

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITÉ DE BLIDA

INSTITUT DU GÉNIE RURAL

Memoire

Présenté par : BOUCHELKIA Hamid

En vue de l'obtention du diplôme
de MAGISTER en GÉNIE RURAL

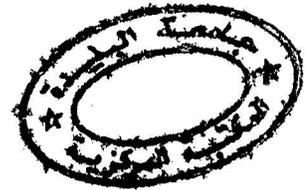
Option : Sciences de l'eau

Theme

**QUANTIFICATION DU TRANSPORT SOLIDE EN
SUSPENSION PAR MODELISATION STATISTIQUE:
APPLICATION SUR LE BASSIN VERSANT DE CHELLIF**

Soutenu publiquement le 16 février 2000 devant le jury :

M.A KETTAB	Professeur	ENP	Président
M. B. ACHOUR	Maître de Conférences	U.BISKRA	} Examineurs
M.A.SAAD	Maître de Conférences	U.CHLEF	
M.A/H GUENDOZ	Chargé de cours	USTBlida	
M.B. REMINI	Maître de Conférences	USTBlida	Rapporteur



Dédicaces

A ma mère, à mon père

A toute ma famille .

A tous ceux qui me sont chers « Joe ».

A tous (tes) mes amis (es).

A tout les enseignants vacataires.

B. Hamid

REMERCIEMENTS

J'exprime mes sincères reconnaissances à monsieur B.REMINI pour, m'avoir inspiré ce sujet et m'avoir guider sans amertume le long de ces dernier années afin de terminer ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de mes profondes gratitudees.

Je suis très reconnaissant à l'égard de tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, sans oublier l'ensemble du personnel de U.S.T.Blida en particulier ceux de l'institut de GENIE RURAL et CIVIL.

Je remercie l'ensemble du personnel de l'A.N.R.H de bir mourad rais en particulier « BELAID, DJAMILA et AL-HADI » DU département d'hydrologie et « SALIMA et FARIDA » du département de pédologie .

Sans oublier mon ami NACER.T.I pour ces efforts déployés pour l'impression de ce mémoire .

Que toutes les personnes non citées qui m'ont aider de prés ou de loin ,trouvent ici mes salutation distinguées.

A toutes et à tous, je vous dis merci

Thanmirth

RESUME :

Afin de permettre une réponse rapide à la demande des ingénieurs pour la quantification du transport solide à l'exutoire d'un bassin versant, un outil simple, facile à mettre en œuvre a été mis au point. Le principe adopté, est basé sur des données hydrométriques des stations de jaugeages, et des analyses saisonnières et annuelles, ont permis de définir une méthode appropriée d'estimation des apports solides.

L'étude est menée par analyse des débits moyens journaliers, par l'intégralité des crues et enfin par dissociation des crues.

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 $Q_s = f(Q)$ sont entre 87% et 95% la quantité du transport solide en suspension retrouvée se situe entre 8.16 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 l'importance de sa superficie, ainsi que l'importance des apports liquides de l'oued CHELIF et son régime turbulent et torrentiel.

Cette méthode une fois affinée peut être généralisée à l'ensemble des bassins versants du nord de l'Algérie.

Mots clés:

Transport solide - Bassin versant - Données hydrométriques - Débit liquide - Débit solide - Corrélation - Modèle - Estimation - Quantification statistique - CHELLIF.

المخلص:

للاجابة السريعة لطلب المهندسين في ميدان إحصاء كمية النقل الصلب. آليه سهله الفهم والاستعمال أعدت في

هذه الدراسة.

المبدأ الأساسي المتبع هو استغلال المعطيات الحقيقية المنتقاة في محطات مراقبة الوديان، و التحليل السنوي و الموسمي

للتوصل إلى تحديد طريقة منهجية لإحصاء كمية الوحل.

هذه الدراسة اتبعت، بتحليل التدفق اليومي المتوسط، و بتحليل الفيضانات في مجملها، ثم بتقسيم الفيضانات

(صعود الفيضان و نزول الفيضان).

محطة سيدي بلعطار في الحوض السالك(الشلف) اتخذت كتطبيق في هذه الدراسة. النتائج المحصل عليها جد مشجعة

معاملات التناسق الموجودة في كل التطبيقات تحوم بين 87% و 95% أما كمية الوحل المحصل عليها تتواجد بين 8.16 و

37.73 مليون طن في السنة. تتظاهر عظمة هذا راجع إلى أهمية الانجراف في هذا الحوض و مساحته المعتبرة

(43700 كم²) وكذا أهمية التدفق السائل في وادي الشلف.

هذه المنهجية بعد تعديلها و تسويتها، بإمكانها أن تعمم على جميع الأحواض الساكنة الجزائرية.

ABSTRACT

In order to permit a rapid response for the request of the engineers for the estimate of quantity of the solide transport to the exutory of a watershed, a simple and easy tool to make in work has been set up. The adopted principale based on hydrometric data of measuring stations. A seasonery and anual analysis have permitted to define an apropreate estimating method of solid bringing.

The study has been brought by analysing delivred daily means, by integral floods and finaly by decomposition of floods.

SIDI BEL-ATAR station to the exutory of a watrshed 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 $Q_s = f(Q)$ are between 87% and 95% . The quantity the founded suspended sediment are situated between 8.16 and 37.73 millions of tans per year, they appear huge without doubts due to the vulnirability of CHELLIF basin in a relation to its erosion and the importance of its oued CHELIFF bringing liquid and turbulante and its torrential regime.

This method once set, it can be generalized for the whole watersheds of the north algeria .

NOTATIONS

D: Diamètre des grains .

U: Vitesse d'écoulement.

τ : Tension tangentielle.

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.

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.

N1: Nombre des talwegs élémentaires.

Q: Débit liquide.

Q_s : Débit solide.

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 : 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 $Y=A.X+B$.

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.

k : paramètre du modèle $Q_s=k Q^A$.

H : Amplitude des classes.

M : Nombre de sous-intervalles de fréquences.

E : Etendu de l'intervalle de fréquence.

$Q_s=f(Q)$: modèle.

Q_{moy} : moyenne de la série des débits liquides.

T_s : Apport spécifique des sédiments en suspension.

C_m : Concentration moyenne annuelle.

Q_{sm} : Débit moyen solide.

Q_m : Débit moyen liquide.

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

(M) : montée de crue.

(D) : Descente de crue.

LISTE DES TABLEAUX

Tab(II.1.1)	Statistique sur la sédimentation des barrages algériens en exploitation	P.13
Tab(III.3.1)	Tableau des fréquences	P.34
Tab(IV.1.1)	Pluviométrie mensuelle moyenne du bassin de CHELLIF	P.44
Tab(IV.3.1)	Résultats de calculs	P.47
Tab(IV.3.2)	Calcul des débits liquides et solides moyens inter-annuels	P.50
Tab(IV.3.3)	Caractéristiques des échantillons (Q, Q _s)	P.51
Tab(IV.3.4)	Relations Saisonnières	P.52
Tab(IV.3.5)	Séries saisonnières des débits liquides moyens journaliers	P.52
Tab(IV.3.6)	Apports saisonniers en sédiments en suspensions	P.52
Tab(IV.3.7)	Caractéristiques des échantillons (Q, Q _s) « crues entières »	P.55
Tab(IV.3.8)	Relations annuelle et saisonnières « Crues entières »	P.56
Tab(IV.3.9)	Apports en sédiments en suspension « Crues entières »	P.57
Tab(IV.3.10)	Caractéristiques des échantillons (Q, Q _s) « crues déssociées »	P.58
Tab(IV.3.11)	Relations annuelle et saisonnières « Crues déssociées »	P.60
Tab(IV.3.12)	Apports en sédiments en suspension « Crues déssociées »	P.60

LISTE DES FIGURES

Fig(III.2.1)	Schéma Explicatif	P.26
Fig(III.2.2)	Droite des moindres carrés	P.30
Fig(III.3.1)	Construction géométrique de la courbe des débits classés	P.32
Fig(III.3.2)	Courbe des débits classés relative à N années	P.33
Fig(III.3.3)	Histogrammes des fréquences	P.34
Fig(IV.1.1)	Données morphométriques	P.45
Fig(IV.3.1)	Droite de régression (Q,Q _s) «B.V de CHELLIF, Toutes années »	P.49
Fig(IV.3.2)	Courbe des débits classés « B.V de CHELLIF, toutes années »	P.49
Fig(IV.3.3)	Solidogramme de la crue du 2 au 5/02/79 « Oued CHELIF »	P.54
Fig(IV.3.4)	Turbidigramme de la crue du 2 au 5/02/79 « Oued CHELIF »	P.54
Fig(IV.3.5)	Droite de régression (Q,Q _s) « crues entières en toutes années »	P.56
Fig(IV.3.6)	Droite de régression (Q,Q _s) « Montée de crues, en toutes années »	P.59
Fig(IV.3.7)	Droite de régression (Q,Q _s) « Descente de crues, toutes années »	P.59
Fig(A.1)	Courbe des débits classés « BV de CHELLIF, automnes »	P.70
Fig(A.2)	Courbe des débits classés « BV de CHELLIF, hivers »	P.70
Fig(A.3)	Courbe des débits classés « BV de CHELLIF, printemps »	P.71
Fig(A.4)	Courbe des débits classés « BV de CHELLIF, étés »	P.71

Fig(A.5)	Courbe des débits classés « BV de CHELLIF, saisons humides »	P.72
Fig(A.6)	Courbe des débits classés « BV de CHELLIF, saisons sèches »	P.72
Fig(B.1)	Droite de régression (Q,Q _s) « BV de CHELLIF, automnes »	P.73
Fig(B.2)	Droite de régression (Q,Q _s) « BV de CHELLIF, hivers»	P.73
Fig(B.3)	Droite de régression (Q,Q _s) « BV de CHELLIF, printemps »	P.74
Fig(B.4)	Droite de régression (Q,Q _s) « BV de CHELLIF, étés»	P.74
Fig(B.5)	Droite de régression (Q,Q _s) « BV de CHELLIF, saisons humides »	P.75
Fig(B.6)	Droite de régression (Q,Q _s) « BV de CHELLIF, saisons sèches»	P.75
Fig(C.1)	Droite de régression (Q,Q _s) « BV de CHELLIF, Crues entières aux automnes »	P.76
Fig(C.2)	Droite de régression (Q,Q _s) « BV de CHELLIF, Crues entières aux hivers »	P.76
Fig(C.3)	Droite de régression (Q,Q _s) « BV de CHELLIF, Crues entières aux printemps »	P.77
Fig(C.4)	Droite de régression (Q,Q _s) « BV de CHELLIF, Crues entières aux saisons humides »	P.78
Fig(C.5)	Droite de régression (Q,Q _s) « BV de CHELLIF, Crues entières aux saisons sèches »	P.78
Fig(C.6)	Droite de régression (Q,Q _s) « BV de CHELLIF, Montée des crues aux automnes »	P.79
Fig(C.7)	Droite de régression (Q,Q _s) « BV de CHELLIF, Déscente des crues aux automnes »	P.79

SOMMAIRE

INTRODUCTION	01
<u>CHAPITRE (I) : EROSION ET TRANSPORT SOLIDE</u>	03
I.1.PROCESSUS D'EROSION DANS LES BASSINS VERSANTS	
I.1.1.GENERALITE	03
I.1.1.1.Les types d'érosion	03
I.1.1.2.Caractéristiques des bassins versants	03
I.1.2.LES INTERFLUVES	04
I.1.2.1.Le processus d'altération	04
I.1.2.2.Influence du climat	05
I.1.2.3.Facteurs topographiques	05
I.1.2.4.Facteurs géologiques et pédologiques	06
I.1.2.5.Le couvert végétal	06
I.1.2.6.L'occupation des terres	06
I.1.3.RESEAU DE DRAINAGE	06
I.2.LE TRANSPORT SOLIDE	07
I.2.1.GENERALITE	07
I.2.2.LE TRANSPORT PAR CHARRIAGE	07
I.2.2.1.Description du phénomène	08
I.2.3.LE TRANSPORT PAR SUSPENSION	08
I.2.3.1.Description du phénomène	09
<u>CHAPITRE (II) : CONSEQUENCE, METHODES DE PREVISIONS ET DEFENCES</u>	10
II.1.ALLUVIENNEMENT DES RETENUS	10
II.1.1.GENERALITE	10
II.1.2.MECANISME DE L'ENVASEMENT	10

II.1.2.1.Comportement des sédiments grossiers	10
II.1.2.2.Comportement des sédiments fins	11
II.1.3.EFFET DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES	11
II.1.4.AMPLEUR DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES EN ALGERIE	12
II.2.METHODES DE PREVISION DES APPORTS SOLIDES	14
II.2.1.GENERALITE	14
II.2.1.1.Méthodes empiriques	14
II.2.1.2.Méthodes d'application des équations du transport solide	14
II.2.1.3.Méthodes de modélisations	15
<i>a. Le modèle mathématique</i>	15
<i>b. Le modèle physique</i>	15
II.2.2.METHODES DE QUANTIFICATION EN ALGERIE	16
II.2.2.1.Modèle de TIXERONT (1960)	16
II.2.2.2.Modèle de SOGREAH (1969)	16
II.2.2.3.Modèle de DAMMAK (A.N.R.H. 1982)	16
II.3.METHODES DE DEFENSE CONTRE L'EROSION ET LE TRANSPORT SOLIDE	17
II.3.1.INTRODUCTION	17
II.3.2.Les interfluves	17
II.3.2.1.Procédés agrotéchniques	18
II.3.2.2.Restauration des forêts	18
II.3.2.3.Procédés hydrotechniques	18
II.3.3.LES COURS D'EAU	19
II.3.3.1.Revêtements des berges	19
II.3.3.2.Freinage de l'écoulement	19
II.3.3.3.Guidage de l'écoulement	19
II.3.3.4.Aménagements hydrauliques	19

<u>CHAPITRE (III) : MODELISATION ET ANALYSE STATISTIQUE</u>	20
III.1.POSITION DU PROBLEME ET ANALYSE STATISTIQUE	20
III.1.1.INTRODUCTION	20
III.1.2.NOTION DE L'ECHANTILLONNAGE	21
III.1.2.1.Population et échantillon	21
III.1.2.2.Caractéristiques de la population	21
<i>A. Moyenne de l'échantillon</i>	21
<i>B. Variance</i>	21
<i>C. Ecart type</i>	21
<i>D. Covariance</i>	22
III.1.2.3.Estimation par intervalles de confiances	22
<i>A. Intervalle de confiance de la moyenne</i>	21
<i>B. Intervalle de confiance de la variance</i>	22
III.1.3.RECUEIL DES DONNEES	23
III.1.4.TRAITEMENT DES DONNEES	23
III.1.4.1.Homogénéité et stationnarité	23
III.1.4.2.Indépendance et stationnarité	24
III.1.4.3.Détection des valeurs hors position	25
III.2.ELABORATION D'UN MODELE PAR APPROXIMATION DES DONNEES	26
III.2.1.INTRODUCTION	26
III.2.2.MODELISATION	27
III.2.3.MODELE STATITISTIQUE	27
III.2.4.AVANTAGE D'UN MODELLE	27
III.2.5.ESTIMATION DES PARAMETRES D'UN MODELE	28
III.2.5.1.Méthode des moindres carrés	28
III.2.6.VALIDITE DU MODELE	29

III.2.6.1.Coefficient de corrélation	29
III.2.6.2.Test de corrélation	29
III.2.7.PRECISION D'UNE CORRELATION « INTERVALLE DE PREDICTION »	30
III.3.REGIME DES DEBITS LIQUIDES	30
III.3.1.INTRODUCTION	30
III.3.2.COURBE DES DEBITS CLASSES	31
III.3.2.1.Construction géométrique de la courbe des débits classés	31
III.3.2.2.Courbe relative à N années	32
III.3.3.ESTIMATION DES LOIS DE PROBABILITES DES VARIABLES CAUSES	33
III.3.3.1.Répartition de la statistique d'observation en classes	33
III.3.3.2.Tableau de fréquences	34
III.3.3.3.Courbe de fréquences des débits liquides	34
III.3.4.AJUSTEMENT A UNE COURBE DE DISTRIBUTION THEORIQUE DES FREQUENCES	35
III.3.5.ESTIMATION DES APPORT SOLIDES EN SUSPENSION	35
III.4.ORGANIGRAMMES DE TRAVAIL	36
III.4.1.ORGANIGRAMME SOMMAIRE	37
III.4.2.ORGANIGRAMME GENERALE	38
III.4.3.ORGANIGRAMME DE CHOIX DES ECHANTILLONS	40
III.4.4.ORGANIGRAMME D'ELABORATION D'UN MODELE	41
III.4.5.ORGANIGRAMME D'ETUDE FREQUENTIELLE DES DEBITS LIQUIDES	42
III.4.6.ORGANIGRAMME D'ESTIMATION DES APPORT SOLIDES EN SUSPENSION	43
<u>CHAPITRE (IV) : ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES A L'EXUTOIRE DU BASSIN VERSANT DE CHELLIF</u>	44
IV.1.PRESENTATION DE LA ZONE D'APPLICATION	44
IV.2.COLLECTE ET DEPOUILLEMENT DE DONNEES	46
IV.3.ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES	46

IV.3.1.ESTIMATION DU TRANSPORT SOLIDES EN SUSPENSION A PARTIR DES DEBITS MOYENS JOURNALIERS.	46
IV.3.1.1.Données sur les sédiments	46
IV.3.1.2.Données sur les débits liquides du cours d'eau	47
IV.3.1.3.Recherche de relation entre débits solides en suspension et débits liquides	47
IV.3.1.4.Courbe des débits classés	48
IV.3.1.5.Estimation des apports solides en suspension	48
IV.3.1.6.Application à l'échelle saisonnière	51
IV.3.2.ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSION A PARTIR DES CRUES	53
IV.3.2.1.Sélection de crues	53
IV.3.2.2.Les tracés de crues (hydrogramme, solidogramme et turbidigramme)	53
IV.3.2.3.Estimation des apports solides à partir des crues (dans leurs intégralités)	55
IV.3.2.4.Données sur les sédiments	55
IV.3.2.5.Caractéristiques des échantillons de couples (Q ,QS)	55
IV.3.2.6.Relation entre débit liquide et débit solide, $QS = f(Q)$	56
IV.3.2.7.Apports solides en suspension	57
IV.3.2.8.Estimation des apports solides par dissociation de crues « en montée et descente de crue »	57
IV.4.DISCUSSION DES RESULTATS	61
CONCLUSION GENERALE	63
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	66
ANNEXE (A)	70
ANNEXE (B)	73
ANNEXE (C)	76

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 les conséquences de ces phénomènes, alors que l'eau cette richesse incontestable se qualifie par sa rareté et sa mauvaise répartition. Avec un taux d'érosion spécifique se situant entre 2000 et 4000T/Km²/an[4][7][11], chaque année l'infrastructure hydraulique algérienne est amputée d'une capacité de 20 millions de m³ (équivalent à un barrage tel que FERGOUG) suite à l'envasement [4][23].

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 tente 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, dans le temps qui privilégie le calcul et même la conception automatique.

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 [3]; un premier travail a été effectué sur la base d'une étude de micros - bassins expérimentaux, mais elle s'est avérée insuffisante pour différentes raisons.

INTRODUCTION

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. Notre choix s'est posé sur cette station 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 CHELIF 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).

L'estimation des apports solides en suspensions a été menée 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.

CHAPITRE I

EROSION ET TRANSPORT SOLIDE

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

I.1.1.GENERALITE :

I.1.1.1.Les types d'érosions:

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. 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 transport les sédiments provenant du ruissellement de surface des parties amonts par l'érosion géologique ou l'érosion des sols.

I.1.1.2.Caractéristiques des bassins versants :

Dans un bassin versant, l'arrachement des particules sédimentaires de leur emplacement d'origine, leur déplacements et leur dépôt, dépendent de nombreuses caractéristiques de ce bassin. Ces dernières peuvent être soit physiques, soit hydrologiques et sont fortement interpellantes [26].

- 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 tel que la précipitation et la température. Le volume et l'intensité des précipitation jouent tous deux un rôle important dans le processus d'érosion par la suite de leur 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[26]. 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 sont 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, par 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 de sédiment 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 [26].

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 [16] :

- 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'abattages du bois, la construction de routes et l'urbanisation, vu 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'eau 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

I.2.1.GENERALITE :

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.

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.

I.2.2.LE TRANSPORT PAR CHARRIAGE [21]:

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 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 [6].

Il est difficile de donner une définition universelle acceptable de la charge de fond, mais EINSTEIN [20][23] a dressé une liste de caractéristiques 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 ou moins souvent.

I.2.2.1. Description du phénomène :

Sur le lit des matériaux sans cohésion, les grains isolés sont soumis aux forces de pesanteur et aux forces hydrauliques [6].

- 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, ayant un poids et un coefficient de frottement fini ; il 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 sur le fond de la rivière est exprimé par [6][9] :

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot J$$

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.

I.2.3. TRANSPORT PAR SUSPENSION :

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[22].

1.2.3.1. 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 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.

$$U^2 = 360 \cdot g \cdot D$$

Puisque : $U = c \cdot \sqrt{h \cdot J}$ et $\tau = \gamma \cdot J \cdot h$

On pourra la mettre sous la forme :

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

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).

CHAPITRE II

CONSEQUENCE, METHODES DE PREVISIONS ET DEFENCES

II.1.ALLUVIONNEMENT DES RETENUES :

II.1.1.GENERALITE :

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'écoulements deviennent nulles «au pieds amont du barrage».

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 lutttes préconisés sont sous deux formes : préventifs (reboisement, décantation) ou curatif (surélévation, construction de nouveaux barrages ou évacuation de vases)[7][26].

II.1.2.MECANISME DE L'ENVASEMENT :

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

II.1.2.1.Comportement des sédiments grossiers:

C'est les sédiments transportés par charriage ; il 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.

II.1.2.2.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. Leurs dépôt se fait, soit par décantation sur place, soit après leurs transport par les courants de densités.

DUQUENNOIS a distingué qu'ils sont en fonction du régime d'écoulement en amont[14] :

- 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 débarrassants de leurs eaux interstitielles.

II.1.3.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...) [20][23].

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.1.4.AMPLEUR DE L'ALLUVIONNEMENT DES RETENUES EN ALGERIE :

Les travaux de DEMMAK 1982 ; sur l'érosion et le transport solide, ont montrés que 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[11].

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[4][7][11].

Le tableau (III.1.1) donne une idée sur la situation de nos barrages de point de vu capacité suivant certaines périodes d'exploitations.

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.1.1 : Statistiques sur la sédimentation des barrages algériens en exploitation

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)	139	14.6	54	12.31	2.05	560	
Hamiz II (1935-1986)	139	21	54	16.4	4.6	649	

* Après surélévation.

II.2.METHODES DE PREVISION DES APPORTS SOLIDES :

II.2.1.GENERALITE :

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[4][26]:

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

II.2.1.1.Méthodes 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 prévision attendues. Il est signaler que l'appel à des études statistiques pour l'établissement des méthodes pour une prévision plus générales est appréciable.

II.2.1.2.Méthodes d'application des équations 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 prédisants 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).

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 [6].

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[6].

II.2.1.3.Méthodes de modélisation :

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

a. Le modèle mathématique [4][26] :

grâce à l'ordinateur, la modélisation a pris un grand essor, vue ses 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 quelque 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.

b. Le modèle physique [4][26]:

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.

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).

II.2.2.METHODES DE QUANTIFICATION EN ALGERIE:**II.2.2.1.Modèle de TIXERONT (1960):**

Ce modèle est basé sur les corrélations établies entre l'apport moyen annuel liquide « A_L » 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.

$$Q_{sl} = a \cdot A_L^b \quad (\text{tonnes/Km}^2/\text{an}) \quad \text{et} \quad b = 0.15$$

A_L : lame d'eaux ruisselé 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.

II.2.2.2.Modèle de SOGREAH (1969):

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

$$Q_{sl} = a \cdot R_c^b \quad (\text{tonnes/Km}^2/\text{an})$$

R_c : Ruissellement annuel moyen de crue (mm).

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

II.2.2.3. Modèle de DAMMAK (A.N.R.H. 1982) [11]:

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.

$$Q_{sl} = 26,62 \text{ IL} + 5,07 \text{ IP} + 9,77 \text{ CT} - 593,56$$

Q_{sl} : Transport solide spécifique moyen annuel en tonnes/Km²/an.

IL : Indice lithologique = produit des pourcentages des précipitation 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 imperméable (IL>50%) et de 30mm pour les bassins imperméables (IL>50%).

CT : Coefficient de torentialité.

$$CT = \frac{\sum Lx}{A'} \cdot \frac{N1}{A'} = Dd \cdot F1$$

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

N1 : Nombre de talwegs élémentaires.

A' : Surface du bassin.

II.3.METHODES DE DEFENCES CONTRE L'EROSION ET LE TRANSPORT SOLIDE :

II.3.1.INTRODUCTION :

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.

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 intervention, dans les interfluves au sein même du cours d'eau.

II.3.2.LES INTERFLUVES :

Les moyens de luttés contre l'érosion dans les interfluves peuvent être classer dans les catégories suivantes [26]:

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

II.3.2.1.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 sol 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 et 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 bande associées à des travaux de terrassements.

II.3.2.2.Restaurations 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 [4][26]:

- 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.3.2.3.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.3.3.LES COURS D'EAU :

L'érosion, le transport et dépôts sont des phénomènes naturels permanent 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.3.3.1.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.3.3.2.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.3.3.3.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.3.3.4.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.

CHAPITRE III

MODELISATION ET ANALYSE STATISTIQUE

III.1.POSITION DU PROBLEME ET ANALYSE STATISTIQUE

III.1.1.INTRODUCTION :

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 côtiers CONSTANTINOIS, SEYBOUSSE, COTIER ALGEROIS, CHELIF, MACTA ,HODNA, SOUMMAM. Apres une interruption d'une dizaine d'années , ces mesures ont été reprises en 1970 et étendues à l'ensemble du réseau hydrique national [4].

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 :

- 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 (débits liquides)et les variables conséquences (débits solides en suspension).

- 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 transportées ; par combinaison entre le modèle (débit solide en suspension en fonction de débit liquide)et la courbe des fréquences cumulées des débits liquides .

III.1.2.NOTION DE L'ECHANTILLONNAGE [1][8][12][25]:

III.1.2.1.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, vue la taille infinie de la population , nous sommes conduits 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.1.2.2.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

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$$

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

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

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:

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

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 :

$$S_{xy} = \frac{\sum (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{N}$$

III.1.2.3. Estimation par intervalles de confiances[1][25]:

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 : $\bar{X} \pm U_{1-\alpha/2} \cdot \frac{S}{\sqrt{N}}$

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

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

Dans ce cas , on utilise la distribution de STUDENT : $\bar{X} \pm t_{1-\alpha/2} \cdot \frac{S}{\sqrt{N}}$

Ou 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:

- **$N \leq 100$:** Pour cela on effectue le test de KHI-DEUX : $\frac{S \cdot \sqrt{N}}{\chi_{1-\alpha/2}} \leq \sigma \leq \frac{S \cdot \sqrt{N}}{\chi_{\alpha/2}}$

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

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

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

III.1.3.RECUEIL DES DONNEES :

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

- Un échantillon représentatif des couples de valeurs (débit liquide-débit solide en suspension) 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, relatif à une période aussi longue que possible ; pour une meilleur étude du régime des débit liquides (variables causes)du cours d'eau.

III.1.4.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.

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 certains critères statistiques suivant le cas de leurs utilisation; à savoir l'indépendance, la stationnarité.

III.1.4.1.Homogénéité et stationnarité:

Le test de MANN-WHITNEY pour l'homogénéité et la stationnarité consiste à partager la série à contrôler en deux sous-échantillons de taille P et G ($P \leq G$).

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

Le test de M-W considère les quantités : $V=R_1 \cdot P \cdot (P+1)/2$

$$W=P \cdot G \cdot V$$

R_1 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_1 , 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:

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

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 est accepté.

III.1.4.2.Indépendance et stationnarité :

Le test de WALD et WILFOTVITZ 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

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} X_i \cdot X_{i+1} + X_1 \cdot X_N$$

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

$$\bar{R} = \frac{S_1^2 - S_2}{N-1} \quad \text{avec} \quad S_j = \Sigma (X_i - \bar{X})^j$$

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

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.1.4.3.Détection des valeurs hors position:

pour appliquer le test de SEVRUK et GEIGER , 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 : $X_H = \text{EXP}(\bar{X} + K_N.S)$.

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

Où \bar{X} ,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.

$$K_N = -3,62201 + 6,28446.N^{1/4} - 2,49835.N^{1/2} + 0.491436.N^{3/4} - 0.037911.N.$$

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 :

III.2.1.INTRODUCTION:

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 :

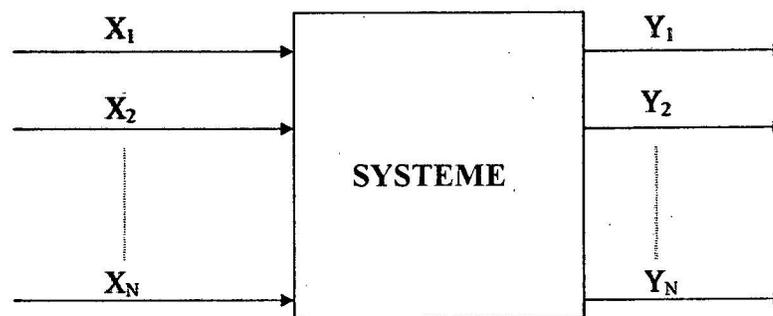


Fig : III.2.1

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 pour l'élaboration d'un modèle permettant une représentation adéquate d'un phénomène dont le comportement est décrit par les données statistiques.

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

- La précision de mesure de 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 à 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.2.2.MODELISATION :

L'ingénieur a souvent à prendre des décisions au sujet des phénomènes dont il ne connaît le comportement que 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.

III.2.3.MODELE STATISTIQUE :

Les mesures effectuées sur les grandeurs régissant 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 :

$$Y = F(x) + \varepsilon \quad (III.1)$$

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'autre variables qui influent sur le comportement du phénomène ;soit d'autre part imposer d'autres opérateurs de transformation des variables causes en variables conséquences.

III.2.4.AVANTAGE D'UN MODELE :

Parmi les avantages d'un modèle on site :

- L'exploitation des données expérimentales, exprimants 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.2.5.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 :

$$Y = A \cdot X + B \quad (\text{III.2})$$

Un modèle est linéarisable s'il peut être ramener à la forme (III.2) 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.2.5.1.Méthode des moindres carrés [1][8][12][25]:

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 fonction analytique [25].

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 (III2). Où les constantes A et B sont données par :

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

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

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 :

$$Y - \bar{Y} = \frac{S_{XY}}{S_X^2} (X - \bar{X}) \quad \text{(III.3)}$$

III.2.6.VALIDITE DU MODELE [8][25]:

III.2.6.1.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 : $R = \frac{S_{XY}}{S_X \cdot S_Y}$

De l'équation (III.3), on aura : $\frac{Y - \bar{Y}}{S_Y} = R \cdot \frac{X - \bar{X}}{S_X}$

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.2.6.2.Test de corrélation :

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

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

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

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

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 .

(D): Droite de régression .

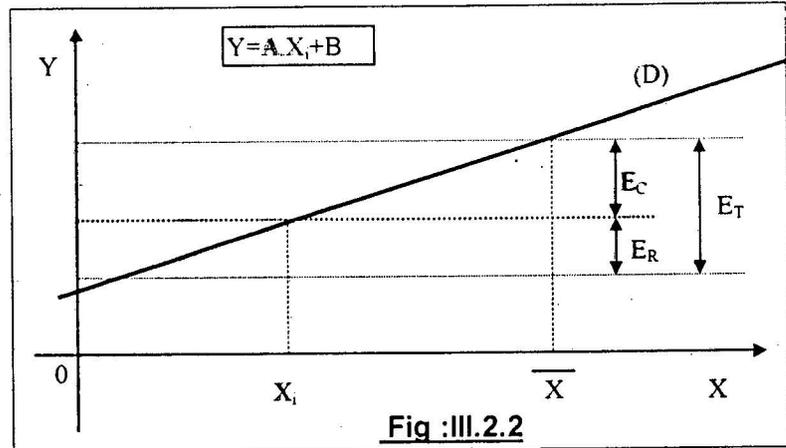


Fig :III.2.2

III.2.7.PRECISION D'UNE CORRELATION « INTERVALLE DE PREDICTION» [8][25]:

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 par:

$$Y_i \pm U_{1-\alpha/2} \cdot \sqrt{V_R}$$

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

V_R : variance résiduelle, préalablement calculée.

III.3.REGIME DES DEBITS LIQUIDES :

III.3.1.INTRODUCTION :

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.

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, polygonales, cumulatif...).

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.

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).

III.3.2.COURBE DES DEBITS CLASSES [2][10][24]:

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 soit décroissantes, la courbe représentative obtenue est dite «courbe des débits classées».

III.3.2.1.Construction géométrique de la courbe des débits classés [2]:

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.

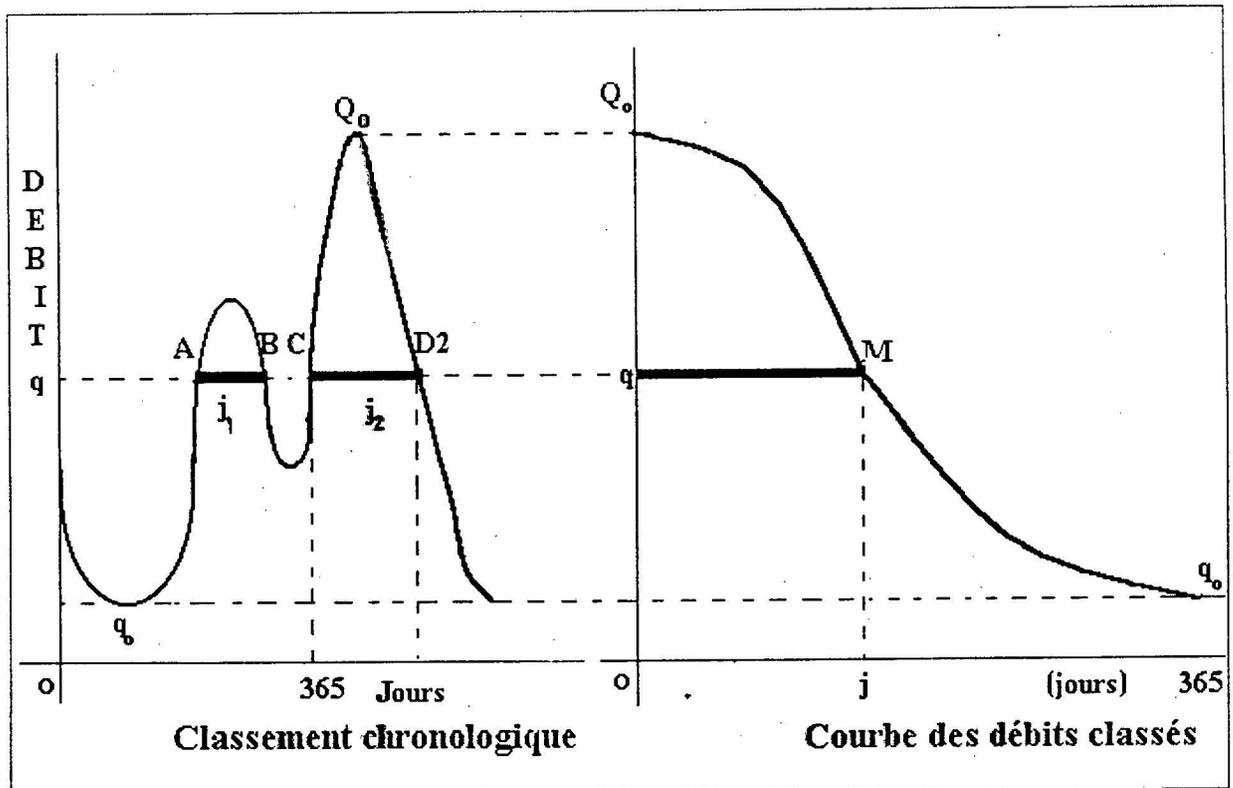


Fig.III.3.1 : Construction géométrique de la courbe des débits classés

On peut tracer directement la courbe des débits classés à partir de la courbe du classement chronologique, comme le montre la fig : 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 [2].

III.3.2.2.Courbe relative à N années[2][24]:

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 fig III.3.2.

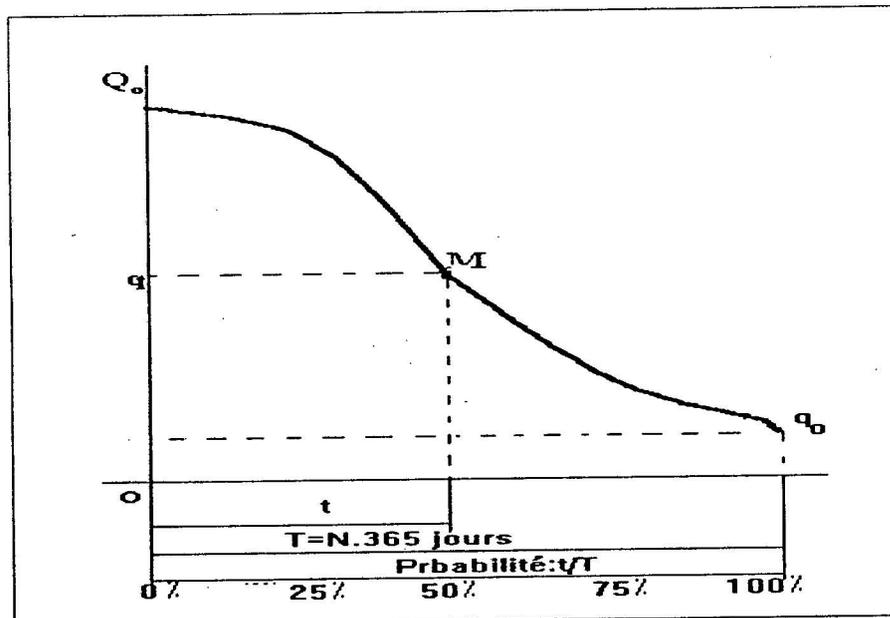


Fig.III.3.2 : courbes des débits classés relative à N années

III.3.3.ESTIMATION DES LOIS DE PROBABILITES DES VARIABLES CAUSES :

Elle se fait en plusieurs étapes :

III.3.3.1.Répartition de la statistique d'observation en classes [13][15]:

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

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

N : Taille de l'échantillon.

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

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

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

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+H

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

III.3.3.2. 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

Tab :III.3.1

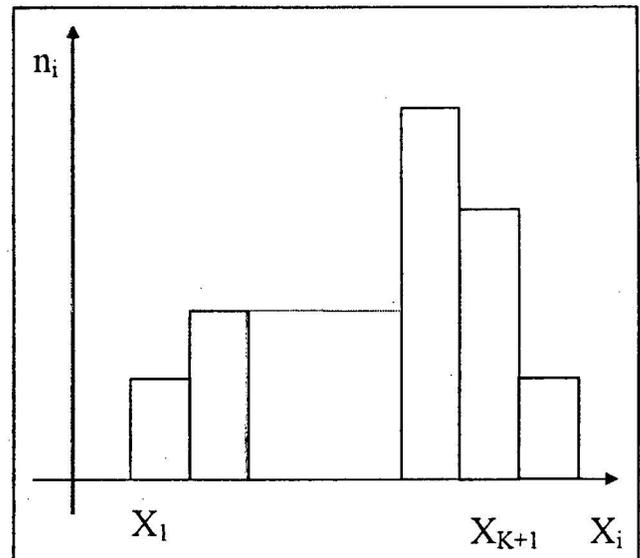


Fig :III.3.3 : histogramme des fréquences

III.3.3.3. Courbes de fréquences des débits :

Nous pouvons tracer, en joignons les milieux des cotés 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 [15].

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 ».

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

III.3.4.AJUSTEMENT A UNE COURBE DE DISTRIBUTION THEORIQUE DES FREQUENCES:

D'une utilisation très répandue aujourd'hui ; des méthodes d'ajustements 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 [10][13][15].

REMARQUE :

- ◆ Pour les débits moyens journaliers GIBRAT a montré que la distribution de GALTON s'adapte mieux pour de nombreuses rivières [24].
- ◆ L'ajustement est indispensable dans le cas où la période d'observation est relativement étroite (< 20 ans)[13][24].

III.3.5.ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSIONS :

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 ».

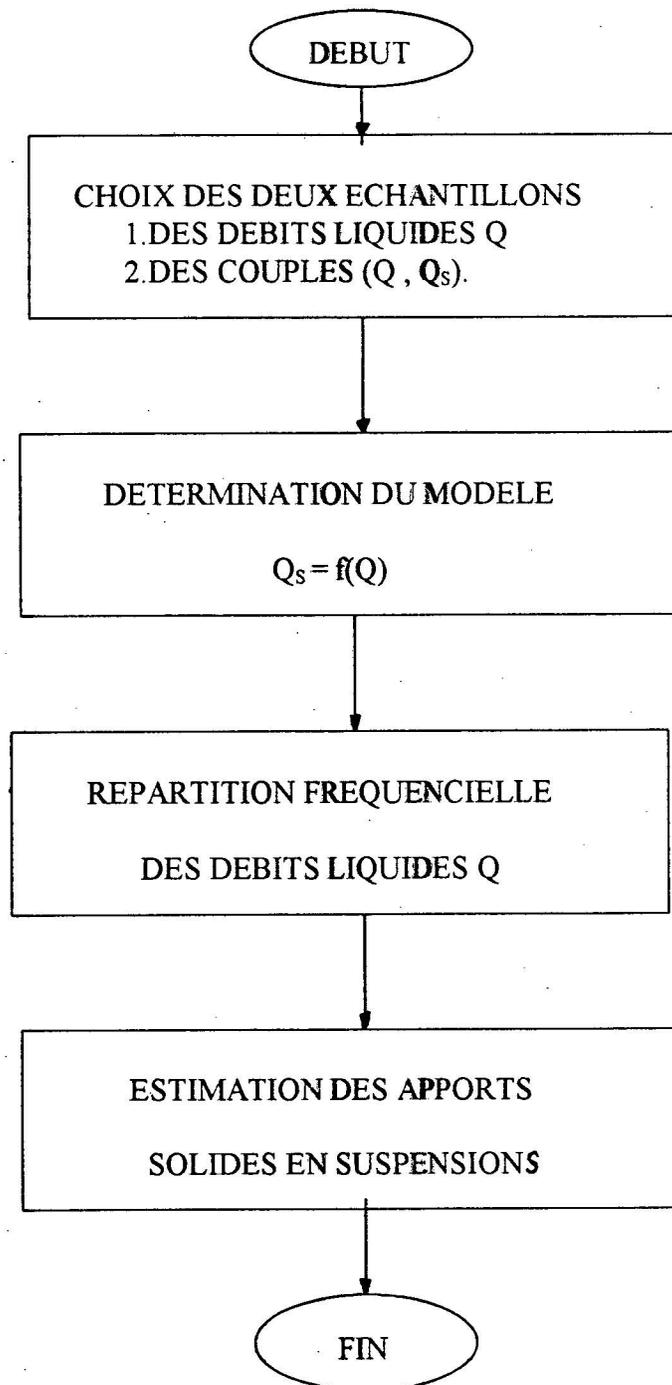
⇒ Evaluer le débit solide moyen inter-annuel par :
$$Q_{sm} = \sum_{i=1}^n Q_{si} \cdot (f_{i+1} - f_i)$$

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

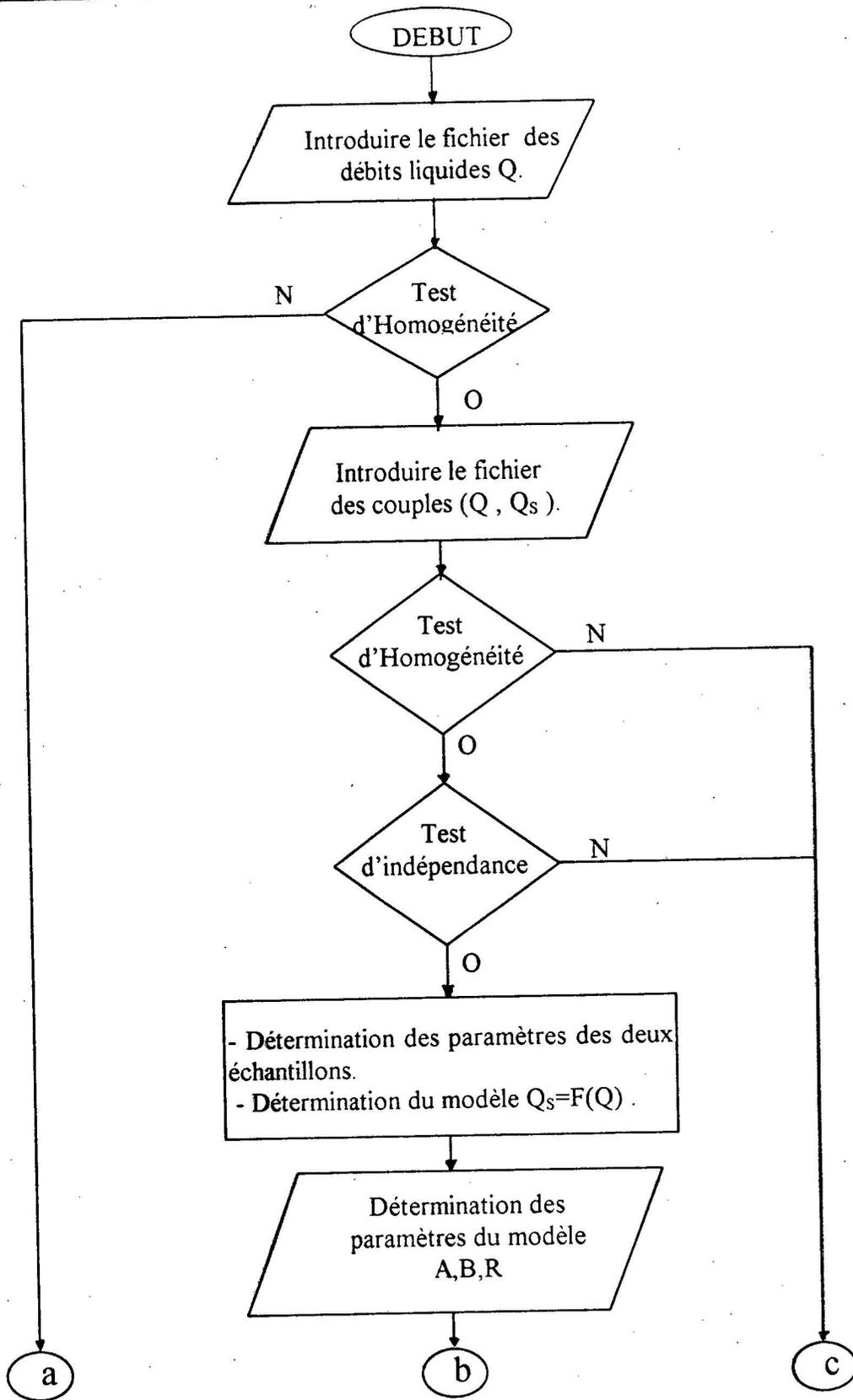
III.4.ORGANIGRAMMES DE TRAVAIL :

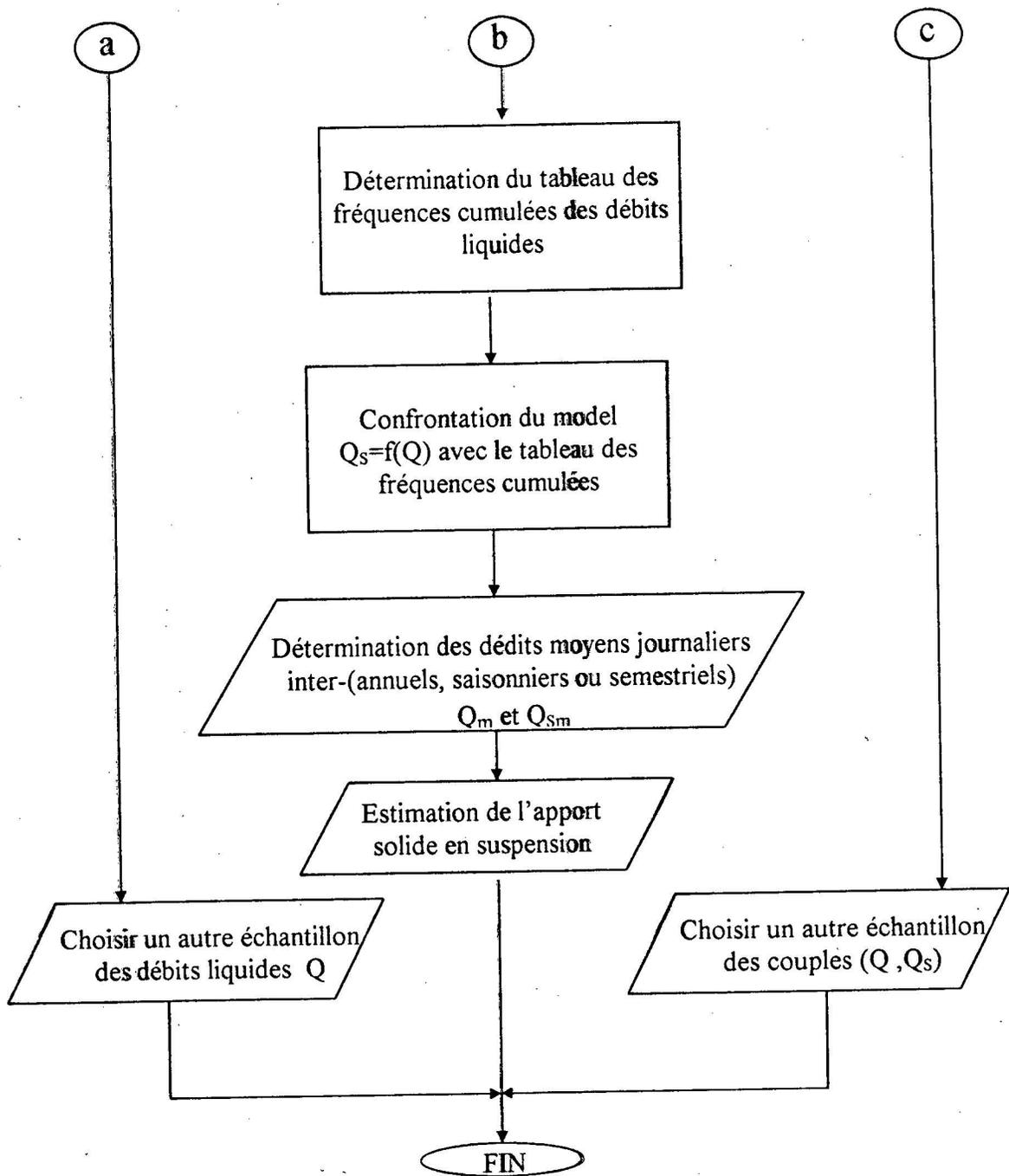
Vu l'importance des tailles des fichiers des données contribuant au phénomène en question ainsi que les modes d'estimation envisagés ; un programme de calcul automatique a été spécialement conçu dont les organigrammesci-dessous :

- (1) Organigramme sommaire.
- (2) Organigramme général.
- (3) Organigramme de choix des échantillons.
- (4) Organigramme d'élaboration d'un modèle .
- (5) Organigramme d'étude fréquentielle des débits liquides .
- (6) Organigramme d'estimation des apport solides en suspensions.

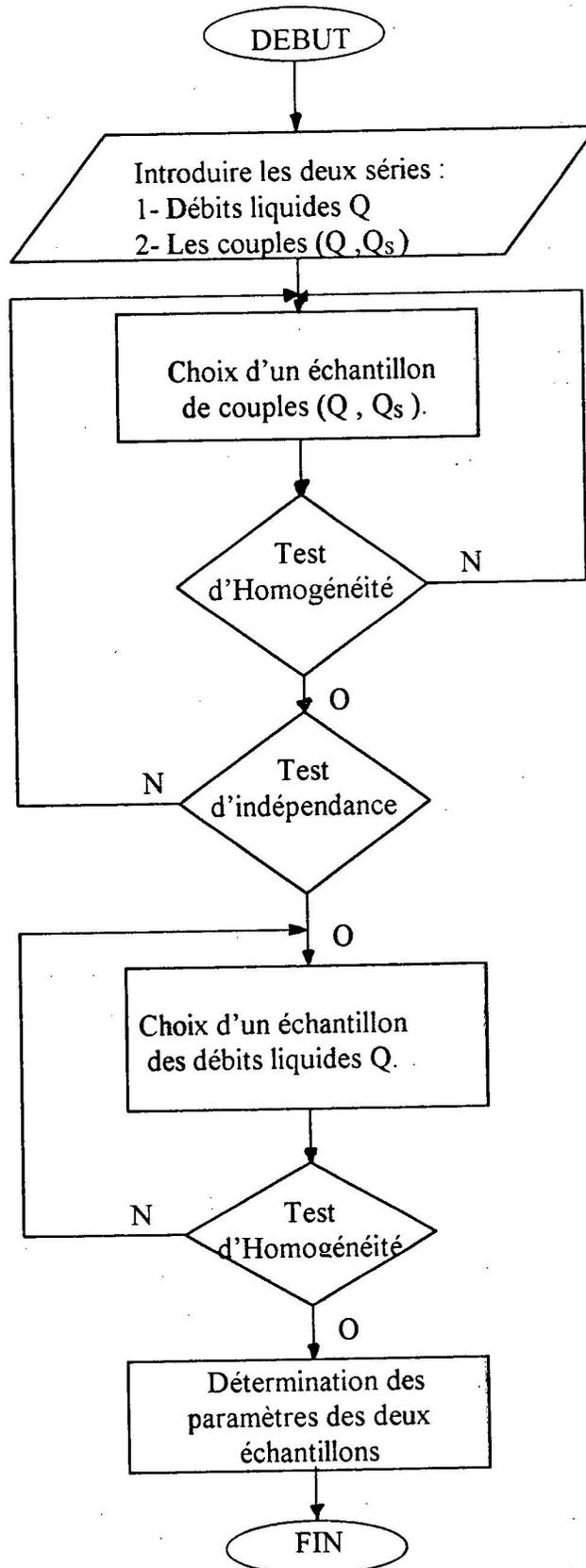
III.4.1. ORGANIGRAMME SOMMAIRE :

III.4.2.ORGANIGRAMME GENERAL :

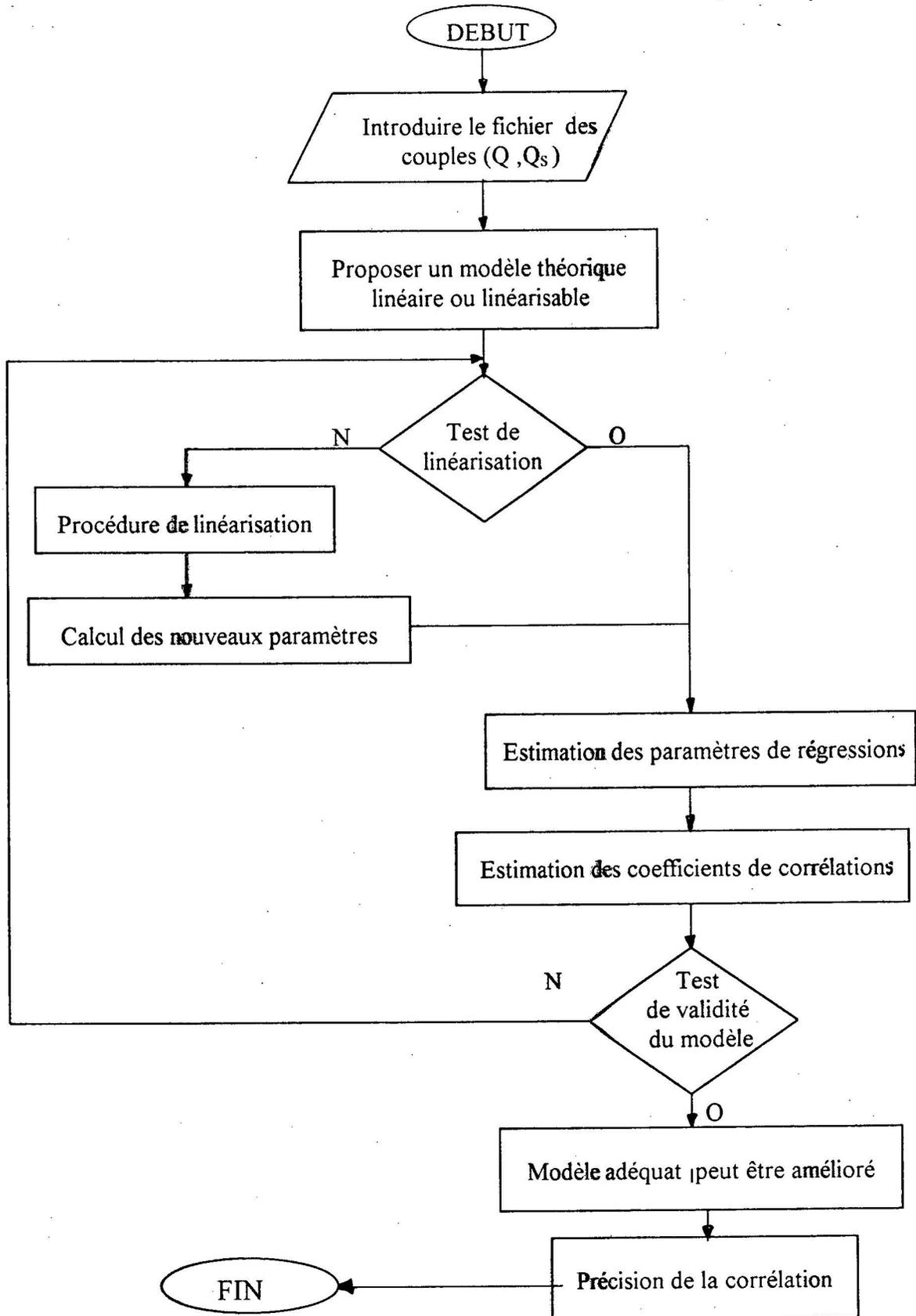




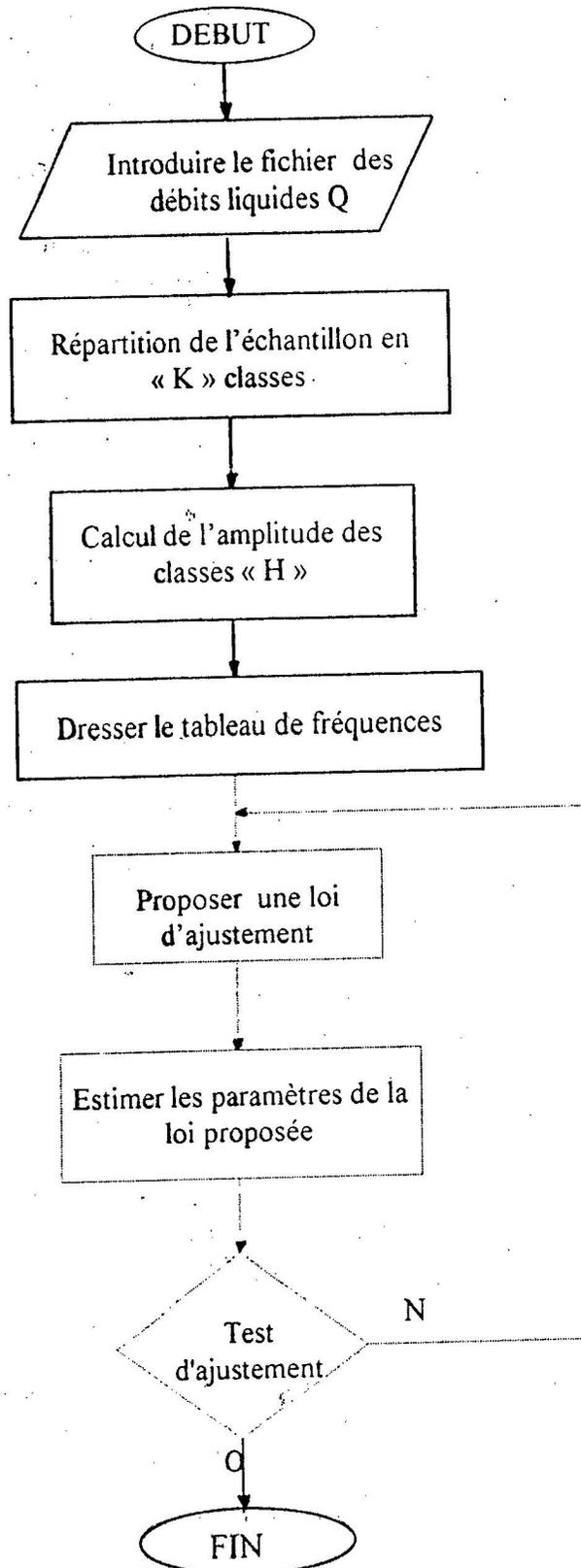
III.4.3.ORGANIGRAMME DE CHOIX DES ECHANTILLONS :

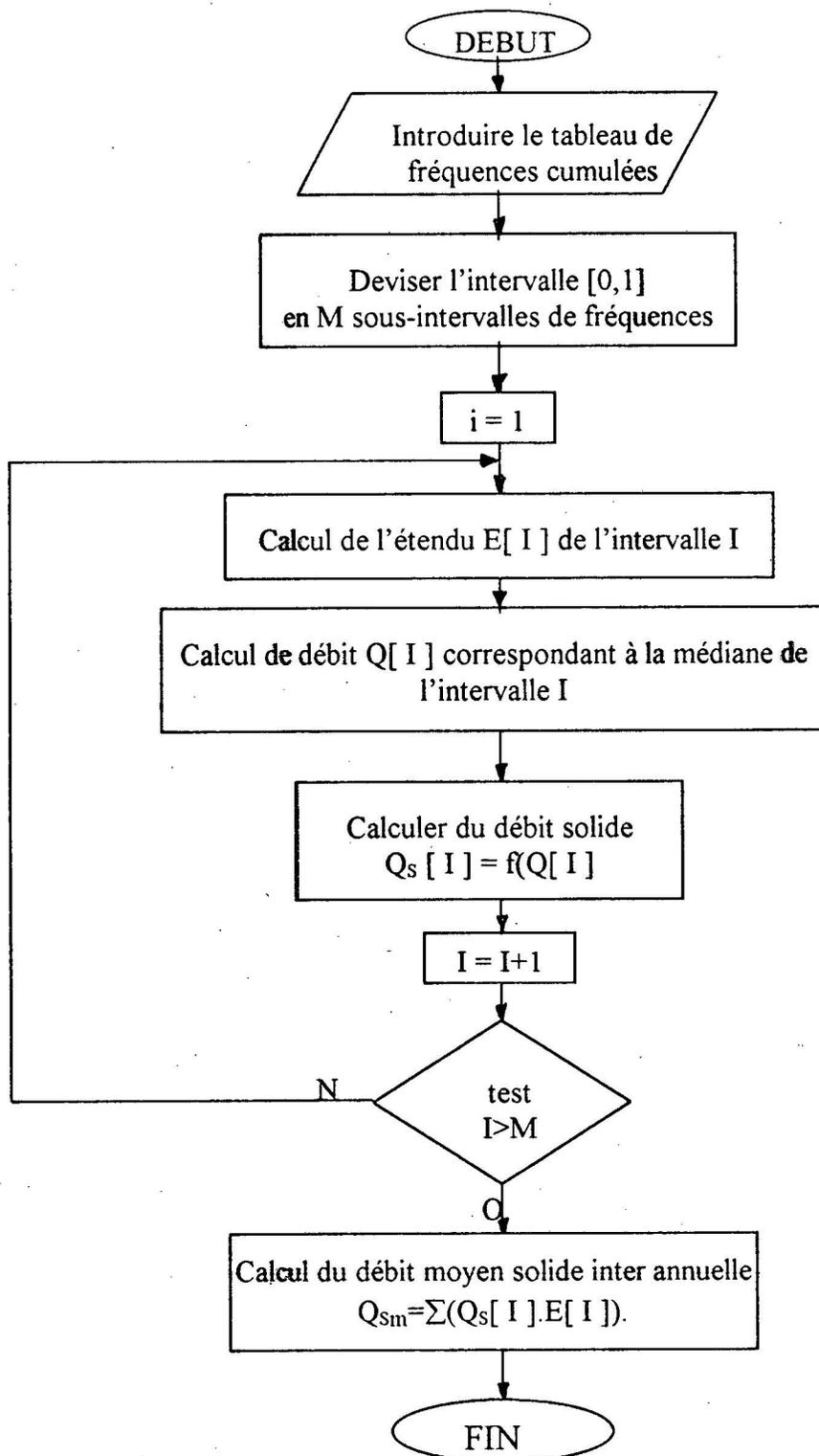


III.4.4.ORGANIGRAMME D'ELABORATION D'UN MODELE :



III.4.5.ORGANIGRAMME D'ETUDE FREQUENCIELLE DES DEBITS LIQUIDES



III.4.6. ORGANIGRAMME D'ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN SUSPENSION

CHAPITRE IV

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

IV.1.PRESENTATION DE LA ZONE D'APPLICATION :

Le bassin de CHELLIF est situé au Nord-Ouest de l'Algérie, il est le plus grand bassin du Nord, c'est l'un des plus érodés de l'ALGERIE, avec une superficie totale de 43700 Km² ; Dont la quasi-totalité des sols sont alluviaux et calluviaux 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.

La figure (IV.1.1) présente la carte du bassin fluvial avec quelque 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-CHELIF et RELIZANE, situées respectivement en haut, moyen et bas CHELLIF.

TABLEAU .IV.1.1 : PLUVIOMETRIE MENSUELLE MOYENNE

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 sillonné par le plus important des oueds du territoire national ; Oued CHELIF 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, bordé 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 [7].

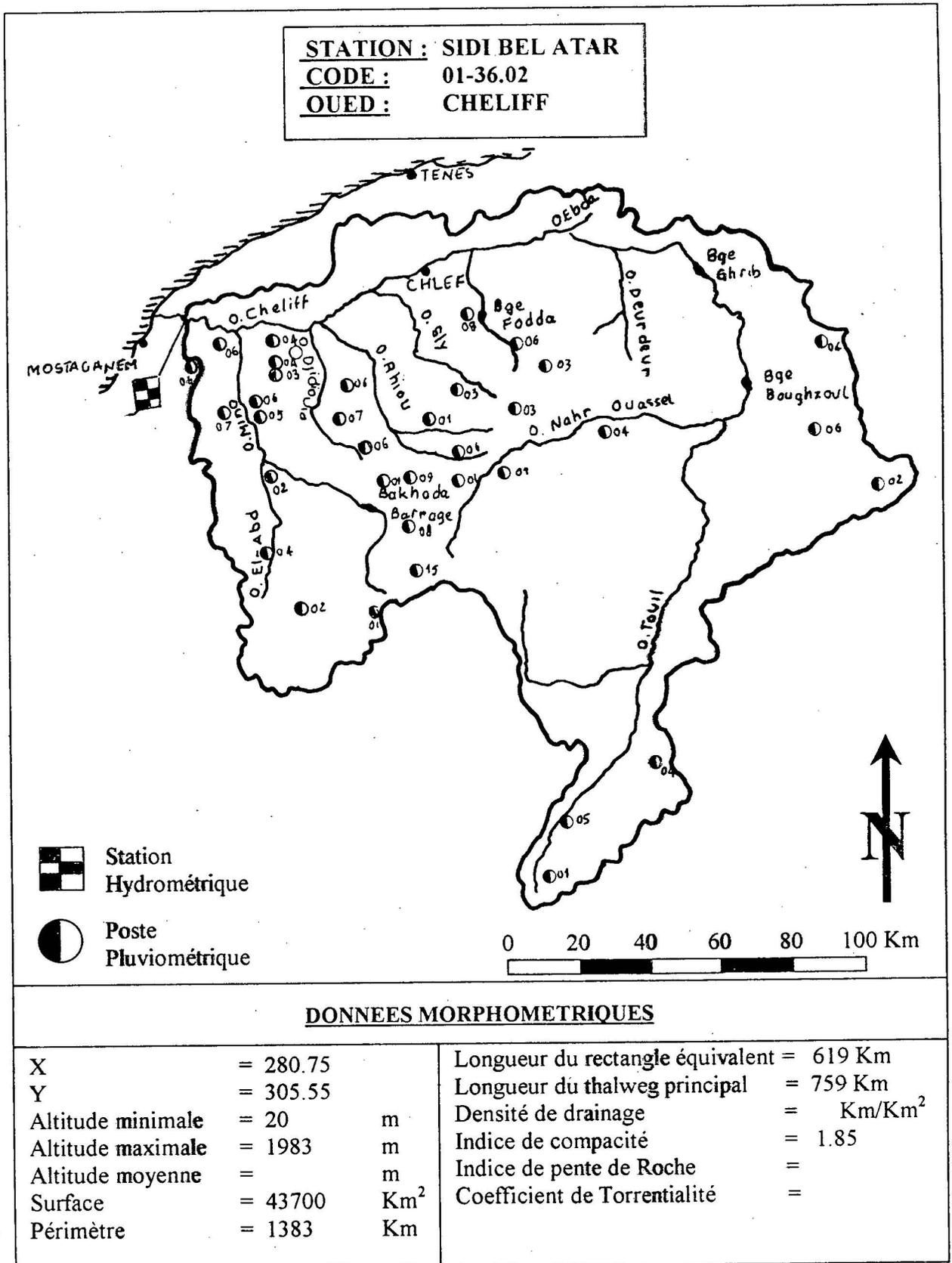


FIG.IV.1.1 : DONNEES MORPHOMETRIQUES

IV.2. COLLECTE ET DEPOUILLEMENT DE DONNEES :

Le but majeure 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. 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 exigées par L'A.N.R.H. (Agence nationale des ressources hydrauliques), deux 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)).

Tous ces fichiers sont réalisés sur une période s'étalant de 1972 à 1996. En érigeant ces deux fichiers de bases, il a été remarqué que les concentrations en matières solides en suspensions étés très élevées en périodes de crues, c.à.d 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'est imposée.

IV.3. ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES :

Notre étude sera menée par deux modes d'estimation :

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

IV.3.1. ESTIMATION DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION A PARTIR DES DEBITS MOYENS JOURNALIERS :

IV.3.1.1. Données sur les sédiments :

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).

IV.3.1.2. Données sur les débits liquides du cours d'eau :

Les relevés des débits liquides effectués à la station de jaugeage de SIDI BEL-ATAR sont saisis 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.

IV.3.1.3. Recherche de relation entre débits solides en suspension et débits 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 :

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

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

Q : débit liquide en m³/s.

Q_s : débit solide en suspension Kg/s.

➤ Des calculs élémentaires conduisent au résultats suivants :

TABLEAU .IV.3.1 : 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 (IV.3.1) montre le nuage de points et la droite de régression pour une application annuelle.

IV.3.1.4. Courbe des débits classés :

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

Dont les caractéristiques estimées sont :

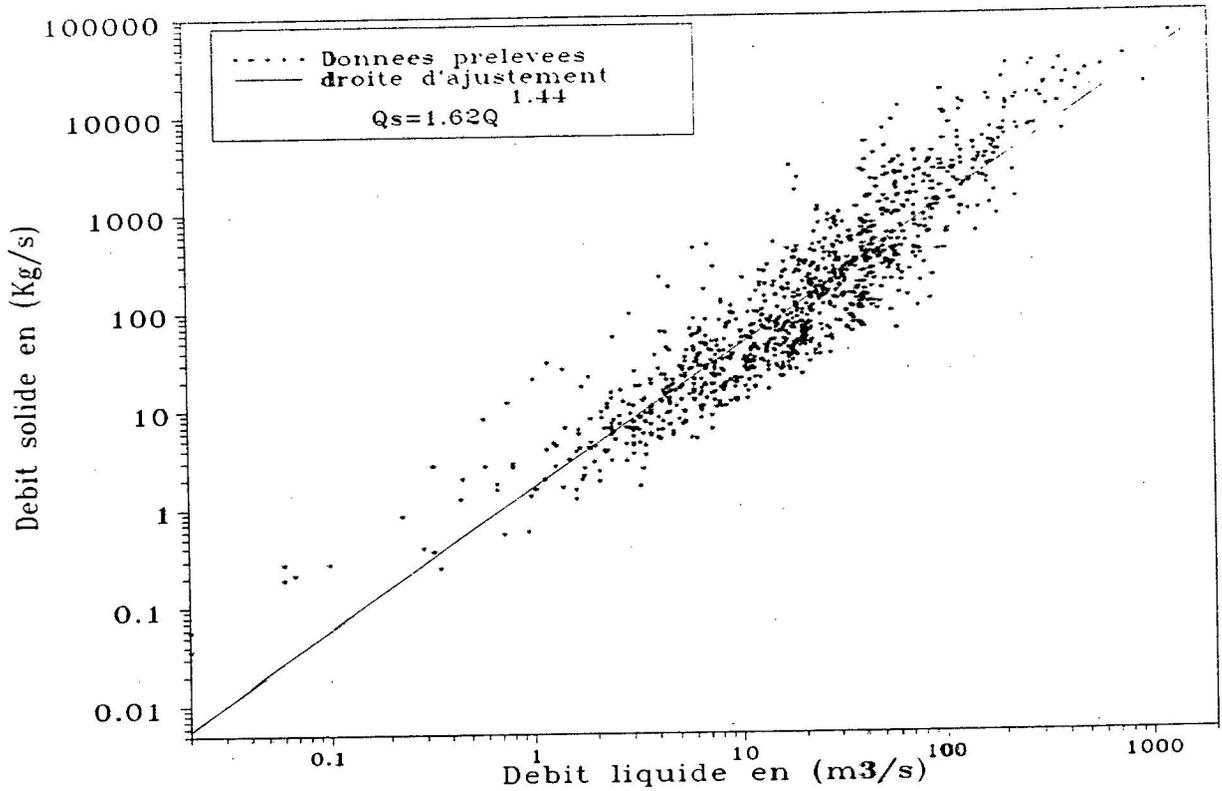
- La moyenne $Q_{\text{moy}} = 32,14 \pm 1,91 \text{ m}^3/s$.
- L'écart type : $S = 77,47 \pm 1,35$.

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 (IV.3.2).

IV.3.1.5. 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 fournit 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 (IV.3.2), qui nous permettront 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.



**FIG.IV.3.1 : DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
(BASSIN DE CHELLIF, TOUTE L'ANNEE)**

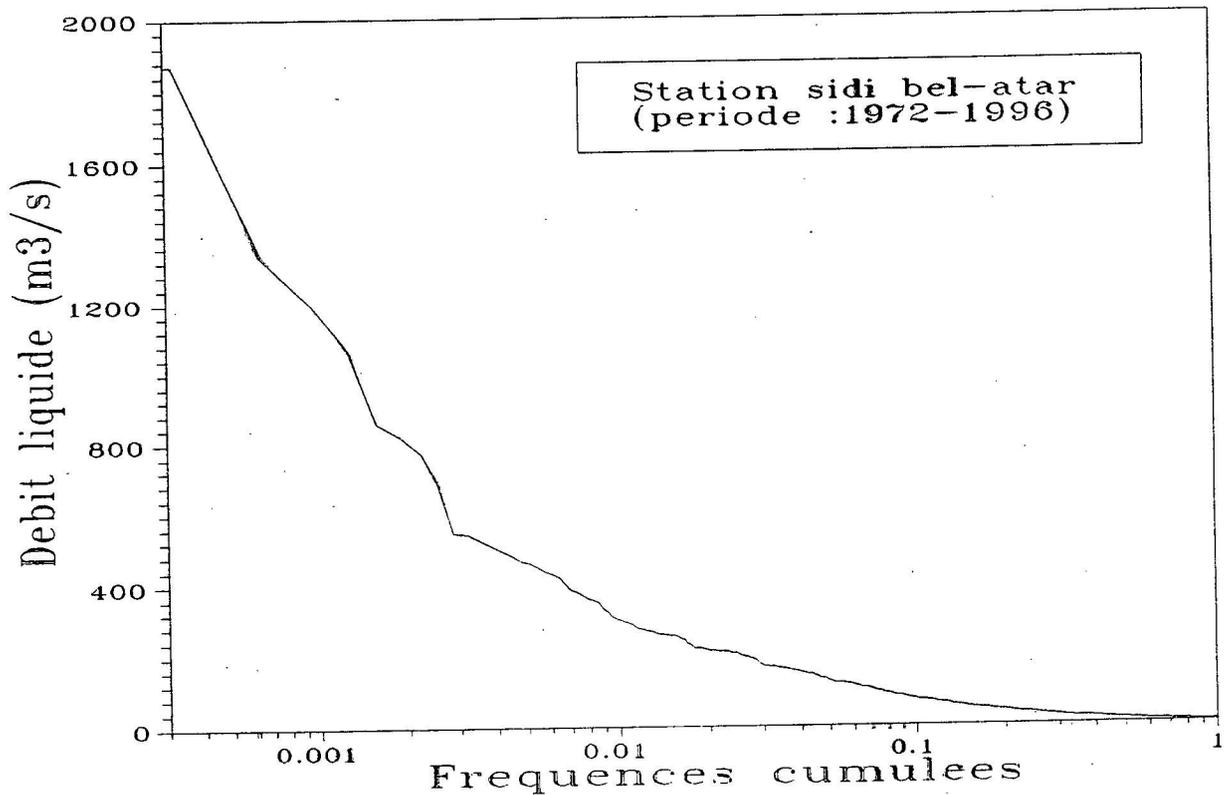


FIG.IV.3.2 : COURBE DES DEBITS CLASSES (BASSIN DE CHELLIF, TOUTE L'ANNEE)

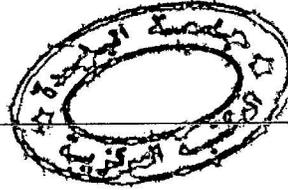


TABLEAU .IV.3.2 : CALCUL DES DEBITS LIQUIDE ET SOLIDE MOYEN INTER - ANNUEL

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 :

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

3) Calcul de la concentration moyenne annuelle :

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

IV.3.1.6. application à l'échelle saisonnière :

Compte rendu de l'influence saisonnière sur le phénomène du transport solide, ce qui 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 groupement effectués suivant les saisons :

- 1) Automne.
 - 2) Hiver.
 - 3) Printemps.
 - 4) Eté.
 - 5) Saison humide (automne et hiver).
 - 6) Saison sèche (printemps et été).
- Le tableau (IV.3.3) résume les paramètres de l'échantillon des couples de valeurs (Q, Q_s) pour chaque saison.

TABLEAU .IV.3.3 : CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS (Q, Q_s)

Saison	Nbre de couples	Moyenne \bar{X}	Moyenne \bar{Y}	Ecart type S_x	Ecart type S_y	Covariance S_{xy}
1	360	1.28 ± 0.05	2.37 ± 0.10	0.49 ± 0.03	0.99 ± 0.07	0.46
2	488	1.52 ± 0.04	2.28 ± 0.07	0.49 ± 0.03	0.86 ± 0.05	0.40
3	258	1.24 ± 0.05	1.98 ± 0.10	0.46 ± 0.04	0.80 ± 0.07	0.34
4	83	0.30 ± 0.14	1.06 ± 0.23	0.66 ± 0.10	1.09 ± 0.16	0.63
5	725	1.40 ± 0.04	2.19 ± 0.06	0.53 ± 0.03	0.91 ± 0.47	0.45
6	341	1.01 ± 0.07	1.75 ± 0.10	0.65 ± 0.05	0.97 ± 0.07	0.57

- Le tableau (IV.3.4) illustre les valeurs des coefficients de régressions 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 Annexe (B) selon l'ordre.

TABLEAU .IV.3.4 : RELATIONS SAISONNIERES

Saison	Nbre de couples	Coefficients de la régression			Coefficient de Corrélation	Intervalle prédiction	Relation
		A	B	k			
1	360	1.88	-0.04	0.91	94 %	± 4.61	0.91 Q ^{1.88}
2	488	1.64	-0.23	0.59	94 %	± 3.77	0.59 Q ^{1.64}
3	258	1.57	0.03	1.07	91 %	± 6.54	1.07 Q ^{1.57}
4	83	1.45	0.62	4.17	87 %	± 11.65	4.17 Q ^{1.45}
5	725	1.58	-0.02	0.95	93 %	± 4.53	0.95 Q ^{1.58}
6	341	1.32	0.42	2.63	90 %	± 6.78	2.63 Q ^{1.32}

- Le tableau (IV.3.5) donne les tailles et les paramètres estimés des séries saisonnières.
- Les tracés des courbes des débits classés saisonnières sont mentionnés en Annexe(A) selon l'ordre.

TABLEAU .IV.3.5 : SERIES SAISONNIERES DES DEBITS LIQUIDES MOYENS JOURNALIERS

Saison	Taille	Moyenne avec intervalle de confiance	Ecart type avec intervalle de confiance
1	2196	12.34 ± 1.23	29.50 ± 0.87
2	2268	38.47 ± 3.10	75.27 ± 2.19
3	2280	18.55 ± 2.45	59.69 ± 1.73
4	2268	1.81 ± 0.01	2.04 ± 0.07
5	4484	25.69 ± 1.73	58.96 ± 1.22
6	4548	10.21 ± 1.25	43.12 ± 0.88

- Le tableau (IV.3.6) donne les estimations des débits liquides et solides en suspensions, moyens journaliers inter – saisonniers ; calculés suivant les étapes citées préalablement ; ainsi que les apports solides en suspension en décolants.

TABLEAU .IV.3.6 : APPORTS SAISONNIER EN SEDIMENTS EN SUSPENSION

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Q _m (m/s)	12.52	38.76	18.98	1.92	25.87	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	

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 de sédiments en suspension.

IV.3.2.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.

IV.3.2.1.Sélection de crues :

Les crues ont été sélectionnées sur la base des critères suivants [3] :

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

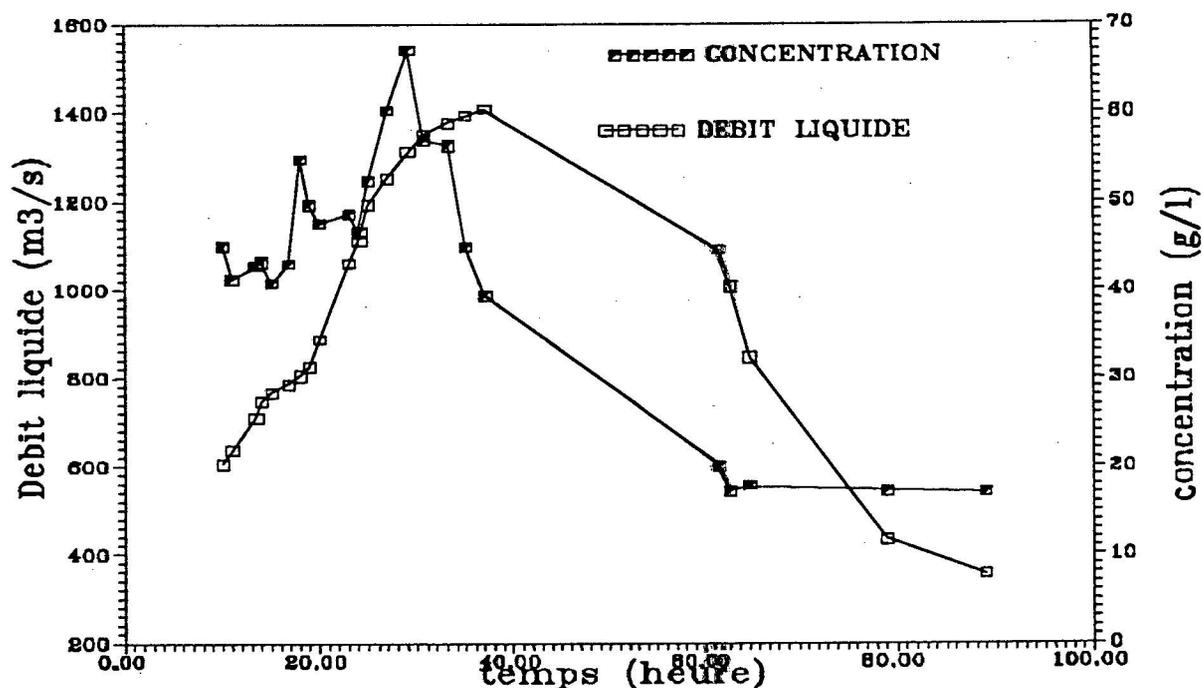
Ainsi pour le bassin de cette étude nous avons procédé au dépouillement de toutes les crues durant toute la période 1972 à 1996, qui sont de 90 crues. La durée des crues varie de 1 à 15 jours, elles varient d'une année à une autre en transportant une quantité variable de sédiments dans le temps. Il est 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.

IV.3.2.2.Les tracés de crues (hydrogramme, solidogramme et turbidigramme) :

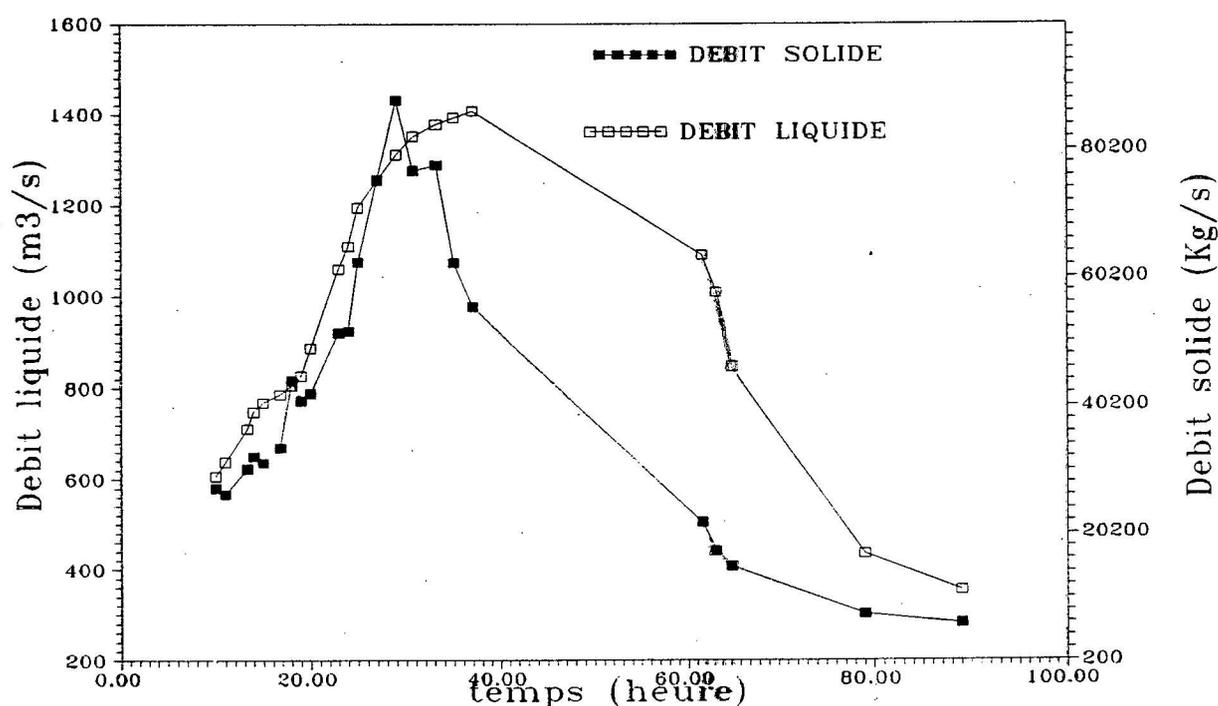
Afin de suivre l'évolution des facteurs décrivant le transport solide durant la période d'une crue différents tracés sont utilisés :

- 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 suspensions durant les crues.

La figure (IV.3.3) et la figure (IV.3.4) 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.



**Fig.IV.3.3 : SOLIDOGRAMME DE LA CRUE DU 02 AU 05/02/1979
(OUED CHELIFF, BASSIN DE CHELIFF, STATION DE SIDI BEL-ATAR)**



**Fig.IV.3.4 : HYDROGRAMME ET TURBIDIGRAMME DE LA CRUE DU 02 AU 05/02/1979
(OUED CHELIFF, BASSIN DE CHELIFF, STATION DE SIDI BEL-ATAR)**

IV.3.2.3. Estimation des apports solides à partir des crues (dans leurs intégralités) :

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 groupements 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 vue leurs raretés en cette saison.

IV.3.2.4. Données sur les sédiments :

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, saisonnier , semestriel).

IV.3.2.5. Caractéristiques des échantillons de couples (Q, Q_s) :

Le tableau (IV.3.7) résume les paramètres des échantillons des couples de chaque fichier.

TABLEAU .IV.3.7 : CARACTERISTIQUE DES ECHANTILLONS (Q, Q_s) « CRUES ENTIERES »

	Nbre de couples	Moyenne	Moyenne	Ecart type S _x	Ecart type S _y	Covariance S _{xy}
1	691	1.98 ± 0.04	3.55 ± 0.05	0.52 ± 0.03	0.62 ± 0.03	0.30
2	377	1.56 ± 0.04	3.43 ± 0.06	0.45 ± 0.06	0.64 ± 0.04	0.26
3	397	2.06 ± 0.05	3.51 ± 0.06	0.48 ± 0.03	0.62 ± 0.04	0.27
4	290	1.91 ± 0.06	3.21 ± 0.09	0.56 ± 0.05	0.77 ± 0.06	0.39
5	544	1.91 ± 0.04	3.44 ± 0.05	0.53 ± 0.03	0.66 ± 0.04	0.32
6	309	1.84 ± 0.07	3.16 ± 0.09	0.61 ± 0.05	0.80 ± 0.06	0.44

IV.3.2.6.Relation entre débit liquide et débit 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 $Q_s = k \cdot Q^A$ avec $k = 10^B$

La figure (IV.3.5) 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 Annexe(C).

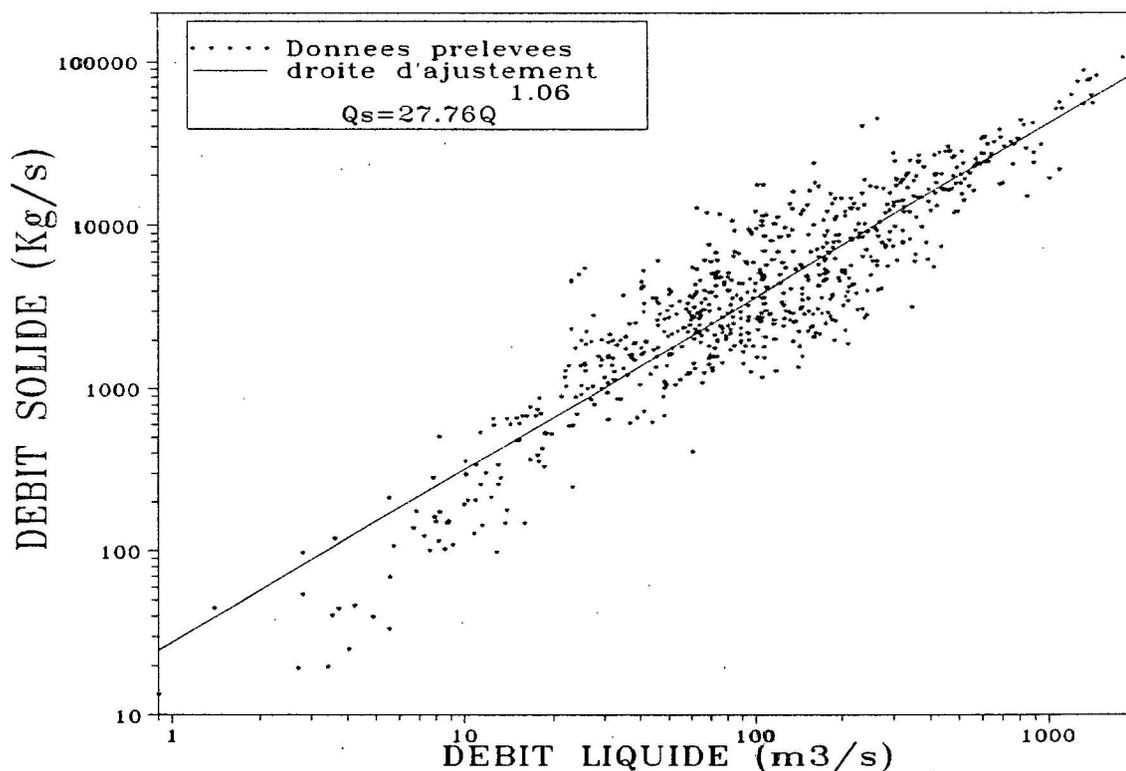


Fig.IV.3.5: DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE – DEBIT LIQUIDE (BASSIN DE CHELLIF, CRUES ENTIERE, TOUTE L’ANNEE)

Le tableau (IV.3.8) illustre les valeurs des coefficients des régressions et les modèles trouvés à chaque mode d’estimation.

TABLEAU .IV.3.8 : RELATIONS ANNUELLES ET SAISONNIERES « CRUES ENTIERES »

	Nbre de Couples	Coefficients de la régression			Coefficient Corrélation	Intervalle Prédiction	Relation
		A	B	k			
1	691	1.06	1.44	27.76	91 %	± 3.23	$27.76 Q^{1.06}$
2	377	1.26	1.46	28.62	91 %	± 3.37	$28.62 Q^{1.26}$
3	397	1.19	1.05	11.13	92 %	± 3.10	$11.13 Q^{1.19}$
4	290	1.25	0.82	6.60	91 %	± 4.43	$6.60 Q^{1.25}$
5	544	1.15	1.25	18.65	91 %	± 3.38	$17.65 Q^{1.15}$
6	309	1.15	1.04	10.91	89 %	± 5.28	$10.91 Q^{1.15}$

IV.3.2.7. Apport solide en suspension :

Les modèles $Q_s = k \cdot Q^A$ combiné avec leurs courbes des débits classés respectives (voir paragraphe IV.3.1.5) « les courbes de la fig.(IV.3.2) et celles rangées en **Annexe (A)** », 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 (IV.3.9).

TABLEAU .IV.3.9 : APPORTS SAISONNIER EN SEDIMENTS EN SUSPENSION

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Q_m (m/s)	32.440	12.590	38.760	18.980	25.870	10.470
Q_{sm} (Kg/s)	1205.540	996.170	1076.80	394.780	876.200	216.670
Q_{ss} (millions tonnes/an)	37.73	19.455			17.230	
T_s (tonne/Km ² /an)	863.360	445.210			394.330	

IV.3.2.8. Estimation des apports solides par dissociation de crues « en montée 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 dissociations 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 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.

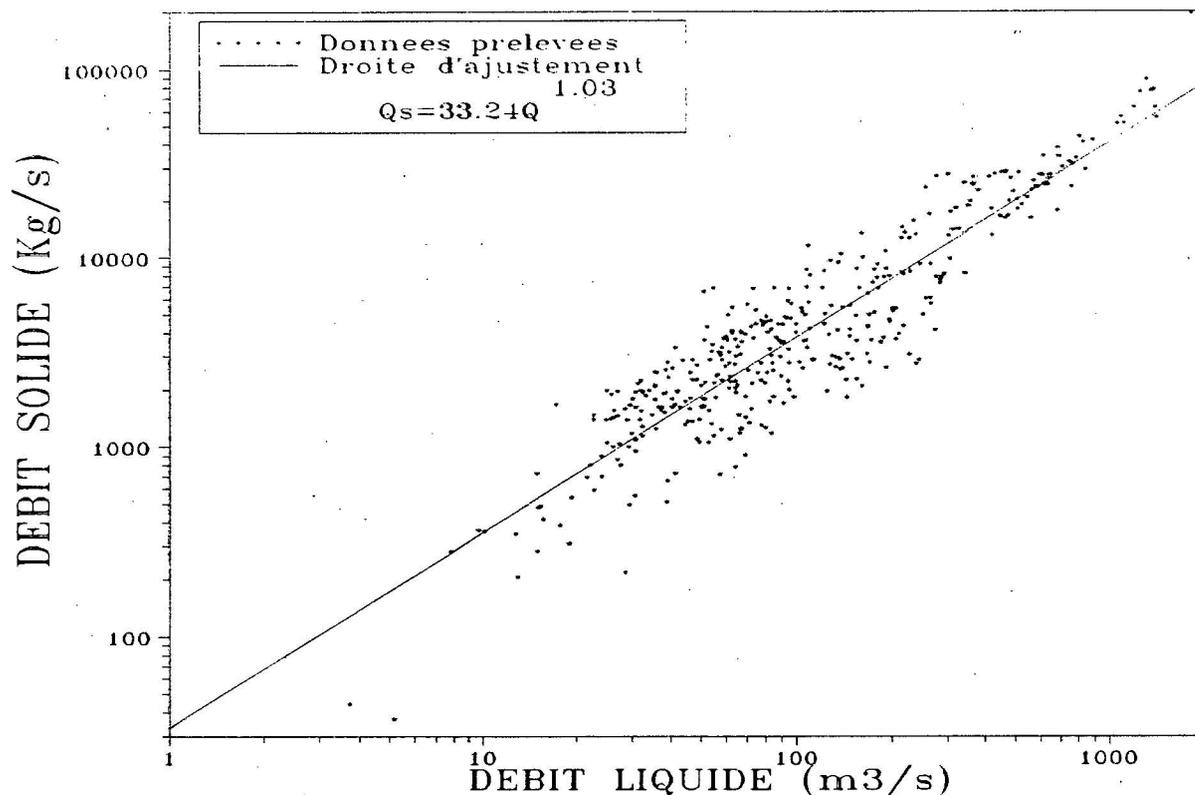
Selon le mode d'estimation des fichiers correspondants sont dressés.

Le tableau (IV.3.10) résume les paramètres estimés des échantillons de chaque fichier.

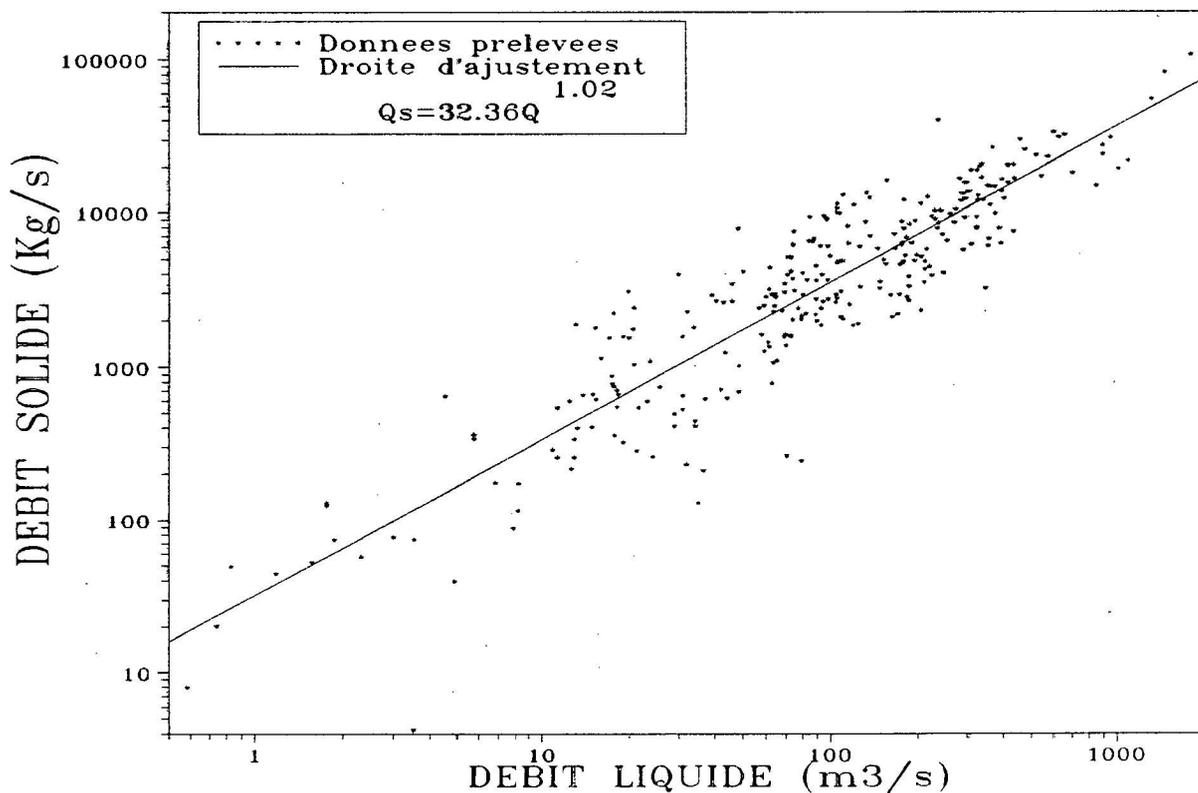
TABLEAU IV.3.10 : CARACTERISTIQUE DES ECHANTILLONS (Q, Q_s) « CRUES DISSOCIEES »

	Type	Nbre de Couples	Moyenne	Moyenne	Ecart type S _x	Ecart type S _y	Covariance S _{xy}
1	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
2	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
3	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
4	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
5	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
6	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 (IV.3.6) et (IV.3.7) 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 Annexe (C) selon leur ordre.



**Fig.IV.3.6 : DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
(BASSIN DE CHELLIF, MONTEE DES CRUES, TOUTE L'ANNEE)**



**Fig.IV.3.7 : DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
(BASSIN DE CHELLIF, DESCENTE DES CRUES, TOUTE L'ANNEE)**

Le tableau (IV.3.11) résume tous les paramètres des corrélations : $Q_s = f(Q)$.

TABLEAU .IV.3.11 : RELATIONS ANNUELLES ET SAISONNIERES « CRUES DISSOCIEES »

	Type	Nbre de Couples	Coefficients de la régression			Coefficient Corrélation	Intervalle prédiction	Relation
			A	B	k			
1	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	$32.36 Q^{1.02}$
2	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	$29.05 Q^{1.26}$
3	M	223	1.14	1.19	15.58	91 %	± 3.21	$15.58 Q^{1.14}$
	D	175	1.28	0.79	6.23	94 %	± 2.74	$06.23 Q^{1.28}$
4	M	177	1.18	1.11	12.87	95 %	± 2.90	$12.87 Q^{1.18}$
	D	116	1.50	0.10	1.27	93 %	± 3.78	$01.27 Q^{1.50}$
5	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	$18.89 Q^{1.11}$
6	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.

La confrontation du modèle : $Q_s = f(Q)$, avec la courbe des débits classés correspondant à chaque mode d'estimation, nous a permis de trouver les résultats du tableau (IV.3.12).

TABLEAU .IV.3.12 : CHARGES EN SEDIMENTS « CRUES DISSOCIEES »

	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)		(6)	
	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/Km ² /an)	863.15		445.30						390.34			

IV.4.DISCUTION DES RESULTATS :

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

- Pour l'analyse des débits moyens journaliers (IV.3.1) les coefficients en découlants à l'échelle annuelle est largement significatif du fait que 92% (IV.3.1.3) des variations des débits solides sont exprimées par le modèle (fig.IV.3.1), à l'échelle saisonnière le degré de signification varie d'une saison à une autre, il est très satisfaisant en les deux premières saisons de l'années (Automne et hiver) et saison humide respectivement 94 %, 94% et 93 % (Tab.IV.3.4) grâce à la régularité relative des apports en ces saisons, puis le degré de signification baisse (91% au printemps, 87% en été et 90% en saison sèche (Tab.IV.3.4)) sans doute à cause de l'irrégularité des apports et l'intervention de certains événements rares en ces saison.
- Pour l'analyse des crues (IV.3.2) les degrés de signification sont assez encourageant dans l'ensemble :
 - ⇒ Pour les crues dans leurs intégralité (de IV.3.2.2 à IV.3.2.7) les coefficients de corrélations varié^r de 89% à 92% avec 91% pour l'année, et des coefficients assez élevés aux saisons (de 91 % à 92%) (Tab.IV.3.8) ce qui explique l'influence des saisons sur le transport solide en suspension, il est à signalé 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.
 - ⇒ Pour l'analyse avec dissociation des crues (IV.3.2.8) le degré de signification des coefficients de corrélations est plus satisfaisant variants de 90% à 95% (Tab.IV.3.11) 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'enregistre les coefficients de corrélations les plus élevés en saisons. Sauf pour la descente des crues en saison sèche qui est de 87% (Tab.IV.3.11); dû, comme il été signalé plus haut, à l'intervention de certains événements rares à grande influence sur l'érosion et le transport solide, surtout en été.

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 résultantes, suite à la discontinuité spatio-temporelle du processus d'érosion.

La quantité des sédiments en suspensions 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.IV.3.2 et Tab.IV.3.6) sont nettement inférieurs à ceux trouvés en analyse des crues (Tab.IV.3.9 et Tab.IV.3.12) 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.IV.3.9) et dissociation des crues (Tab.IV.3.12)) 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 événements exceptionnels dont la majorité des apports (solides et liquides) sont enregistrés en ces occasions.

Enfin les résultats obtenus dans les applications paraissent énormes (entre 8.16 M.t/an (Tab.IV.3.6) et 37.73 M.t /an (tab.IV.3.9)), cela peut s'expliquer par le fait que le bassin de CHELLIF est d'une érodabilité importante et il est d'une grande superficie (43700 Km² (fig.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.

CONCLUSION GENERALE

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 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, la détermination de la relation $Q_s = f(Q)$ et enfin la confrontation du modèle avec l'analyse fréquentielle des débits liquides pour l'estimation de l'apport solide en suspension. Ce programme permettra 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 qualifions 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.

CONCLUSION GENERALE

Dans le présent mémoire nous avons essayé de quantifier le transport solide en suspension par modélisation statistique, 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.

- 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 de crue) 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 à l'échelle saisonnières ont été menées à fin de mieux cerner le problème, vu l'influence des saisons sur le phénomène. Les résultats obtenus 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 CHELIF a des apports considérables en sédiments ($8.16 \cdot 10^6$ t/an le minimum trouvé) cela est dû à la vulnérabilité du bassin qu'il draine face à l'érosion et sa superficie importante (43700 Km^2).

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 du modèle afin de couvrir le transport par charriage.

CONCLUSION GENERALE

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 meilleur 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 cette méthode 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 choisir le mode d'estimation le plus appropriés et le calage du modèle d'estimation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[01] **ADMANE O., HOENG Ky. et OUAkli N, 1992** , Statistique (cours et exercices).

Editions Office des publications universitaires

[02] **BENBLIDIA M, 1973** , Cours d'hydrologie.

Ecole d'Ingénieurs des Travaux Publiques d'Alger, photocopié.

[03] **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.

[04] **BENHADJ M. O, 1994**, Contribution à la modélisation statistique des transports solides en suspension , Thèse d'ingénieur en Hydraulique, Ecole nationale polytechnique d'Alger .

[05] **BERBARA M. et DERRAR A,1993**, Estimation des apports solides à l'exutoire de bassin versant de TAFNA.

Thèse d'ingénieur en mathématiques appliquées, Université de Blida.

[06] **BOUVARD M, 1984**, Barrages mobiles et ouvrages de dérivation.

Edition EYROLLES, PARIS, France.

[07] **BOUKARTA M. et BELKHIRI A., 1995**, Mise au point d'une méthode de quantification automatique des apports solides, à partir des débits liquides.

Thèse d'ingénieur en génie Hydraulique, Ecole nationale polytechnique d'Alger.

[08] **BOWKER A. H, 1965**, Méthodes statistiques de l'ingénieurs.

Edition DUNOD, PARIS, FRANCE .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[09] **CHIKITA K. A, 1996**, Suspended sediment discharge from snowmelt :Ikushunbetsu River, Hokkaido, JAPAN.

Journal of Hydrologie 186 (1996), pp 255-313.

[10] **CHOW V. T, 1988**, Applied Hydrology.

Edition Mc GRAW-HILL ; SINGAPORE .

[11] **DAMMAK A, 1982**, Etude sur l'érosion et le transport solide.

Thèse de Docteur – ingénieur, Université de PARIS, France.

[12] **DROESBEKE J.J, 1988**, Eléments de statistique.

Office des publications universitaires, Alger .

[13] **DUBREUIL. P, 1974**, Introduction à l'analyse hydrologique.

Edition Masson et C^{ie} ,Paris.

[14] **DUQUENNOIS, 1969**, Sédimentations dans les barrages réservoirs et moyen de lutte. Colloque international, Université de LIEGE 4 en Mai 1969.

[15] **GOURDIN A, 1991**, Méthodes numériques appliquées.

Edition Office des publications universitaires, Alger.

[16] **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.

[17] **KASSOUL M. 1991**, Contribution à l'étude de la sédimentation des barrages en ALGERIE. Thèse d'ingénieur, Ecole nationale supérieure d'hydraulique, BLIDA.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[18] **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.

[19] **LECCE S.A., 1997**, spatial patterns of historical overbank sedimentation and flood plain evolution.

Blue River, Wisconsin, Géomorphologie 18 , pp265-277.

[20] **MACHANE K. et MAHDI T, 1993**, L'Hydraulique de la sédimentation des retenus par modèle mathématique de la formation de delta.

Thèse d'ingénieur en génie Hydraulique, Ecole nationale polytechnique d'Alger.

[21] **MERLE J. P., 1989**, Transport des sédiments (ouvrages en rivière, résultats expérimentaux).

La HOUILLE BLANCHE N° 3/4, pp 273-280.

Thèse d'ingénieur en Hydraulique, Ecole nationale polytechnique d'Alger.

[22] **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.

[23] **REMINE B, 1990**, Etude hydrodynamique du mécanisme d'envasement.

Thèse de Magister, Ecole National Polytechnique d'Alger.

[24] **RENMINIERAS G, 1979**, Hydraulique de l'ingénieur.

Edition EYROLLES, PARIS, FRANCE.

[25] **SPEGLER M. R. , 1975**, Probabilité et statistiques.

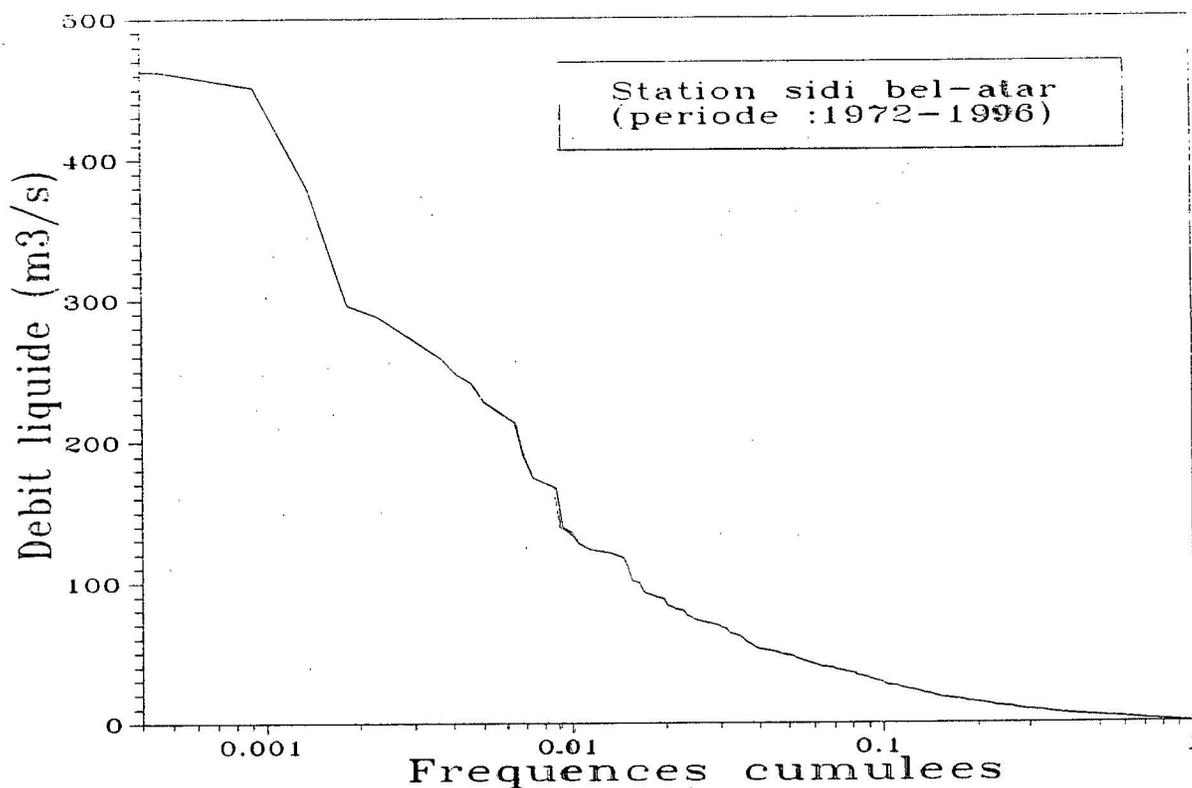
Mc GRAW-HILL Edition, NEWYORK, U.S.A.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

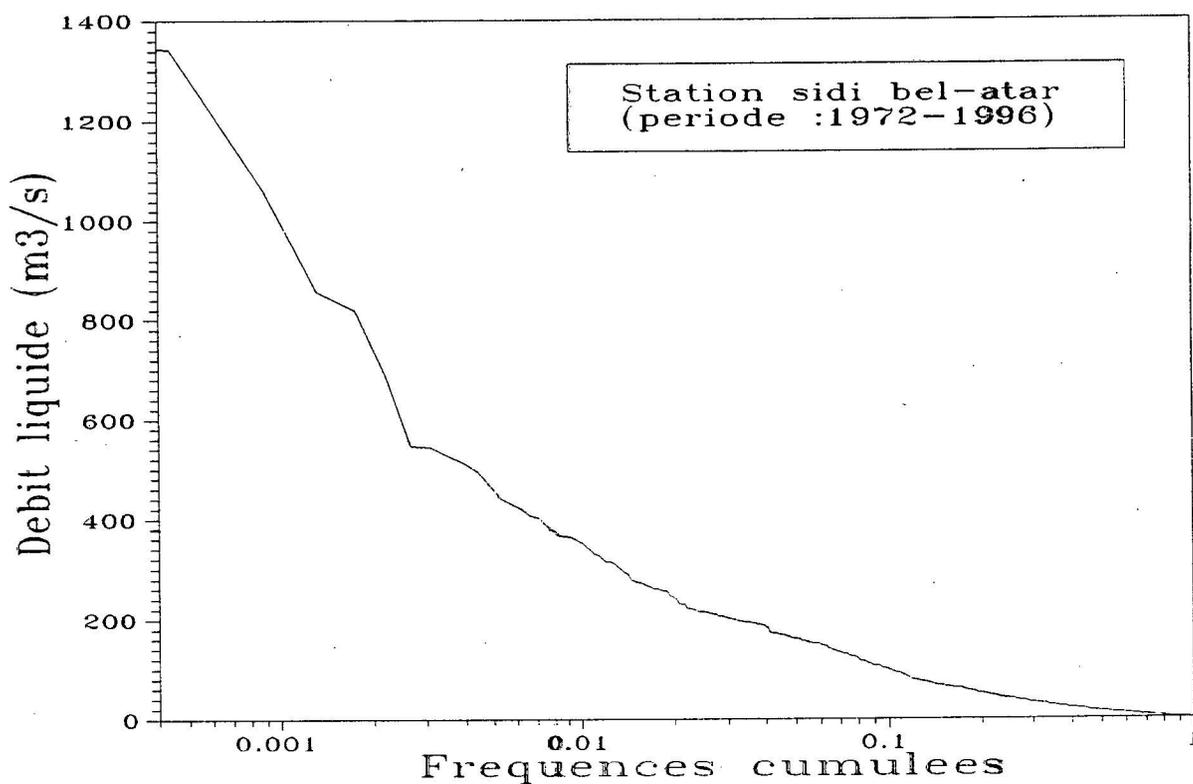
[26] UNESCO, 1989, Problème d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants.

Projet 5.3 du programme hydrologique international, rapport préparé sous la présidence de SAUDBARG A. directeur de la publication WHITE W.R.

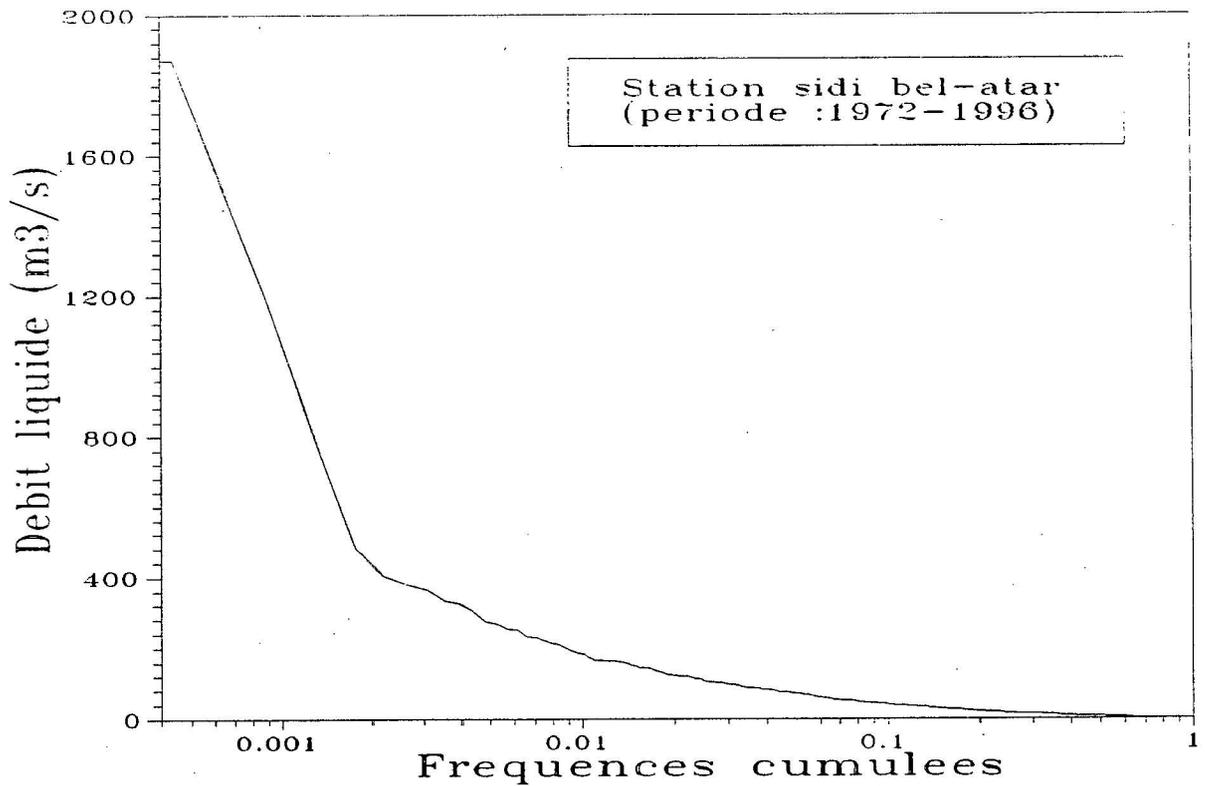
ANNEXE C



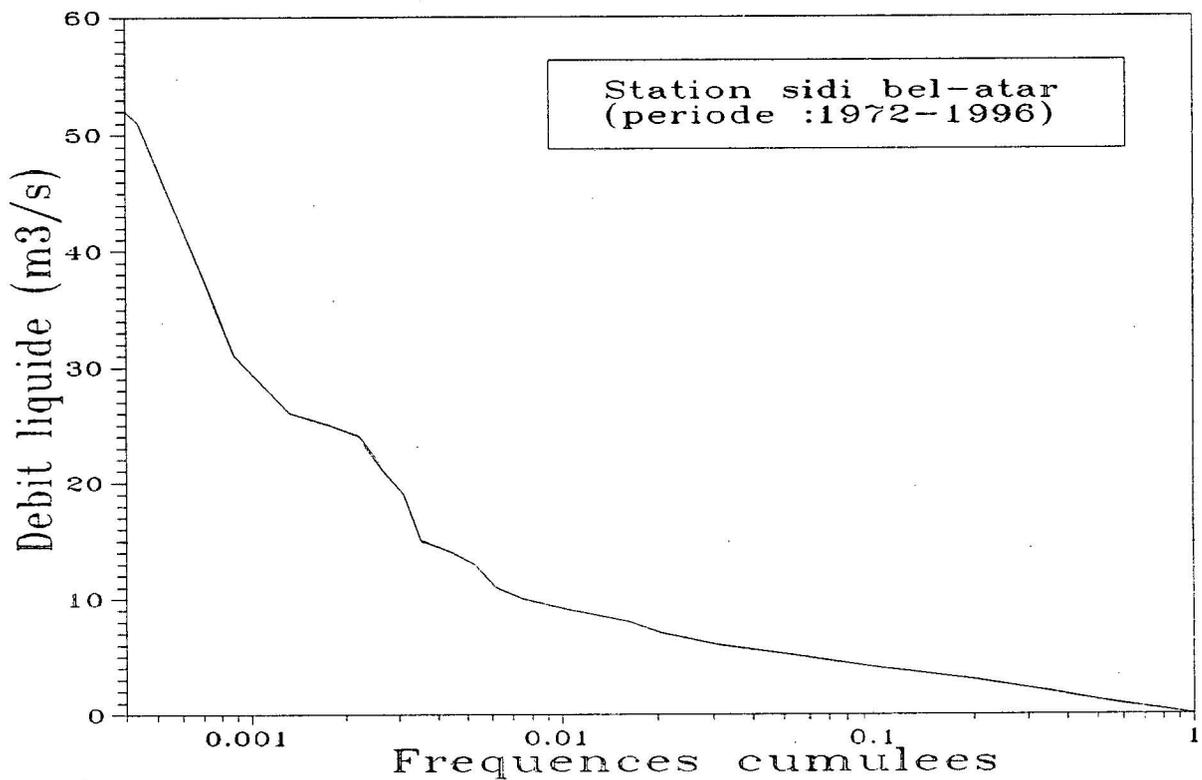
**Fig.A.1 : COURBE DES DEBITS CLASSES
(BASSIN DE CHELLIF, SAISONS D'AUTOMNES)**



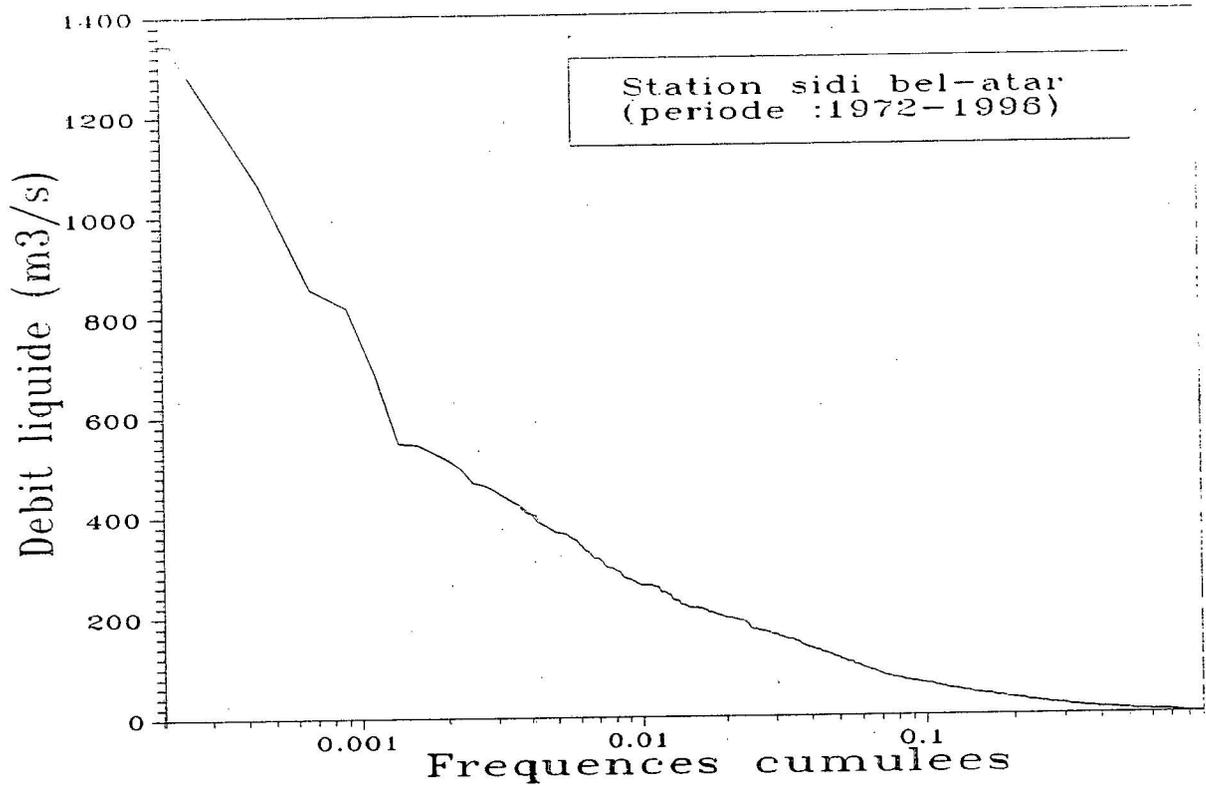
**Fig.A.2 : COURBE DES DEBITS CLASSES
(BASSIN DE CHELLIF, SAISONS D'HIVERS)**



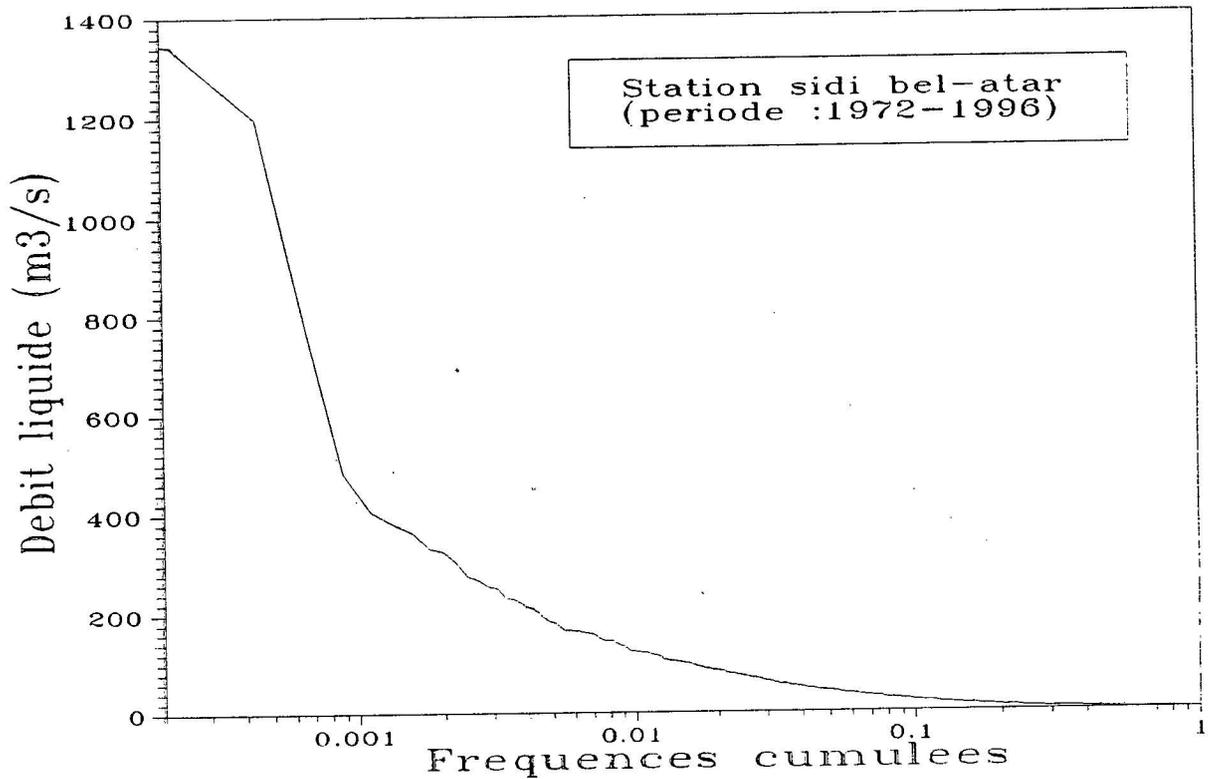
**Fig.A.3 : COURBE DES DEBITS CLASSES
(BASSIN DE CHELLIF, SAISONS DU PRINTEMPS)**



**Fig.A.4 : COURBE DES DEBITS CLASSES
(BASSIN DE CHELLIF, SAISONS D'ETES)**

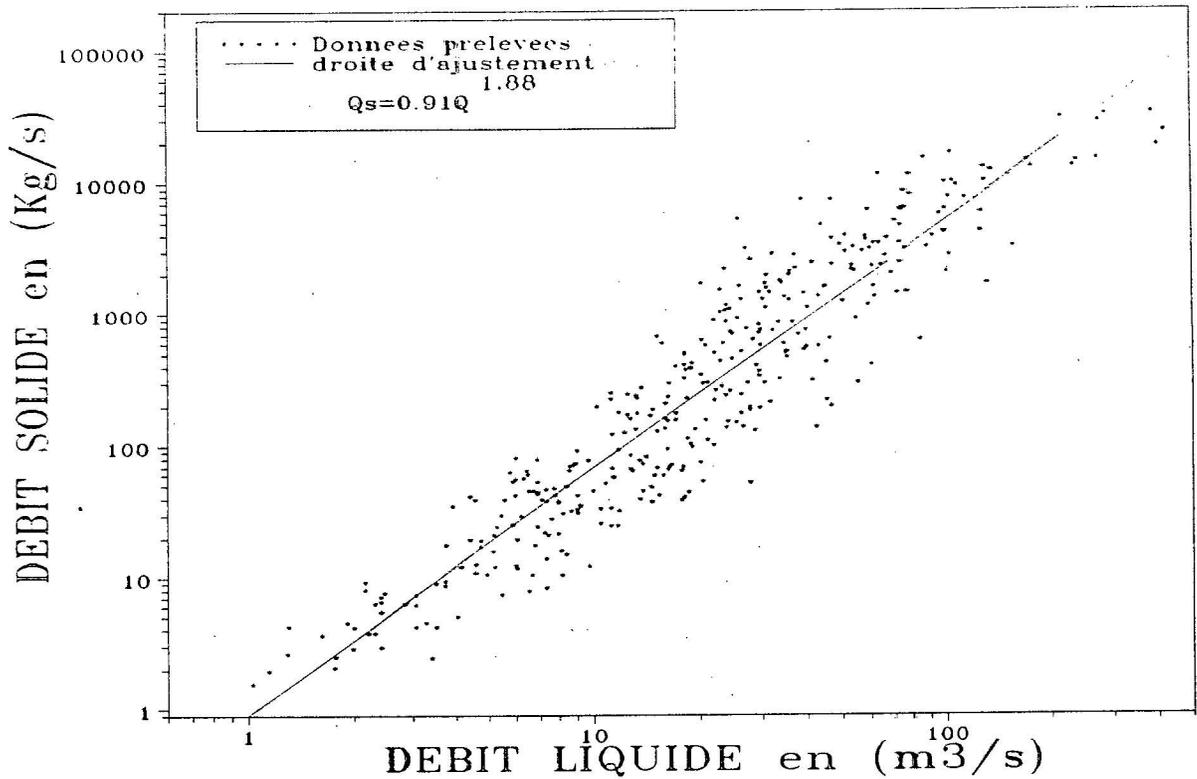


**Fig.A.5 : COURBE DES DEBITS CLASSES
(BASSIN DE CHELLIF, SAISONS HUMIDES)**

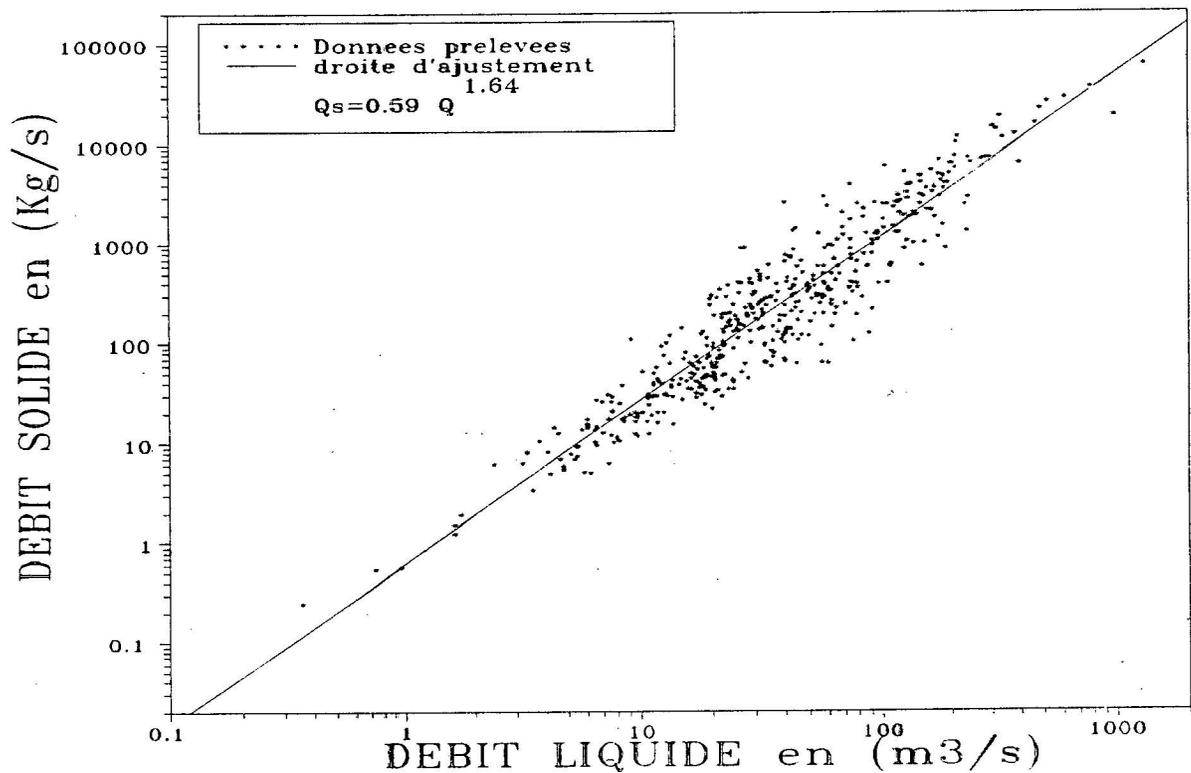


**Fig.A.6 : COURBE DES DEBITS CLASSES
(BASSIN DE CHELLIF, SAISONS SECHES)**

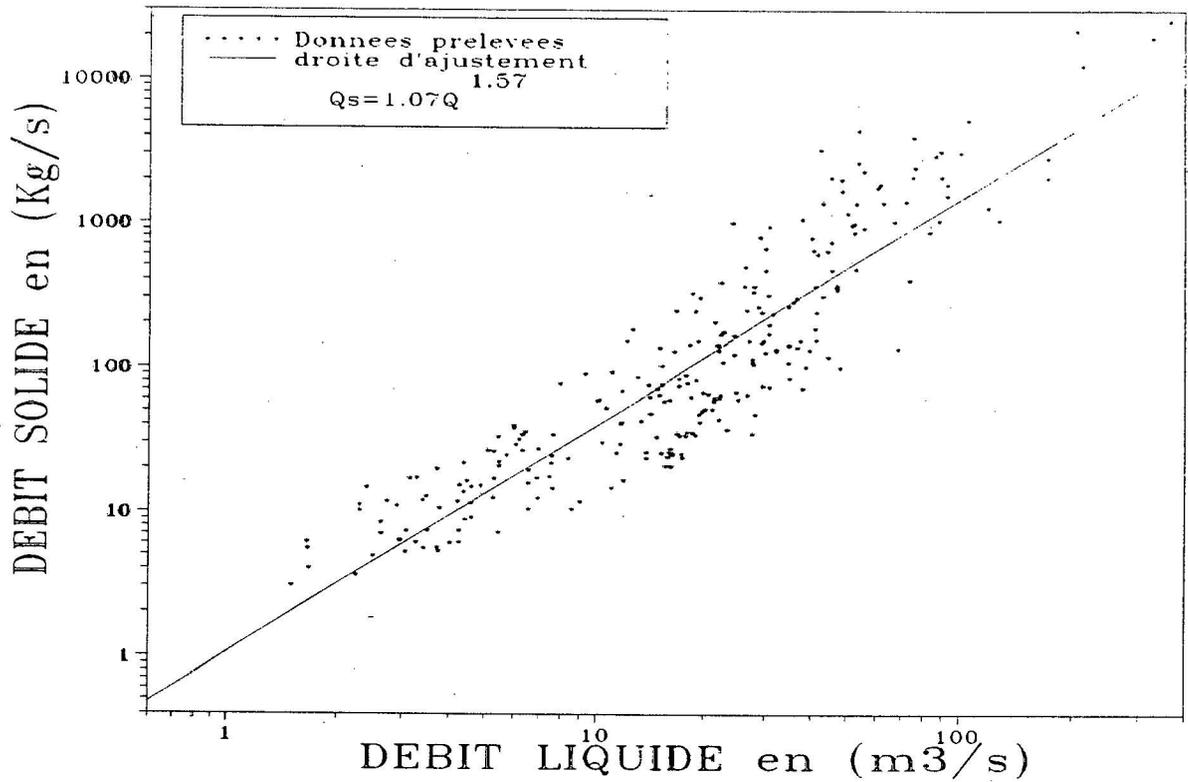
**ANNEXE
(B)**



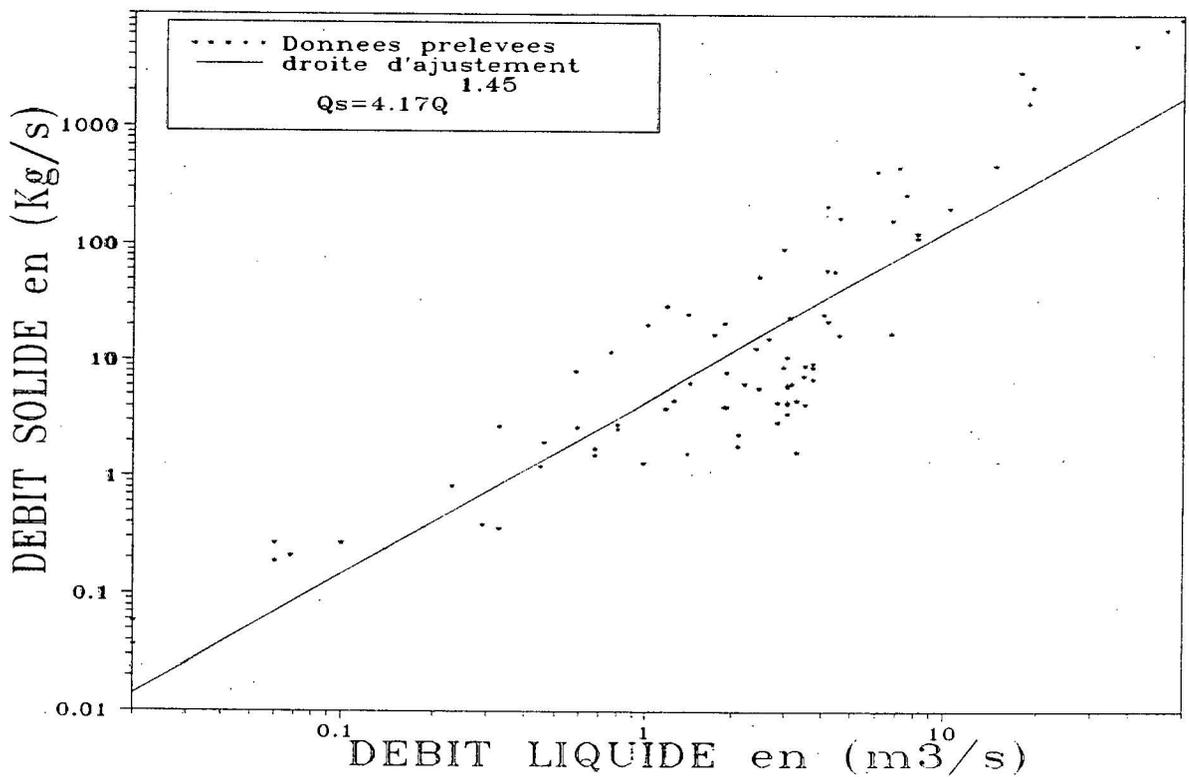
**Fig.B.1 : DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
(BASSIN DE CHELLIF, SAISONS D'AUTOMNES)**



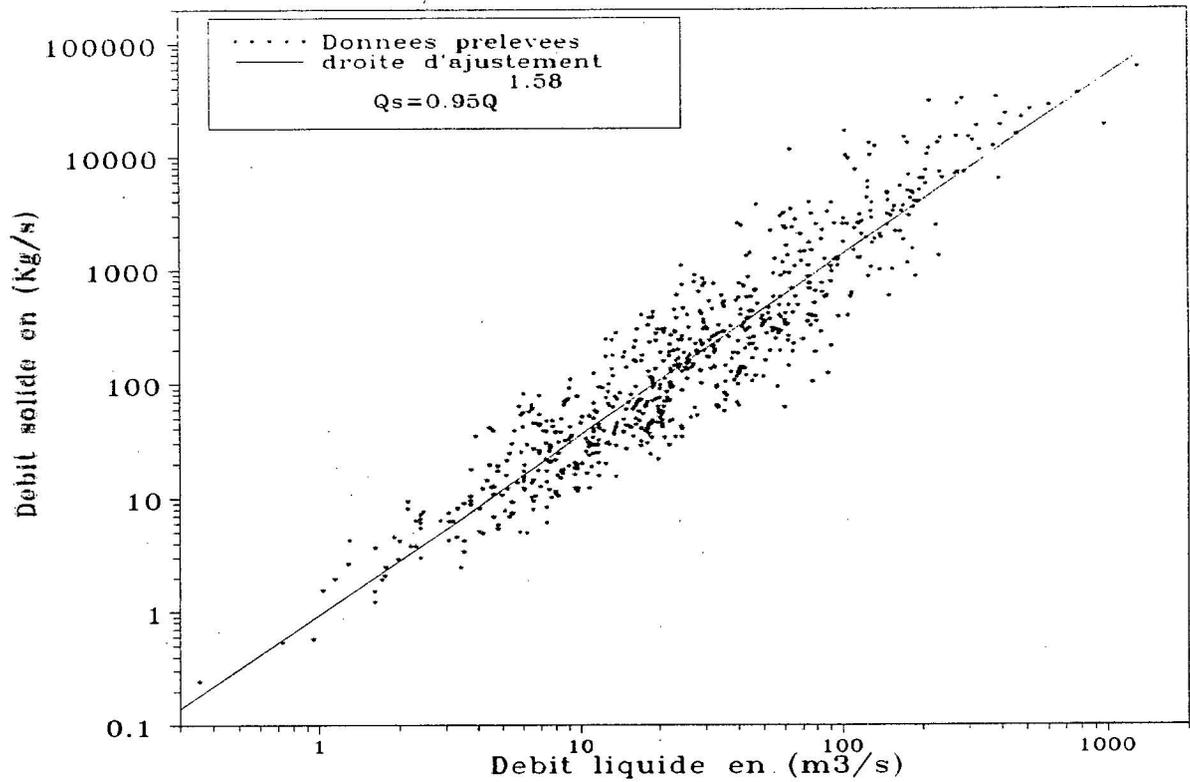
**Fig.B.2 : DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
(BASSIN DE CHELLIF, SAISONS D'HIVERS)**



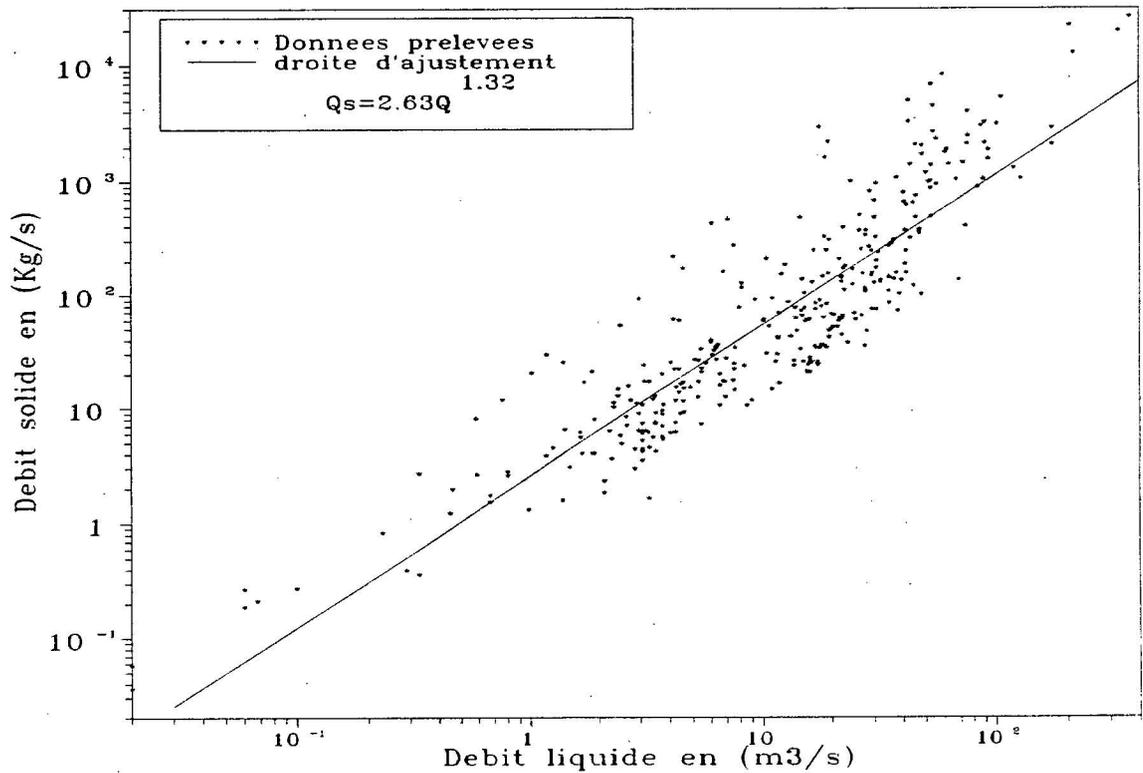
**Fig.B.3 : DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
(BASSIN DE CHELLIF, SAISONS DU PRINTEMPS)**



**Fig.B.4 : DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
(BASSIN DE CHELLIF, SAISONS D'ETES)**

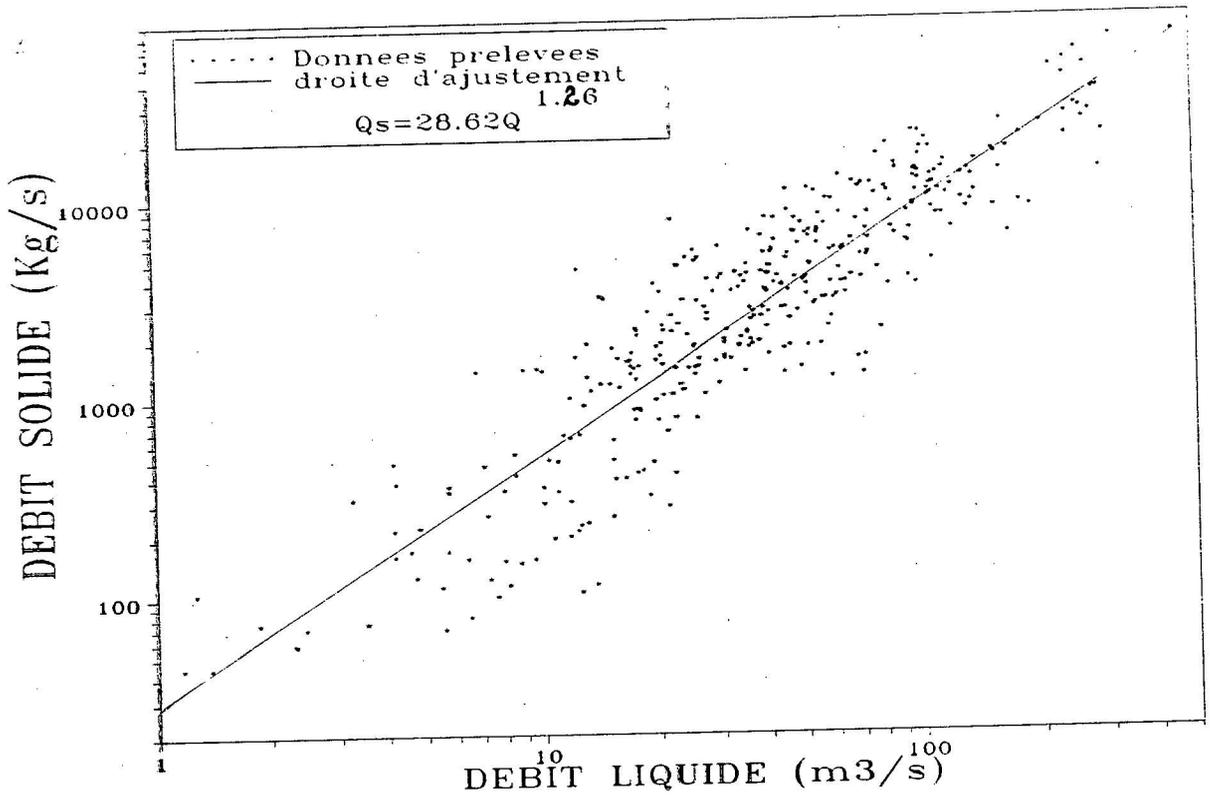


**Fig.B.5 : DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
(BASSIN DE CHELLIF, SAISONS HUMIDES)**

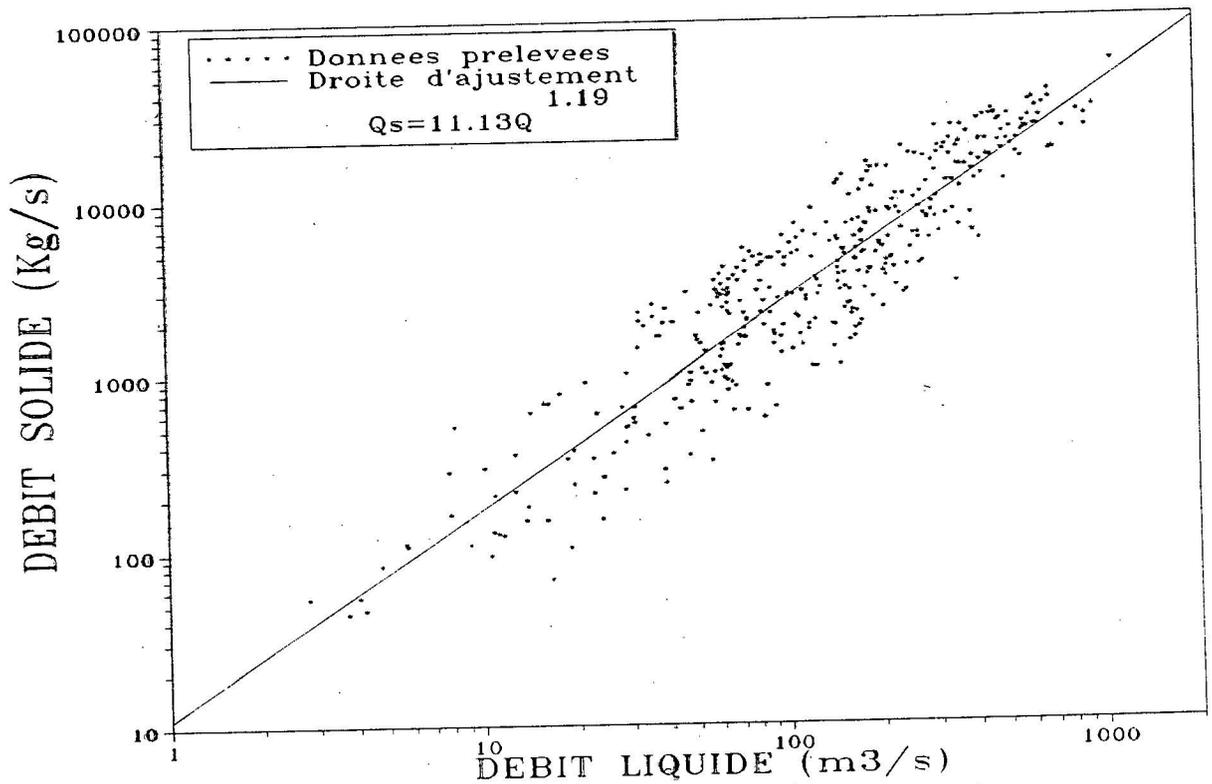


**Fig.B.6 : DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
(BASSIN DE CHELLIF, SAISONS SECHES)**

ANNEXE
C



**Fig.C.1 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, CRUES ENTIERES AUX SAISONS D'AUTOMNES)**



**Fig.C.2 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, CRUES ENTIERES AUX HIVERS)**

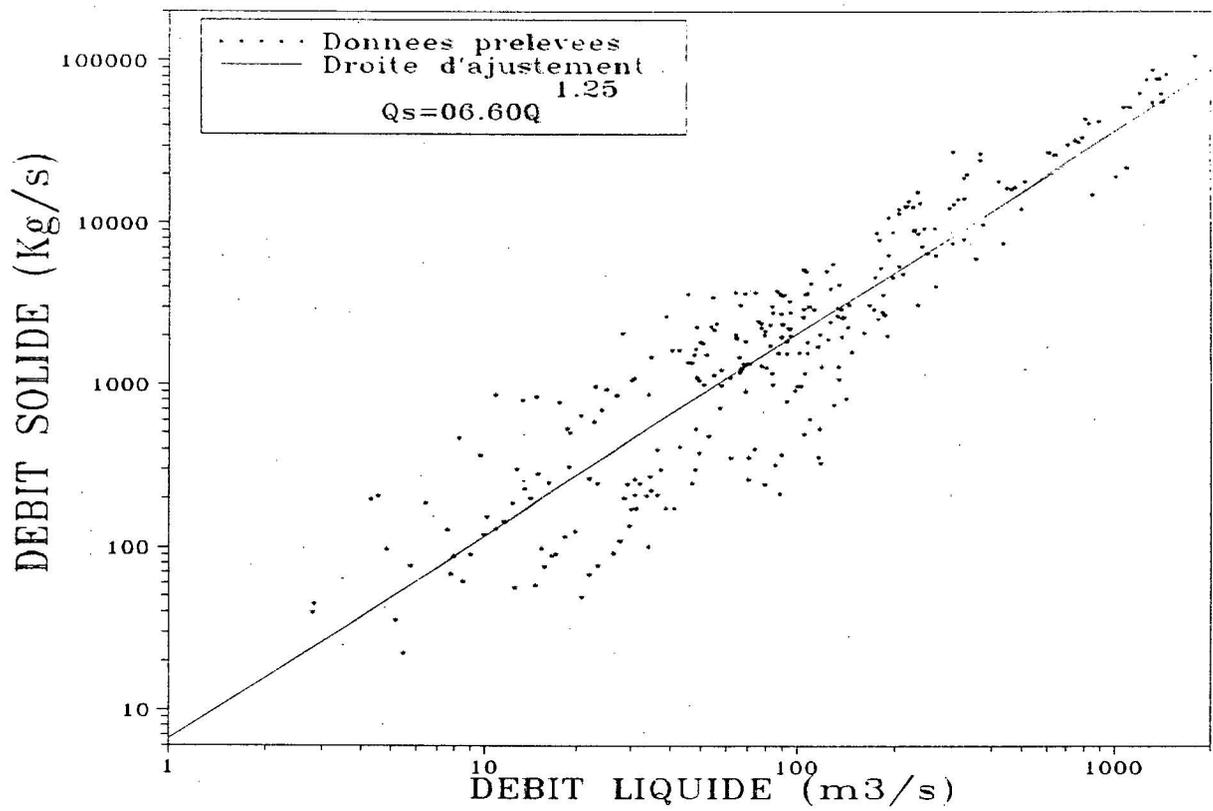
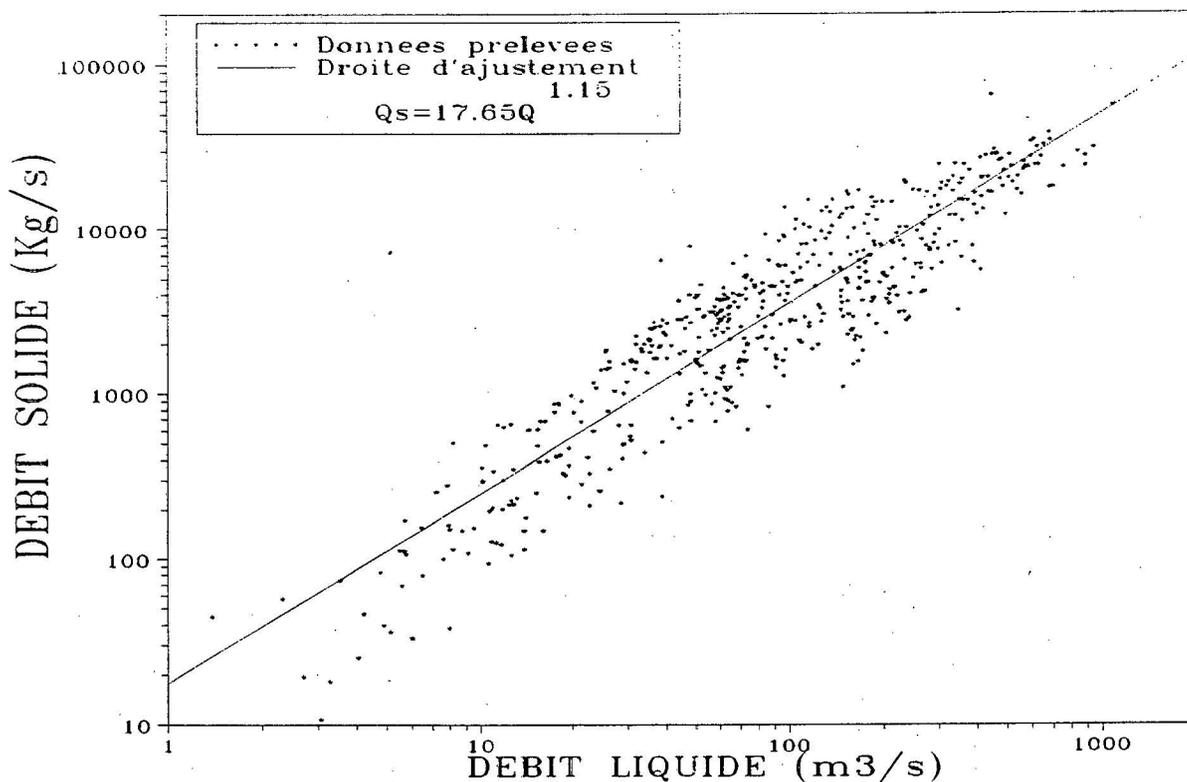
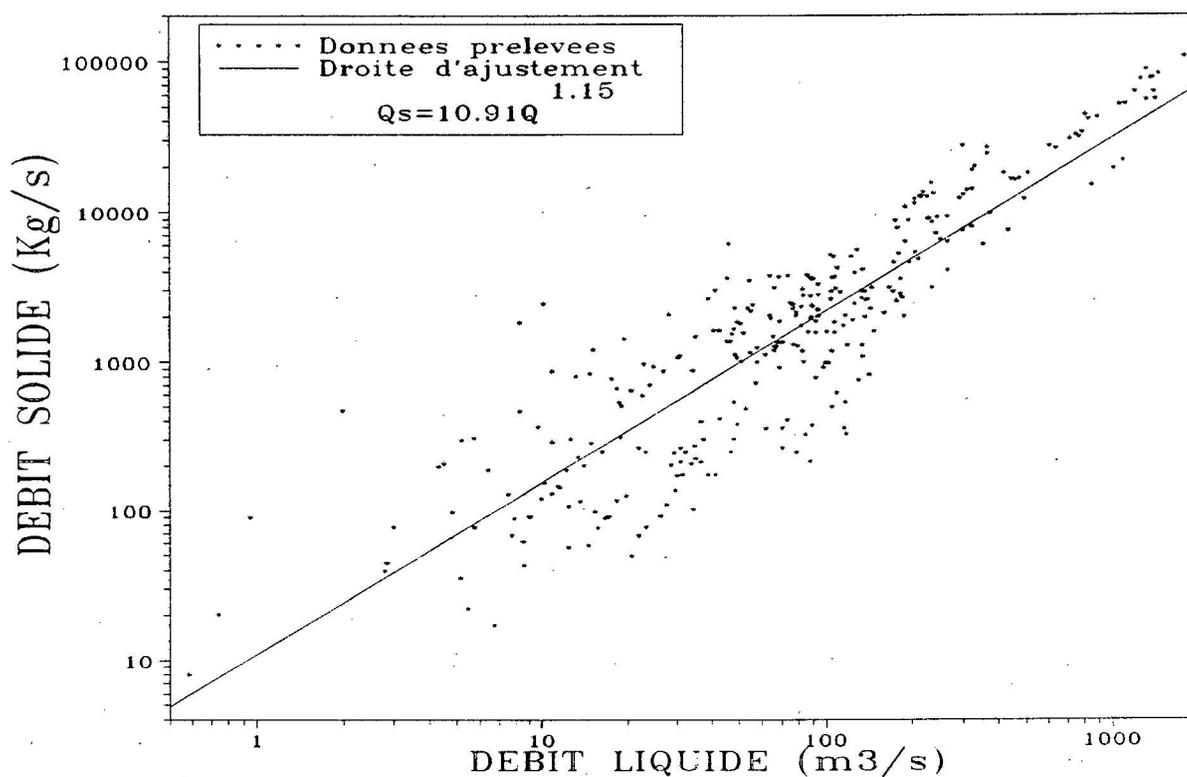


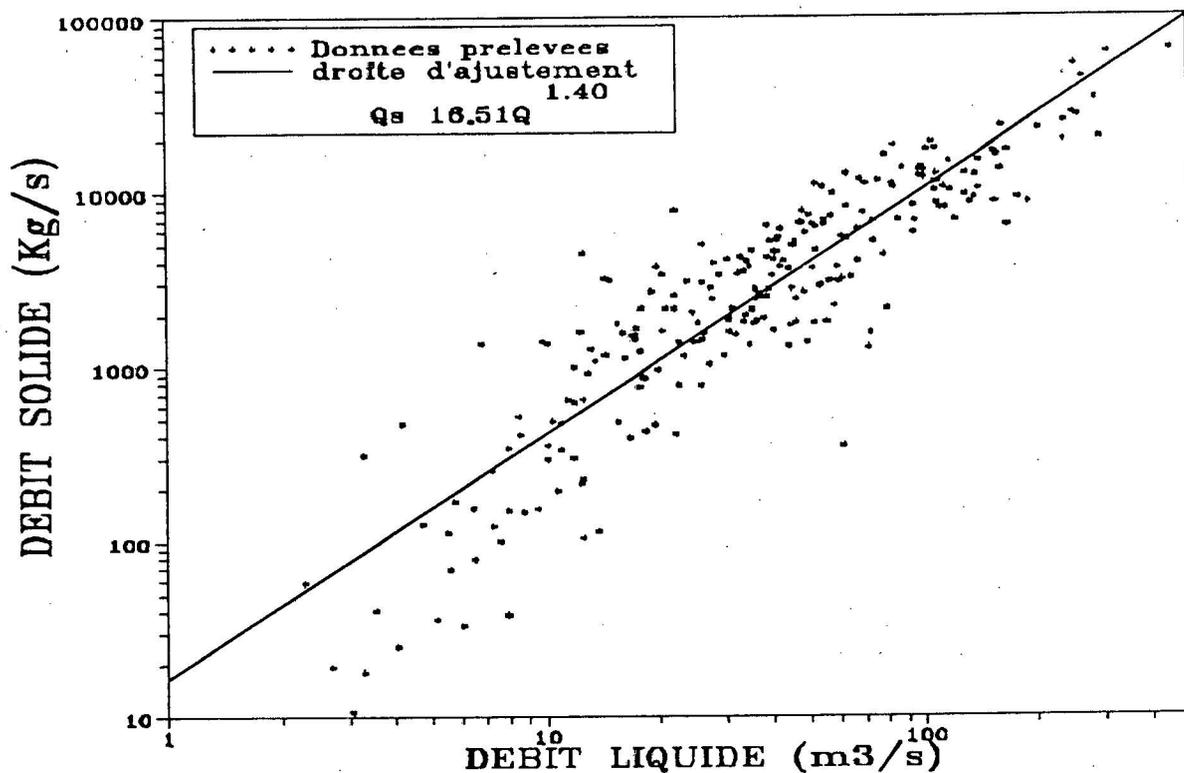
Fig.C.3 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, CRUES ENTIERES AUX PRINTEMPS)



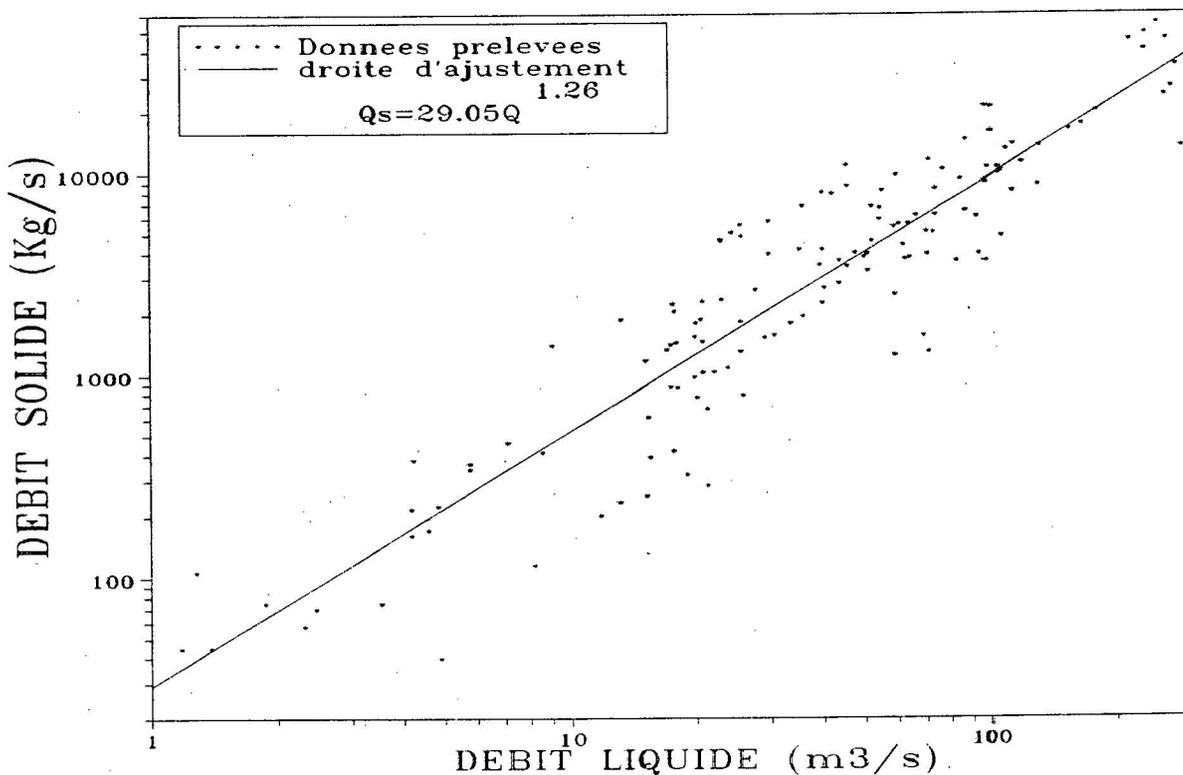
**Fig.C.4 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, CRUES ENTIERES EN SAISONS HUMIDES)**



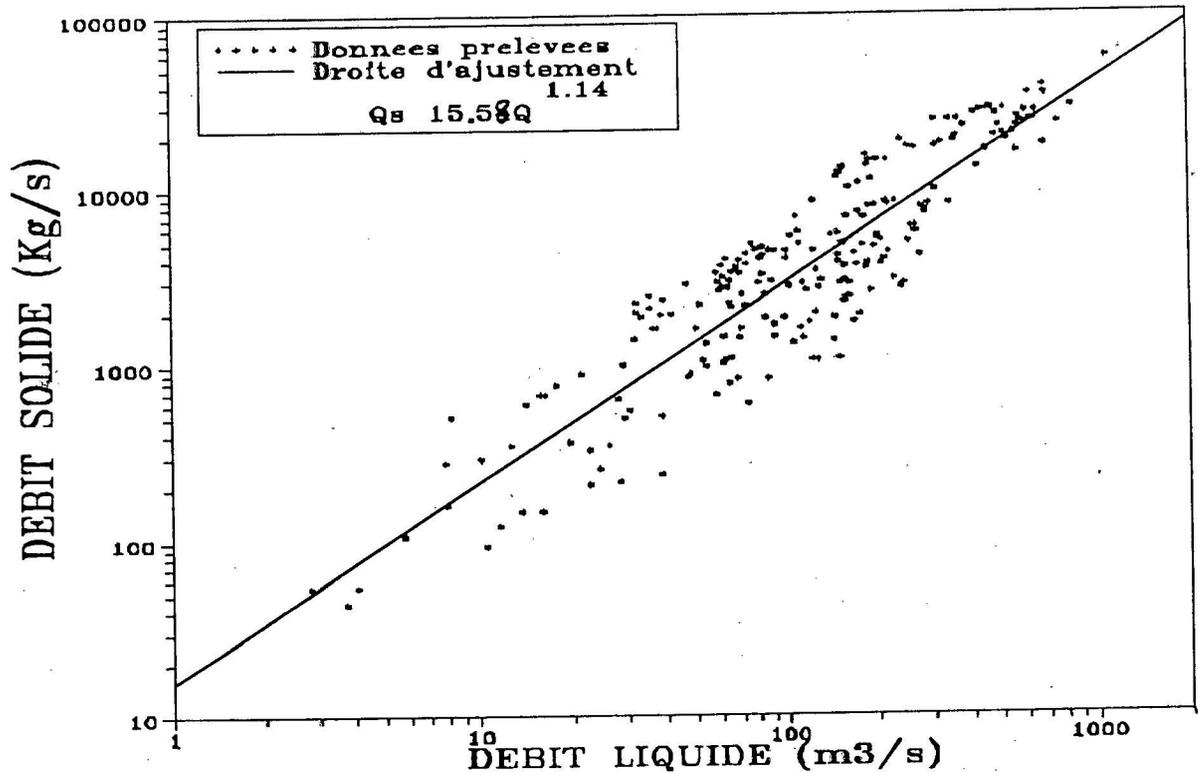
**Fig.C.5 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, CRUES ENTIERES EN SAISONS SECHES)**



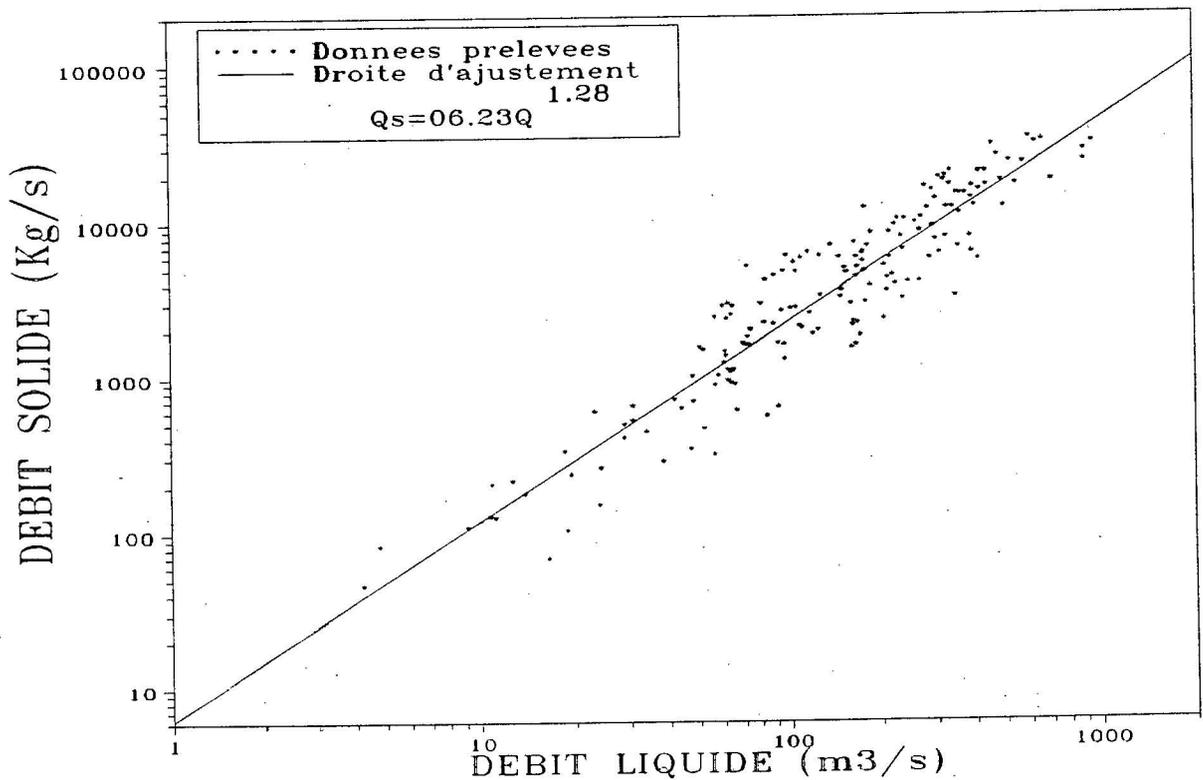
**Fig.C.6 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, MONTEES DES CRUES AUX AUTOMNES)**



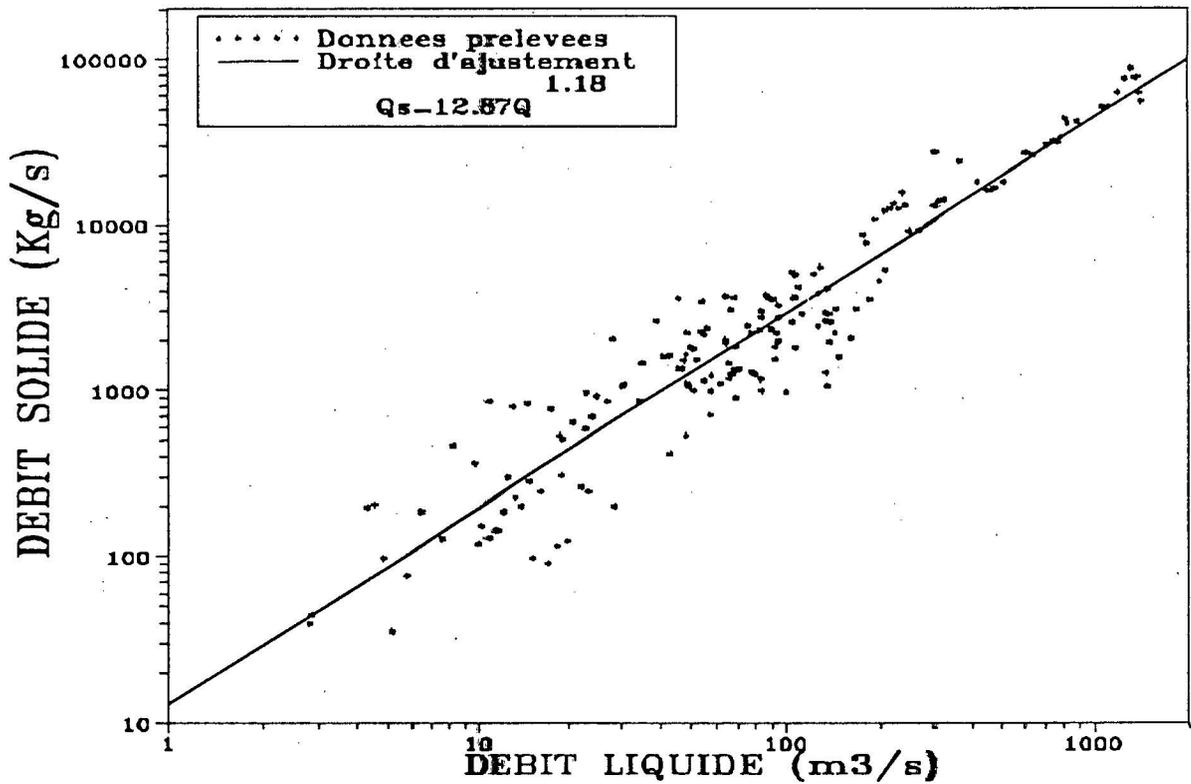
**Fig.C.7 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, DESCENTES DES CRUES AUX AUTOMNES)**



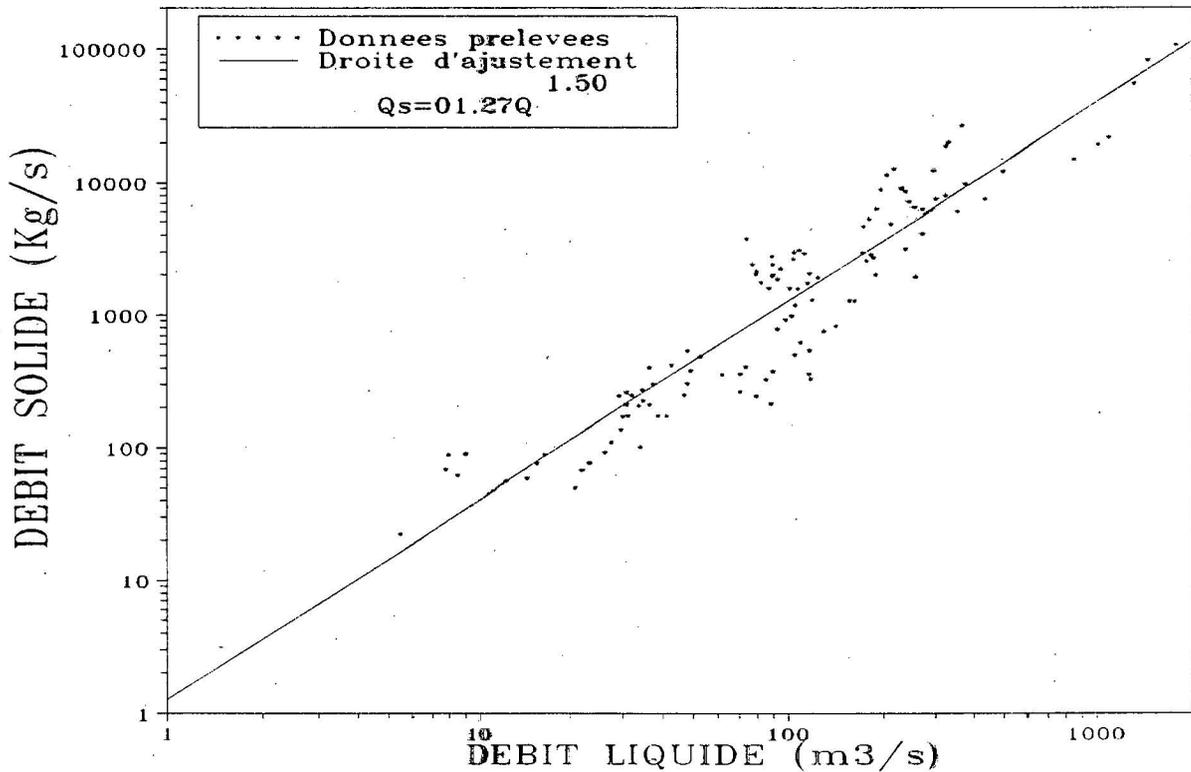
**Fig.C.8 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, MONTEES DES CRUES AUX HIVERS)**



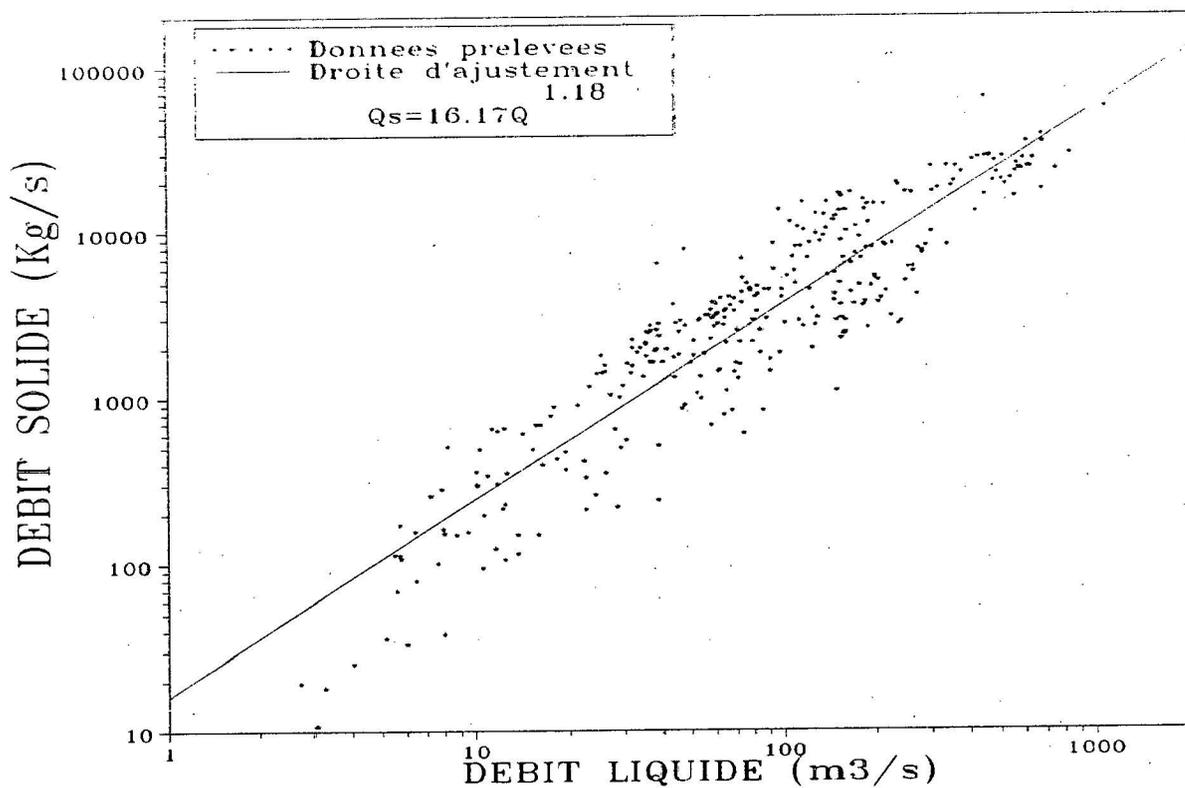
**Fig.C.9 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, DESCENTES DES CRUES AUX HIVERS)**



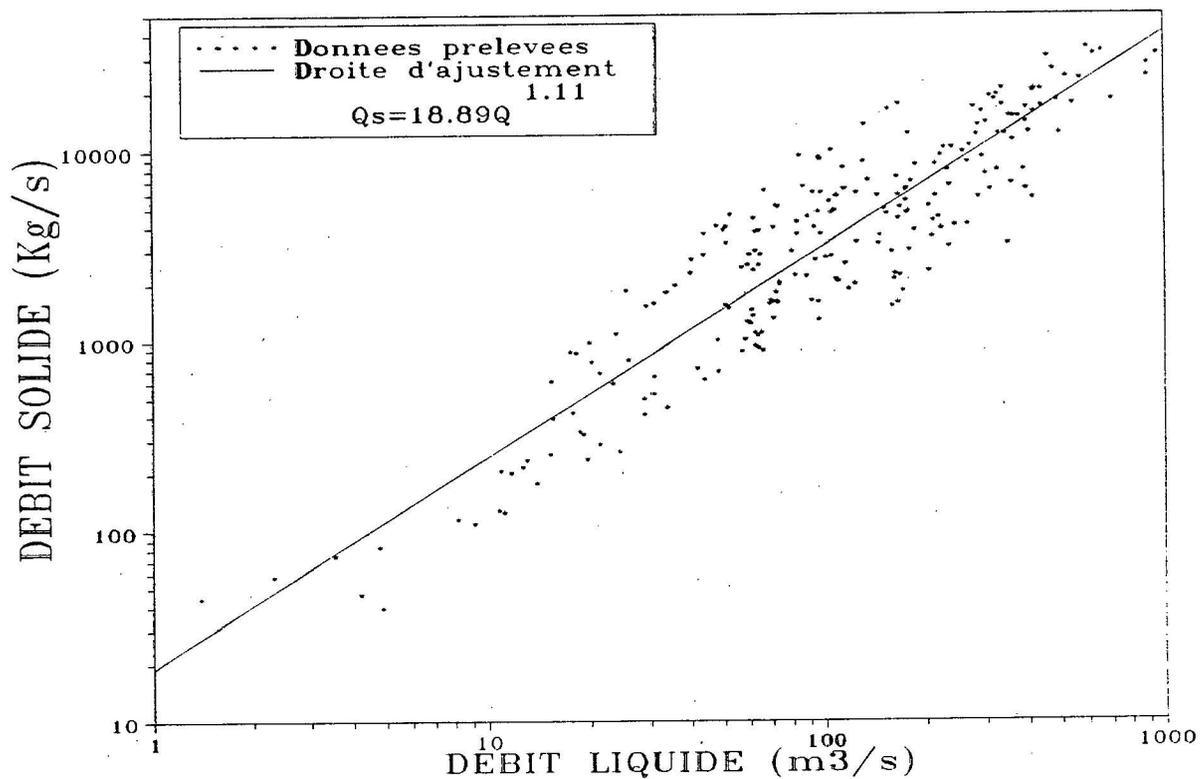
**Fig.C.10 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, MONTEES DES CRUES AUX PRINTEMPS)**



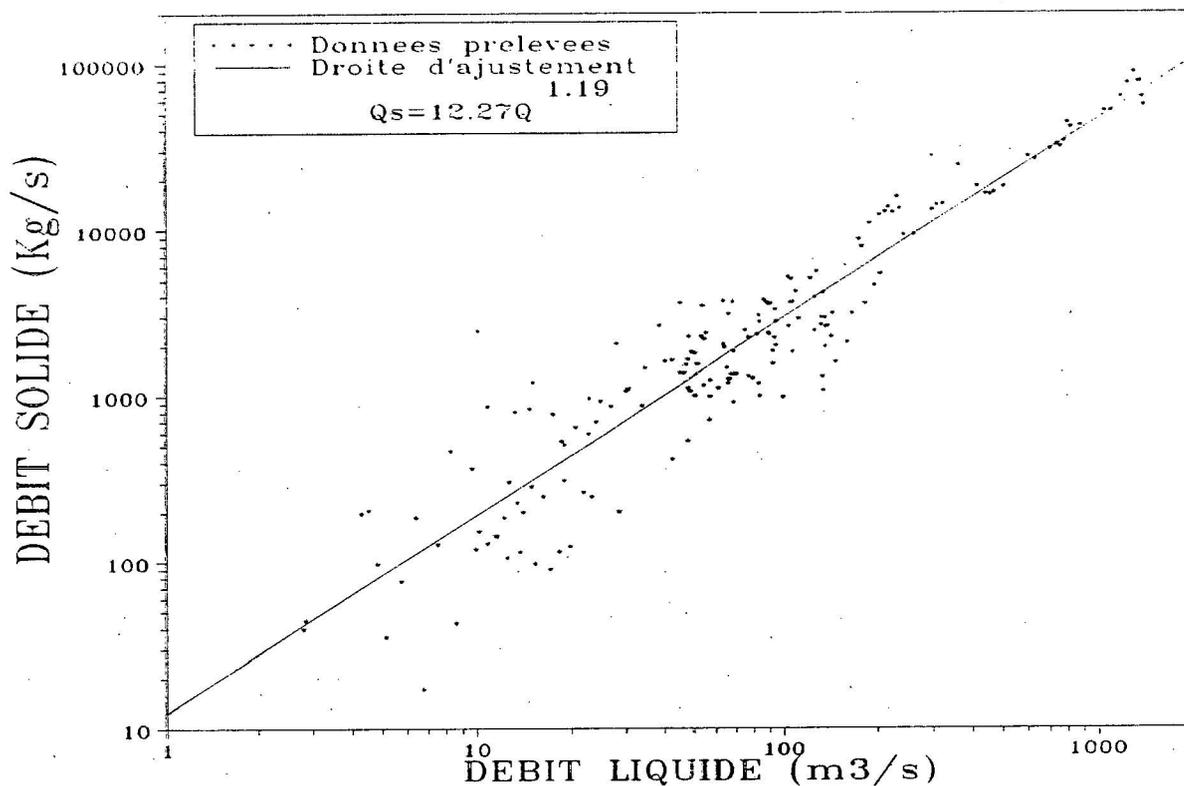
**Fig.C.11 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, DESCENTES DES CRUES AUX PRINTEMPS)**



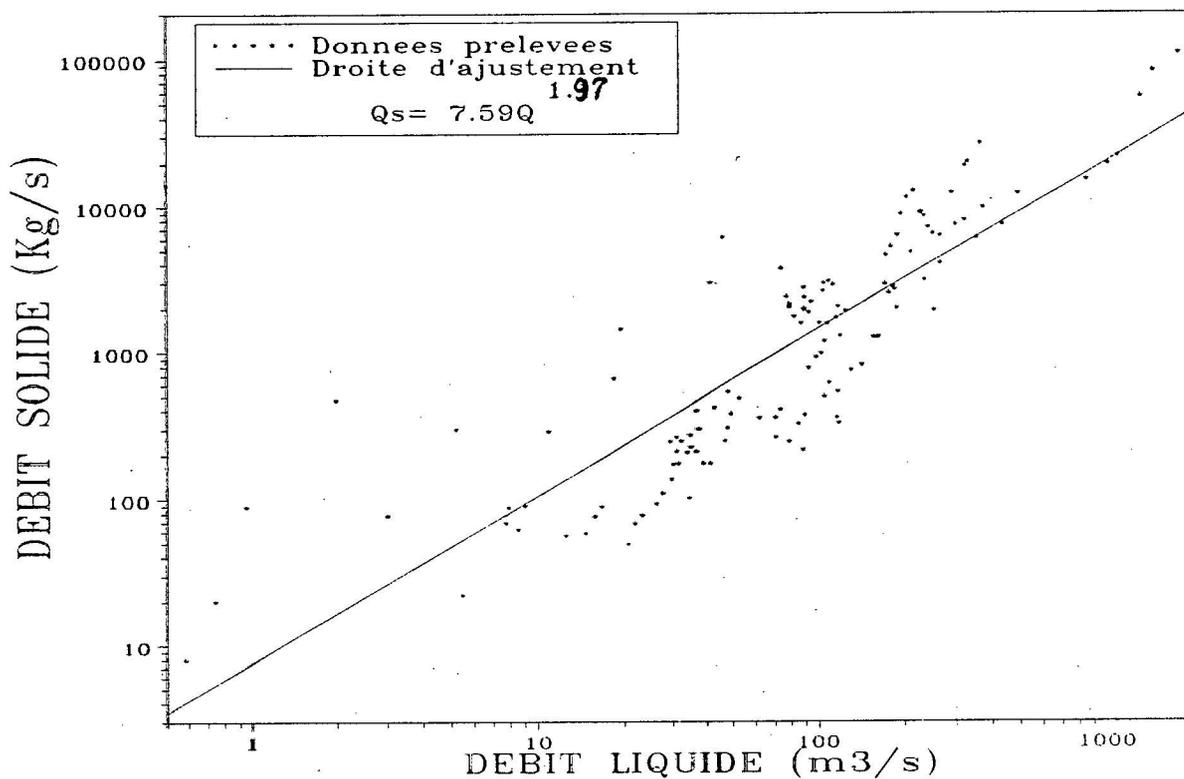
**Fig.C.12 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, MONTEES DES CRUES EN SAISONS HUMIDES)**



**Fig.C.13 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, DESCENTES DES CRUES EN SAISONS HUMIDES)**



**Fig.C.14 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, MONTEES DES CRUES EN SAISONS SECHES)**



**Fig.C.15 : DROITE DE REGRESSION DEBITS LIQUIDES - DEBITS SOLIDES
(BASSIN DE CHELLIF, DESCENTES DES CRUES EN SAISONS SECHES)**