

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila

Institut des Sciences et de Technologie

Département de sciences et Techniques



N° Ref :.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Sciences Hydrauliques.

THEME

Etude de transport solide d'Oued Sébaou

Présenté par :

-Abassi Lina Afaf

-Zahtani Chaima

Soutenu devant le jury :

M.Berhail

Sabri

M.Koussa

Miloud

M.Moussouni

Abderzak

Président

Examineur

Encadreur

Année universitaire : 2016/2017

Remerciements

C'est avec l'aide de Dieu que ce travail intitulé a été réalisé, il n'aurait pas pu être achevé sans le soutien, les conseils et les encouragements des personnes aux quelles nous tenons ici à exprimer nos sincères remerciements.

En premier lieu, nous exprimons toute notre gratitude pour notre Encadreur: Mr Moussouni Abderzak pour ses précieux conseils, sa disponibilité, la confiance qu'il nous a toujours témoignés et la sollicitude dont il nous a entouré et surtout au long de l'élaboration du présent travail.

Nous n'oublions pas nos enseignants qui tout au long du cycle d'étude au centre universitaire Abdelhafid Boussouf n'ont pas cessé de nous procurer assistance & conseils.

Nous tenons enfin à remercier tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail. . . . Qu'ils acceptent notre profond respect. . . !!

“On dédie ce mémoire à ”

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire "Ya Kayoum".

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère: ROFIA ...!!

A mon père: OMAR, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les garde et les protège.

A mes deux adorables: Frère & Sœur.

A mes amis.

A tous ceux qui me sont chers Que Dieu les garde.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

LINA

A ma très chère mère: FAHIMA

Affable, honorable, aimable: tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours. Pour mener à bien mes études.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon papa: - ABDELKRIM

-aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous...!!

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

A ma petite fille : SOUDJOUD et mon marie : IBRAHIM

A mes chers frangins : La lumière de mon chemin

Ma vie à vos côtés est remplie de belles surprises ...vos sacrifices, vos soutiens, votre gentillesse sans égal, votre profond attachement m'ont permis de réussir mes études... Que Dieu réussisse nos chemins pour une longue vie sereine...!!

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour, et l'affection que je porte pour vous.

Des anges gardiens et mes fidèles accompagnants dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de quiétude....!!

CHAIMA

Résumé

Le transport de sédiment en zone semi aride à climat tempéré pose de sérieux problèmes aux services de mobilisation des ressources hydrauliques, notamment aux chercheurs chargés d'évaluer le transport solide dans les bassins versant. Il en résulte que toute intervention susceptible de modifier le régime hydrologique ou le lit d'un cours d'eau se doit d'être examinée en regard des processus d'érosion, de transport solide et de déposition.

L'irrégularité saisonnière et interannuelle des pluies liées à des intensités parfois très élevées peuvent engendrer avec des temps de concentration parfois très courts des pertes de terrains considérables.

Le présent travail est de faire une étude sur le transport solide, elle sera basée sur le transport en suspension, de oued Sébaou et au niveau de deux stations hydrométriques Baghlia et Balloua. Nous traitons et nous analysons les données de ces deux stations afin d'établir des relations existantes entre les débits liquides et solides à différentes échelles du temps mensuelle et annuelle.

Abstract

The transport of sediments in asemi-aridzone with a temperate climate pose serious problem for water resources mobilization services, in particular for researchers in charge of assessing solid transport in the watershed. It follows that any intervention likely to modify hydrological regime or the bed of a water course must be examined with regard to the process of erosion ofsolid transport and deposition .

The seasonal and interannual irregularity of the rains linked to intensities which are sometime svery high can cause considerable losses of land with sometimes very short periods of concentration.

The present workis to make a study on the solid transport it will be based on the transport in suspension of oued sebaou and at the level of two hydrometric stations Baghlia and Balloua. We process and analyze the data from these two stations in order to establish existing relation ship between liquid and solid flows at different scales of monthly and annual time.

ملخص

يشكل نقل الرواسب في المناطق شبه القاحلة ذات المناخ المعتدل مشاكل خطيرة لخدمات تعبئة الموارد المائية بما في ذلك العلماء المسؤولين عن تقييم نقل الرواسب في مستجمعات مائية. ويترتب على ذلك أي تدخل من المرجح أن يغير النظام الهيدرولوجي أو سرير من مجرى مائي يجب أن تدرس في ضوء عملية نقل الرواسب من التعرية والترسيب. عدم انتظام هطول الأمطار الموسمية والسنوات مرتبطة بأوقات ذات شدة عالية جدا يمكن ان يؤدي أحيانا مع أوقات تركيز قصيرة جدا إلى فقدان أراضي كبيرة.

هذا العمل هو إجراء دراسة على نقل الرواسب الصلبة يتم على أساس نقل تعليق واد سباو على مستوى محطتين هيدرومتريتين بغاية وبلوة. نقوم بمعالجة وتحليل البيانات من هذه المحطات وذلك لتطبيق علاقات بين معادلات التدفق السائل والصلب في مستويات مختلفة من الزمن الشهري والسنوي.

Liste des tableaux

N°	Titre des Tableaux	Pages
I.01	Classification des sédiments d'un lit	19
I.02	Classification de Ramette	24
II.01	Répartition des superficies par sous Bassin	38
II.02	Paramètre de forme	40
II.03	Les paramètres morphologiques du Bassin versant du sébaou (source ANRH TIZI-OUZOU)	42
III.01	Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées	43
III.02	Précipitations moyennes annuelles (mm)	46
III.03	Précipitations moyennes mensuelles (1980-2005)	49
III.04	Moyenne mensuelles des vitesses des vents	50
III.05	Caractéristique des différentes stations hydrométriques	52
III.06	Débits moyens mensuels des stations de Baghlia et Baloua	53
III.07	Corrélation précipitation /débits évacuées à la station de Baghlia	53
III.08	Calcul de la lame d'eau écoulee à la station de Baghlia	57
III.09	Calcul de la lame d'eau écoulee à la station de Baloua	58
IV.01	Nombre de valeurs observées par station année	61
IV.02	Nombre de valeurs observées par station mois	62
IV.03	Valeurs de R^2 et le modèle retenu à l'échelle annuel de la station de Baghlia	83
IV.04	Valeurs de R^2 et le modèle retenu à l'échelle mensuel de la station de Baghlia	83
IV.05	Valeurs de R^2 et le modèle retenu à l'échelle saisonnière de la station de Baghlia	84
IV.06	Valeurs de R^2 et le modèle retenu à l'échelle annuel de la station de Baloua	84
IV.07	Valeurs de R^2 et le modèle retenu à l'échelle mensuel de la station de Baloua	85
IV.08	Valeurs de R^2 et le modèle retenu à l'échelle saisonnière de la station de Baloua	85
IV.09	Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuel à la station de de Baghlia $QI=f(h)$	102

IV.10	Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuel à la station de de Baghlia $QI=f(s)$	103
IV.11	Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuel à la station de de Baghlia $C=f(QI)$	104
IV.12	Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuel à la station de de Baghlia $C=f(s)$	104
IV.13	Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuel à la station de de Baloua $QI=f(h)$	105
IV.14	Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuel à la station de de Baloua $QI=f(s)$	106
IV.15	Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuel à la station de de Baloua $C=f(QI)$	108
IV.16	Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuel à la station de de Baloua $C=f(s)$	109

Liste des figures

N°	Titre des Figures	Pages
I.01	répartition des verticales	7
I.02	Epure des vitesses	7
I.03	Epure du débit solide sur toute la section de mesure	8
I.04	classification du transport solide (D'après WenShen, Julien, 1992)	10
I.05	Modes de transport solide	10
I.06	Schémas des modes de transport solide	11
I.07	Intégral de j_1 et de j utilisée dans la méthode d'EINSTEIN	18
I.08	Diagramme de Yalin-sheilds (d^* en m)	23
II.01	Bassin versant du sébaou	30
II.02	Situation géographique du bassin versant du sébaou	30
II.03	Carte des unités morphostrecturale	33
II.04	Réseau hydrographique du bassin versant du sébaou	36
II.05	Sous bassins versant du sébaou	39
III.01	Répartition des stations pluviométriques et hydrométriques dans le bassin versant du sébaou	44
III.02	Evaluation des précipitations annuelles de la station de TIZI-OUZOU	46
III.03	Précipitation moyen annuelle	48
III.04	Evaluation des précipitations moyenne mensuelle de la station de TIZI-OUZOU	49
III.05	Précipitations moyennes mensuelles des stations pluviométriques	50
III.06	Variation mensuelles des apports de l'oued à la station de Baghlia(1986-1999)	54
III.07	Variation mensuelles des apports de l'oued à la station de Balouia(1986-1999)	54
III.08	Corrélation précipitations- débits évacuées à la station de Baghlia	55
IV.01	Répartition débit solide- débit liquide de la totalité des données1968-1996 de la station de Baghlia	63
IV.02	Répartition débit solide- débit liquide de la totalité des données1989-2001 de la station de Baloua	63
IV.03	Répartition mensuelles des débits solides- débits liquides à la station de Baghlia	64
IV.04	Répartition mensuelles des débits solides- débits liquides à la station de Baloua	68

IV.05	Répartition annuelles des débits solides- débits liquides à la station de Baghlia	71
IV.06	Répartition annuelles des débits solides- débits liquides à la station de Baloua	75
IV.07	Répartition saisonnière des débits solides- débits liquides à la station de Baghlia	78
IV.08	Répartition saisonnière des débits solides- débits liquides à la station de Baloua	79
IV.09	Répartition mensuelles des débits solides- Hauteur d'eau à la station de Baghlia	86
IV.10	Répartition des débits liquides-Hauteurs pour toute la période d'observation de la station de Baghlia	88
IV.11	Répartition mensuelles des concentrations-débits liquides de la station de Baghlia	88
IV.12	Répartition mensuelles des débits liquides-surface mouillée de la station de Baghlia	93
IV.13	Répartition des débits liquides-surface mouillée pour toute la période d'observation de la station de Baghlia	94
IV.14	Variation mensuelle de la concentration-surface mouillée à la station de Baghlia	95
IV.15	Répartition mensuelle des débits liquides-Hauteur d'eau à la station de Baloua	96
IV.16	Répartition mensuelle des débits liquides-Hauteurs pour toute la période d'observation de la station de Baloua	97
IV.17	Répartition mensuelles des concentrations-débits liquides de la station de Baloua	98
IV.18	Répartition mensuelles des débits liquides-surface mouillée de la station de Baloua	99
IV.19	Répartition des débits liquides-surface mouillée pour toute la période d'observation de la station de Baloua	101
IV.20	Variation mensuelle de la concentration-surface mouillée à la station de Baloua	101

SOMMAIRE

N°	Titre	Pages
	Introduction Generale	1
	INTRODUCTION	3
I.1	Phénomène de l'érosion hydrique du sol	3
I.1.1	Généralité	3
I.1.2	Splash	3
I.1.3	Ruissellement	4
I.2	Causes de l'érosion	4
I.3	Quantification de l'érosion	4
I.3.1	Equation universelle de perte en terre	4
I.3.2	Formule de Graviovic	5
I.3.3	Formule de L'A.N.R.H	5
I.3.4	Formule de Tixeront	6
I.3.5	Méthodes liées à la mesure de la turbidité	6
I.4	Transport solide	8
I.4.1	Mode de transport solide	10
I.4.2	Calcul et estimation du transport solide	11
I.5	Transport par charriage	11
I.5.1	Description du phénomène	11
a	Formule de Schoklitsch	12
b	Formule de MEYER-PETER et MÜLLER	13
c	Formule d'Einstein-Brown (1950)	14
I.6	Transport par suspension	15
I.6.1	Description du phénomène	16
a	Formule d'Einstein	17

I.6.2	Méthode statistique	18
I.6.3	Caractérisation de la phase solide	18
I.6.4	Classification des sédiments	19
I.6.5	Granulométrie	19
I.7	Vitesse de chute	20
I.8	Début d'entraînement des sédiments	22
I.8.1	Début d'entraînement des sédiments en suspension	22
I.8.2	Début d'entraînement des sédiments sur le fond	22
I.9	Transport solide en Algérie	24
I.10	Conséquences et les méthodes de prévision et défense	26
I.10.1	Conséquences du phénomène du transport solide	26
I.10.2	Mécanisme de l'envasement	26
I.11	Méthodes de lutte contre l'érosion et le transport solide	26
I.11.1	Procédés agro techniques	26
I.11.2	Restauration des forets	27
I.11.3	Procédés hydrotechnique	27
I.12	Cours d'eau	27
a	Revêtement des berges	27
b	Freinage de l'écoulement	27
C	Guidage de l'écoulement	27
d	Aménagements hydrauliques	27
	Conclusion	28
	Introduction	29
II.1	Bassin versant de sébaou	29
II.1.1	Présentation du bassin versant	29
II.1.1.1	Situation géographique	29

II.2	Etude géomorphologique	31
II.2.1	Grands ensembles morphologiques	31
II.2.2	Chaine Djurdjura	31
II.2.3	Massif de Kabylie	31
II.2.4	Synclinale de Tizi-Ouzou	32
II.3	Lithologie	33
II.4	Végétation	33
II.5	Réseau hydrographique	34
II.6	Paramètre physique et géomorphologique du bassin versant	37
II.6.1	Paramètre géométriques	37
a	La surface	37
b	Le Périmètre	37
II.6.2	Paramètre du relief	40
II.6.2.1	Indice de compacité de Gravelius	40
II.6.2.2	Rectangle équivalent	41
a	Indice de pente globale(Ig)	41
	Conclusion	41
	Introduction	43
III.1	Etude hydroclimatologique	43
III.2	Analyse des paramètres climatiques	45
III.2.1	Précipitations	45
III.2.1.1	Variation des précipitations	45
a	Variation annuelle	45
b	Variation mensuelle	48
III.2.2	Vent	50
III.2.2.1	Force des vents	51
III.3	Etude de l'évapotranspiration	51

III.4	Hydrologie de surface	51
III.4.1	Station et données hydrométrique	52
III.4.2	Estimation des sources en eau de surface	52
III.5	Régime des apports	52
III.5.1	Régime mensuel des apports	52
III.5.2	Relation précipitation débits évacués	53
III.6	Détermination de la lame d'eau écoulée (R)	55
a	Débit moyen annuel Q_{0a} et l'apport moyen annuel A_{0a}	55
b	Calcul du débit moyen intrannuel Q_0 et l'apport moyen intrannuel A_0	55
c	Lame d'eau écoulé moyenne intrannuelle L_e	56
d	Débit spécifique M_0	56
e	Coefficient de débit pour chaque année K_i	56
	Conclusion	59
	Introduction	60
IV.1	Collecte et mise en forme des données	60
IV.2	Dépouillement des données	60
IV.3	Présentation et mise en forme	61
IV.3.1	Classification des données	61
IV.3.2	Répartition de la totalité des données	62
IV.3.3	Répartition mensuelle des débits solides débits liquides de la station deBAGHLIA	63
IV.3.4	Répartition mensuelle des débits solides débits liquides de la station de BALLOUA	67
IV.3.5	Répartition annuelle des débits solides- débits liquides	70
IV.3.5.1	Répartition annuelle des débits solides- débits liquides de la station de BAGHLIA	70
IV.3.5.2	Répartition annuelle des débits solides- débits liquides de la station de BALLOUA	75
IV.3.6	Réparation saisonnière des débits liquides- débits solides	77
IV.3.6.1	Réparation saisonnière des débits liquides- débits solides de la	77

	station de Baghlia	
IV.3.6.2	Réparation saisonnière des débits liquides- débits solides de la station de Balloua	79
IV.4	Traitement et interprétation des résultats	80
IV.4.1	Méthode de régression linéaire	80
IV.4.1.1	Avantage d'un modèle	80
IV.4.1.2	Estimation des paramètres du modèle	80
IV.4.1.3	Méthode des moindres carrés	81
IV.4.1.4	Coefficient de corrélation	81
IV.4.2	Présentation des modèles régressifs	81
IV.4.2.1	Modèle linéaire « type droite »	81
IV.4.2.2	Modèle logarithmique	82
IV.4.2.3	Modèle de l'exponentiel	82
IV.4.2.4	Modèle puissance	82
IV.4.2.5	Modèle polynomial	82
IV.4.3	Traitement des données	82
IV.5	Réparation mensuelle des débits liquides-hauteur d'eau de la station de Baghlia	86
IV.6	Répartition des débits liquides-hauteurs pour toute la période d'observation de la station de BAGHLIA	87
IV.7	Répartition mensuelle des concentration- débits liquides de la station de BAGHLIA	88
IV.8	Répartition mensuelle des débits liquides-surface mouillée de la station de BAGHLIA	92
IV.9	Répartition des débits liquides-surface mouillée pour toute la période d'observation à la station de BAGHLIA	94
IV.10	Variation mensuelle de la concentration en sédiments-surface mouillée à la station de BAGHLIA	94
IV.11	Répartition mensuelle des débits liquides-surface mouillée de la station de BALLOUA	96
IV.12	Répartition des débits liquides-hauteurs pour toute la période d'observation de la station de BALLOUA	97
IV.13	Répartition mensuelle des concentration- débits liquides de la station de BALLOUA	97
IV.14	Répartition mensuelle des débits liquides-surface mouillée de la station de BALLOUA	99
IV.15	Répartition des débits liquides-surface mouillée pour toute la période d'observation à la station de BALLOUA	100
IV.16	Variation mensuelle de la concentration-surface mouillée à la station de BALLOUA	101

IV.17	Coefficient de détermination	102
IV.18	Discussion des résultats	111
	Conclusion général	112
	Référence bibliographique	

INTRODUCTION GENERALE

Les phénomènes d'érosion hydrique du sol et le transport solide menacent gravement les ressources en eau et en sol et devient de plus en plus dramatique. Ses prises en compte dans les perspectives des aménagements hydrauliques présentent une importance primordiale. Le transport solide est responsable de très grande catastrophe en milieu naturel : envasement des ouvrages hydrauliques entraînant la diminution de leur potentialité, ensablement des ports et le rehaussement des lits de cours d'eau entraînant un accroissement des risques d'inondation et appauvrissement des terres agricoles.

Le transport solide constitue par son importance, un problème majeur en Algérie, c'est l'un des pays les plus touché par les conséquences de ce phénomène. Selon [1], l'érosion spécifique moyenne annuelle en Algérie variant entre 2000 à 4000 t/km². [2] citent que l'Algérie dispose de 120 petits et grands barrages en exploitation, d'une capacité de 7 milliards de m³ d'eau, avec un volume régularisé de 3 milliards de m³ par année. Un cumul de vase d'environ un milliard de m³ s'est déposé au fond de ces barrages. Ces valeurs élevées ne sont que la conséquence de la dégradation de l'ensemble des bassins versant de l'Algérie du nord. [2] signale que le transport solide en Algérie enregistre les valeurs les plus élevées de la planète. L'analyse de ces valeurs et les déclarations faites par les différents chercheurs sur le transport solide en Algérie, nous amène à réagir et à intervenir rapidement et efficacement, et ce par une bonne quantification du transport solide en utilisant des formules mathématiques fiables.

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

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

L'objectif de ce travail est de faire une étude de transport solide, l'étude sera accentuée sur le transport en suspension, de oued Sébaou et au niveau de deux stations hydrométriques BAGHLIA et BALLOUA. Nous essayons d'analyser les données de ces deux stations afin d'établir des relations existantes entre les débits liquides et solides à différentes échelles du temps mensuelle et annuelle.

Pour se faire, notre étude s'articulera sur quatre chapitres :

Un aperçu bibliographique où nous avons parlé sur l'érosion hydrique du sol, les causes de l'érosion et du transport solide dans les bassins versants, méthodes d'évaluation du transport solide, les principaux travaux effectués en Algérie pour atténuer ce phénomène. Le chapitre II sera consacré à la présentation de la zone d'étude ; aux différentes stations hydrométrique implantées dans la région. Le chapitre III présente l'analyse des paramètres climatologique et d'évaluer le comportement des différents composants du climat l'un par rapport à l'autre. Le dernier chapitre sera porté sur l'étude de transport solide par suspension.

Nous déterminerons la relation débit liquide-débit solide mensuelle, saisonnière, annuelle et intégrale ainsi que le modèle mathématique représentant les couples (débit solide – débit liquide). Et enfin nous terminons par une conclusion générale.

CHAPITRE I :
REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION

Le transport solide représente l'entraînement des sédiments sous l'action d'un écoulement fluide. Il existe dans différents phénomènes physiques, naturels et constitue un écoulement à surface libre ou en charge. Dans les cours d'eau, il constitue la seconde phase de l'érosion. Il révèle essentiellement de ruissellement et met en jeu diverses formes d'écoulement de l'eau dans la nature. Le processus entier peut considérer comme un cycle continu et on le schématiser comme suit : érosion, transport solide, sédimentation.

Le transport solide est limité par la quantité de matériaux susceptible d'être transportée. Il est principalement réglé par deux propriétés du cours d'eau :

- Sa compétence, elle est mesurée par le diamètre maximum des débris rocheux que peut transporter le cours d'eau, cette caractéristique est essentiellement fonction de la vitesse de l'eau.
- Sa capacité, c'est la quantité maximale de matériaux solide que peut transporter en un point et à un instant donné du cours d'eau. La capacité est fonction de la vitesse de l'eau, du débit et des caractéristiques de la section (forme, rugosité, etc....).

I .1 Phénomène de l'érosion hydrique du sol

I.1.1 Généralité

L'érosion hydrique du sol est un phénomène complexe, résultant du détachement de sol par l'impact des gouttes de pluie et du transport des particules détachées par l'écoulement de surface [3]. [4] affirme que chaque particule qui passe dans une section de mesure doit satisfaire deux conditions : elle doit être érodée à un endroit quelconque des versants à l'amont et elle doit être transportée par l'écoulement (ruissellement) de l'endroit d'érosion vers l'exutoire du bassin.

Ce phénomène est composé d'un ensemble de processus complexes. Le détachement et le transport des particules du sol font intervenir de nombreux paramètres, dont les plus importants concernent les deux agents principaux que sont la pluie et le ruissellement superficiel.

I.1.2 Splash

Le splash est le premier stade de l'érosion hydrique. Ce phénomène compacte, arrache et éjecte les particules du sol. Le choc des gouttes sur le sol provoque le détachement et la projection des particules dans toutes les directions à des distances comprises entre quelques millimètres et plusieurs dizaines de centimètres. Le taux de détachement par le splash est lié à l'énergie cinétique de la pluie, le type de sol et la tailles des gouttes [5].

La force exercée par l'impact d'une goutte d'eau sur la surface du sol possède des composantes normale et tangentielle à cette surface. La composante normale contribue à compacter le sol. La composante tangentielle est plus faible et elle est entièrement transmise au sol (phénomène de cisaillement) [6].

I.1.3 Ruissellement

Le ruissellement de surface, qui apparaît dès que la pluie dépasse la limite d'absorption du sol, exerce sur ce dernier des actions de détachement et de transport. La quantité de sol érodé est ainsi limitée soit par la capacité de détachement de la pluie et du ruissellement, soit par la capacité de transport du ruissellement [7,8].

I.2 Causes de l'érosion

Les causes sont multiples. L'agent principal est l'eau et plus particulièrement la pluie torrentielle.

Le climat de l'Algérie du Nord est caractérisé par une irrégularité saisonnière et interannuelle des pluies liées à des intensités parfois très élevées. Ces intensités peuvent engendrer avec des temps de concentration parfois très courts des pertes de terrains considérables.

A cela, doit s'ajouter le couvert végétal, la pente du terrain, la lithologie du bassin versant, l'homme, qui ont leur part dans l'érosion des bassins versants.

I.3 Quantification de l'érosion

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

I.3.1 Equation universelle de perte en terre [9]

Le modèle empirique le plus connu pour estimer l'érosion hydrique est l'équation universelle de perte en terre, USLE (Universal Soil Loss Equation). Ce modèle a été développé aux Etats Unis par Wischmeier pour des terrains agricoles. L'USLE permet l'estimation de la perte en terre pour une parcelle donnée dans des conditions bien définies. Le modèle est basé sur l'analyse statistique de 10'000 "parcelles expérimentales années". Ces parcelles expérimentales sont standardisées, elles ont 22.1 m de longueur et de 9 % de pente. L'équation pour la perte en terre s'écrit :

$$A = R.K.L.S.C. P \quad (I.01)$$

Avec :

A : perte en terre [t ha⁻¹ an⁻¹]

R : facteur d'agressivité climatique [kJ mm m⁻² h⁻¹]

K : facteur sol [t m² h an⁻¹ ha⁻¹ kJ⁻¹ mm⁻¹]

L : facteur longueur de pente [-]

S : facteur pente [-]

C : facteur agronomique [-]

P : facteur des aménagements anti-érosif [-]. (Exprime le rapport entre la perte en terre d'une parcelle où l'on pratique des mesures de conservation et celles d'un champ cultivé dans le sens de la pente).

I.3.2 Formule de Gravilovic

Il a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnel à la température, à la pluie et à un coefficient d'érosion, l'équation est donnée par l'expression suivante : [10]

$$E_s = 3,14. T. P_0 \sqrt{Z^3} \quad (I.02)$$

Où

E_s : érosion spécifique dans le bassin versant (T/Km².an).

T : coefficient de température.

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0,1 \quad (I.03)$$

Avec :

t_0 : température moyenne annuelle en °C.

p_0 : pluie annuelle en (mm).

Z : coefficient d'érosion.

Avec :

$$Z = y. (x.a).(\delta + \sqrt{I_{moy}}) \quad (I.04)$$

Où

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

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

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

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

I.3.3 Formule de L'A.N.R.H [11]

$$T_{ss} = 26,62 I_e + 5,071 I_p + 9,77 C_t - 593,59 \quad (I.05)$$

Avec :

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

I_e : indice lithologique (%).

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

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

L_1 : longueur de tous les cours d'eau d'ordre 1 (Km).

F_1 = nombre de talweg/ surface, fréquence des talwegs élémentaire.

Cette formule est applicable dans les conditions suivantes :

$$I_e > 10\%.$$

$$I_p > 300.$$

I.3.4 Formule de Tixeront [12]

$$E_s = (S_1.Ta_1 + S_2.Ta_2 + S_3.Ta_3 + \dots + S_n.Ta_n) \quad (I.06)$$

Avec :

E_s : érosion spécifique (t/Km².an)

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

S : superficie totale du bassin (Km²).

S_1, S_2, S_n : superficie des sous bassins (Km²).

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

On a :

$$E_s = K.L_e \quad (I.07)$$

Avec :

L_e : lame d'eau ruisselé moyenne interannuelle (mm).

K : constante.

K : coefficient qui tiens compte de la perméabilité es terrains.

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

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

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

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

$K=3200$ pour les terrains perméables.

I.3.5 Méthodes liées à la mesure de la turbidité

La mesure de la turbidité de l'eau peut être reliée à la quantité de sédiments arrachés au bassin versant.

En vue de sa mesure, des prélèvements d'échantillons par des équipements spéciaux au droit de la station de jaugeage, à différentes positions se font parallèlement au jaugeage de débit au moulinet.

Sur un certain nombre de points répartis sur plusieurs verticales A, B, C, D... d'une section, on mesure simultanément la vitesse "V" du courant avec un moulinet et la concentration "C" en g/l des matériaux en suspension.

En reportant cette section à un système "XoY" avec en abscisse la largeur de la rivière "rive droite au rive gauche" et en ordonnée les profondeurs à partir de la surface d'eau, n'importe quel point de mesure sera identifié (Voir Figure. I.01).

Sur chaque verticale, on représente le débit solide rapporté à l'unité de surface "qs" qu'est le produit de concentration "C" par la vitesse "V" mesurés aux différentes profondeurs par des vecteurs horizontaux, dirigés dans le sens du courant pour une verticale donnée (Voir Figure. I.02).

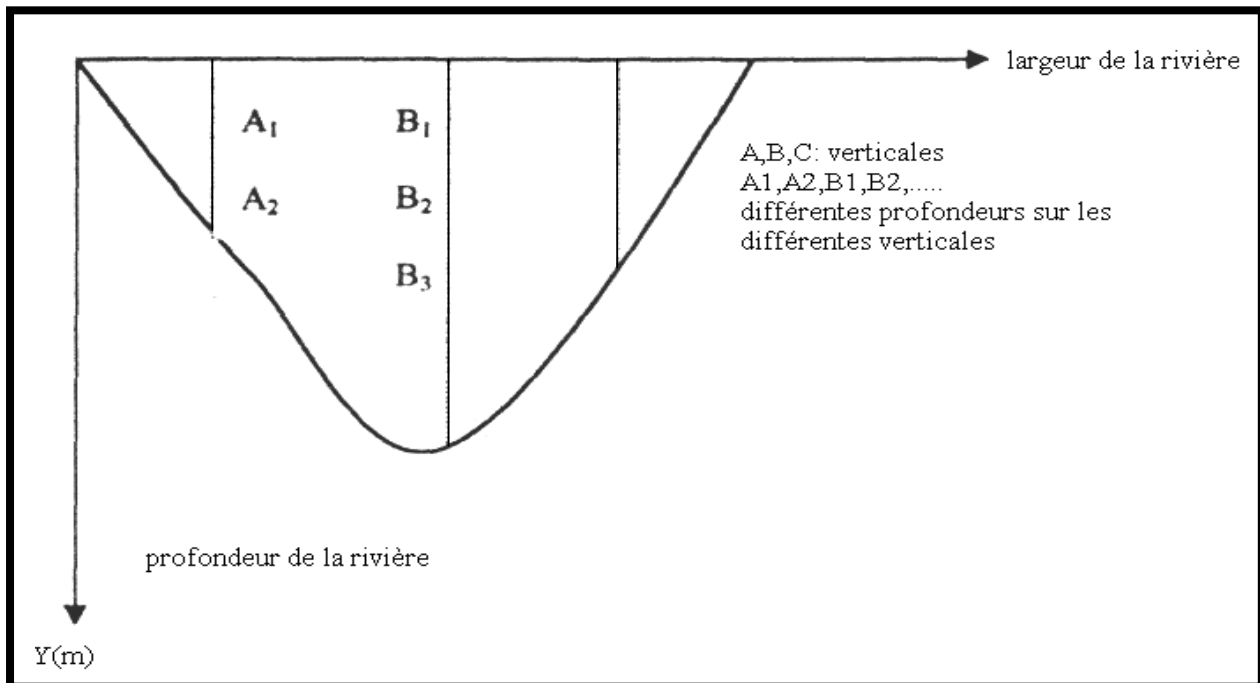


Figure I.01 : répartition des verticales. [12]

Si on prend une verticale, on a

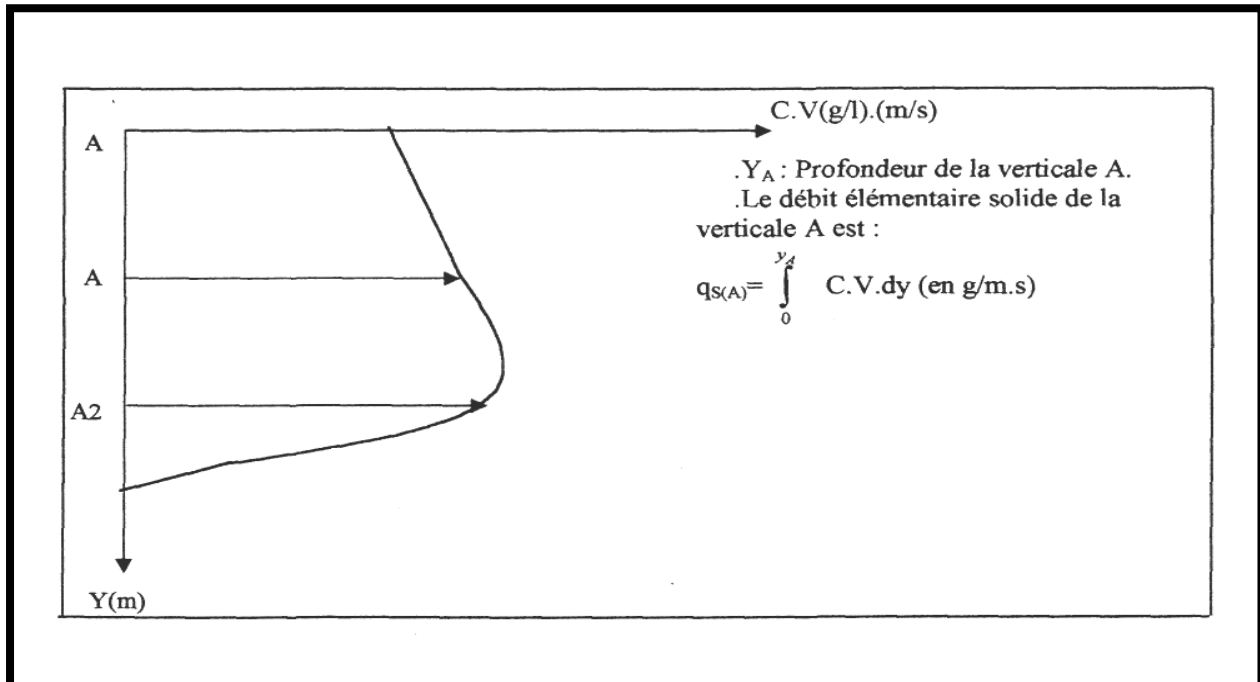


Figure I.02 : Epure des vitesses. [12]

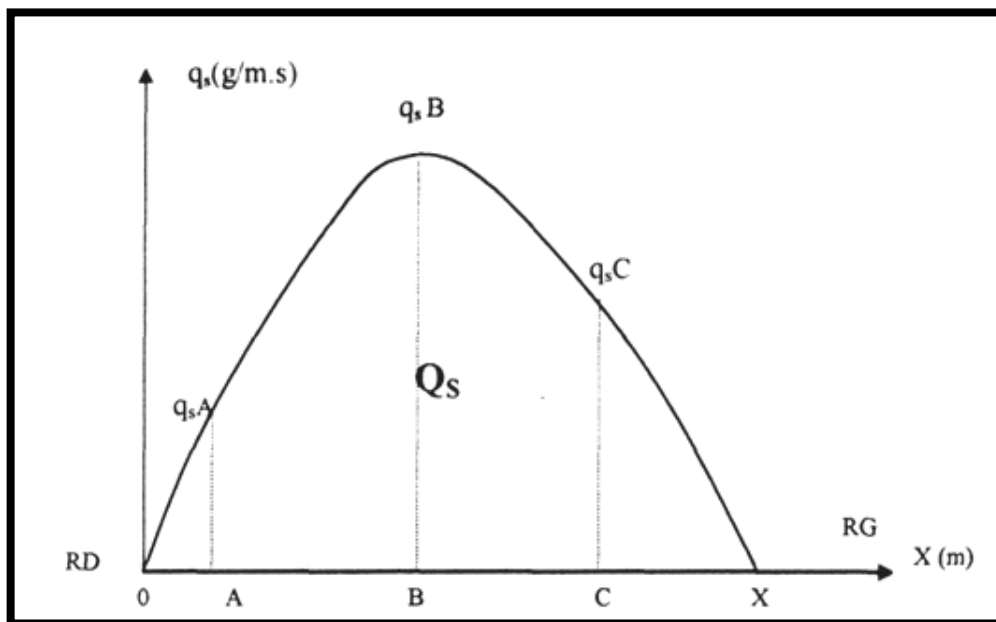


Figure I.03 : Epure du débit solide sur toute la section de mesure. [12]

On détermine graphiquement le débit solide en suspension par unité de largeur de la rivière, au droit d'une verticale.

Le débit solide en kg/s, n'est que l'intégration des différents débits élémentaires des différentes verticales. Représentés un système "XoY" où x représente la largeur de la rivière, et y le débit élémentaire "qs", le débit solide total Q_s est planimétrie. C'est la surface comprise entre la courbe des débits élémentaires et l'axe X, comme montre la (figure I.03)

$$Q_s = \int_0^x q_s(x) dx. \text{ en kg/s ou en tonne/an} \quad (\text{I.08})$$

Pour la détermination de la concentration des matériaux en suspension, les prélèvements d'eau sont filtrés sur les filtres pesés au préalable. Sèches à 100 °C à l'étuve et par double pesés, le poids des matériaux en suspension est déterminé et ramené à l'unité de volume (g/l, kg/m³), après calcination de la matière organique si elle existe.

I.4 Transport solide

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion, il permet le déplacement d'une masse solide composée d'éléments granulaires (sédiments fins, sables, galets, ...) sous l'action de l'écoulement de l'eau.

Il s'effectue selon trois modes différents, en fonction de la taille des particules (Voir figure I.04) :

- suspension (transport sur de longues distances dans la masse de l'écoulement) ;
- saltation (mode intermédiaire, sauts sur de courtes distances) ;
- charriage (déplacement des particules au contact avec le fond).

Dans la pratique, on ne retient généralement que les transports par suspension et par charriage.

Il est en effet de déterminer une limite objective, dans le cas d'écoulements réels et en présence d'un contexte granulométrique naturel (souvent hétérogène), à la distance du saut d'une particule en delà de laquelle le charriage de fond ferait place à la saltation.

Le cas des sédiments cohésifs (particules colloïdales, minérales, organiques ou chimiques) est traité généralement par une approche différente. Les critères de mise en mouvement et les mécanismes du transport dépendent, en plus des conditions d'écoulement, à la fois de la nature minéralogique et organique des composants du substrat et de la composition physico-chimique de l'eau. [13]

Toutefois, trois origines des matériaux transportés sont en général distinguées :

- 1-Les particules érodées à partir des versants,
- 2-Les particules arrachées aux berges du cours d'eau,
- 3-Les éléments soulevés à partir du lit, nous parlons alors de reprise de matériaux antérieurement déposés.

Ces notions permettent de distinguer les deux composantes du transport solide (voir figure I.02):

- la charge en suspension est constituée de matériaux dont la taille et la densité leur permettent, dans des conditions d'écoulement déterminées, de se déplacer sans toucher le fond du lit. Il s'agit essentiellement des argiles et des colloïdes.
- la charge de fond est formée de matériaux trop denses pour être mis en suspension relativement à la vitesse du courant. Certains auteurs distinguent un transport par saltation qui correspond approximativement à un déplacement par bonds successifs. [14]

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

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

En tout point d'une rivière, l'alimentation en débit solide est définie par les caractéristiques hydrologiques de son bassin versant. [15]

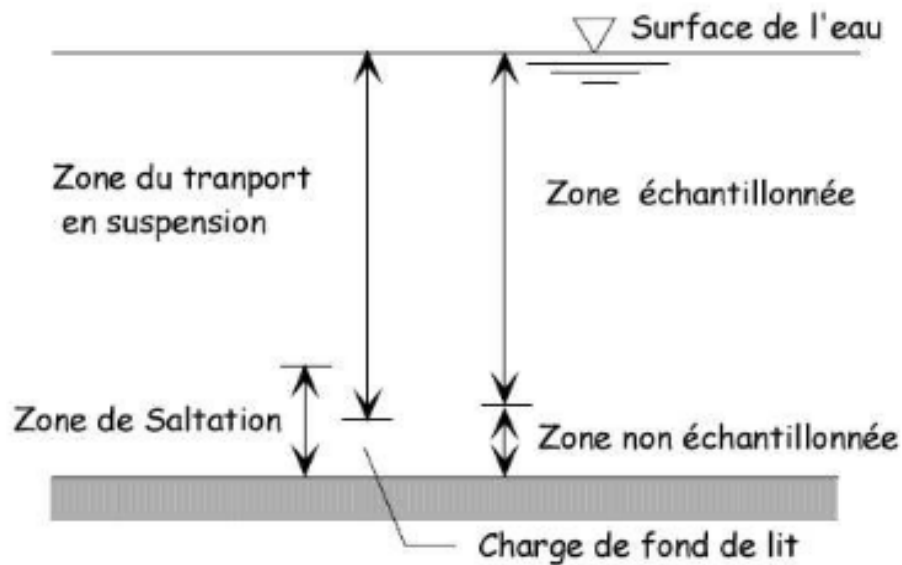


Figure I.04 : classification du transport sol
(D'après WenShen, Julien, 1992). [14]

I.4.1 Mode de transport solide

Le transport solide total de sédiments par l'eau est l'ensemble du transport des particules qui passent dans une section du cours d'eau.

On classe habituellement (un peu artificiellement) le transport de sédiments en différents modes (voir figure I.05) correspondant à des mécanismes physiques de base relativement distincts. [16]

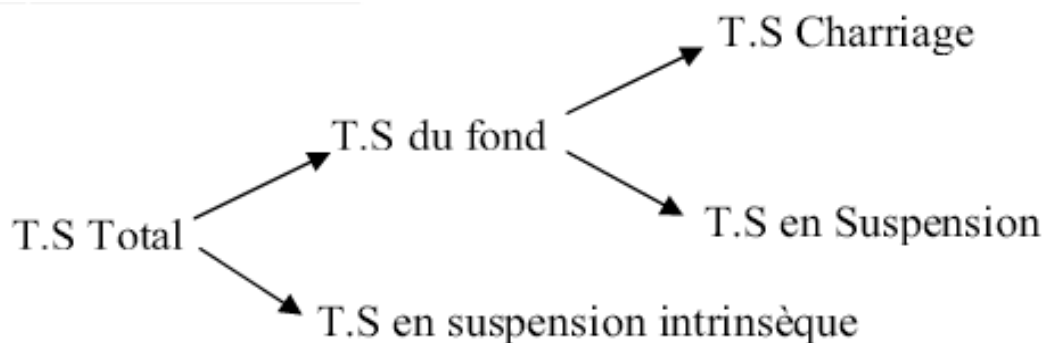


Figure I.05 : Modes de transport solide. [16]

La figure I.06 permet de voir comment se déroule chaque type de transport solide

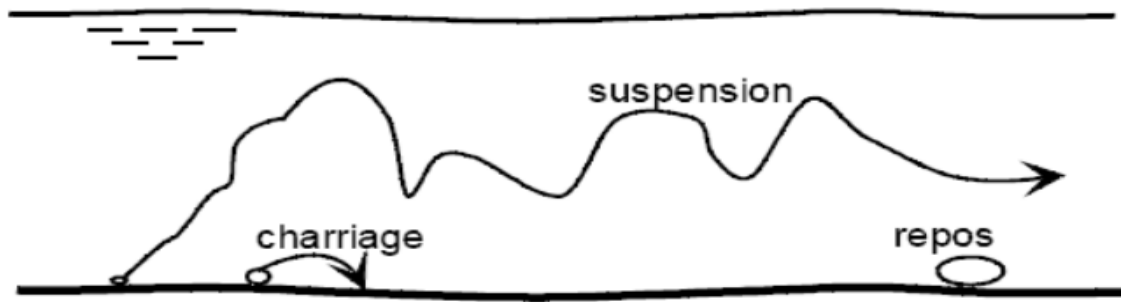


Figure I.06 : Schémas des modes de transport solide. [16]

I.4.2 Calcul et estimation du transport solide

Le calcul du transport solide est le calcul du débit solide. Ce dernier est le volume de matériaux transportés par le courant par unité de temps. Il s'exprime en mètre cube par seconde. Il constitue depuis longtemps un défi pour les ingénieurs et chercheurs, qui ont élaboré une panoplie complexe de méthodes et de formules pour faciliter ce travail. De nombreux hydrauliciens ont cherché à établir des relations permettant d'estimer le débit solide d'un cours d'eau, à partir de nombreuses mesures en modèle réduit ou sur des fleuves. Ces différentes formules donnent rarement des résultats comparables, car elles ont été établies dans des conditions différentes.

I.5 Transport par charriage

Le charriage est un mouvement des grains près du fond par roulement ou glissement des grains les uns sur les autres ou par petits sauts. Le charriage est un déplacement mais bien sûr pour qu'il y ait déplacement il faut qu'il y ait d'abord arrachement des grains. Ces déplacements sont dus à la traînée et à la portance.

Les particules charriées se déplacent sous l'effet des actions hydrodynamiques exercées par l'écoulement d'eau. Le transport solide par charriage concerne plutôt les particules grossières, typiquement de diamètre supérieur à 0,5mm. [16]

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

I.5.1 Description du phénomène [10]

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

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

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

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

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

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

$$\tau = \rho g R_h j \quad (\text{N/m}^2) \quad (\text{I.09})$$

Avec :

τ : La contrainte sur le fond de la rivière (N/m^2).

J : Perte de charge régulière de l'écoulement (m/m).

ρ : Masse volumique du liquide (Kg/m^3).

R_h : Rayon hydraulique(m).

g : Accélération de pesanteur (m^2/s).

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.

Vu la complexité de mesure, le charriage n'a pas été mesuré, les valeurs utilisées dans la quantification sont inspirées de travaux réalisés par des chercheurs.

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

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

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

a) Formule de Schoklitsch [18]

Schoklitsch a proposé deux formules empiriques, l'une en 1934 et l'autre en 1950, présentent la plus récente.

$$q_s = \frac{2,5}{S_s} j_e^{3/2} (q - q_c) \quad (\text{I.10})$$

S_s : densité relative des particules.

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

$$q_c = 0,26(s_s - 1)^{5/3} \frac{d^{3/2}}{j_e^{7/6}} \quad (I.11)$$

Valable pour $d \geq 6\text{mm}$. Pour un mélange de granulométrie non uniforme on prend $d = d_{40}$ comme diamètre équivalent.

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

b) Formule de MEYER-PETER et MÜLLER [18]

En analysant plusieurs formules empiriques obtenues en laboratoire, mais en vérifiant les conditions de Froude, que MEYER-PETER et MÜLLER ont obtenu en 1948. Leur dernière formule est :

$$0,25\rho^{1/3} g_s'^{2/3} = \gamma R_h \zeta_M j_e - 0.047(\gamma_s - \gamma) \quad (I.12)$$

g_s' : le débit solide en poids dans l'eau $\frac{g_s'}{g_s} = q_s$

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

En posant :

$$\tau' = \zeta_M \gamma R_h j_e \quad \text{et} \quad \tau_c = 0.047(\gamma_s - \gamma)$$

Il vient :

$$g_s' = 8 \sqrt{\frac{1}{\rho}} (\tau' - \tau_c)^{3/2} \quad (\text{Kg/s}) \quad (I.13)$$

Où :

$g_s' = g_s (\gamma_s - \gamma) / \gamma_s$ est le débit solide en poids dans l'eau

et $g_s / \gamma_s = q_s$ est le débit solide volumique net ($\text{m}^3/\text{s/m}$) :

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

Ou sous la forme suivante :

$$q_s = 8 \sqrt{g(s_s - 1)d^3} (\tau^{*'} - \tau_c^*)^{3/2} \quad (I.14)$$

R_h : est le rayon hydraulique du lit.

$\tau^{*'}$: est la force tractrice adimensionnelle corrigée.

τ_c^* : est la tension adimensionnelle critique de frottement.

ζ_M : est un paramètre de rugosité donnée par : $\zeta_M = (K_s/K'_s)^{3/2}$

K_s : rugosité totale du lit, évaluée avec la formule de MANING-STRICKLER

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

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

$$K'_s = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} = \frac{21.1}{d_{50}^{1/6}}$$

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

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

ζ_M : paramètre de rugosité selon Meyer-Peter.

La formule a été établie en canal pour des écoulements uniformes de 1 à 5000 l/s sur des granulats de 0.4 à 30 mm, de granulométrie tantôt uniforme tantôt étendue, et pour des pentes comprises entre 0,0004 et 0,024. La profondeur du canal dans les expériences allait de 120 cm. La gamme de ρ_s/ρ couverte allait de 7,25 à 4,22. [18]

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

Il est donc recommandé de n'utiliser cette formule que pour des granulats plutôt grossier, $d > 2$ [mm], à granulométrie uniforme et non uniforme, et pour une gamme de pentes de fond allant de 0.0004 à 0.024. [16]

c) Formule d'Einstein-Brown (1950) [18]

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

$$\Phi = 40 \left(\frac{1}{\psi} \right)^3 \text{ pour } \frac{1}{\psi} \geq 0.09 \quad (\text{I.15})$$

Avec :

$$\frac{1}{\psi} = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho) g d}, \quad \tau = \rho g R_h j$$

$$\Phi = \frac{g_s}{\rho_s g F \sqrt{g(s-1)d^3}}$$

Ψ : intensité adimensionnelle de frottement sur les particules solides.

Φ : intensité adimensionnelle de débit solide (intégrale de bakhmeteff).

$$F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{g(s_s-1)d^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{g(s_s-1)d^3}} \quad (I.16)$$

Cette formule a été confirmée pour des granulats de diamètre d allant de 0.3 à 7 mm en laboratoire.

D'ou la formule :

$$q_s = 40F \sqrt{g(s_s - 1)d^3} \tau^{*3} \quad (I.17)$$

I.6 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 même du liquide

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

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

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

La fonction $C(z)$ a été déterminée par M.P. O'BRIEN en 1933. L'échange verticale des particules solides du à la diffusion turbulente et le mouvement gravitationnel exprimé pour la vitesse de chute W à la cote Z est donnée par l'expression suivante : [18].

$$CW + \varepsilon_s \frac{dC}{dz} = 0 \quad (I.18)$$

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

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

Pour des faibles concentrations, il est admet en général que : $\varepsilon_s = \varepsilon$

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

$$\frac{du}{u^*} = \frac{dz}{kz} \quad (I.19)$$

K : paramètre de VON KARMAN.

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

$$\varepsilon = u^{*2} / \left(\frac{du}{dz} \right)$$

On obtient donc l'expression suivante :

$$\frac{dC}{C} + \frac{w}{ku^*} \left(\frac{h}{h-z} \right) \frac{dz}{z} = 0 \quad (I.20)$$

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

$$\frac{C}{C_0} = \left(\frac{h-z}{z} - \frac{z_0}{h-z_0} \right)^{w/ku^*} \quad (I.21)$$

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

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

I.6.1 Description du phénomène [16]

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

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

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

$$U^2 = 360 . g . D \quad (I.22)$$

Avec :

$$U = C\sqrt{hj} \quad \text{et} \quad \tau = \gamma j h \quad \text{d'où} \quad \tau = 360\left(\frac{\gamma g}{C^2}\right)D$$

τ : Tension tangentielle de l'écoulement (N/m²).

γ : Poids volumique du liquide (N/m³).

C : Coefficient de Chezy.

h : Hauteur du liquide (m).

J : Perte de charge régulière (m/m).

U : Vitesse de l'écoulement (m/s).

D : Diamètre des grains (mm).

g : Accélération de pesanteur (m²/s).

a) Formule d'Einstein [18]

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

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

$$q_{ss} = 11,6 C_0 u_{*s}^* [2,303 \log(30,2 \frac{h}{\Delta})^{j_1 + j_2}] \quad (I.23)$$

Où j_1 et j_2 sont des intégrales évaluées numériquement (abaques) pour déversent valeurs de A_E , ζ , tel que : (voir figure I.07)

$$\zeta = w/k u_{*s}^*$$

$$A_E = z_s/h$$

ζ : l'exposant de ROUSE

Δ : un terme correcteur

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

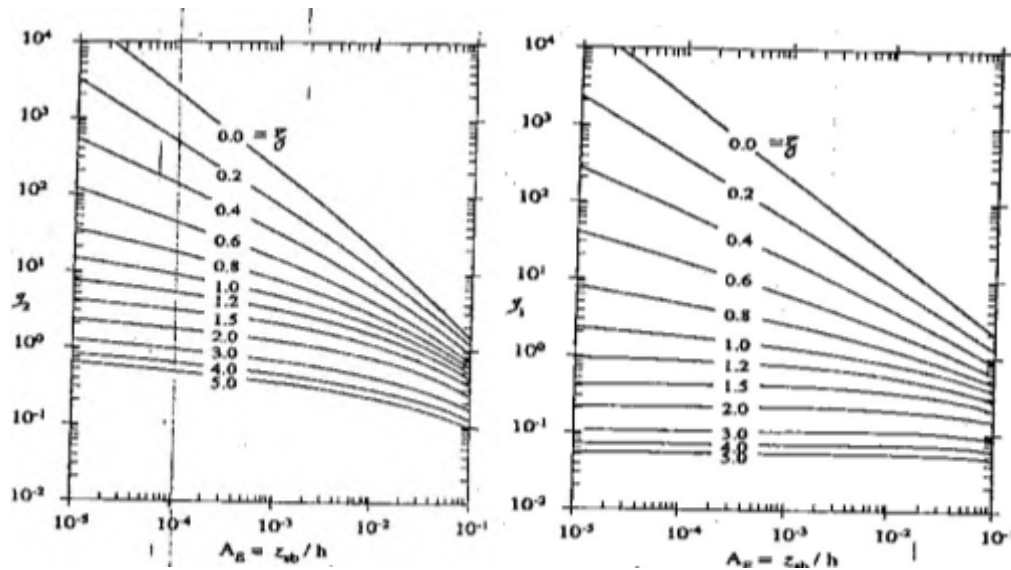


Figure I.07 : Intégral de j_1 et de j_2 utilisée dans la méthode d'EINSTEIN. [16]

I.6.2 Méthode statistique [19]

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

$$q_{ss} = a q^b \quad (I.24)$$

Où q_{ss} : est le débit solide en Kg/s,

q : est le débit liquide en m^3/s et a et b deux paramètres à déterminer à partir des séries observées.

I.6.3 Caractérisation de la phase solide

Le transport solide sédimentaire dépendra obligatoirement du type de matériaux en présence. De plus la granulométrie du sol, joue un grand rôle dans le phénomène du transport solide. Nous allons nous intéresser aux sédiments et à la définition de leurs caractéristiques physiques et hydrauliques essentielles, à savoir :

- ❖ La taille de la particule, donnée par la courbe granulométrique.
- ❖ La forme des particules.
- ❖ La masse volumique des particules ρ_s .
- ❖ Vitesse de chute w .
- ❖ Tous ces paramètres peuvent varier le long du canal. De plus, ils dépendent du type de prélèvement et d'analyses d'échantillon.

I.6.4 Classification des sédiments [16]

Le sol d'un lit est très diversifié et est composé de limon et vases, argile, sable, gravier, galet et bloc. Leur classification est donnée selon le tableau suivant :

Tableau I.01 : Classification des sédiments d'un lit.

Diamètre	désignation	Observation
$d < 0.5\mu$	Colloïdes (vase et limons)	Cohérentes, compressibles, non élastiques, lisses, difficiles à éroder.
$0.5\mu < d < 5\mu$	argile	
$5\mu < d < 64\mu$	silt	
$64\mu < d < 2\text{ mm}$	sable	
$2\text{ mm} < d < 20\text{ mm}$	gravier	Morceaux de roche plus ou moins roulés.
$20\text{ mm} < d < 300\text{ mm}$	galet	
$300\text{ mm} < d$	blocs	

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

I.6.5 Granulométrie

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

La courbe granulométrique du lit est obtenue par échantillonnage. Il est recommandé de prendre plusieurs échantillons dans différentes sections du cours d'eau à l'étude, puis d'établir une courbe moyenne. Chaque échantillon

doit être prélevé jusqu'à une profondeur d'érosion maximale anticipée, soit autour de 0.70 m de profondeur.

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

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

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

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

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

I.7 Vitesse de chute [16]

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

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

$$p = \frac{3}{4}\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 (\rho_s - \rho)g = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_s - \rho)g \quad (\text{I.25})$$

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

$$F = \xi \gamma \frac{\pi d^2}{4} \frac{w^2}{2g} \quad (\text{I.26})$$

On pose :

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

D'où la formule de newton :

$$w^2 = \frac{3(s-1)g}{4\xi} d \quad (\text{I.27})$$

On peut définir 2 paramètres adimensionnels :

✚ Le diamètre des sédiments logique du grain :

$$d^* = \left[\frac{(s-1)}{v^2} g \right]^{\frac{1}{3}} d \quad (\text{I.28})$$

et le nombre de Reynolds de chute :

$$R_w = \frac{dw}{\nu} \quad (I.29)$$

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

• pour un régime laminaire $R_w < 1$:
on a : $\xi = 24/R_w$ et $R_w = 1/18d^{*3}$

On obtient la solution de Stocks :

$$w = \frac{1}{18} \frac{(s-1)g}{\nu} d^2 \quad (I.30)$$

• pour un régime turbulent :
 $R_w > 1000$, ξ est une constante et ne dépend plus de Reynolds :

$$\xi = 0,5 \quad \text{et} \quad R_w = \frac{8}{3} d^{*3}$$

Et :
$$w = \sqrt{\frac{8}{3}(s-1)gd} \quad (I.31)$$

• pour $1 < R_w < 1000$:
On est dans la zone de transition entre le régime laminaire et le régime turbulent : $\xi = F(R_w)$, cette fonction est plus complexe. Oseen propose la formule empirique suivante, pour $R_w > 2$:

$$w = \frac{24}{R_w} \left(1 + \frac{3}{16} R_w\right) \quad (I.32)$$

Dans le domaine du transport solide on admet les équations suivantes :

$$d < 0.1 \text{ mm} \quad w = \frac{1}{18} \frac{(s-1)g}{\nu} d^3 \text{ STOCKS}$$

$$0.1 \text{ mm} < d < 1 \text{ mm} \quad w = 10 \frac{\nu}{d} \left[\sqrt{1 + \frac{0.01(s-1)}{\nu^2} g d^3} - 1 \right] \text{ BRUDRYK}$$

$$1 \text{ mm} < dw = 1.1 \sqrt{(s-1)gd} \quad \text{VAN RIJIN}$$

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

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

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

I.8 Début d'entraînement des sédiments

I.8.1 Début d'entraînement des sédiments en suspension

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

La plus part des critères se base sur la comparaison de la vitesse de frottement u^* à la vitesse de chute des particules solides w . En se basant sur des résultats expérimentaux et sur des considérations théoriques, selon [18] Bagnold (1954) et Engelund (1965) indiquent que les particules solides ne peuvent être suspendues que si : u^* dépasse la vitesse de chute soit :

$$u_*/w \geq 1$$

Graf(1971) suggère que le transport en suspension commence si

$$u_*/w \geq 0.4$$

Rijin (1984) propose ce qui suit :

$$\frac{u_*}{w} > \frac{4}{d^*} \quad \text{Pour } 1 < d^* \leq 10$$

$$\frac{u_*}{w} > 0.4 \quad \text{Pour } d^* > 10$$

I.8.2 Début d'entraînement des sédiments sur le fond

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

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

Shields a montré expérimentalement en 1936 que pour une granulométrie uniforme, la loi de mise en mouvement des grains pouvait s'exprimer par une relation entre τ^* et le nombre de Reynolds. [10]

$$\tau^* = \frac{\gamma_w R i}{(\gamma_s - \gamma_w) d} \quad (I.33)$$

Avec :

R : rayon hydraulique.

i : pente de l'écoulement.

γ_s : poids volumique spécifique des grains solides est de 26 à 27KN/m³.

γ_w : poids volumique de l'eau 10KN/m³.

d : diamètre du grain.

Aussi, proposons-nous la présentation de Yalin 1972 qui a transformé la relation de Shields en une relation entre

$$\tau^* \text{ et } d^* = d \left[\frac{(\gamma_s - \gamma_w)g}{\gamma_w v^2} \right].$$

Cette relation apparait dans la (figure 06.)

La figure 06 montre donc qu'à 20°C, le matériau correspondant au faible paramètre de Shields a pour diamètre environ 0,8 mm.

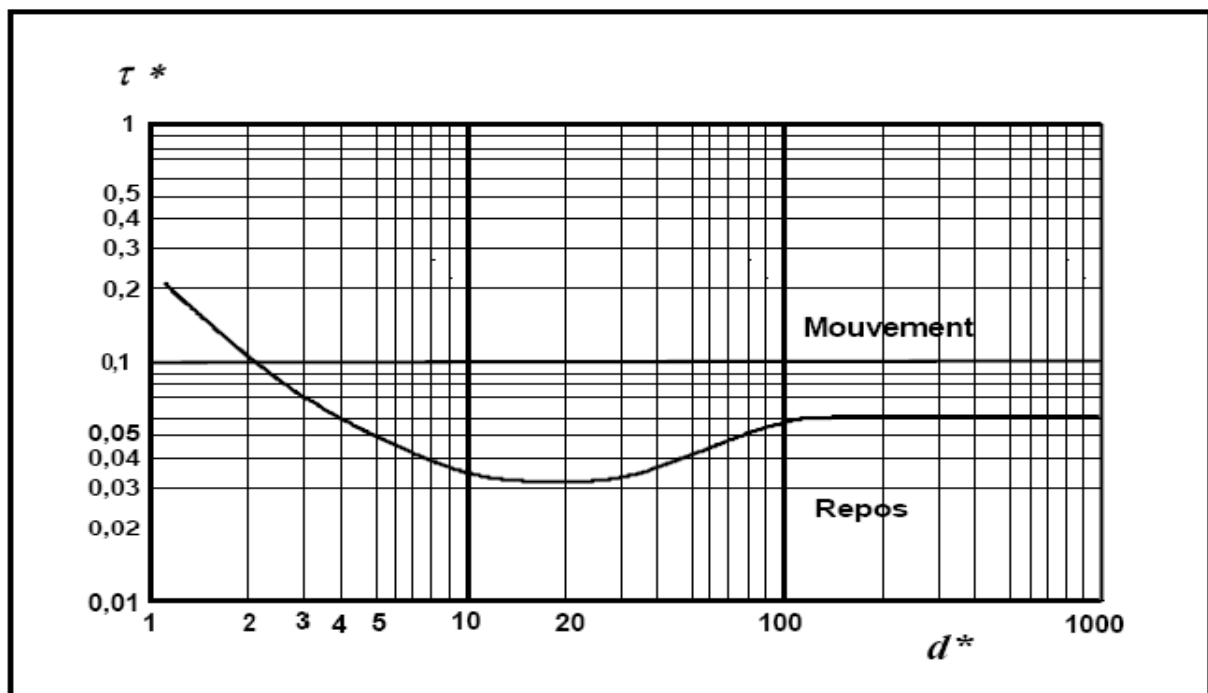


Figure I.08 : diagramme de Yalin-Sheilds (d^* en m). [16]

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

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

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

Tableau I.02 : Classification de Ramette. [16]

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

I.9 Transport solide en Algérie

Le phénomène d'érosion et l'envasement sont une véritable calamité en Algérie. La nature et la morphologie des terrains en pente, la fragilité du couvert végétal, le manque de boisement et l'urbanisation en amont des barrages engendrent une forte érosion qui réduit la capacité de stockage des barrages de 2 à 3% chaque année, suite à l'envasement dû au transport et au dépôt de sédiments par les eaux de ruissellement. Selon [13] il existe plusieurs études faites en Algérie sur le transport solide. Les études signalées par l'auteur sont :

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

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

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

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

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

difficultés économiques. La lutte antiérosive a été restreinte à la protection des ouvrages d'art, à la reforestation, à la végétation des ravines et à la construction des grands barrages.

Pour les paysans, les seules actions de l'état concernent aujourd'hui l'amélioration foncière (c'est-à-dire, sous-solage des sols à croûte calcaire, qui augmente la productivité des céréales) et la création de petites retenues collinaires, fournissant de l'eau en tête de vallée pour le bétail, l'habitat et quelques hectares d'irrigation. Même cette politique est remise en cause par des hydrologues qui font remarquer que l'envasement des barrages n'a pas diminué depuis l'effort consenti par l'aménagement des hautes vallées.

Heusch (1970) et Demmak (1982) : montrent que la majorité des sédiments piégés dans les réservoirs proviennent du ravinement, des glissements de terrain, des éboulements des berges et de la divagation des oueds. En fonction des objectifs des projets de lutte antiérosive en vue de réduire les nuisances à l'aval ou de préserver le capital foncier des versants, on cherchera un compromis permettant d'intervenir dans les vallées pour piéger les sédiments et stabiliser les berges tout en aménageant les versants pour réduire et retarder le ruissellement (améliorations foncières, talus enherbés,).

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

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

Tixeront (1960): Ses travaux sont basés sur les données de 32 bassins d'Algérie et 6 bassins de Tunisie, dont la superficie varie de 90 à 22300 km². L'auteur a procédé à la correction et l'homogénéisation des séries qui figurent dans les annuaires hydrologiques de l'Algérie. Après avoir regroupé les bassins en trois classes, suivant un critère régional, il a essayé de mettre en évidence le rôle des facteurs suivants : précipitations, écoulement annuel, répartition saisonnière des pluies, le couvert végétal et les facteurs géomorphologiques dans la dégradation du sol

Il a trouvé que :

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

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

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

I.10 Conséquences et les méthodes de prévision et défense

I.10.1 Conséquences du phénomène du transport solide

La construction des barrages par l'aménagement des cours d'eau modifié les conditions d'écoulement du débit solide.

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

I.10.2 Mécanisme de l'envasement

L'érosion des bassins versants a des conséquences sur les aménagements du cours d'eau à l'aval.

La plus dramatique de ces conséquences et sans aucun doute, l'envasement des retenues qui est la cause principale des pertes en capacité des réservoirs d'eau.

I.11 Méthodes de lutte contre l'érosion et le transport solide

La modification de l'environnement dans le bassin versant est les conséquences de multiples problèmes posés par l'érosion accélérée et les dépôts des sédiments.

Les méthodes de lutte contre l'érosion et la sédimentation reposent sur l'étude de leur nature et leur évolution, afin de prévoir les dispositifs nécessaires pour réduire ou éliminer les effets négatifs des processus observés.

On peut classer les moyens de lutte contre l'érosion dans les catégories suivantes :

- Procédés agro techniques.
- Restauration des forêts.
- Procédés hydrotechniques.

I.11.1 Procédés agro techniques

Ces méthodes de protection contre l'érosion consistent surtout en procédés de cultures appropriées pour retenir l'eau.

Le travail selon les courbes de niveau est réservé aux pentes douces et aux régions de pluies modérées. Sur les terrains pentus et dans les régions où il peut se produire des fortes crues, l'eau des ruissellements peut être retenue par les cultures en bande associées à des travaux de terrassement.

I.11.2 Restauration des forêts

Les ceintures forestières sont un moyen efficace de conservation des sols.

Elles contribuent à la réduction de la vitesse de vent et améliorent le microclimat. Elles sont très efficaces lorsqu'elles sont plantées en lignes perpendiculaires au ruissellement, pour que 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.

I.11.3 Procédés hydrotechnique

Ces procédés comprennent les fossés d'infiltration 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 diversions au sommet des ravines, etc.

I.12 Cours d'eau

L'érosion du réseau hydrographique est la cause principale des pertes en capacité des réservoirs d'eau.

Plusieurs procédés sont employés dans le but de protéger le cours d'eau principal contre le dépôt de sédiments causé par le phénomène d'érosion.

a) 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 déposé directement sur le talus des berges.

b) 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 de berges.

c) Guidage de l'écoulement

Pour écarter les courants et les vagues des zones sensibles, les jetées, épis et les chicanes sont souvent employés.

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.

d) 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 :

- Bassins d'amortissement.
- Sauts de ski.

Conclusion

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

Le phénomène d'érosion et le transport solide sont une véritable menace en Algérie. La nature et la morphologie des terrains en pente, la fragilité du couvert végétal, le manque de boisement et l'urbanisation en amont des barrages engendrent une forte érosion qui réduit la capacité de stockage des barrages de 2 à 3%.

Le transport solide est un phénomène à seuil, avec deux modes :

- Le charriage, translation en masse des matériaux du fond.
- La suspension, entrainement par le courant turbulent, dans toute la section d'écoulement.

Le charriage et la suspension ont sur la morphologie des influences très différentes :

- Le charriage est en constante interaction avec le lit ; nous pouvons dire qu'il le façonne.
- Les matériaux en suspension ont beaucoup moins d'interaction avec ceux du fond ; ils se déplacent à la vitesse du courant et ne font que passer ; ils ont rarement un rôle morphogène important.

CHAPITRE II :
PRESENTATION
DE LA ZONE
D'ETUDE

Introduction

La wilaya de Tizi Ouzou s'étend sur une superficie de 2992,96 km², est situé au Nord de l'Algérie, elle est délimitée :

A l'ouest par la wilaya de Boumerdès ; au sud par la wilaya de bouira ; à l'est par la wilaya de Bejaïa ; au Nord par la méditerranée.

Elle comprend approximativement le territoire situé de la rive droite du Sebaou jusqu'à la mer. Le réseau hydrographique renferme deux (02) grands bassin versant à savoir le bassin de l'Ouest-Sebaou et le bassin côtier.

II.1 Bassin versant de sébaou

II.1.1 Présentation du bassin versant

II.1.1.1 Situation géographique

La vallée de l'oued sebaou, zone déprimé du versant nord du Djurdjura qui culmine à 2308 m (Lala Khedidja) est a une centaine (100) de kilomètres à l'Est d'Alger et à une vingtaine (20) de kilomètres de la méditerranée. La plaine alluviale du Sébaou se situe dans les Wilaya de Tizi-Ouzou et de Boumerdès. La figure II.01 et figure II.02 illustre le bassin versant de oued Sébaou.

.La surface drainée par l'oued Sébaou et ses affluents (bassin versant) sont limités entre les altitudes 36°27' et 36°55' Nord et les longitudes 3°55' et 4°53' Est. S'étalant sur une superficie de 2500 Km² ; Le bassin versant de Sébaou est caractérisé par un relief typiquement montagneux, couvrant 82% de la superficie totale, elle se limite : [20]

- Au nord ouest par la mer méditerranée ;
- Au nord et nord est par la chaîne littorale ;
- Au sud et sud est par la chaîne de Djurdjura ;
- A l'ouest par les chaînons de Naciria et Sidi-Ali-Bounab orienté ENE –WSW ;

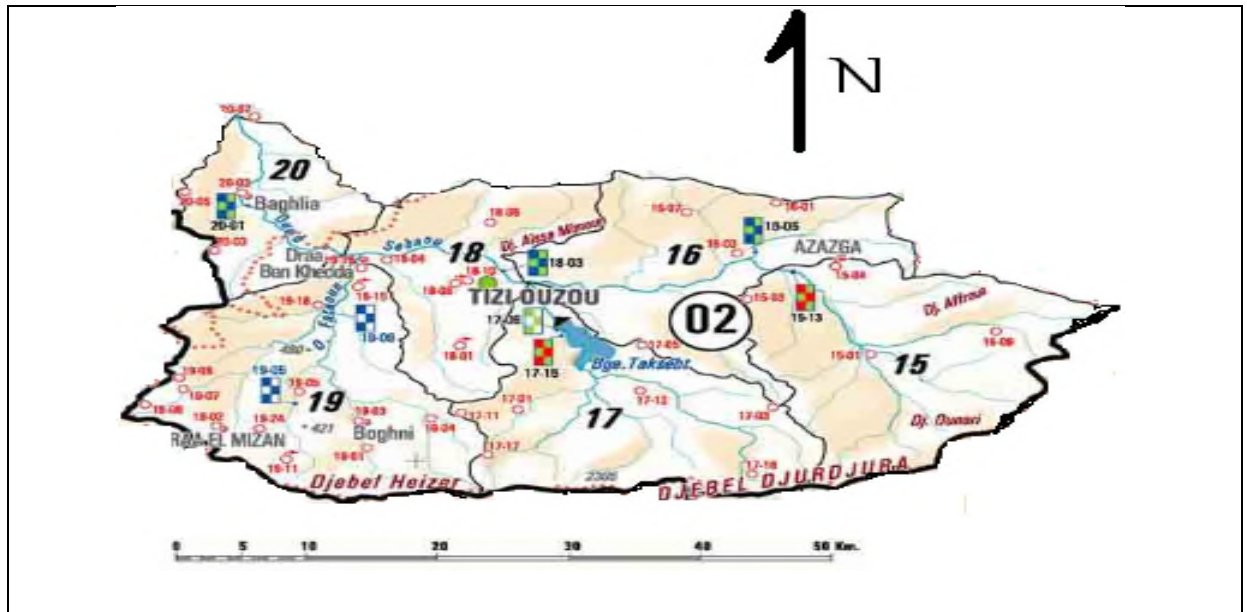


Figure II.01 : Bassin versant de sébaou. [ANRH]

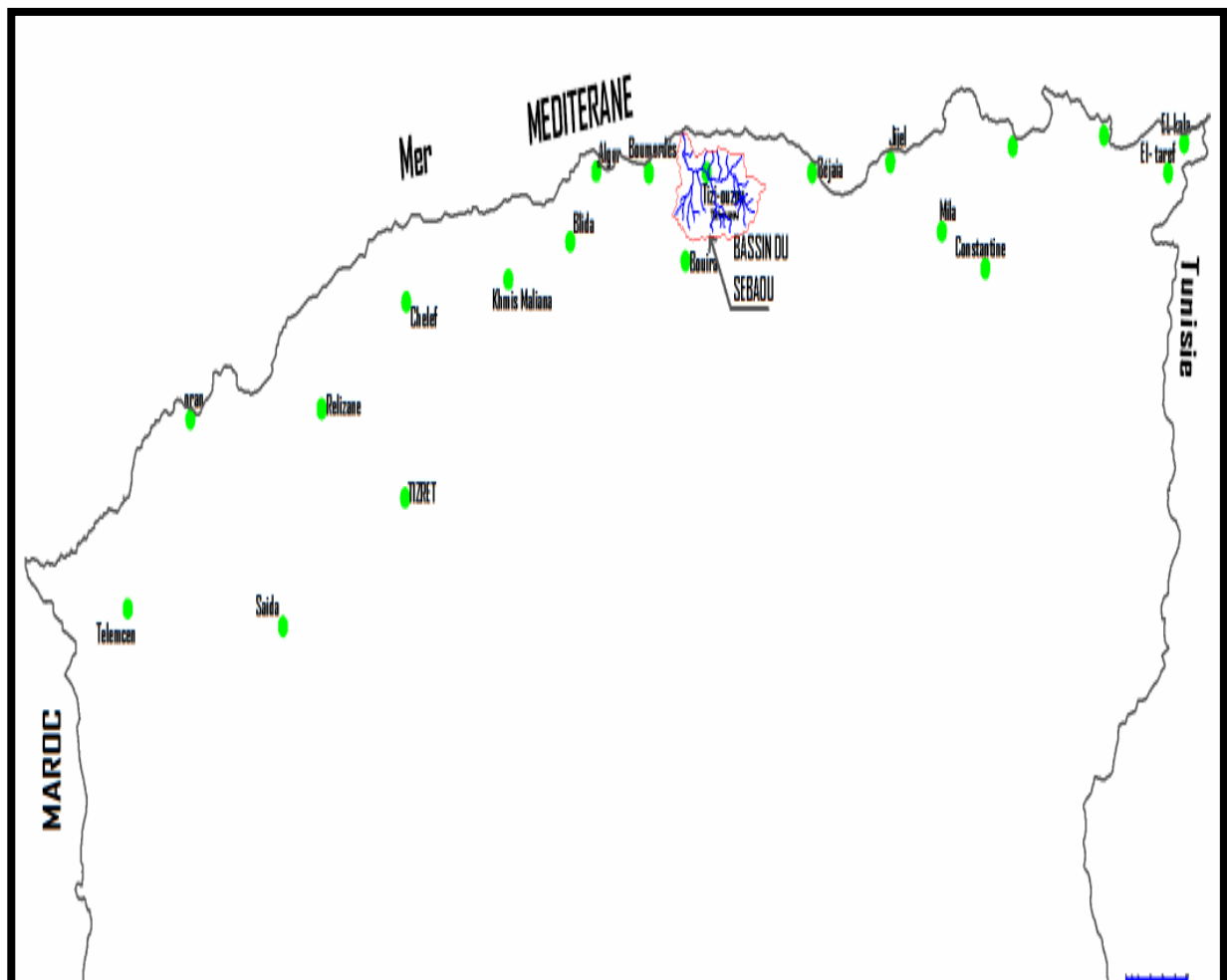


Figure II.02 : Situation géographique du Bassin versant du Sébaou.

II.2 Etude géomorphologique

La climatologie, l'hydrologie de surface et souterraine sont étroitement tributaires des caractéristiques physiques, morphologiques de reliefs et morphométriques des bassins versants. Aussi, il apparaît nécessaire voir indispensable de quantifier ces paramètres.

II.2.1. Grands ensembles morphologiques

Le paysage de la région d'étude est diversifié, caractérisé par un relief montagneux très accidenté. Les chapelets de surélévations rudes et accentuées apparaissent dans toute la région.

Le grand bassin de Sébaou est limité au Nord par la chaîne littorale et au sud par le massif Kabyle. Cette double masse surélevée délimite un couloir étroit d'orientation générale Est-Ouest, formant la vallée de l'oued de Sébaou, qui s'étend d'Azazga à l'Est jusqu'au Dellys à l'Ouest.

Nous distinguons trois unités morpho structurales nettement différenciées :

II.2.2 Chaîne Djurdjura

Elle fait partie de la dorsale calcaire des Maghribides, délimite au sud notre domaine d'étude et représenté par un ensemble morphologique très compétant d'âge secondaire et tertiaire.

Cette chaîne culmine au sommet de Lalla Khedidja (2308m) et au Ras Timedouine (2503m) sous forme d'un arc, très peu tendu et étroit qui s'achève à l'est par un élément isolé, le massif de Chellata.

Elle se compose de quatre unités qui se succèdent du Nord vers le Sud :

- L'unité des kouriet.
- L'unité de Ras Timadouine et de Tikjda.
- L'unité d'Ajiba.
- L'unité de Lalla Khedidja.

Les unités d'Ajiba et Lalla Khedidja proviennent d'une zone située au nord des kouriet. Elles se sont déplacées vers le sud entre le Priabonien et l'Oligocène supérieur, et ont recouvert les unités méridionales de Ras Timadouine et de Tikjda. Des écaillages ultérieurs ont abouti au pincement de ces unités. [20]

II.2.3 Massif de Kabylie

Morphologiquement, le massif de la grande Kabylie constitue un ensemble homogène, qui domine le bassin de Tizi-Ouzou au nord et assure une transition la chaîne de Djurdjura au sud. Il est limité à l'est par l'affleurement des flysch du haut Sébaou et à l'ouest par les flysch supra-kabyles.

Les sommets forment un bombement à grand rayon de courbure selon l'axe orienté Est-Ouest et les altitudes se relèvent d'Ouest 600 m en Est 1278m.

Cet ensemble morphologique est caractérisé par des formations plus au moins tendres et compartimentées d'âges récents aux anciens.

C'est là qu'on voit se succéder les différents types d'érosions, allant du plus simple (ravinement plus simple) au plus complexe (mouvement de masse, éboulement, glissement)

II.2.4 Synclinale de Tizi-Ouzou

C'est le seul matériel autochtone dans la région, représenté essentiellement par les grés et les limons du miocène 'Post-nappe' (M.Ben Hassainne ,1980).

Dans sa partie médiane s'allonge une série de chaînons de socle aligné, que l'oued Sébaou traversent orthogonalement, il s'agit de :

Alignement Nord :

- Massif de Naciria l'Ouest ;
- Massif de Draà Karouche à l'Est ;
- Alignement Sud :
- Sidi Ali Bounab,Belloua à l'Ouest ;
- massif d'Aïssa Mimoun à l'Est ;

Et à l'intérieur de cette cuvette, s'étale la plaine alluviale du Sébaou, qui se présente sous forme d'une bande étroite à fond plat orienté E-W, constituée d'un remplissage alluvionnaire d'âge quaternaire.

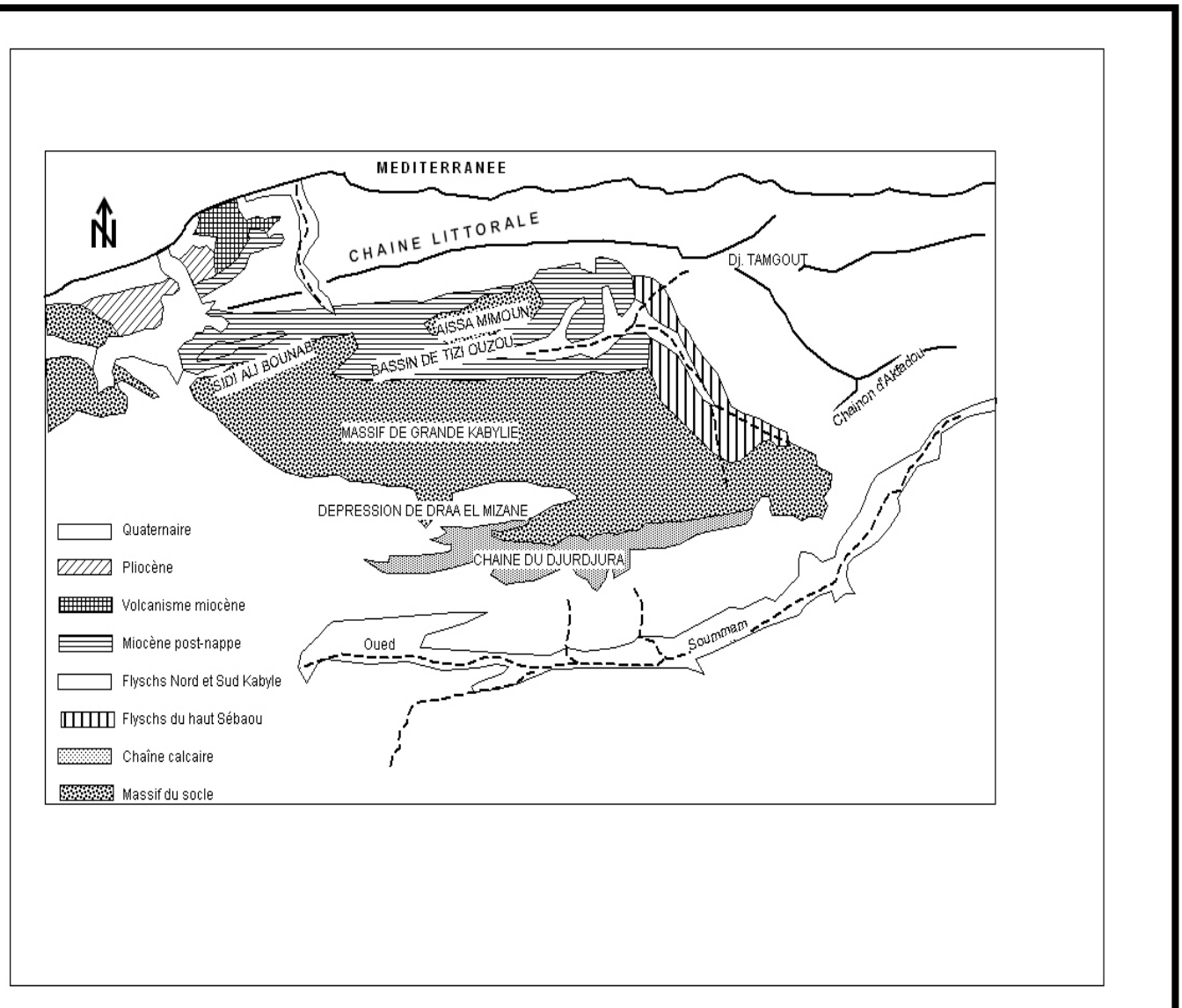


Figure II.03 : Carte des unités morpho structurales. [ANRH]

II.3 Lithologie

La perméabilité du sol et de sous sol d'un bassin versant est liée à la nature géologique qui conditionnera l'infiltration, le ruissellement ainsi que l'évaporation.

Mises à part les formations perméables de la chaîne calcaire de la plaine alluviale de l'oued Sébaou, les autres formations telles que celles du socle Kabyle, de Miocène post nappe et des flysch qui occupent la majeure partie du bassin versant, sont généralement "imperméables".

II.4 Végétation

Dans notre secteur d'étude la végétation est de type méditerranéen. Le couvert végétal joue un rôle important dans l'amortissement des crues en réduisant et en freinant le ruissellement superficiel, ainsi la perméabilité des terrains est liée à leur nature lithologique.

La végétation de la région d'étude est de type méditerranéen, caractérisée dans son ensemble par trois étages bioclimatiques bien distincts :

- **Les cultures** : elles sont concentrées dans la plaine et représentées par l'arboriculture et les mirifiques champs des cultures maraîchères, auxquelles s'ajoutent laurier rose et le roseau dominant les zones incultes et inondables.
- **Les maquis** : caractérisant en particulier les zones intermédiaires, constitués essentiellement de très denses champs d'oliviers parcelles de figuiers et par quelque peuplement de chêne liège et de chêne vert, complète par une végétation arbustive assez basse qui reflète l'état de dégradation de la végétation dans la région.
- **Les forêts** : occupant les zones montagneuses et représentées généralement par le chêne vert, le chêne liège et le pin d'alpe.

Malgré sa diversification, le couvert végétal de notre région d'étude demeure très dégradé et n'occupe que 19%(soit 55025 ha) de la surface totale. Cette dégradation due indubitablement à l'activité humaine (défrichement, coupes, incendies.....) expose la région à une forte érosion et une déperdition accélérée des sols fertiles surtout en haute montagne. [20]

II.5 Réseau hydrographique

Le bassin versant du Sébaou représente un réseau hydrographique très développé, voir figure II.04.

Le drainage très dense s'effectue par une multitude de torrents plus ou moins long.

Les torrents de rive droite proviennent de la chaîne littorale au nord du bassin versant et ne dépassent pas une quinzaine de kilomètres de long. L'oued Dis qui présente le plus fort débit prend sa source au Dj. Tamgout à 1278m d'altitude et débouche dans l'oued Sébaou juste après le premier coude majeur de l'oued du village de Freha.

Les torrents de la rive gauche naissant dans le socle de la grande Kabylie :

- L'oued Sébaou lui-même et ses deux principaux affluents sud prennent naissance dans la chaîne du Djurdjura.
- L'oued Bougdoura prend sa source à 1900m d'altitude. le profil longitudinal très relevé dans la section amont, s'abaisse rapidement, et au contact de la plaine, s'insinue entre les inters fleuves.
- L'oued Aissi prend sa source à 2000m d'altitude. C'est l'affluent qui a le plus fort débit et qui est responsable des modifications du tracé du lit de l'oued sébaou. En effet l'oued Aussi débouche dans l'oued sebaou juste en amont des gorges du Belloua.
- L'oued Sébaou débute à l'Est de la chaîne du Djurdjura par l'intermédiaire de quatre torrents qui naissent entre le col de Tirourda à 2200m d'altitude le col de Chellata à 2100m d'altitude.

Les quatre torrents confluent après cinq kilomètres de parcours pour former le haut sébaou, que les kabyles nomment Acif n'Boubhir.

Dans la haute vallée, l'oued suit une direction SSE-NNW, jusqu'à un premier coude majeur, localisé entre Azzazga et Freha.

Dans la moyenne vallée, l'oued coule suivant une direction Et-Ouest dans le synclinal Miocène de Tizi-Ouzou.

Dans la basse vallée, on assiste à une nouvelle orientation du tracé. Vers Tadmait l'oued effectue un nouveau coude majeur et se met à couler suivant une direction parallèle à celle de sa direction amont, pour déboucher en mer, à l'Ouest de Dellys.

Dans cette section la terrasse la plus basse extrêmement étendue envahit toute la plaine alluviale, l'oued n'est plus adapté à la structure géologique dans cette région car il coupe en travers la chaîne littorale, et les chaînons côtiers. [20]

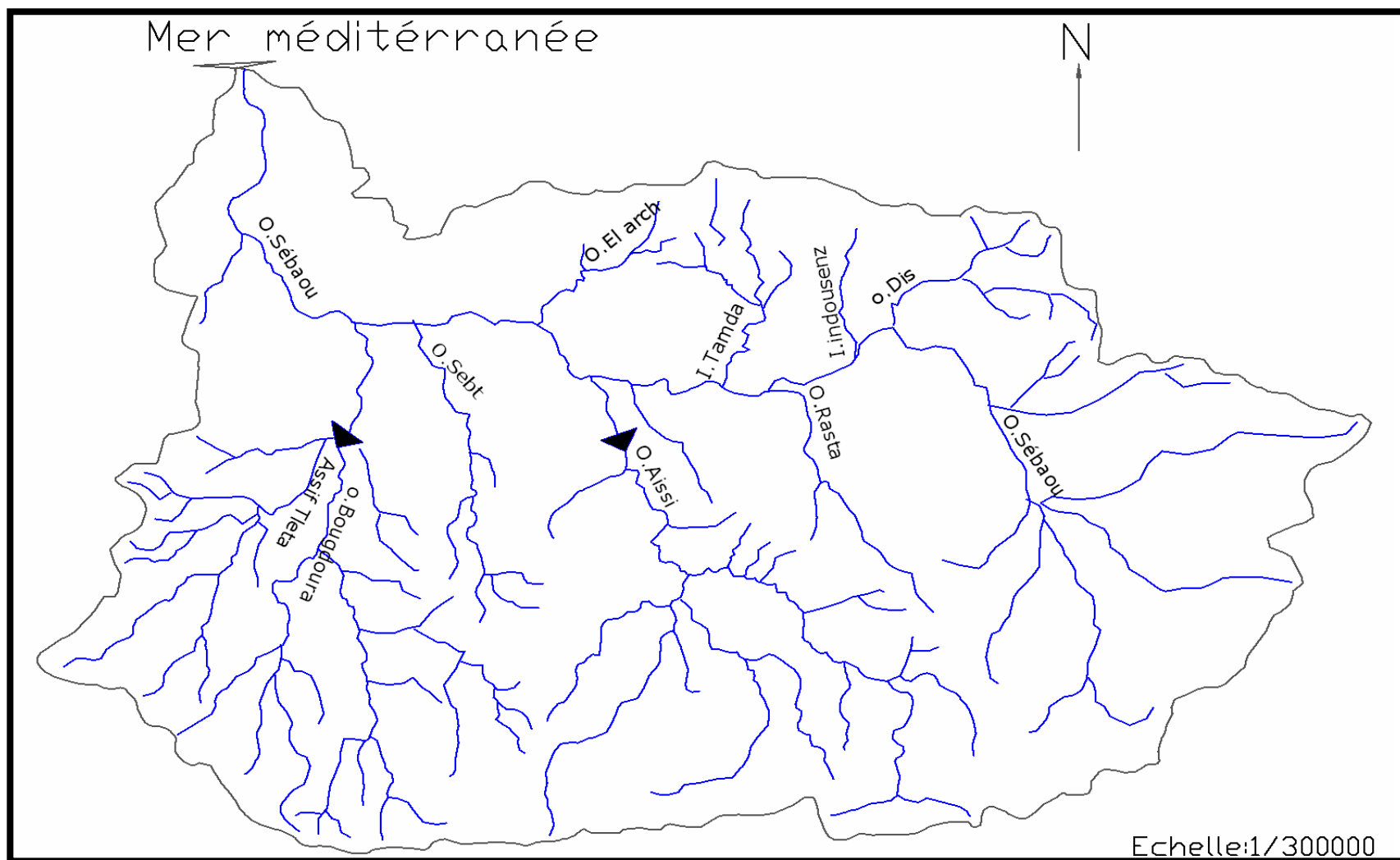


Figure II.04 : Réseau hydrographique du bassin versant du Sébaou. [20]

II.6 Paramètres physiques et géomorphologiques du bassin versant

Chaque cours d'eau draine une certaine surface de terrain appelée bassin versant. Le bassin versant fonctionne donc comme un collecteur chargé de recueillir les précipitations et de les transporter par l'écoulement vers le point le plus bas appelé exutoire. Cette transformation est plus ou moins rapide suivant les caractéristiques physiques du bassin.

La morphométrie du bassin fait partie des facteurs permanents, leur variation influe sur les modalités des écoulements superficiels et leur analyse permettra une meilleure compréhension des causes de variation des régimes hydrogéologiques.

II.6.1 Paramètre géométriques

Le bassin versant de la vallée de Sébaou (code 02 au répertoire de l'ANRH) subdivisé en 06 sous bassins réparties de façon inégale sur le Haut, Moyen, le Bas Sébaou figure II.04. Cette répartition est représentée dans le tableau II.01.

a) La surface

La surface d'un bassin versant est l'aire géographique délimitée par la ligne de crêtes bordant le bassin. A l'intérieur de cette surface l'eau précipitée est drainée et orientée par un réseau hydrographique vers l'exutoire. La surface influe sur le processus de la formation de l'écoulement. Le bassin versant de la vallée de sébaou couvre une superficie $S = 2500 \text{ km}^2$.

b) Le Périmètre

Le périmètre est défini par la ligne de crêtes formant le contour du bassin versant. Le périmètre du bassin versant de l'oued sébaou est $P = 250.4 \text{ km}$.

Tableau II.01: Répartition des superficies par sous bassin. [20]

	Code des sous bassins versant de sébaou	Supperficie en km ²	Périmètre en km
Haut Sébaou	02-15	532	102,4
	02-16	432	112
	02-17	468	98,6
Moyen Sébaou	02-18	304	82
	02-19	544	94,2
Bas Sébaou	02-20	220	62,6

La figure II.05 représente les sous bassin d'oued Sébaou

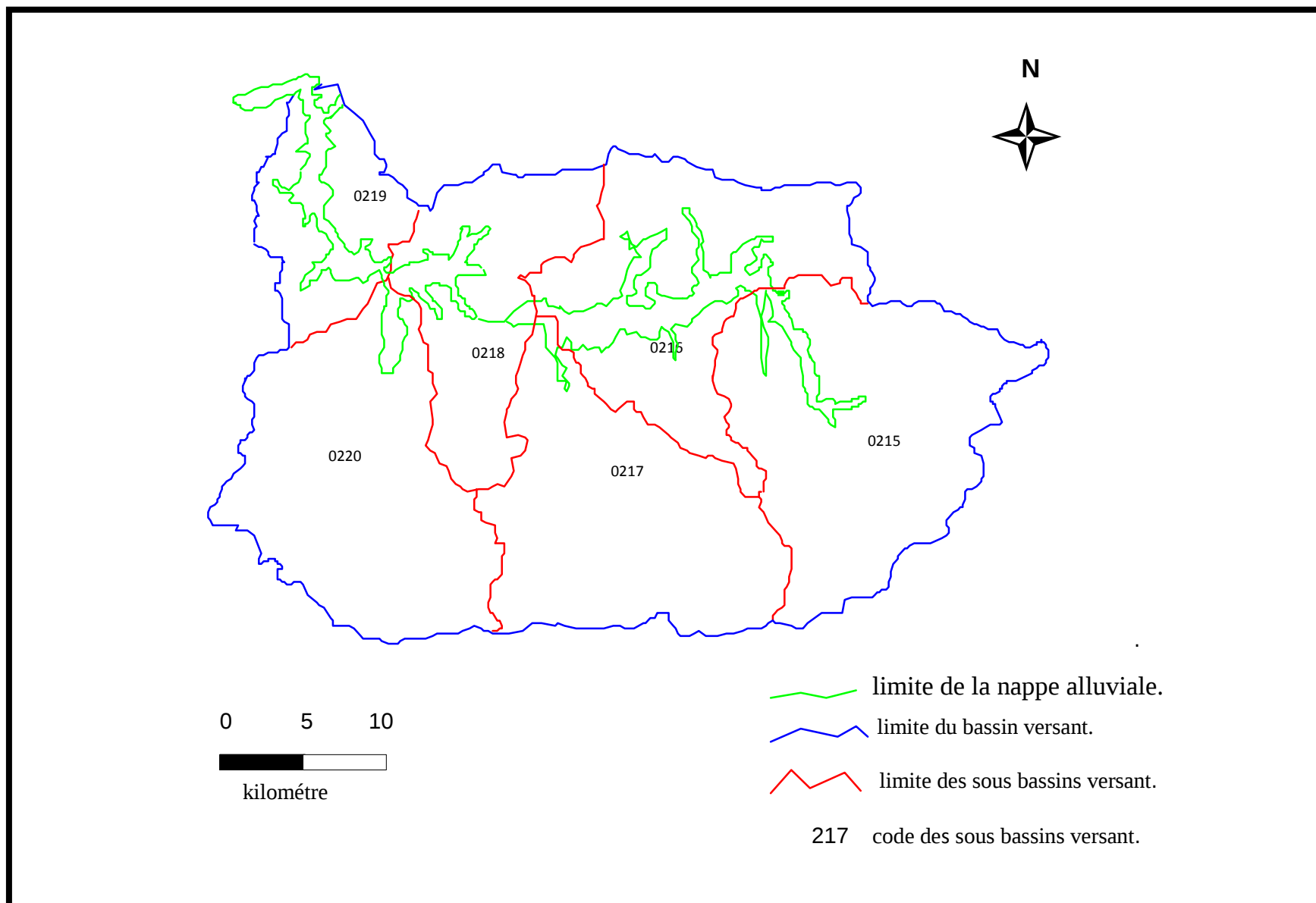


Figure II.05 : Sous bassins versant du sébaou. [20]

II.6.2 Paramètre du relief [20]**II.6.2.1 Indice de compacité de Gravelius**

La forme du bassin versant exerce une influence considérable sur la concentration des débits résultant d'une pluie donnée, plus le bassin est ramassé plus le débit se concentrent.

L'indice admis pour représenter cette caractéristique est l'indice de compacité de Gravelius K_c .

L'indice de compacité, il est exprimé en fonction de la formule suivant :

$$K_c = \frac{0.28P}{\sqrt{A}} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

P : périmètre du bassin en km.

A : surface en km^2 .

Les valeurs de K_c pour l'ensemble du bassin versant de sébaou ainsi pour ces sous bassins, sont mentionnées dans le tableau II.2.

Tableau II.02 : Paramètres de forme. [20]

Bassin versant		Périmètre (km)	Surface (km^2)	K_c
Haut Sébaou	02-15	102.4	532	1.24
	02-16	112	432	1.50
	02-17	98.6	468	1.27
Moyen Sébaou	02-18	82	304	1.31
	02-19	94.2	544	1.13
Bas Sébaou	02-20	62.6	220	1.18
Le grand bassin		250.4	2500	1.4

Les valeurs de K_c aussi bien pour le grand barrage que pour ces sous bassins sont supérieur à l'unité, suggérant à priori une forme allongée pour l'ensemble, donc la concentration des eaux à l'exutoire se fait lentement, ce qui favorise l'infiltration sur le ruissellement.

L'indice admis pour représenter cette caractéristique est l'indice de compacité de Gravelius K_c .

L'indice de compacité, il est exprimé en fonction de la formule suivant :

II.6.2.2- Rectangle équivalent

C'est une transformation purement géométrique. On assimile le bassin à un rectangle de même périmètre et de même surface, donc même indice de compacité

Le rectangle équivalent sert à la comparaison des bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement.

-La longueur du rectangle équivalent L en km :

$$L = \frac{k_c \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{k_c} \right)^2} \right) \quad (\text{II.2})$$

-La largeur du rectangle équivalent l en km :

$$l = \frac{p}{2} - L \quad (\text{II.3})$$

Pour $k_c=1.4$ et $A=2500\text{Km}^2$.

$L=100\text{km}$ et $l=25\text{km}$

a)Indice de pente globale (Ig) : [20]

$$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L} = \frac{D}{L} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

D : la dénivelée en (m)

L : longueur du rectangle équivalent =100Km

Pour ces données on a : $I_g=1.15\%$.

Conclusion

Le bassin versant de l'oued Sébaou est de forme allongée, de direction E-W, il couvre une superficie de 2500km^2 , dont l'altitude moyenne est de 504m.

La nappe alluviale représente environ 36% de la surface totale du bassin, dont l'altitude est inférieure à 200m.

Les différents paramètres morphologiques du bassin versant du Sébaou sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau II.03: Les paramètres morphologiques du bassin versant du Sébaou (source ANRH Tizi-Ouzou).

Paramètres morphologiques	Valeurs
Surface	2500km ²
Périmètre	240km
Longueur	100km
Largeur	27km
Altitude maximale	2305m
Altitude moyenne	504m
Altitude de fréquence $\frac{1}{2}$	510m
Altitude la plus fréquente	300m
Indice de compacité de Gravelius	1.4
Indice de pente globale (I_g)	1.15%

CHAPITRE III :

ETUDE

CLIMATIQUE

Introduction

Dans le présent chapitre, nous analyserons les paramètres climatologiques pour évaluer l'ensemble des éléments climatologiques et aussi la manière dont les différents composants du climat se comportent l'un par rapport à l'autre.

III.1 Etude hydroclimatologique

Pour mieux caractériser le régime climatique dans la région d'étude, nous avons choisi six stations climatiques, systématiquement sur la surface du bassin versant figure III.1, couvrant une période de 30 ans (1972-2002), les différentes caractéristiques relatives à ces stations sont regroupées dans le tableau III.1.

Bien que le nombre et la répartition de ces stations paraissent à premier vue satisfaisantes pour mener une étude climatique sérieuse et bien définie. La réalité est autre car les informations que fournissent ces stations sont incomplètes pour la période d'observation considérée, exception faite pour les précipitations.

Tableau III.01: Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées. [ANRH]

Station pluviométrie	Code (ANRH)	Coordonnées		Altitudes (m)	Période de fonctionnement
		X (km)	Y (km)		
Azazga école	02-15-04	449.4	384	430	1970-actuel
BENI YENI	02-17-12	635	365,25	760	1971-actuel
Draâ El Mizane	02-19-02	601.5	360.15	460	1970-actuel
Baghlia ville	02-20-02	603.5	391.15	30	1968-actuel
Freha	02-16-03	641.9	383.5	140	*
Tizi ousou	02-18-10	*	*	*	*

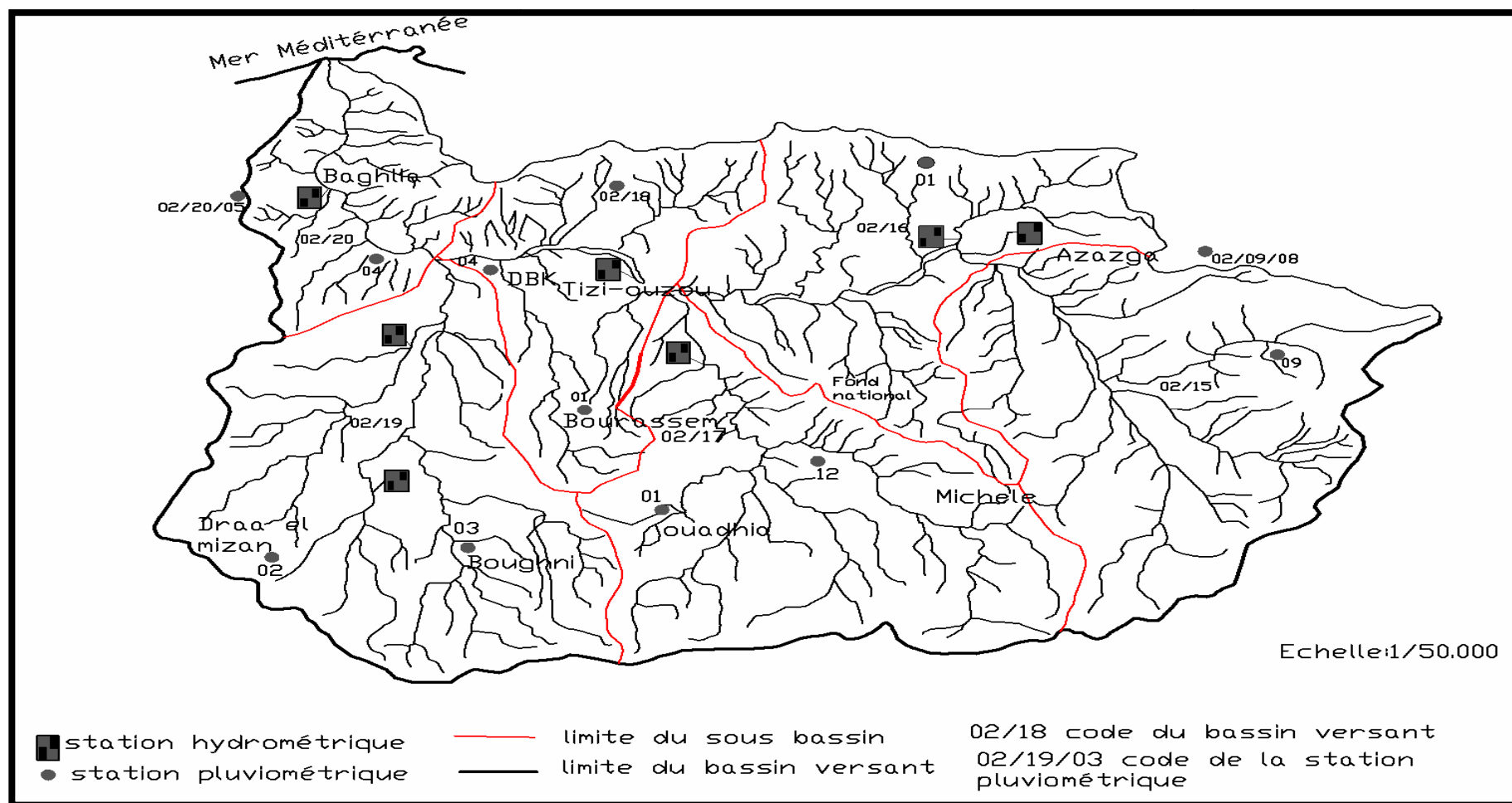


Figure III.01 : Répartition des stations pluviométriques et hydrométriques dans le bassin versant du sébaou.[ANRH]

III.2 Analyse des paramètres climatiques

III.2.1 Précipitations

Les précipitations constituent la composante fondamentale de l'hydrologie et la connaissance de cet apport d'eau au sol est essentielle pour appréhender l'état des réserves en eau du sol, la recharge des nappes et le régime des cours d'eau.

Le bassin du Sébaou reçoit en général deux formes de précipitation bien distinctes :

- La première est la pluie, la forme la plus répandue dans tout le bassin ;
- La seconde est la neige, la forme la plus localisée dans le temps et dans l'espace, elle se produit principalement sur les reliefs montagneux du Djurdjura au sud, la chaîne littorale au nord.

L'utilité avantageuse de la neige apparaît surtout dans l'écoulement, elle le ralentit relativement et laisse le sol s'imbiber d'une façon continue et donc l'eau a largement le temps de s'infiltrer.

Malgré cet intérêt indéniable qu'apporte aux sources en eau, la neige reste le facteur le moins étudié dans le bassin du Sébaou en l'absence de station d'observation appropriée en hautes montagnes (pluviomètre totaliseur).

III.2.1.1 Variation des précipitations

Le bassin versant de l'oued Sébaou possède un réseau pluviométrique très dense (26 stations), les données anciennes sont parfois manquantes, selon les stations.

La pluviométrie moyenne à l'échelle du bassin versant est de l'ordre de 900 mm.

a) Variation annuelle

La figure ci-après figure III.02, nous montre l'évolution des précipitations en dents de scie à la station de Tizi-Ouzou, durant la période allant de 1984/1985 à 2004/2005, nous constatons que depuis l'année hydrologique 1988/1999, les apports en quantité de pluie annuelle ne cessent pas de diminuer, elle s'échelonne de 1113.2mm en 1997/1998 jusqu'à 461.8 mm en 2001/2002.

Au cours de l'année 2002/2003 nous avons enregistré une nette augmentation des précipitations qui ont atteint 1217.5 mm à la station de Tizi Ouzou .

La moyenne annuelle enregistrée à l'échelle du bassin versant de l'oued Sébaou, pour la période 2002/2003 est de 1321.5 mm, ceci dépasse largement la moyenne annuelle des années précédentes, ce qui est exceptionnel.

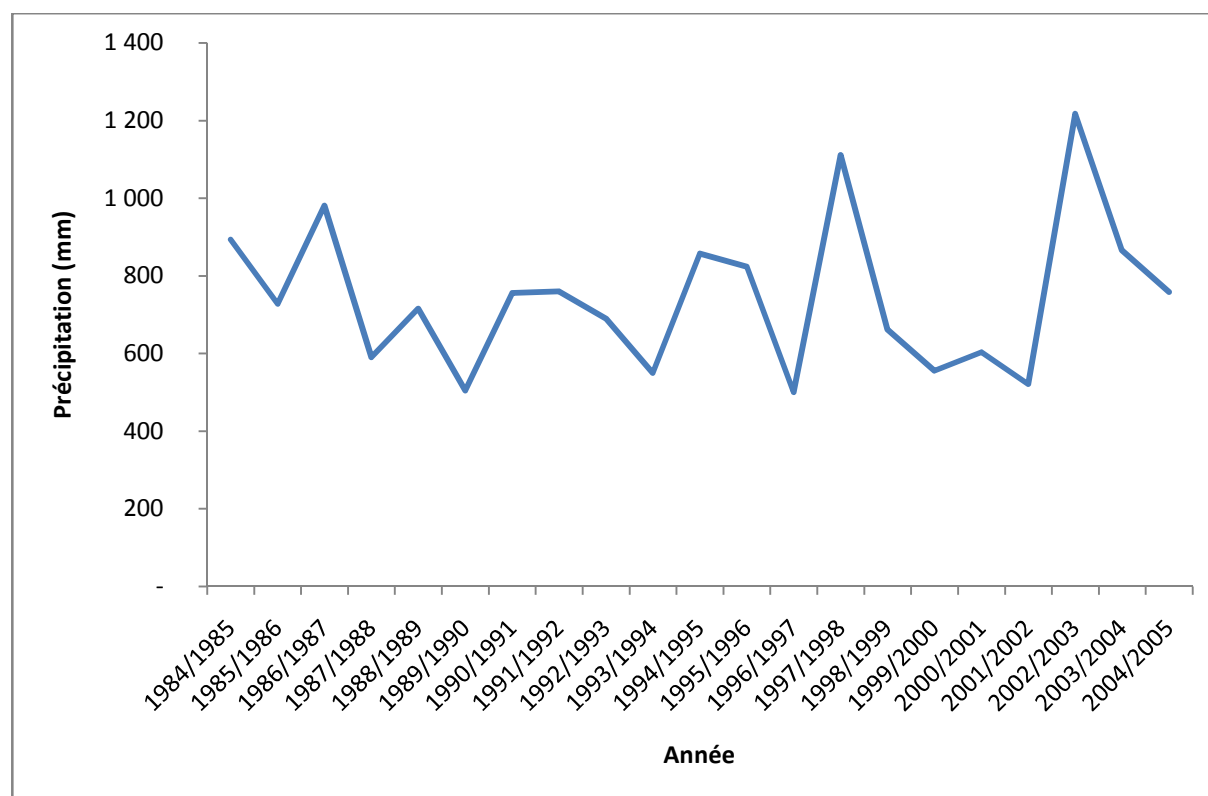


Figure III.02 : Evaluation des précipitations annuelles de la station de Tizi-Ouzou.

Sur un autre plan ; le diagramme de la figure III.03 établit à partir des données pluviométriques enregistrées au niveau des stations Azazga école , Tizi-Ouzou ,Baghlia village, freha et Draa el Mizane, BENI YENI montre que les variations interannuelles des précipitations durant la période s'étalant depuis 1980/1981 à 2004/2005 sont assez concordantes.

Tableau III.02: Précipitations moyennes annuelles (mm). [ANRH]

Année	TIZI-OUZOU	FREHA	BAGHLIA	AZAZGA	BENI YENI	DRAA EL MIZANE
1980/1981		832	763.5	930.8	1027	734
1981/1982		709	597.2	894.2	894.3	635.1
1982/1983		694.9	688.9	865.5	828.8	668.2
1983/1984		650.5	550.3	926.1	885.6	556.5
1984/1985	893.5	861.2	799.1	1237.1	990.6	835.7
1985/1986	727.8	712.4	751.1	930.7	868.5	715.8
1986/1987	981.2	898.8	769.1	1106	1040	880.6
1987/1988	589.7	580.3	606.3	689	721	520.9
1988/1989	715.2	604.4	658.6	819.2	699.2	597.7

1989/1990	504.5	425.1	523.6	542.9	522.4	475.6
1990/1991	755.6	681.7	725.1	826.9	842.8	743.6
1991/1992	759.7	647,1	766.1	805	725.6	729
1992/1993	689.3	667.7	679.6	867.7	702	586.8
1993/1994	549.7	553.1	516.6	679	618.9	514.2
1994/1995	857.5	752.1	733.7	973.8	922.5	670.3
1995/1996	823.1	767.7	767.1	1093.6	890.8	702.2
1996/1997	500	473	499.6	591.8	505.5	394
1997/1998	1111.4	948.7	1031.2	1317.9	1192.3	936.6
1998/1999	661.3	678.7	737.7	855.3	768.4	557.8
1999/2000	555.6	597.7	568.6	780.6	624.2	414.7
2000/2001	602.9	604.3	620.7	826.6	785.3	624.2
2001/2002	520.7	387.7	446.9	521	479.6	392.5
2002/2003	1217.5	1192.3	1108.4	1537.4	1366.5	1106.9
2003/2004	865.6	804.3	846.1	1039.6	903.6	740.2
2004/2005	758.1	721.6	713.6	987.2	806.8	686.3

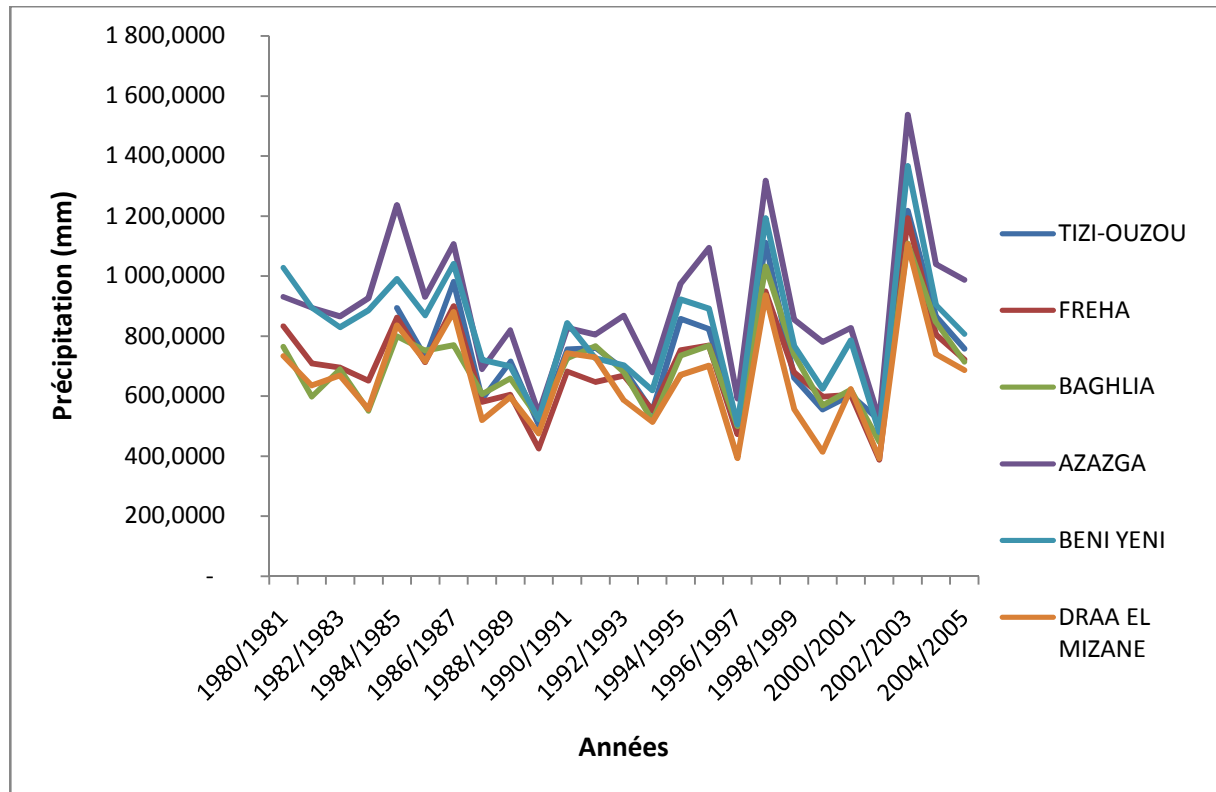


Figure III.03 : précipitation moyenne annuelle.

b) Variation mensuelle

Le bassin versant de la grande Kabylie, jouie d'un climat méditerranéen, dont on distingue deux périodes à savoir, une période sèche allant du mois de mai au mois de septembre et une période humide allant du mois d'octobre au mois d'avril. L'évolution des précipitations à la station de AZAZGA montre bien ces deux périodes durant l'année 2002/2003. (Figure III.04)

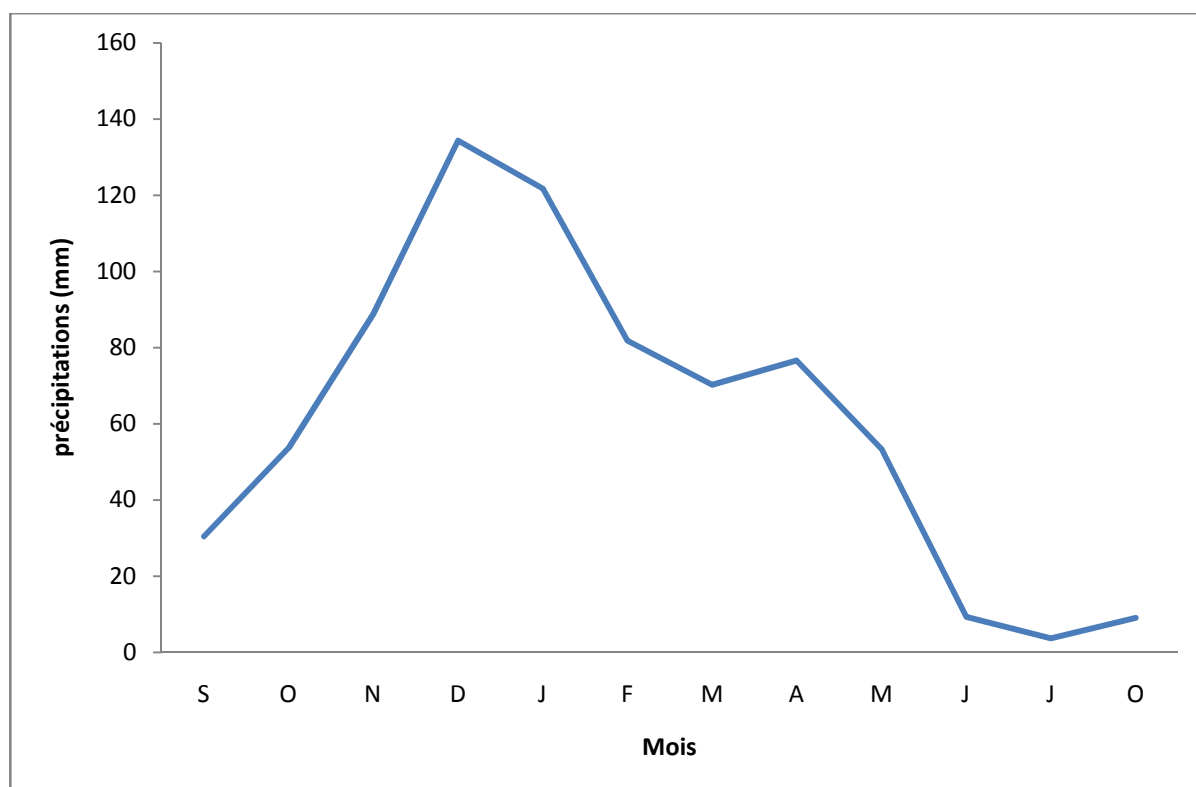


Figure III.04: Evaluation des précipitations moyenne mensuelle de la station de Tizi-Ouzou.

Les hauteurs moyennes des précipitations mensuelles enregistrées au niveau du bassin versant du Sébaou durant la période (1980-2005), pour les stations d'observation de AZAZGA, Draa El Mizane, Baghlia village, BENI YENI, FREHA, TIZI OUZOU sont reportées dans le tableau III.03.

Tableau III.03: Précipitation moyennes mensuelles (1980-2005). [ANRH]

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	O	Année
TIZI UOZOU	30,4	53,68	88,8	134,33	121,76	81,83	70,24	76,6	53,45	9,37	3,72	9,1	697,87
Azazga	44,04	77,11	101,16	164,09	132,58	118,87	105,3	82,63	54,43	11,28	5,36	6,6	906,04
Draa El Mizan	36,11	55,12	39,4	103,57	88,44	90,35	55,37	51,93	6,3	9,43	3,64	9,57	657,03
Baghlia	35,85	65	99,68	118,15	96,79	99,92	75,7	68,05	43,32	9,03	3,42	8,24	698,95
FREHA	27,79	59,91	89,34	142,09	115,22	81,87	61,7	60,86	43,82	7,4	2,08	6,22	692,21
BENI YENI	37,42	68,51	98,11	147,12	122,49	100,33	80,42	84,05	59,33	12,78	4,77	8,78	741,39

Les résultats des quatre stations marquées dans le tableau ci-dessus confirme les résultats de la station de Tizi-Ouzou c à d les précipitations sont réparties suivants deux saisons :

- Une saison pluvieuse humide s'étalant du mois d'octobre en avril avec un maximum enregistré au mois de décembre.
- Une saison sèche s'étalant du mois de mai au moi de septembre.

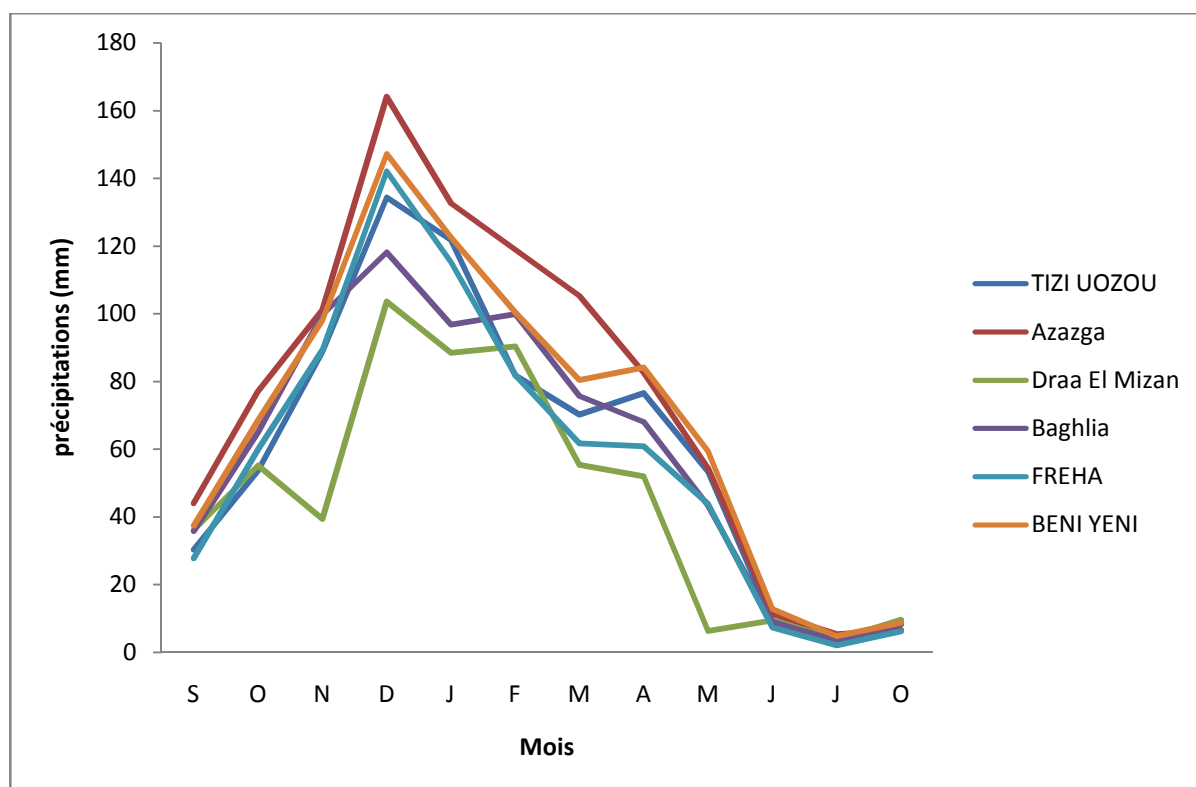


Figure III.05 : précipitations moyennes mensuelles des stations pluviométriques.

Le graphe de la figure III.05, montre que l'évolution saisonnière des précipitations est similaire dans toutes les stations. Toutefois, nous constatons que la région la plus arrosée est celle d'AZAZGA avec une moyenne annuelle de 906.04mm, cela peut s'expliquer par l'influence maritime.

En revanche, la station de Draa El Mizane , qui est relativement loin de la mer , reçoit le minimum de pluie soit une lame d'eau précipitée de 657,03mm par an.

III.2.2 Vent

Est l'un des éléments caractéristiques du climat régissant l'évaporation à la surface du sol et de la végétation .Les résultats des moyennes mensuelles de la vitesse du vent enregistré au niveau de la station de Tizi-Ouzou sont présentés dans le tableau III.04.

Tableau III.04 : Moyenne mensuelles des vitesses des vents.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Vitesse (km/h)	1.92	1.63	1.45	1.75	1.57	1.63	1.57	1.85	2.13	2.63	2.21	2.07

D'après les données de l'ONM on constate que les vents dans la zone d'étude sont généralement d'orientation Ouest à Sud-Ouest.

III.2.2.1 Force des vents

Elle est estimée d'après une échelle télégraphique dont les degrés sont les suivants :

- 0 : vent calme ;
- 1-2 : vent faible ;
- 3-4: vent modéré ;
- 5-6 : vent assez fort ;
- 7-8 : vent fort ;
- 9 : vent violent ;

D'après les données disponibles, on constate que la région d'étude est caractérisée par des vents faibles.

III.3 Etude de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est l'une des plus importantes composantes du bilan hydrologique.

L'évapotranspiration est la restitution de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre quelque soit sa nature à l'atmosphère à partir de l'eau de surface (lacs, mers,...) souterraines (nappes aquifères) et de transpiration des plantes. Ce paramètre climatique conditionne l'abondance ou la disette en eau pour la végétation.

L'évapotranspiration est un paramètre difficile à mesurer, il dépend de plusieurs paramètres facteurs variant dans le temps et dans l'espace. Les principaux paramètres qui conditionnent l'évapotranspiration sont : la température, les précipitations, l'état du sol et la végétation.

L'évapotranspiration est la combinaison de deux phénomènes :

- L'évapotranspiration potentielle (ETP) qui représente la quantité d'eau maximale qui pourrait évaporée au niveau d'un sol saturé c-a-d l'évapotranspiration potentielle est employée lorsque la surface évaporante est convenablement alimentée en eau.
- L'évapotranspiration réelle (ETR) qui désigne la quantité d'eau effectivement évaporée et transpiré c- a-d l'ETR désigne l'évaporation sans tenir compte de l'abondance de l'eau de l'abondance de l'eau à la surface évaporante.

III.4 Hydrologie de surface

Un bassin hydrographique se définit comme la surface topographique drainée par un cours d'eau et ces affluents de telle façon que tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface suive son trajet jusqu'à l'exutoire. En l'occurrence, c'est la mer méditerranée qui constitue l'exutoire du sébaou

L'hydrologie de surface, s'intéresse, justement à la fraction de lame d'eau précipité sur le bassin versant et drainée par le réseau hydrographique.

III.4.1 Station et données hydrométrique

Le bassin versant de sébaou compte six stations hydrométriques dont les caractéristiques sont consignées dans le tableau III.05.

Les données mensuelles (et journalières) aux stations hydrométriques de Sébaou ont été collectées à l'ANRH de Blida.

Tableau III.05 : caractéristiques de différentes stations hydrométriques.[ANRH]

Oued	Nom de la station	Code	Superficie (Km ²)	Date de mise en service	Cordonnées Lambert		
					X (km)	Y (km)	Z(m)
Boubhir	Boubroune	02.15.13	482	17/10/1987	645.600	382.600	140
Dis	Fréha	02.16.15	96	01/04/1973	642.950	384.250	130
Aissi	RN 30	02.15.17	445	15/10/1979	627.100	374.600	110
Sébaou	Belloua	02.18.03	1465	20/03/1973	623.300	381.200	90
Bougdoura	RN 25	02.19.09	296	25/04/1973	610.200	375.750	80
Sébaou	Baglia	02.20.01		Depuis 1949	603.750	390.100	25

III.4.2 Estimation des sources en eau de surface

Les ressources en eau de surface annuelles disponibles dans le Sébaou, sont estimées à la station hydrométrique de Baghlia durant la période (1986-1999) à 466.73 Hm³ soit un débit moyen annuel de 14.8m³/s. cette valeur correspond à une lame d'eau écoulé de 187mm répartie sur l'ensemble du bassin, soit environ 23% des précipitations.

La répartition des débits moyens mensuels enregistrés à la station de jaugeage de Baghlia située à l'exutoire du bassin versant pour une période de 13 ans, est représentée dans la figure II.06, ce dernier est établi à partir des données du tableau n°18 et montre que le débit de l'oued Sébaou est fort au mois de décembre jusqu'en mai et faible durant les mois de juin jusqu'en novembre au point où se tarir complètement au moi d'août.

III.5 Régime des apports

III.5.1 Régime mensuel des apports

Les histogrammes des débits moyens mensuels (figure III.06 et III.07) tracées à partir des données consignées dans le tableau III.06 montre une croissance des valeurs de septembre à février suivie d'une décroissance.

Le maximum des débits mensuels pour deux stations de Belloua et de Baghlia ; exutoires respectifs du haut et du bas Sébaou ; est enregistré aux mois de novembre à avril. Par contre le minimum d'apport est enregistré aux mois de juillet à octobre

Tableau III.06: Débits moyens mensuels des stations de Baghlia et de Balloua (m³/s).

	S	O	N	D	J	F	M	A	m	J	J	A
Baghlia	0.22	0.40	6.45	28.35	38.20	39.92	24.89	19.95	15.17	3.88	0.19	0
Belloua	0.23	0.58	2.53	16.03	22.23	26.62	16.47	15.08	9.59	1.78	0.28	0.15

En outre, on constate que les sommets des histogrammes des débits moyens mensuels sont observés au mois de février, cela peut-être expliqué par l'apport supplémentaire provenant de la fonte des neiges.

Sur un autre plan, on note une grande différence entre le maximum enregistré en mois de Février à la station de Baghlia (39.92 m³/s) et celui enregistré à la station de Belloua avec 26.62 m³/s seulement.

III.5.2- Relation précipitation débits évacués

Le diagramme de la figure III.08 construits à partir des données de débit et de pluviométrie enregistrer à la station de Baghlia durant la période 1986/1999 (tableau III.07) montre une concordance entre les variations interannuelles de ces deux paramètres traduisant ainsi une alimentation de l'oued par les pluies.

Tableau III.07: Corrélation précipitation/Débits évacués à la station Baghlia.

donnée	86/87	87/88	88/89	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96	96/97	97/98	98/99
P(mm)	769.1	606.3	658.6	523.6	725.1	766.1	679.6	516.6	733.7	767.1	499.6	1031.2	737.7
Q(m ³ /s)	34.21	4.09	8.40	2.43	26.75	13.76	11.68	4.87	17.45	17.15	2.31	27.5	21.90

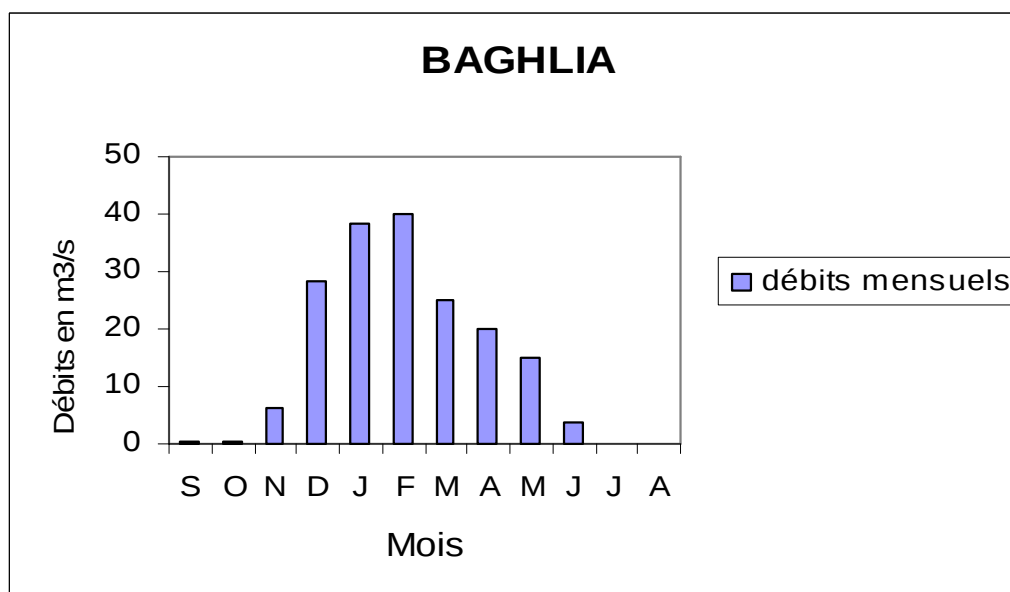


Figure III.06 : Variation mensuelle des apports de l'oued à la station de Baghlia(1986/1999).

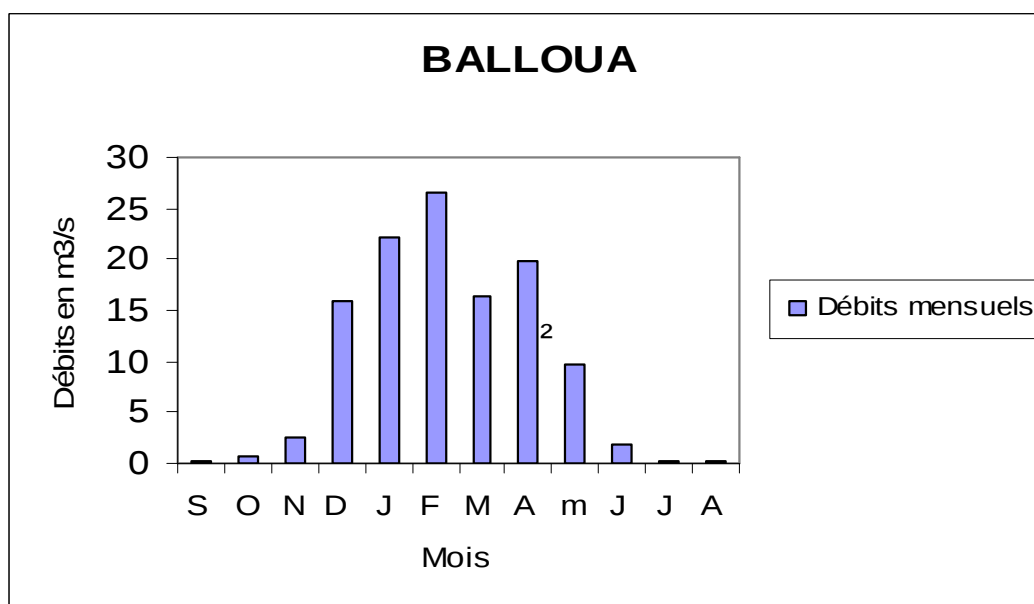


Figure III.07 : Variation mensuelle des apports de l'oued à la station de BALLOUA (1986/1999).

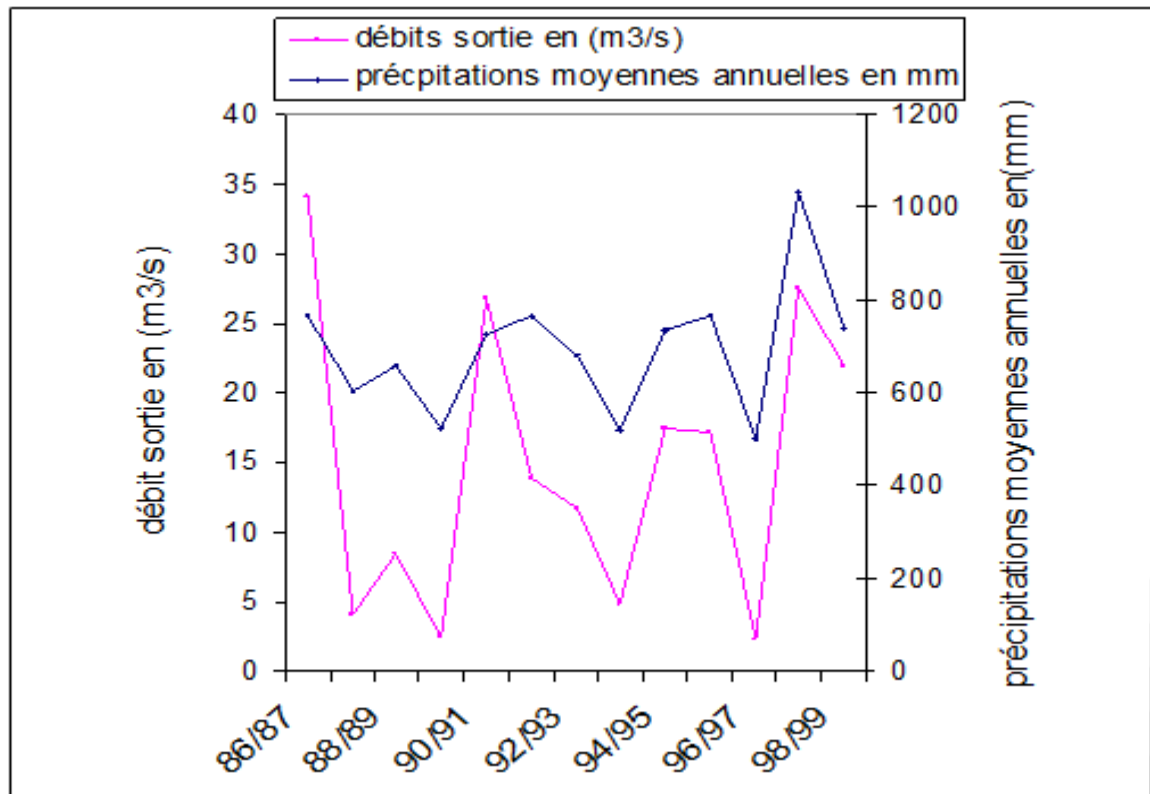


Figure III.08: Corrélation précipitations- Débits évacués à la station de Baghlia

III.6 Détermination de la lame d'eau écoulee (R)

Dans cette partie on va calculer les paramètres de l'écoulement .il faut donc estimer les crues qui peuvent s'effectuer au future et faire des études sur un bassin versant qui nécessite de savoir toutes les caractéristiques de forme de l'écoulement.

Dans ce cas la on va déterminer la lame d'eau ruisselée au niveau de deux stations hydrométrique BAGHLIA et BALLOUA

Le tableau ci-dessous et représente les débits moyens mensuel Q en m³/s. pour calculer la lame d'eau écoulee il faut déterminer plusieurs paramètres

a) Débit moyen annuel Q_{0a} et l'apport moyen annuel A_{0a}

$$Q_{0A} = \sum Q_i / 12 \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (\text{III.1})$$

Avec:

Q_i :débit mensuel de chaque mois.

$$A_{0a} = Q_{0a} * T \quad \text{m}^3 \quad (\text{III.2})$$

Telque $T = 365 * 24 * 3600 = 31536000 \text{s}$.

Les résultats de Q_{0a} et A_{0a} pour les deux stations sont obtenus dans les tableaux ci dessous

b) Calcul du débit moyen intrannuel Q_0 et l'apport moyen intrannuel A_0

$$Q_0 = \sum Q_{0ai} / N \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

N: le nombre des années

Q_{0ai} : débit moyen annuel de chaque année.

$$A_0 = Q_0 * T \quad m^3 \quad (III.4)$$

Avec : $T = 365 * 24 * 3600 = 31536000s$.

c) Lane d'eau écoulé moyenne intrannuelle L_e

$$L_e = A_0 / S \quad mm \quad (III.5)$$

Avec :

A_0 :apport moyen intrannuel.

S : la surface du bassin versant $S = 2500 km^2$.

d) Débit spécifique M_0

$$M_0 = Q_0 / S \quad l/s.km^2. \quad (III.6)$$

e) Coefficient de débit pour chaque année K_i

$$K_i = Q_{0ai} / Q_0 \quad (III.7)$$

on note : -si $K_i \geq 1$ année humide.
 -si $K_i < 1$ année sèche.

Tableau III.08 : Calcul de la lame d'eau écoulee a la Station de BAGHLIA.

	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	Mai	juin	juil	aout	$Q_{0a} \text{ m}^3/\text{s}$	$A_{0a} \text{ m}^3$	Ki	
1987 - 1988	0,00	0,55	1,00	3,61	6,86	7,73	18,08	6,51	4,50	1,33	0,06	0,00	4,1847139	132004440	0	Sèche
1988 - 1989	0,00	0,00	0,12	32,71	17,48	9,46	13,55	19,76	6,38	1,43	0,05	0,00	8,41217931	265270320	0,01304405	Sèche
1989 - 1990	0,00	0,00	0,00	0,34	2,99	2,69	0,92	4,70	14,52	3,05	0,00	0,00	2,43540868	76763880	0,11297501	Sèche
1990 - 1991	0,00	0,00	0,00	60,98	118,84	73,35	34,61	22,17	7,30	3,70	0,00	0,00	26,7455515	843456600	0,3960378	Sèche
1991 - 1992	0,00	0,00	0,34	0,41	19,04	5,92	51,87	85,70	22,93	17,83	0,48	0,00	17,0441599	537478560	1,51244377	Humide
1992 - 1993	0,00	0,00	1,77	36,42	38,49	8,65	16,04	15,46	18,01	6,39	0,01	0,00	11,7702922	371178720	1,26250826	Humide
1993 - 1994	0,00	0,00	0,00	6,30	22,71	25,06	3,01	1,11	0,28	0,00	0,00	0,00	4,87238912	153659160	3,67040078	Humide
1994 - 1995	0,00	0,51	0,59	8,04	121,58	15,70	58,00	0,00	2,22	0,30	0,00	0,00	17,2439965	543838320	0,79684933	Sèche
1995 - 1996	0,00	0,00	0,00	0,00	12,97	61,16	59,35	36,46	29,82	5,38	0,90	0,00	17,1709982	541473120	0,43300654	Sèche
1996 - 1997	0,00	0,52	0,14	3,72	10,23	4,26	2,10	6,01	1,10	0,02	0,00	0,00	2,34185045	73846800	1,16933571	Humide

$$Q_0=13,4664$$

$$A_0=424976390,4$$

$$L_e=169870,55634$$

$$M_0=0,0045588$$

Tableau III.09 : calcul de la lame d'eau écoulee a la Station de BALLOUA .

	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	$Q_{oa} m^3/s$	$A_{oa} m^3$	Ki	
1987 - 1988	0,34	0,40	0,70	3,40	5,48	6,22	16,51	6,82	3,84	0,94	0,30	0,00	3,74542714	118128600	0,04975899	Sèche
1988 - 1989	0,22	0,24	0,30	26,98	11,26	7,15	12,21	21,87	6,84	1,55	0,34	0,32	7,43967613	234627840	0,05708632	Sèche
1989 - 1990	0,21	0,21	0,25	0,23	3,62	2,82	1,79	5,55	12,76	2,15	0,27	0,19	2,50418467	78971400	0,95601775	Sèche
1990 - 1991	0,24	0,51	0,69	30,77	15,03	41,44	31,46	18,65	5,31	3,08	0,18	0,13	12,2911494	387603720	1,0758978	Humide
1991 - 1992	0,13	0,58	0,47	1,08	13,92	6,80	13,47	54,24	11,29	2,81	0,31	0,13	8,76993921	276544440	1,87601761	Humide
1992 - 1993	0,14	0,13	1,00	22,31	23,52	9,80	12,89	11,99	14,17	1,59	0,28	0,14	8,16245737	257438880	1,5944348	Humide
1993 - 1994	0,26	0,22	0,46	9,86	18,10	22,10	7,76	6,33	1,17	0,76	0,13	0,11	5,6045019	176759280	2,26	Humide
1994 - 1995	0,58	1,91	0,91	5,65	77,14	8,58	38,65	2,99	0,90	0,20	0,12	0,11	11,4789433	361980720	1,0458412	Humide
1996 - 1997		0,20	0,29	3,33	6,57	2,63	0,78	3,20	0,56	0,13	0,06	0,03	1,47953624	46725840	6,03360517	Humide
1997 - 1998	0,04	0,40	11,24	27,50	9,62	19,03	15,45	19,42	56,87	6,99	0,94	0,30	13,9818537	440978400	0,11400973	Sèche
1998 - 1999	0,28	0,76	15,03	42,00	31,10	43,82	14,61	6,09	3,32	0,67	0,18	0,07	13,1607841	415040040	0,01805125	Sèche

$Q_0 = 8,7890181818$

$A_0 = 250018528,35$

$L_e = 110868,06577$

$M_0 = 0,0035156054$

Conclusion

L'examen des données climatiques nous a permis de définir deux périodes différentes :

- Une saison où le climat est sec qui s'étend de mai à septembre.
- Une saison froide, avec un climat humide tempéré s'étend d'octobre à avril.
- La température moyenne est environ de 17.30°C.
- Le régime climatique du bassin versant du Sébaou est humide et tempéré.
- La valeur de la lame d'eau ruisselée calculée dans la station de BAGHLIA est de 141.56mm et pour la station de BALLOUA est de 101.62mm.

CHAPITRE IV : TRANSPORT EN SUSPENSION

Introduction

Comme on sait le transport par suspension c'est le cas où les particules restent occasionnellement en contact avec le fond, c'est à dire elles se déplacent par bonds et restent souvent entourées d'eau.

Dans ce chapitre on va faire une étude pour atteindre à une relation qui relie les différents paramètres, tel que concentration en sédiment, le débit solide, débit liquide, la hauteur d'eau et la surface mouillée.

IV.1 Collecte et mise en forme des données

La collecte et mise en forme des données est la phase la plus délicate et la plus difficile en hydrologie.

La collecte des données consiste en un dépouillement systématique de tous les fichiers de hauteur d'eau, et de leurs concentrations en matière en suspension correspondantes en g/l.

Les deux stations de BAGHLIA et BALLOUA disposent d'une longue série de mesure hauteur d'eau – débit liquide (1968 jusqu'à 1996 pour la station de BAGHLIA, et 1989 jusqu'à 2001 pour la station de BALLOUA).

Des prélèvements quotidiens des hauteurs d'eau, dont la fréquence augmente surtout en période de crue, sont effectués pour l'estimation du transport solide.

IV.2 Dépouillement des données

A la station de BAGHLIA et BALLOUA, nous disposons d'une grande série de mesure, environ 4229 valeurs de débits instantanés Q_l en m^3/l pour la station de BAGHLIA et pour la station de BALLOUA on a 628 valeurs de débits instantanés Q_l en m^3/l .

Les données obtenues ont été classées donc par l'heure et la hauteur en cm. Cette banque de données a été sélectionnée pour la recherche d'un modèle mathématique entre le débit solide et le débit liquide $Q_s=f(Q_l)$, $Q_l=f(h)$, $C=f(Q_l)$, $Q_l=f(S)$ et déterminer une relation entre la concentration et la surface $C=f(S)$.

La relation $Q_s=C.Q_l$ nous a permis d'obtenir le débit solide en kg/s pour chaque hauteur sur la base des matières en suspension.

Nous disposons donc d'un fichier global comprenant la date, l'heure, la hauteur d'eau en cm, le débit liquide instantané en m^3/s , la concentration en matière en suspension en g/l et le débit solide instantané en kg/s de tous les prélèvements effectués.

Il est à remarquer que nous ne disposons pas de toutes les valeurs relatives au transport solide lors de crues qui varient d'une année à l'autre, charriant une quantité de sédiment variable dans le temps.

IV.3 Présentation et mise en forme

IV.3.1 Classification des données

Nous avons dans notre fichier de base pour les deux stations, de 4229 couples de valeurs instantanés de débits solide et de débit liquide observées d'une période de 28 ans pour la station de BAGHLIA et de 628 observées d'une période de 12 pour la station de BALLOUA. Chaque année hydrologique a été marquée par ces événements exceptionnels (crues) ou par l'absence de prélèvement pour certaines périodes pour des raisons bien différentes.

Pour bien mettre en forme toutes les données, qui seront exploitées, ces dernières ont été classées et ordonnées à partir d'un calcul détaillé de nombre exacts d'échantillons relatifs à chaque année tout en calculant le nombre de données mensuelles.

Le tableau IV.01 illustre tout les résultats obtenus. Les résultats du tableau IV.1 nous renseignent sur la taille de la série de données et le nombre de prélèvements effectués au droit de chaque station.

A partir de ces résultats nous tirons plusieurs informations et nous procédons au traitement statistique.

Toutes les données dont la taille a été déterminée constituent des échantillons nécessaires à la recherche d'une relation significative reliant le débit solide au débit liquide et pour déterminer une relation entre la concentration et la surface $C=f(S)$.

Il est souhaitable d'avoir collecté au préalable le maximum de données.

Tableau IV.01: Nombre de valeurs observées par station, année.

Totalité des valeurs observées 1968/2001	STATIONS	
	BAGHLIA	BALLOUA
1968/1969	27	*
1969/1970	*	*
1970/1971	59	*
1971/1972	21	*
1972/1973	548	*
1973/1974	537	*
1974/1975	412	*
1975/1976	469	*
1976/1977	160	*
1977/1978	127	*
1978/1979	113	*
1979/1980	138	*
1980/1981	158	*
1981/1982	1	*
1982/1983	358	*
1983/1984	241	*
1984/1985	163	*
1985/1986	124	*
1986/1987	228	*

1987/1988	12	*
1988/1989	*	*
1989/1990	11	19
1990/1991	73	56
1991/1992	68	49
1992/1993	70	41
1993/1994	50	26
1994/1995	14	106
1995/1996	47	*
1996/1997	*	21
1997/1998	*	205
1998/1999	*	52
1999/2000	*	8
2000/2001	*	45

*année non observée

Tableau IV.02 : Nombre de valeurs observées par station,
Mois

	STATIONS	
Totalité des valeurs observées Sep/Aout	BAGHLIA	BALLOUA
Septembre	179	26
Octobre	194	67
Novembre	272	71
Décembre	549	124
Janvier	601	133
Février	606	64
Mars	638	61
Avril	463	45
Mai	232	65
Juin	156	6
Juillet	172	*
Aout	145	4

*Mois non observée

Plus le nombre de données est important, plus sa réduction au nombre d'un modèle donne une meilleure approximation possible au problème posé.

Les périodes où les prélèvements n'ont été pas effectués peuvent avoir un effet direct sur le résultat final du traitement.

Avant de toute tentative de traitement nous essayons de représenter graphiquement toutes les données afin d'avoir la présentation approximative des débits solides à différentes échelles (saisonnière, annuelle, mensuelle et pour toute la période d'observation) de toutes les données.

IV.3.2 Répartition de la totalité des données

La visualisation de l'ensemble des données observées, dans un diagramme débit solide et débit liquide permet d'identifier l'allure de la figure IV.01 et la figure IV.02.

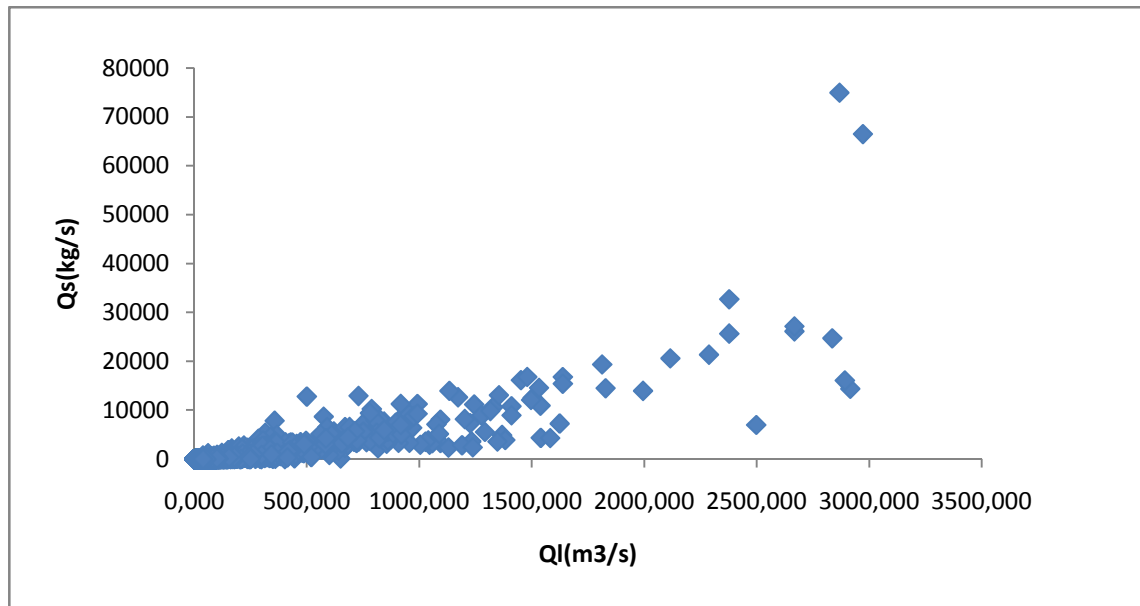


Figure IV.01: Répartition débit solide – débit liquide de la totalité des données de 1968-1996 de la station de BAGHLIA.

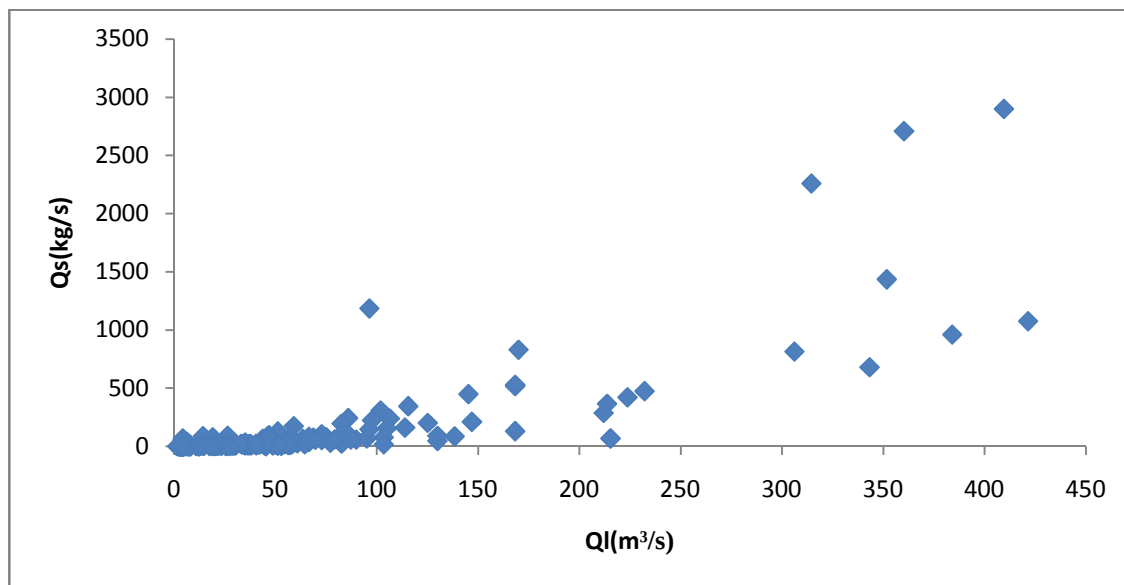


Figure IV.02: Répartition débit solide – débit liquide de la totalité des données de 1989-2001 de la station de BALLOUA.

IV.3.3 Répartition mensuelle des débits solides débits liquides de la station de BAGHLIA

La répartition mensuelle des débits solides en fonction des débits liquides de la station de Baghlia est représentée sur la figure IV.03

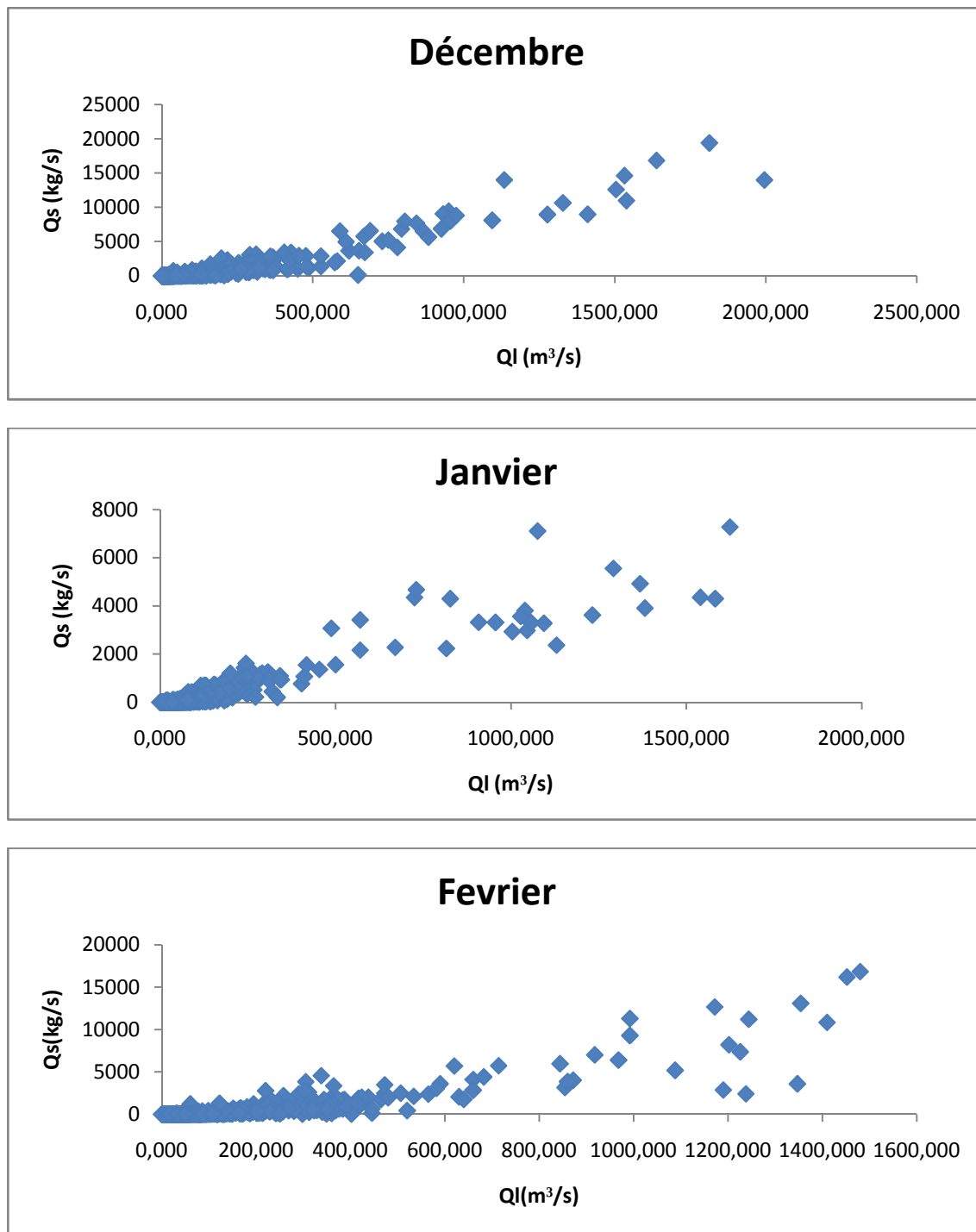
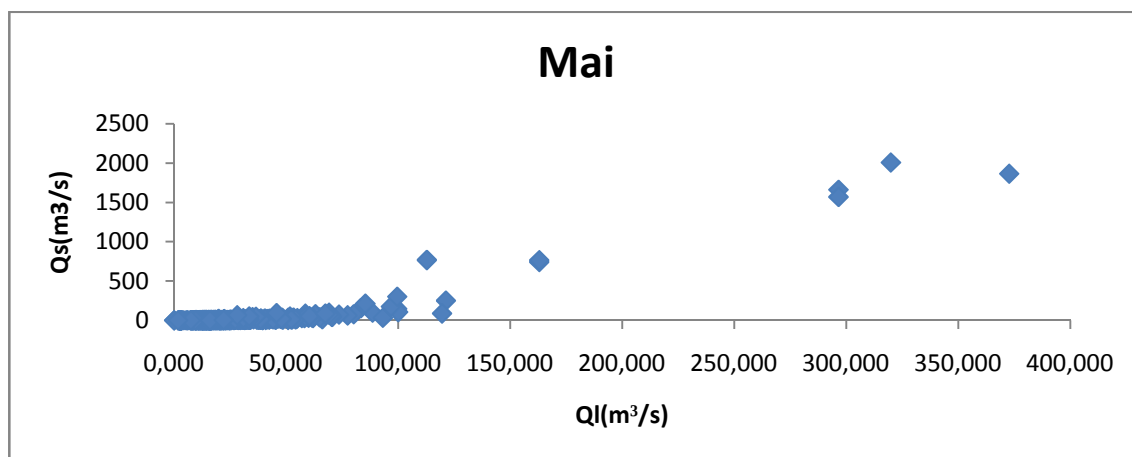
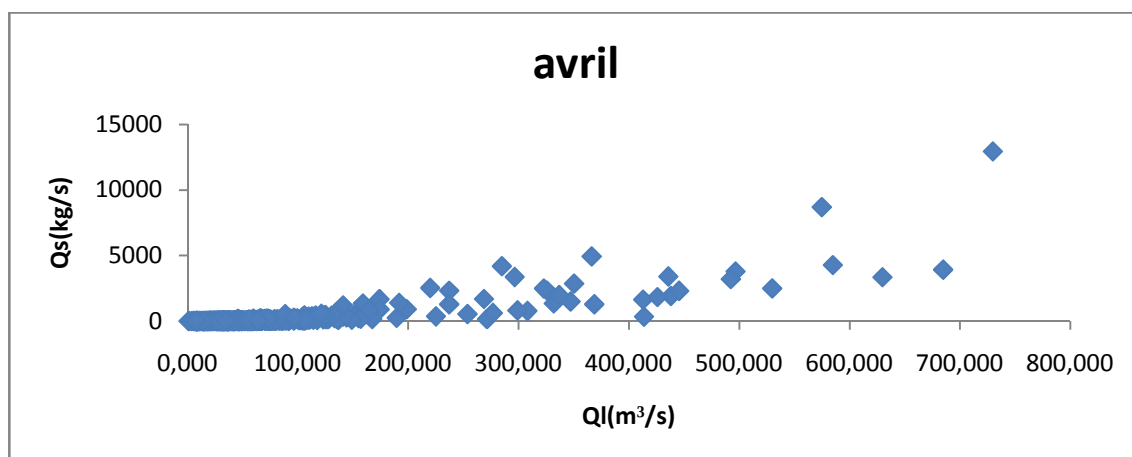
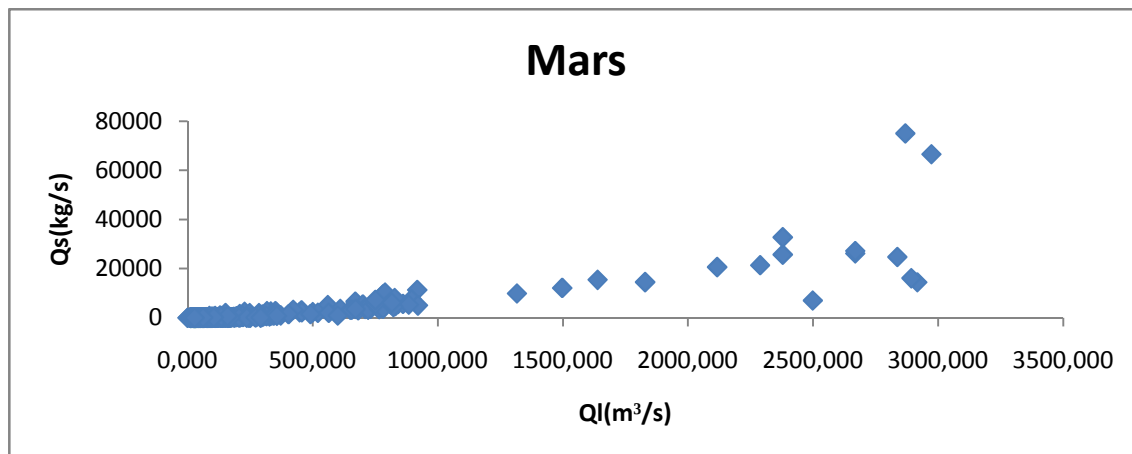
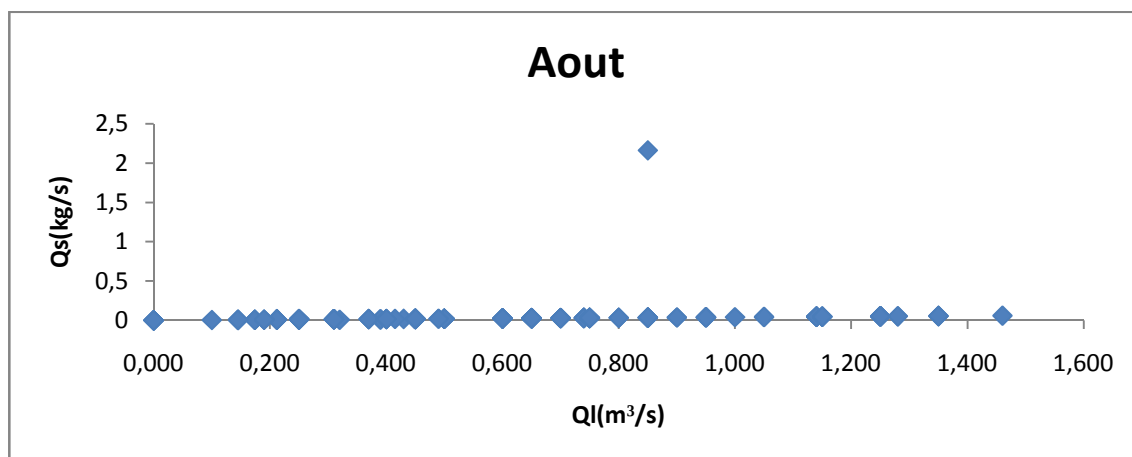
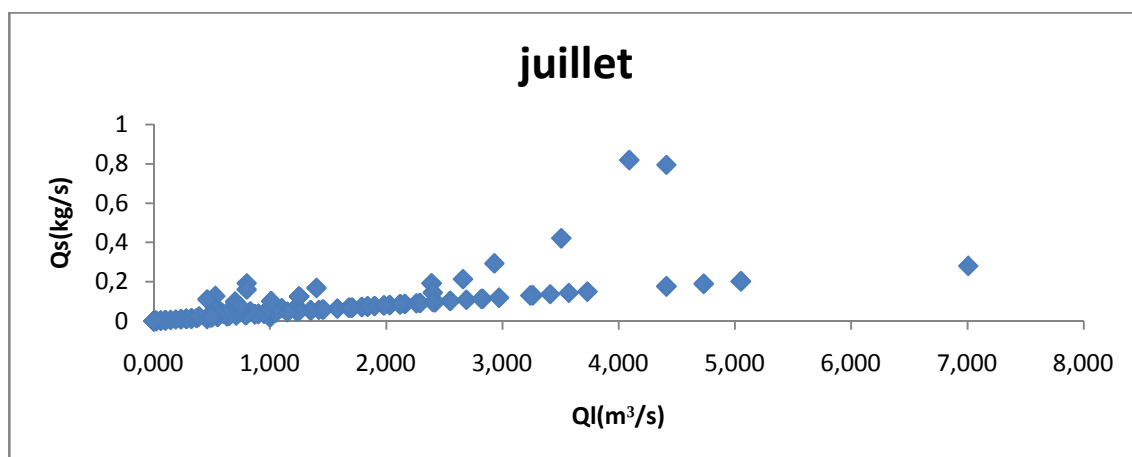
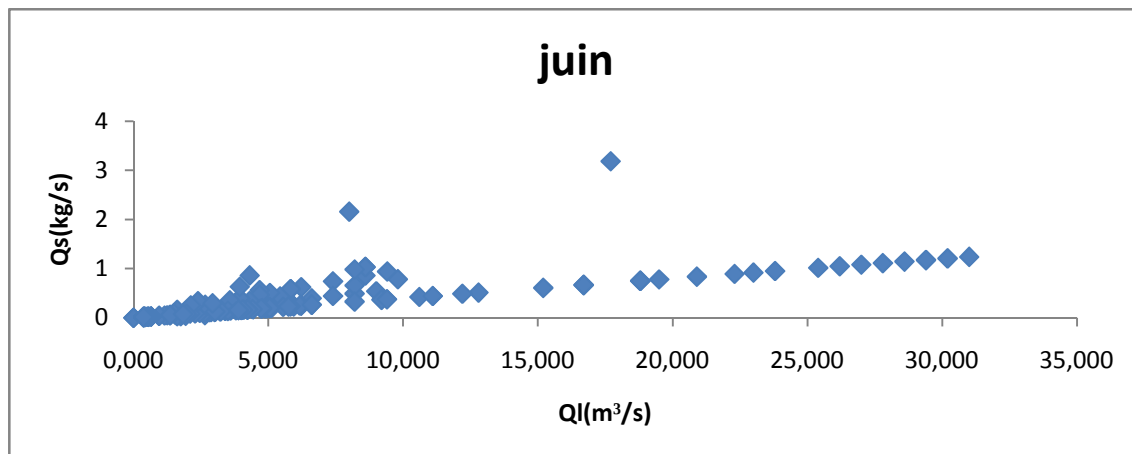


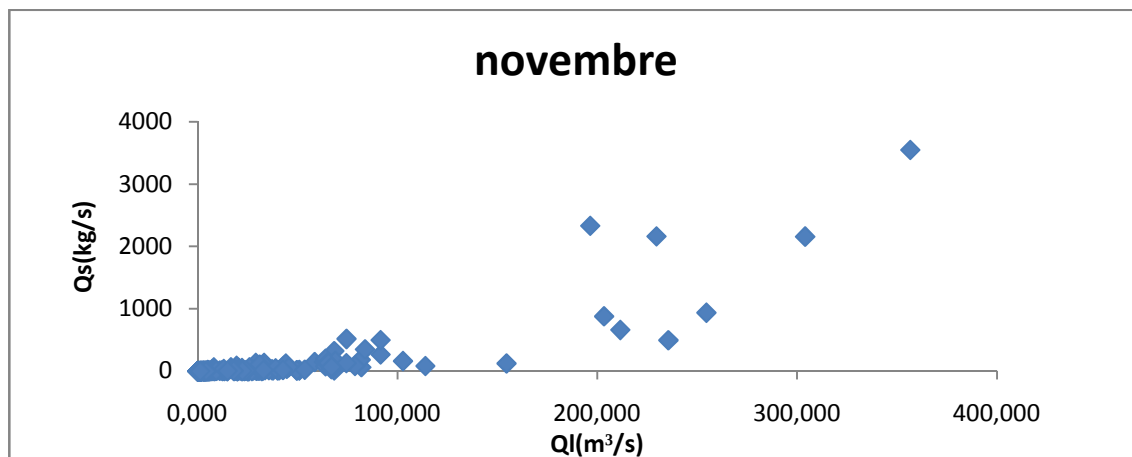
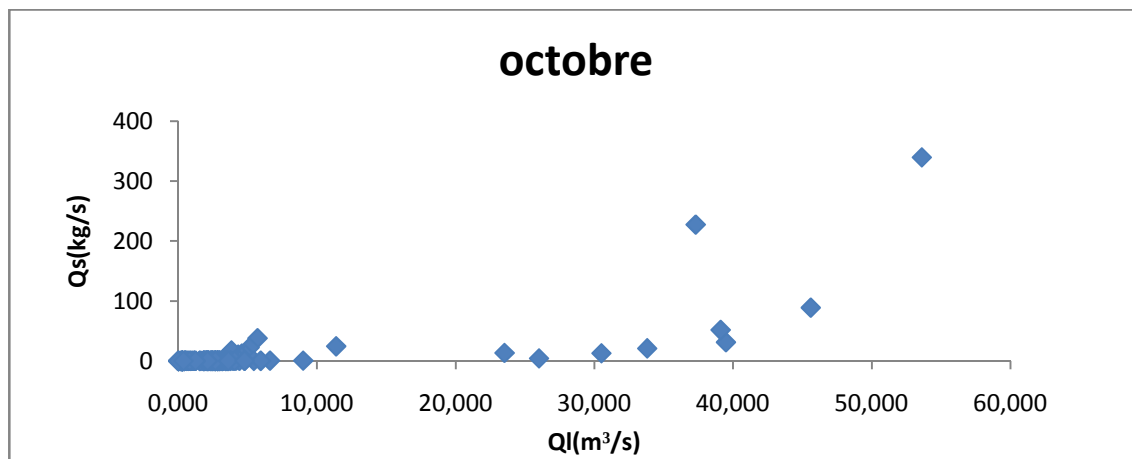
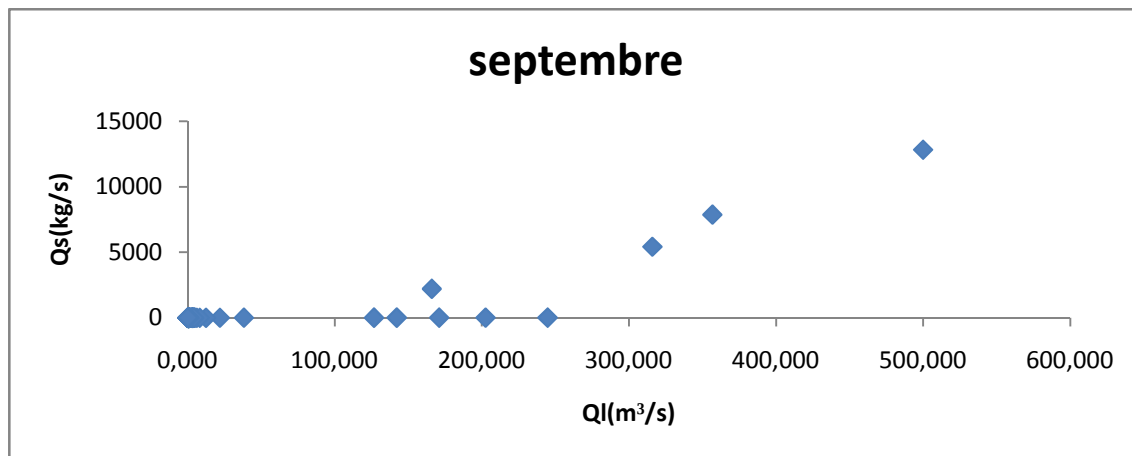
Figure IV.03: Répartition mensuelle des débits solides – débits liquides à la station de BAGHLIA.



Suite Figure IV.03: Répartition mensuelle des débits solides – débits liquides à la station de BAGHLIA.



Suite Figure IV.03: Répartition mensuelle des débits solides – débits liquides à la station de BAGHLIA.



Suite Figure IV.03: Répartition mensuelle des débits solides – débits liquides à la station de BAGHLIA.

IV.3.4 Répartition mensuelle des débits solides débits liquides de la station de BALLOUA

La répartition mensuelle des débits solides en fonction des débits liquides de la station de Balloua est représentée sur la figure IV.04

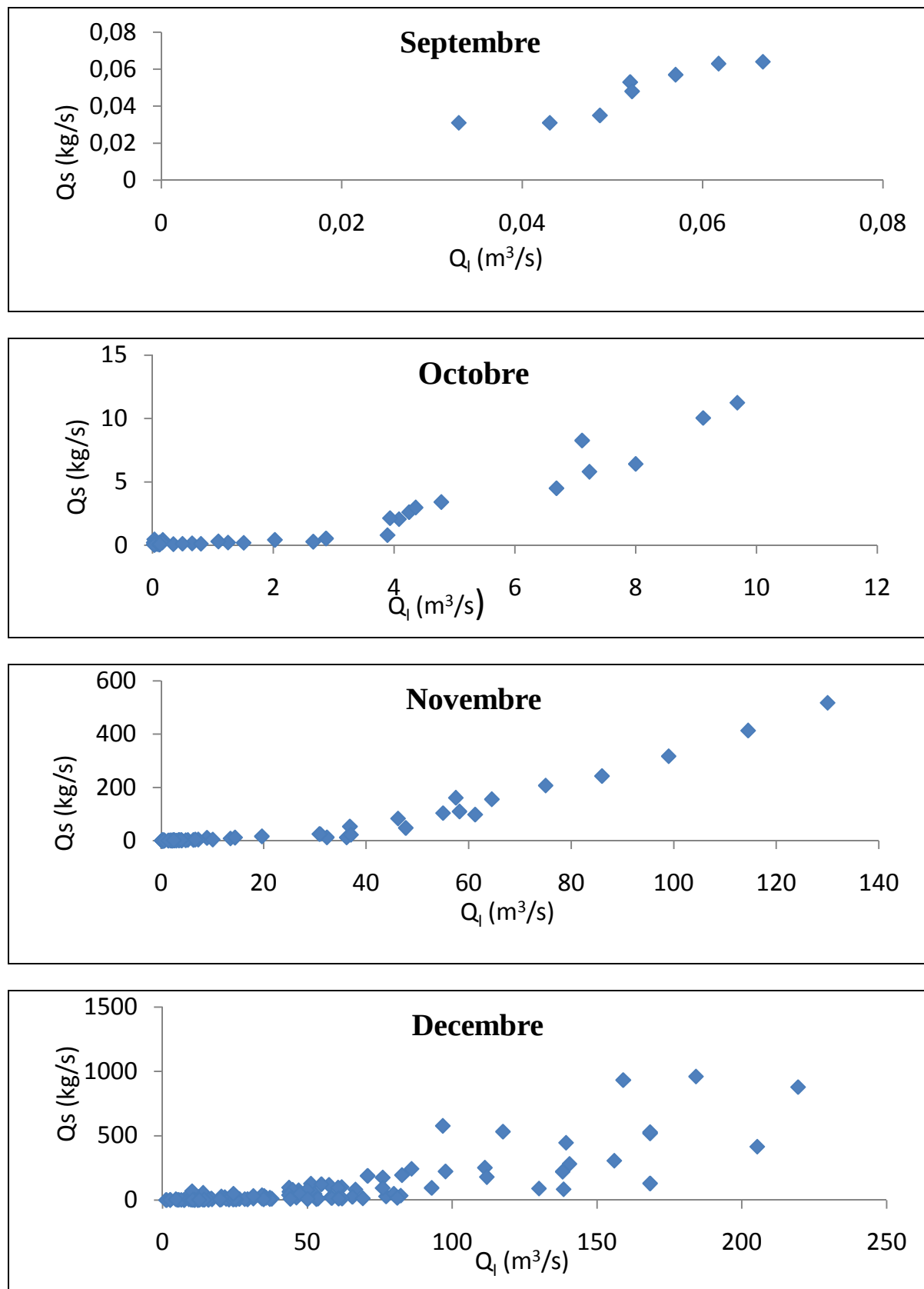
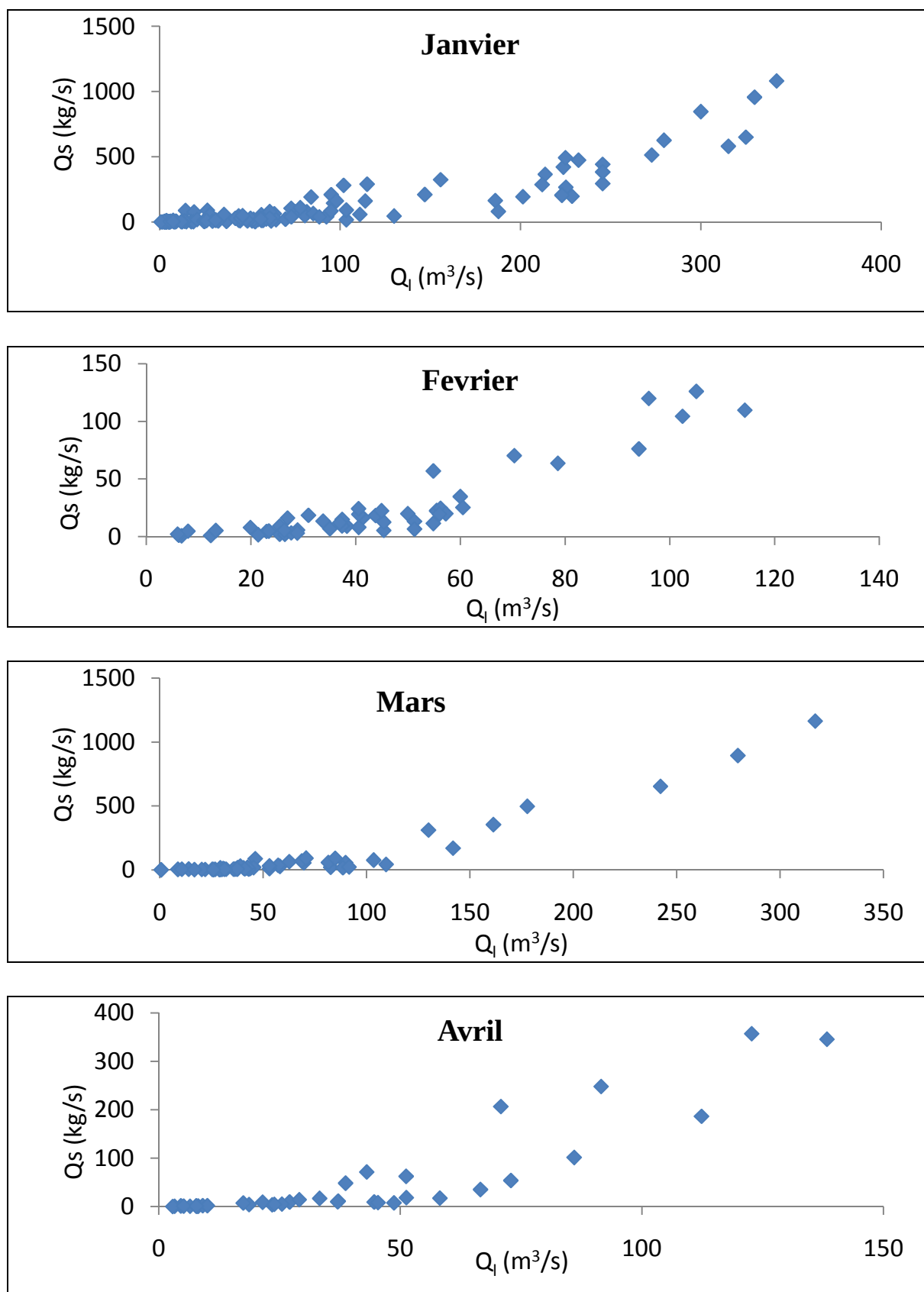
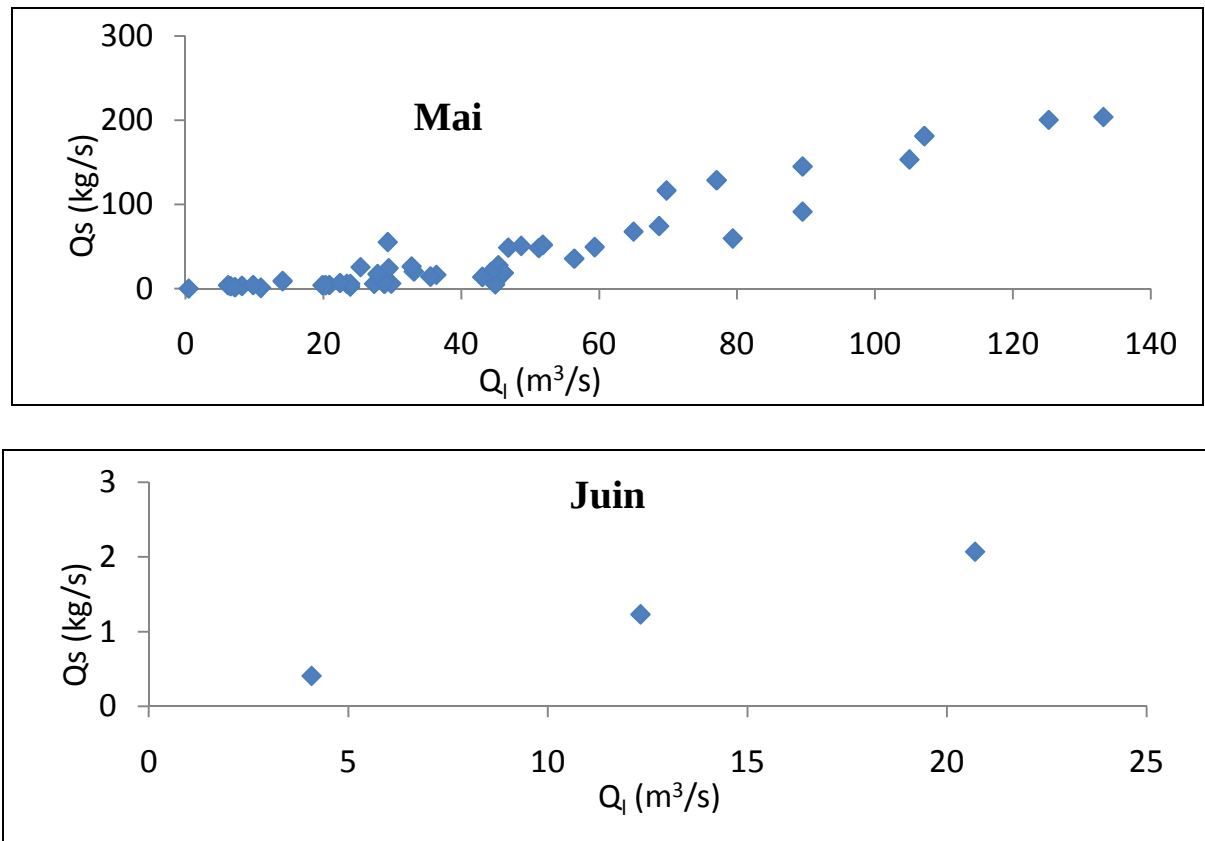


Figure IV.04: Répartition mensuelle des débits solides – débits liquides à la station de BALLOUA.



Suite Figure IV.04: Répartition mensuelle des débits solides – débits liquides à la station de BALLOUA.



Suite Figure IV.04: Répartition mensuelle des débits solides – débits liquides à la station de BALLOUA

Chaque mois est marqué par une forme spécifique caractérisant la variation des apports solide en fonction des apports liquides, cette variation nous renseigne sur les limites que peut atteindre le couple (Q_s, Q_l) , ainsi que les périodes ou des événements extrêmes ont été enregistrés.

IV.3.5 Répartition annuelle des débits solides- débits liquides

La longue série de données mise à notre disposition nous incite à rechercher les années qui peuvent avoir une influence directe sur le calcul des apports solides.

Les graphes qui représentent le couples (Q_s, Q_l) donnent au préalable toutes les informations relatives à l'évolution du couple (Q_s, Q_l) dans le temps et une meilleure explication de la variation annuelle du débit solide en fonction du débit liquide.

IV.3.5.1 Répartition annuelle des débits solides- débits liquides de la station de BAGHLIA

La répartition annuelle des débits solides en fonction des débits liquides de la station de Baghlia est représentée sur la figure IV.05.

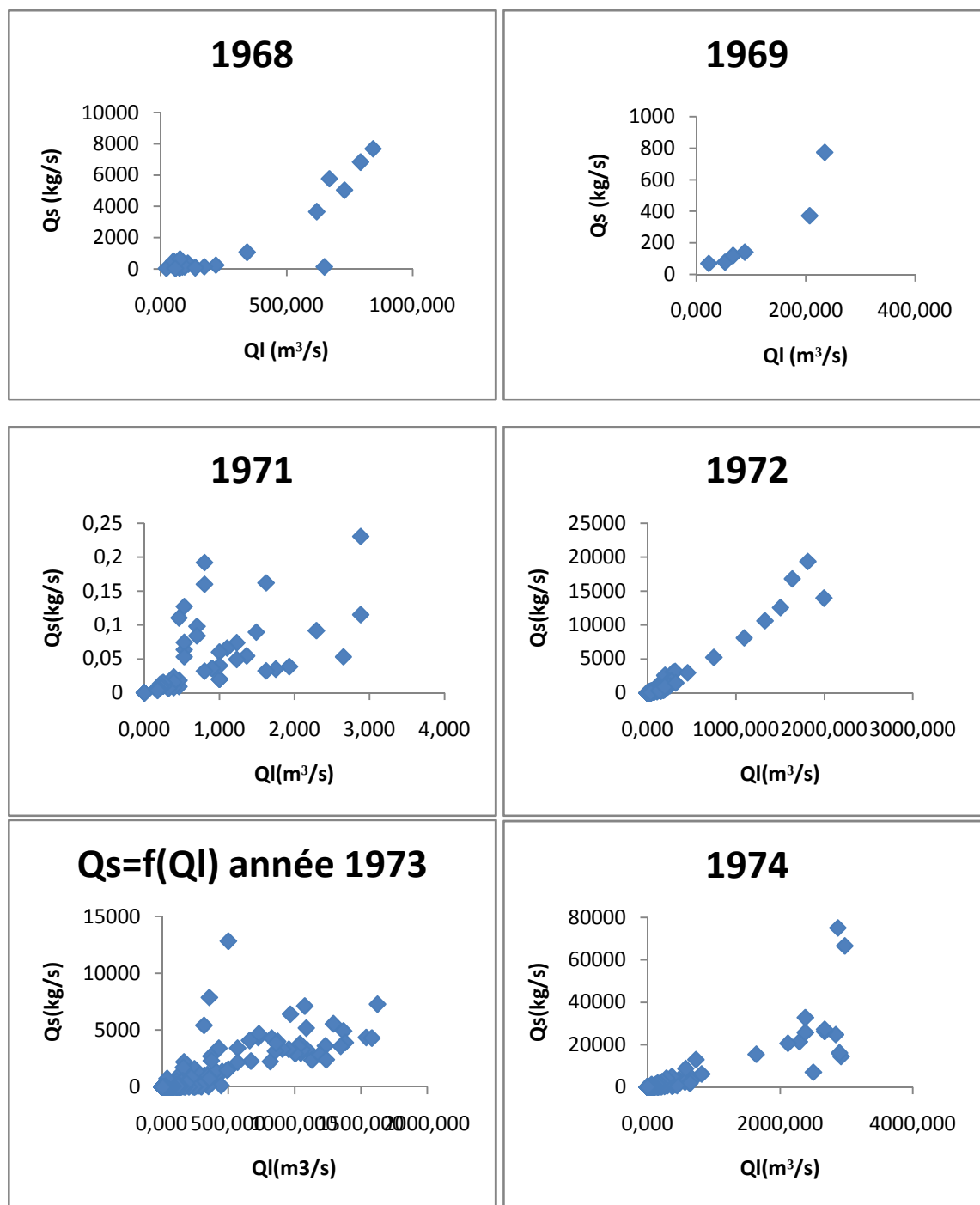
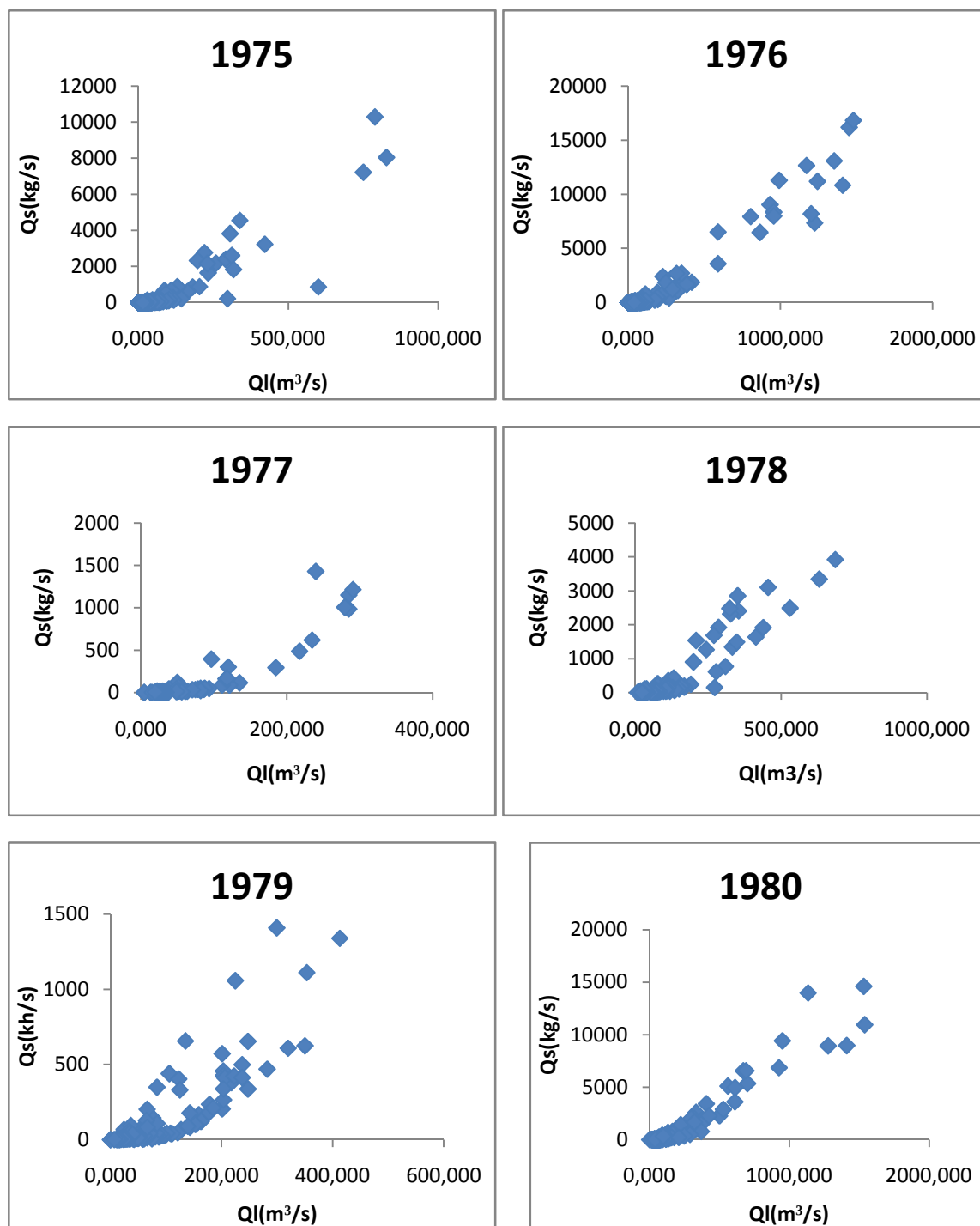
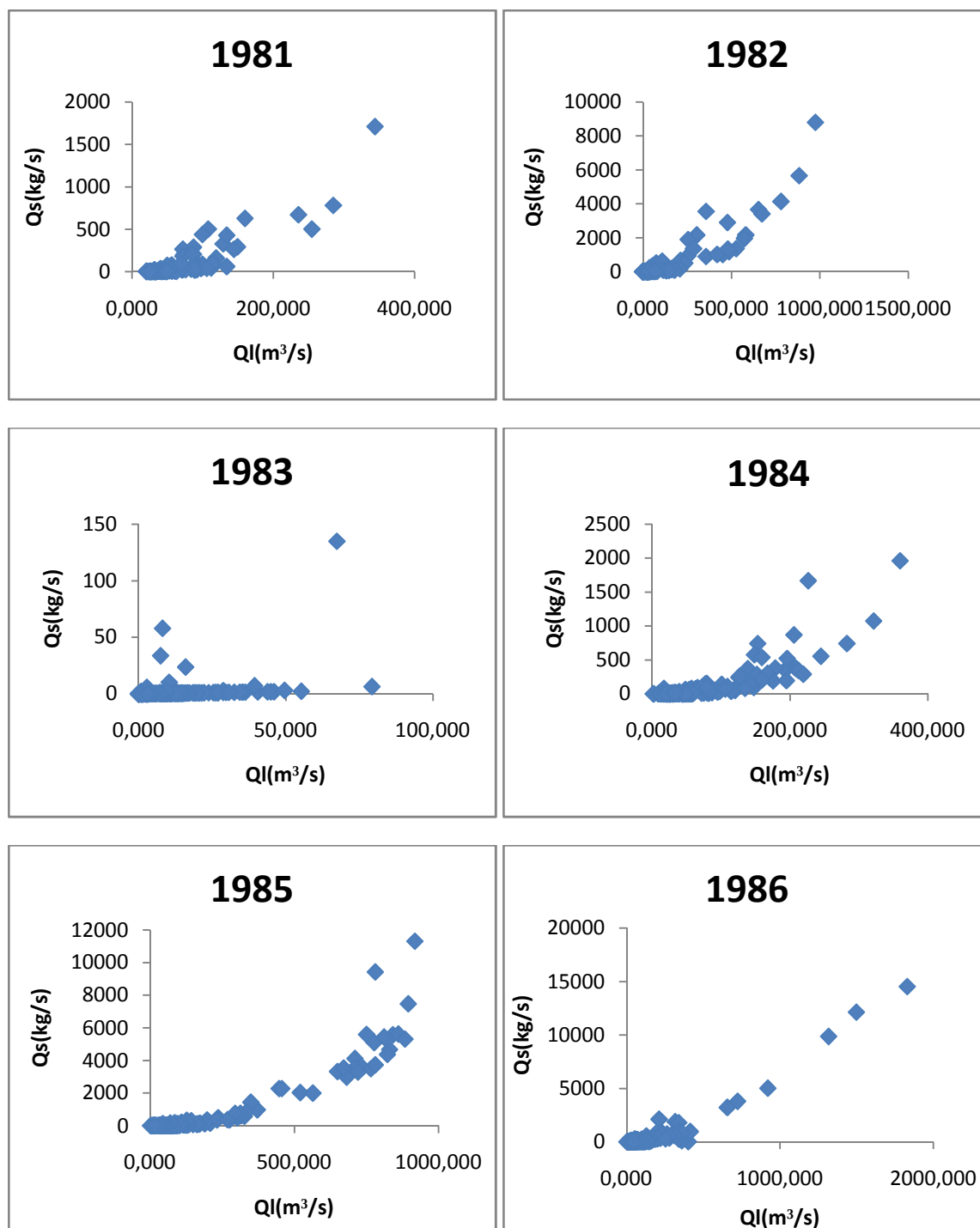


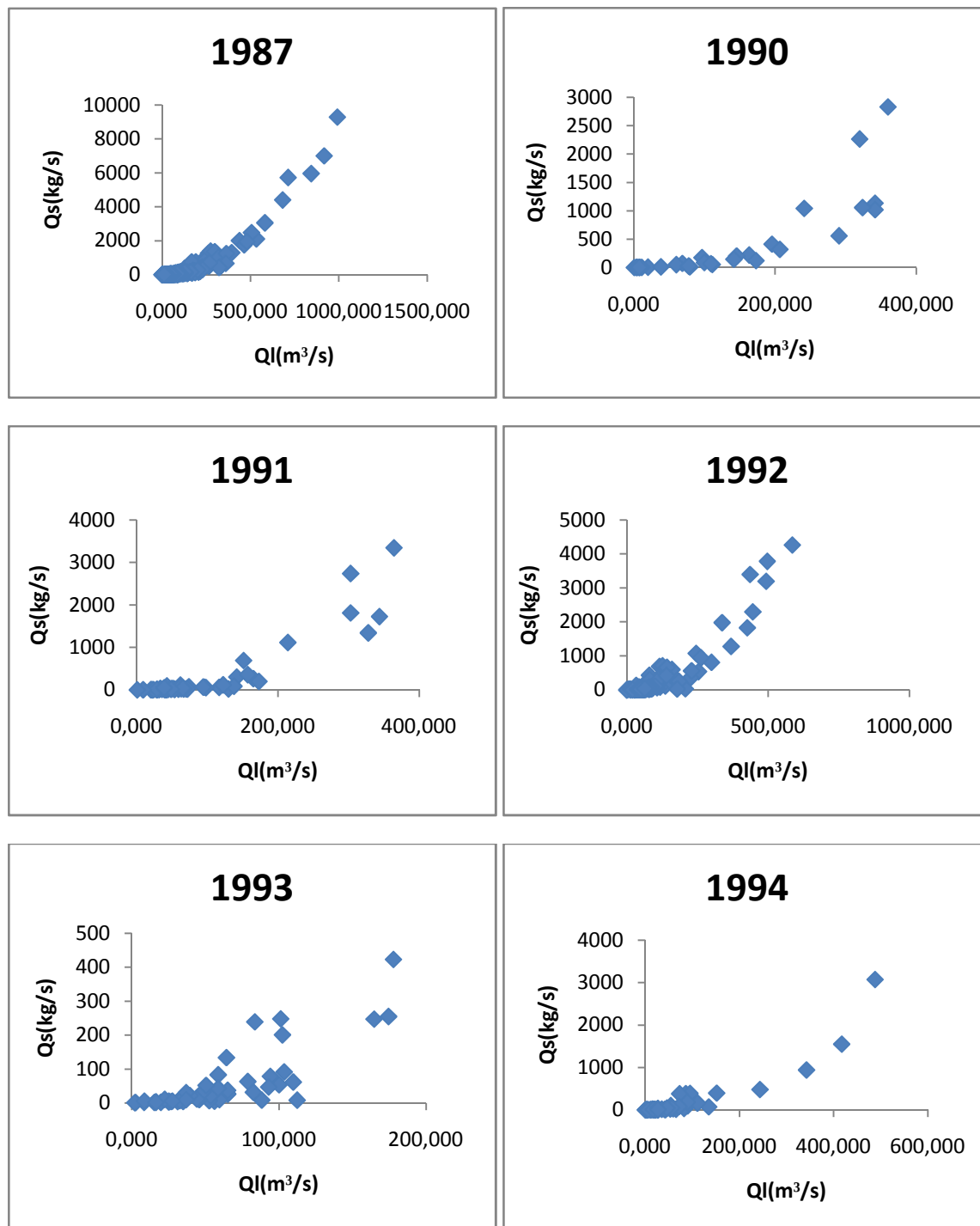
Figure IV.05: Répartition annuelle des débits solides – débits liquides à la station de BAGHLIA.



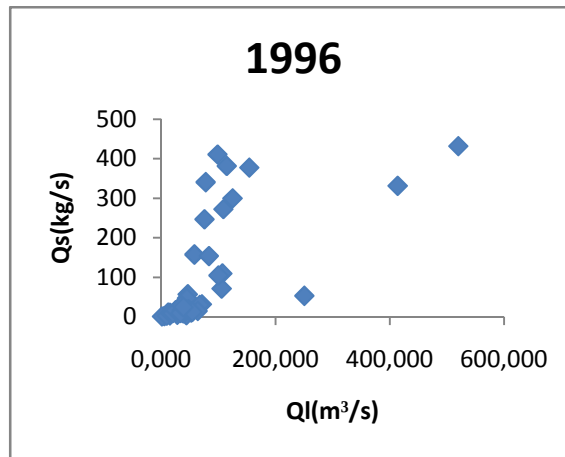
Suite Figure IV.05: Répartition annuelle des débits solides – débits liquides à la station de BAGHLIA.



Suite Figure IV.05: Répartition annuelle des débits solides – débits liquides à la station de BAGHLIA



Suite Figure IV.05: Répartition annuelle des débits solides – débits liquides à la station de BAGHLIA.



Suite Figure IV.05: Répartition annuelle des débits solides – débits liquides à la station de BAGHLIA.

IV.3.5.2 Répartition annuelle des débits solides- débits liquides de la station de BALLOUA

La répartition annuelle des débits solides en fonction des débits liquides de la station de Balloua est représentée sur la figure IV.06.

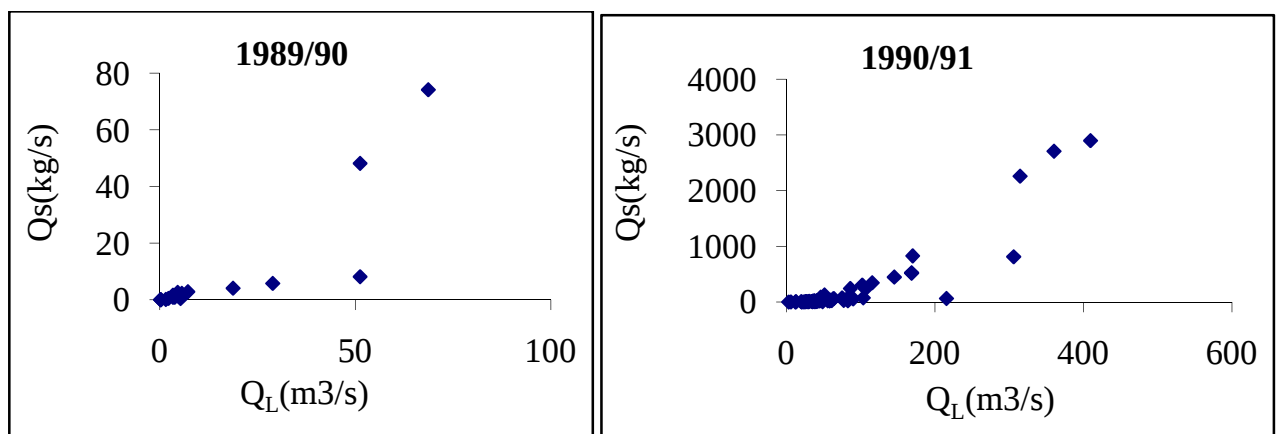
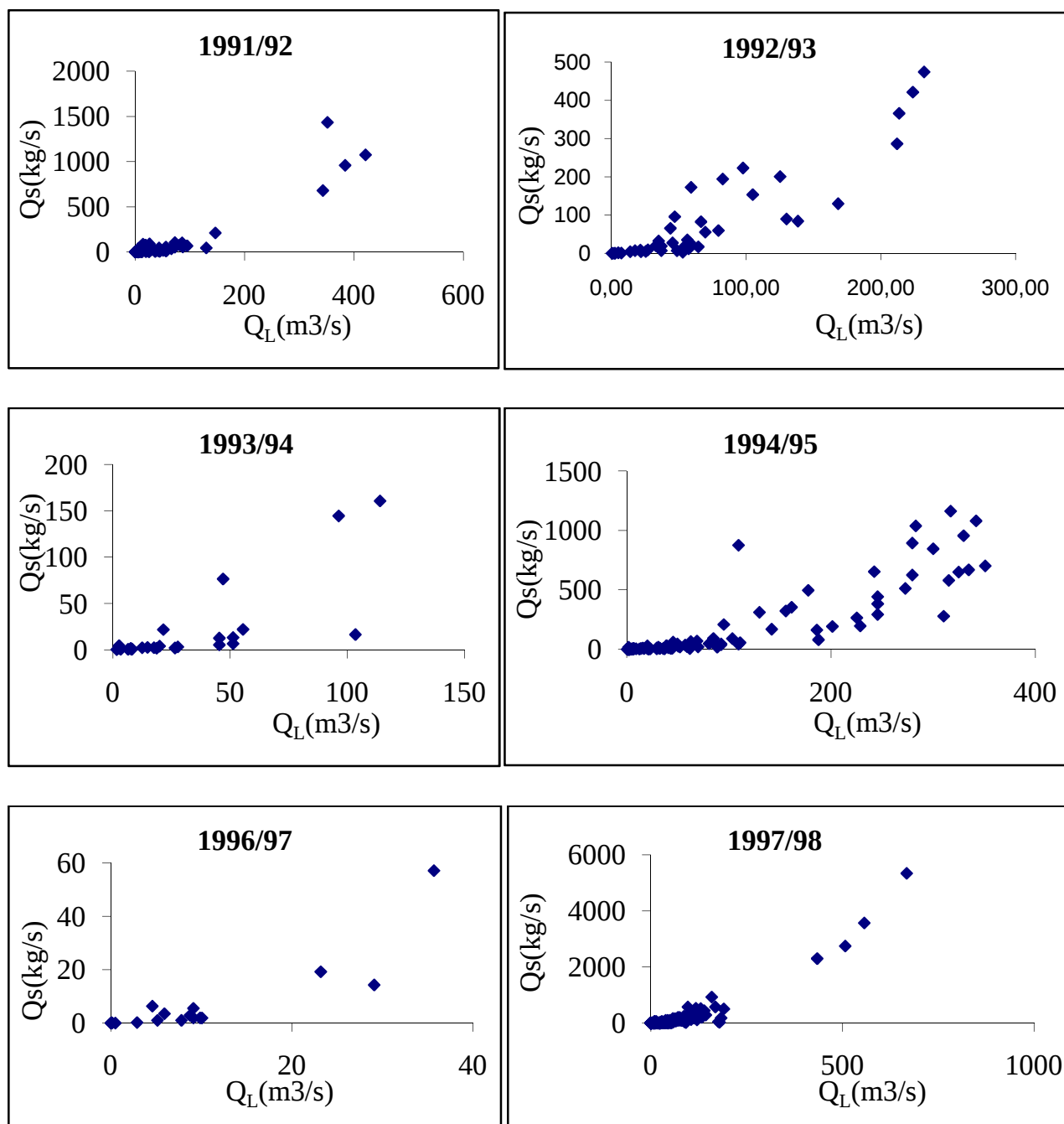
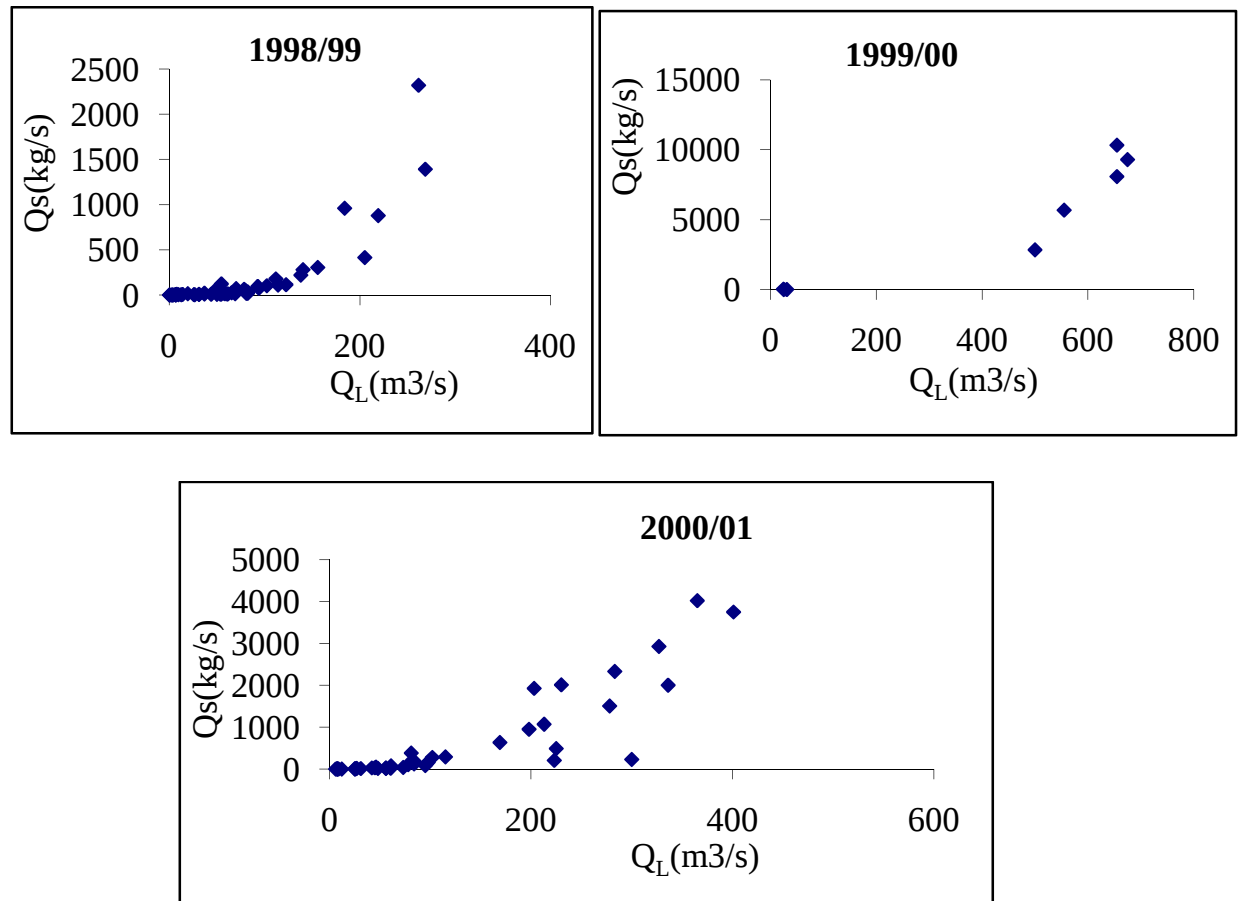


Figure IV.06: Répartition annuelle des débits solides – débits liquides à la station de BALLOUA



Suite Figure IV.06: Répartition annuelle des débits solides – débits liquides à la station de BALLOUA



Suite Figure IV.06: Répartition annuelle des débits solides – débits liquides à la station de BALLOUA.

IV.3.6 Répartition saisonnière des débits liquides- débits solides

Vu l'influence des saisons sur le phénomène du transport solide, la visualisation de l'ensemble des données à l'échelle saisonnière permet d'identifier la saison la plus contribuable à l'érosion du bassin de l'oued de sébaou.

La visualisation des données brutes d'observation quotidienne (série des débits liquide en m^3/s et des concentrations en g/l a montré que les concentrations moyennes saisonnières sont plus élevées en automne. Mais les apports solides en hiver sont les plus importants.

IV.3.6.1 Répartition saisonnière des débits liquides- débits solides de la station de Baghlia

La figure IV.07 représente la répartition saisonnière des débits solides en fonction des débits liquides de la station de Baghlia.

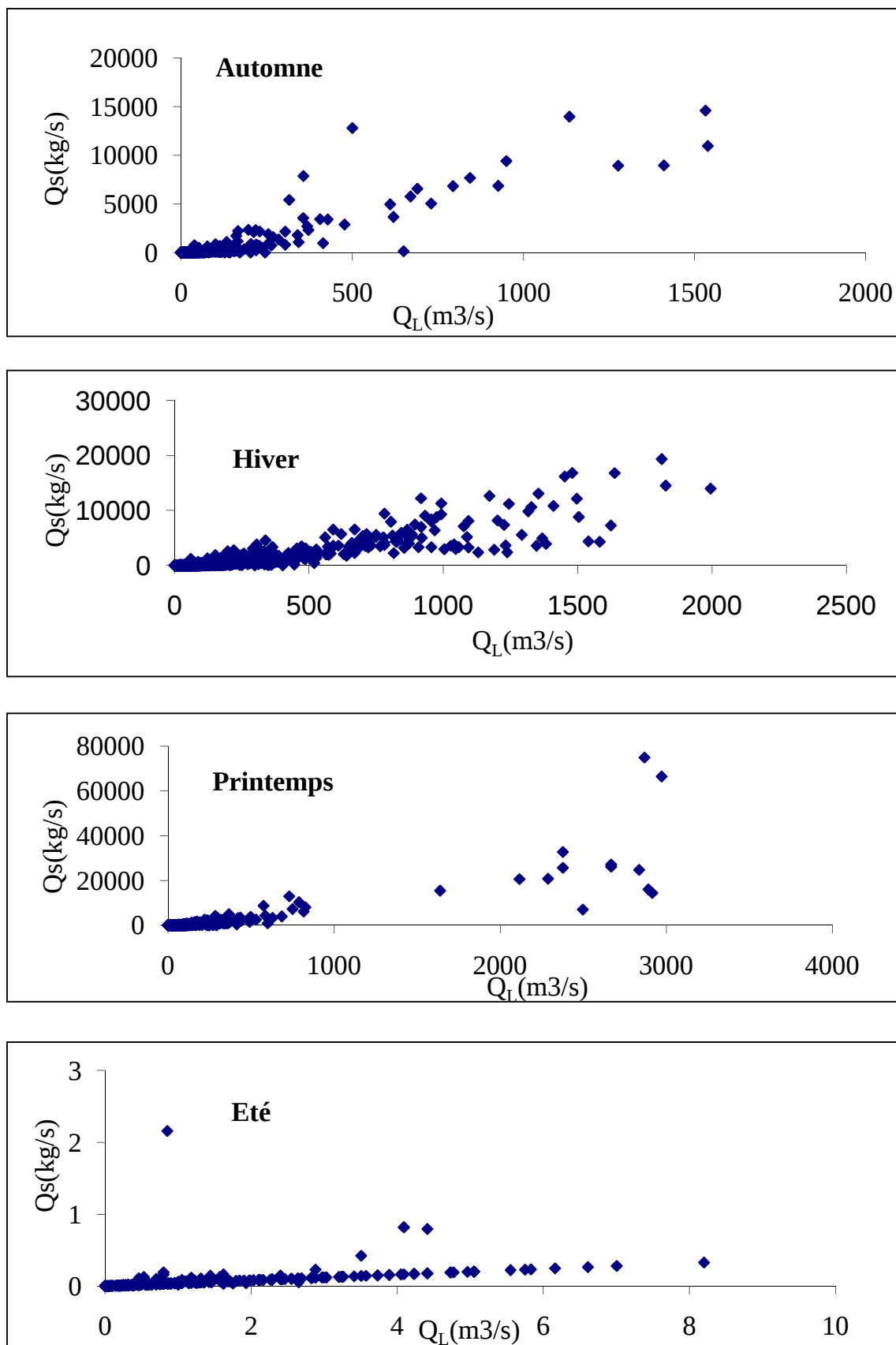


Figure IV.07: Répartition saisonnière des débits solides – débits liquides à la station de BAGHLIA.

IV.3.6.2 Répartition saisonnière des débits liquides- débits solides de la station de Balloua

La figure IV.08 représente la répartition saisonnière des débits solides en fonction des débits liquides de la station de Balloua.

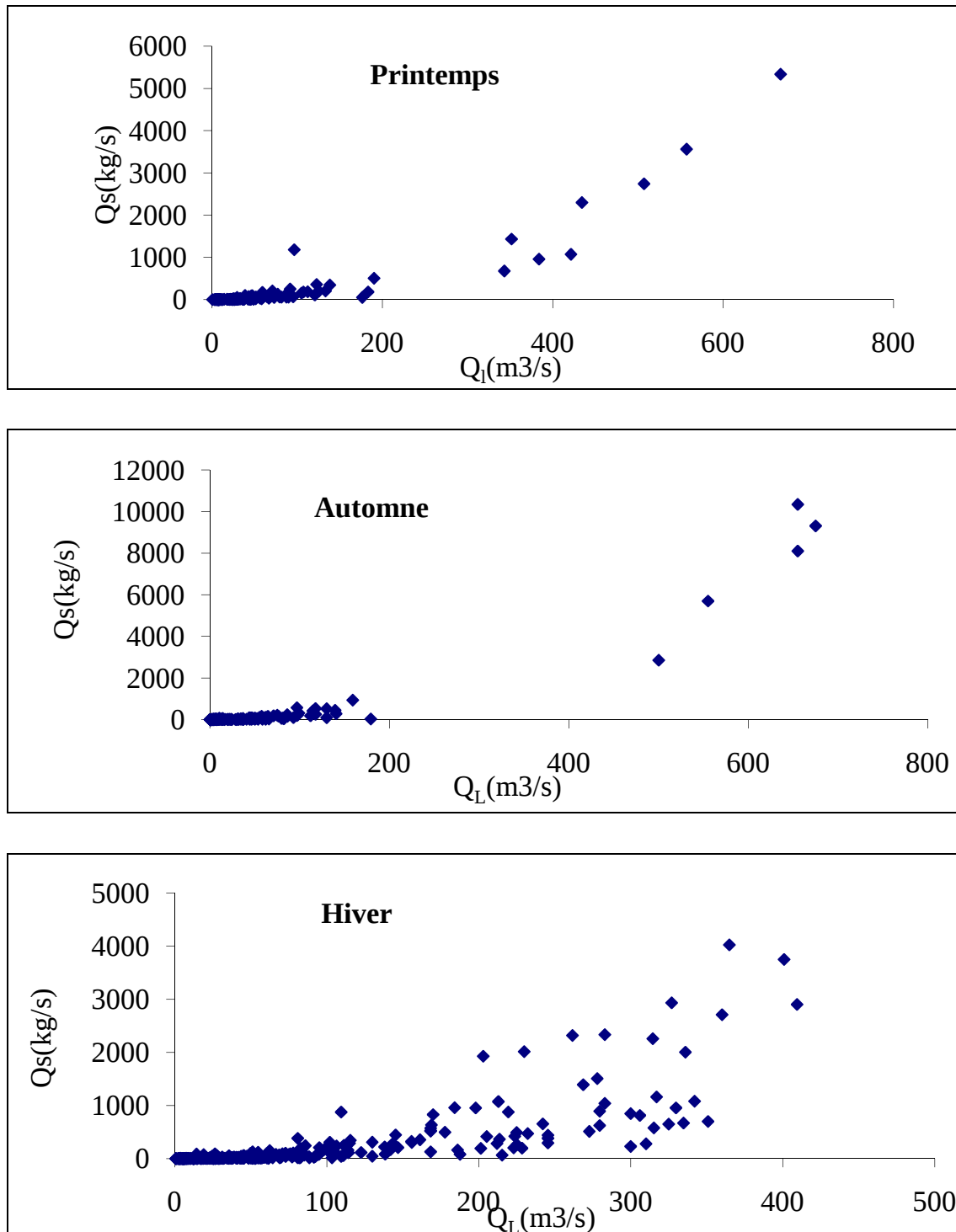


Figure IV.08: Répartition saisonnière des débits solides – débits liquides à la station de BALLOUA.

IV.4 Traitement et interprétation des résultats

Pour prédire l'effet du transport solide par suspension et pour établir des relations empiriques entre les facteurs contribuant au phénomène et pour définir une relation entre les différents paramètres débit liquide, le débit solide, la concentration, la hauteur du cours d'eau et la surface mouillée, l'analyse hydrologique emploie des méthodes ayant recours à la mathématique en général et à la statistique en particulier.

Ces méthodes statistiques exigent que les données soient bien organisées et bien stockées, pour parvenir à une décision ou une conclusion.

Le principal but à atteindre avec la présente étude est l'exploitation de cette banque de données pour l'estimation de sédiments qui transitent à travers le cours d'eau considéré et pour déterminer une relation entre la concentration et la surface.

A cet effet, nous avons soumis les données préparées à un traitement statistique et informatique pour identifier le meilleur modèle régressif entre la variable explicative (débit liquide) et la variable expliquée (débit solide). Ces deux variables aléatoires Q_s - Q_l constituent les paramètres clés de notre étude.

IV.4.1 Méthode de régression linéaire

IV.4.1.1 Avantage d'un modèle

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

La connaissance fondamentale des phénomènes en question nous permet de proposer un modèle précis qui a pour avantage :

- L'exploitation des données expérimentales, exprimant le mieux possible un problème donné.
- Réduction de l'ensemble de données ou nombre de modèle, tout en gardant l'information continue dans les données.
- Simulation du comportement du système.

IV.4.1.2 Estimation des paramètres du modèle

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 :

$$Y=A+BX \quad (\text{IV.01})$$

Un modèle est linéaire s'il peut être ramené à la forme (I) par un changement de variable.

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 linéarisable, le recoure aux méthodes de programmation non linéarisable est inévitable.

IV.4.1.3 Méthode des moindres carrés

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

Cette méthode consiste à minimiser la somme des carrés des écarts entre les valeurs observées et les valeurs théoriques d'une fonction.

La droite qui approche un ensemble de points, obéissant à la norme :

$$\sum_{i=1}^n E^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2 \quad (\text{IV.02})$$

Est la meilleure droite d'ajustement, avec y^* est fonction analytique.

La droite présentant cette propriété est dite, s'ajuster aux données au sens des moindres carrés, et elle est appelé « droite de régression au sens des moindres carrés ».

IV.4.1.4 Coefficient de corrélation

On est amené à déterminer statiquement le degré de liaison d'une relation de régression par la détermination d'un coefficient de corrélation « r » défini par la formule :

$$r = \sqrt{\frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{IV.03})$$

Avec :

X_i : variable connue, correspond à un débit liquide Q_l instantané.

Y_i : variable connue, correspond à un débit solide Q_s instantané.

$\bar{x}_l$: Moyenne arithmétique de la série « x_i ».

$\bar{y}_l$: Moyenne arithmétique de la série « y_i ».

n : taille de série.

Le coefficient de détermination « R^2 » est toujours compris entre 0 et 1, il vaut (1) dans le cas d'une liaison fonctionnelle parfaite, il vaut (0) dans le cas contraire. il explique surtout la part de la variance totale.

IV.4.2 Présentation des modèles régressifs

IV.4.2.1 Modèle linéaire « type droite »

C'est un modèle de type linéaire, son équation de droite est de la forme suivante :

$$Y = A + BX \quad (\text{IV.04})$$

« B » représente la pente de la droite et est égale à :

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (\text{IV.05})$$

« A » est l'ordonnée à l'origine de la droite et est égale à :

$$A = \bar{y} - B\bar{x} \quad (\text{IV.06})$$

$\bar{x}$ et $\bar{y}$ sont les plus moyennes arithmétiques respectivement de la série des X_i et de la série des Y_i

IV.4.2.2 Modèle logarithmique

Ce modèle est gouverné par l'équation suivante :

$$Y = \ln X + B \quad (\text{IV.07})$$

IV.4.2.3 Modèle de l'exponentiel

L'équation de ce modèle est de la forme suivante :

$$Y = A \cdot e^{BX} \quad (\text{IV.08})$$

Nous obtenons l'équation suivante pour une transformation logarithmique :

$$\ln Y = \ln A + \ln e^{BX} \quad \text{ou} \quad \ln Y = \ln A + BX \quad (\text{IV.09})$$

Et pour une équation de droite on transforme l'équation obtenue.

IV.4.2.4 Modèle puissance

L'équation de ce modèle est de forme suivante :

$$Y = AX^B \quad (\text{IV.10})$$

Si on introduit le logarithme népérien on a :

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

IV.4.2.5 Modèle polynomial

Pour un modèle linéaire et dans le cas d'un polynôme de 2^{ème} degré, l'équation de la parabole est de la forme suivante :

$$Y = A + BX + CX^2 \quad (\text{IV.11})$$

Pour cette équation afin de déterminer les valeurs des coefficient A , B , C , il faut résoudre un système de trois équations à trois inconnues. Ces trois équations sont des équations normales.

Remarque

Vu l'importance de la quantité des données mises à notre disposition, nous allons rechercher les modèles régressifs, traiter leurs caractéristiques et déterminer les valeurs des coefficients de corrélation R^2 à l'aide de l'Excel

IV.4.3 Traitement des données

Pour trouver une formulation mathématique de notre d'étude, la première tentative de traitement consiste à la recherche d'une liaison fonctionnelle entre les débits liquides et le débit solide.

La mise en graphe de toutes les données présentant les couples (Q_s, Q_l) a orienté le choix du modèle. Pour tous les fichiers traités, le modèle puissance et polynomial reliant le débit solide au débit liquide sont les plus significatifs.

Les résultats concernant le coefficient de détermination R^2 et les formules reliant le débit solide avec le débit liquide de la station de BAGHLIA sont représentés dans les tableaux IV.02, IV.03 et IV.04.

Tableau IV.03 : Valeurs de R^2 et le modèle retenu à l'échelle annuelle de la station de Baghlia.

Année	R ²					Equation du modèle retenu
	expo	lin	logarith	Poly	pui	
1968	0,68	0,78	0,59	0,86	0,63	$Q_s = 0,017Q_l^2 - 6,56Q_l + 632,9$
1969	0,97	0,84	0,67	0,92	0,87	$Q_s = 52,86e^{0,010Q_l}$
1971	-	0,38	-	0,4	-	$Q_s = 0,009Q_l^2 + 0,066Q_l + 0,004$
1972	-	0,95	-	0,96	-	$Q_s = 0,001Q_l^2 + 6,692Q_l - 82,30$
1973	-	0,65	-	0,66	-	$Q_s = 0,001Q_l^2 + 4,899Q_l - 139,7$
1974	-	0,71	-	0,73	-	$Q_s = 0,003Q_l^2 + 3,361Q_l - 37,44$
1975	-	0,8	-	0,85	-	$Q_s = 0,007Q_l^2 + 4,031Q_l - 53,07$
1976	-	0,92	-	0,95	-	$Q_s = 0,004Q_l^2 + 4,109Q_l - 121,3$
1977	0,78	0,82	0,5	0,9	0,8	$Q_s = 0,016Q_l^2 - 0,589Q_l + 10,750$
1978	0,68	0,85	0,5	0,86	0,78	$Q_s = 0,003Q_l^2 + 3,611Q_l - 148,8$
1979	-	0,71	-	0,77	-	$Q_s = 0,006Q_l^2 + 0,520Q_l - 7,882$
1980	-	0,919	-	0,921	-	$Q_s = 0,001Q_l^2 + 7,189Q_l - 456,5$
1981	0,62	0,74	0,47	0,83	0,75	$Q_s = 0,011Q_l^2 + 0,210Q_l - 9,447$
1982	-	0,81	-	0,9	-	$Q_s = 0,007Q_l^2 + 0,492Q_l + 18,02$
1983	-	0,12	-	0,2	-	$Q_s = 0,009Q_l^2 - 0,170Q_l + 0,768$
1984	0,72	0,64	0,3	0,78	0,79	$Q_s = 0,001Q_l^{2,230}$
1985	0,77	0,83	0,46	0,9	0,86	$Q_s = 0,010Q_l^2 - 1,618Q_l + 95,42$
1986	0,45	0,9	0,3	0,97	0,73	$Q_s = 0,003Q_l^2 + 2,126Q_l - 105,1$
1987	0,6	0,82	0,23	0,97	0,87	$Q_s = 0,008Q_l^2 + 0,167Q_l - 11,90$
1990	0,81	0,66	0,3	0,78	0,93	$Q_s = 0,064Q_l^{1,608}$
1991	0,79	0,78	0,37	0,89	0,82	$Q_s = 0,026Q_l^2 - 2,131Q_l + 51,48$
1992	0,59	0,83	0,26	0,93	0,72	$Q_s = 0,013Q_l^2 - 0,407Q_l + 25,17$
1993	0,67	0,62	0,31	0,69	0,7	$Q_s = 0,052Q_l^{1,516}$
1994	0,54	0,82	0,24	0,93	0,85	$Q_s = 0,012Q_l^2 - 0,537Q_l + 33,16$
1996	0,38	0,44	0,43	0,54	0,73	$Q_s = 0,158Q_l - 1,353$

Tableau IV.04 : Valeurs de R^2 et le modèle retenu à l'échelle mensuelle de la station de Baghlia.

Mois	R ²					Equation du modèle retenu
	expo	lin	Logarith	poly	pui	
Décembre	0,42	0,89	0,3	0,91	0,88	$Q_s = 0,002Q_l^2 + 5,110Q_l - 201,3$
Janvier	-	0,879	-	0,88	-	$Q_s = -2E-05Q_l^2 + 3,638Q_l - 132,1$
Février	-	0,76	-	0,82	-	$Q_s = 0,004Q_l^2 + 2,138Q_l - 86,55$
Mars	-	0,71	-	0,75	-	$Q_s = 0,003Q_l^2 + 3,781Q_l - 195,6$

Avril	0,57	0,67	0,28	0,75	0,87	$Q_s = 0,002Q_l^{2,342}$
Mai	-	0,82	-	0,94	-	$Q_s = 0,014Q_l^2 + 0,814Q_l - 22,44$
Juin	-	0,55	-	0,59	-	$Q_s = 0,001Q_l^2 + 0,081Q_l - 0,042$
Juillet	-	0,463	-	0,463	-	$Q_s = 0,000Q_l^2 + 0,058Q_l - 0,003$
Aout	-	0,02	-	0,024	-	$Q_s = -0,069Q_l^2 + 0,161Q_l - 0,022$
Septembre	-	0,73	-	0,94	-	$Q_s = 0,071Q_l^2 - 8,694Q_l + 9,703$
Octobre	-	0,53	-	0,71	-	$Q_s = 0,140Q_l^2 - 2,907Q_l + 4,739$
Novembre	-	0,69	-	0,83	-	$Q_s = 0,025Q_l^2 - 0,067Q_l + 4,003$

Tableau IV.05 : Valeurs de R^2 et le modèle retenu à l'échelle saisonnière de la station de Baghlia.

Saison	R^2					Equation du modèle retenu
	exp	lin	log	poly	pui	
Hiver	-	0,78	-	0,81	-	$Q_s = 0,002Q_l^2 + 3,647Q_l - 166,5$
Printemps	-	0,71	-	0,74	-	$Q_s = 0,002Q_l^2 + 4,340Q_l - 157,4$
Eté	-	0,25	-	0,26	-	$Q_s = -0,003Q_l^2 + 0,072Q_l - 0,006$
Autonne	-	0,81	-	0,82	-	$Q_s = 0,001Q_l^2 + 6,531Q_l - 87,68$

Les résultats concernant le coefficient de détermination R^2 et les formules reliant le débit solide avec le débit liquide des de la station de BALLOUA sont représentés dans les tableaux IV.05, IV.06 et IV.07.

Tableau IV.06 : Valeurs de R^2 et le modèle retenu à l'échelle annuelle de la station de Balloua.

Années	N	<u>Linéaire</u>	<u>Logarithmique</u>	<u>Puissance</u>	<u>Exponentielle</u>	<u>Polynomiale</u>
89/90	20	0,72	0,35	0,92	0,57	0,85
90/91	56	0,7	0,42	0,84	0,72	0,91
91/92	49	0,83	0,27	0,78	0,47	0,9
92/93	41	0,77	0,37	0,84	0,64	0,84
93/94	26	0,53	0,31	0,66	0,71	0,64
94/95	106	0,74	0,4	0,87	0,74	0,79
96/97	21	0,7	0,23	0,88	0,67	0,87
97/98	205	0,77	0,09	0,85	0,39	0,97
98/99	52	0,54	0,19	0,83	0,78	0,87
99/00	8	*	*	*	*	*
00/01	45	0,69	0,44	0,88	0,77	0,82

Tableau IV.07 : Valeurs de R^2 et le modèle retenu à l'échelle mensuelle de la station de Balloua.

Mois	N	<u>linéaire</u>	<u>logarithmique</u>	<u>polynomiale</u>	<u>puissance</u>	<u>exponentielle</u>	Equation du
------	---	-----------------	----------------------	--------------------	------------------	----------------------	-------------

							modèle
<u>Septembre</u>	19	0.81	0.80	0.87	0.81	*	$Q_s=14.94$ $Q_l^2+0.571 Q_l$
<u>Octobre</u>	45	0.86	0.434	0.97	0.65	0.81	$Q_s=0.12$ $Q_l^2+0.02 Q_l$
<u>Novembre</u>	71	0.85	0.37	0.99	0.95	0.70	$Q_s=0.03$ $Q_l^2+0.14 Q_l$
<u>Décembre</u>	124	0.58	0.33	0.7	0.72	0.66	$Q_s=0.14 Q_l^{1.44}$
<u>Janvier</u>	133	0.76	0.4	0.89	0.80	*	$Q_s=0.007$ $Q_l^2+0.129 Q_l$
<u>Février</u>	64	0.63	0.46	0.90	0.74	0.72	$Q_s=0.012 Q_l^2-$ $0.102 Q_l$
<u>Mars</u>	61	0.73	0.3	0.97	0.67	0.25	$Q_s=0.01 Q_l^2-$ $0.09 Q_l$
<u>Avril</u>	45	0.66	0.4	0.87	0.88	0.81	$Q_s=0.04 Q_l^{1.74}$
<u>Mai</u>	61	0.44	0.4	0.87	0.88	*	$Q_s=0.01 Q_l^2-$ $0.26 Q_l$
<u>Juin</u>	6	0,98	0.96	0,99	0,98	*	$Q_s=0.1 Q_l$
<u>Juillet</u>	0	*	*	*	*	*	*
<u>Aout</u>	0	*	*	*	*	*	*

Tableau IV.08 : Valeurs de R^2 et le modèle retenu à l'échelle saisonnière de la station de Balloua.

<u>Saison</u>	<u>N</u>	<u>Linéaire</u>	<u>Logarithmique</u>	<u>Puissance</u>	<u>Exponentielle</u>	<u>Polynomiale</u>
<u>Hiver</u>	312	0,53	0,27	0,78	0,72	0,68
<u>Printemps</u>	120	0,75	0,3	0,88	0,57	0,94
<u>Eté</u>	7	*	*	*	*	*
<u>Automne</u>	190	0,83	0,11	0,87	0,39	0,97

Par ce travail des modèles explicatifs de la variation du débit solide par le débit liquide ont été développés pour différents cas de regroupements de données (annuelles, saisonnières, mensuelles et intégrales). Les modèles obtenus aux échelles mensuelle donnent les meilleurs

coefficients de corrélation. ce modèle explique plus de 60% de variance de débit solide dans la station de BAGHLIA et 70% de la variance de débit solide dans la station de BALLOUA.

Après avoir connu l'échelle qui va nous guider vers l'étude de la variation de la concentration et la surface mouillée ($C=f(S)$). Nous passons par les étapes suivantes :

- Après le traçage des graphes en détermine des équations entre le débit solide et le débit liquide pour chaque mois qui nous permettons de connaître la concentration par la formule : $Q_s=Q_l C$.
- par la suite en trace les graphes $C=f(Q_l)$ et détermine les équations de chaque mois.
- en trace les graphes $Q_l=f(S)$ et on détermine les équations de chaque mois.
- Finalement en a une relation entre la concentration et la surface mouillée. En trace les graphes $C=f(S)$ avec la détermination des équations de chaque mois

A l'aide de l'échelle mensuelle en trace les graphes suivants $Q_l=f(s)$, $Q_l=f(h)$, $C=f(Q_l)$ et $C=f(S)$.

IV.5 Répartition mensuel des débits liquides-hauteur d'eau de la station de Baghlia

La représentation mensuelle des débits liquides-hauteurs sont représenté sur la figure IV.09

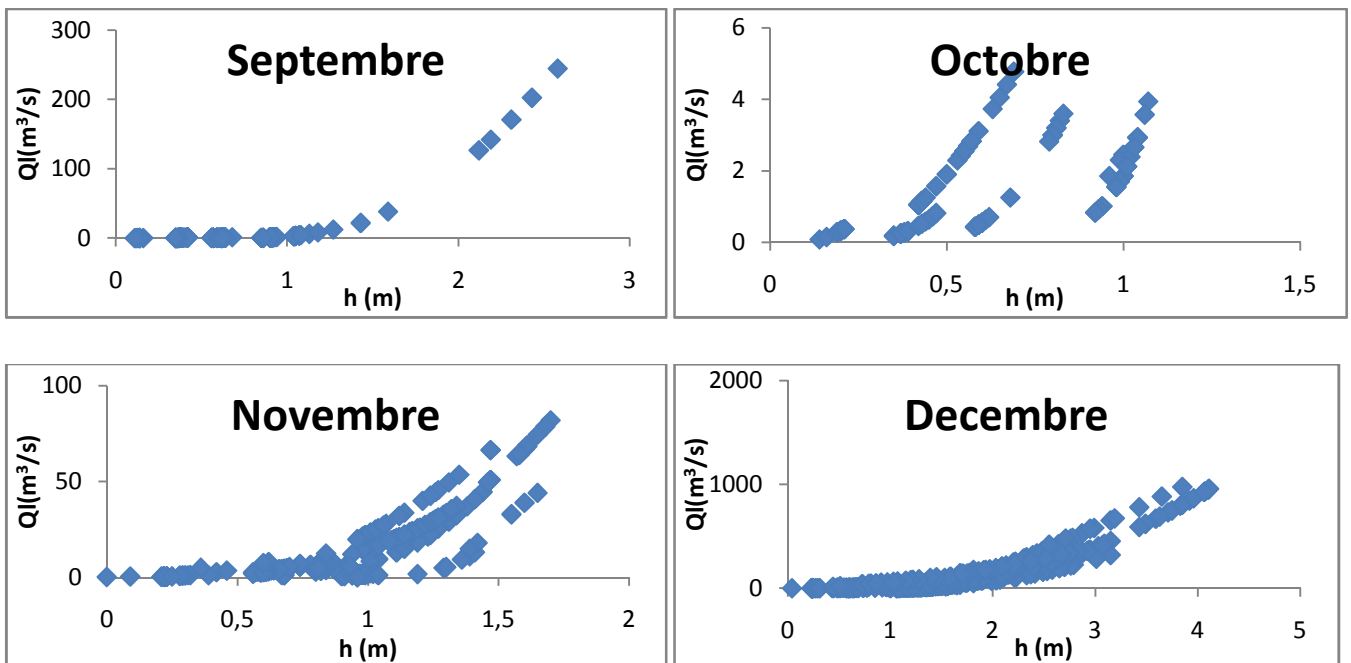
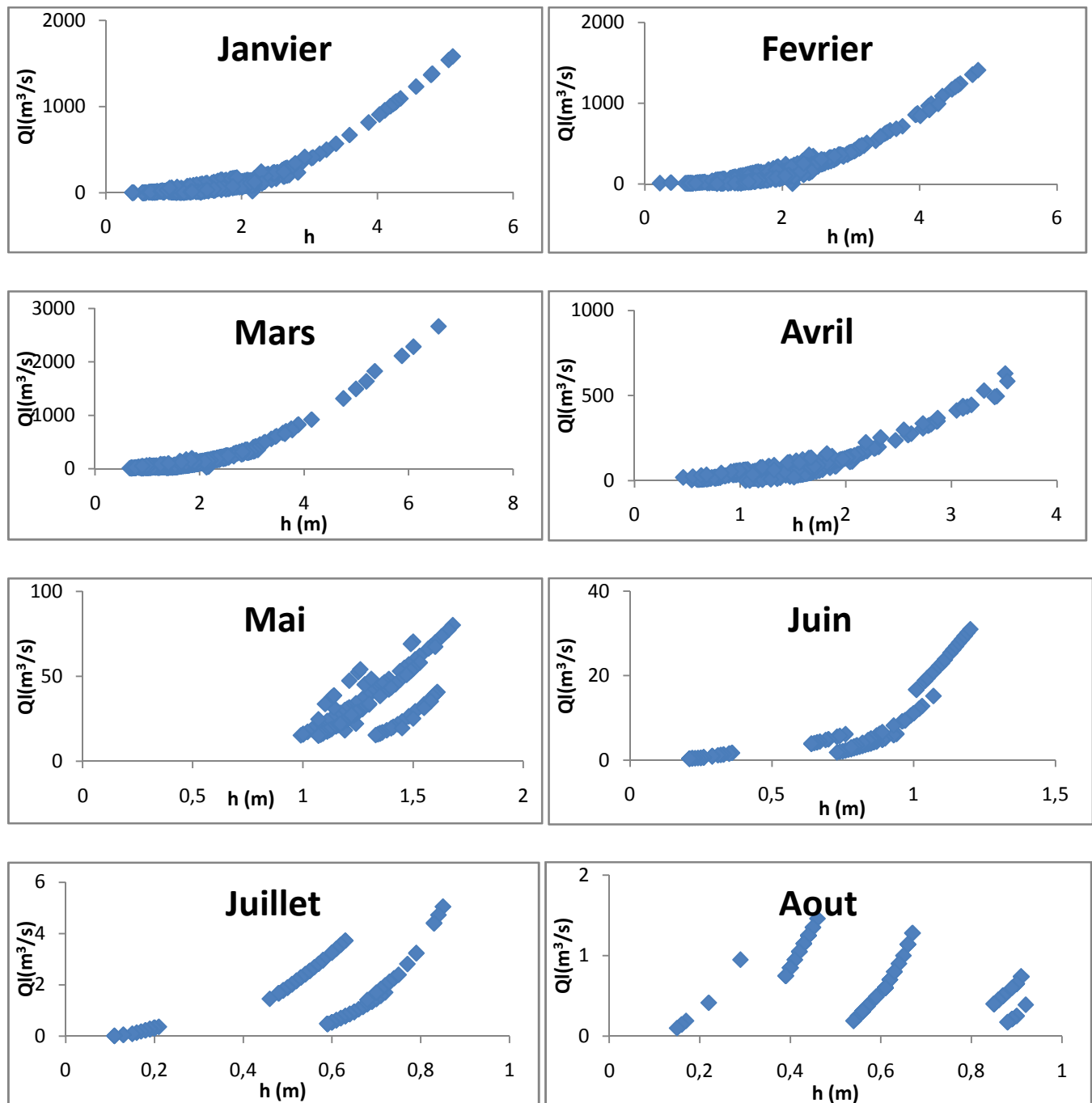


Figure IV.09: Répartition mensuelle des débits liquides-hauteur d'eau à la station de BAGHLIA.



Suite Figure IV.09: Répartition mensuelle des débits liquides-hauteur d'eau à la station de BAGHLIA

IV.6 Répartition des débits liquides-hauteurs pour toute la période d'observation de la station de BAGHLIA

La figure IV.10 représente la répartition des débits liquides-hauteurs pour toute la période d'observation de la station de BAGHLIA.

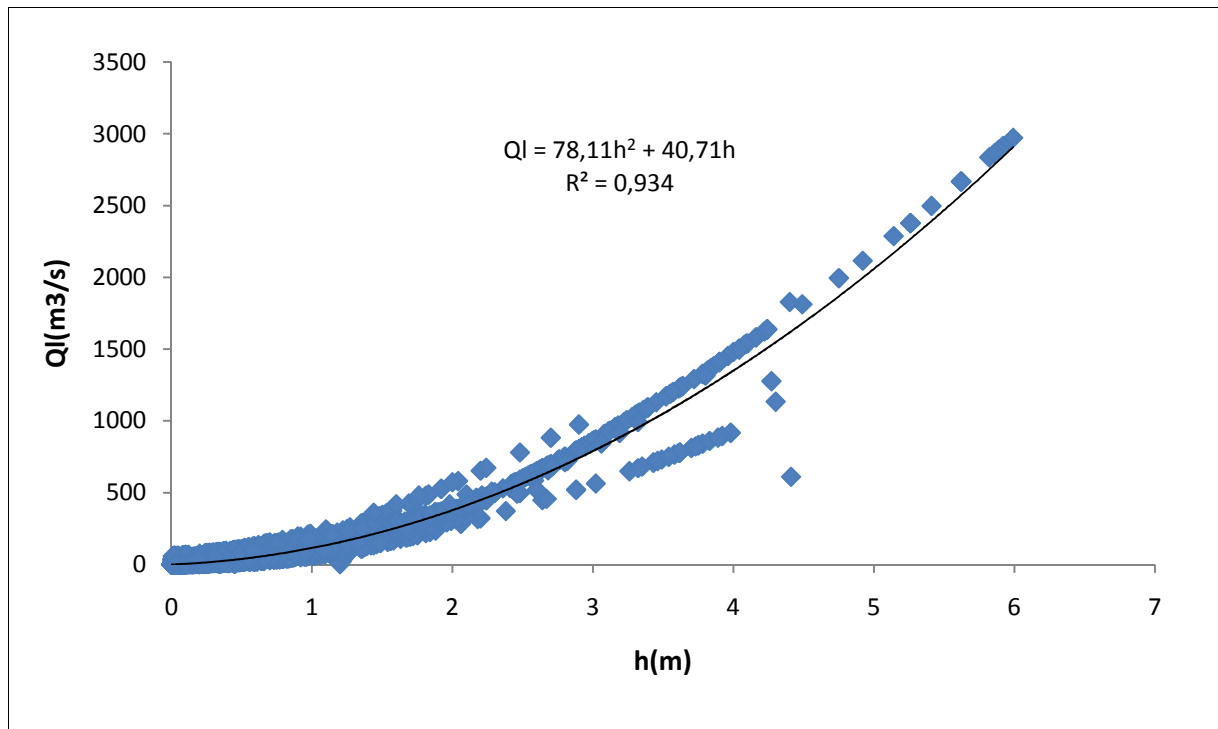


Figure IV.10 : Répartition des débits liquides-hauteurs pour toute la période d'observation de la station de BAGHLIA.

IV.7 Répartition mensuelle des concentration- débits liquides de la station de BAGHLIA

La répartition mensuelle des concentrations en fonction des débits liquides de la station de Baghlia est représentée sur la figure IV.10.

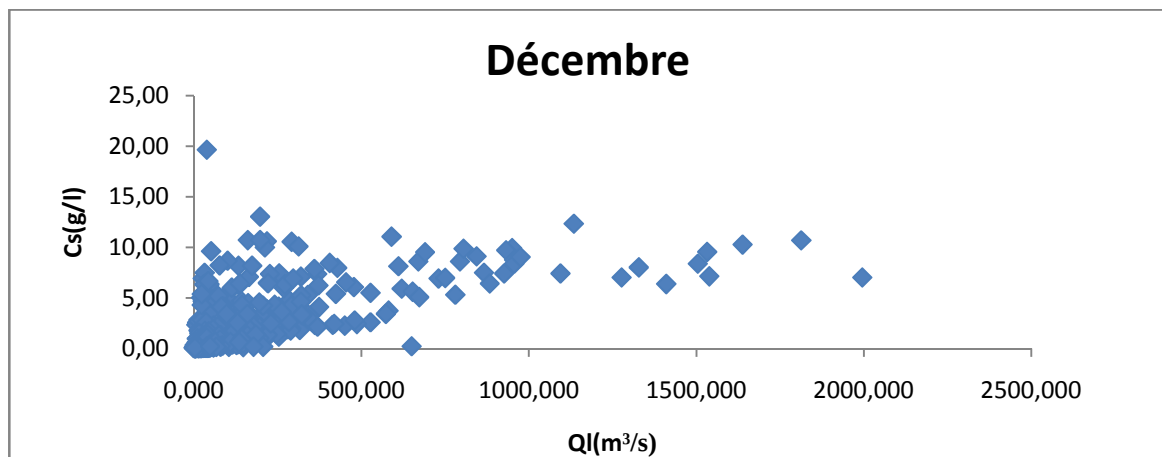
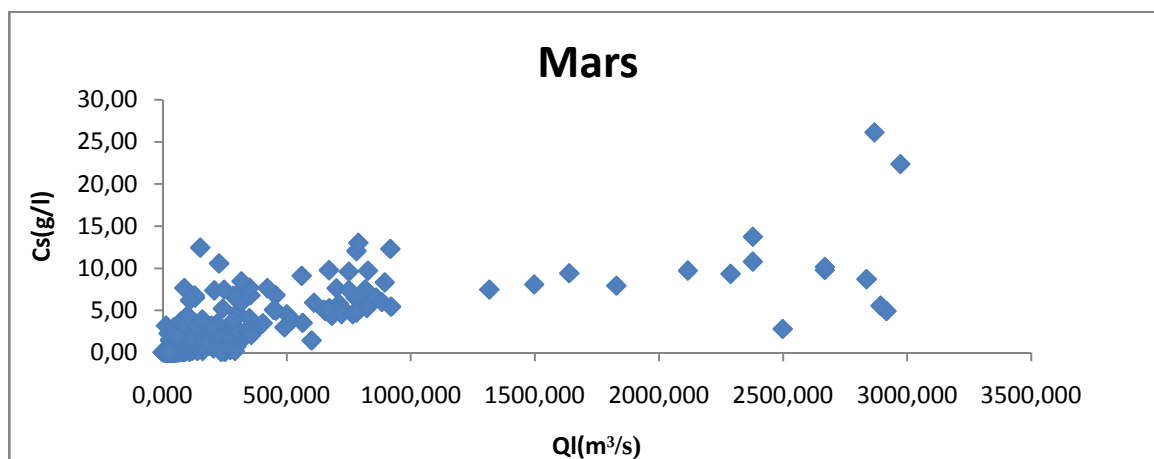
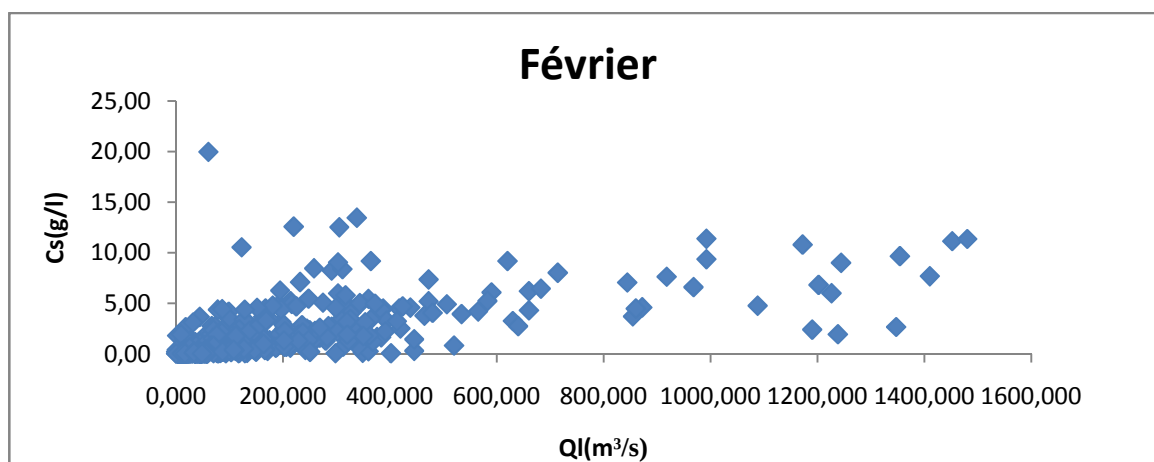
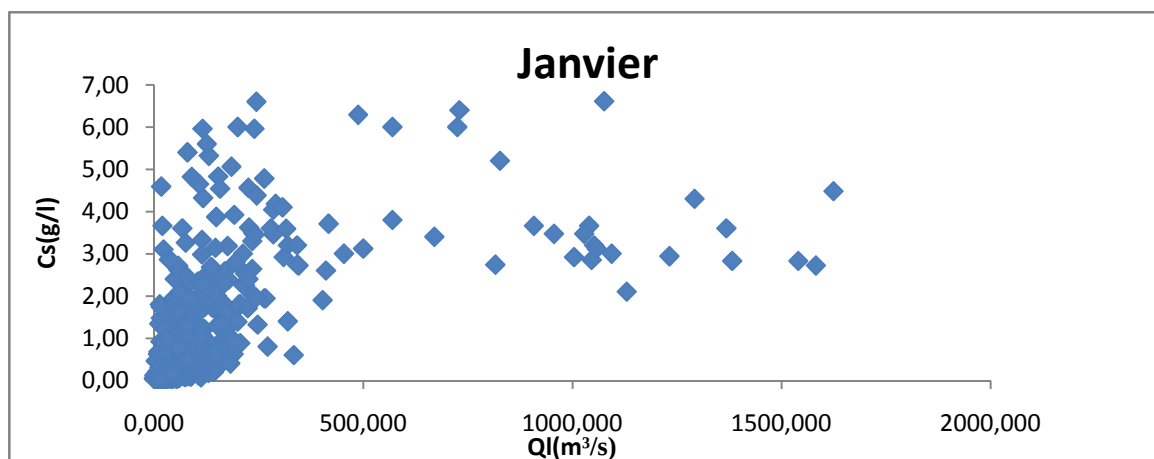
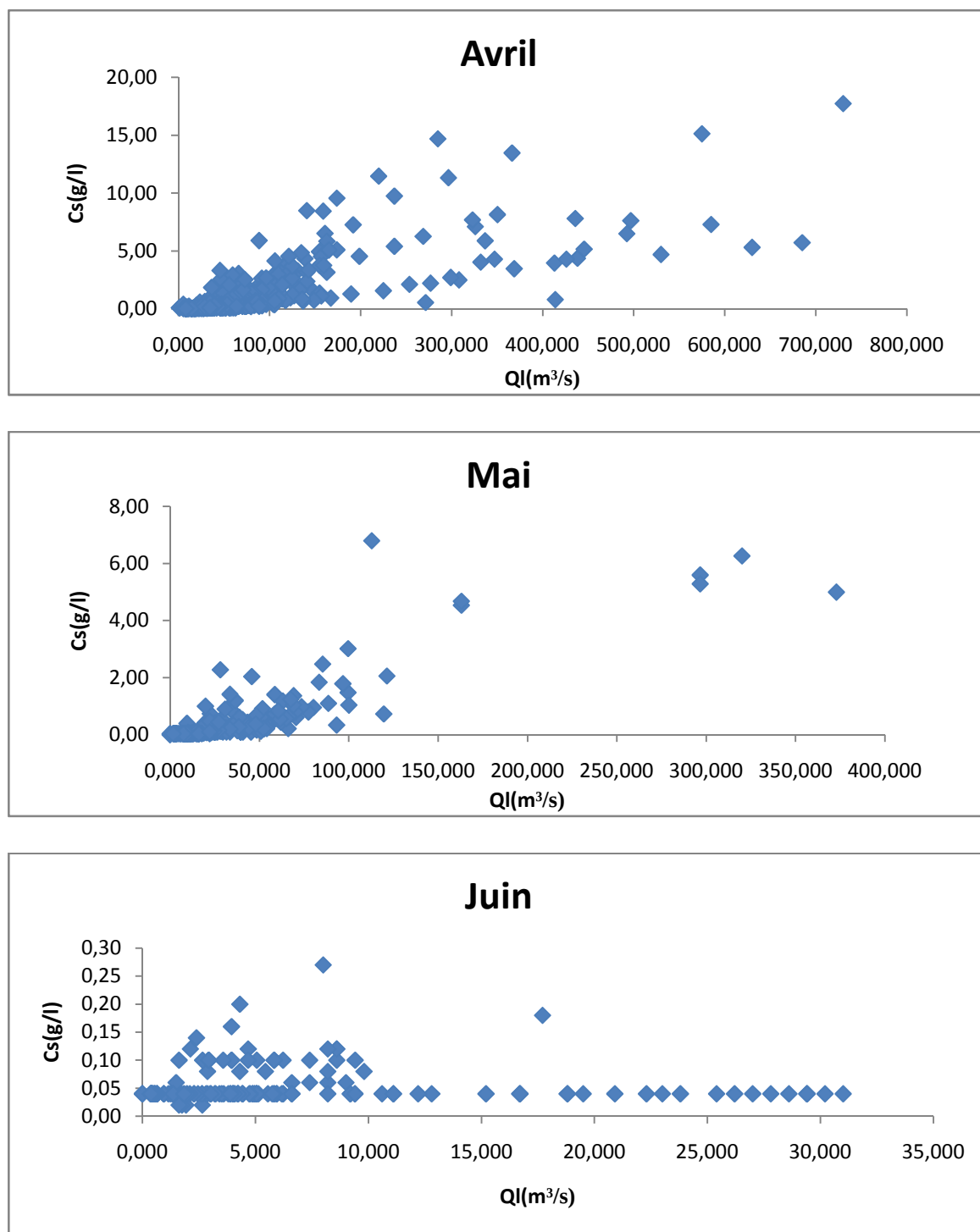


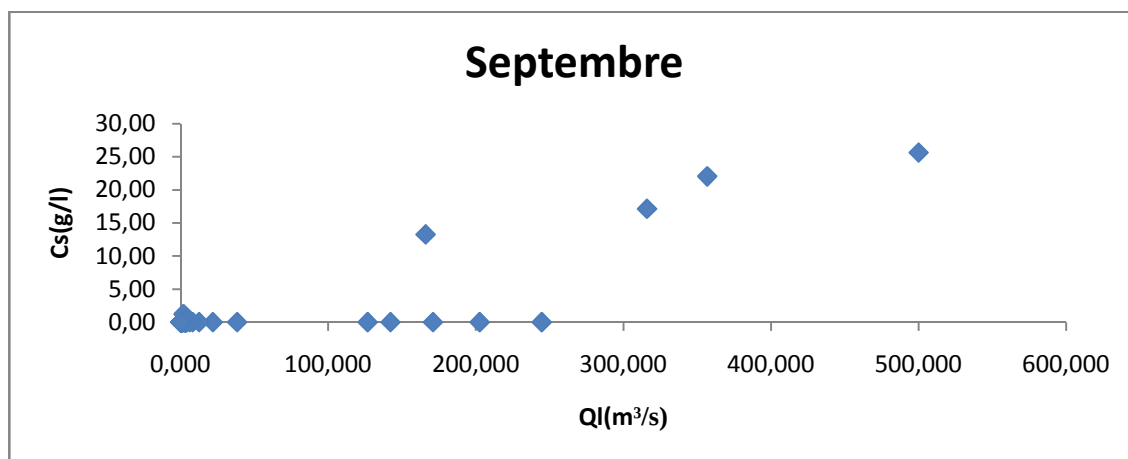
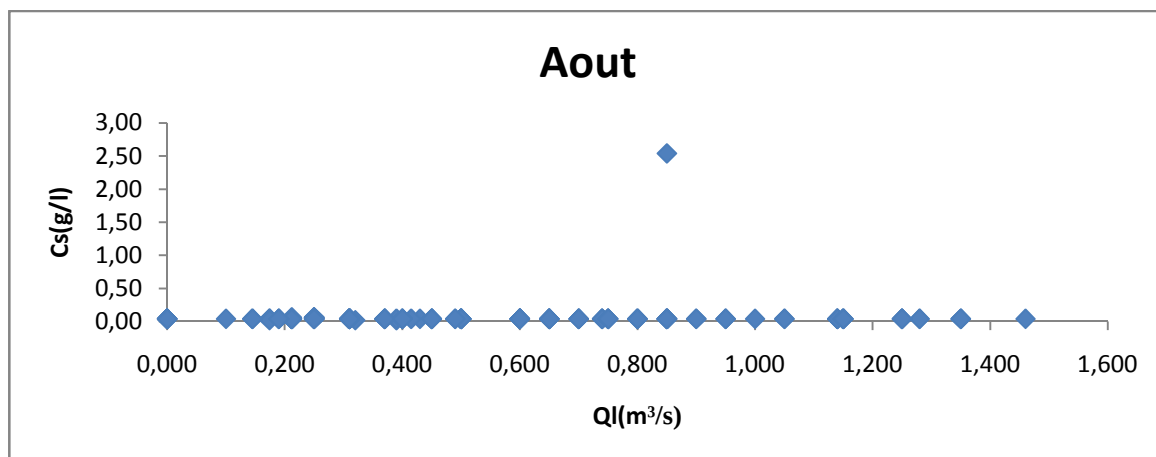
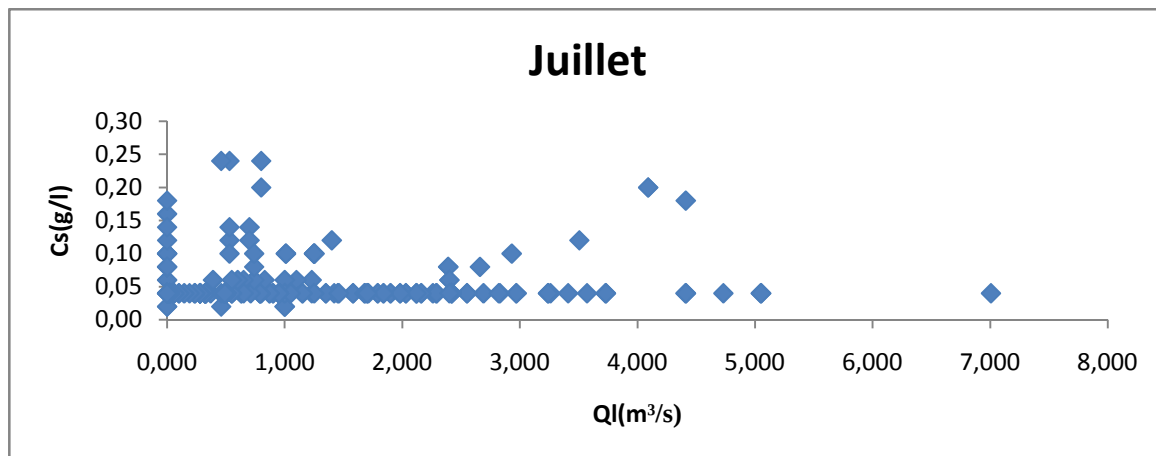
Figure IV.11 : Répartition mensuelle des concentration- débits liquides de la station de BAGHLIA.



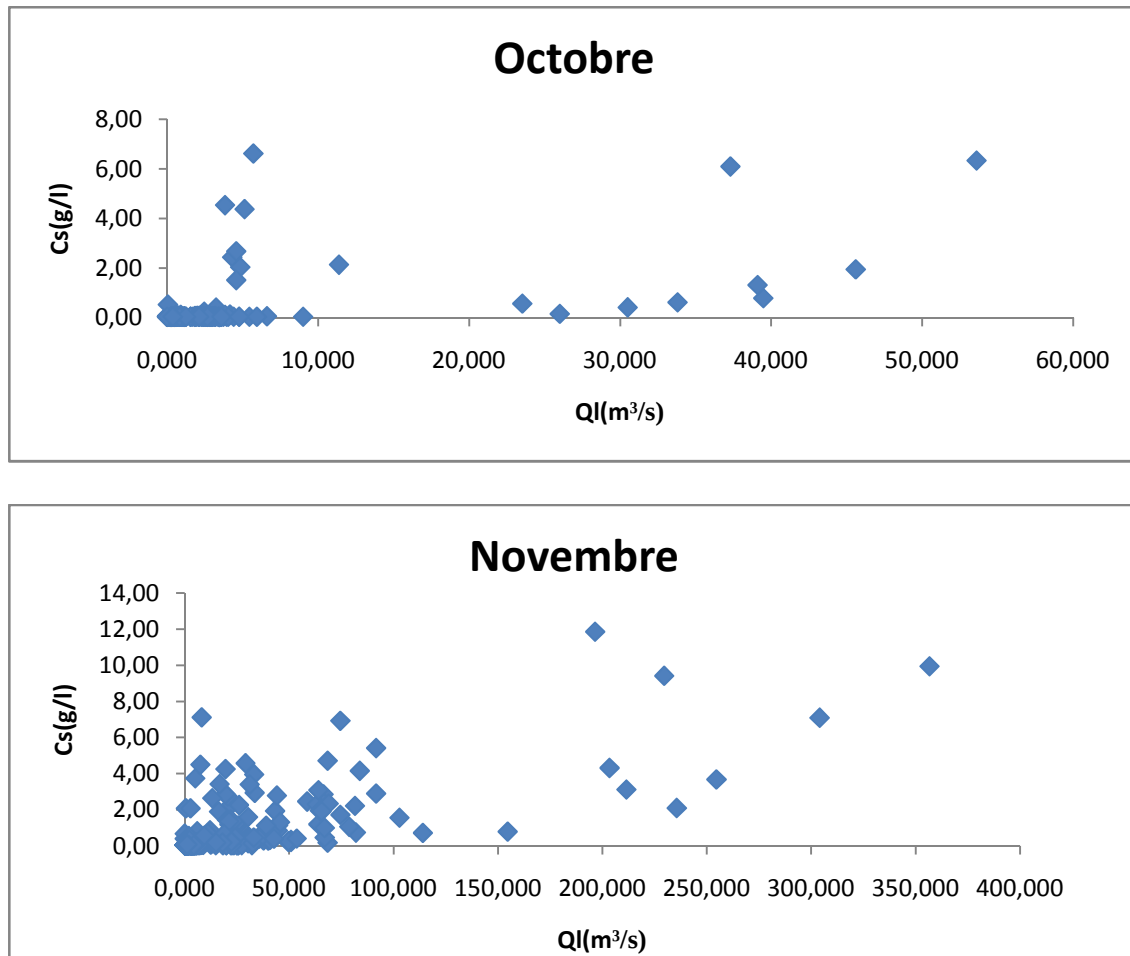
Suite Figure IV.11 : Répartition mensuelle des concentration- débits liquides de la station de BAGHLIA.



Suite Figure IV.11 : Répartition mensuelle des concentration- débits liquides de la station de BAGHLIA.



Suite Figure IV.11 : Répartition mensuelle des concentration- débits liquides de la station de BAGHLIA.



Suite Figure IV.11 : Répartition mensuelle des concentration- débits liquides de la station de BAGHLIA.

Remarque

On a vu clairement que les courbes de targes débits-hauteurs présentes plusieurs branches chose qui rend difficile l'estimation des débits par la hauteur. Pour cette raison qu'il est nécessaire d'utiliser la section mouillée à la place de la hauteur.

IV.8 Répartition mensuelle des débits liquides-surface mouillée de la station de BAGHLIA

Les débits liquides en fonction de la surface mouillée de la station de Baghlia sont représentées sur la figure IV.12

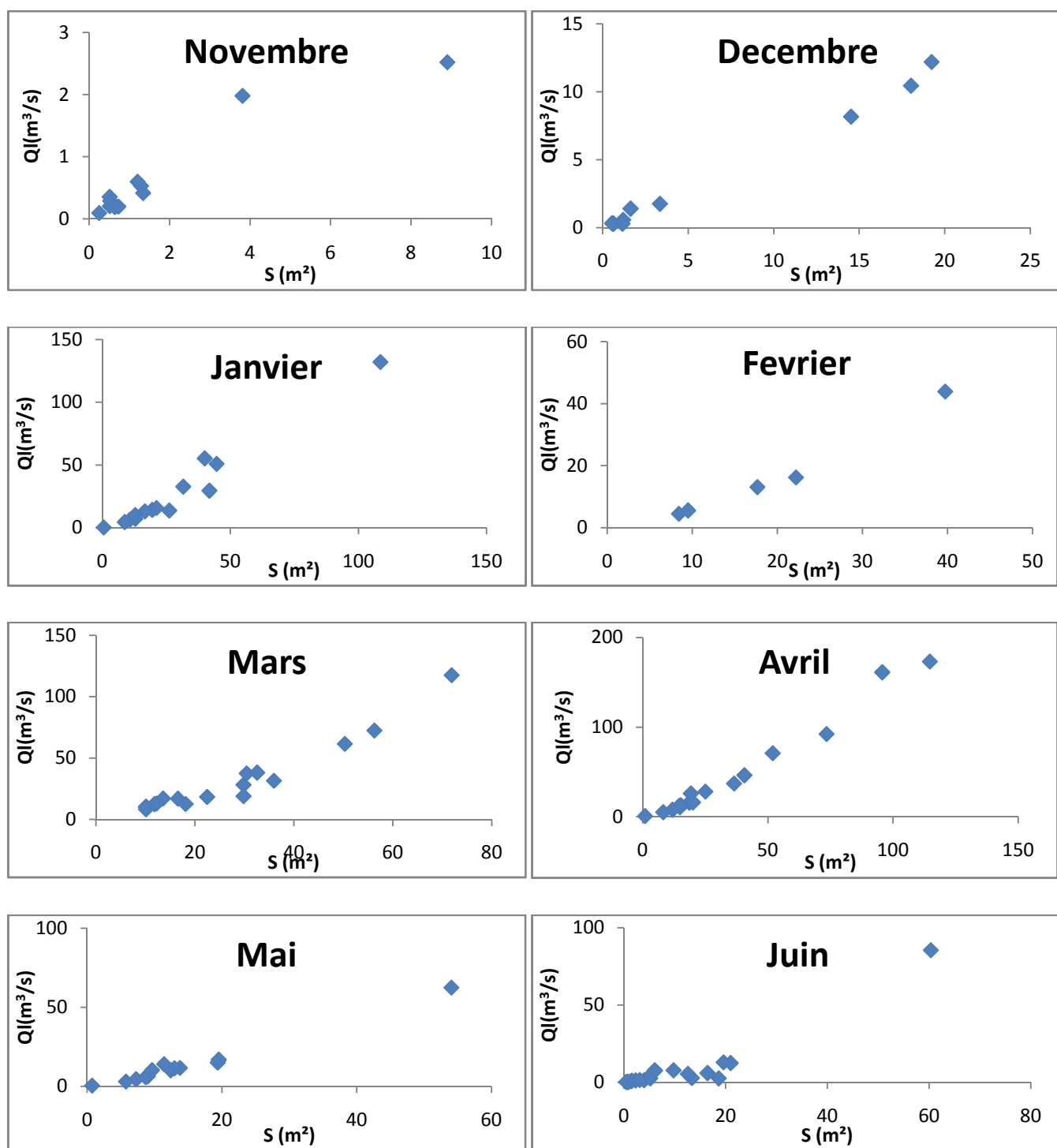
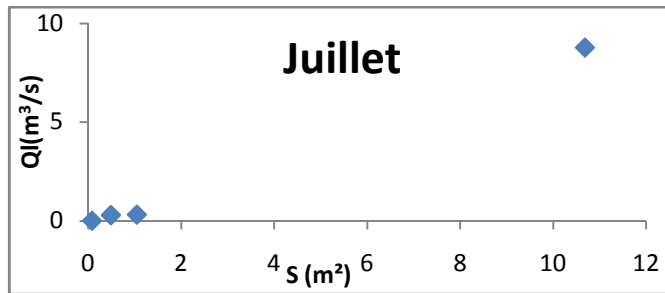


Figure IV.12: Répartition mensuelle des débits liquides-surface mouillée à la station de BAGHLIA



Suite Figure IV.12: Répartition mensuelle des débits liquides-surface mouillée à la station de BAGHLIA.

IV.9 Répartition des débits liquides-surface mouillée pour toute la période d'observation à la station de BAGHLIA

La répartition des débits liquides-surface mouillée pour toute la période d'observation à la station de BAGHLIA est représentée sur la figure IV.13

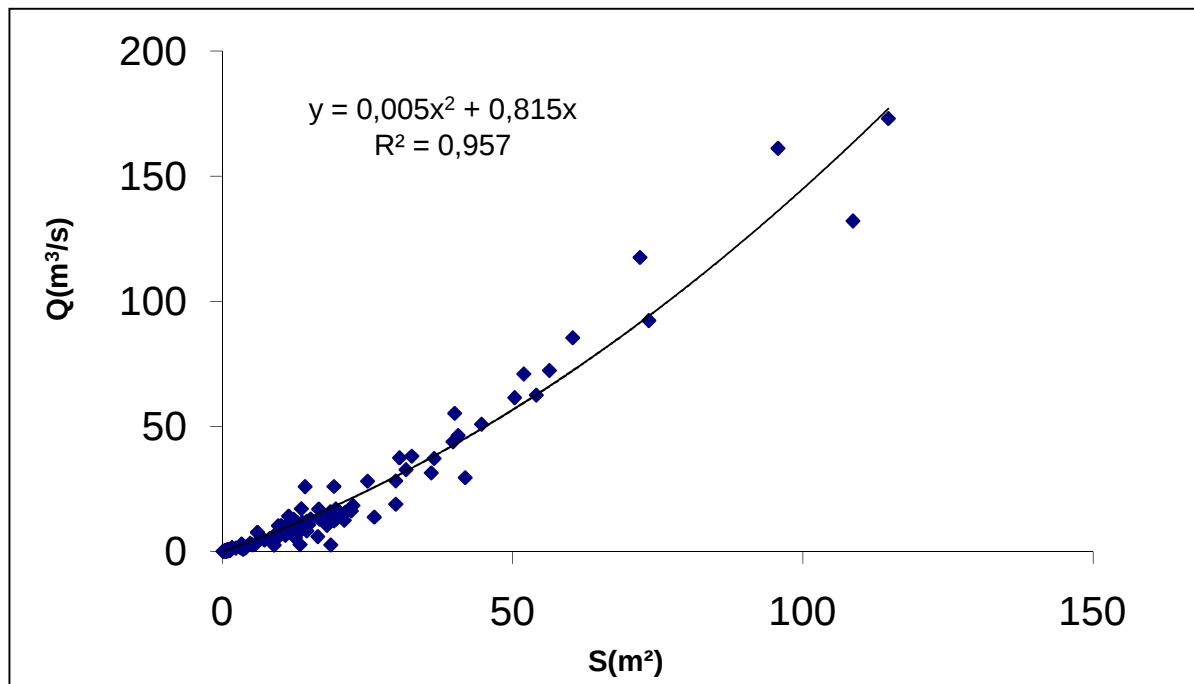
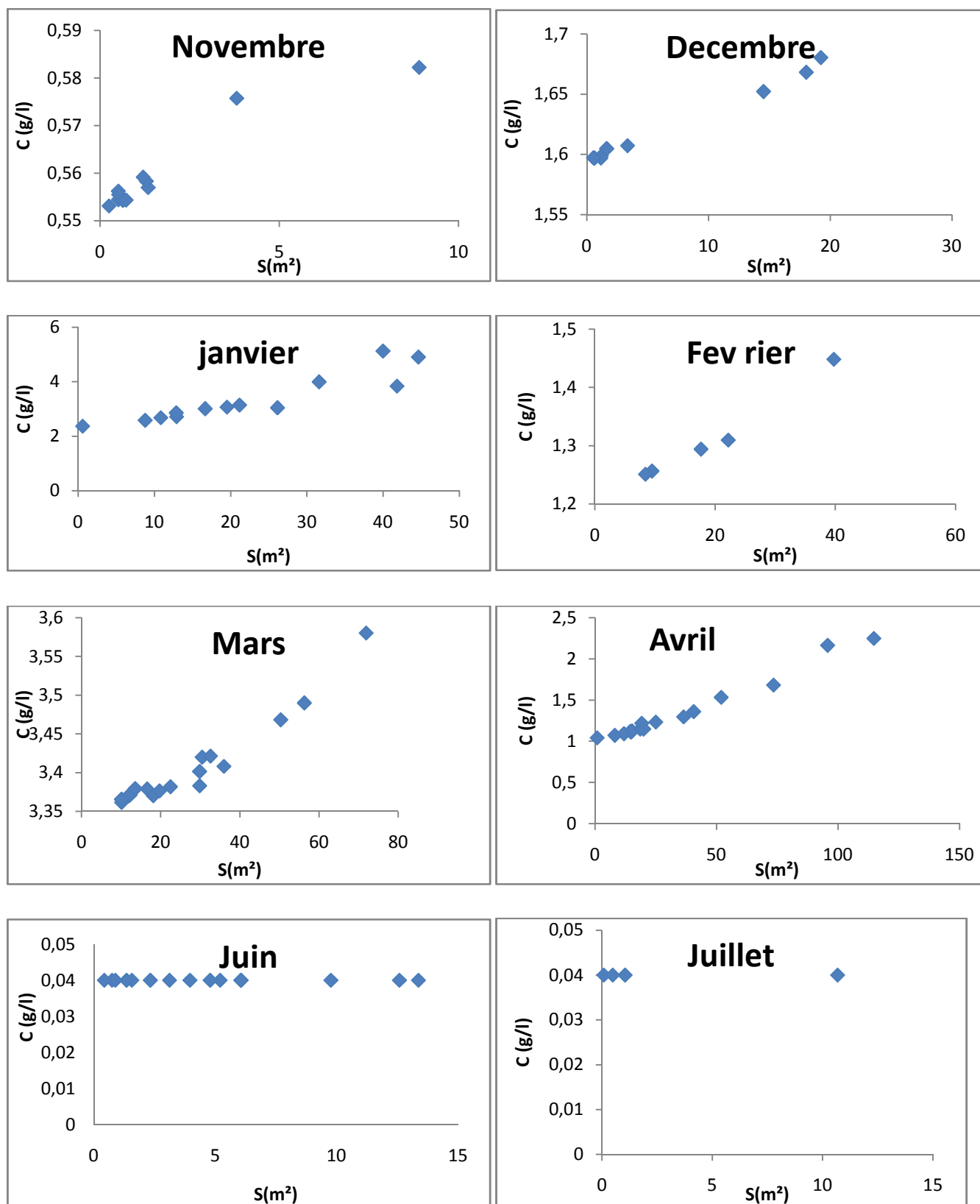


Figure IV.13 : Répartition des débits liquides-surface mouillée pour toute la période d'observation à la station de BAGHLIA.

IV.10 Variation mensuelle de la concentration en sédiments-surface mouillée à la station de BAGHLIA

La variation mensuelle de la concentration en sédiments en fonction de la surface mouillée de la station de Baghlia est représentée sur la figure IV.14.



IV.11 Répartition mensuelle des débits liquides-hauteur d'eau de la station de BALLOUA

La répartition mensuelle des débits liquides-hauteur d'eau de la station de BALLOUA est représentée sur la figure IV.15.

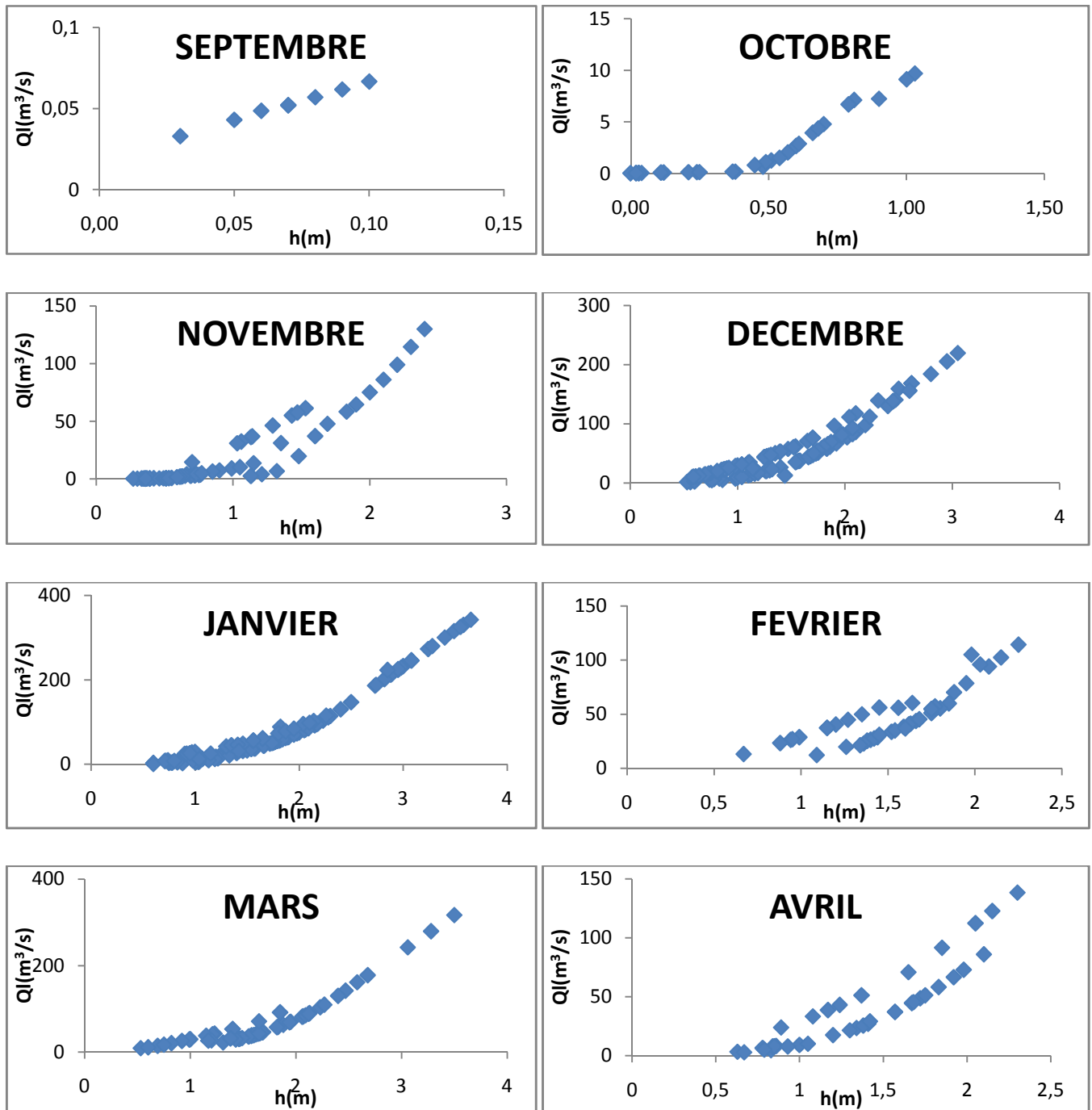
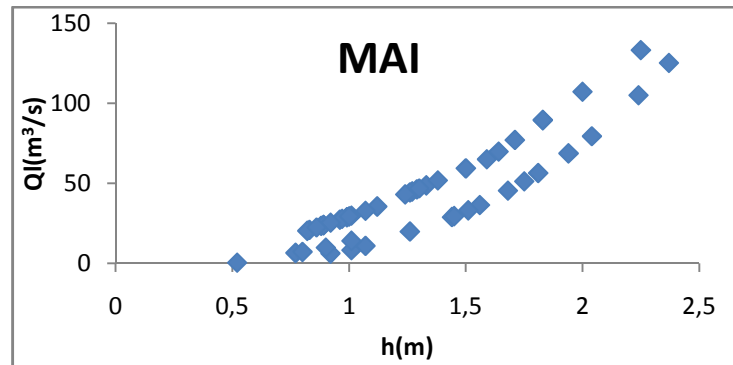


Figure IV.15: Répartition mensuelle des débits liquides-hauteur d'eau à la station de BALLOUA.



Suite Figure IV.15: Répartition mensuelle des débits liquides-hauteur d'eau à la station de BALLOUA.

IV.12 Répartition des débits liquides-hauteurs pour toute la période d'observation de la station de BALLOUA

La figure IV.16 représente la répartition des débits liquides-hauteurs pour toute la période d'observation de la station de BALLOUA.

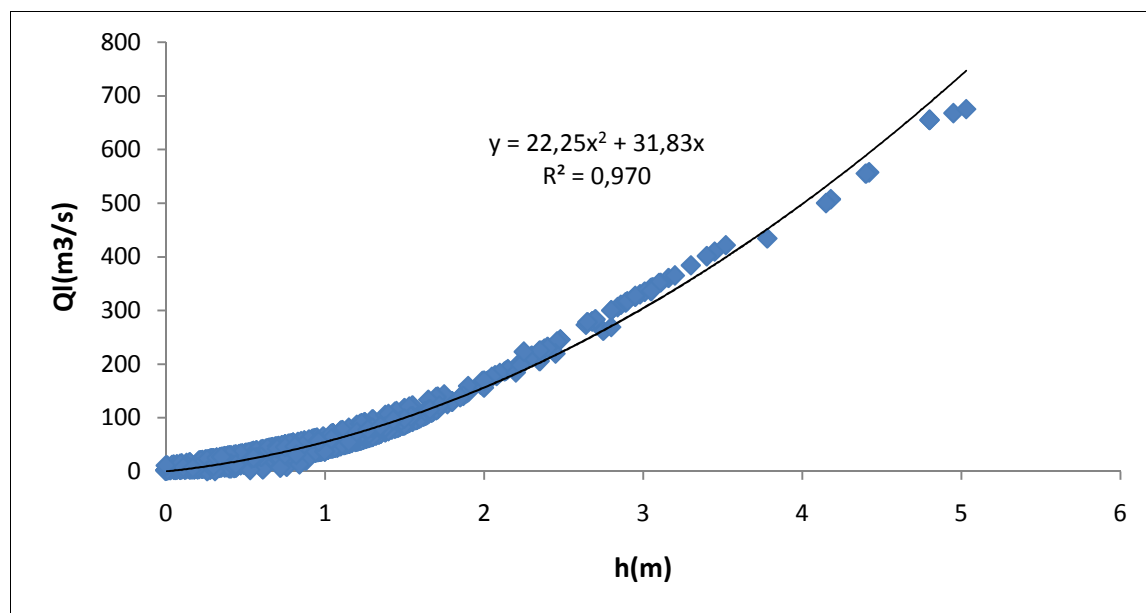


Figure IV.16 : Répartition des débits liquides-hauteurs pour toute la période d'observation de la station de BALLOUA.

IV.13 Répartition mensuelle des concentration- débits liquides de la station de BALLOUA

La figure IV.17 représente la répartition mensuelle des concentration- débits liquides de la station de BALLOUA.

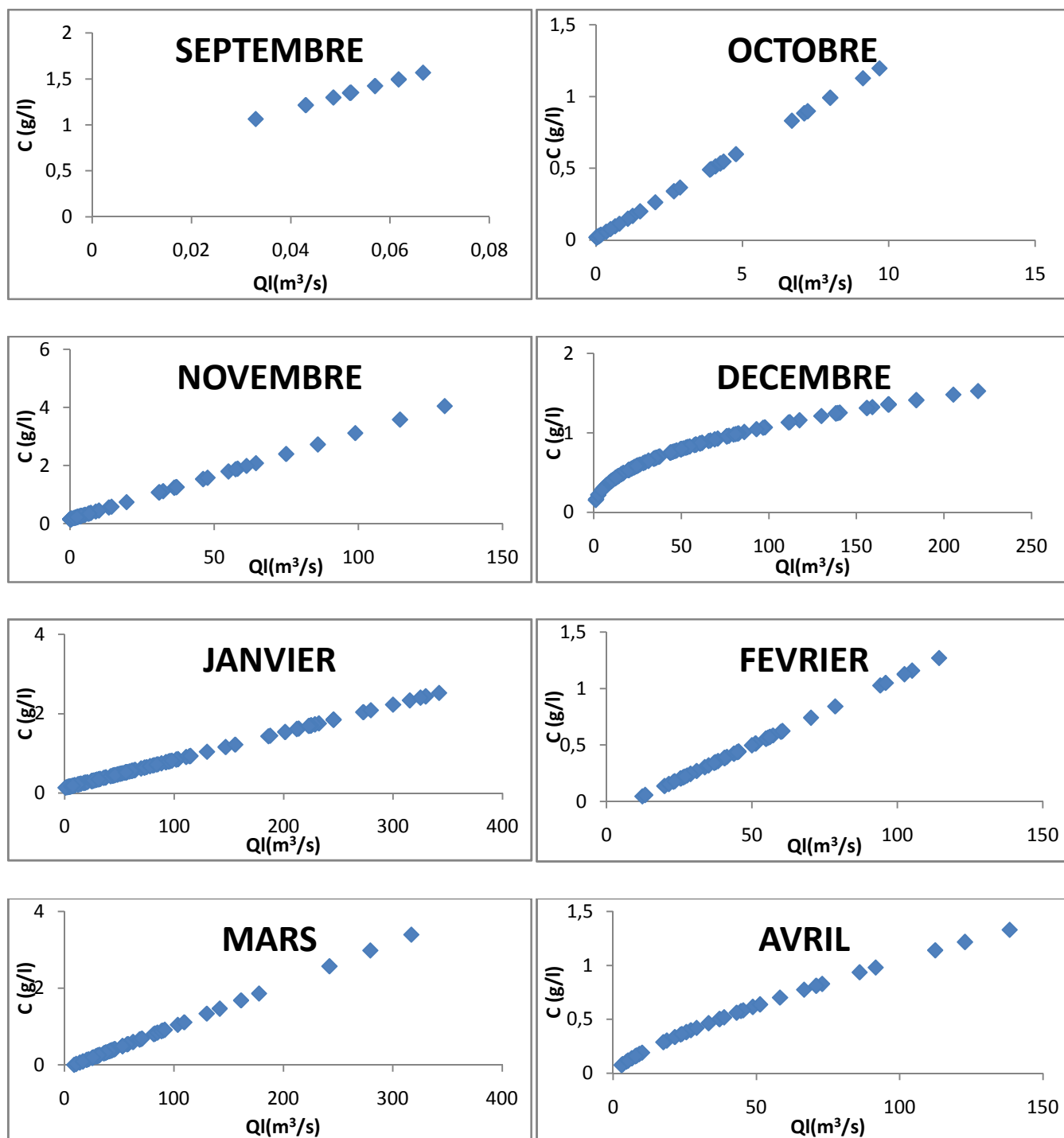
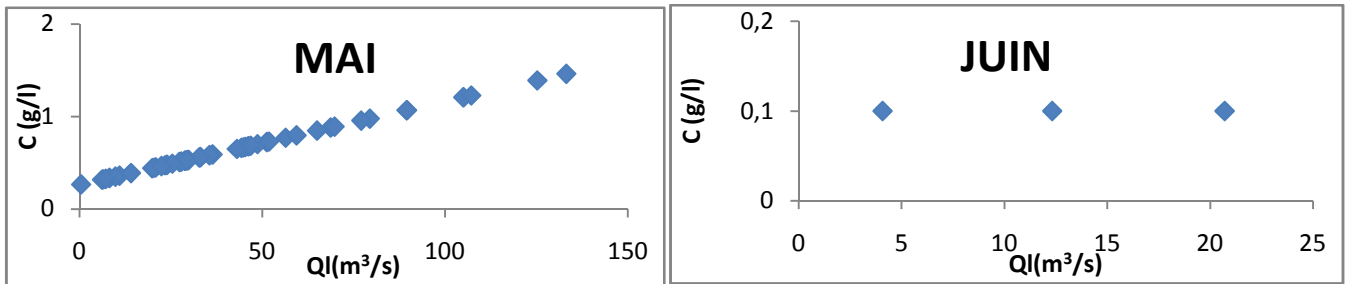


Figure IV.17: Répartition mensuelle des concentration- débits liquides à la station de BALLOUA.



Suit Figure IV.17: Répartition mensuelle à la station de BALLOUA des concentration- débits liquides.

Remarque

On a vu clairement que les courbes de targes débits-hauteurs présentes plusieurs branches chose qui rend difficile l'estimation des débits par la hauteur. Pour cette raison qu'il est nécessaire d'utiliser la section mouillée à la place de la hauteur.

IV.14 Répartition mensuelle des débits liquides-surface mouillée de la station de BALLOUA

La variation mensuelle des débits liquides-surface mouillée de la station de BALLOUA est représentée sur la figure IV.18.

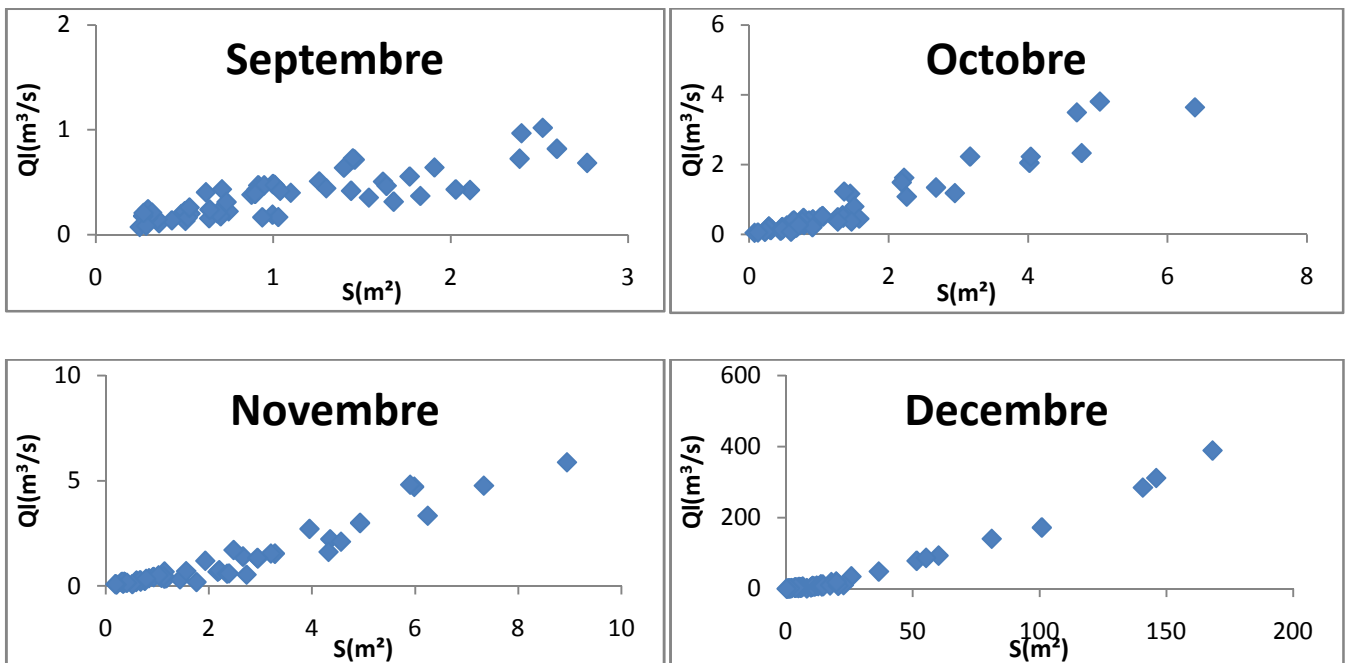
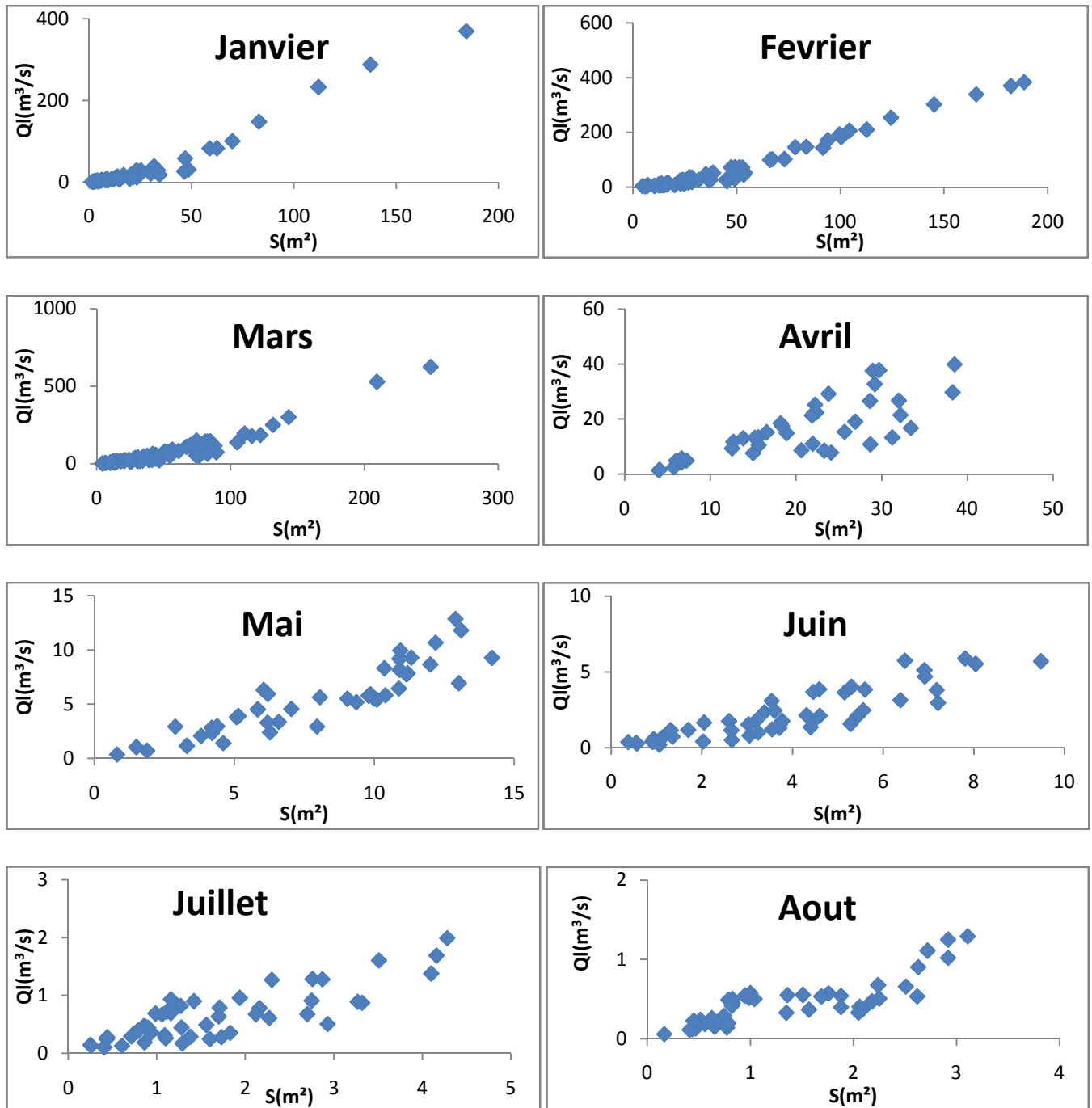


Figure IV.18: Répartition mensuelle des débits liquides-surface mouillée à la station de BALLOUA.



Suite Figure IV.18: Répartition mensuelle des débits liquides-surface mouillée à la station de BALLOUA.

IV.15 Répartition des débits liquides-surface mouillée pour toute la période d'observation à la station de BALLOUA

Répartition des débits liquides-surface mouillée de la station de BALLOUA est illustrée sur la figure IV.19

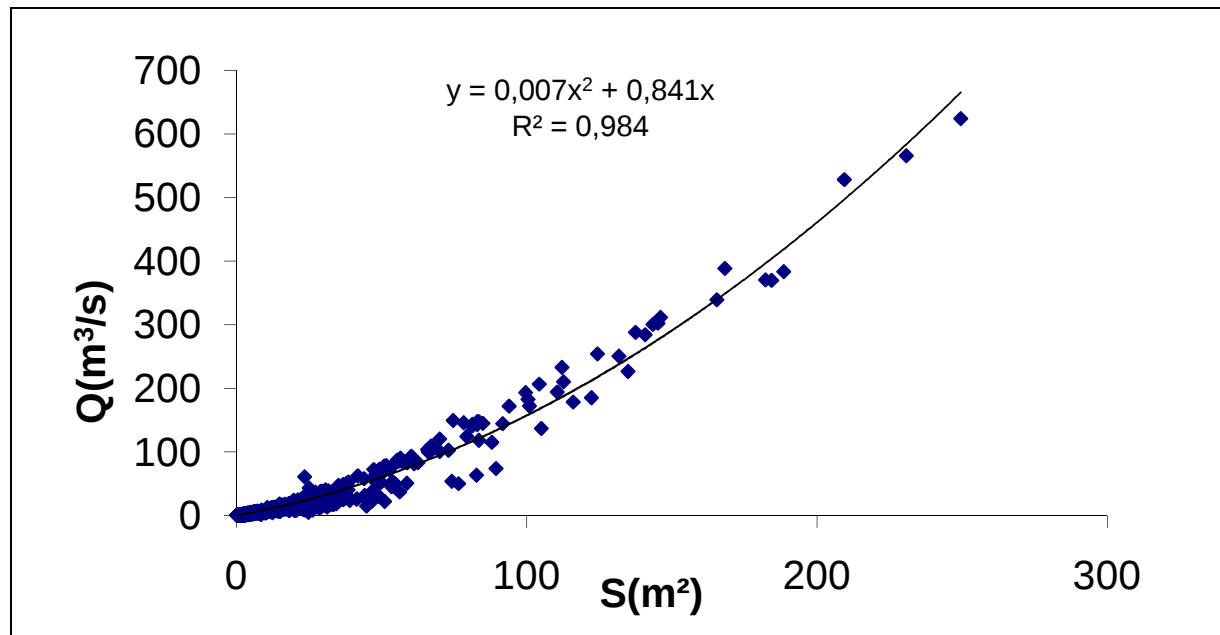


Figure IV.19 : Répartition des débits liquides-surface mouillée pour toute la période d'observation à la station de BALLOUA.

IV.16 Variation mensuelle de la concentration-surface mouillée à la station de BALLOUA

La variation mensuelle de la concentration en sédiments en fonction de la surface mouillée est représentée sur la figure IV.20.

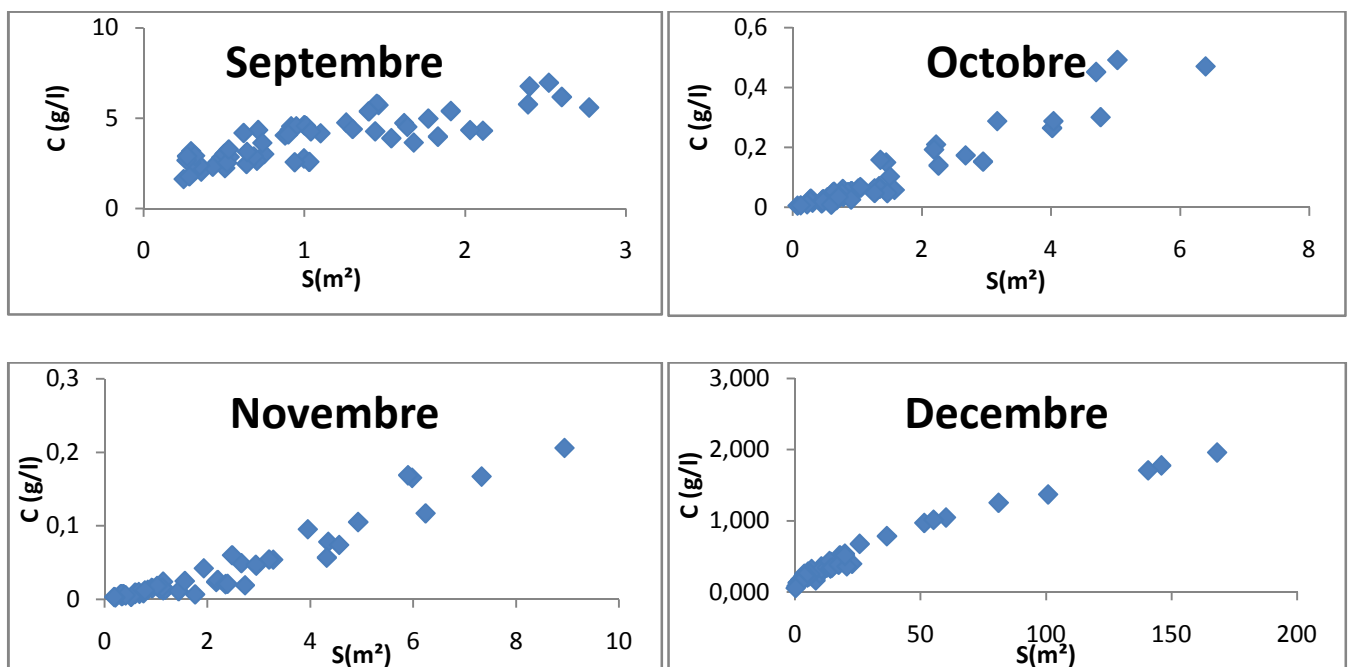
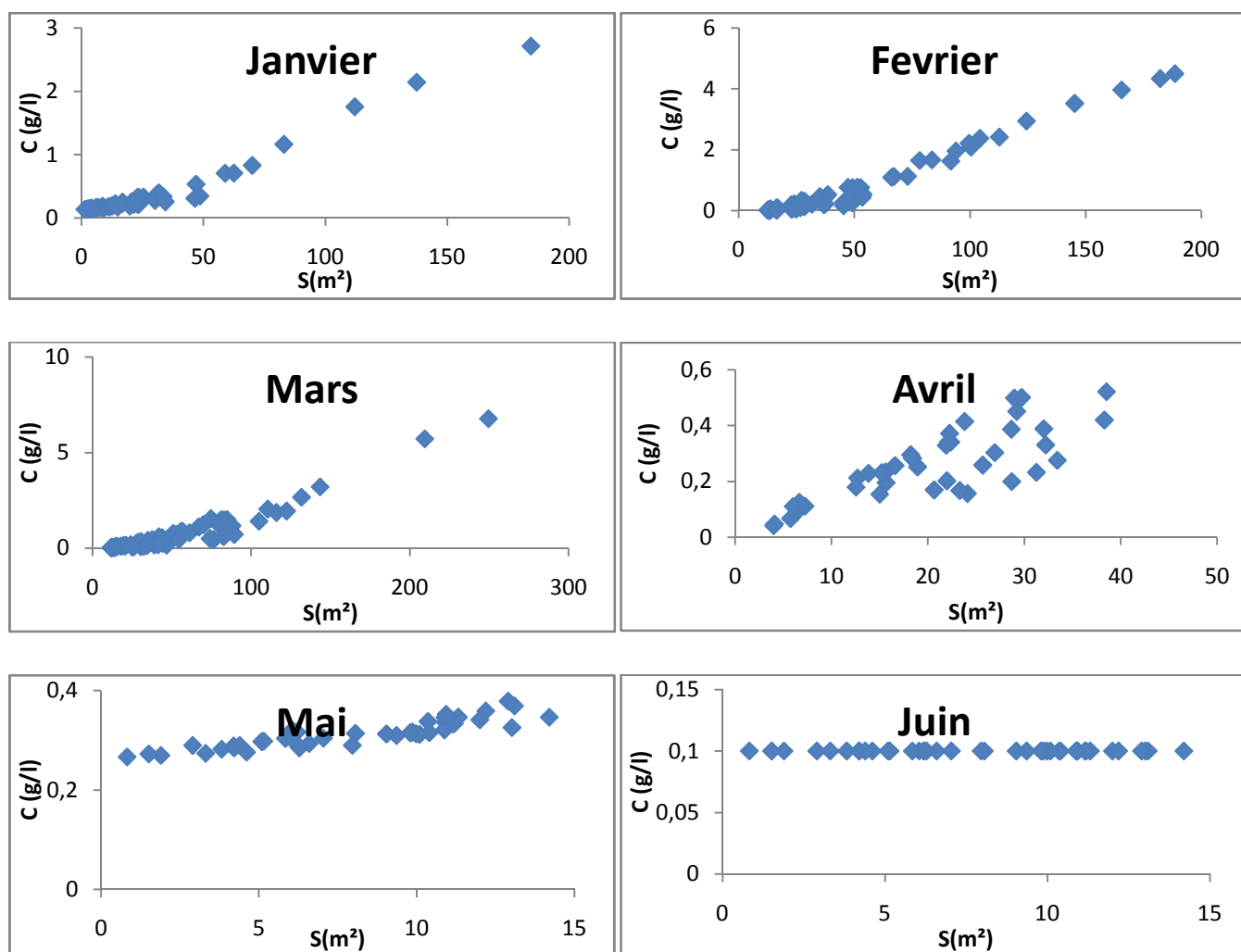


Figure IV.20: Variation mensuelle de la concentration-surface mouillée à la station de BALLOUA.



Suite Figure IV.20: Variation mensuelle de la concentration-surface mouillée
à la station de BALLOUA.

IV.17 Coefficient de détermination

Le coefficient de détermination et le modèle retenu des deux stations sont représentés dans le tableau IV. jusqu'au tableau IV.15.

Tableau IV.09: Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuelle
à la station de BAGHLIA $Ql=f(h)$.

Mois	R ²					Equation du modèle retenu
	Exp	Lin	Log	Poly	Pui	
Décembre	-	0,78	-	0,86	-	$H=-0,000Ql^2+0,519Ql+18,57$
Janvier	-	0,77	-	0,87	-	$H=0,000Ql^2+0,624Ql+13,34$
Février	-	0,81	-	0,9	-	$H=-0,000Ql^2+0,574Ql+19,02$
Mars	-	0,8	-	0,93	-	$H=-0,000Ql^2+0,492Ql+26,89$
Avril	-	0,79	-	0,85	-	$H=-0,000Ql^2+0,816Ql+1,268$
Mai	-	0,6	-	0,67	-	$H=-0,000Ql^2+1,216Ql+12,46$
Juin	-	0,3	-	0,49	-	$H=-0,225Ql^2+8,413Ql-45,10$
Juillet	-	0,03	-	0,04	-	$H=-0,813Ql^2+7,727Ql-34,88$

Aout	-	0,001	-	0,227	-	$H=-92,54Ql^2+123,7Ql-63,09$
Septembre	-	0,68	-	0,73	-	$H=-0,001Ql^2+1,248Ql-30,17$
Octobre	-	0,28	-	0,45	-	$H=-0,155Ql^2+8,718Ql-42,44$
Novembre	-	0,58	-	0,68	-	$H=-0,002Ql^2+1,378Ql-20,23$

Tableau IV.10: Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuelle à la station de BAGHLIA $Ql=f(s)$.

Mois	Type de modèle	R ²	Ql=f(s)
Octobre	exponentielle	*	$Ql=0.33 S^{1.32}$
	linéaire	0.97	
	logarithmique	0.97	
	polynomiale	0.96	
	puissance	0.98	
Novembre	exponentielle	*	$Ql=-0.04 S^2+0.55 S$
	linéaire	0.98	
	logarithmique	0.87	
	polynomiale	0.96	
	puissance	0.91	
Decembre	exponentielle	*	$Ql=0.01 S^2+0.5 S$
	linéaire	0.99	
	logarithmique	0.9	
	polynomiale	0.99	
	puissance	0.95	
Janvier	exponentielle	0.19	$Ql=0.32 S^{1.29}$
	linéaire	0.92	
	logarithmique	0.46	
	polynomiale	0.96	
	puissance	0.98	
Fevrier	exponentielle	*	$Ql=0.02 S^2+0.37 S$
	linéaire	0.9	
	logarithmique	0.86	
	polynomiale	0.98	
	puissance	0.97	
Mars	exponentielle	*	$Ql=0.02 S^2+0.57 S$
	linéaire	0.88	
	logarithmique	0.74	
	polynomiale	0.97	
	puissance	0.92	
Avril	exponentielle	*	$Ql=0.004 S^2+0.92 S$
	linéaire	0.96	
	logarithmique	0.59	
	polynomiale	0.99	
	puissance	0.97	
Mai	exponentielle	*	$Ql=0.01 S^2+0.74 S$
	linéaire	0.95	
	logarithmique	0.51	
	polynomiale	0.99	
	puissance	0.96	
Juin	exponentielle	*	$Ql=0.02 S^2+0.15 S$
	linéaire	0.81	
	logarithmique	0.33	

	polynomiale	0.97	
	puissance	0.85	
Mois	Type de modèle	R ²	Ql=f(s)
Juillet	exponentielle		Ql=0.05 S ² +0.31 S
	linéaire	0.97	
	logarithmique	0.75	
	polynomiale	0.98	
	puissance	0.97	

Tableau IV.11: Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuelle à la station de BAGHLIA C=f(Ql).

Mois	R ²					Equation du modèle retenu
	exp	lin	Log	poly	pui	
Décembre	0,29	0,43	0,38	0,49	0,61	Cs=0,018Ql ^{0,874}
Janvier	0,26	0,34	-	0,52	-	Cs=-6E-06Ql ² +0,010Ql+0,101
Février	0,35	0,44	-	0,47	-	Cs=-4E-06Ql ² +0,011Ql+0,047
Mars	0,3	0,58	-	0,65	-	Cs=-2E-06Ql ² +0,010Ql-0,023
Avril	0,46	0,59	0,42	0,6	0,68	Cs=0,002Ql ^{1,342}
Mai	-	0,742	-	0,743	-	Cs=-6E-06Ql ² +0,020Ql-0,229
Juin	9,00E-05	0	-	0,065	-	Cs=0,000Ql ² +0,003Ql+0,043
Juillet	0	0	-	0,008	-	Cs=0,001Ql ² -0,007Ql+0,064
Aout	0,003	0,003	-	0,007	-	Cs=-0,081Ql ² +0,141Ql+0,013
Septembre	0,52	0,73	-	0,82	-	Cs=0,000Ql ² +0,002Ql+0,041
Octobre	0,42	0,28	-	0,29	-	Cs=0,046e ^{0,093Ql}
Novembre	0,38	0,498	-	0,499	-	Cs=-6E-06Ql ² +0,025Ql+0,171

Tableau IV.12: Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuelle à la station de BAGHLIA C=f(S).

Mois	Type de modèle	R ²	C=f(S)
Novembre	exponentielle	0.9	C=0.01 S+0.55
	linéaire	0.9	
	logarithmique	0.87	
	polynomiale	0.97	
	puissance	0.87	
Decembre	exponentielle	0.99	C=7 10 ⁻⁵ S ² +0.002 S+1.6
	linéaire	0.99	
	logarithmique	0.9	

	polynomiale	0.99	
	puissance	0.9	
Janvier	exponentielle	0.89	$C=0.02 S+2.36$
	linéaire	0.84	
	logarithmique	0.47	
	polynomiale	0.87	
	puissance	0.55	
Fevrier	exponentielle	0.98	$C=0.001 S+1.23$
	linéaire	0.98	
	logarithmique	0.86	
	polynomiale	0.99	
	puissance	0.87	
Mars	exponentielle	0.92	$C=4 \cdot 10^{-5} S^2+4 \cdot 10^{-5} S+3.36$
	linéaire	0.92	
	logarithmique	0.73	
	polynomiale	0.98	
	puissance	0.74	
Avril	exponentielle	0.99	$C=3 \cdot 10^{-5} S^2+0.01 S+1$
	linéaire	0.98	
	logarithmique	0.59	
	polynomiale	0.99	
	puissance	0.65	

Tableau IV.13: Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuelle à la station de BALLOUA $Ql=f(h)$.

Mois	Type de modèle	R ²	Ql=f(h)
Septembre	exponentielle	*	$Ql=0.25 h^{0.58}$
	linéaire	0.69	
	logarithmique	0.97	
	polynomiale	0.95	
	puissance	0.98	
Octobre	exponentielle	*	$Ql=13.14 h^2-3.19 h$
	linéaire	0.74	
	logarithmique	*	
	polynomiale	0.97	
	puissance	*	
Novembre	exponentielle	*	$Ql=8.53 h^{3.58}$
	linéaire	0.63	
	logarithmique	0.65	
	polynomiale	0.92	
	puissance	0.93	
Decembre	exponentielle	*	$Ql=33.59 h^2-9.49 h$
	linéaire	0.68	
	logarithmique	0.72	

	polynomiale	0.95	
	puissance	0.83	
Janvier	exponentielle	*	Ql=36.25 h ² -23.49 h
	linéaire	0.68	
	logarithmique	0.75	
	polynomiale	0.99	
	puissance	0.93	
Fevrier	exponentielle	*	Ql=59.89 h ² -8.66 h
	linéaire	0.55	
	logarithmique	0.59	
	polynomiale	0.79	
	puissance	0.67	
Mars	exponentielle	*	Ql=42.41 h ² -20.24 h
	linéaire	0.58	
	logarithmique	0.6	
	polynomiale	0.97	
	puissance	0.88	
Avril	exponentielle	*	Ql=12.43 h ^{2.82}
	linéaire	0.59	
	logarithmique	0.74	
	polynomiale	0.89	
	puissance	0.9	
Mois	Type de modèle	R ²	Ql=f(h)
Mai	exponentielle	*	Ql=24.58 h ² +0.81 h
	linéaire	0.66	
	logarithmique	0.77	
	polynomiale	0.86	
	puissance	0.72	

Tableau IV.14: Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuelle à la station de BALLOUA Ql=f(s).

Mois	Type de modèle	R ²	Ql=f(s)
Septembre	exponentielle	*	Ql=0.35 S ^{0.75}
	linéaire	0.66	
	logarithmique	0.65	
	polynomiale	0.69	
	puissance	0.7	
Octobre	exponentielle	*	Ql=0.02 S ² +0.47 S
	linéaire	0.91	
	logarithmique	0.67	
	polynomiale	0.92	
	puissance	0.88	

Novembre	exponentielle	*	$Ql=0.04 S^2+0.35 S$
	linéaire	0.89	
	logarithmique	0.63	
	polynomiale	0.93	
	puissance	0.89	
Decembre	exponentielle	*	$Ql=0.01 S^2+0.9 S$
	linéaire	0.95	
	logarithmique	0.5	
	polynomiale	0,98	
	puissance	0.95	
Janvier	exponentielle	*	$Ql=0.01 S^2+0.89 S$
	linéaire	0.9	
	logarithmique	0.48	
	polynomiale	0.97	
	puissance	0.94	
Fevrier	exponentielle	*	$Ql=0.004 S^2+0.98 S$
	linéaire	0.92	
	logarithmique	0.68	
	polynomiale	0.97	
	puissance	0.94	
Mars	exponentielle	*	$Ql=0.01 S^2+0.8 S$
	linéaire	0.84	
	logarithmique	0.53	
	polynomiale	0.96	
	puissance	0.92	
Avril	exponentielle	*	$Ql=0.4 S^{1.2}$
	linéaire	0.60	
	logarithmique	0.56	
	polynomiale	0.6	
	puissance	0.78	
Mai	exponentielle	*	$Ql=0.47 S^{1.16}$
	linéaire	0.79	
	logarithmique	0.67	
	polynomiale	0.81	
	puissance	0.87	
Juin	exponentielle	*	$Ql=0.5 S^{1.02}$
	linéaire	0.78	
	logarithmique	0.62	
	polynomiale	0.8	
	puissance	0.8	
Juillet	exponentielle	*	$Ql=0.04 S^2+0.38 S$
	linéaire	0.68	
	logarithmique	0.58	
	polynomiale	0.68	

	puissance	0.64	
Aout	exponentielle	*	$QI=0.33 S^{0.86}$
	linéaire	0.67	
	logarithmique	0.57	
	polynomiale	0.67	
	puissance	0.74	

Tableau IV.15: Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuelle à la station de BALLOUA $C=f(QI)$.

Mois	Type de modèle	R ²	C=f(QI)
Septembre	exponentielle	0,98	$C=6.89 QI^{0.55}$
	linéaire	*	
	logarithmique	0.97	
	polynomiale	0.96	
	puissance	0,99	
Octobre	exponentielle	0.82	$C=0.13 QI$
	linéaire	1	
	logarithmique	0.71	
	polynomiale	1	
	puissance	0.97	
Novembre	exponentielle	*	$C=0.04 QI$
	linéaire	0.98	
	logarithmique	0.63	
	polynomiale	0.98	
	puissance	0.88	
Decembre	exponentielle	*	$C=0.14 QI^{0.44}$
	linéaire	0.13	
	logarithmique	0.92	
	polynomiale	0.98	
	puissance	0,99	
Janvier	exponentielle	*	$C=0.01 QI+0.13$
	linéaire	0.98	
	logarithmique	0.68	
	polynomiale	0,99	
	puissance	0.93	
Fevrier	exponentielle	0.81	$C=0.01 QI-0.1$
	linéaire	0,98	
	logarithmique	0.9	
	polynomiale	0,99	
	puissance	0.98	
Mars	exponentielle	0.6	$C=0.01 QI-0.1$
	linéaire	0,97	
	logarithmique	0.8	
	polynomiale	0,98	
	puissance	0.92	
Avril	exponentielle	0.79	$C=0.04 QI^{0.73}$
	linéaire	0.94	
	logarithmique	0.87	

Mai	polynomiale	0,97	C=0.01 Ql+ 0.26
	puissance	0,98	
	exponentielle	0.95	
	linéaire	0,96	
	logarithmique	0.67	
	polynomiale	0,98	
	puissance	0.83	

Tableau IV.16: Coefficient de détermination et le modèle retenus pour l'échelle mensuelle à la station de BALLOUA $C=f(S)$.

Mois	Type de modèle	R ²	C=f(S)
Septembre	exponentielle	*	$C=-0.2S^2+2.35S+1.79$
	linéaire	0.69	
	logarithmique	0.69	
	polynomiale	0.71	
	puissance	0.7	
Octobre	exponentielle	*	$C=0.002 S^2+0.01 S$
	linéaire	0.91	
	logarithmique	0.67	
	polynomiale	0.92	
	puissance	0.88	
Novembre	exponentielle	*	$C=0.001 S^2+ 0.01 S$
	linéaire	0.89	
	logarithmique	0.63	
	polynomiale	0.93	
	puissance	0.89	
Decembre	exponentielle	*	$C=-4 \cdot 10^{-5} S^2+0.02 S+ 0.14$
	linéaire	0.83	
	logarithmique	0.74	
	polynomiale	0.99	
	puissance	0.95	
Janvier	exponentielle	*	$C=4 \cdot 10^{-5} S^2+0.01 S$
	linéaire	0.95	
	logarithmique	0.48	
	polynomiale	0.97	
	puissance	0.76	
Fevrier	exponentielle	*	$C=4 \cdot 10^{-5} S^2+ 0.01 S$
	linéaire	0.88	
	logarithmique	0.77	
	polynomiale	0.96	
	puissance	0.85	
Mars	exponentielle	*	$C=8 \cdot 10^{-5} S^2+0.01 S$
	linéaire	0.8	
	logarithmique	0.58	
	polynomiale	0.96	
	puissance	0.89	
Avril	exponentielle	*	$C=0.02 S^{0.88}$
	linéaire	0.62	
	logarithmique	0.63	

	polynomiale	0.64	
	puissance	0.78	
Mai	exponentielle	0.82	$C=0.26 e^{0.02 S}$
	linéaire	0.8	
	logarithmique	0.67	
	polynomiale	0.81	
	puissance	0.7	

IV.18 Discussion des résultats

Nous devons signaler avant d'entamer l'interprétation de ces résultats, le manque de données au niveau des deux stations et surtout celle de BALLOUA.

Nous remarquons que le modèle polynomiale ou parabolique est le mieux adapté pour relié les facteurs entre eux (débit solide, débit liquide, concentration et la surface mouillée), avec ces variations on remarque que le modèle polynomiale signifié une variation rapide avec un coefficient de corrélation très significatif.

On trouve ce type de modèle dans les mois qui est caractérisé par une saison pluvieuse humide s'étalant du mois d'octobre en avril.

Pour les graphes de débit solide-débit liquide la variation dans les mois de juin, juillet, aout et septembre est moins significative (saison sèche) dans les deux stations (BAGHLIA et BALLOUA). Par contre dans les autre mois, octobre, novembre, décembre, janvier, février, mars et avril (saison humide), où on remarque une augmentation et surtout dans le mois de mars, et cette variation est enregistré dans les deux stations BAGHLIA et BALLOUA. Il est a signalé que lorsque le débit liquide augmente le débit solide augmente.

Pour la concentration en sédiment et le débit liquide on a observé les mêmes variation par rapport au variation des débits solide-débits liquide. À l'exception du mois juillet, aout, septembre pour la station de BAGHLIA et mois juin pour la station de BALLOUA Où la concentration est constante à cause des faibles, débit c'est une période défini par la saison sèche.

Et pour les graphes de débit liquide –surface mouillée en remarque que le débit augmente si la surface mouillée augmente, on a le débit égale : $Q=U S$, mais la variation du débit en fonction de la surface est relative bien sur à la saison (sèche ou humide).

Mais le but de tracer la le graphe débit liquide-surface mouillée et pour atteindre à tracer un graphe concentration-surface mouillée. Dans se dernier en remarque que la forme du graphe est parabolique, la fonction est polynomiale, a l'exception du mois avril l'équation est de forme puissance, mois de mai de forme exponentielle et constante dans le mois du juin pour la station de BALLOUA. Cette variation d'équation entre ces mois dépend de la variation de la concentration dans chaque mois (pour chaque saison). On peut dire que la concentration dépend essentiellement de la saison, mais dans le cas générale en voix que si la surface mouillée augmente la concentration augmente.

En ce qui concerne l'évaluation du débit solide à partir des débits liquides journaliers, le coefficient de corrélation pour le modèle annuel est largement significatif, il est de par contre à l'échelle saisonnière, le coefficient de corrélation est beaucoup plus important pour les saisons automne, hiver et humide. Cela peut s'expliquer par la régularité des apports durant ces saisons. Inversement, le coefficient de corrélation est beaucoup plus faible durant les saisons printemps, été et sèche.

Du fait de la complexité du phénomène du transport solide et, malgré l'existence de nombreux modèles dans le monde en général et en Algérie en particulier, il n'existe aucun modèle théorique ou procédure de calcul standard. Il faut signaler que les modèles puissance établis durant le période d'observation ont aussi des coefficients de corrélation significatifs. Ce modèle est proche des modèles représentés par plusieurs auteurs tel que. [21, 22, 23, 12]

Conclusion générale

Le transport solide est très répandu en zone méditerranéenne et en particulier en Algérie. Ils existent deux formes de transport sédimentaire, transport solide par suspension où notre étude est accentuée et le transport solide par charriage. Les conditions physiques, géomorphologiques et hydroclimatiques sont particulièrement favorables au déclenchement et à l'accélération du phénomène (prédominance de formation marneuse peu résistantes, irrégularité climatique, torrencialité des écoulements, faible densité du couvert végétal). Notre étude est faite sur le bassin versant de Sébaou qui a une forme allongée, donc la concentration des eaux à l'exutoire se fait lentement, le couvert végétal de notre région d'étude demeure très dégradé et n'occupe que 19% de la surface totale, expose la région à une forte érosion et une déperdition accélérée des sols fertiles. Le bassin versant de Sébaou est caractérisé par un régime climatique humide et tempéré, la période sèche allant du mois de mai au mois de septembre et la période humide allant du mois d'octobre au mois d'avril.

A travers cette étude on peut conclure ce qui suit :

- Les études statistiques faites sur le débit solide et le débit liquide montrent une bonne corrélation dans la régression polynomiale.
- Le choix de l'utilisation de la section mouillée à la place de la hauteur est dû essentiellement à la présence de plusieurs branches dans les courbes de tarages débit-hauteur.
- La présence de deux stations hydrométriques (Baghlia et Balloua) nous a permis d'élaborer une relation entre la concentration en sédiment et la surface mouillée (mensuelle).
- Durant la période sèche, le couvert végétal est dégradé ce qui donne un taux d'érosion important contrairement à la période humide.

A la fin, on a constaté un manque de données surtout morphologiques de l'oued spécialement la sédimentométrie du lit d'oued, chose qui a influencé négativement sur le traitement de l'hydrodynamique du transport solide.

Nous recommandons :

- De donner une attention particulière aux données recueillies, et de prévenir pour des futures études une modélisation mécanique ou même physique du phénomène de transport solide.
- Les services concernés doivent prendre conscience de la nécessité des données mesurées et d'avoir le maximum possible de données afin d'élaborer un modèle efficace et très proche de la réalité.
- Le transport solide par charriage doit être faire l'objet d'une étude ultérieure afin de cerner le phénomène et avoir des modèles acceptables en utilisant les différentes formules existantes dans la littérature et faire attention aux conditions d'application de chaque formule.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] : Touaibia .B,(1999). Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales : bassin versant de l'oued Mina. Journal des sciences hydrologiques, 44(6) décembre 1999.

[2] : Meguenni et Reminni B(2008) . Evaluation du débit solide dans le bassins versant de HERREZA (Algérie).Larhyss Journal, ISSN 1112-3680 , n07, juin 2008, pp.7-19.

[3]: Ellison, W.D., (1947). Soil erosion studies. Agricultural Engineering.V. 28, p. 402-405.

[4]: Einstein, H. A., (1950). The bed load function for sediment transportation in open channels. Washington, U.S. Departement of Agriculture.78p. (Soil Conservation Service.Technical Bulletin 1026).

[5]: De Ploey, J., and J. Savat, (1968). Contribution to the study of splash erosion. Z. Geomorphology 12: 174-193.

[6] : Souter Marc, André Mermoud et André Musy, 2007. Ingénierie des eaux et du sol processus et aménagement. La collection « science et technologie de l'environnement » 289p.

[7]: Foster, G. R., (1982). Modelling the Erosion Process.**In** : C. T. Haan, H. P. Johnson and D. L. Brakensiek (eds.). Hydrologic Modelling of Small Watershed. ASAE Monograph 5, St Joseph, MI, 297-308.

[8]: Rose C. W. (1994). Research Progress on Soil Erosion Processes and a Basis for Soil Conservation Practices.**In** :R. Lal (ed.). Soil Erosion.Research Methods.Soil and Water Conservation Soc. And St. Lucie Press, 2nd Edition, 159-178.

[9]: Wischmeier W. H., Smith D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. US Department of Agriculture, agricultural handbook n° 537, Science and Education Administration USDA, Washington DC.58 p.

[10] : Magali Jodeau (2004). Etude expérimentale des mécanismes de transport solide par charriage torrentiel. Mémoire de DEA CEMAGREF Grenoble, division ETNA Février-Septembre 2004.

[11] : Touibia. B (1986).Qantification de la salinité et du transport solide cas de bassin versant de l'oued Derdeur. Thèse de Magister. INA-Alger.

[12] : Mohamed Achite- Mohamed Meddi (2004). Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). Sécheresse 2004; 15 (4): 367-73.

[13] : Oliveros Carlos (1996). Transport solide : modèles et condition d'application en région PACA, Rapport BRGM R39474, 9-11 p.

[14] : Anne-Claire NIVET, Cemagref-URA ema (2009). Caractérisation du transport solide en ravine et cours d'eau permanent, site de la baie du Robert. 8-9 P.

[15] : Mokhtari Elhadj (2009). Contribution à l'étude du transport solide en suspension Bassin de l'oued Chellif. Ghrib, Th. Magister, Université Mentouri-Constantine. 37 P.

[16]: Walter H.Graf-M.S.Altinakar (2000). Hydraulique fluviale : écoulement et phénomène de transport solide dans les canaux à géométrie simple.

[17] : Elahcene Omar (2013). Etude de transport solide par charriage et en suspension dans le bassin versant de l'oued Bellah (Tipaza), Th. Doc, Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach (Alger). 9-37 P.

[18] : Cheniti Naoual (2003). Contribution à la quantification du transport solide au droit de deux stations hydrométriques. Sécheresse 2004; 15 (4): 367-74

[19] : Bouanani Abderrazak (2004). Hydrologie, Transport Solide et Modélisation (Etude de quelques sous bassins de la Tafna). Thèse de doctorat, université de Tlemcen 250 p.

[20] : REMENIERAS.G. (1986). Hydrologie de l'ingénieur .édition Eyrolles .Paris .France.

[21] : Larfi B. et Remini B, 2006 ; LE TRANSPORT SOLIDE DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED ISSER IMPACT SUR L'ENVASEMENT DU BARRAGE DE BENI AMRANE (ALGERIE). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 05, Juin 2006, pp.63-73.

[22] : MEDDI M, 2015 ; CONTRIBUTION A L'ETUDE DU TRANSPORT SOLIDE EN ALGERIE DU NORD. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°24, Décembre 2015, pp. 315-336.

[23] : H. Bouchelkia et B. Remini, 2003 ; Quantification du transport solide dans le bassin versant algérien du Chellif. Ingénieries - E A T, IRSTEA _édition 2003, p. 45 - p. 56.