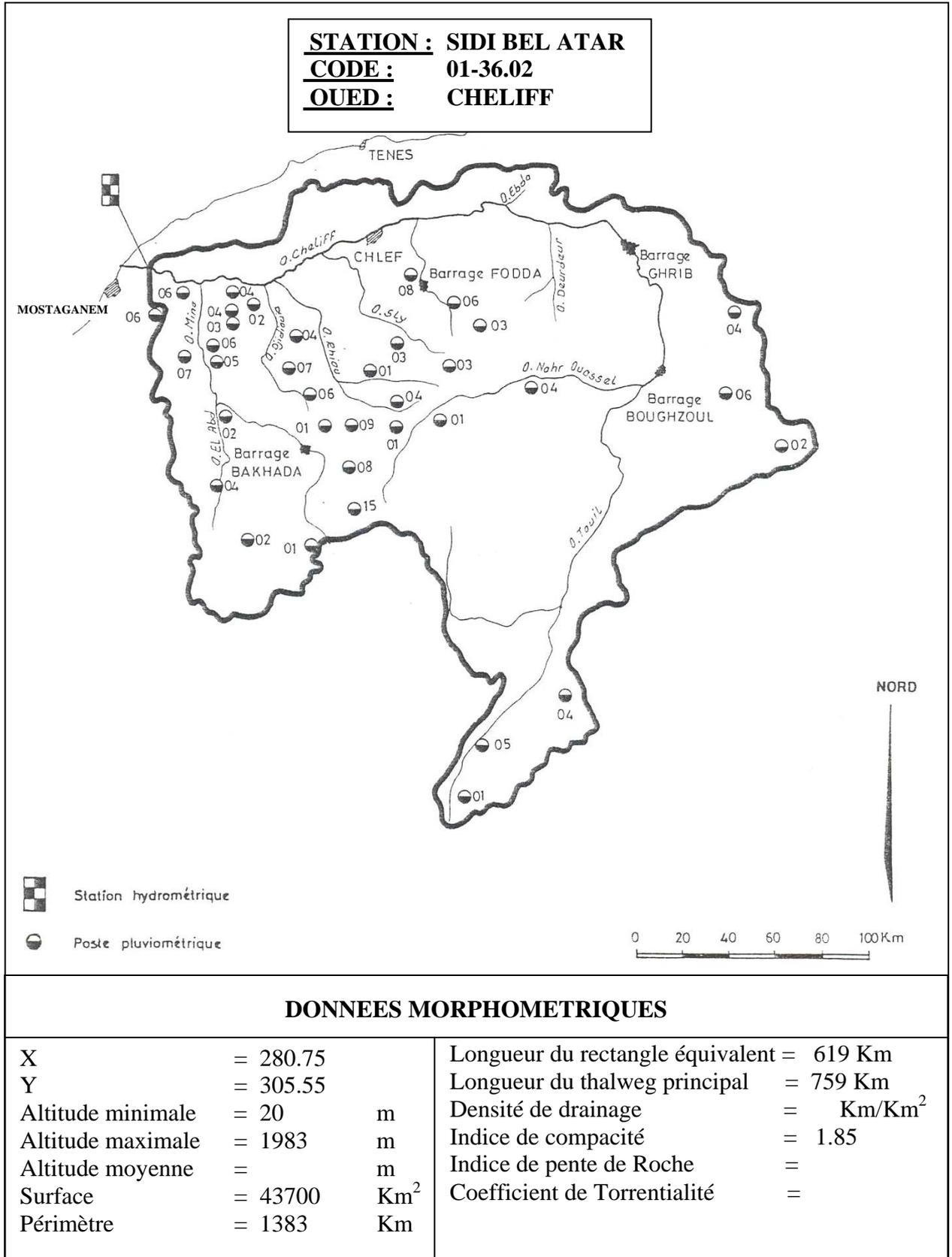


FIGURE IV.1.3. DONNEES MORPHOMETRIQUES (in [6])

La figure (IV.1.3) présente la carte du bassin fluvial avec quelques caractéristiques géomorphologiques. Son climat est typiquement méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers frais et pluvieux, caractérisé par des vents légers, de moins 10 Km/h et un ensoleillement moyen élevé, variant selon les saisons ; de 60 à 80% de la durée du jour. Sa pluviométrie est relativement faible, comme l'indique le tableau (IV.1.1) aux stations d'EL-KEMIS, ECH-CHELIFF et RELIZANE, situées respectivement en haut, moyen et bas CHELLIF.

TABLEAU .IV.1.1 : PLUVIOMETRIE MENSUELLE MOYENNE (1972 1994)[24]

PLUVIOMETRIE MENSUELLE MOYENNE (mm)													
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Khmis Miliana	76.1	59.0	48.8	48.6	34.9	13.1	09.0	03.1	14.8	53.8	49.5	69.0	471.7
Ech-Cheliff	21.5	55.5	38.4	45.7	34.9	09.8	08.0	01.3	09.7	49.6	43.0	71.1	429.3
Rélizane	44.0	42.8	39.6	41.4	30.6	10.1	01.0	01.3	15.3	32.5	33.3	49.2	347.3

Le bassin de CHELLIF est drainé par le plus important des oueds du territoire national ; Oued CHELIFF qui coule de l'Est en Ouest ; depuis le barrage BOUGHZOUL et se déverse à la Méditerranée à proximité de MOSTAGANEM.

IV.2.GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT DE CHELLIF :

La quasi-totalité des sols du CHELLIF sont alluviaux et colluviaux alluviaux ; leurs caractères physiques essentiels est la prédominance des éléments fins. La forte teneur en éléments fins liée à l'origine des alluviaux ; essentiellement dérivées de marne ou d'argile, le rendant très sensible à l'érosion [24].

Le bassin versant du Chellif occupe une portion de l'Algérie dont l'orographie est à la fois simple et typique. Des chaînes montagneuses, parallèles à la côte, séparées par les zones déprimées ou par de hautes plaines, en constituant les principaux traits. Cette disposition correspond à la structure géologique, mais sa réalisation fut assez récente puisqu'elle ne s'est introduite définitivement dans le relief qu'au cours de la période Miocène [9][10][90]

De point de vu géologique, le bassin du Chellif appartient aux bassins sédimentaires sublittoraux allongés Est -Ouest et mis en place après la dernière phase alpine de tectonique tangentielle. Au Nord, cette dépression est séparée de la mer par le Tell septentrional représenté par une suite de reliefs parallèles formés essentiellement de terrains jurassico-crétacés que l'on retrouve aussi dans la plaine (Dahra et massifs épi-métamorphiques à schistosités du Doui,

Rouina et Témoulga). Au sud, le bassin du Chellif est limité par le Tell méridional représenté par un ensemble de massif montagneux où le substratum y est principalement marno-calcaire et correspond à l'allochtone tellien avec ses différentes nappes. Ces deux ensembles telliens ont été structurés au cours du Mésozoïque suite à plusieurs phases tectoniques.

Une phase infra - crétacée, compressive donne des plis NE-SW; Une phase à composante tangentielle intervient après le Sénonien et le Paléocène et serait en partie responsable de l'épimétamorphisme.

Une phase datée Aquitano-Burdigalienne, compressive et profonde génératrice d'un nouvel épimétamorphisme

Pendant que les nappes telliennes achèvent de se mettre en place, un nouveau cycle sédimentaire s'amorce marqué par une transgression qui envahit le bassin et finit par déposer une épaisse sédimentation mio-plio-quaternaire. Parallèlement, le bassin du Chellif est soumis pendant tout le Néogène à une importante tectonique principalement distensive pour certains auteurs (Y. Gourinard, A.Perrodon, B.Fenet) et polyphasée pour G.Thomas. Cette tectonique continue jusqu'à l'actuel comme en témoigne l'intense activité sismique de la région [10][90]. la figure IV.2.1 présente le profil géologique de la zone d'étude.

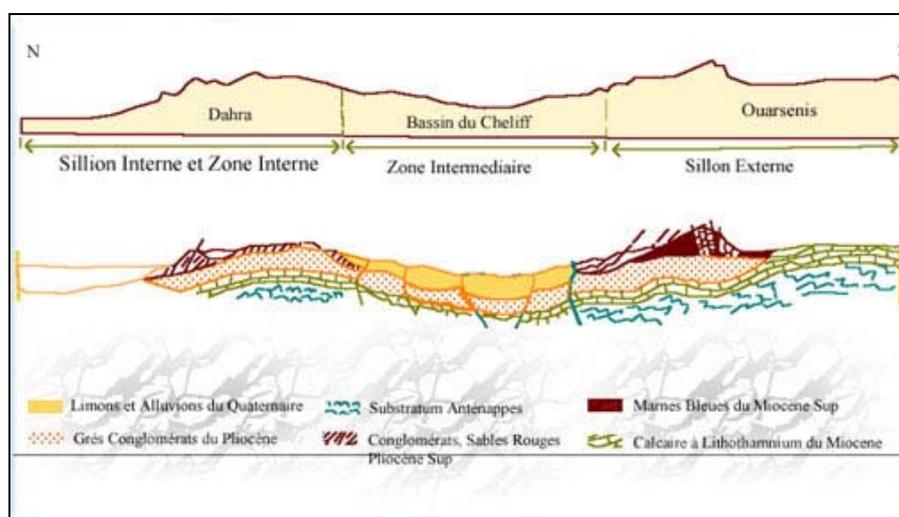


Figure IV.2.1. Profil géologique de la zone d'étude [10][90].

Le bassin du Chellif est un bassin Néogène post nappes, l'Atlas Tellien lui sert de substratum et nous pouvons distinguer dans la région :

- un substratum tellien anté néogène,
- un bassin néogène post nappes avec son histoire et son remplissage [56].

La figure IV.2.2 présente une carte géologique de la zone d'étude

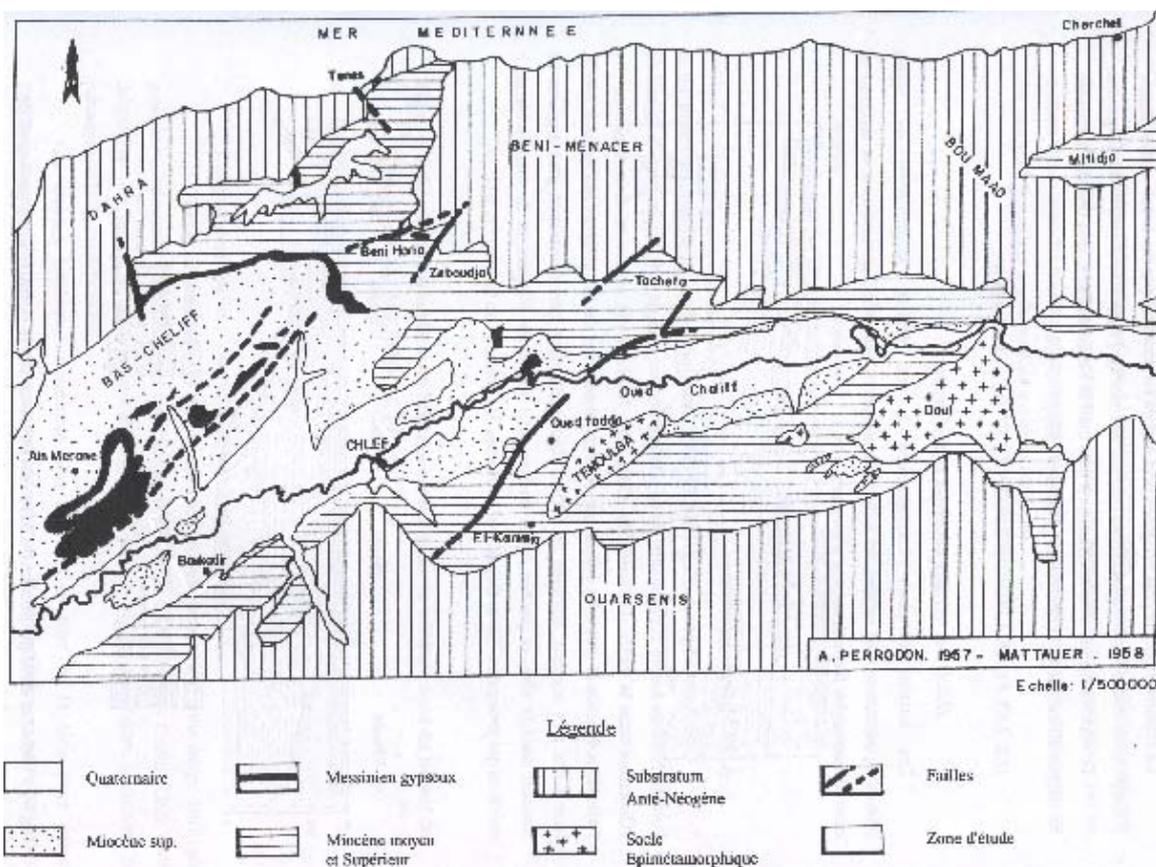


Figure IV.2.2. Cadre géologique de la région étudiée (Perrodon 1967-Mattauer 1958) (in [56])

IV.2.1. PROFIL EN LONG DE LA TERRASSE DE CHELIFF :

Le bassin de CHELLIF est sillonné par le plus important des oueds du territoire national ; Oued CHELIFF qui coule de l’Est en Ouest ; depuis le barrage BOUGHZOUL et se déverse à la méditerranée à proximité de MOSTAGANEM. Sur la majeure partie de son cours ; il serpente au fond des vallées parallèles à la mer, border au sud par le massif des OUARSAENIS et au nord par la chaîne côtière des monts DAHRA. De BOUGHZOUL à l’embouchure, la distance à vol d’oiseau est de 250 Km et la dénivellation est d’environ 625 Km [6][11][24].

Le profil en long du lit du Cheliff varie avec les apports des affluents et l’existence de niveaux rocheux. Le seul profil qu’il soit possible de construire avec un certain degré de précision est donc celui de la terrasse récente. Il a une signification certaine car c’est le profil des eaux lors de la crue millénaire

Ce profil en long ne se raccorde pas avec le niveau de la mer suivant le schéma classique ; depuis la ville de Chlef jusqu’au au pont du Cheliff le profil a la forme pseudo parabolique habituelle et une rupture de pente se produit à l’aval. Cette disposition serait probablement liée à la néotectonique, en effet à quelques kilomètres à l’amont de pont du Cheliff, l’oued coule sur

les terrains en place. Or il est à peu près certain qu'une période de creusement intense a eu lieu avant le dépôt de la terrasse récente en liaison avec le recul de la mer à 90-100m. Ce creusement aurait du aussi être notable près de la mer. Il se peut aussi que l'enlèvement continu par les courants marins des dépôts qui devraient normalement former un delta à l'embouchure du Chelif soit la cause de cette anomalie du profil en long ; les courants sont en effet très importants dans cette portion de la côte [9] [56].

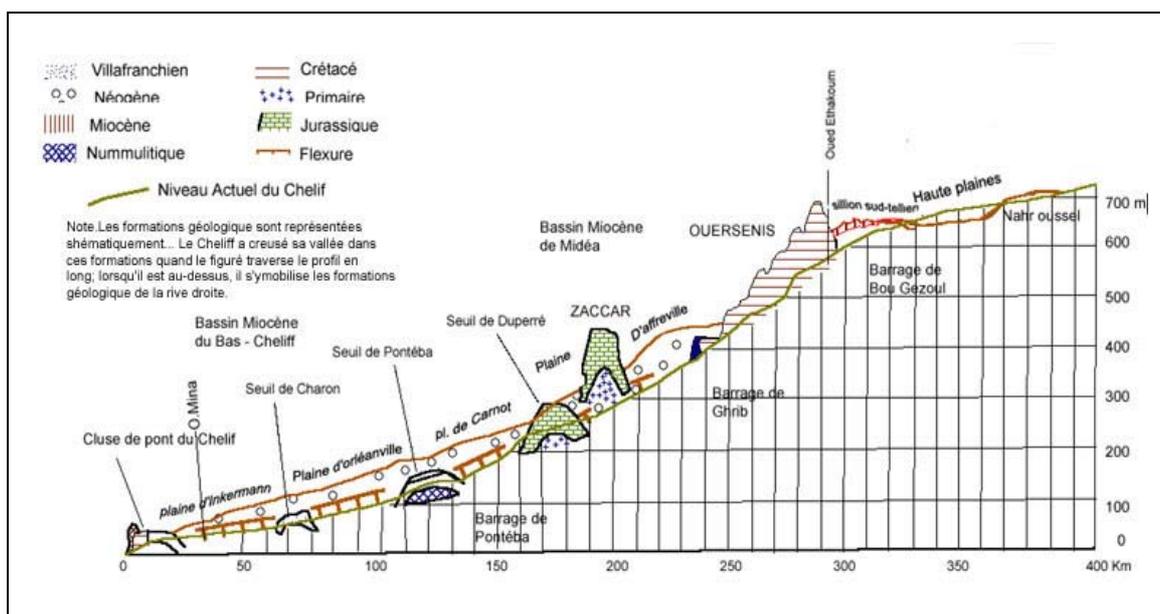


Figure IV.2.4 Profil en long de la terrasse du Cheliff. (Selon J. BOULAIN 1955)(in [9][10][56])

IV.3. SOLS [56] :

Les sols des bassins du Cheliff sont composés de sept zones homogènes. Les cinq premières concernent, selon un ordre de potentialités décroissantes, les sols de la plaine et les deux dernières les sols de bordure.

Zone I : Alluvions récentes, profondes non salées de texture équilibrée.

Ces alluvions s'observent le long des principaux Oueds (Chlef, Sly, Fodda) ; les épandages colluviaux alluviaux de la plaine des Medjadjas y sont associés.

Dans cette zone homogène, les sols sont toujours profonds, la texture est de type limono argileuse à argilo limoneuse ; sur les formations colluviales, elle peut être grossière (sable limono argileux). On trouve souvent des litages d'horizons de texture différente mais les niveaux argileux compacts et imperméables sont exceptionnels. Il est donc normal que ces sols présentent une bonne perméabilité (K de l'ordre de 3 cm/heure).

Zone II : Alluvions récentes de texture fine, légèrement salées et / ou tirsifiées :

Cette zone est la plus importante ; elle occupe de vastes surfaces dans la plaine du Chelif. Sa caractéristique majeure est la texture, fine souvent dès la surface qui induit une faible perméabilité (K de l'ordre de 1 cm/ heure). Ces terres sont profondes et possèdent des réserves hydriques et minérales importantes mais qui ne sont pas toujours bien exploitées par les cultures en raison de cette perméabilité médiocre. On remarque souvent dans cette zone l'apparition des caractères vertiques liés ou non à une augmentation de la salure.

Les sols de cette zone situés en rive gauche présentent généralement une perméabilité meilleure qu'en rive droite ; on y observe souvent des horizons drainant en profondeur.

Zone III : Alluvions récentes et anciennes fortement tirsifiées :

Cette zone présente des sols fortement tirsifiés et uniformément caractérisés par des textures très fines (plus de 40% d'argile) et des perméabilités très faibles (inférieures à 1 cm/heure). Pendant la période estivale, un réseau important de fentes de retrait se développe de la surface jusqu'à 60/70 cm de profondeur, la puissance des forces de rétraction du sol peut être fortement préjudiciable au réseau racinaire, en période humide, ces fentes se referment très rapidement et ne permettent plus à l'eau de s'infiltrer en profondeur.

Zone IV : Alluvions salées :

Trois secteurs bien délimités géographiquement présentent des sols salés.

- La zone de confluence des Oueds Sly et Chlef.
- Le piémont Nord-Ouest de la plaine de Chlef.
- Un petit secteur de la plaine de Bir-Saf-Saf.

Dans ces secteurs, la conductivité électrique est supérieure à 4mmhos/cm dès la surface, elle croit toujours avec la profondeur, les valeurs de 15 à 20 mmhos/cm ne sont pas rares. La texture est équilibrée sauf dans la plaine de Bir-Saf-Saf. où elle est fine.

Zone V : Alluvions fortement salées et tirsifiées :

Cette zone concerne exclusivement la plaine de Boukader, on y trouve des sols très lourds (plus de 40 % d'argile) fortement tirsifiés et présentant des conductivités supérieures à 7 mmhos/cm des la surface.

Zone VI : Alluvions anciennes et sols de piémont non tirsifiés :

Ces alluvions sont situées exclusivement à la périphérie des plaines d'Ech-cheliff, Ouled-Fares et Oued Fodda ainsi que dans la plaine des Medjadjas.

Les sols présentent une texture équilibrée et fine, ils sont bien structurés et de ce fait présentent une bonne perméabilité (K de l'ordre de 10 cm/heure). Ils ne sont en outre jamais salés.

Dans certains secteurs peuvent apparaître des risques d'érosion, c'est notamment le cas sur les piémonts Nord-Ouest de la plaine de Ouled-Fares (Oued Ouahranre).

Zone VII : Sols sur croûte ou encroûtement calcaire :

Les contraintes de cette zone sont d'abord d'ordre mécanique, les croûtes calcaires sont souvent mêlées à des formations caillouteuses (Poudingues), les risques d'érosions des petits Oueds qui descendent des reliefs ne sont pas négligeables et peuvent nécessiter des recalibrages.

Il en est de même des zones urbaines, des affleurements rocheux ou des zones de pentes très fortes et du lit majeur des principales rivières qui peut être exploité pendant une partie de l'année (maraîchères irrigué.....) mais ne pouvant faire partie d'un schéma d'aménagement en raison des risques d'inondation.

Globalement, on distinguera deux ensembles de sols :

- Les sols d'alluvions.
- Les sols de bordure.

Cette séparation n'a rien de formel, mais permet au contraire de faire rapidement la part entre un ensemble de sols (les sols de bordure) qui ne présenteront jamais de problème de salure, mais dont les teneurs en calcaire actif pourront atteindre des niveaux chlorosants, et des sols de la plaine qui présenteront des caractéristiques inverses. Par ailleurs, dans les deux cas, des phénomènes de tirsification pourront se présenter.

IV.4 ANALYSE DES PRECIPITATIONS DU BASSIN VERSANT DE CHELLIF :

IV.4.1 Distribution spatiale des précipitations :

Dans son rapport définitive de l'étude de développement d'un plan de gestion Intégrée des ressources en Eau de la région hydrographique CHELIFF – ZAHREZ [91], Le ministère des ressources en eau, 284 fichiers de traitement de données ont été générés, correspondants aux 142 stations qui font partie du réseau d'observations de bassin hydrographique de Cheliff-Zahrez.

Une fois effectuée l'étude préliminaire de la qualité des séries complétées au préalable, on a estimé les valeurs moyennes pour la période de référence considérée, 66 stations sélectionnées, représentées sur la figure IV.4.1 dont la période d'observation s'étalant de 1972 à 2002. Il est à constater qu'il existe un important déficit de stations dans la partie Sud du bassin, notablement inférieur aux recommandations établies par l'OMM, cet état de fait a rendu le tracé des courbes isohyètes difficile.

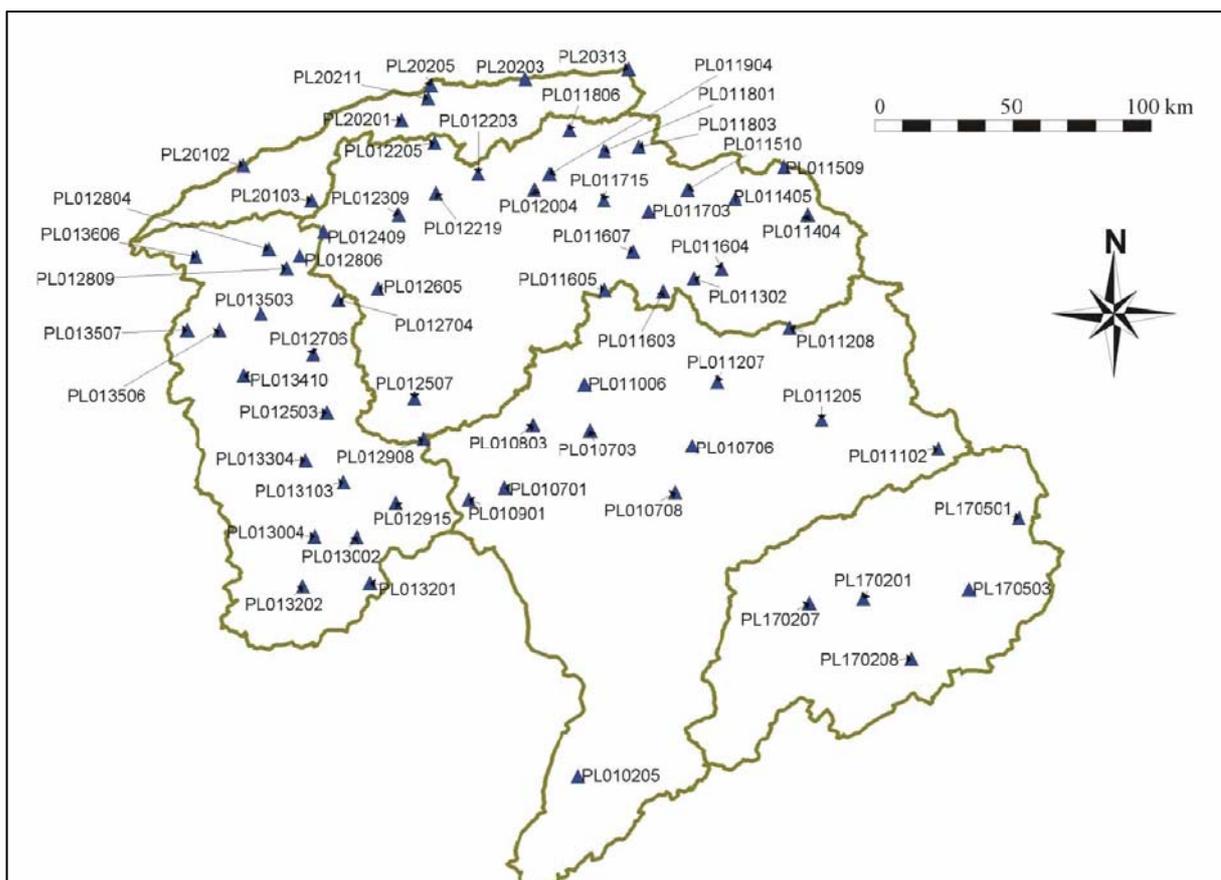


Figure IV.4.1 Distribution spatiale des stations utilisées dans l'étude [91]

La précipitation moyenne dans le bassin oscille entre des valeurs inférieures à 150 mm dans le sud et des précipitations proches de 700 mm dans le secteur nord-est. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans le secteur côtier et sur les points situés aux plus hautes altitudes et liées aux masses d'air humide en provenance du nord. Concrètement, la précipitation moyenne annuelle atteint son maxima dans les stations de Sidi Medjahed (PL011803) et El Anneb (PL011806), avec des valeurs de respectivement 678 et 612 mm. On constate également l'existence de maxima relatifs de précipitations dans les Monts de l'Ouarsenis et les Hauts Plateaux. Les zones avec les valeurs de précipitations les plus faibles se concentrent dans le secteur méridional; la superficie occupée par les isohyètes inférieures à 200 mm est particulièrement étendue, couvrant la quasi-totalité du cours supérieur de l'oued Cheliff et la zone endoréique de Zahrez. Concrètement, les valeurs minimales sont enregistrées dans les stations de Djelfa (PL170208) « BV de ZAHREZ » et de Kef Lasfar (PL011205) « BV de CHELLIF », avec respectivement 137 et 150 mm de précipitations moyennes annuelles. Il existe de plus des minima relatifs dans la basse vallée de l'oued Cheliff et dans le bassin de l'Oued Mina [90][91].

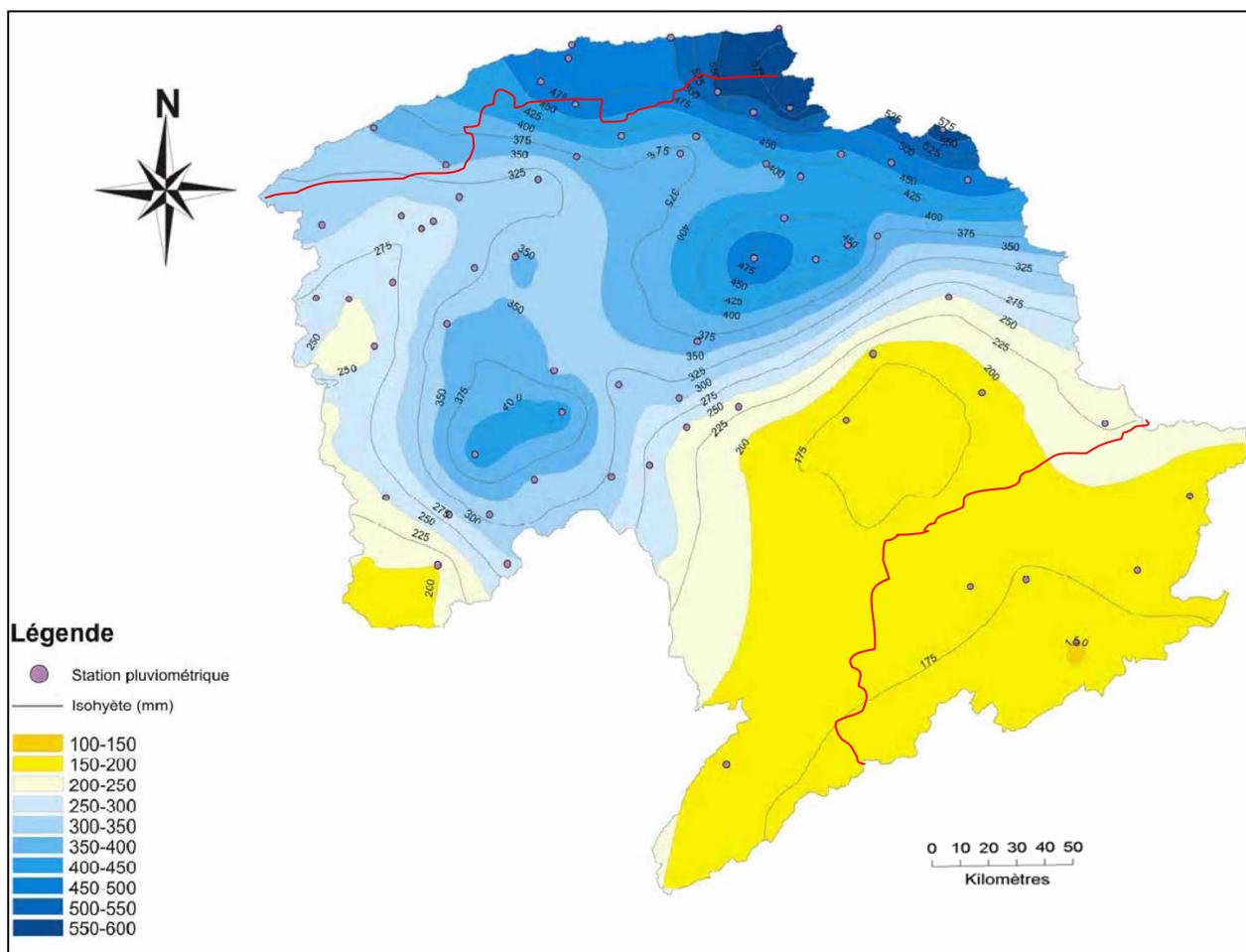


Figure IV.4.2. Carte des isohyètes du bassin de CHELIFF-ZAHREZ [91]

Les pluies augmentent du sud au nord et d'ouest en est, comme on peut le voir sur la carte des isohyètes de la Figure IV.4.2. Les précipitations sont fondamentalement conditionnées par trois facteurs géographiques : l'altitude, la distance de la mer et la longitude, celle-ci étant, semble-t-il, l'un des facteurs déterminants de la distribution spatiale.

La valeur de la précipitation moyenne estimée à travers la planimétrie des isohyètes pour le bassin de Chellif est de 315 mm, légèrement inférieure à celle déduite à partir de la moyenne arithmétique de toutes les stations (357 mm), du fait de la distribution irrégulière des lignes isohyètes. Dans la région endoréique de Zahrez cette valeur est beaucoup plus faible, de l'ordre de 175 mm. Les années sèches (1992/93) et humides (1995/96) de la série coïncident au cours de la même décennie, et elles atteignent une valeur moyenne pour la région de respectivement 226,6 et 486,5 mm. Ils représentent respectivement 142 % et 66 % du module pluviométrique estimé pour toute la région. La précipitation moyenne enregistrée sur le bassin durant l'année la plus humide est deux fois plus importante que celle correspondant à l'année la plus sèche. Ce rapport est beaucoup plus important si l'on analyse de façon individuelle les différentes stations, les valeurs les plus élevées étant obtenues dans les stations les plus déficitaires en pluie, où le rapport entre l'année la plus humide et l'année la plus sèche peut atteindre une valeur de 7,

ce qui indique des conditions d'aridité plus accusées pour le dernier cas. La valeur moyenne des 66 stations est de 3,3. En toute logique, les valeurs les plus élevées pour ce rapport sont enregistrées dans le secteur méridional (Zahrez-Aflou) et le cours supérieur du bassin de l'oued Mina, zones dotées du plus faible module pluviométrique [91]

En règle générale, la carte coïncide de manière significative avec d'autres, publiées sur le même bassin (tel que la carte numérisée par L'ABH de figure IV.4.3), même si dans ce cas les précipitations sont environ 15 % plus faibles étant donné la période de référence utilisée [91].

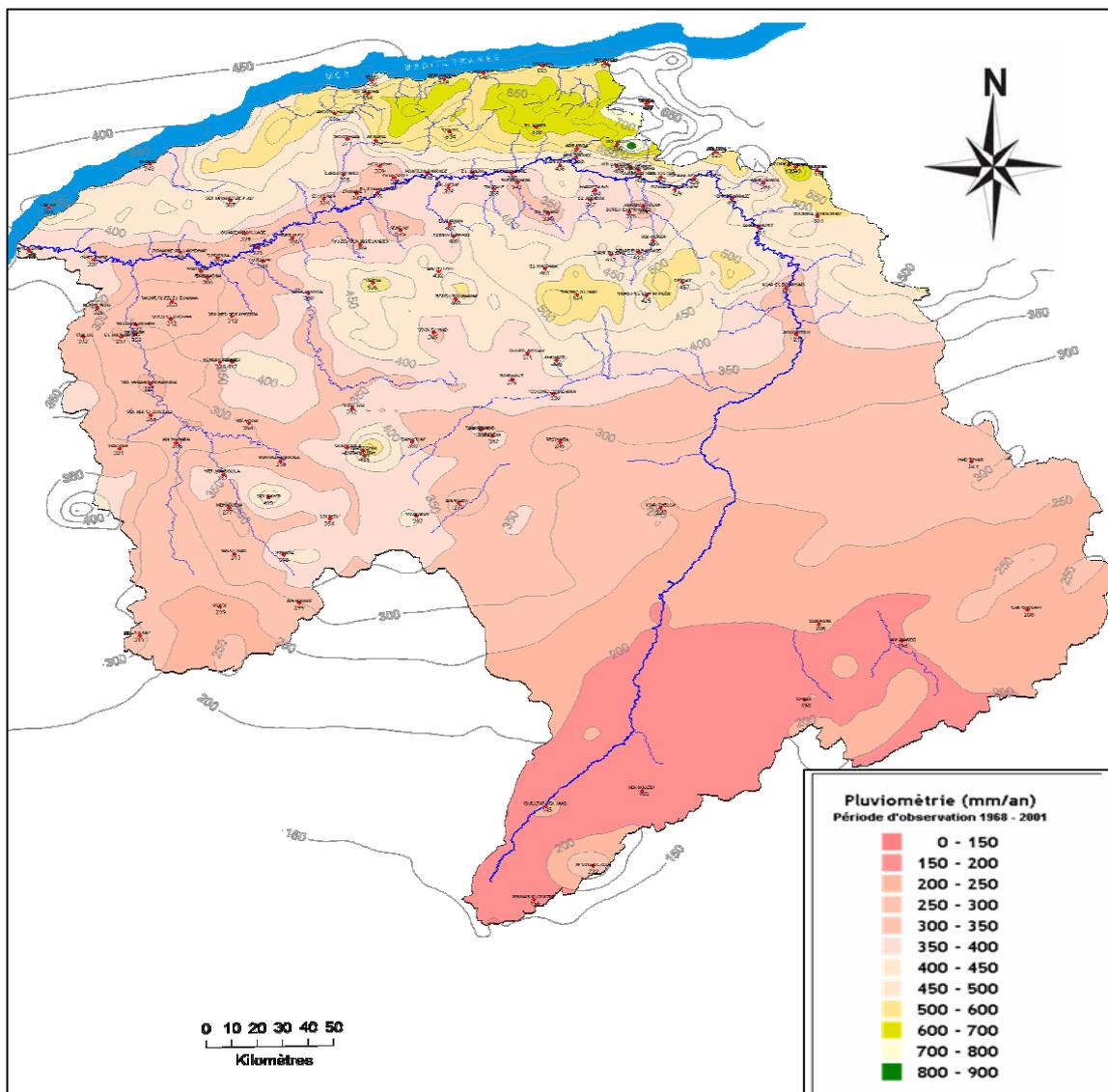


Figure IV.4.3. Carte numérisée par l'ABH Chellif-Zahrez (in [90][92])

IV.4.2. Précipitations mensuelles

Le régime pluviométrique mensuel est variable selon les différents secteurs pris en compte. Lors de l'analyse de 39 stations couvrant pratiquement toute la région de Chellif (tableau IV.4.1)

Tableau IV.4.1: Précipitations moyennes mensuelles (mm) de 39 stations du Bassin versant de Chellif (1972/2002) [91]

Station	sept	oct	nov	déc	janv	fév	mars	avril	mai	juin	juil.	août
PL010205	16	16,2	15,7	18	17,5	15,6	18,7	17,4	16,2	11,9	4,9	8,3
PL010701	20,1	22,2	21,4	31,6	27,3	27,9	25	25	22,7	11,3	4	7,8
PL010703	18,4	24,2	21,4	17,7	19,3	22,7	21,2	25,6	19,5	8,7	3,8	6,3
PL010706	17,2	18,6	15,7	13,6	13,5	11,1	15,5	18,2	18,6	10,9	3,6	5,8
PL010708	21	19,7	20,7	16,1	23,6	25,4	21	21	22,2	10,1	4,3	5,3
PL010803	28,4	35,7	35,1	35,6	35	39,1	35,3	37,1	30,1	12,3	5,7	11
PL010901	21,6	30,8	34,3	39,7	37	39	36,5	38,7	30,1	14,8	3,8	9,9
PL011006	31,2	37,2	35,2	40,3	44,2	43,9	35,9	40,5	30,3	22,4	6,1	9,6
PL011102	20,8	24,6	25,5	24,1	21,8	16,6	20,2	22	30,7	12	7,1	9,1
PL011205	17,8	20,5	16,3	14,9	18	14,2	16,3	20,3	22,7	11,1	3,1	9,4
PL011207	16,2	18,1	15,8	10,4	14,6	11,8	12,9	16,9	16,6	10,3	3	4,1
PL011208	24,9	23,2	18,7	18,2	21,5	17,7	19,9	24,3	23,2	16,7	4,8	5,8
PL011302	35,6	52	56,8	66,1	68,9	66,9	60,9	50,3	38,9	11,5	7,5	8,3
PL011404	27,9	44,8	54,4	72,3	62	57,4	53,7	55,1	36,9	16,3	3,6	10,3
PL011405	25,3	39,8	52,1	61	56,5	59,5	54	46,2	30,3	11,8	4,8	4,8
PL011509	29,3	51,7	74,9	87,9	86,6	77	72,2	64,9	40,6	13,5	5,3	4,7
PL011510	22,6	39,5	48,6	50,9	53	55,2	53,5	42	28,5	10,6	1,9	4,7
PL011603	32,7	39,7	42,5	54,4	62,7	51,5	52,5	39,7	31,3	11,9	5,2	8,5
PL011604	21	30,7	30,5	45,3	42,7	39,4	36,1	32,9	30,5	8,9	6,1	3,6
PL011605	30	53,8	57	67,7	72,1	71,4	67,2	54,7	35,7	14,1	5,7	10,9
PL011607	23,5	43	47,9	47	54,4	57,8	55	45,3	29,6	10,3	4,2	3,3
PL011703	18,3	39,6	40,2	46,4	44,9	54,5	48,8	39,2	28,3	6,9	3,7	4,2
PL011715	19,1	37,4	39	43,5	46,6	50,1	44,2	38,5	24,5	8,2	2,5	4,3
PL011801	18,9	41	60,7	70,3	68,2	71,9	63,7	46,7	32,7	10,9	1,4	4,8
PL011803	27,7	58,3	80,9	91,3	99,7	95,7	94,8	65,4	42,8	14,3	2,4	4,8
PL011806	25,5	52,7	78,7	88,4	88,9	87,2	77,5	55,2	40	10,9	1,9	5,9
PL011904	16	34,1	46,4	43	47	48,6	43,9	38,1	27	10,1	1,5	3,2
PL012004	16,4	33,2	44,5	42,8	44,3	46,7	42,7	37,6	28	7,5	2,2	3
PL012203	19,9	40,6	54,4	54,9	59,8	60,6	48,5	43,8	30,4	9,1	1,5	3
PL012205	24,2	41	70,3	73,6	68,5	69,8	65,8	53,5	29,4	5,8	0,6	4,3
PL012219	20,1	41,2	48,7	44,8	43,3	45,2	41	39,7	25,1	5,1	1,5	5,3
PL012309	10,5	26	35,3	35,3	32,4	34,5	35,6	24,8	18,6	3,8	1,1	2,1
PL012409	12	32,8	43,1	41	35,3	42,1	30,2	32,2	19,4	4,5	0,5	1,6
PL012503	15,2	25,9	32	29,8	35,4	34,3	33,9	34,3	24,8	7,7	2,4	4,3
PL012507	15,9	26,1	36,2	36,3	41,4	38,9	42,3	36,1	24,7	9	2,7	5,2
PL012605	22,3	36,9	49,8	51,3	47,7	50,6	48,5	42,9	22,3	7,1	1,9	3,6
PL012704	14,7	30,9	37,8	44	40,7	40,2	33,2	33	15,3	5,3	1,6	2,8
PL012706	17,1	34,9	48,4	57,8	52,6	50,2	45,3	45	22,8	7,3	2,1	3,5
PL012804	13,6	30,4	39,6	38,9	32,8	37,2	29,6	28,3	16,1	4,1	0,7	1,1
Moyenne	21,25	34,59	41,70	45,28	45,68	45,62	42,38	37,75	27,11	10,23	3,35	5,60

Source (ANRH)

On constate que les précipitations annuelles se concentrent principalement sur la période de décembre à février, avec des valeurs presque similaires au cours de ces trois mois respectivement 45,29mm, 45,68mm et 45,63 mm, comme on peut l'observer sur la Figure IV.4.4, alors que les valeurs minimales correspondent aux mois de juillet et août, avec des précipitations moyennes estimées à respectivement 3,35 et 5,6 mm.

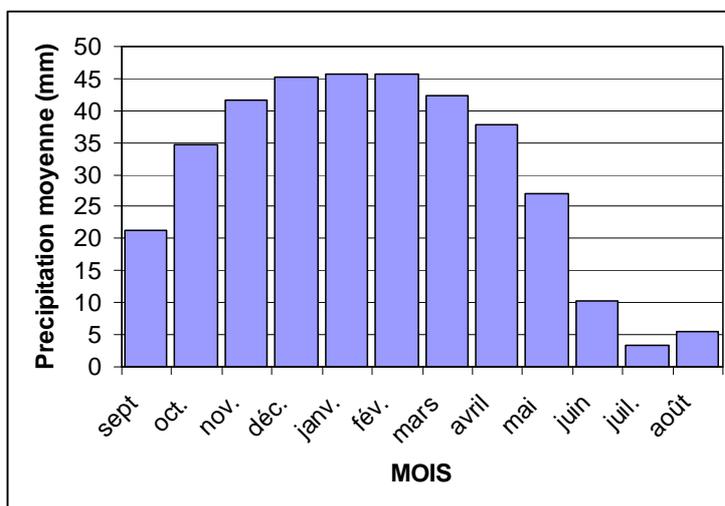


Figure IV.4.4. Distribution mensuelle des précipitations pour le Chellif

IV.4.3. Précipitations saisonnières

La distribution saisonnière de la précipitation est aussi variable selon la région analysée, comme on peut le constater sur la Figure IV.4.5, Il est signalé que l'essentielle des précipitations est obtenue en hiver et en automne respectivement 133,69mm et 121,58mm. Dans le bassin versant de Chellif, presque 37 % de la pluie annuelle est concentrée sur les mois d'hiver, suivi de l'automne, avec presque 34 % de la précipitation annuelle, les minimas sont à signaler au printemps avec 21% et l'été avec 8% de la précipitation annuelle (figure IV.4.6).

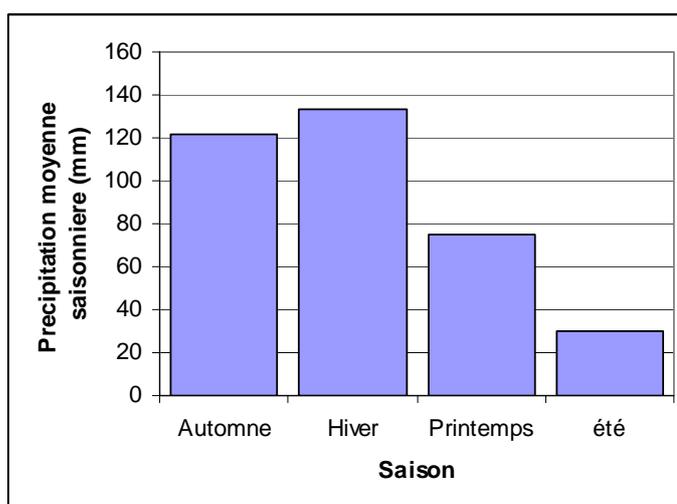


Figure IV.4.5 Distribution saisonnière des précipitations pour le Chellif

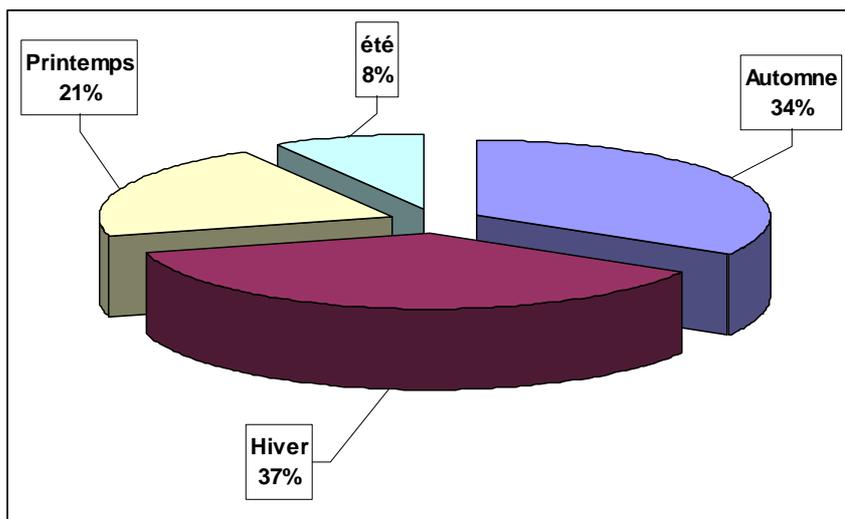


Figure IV.4.6 répartition saisonnière des précipitations du Chellif

IV.5. Température :

Dans cette étude nous avons utilisé les données de 8 stations du bassin versant de Chellif dont les localisations sont mentionnées dans la figure IV.5.1 qui suit. Le tableau IV.5.1 résume les températures moyennes mensuelles enregistrées en ces stations

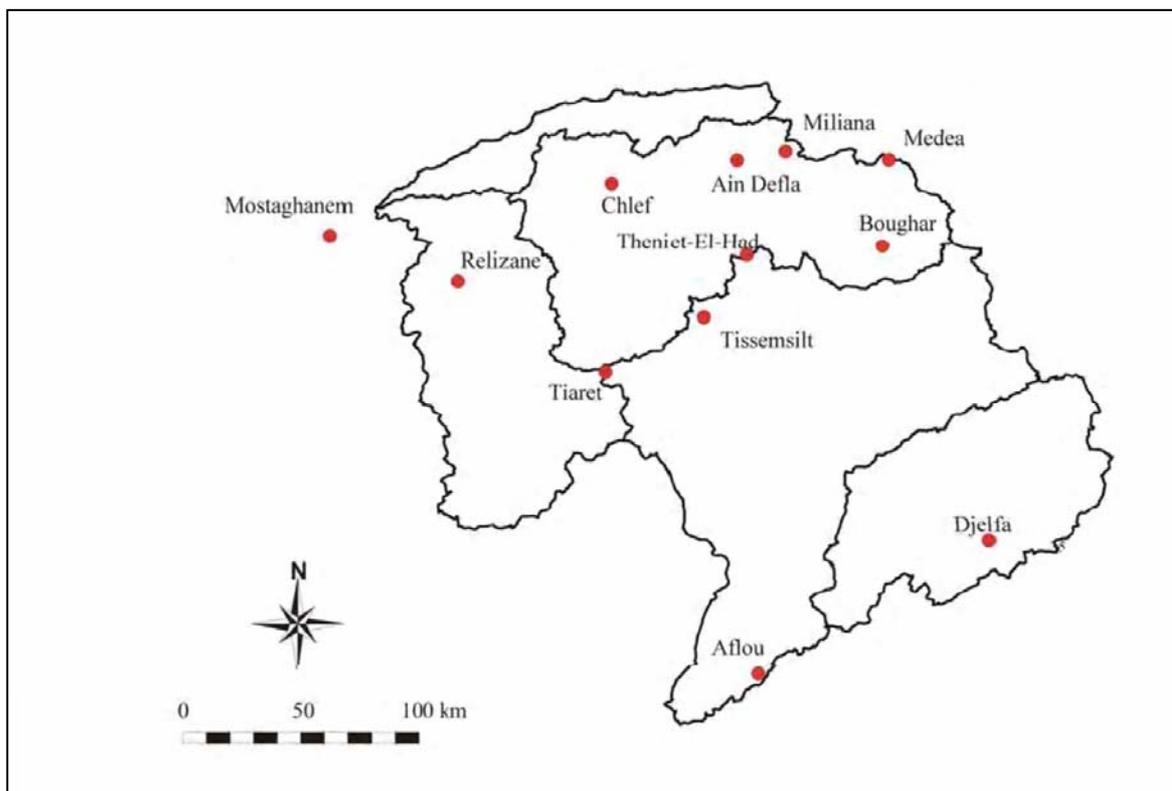
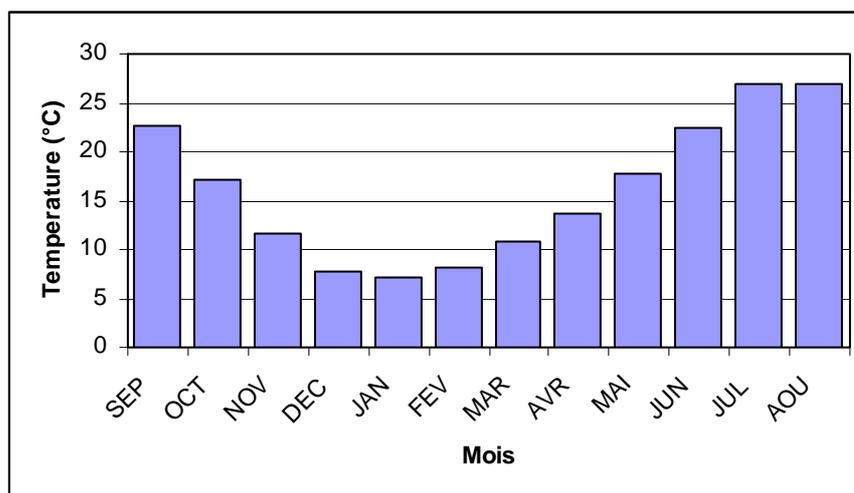


Figure IV.5.1 Localisation des stations de mesure de température [91]

Tableau IV.5.1 : Températures moyennes mensuelles (°C) de quelques stations de Chellif (1975-1996) [91]

STATIONS	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU
<i>AFLOU</i>	19,1	13,9	8,3	4,8	4,3	3,5	8,3	10,8	15,7	20,4	24,1	23,9
<i>AINDEFLA</i>	25,9	20,3	13,7	9,8	8,8	9,8	13,3	16,1	20,4	25,8	30,6	30,2
<i>BOGHAR</i>	21,4	16	10,3	6,2	5,7	7,1	9,8	13,1	17	21,4	26,3	26,3
<i>CHLEF</i>	25,2	19,3	13,9	10,2	9,6	10,9	13,4	16,4	20,8	25,5	29,6	29,8
<i>MILIANA</i>	22	16,9	11,7	8,3	7,5	8,6	10,4	13	16,7	21,4	25,5	25,8
<i>RELIZANE</i>	25,1	19,6	14,5	10,8	9,9	11,3	13,4	16,3	20,1	23,6	27,9	28,7
<i>TIARET</i>	21,7	15,9	10,3	6,6	6,1	6,9	9,1	12,2	16,1	21	25,9	26
<i>TISSEMSILT</i>	21	15,1	9,9	6	5,8	6,4	8,7	11,2	15,6	20,4	25,3	25,3
MOYENNE	22,68	17,13	11,58	7,83	7,21	8,06	10,8	13,64	17,8	22,44	26,9	27

Source (ANRH)

**Figure IV.5.2. Variation de la température moyenne mensuelle dans le Chellif**

Pour l'ensemble du bassin, la température moyenne interannuelle est au environ de 16,1 °C. La température du mois le plus froid (janvier) est de 7,2°C, tandis que celle du mois le plus chaud (août) est de 27°C (Figure IV.5.2).

La variabilité est plus importante vers le sud, en raison des conditions progressivement plus arides, les zones correspondant au Moyen Chellif présentent les valeurs de température les plus élevées, du moins selon les données disponibles. Plus précisément, les stations les plus chaudes de la série disponible sont les stations appelées Ain Defla et Chlef, présentant toutes les deux une valeur similaire de température moyenne annuelle (18,7°C). Dans la première, on dépasse les 30°C de température moyenne pendant les mois de juillet et août. Certains facteurs topographiques locaux jouent sûrement un rôle important dans cette distribution thermométrique très spécifique.

IV.6. RESSOURCES EN EAU SUPERFICIELLE

Les données de 6 stations hydrométriques sont utilisées dont la période d'observation d'étale de 1972 à 2002. Toutes ces stations se trouvent sur le cours d'eau principal de Cheliff. Les caractéristiques de ces stations sont résumées dans le tableau IV.6.1 et leurs localisations dans le bassin versant d'étude dans la figure IV.6.1

Tableau IV.6.1 Caractéristiques de ces stations hydrométriques (ANRH)

Région	Code station	Station	Oued	C. lambert		Surface BV (Km ²)
				X(m)	Y(m)	
Moyen et haut Chellif	11514	Djenan Ben Ouadah	CHELIF	475675	325200	22580
Moyen et haut Chellif	11702	Arib Cheliff	CHELIF	245200	230000	2452
Moyen et haut Chellif	12001	El Abadia1	CHELIF	407154	327900	26414
Moyen et haut Chellif	12203	Ponteba Defluent	CHELIF	390000	327749	27880
Bas chellif et Mina	12806	Djediouia Cheliff	CHELIF	329599	298200	34550
Bas chellif et Mina	13602	Sidi Belattar	CHELIF	280749	30550	43700

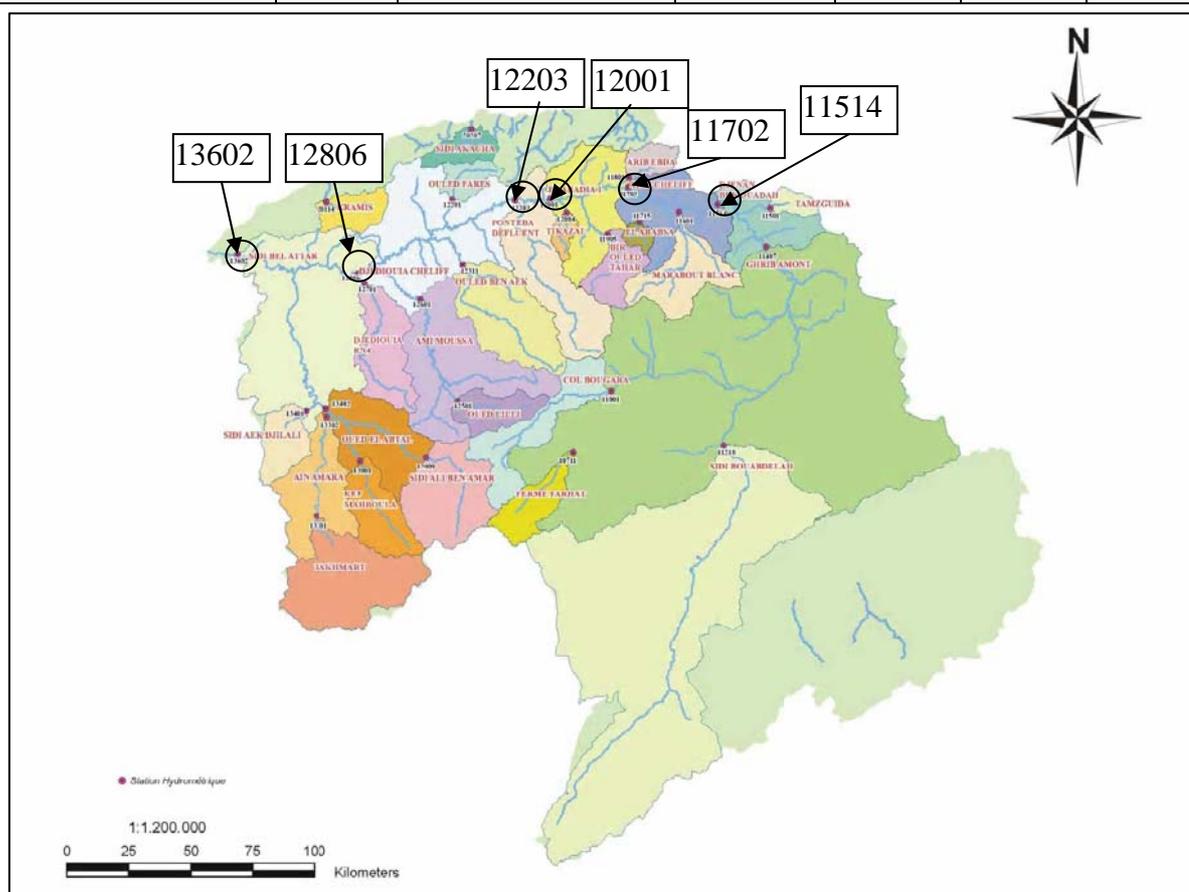


Figure IV.6.1. Localisation des stations hydrométriques étudiées dans le Cheliff (in [91])

Le tableau IV.6.2 qui suit, résume les principaux paramètres hydrologiques de oued Cheliff aux stations de l'étude.

Tableau IV.6.2 Paramètres hydrologiques de oued Cheliff [91]

Code	Station	Apport moyen annuel (hm ³ /an)	apport moyen mensuel (hm ³ /an)	Débit spécifique (hm ³ /km ² .an)	Debit moyen journalier (m ³ /s)	Débit max annuel (m ³ /s)
11514	Djenan Ben Ouadah	75,53	6,58	0,003	2,5	102,6
11702	Arib Cheliff	146,08	12,45	0,006	4,76	481,4
12001	El Abadia1	180,4	19,03	0,007	7,26	840,1
12203	Ponteba Defluent	162,25	13,95	0,006	5,35	11179
12806	Djediouia Cheliff	434,43	36,2	0,013	13,89	1598
13602	Sidi Belattar	609,35	53,9	0,014	19,9	1339
	Moyenne	268,01	23,69	0,01	8,94	2590,02
	Max	609,35	53,9	0,014	19,9	1339
	Min	75,53	6,58	0,003	2,5	102,6

Pour l'ensemble de bassin versant c'est à dire à sidi Belattar, l'apport moyen annuel de oued Cheliff est de l'ordre 268,01 hm³/an, avec un débit moyen journalier de 8,94 m³/s, et un débit maximal enregistré à la dite station de 1339 m³/s sur la période 1972 à 2002.

Le tableau qui suit résume les apports moyens mensuels des oueds Cheliff au niveau des stations de référence.

Tableau IV.6.3 Apport moyen mensuel (hm³/an) des stations hydrométriques dans la Chellif [91]

Station	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
11514	4,7	13,04	4,43	2,49	9,22	9,27	7,3	5,09	10,14	7,48	7,03	5,12
11702	6,43	11,71	7,49	14,03	21,56	26,86	23,97	13,5	7,77	5,42	6,7	6,11
12001	4,31	11,09	6,04	25	31,79	43,72	43,56	18,21	7,86	5,16	6,51	4,87
12203	0,67	7,84	10,01	31,51	25,06	43,14	42,22	11,25	5,78	1,26	0,34	0,19
12806	8,94	26,17	36,7	45,18	54,55	92,42	88,23	45,88	23,39	6,4	3,31	3,3
13602	23,41	49,91	60,54	70,65	80,74	116,06	97,21	49,96	44,46	23,99	14,69	15,91
Moy	8,07	19,96	20,86	31,47	37,15	55,24	50,41	23,98	16,56	8,28	6,43	5,91

Source (ANRH)

La répartition saisonnière des ressources en eau est illustrée à travers la Figure IV.6.2, avec un pourcentage de ressources maximum en hiver (46 % de l'apport annuel) et un minimum pendant l'été (8 %), et avec des valeurs intermédiaires en automne (28 %) et au printemps (18 %). En général, le comportement saisonnier des précipitations et celui des débits sont similaires.

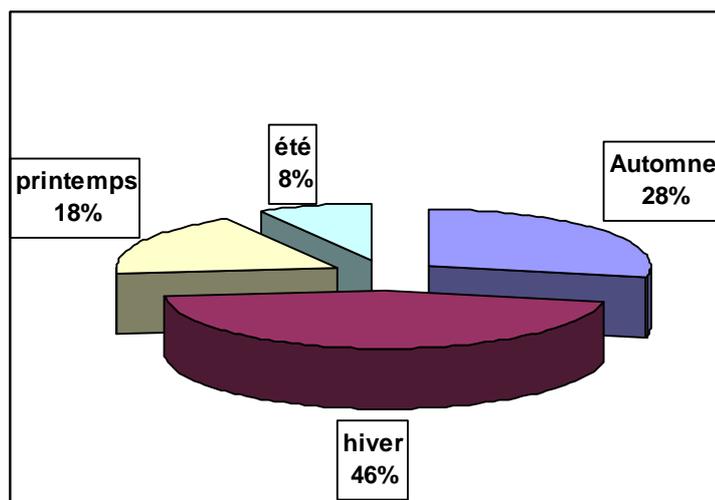


Figure IV.6.2 Répartition saisonnière des ressources en eau au Chellif

IV.7. VEGETATION ET AGRICULTURE :

Il est clair que le couvert végétal est efficace pour réduire le ruissellement, la couverture du sol, plus particulièrement celle assurée par la strate herbacée et les résidus végétaux constitue la protection la plus efficace du sol. Excepté le sous bassin versant de ALLALA localisé en zone littorale, donc soumis essentiellement à un climat méditerranéen qui conditionne des cultures maraîchères rarement céréalières, les autres sous bassins sont en majeure partie affectés par un régime climatique semi-aride qui déterminera la couverture végétale.

On observe alors au niveau des secteurs topographiquement déprimés une prédominance des cultures céréalières et maraîchères limitées aux affleurements miocènes, aux plaines et terrasses alluviales. Ces secteurs sont caractérisés par des pentes assez faibles (2% à 5%) et sont faiblement soumis à l'érosion. Au niveau des parties amonts des bassins ou les pentes sont relativement fortes (10% à 18%) les cultures sont installées essentiellement sur les marnes sénoniennes et les argiles médjaniennes. Ces formations constituent des sous bassesments fragiles et très favorables à l'érosion. Les régions les plus élevées sont quant à elles, surtout forestières, on rencontre alors de belles forêts de chênes-lièges [56]

Vu l'influence de activité humaine sur l'érosion et transport solide, en particulier l'agriculture, nous avons pensé utile d'en parler sur ce secteur dans la zone d'étude.

La superficie agricole de l'Algérie est réduite par rapport au total de la superficie de son territoire et aux nécessités croissantes d'une population en pleine transformation. Ce potentiel agricole se concentre principalement dans le Nord du pays, la région Nord – centre étant l'une de celles qui font partie du patrimoine agricole du pays. La croissance de la superficie irriguée a été faible et a connue une baisse, elle représentait 25,5 % du total entre les années 1966 et 1972 et se situe à 17,7 % entre 1995 et 2000 [93]

Sur la région hydrographique Cheliff – Zahrez on peut distinguer deux types d'exploitation irriguées en fonction de leurs superficies : d'un côté les Grands Périmètres Irrigués (GPI) du Haut Cheliff, Moyen Cheliff, Bas Cheliff et La Mina, qui, avec des superficies équipées à cet effet, reçoivent l'eau des retenues de la région; d'un autre, la Petite et Moyenne hydraulique (PMH), composée d'exploitations de moindre envergure qui se fournissent à partir de ressources locales (sources, puits, forages, retenues, etc.) [91]

La superficie agricole utile (S.A.U.) de la PMH, la région hydrographique possède 1,9 million d'hectares, au sein de laquelle la superficie irriguée est d'environ 31 000 hectares, c'est-à-dire 4,1 % de la S.A.U totale, et 1,7 % du total de la région d'étude (ABH Cheliff – Zahrez)[93]

Dans la région Chellif il y a six (6) grands périmètres irrigués (GPI) en exploitation pendant la campagne d'irrigation 2005 tel on présent ci – dessous :

Tableau IV.7.1 Périmètres exploités pendant la campagne d'irrigation 2005 [94]

Périmètres	Wilaya	Exploitation Équipée (HA)	Programme en Cours	Ressources en eau	
			Réalisation (HA)	Étude (HA)	
Mina	Relizane	16 210			Bge.Sidi M'hamed Ben Ouda
Bas Cheliff	Relizane-Mostaganem-Chlef	15 000	7 715		Bges.Gargar, Merdja Sidi Abed, Dérivation Boukadir
Moyen Cheliff	Chlef-AinDefla	21800	7 708	Tr II 9 600	Bges. Sidi yacoub, Oum Drou, Lag,Oued Fodda,Prise Chellif
Amra Abadia	Ain Defla	8 495			Bge. Sidi M'hamed Ben Taiba, Oued Mellouk
Haut Cheliff	Ain Defla	20 200			Bges.Grib, Harréza, Deurdeur
Bougara	Tissemsilt-Tiaret	798			Bge.Bougara
Dahmouni	Tiaret		1214 2786 (*)	4 000	Bge. Dahmouni

(*) Étude achevée, Travaux à lancer

Il est prévu la mise en exploitation des périmètres de Dahmouni (en phase de projet) et Khramis (en phase de réalisation). Il est prévu aussi pour l'horizon 2010 la mise en service d'un petit périmètre irrigué nommé M'Ghila qui ne sera pas géré par l'ONID, mais par les services agricoles locales. Il s'agit d'un petit périmètre. Pour mettre en valeur le potentiel des sols irrigables, plusieurs actions de réhabilitation et d'extension sont programmées [94]

Tableau .IV.8.1 Barrages du bassin versant de Chelif [8]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Date de mise en service	1934	1939	1984	1984	2003	1932	2004	1989	1986	1987	1988	1936	1977	1984
Surface du BV (Km ²)	20500	2800	469	143	869	800	420	454	932	530	2900	1300	7990	101
Apport moy interannuel de BV (Hm ³)	83	148	34.52	30.8	47.5	120	44.6	14.43	113	13.3	185	72	120	185
Capacité initiale (Hm ³)	60	138.4	45	7.79	40.38	20	22.4	9	32	14.06	79.48	61.7	90	79.48
Capacité estimée (2003) (Hm ³)	55	280	115	70	127	228	73	13	280	41	450	56	235	450
Volume régularisé(Hm ³)	35.6	145.2	110.2	69.2	127	125.5	--	11	278.9	38.6	437.1	43.8	153.7	437.1
Apport reel (Hm ³)	--	105	40	23	38	69	21.2	5.5	98	9	120	44	100	120
Taux d'envasement (%)	78.5 (90-03)	88.56	18.2	3.64 (90-01)	--	32.26	--	5.92 (93-01)	47.38 (90-01)	7.46 (90-01)	60.9 (90-01)	28.5 (90-01)	80.92 (78-02)	60.9 (90-01)
	35	48	4	1	--	45	--	5.5	0.39	6	3	22	32	3

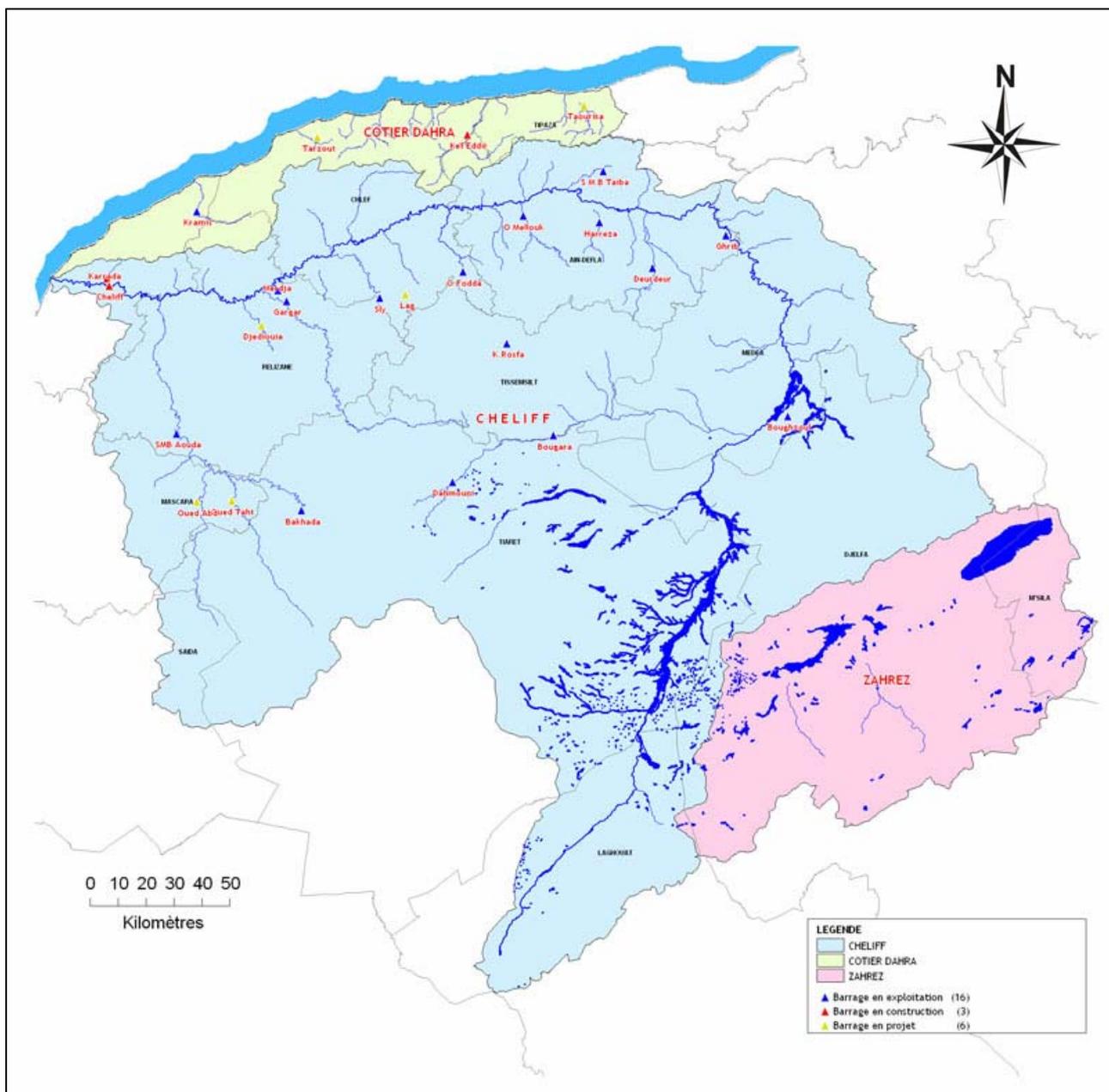


Figure IV.8.1. Localisations des différents barrages dans la zone d'étude [10]

**ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES
A L'EXUTOIRE DU BASSIN VERSANT
DE CHELLIF**

ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES A L'EXUTOIRE DU BASSIN VERSANT DE CHELLIF

La conséquence la plus dramatique du transport solide dans les cours d'eau des bassins versant est sans aucun doute l'envasement des barrages et malheureusement l'Algérie n'échappe pas à ce problème. La non maîtrise du mécanisme de l'envasement d'une part et la mauvaise estimation de la quantité des matériaux solides transportés par le cours d'eau particulièrement la fraction entrante dans les retenues d'autre part, rendent l'estimation des apports solide en suspension assez compliqué à réaliser. Ces dans ce sens que s'inscrit cette étude qui consiste à évaluer le transport solide en suspension à l'exutoire du bassin versant de CHELLIF. Ce bassin versant à été choisi comme exemple d'application de nos approches car, il le plus grand bassin du nord du pays, c'est l'un des plus érodés et de plus il comporte le plus grand nombre d'ouvrage de mobilisation des eaux de surface.

Notre objectif est de fournir les informations indispensables pour mieux connaître la durée de vie de nos barrages et de définir le dimensionnement des ouvrages futurs.

Dans l'état actuel, notre préoccupation n'est pas de procéder à une estimation des apports solides pour un ou plusieurs événements (crués), notre étude s'intéresse à l'estimation des apports solides en suspension transitant par les stations de jaugeages, car il est le plus important en quantité que le transport par charriage, et c'est lui qui affecte les ouvrages hydrotechniques.

V.1.Collecte des données et Estimation des apports solides :

IV.1.1.Collecte et depouillement de donnees :

Le but majeur de notre étude est l'exploitation des données hydrométriques réelles, recueillies à la station de jaugeage pour que notre estimation s'approche le plus proche possible de la réalité.

Les données utilisées dans notre thèse proviennent de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH), elles sont prélevées à la station de Sidi Bel Attar. Le mode de prélèvement suivi consiste à faire des prélèvements quotidien d'échantillon d'eau dans des bouteilles en matière plastique, à analyser au laboratoire pour la détermination des concentrations en matières

solides et autres caractéristiques (analyses chimiques). Le prélèvement est donc ponctuel avec multiplication du nombre de prélèvement en période de crues ou à débit variable (prélèvement chaque pas de temps restreint « 15 mn par moment ». Le prélèvement de fait manuellement par l'opérateur de la station, l'inconvénient majeur réside dans ces prélèvements manuels en particulier en période de crue, car ils deviennent extrêmement difficiles et risqués. Dans ces cas les prélèvements se font tout près de la rive. Mais malgré la simplicité de la prise d'échantillons et l'inconvénient précité leurs utilisations dans l'estimation des apports solides reste meilleurs que l'utilisation des modèles empiriques [11].

La collecte consiste en un dépouillement systématique de tous les fichiers de hauteurs d'eaux (débits liquides exprimés en hauteurs) et leurs concentrations en matières solides en suspensions correspondantes (en g/l). A partir des feuilles d'analyses chimiques de l'eau, relatives à Oued CHELIFF ; contrôlé par la station de SIDI BEL-ATAR à l'exutoire du grand bassin de CHELLIF et grâce au barème d'étalonnage des courbes de tarages érigées par L'A.N.R.H.(Agence nationale des ressources hydrauliques d'ALGER), trois types de fichiers sont dressés :

- Un fichier présentant une série continue et la plus longue possible, de débits liquides moyens journaliers en (m^3/s).
- Un fichier présentant une assez longue série de couples (débit liquide (m^3/s), débit solide (Kg/s)).
- Un fichier présentant une assez longue série de couples (débit liquide (m^3/s), concentration solide (g/l)).

Tous ces fichiers sont réalisés sur une période s'étalant de 1972 à 1996. En érigant ces deux fichiers de bases, il a été remarqué que les concentrations en matières solides en suspensions étaient très élevées en périodes de crues, c'est-à-dire que les débits solides sont importants dans ces périodes ; ainsi donc une estimation du transports solides en suspension à partir des débits de crues s'impose [11][87].

IV.1.2. Estimation des apports solides :

Notre étude sera menée par deux approches d'estimation dont les démarches à suivre sont présentées précédemment :

- a. Une quantification par modélisation statistique à une corrélation.
- b. Une quantification par modélisation statistique à double corrélation.

Les deux approches seront appliquées pour le bassin versant en question selon les modes d'estimation suivants:

- Une estimation du transport solide à partir des débits moyens journaliers.
- Une estimation du transport solide à partir des crues.

V.2. ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSIONS PAR MODELISATION STATISTIQUE A UNE CORRELATION « MUC » :

Comme il à été signalé avant, l'estimation dans cette approche se fera en se basant sur les débits solides calculés à la base des données hydrométriques de la station de SIDI BEL ATTAR contrôlant le bassin versant de Chellif (débits liquide instantanés et concentration) et les débit liquide, avec intégration des fréquences de ces derniers. L'estimation sera menée selon les deux modes précédemment cités (débits moyens journaliers et débit de crues).

V.2.1.ESTIMATION DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION A PARTIR DES DEBITS MOYENS JOURNALIERS :

Pour pouvoir intégré un nombre important de données dans notre estimation nous avons procédé à l'estimation des apport solides en suspension à la base des débits moyens journaliers.

V.2.1.1.DONNEES SUR LES SEDIMENTS :

A partir du fichier de base des couples (Q, Q_S), (débit liquide instantané et débit solide en suspension instantané), des fichiers de couples (Q, Q_S) sont dressés pour des débits moyens journaliers aussi bien pour les débits liquides que pour les débits solides, selon la période de validité de l'estimation (annuelle, saisonnière ou semestrielle).

V.2.1.2.DONNEES SUR LES DEBITS LIQUIDES DU COURS D'EAU :

Les relevés des débits liquides effectués à la station de jaugeage de SIDI BEL-ATAR sont saisies à L'A.N.R.H. et sont disponibles sous forme de fichier présentant les débits moyens journaliers dans leurs classements chronologiques sur une période d'observation de 1972 à 1996.

V.2.1.3.RECHERCHE DE RELATION ENTRE DEBITS SOLIDES EN SUSPENSION ET DEBITS LIQUIDES:

Un premier examen des débits liquides moyens journaliers et des débits solides en suspension moyens journaliers correspondants, observés durant la période 1972 à 1996, nous a permis de sélectionner un échantillon suffisant et représentatif des couples (Q, Q_S) d'une taille :

$$N = 1026 \text{ couples}$$

Les couples de valeurs (Q, Q_S) sélectionnés sont rapportés sur un papier Log – Log ; le tracé démontre que le nuage de points obtenu autorise un ajustement linéaire. On pose donc le modèle linéaire :

$$Y = A \cdot X + B$$

$$\text{Tel que :} \quad X = \text{Log}(Q) \quad \text{et} \quad Y = \text{Log}(Q_S)$$

Q : débit liquide en m³/s.

Q_S : débit solide en suspension Kg/s.

- Des calculs élémentaires conduisent aux résultats suivants :

TABLEAU .V.2.1 : RESULTATS DE CALCUL

	X	Y
Les moyennes	1,27 ± 0,03	2,05 ± 0,57
Les écarts types	0,61 ± 0,02	0,95 ± 0,04
La covariance	0,53	
Coef. de corrélation	92 %	

- Les paramètres du modèle A et B :

$$A = 1,44 \quad \text{et} \quad B = 0,21$$

- Le modèle ainsi déduit est de la forme :

$$Q_s = k \cdot Q^A \quad \text{avec} \quad k = 10^B$$

Donc :
$$Q_s = 1,62 \cdot Q^{1,44}$$

C'est la relation exprimant le débit solide (Kg/s) en fonction du débit liquide (m^3/s) appliquée à l'échelle annuelle.

- Pour l'intervalle de prédiction de ce modèle pour un niveau de confiance de 95% est :

$$Q_s \pm 5,53 \text{ Kg/s}$$

La figure (V.2.1) montre le nuage de points et la droite de régression pour une application annuelle.

V.2.1.4.COURBE DES DEBITS CLASSES :

Une série de débits liquides moyens journaliers a été sélectionnée ; une série complète continue de 1972 à 1996 [11][89] d'une taille : $N = 6312$ valeurs.

Dont les caractéristiques estimées sont :

- La moyenne $Q_{\text{moy}} = 32,14 \pm 1,91 \text{ m}^3/s$.
- L'écart type : $S = 77,47 \pm 1,35$.

La répartition de la statistique d'observation en classes nous a permis de tracer la courbe des débits classés (courbe des fréquences cumulées des débits liquides) de cette série, figure (V.3.2).

V.2.1.5.ESTIMATION DE L'APPORT SOLIDE EN SUSPENSION :

Le modèle : $Q_s = 1,62 \cdot Q^{1,44}$, combiné avec la courbe des débits classés, suivant les étapes citées précédemment nous fournissent en résultats, le débit liquide moyen journalier inter- annuel Q_m et le débit solide moyen journalier inter – annuel Q_{sm} , tel qu'il est résumé au tableau (V.2.2), qui

nous permettrons d'estimer la masse des sédiments en suspensions transportés dans le cours d'eau de CHELIFF .

REMARQUE : tous les résultats obtenus sont déterminés grâce au programme informatique spécialement conçu.

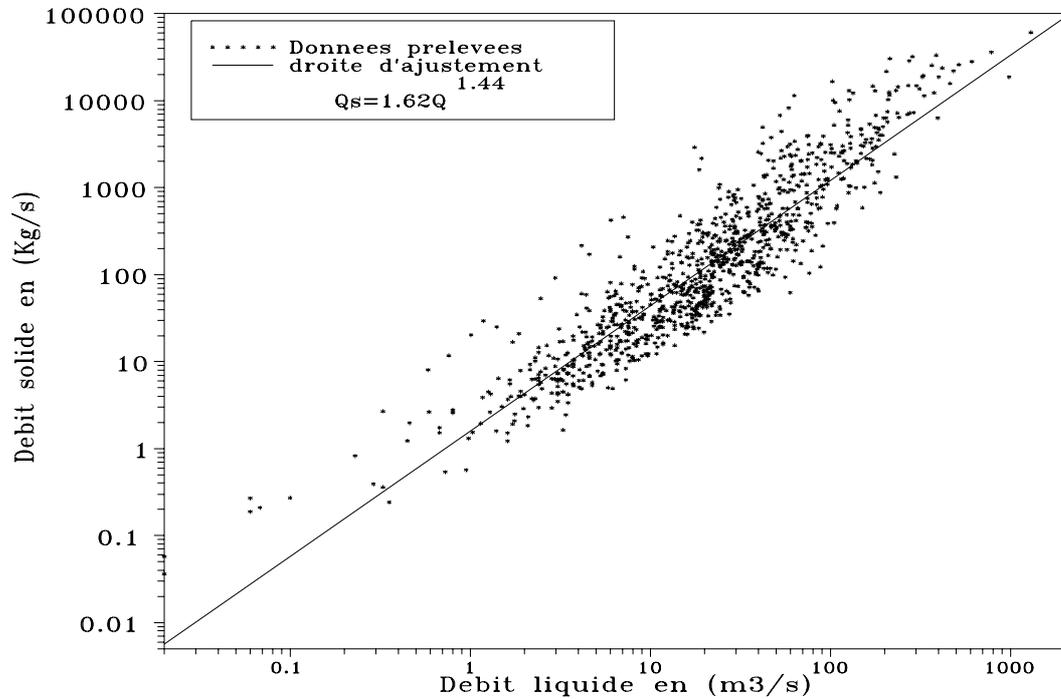


FIGURE.V.2.1 : DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE – DEBIT LIQUIDE (TOUTE L’ANNEE) « MUC »

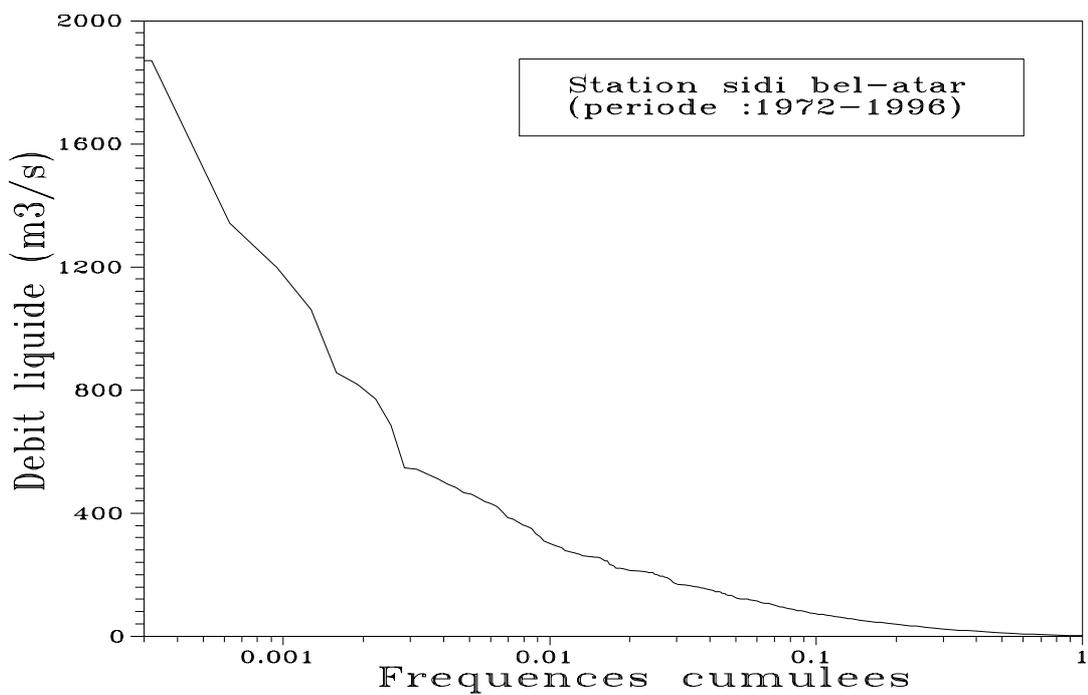


FIGURE.V.2.2 : COURBE DES DEBITS CLASSES (TOUTE L’ANNEE) « MUC »

TABLEAU .V.2.2 : CALCUL DES DEBITS LIQUIDE ET SOLIDE MOYEN INTERANNUEL

Bornes (%)	Intervalle	Médiane	Q	Q _s	col2. Col4/100	col2.col5/100
0.00 – 0.35	0,35	0,175	925,71	37434,28	3,40	131,02
0.35 – 1.05	0,70	0,700	572,32	9354,28	5,01	65,48
1.05 – 1.90	0,85	1,125	223,45	4836,47	2,06	41,11
1.90 – 3.01	1,11	2,455	174,94	3400,00	2,10	37,74
3.01 – 5.86	2,85	4,435	123,91	2069,12	3,64	58,97
5.86 – 8.05	2,19	6,950	87,06	1244,75	2,07	27,26
8.05 – 9.76	1,71	8,900	70,41	916,96	1,36	15,68
9.76 – 12.36	2,60	11,06	59,17	713,84	1,71	18,56
12.36 – 14.54	2,18	13,45	49,77	536,42	1,24	12,13
14.54 – 20.06	5,52	17,30	39,26	395,47	2,33	21,83
20.06 – 27.04	6,98	23,55	28,58	250,28	2,15	17,47
27.04 – 42.03	14,99	34,53	17,82	126,81	2,83	19,01
42.03 – 64.59	22,56	53,31	9,11	48,22	2,21	10,88
64.59 – 100.00	35,41	82,29	2,78	8,72	1,14	3,09
					Q_m= 32,44 m³/s	Q_{sm}= 474,73 Kg/s

1) Calcul de la charge annuelle de sédimentation :

$$Q_{SS} \text{ (annuelle)} = Q_{Sm} \cdot 3,154 \cdot 10^4 = 474,73 \cdot 3,154 \cdot 10^4 = 14,94 \text{ million tonne / an}$$

$$Q_{SS} = 14,97 \text{ millions de tonnes / an.}$$

2) Calcul de l'apport spécifique des sédiments en suspension :

$$T_s = Q_{SS} \text{ (annuelle)} / \text{surface} = 14,97 \cdot 10^6 / 43700 = 342,59 \text{ T/Km}^2/\text{an}$$

Remarque : le "T_s" calculé ne représente que une valeur apparente de la dégradation spécifique car dans le bassin en question il y'a un nombre important de barrage ou les sédiments sont

piégés, il a été calculé juste pour avoir un petit aperçu sur le degré de dégradation du dit bassin versant [11].

Le calcul de la dégradation spécifique d'un bassin versant est extrêmement difficile à cerner du fait de l'intervention de plusieurs paramètres tel que les ouvrages hydrauliques existant dans le bassin qui piègent les sédiments en suspension comme les barrages et les retenues collinaires ainsi que les activités humaine sans oublier les incendies qui se produisent chaque année et qui dévaste des forêts entières laissant les sols vulnérables à l'érosion. Dans cette étude nous essayerons de d'évaluer cette dégradation spécifique et que nous appellerons dégradation spécifique effective " T_{SF} " en tenant compte que de quelques barrages importants réalisés avant la période 1972-1996 (période d'observation de nos données) en posant l'hypothèse que tous les sédiments produits par les bassins versants à l'amont des barrages à considérer sont piégés entièrement dans les retenues de ces derniers. Dans cette estimation nous ne tenons pas compte ni des retenues collinaires qui existent dans ce bassin ni des incendies enregistrés. Ainsi donc les barrages de Boughzoul, Grib, Oued el Fodda et Bakhada sont considérés dans cette étude, soit un cumule de leur surfaces des bassins versants de 25400 Km^2 , donc nous considérons que la totalité des sédiments produit par ces bassins versants seront piégés dans les barrages précités.

Dans la surface concerné par la production des sédiments qui devront par hypothèse atteindre la station de Sidi Bel Attar sera de $43700 - 25400 = 18300 \text{ Km}^2$.

3) Calcul de la dégradation spécifique effective :

$$T_{SF} = Q_{SS} \text{ (annuelle)} / \text{surface effective} = 14,97 \cdot 10^6 / 18300 = 818,03 \text{ T/Km}^2/\text{an}$$

4) Calcul de la concentration moyenne annuelle :

$$C_m = Q_s / Q = 474,73 / 32,44 = 14,63 \text{ g/l}$$

V.2.I.6. APPLICATION A L'ECHELLE SAISONNIERE :

Compte tenu de l'influence saisonnière sur le phénomène du transport solide, ce ci nous a poussé à établir des relations saisonnières entre débits liquides moyens journaliers et débits solides moyens journaliers et d'estimer l'apport solide en suspension en découlant pour chaque saison. Pour les données de la dite station, l'étude sera menée de la même manière selon les groupements effectués suivant les saisons [88]:

- 1) Automne.
- 2) Hiver.
- 3) Printemps.
- 4) Eté.
- 5) Saison humide (automne et hiver).
- 6) Saison sèche (printemps et été).

Remarque :

Le regroupement, Saison humide et saison sèche à été effectuer suite à l'importance des apport pluviométrique. Nous avons remarqué dans le chapitre précédent (figure.IV.4.6) que 71% des précipitations sont enregistrées en automne et hiver d'où le regroupement en saison humide contre 29% au printemps et en été d'où le regroupement en saison sèche.

- Le tableau (V.2.3) résume les paramètres de l'échantillon des couples de valeurs (Q, Q_S) pour chaque saison.

TABLEAU .V.2.3 : CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS (Q, Q_S) « MUC » [11]

Saison	Nbre de couples	Moyenne \bar{X} (m ³ /s)	Moyenne \bar{Y} (Kg/s)	Ecart type S _X	Ecart type S _Y	Covariance S _{XY}
Automne	360	1,28 ± 0,05	2,37 ± 0,10	0,49 ± 0,03	0,99 ± 0,07	0,46
Hiver	488	1,52 ± 0,04	2,28 ± 0,07	0,49 ± 0,03	0,86 ± 0,05	0,40
Printemps	258	1,24 ± 0,05	1,98 ± 0,10	0,46 ± 0,04	0,80 ± 0,07	0,34
Eté	83	0,30 ± 0,14	1,06 ± 0,23	0,66 ± 0,10	1,09 ± 0,16	0,63
S. Humide	725	1,40 ± 0,04	2,19 ± 0,06	0,53 ± 0,03	0,91 ± 0,47	0,45
S. Sèche	341	1,01 ± 0,07	1,75 ± 0,10	0,65 ± 0,05	0,97 ± 0,07	0,57

- Le tableau (V.2.4) illustre les valeurs des coefficients de régression des relations saisonnières, ainsi que les modèles trouvés pour chaque saison.

L'équation de régression logarithmique et de la forme : $\text{Log}(Q_s) = A \cdot \text{Log}(Q) + B$

Et le modèle recherché est de la forme : $Q_s = k \cdot Q^A$ avec $k = 10^B$

Les graphes mentionnant les nuages de points et les droites de régressions sont classés en figure.V.2.3 qui suit selon l'ordre.

TABLEAU .V.2.4 : RELATIONS SAISONNIERES [11][89]

Saison	Nbre de Couples	Coefficients de la régression			Coefficient Corrélation	Intervalle prédiction	Relation
		A	B	k			
Automne	360	1,88	-0,04	0,91	94 %	± 4,61	0,91 Q ^{1,88}
Hiver	488	1,64	-0,23	0,59	94 %	± 3,77	0,59 Q ^{1,64}
Printemps	258	1,57	0,03	1,07	91 %	± 6,54	1,07 Q ^{1,57}
Eté	83	1,45	0,62	4,17	87 %	± 11,65	4,17 Q ^{1,45}
S. Humide	725	1,58	-0,02	0,95	93 %	± 4,53	0,95 Q ^{1,58}
S. Sèche	341	1,32	0,42	2,63	90 %	± 6,78	2,63 Q ^{1,32}

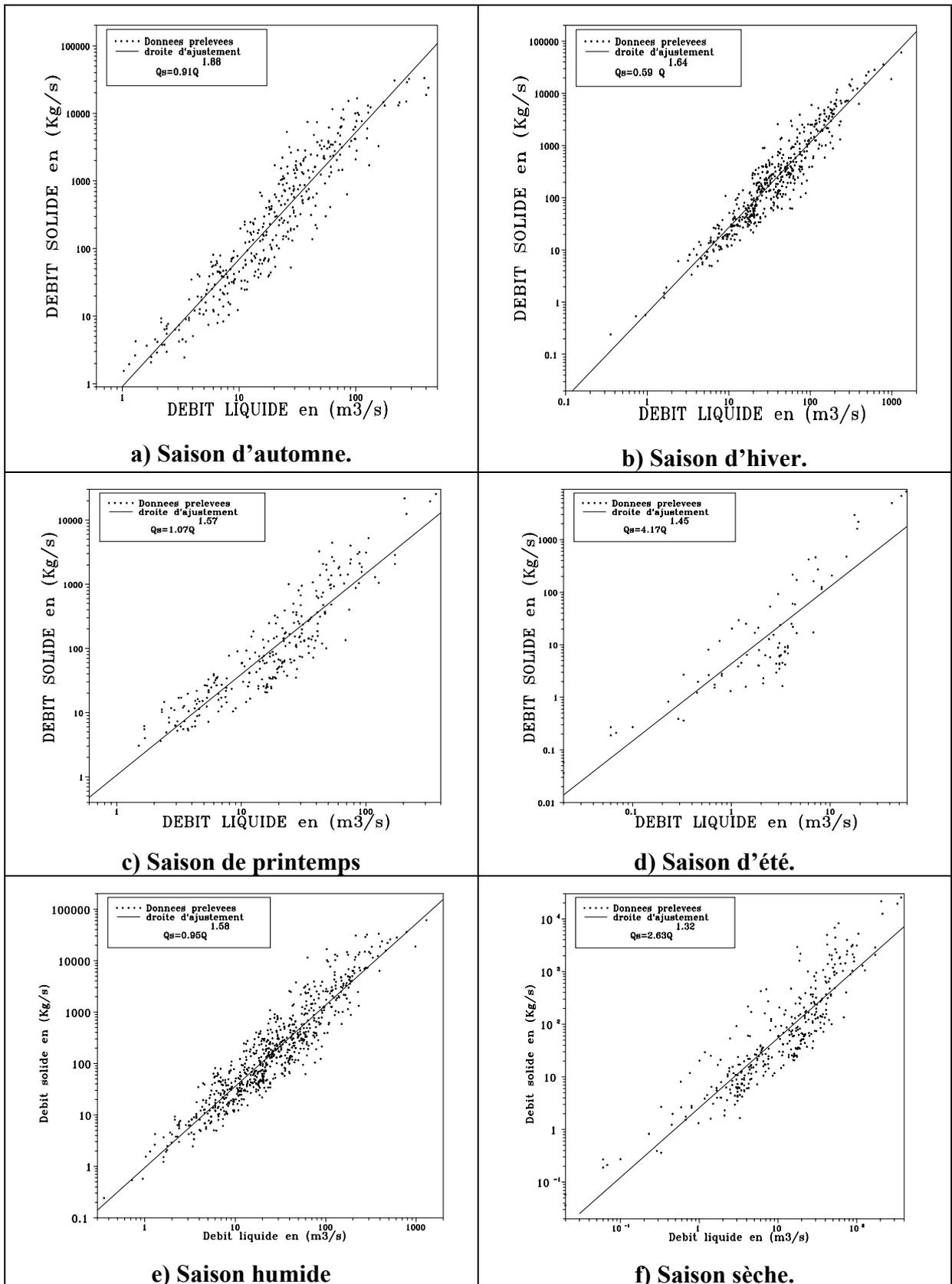


Figure.V.2.3 .Bassin versant de Chellif - corrélation saisonnière entre débit solide et débit liquide.

L'application du test adéquat de Fisher Snedecor (paragraphe III.2.5.2 du chapitre III) pour toutes les applications précédentes (annuelle et saisonnières) montre que les seuils de significations des relations retrouvées sont de l'ordre de 99% (risque $\alpha=1\%$) car les F observés dépassent le F théorique ($F_{\alpha}(1,N-2)$) obtenu à partir de la table de Fisher, ce qui montre la bonne représentativité des modèles. C'est normal, car les coefficients de corrélations sont importants et les effectifs sont relativement grands.

- Le tableau (V.2.5) donne les tailles et les paramètres estimés des séries saisonnières.
- Les tracés des courbes des débits classés saisonnières sont mentionnés en figure V.2.4 selon l'ordre.

TABLEAU .V.2.5 : SERIES SAISONNIERES DES DEBITS LIQUIDES MOYENS JOURNALIERS [11]

Saison	Taille	Moyenne avec intervalle de confiance	Ecart type avec intervalle de confiance
Automne	2196	12,34 ± 1,23	29,50 ± 0,87
Hiver	2268	38,47 ± 3,10	75,27 ± 2,19
Printemps	2280	18,55 ± 2,45	59,69 ± 1,73
Eté	2268	1,81 ± 0,01	2,04 ± 0,07
S. Humide	4484	25,69 ± 1,73	58,96 ± 1,22
S. Sèche	4548	10,21 ± 1,25	43,12 ± 0,88

- Le tableau (V.2.6) donne les estimations des débits liquides et solides en suspension, moyens journaliers inter – saisonniers ; calculés suivant les étapes cités préalablement ; ainsi que les apports solides en suspension en découlant.

TABLEAU .V.2.6 : APPORTS SAISONNIER EN SEDIMENTS EN SUSPENSION [11][87]

	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Saison Humide	Saison Sèche
Q_m (m ³ /s)	12,59	38,76	18,98	1,92	25,94	10,47
Q_{sm} (Kg/s)	543,41	582,77	345,25	14,35	405,61	113,58
Q_{SS} (millions tonnes/an)	11,71				8,16	
T_s (tonne/Km ² /an)	268,05				187,33	
T_{SF} (tonne/Km ² /an)	639,89				445,9	

Q_{sm} : Débit moyen solide en suspension.

Q_{SS} : charge annuelle de sédiments en suspensions, Q_{SS} (annuel) = ΣQ_{sm} (saisonniers).

T_s : apport spécifique en sédiments en suspension (dégradation spécifique).

T_{SF} : apport spécifique effectif en sédiments en suspension (dégradation spécifique).

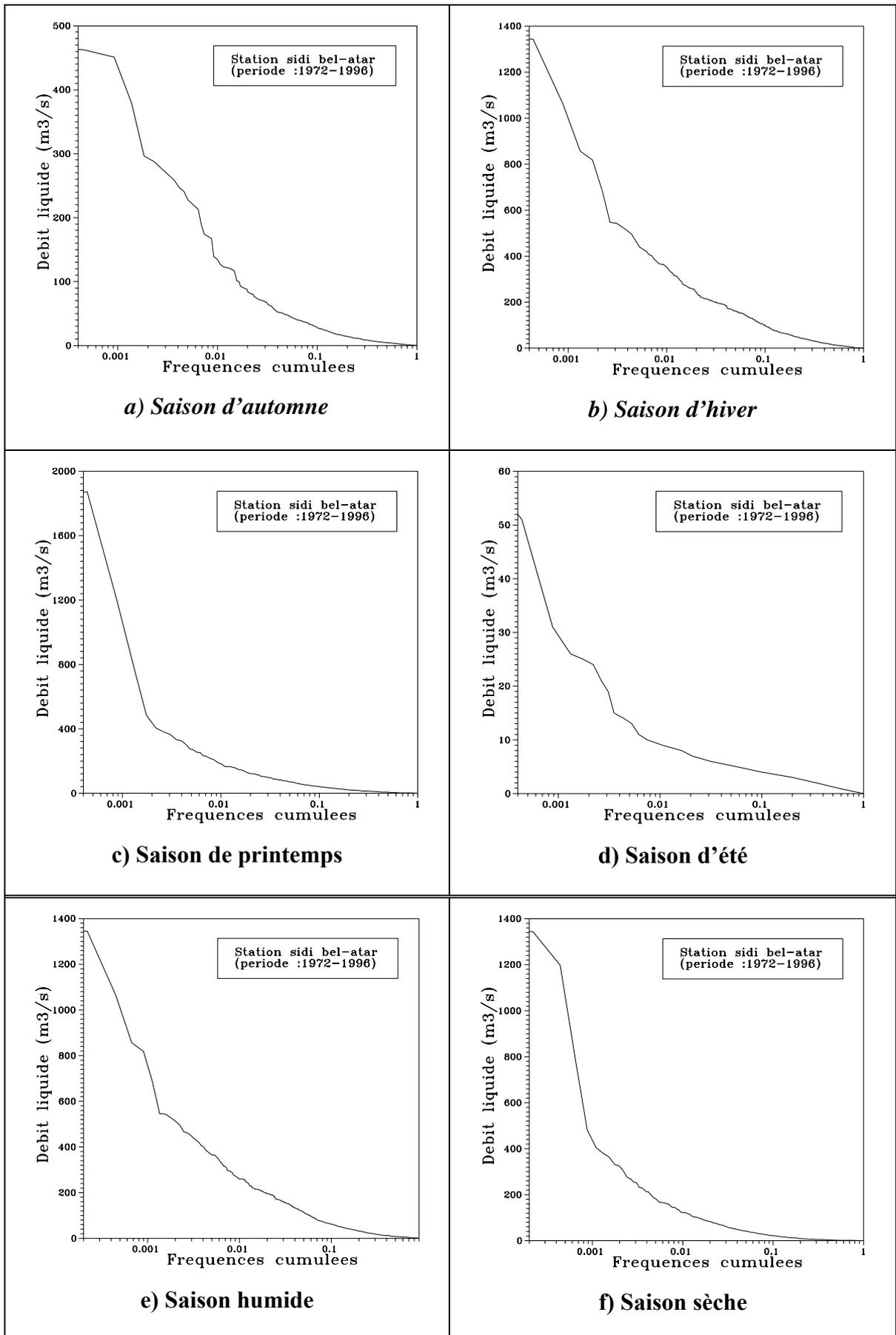


Figure.V.2.4.Courbes des débits classés à l'échelle saisonnière « MUC ».

V.2.2.ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSION A PARTIR DES CRUES :

Une crue survient toujours suite à une précipitation relativement importante, alors que la précipitation est l'un des facteurs d'érosion du bassin versant, par conséquent elle alimente l'oued en eau à turbidité élevée. La teneur en particules fines dans les cours d'eau étant la plus élevée en périodes de crues ; la quantification du transport solide est beaucoup plus intéressant par modélisation en ces périodes [11].

V.2.2.1.SELECTION DE CRUES :

Les crues ont été sélectionnées sur la base des critères suivants [11]:

- Nombre de points suffisants en crue et en décrue.
- D'après leur importance.

Ainsi pour le bassin de cette étude nous avons procédé au dépouillement de toutes les crues durant toute la période 1972 à 1996, qui sont de 90 crues. La durée des crues varie de 1 à 15 jours, elles varient d'une année à une autre en transportant une quantité variable de sédiments dans le temps. Il est à signaler que nous ne disposons pas de toutes les données du transport solide lors des crues et notamment les crues torrentielles. Le régime de Oued CHELIFF est très turbulent et torrentiel, ce qui rend la tâche de l'opérateur de la station, difficile, vu les moyens mis à sa disposition.

V.2.2.2.LES TRACES DE CRUES (HYDROGRAMME, SOLIDOGRAMME ET TURBIDIGRAMME) :

Afin de suivre l'évolution des facteurs décrivant le transport solide durant la période d'une crue différents tracés sont utilisés :

- L'hydrogramme et le turbidigramme : sur la même bande de l'hydrogramme qui est l'évolution du débit liquide en fonction du temps rapporté à une échelle que l'en déterminera au préalable, les résultats chronologiques de concentration.
- Le solidogramme exprime l'évolution chronologique des débits solides en suspension durant les crues.

La figure.V.2.5 et la figure.V.2.6 illustrent respectivement solidogramme et le turbidigramme de la crue du 02 au 05/05/1979. Ces tracés nous permettent de mieux comprendre le comportement du phénomène et de dresser le mode le plus approprié pour son étude pour mieux cerner le problème en question [11][87][88].

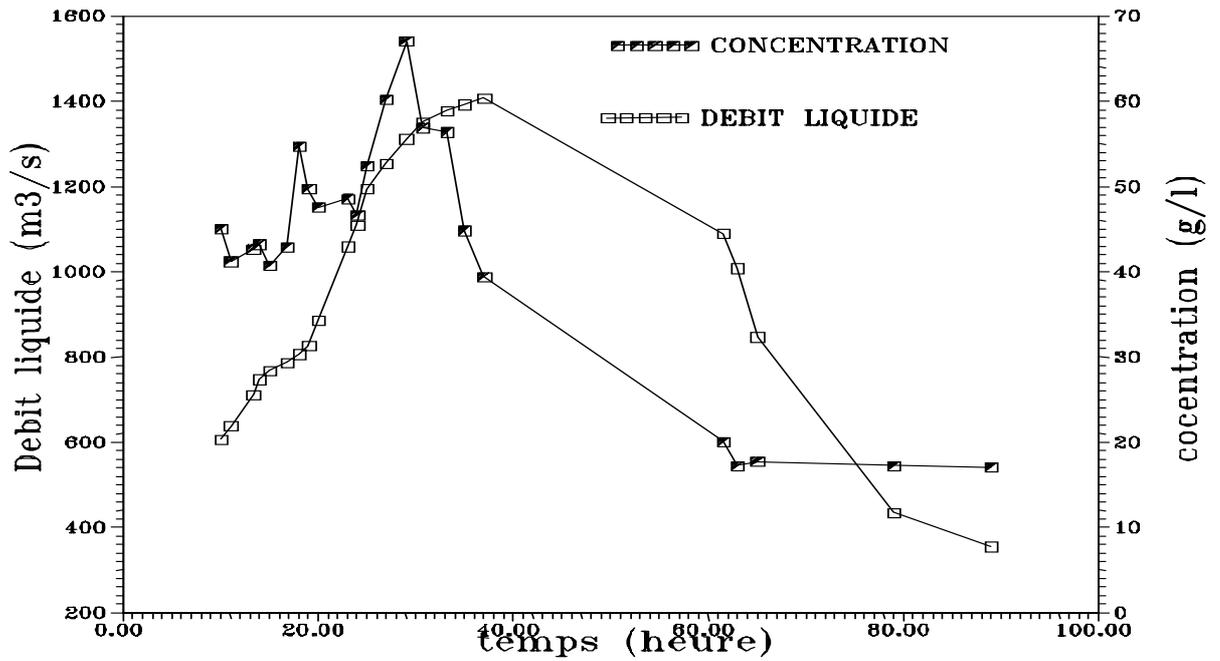


Figure.V.2.5 : SOLIDOGRAMME DE LA CRUE DU 02 AU 05/02/1979 (OUED CHELIFF, BASSIN DE CHELLIF, STATION DE SIDI BEL-ATAR)

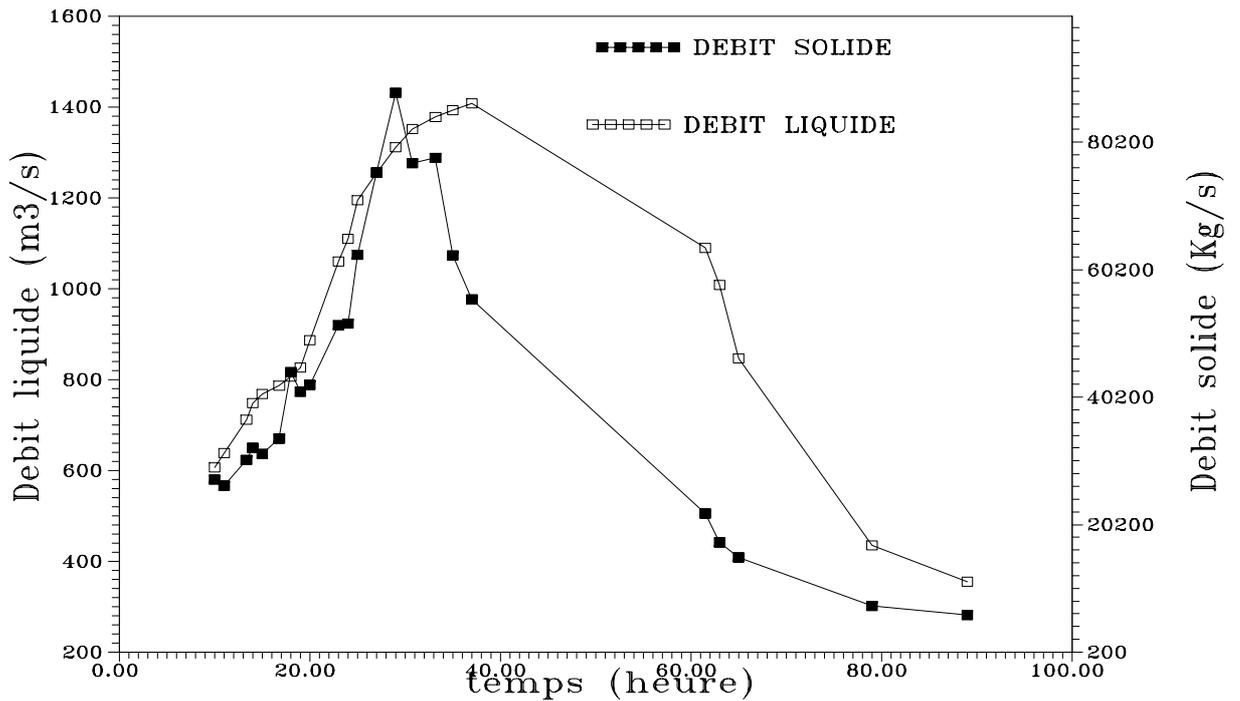


Figure.V.2.6 : HYDROGRAMME ET TURBIDIGRAMME DE LA CRUE DU 02 AU 05/02/1979 (OUED CHELIFF, BASSIN DE CHELLIF, STATION DE SIDI BEL-ATAR)

V.2.2.3. ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES A PARTIR DES CRUES (DANS LEURS INTEGRALITES)[11][87][88]:

Cette seconde étude est menée, en se basant sur une modélisation du transport solide en suspension à partir des débits de crues dans leurs intégralités « sans dissociation de la crue », sur toute la période 1972 à 1996, à l'échelle annuelle et saisonnière ; compte tenu de l'influence de cette dernière sur le phénomène en question. Pour la dite station (Sidi BEL-ATAR) l'étude annuellement et selon les groupement de saisons :

- 1) Annuel.
- 2) Automne.
- 3) Hiver.
- 4) Printemps.
- 5) Saison humide.
- 6) Saison sèche.

Pour la saison d'été les données sur les crues sont insuffisantes vu leurs raretés en cette saison.

A. DONNEES SUR LES SEDIMENTS :

A partir du fichier de base de couples (Q, Q_S), des fichiers présentant tous les couples (Q, Q_S) enregistrés en périodes de crues, sont érigés selon le mode d'estimation envisagé (annuel, saisonnière, semestriel).

B. CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS DE COUPLES (Q, Q_S) :

Le tableau (V.2.7) résume les paramètres des échantillons des couples de chaque fichier.

TABLEAU .V.2.7 : CARACTERISTIQUE DES ECHANTILLONS (Q, Q_S) « CRUES ENTIERES »

	Nbre de couples	Moyenne \bar{X}	Moyenne \bar{Y}	Ecart type S_X	Ecart type S_Y	Covariance S_{XY}
Annuel	691	1,98 ± 0,04	3,55 ± 0,05	0,52 ± 0,03	0,62 ± 0,03	0,30
Automne	377	1,56 ± 0,04	3,43 ± 0,06	0,45 ± 0,06	0,64 ± 0,04	0,26
Hiver	397	2,06 ± 0,05	3,51 ± 0,06	0,48 ± 0,03	0,62 ± 0,04	0,27
Printemps	290	1,91 ± 0,06	3,21 ± 0,09	0,56 ± 0,05	0,77 ± 0,06	0,39
S. Humide	544	1,91 ± 0,04	3,44 ± 0,05	0,53 ± 0,03	0,66 ± 0,04	0,32
S. sèche	309	1,84 ± 0,07	3,16 ± 0,09	0,61 ± 0,05	0,80 ± 0,06	0,44

C. RELATION ENTRE DEBIT LIQUIDE ET DEBIT SOLIDE, $Q_s=F(Q)$:

Les couples de valeurs (Q , Q_s) sélectionnés sont rapportés sur un papier Log – Log. Le tracé montre que l'ajustement linéaire est favorable : $\text{Log}(Q_s) = A \cdot \text{Log}(Q) + B$

Et
$$Q_s = k \cdot Q^A \quad \text{avec} \quad k = 10^B$$

La figure (V.2.7) mentionne le nuage de points et sa droite de régression à l'échelle annuelle. Les autres figures saisonnières sont classées selon l'ordre établi en figure.V.2.8.

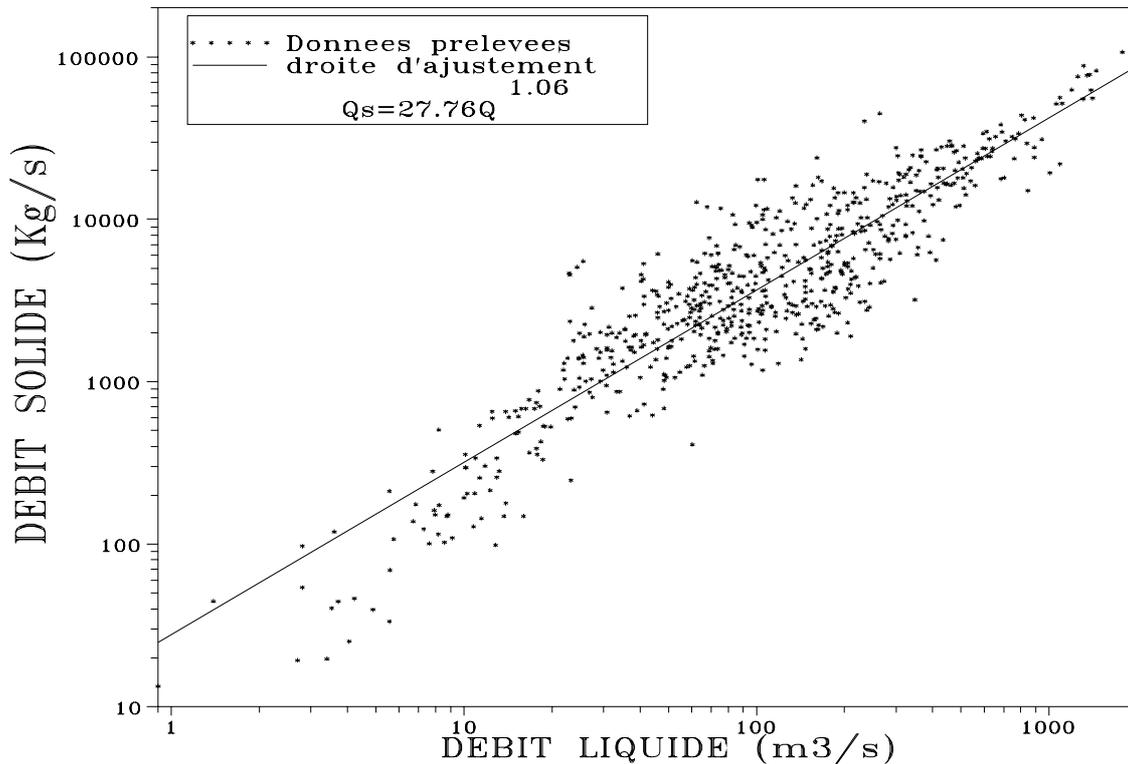


Figure.V.2.7: DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE – DEBIT LIQUIDE (TOUTE L'ANNEE)

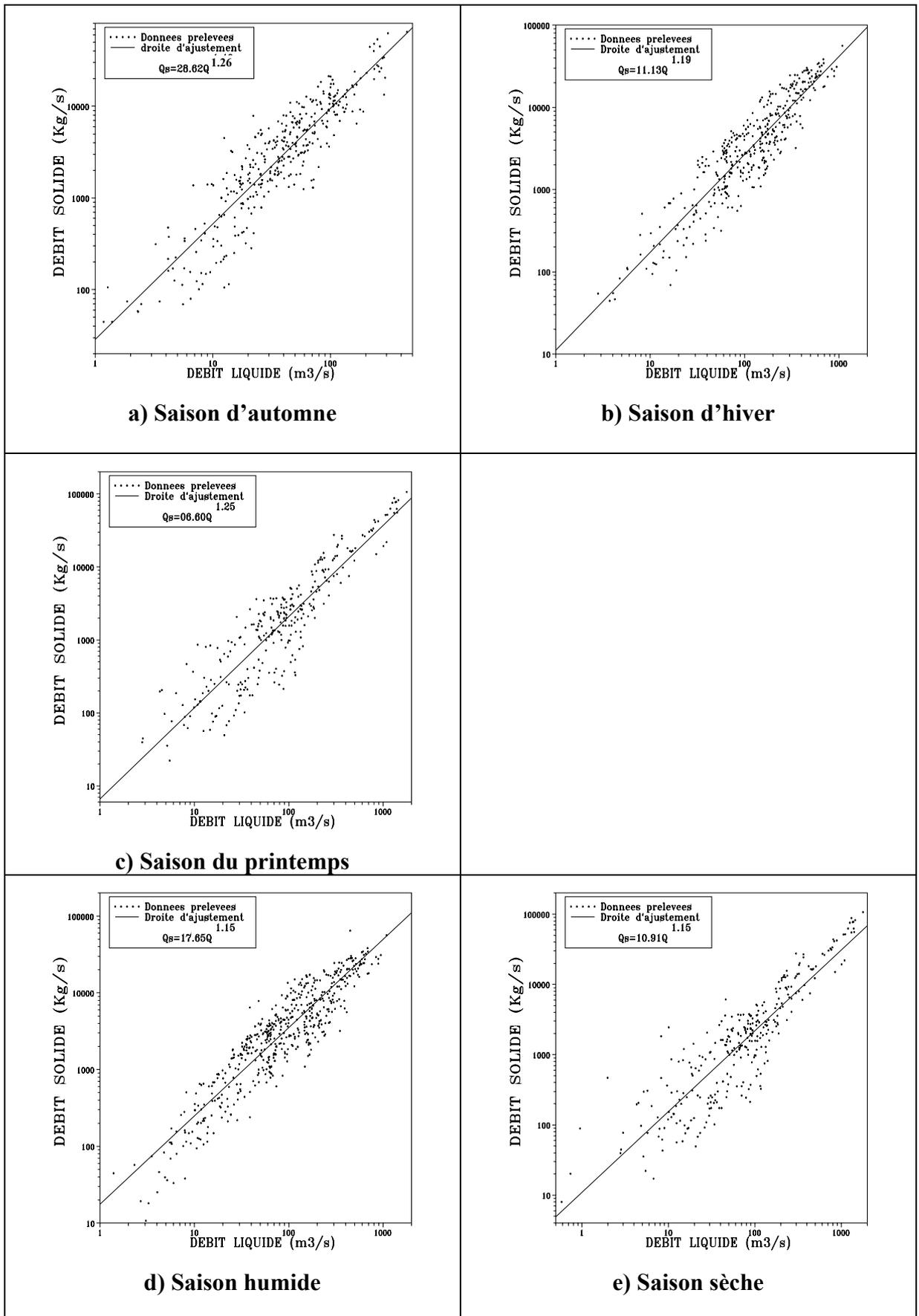


Figure.V.2.8. Corrélations saisonnières entre débit solide et débit liquide (Crues entières) « MUC »

Le tableau (V.2.8) illustre les valeurs des coefficients des régressions et les modèles trouvés à chaque mode d'estimation.

TABLEAU .V.2.8 : RELATIONS ANNUELLES ET SAISONNIERES « CRUES ENTIERES »

	Nbre de Couples	Coefficients de la régression			Coefficient Corrélation	Intervalle Prédiction	Relation
		A	B	k			
Annuel	691	1,06	1,44	27,76	91 %	± 3,23	27,76 Q ^{1,06}
Automne	377	1,26	1,46	28,62	91 %	± 3,37	28,62 Q ^{1,26}
Hiver	397	1,19	1,05	11,13	92 %	± 3,10	11,13 Q ^{1,19}
Printemps	290	1,25	0,82	6,60	91 %	± 4,43	6,60 Q ^{1,25}
S. Humide	544	1,15	1,25	18,65	91 %	± 3,38	17,65 Q ^{1,15}
S. sèche	309	1,15	1,04	10,91	89 %	± 5,28	10,91 Q ^{1,15}

Même ici, l'application du test de Fisher Snedecor (paragraphe III.2.5.2 du chapitre III) pour toutes les applications précédentes (annuelle et saisonnières) montre que les seuils de significations des relations retrouvées sont de 99% (risque $\alpha=1\%$) ce qui montre la bonne représentativité des modèles.

D. APPORT SOLIDE EN SUSPENSION :

Les modèles $Q_s = k \cdot Q^A$ combiné avec leurs courbes des débits classés respectives (voir paragraphe V.2.1.5) « les courbes de la figure.(V.2.2) et celles rangées en **figureV.2.4**, suivant les mêmes étapes précédentes nous a permis d'estimer les débits moyen journaliers inter – annuel et inter – saisonnier, liquide et solide qui nous ont permis de trouver les résultats du tableau (V.2.9).

TABLEAU .V.2.9 : APPORTS SAISONNIER EN SEDIMENTS EN SUSPENSION [11][87][88]

	Annuel	Automne	Hiver	Printemps	S. Humide	S. sèche
Qm (m/s)	32,440	12,590	38,760	18,980	25,940	10,470
QSm (Kg/s)	1205,540	996,170	1076,80	394,780	876,200	216,670
QSS (millions tonnes/an)	37,73	19,455			17,230	
T _S (tonne/Km2/an)	863,360	445,210			394,330	
T _{SF} (tonne/Km2/an)	2061,75	1063,11			941,53	

V.2.2.4.ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES PAR DISSOCIATION DE CRUES « EN MONTEE ET DESCENTE DE CRUE » :

Nous avons continué notre démarche, en espérons trouver une relation assez étroite entre les débits liquides « Q » et les débits solides « Q_s », en dissociions les crues en deux parties : montée et descente (décrue), car le comportement des apports solides par rapport aux débit liquide en ces événements diffère entre les montées des crues et les décrûes ainsi que, les concentrations solides diminues, surtout pour les crues de longue durée (plusieurs jours) qui est dû au lessivage constant du sol. Ainsi le même travail a été refait pour les deux parties des crues.

DONNEES SUR LES SEDIMENTS :

Du fichier présentant les couples (Q, Q_s), relatifs aux périodes des crues, 2 types de fichiers sont érigés :

- 1) Un fichier présentant les couples (Q, Q_s) relatifs aux débits de montées de crues.
- 2) Un fichier présentant les couples (Q, Q_s) relatifs aux débits de décrues.

Selon le mode d'estimation des fichiers correspondants sont dressés.

Le tableau (V.2.10) résume les paramètres estimés des échantillons de chaque fichier.

TABLEAU .V.2.10 : CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS (Q, Q_s) « CRUES DISSOCIES»[11]

	Type	Nbre de Couples	Moyenne \bar{X}	Moyenne \bar{Y}	Ecart type S _x	Ecart type S _y	Covariance S _{xy}
Annuel	M	398	2,00 ±0,04	3,59 ±0,05	0,47±0,03	0,53±0,04	0,23
	D	288	1,92 ±0,07	3,46 ±0,08	0,61 ± 0,05	0,69 ± 0,06	0,38
Automne	M	248	1,54 ±0,05	3,37 ±0,08	0,45 ± 0,04	0,70 ± 0,06	0,28
	D	139	1,54 ±0,08	3,41 ±0,12	0,51 ± 0,06	0,70 ± 0,08	0,33
Hiver	M	223	2,05 ±0,06	3,51 ±0,08	0,49 ± 0,04	0,62 ± 0,06	0,28
	D	175	2,10 ±0,07	3,49 ±0,04	0,45 ± 0,05	0,62 ± 0,06	0,27
Printemps	M	177	1,87 ±0,09	3,37 ±0,11	0,59 ± 0,06	0,73 ± 0,07	0,41
	D	116	1,97 ±0,09	3,05 ±0,14	0,50 ± 0,06	0,79 ± 0,10	0,36
S. humide	M	319	1,86 ±0,06	3,42 ±0,07	0,54 ± 0,04	0,69 ± 0,04	0,34
	D	225	1,98 ±0,07	3,47 ±0,08	0,51 ± 0,05	0,62 ± 0,06	0,29
S. Sèche	M	183	1,85 ±0,09	3,28 ±0,11	0,60 ± 0,06	0,76 ± 0,08	0,43
	D	125	1,88 ±0,11	3,00 ±0,14	0,61 ± 0,07	0,82 ± 0,10	0,43

Le modèle recherché est : $Q_s = k \cdot Q^A$ et les figures (V.2.9) et (V.2.10) montrent les nuages de points et leurs droites de régressions, respectivement pour la montée et la descente de crues annuelles « modélisation annuelle ». Pour les modélisations saisonnières, les graphes les représentants sont rangés en **figure.V.2.11**. Selon leur ordre.

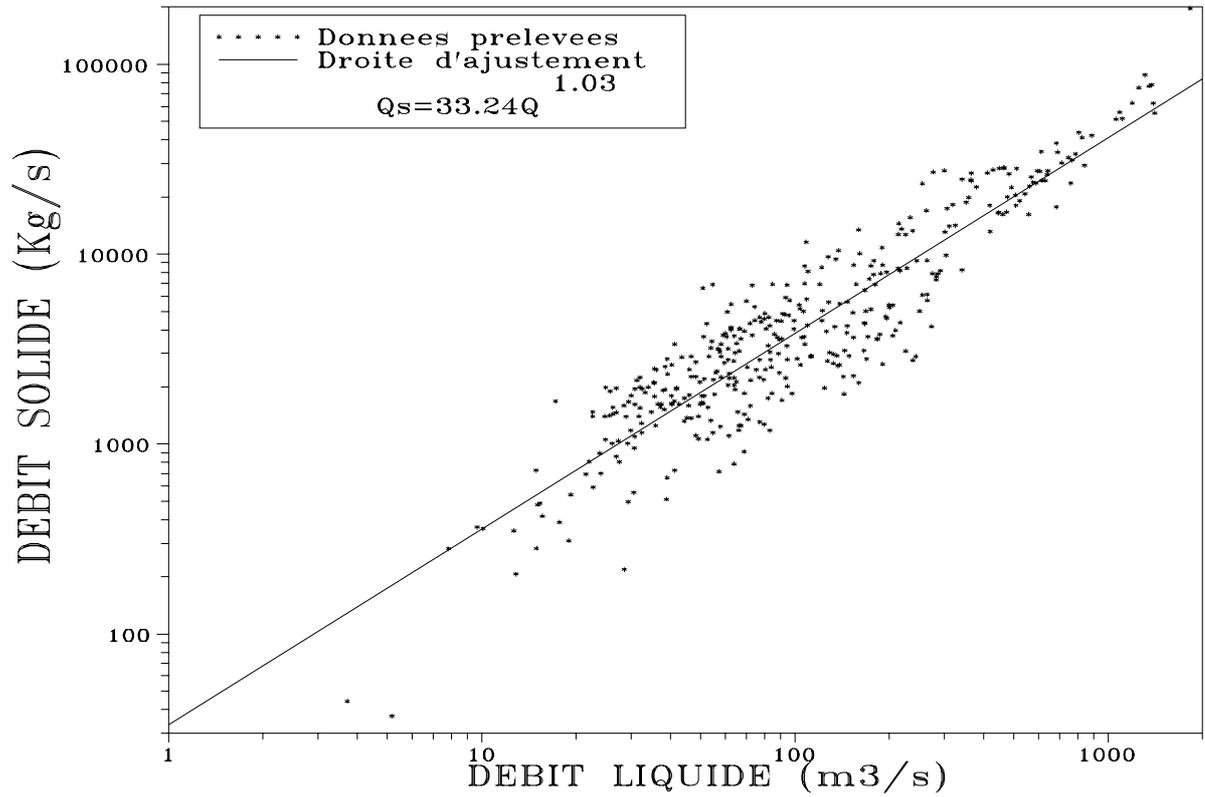


Figure.V.2.9 : DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE – DEBIT LIQUIDE (TOUTE L'ANNEE)

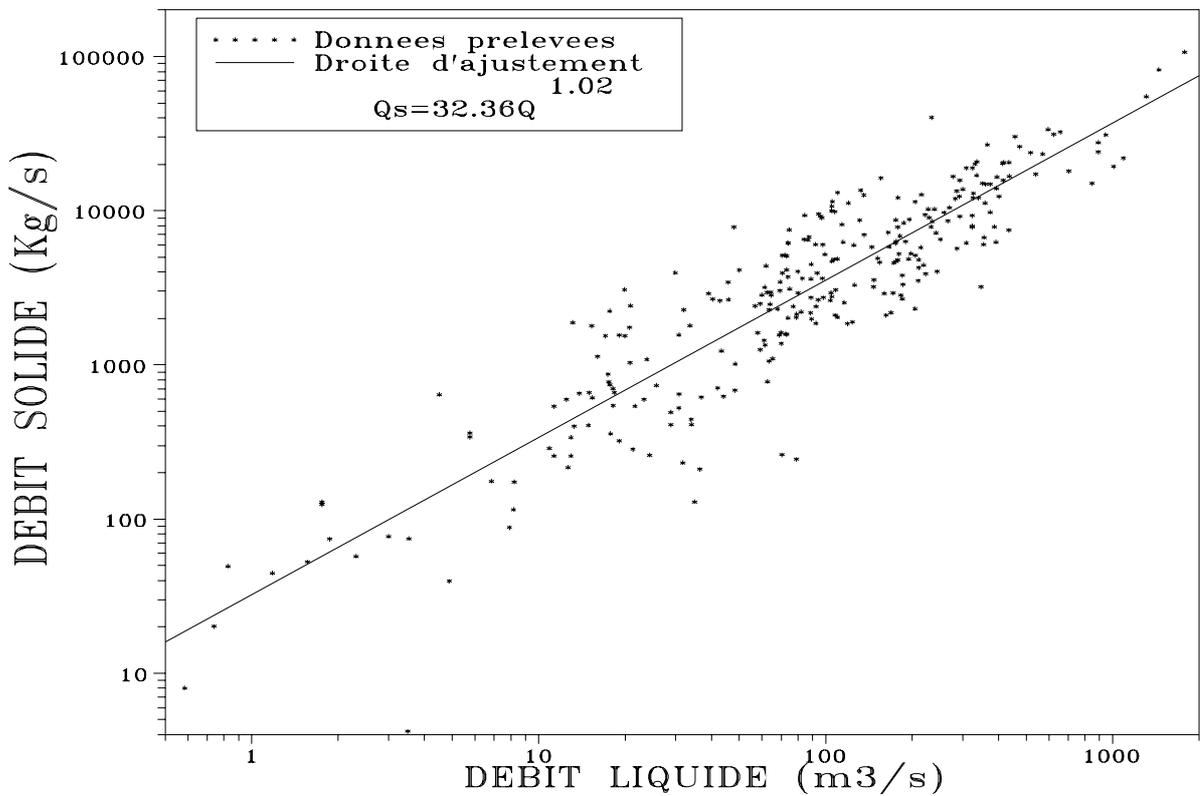
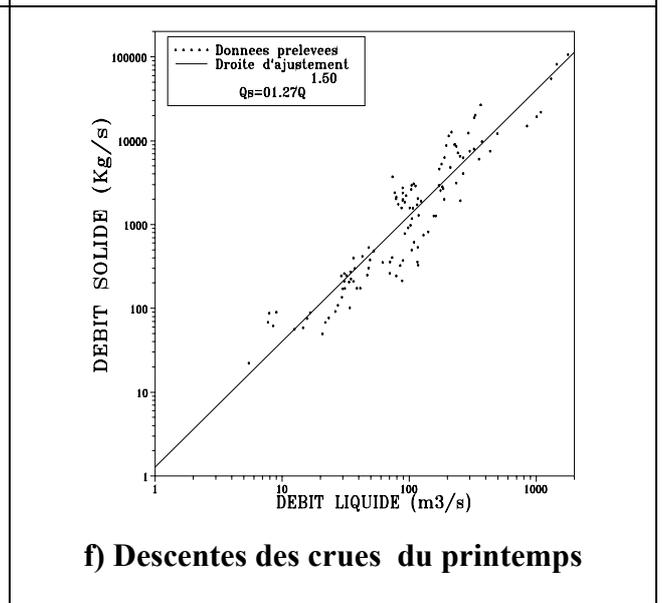
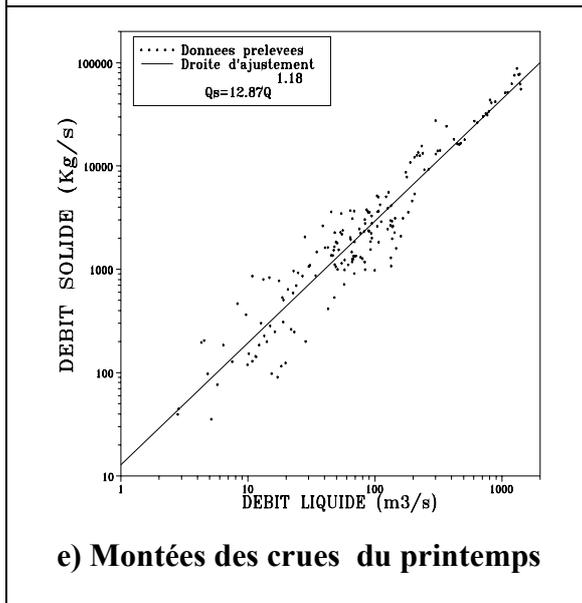
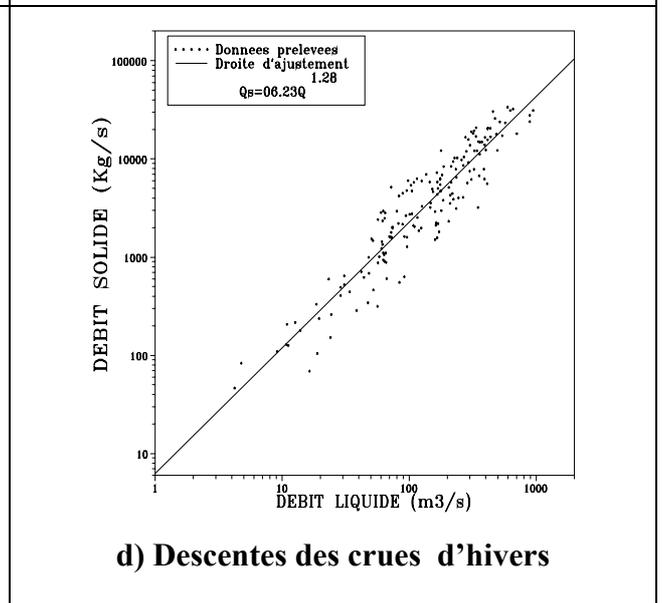
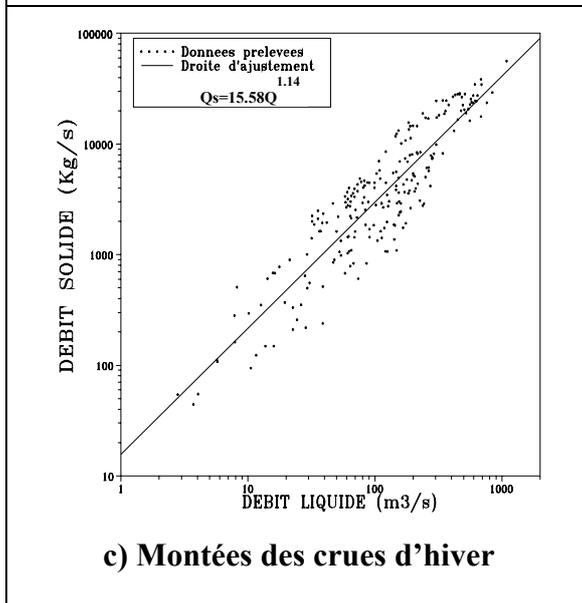
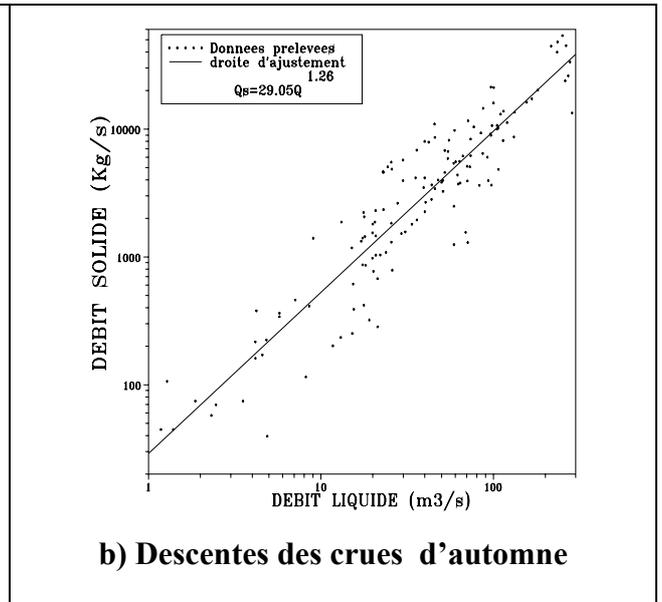
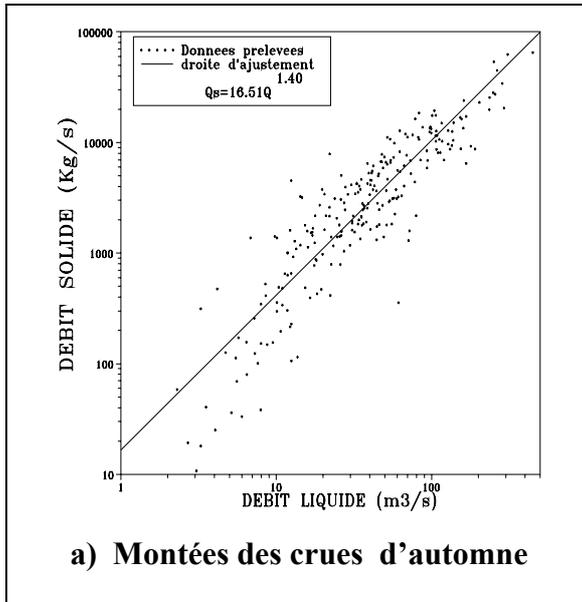


Figure.V.2.10 : DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE – DEBIT LIQUIDE (DESCENTE DES CRUES, TOUTE L'ANNEE) « MUC »



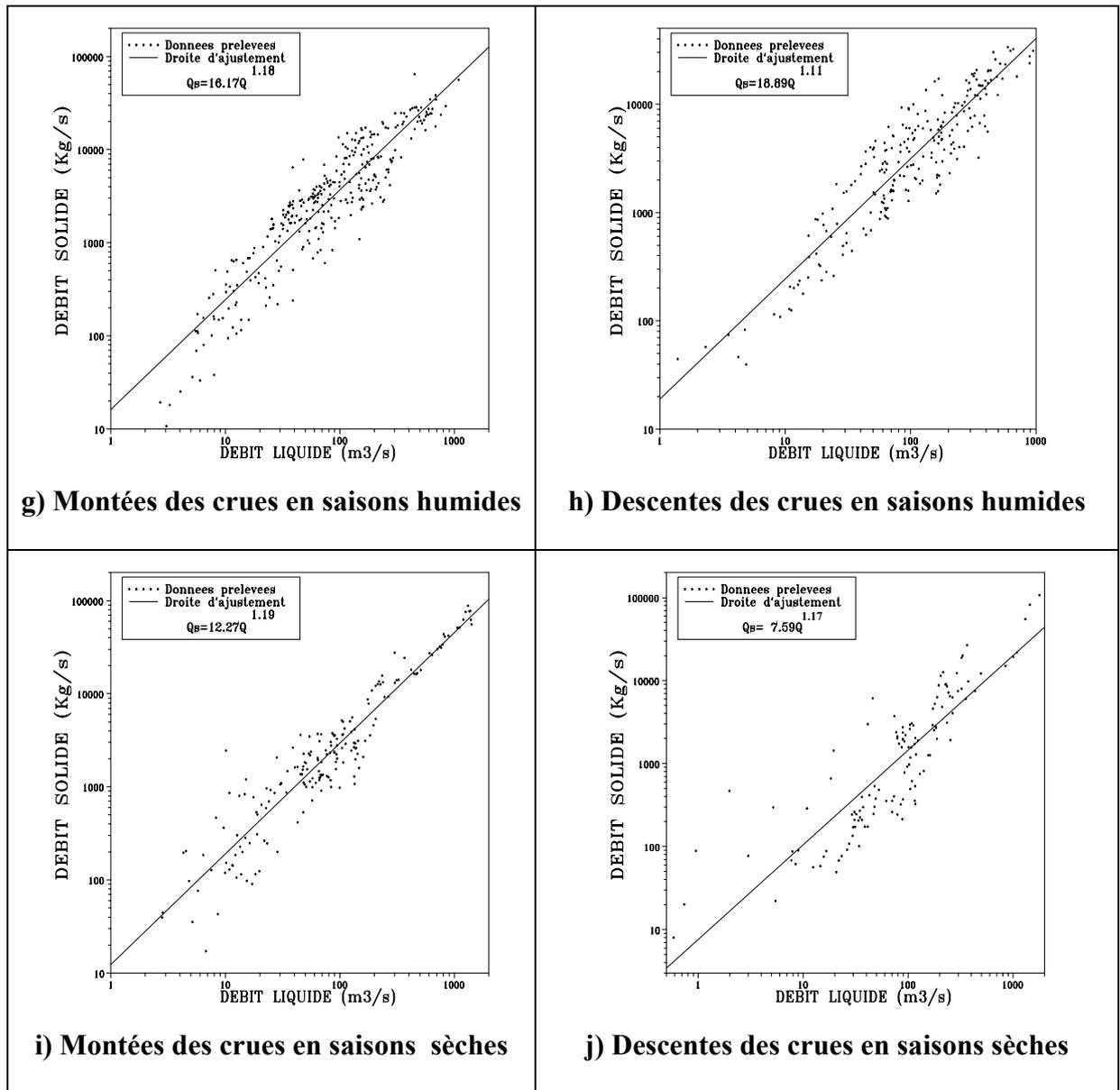


Figure.V.2.11. Corrélations saisonnières entre débit solide et débit liquide (Dissociation des crues) « MUC »

Le tableau (V.2.11) résume tous les paramètres des corrélations : $Q_s = f(Q)$.

TABLEAU .V.2.11 : RELATIONS ANNUELLES ET SAISONNIERES « CRUES DISSOCIEES »

	Type	Nbre de Couples	Coefficients de la régression			Coefficient Corrélation	Intervalle prédiction	Relation
			A	B	k			
Annuel	M	398	1,03	1,52	33,24	92 %	± 2,59	33,24 $Q^{1,03}$
	D	288	1,02	1,51	32,36	90 %	± 3,85	32,36 $Q^{1,02}$
Automne	M	248	1,40	1,22	16,51	90 %	± 4,06	16,51 $Q^{1,40}$
	D	139	1,26	1,46	29,05	92 %	± 3,41	29,05 $Q^{1,26}$
Hiver	M	223	1,14	1,19	15,38	91 %	± 3,21	15,58 $Q^{1,14}$
	D	175	1,28	0,79	6,23	94 %	± 2,74	06,23 $Q^{1,28}$
Printemps	M	177	1,18	1,11	12,37	95 %	± 2,90	12,87 $Q^{1,18}$
	D	116	1,50	0,10	1,27	93 %	± 3,78	01,27 $Q^{1,50}$
S. humide	M	319	1,18	1,21	16,17	92 %	± 3,51	16,17 $Q^{1,18}$
	D	225	1,11	1,28	18,89	92 %	± 3,10	18,89 $Q^{1,11}$
S. Sèche	M	183	1,19	1,09	12,27	94 %	± 3,25	12,27 $Q^{1,19}$
	D	125	1,97	0,88	7,59	87 %	± 6,17	07,59 $Q^{1,97}$

(M) : montée de crues. (D) : descente de crues.

L'application du test Fisher Snedecor montre sur toutes les applications (annuelle et saisonnières) montre que les seuils de significations des relations retrouvées sont de 99% (risque $\alpha=1\%$)

La confrontation du modèle : $Q_s = f(Q)$, avec la courbe des débits classés correspondant à chaque mode d'estimation, nous à permis de trouver les résultats du tableau (V.2.12).

TABLEAU .V.2.12 : CHARGES EN SEDIMENTS « CRUES DISSOCIEES » [11][87][88]

	Annuel		Automne		Hiver		Printemps		S. Humide		S. sèche	
	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D
Q_{Sm} (Kg/s)	1253,42	1138,75	1002,29	997,05	1189,72	942,30	537,0	267,21	959,38	784,70	283,22	136,32
Q_{SS} (millions tonnes/an)	37,72		19,46						17,06			
T_S (tonne/Km²/an)	863,15		445,30						390,34			
T_{SF} (tonne/Km²/an)	2061,20		1063,39						932,24			

V.2.3. Discussion des résultats :

Les résultats des modèles d'ajustements débit solide - débit liquide sont assez significatifs du fait que nous avons trouvé dans toutes les applications, des coefficients de corrélation entre 87% et 95%.

- Pour l'analyse des débits moyens journaliers (V.2.1) le coefficient en découlant à l'échelle annuelle est largement significatif du fait que 92% (V.2.1.3) des variations des débits solides sont exprimés par le modèle (figure.V.2.1). A l'échelle saisonnière, le degré de signification varie d'une saison à une autre, il est très satisfaisant dans les deux premières saisons de l'année (Automne et hiver) et saison humide respectivement 94 %, 94% et 93 % (Tab.V.2.4) grâce à la régularité relative des apports en ces saisons. Le degré de signification baisse après (91% au printemps, 87% en été et 90% en saison sèche (Tab.V.2.4)) sans doute à cause de l'irrégularité des apports et l'intervention de certains événements rares en ces saisons [11].
- Pour l'analyse des crues (V.2.2) les degrés de signification sont assez encourageants dans l'ensemble :
 - ⇒ Pour les crues dans leurs intégralités (de V.2.2.2 à V.2.2.7) les coefficients de corrélations varie de 89% à 92% avec 91% pour l'année, et des coefficients assez élevés aux saisons (de 91 % à 92%) (Tab.V.2.8) ce qui explique l'influence des saisons sur le transport solide en suspension. Il est à signaler que le coefficient de corrélation en saison sèche est de 89% (le plus bas) car en cette saison les crues d'été sont mises en jeu, qui sont très rares et dont le comportement est assez complexe et imprévu [88].
 - ⇒ Pour l'analyse avec dissociation des crues (V.2.2.8), le degré de signification des coefficients de corrélations est plus satisfaisant, variants de 90% à 95% (Tab.V.2.11) selon le mode d'application, car le problème dans ces cas là est mieux cerné à l'échelle de l'événement. Même dans ce cas, l'influence des saisons est très apparent du fait que l'on enregistre les coefficients de corrélations les plus élevés en saisons, sauf pour la descente des crues en saison sèche qui est de 87% (Tab.V.2.11); dû comme il été signaler plus haut, à l'intervention de certains événements rares à grande influence sur l'érosion et le transport solide surtout en été [88].

Donc dans l'ensemble une auto-corrélation existe entre les variables explicatives, les parties non expliquées par les modèles peuvent être dues aux fluctuations aléatoires résultants, suite à la discontinuité spatio-temporelle du processus d'érosion.

La quantité des sédiments en suspension fournie par le bassin en question donne une explication au modèle trouvé et reflète l'importance de l'érosion en ce bassin versant. Les apports estimés varient d'une application à une autre, en analyse des débits moyens journaliers les apports trouvés à chaque échelle (Tab.V.2.2 et Tab.V.2.6) sont nettement inférieurs à ceux

trouvés en analyse des crues (Tab.V.2.9 et Tab.V.2.12) car les modèles trouvés en analyse des débits moyens journaliers tiennent compte que des moyennes sans se soucier des événements qui peuvent se produire. En analyse des crues les résultats obtenus dans les deux applications (crues entières (Tab.V.2.9) et dissociation des crues (Tab.V.2.12)) sont assez proches les uns des autres ; ils sont plus importants en quantité par rapport à ceux de la première application car contrairement à la première elles tiennent compte que des événement exceptionnels dont la majorité des apports (solides et liquides) sont enregistrés en ces occasions [11].

Enfin les résultats obtenus dans les applications paraissent énormes (entre 8,16 M.t/an (Tab.V.2.6) et 37,73 M.t /an (tab.V.2.9)), cela peut s'expliquer par le fait que le bassin de CHELLIF est d'une érodabilité importante et occupe une grande superficie (43700 Km² (figure.IV.1.1)). Vu l'importance des apports liquides de OUED CHELIFF, ainsi que son régime qui est turbulent et torrentiel, il est peut être un cas particulier de l'érosion en ALGERIE [11]. Toutefois ces résultats reste inférieurs à celui trouvé par Jacob (1974) 40Mt/an [76] pour le même bassin versant à la même station. Comparativement à d'autres bassins versants ces résultats sont nettement supérieurs aus apports solide en suspension que nous avons estimé en 1994 pour le bassin versant de la Tafna entre 1,4 M.t /an et 1,75 M.t /an [7] et le bassin versant de Oued Mouillah en 2000 dont la charge annuelle en sédiments en suspension a été estimée entre 0,39M.t /an et 0,51M.t /an [71].

La dégradation spécifique effective estimé varie d'une application à une autre (entre 445.9 t/Km²/an et 818,03 t/Km²/an pour l'application en débit moyens journaliers et entre 932,24 t/Km²/an et 2061,75 t/Km²/an pour l'application par analyse des crues), ces valeurs dépasse pratiquement toute les dégradations spécifiques retrouvées par certains auteurs ; celles des cinq bassins du bassin versant de oued mina étudiés par Achit et Meddi (2005) (212 t/Km²/an comme maximum au bassin de Oued Haddad) [68], celle retrouvé par Megnounif (2007) pour le bassin Oued Mouillah (126 t/Km²/an)[69], celles que nous avons retrouvé pour le bassin de la Tafna (entre 197,1 t/Km²/an et 254,35 t/Km²/an [7] ainsi que celles retrouvées pour le bassin versant de Oued Mouillah (entre 149,25 t/Km²/an et 194 t/Km²/an [71], le bassin versant de Sebdu avec ces 1120 t/Km²/an [69] peut rivaliser avec le Chellif. Dans la majorité des application, ces résultats dépassent les valeurs des dégradation spécifique avancées par Probst et Amiotte (1992) pour le Maghreb (420 à 504 t/Km²/an)[60] mais elles reste dans la fourchette estimée par Walling (1984) (entre 1000 et 5000 t/Km²/an) (in [60]).

V.3. Estimation des apports solides en suspension par double corrélation " MDC ":

Il nous a semblé qu'il est plus logique de faire une corrélation entre débit liquide et les concentrations, que la précédente car elle utilisera les données brutes recueillies à la station de jaugeage et d'intégrer dans l'estimation des apports solides en suspension calculé à partir de la série d'observation par une seconde corrélation entre concentration solide et débit solide. Ainsi donc dans cette approche que nous proposons, l'estimation de l'apport solide en suspension en se basant sur une double corrélation (concentration - débit liquide) et (débit solide - concentration) dont la première sera confrontée à la courbe des fréquences cumulées des débits liquides moyens journaliers afin d'évaluer la concentration moyenne inter-annuelle, car cette dernière dépend fortement de débits liquides et de leurs fréquences. La seconde nous permettra de rattraper les incertitudes probables de la première corrélation et d'estimer l'apport solide en suspension correspondant car le débit solide dépend aussi de la concentration en matière solide de l'eau du cours d'eau.

Notre étude sera menée analogiquement à la première approche par deux modes d'estimation :

- Une estimation du transport solide à partir des débits moyens journaliers.
- Une estimation du transport solide à partir des crues.

Avec des applications aux échelles, annuelle, saisonnière et semestrielle. Les applications seront menées selon les démarches citées dans le chapitre III, paragraphe III.4.1.

V.3.1.DONNEES SUR LES SEDIMENTS :

A partir du fichier de base des couples (Q, C_s) qui sont des résultats d'observations brutes recueillies à la station de jaugeage en question, (débit liquide instantané et concentration solide en suspension instantané), des fichiers de couples (Q, C_s) sont dressés pour des débits moyens journaliers aussi bien pour les débits liquides que pour les concentrations solides, selon la période de validité de l'estimation (annuelle, saisonnière ou semestrielle).

Pour les besoins de cette approche nous utilisons deux types de fichiers :

- Des fichiers de débit moyen journalier s'étalant sur une période de 24 ans complète sans lacune (1-Série annuelle complète et continue, 4- série saisonnière complète et continue, 2-série semestrielle complète et continue) à qui nous appliquons le test d'homogénéité et que nous étudierons pour la détermination des tableaux des fréquences cumulées (analyse fréquentielle de débit liquide moyen journalier)

- Des fichiers de couple de valeur (Q, Cs) dont Q sont des débits liquides et qui sont selon le mode d'estimation :
 - Q : débits moyens journaliers dans le cas d'une estimation à partir des débits moyens journaliers.
 - Q : débits instantanés enregistrés en période de crue dans le cas d'une estimation par analyse des crues.

Dans cette étude notre choix des tests utilisés s'est porté sur le test de MAN-WHITE pour l'homogénéité et le test de WALD et WILFOTVITZ pour l'indépendance.

V.3.2. EVALUATION A PARTIR DES DEBITS MOYENS JOURNALIERS

a) Corrélation concentration solide-débit liquide (première corrélation)

Pour la station de Sidi Bel Atar, après application et vérification des tests statistiques cités précédemment sur nos données, nous avons établi des relations: $C_s=f(Q)$ durant les périodes suivantes: Annuelle , Automne , Hiver , Printemps , Eté , Humide et Sèche . Plus de 6312 de données de débits liquides moyens journaliers et 1190 couples (Q,Cs) sélectionnés sur la période 1972-1996.

Le tableau (V.3.1) résume les paramètres des échantillons des couples de chaque fichier.

TABLEAU .V.3.1 : CARACTERISTIQUE DES ECHANTILLONS (Q, Cs)

	Nbre de couples	Moyenne \bar{X}	Moyenne \bar{Y}	Ecart type S_x	Ecart type S_y	Covariance S_{xy}
Annuel	1190	1,23 ± 0,03	0,87 ± 0,02	0,60 ± 0,02	0,43 ± 0,02	0,16
Automne	360	1,17 ± 0,06	1,17 ± 0,04	0,55 ± 0,04	0,44 ± 0,03	0,21
Hiver	489	1,46 ± 0,05	0,68 ± 0,03	0,52 ± 0,03	0,35 ± 0,02	0,17
Printemps	258	1,12 ± 0,06	0,86 ± 0,043	0,52 ± 0,05	0,36 ± 0,03	0,15
Eté	83	0,42 ± 0,16	1,12 ± 0,10	0,76 ± 0,12	0,48 ± 0,07	0,29
S, Humide	849	1,34 ± 0,04	0,87 ± 0,03	0,55 ± 0,03	0,45 ± 0,02	0,16
S. Sèche	341	0,94 ± 0,07	0,84 ± 0,04	0,62 ± 0,05	0,39 ± 0,03	0,15

La figure V.3.1 représente la relation annuelle de concentration solide en fonction du débit liquide. Il est intéressant de constater que le nuage de points prend la forme d'une corrélation puissance:

$$C_s = k \cdot Q^A$$

k et A: coefficients.

Les mêmes constatations peuvent être faites pour la figure.V.3.2 (a à d) représentant quelques relations saisonnières entre les débits solides et liquides. Le tableau.V.3.2 résume bien les différentes relations saisonnières et les coefficients de corrélation.

Remarque : LECCE S A (1997)[95] pour blue river en wisconsin, il trouve des courbe de même genre que celles que nous avons trouvé dans notre cas.

Tableau.V.3.2. Différentes relations et coefficients de corrélation

Période	Nombre de points	Coefficient A	Coefficient B	Coefficient k	Coefficient de corrélation	Intervalle de prédiction	Relation
Annuel	1190	0,44	0,326	2,12	61%	± 4,75	$2,12 \times Q^{0,44}$
Automne	360	0,71	0,340	2,19	89%	± 2,5	$2,19 \times Q^{0,71}$
Hiver	488	0,61	-0,214	0,61	91%	± 1,93	$0,61 \times Q^{0,61}$
Printemps	258	0,56	0,240	1,74	82%	± 2,53	$1,74 \times Q^{0,56}$
Eté	83	0,5	0,906	8,05	79,5%	± 2,82	$8,05 \times Q^{0,5}$
S. Humide	849	0,51	0,195	1,57	62%	± 4,91	$1,57 \times Q^{0,51}$
S. Sèche	341	0,41	0,454	2,84	65%	± 3,83	$2,84 \times Q^{0,41}$

Dans cette approche et dans toutes ses applications (annuelle et saisonnières) les seuils de significations des relations retrouvées par le test de Fischer Snedecor sont de l'ordre de 99% (risque $\alpha=1\%$) ce qui montre la bonne représentativité des modèles.

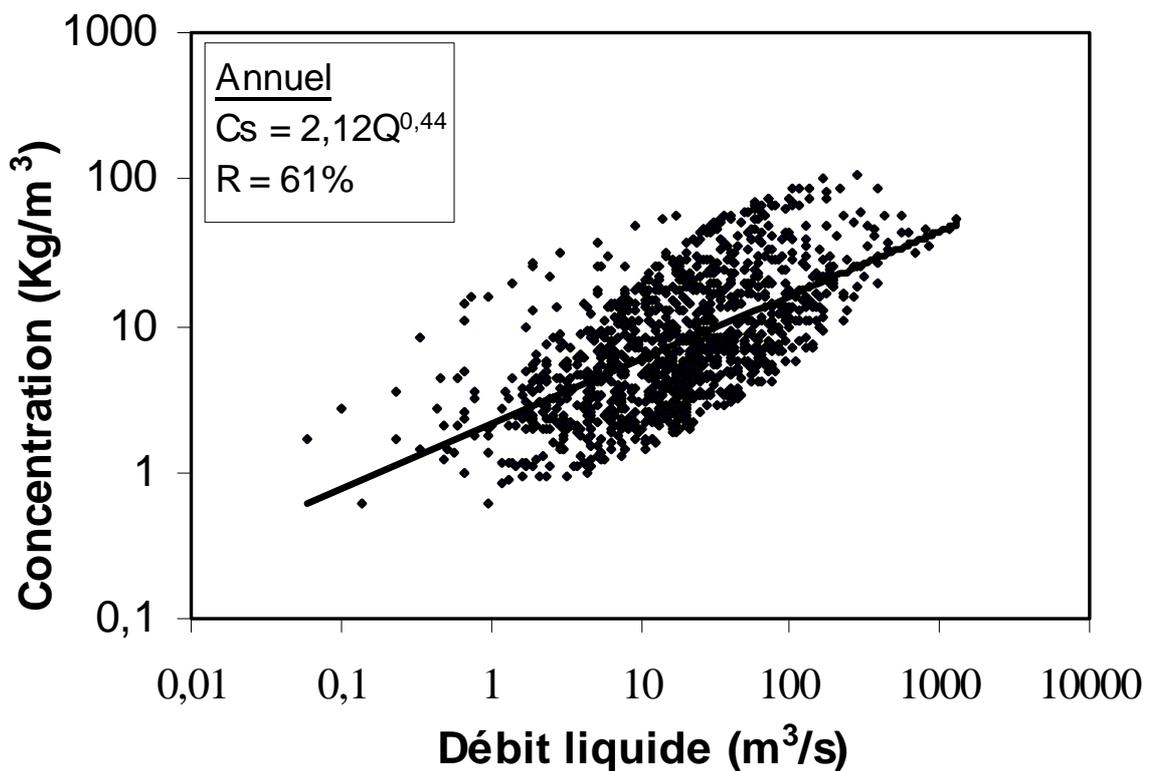


Figure.V.3.1. Corrélation annuelle entre concentration solide et débit liquide

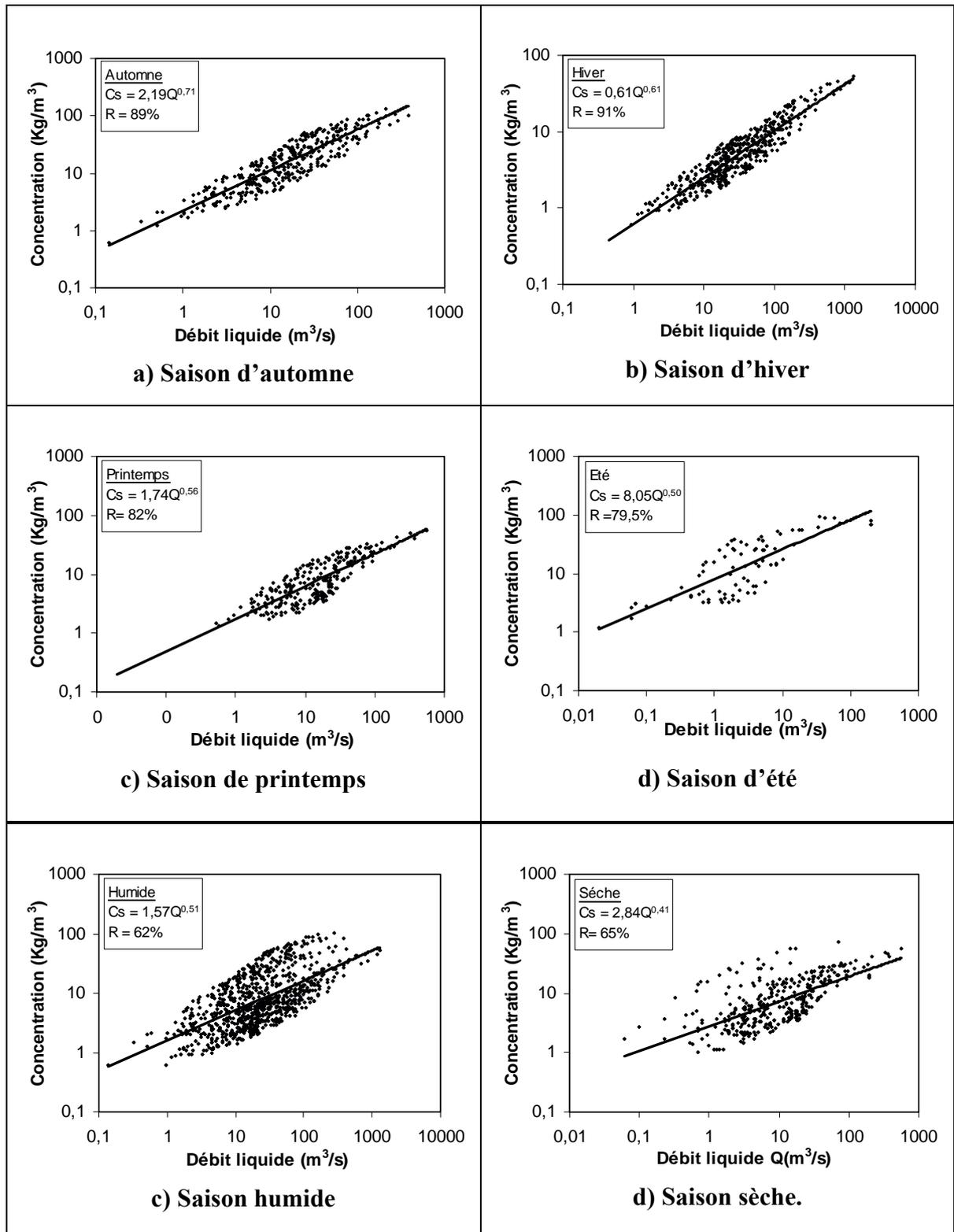


Figure.V.3.2.Corrélations saisonnières entre Concentration solide et débit liquide" MDC "

b) Etude fréquentielle des débits liquides

Comme il a été signalé précédemment l'un des avantages de l'approche est l'intégration des fréquences des débits liquides dans l'estimation ; les courbes des débits classés (fréquences cumulées des débits liquides moyens journaliers) pour la période annuelle (figure.V.2.2) et les courbes saisonnières (figure.V.2.3 (a à d)) contribueront donc dans l'estimation des concentrations moyennes interannuelles.

c) Evaluation des concentrations moyenne interannuelles

Le modèle $C_s = k Q^A$ combiné avec la courbe des débits classés (figure.V.2.2) et (figure.V.2.4 (a à d)), nous a permis d'intégrer les débits et leurs fréquences pour mieux évaluer la Concentration solide moyen interannuelle C_{sm} . Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau.V.3.3.

Tableau .V.3.3. Concentration moyenne interannuelle de l'oued Chellif

Période	Annuel	Automne	Hiver	Printemps	Eté	S. humide	S. sèche
Q_m (m ³ /s)	32,44	12,59	38,76	18,98	1,92	25,94	10,47
C_{sm} (kg/m ³)	7,54	10,61	4,54	6,62	10,01	6,09	5,27

Q_m : Débit liquide moyen interannuel

C_{sm} : Concentration solide moyen interannuelle

d) Corrélation entre débit solide-concentration (seconde corrélation)

Pour une estimation fiable des apports solides en suspension une seconde corrélation a été entreprise, cette fois, la corrélation concerne les débits solides avec les concentrations enregistrées, car l'importance du débit solide est intimement lié à la concentration solide de l'eau de l'oued.

Cette seconde corrélation peut être qualifiée de corrélation correctrice de la première.

Pour la dite station nous avons établie les relations $Q_s = F(C_s)$ pour les même périodes considérées. Les données des couples de valeurs (C_s, Q_s) , une fois rapportées à l'échelle logarithmique, le nuage de points montre une excellente corrélation de types $Q_s = \gamma C_s^\alpha$.

Les figures.V.3.3 et V.3.4 représentent différentes relations annuelle et saisonnières des débits solides en fonction des concentrations solides. Le tableau.V.3.4 résume bien les différentes relations saisonnières et les coefficients de corrélation.

Tableau .V.3.4. Différentes relations et coefficients de corrélation

Période	Nombre de points	Coeff α	Coeff β	Coeff γ	Coefficient de corrélation	Intervalle de prédiction	Relation
Annuel	1190	1,84	0,498	3,15	86%	± 28,36	$3,15 \times Cs^{1,84}$
Automne	360	2,11	-0,132	0,74	96%	± 07,32	$0,74 \times Cs^{2,11}$
Hiver	488	2,36	0,538	3,45	97%	± 04,97	$3,45 \times Cs^{2,36}$
Printemps	258	2,21	0,079	1,2	93%	± 8,98	$1,2 \times Cs^{2,21}$
Eté	83	2,26	-0,984	0,1	92%	± 26,68	$0,1 \times Cs^{2,26}$
S. humide	725	1,77	0,67	4,68	88%	± 24,68	$4,68 \times Cs^{1,77}$
S. Sèche	341	2,04	0,069	1,17	86%	± 24,02	$1,17 \times Cs^{2,04}$

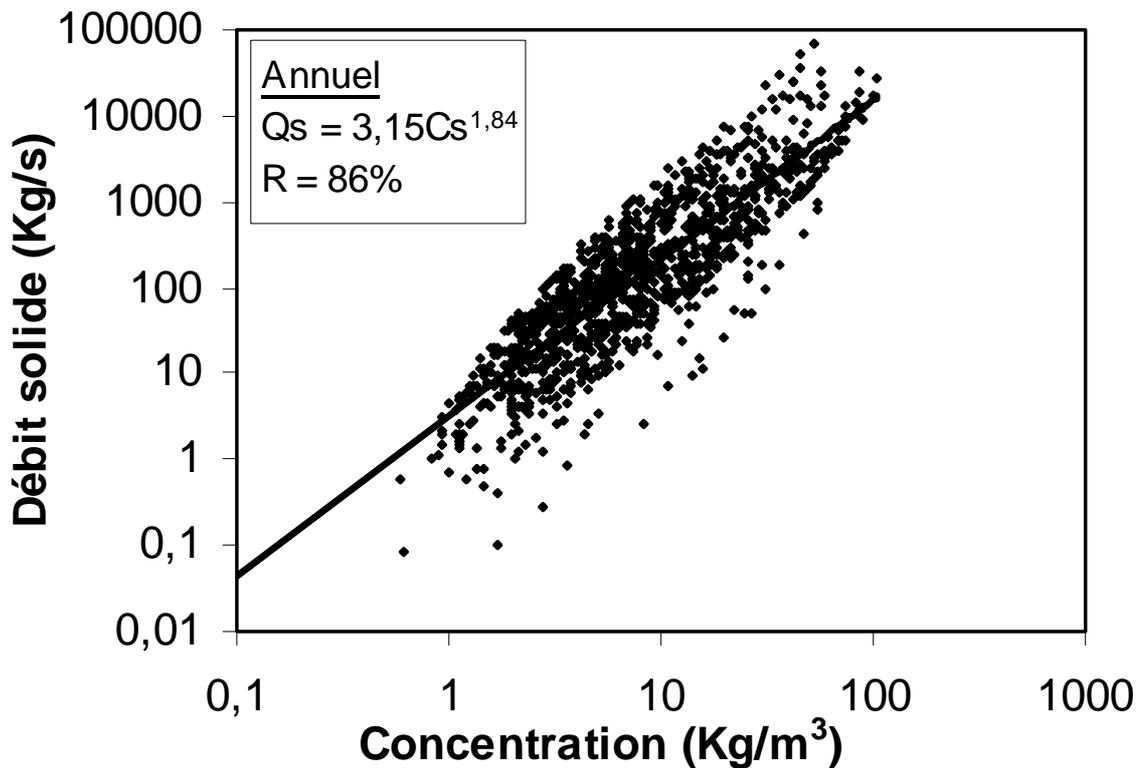


Figure.V.3.3 corrélation annuelle entre débit solide et concentration solide" MDC "

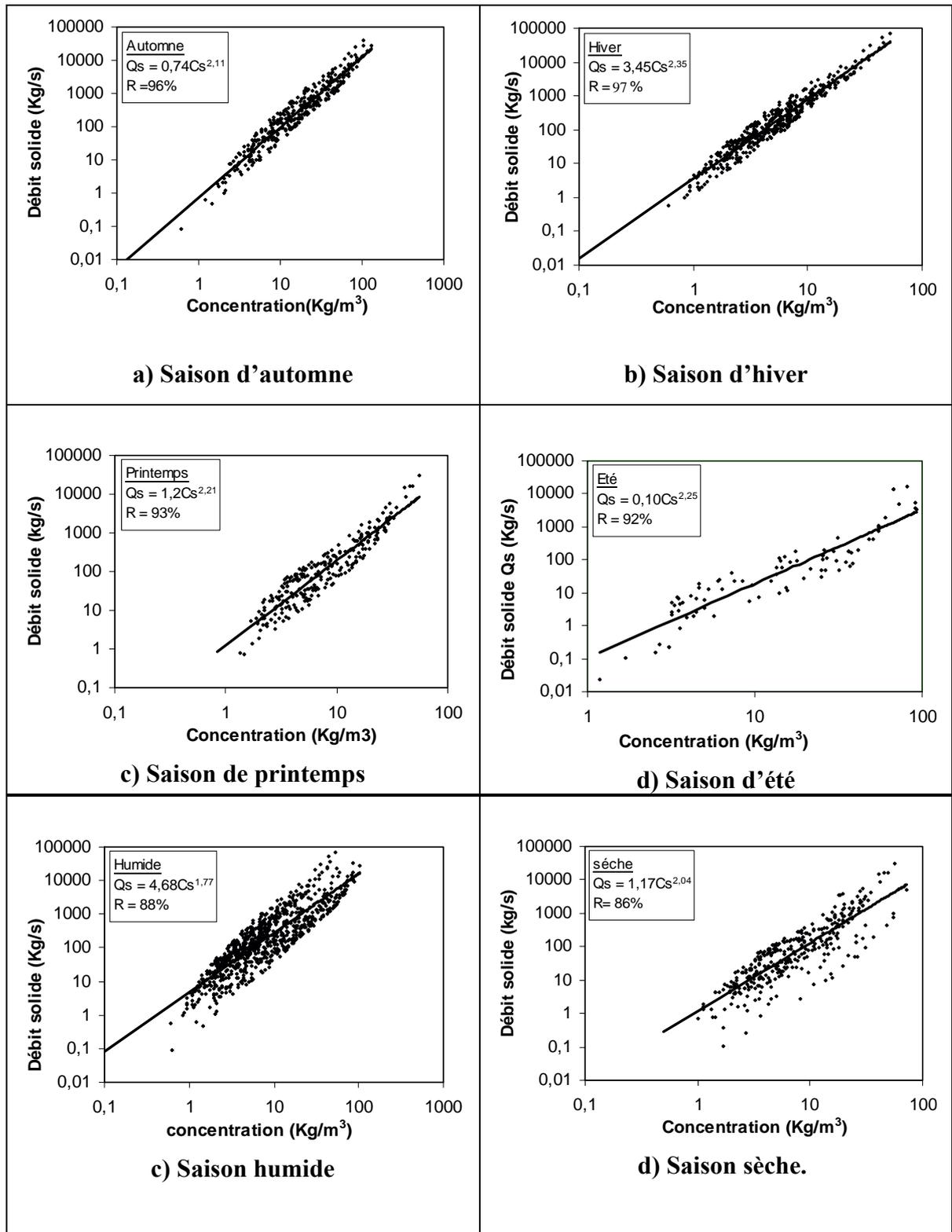


Figure. V.3.4. Corrélations saisonnières entre "Concentration solide et débit liquide" MDC ".

e) Apports solide en suspension

Le remplacement de la valeur de la concentration moyenne interannuelle dans le modèle $Q_s = \alpha \cdot C_s^\beta$ nous permettra de déterminer le débit solide moyen en suspension interannuel dans le bassin de Cheliff et d'évaluer l'apport solide transporté par oued Cheliff et la dégradation spécifique de ce bassin versant. Le tableau.V.3.5 résume les résultats obtenus

Tableau.V.3.5. Valeurs des apports solides

Période	Annuelle	Automne	Hiver	Printemps	Eté	S. humide	S. sèche
Q_{sm} (kg/s)	130,53	108,44	121,65	77,69	18,73	114,37	34,70
C_{sm} (g/l)	7,54	10,61	4,54	6,62	10,01	6,09	5,27
C_m (g/l)	4,02	8,62	3,14	4,09	9,76	4,41	3,31
Q_{ss} (10^6 Tonnes/période)	4,12	0,85	0,96	0,61	0,15	1,80	0,55
T_s (T/Km ² /période)	94,20	19,56	21,95	14,02	3,38	41,27	12,52
Q_{SS} (10^6 t/an)	4,12	2,57				2,35	
T_S (t/Km ² ,an)	94,20	58,81				53,77	
T_S (t/Km ² .an)	225,14	140,44				128,41	

Q_{sm} : Débit moyen solide en suspension.

C_{sm} : Concentration solide moyen interannuelle

C_m : Concentration moyen = (Q_{sm}/Q_m) ,

Q_{SS} : charge annuelle de sédiments en suspensions, Q_{SS} (annuel) = ΣQ_{sm} (saisonniers).

T_s : apport spécifique apparent en sédiments en suspension (dégradation spécifique).

T_{SF} : apport spécifique effectif en sédiments en suspension (dégradation spécifique).

V.3.3. EVALUATION A PARTIR DU DEBIT DE CRUES

De la même manière que la précédente nous avons procédé à l'évaluation des apports solide en suspension au niveau de la station de Sid Bel Attar à partir:

- de l'intégralité des crues;
- de la dissociation des crues;

Dans la période d'étude nous avons sélectionné plus de 100 crues les plus importantes et les plus enregistrées (nombre important de prélèvement durant l'événement) que nous avons utilisé dans l'estimation. Nous avons présenté une seule crue (figure.V.2.5 et V.2.6) pour montrer l'évolution des concentration, débit liquide et solide pendant la crue, ainsi que pour pouvoir montrer que le comportement des débits solide en fonction du débit liquide est différent en montée qu'en descente de la crue.

Les 100 crues dont nous disposons sont de durée variant de 1 à 15 jours.

V.3.3.1 Estimation à partir de l'intégralité des crues

Le tableau (V.3.6) résume les paramètres des échantillons des couples de chaque fichier.

TABLEAU .V.3.6 : CARACTERISTIQUE DES ECHANTILLONS (Q, C_S) « CRUES ENTIERES »

	Nbre de couples	Moyenne \bar{X}	Moyenne \bar{Y}	Ecart type S_x	Ecart type S_y	Covariance S_{xy}
Annuel	754	1,58 ±0,048	1,43 ±0,019	0,67 ±0,034	0,26 ±0,013	0,13
Automne	387	1,37 ±0,064	1,78 ±0,031	0,64 ±0,045	0,31 ±0,022	0,1647
Hiver	395	1,79 ±0,065	1,44 ±0,024	0,66 ±0,046	0,24 ±0,017	0,1137
Printemps	295	1,75 ±0,074	1,27 ±0,040	0,65 ±0,052	0,35 ±0,028	0,1518
S, humide	563	1,51 ±0,053	1,48 ±0,022	0,64 ±0,038	0,26 ±0,016	0,1206
S. Sèche	326	1,68 ±0,073	1,26 ±0,039	0,67 ±0,052	0,36 ±0,027	0,1590

a) Première corrélation

Les relations : concentration solide en fonction du débit liquide ($C_s=f(Q)$) ont été établies pour sept périodes: Annuelle, Automne, Hiver, Printemps, Humide et Sèche. Les données disponibles sont insuffisantes pour la saison d'été; les crues sont rares. La figure V.3.5 représente la corrélation annuelle de concentration solide en suspension en fonction du débit liquide. Nous remarquons que le nuage de points prend la forme d'une fonction puissance:

$$C_s = k Q^A$$

Les mêmes constatations peuvent être faites pour les figures V.3.6 (a à e) représentant les relations saisonnières entre les débits solides et liquides. Le tableau.V.3.7 résume les différentes relations et les coefficients de corrélations.

Tableau.V.3.7. Différentes corrélations

Période	Nombre de points	Coeff A	Coeff B	Coeff k	Intervalle de prédiction	Coefficient de corrélation	Relation
Annuel	754	0,29	0,97	9,33	±2,23	74%	$9,33 \times Q^{0,29}$
Automne	387	0,40	1,23	16,98	±2,23	82%	$16,98 \times Q^{0,4}$
Hiver	395	0,26	0,97	9,33	±2,15	71%	$9,33 \times Q^{0,26}$
Printemps	295	0,36	0,64	4,36	±3,25	67 %	$4,36 \times Q^{0,36}$
S. humide	563	0,29	1,04	10,96	±2,37	70%	$10,96 \times Q^{0,29}$
S. Sèche	326	0,35	0,67	4,68	±3,35	66%	$4,68 \times Q^{0,35}$

Les seuils de significations des relations retrouvées par le test de Fisher Snedecor sont de l'ordre de 99% (risque $\alpha=1\%$) ce qui confirme la bonne représentativité des modèles retrouvés.

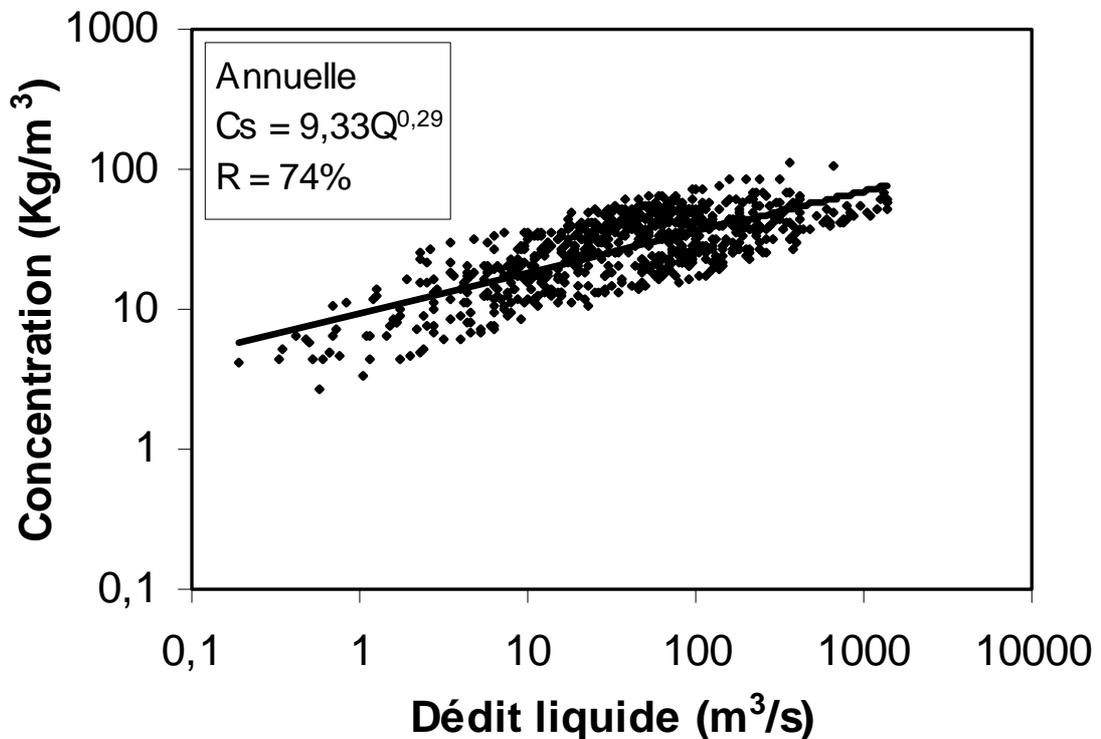


Figure. V.3.5. Corrélation annuelle entre concentration solide et débit liquide" MDC " (Crues entières)

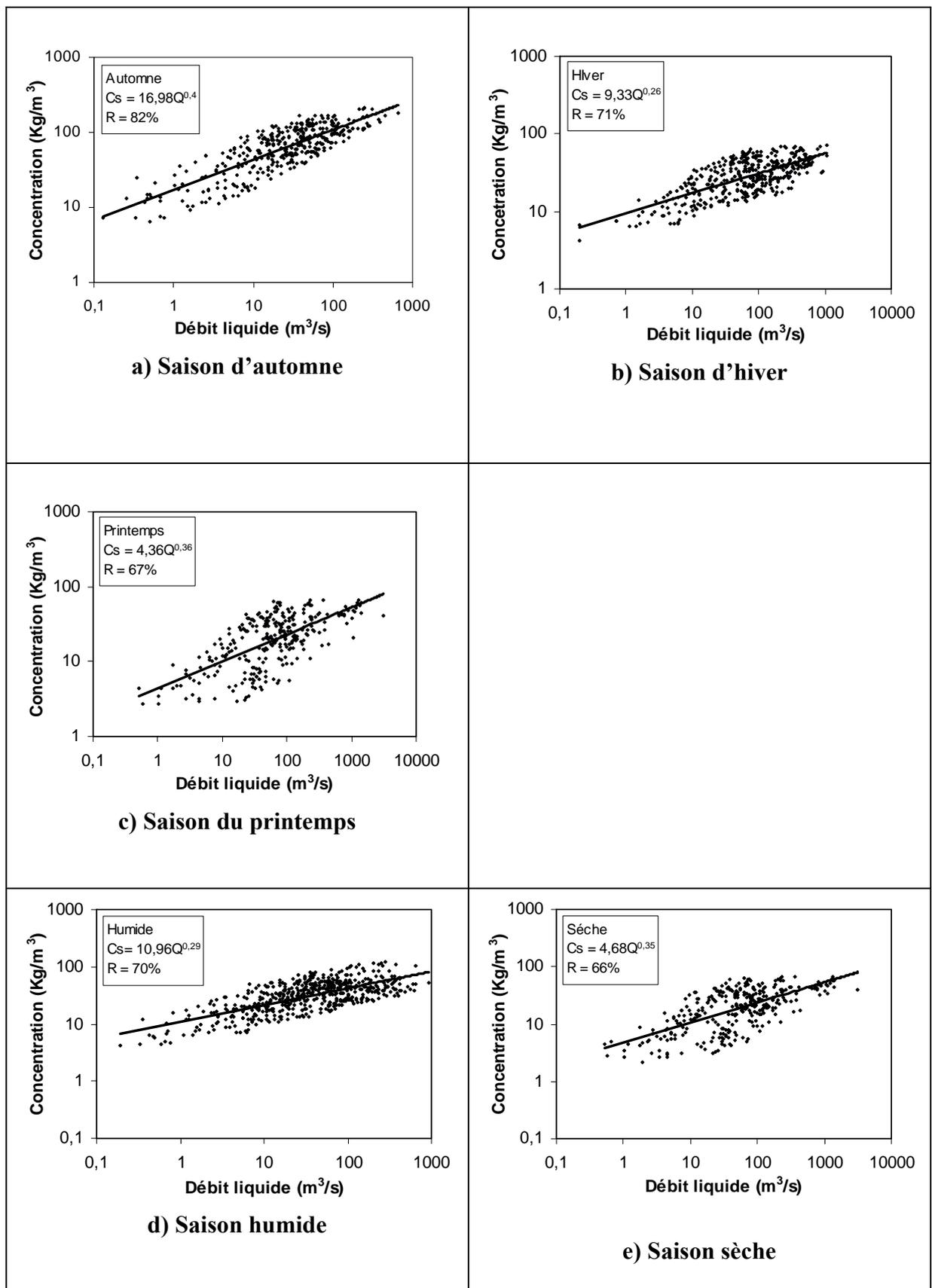


Figure V.3.6. Corrélations saisonnières entre concentration solide et débit liquide (Crues entières) " MDC "

c) Concentration moyenne interannuelle

Le modèle $C_s = k Q^A$ combiné avec la courbe des débits classés nous a permis d'estimer pour les applications à différentes échelles, les concentrations moyennes interannuelles dont les résultats sont résumés dans le tableau V.3.8.

Tableau.V.3.8. Concentration moyenne interannuelle

Période	Annuel	Automne	Hiver	Printemps	S. humide	S. sèche
Q_m (m ³ /s)	32,5	12	39	19	26	10
C_{Sm} (g/l)	20,74	36,51	19,76	9,54	22,35	7,72

d) seconde corrélation :

Comme dans le premier mode d'estimation (à partir des débits moyens journaliers) des corrélations ont été réalisées entre débits solides en suspension et concentrations. Il a été constaté que toutes les relations obtenues sur toutes les échelles sont de la forme $Q_s = \gamma C_s^\alpha$, Les résultats des différentes corrélations sont regroupés dans le tableau V.3.9, les nuages de points et les droites d'ajustement sont résumés dans la figure.V.3.7 et la figure.V.3.8.

Tableau.V.3.9. Secondes corrélations – annuelle et saisonnières (crues entières)

Période	Nombre de points	Coef α	Coef β	Coef γ	Intervalle de prédiction	Coefficient de corrélation	Relation
Annuel	754	2,88	-1,12	0,076	±14,75	86%	$0,076 \times C^{2,88}$
Automne	387	2,69	-1,64	0,023	±10,56	92%	$0,023 \times C^{2,69}$
Hiver	395	2,96	-1,02	0,095	±14,98	84%	$0,095 \times C^{2,96}$
Printemps	295	2,24	0,18	1,51	±22,12	85%	$1,51 \times C^{2,24}$
S. humide	563	2,69	-0,99	0,1	±15,71	84%	$0,1 \times C^{2,69}$
S, Sèche	326	2,25	0,10	1,26	±24,74	85%	$1,26 \times C^{2,25}$

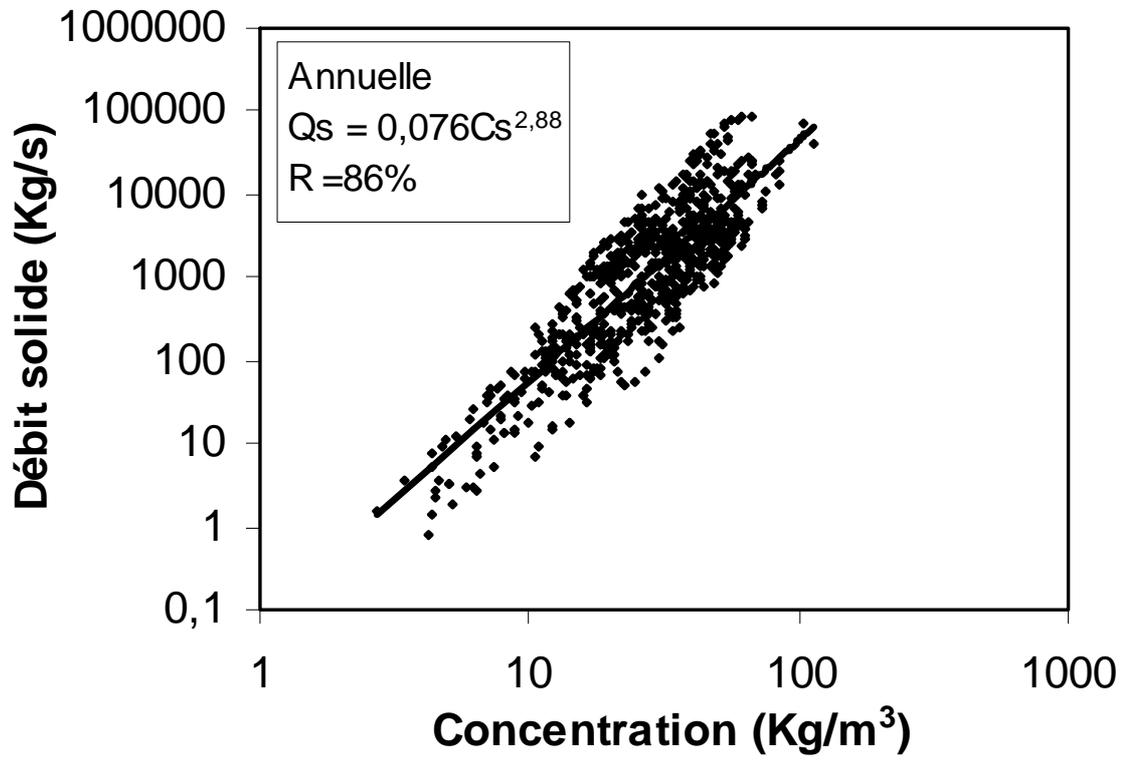


Figure. V.3.7. Corrélation annuelle entre concentration solide et débit liquide (Crues entières) " MDC "

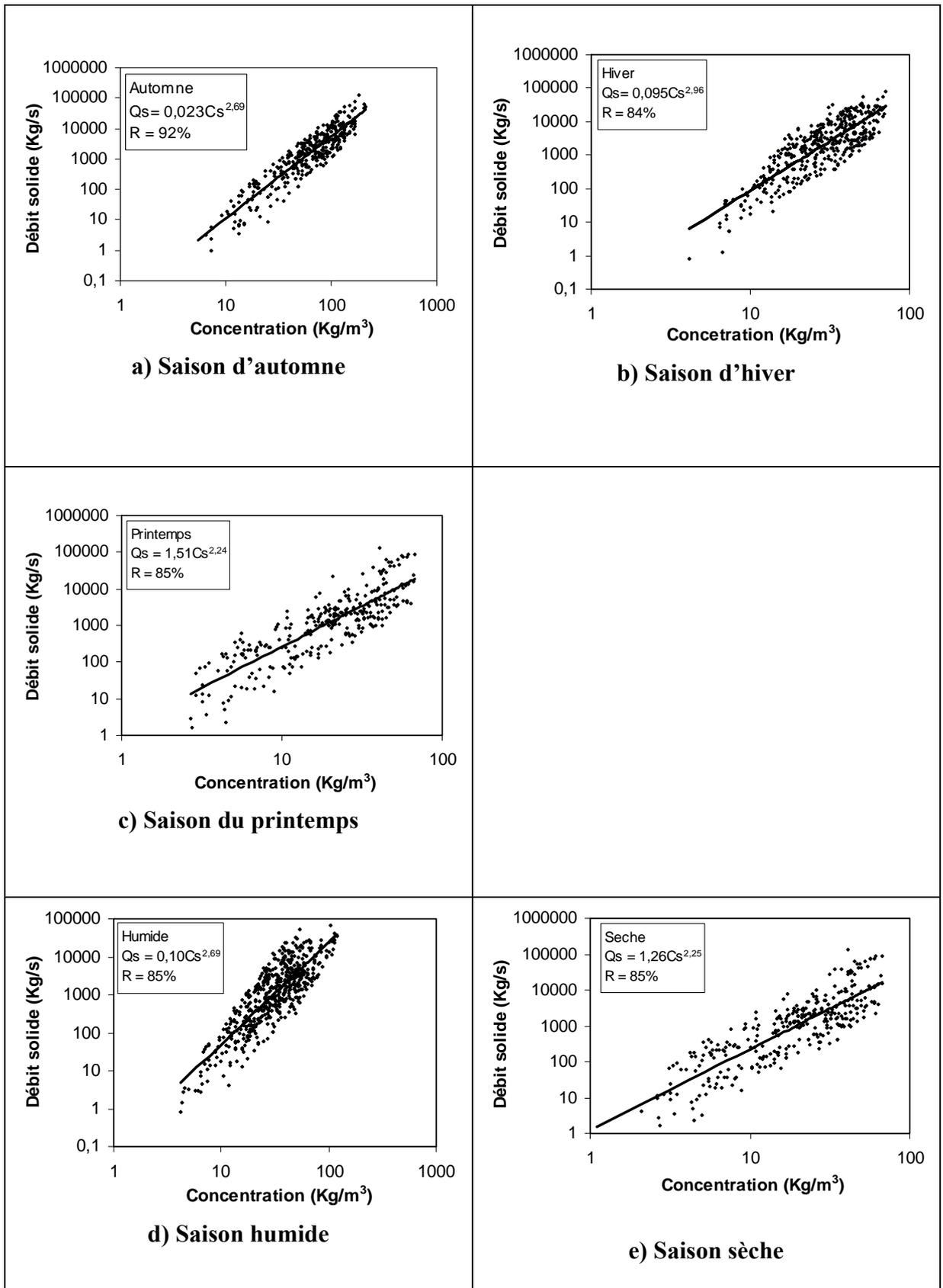


Figure. V.3.8. Corrélations saisonnières entre concentration solide et débit liquide (Crues entières) " MDC "

e) Apports solide en suspension

Pour ces concentrations obtenues au tableau.V.3.8 et à l'aide des modèles $Q_s = F(C_s)$, précédemment établis les charges annuelles et saisonnières sont estimées. Ce qui nous a permis de déterminer les résultats du tableau.V.3.10.

Tableau.V.3.10. Valeurs des apports solides

Période	Annuel	Automne	Hiver	Printemps	S. humide	S. sèche
Q_{Sm} (kg/s)	478,5	364,49	650,78	234,25	430,66	125,2
C_{Sm} (g/l)	20,74	36,51	19,76	9,54	22,35	7,72
C_m (g/l)	14,75	28,96	16,79	12,34	16,6	11,96
Q_{SS} (10^6 t/période)	15,09	2,874	5,13	1,847	6,79	1,974
T_S (t/Km ² /période)	345,31	65,76	117,41	42,26	155,39	45,18
Q_{SS} (10^6 t/an)	15,09	9,851			8,764	
T_S (t/km ² .an)	345,31	255,42			200,55	
T_{SF} (t/km ² .an)	822,95	538,31			478,91	

V.3.4. ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES PAR DISSOCIATION DE CRUES « EN MONTEE ET DESCENTE DE CRUE » :

Comme pour la première approche nous avons continué notre démarche, en espérant trouver une relation assez étroite entre les débits liquides « Q », les concentrations solide « Cs » et les débits solides « Q_S », en dissociant les crues en deux parties : montée et descente (décrue), car les concentrations solides diminues, surtout pour les crues de longue durée (plusieurs jours) qui est dû au lessivage constant du sol. Ainsi le même travail a été fait pour les deux parties des crues.

DONNEES SUR LES SEDIMENTS :

Du fichier présentant les couples (Q, C_S), relatifs aux périodes des crues, 2 types de fichiers sont érigés :

- 3) Un fichier présentant les couples (Q, C_S) relatifs aux montées de crues.
- 4) Un fichier présentant les couples (Q, C_S) relatifs aux décrues.

Selon le mode d'estimation des fichiers correspondants sont dressés.

Le tableau.V.3.11 résume les paramètres estimés des échantillons de chaque fichier.

TABLEAU .V.3.11 : CARACTERISTIQUE DES ECHANTILLONS (Q, Cs) « CRUES DISSOCIES»

	Type	Nbre de Couples	Moyenne \bar{X}	Moyenne \bar{Y}	Ecart type S_x	Ecart type S_y	Covariance S_{xy}
Annuel	M	496	1,54 ± 0,06	1,48 ± 0,03	0,65 ± 0,04	0,28 ± 0,02	0,14
	D	303	1,68 ± 0,08	1,33 ± 0,03	0,74 ± 0,06	0,25 ± 0,02	0,13
Automne	M	248	1,41 ± 0,08	1,76 ± 0,05	0,62 ± 0,06	0,33 ± 0,03	0,18
	D	139	1,29 ± 0,11	1,83 ± 0,04	0,67 ± 0,08	0,26 ± 0,03	0,14
Hiver	M	249	1,74 ± 0,08	1,47 ± 0,03	0,65 ± 0,06	0,26 ± 0,02	0,12
	D	145	1,89 ± 0,11	1,37 ± 0,03	0,67 ± 0,08	0,2 ± 0,02	0,11
Printemps	M	179	1,81 ± 0,09	1,43 ± 0,04	0,64 ± 0,07	0,26 ± 0,03	0,12
	D	116	1,65 ± 0,12	1,02 ± 0,06	0,64 ± 0,08	0,33 ± 0,04	0,16
S, humide	M	410	1,48 ± 0,06	1,56 ± 0,03	0,60 ± 0,04	0,32 ± 0,02	0,14
	D	224	1,67 ± 0,09	1,4 ± 0,03	0,73 ± 0,07	0,19 ± 0,02	0,08
S. Sèche	M	197	1,74 ± 0,09	1,42 ± 0,04	0,67 ± 0,07	0,27 ± 0,03	0,13
	D	129	1,59 ± 0,12	1,02 ± 0,06	0,67 ± 0,08	0,35 ± 0,04	0,16

Le modèle recherché est : $C_s = K \cdot Q^A$ et les figures V.3.9 et V.3.10 montrent les nuages de points et leurs droites de régressions, respectivement pour la montée et la descente de crues annuelles « modélisation annuelle ». Pour les modélisations saisonnières, les graphes les représentants sont rangés en figure.V.3.11 et en figure.V.3.12 selon leur ordre.

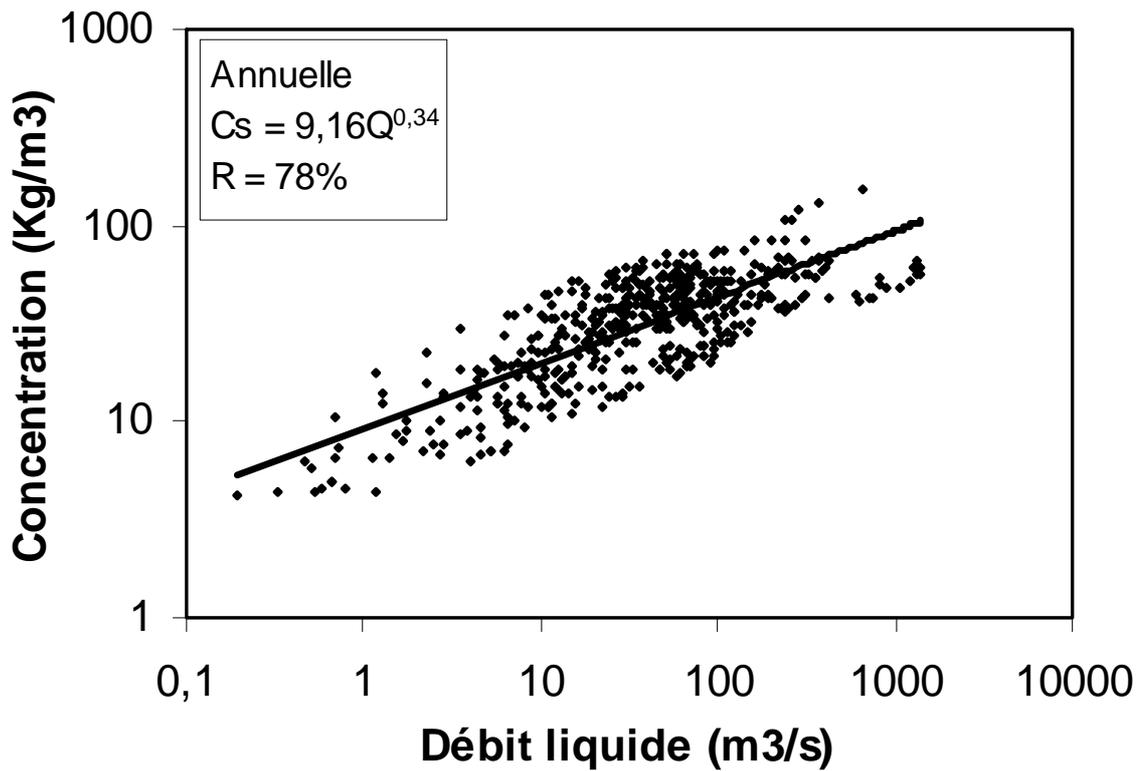


Figure. V.3.9 : Droite de régression concentration solide – débit liquide (Montée des crues, toute l'année) " MDC "

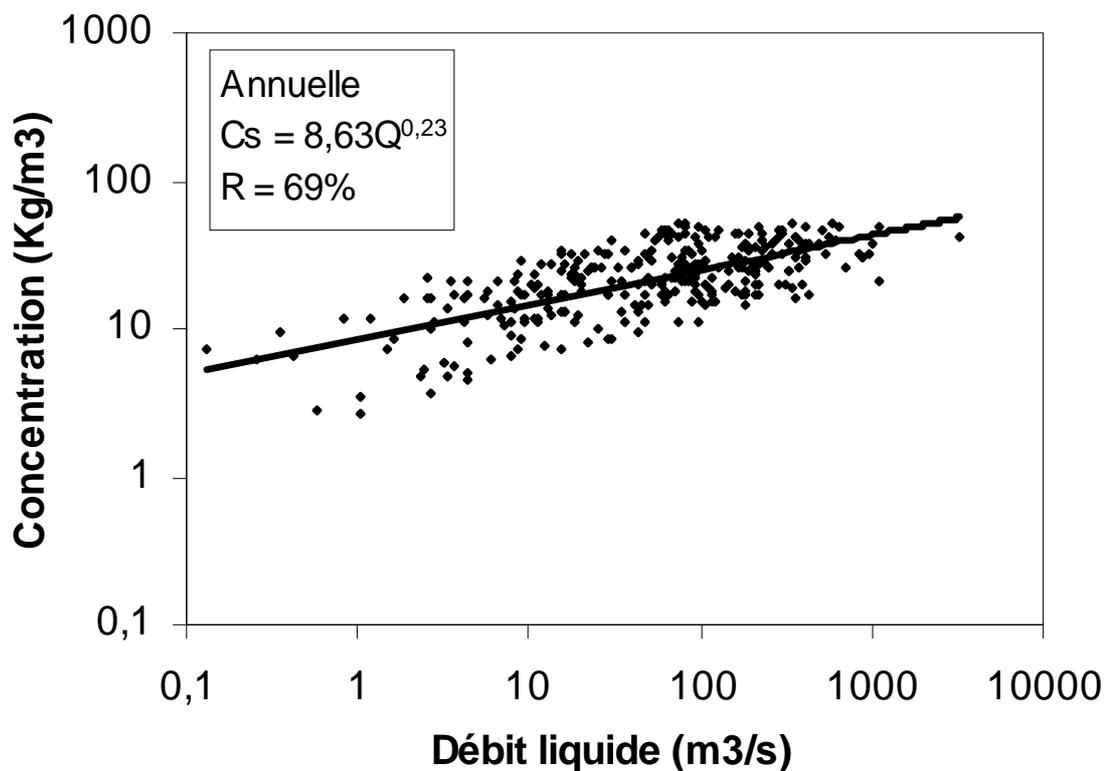


Figure. V.3.10: Droite de régression concentration solide – débit liquide (Descente des crues, toute l'année) " MDC "

Le tableau.V.3.12 résume tous les paramètres des corrélations : $C_S = f(Q)$.

TABLEAU.V.3.12 : RELATIONS (Q, C_S) ANNUELLES ET SAISONNIERES « CRUES DISSOCIEES »

	Type	Nbre de Couples	Coefficients de la régression			Coefficient Corrélation	Intervalle prédiction	Relation
			A	B	k			
Annuel	M	496	0,34	0,962	9,16	78%	± 2,21	9,16Q ^{0,34}
	D	303	0,23	0,936	8,63	69%	± 2,26	8,63Q ^{0,23}
Automne	M	248	0,46	1,105	12,73	86%	± 2,17	12,73Q ^{0,46}
	D	139	0,32	1,408	25,59	82%	± 1,99	25,59Q ^{0,32}
Hiver	M	249	0,29	0,964	9,20	74%	± 2,18	9,20Q ^{0,29}
	D	145	0,24	0,926	8,43	80%	± 1,71	8,43Q ^{0,24}
Printemps	M	179	0,29	0,898	7,9	74%	± 2,18	7,90Q ^{0,29}
	D	116	0,38	0,384	2,42	75%	± 2,70	2,42Q ^{0,38}
S. humide	M	410	0,40	0,978	9,51	74%	± 2,67	9,51Q ^{0,40}
	D	224	0,16	1,128	13,43	62%	± 1,96	13,43Q ^{0,16}
S. Sèche	M	197	0,29	0,911	8,15	71%	± 2,39	8,15Q ^{0,29}
	D	129	0,37	0,437	2,73	70%	± 3,07	2,73Q ^{0,37}
(M) : montée de crues. (D) : descente de crues.								

Les seuils de significations des relations retrouvées par le test de Fisher Snedecor sont de l'ordre de 99% (risque $\alpha=1\%$) ce qui confirme la bonne représentativité des modèles

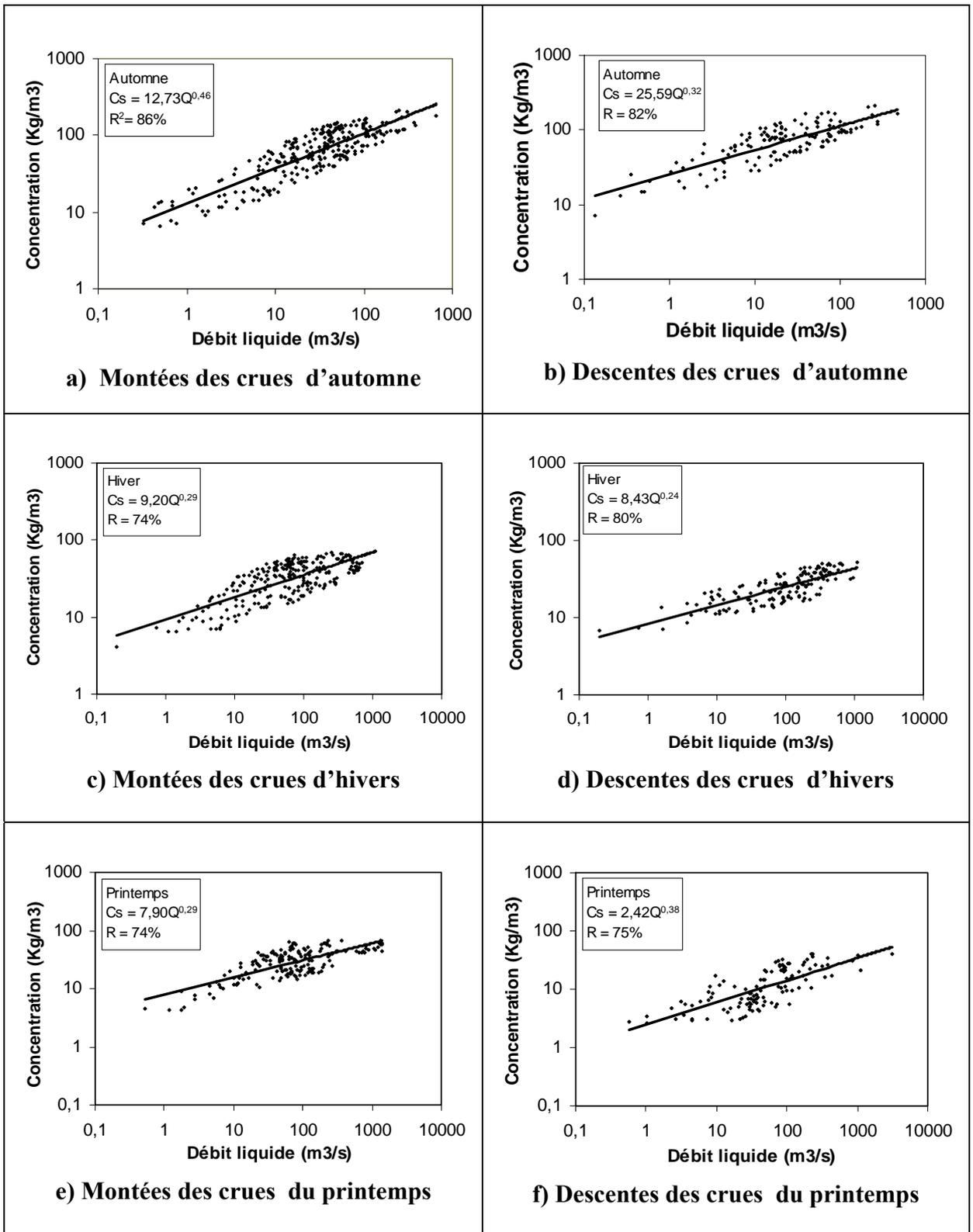


Figure. V.3.11. Corrélations saisonnières entre concentration solide et débit liquide (Dissociation des crues) " MDC "

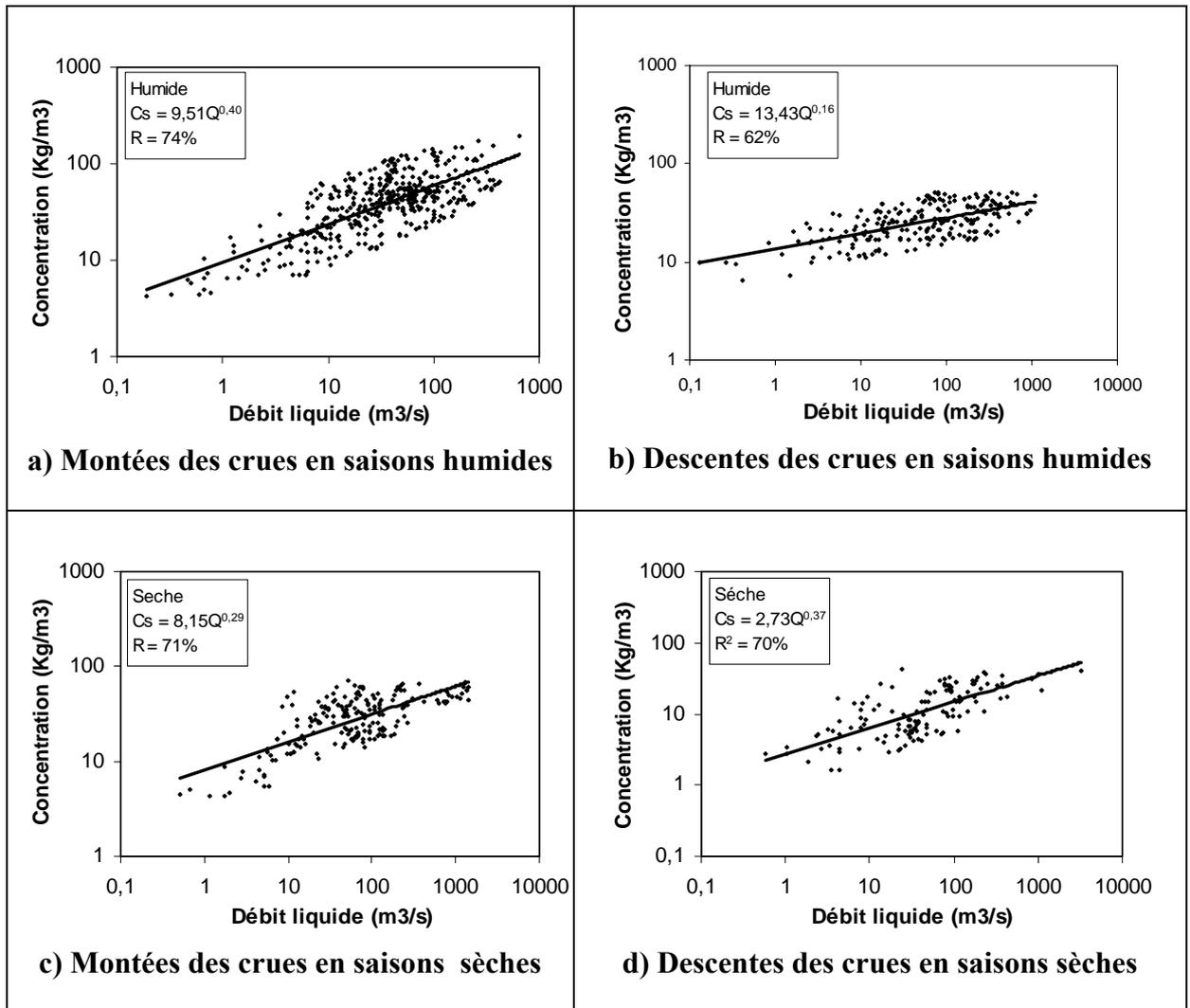


Figure. V.3.12. Corrélations semestrielles entre concentration solide et débit liquide (Dissociation des crues) " MDC "

La confrontation respectives des modèles : $C_s = f(Q)$, avec les courbes des débits classés correspondant à chaque mode d'estimation, nous a permis de trouver les résultats des concentrations moyennes interannuelles correspondantes du tableau.V.3.13

TABLEAU.V.3.13 : CONCENTRATION MOYENNE INTERANNUELLE « CRUES DISSOCIES »

	Annuel		Automne		Hiver		Printemps		S. humide		S. sèche	
	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D
C_{Sm} (g/l)	23,35	16,03	31,49	45,98	21,64	16,56	14,70	5,66	26,12	19,23	12,08	4,63

(M) : montée de crues. (D) : descente de crues.

Même en cette application, en représentant le nuage des points en échelles logarithmiques pour trouver les modèles $Q_s=F(C_s)$ pour les différents modes nous avons constaté qu'ils obéissent à des modèles de la forme $C_s=\gamma C_s^\alpha$. Les paramètres de ces modèles sont regroupés dans le tableau.V.3.14, et leurs courbes respectives sont rangées dans les figures.V.3.13, V.3.14, V.3.15 et V.3.16

TABLEAU.V.3.14 : RELATIONS (CS ,QS) ANNUELLES ET SAISONNIERES « CRUES DISSOCIEES »

	Type	Nbre de Couples	Coefficients de la régression			Coefficient Corrélation	Intervalle prédiction	Relation
			α	β	γ			
Annuel	M	496	2,81	-1,139	0,07	89%	± 12,29	$0,07C_s^{2,81}$
	D	303	3,04	-1,020	0,09	82%	± 20,96	$0,09C_s^{3,04}$
Automne	M	248	2,60	-1,404	0,04	94%	± 8,52	$0,04C_s^{2,60}$
	D	139	3,08	-2,502	0,003	90%	± 10,39	$0,003C_s^{3,08}$
Hiver	M	249	2,88	-1,036	0,09	86%	± 13,57	$0,09C_s^{2,88}$
	D	145	3,72	-1,839	0,01	88%	± 9,80	$0,01C_s^{3,72}$
Printemps	M	179	2,87	-0,861	0,14	86%	± 13,43	$0,14C_s^{2,87}$
	D	116	2,46	0,161	1,45	88%	±15,80	$1,45C_s^{2,46}$
S. humide	M	410	2,38	-0,676	0,21	88%	± 13,98	$0,21C_s^{2,38}$
	D	224	3,39	-1,659	0,02	74%	± 21,41	$0,02C_s^{3,39}$
S. Sèche	M	197	2,74	0,740	0,18	85%	± 16,62	$0,18C_s^{2,74}$
	D	129	2,36	0,205	1,60	86%	± 21,14	$1,60C_s^{2,36}$
(M) : montée de crues, (D) : descente de crues.								

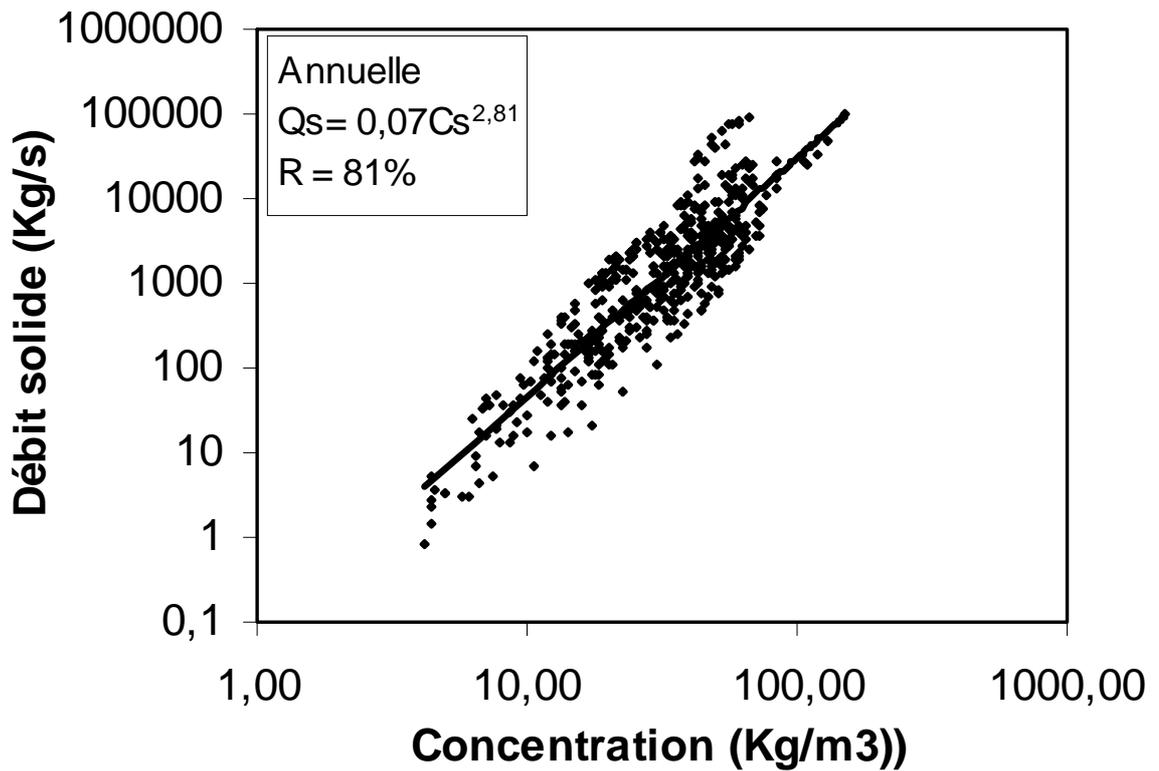


Figure. V.3.13 : Droite de régression débit solide – concentration (Montée des crues, toute l’année) " MDC "

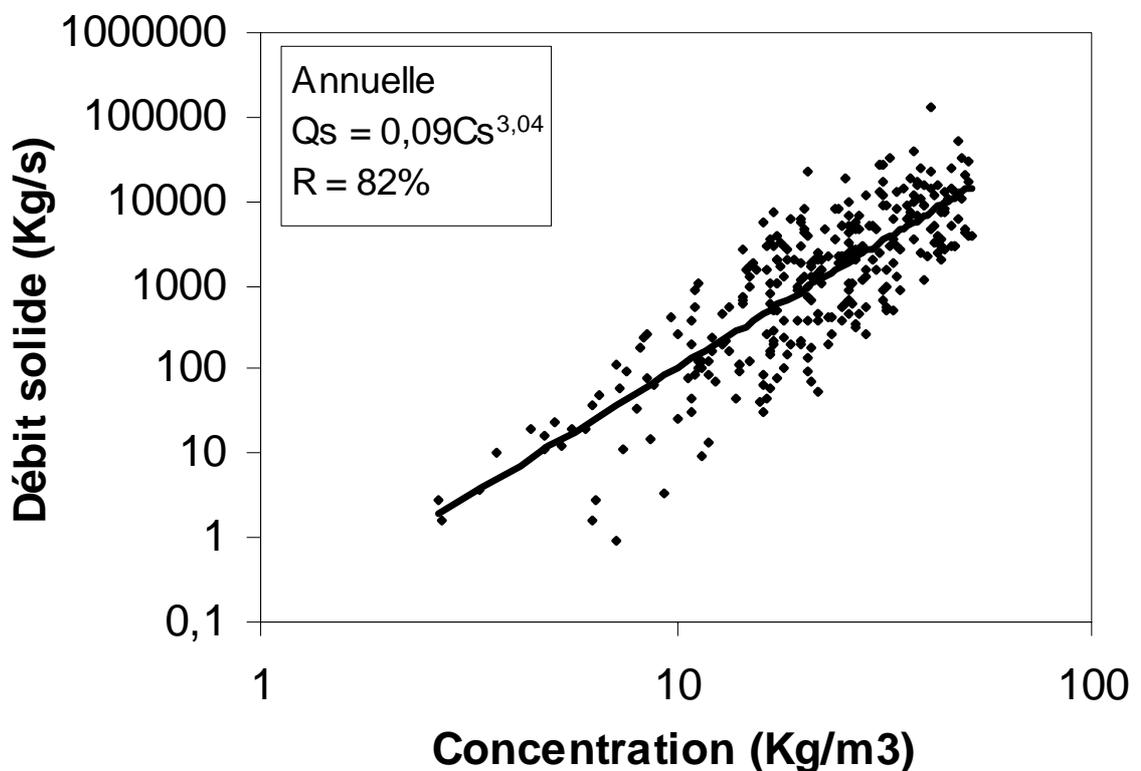


Figure. V.3.14 : Droite de régression débit solide – concentration (Descente des crues, toute l’année) " MDC "

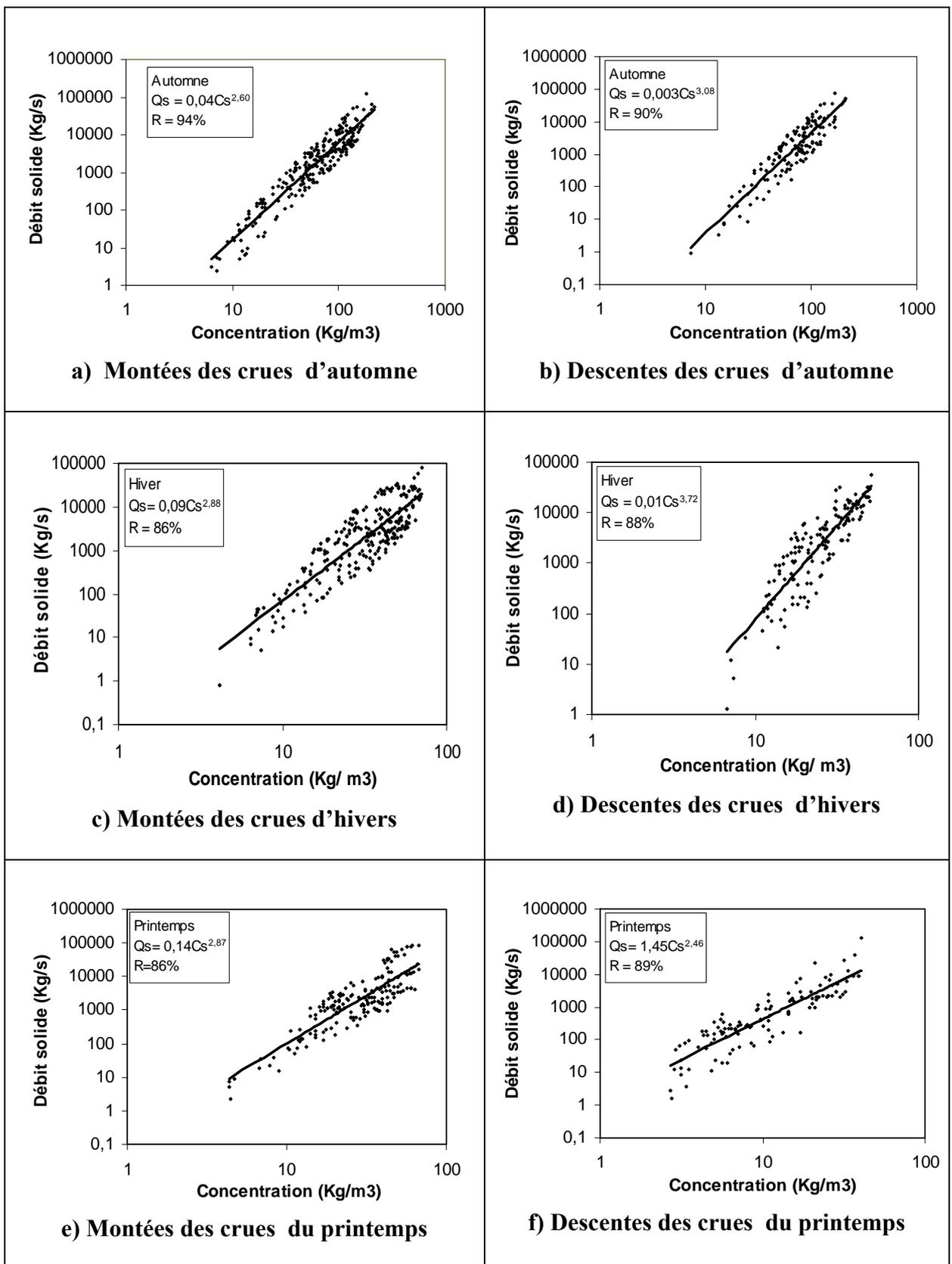


Figure. V.3.15. Corrélations saisonnières entre débit solide et concentration (Dissociation des crues) " MDC "

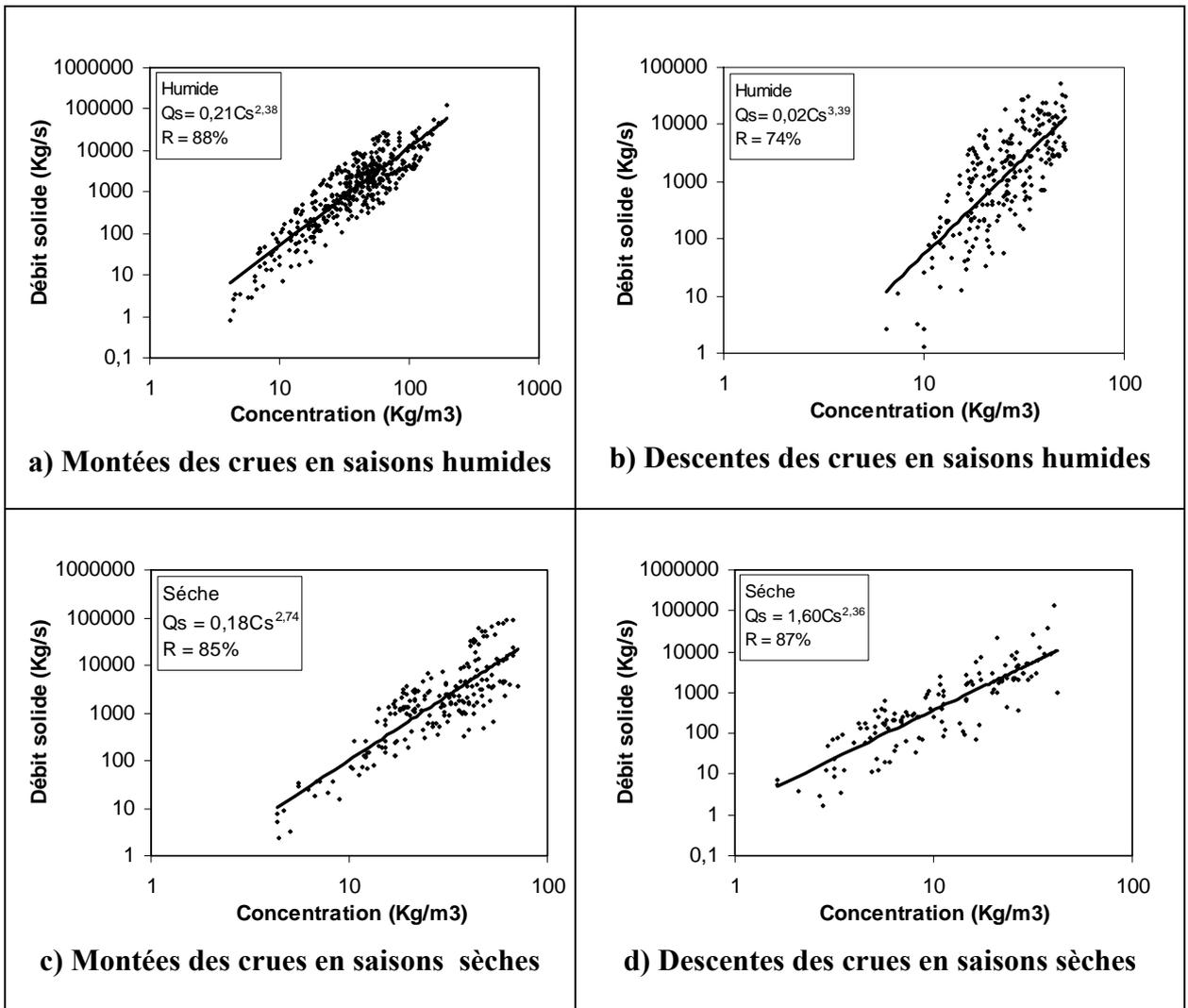


Figure. V.3.16. Corrélations semestrielles entre débit solide et concentration (Dissociation des crues) " MDC "

En fin pour ces concentrations du tableau.V.3.14 et à l'aide des modèles $Q_s = F(C_s)$, précédemment établis les charges annuelles et saisonnières sont estimées. Ce qui nous à permet de déterminer les résultats du tableau.V.3.15 qui suit.

TABLEAU.V.3.15 : CHARGES EN SEDIMENTS « CRUES DISSOCIES »

	Annuel		Automne		Hiver		Printemps		S. humide		S. sèche	
	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D
Q_{sm} (Kg/s)	506,89	434,79	312,00	414,06	651,47	490,23	306,24	103,76	491,21	489,73	169,61	59,24
Q_{ss} (10⁶ Tonnes/periode)	7,99	6,86	1,23	1,63	2,57	1,93	1,21	0,41	3,87	3,86	1,34	4,67
Q_{ss} (10⁶ Tonnes/période)	14,85		2,86		4,5		1,62		7,73		1,80	
T_s (tonne/Km²/an)	339,78		65,49		102,99		36,98		176,97		41,29	
Q_{SS} (millions tonnes/an)	14,85		8,98						9,54			
T_S (tonne/Km²/an)	339,78		205,47						218,26			
T_{SF} (tonne/Km²/an)	811,47		490,71						521,31			
(M) : montée de crues. (D) : descente de crues.												

V.3.5. Discussion des résultats " MDC " :

Dans cette deuxième approche d'estimation des apports solides en suspension (estimation par double corrélation) et dans le dit bassin versant, nous signalons que toute les corrélations obtenues sont assez satisfaisantes du moment que tous les coefficients de corrélations sont compris entre 61% et 97% toutes corrélations confondues, mais nous remarquons que les corrélations débit solide – concentration présentent des coefficients de corrélations les plus élevés 74% comme minimum, ce qui reflète la signification des modèles de corrélations.

- ✓ Lors de la première approche basée sur les débits moyenne journaliers (V.3.2), il est à constater que dans la première corrélation (concentration-débit liquide)(tableau V.3.2) les meilleurs corrélations sont obtenues en raisonnement saisonnier en particulier automne, hiver et printemps (figure V.3.2 "a, b et c") ceux qui reflète l'influence des saisons sur le phénomène étudié, exception faite pour l'été (figure V.3.2 "d") ou nous avons obtenu un coefficient de corrélation de 79.5% due sûrement à l'intervention de certains événements particuliers à cette saison (averse d'été, terres nues « récoltées »...), la plus significative est celle relative à l'hiver (91%) grâce à la régularité des apports et la stabilisation de l'érosion

des versants en cette saison. Dans les autres approches (annuelle et semestrielle) (figure V.3.2 "e et f") les coefficients de corrélation se situent entre 61% et 65% nettement inférieur aux premières confirmant la variation des apports selon les saisons, nous remarquons qu'en saison humide le coefficient de corrélation est de 61% malgré son importance dans les saisons qu'il met en jeu (89% en automne et 91% en hiver) ceci s'explique par la différence du comportement de la concentration en fonction du débit liquide en ces saisons. Par contre les secondes corrélations (débit solide - concentration) sont très satisfaisantes du fait que tous les coefficients de corrélation dépassent les 86% (tableau.V.3.4) et ici, d'excellentes corrélations ont été réalisées en applications saisonnières (>92%) (figure V.3.4 et figure.V.3.4).

Nous remarquons que les plus importantes concentrations moyennes estimées sont obtenues en été et à l'automne car en été il y a intervention des crues d'été due aux averse brusque et brutale tombant sur des terres cultivées donc nues, l'automne ces premières pluies qui tombent sur un sol sec et dénudé de couvert végétal, la plus faible concentration est obtenue en hiver (tableau.V.3.3) du fait d'un lessivage permanent de l'oued en cette saison, dans les autres applications elles sont proches les unes des autres car ce sont en quelque sorte des valeurs moyennes des saisonnières.

En terme d'apport solide les valeurs en raisonnement saisonnier et semestriel sont assez proches ($2.56 \cdot 10^6$ Tonnes/an en raisonnement saisonnier et 2.410^6 Tonnes/an en raisonnement semestrielles (tableau.V.3.5)) ce qui montre la précision des approches saisonnières.

✓ Pour l'approche par analyse des débits des crues (V.3.3) les degrés de signification sont assez encourageants dans l'ensemble :

⇒ Pour les crues dans leurs intégralités (V.3.3.1) les coefficients de corrélations dans la première corrélation (Q-Cs) varient de 66% à 82% avec 74% pour l'année, et des coefficients relativement élevés aux saisons (82 % en automne, 71% en hiver, 67% en printemps relativement inférieur aux autres saisons, 70% en saison humide et 66% en saison sèche ; c'est le plus bas) (Tableau.V.3.7, figure.V.3.5 et figure.V.3.6) ce qui explique l'influence des saisons sur le transport solide en suspension, il est à signaler que les coefficients de corrélation en printemps et en saison sèche sont les plus bas, respectivement 67% et 66% (V.3.5 "c et e") car en cette dernière les crues d'été sont mises en jeu, qui sont très rares et dont le comportement est assez complexe et imprévu. Dans les secondes corrélations (Cs-Qs) pratiquement tous les modèles de corrélation sont

très représentatifs du fait que tous les coefficients de corrélations enregistrés dépassent les 84% (tableau.V.3.9, figure.V.3.7 et figure.V.3.8) reflétant l'intime relation entre les débits solides et les concentrations.

En ce qui concerne les concentrations moyenne estimées (tableau.V.3.8), nous remarquons que la plus importante est obtenue en automne 36,5g/l pour les mêmes raisons citées plus haut et la plus faible concentration en raisonnement saisonnier est obtenue au printemps (9,54g/l), vu que les crues en cette saison ne sont pas aussi violentes que celles d'automne ou d'hiver. Notons que la concentration baisse graduellement d'une saison à une autre dans l'ordre suite au lessivage progressive du cours d'eau. Dans l'application annuelle sa valeurs n'est qu'une moyenne des valeurs saisonnières et en fin en application semestrielle elle est plus importante en saison humide (22,35g/l) du faite de l'importance du phénomène en cette saison mais proche de la valeur annuelle estimée car les crues sont plus importantes et plus nombreuses en saison humide mettant en jeu principalement les crues d'automne et d'hiver, la plus faible valeur étant enregistrée en saison sèche (7,72g /l) ceci étant normale du faite du lessivage répété du lit du cours d'eau.

En terme d'apport solide les valeurs en raisonnement saisonnier et semestriel sont relativement proches ($9,85 \cdot 10^6$ Tonnes/an en raisonnement saisonnier et $8,76 \cdot 10^6$ Tonnes/an en raisonnement semestriel) ce qui montre même dans ce cas la précision des approches saisonnières par contre en raisonnement annuel il est de 15,1 millions de tonnes par an (tableau.V.3.10).

⇒ Pour l'analyse avec dissociation des crues (V.3.3.2) le degré de signification des coefficients de corrélations aux premières corrélations est plus satisfaisant dépassant très souvent les 70% (Tableau.V.3.12, figure V.3.9, figure V.3.10, figure.V.3.11 et figure.V.3.12) selon le mode d'application, exception faite en saison humide en descente des crues (figure V.3.4.12 "b"); le problème dans ces cas là est mieux cerné à l'échelle de l'événement, même dans ce cas, l'influence des saisons est très apparent du fait que l'on enregistre les coefficients de corrélations les plus élevés en saisons (figure.V.3.12, figure V.3.11), sauf pour la descente des crues en saison humide qui est de 62% (figure V.3.11 "d"); dû sûrement au faite que les crues d'automne et celles d'hiver ne se comportent pas de la même manière du moins dans ce phénomène (transport solide). Ici malgré ce qui a été signalé en ce qui concerne l'intervention de certains événements rares à grande influence sur l'érosion et le transport solide surtout en été, les models sont assez satisfaisants en saison sèche (71% en montées des crues et 70% en descente des crues)

(figure V.3.12 "c et d"). En seconde corrélation (tableau.V.3.14, figure.V.3.13, figure.V.3.14, figure V.3.15 et figure.V.3.16), la même chose est signalé ; tout les coefficients de corrélation sont assez élevés dépassants dans la plus part des cas les 82%, reflétant ainsi la bonne corrélation entre les concentrations et les débits solides.

En ce qui concerne les concentrations moyennes estimées (tableau.V.3.13), nous remarquons que les plus importantes sont enregistrées en montée des crues car en cette tranche (montée) que la crue transporte le plus de sédiments, exception faite en automne ou la concentration en monté est plus faible que celle en descente; cela est sans doute dû aux erreurs commises lors des prélèvements d'échantillons ou à la non prise d'échantillon lors des crues importante lié au risque important sur l'opérateur de la station.

En terme d'apport solide les valeurs en raisonnement saisonnier et semestriel sont relativement proches ($8,98 \cdot 10^6$ Tonnes/an et $9,54 \cdot 10^6$ Tonnes/an (Tableau.V.3.15)) ce qui montre même dans ce cas la précision des approches saisonnières par contre en raisonnement annuel il est de 14,85 millions de tonnes par an (Tableau.V.3.15).

Dans l'ensemble une auto-corrélation existe entre les différentes variables explicatives, prise en compte pour l'étude du phénomène du transport solide en suspension lors de cette modeste étude. Les parties non expliquées par les modèles peuvent être dues au fluctuations aléatoires résultants de la discontinuité spatio-temporelle du processus d'érosion et la négligence d'autre facteurs influençant ce phénomène aussi complexe.

Les apports solides en suspension produits par le bassin versant en question et transportés par Oued Chellif donnent une signification aux modèles d'ajustement des deux corrélations effectuées et reflète l'importance de l'érosion et du transport solide dans ce bassin versant.

Les concentrations retrouvées par analyse des débits moyens journaliers sont nettement inférieures à celles retrouvées par analyse des débits de crues

Les apports estimés varient d'une application à une autre, en analyse des débits moyens journaliers les apports trouvés à chaque échelle (Tableau.V.3.5) sont nettement inférieurs à ceux trouvés en analyse des crues (Tableau.V.3.10 et Tableau.V.3.15) car les modèle trouvés en analyse des débits moyens journaliers ne tiennent compte que des moyennes sans se soucier des événements qui peuvent se produire. En analyse des crues les résultats obtenus dans les deux applications (crues entières (Tab.V.3.10) et dissociation des crues (Tab.V.3.15)) sont assez proches les uns des autres ; ils sont plus importants en quantité par rapport à ceux de la première

application, car contrairement à la première elles ne tiennent compte que des événements exceptionnels dont la majorité des apports (solides et liquides) sont enregistrés en ces occasions.

Enfin dans cette approche les résultats obtenus dans les applications paraissent importants (entre 2,35 M.t/an (Tableau.V.3.5) et 15,09 M.t /an (tableau.V.3.10)), cela confirme que le bassin de CHELLIF est d'une érodabilité accentuée par sa grande superficie (43700 Km² (figure.IV.1.1)) et l'importance des apports liquides de Oued Cheliff. Il est peut être un cas particulier de l'érosion en Algérie. Toutefois ces résultats reste inférieurs à celui trouvé par Jacob (1974) 40Mt/an [76] pour le même bassin versant à la même station. Comparativement à d'autres bassins versants même dans cette approche les résultats sont nettement supérieurs aux apports solide en suspension que nous avons estimé en 1994 pour le bassin versant de la Tafna entre 1,4 M.t /an et 1,75 M.t /an [7] et le bassin versant de Oued Mouillah en 2000 dont la charge annuelle en sédiments en suspension a été estimée entre 0.39M.t /an et 0.51M.t /an [71].

La dégradation spécifique effective estimé varie d'une application à une autre (entre 128,41 t/Km²/an et 225,14 t/Km²/an pour l'application en débit moyens journaliers et entre 478,91 t/Km²/an et 822,95 t/Km²/an pour l'application par analyse de crues) ces valeurs dépasse pratiquement toutes les dégradations spécifiques retrouvées par certains auteurs : celles des cinq bassin de bassin versant de oued mina étudiés par Achit et Meddi (2005) (sauf les 212 t/Km²/an comme maximum du bassin de Oued Haddad) [68], celle retrouvé par Megnounif (2007) pour le bassin Oued Mouillah (126 t/Km²/an)[69], par contre le bassin versant de Sebdou avec ces 1120 t/Km²/an [69] les dépasse. Dans les application en débits moyens journaliers les résultats sont en dessous des valeurs des dégradation spécifique avancées par Probst et Amiotte (1992) pour le Maghreb (420 à 504 t/Km²/an)[60] et elles sont totalement dépassées en approche par analyse de crues, mais elles reste dans la fourchette proposée par Walling (1984)(in [60]).

En comparant les deux approches (MUC et MDC), on constate que la première approche donne des charges sédimentaires plus importantes que la seconde (entre 8,16 M,t/an (Tab.V.2.6) et 37,73 M.t /an (tab.V.2.9)) et des coefficients de corrélations plus élevés (entre 87% et 95%) que la première corrélation de la seconde approche, dans cette dernière les charges sédimentaires estimé sont comprise entre 2,35 M t/an (tableau.V.3.5) et 15,09 Mt/an (tableau.V.3.10), des coefficients de corrélations entre 61% et 91% en première corrélation et entre 74% (tableau.V.3.14) et 97% (tableau.V.3.4) en seconde corrélation. Malgré tout, nous ne pouvons qualifier la première comme approche de surestimation ni la seconde de sous estimative de charge sédimentaire, bien que l'approche basée sur corrélation entre débit liquide et

concentration (deuxième approche) nous semble plus logique car elle utilise directement les données recueillies à la station de jaugeage.

En fin, il est à signaler que les résultats trouvés précédemment par Meddi M. en 1992 dans le bassin de la Mina (qui fait partie du Chéllif) [96], dont les relations incluant les pluies journalières et l'humidité du sol ont amélioré considérablement les coefficients de corrélation, confirme ceux développés dans cette thèse

CONCLUSION

CONCLUSION

L'importance de la prise en compte du phénomène du transport solide dans les perspectives des aménagements hydrauliques et la gestion quotidienne des infrastructures hydrauliques, notamment en périodes de crues, lesquelles sont les sources essentielles des apports solides. En absence des précautions élémentaires, les matériaux déposés peuvent se consolider lentement; perturber par conséquent le bon fonctionnement des ouvrages et rendre irréversible l'évolution défavorable de la capacité des retenues.

C'est dans ce cadre que s'inscrit cette présente étude, qui n'est qu'un ajout aux travaux théoriques, expérimentaux et numériques effectués dans le domaine de la quantification du transport solide. Malgré toutes ces études, il n'existe aucun modèle ou procédure de calcul, qui puisse être qualifié de parfait, à cause de la complexité du phénomène et l'intervention de certains paramètres qui sont complexes et parfois même mal connus.

Nous sommes arrivés dans ce présent travail à présenter deux approches d'estimation des apports solides en suspension dans les bassins versants basées sur des données hydrométriques recueillies aux stations de jaugeage contrôlant les oueds drainant ces bassins. Une première basée sur les débits moyens journaliers que nous avons appelé " Estimation des apports solides en suspensions par modélisation statistique à une corrélation (**MUC**)" et une seconde approche que nous avons baptisé " Estimation des apports solides en suspension à double corrélation (**MDC**)".

Dans chaque approche nous sommes arrivés à mettre au point un programme qui permet d'analyser statistiquement les échantillons recueillis, par l'application des tests d'homogénéité et d'indépendance, l'estimation de leurs caractéristiques, l'analyse fréquentielle des débits liquides, et selon l'approche : en première approche; la détermination des relations $Q_s = f(Q)$ et enfin la confrontation du modèle avec l'analyse fréquentielle des débits liquides pour l'estimation de l'apport solide en suspension et en seconde, la détermination des relations $C = F(Q)$, l'estimation des concentrations moyennes par confrontation du modèle avec l'analyse fréquentielle des débits liquides, estimation de la relation $Q_s = F(C)$ et en fin l'estimation des apports solides en suspension à partir de la concentration obtenue et de cette seconde corrélation.

Ces approches et leurs programmes permettront au projeteur et au gestionnaire d'ouvrages de gagner un temps précieux dans l'estimation du transport solide en suspension qui constitue la majeure partie du transport, pour une meilleure gestion et bonne prédiction des pertes en capacité. La quantification du transport solide en suspension par modélisation statistique, nous la qualifierons de plus fiables que l'utilisation de modèles empiriques, qui sont obtenus grâce aux données des autres bassins qui n'ont pas forcément les mêmes caractéristiques que le bassin à étudier.

Dans la présente thèse nous avons essayé de quantifier le transport solide en suspension par modélisation statistique en utilisant deux approche avec différentes applications (annuelle, saisonnière et semestrielle), en se basant sur les données observées durant la période 1972 à 1996 à la station de SIDI BEL-ATAR à l'exutoire du bassin versant de CHELLIF.

Dans les deux approches citées :

- Une première tentative d'estimation a été basée sur l'analyse des débits moyens journaliers.
- Une seconde est basée sur l'analyse des crues enregistrées en cette période; car la majeure partie des apports est effectuée en ces occasions, et vu que les apports solides sont plus importants en montée de crue qu'en décrue (descente des crues) à l'échelle de l'événement (visualisation des solidogrammes des crues) ainsi une troisième tentative d'estimation par dissociation des crues a été entreprise.

Des applications aux échelles saisonnières et semestrielle ont été menées dans les deux approche d'estimation des apports solides en suspensions à fin de mieux cerner le problème, vu l'influence des saisons sur le phénomène.

Les résultats obtenus dans les deux applications et dans les divers modes d'estimation (avec analyse des débits moyens journaliers, avec analyse des débits de crues dans leurs intégralités et avec analyse des débits de crues dissociées) montrent que les concentrations moyennes saisonnières sont plus élevées en automne, mais les apports solides en hiver sont les plus importants, du fait que les apports liquides sont plus abondants, plus réguliers et plus importants en cette dernière.

Oued CHELIFF a des apports considérables en sédiments ($8.16 \cdot 10^6$ t /an le minimum trouvé en première approche "MUC" et $2.35 \cdot 10^6$ t/an le minimum en seconde application "MDC") cela est dû à la vulnérabilité du bassin versant qu'il draine face à l'érosion et sa superficie importante, malgré l'existence de barrages dans ce bassin versant.

Les résultats obtenus par les deux approches sont loin les uns des autres dans toutes les applications; l'approche à une corrélation à conduit à des valeurs plus importantes que ceux de la seconde, mais nous ne pouvons qualifier la première de surestimation ni la seconde de sous estimative sans confrontation de leurs résultats avec données obtenus sur terrain (mesures du transport solide en suspension ou relevées bathymétriques d'une retenue de barrage). Ni au moins à ce stade l'importance du projet ou de l'ouvrage sera déterminante dans le choix de l'approche et du mode d'estimation des apports solides en suspension.

Cette étude a mis en évidence des corrélations très encourageantes, mais des études plus poussées sont à envisagées:

- Approche qui fait appel au modèle d'ajustement qui consiste à réaliser des échantillons multidimensionnels intégrant les précipitations (hauteur de pluie et intensité) car elles contribuent activement à accroître l'agressivité du processus d'érosion et le transport solide.
- L'intégration des coefficients exprimants la superficie du bassin et sa géologie.
- L'amélioration des modèles afin de couvrir le transport par charriage.
- Proposition d'autres modèles de corrélation entre paramètres intervenants.

Nous espérons que ce modeste travail sera un pas pour une généralisation sur tous les bassins du pays, pour une modélisation typique propre à l'ALGERIE, afin de sortir un modèle fiable, convenable applicable à tous les bassins du Nord, pour une meilleure quantification du transport solide.

Enfin ce travail ne prétend pas couvrir les problèmes présents dans le domaine de l'hydraulique de sédimentation. La quantification du transport solide par modélisation statistique a beaucoup, l'ambition de fournir un outil simple de prévision des apports solides et nous espérons que ces méthodes et les résultats obtenus seront l'objet de critiques de la part des ingénieurs de terrain.

C'est grâce à ces critiques que nous parviendrons à définir l'approche la plus fiable des deux proposées et de choisir le mode d'estimation le plus appropriés et le calage des modèles pour une meilleure estimation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] **KETTAB A, 2001**, Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision, Desalination 136, p25–33
- [02] **PANAPRSSE**, Vers la réalisation en Algérie de 43 barrages d'ici à 2012, <http://www.panapress.com/newslatf.asp?code=fre040037&dte=29/03/2004>
(Consulté le 29/03/2006)
- [03] **DAMMAK A, 1982**, Etude sur l'érosion et le transport solide. Thèse de Docteur – ingénieur, Université de PARIS, France, 323p.
- [04] **REMINI B**, Envasement des retenues de barrage en Algérie et moyen par la technique de soutirage, Thèse de doctorat, école nationale polytechnique d'Alger, 342p.
- [05] **REMINI B, AVENARD J, KETTAB A, 2003**, L'envasement des barrages, édition CEDOC, ALGERIE
- [06] **BOUCHELKIA H, 2000**, Quantification du transport solide en suspension par modélisation statistique : application au bassin versant de Chellif, Mémoire de magister, département de Génie rural, Université de Blida, 83p
- [07] **BOUCHELKIA H et BENHADJ M O, 1994**, Contribution à la modélisation statistique des transports solides en suspension, mémoire d'ingénieur en Hydraulique, Ecole nationale polytechnique d'Alger, 116p.
- [08] **DEMMAK A, OUAAR M, GUEDJTAL A, 1991**, Quantification de l'érosion à l'exutoire de micro-bassins en zone semi-aride, dans l'ouvrage « Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride », Edition. AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext, Paris, pp179-188.
- [09] **MHEIGUEN M, 2005**, Evaluation des ressources en eau superficielles du bassin hydrographique « Cheliff-Zahrez », mémoire de magister, Université Hassiba Ben Bouali de CHLEF, 150p.
- [10] **A.B.H**, bassin hydrographique de Chellif zahrez
<http://www.abh-cz.com.dz> (consulté le 29/03/2006)
- [11] **BOUCHELKIA H, 2003**, Quantification du transport solide dans le bassin versant algérien du Chellif, Ingénieries N°33-P.45 à 56 (mars 2003)

- [12] **BOUANANI A, 2005**, Hydrologie, transport solide et modélisation, Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie), Thèse de DOCTORAT en Géologie appliquée: Option: hydrogéologie, Département d’hydraulique, Université de Tlemcen, 250p.
- [13] **UNESCO, 1989**, Problème d’érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants. Projet 5.3 du programme hydrologique international, rapport préparé sous la présidence de SAUDBARG A. directeur de la publication WHITE W.R.
- [14] **HENENSAL P, 1986**, L’érosion extrême des sols par l’eau : approche quantitative et mécanismes. Rapport de recherche L.P.C. N°138, Paris, Mars 1986.
- [15] **BOUVARD M, 1984**, Barrages mobiles et ouvrages de dérivation. Edition EYROLLES, PARIS, France.
- [16] **TERFOUS A, 2002**, Modèles de calcul du débit solide dans les cour d’eau et canaux, département d’hydraulique Université de Tlemcen.
- [17] **MERLE J P, 1989**, Transport des sédiments (ouvrages en rivière, résultats expérimentaux), La HOUILLE BLANCHE N° 3/4, pp 273-280.
- [18] **BIGILLON F, 2001**, Etude du mouvement bidimensionnel d’une particule dans un courant d’eau sur forte pente, Thèse de doctorat en Géophysique, Géochimie et Géomécanique, Université Grenoble 1 – Joseph Fournier, France, 217p.
- [19] **MACHANE K et MAHDI T, 1993**, L’Hydraulique de la sédimentations des retenus par modèle mathématique de la formation de delta. Mémoire d’ingénieur en génie Hydraulique, Ecole nationale polytechnique d’Alger.
- [20] **CHIKITA K A, 1996**, Suspended sediment discharge from snowmelt: Ikushunbetsu River, Hokkaido, JAPAN. Journal of Hydrology 186 (1996), pp 255-313
- [21] **KELLER E A, VALENTINE D.W, GIBES D R, 1997**, Hydrological Response of Small Watersheds Following the Southern California Painted Cave fire of june 1990. Hydrological Process vol 11, pp 401-414.
- [22] **LEBRETON J C, 1974**, Dynamique fluviale, édition Eyrolles
- [23] **OLIVRY J C, BRICQUET J.P, THIEBAUX J.P, 1989**, Bilan annuel et variations saisonnières des flux particuliers du Congo à Brazzaville et de l’Oubangui à bangui. La HOUILLE BLANCHE N°3/4, pp 311-314.

- [24] **BOUKARTA M et BELKHIRI A, 1995**, Mise au point d'une méthode de quantification automatique des apports solides, à partir des débits liquides. Mémoire d'ingénieur en génie Hydraulique, Ecole nationale polytechnique d'Alger, 150p
- [25] **ELKADI A K, 2006**, Evolution d'un lit de rivière en fonction des apports, thèse de doctorat en mécanique, Université Claude Bernard- Lyon 1, France, 189p.
- [26] **BALAYN P, 2001**, Contribution à la modélisation numérique de l'évolution morphologique des cours d'eau aménagés lors de crues, Thèse de Doctorat en mécanique, Université Claude Bernard- Lyon 1, France, 222p.
- [27] **FOURNIER F, 1967**, mesure de l'érosion , principe de base et incidence de l'instrumentation nouvelle sur l'établissement des réseaux de mesure, Publication N° 67 de l'A.I.H.S, Symposium Planification des réseaux hydrologiques, pp 343-355
- [28] **MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE**
<http://www.enseeiht.fr/hmf/travaux/CD9598/travaux/optsee/bei/nome34/n34p00.htm>
(Consulté le 20/01/2004)
- [29] **MUSY A, CHAPITRE 7- La mesure hydrologique**
<http://hydram.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html> (consulté le 25/03/2006)
- [30] **MALAVOI J R, 2005**, Le transport solide par charriage, Etat des connaissances, ENGREF, FRANCE
- [31] **Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAP/CAR) du Plan d'action pour la Méditerranée –PNUE,1998**, Directives, pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes, Programme d'actions prioritaires,centre d'activités régionales, Split, Croatie
- [32] **ANDRE M et HIGY C, 2004**, Hydrologie, une science de la nature, Collection gérer l'environnement, édition Presses polytechnique et universitaires Romandes, SUISSE
- [33] **DEGOUTTE G, Chapitre 2 – Transport solide en hydraulique fluviale.**
www.engref.fr/coursenligne/hydraulique/degoutte2.pdf (consulté le 20/03/2006)
- [34] **REMINI B, 1990**, Etude hydrodynamique du mécanisme d'envasement. Thèse de Magister, Ecole National Polytechnique d'Alger, 100p.
- [35] **REMINI B, HALLOUCHE. W, 2005**, L'alluvionnement des retenues, imprimerie Madani BLIDA
- [36] **DE CESARE G, 1998**, Alluvionnement des retenues par courants de turbidité, Thèse de doctorat, Département de Génie civil, École polytechnique fédérale de Lausanne, 186p.
- [37] **DUQUENNOIS, 1969**, Sédimentations dans les barrages réservoirs et moyen de lutte. Colloque international, Université de LIEGE 4 en Mai 1969.

[38] Rapport français sur l'Algérie

<http://www.cedare.org.eg/files/rapportfrancais.doc> (consulté 28/03/06)

[39] TEBETAOUL M, Les changements d'utilisation et de couvert des sols et les ressources en eau, <http://medias.obs-mip.fr/www/Reseau/Lettre/13bis/fr/07.ALGERIE.TABETAOUL.PDF>

(Consulté 28/03/06)

[40] LES CAHIERS DU PLAN BLEU, 2003, Les menaces sur les sols dans les pays Méditerranéens, Etude bibliographique, Plan Bleu centre d'activités régionales, Sophia Antipolis, Mai 2003

[41] RAIS S ET ADIDI M, 1989, Prévision du transport solide sur un bassin versant. Application à l'envasement d'une retenue. La Houille Blanche/N° 3/4-1989, pp 296-300.

[42] GRAF W H, 2000, Hydraulique Fluvial, volume 16, édition presse polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne SUISSE

[43] BELLEUDY P, 2001, Le transport solide en rivière: lacunes de connaissance et besoins Méthodologiques, Mémoire de recherche pour l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches, institut National Polytechnique de Grenoble, FRANCE, 77p.

[44] MEUNIER P, 2004, Dynamique des rivières en tresses (Braided rivers dynamics), Thèse de doctorat en géophysique interne, Institut de physique du globe de Paris, FRANCE, 130p.

[45] EL GANAOUI O, 2002, Modélisation de la dynamique sédimentaire pour les transferts des radionucléaires dans les cours d'eau, Thèse de Doctorat en Mécanique, Université de la méditerranée Aix-Marseille II, Ecole supérieure de mécanique de Marseille, France, 200p.

[46] HAMITOCHE M, 2000, Modélisation de l'évolution du lit alluvionnaire des rivières, Mémoire de Magister, Département de Génie rural, Université de Blida, 137p

[47] MALAVOI J R (Epteau),1998, Guide technique N°2, Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau Bassin Rhone méditerranée Corse, édition SDAGE Rhone méditerranée Corse

[48] VONGVIXAY A, 2001, Modèle d'évolution sédimentaire d'un segment de rivière, Mémoire de maîtrise des sciences appliquées, Département des Génies civil, Géologique et des Mines, Ecole polytechnique de Montréal, Canada, 115p.

[49] Groupe d'Hydraulique Fluviale, Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales,

http://www.cetmef.equipement.gouv.fr/projets/hydraulique/clubcourseau/pdf/publis/stage_module1.pdf

(Consulté 28/06/05)

[50] ANTONIO H C et GRACE O N, 1994, Prévision du transport total évaluation de formules existantes. La Houille Blanche/N° 4-1994, pp 13-24.

- [51] **DUFRESNE M F D, 2005**, Etude expérimentale du transport de particules solides par charriage à forte pente, Mémoire de DEA Mécanique et Ingénierie option Sciences de l'Eau, Institut de Mécanique des Fluides et des Solides de Strasbourg.
- [52] **KASSOUL M, 1991**, Contribution à l'étude de la sédimentation des barrages en ALGERIE. Mémoire d'ingénieur, Ecole nationale supérieure d'hydraulique, BLIDA.
- [53] **KHENTOUCHE A, 2005**, Contribution à L'étude quantitative et quantitative de (érosion dans le bassin versant de Oued Nafla (W. de Batna), Mémoire de Magister, Département des sciences de la terre, Université El Hadj Lakhdar BATNA, ALGERIE, 119p.
- [54] **UNESCO, 1986**, METHODES DE CALCUL DE LA SEDIMENTATION DANS LES LACS ET LES RESERVOIRS, Contribution au Programme Hydrologique Internationale PHI - II Project A.2.6.1 Panel Stevan Bruk, Rapporteur Janvier 1986
- [55] **REMINI B, KETTAB A et HIHAT H, 1995**, envasement du barrage D'IGHIL EMDA, La Houille Blanche N°2/3-1995, pp23-28
- [56] **REMAOUN M, 2007**, Crues et sécheresses en algérien, cas du moyen chellif, Thèse de doctorat d'état en hydrogéologie. Université Houari Boumedienne, Alger, 244p.
- [57] **TOUAHIR S, 2007**, Etude comparative du transport solide en suspension entre les sous bassins des oueds Zeddine et Tikazale(Chellif), mémoire de magister, école nationale supérieure d'hydraulique, Blida
- [58] **JACOB J, 1974**, Transport solide du cheliff, Sidi belattar, note hydrologique, Note technique N°27/SHYL, journal de ORSTOM collection de référence N°7684Hydr
- [59] **TOUIBIA B, 1986**. Quantification de la salinité et du transport solide cas du bassin versant de l'oued Deurdeur. Thèse de magister .119p.INA El Harrach. Alger.
- [60] **PROBST J L et AMIOTTE SUCHET P, 1992**, Fluvial suspended sédimente transport and mécanical érosion in the Maghreb (North Africa), Hydrological sciences –journal- des sciences hydrollogiques, 37,6,12/1992 ; PP 621-637
- [61] **ACHIT M, 2000**, Contribution à l'analyse multi variée de la variable « transport solide): cas du bassin versant de oued Mina (Willaya de Relizane). Thèse de Magister. ENSH .Blida.
- [62] **LARFI B, REMINI B, 2002**, Quantification du transport solide dans le bassin versant de l'oued Isser-application à l'envasement du barrage de Beni Amrane. Proceeding de 2ème colloque Méditerranéen sur l'eau et l'environnement. Alger.

- [63] **GHENIM A, 2001**. Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna: cas d'oued Isser, oued Mouilah et de la Haute tafna, mémoire de Magister, Univ. Tlemcen.
- [64] **TERFOUS A, MEGNOUNIF A et BOUANANI A, 2001**, Etude du transport solide en suspension dans l'oued Mouilah (Nord ouest Algérien, Revue des science de l'eau 14/2, pp173-185.
- [65] **BENKHALED A et REMINI B, 2003**, Analyse de la relation de puissance: Débit solide – débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'oued Ouahrane (Algerie), Revue des sciences de l'eau 16/3, pp 333-356
- [66] **MEGNOUNIF A, TERFOUS A et BOUANANI. A, 2003**, Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute Tafna (Nord ouest Algérien, Revue des sciences de l'eau 16/3, pp 369-380.
- [67] **ACHIT M ET MEDDI M, 2004**, Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Haddad (Nord Ouest Algérien, Sécheresse ; 15(4), PP 367-373.
- [68] **ACHIT M ET MEDDI M, 2005**, Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride, cas du bassin versant de l'oued Mina (Nord Ouest Algérien), Revue des sciences de l'eau 18/Special, pp 37-56.
- [69] **MEGNOUNIF A, 2007**, Etude du transport des sédiments en suspension dans les écoulements de surface, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 168p
- [70] **GHENIM A , SEDDINI A, TERFOUS A, 2007**, Production et exportation des sédiments en suspension lors des evenements de crue cas du bassin versant L'Oued Mouillah, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 06, Décembre 2007, pp. 35-44
- [71] **BENHAMIDI K et HAMMAS N, 2001**, Estimation des apports solides en suspension du bassin versant de Oued Mouillah par analyse statistique, Mémoire d'ingénieur, Département d'hydraulique , Université de Tlemcen, 103p.
- [72] **ADMANE O, HOENG K et OUAKLI N, 1992**, Statistique (cours et exercices) Editions Office des publications universitaires
- [73] **SPEIGEL M. R, 1975**, Probabilité et statistiques. Mc GRAW-HILL Edition, NEWYORK, U.S.A.
- [74] **SAPORTA G, 1990**, Analyse des données et statistiques, édition technip
- [75] **BENBLIDIA M, 1973**, Cours d'hydrologie. Ecole d'Ingénieurs des Travaux Publiques d'Alger, photocopié.
- [76] **RAOULT J P et l'équipe des enseignants, 2006**, Cours de statistique et analyse des données, Ecole nationale des ponts et chaussées, France

- [77] COLIN F et Al, 1997, Introduction à la décision statistique, Fiches aide-memoire, Département de Mathématiques et Informatique Appliquées (MIA), l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), France,
www.inra.fr/mia/ftp/V/FPstat/module1/version1/Fiches.pdf
- [78] BENAVENT C, Tests statistiques
<http://christophe.benavent.free.fr/cours/stat/test.PDF> (consulté le 30/03/2006)
- [79] BOWKER A. H, 1965, Méthodes statistiques de l'ingénieur, Edition DUNOD, Paris, FRANCE.
- [80] DROESBEKE J. J, 1988, Eléments de statistique. Office des publications universitaires, Alger.
- [81] BERBARA M. et DERRAR A, 1993, Estimation des apports solides à l'exutoire de bassin versant de TAFNA. Mémoire d'ingénieur en mathématiques appliquées, Université de Blida. 80p.
- [82] BENCHAEKH A, 1996, Définition d'une méthodologie de quantification automatique des T.S. à partir des débits liquides. Application au BV de la TAFNA. Agence nationale des ressources. Hydrauliques, Alger.
- [83] REMINIERAS G, 1979, Hydrologie de l'ingénieur. Edition EYROLLES, Paris, FRANCE.
- [84] CHOW V. T, 1988, Applied Hydrology. Edition Mc GRAW-HILL, SINGAPORE.
- [85] DUBREUIL. P, 1974, Introduction à l'analyse hydrologique. Edition Masson et C^{ie}, Paris.
- [86] GOURDIN A, 1991, Méthodes numériques appliquées. Edition Office des publications universitaires, Alger.
- [87] BOUCHELKIA H, 2003, Essai de bilan quantitatif des ressources hydrique de l'ALGÉRIE du nord 5^{ème} symposium international de l'eau à cannes.
- [88] BOUCHELKIA H, 2004, Estimation du transport solide en suspension par analyse des débits de crues 2^{ème} séminaire nationale sur les ressources en eau, MASCARA « SNRE 2004 »
- [89] BOUCHELKIA H, 2001, Modélisation statistique du transport solide dans le bassin versant de Chellif, 1^{er} séminaire nationale sur l'eau, TLEMCEN « SNE 2000 »
- [90] BOUCEFIANE A, 2006, Cartographie des précipitations du bassin hydrographiques du Chéelif-Zahrez , mémoire de magister, Centre Universitaire de Khemis Miliana, 110p.
- [91] Ministère des ressources en eau, 2006, Etude de Développement d'un Plan de Gestion Intégrée des Ressources en Eau de la Région Hydrographique Cheliff-Zahrez, MISSION I: Diagnostic de la situation actuelle de la région hydrographique de Cheliff – Zahrez (Rapport Définitif)

- [92] **MOUMNA A (ABH), 2005**, L'eau dans la région hydrographique Cheliff – Zahrez "Equation Ressources – Besoins", Rencontre-débats sur l'économie de l'eau dans l'industrie à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- [93] **MESSAHEL. M, BENHAFID. M. S et OUELD HOUCINE. M. C, 2004**, Options Méditerranéennes, Séries B n. 52, Irrigation Systems Performance, Proceedings of 2nd WASAMED (Water Saving in Mediterranean agriculture) Workshop Hammamet (Tunisia), 24-28 June 2004, PP 61-78.
- [94] **ONID**, Office nationale de l'irrigation de drainage direction régionale Cheliff, <http://www.onid.com.dz/html/cheliff.htm> consulté le (20/05/2008)
- [95] **LECCE S.A., 1997**, spatial patterns of historical overbank sedimentation and flood plain evolution. Blue River, Wisconsin, Géomorphologie 18, pp265-277.
- [96] **MEDDI M, 1992**, Hydropluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'Oued Mina (Ouest de l'Algérie). Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 358 p.