



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
جامعة زيان عاشور - الجلفة
Université Ziane Achour – Djelfa
كلية علوم الطبيعة والحياة
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie



Département des Sciences Agronomiques et Vétérinaires

Mémoire de fin d'études

en Vue de l'Obtention du Diplôme de Master en Sciences Agronomiques
Spécialité : Eau et Environnement

Thème

**Etude des concentrations des sédiments en suspension en
fonction des débits liquides dans un bassin semi-aride.
Cas de l'Oued Zeddine, Ain Defla.**

Présenté par : Difi Mohamed Lamine

Dr. Elahcene Omar maître de conférences A université de Djelfa Promoteur

Les membres du jury :

BOULEKNAFET Zohir	MCB	université de Djelfa	Président
BOUTELDJAOUI Fateh	MAA	université de Djelfa	Examineur
KHADRI Samira	MCB	université de Djelfa	Examinatrice

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Je remercie Dieu, le Tout Puissant, le Miséricordieux, qui m'a donné l'opportunité de mener à bien ce travail.

Au terme de ce travail, nous ne manquons d'adresser mes sincères remerciements à tous ce qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

*Ma première reconnaissance est adressée tout d'abord à mon promoteur, Docteur **Elahcene Omar**, qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect pour leurs confiance en moi, leurs soutien, leurs patience, et leurs encouragement pour mener à bien ce travail, sans oublier les valeurs de travail, de rigueur et de valeurs humaine qu'il m'a pu me transmettre. Il a su me donner confiance en mes compétences. Il m'a permis d'élaborer cet mémoire et qui sans aides, ce travail n'aurait point vu de jour.*

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants de la faculté des sciences de la nature et de la vie qui ont contribué à ma formation pour m'avoir transmis l'amour de la recherche scientifique.

Aux Etudiants de ma promotion, je leurs dis merci pour les moments de joies et de stress passés ensemble.

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour à :

Mes très chers parents ;

Mon frère Ahmed Yassin ;

Mes sœurs ;

Mon neveu Mustapha Yassin ;

Mon cousin Ahmed Mustapha ;

*Mes meilleurs amis : Laid, Boulanouar, Salah Eddine, Houssam, Karim,
Mohamed, Abdelbaki et Ismail.*

Mohamed Lamine

Résumé

Résumé

Le présent travail s'intéresse à l'étude des concentrations des sédiments en suspension et des débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine. Ce bassin se situe en zone semi-aride. Les données acquises par la station de Bir Ouled Tahar, Ain Defla, Algérie (hauteurs d'eau $H[\text{cm}]$, débits liquides $Q_l[\text{m}^3/\text{s}]$ et la concentration en matières en suspension $C[\text{g/l}]$) et utilisées pour la quantification du transport solide ont été analysées en vue d'en déterminer leurs fiabilité et validité c'est-à-dire une fois mesurées, les concentrations en MES sont corrélées aux débits liquides journaliers. La corrélation entre les deux paramètres (C et Q_l) durant les crues est étudiée de manière qualitative. Le rapport C/Q_l a été soumis à des relations linéaire, logarithmique, polynomiale, puissance et exponentielle. Pour l'application au niveau de ce bassin le résultat obtenu montre qu'il existe une mauvaise corrélation entre la concentration et le débit liquide pour une période allant du 1990 à 2013. Et, L'évolution des concentrations des sédiments en fonction des débits liquides durant les crues montre que la réponse des concentrations aux débits suit quatre modèles de courbes (courbe simple de la classe I, courbe dans le sens des aiguilles d'une montre, dans le sens contraire des aiguilles d'une montre et en forme en huit). Le modèle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre est le plus fréquent (48,15%). On le trouve, essentiellement, pour des crues d'hiver (32,69%) et d'automne (30,76%). Pour ce modèle, l'érosion est active dès les premières pluies qui, même si elles sont d'un faible apport liquide, peuvent donner des concentrations importantes des sédiments en suspension. Les sédiments transportés durant la crue pour ce modèle proviennent, essentiellement, du lit de la rivière, mais aussi des berges et des affluents.

Mots clefs : Bassin versant, Oued Zeddine, Concentrations en MES, débits liquides, les crues, hystérésis, Algérie

Abstract

Abstract

This work focuses on the study of suspended sediment concentrations and liquid flows in the Oued Zeddine watershed. This basin is located in a semi-arid zone. Data acquired by Bir Ouled Tahar station, Ain Defla, Algeria (water heights H [cm], liquid flows Q_1 [m³/s] and the concentration of suspended materials C [g/l]) used for the quantification of solid transport were analysed to determine their reliability and validity, i.e. when measured, concentrations are correlated with daily liquid flows. The correlation between the two parameters (C and Q_1) during floods is studied qualitatively. The C/Q_1 ratio has been subjected to linear, logarithmic, polynomial, power and exponential relationships. For the application of this basin the result obtained shows that there is a poor correlation between concentration and liquid flow for a period from 1990 to 2013. And, the evolution of sediment concentrations according to liquid flows during floods shows that the response of concentrations to flows follows four models of curves (simple curve of class I, curved clockwise, counterclockwise and shaped in eight). The clockwise pattern is the most common (48.15%). It is found, mainly, for winter floods (32.69%) autumn (30.76%). For this model, erosion is active from the first rains, which, although low in fluid, can produce high concentrations of suspended sediments. The sediments transported during the flood for this model come mainly from the riverbed, but also from the banks and tributaries.

Keywords: Watershed, Zeddine Wadi, suspended sediment (SS) concentrations, liquid flows, floods, hysteresis, Algeria.

ملخص

ويركز هذا العمل على دراسة تركيزات الرواسب المعلقة والتدفقات السائلة في مستجمعات المياه في واد زدين. يقع هذا الحوض في منطقة شبه قاحلة. وقد تم تحليل البيانات التي حصلت عليها محطة بير أولاد الطاهر، عين دفلة، الجزائر (ارتفاعات المياه [سم]، وتدفقات السائل [م³/ث] وتركيز المواد المعلقة [غ/ل] المستخدمة في القياس الكمي للنقل الصلب لتحديد موثوقيتها وصلاحياتها، أي عند قياسها، ترتبط تركيزات المواد المعلقة بالتدفقات السائلة اليومية. ويجري دراسة العلاقة بين المعلمتين (التراكيز و التدفق) أثناء الفيضانات من الناحية النوعية. وقد خضعت نسبة التراكيز و التدفق للعلاقات الخطية واللوغاريتمية ومتعددة الحدود والقوة والعلاقات الأسية. وبالنسبة لتطبيق هذا الحوض، تظهر النتيجة التي تم الحصول عليها أن هناك ترابطاً ضعيفاً بين التركيز وتدفق السائل لفترة من 1990 إلى 2013. ويظهر تطور تركيزات الرواسب وفقاً للتدفقات السائلة أثناء الفيضانات أن استجابة التركيزات على التدفقات تتبع أربعة نماذج من المنحنيات (منحنى بسيط من الدرجة الأولى، منحنى في اتجاه عقارب الساعة، عكس عقارب الساعة، وفي شكل ثمانية). نمط عكس عقارب الساعة هو الأكثر شيوعاً (48.15%). وتوجد هذه الانبعثات أساساً في الفيضانات الشتوية (32.69%) والخريف (30.76%). وبالنسبة لهذا النموذج، فإن التآكل نشط من الأمطار الأولى، التي، على الرغم من انخفاض السوائل، يمكن أن تنتج تركيزات عالية من الرواسب المعلقة. الرواسب المنقولة خلال الفيضانات لهذا النموذج تأتي أساساً من مجرى النهر، ولكن أيضاً من ضفاف وروافد.

الكلمات الرئيسية: مستجمعات المياه، واد زدين، تركيزات المواد المعلقة، التدفقات السائلة، الفيضانات، الهستيري، الجزائر

SOMMAIRE

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction01

Chapitre I Revue bibliographique

I.1 Introduction05

I.2 Erosion06

I.2.1 Définition.....06

I.2.2 Types d'érosion.....06

I.2.2.1 Erosion éolienne.....06

I.2.2.2 Erosion aratoire ou mécanique sèche07

I.2.2.3 Erosion hydrique07

I.2.3 Formes d'érosion08

I.2.3.1 Erosion en nappe, érosion laminaire ou érosion aréolaire (Sheet erosion)08

I.2.3.2 Érosion linéaire08

I.2.3.2.1 Griffes (rill erosion).....08

I.2.3.2.2 Rigoles (rill or ephemeral erosion).....09

I.2.3.2.3 Erosion par ravinement (gully erosion)09

I.2.4 Facteurs de l'érosion10

I.2.4.1 Climat10

SOMMAIRE

I.2.4.2 Relief (morphologie du terrain)	10
I.2.4.3 Sol (la physique et la chimie de la roche).....	10
I.2.4.4 Couverture végétale.....	10
I.2.4.5 Action de l'homme (pratiques agricoles, urbanisation)	11
I.2.5 Principaux agents de l'érosion hydrique	11
I.2.5.1 Intensité et agressivité des précipitations	11
I.2.5.2 Ruissellement.....	12
a- L'infiltration	13
b-Détention superficielle et rugosité du sol.....	13
c- Pente et longueur de pente.....	13
d- Le couvert végétal.....	14
I.2.6 Conséquences de l'érosion hydrique.....	14
I.2.6.1 Conséquences de l'érosion hydrique en zones érodées.....	14
I.2.6.2 Conséquences de l'érosion hydrique en zones de dépôts.....	14
I.3 Transport solide	15
I.3.1 Généralité	15
I.3.2 Définition.....	15
I.3.3 Types de transport solide.....	15
I.3.3.1 Transport solide par charriage	16
I.3.3.2 Transport solide en suspension	17
I.3.3.3 Transport solide par saltation.....	18
I.3.4 Mesures du transport solide en suspension	18
I.4 Débit liquide	19
I.4.1 Définition.....	19
I.4.2 Relation débit liquide – niveau d'eau.....	19

SOMMAIRE

I.4.3 Méthodes de mesure le débit liquide.....	20
I.5 Crue.....	20
I.5.1 Différentes méthodes d'évaluation des crues	22
I.5.1.1 Méthodes historiques.....	22
I.5.1.2 Méthodes empiriques	22
A - Formule de Mallet – Gauthier.....	22
B - Formule de POSSENTI.....	23
C - Formule de Turraza	23
D - Formule de SOKOLOVSKY	23
I.6 Hystérésis	24
I.6.1 Définition.....	24
I.6.2 Sources de l'hystérésis	24
Chapitre II présentation de la zone d'étude	
II Etude Morphométrique	26
II.1 Introduction.....	26
II.2 Situation géographique du bassin versant.....	26
II.3 Paramètre géométrique	29
a. Superficie et Périmètre du bassin versant	29
II.4 Caractéristique de forme	30
II.4.1 Indice de compacité de Gravelius, Kc	30
II.4.2 Rectangle équivalent.....	31
II.4.3 Coefficient de Circularité.....	33
II.5 Etude du réseau hydrographique	33
II.5.1 Pente moyenne du cours d'eau.....	34
II.5.2 Densité de drainage.....	34

SOMMAIRE

II.5.3 Densité hydrographique	35
II.5.4 Rapport de confluence	35
II.5.5 Rapport de longueur.....	35
II.5.6 Fréquence des cours d'eau	36
II.6 Etude du relief	36
II.6.1 Hypsométrie	36
II.6.2 Altitudes caractéristiques	38
A - Les altitudes maximale et minimale.....	38
B - L'altitude moyenne du bassin versant	39
C - L'altitude médiane.....	39
D - Pente moyenne du bassin versant	39
II.7 Indices de pente et relief	40
II.7.1 Indice de pente de Roche Ip	40
II.7.2 Indice de pente globale Ig	41
II.7.3 Dénivelée spécifique Ds.....	42
II.7.4 Temps de concentration	43
II.8 Géologie du bassin versant de l'Oued Zeddine.....	44
II.9 Végétation	44
II.10 Climat.....	45
Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits Liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine	
Introduction	48
III.1 Corrélation entre la concentration des sédiments en suspension et le débit liquide dans le bassin versant de l'Oued Zeddine	49
III.1.1 Données et méthodologie.....	49
III.1.2 Analyse des résultats.....	55

SOMMAIRE

III.2 Concentrations des sédiments en suspension et des débits liquides par événement dans le bassin versant de l'Oued Zeddine	59
III.2.1 Données et méthodologies	59
III.2.2 Discussions.....	77
III.2.2.1 Application au bassin versant de l'oued Zeddine.....	77
III.2.3 Analyse des hystérésis	80
Conclusion.....	83
Référence bibliographique.....	85
Annexe.....	95

Liste des figures

N° de figure	Titre de la figure	Page
I.1	différents types de transport solide.	16
I.2	une crue simple	22
I.3	une crue complexe	22
II.1	Carte de localisation du bassin versant de l'oued Zeddine.	28
II.2	Carte du relief et répartition en classes d'altitude.	29
II.3	Carte des pentes et répartition en classes de pente.	29
II.4	Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Zeddine	39
III.1	Corrélations entre les concentrations des sédiments en suspension et les débits liquides à différente échelle par le modèle Exponentielle dans le bassin versant de l'Oued Zeddine (1990/2013).	52
III.2	Corrélations entre les concentrations des sédiments en suspension et les débits liquides à différente échelle par le modèle Linéaire dans le bassin versant de l'Oued Zeddine (1990/2013).	53
III.3	Corrélations entre les concentrations des sédiments en suspension et les débits liquides à différente échelle par le modèle Logarithmique dans le bassin versant de l'Oued Zeddine (1990/2013).	54
III.4	Corrélations entre les concentrations des sédiments en suspension et les débits liquides à différente échelle par le modèle Polynomiale dans le bassin versant de l'Oued Zeddine (1990/2013).	55
III.5	Corrélations entre les concentrations des sédiments en suspension et les débits liquides à différente échelle par le modèle Puissance dans le bassin versant de l'Oued Zeddine (1990/2013).	56

Liste des figures

III.6	Corrélations entre les concentrations des sédiments en suspension médiane et les débits liquides médiane à différentes classes (10-11-12-13-14-15) par le modèle Puissance dans le bassin versant de l'Oued Zeddine pour la série complète (1990/2013).	59
III.7	Les différentes classes d'hystérésis dans les relations concentrations en MES-débits liquides (Le François, 2005).	63
III.8	Evolution des concentrations des sédiments transportés en suspension et des débits liquides pendant les crues à l'Oued Zeddine (1990/2013) et classification des relations C-Q _l .	78
III.9	Modèle de la relation C/Q _l formant une hystérésis. 1: érosion; 2: transport; 3: sédimentation.	82

Liste des tableaux

Liste des tableaux

N° de tableau	Titre de tableau	Page
I.1	Formes d'érosion hydrique (Roose, 1994)	09
II.1	Classes de formes de cuvette oasienne suivant les valeurs de l'indice de Gravelius.	32
II.2	Caractéristiques de forme du bassin versant d'Oued Zeddine.	34
II.3	Surfaces partielles du bassin versant par tranche d'altitude.	38
II.4	Les Courbes de niveau et leurs longueurs du bassin versant de l'Oued Zeddine	41
II.5	Détermination de la pente de Roche Ip du bassin versant de l'Oued Zeddine	42
II.6	Classification du relief selon Ig par l'ORSTOM.	43
II.7	Classification du relief selon la méthode de L'ORSTOM (Ds)	44
II.8	Indice de pente et Relief du Bassin versant de oued Zeddine	44
II.9	Caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant de l'Oued Zeddine	47
III.1	Relations concentration-débit liquide pour chaque échelle de temps de 1990 à 2013.	57
III.2	Classes des relations C/Q_t (d'après williams, 1989).	62
III.3	Chronologie des crues sélectionnées	64
III.4	Statistiques par événement	68
III.5	Différentes classes d'évolution des relations concentration en sédiments transportés avec les débits liquides et leur fréquence relative dans le bassin versant de l'Oued Zeddine	78

Introduction

Introduction

Introduction

La crue dépend essentiellement de la quantité et de l'intensité de la pluie. La vitesse de montée de débit est largement influencée par le couvert végétal, la lithologie et les paramètres morphométriques du bassin (indice de compacité, densité de drainage, rapport des confluences et des longueurs, pente des talwegs et forme du lit (Cosandey et Robinson, 2000).

D'après Benkhaled et Remini (2003), l'origine des sédiments dans le réseau d'écoulement et l'érosion en nappes des versants n'apportent qu'une faible part au transport solide des oueds. Les sédiments transportés par le cours d'eau sont produits soit par ruissellement superficiel sur les versants, soit arrachés du lit et des berges de l'oued.

L'analyse du transport solide par événement peut permettre de déterminer la provenance des sédiments transportés par l'analyse des courbes représentant la concentration en fonction du débit liquide. Plusieurs études sur l'évaluation et l'analyse spatiale de la variabilité temporelle des sédiments en suspension ont été menées par différents chercheurs au cours de la dernière décennie : Evans et Davies, 1998, Achite et Meddi, 2005, Achite et Ouillon, 2007, Ghenim et al., 2008, Battala et Sala, 1994, Chikita et al., 2002, Zabaleta et al., 2007 et Elahcene et al., 2013. Ces auteurs ont analysé les facteurs qui agissent à la fois sur le débit liquide et le débit solide dans les cours d'eau. Un effet d'hystérésis est observé lorsque la concentration de matières en suspension présente différentes valeurs à des débits identiques à différentes étapes de la crue. Dans ce contexte, on notera les travaux de Williams, 1989, Walling, 1974, Asselman et Middelkoop, 1998, Hodkins, 1999, Picouet et al., 2000, Jansson, 2002, Benkhaled et al., 2003, Le François et al., 2003, Bacca, 2008, Gurnell, 1987, Lenzi et Marchi, 2000, Brasington et Richards, 2000, Tavares, 2010, Seeger et al., 2004 et Gellis, 2013 qui ont pu identifier les sources de sédiment dans un système en analysant systématiquement ces relations d'hystérésis.

Introduction

D'après Benkhaled et Remini, 2003, la relation entre la concentration en matières en suspension et le débit est influencée par la succession de trois périodes. La première période (désagrégation) est caractérisée par une forte augmentation de la concentration de sédiments en suspension et du débit. Cette phase est définie par l'arrivée des premières quantités de matériaux en suspension produites essentiellement par l'effet « splash » des pluies érosives dans les zones de ruissellement proches de l'exutoire du bassin. Cette période peut aussi correspondre à la remobilisation des matériaux déposés sur le fond du cours d'eau lors des basses eaux (Kattan et al., 1987). La seconde période (transport) est caractérisée par une diminution de la concentration des matières en suspension et une forte augmentation du débit. Cette phase de transport correspond à la dilution de la concentration en sédiments. Pendant cette période peut également se produire l'érosion des berges du cours d'eau (Kattan et al., 1987; Dinehart, 1992). La troisième période (dépôt) est caractérisée par une diminution conjointe de la concentration de matières en suspension et du débit. Cette phase correspond au dépôt des matériaux sur le lit des cours d'eau et dans les zones alluviales du bassin.

Le volume de matériaux qui se déposent chaque année dans les retenues des barrages algériens est évalué, en moyenne à 20 millions de m³ par an (Remini, 1999), ce qui contribue à réduire de 0,3% par an les capacités de stockage de l'eau estimé à 6,2 milliard de m³.

L'objectif principal de ce travail dans le bassin versant de l'Oued Zeddine est l'analyse détaillée des boucles d'hystérésis montrées par les relations C-Q₁ durant la période hydro-pluviométrique étudiée. Nous essayons par la suite de caractériser et de classer ces différentes relations pour une meilleure compréhension du phénomène afin d'identifier la source de provenance des sédiments, en utilisant une méthode de classification de Williams, 1989.

Le mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre qui porte une revue bibliographique sur l'érosion, le transport solide et le phénomène d'hystérésis (les crues)

Introduction

Le deuxième chapitre aborde une présentation générale du bassin versant de l'Oued Zeddine.

Le troisième chapitre intitulé sur les l'étude des concentrations des sédiments en suspension et des débits liquides par événement dans le bassin versant de l'Oued Zeddine.

Enfin, nous terminons le travail par une conclusion.

Chapitre I
Revue
bibliographique

I.1 Introduction

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

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

(Remini, 1999), a estimé le volume de matériaux qui se déposent chaque année dans les retenues des barrages Algériens, en moyenne à 20 millions de m³ par an, ce qui contribue à réduire de 0,3% par an les capacités de stockage de l'eau estimées à 6,2 milliard de m³ (Riad et al., 1999), dans des régions caractérisées par une pluviométrie à la fois faible et irrégulière.

I.2 Erosion

I.2.1 Définition

D'une manière générale, l'érosion des sols correspond au "détachement" et au "transport" des particules de sol, par différents agents (gravité, eau, vent, glace), de leur emplacement d'origine à un endroit de "dépôt" à l'aval. Dans tous les cas, ces mouvements de sol sont des processus discontinus à fortes variations spatio-temporelles, difficiles à décrire sous forme d'équations mathématiques (Le Bissonais, 2002).

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

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

I.2.2 Types d'érosion

Il existe trois types d'érosion

I.2.2.1 Erosion éolienne

Le vent exerce sur les particules solides au repos une pression sur la surface exposée au flux d'air, appliquée au-dessus du centre de gravité, auquel s'oppose un frottement centré sur la base des particules. Ces deux forces constituent un couple tendant à faire basculer et rouler les particules lourdes (0,5 à 2 mm), de plus, la différence de vitesse entre la base et le sommet des particules provoque leur aspiration vers le haut. Les particules les plus légères s'élèvent à la verticale jusqu'à ce que le gradient de vitesse ne les porte plus. Elles retombent alors, poussées par le vent, suivant une trajectoire subhorizontale. En retombant, ces grains de sable transmettent leur énergie à d'autres grains de sable (comme dans un jeu de boules) ou se dégradent les agrégats limono-argileux en dégageant de la poussière (Heusch, 1988).

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

I.2.2.2 Erosion aratoire ou mécanique sèche

Ce phénomène d'érosion n'est pas dû à l'intervention de l'eau, c'est le travail du sol qui arrache les particules, les transporte et les dépose soit en bas de parcelle, soit en talus. Les facteurs influençant la quantité de terre déplacée sont :

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

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

I.2.2.3 Erosion hydrique

L'érosion hydrique des terres est un processus impliquant le détachement de particules de sol puis leur transport sous l'action de l'eau versant lieu de dépôt.

L'élément déclencheur de ce type d'érosion est la pluie, qui provoque le détachement des particules élémentaires du sol. Et il existe plusieurs formes de l'érosion hydrique

I.2.3 Formes d'érosion

Plusieurs approches sont utilisées depuis de nombreuses années pour étudier la complexité de l'érosion et mieux cerner les mécanismes de ce phénomène. Ce paragraphe définit et décrit les différentes formes que peut prendre l'érosion des sols (tableau I.1). Ces formes correspondent à des processus qui se succèdent dans l'espace ou dans le temps. Elles n'apparaissent que lorsque la capacité de rétention d'eau du sol est soit atteinte ou soit l'eau rencontre sur son passage un obstacle qui l'empêche de s'infiltrer dans le sol. Ces formes ont été décrites par plusieurs chercheurs et dans diverses latitudes, notamment par De Noni et al., (1997) sur versants volcaniques cultivés, où ils mettent en corrélation les dynamiques et les formes d'érosion ; Daoudi et al., (2009), sur le processus de ravinement à l'échelle de bassin versant. Roose et al., (2001), ont étudié les formes d'érosion, tout en mettant un accent particulier sur le ravinement et sa typologie en Algérie.

I.2.3.1 Erosion en nappe, érosion laminaire ou érosion aréolaire (Sheet erosion)

C'est le stade initial de la dégradation du sol par érosion, du fait de l'impact des gouttes de pluie sur le sol et le transport des éléments détachés par le ruissellement en nappe (Roose, 1984). Cette forme d'érosion, sous l'influence du travail du sol par les outils aratoires, engendre la remontée des cailloux à la surface du sol (Roose, 1973). En Afrique, l'érosion en nappe dépend de la hauteur, de l'intensité, de l'énergie cinétique et de la répartition des pluies (Roose et De Noni, 2004).

I.2.3.2 Érosion linéaire

I.2.3.2.1 Griffes (rill erosion)

L'érosion linéaire décape et transporte généralement toutes les particules rencontrées : elle n'est donc pas sélective mais les dépôts sont souvent triés. Elle manifeste souvent un degré de dégradation bien plus élevé du milieu (Roose, 1985).

I .2.3.2.2 Rigoles (rill or ephemeral erosion)

On parle d'érosion en rigoles lorsque les petits canaux présentent des profondeurs supérieures à 10 cm (Roose, 1984 ; Al-kaisi et al., 2009)

I .2.3.2.3 Erosion par ravinement (gully erosion)

La ravine est une rigole approfondie où se concentrent les filets d'eau. La rigole se transforme en ravine lorsque sa profondeur interdit son nivellement par des simples instruments aratoires. Le ravinement constitue un stade avancé de l'érosion. Les ravines peuvent atteindre des dimensions considérables. L'approfondissement des ravines remonte du bas vers le haut de la pente (érosion régressive).

Cette forme d'érosion peut transformer le paysage en (badlands) et explique également la sappe d'ouvrages (ponts, radiers, digues ...). Lorsque l'aménagement des ravines n'est pas prolongé suffisamment en aval.

Tableau I.1 Formes d'érosion hydrique (Roose, 1994)

Applications des lignes d'écoulement	
Profondeur	Appellation
Quelques centimètres	Griffes
> 10 cm	Rigoles
10 à 20 cm quelques mètres de large	Nappe Ravinant
>50 cm	Ravines

I.2.4 Facteurs de l'érosion

I.2.4.1 Le climat

Il constitue la cause et la source de l'énergie érosive. Ce sont les gouttes de pluie et les eaux de ruissellements sur les terrains en pentes et les vents violents qui détachent et entraînent les particules terreuses.

I.2.4.2 Le relief (morphologie du terrain)

Les paramètres topographiques sont fondamentaux pour expliquer l'importance des phénomènes érosifs.

- La déclivité de la pente : le ruissellement et l'érosion commencent sur des pentes faibles (1 à 2%) et elle augmente avec la pente.
- La longueur de la pente : plus la pente est longue plus le ruissellement s'accumule, prend de la vitesse et de l'énergie et plus l'érosion s'intensifie.

Les fortes pentes avec un écoulement rapide sont généralement à l'origine d'une érosion excessive dont l'importance dépend de la géologie des sols et la protection de la couverture végétale (Azzouzi, 2014).

I.2.4.3 Le sol (la physique et la chimie de la roche)

Les caractéristiques du sol comme sa texture, sa minéralogie, sa stabilité structurale et la matière organique qu'il contient nous informe sur sa résistance à l'érosion.

I.2.4.4 la couverture végétale

L'absence du couvert végétal expose le sol à l'action directe des gouttes de pluie et des vents. Les arbres forestiers ou les plantes cultivés protègent le sol contre l'érosion.

L'occupation des terres est en rapport direct avec les activités humaines qui sont l'agriculture, l'élevage, les exploitations minières, l'abatage du bois, la construction des routes et l'urbanisation vu la suppression de la végétation, entourant sur les phénomènes d'érosion (Said, 2014).

I.2.4.5 L'action de l'homme (pratiques agricoles, urbanisation)

Les défrichements que l'homme opère sur les forêts et les parcours naturelles, le surpâturage, les labours mécaniques facilitent le ruissellement et par conséquent l'érosion. (Abir et Oumellal ,2014)

I.2.5 Principaux agents de l'érosion hydrique

Il existe deux agents principaux de l'érosion hydrique: les précipitations et le ruissellement superficiel. Toutefois, un grand nombre de facteurs (intensité et agressivité des précipitations, caractéristiques du sol, pentes et longueur de pente, le couvert végétal et l'état hydrique initial) et de mécanismes affectent la relation "chute de pluie-ruissellement- entraînement des terres".

I.2.5.1 Intensité et agressivité des précipitations

La désagrégation de la structure et le détachement des particules sous l'impact des gouttes de pluie résultent du "travail" exercé par les gouttes à la surface du sol. Il est donc lié à l'énergie cinétique des gouttes E_c . Elle s'écrit :

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

Où,

E_c : l'énergie cinétique (joule) ;

m : la masse de la goutte (kg) ;

v : la vitesse (m/s).

L'évaluation de l'énergie cinétique des gouttes reste un bon critère d'évaluation de l'agressivité des pluies. Il existe d'ailleurs une relation empirique reliant l'intensité d'une pluie et son énergie cinétique (Remy. et al., 1998). Elle s'écrit :

$$E_c = 11.9 + 8.73 \log I_p$$

Avec,

E_c : l'énergie cinétique ($\text{j/m}^2/\text{mm}$) ;

I_p : l'intensité de pluie (mm/h).

Les pluies, lors de l'impact des gouttes, provoquent un détachement des matières et une destruction des agrégats lors de la conversion de l'énergie cinétique en efforts de cisaillement.

L'impact direct des gouttes de pluie provoque non seulement le délitage et la fragmentation des agrégats du sol, mais également l'entraînement et la projection des particules dans toutes les directions, ce rejaillissement peut être important. Plusieurs chercheurs ont essayé de quantifier cette masse de sol détachée (D_p) expérimentalement. Les relations obtenues sont en général de la forme (Poessen, 1984) . Elle s'écrit :

$$D_p = a.E_c^b$$

Où,

D_p : la masse détachée ;

E_c : l'énergie cinétique de la pluie ;

a et b : coefficients dépendent essentiellement de la texture et de la structure du sol.

Feodoroff et al., 1965, donnent des valeurs de 15 tonnes de terre remuées par hectare pour une averse de 25 mm et de 300 tonnes par hectare pour une averse de 100 mm. Ces processus de désagrégation de la surface du sol et d'érosion par rejaillissement conduisent à la fermeture des pores à la surface du sol et à la réduction de son infiltrabilité en formant une croûte de battance.

Jusqu'à ce stade, on ne peut parler de transport proprement dit. Il faut que le ruissellement démarre pour qu'il y ait une prise en charge des particules détachées par mise en suspension ou par charriage.

I.2.5.2 Ruissellement

Le ruissellement apparaît dès que l'intensité d'une pluie devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol, il dépend de plusieurs facteurs en particulier de la pente du terrain. D'une manière générale, il est admis que la vitesse du ruissellement est le paramètre

prépondérant de l'action érosive du ruissellement. Meyer, 1965 a proposé la relation suivante pour évaluer cette vitesse (Bouanani, 2004) : Elle s'écrit :

$$V_R = (I^{0.33} \cdot Q_R^{0.33}) / n^{0.66}$$

Où,

V_R : vitesse de ruissellement (m/s) ;

I : pente du terrain (%);

Q_R : Débit du ruissellement (m³/s);

n : rugosité du sol (cm).

Les facteurs qui régissent le ruissellement sont principalement:

a- L'infiltration

Tous les sols sont plus ou moins perméables. Le coefficient de perméabilité qui représente la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol dépend essentiellement de la porosité du sol.

b-Détention superficielle et rugosité du sol

Elle correspond à la capacité de stockage temporaire de la surface du sol vis-à-vis de l'eau. La détention superficielle se fait sous forme de flaques dans les micro-dépressions, dont la capacité de stockage est liée à la rugosité.

c- Pente et longueur de pente

L'influence de la pente est complexe. Le plus souvent, l'érosion augmente avec la pente. Il se développe une érosion en rigoles dix fois plus agressive que l'érosion en nappe (Roose, et al., 1998). Quant à la longueur des pentes, il semble que son influence sur la naissance de rigoles dépend de diverses interactions avec la rugosité et la perméabilité du sol, le type et l'abondance du couvert végétal.

d- Le couvert végétal

Il est clair que le couvert végétal est efficace pour réduire le ruissellement. La couverture du sol, plus particulièrement celle assurée par la strate herbacée et les résidus végétaux, constitue la protection la plus efficace du sol. Elle intervient vis-à-vis du sol par:

- **L'interception nette:** une partie de la pluie qui tombe sur la végétation est directement reprise par l'évaporation. Elle ne participe alors, ni à l'infiltration, ni au ruissellement.
- **La dissipation de l'énergie cinétique:** une partie de la pluie interceptée par le feuillage continue sa course jusqu'au sol. L'énergie cinétique des gouttes s'en trouve alors modifiée. L'expérience montre (Ruiz-Figueroa, J.F., 1983) que l'efficacité d'un couvert végétal à l'égard de l'infiltration est d'autant plus marquée que le dernier élément récepteur est bas (Elahcene, 2013).

I.2.6 Conséquences de l'érosion hydrique

I.2.6.1 Conséquences de l'érosion hydrique en zones érodées

L'érosion hydrique a des effets sur les zones érodées, parmi lesquels on cite:

- ✓ La diminution de la capacité du sol de retenir l'eau et de mettre à la disposition des végétaux;
- ✓ La diminution du drainage profond induisant une moindre réalimentation des nappes ;
- ✓ L'appauvrissement du sol : la teneur en humus et en élément nutritifs du sol décroît ce qui influence la stabilité structurale du sol ;
- ✓ La baisse des rendements des cultures, une augmentation des coûts de production des aliments ;
- ✓ La dégradation des terres agricoles et une désertification du milieu naturel.

I.2.6.2 Conséquences de l'érosion hydrique en zones de dépôts

Sont :

- ✓ L'envasement accéléré des barrages, des canaux d'irrigation et des réservoirs ;
- ✓ La destruction de routes, chemins et ponts ;

- ✓ La réduction de la capacité des lits de rivières et un risque d'inondation des terres voisines ;
- ✓ Le transfert et la répartition spatiale des polluants (pesticides, métaux lourds et nutriments en excès) dans l'environnement;
- ✓ L'augmentation du coût de traitement des eaux de consommation.

I.3 Transport solide

I.3.1 Généralité

La dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés dans le réseau d'écoulement dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement et de la granulométrie. Le champ d'exploration des vitesses varie tout au long du profil de l'oued d'amont en aval. La capacité de transport est liée à la nature granulométrique des matériaux et varie dans le temps et dans l'espace avec le débit liquide.

I.3.2 Définition

Le transport solide est par définition la quantité de sédiments (ou, flux solide, charge solide, débit solide) transportée par un cours d'eau à une section donnée pendant un temps d_t ($t=1$ jour, 1 mois, 1 année). Il est composé de la charge en suspension et du transport de fond (glissement ou Roulement sur le fond et saltation). Le transport des sédiments dans les cours d'eau est déterminé par les caractéristiques des particules (taille, forme, concentration, vitesse de chutes et densité des particules) (Bouanani, 2004).

La dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés par le réseau d'écoulement dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement et de la granulométrie.

I.3.3 Types de transport solide

L'eau met en jeu trois types de mécanisme : le charriage et la suspension qui sont les principaux types de transport solide et le troisième c'est la saltation (figure I.1).

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 (Mokhtari, 2007).

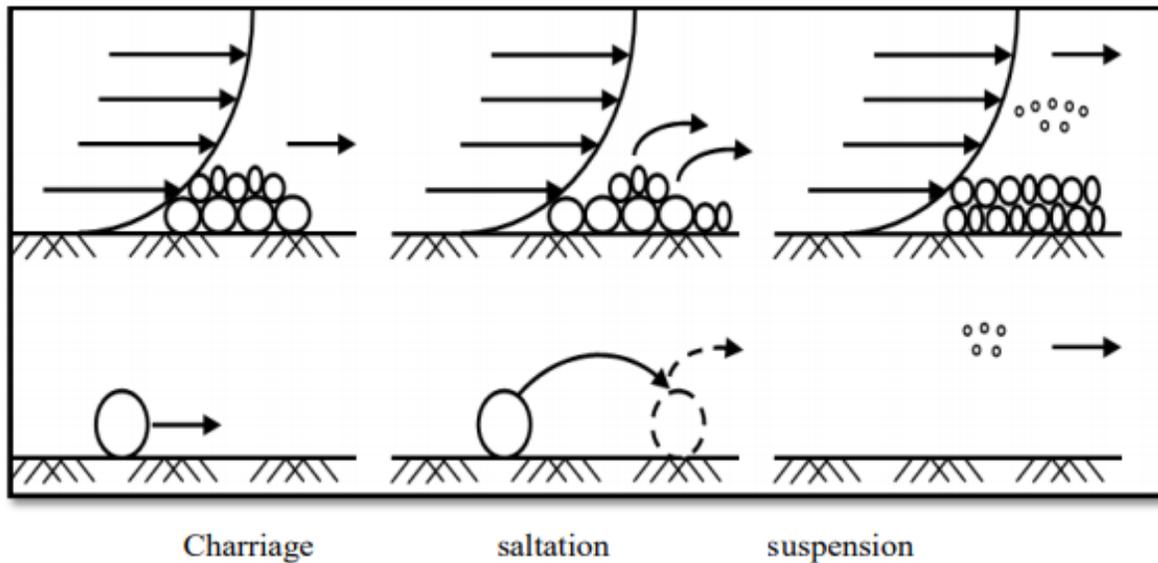


Figure. I.1 Différent types de transport solide en rivière (Komeru et al., 2006).

I.3.3.1 Transport solide par charriage

Le transport solide par charriage, représente la progression de sédiments grossiers (sables, graviers, galets et blocs) de diamètre supérieur ou égale à 1 mm, qui se déplacent par roulement ou glissement, au voisinage immédiat du fond du cours d'eau. Les particules en charriage parcourent des distances relativement petites et discontinues dans le temps et dans l'espace. Leur vitesse est inférieure à celle de l'écoulement.

Les mesures sur terrain du transport solide par charriage sont très onéreuses à cause des perturbations de l'écoulement. L'évaluation de ce type de transport est difficile à mener en l'absence de base de données. On se contente généralement d'études sur modèles réduits pour déterminer la proportion du charriage par rapport à la suspension ou au transport total. Pour

quelque bassin versant le taux de charriage a été estimé 12,5% de la suspension (Bouanani, 2004).

Dans les retenues Algérienne, les apports par charriage représentent entre 10 à 15 % de la charge solide en suspension (Remini, 2003).

I.3.3.2 Transport solide en suspension

Le transport solide en suspension représente le transport de sédiments fins (argiles, limons, sables fins), de taille micritique, maintenues en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau, sous l'action des fluctuations turbulentes de l'écoulement. Les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide croît de l'amont vers l'aval.

Quelques valeurs indicatives, permettent de délimiter les deux modes de transport. Ces valeurs utilisent le rapport entre vitesse de l'écoulement V sur le lit du cours d'eau, et la vitesse W de chute des particules, (Graf, 1971).

- $V/W > 0.10$ début de transport par charriage.
- $V/W > 0.40$ début de transport en suspension.

Lorsque les matériaux arrachés au bassin atteignent le réseau hydrographique, ils seront transportés par le courant si celui-ci en est capable, sinon ils se déposent pour former la partie affouillable du lit des rivières. La majeure partie du transport solide est constituée d'éléments fins restant en suspension dans les eaux de rivières (Bouanani, 2004 ; Corne, 2009).

La quantité de matériaux véhiculés par les cours d'eau peut atteindre des valeurs considérables et avoir des conséquences très graves sur les infrastructures hydro-agricoles et routières : comblements de barrage, dépôt dans les canaux d'irrigation, avaloirs, routes et autoroutes, blocage des stations de pompage, impact sur l'aquaculture et la qualité de l'eau dans les lacs naturels et artificiels, eutrophisation...).

La concentration d'élément en suspension des Oueds Algériens dépasse souvent 100g/l pendant les premières pluies d'automne (Remini, 2003).

I.3.3.3 Transport solide par saltation

Correspond à des matériaux assez fins pour que les interactions avec le fond ne soient pas prépondérantes mais trop grossiers pour que les matériaux restent durablement dans l'écoulement.

Dans les rivières, il s'agit essentiellement de sables .Dans le cas d'un bassin versant granitique, ce type de transport qui est prépondérant. Or, sa quantification à partir des conditions d'écoulement n'est pas accessible. Cette lacune n'est généralement pas pénalisante car les interactions avec le lit sont très modérées, les sables se déposant, plutôt à la décrue, seulement dans les zones d'eau morte. Par contre, ces matériaux se déposent massivement lorsque la vitesse diminue et donc la turbulence diminue, comme c'est le cas dans les retenues.

Le remplissage des retenues diminue et donc le bilan d'apport diminue est alors totalement dépendant de ces apports de sables.

I.3.4 Mesures du transport solide en suspension

A la différence du charriage, la mesure du transport solide se fait sur toute la largeur de la section de mesure. La méthode utilisée, consiste à explorer le champ des vitesses et des concentrations sur une section donnée du cours d'eau. Des prélèvements d'échantillons par des équipements spécifiques, au droit de la section de mesure, se font parallèlement au jaugeage de débit au moulinet pour différentes largeurs et différentes profondeurs de la section de mesure. Le prélèvement d'échantillons doit se faire avec des appareils à action très rapide. Il existe plusieurs appareils de prélèvements d'échantillons actuellement utilisés, à savoir :

- ✓ Turbidisonde NEYRPIC ;
- ✓ Turbidisonde DELFT ;
- ✓ Prélèvement au moyen d'une pompe ;
- ✓ Prélèvement au moyen de bouteilles.

Pour les faibles courants d'eau, les prélèvements peuvent être faits à l'aide de bouteilles que l'on envoie à la profondeur voulue grâce à un câble (Touaibia, 2009).

Les échantillons prélevés sont pris au laboratoire. Les eaux sont filtrées. Les matériaux en suspension sont récupérés sur des filtres en papier ou des membranes cellulosiques préalablement pesées. Papiers ou membranes chargées sont séchées à l'étuve à environ 105 °c. Le filtre séché est pesé avec une balance de précision et le poids de la charge solide est ramené à l'unité de volume [M/L³]. La turbidité ou la concentration en éléments en suspension s'exprime en mg/l ou en g/m³ ou autres (Mokadmi,2012).

I.4 Débit liquide

I.4.1 Définition

Est le volume d'eau passant à travers une section d'un cours d'eau pendant une unité de temps (par exemple 1 seconde).

Le débit liquide instantané est le volume d'eau passant à travers une section d'un cours d'eau pendant une unité de temps. Il s'écrit:

$$Q(\text{débit}) = \frac{V(\text{volume})}{t(\text{temps})}$$

On détermine le débit en intégrant la vitesse sur la section, ou encore en multipliant la superficie de la section mouillée (en m²) par la vitesse moyenne (en m/s) des filets liquides traversant la dite section. Il s'écrit:

$$\int_A v \cdot dA = v_{\text{moy}} \cdot A$$

I.4.2 Relation débit liquide – niveau d'eau

- Une série de mesures de débits liquides dans une section de contrôle permet d'établir la relation entre le niveau d'eau local et le débit (courbe de débit). La valeur approximative du débit pour un niveau d'eau quelconque peut ensuite être déduite de la courbe (Borgerhout, 2008).
- La comparaison des débits liquides relevés à intervalles de temps variables permet de déceler la fermeture ou l'ouverture de chenaux par lesquelles ils transitent.

- L'évolution de la distribution du débit liquide entre les différents chenaux mesurée régulièrement est un indicateur pour les changements à la morphologie du système de méandres.

I.4.3 Méthodes de mesure le débit liquide

On distingue quatre méthodes :

- **Les méthodes 'volumétriques'** permettent de déterminer le débit directement à partir du temps nécessaire pour remplir d'eau un récipient d'une contenance déterminée.
- **Les méthodes 'd'exploration du champ de vitesse'** consiste à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section, tout en mesurant la surface de la section mouillée.
- **Les méthodes 'hydrauliques'** tiennent compte des forces qui régissent l'écoulement (pesanteur, inertie, viscosité...).
- **Les méthodes 'physico-chimiques'** prennent en compte les variations, lors de l'écoulement de certaines propriétés physiques du liquide (concentration en certains éléments dissous).

La méthode la mieux adaptée pour la région divagante est la méthode 'd'exploration du champ de vitesse' d'où les vitesses sont mesurées par moulinet hydrométrique ou par flotteurs de surface (Borgerhout, 2008).

I.5 Crue

Une crue est un phénomène hydrologique qui s'exprime par une pulsation brutale dans le niveau du cours d'eau. Elle est décrite à partir de trois paramètres : le débit, la hauteur d'eau et la vitesse du courant.

Selon Frécaut (1971), il convient de distinguer crues et hautes eaux ; les hautes eaux moyennes représentent une situation saisonnière durable. Les crues au contraire, constituent avec

les étiages une situation extrême dans le comportement des cours d'eau. Il s'agit de gonflements fluviaux exceptionnels et irréguliers, tant en saison froide (période de hautes eaux), qu'en saison chaude (période de basses eaux). Pour certains auteurs les crues sont des débits égaux ou supérieurs à un certain multiple du module annuel (03 à 05 fois le module). On distingue :

- Les crues simples qui sont caractérisées par une seule montée du niveau d'eau, suivit d'une descente de ce niveau (figure I.2)
- Les crues complexes : Elles sont caractérisées par plusieurs baisses et plusieurs hausses des niveaux d'eau, ce qui témoigne de la pluralité des facteurs responsables de la crue (figure I.3)

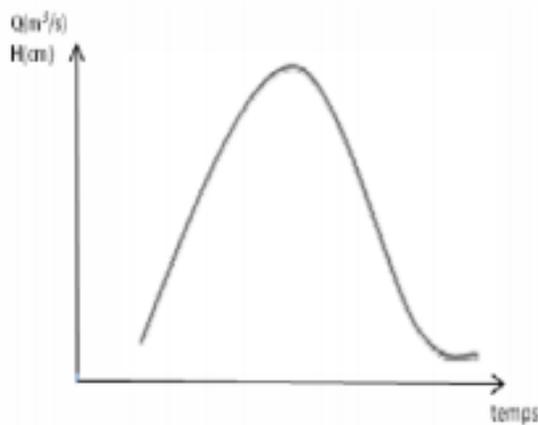


figure I.2 une crue simple

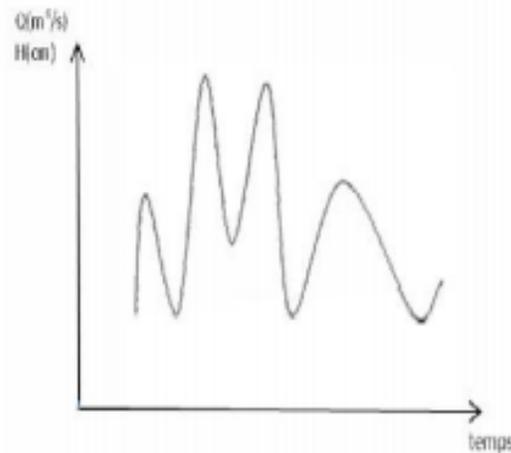


figure I.3 une crue complexe

Une crue est influencée par de nombreuses variables parmi lesquelles : l'intensité, la durée et la distribution de la pluie dans le bassin, la topographie et l'occupation du sol. Les débits de crues ont une influence directe sur le régime hydrologique et en particulier sur les Oueds, à cause de la grande irrégularité, passant de débits nuls à des débits de crues exceptionnels (Asnoui, 2014).

I.5.1 Différentes méthodes d'évaluation des crues

Les techniques utilisées pour la détermination des crues dépendent pour une grande part des données disponibles. Presque chaque problème qui se produit est uniquement, du aux variations des conditions et des données, qui fait que c'est la disponibilité des données plutôt que la nature des problèmes qui conditionnent la procédure. Il n'existe pas encore une unicité de calcul des crues, les méthodes de calcul diffèrent aussi selon le chargé d'études (Krim, 2006).

Nous rappelons ci-dessous, les différentes méthodes de calcul des crues citant les avantages et les inconvénients de chacune.

I.5.1.1 Méthodes historiques

Comprend les études des archives, les enquêtes auprès des populations et les recherches d'anciennes traces des crues (les niveaux atteints par les crues du passé).

I.5.1.2 Méthodes empiriques

Les méthodes empiriques sont des excellents outils pour la détermination d'un hydrogramme. En effet, elles permettent toute au long du développement du calcul, de rationaliser les résultats et de dégager ainsi les meilleures caractéristiques du projet. (Boudjerda, 2005). Les méthodes consistent à établir les relations entre le débit et la surface du bassin versant, la pluie et la période de retour comme les formules de Greager, Fuller, Snyder, Possenti, etc.... Voici quelques formules :

A - Formule de Mallet – Gauthier

s'écrit :

$$Q_{\max\%} = 2K \log \left(1 + A \cdot P_{\text{moy}} \cdot \frac{A}{\sqrt{L}} \left(1 + \sqrt{4 \log T - \log A} \right) \right)$$

avec,

K : une constante comprise entre 1-3 ;

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle (m) ;

A : Surface du bassin en Km² ;

L : Longueur du talweg principal en Km ;

T : Période de retour.

B - Formule de POSSENTI

s'écrit :

$$Q_{\max} = \frac{\mu . P_{\max j\%} . A}{L_p}$$

Avec,

$P_{\max j\%}$: Pluie maximale journalière correspondante à la période de retour donnée (m) ;

μ : Coefficient compris entre 700 et 800 ;

L_p : Longueur du cours d'eau principal en (Km) ;

A : Surface du bassin en Km².

C - Formule de Turraza

Cette formule utilise l'intensité moyenne maximale de précipitations déterminées sur un intervalle de référence égal au temps de concentration du bassin versant. Elle s'écrit :

$$Q_{\max .p\%} = \frac{c . i_{tc} . A}{3.6}$$

Avec,

A : Surface du sous bassin (km²) ;

i_{tc} : Intensité moyenne maximale des précipitations pendant une durée égale au temps de concentration en mm/h ;

C : coefficient de ruissellement de la crue considérée pour une probabilité P%.

Cette formule est bien adaptée aux petits bassins (Taha et Hugo Année et Bobee et Lemonier, 2001).

D - Formule de SOKOLOVSKY

s'écrit :

$$Q_{\max .p\%} = \frac{0.28 (P_{tc} - H_o) . a\% . F . A}{T_m}$$

Avec,

A: superficie du bassin versant (km²) ;

H₀ : pertes initiales en mm. H₀ = 8 mm ;

α_% : coefficient de ruissellement de la crue probable pour une période donnée ;

F : Coefficient de forme de la crue ;

t_m = t_c .

I.6 Hystérésis

I.6.1 Définition

L'hystérésis (ou hystérèse) est la propriété d'un système dont l'évolution ne suit pas le même chemin selon qu'une cause extérieure augmente ou diminue.

I.6.2 Sources de l'hystérésis

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

L'origine des sédiments dans le réseau d'écoulement sont le lit, les berges et les affluents. Le ruissellement qui s'échappe des pentes dénudées crée les ravines, les pointes de crues très fortes, le sapement des berges et l'alluvionnement du lit. L'érosion en nappes des versants n'apporte qu'une faible part au transport solide des oueds (Demmak, 1982). Les sources majeures des sédiments directement mobilisés par les Oueds lors des fortes crues se trouvent au niveau des ravinements, des éboulements en masse des versants entaillés par la divagation des oueds.

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

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

II Etude Morphométrique

II.1 Introduction

Les indices morphométriques classiques ont été les toutes premières mesures créées par les géomorphologues afin de quantifier l'influence théorique de la morphologie des bassins versants sur leur réponse hydrologique de surface (Douvinet, Delahaye, Langlois, 2007).

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

Dans ce chapitre on va présenter les principales caractéristiques physiques et climatiques du bassin versant, les données du milieu physique dont nous disposons, et l'interprétation que nous pouvons en faire quant au fonctionnement hydrologique de notre site d'étude.

Les principaux paramètres morphométriques qui agissent sur la variation du régime hydraulique sont : le profil en long, la densité de drainage et, les rapports de confluence et de longueur.

II.2 Situation géographique du bassin versant

Le bassin de l'oued Zeddine s'étend sur 435 km² à l'ouest de la ville d'Ain Defla et se situe au nord du grand bassin hydrographique du Chélif (figure II.1). Il est entre 1.8° 35.9' et 2.1° 36.0' de longitude Est et entre 1.95° 36.13' et 2° 35.8' de latitude Nord (ANRH, 2017).

L'essentiel du réseau hydrographique draine des terrains tertiaires (Éocène, Pliocène) et quaternaires. C'est un bassin versant moyennement accidenté, avec des altitudes qui varient entre 183 et 1 786 m. Elles sont maximales au sud et minimales au nord (figure II.2). Le relief montagneux de la partie sud et de l'extrême nord est défini par des pentes très fortes dépassant les 30 %. Les pentes plus douces, qui s'abaissent à 2 %, occupent plus de 60 % de la superficie du bassin en direction du nord et à proximité de la retenue du barrage (figure II.3). Le chevelu hydrographique suit pratiquement les accidents tectoniques importants, soulignés par des alluvions grossières essentiellement conglomératiques, des sables aux galets (Touahir, 2007).

L'importance du drainage est principalement due à la nature imperméable des formations qui constituent le bassin mais aussi à la forte déclivité des pentes et à l'occurrence de pluies irrégulières et violentes (Touahir, 2007).

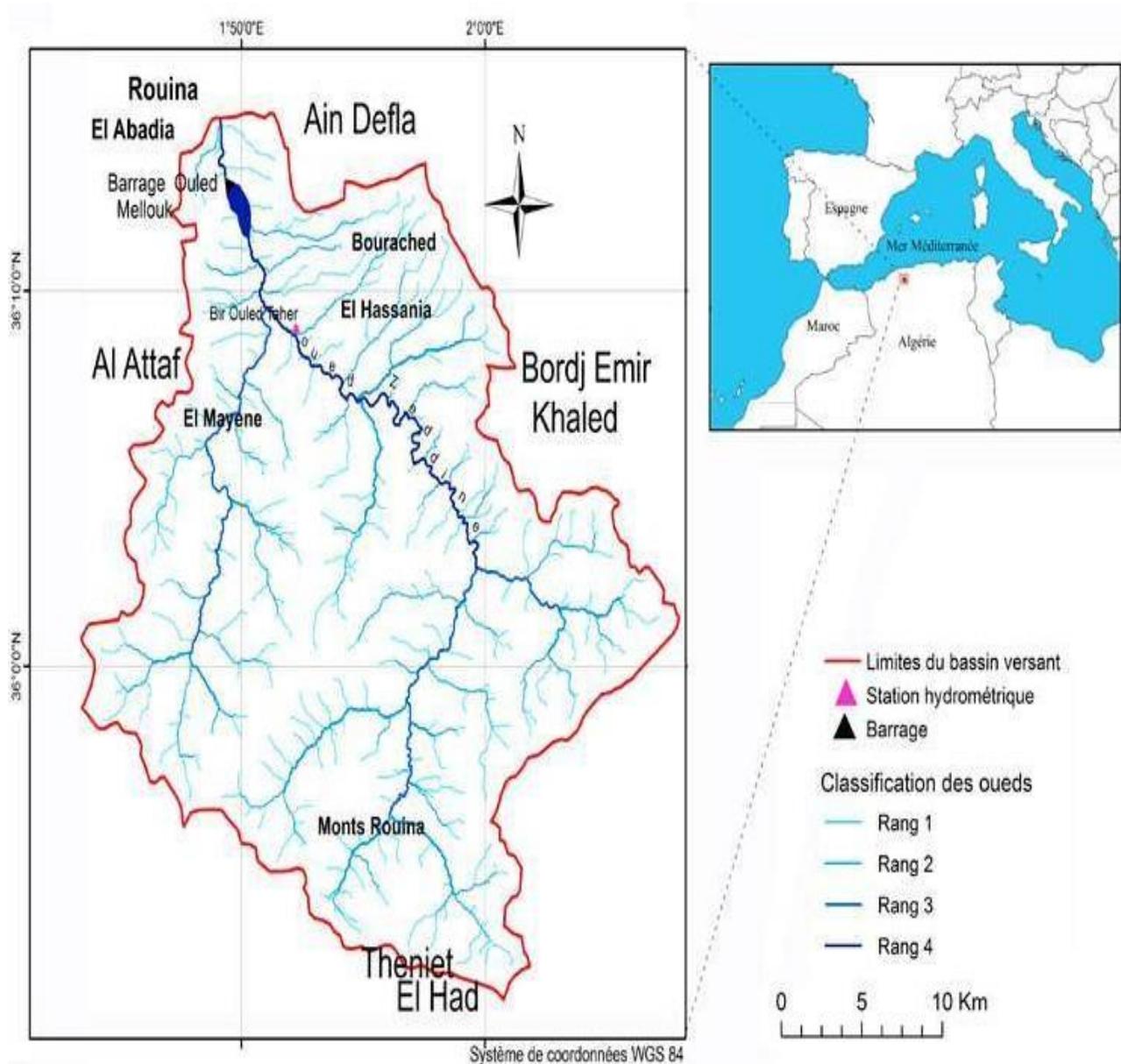


Figure II.1 Carte de localisation du bassin versant de l'Oued Zeddine (Touahir et al., 2018).

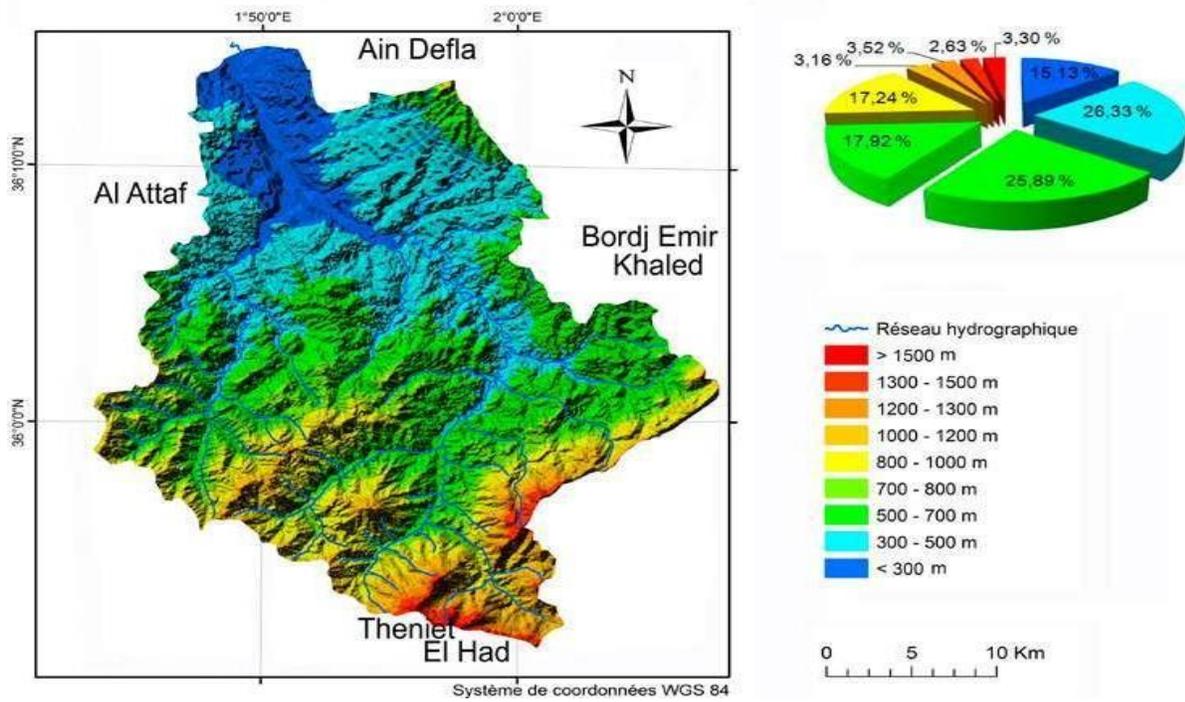


Figure II.2 Carte du relief et répartition en classes d'altitude (Touahir et al., 2018).

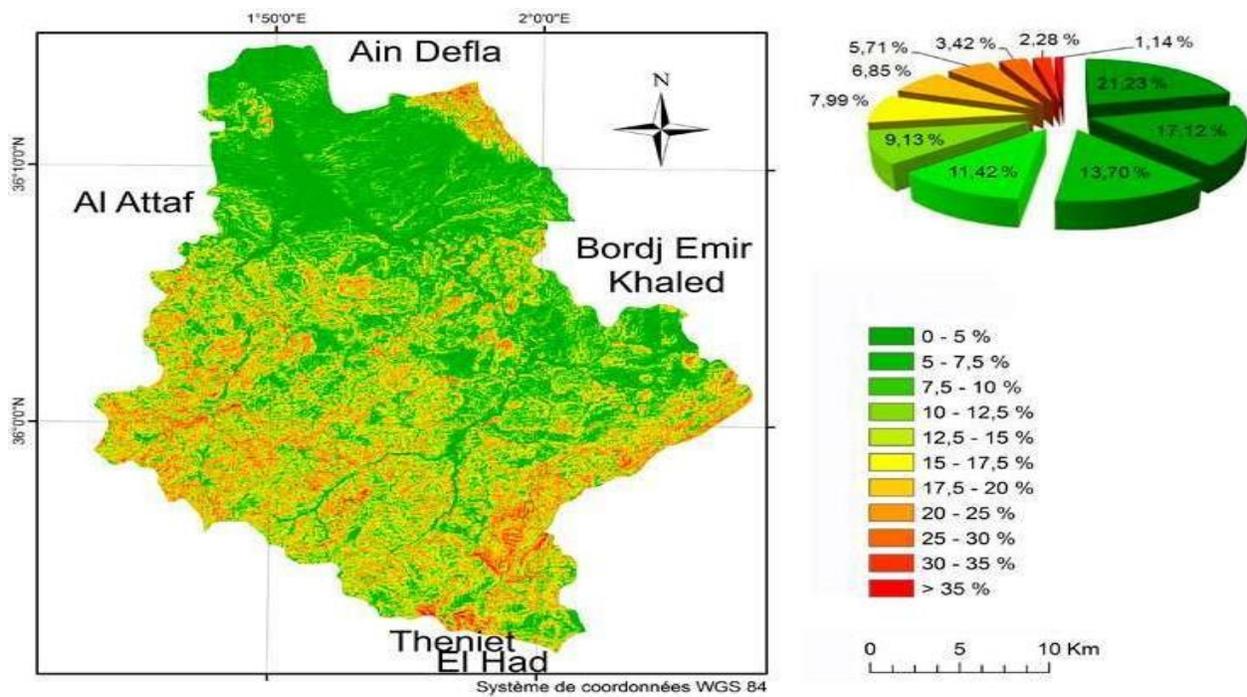


Figure II.3 Carte des pentes et répartition en classes de pente (Touahir et al., 2018).

II.3 Paramètre géométrique

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage.

Diverses caractéristiques morphologiques sont à définir : en premier lieu, la taille du bassin (sa surface), sa forme, son élévation, sa pente et son orientation. Comme, on ajoute le type de sol, le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique.

Ces facteurs, d'ordre purement géométrique ou physique, s'estiment aisément à partir des cartes adéquates ou en recourant à des techniques digitales et à des modèles numériques.

a. Superficie et Périmètre du bassin versant

La surface du bassin versant ainsi que son périmètre ont été déterminé par l'utilisation de la technique de digitalisation de la carte topographique à l'échelle 1/200.000 grâce au logiciel (MapInfo 6,5), qui établit un modèle numérique du terrain (M.N.T) de ce bassin.

Cette technique, nous a permis d'estimer avec une grande précision la surface de notre bassin versant l'Oued Zeddine (435,00 km²), et le périmètre correspondant d'une valeur de 113,30 km.

Pour représenter le bassin versant sous forme d'un rectangle, on inclut la notion de rectangle équivalent ayant la même surface et le même périmètre (ou le même coefficient de compacité) et donc par conséquent la même répartition hypsométrique.

Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau.

II.4 Caractéristique de forme

II.4.1 Indice de compacité de Gravelius, K_c

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Ce phénomène est lié à la notion de temps de concentration (Nianga, 2012).

Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux. Citons à titre d'exemple l'indice de compacité de **Gravelius (1914)** K_c , défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface.

Le coefficient de compacité est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire, et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée Tableau II.1. Sa formule s'écrit:

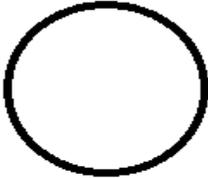
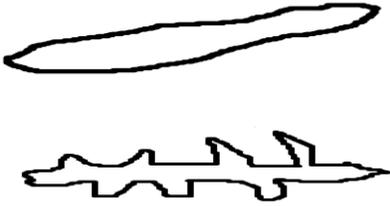
$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Où,

P : périmètre du bassin versant (km) ;

A : superficie du bassin versant (km²).

Tableau II.1 Classes de formes de cuvette oasienne suivant les valeurs de l'indice de Gravelius (Barké et al., 2017).

Forme	Valeur de l'indice	définition	Schema stylisé
circulaire	1 à 1,03	Cuvette ayant la forme de cercle	
Ovoïde	1,03 à 1,3	Cuvettes Ovoïdes	
Amiboïde	1,3 à 1,4	Cuvette caractérisée par une association de plages irrégulières, lobées, d'aspect amiboïde, à contours nets, très contrastés	
Étirée	1,4 à 1,7	Cuvettes allongées	
Très étirée à tendance amiboïde	> 1,7	Cuvettes plus étirées que les précédentes, elles présentent souvent des fragments amiboïdes c'est-à-dire des contours lobés	

Calcule le Kc : On a

$$P = 113,30 \text{ km}$$

$$A = 435 \text{ km}^2$$

Donc après les calculs, le coefficient de compacité de Gravelius Kc égale à 1,52.

Et comme $1,4 < 1,52 < 1,7$ donc le bassin de l'oued Zeddine présente une forme allongée, cette forme induit de faibles débits de pointe de crue (Bentekhici et Saad 2016) et favorise une érosion linéaire et régressive.

II.4.2 Rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent a été introduite dans l'étude géomorphologique des bassins. Elle permet la comparaison des bassins entre eux de point de vue de l'écoulement, en possédant la même superficie et le même périmètre que le bassin considéré.

Le rectangle équivalent est caractérisé par la longueur « L » et la largeur « l » défini par deux méthodes :

Méthode 1 : définit respectivement par les formules suivantes :

$$L : \text{longueur} = \frac{Kc \sqrt{A}}{1.128} \left[1 + \sqrt{\left(1 - \frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right]$$

$$l : \text{largeur} = \frac{Kc \sqrt{A}}{1.128} \left[1 - \sqrt{\left(1 - \frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right]$$

Méthode 2 : Ces deux critères permettent de définir ce que l'on appelle le rectangle équivalent :

$$A = L \times l \quad \& \quad P = 2 \times (L + l)$$

Avec,

L et l sont respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent ;

P : périmètre du bassin versant (km) ;

A: superficie du bassin versant (km²).

Et, L et l sont les solutions de l'équation : $x^2 - (P/2)x + A = 0$

Il faut implicitement pour que ce rectangle existe que : $P^2 > 16 A$ soit $P > 4 \times A^{1/2}$

Après les calculs, la longueur et la largeur du rectangle équivalent du bassin versant de l'Oued Zeddine sont respectivement 47,49 (km) et 9,16 (km). Les caractéristiques de forme du bassin versant de l'Oued Zeddine sont résumées dans le tableau II.2.

Tableau II.2 Caractéristiques de forme du bassin versant de l'Oued Zeddine.

Bassin	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	K _c	Rectangle Equivalent		Forme
				Longueur (km)	Largeur (Km)	
Oued Zeddine	435	113,30	1,52	47,49	9,16	Allongée

II.4.3 Coefficient de Circularité

La circularité d'un Bassin versant, est le rapport entre l'aire du Bassin versant et l'aire d'un cercle ayant le même périmètre que ce dernier, elle est de forme :

$$R_{ci} = 4 A \pi / P^2$$

Avec,

R_{ci} : Coefficient de Circularité ;

A : la surface du bassin versant (km²) ;

P : le Périmètre du bassin versant (km).

Une valeur de 1 indique un cercle parfait, et une valeur tendant vers 0 caractérise une forme allongée. Dans notre cas, R_{ci} = 0,43, la forme de notre bassin est allongée.

II.5 Etude du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin.

Il peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux : la structure géologique qui prédomine dans le bassin, le climat qui règne sur la région, la pente des terrains et l'influence de l'action humaine sur le tracé du réseau par l'implantation des différents aménagements hydrauliques (ANRH, 2017).

Divers paramètres descriptifs sont utilisés pour définir le réseau hydrographique. Parmi eux, les plus importants sont : la densité de drainage (D_d), le rapport de confluence (R_c) et le rapport des longueurs (R_l).

II.5.1 La pente moyenne du cours d'eau

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin dans le temps de concentration, elle est donnée par la formule suivante :

$$P_{\text{moy}} = \Delta H_{\text{max}} / L$$

Avec :

P_{moy} : pente moyenne du cours d'eau (m/km) ;

ΔH_{max} : dénivellation maximale de la rivière (m) (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'émissaire) $\Delta H_{\text{max}} = (688,20 - 355,50) = 332,70$ m ;

L : longueur du cours d'eau principal [km] ;

$L = 34.25$ (km).

Après les calculs, on trouve que la pente moyenne du cours d'eau est de $p_{\text{moy}} 0,97$ (%)

II.5.2 Densité de drainage

Elle est définie pour un bassin versant donnée de surface «A», comme la longueur totale des cours d'eaux de tous les ordres sur la surface drainée, elle est exprimée en Km/Km². Elle s'écrit :

$$D_d = \sum L / A$$

Avec,

D_d : Densité de drainage ;

$\sum L_i$: somme des longueurs de tous les cours d'eau d'ordre i (km). $\sum L_i = 321,70$ (km) ;

A : surface du bassin versant (Km²). $A = 435,00$ (km²).

Après les calculs, on a trouvé que la densité de drainage est de $0,74$ (Km/Km²).

La caractéristique du drainage est due principalement à la nature des formations qui forment le bassin ainsi qu'aux pentes assez fortes des versants d'une part et d'autre part au régime climatique, caractérisé par son aridité et ses pluies irrégulières et violentes (Bouanani, 2004).

II.5.3 Densité hydrographique

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface s'écrit :

$$F = \sum N_i / A$$

Avec,

F : densité hydrographique (km⁻²) ;

N_i : nombre de cours d'eau (N_i=9) ;

A : superficie du bassin (km²).

L'ou F = 20,07 (km⁻²). à partir de cette valeur, on peut dire que notre bassin présente un substratum imperméable a couvert végétal faible et a un relief faible très accidenté (Bentekhici et Saad 2016).

II.5.4 Rapport de confluence

Il s'agit d'une adaptation de la méthode du nombre puisque le rapport de confluence R_c est obtenu en divisant le nombre N de cours d'eau de rang n par le nombre de cours d'eau de rang n+1 de telle sorte que (Bravard & Petit 2002). Il est de la forme :

$$R_c = N_n / N_{(n+1)}$$

Où,

R_c : Rapport de confluence ;

N_n : Nombre de cours d'eau d'ordre n.

II.5.5 Rapport de longueur

Le rapport de longueur (R_L) est défini par la relation suivante :

$$R_L = L_{(N+1)} / L_N$$

Où,

L_N : Longueur de cours d'eau d'ordre N.

II.5.6 Fréquence des cours d'eau

Elle correspond au nombre de cours d'eau par unité de surface, elle est donnée par la relation suivante. Elle s'écrit :

$$F_s = n/A$$

Avec,

n : Nombre des cours d'eaux ;

A : Aire du bassin versant (km²).

II.6 Etude du relief

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin. Partant de la répartition par tranches d'altitudes du bassin, on présente la courbe hypsométrique et le diagramme de fréquence altimétrique.

Le type du relief est déterminé soit à partir de la relation d'indice de pente globale, soit par la formule de la dénivelée spécifique.

II.6.1 Hypsométrie

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.

Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée.

Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude.

La courbe hypsométrique donne des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage. Elle fournit déjà pas mal de renseignements qualitatifs sur l'allure du relief.

Une pente forte à l'origine (vers les plus basses altitudes) indique souvent des plaines ou des pénéplaines ; si la pente est très forte, il y a des chances pour qu'on ait de vastes zones d'inondation.

Une pente très faible dans la même région révèle au contraire une vallée encaissée. Une pente forte dans le milieu ou dans les hautes altitudes indique probablement un grand plateau, etc.

La répartition de la surface du bassin versant de l'Oued Zeddine, par tranche d'altitude, nous a permis d'établir la courbe hypsométrique (tableau II.3 et figure II.4).

Tableau II.3 Surfaces partielles du bassin versant par tranche d'altitude.

Altitude $H_i - H_{i-1}$ (m)	H_i (m)	surface				$H_i \cdot S_i$ (m . Km ²)
		partielles		cumulées		
		S_i (Km ²)	S_i (%)	S_i (Km ²)	S_i (%)	
1759-1650	1704,5	2,30	0,5287356	2,30	0,1402952	3920,35
1650-1500	1575,00	4,30	0,9885057	6,60	0,4025863	6772,5
1500-1350	1425,00	11,50	2,6436782	18,10	1,1040625	16387,5
1350-1200	1275,00	19,50	4,4827586	37,60	2,293522	24862,5
1200-1050	1125,00	40,10	9,2183908	77,70	4,7395389	45112,5
1050-900	975,00	68,80	15,816092	146,50	8,9361962	67080
900-750	825,00	63,70	14,643678	210,20	12,821764	52552,5
750-600	675,00	85,50	19,655172	295,70	18,037087	57712,5
600-450	525,00	114,00	26,206897	409,70	24,99085	59850
450-323	386,50	25,30	5,816092	435,00	26,534098	9778,45
	435,00	100,00	1639,40	100,00		

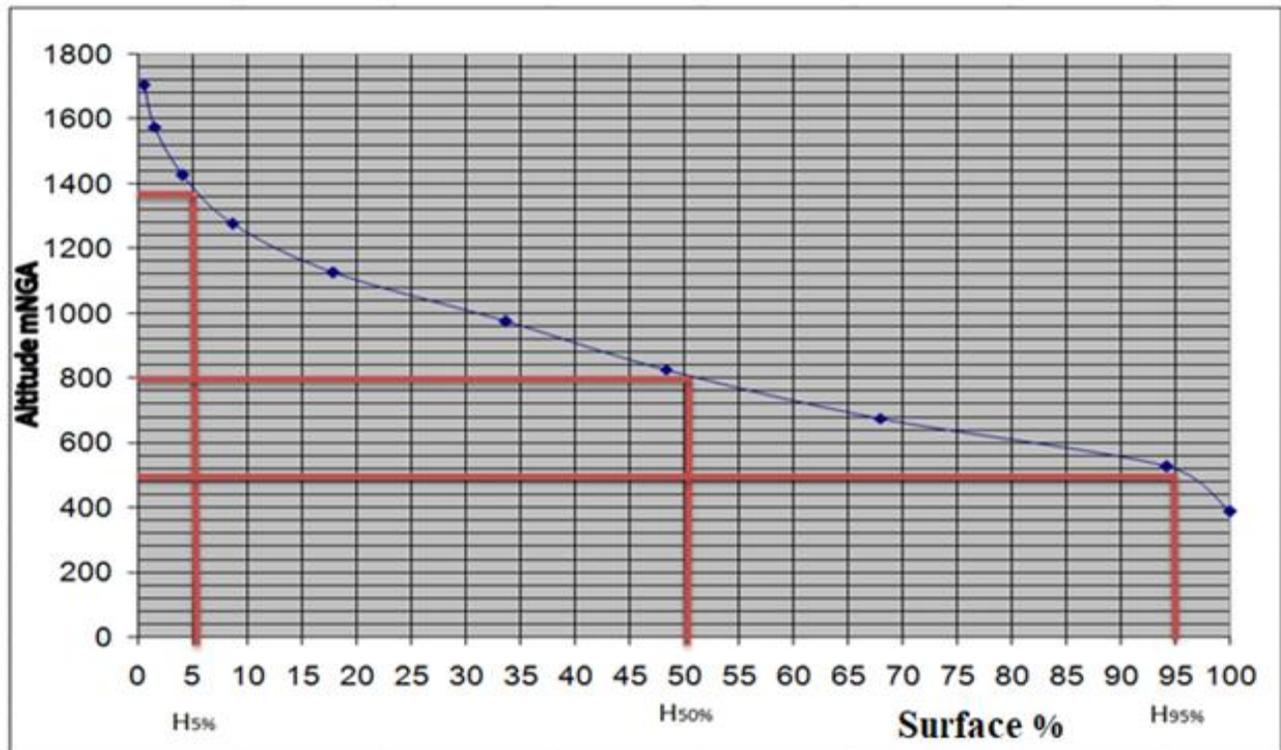


Figure II.4 Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Zeddine.

II.6.2 Altitudes caractéristiques

A - Les altitudes maximale et minimale

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire.

Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente, donc d'après la carte topographique, on a :

$$H_{\max} = 1759,00 \text{ (m)} \text{ et } H_{\min} = 323,00 \text{ (m)}$$

B - L'altitude moyenne du bassin versant

L'altitude moyenne est calculée par la formule suivante :

$$H_{\text{moy}} = \sum A_i \cdot H_i / A$$

Avec,

A_i : surface partielle entre deux courbes de niveau consécutives n-1 et n en (Km²) ;

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau consécutives n-1 et n en (m) ;

A : Superficie du bassin versant en (Km²).

Après les calculs, l'altitude moyenne de notre bassin d'étude est de 1307,30 (m).

C - L'altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50 % de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière. D'après la courbe hypsométrique (figure II.4), l'altitude médiane est de 800 (m).

D - Pente moyenne du bassin versant

Elle est donnée par la relation suivante :
$$I_m = \frac{\Delta H(0.5l_1 + l_2 + l_3 + \dots + 0.5l_n)}{A}$$

Avec,

ΔH : Dénivelée entre deux courbes de niveau successives (m) ;

$L_1 L_2 \dots L_n$: les longueurs des courbes de niveaux (m) ;

A : superficie du bassin versant (Km²).

Les longueurs des courbes de niveau sont représentées dans le tableau II.4.

Tableau II.4 Les Courbes de niveau et leurs longueurs du bassin versant de l'Oued Zeddine

N°	Altitude $H_i - H_{i-1}$ (m)	ΔH_i (m)	L_i (m)
01	323 - 450	127	47000,00
02	450 - 600	150	97500,00
03	600 - 750		90300,00
04	750 - 900		123000,00
05	900 - 1050		76500,00
06	1050 - 1200		40900,00
07	1200 - 1350		29500,00
08	1350 - 1500		9000,00
09	1500 - 1650		9300,00

Après les calculs, la pente moyenne du bassin versant de l'Oued Zeddine est de 0,164, soit 16,40%.

II.7 Les indices de pente et relief

II.7.1 Indice de pente de Roche I_p

I_p est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces comprises entre 2 courbes de niveau H_i et H_{i-1} .

I_p est calculé par la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n \sqrt{A_i D_i}$$

Avec,

L : longueur de rectangle équivalent (m) ;

A_i : surface partielle (%) comprise entre 2 courbes de niveau consécutives H_i et H_{i+1} .

Les démarches de calcul sont représentées dans le tableau (II.5).

Tableau II.5 Détermination de la pente de Roche Ip du bassin versant de l'Oued Zeddine

Altitude $H_i - H_{i-1}$ (m)	ΔH_i (m)	Si (Km ²)	$A_i = S_i/S_t$ (%)	$(\Delta H_i \cdot A_i)1/2$
1759-1650	109	2,3	0,528735632	7,60
1650-1500	150	4,3	0,988505747	12,17
1500-1350	150	11,5	2,643678161	19,91
1350-1200	150	19,5	4,482758621	25,93
1200-1050	150	40,1	9,218390805	37,18
1050-900	150	68,8	15,81609195	48,7
900-750	150	63,7	14,64367816	46,86
750-600	150	85,5	19,65517241	54,3
600-450	150	114	26,20689655	62,7
450-323	127	25,3	5,816091954	27,17
	435,00	100,00	342,52	

L'indice de pente de Roche est de $I_p = 1,57 \%$.

II.7.2 Indice de pente globale I_g

A partir de la courbe hypsométrique, nous déduisant les altitudes de fréquence 5% et 95% de la surface du bassin versant. L'indice de pente global est donné par :

$$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L}$$

Avec,

L : longueur du rectangle équivalent ;

A partir le Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Zeddine (Figure II.4)

$H_{5\%} = 1360$ (m) , $H_{95\%} = 520$ (m) et $L = 47,49$ (km).

Après les calculs, l'indice de pente globale du bassin d'étude est de $I_g = 17,9$ (%) (tableau II.6).

Tableau II.6 Classification du relief selon I_g par l'ORSTOM.

Relief	I_g (m/km)
Relief très faible	$I_g < 0,002$
Relief faible	$0,002 < I_g < 0,005$
Relief assez faible	$0,005 < I_g < 0,01$
Relief modéré	$0,01 < I_g < 0,02$
Relief assez fort	$0,02 < I_g < 0,05$
Relief fort	$0,05 < I_g < 0,5$
Relief très fort	$0,5 < I_g$

Pour atténuer l'influence de la surface sur l'indice de pente I_g , les chercheurs de l'ORSTOM ont introduit la dénivelée spécifique D_s

II.7.3 Dénivelée spécifique D_s

Elle s'écrit :

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{A}$$

$$D_s = 17,9 \times \sqrt{435}$$

$$D_s = 373,4\text{m}$$

Avec,

I_g : Indice de pente global (m/km) ;

A : aire du bassin (km^2).

En se rapportant à la classification de l'ORSTOM du relief selon D_s (tableau II.7), le bassin du l'Oued Zeddine présente un relief fort.

Tableau II.7 Classification du relief selon la méthode de L'ORSTOM (D_s)

Classe	Type de relief	D_s
R1	10	Relief très faible
R2	$10 \text{ m} < D_s < 25 \text{ m}$	Relief faible
R3	$25 \text{ m} < D_s < 50 \text{ m}$	Relief assez faible
R4	$50 \text{ m} < D_s < 100 \text{ m}$	Relief modéré
R5	$100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$	Relief assez fort
R6	$250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$	Relief fort
R7	$D_s > 500 \text{ m}$	Relief très fort

Les caractéristiques du relief sont résumées dans le tableau II.8.

Tableau II.8 Indice de pente et Relief du Bassin versant de l'Oued Zeddine

Bassin	I_p	I_g (m/km)	Relief selon « I_g »	D_s (m)	Relief selon « D_s »
Zeddine	1,57	17,9	Très fort	373,4	Fort

II.7.4 Temps de concentration

C'est le temps que met la particule d'eau la plus éloignée pour arriver à l'exutoire. Il existe plusieurs formules. Dans le contexte algérien et pour les grands bassins versants, il peut être notamment calculé par l'ancienne formule de Giandotti (1937) (ANRH, 2017).

Pour sa détermination, on utilise la formule la plus utilisée en Algérie celle de Giandotti :

Formule de Giandotti (1937): elle est de la forme :

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L_{cp}}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \text{ (heure)}$$

Avec,

L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (Km);

A : La superficie du bassin versant (Km²);

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant (m NGA);

H_{min} : Altitude minimale du bassin versant (m NGA).

t_c : Temps de concentration (heure)

AN : $t_c = 4,45$ heure

II.8 La géologie du bassin versant de l'Oued Zeddine

La lithologie du bassin versant de l'Oued Zeddine est constituée par le quaternaire continental (cette formation est représentée par des éoliennes, regs et terrasses), le Pliocène continental (représenté par des calcaires lacustres) et le Miocène inférieur marin (représenté par une formation marneuse) (ANRH, 2017).

II.9 La végétation

La végétation du bassin est constituée essentiellement de maquis représentant environ 30 % de l'ensemble du bassin (forêt dégradée).

Elle est soumise à un surpâturage et est discontinue dans l'espace. Cette présentation des différents facteurs physico-géographiques permet d'émettre les conclusions suivantes :

- les facteurs morphométriques sont très favorables à l'écoulement superficiel.
- les facteurs lithologiques sont favorables à l'infiltration des eaux.

la végétation est favorable au ruissellement et par conséquent à l'érosion et au transport solide (ANRH, 2017).

II.10 Le climat

Le climat dans le sous bassin de l'Oued Zeddine est de type semi-aride, humide et froid en hiver et chaud et sec en été.

- Les précipitations : Le bassin reçoit entre 300 et 500 mm de pluie par an (ANRH, 2017). Après une étude critique des éléments antérieurement obtenus, la précipitation annuelle moyenne du bassin versant a été fixée à 461 mm/an (ANBT, 2017).
- La température : Les températures moyennes de la région subissent des variations saisonnières. Le contraste saisonnier est bien marqué entre l'hiver et l'été. Les minima thermiques sont généralement atteints en janvier, les maxima en juillet et août qui peut atteindre les 41 °C (ANRH, 2017).
- Le vent le bassin versant subi un fort vent stable de décembre a avril et des vents calmes de juin à octobre (ANRH, 2017).

Les caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant de l'Oued Zeddine sont résumées dans le tableau (II.9)

Tableau II.9 Caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant de l'Oued Zeddine

Caractéristiques		Symbole	Unité	Valeur
Surface		A	Km ²	435
Périmètre		P	Km	113,30
Altitude	Maximale	H _{max}	M	1759
	Moyenne	H _{moy}		1307,30
	Médiane	H _{50%}		800
	Minimale	H _{min}		323
	fréquence 5 %	H _{5%}		1360
	fréquence 95 %	H _{95%}		520
Indice de compacité		K _C	/	1.52
Longueur du rectangle équivalent		L	M	47,49
Largeur du rectangle équivalent		l	M	9,16
L'indice de pente de Roche		I _p	%	1,57
Indice de pente globale		I _g	%	17,9
Dénivelée spécifique		D _s	M	373,4
Pente moyenne du bassin		I _m	%	16,40
Longueur du cours d'eau principal		L _C	Km	34,25
Densité de drainage		D _d	Km/km ²	0,74
Densité hydrographique		F	km ⁻²	20,07
Pente moyenne du cours d'eau		P _{moy}	%	0,97
Temps de concentration		t _c	Heure	4,45

Chapitre III

Concentrations des
sédiments en suspension et
débits liquides dans le
bassin versant de l'Oued
Zeddine

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

Introduction

La relation entre la concentration des sédiments en suspension C et le débit liquide Q_l constitue une relation fondamentale en matière de transport solide. La concentration des sédiments en suspension C et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance $C = aQ_l^b$ (Etchanchu et Probst, 1986). Depuis des années, on a essayé de caractériser les paramètres a et b afin de mieux les définir (Benkhaled et Remini, 2003 ; Bouanani, 2004).

Dans ce travail, les mesures des paramètres hydrométriques (hauteurs d'eau, débit liquide et concentration des matières en suspension à la station hydrométrique de Bir Ouled Tahar) ont été utilisés pour la quantification et la modélisation du transport solide. L'approche utilisée sur le bassin versant de l'Oued Zeddine (Algérie) est du type déterministe et utilise des modèles régressifs simples dont l'objectif est de trouver une ou plusieurs relations entre la concentration en matières en suspension et le débit liquide.

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

III.1 Corrélation entre la concentration des sédiments en suspension et le débit liquide dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

III.1.1 Données et méthodologie

Les données sont effectuées de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH, Alger), Elles sont réalisées à partir de la station hydrométrique de Bir Ouled Tahar où son Code est 011905.

L'étude est réalisée à partir des données collectées au niveau du bassin versant de l'Oued Zeddine allant du 1990 à 2013

A la station de Bir Ouled tahar, nous disposons d'une série de mesure de 3081 valeurs des hauteurs d'eau (H en m), des débits liquides (Q_1 en m^3/s) et des concentrations en matières en suspensions (C en g/l). L'utilisation du programme A.N.R.H. (concentre/Bashyd), nous a permis d'obtenir le débit solide en kg/s, pour chaque hauteur prélevée sur la base des matières en suspension observées. Il est donné par la relation suivante : $Q_s = C.Q_1$

Où,

Q_s : débit solide (kg/s) ;

C : la concentration (g/l) ;

Q_1 : débit liquide (m^3/s).

Ces données et utilisées pour la quantification du transport solide ont été analysées en vue d'en déterminer leurs fiabilité et validité c'est-à-dire une fois mesurées, les concentrations en MES sont corrélées aux débits liquides journaliers.

Les débits Liquides sont obtenus de deux façons: sur la base de la courbe de tarage à partir des hauteurs d'eau lues sur une échelle limnimétrique d'une part, et par dépouillement des hauteurs d'eau enregistrées par un limnigraphe à flotteur, d'autre part.

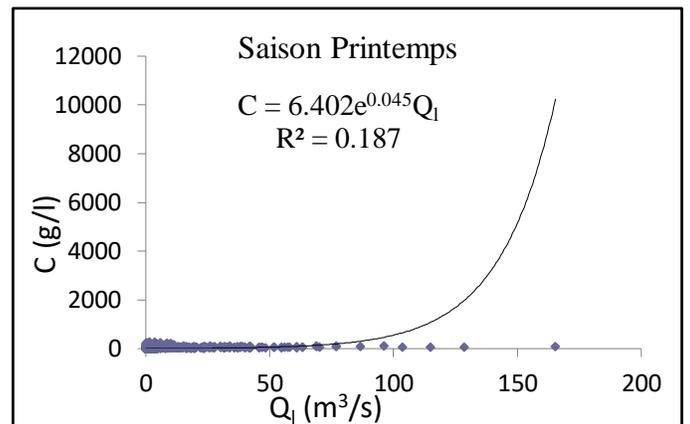
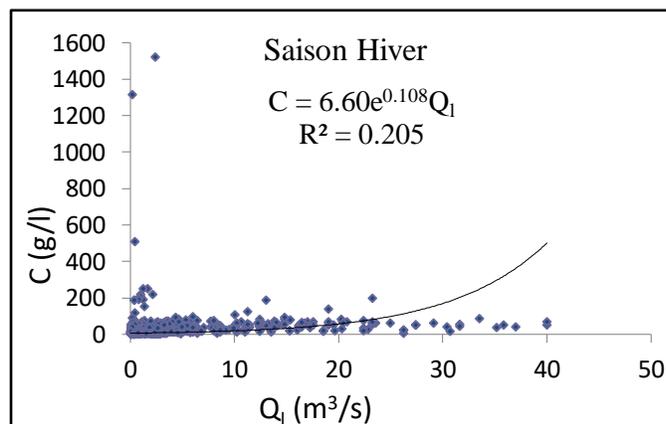
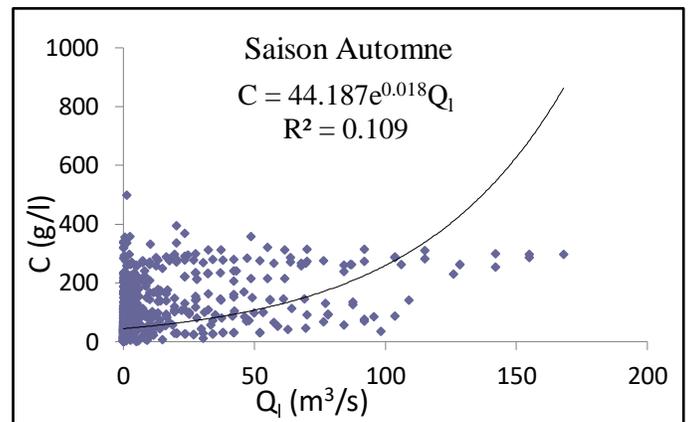
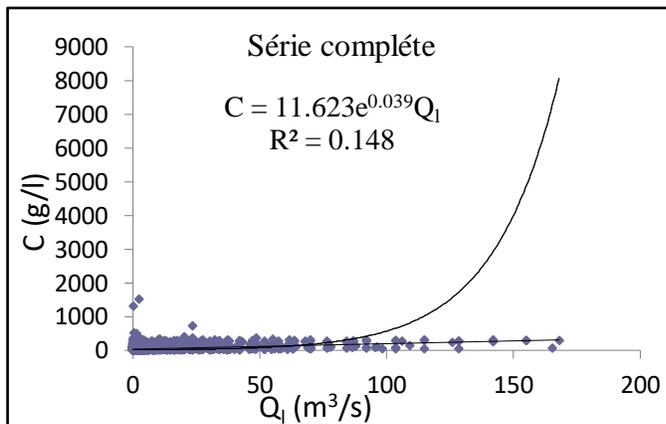
La concentration est obtenue d'après le protocole suivant :

A chaque lecture de hauteur d'eau, on prélève un échantillon d'eau, chargée, sur la rive à la surface de l'oued au moyen d'un flacon de 50 cl. Les sédiments filtrés sur papier- filtre sont

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

ensuite séchés à l'étuve pendant 30 min à une température de 105°C. Ramenée à l'unité de volume (1 litre), cette charge est attribuée à la concentration en suspension instantanée véhiculée par le cours d'eau en g/l. La cadence de prise des mesures varie selon l'ampleur de l'événement. En période de crue, les prises sont intensifiées jusqu'à des intervalles de temps d'une heure ou même de 30 min en fonction de la vitesse de l'augmentation des débits liquides. En période d'écoulement normal ou en période d'étiage, on se contente d'une prise quotidienne effectuée généralement à midi.

La relation entre les deux paramètres (C et Q_l) est étudiée de manière qualitative. Le rapport C/Q_l a été soumis à des relations linéaire, logarithmique, polynomiale, puissance et exponentielle. Ils sont nécessaires à étudier pour quantifier le transport solide en suspension. Les résultats sont représentés dans la figure (III.1, III.2, III.3, III.4 et III.5).



Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

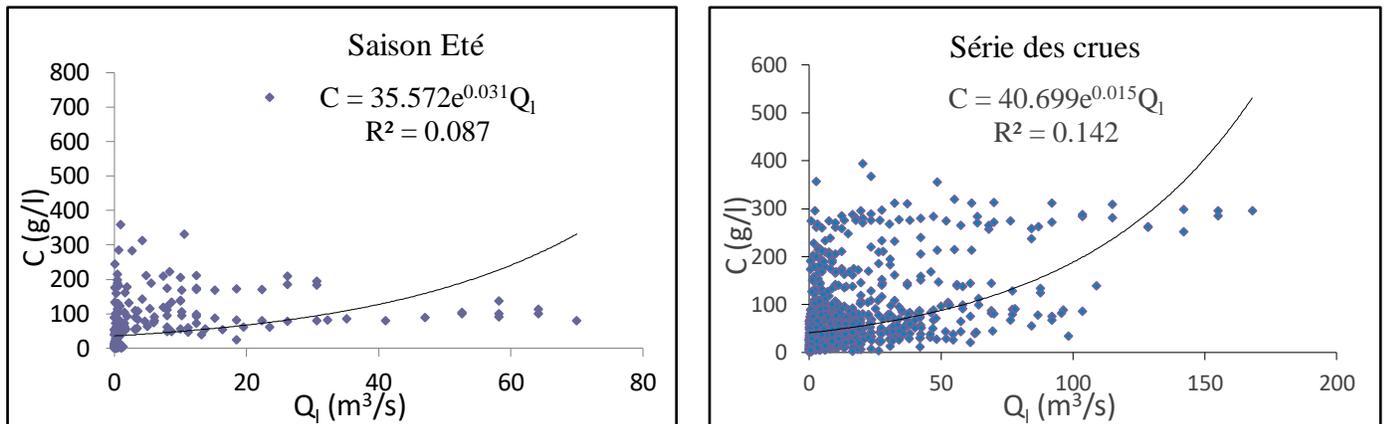
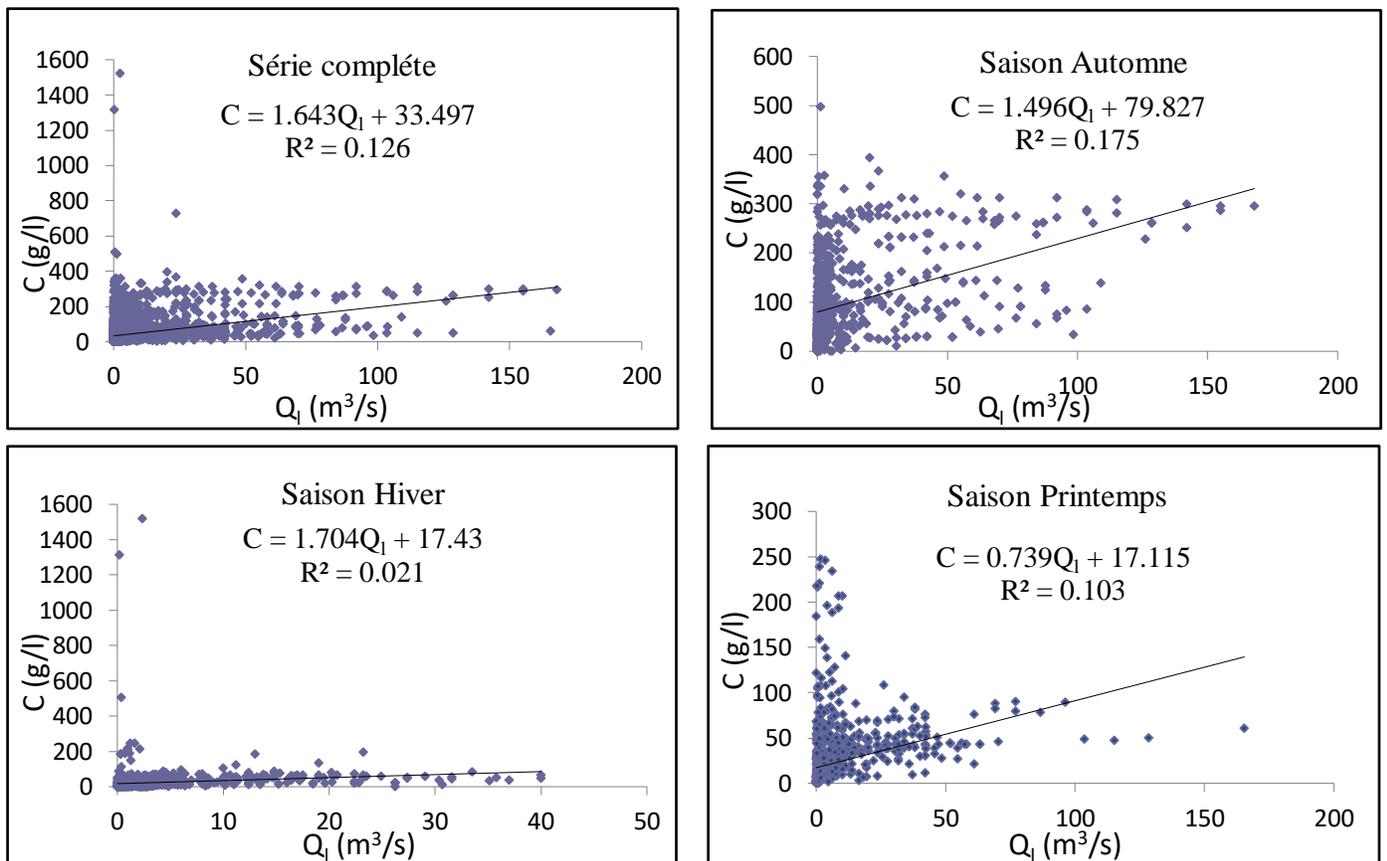


Figure III.1 Corrélations entre les concentrations des sédiments en suspension et les débits liquides à différente échelle par le modèle Exponentielle dans le bassin versant de l'Oued Zeddine (1990/2013).



Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

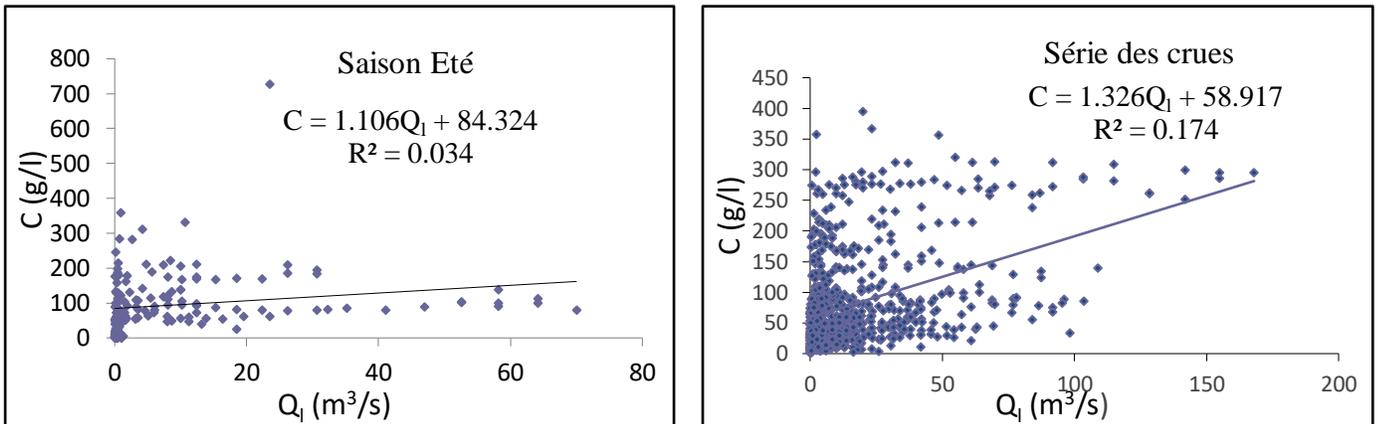
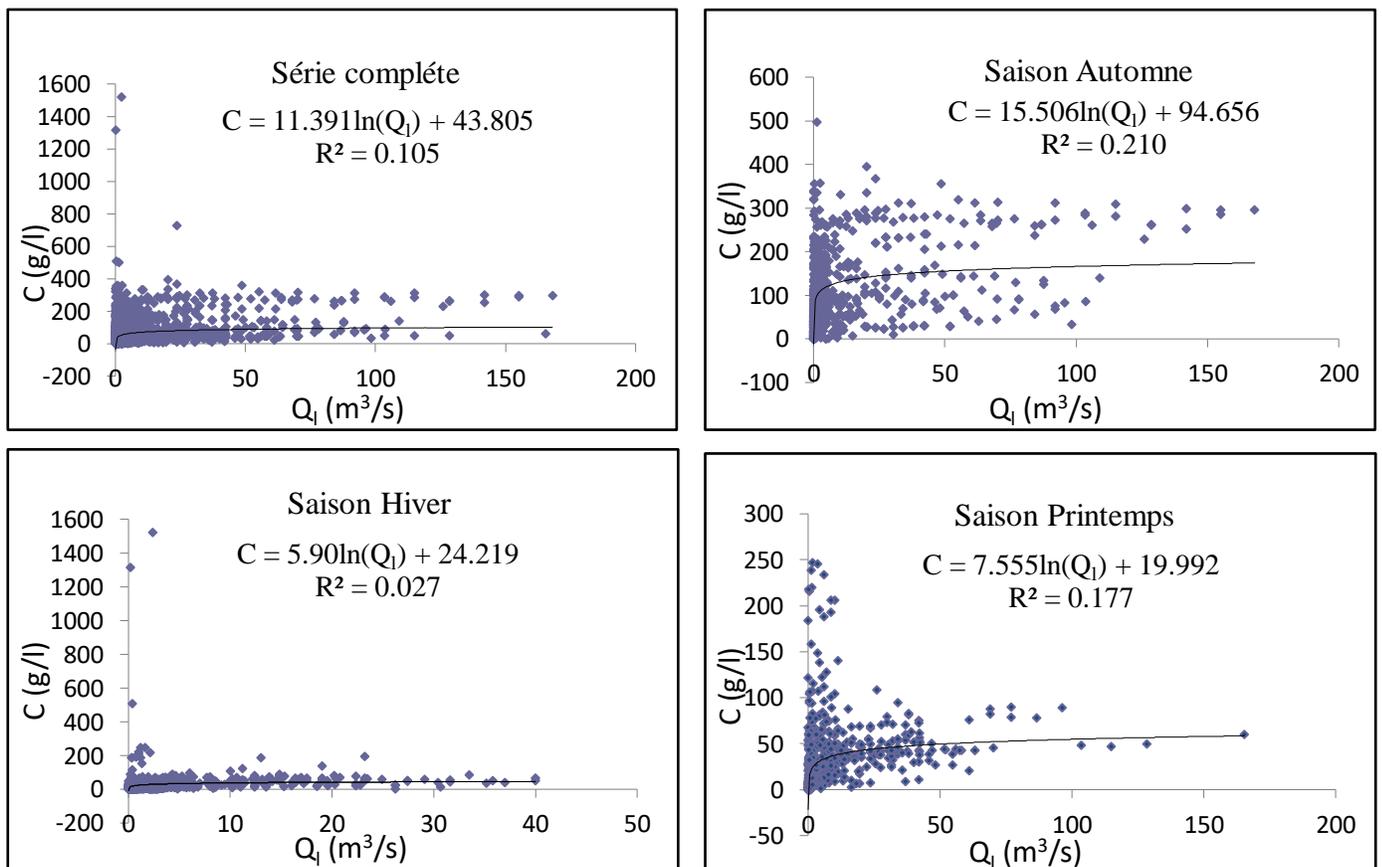


Figure III.2 Corrélations entre les concentrations des sédiments en suspension et les débits liquides à différente échelle par le modèle Linéaire dans le bassin versant de l'Oued Zeddine (1990/2013).



Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

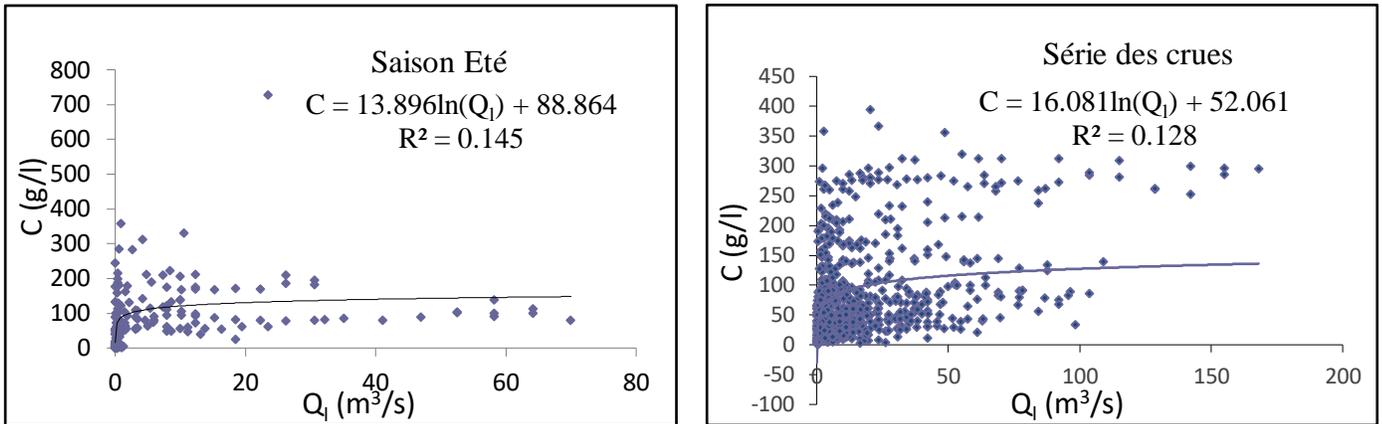
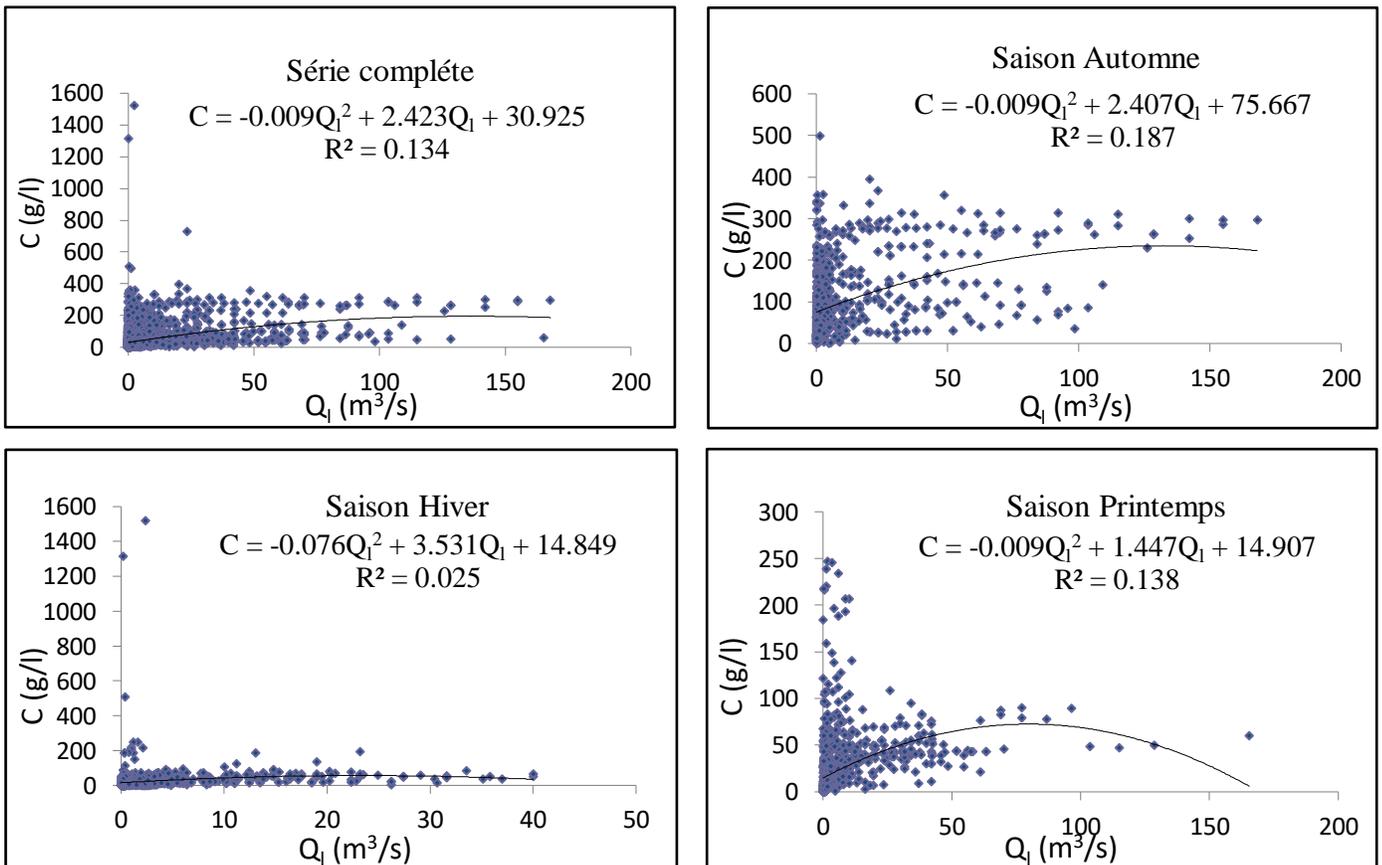


Figure III.3 Corrélations entre les concentrations des sédiments en suspension et les débits liquides à différente échelle par le modèle Logarithmique dans le bassin versant de l'Oued Zeddine (1990/2013).



Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

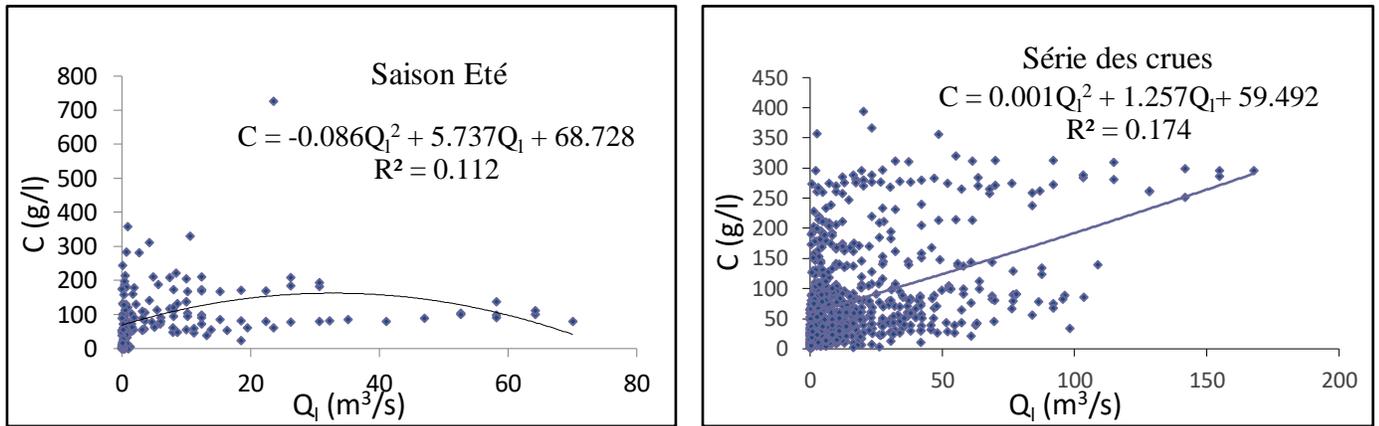
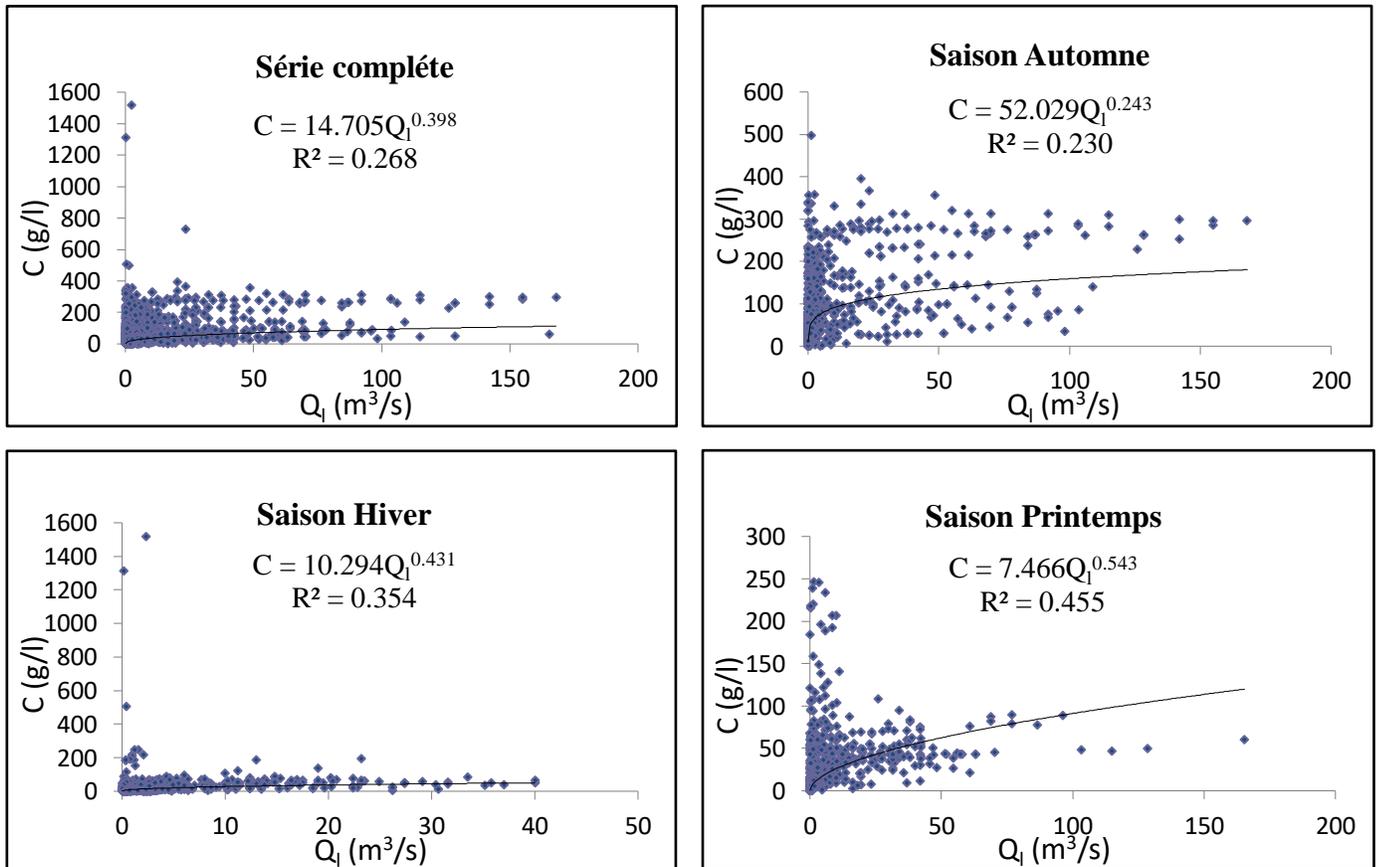


Figure III.4 Corrélations entre les concentrations des sédiments en suspension et les débits liquides à différente échelle par le modèle Polynomiale dans le bassin versant de l'Oued Zeddine (1990/2013).



Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

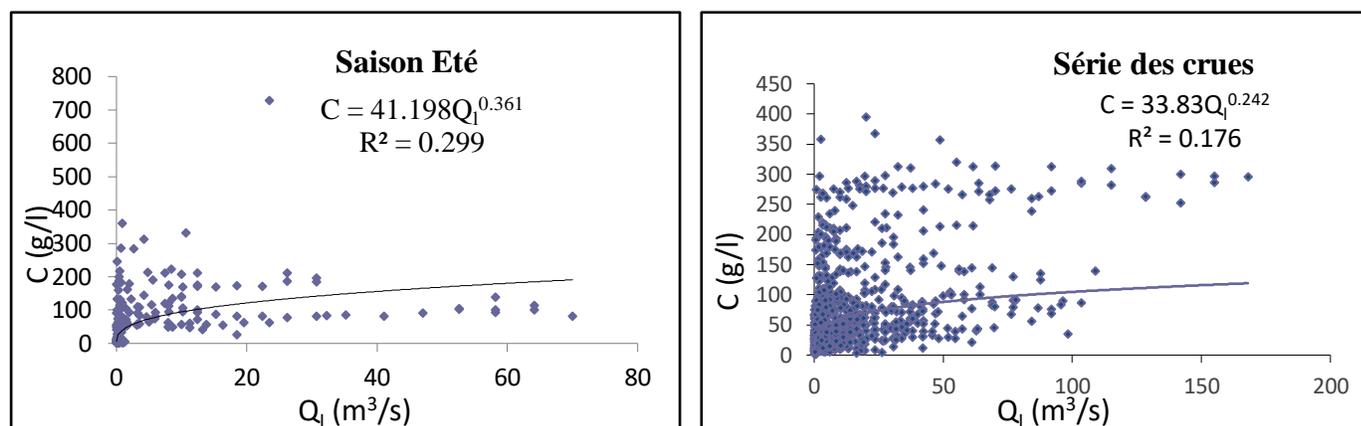


Figure III.5 Corrélations entre les concentrations des sédiments en suspension et les débits liquides à différente échelle par le modèle Puissance dans le bassin versant de l'Oued Zeddine (1990/2013).

III.1.2 Analyse des résultats

La mise en graphes des données des concentrations des sédiments en suspension et des débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine pour la période (1990-2013), montre une dispersion considérable pour tous les modèles étudiés (figure III.1, figure III.2, figure III.3, figure III.4 et figure III.5).

A partir des figures précédentes, on peut tirer les coefficients de corrélation « R » où R est la racine carrée du coefficient de détermination « R² » pour tous les modèles étudiés (exponentielle, linéaire, logarithmique, polynomiale et puissance). L'ensemble des relations ainsi les coefficients de détermination obtenus est donné dans le tableau suivant :

Tableau III.1 Relations concentration-débit liquide pour chaque échelle de temps dans le bassin versant de l'Oued Zeddine allant du 1990 à 2013.

Echelle temporelle	Nombre d'observation	Type de régression	Relations retenues	Coefficient de corrélation (R)	Coefficient de détermination (R ²)
Série complète	3081	Exponentielle	$C = 11.62 \times e^{0.04Q_l}$	0,39(39%)	0,15
		Linéaire	$C = 1.64Q_l + 33.50$	0,36(36%)	0,13
		Logarithmique	$C = 11.39 \ln(Q_l) + 43.81$	0,32(32%)	0,11
		Polynomiale	$C = -0.01Q_l^2 + 2.42Q_l + 30.93$	0,37(37%)	0,13

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

		Puissance	$C = 14.71Q_1^{0.398}$	0,52(52%)	0,27
Automne	757	Exponentielle	$C = 44.19e^{0.02}Q_1$	0,33(33%)	0,11
		Linéaire	$C = 1.50Q_1 + 79.83$	0,42(42%)	0,17
		Logarithmique	$C = 15.51\ln(Q_1) + 94.66$	0,46(46%)	0,21
		Polynomiale	$C = -0.01Q_1^2 + 2.41Q_1 + 75.67$	0,43(43%)	0,19
		Puissance	$C = 52.03Q_1^{0.24}$	0,48(48%)	0,23
Hiver	1101	Exponentielle	$C = 6.60e^{0.11}Q_1$	0,45(45%)	0,21
		Linéaire	$C = 1.70Q_1 + 17.43$	0,15(15%)	0,02
		Logarithmique	$C = 5.90\ln(Q_1) + 24.22$	0,16(16%)	0,03
		Polynomiale	$C = -0.08Q_1^2 + 3.53Q_1 + 14.85$	0,16(16%)	0,03
		Puissance	$C = 10.29Q_1^{0.43}$	0,60(60%)	0,35
Printemps	1066	Exponentielle	$C = 6.40e^{0.05}Q_1$	0,43(43%)	0,19
		Linéaire	$C = 0.74Q_1 + 17.12$	0,32(32%)	0,10
		Logarithmique	$C = 7.56\ln(Q_1) + 19.99$	0,42(42%)	0,18
		Polynomiale	$C = -0.01Q_1^2 + 1.45Q_1 + 14.91$	0,37(37%)	0,14
		Puissance	$C = 7.47Q_1^{0.543}$	0,68(68%)	0,46
Été	157	Exponentielle	$C = 35.57e^{0.03}Q_1$	0,30(30%)	0,09
		Linéaire	$C = 1.11Q_1 + 84.32$	0,18(18%)	0,03
		Logarithmique	$C = 13.90\ln(Q_1) + 88.86$	0,38(38%)	0,15
		Polynomiale	$C = -0.09Q_1^2 + 5.74Q_1 + 68.73$	0,34(34%)	0,11
		Puissance	$C = 41.20Q_1^{0.36}$	0,55(55%)	0,30
Crue	785	Exponentielle	$C = 40.70e^{0.02}Q_1$	0,38(38%)	0,14
		Linéaire	$C = 1.33Q_1 + 58.92$	0,42(42%)	0,17
		Logarithmique	$C = 16.08\ln(Q_1) + 52.06$	0,36(36%)	0,13
		Polynomiale	$C = 0.001Q_1^2 + 1.26Q_1 + 59.49$	0,42(42%)	0,17

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

		Puissance	$C = 33.83Q_l^{0.24}$	0,42(42%)	0,18
--	--	-----------	-----------------------	-----------	------

Le tableau III.1 montre que les coefficients de corrélation pour tous les modèles et pour les différentes échelles tendent vers zéro c'est-à-dire qu'il y a des mauvaises corrélations entre les concentrations des sédiments en suspension et les débits liquides (de 42 % pour la série des crues à 68 % pour la saison de printemps).

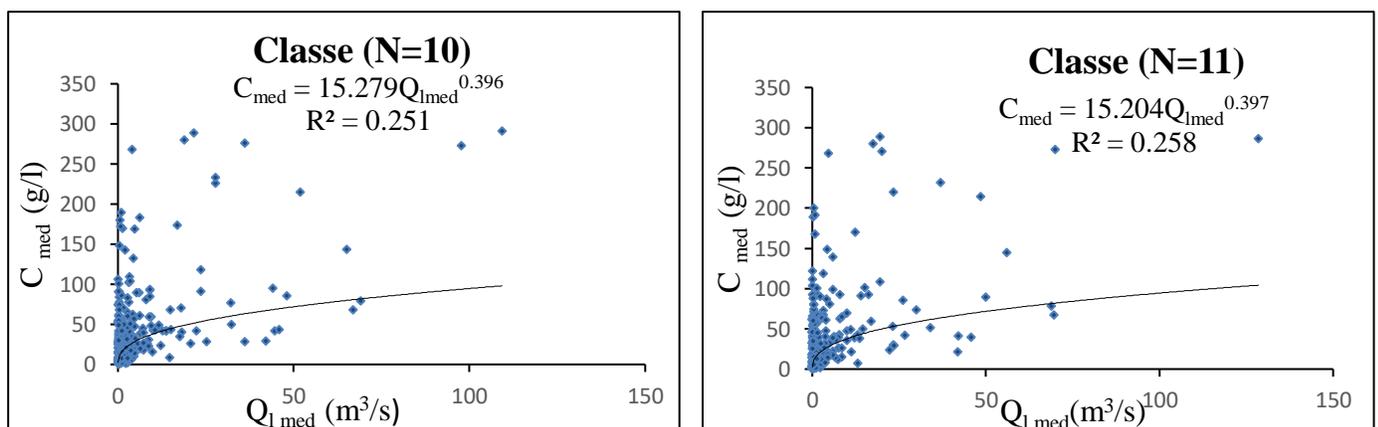
Généralement, les meilleurs résultats sont obtenus par une équation de type: $C = a.Q_l^b$ (Etchanchu et al., 1986; Walling et al., 1981; Wood P.A.,1977) avec a et b: coefficients empiriques.

Ces corrélations ne sont pas respectées et ainsi la mesure de la concentration des sédiments en suspension n'est pas fiable c'est-à-dire n'est plus représentatif. Et, ces faibles valeurs du coefficient de détermination est le résultat de la grande dispersion des couples (C, Q_l).

D'après nos connaissances, on sait qu'il existe une relation entre la concentration des sédiments en suspension et le débit liquide. Et, il faut prouver cette relation ?

Pour cela, on a regroupé la série en classe suivant les mois, l'année et calculons la concentration médiane et le débit liquide médiane pour chaque classe.

Et, On trace les graphiques $C_{med} = f(Q_{lmed})$. Les résultants sont obtenus dans la figure III.6



Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

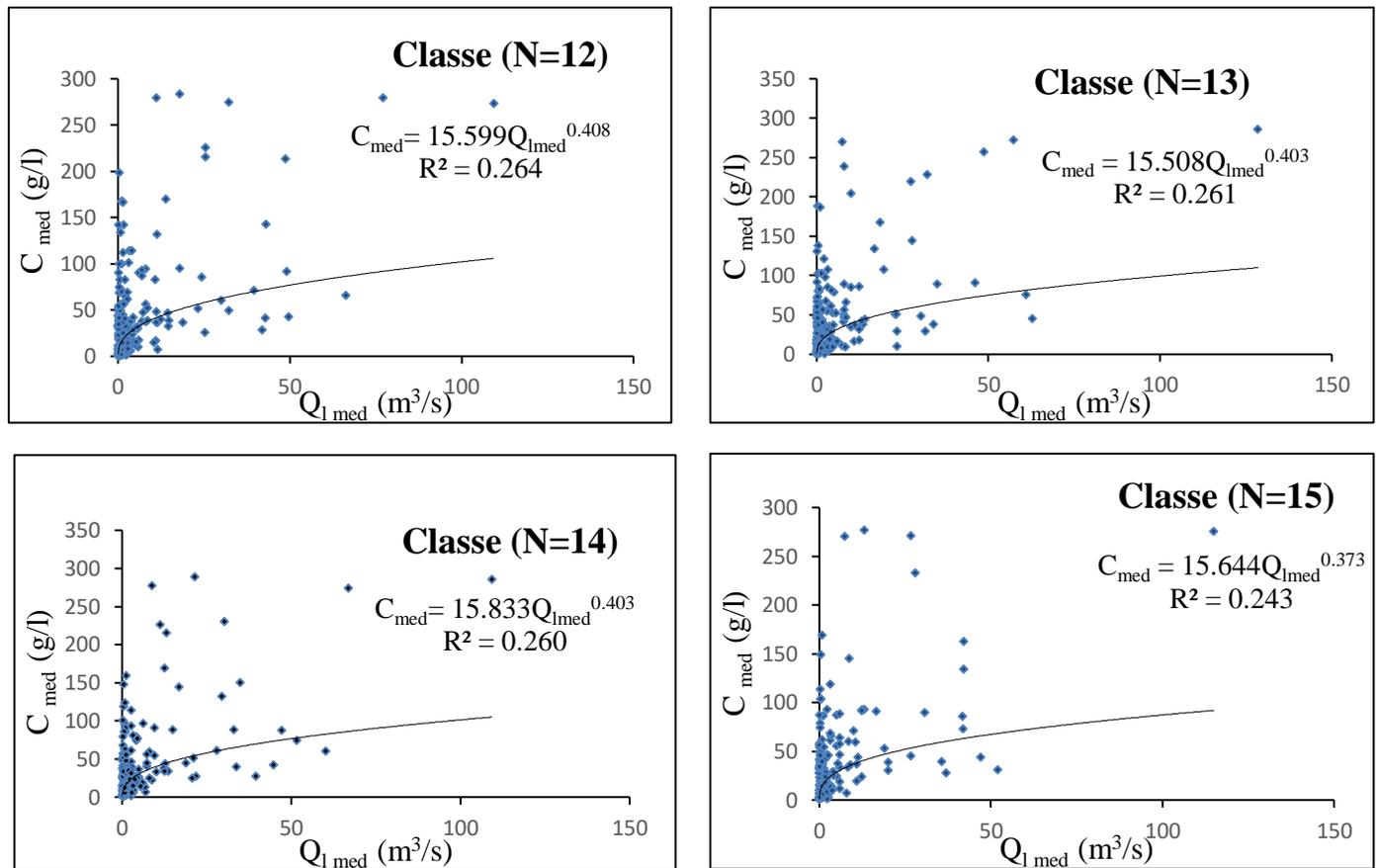


Figure III.6 Corrélation entre les concentrations des sédiments en suspension médiane et les débits liquides médiane à différentes classes (10-11-12-13-14 et 15) par le modèle puissance dans le bassin versant de l'Oued Zeddine pour la série complète (1990/2013).

D'après la figure III.6, on voit clairement qu'il y a de mauvaises corrélations entre la concentration médiane et le débit liquide médiane pour l'ensemble des échelles étudiées.

La relation entre la concentration des sédiments en suspension et le débit liquide est obscurcie par les entrées soudaines de sédiments produites par les pluies occasionnelles dans des périodes plus sèches et par les premiers éclats (Elahcene et Remini, 2009).

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

III.2 Concentrations des sédiments en suspension et des débits liquides par événement dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

III.2.1 Données et méthodologies

Les relations entre la concentration des sédiments en suspension C [g/l] et les débits liquides Q_1 [m³/s] pour un événement hydrologique telles que les crues, peuvent être étudiées qualitativement par l'analyse des courbes des concentrations et des débits liquides en fonction du temps pour 108 crues sur l'Oued Zeddine. Ces relations sont fondamentales dans le domaine du transport solide en rivière.

Pour ce faire, il faut montrer la variabilité des concentrations en matières solides en fonction des débits liquides pour les événements des crues. Pour cela, il faut analyser les graphes des concentrations en sédiments et les débits liquides en fonction du temps. L'analyse montre qu'il n'est pas possible de considérer une relation stable entre les débits liquides et les concentrations en matières solides c'est-à-dire une variabilité temporelle expliquée par l'effet saisonnier, ainsi, que par le phénomène d'hystérésis qui définit en fait l'évolution de C [g/l] et Q_1 [m³/s] durant la crue.

L'étude sur le bassin versant de l'Oued Zeddine, Ain Defla, Algérie a pour objet de trouver cette variabilité temporelle de la concentration en sédiments. Cette étude nécessite un traitement individualisé de chaque crue, avec une reconstitution des courbes des concentrations en sédiments et des débits liquides en fonction du temps et les analyser. A cet effet, Williams, 1989 propose une classification de ces relations basées sur le rapport C/Q_1 durant les phases de montée de crue et de décrue.

L'étude du transport solide lors des crues peut permettre l'analyse des courbes représentant la concentration en MES en fonction du débit liquide qui présentent parfois des hystérésis. Dans ce contexte, on notera les travaux de Williams (1989), Asselman (1999), Picouet et al. (2000), Benkhaled et Remini (2003), Le François et al., (2005), Bacà (2008) et Elahcene et al., 2013 .

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

La présente étude de l'hystérésis est basée sur les travaux de Williams (1989), qui propose une classification de ces relations basées sur le rapport C/Q_t durant les phases de montée de crue et de décrue. Cinq modèles de relations sont ainsi établis (Tableau III.2).

Tableau III.2 Classes des relations C/Q_t (d'après Williams, 1989).

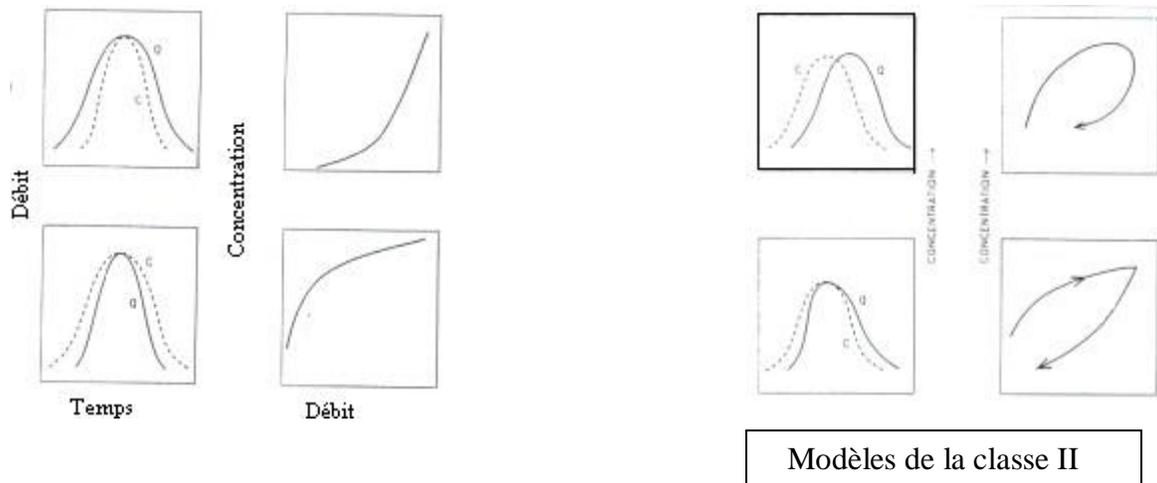
Classe	Modèle	Critère	Référence
I	<ul style="list-style-type: none"> • Courbe simple (single line), ligne droite. • Courbe, la pente croit quand Q_t augmente • Courbe, la pente décroît quand Q_t augmente 	<ul style="list-style-type: none"> • $(C/Q_t)_i \approx (C/Q_t)_f$, les pentes des deux sections montée et décrue sont égales • Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales • Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales 	Wood (1977)
II	<ul style="list-style-type: none"> • Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop) 	<ul style="list-style-type: none"> • $(C/Q_t)_i > (C/Q_t)_f$ pour toutes les valeurs de Q_t 	Paustian et Beschta (1979)
III	<ul style="list-style-type: none"> • Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop) 	<ul style="list-style-type: none"> • $(C/Q_t)_i < (C/Q_t)_f$ pour toutes les valeurs de Q_t 	Axelsson (1967)

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

	wise loop)		
IV	<ul style="list-style-type: none"> Linéaire simple plus une boucle (single line plus a loop) 	<ul style="list-style-type: none"> $(C/Q_i)_i \approx (C/Q_i)_f$ pour une partie des valeurs de Q_i $(C/Q_i)_i > (C/Q_i)_f$ Pour l'autre partie des valeurs de Q_i 	Williams (1989)
V	<ul style="list-style-type: none"> Forme en huit (figure eight) 	<ul style="list-style-type: none"> $(C/Q_i)_i > (C/Q_i)_f$ pour une partie des valeurs de Q_i $(C/Q_i)_i < (C/Q_i)_f$ pour l'autre partie des valeurs de Q_i 	Amborg et al. (1967)

Notes: $(C/Q_i)_i = (C/Q_i)$ de la courbe de montée de crue pour des débits donnés;
 $(C/Q_i)_f = (C/Q_i)$ de la courbe de décrue.

Cinq modèles de relations sont ainsi établis c'est-à-dire cinq exemples de classes d'hystérésis ont été identifiés sur la base d'un critère fiable, le rapport C/Q_i et sont discutés ici, incluent des variétés (figure III.7)



Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

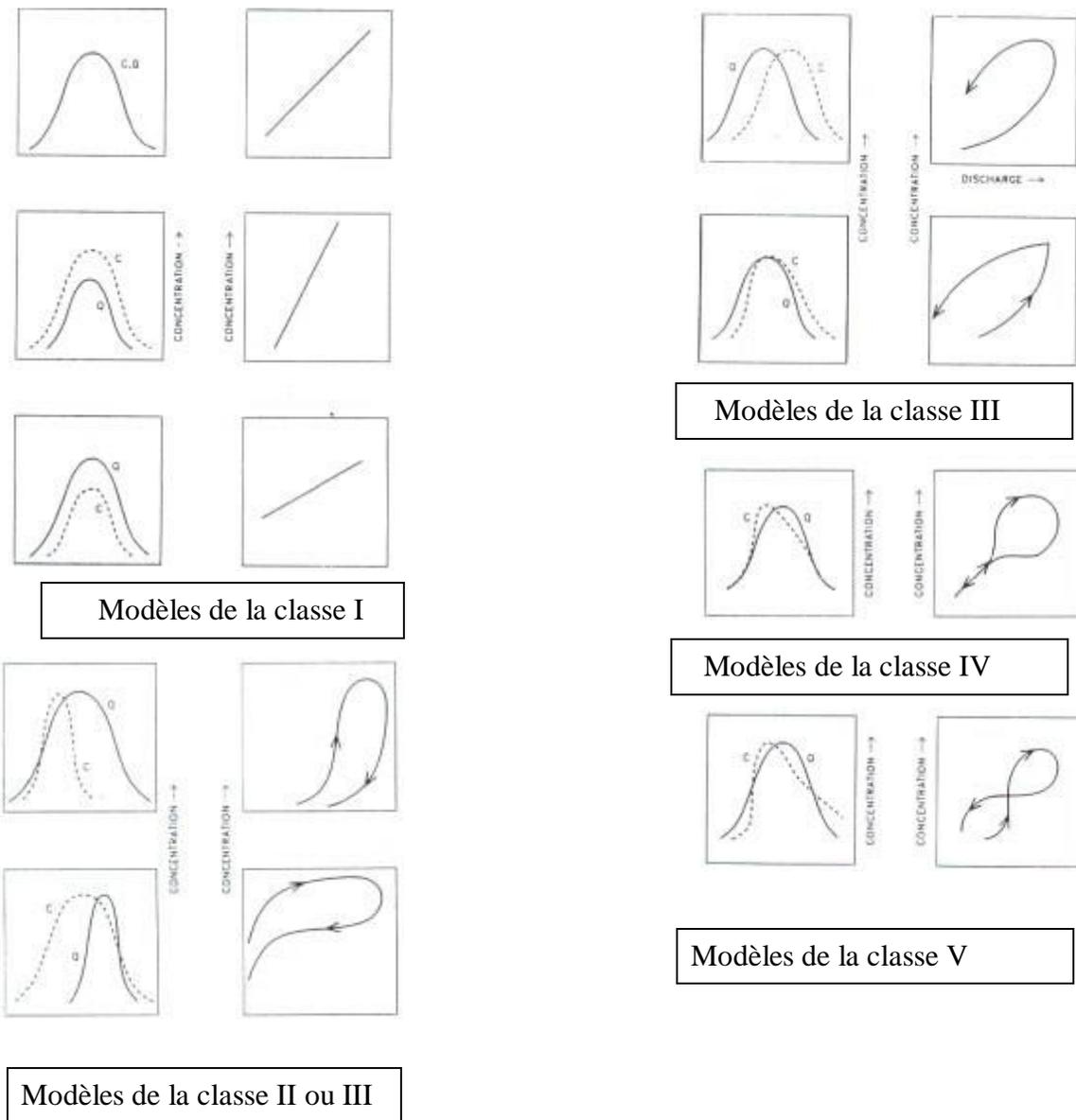


Figure III.7 Les différentes classes d’hystérésis dans les relations concentrations en MES- débits liquides (Le François, 2005).

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

Bien que ce n'est pas toujours évident, vu le manque et l'imprécision des données, nous allons présenter, dans ce qui suit, les graphes des relations C-Q₁ pour les 108 crues enregistrés à l'Oued Zeddine sur la période hydropluviométrique étudiée. Nous essayons en même temps de caractériser et de classer ces différentes relations pour une meilleure compréhension du phénomène. Les résultats sont illustrés dans le tableau (III.3)

Tableau III.3 Chronologie des crues sélectionnées

N° du crue	Début			Fin				Max	Nombre D'observation	
	Date		Heure	Date		Heure				
01	1990	09	08	16:12	1990	09	08	18:36	280	20
02	1990	12	09	9:37	1990	12	09	13:00	30	04
03	1990	12	23	7:00	1990	12	23	15:51	33	05
04	1991	01	27	7:57	1991	01	27	13:00	50	05
05	1991	02	15	7:00	1991	02	15	13:00	33	3
06	1991	03	14	7:00	1991	03	14	17:22	130	09
07	1991	10	04	7:00	1991	10	04	13:54	70	07
08	1991	10	05	7:00	1991	10	05	13:00	30	03
09	1991	10	20	7:00	1991	10	20	18:00	53	04
10	1992	03	10	7:00	1992	03	10	18:00	70	04
11	1992	03	27	7:00	1992	03	27	13:00	120	07
12	1992	04	08	13:00	1992	04	08	20:46	120	05
13	1992	04	09	7:00	1992	04	09	13:00	134	06
14	1992	10	04	13:00	1992	10	04	18:03	140	14
15	1993	04	22	9:24	1993	04	22	18:18	100	10
16	1993	04	24	6:30	1993	04	24	13:00	100	05
17	1993	05	05	17:13	1993	05	05	19:03	100	03
18	1993	05	06	6:30	1993	05	06	16:30	85	04
19	1993	09	23	7:00	1993	09	23	18:00	93	04
20	1993	12	01	9:20	1993	12	01	13:00	60	04

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

21	1993	12	14	8:33	1993	12	14	13:00	57	03
22	1994	01	20	7:00	1994	01	20	16:49	100	05
23	1994	04	15	12:40	1994	04	15	19:38	90	08
24	1994	09	23	6:29	1994	09	23	16:58	240	34
25	1994	10	13	19:23	1994	10	13	19:32	80	04
26	1994	10	16	13:00	1994	10	16	17:51	120	20
27	1994	10	19	13:00	1994	10	19	17:33	60	06
28	1994	11	13	8:40	1994	11	13	18:00	90	08
29	1995	01	06	16:24	1995	01	06	17:23	60	03
30	1995	01	07	7:00	1995	01	07	17:33	150	08
31	1995	01	10	7:00	1995	01	10	13:00	93	03
32	1995	03	02	7:00	1995	03	02	13:00	100	03
33	1995	09	27	7:00	1995	09	27	13:00	90	03
34	1995	11	24	7:00	1995	11	24	15:23	80	05
35	1996	01	12	7:00	1996	01	12	13:00	63	03
36	1996	02	04	7:00	1996	02	04	16:00	120	07
37	1996	02	16	8:17	1996	02	16	13:00	79	03
38	1996	03	09	7:00	1996	03	09	14:30	120	03
39	1996	03	13	7:00	1996	03	13	18:00	96	03
40	1996	03	15	7:00	1996	03	15	15:58	230	10
41	1996	03	16	7:00	1996	03	16	13:00	160	09
42	1996	04	26	7:00	1996	04	26	19:00	120	05
43	1996	04	29	7:00	1996	04	29	18:30	120	04
44	1996	06	12	13:00	1996	06	12	19:10	160	09
45	1996	09	04	6:15	1996	09	04	7:10	260	08
46	1996	10	15	7:00	1996	10	15	18:24	150	08
47	1997	04	21	6:49	1997	04	21	19:35	200	09
48	1997	04	23	13:00	1997	04	23	18:49	100	03

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

49	1997	05	23	16:00	1997	05	23	18:00	270	16
50	1997	10	29	10:52	1997	10	29	12:48	90	05
51	1997	11	12	13:00	1997	11	12	17:00	87	05
52	1997	11	20	8:00	1997	11	20	17:00	80	04
53	1997	11	22	13:00	1997	11	22	17:13	155	03
54	1998	05	23	7:00	1998	05	23	13:29	110	05
55	1998	10	06	7:00	1998	10	06	16:37	53	05
56	1999	01	18	7:00	1999	01	18	13:00	66	03
57	1999	01	19	7:37	1999	01	19	13:00	160	06
58	1999	03	01	7:00	1999	03	01	16:09	230	13
59	1999	03	28	6:54	1999	03	28	17:00	220	15
60	1999	06	23	17:50	1999	06	23	19:24	130	06
61	1999	12	16	7:00	1999	12	16	15:20	87	05
62	1999	12	19	13:00	1999	12	19	16:52	145	07
63	2000	06	04	17:56	2000	06	04	20:09	130	08
64	2000	09	30	8:10	2000	09	30	17:00	100	07
65	2000	10	22	8:05	2000	10	22	16:44	170	13
66	2000	10	24	6:37	2000	10	24	18:15	360	39
67	2000	11	16	7:00	2000	11	16	17:00	310	21
68	2001	01	28	8:24	2001	01	28	18:24	100	04
69	2001	04	21	7:09	2001	04	21	13:00	90	03
70	2001	04	27	18:24	2001	04	27	19:33	220	11
71	2001	04	28	9:35	2001	04	28	13:00	87	05
72	2001	05	01	7:00	2001	05	01	14:25	120	04
73	2002	01	04	7:13	2002	01	04	14:12	102	08
74	2002	03	08	7:00	2002	03	08	17:00	80	04
75	2002	05	06	19:24	2002	05	06	19:48	70	03
76	2003	01	09	7:00	2003	01	09	16:31	200	12

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

77	2003	01	11	7:00	2003	01	11	15:45	130	07
78	2003	02	05	11:45	2003	02	05	17:26	130	05
79	2003	02	17	8:30	2003	02	17	14:47	160	06
80	2003	05	09	12:40	2003	05	09	17:00	150	05
81	2003	08	10	16:20	2003	08	10	19:12	250	19
82	2003	08	19	19:00	2003	08	19	20:30	190	10
83	2003	08	25	16:54	2003	08	25	18:59	260	05
84	2003	12	10	10:37	2003	12	10	13:00	110	05
85	2004	02	27	7:00	2004	02	27	16:06	130	05
86	2004	09	25	15:09	2004	09	25	16:00	110	05
87	2007	04	05	7:00	2007	04	05	17:00	122	04
88	2007	04	26	14:13	2007	04	26	18:25	160	09
89	2007	09	22	7:00	2007	09	22	17:10	346	27
90	2007	11	27	7:00	2007	11	27	13:00	140	04
91	2007	11	29	7:00	2007	11	29	17:00	180	05
92	2008	06	09	19:34	2008	06	09	20:04	130	03
93	2008	10	16	14:19	2008	10	16	15:01	130	04
94	2008	12	14	11:10	2008	12	14	17:00	190	07
95	2009	04	19	8:35	2009	04	19	16:40	180	08
96	2009	12	15	7:00	2009	12	15	14:42	200	07
97	2010	01	14	7:00	2010	01	14	13:00	138	03
98	2010	02	11	9:07	2010	02	11	13:45	250	06
99	2010	02	14	7:00	2010	02	14	17:00	160	04
100	2010	03	09	7:00	2010	03	09	16:28	230	03
101	2010	08	18	7:00	2010	08	18	19:06	180	10
102	2010	10	10	7:00	2010	10	10	17:00	136	05
103	2010	11	02	7:00	2010	11	02	13:00	130	04
104	2010	11	28	13:47	2010	11	28	17:00	140	03

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

105	2011	02	18	7:00	2011	02	18	13:17	230	09
106	2011	05	19	18:19	2011	05	19	18:44	170	04
107	2012	04	15	8:35	2012	04	15	18:33	290	13
108	2012	11	13	13:00	2012	11	13	15:56	180	08

Le Tableau III.4 donne les caractéristiques statistiques des 108 crues traitées pour les variables Q_1 et C, donnant d'une part, l'écart type, la moyenne, le mode, la médiane, le coefficient de variation, l'aplatissement et l'asymétrie. Les intervalles de variation des estimations des paramètres statistiques des échantillons analysés (en les considérant un à un) sont assez importants, témoignant de l'irrégularité de l'écoulement du régime hydrologique de l'Oued Zeddine.

Tableau III.4 Statistiques par événement

Crue	Variable	Max	σ_x	X	Mo	Me	Cv	Aplatissement	Asymétrie
01	$Q_1(m^3/s)$	109	33.68	46.59	/	45.65	0.72	-1.13	0.31
	C (g/l)	179.4	37.94	131.06	/	140.79	0.29	4.17	-1.99
02	$Q_1(m^3/s)$	0.335	0.14	21.50	/	0.31	0.01	3.28	-1.81
	C (g/l)	25.4	4.19	21.50	/	21.97	0.2	-3.9	-0.31
03	$Q_1(m^3/s)$	0.45	0.18	0.31	/	0.42	0.56	-3.21	-0.62
	C (g/l)	14.92	3.81	9.02	/	8.82	0.42	0.74	0.98
04	$Q_1(m^3/s)$	2.63	01	1.31	/	1.65	0.76	-1.59	0.16
	C (g/l)	26.68	6.45	17.31	/	16.51	0.37	0.1	0.39
05	$Q_1(m^3/s)$	0.33	0.13	0.18	/	0.14	0.71	/	1.39
	C (g/l)	25.38	9.54	14.45	/	10.16	0.66	/	1.61
06	$Q_1(m^3/s)$	14.1	3.94	7.70	/	7.35	0.51	-1.32	0.39
	C (g/l)	49.79	9.47	35.91	/	39.34	0.26	-1.65	-0.07
07	$Q_1(m^3/s)$	3.4	1.01	1.90	2.6	1.6	0.53	-1.09	0.15
	C (g/l)	357.67	79.12	200.02	/	178.48	0.4	3.05	1.39

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

08	Q _i (m ³ /s)	0.12	0.06	0.06	/	0.05	0.93	/	0.53
	C(g/l)	66.29	0.64	65.56	/	65.23	0.01	/	1.70
09	Q _i (m ³ /s)	1.9	0.73	98.27	/	1.08	0.01	-5.11	0.13
	C(g/l)	146.95	35.6	98.27	/	92.25	0.36	1.85	0.96
10	Q _i (m ³ /s)	2.7	0.52	1.99	/	1.82	0.26	0.44	1.19
	C(g/l)	31.58	5.52	26.52	/	27.85	0.21	1.74	-1.25
11	Q _i (m ³ /s)	10.3	2.67	5.6	3.8	4.8	0.48	0.18	0.96
	C(g/l)	74.97	20.72	51.57	/	56.18	0.40	-1.29	-0.44
12	Q _i (m ³ /s)	10.3	3.02	6.81	/	7.8	0.44	1.34	-0.87
	C(g/l)	76.31	14.62	52.09	/	50.55	0.28	2.47	1.47
13	Q _i (m ³ /s)	14.2	3.57	9.91	/	10.05	0.36	-1.86	-0.11
	C(g/l)	47.12	10.86	35.25	/	39.22	0.31	-1.67	-0.63
14	Q _i (m ³ /s)	16.33	4.93	7.20	6	7	0.68	-0.86	0.31
	C(g/l)	166.28	26.87	99.71	/	89.27	0.27	1.85	1.66
15	Q _i (m ³ /s)	5.99	2.09	2.13	0.2	1.9	0.98	-0.73	0.68
	C(g/l)	96.51	29.59	64.03	67.68	72.41	0.46	-0.10	-0.92
16	Q _i (m ³ /s)	5.99	1.66	3.42	2.4	2.4	0.49	0.09	1.19
	C(g/l)	46.44	8.53	32.40	/	31.72	0.26	2.20	1.42
17	Q _i (m ³ /s)	5.99	1.03	4.80	4.2	4.2	0.22	/	1.73
	C(g/l)	196.23	69.28	116.35	/	80.1	0.6	/	1.71
18	Q _i (m ³ /s)	3.3	0.75	2.42	/	2.33	0.31	-3.29	0.37
	C(g/l)	64.68	13.52	45.14	/	40.82	0.3	2.67	1.59
19	Q _i (m ³ /s)	4.74	1.84	2.48	/	2.33	0.74	-1.47	0.38
	C(g/l)	203.38	80.10	130.57	/	150.01	0.61	1.55	-1.23
20	Q _i (m ³ /s)	0.53	0.23	0.19	/	0.08	1.19	3.99	2
	C(g/l)	68.14	19.69	39.26	/	31.32	0.50	3.03	1.75
21	Q _i (m ³ /s)	0.34	0.15	0.16	/	0.08	0.93	/	1.72
	C(g/l)	28.35	11.12	16.04	/	13.02	0.69	/	1.13

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

22	Q _i (m ³ /s)	6	1.28	4.46	/	4.2	0.29	0.12	-0.40
	C(g/l)	82.32	27.21	58.82	/	74.2	0.46	-2.36	-0.72
23	Q _i (m ³ /s)	4.2	1.33	2.44	4.2	2.63	0.54	-1	0.11
	C(g/l)	74.15	20.82	46.81	/	48.82	0.45	4.07	-1.52
24	Q _i (m ³ /s)	68	18.33	28.82	19.5	27.5	0.64	-0.61	0.46
	C(g/l)	356.25	84.42	205.55	/	211.81	0.41	-1.19	-0.03
25	Q _i (m ³ /s)	4.2	1.60	2.89	/	3.4	0.56	3.13	-1.66
	C(g/l)	219.58	13.26	210.32	/	215.52	0.06	3.60	-1.87
26	Q _i (m ³ /s)	11	2.63	4.91	5.1	5.1	0.53	0.73	0.22
	C(g/l)	125.43	17.32	84.65	/	85.73	0.21	0.42	0.23
27	Q _i (m ³ /s)	2.6	0.90	1.02	0.55	0.55	0.89	0.96	1.38
	C(g/l)	64.02	21.53	22.92	/	16.01	0.94	3.50	1.82
28	Q _i (m ³ /s)	5.1	1.26	3.26	4.2	3.4	0.39	-1.05	-0.15
	C(g/l)	199.89	37.18	134.97	/	137.97	0.28	-0.32	0.43
29	Q _i (m ³ /s)	2.6	1.03	1.58	/	1.6	0.65	/	-0.07
	C(g/l)	43.44	21.93	18.14	/	6.25	1.21	/	1.72
30	Q _i (m ³ /s)	20.25	3.67	13.09	13.5	12.25	0.28	1.15	1.03
	C(g/l)	27.52	5.23	20.21	/	20.86	0.26	-0.66	-0.45
31	Q _i (m ³ /s)	5.37	1.24	3.95	/	3.4	0.31	/	1.60
	C(g/l)	28.77	10.18	17.48	/	14.68	0.58	/	1.14
32	Q _i (m ³ /s)	6	1.27	4.53	3.8	3.8	0.28	/	1.73
	C(g/l)	27.63	12.45	13.28	/	6.87	0.94	/	1.70
33	Q _i (m ³ /s)	4.2	1.04	3	2.4	2.4	0.35	/	1.73
	C(g/l)	78.04	23.56	51.83	/	45.04	0.45	/	1.19
34	Q _i (m ³ /s)	2.4	0.86	1.39	1.3	1.3	0.62	1.13	-0.70
	C(g/l)	35.91	13.13	21.72	/	22.95	0.60	-2.85	-0.10
35	Q _i (m ³ /s)	0.69	0.33	0.39	/	0.43	0.85	/	-0.59
	C(g/l)	38.15	13.71	26.11	/	29	0.53	/	-0.91

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

36	Q _l (m ³ /s)	10	2.82	5.67	4.2	6	0.5	0.15	0.04
	C(g/l)	151.2	44.06	54.88	/	45	0.80	5.55	2.24
37	Q _l (m ³ /s)	2.29	0.92	1.25	/	0.95	0.74	/	1.31
	C(g/l)	57.62	21.65	34.54	/	31.32	0.63	/	0.65
38	Q _l (m ³ /s)	10	3.97	5.53	/	4.2	0.72	/	1.34
	C(g/l)	47.53	24.34	19.43	/	5.72	1.25	/	1.73
39	Q _l (m ³ /s)	5.28	1.10	4.02	/	3.48	0.27	/	1.68
	C(g/l)	27.38	7.13	19.38	/	17.04	0.37	/	1.32
40	Q _l (m ³ /s)	61	18.64	37.81	/	42	0.49	-0.53	-0.65
	C(g/l)	39.77	9.21	27.93	/	28.84	0.33	-0.48	-0.49
41	Q _l (m ³ /s)	23.5	5.98	14.90	19.5	16.33	0.40	-1.22	-0.24
	C(g/l)	17.09	3.17	9.35	/	8.48	0.34	5.29	2.14
42	Q _l (m ³ /s)	10	1.87	7.79	/	7.95	0.24	-2.57	0.01
	C(g/l)	24.99	5.33	16.25	/	14.14	0.33	1.97	1.45
43	Q _l (m ³ /s)	10	1.11	8.36	/	7.95	0.13	3.48	1.81
	C(g/l)	24.38	7.16	17.55	/	17.67	0.41	-5.49	-0.03
44	Q _l (m ³ /s)	23.5	7.16	11.66	7.95	10	0.61	-0.49	0.27
	C(g/l)	73.59	20.45	51.31	/	56.78	0.40	4.17	-1.86
45	Q _l (m ³ /s)	87	26.77	38.90	/	30.20	0.69	0.37	0.81
	C(g/l)	265.75	20.62	240.74	/	236.78	0.09	-1.54	-0.03
46	Q _l (m ³ /s)	19.5	7.394	10.265	/	11.58	0.72	-1.48	-0.36
	C(g/l)	162.7	48.72	96.69	/	88.95	0.50	0.19	-0.03
47	Q _l (m ³ /s)	42	13.43	22.98	/	19.5	0.59	-1.66	0.20
	C(g/l)	75.86	19.04	47.69	/	50.09	0.40	3.56	-1.25
48	Q _l (m ³ /s)	5.9	2.74	3.21	/	3.3	0.86	/	-0.15
	C(g/l)	34.04	14.82	20.52	/	22.84	0.72	/	-0.69
49	Q _l (m ³ /s)	96.29	28.79	47.34	69	39.5	0.61	-1.46	0.27
	C(g/l)	89.97	8.85	74.97	/	71.85	0.12	-0.71	0.40

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

50	Q _i (m ³ /s)	3.2	1.23	1.70	/	2.2	0.73	-1.39	-0.26
	C(g/l)	44.14	9.95	33.80	/	32.08	0.29	-2.39	0.03
51	Q _i (m ³ /s)	2.9	1.13	1.23	/	0.8	0.92	-0.13	0.82
	C(g/l)	56.58	19.36	28.85	/	23.37	0.67	-0.05	0.51
52	Q _i (m ³ /s)	2.2	0.92	1.29	/	1.36	0.71	-3.90	-0.22
	C(g/l)	109.95	44.60	54.23	/	47.94	0.82	-1.92	0.56
53	Q _i (m ³ /s)	18.85	4.40	15.08	/	16.15	0.29	/	-1.03
	C(g/l)	56.39	12.66	47.27	/	52.6	0.27	/	-1.56
54	Q _i (m ³ /s)	7.7	2.16	4.53	/	4.07	0.48	0.40	0.61
	C(g/l)	54.43	12.71	41.08	/	47.18	0.31	-1.48	-0.64
55	Q _i (m ³ /s)	0.64	0.25	0.22	/	0.19	1.13	3.05	1.67
	C(g/l)	67.19	16.34	45.44	/	47.55	0.36	-1.49	0.22
56	Q _i (m ³ /s)	1.62	0.40	1.22	/	1.24	0.33	/	-0.17
	C(g/l)	52.51	16.53	41.85	/	50.24	0.40	/	-1.70
57	Q _i (m ³ /s)	20.2	5.03	13.69	/	13.92	0.37	-0.78	-0.23
	C(g/l)	81.52	28.04	52.01	/	53.72	0.54	-1.22	-0.47
58	Q _i (m ³ /s)	46.8	12.67	24.70	23.5	23.5	0.51	-1.02	0.39
	C(g/l)	76.22	11.20	48.73	/	48.98	0.23	1.72	1.22
59	Q _i (m ³ /s)	42.2	10.83	22.83	34	20.2	0.47	-1.16	0.39
	C(g/l)	49.48	7.58	37.46	/	39.71	0.20	-0.23	-0.63
60	Q _i (m ³ /s)	12.4	4.20	6.21	/	5.21	0.68	-0.99	0.58
	C(g/l)	139	35.09	83.32	/	67.5	0.42	-0.73	1.08
61	Q _i (m ³ /s)	2.93	1.14	1.59	/	1.18	0.72	-1.53	-0.02
	C(g/l)	29.87	4.03	23.38	/	22.18	0.17	1.44	1.31
62	Q _i (m ³ /s)	16.15	4.06	11.35	/	12.4	0.36	-0.77	-0.58
	C(g/l)	107.07	27.87	66.47	/	69.6	0.42	-1.60	0.21
63	Q _i (m ³ /s)	12.4	3.58	7.18	7.4	7.4	0.50	-1.20	-0.05
	C(g/l)	212.04	43.14	162.62	/	156.46	0.27	-2.18	0.08

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

64	Q _i (m ³ /s)	4.8	1.40	2.54	2.2	2.2	0.55	1.08	0.01
	C(g/l)	131.89	28.64	93.66	/	95.72	0.31	2.74	-1.11
65	Q _i (m ³ /s)	23.5	8.21	11.2	20.2	10	0.73	-1.73	0.20
	C(g/l)	394.55	40.72	292.30	279.8	279.8	0.14	3.24	2.04
66	Q _i (m ³ /s)	168	48.91	67.89	7.4	63.73	0.72	-0.94	0.45
	C(g/l)	312.71	47.26	258.22	204.49	272.47	0.18	4.15	-1.92
67	Q _i (m ³ /s)	103.6	28.64	48.70	34	42	0.59	-0.93	0.45
	C(g/l)	85.71	20.28	48.54	/	45.45	0.42	-1.52	0.21
68	Q _i (m ³ /s)	6.4	2.21	4.15	2.25	3.98	0.53	-5.51	0.09
	C(g/l)	28.08	4.90	21.32	17.7	19.75	0.23	0.54	1.21
69	Q _i (m ³ /s)	5	1.41	3.44	/	3.08	0.41	/	1.09
	C(g/l)	66.11	3.06	62.66	/	61.63	0.05	/	1.35
70	Q _i (m ³ /s)	42.4	9.54	29.7	34	30	0.32	1.41	-1
	C(g/l)	108.57	19.82	71.88	/	73.16	0.28	-0.71	0.45
71	Q _i (m ³ /s)	4.18	1.70	2.97	/	3.62	0.57	2.80	-1.69
	C(g/l)	25.09	3.67	22.60	/	23.88	0.16	4.54	-2.10
72	Q _i (m ³ /s)	8.4	3	5	/	5.1	0.60	-0.93	-0.16
	C(g/l)	81.64	32.18	35.31	/	24.68	0.91	2.38	1.56
73	Q _i (m ³ /s)	4.44	1.11	2.69	2.8	2.8	0.41	-1.02	0.46
	C(g/l)	48.01	9.15	26.65	/	23.85	0.34	5.52	2.24
74	Q _i (m ³ /s)	1.6	0.51	1.03	/	0.95	0.49	-4.32	0.30
	C(g/l)	11.98	3.18	8.16	/	8.24	0.39	1.51	-0.14
75	Q _i (m ³ /s)	0.6	0.32	0.23	/	0.05	1.36	/	1.73
	C(g/l)	48.85	11	37.9	/	37.99	0.29	/	-0.04
76	Q _i (m ³ /s)	35.15	10.17	18.30	26.2	17.38	0.56	-1.21	0.16
	C(g/l)	75.93	22.16	40.21	/	41.50	0.55	-0.99	-0.08
77	Q _i (m ³ /s)	10.2	2.87	4.83	6	3.75	0.60	1.31	1.07
	C(g/l)	33.01	5.88	23.37	/	22.69	0.25	0.92	0.18

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

78	Q _l (m ³ /s)	10.2	2.52	7.14	8	8	0.35	0.25	-0.52
	C(g/l)	74.06	24.82	32.93	/	22.08	0.75	2.19	1.55
79	Q _l (m ³ /s)	18.5	4.63	13.13	12.4	12.4	0.35	-1.18	0.09
	C(g/l)	19.66	2.52	16.34	/	15.32	0.15	-1.97	0.72
80	Q _l (m ³ /s)	15.25	4.83	8.83	/	10.2	0.55	-0.20	-0.03
	C(g/l)	112.33	45.09	69.84	/	87.88	0.65	-2.23	-0.61
81	Q _l (m ³ /s)	64.16	20.23	28.51	/	26.2	0.71	-1.15	0.38
	C(g/l)	183.27	25.56	95.58	/	89.56	0.27	7.87	2.65
82	Q _l (m ³ /s)	30.67	7.78	18.22	/	16.88	0.47	-1.37	0.30
	C(g/l)	211.13	17.01	182.45	/	173.30	0.09	-0.73	0.97
83	Q _l (m ³ /s)	70	20.19	52.69	/	58.2	0.38	3.09	-1.68
	C(g/l)	112.72	34.09	82.09	/	91.25	0.42	2.78	-1.57
84	Q _l (m ³ /s)	3.6	1.50	1.38	/	1.1	1.09	-0.48	0.81
	C(g/l)	56.15	23.31	14.94	/	3.73	1.56	4.51	2.11
85	Q _l (m ³ /s)	5	1.44	3.48	/	3.72	0.41	2.89	-1.38
	C(g/l)	69.19	21.13	41.40	/	35.67	0.51	-2.20	0.51
86	Q _l (m ³ /s)	1.25	0.51	0.37	/	0.28	1.35	3.82	1.90
	C(g/l)	58.23	10.20	44.18	/	40.63	0.23	-0.61	0.39
87	Q _l (m ³ /s)	2.64	1.03	1.42	/	1.40	0.72	-0.99	0.09
	C(g/l)	42.38	16.97	19.43	/	16.23	0.87	0.83	0.96
88	Q _l (m ³ /s)	8.8	2.90	4.60	5.2	5.2	0.63	-0.66	-0.36
	C(g/l)	127.94	51.48	63.70	/	73.97	0.81	-1.96	-0.06
89	Q _l (m ³ /s)	95.64	24.79	32.97	53.2	31	0.75	0.32	0.80
	C(g/l)	105.14	13.65	85.34	99.63	88	0.16	2.44	-1.30
90	Q _l (m ³ /s)	5.2	0.95	3.97	/	3.8	0.24	-0.90	0.76
	C(g/l)	47.58	12.08	35.49	/	37.78	0.34	1.97	-1.07
91	Q _l (m ³ /s)	14	4.31	8.24	/	7	0.52	-2.04	0.56
	C(g/l)	42.92	11.47	29.6	/	29.3	0.39	-2.28	-0.002

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

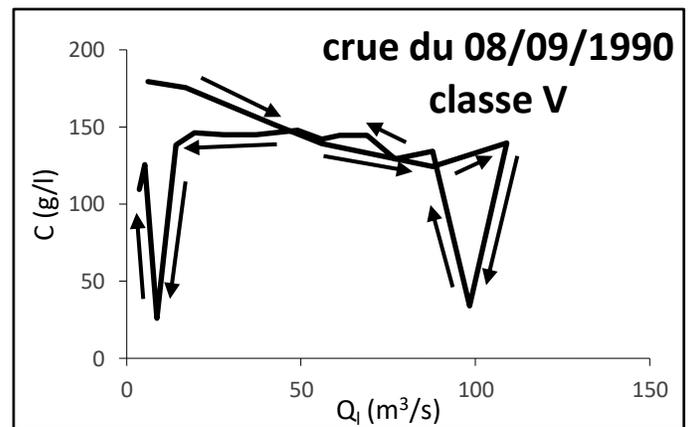
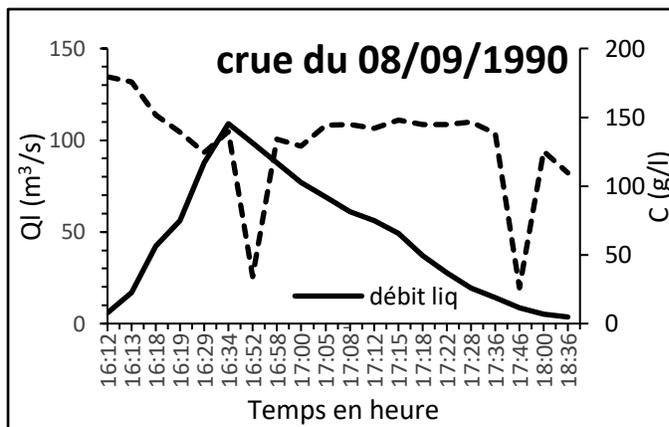
92	Q _l (m ³ /s)	4.2	1.15	3.1	/	3.2	0.37	/	-0.39
	C(g/l)	178.64	44.90	137	/	142.93	0.33	/	-0.58
93	Q _l (m ³ /s)	4.2	0.94	3.125	/	3.2	0.30	1.63	-0.47
	C(g/l)	122.43	44.94	56.24	/	38.42	0.80	3.24	1.79
94	Q _l (m ³ /s)	16.7	4.84	10.17	/	11.4	0.48	0.39	-0.54
	C(g/l)	63.83	16.89	41.44	/	36.86	0.41	-1.13	-0.01
95	Q _l (m ³ /s)	13.8	3.41	9.56	6	9.9	0.36	-1.92	0.10
	C(g/l)	44.16	10.21	23.10	/	18.52	0.44	1.90	1.65
96	Q _l (m ³ /s)	19	5.61	10.74	/	11.2	0.52	-0.85	0.22
	C(g/l)	55.57	7.34	45.18	/	47.93	0.16	-0.70	-0.25
97	Q _l (m ³ /s)	4.32	1.22	2.97	/	2.64	0.41	/	1.12
	C(g/l)	90.28	18.64	71.71	/	71.86	0.26	/	-0.04
98	Q _l (m ³ /s)	40	8.26	28.8	23.2	27.4	0.29	-1.83	0.25
	C(g/l)	67.42	6.26	57.97	/	57.49	0.11	-1.07	0.49
99	Q _l (m ³ /s)	8.6	2.32	5.57	/	5.23	0.42	-0.08	0.71
	C(g/l)	32.36	9.62	20.01	/	18.36	0.48	-1.32	0.71
100	Q _l (m ³ /s)	31.6	10.77	20.25	/	19	0.53	/	0.52
	C(g/l)	27	5.67	21.02	/	20.36	0.27	/	0.52
101	Q _l (m ³ /s)	13.8	3.63	7.63	11.2	7.3	0.48	-1.10	0.38
	C(g/l)	189.36	45.74	81.04	/	59.40	0.56	3.09	1.88
102	Q _l (m ³ /s)	4.04	1.35	2.12	/	2.22	0.64	-0.73	0.53
	C(g/l)	127.51	40.80	59.66	/	53.66	0.68	2.81	1.47
103	Q _l (m ³ /s)	3.2	1.08	1.76	/	1.62	0.62	1.29	0.73
	C(g/l)	82.92	20.04	65.49	/	70.97	0.31	2.04	-1.39
104	Q _l (m ³ /s)	4.6	0.95	3.53	/	3.2	0.27	/	1.36
	C(g/l)	31.25	3.67	27.51	/	27.36	0.13	/	0.18
105	Q _l (m ³ /s)	31.6	8.78	18.75	27.4	16.4	0.47	-1.78	0.24
	C(g/l)	60.55	8.78	40.87	/	42.86	0.22	-0.45	-0.13

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

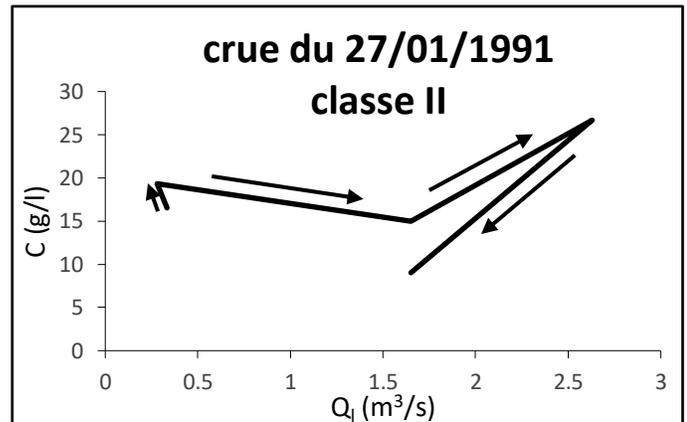
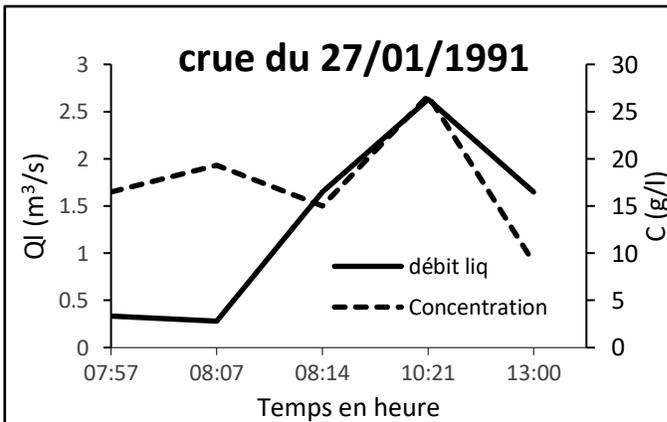
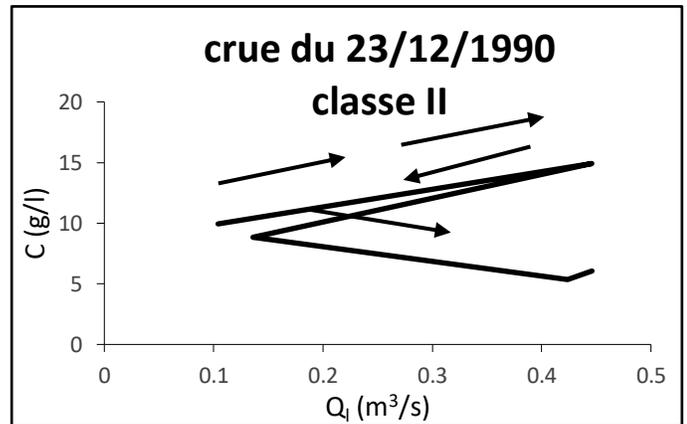
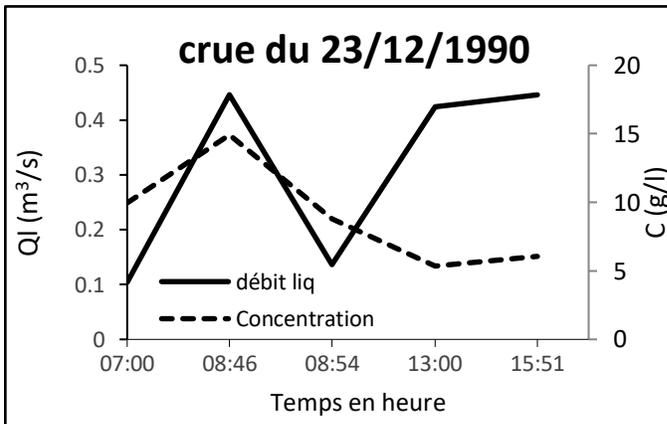
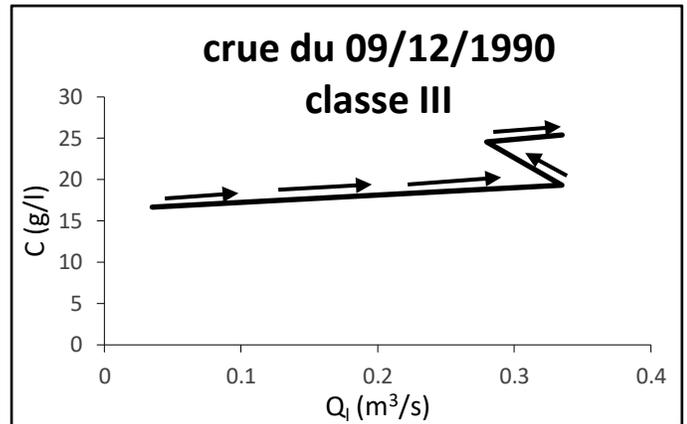
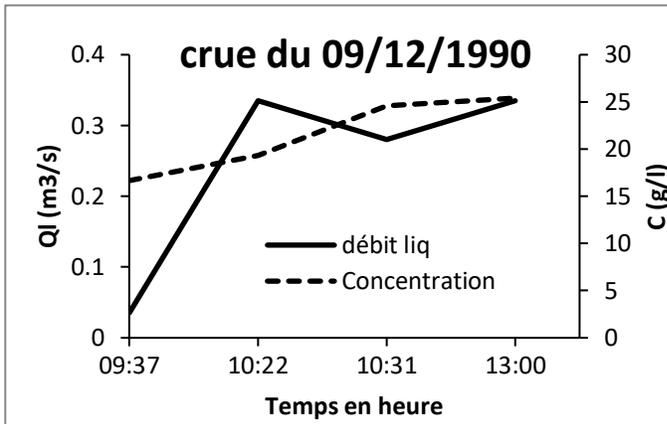
106	$Q_l(m^3/s)$	11.2	2.12	8.6	8.6	8.6	0.25	1.5	0
	$C(g/l)$	234.08	58.48	167.08	/	166.72	0.35	-1.98	0.03
107	$Q_l(m^3/s)$	63.2	14.70	41.32	45.8	40	0.36	-0.92	0.11
	$C(g/l)$	52.01	12.66	36.16	43.06	40.28	0.35	3.18	-1.64
108	$Q_l(m^3/s)$	13.8	4.31	7.90	11.2	8.6	0.55	-0.93	-0.32
	$C(g/l)$	188.88	67.54	77.17	/	45.01	0.88	-0.12	1.35

C_v : coefficient de variation, Q_l en m^3/s et C en g/l

Le tracé des graphes temporels ainsi que celui représentant l'hystérésis est donnée en figure III.8 (à gauche sont représentés la chronologie des variations C et Q_l et à droite l'hystérésis). On représente dans la figure III.8, les six premières crues tandis que le reste c'est-à-dire les cents deux crues sont représentées dans l'annexe.



Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine



Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

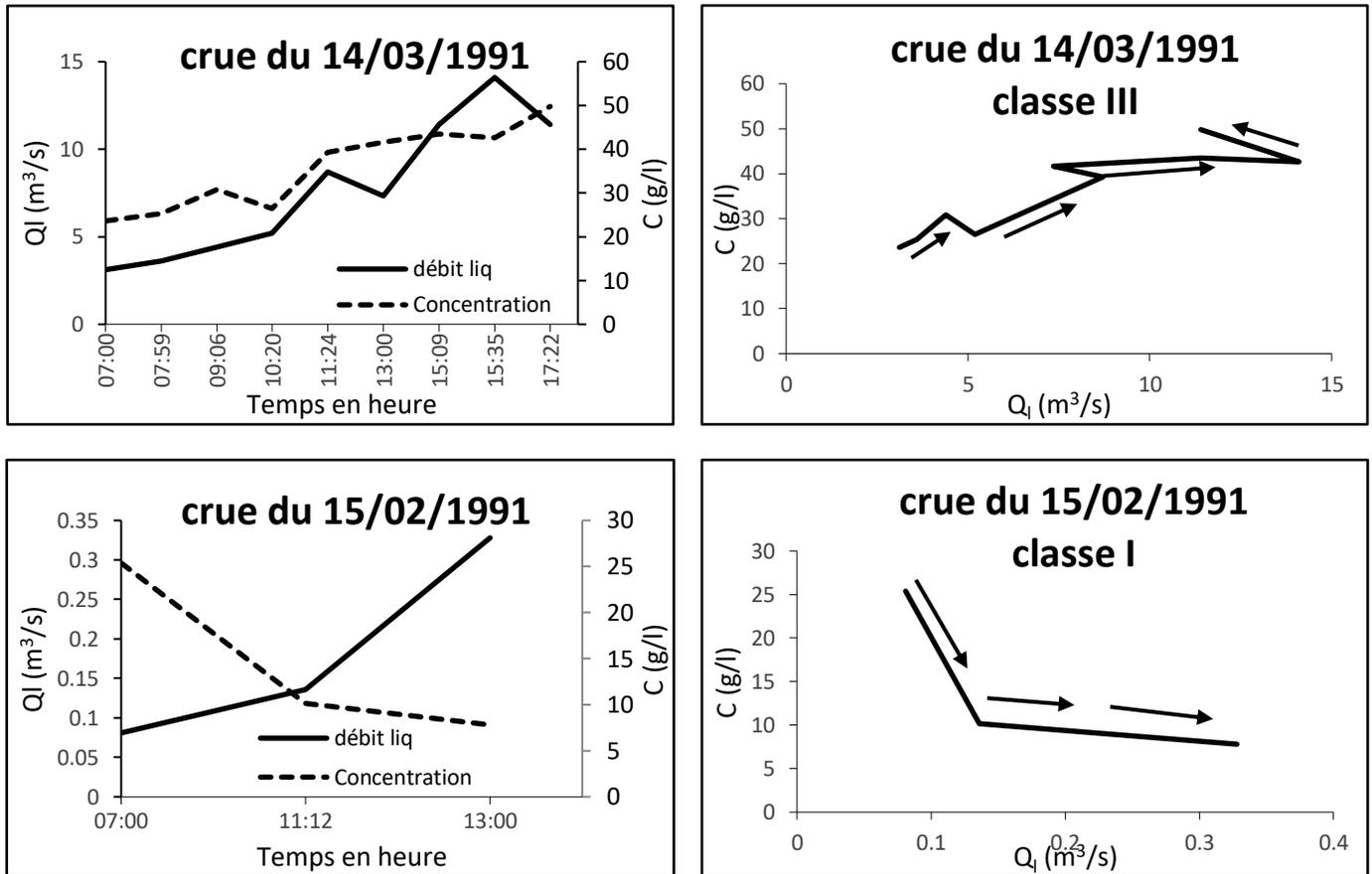


Figure III.8 Evolution des concentrations des sédiments transportés en suspension et des débits liquides pendant les crues à l'Oued Zeddine (1990/2013) et classification des relations C- Q_i .

III.2.2 Discussions

III.2.2.1 Application au bassin versant de l'Oued Zeddine

L'application de l'approche des hystérésis, pour les différentes crues enregistrées au niveau du bassin étudié durant les périodes de données disponibles, fait ressortir la distribution (tableau III.5), des différentes classes d'évolution des relations concentration en sédiments transportés avec les débits liquides et leur fréquence relative.

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

Tableau III.5 Différentes classes d'évolution des relations concentration en sédiments transportés avec les débits liquides et leur fréquence relative dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

Classes	Nombre total des crues	Classe I Courbe simple	Classe II (clockwise)	Classe III Counterclockwise	Classe V Figure huit
Zeddine (1990-2013)	108	05	27	52	24
	100%	4,63%	25%	48,15%	22,22%

Les courbes de la figure III.8 présentent les fluctuations de la concentration des sédiments transportés en suspension et des débits liquides pour les crues. Elles montrent qu'à l'Oued Zeddine, l'évolution des concentrations en fonction des débits liquides pendant les crues suit principalement quatre modèles.

Classe III : La classe III ou la classe en boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (counterclockwise) est dominante dans le bassin versant de l'Oued Zeddine avec un taux de 48,15 pour cent. En générale, elle présente les crues survenues en automne (30,76 %), en hiver (32,69%) et en printemps (28,84) Les crues d'automne surviennent après une saison généralement sans pluie où le sol est particulièrement fragilisé et facilement érodable et où les pluies peuvent être violentes mais de courte durée. L'érosion est active dès les premières pluies qui, même si elles sont d'un faible apport liquide, peuvent donner des concentrations importantes en sédiments en suspension.

Pendant les crues de printemps, saison caractérisée par de fortes pluies tombant après une saison d'hiver bien que relativement froide mais généralement peu pluvieuse. Aussi, la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes d'Automne comparé, à un manque ou une diminution des réserves en sédiments à la fin de la saison sèche. Ceci permettra, l'apparition du pic des concentrations avant, le pic des débits liquides, surtout si l'averse est de faible intensité et de longue durée.

Classe II : Classe II ou classe dans la sens des aiguilles d'une montre (clockwise) se présente avec un pourcentage de 25 pourcent. Dans cette classe, la source des sédiments se trouve soit au fond du cours d'eau, soit près de l'exutoire ou bien les zones proches du fond du cours d'eau

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

(Slattery et al., 2002 ; Rodriguez et al., 2008 ; Le François et al., 2007 ; Amborg et al., 1967 ; Van Sickle et Beschta, 1983 ; Klein, 1984 ; Jeje et al., 1991 ; Asselman et Middlekoop, 1998). Elle est caractérisée surtout par les crues d'hiver (33,33%) et du printemps (37,03 %). Ces crues arrivent après les fortes pluies de la saison d'automne. Les eaux de ruissellement sont donc moins chargées en particules solides car la quasi-totalité des sédiments du lit a été transportée lors des premières crues de la saison d'automne donc Les apports solides ont connu une diminution sensible, car la plus grande partie des particules solides a été transportée par les premières crues d'automne (Achite et Meddi, 2005; Stephen, 2000). Durant cette période, le sol étant moins saturé et plus couvert résiste mieux à la pluie. Ce mode d'évolution se manifeste par un décalage entre l'onde de crue qui affecte les masses d'eau et le transfert plus lent des matériaux fournis à partir des versants. Ces crues sont généralement générées par de grosses averses qui trouvent un sol humide. L'eau présente dans le sol avant la crue permet d'augmenter les forces de cohésion du sol et diminue le taux de détachement des particules. La source principale de la charge solide en suspension est alimentée par l'érosion en ravines et la dégradation des berges du cours d'eau.

Classe V : Classe V ou bien classe en boucle en forme de huit présente un taux de 22,22 pourcent. Elle résulte la combinaison de deux hystérésis : la classe II et la classe III (Williams, 1989). Elle représente surtout les crues survenues en automne (50%), en printemps (33,33%) et avec un degré moindre en hiver (16,66%).

En effet, si l'averse est de faible intensité et de longue durée et à l'existence d'une couche de pavage formée sur le lit de l'Oued antérieurement à la crue influencée par la variabilité spatiotemporelle de la précipitation, l'augmentation de Concentration peut être plus rapide que celle de débit liquide et le pic de la concentration vient avant celui du débit. Ceci donnera une boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre, pendant la montée de la crue. Après le pic, la concentration diminue lentement en fonction du temps, relativement aux débits liquides, pendant la décrue et on obtient une boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre pour la relation (C-Q).

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

Classe I : le modèle de courbe simple de la classe I, ligne droite ou courbe à concavité vers le haut ou vers le bas indique aussi que les concentrations des sédiments en suspension doivent augmenter ou diminuer en parfaite synchronisation avec le débit liquide. Ce modèle est survenu en général pour les crues de printemps (mars, avril ou mai). A l'Oued Zeddine, ce modèle se manifeste par un pourcentage de 4,63%. Cela pourrait être associé avec un apport continu de sédiments pendant les crues (Wood, 1977) et/ou à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes en hiver. En effet, le transport solide à oued Zeddine est important pendant le printemps. Et cette modèle de la courbe simple s'explique que le sol à la fin du Printemps et début de l'été est apte à l'érosion intense due à la température élevée dans cette période. Dans celle-ci le sol est particulièrement fragilisée et facilement érodable.

III.2.3 Analyse des hystérésis

Les concentrations des sédiments en suspension sont directement liées aux débits, dans les petits cours d'eau. Généralement, elles augmentent très rapidement pendant les montées de crues, produisent une pointe avant le débit liquide maximal puis diminuent plus lentement pendant la décrue. Autrement, le débit liquide et la concentration instantanée des sédiments en suspension peuvent ne pas avoir une relation stationnaire pendant un écoulement simple dû à une averse. La tendance pour que la concentration en sédiments soit différente pour des débits identiques est l'effet d'hystérésis. Le caractère cyclique de la relation concentration en matières solides en suspension en fonction du débit liquide est illustré dans la Figure III.9.

Cette dernière, montre que l'hystérésis se distingue par trois périodes (Benkhaled et Remini 2003).

- La première période Figure III.8 (1) est caractérisée par une forte augmentation de la concentration de sédiments en suspension et du débit. Cette phase est définie par l'arrivée successive des premières quantités de matériaux en suspension produites essentiellement par l'effet « splash » des pluies érosives dans les zones de ruissellement proches de l'exutoire du bassin. Cette période peut aussi correspondre à la remobilisation des matériaux déposés sur le fond lors des basses eaux (Kattan *et al.*, 1987).

Chapitre III Concentrations des sédiments en suspension et débits liquides dans le bassin versant de l'Oued Zeddine

- La seconde période (Figure III.8 (2)) est caractérisée par une diminution de la concentration des sédiments en suspension et une forte augmentation du débit. Cette phase de transport correspond à la dilution de la concentration des sédiments et peut également être attribuée à l'érosion des berges du cours d'eau (Kattan *et al.*, 1987, Dinehart 1992).
- La troisième période (Figure III.8 (3)) est caractérisée par une diminution de la concentration des sédiments en suspension et du débit. Cette phase correspond au dépôt des matériaux sur le lit des cours d'eau et dans les zones alluviales du bassin.

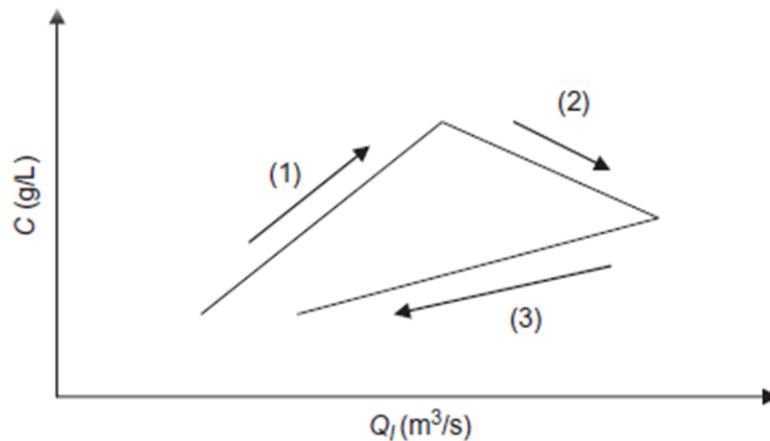


Figure III.9 Modèle de la relation C/Q_l formant une hystérésis.
1: érosion; 2: transport; 3: sédimentation.

De manière générale, les causes de formations de ces boucles sont la diminution du stock de sédiments au cours de l'événement et l'existence d'une couche de pavage formée sur le fond du lit antérieurement à la crue. L'observation d'hystérésis anti-horaire indique que les sédiments transportés durant la crue du bassin versant de l'Oued Zeddine proviennent du lit de la rivière.

Conclusion

Conclusion

Conclusion

L'érosion hydrique est un phénomène naturel dont l'intensité varie en fonction des précipitations et de la force du courant, mais aussi de la nature du sol, de la pente et du drainage du terrain et de son exposition aux intempéries.

L'érosion hydrique reste un problème majeur en Algérie dont le principal facteur est le ruissellement dont la répartition spatiale est contrôlée par celles des précipitations et autres facteurs naturels : topographiques, couvert végétal, ... etc.

L'Algérie est de ce fait, l'un des pays les plus menacés dans le monde par l'érosion.

Ce travail a pour objectif de trouver la relation entre les concentrations des sédiments en suspension et les débits liquides et, de trouver l'origine des sédiments évacués par l'Oued Zeddine. L'étude est basée sur les données observées durant une période allant du 1990 à 2013.

Les résultats obtenus au cours de ce travail ont permis de conclure ce qui suit :

- ✚ Le relief du bassin versant de l'Oued Zeddine est un relief fort (D_s) ;
- ✚ Le coefficient de compacité est égal à 1,52 ce qui prouve que le bassin est allongé. Cette forme induit de faibles débits de pointe de crue ;
- ✚ La densité de drainage au niveau de l'Oued Zeddine est égale à 0,74 km/km², ceci traduit que le bassin présente dans son ensemble une formation géologique perméable ;
- ✚ Il y a une mauvaise corrélation entre les débits liquides (m³/s) et les concentrations des matières en suspension (g/l). Cela signifierait que la mesure des deux paramètres en période de basses eaux est difficile dans ce bassin, contrairement à ce que l'on pense et que dans ce cas, elles sont fortement entachées d'erreurs ;
- ✚ L'évolution des concentrations des sédiments en fonction des débits liquides durant les crues montre que la réponse des concentrations aux débits suit quatre modèles de courbes (courbe simple de la classe I, courbe dans le sens des aiguilles d'une montre, dans le sens

Conclusion

contraire des aiguilles d'une montre et en forme en huit). Le modèle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre est le plus fréquent (48,15%). On le trouve, essentiellement, pour des crues d'hiver (32,69%) et d'automne (30,76%). Pour ce modèle, l'érosion est active dès les premières pluies qui, même si elles sont d'un faible apport liquide, peuvent donner des concentrations importantes des sédiments en suspension. Les sédiments transportés durant la crue pour ce modèle proviennent, essentiellement, du lit de la rivière, mais aussi des berges et des affluents.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abir D et Oumellal, 2014. Cartographie des risques d'érosion et évaluation du transport solide du bassin versant haut et moyen Cheliff. Mémoire, Univ. Tizi ousou, Algérie, 102 p.
- Achite M, 2002. Approche statistique d'évaluation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina (Nord-ouest algérien). Watmed, Tunisia. 10-13 oct, vol 2, 894-899.
- Achite M et Meddi M., 2004. Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). Cahier sécheresse, 15(4): 367-373.
- Achite M et M Meddi, 2005. Variabilité spatiotemporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin de l'oued Mina (Nord-Ouest algérien). Rev. Sci. Eau, 18 (numéro hors-série), 37-56.
- Achite M et S. Ouillon, 2007. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria, (1973-1995). J. Hydrol., 343, 187-202.
- ANBT, 2017. Agence nationale des barrages et transferts.
- ANRH, 2017. Agence Nationale des Ressources Hydriques.
- Asnoui F, 2014. Etude du transport solide en suspension dans le Bassin Versant d'oued AL ABD, Mémoire de master, Université de Tlemcen.
- Asselman N.E.M et Middelkoop H, 1998. Temporal variability of contemporary floodplain sedimentation in the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. Earth Surf. Process. Land., 23, 595-609.
- Asselman, N.E.M., 1999. Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the river Rhine. Hydrological Processes, 13, 1437–1450.
- Azouzi, B., & Ladjal, I. (2014). Etude du comportement varietal de cinq varietes de ble dur sous l'effet des deux doses de semis differentes en environnement semi-aride de Djelfa. Sciences & Technologie. C, Biotechnologies, (40), 25-31. Consulté à l'adresse <http://193.194.84.141/index.php/c/article/view/1689>.

Références bibliographiques

- Baca P, 2008. Hysteresis effect in suspended sediment concentration \checkmark in the Rybárik basin, Slovakia. *Hydrological Sciences Journal*, 53 (1), 224–235, doi: 10.1623/hysj.53.1.224.
- Barké M K, Oussein I, Biolders C, Karimou J.M, Ambouta et Tychon B, 2017. Caractérisation morphologique des cuvettes oasiennes du Centre-Est du Niger. p. 255-276. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.5607>.
- Battala R.J et M. Sala, 1994. Temporal variability of suspended sediment transport in a Mediterranean sandy gravel-bed river. Dans : Canberra Symposium, 1994. Variability in Stream Erosion and Sediment Transport. OLIVE L.J., R.J. LOUGHRAN et J.A. KESBY (Éditeurs), IAHS Publication, No 224, Wallingford, Grande-Bretagne, pp. 299-305.
- Bavard J.P et Petit F, 1991. Les cours d'eau (dynamique du système fluvial). Collection Armand Collin. Ed. Masson. 147 p., 69 fig.
- Ben Khaled A et Remini B, 2003." Variabilité temporelle de la concentration en sédiments et phénomène d'hystérésis dans le bassin de l'Oued Wahrane (Algérie)". *Hydrological Sciences Journal–des Sciences Hydrologiques*, 48(2) avril 2003.
- Ben Khaled A et Rimini B, 2003. "Analyse de la relation de Puissance : débit solide – débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'oued Wahrane (Algérie) ". *Rev. Sci. Eau* 16/3(2003) 333-356.
- Ben Khaled L, Gomez A, Honrubia M et Oihabi A, 2003. Effet du stress salin en milieu hydroponique sur le trèfle inoculé par le Rhizobium, *Agronomie*, EDP Sciences, 2003, 23 (7), 553-560 p.
- Bentekhici N et Saad A, 2016. Cartographie de la vulnérabilité de la nappe à la pollution dans la plaine de Sidi Bel Abbès. Apport des données de télédétection et le SIG. *Bull. Sci. Géogr.*, 30, 42-52.
- Bouanani, A, et al., 1999. Resources and stocks of water of Algeria. In: First international conference on the geology of Africa, 23–25 November, Assiut, Egypt. Assiut: University of Assiut, Vol. 1, 473–480.
- Bouanani A, 2004. Hydrologie, transport solide et modélisation. Étude de quelques sous-bassins de la Tafna (NW–Algérie). Thèse de Doctorat, Univ. Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 250 p.

Références bibliographiques

- Boudjerda M, 2005 .Protection contre les inondations de la région de fouka (W.Tipaza), Mémoire de magister, Ecole national supérieur d'hydraulique.
- Boussema H-R, 1996. Systèmes d'information pour la conservation et la gestion des ressources naturelles. Colloque international sur le rôle des TIC en matière de protection de l'environnement, Tunis, Tunisie, 112-116.
- Brasington J et RICHARDS K, 2000. Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills. *Hydrol. Process.*, 14 (14), 2559-2574.
- Bravard, J.P et Petit F, 2002. Les cours d'eaux «Dynamique du système Fluviale », Edition Armand Colin, Paris, France.
- Celik I, Aydin M et Yazici U, 1996. A review of the erosion control studies during the republic period in Turkey. In: Kapur S., Akça E., Eswaran H., Kelling G., Vita Finzi, Mermut A-R, Ocal A-D, editors. 1st international conference on land degradation, Adana, Turkey, 10-14 June 1996, 175-180.
- Chebanni R, Djilli K et Roose E, 1997. Etude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser (Tlemcen), Article, 1ères journées d'étude sur les agricultures de montagne, Mascara, Algérie.
- Chevalier J-J, Pouliot J, Thomson K et Boussema M-R, 1995. Systèmes d'aide à la planification pour la conservation des eaux et sols (Tunisie). Systèmes d'information géographique utilisant les données de la télédétection. Actes du colloque scientifique international (Hammamet, Tunisie, 1-2 Novembre, 1994, 4-12.
- Chibbani R, Djilli K et Roose E., 1999. Étude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. *Bull. ORSTOM, Rés. Eros.*, 19, 85-95 p.
- Chikita K.H, Kemnitz R et Kumai R, 2002. Characteristics of sediment discharge in the subarctic Yukon River, Alaska. *Catena*, 48 (4), 235-253.
- Colby, B. R., 1956. The relationship of sediment discharge to streamflow. U. S. Geological Survey Open File Report.
- Demmak A, 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, France, 323 p.
- Dinehart R.L, 1992. Sediment data for streams near Mount St. Helens, water years 1984-1987. US Geological Survey Open-File Report 91-219, 3, 178 p.

Références bibliographiques

- Dutil, P, 1984. L'érosion en grande culture, revue technique des agriculteurs dynamique, N°169, France.
- Elahcene O & Remini B, 2009. Corrélation entre la concentration en matières en suspension et le débit liquide dans le bassin versant de oued Bellah (Algérie). *European Journal of Scientific research*. ISSN 1450-216X, Vol. 26, N°.1, pp. 139-146.
- Elahcene O., Terfous A., Remini B., Ghenaim A et Poulet J.-B.. Quantification des apports en sédiments en suspension par les modèles régressifs dans un bassin méditerranéen de zone semi-aride : Bellah (Algérie). Colloque international « La gestion de l'eau, défi du XXIème siècle ». IUT du Limousin, Limoges, France, du 19 au 21 octobre 2011.
- Elahcene O , 2013 : Etude du transport solide par charriage et en suspension dans le bassin versant de l'oued bellah (tipaza) doctorat en science agronomique école nationale supérieure agronomique el harrache (alger) . Faculté des Sciences et Techniques – Fès Master Sciences et Techniques
- Elahcene O., Terfous A., Remini B., Ghenaim A et Poulet J.-B., 2013. Etude de la dynamique sédimentaire dans le bassin versant de l'Oued Bellah (Algérie). *Hydrological Sciences Journal*, 58-1, 1-13.
- Etchanchu D et J.L. Probst, 1986. Érosion et transport de matières en suspension dans un bassin versant en région agricole. Méthode de mesure superficielle, de sa charge et de ses deux composantes du transport solide dans un cours d'eau. *CR Acad Sci. Paris*, 17, 1063-1067.
- Evans C et Davies T.D, 1998. Causes of concentration/ discharge hysteresis and its potential as a tool for analysis of episode hydrochemistry. *Water Resour. Res.*, 34 (1), 129- 137.
- FAO, 1990. Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides. Bulletin Pédologique no. 57, FAO, Rome, Italy.
- Frécaut F, 1971 .La Moselle et son bassin. Contribution à l'hydrologie et la dynamique fluviales :en milieu tempéré océanique. Thèse, doctorat, Brest, Reprod. Univ. Lille III.
- Gellis A.C, 2013. Factors influencing storm-generated suspended-sediment concentrations and loads in four basins of contrasting land use, humid-tropical Puerto Rico. *Catena*, 104, 39-57.

Références bibliographiques

- Ghenim, A., Terfous, A., et Seddini, A., 2007. Etude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéenne: cas du bassin versant de l'Oued Sebdou (Nord-Ouest algériens). *Sécheresse*, 18 (1), 39–44.
- Ghenim, A., Seddini, A., et Terfous, A., 2008. Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'Oued Mouilah (Nord-Ouest algérien). *Hydrological Sciences Journal*, 53 (2), 448–456, doi:10.1623/hysj.53.2.448.
- Graf, W. H., 1971. *Hydraulics of Sediment Transport*: McGraw Hill, New York
- Gravelius, H. (1914) *Grundrifi der gesamtenGewässerkunde*, Band 1: h'lufikunde (Compendium of Hydrology?, vol. 1: Rivers, in German). Goschen, Berlin, Germany.
- Gurnell A.M, 1987. Suspended Sediment. Dans : *Glaciofluvial Sediment Transfert: An Alpine Perspective*. GURNELL A.M. et M.J. CLARK (Éditeurs), Wiley, Chichester, Grande-Bretagne, pp. 305-354.
- Heidel, S.G., 1956. The progressive lag of sediment concentration with flood waves. *Transactions of the American Geophysical Union*, 37 (1), 56–66.
- Heusch .B, 1970 .L'érosion du Pré Rif occidental : une étude quantitative de l'érosion hydrique. *Ann de la Recherche Forestière du Maroc* 12 : 9-176.
- Heusch, B., 1982. Etude de l'érosion et des transports solides en zone semi-aride. *Recherche bibliographique sur l'Afrique du Nord*. Projet RAB/80/04/PNUD.
- Hodkins R, 1999. Controls on suspended-sediment transfer at a high-arctic glacier, determined from statistical modelling. *Earth Surf. Proc. Land.*, 24, 1-21.
- Jansson M.B, 2002. Determining sediment source areas in a tropical river basin, Costa Rica. *Catena*, 47, 63-84.
- Jeje L.K., O.O Ogunkoya et J.M Oluwatimilehin, 1991. Variation in suspended sediment concentration during storm discharges in three small streams in upper Osun basin, Central Western Nigeria. *Hydrol. Process.*, 5, 361-369.
- Kattan Z. et J.L. Probst, 1987. Transport en solution et en suspension par la Moselle en période de crues. Dans : *Actes des Journées d'Hydrologie, Crues et Inondations*, Strasbourg, France, pp. 143-167.
- Kattan Z., J.Y. Gac et J.L. Probst, 1987. Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin, estimation of the runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. *J. Hydrol.*, 92, 59-76.

Références bibliographiques

- Klein M, 1984. Anti-clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms: Holbeck catchment; Yorkshire, England. *Catena*, 11 (2-3), 251-257.
- Komercu. M, Onsoy. H, Kankal. M et Karasu. S, Etude des transports solides en vue de gestion des ouvrages hydrauliques dans la région de la mer noire, Est en Turquie.
- Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C et Daroussin J, 2002. L'érosion hydrique des sols en France. <http://erosion.orleans.inra.fr/rapport2002/>
- LE Francois J., C. Grimaldi, C.O. Gascuel et N. Gilliet, 2003. Origins and dynamics of suspended sediment in small agricultural catchments. The Fourth Inter Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, 11 au 14 juillet, Guimarães, Portugal, Compte rendu, pp. 1-13.
- Lefrançois, J., et al., 2005. Origins and dynamics sediment in small agricultural catchments. In: Lobo Ferreira, J.P. et José M.P. Viera, eds., Fourth Inter-Celtic colloquium on hydrology, 11–14 juillet, Guimarães, Portugal. 1–13. <http://www.aprh.pt/celtico/PAPERS/17.PDF> [Accessed 31 October 2012].
- LE Francois J., C. Grimaldi, C.O. Gascuel, C. DOUX et N. Gilliet, 2007. Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main source on small agricultural catchments. *Hydrol. Process.*, 21, 2923-2933.
- Lenzi M. et L. Marchi, 2000. Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (Northeastern Italy), *Catena*, 39 (4), 267-282.
- Megnounif, A., Terfous, A., et Bouanani, A., 2000. Etude du transport solide dans l'oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). Colloque Méditerranéen Eau-Environnement. Alger. 128-132.
- Megnounif, A., Terfous, A., et Bouanani, A., 2003. Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (Nord-Ouest Algérien). *Revue des Sciences de l'eau* 16(3), 369-380.
- Megnounif, A., Terfous, A., Ghenaim, A. & Poulet, J. B., 2007. Key processes influencing erosion and sediment transport in a semi-arid Mediterranean area: the Upper Tafna catchment, Algeria. *Hydrol. Sci. J.* 52(6), 1271-1284.
- Meyer L.D., Foster G.B. & Nikolov S, 1975. Effect of flow rate and canopy on mill erosion. *Trans.Am.Soc.Agric.Eng.*

Références bibliographiques

- Mokhtari E .2007 .Contribution à l'étude du transport solide en suspension Bassin de l'Oued Cheliff – Ghrib université badji mokhtar – ANNABA mémoire de magister
- Mokadmi S, 2012. Etude hydrologique et modélisation du transport solide en suspension dans le sous bassin versant de l'oued Mekerra. Mémoire, Univ. d'Oran, Algérie, 153 p.
- Nyanga, Progress. (2012). Factors Influencing Adoption and Area under Conservation Agriculture: A Mixed Methods Approach. Sustainable Agriculture Research. 1. 10.5539/sar.v1n2p27.
- Picouet, C., Hingray, B., et Olivry, J.C., 2000. Modélisation conceptuelle globale du régime du transport particulaire sur les fleuves tropicaux d'Afrique: application aux bassins du Niger supérieur et du Bani, Mali. Revue des Sciences de l'Eau, 13 (4), 463–481. http://www.rse.inrs.ca/art/volume13/v13n4_463.pdf [Accessed 31 October 2012].
- Poesen, J., 1984. The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume. Zeit. Geom. Suppl. Bd. 49: 117-131.
- Remini, B. 1999. Envasement des barrages dans le Maghreb. Bul. Int. de l'eau et de l'Env., 22 : 4- 8.
- Remini, B., 2002. L'envasement des barrages et la technique du soutirage: quelques exemples algériens. Colloque international sur l'eau. Gestion quantitative et qualitative des ressources en eau, Chlef, Algérie.
- Remini B., 2003 .l'envasement des barrages et la technique de soutirage : quelque exemple algériens. Colloque international sur l'eau « gestion quantitative et qualitative des ressources en eau ».chlef ; Algérie
- Remini, B., 2008. La surélévation des barrages: une technique de lutte contre l'envasement—exemples algériens. La Houille Blanche, 5, 103–108.
- Riad, S., Bouanani, A., Mania, J., Bouchaou, L., Bensalah, M., et Baba hamed, K., 1999. Analyse fréquentielle des débits maximums instantanés de quelques bassins sud ouest méditerranéen cas des sous bassins de la Tafna en Algérie et de la Moulouya au Maroc. Coll. Int. « Technologies nouvelles et amélioration de la gestion des risques majeurs ». 15-17 mars 1999, (Kenitra, Maroc).
- Roche M. 1963. Hydrologie de surface, Gauthier-Villars paris, 430 p.
- Rodriguez-Blanco M.L., M.M. Tabaodacastro, M.T. Taboada-Castro et J.L. Oropezamota, 2008. Suspended sediments-discharge hysteresis during rainfall events in a

Références bibliographiques

- small headwater catchment in the NW Spain. Journée d'étude de l'Université de La Corogne, A Coruña, Espagne, pp. 205-217.
- Roose E., 1973. "Dix-sept ans de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallithique sableux de Basse Côte d'Ivoire". ORSTOM, Abidjan, 12p. Thèse Doc. Ing. Fac. Sci. Abidjan, n° 20.
 - Roose E., 1984. "Causes et facteurs de l'érosion hydrique sous climat tropical, conséquences pour les méthodes antiérosives". *Machinisme Agric. Trop.* 87 : 4-18.
 - Roose et Piot, 1984. Runoff erosion and soil fertility restoration on the mossi plateau (central zone of upper-volta). *Symp. Intern challenge in African Hydrology and water resource. Harare Symposium I.A.N.S publ*, 144, p 485-498.
 - Roose E., 1985. "Dégradation de terres et développement en Afrique de l'Ouest". *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, 20 3/4, 505-537.
 - Roose, E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols, *Bulletin pédologique de la FAO*, 70 p.
 - Roose E., Bourouga L et Chehebbani R., 2001. "Le ravinement en Algérie : typologie. Facteurs
 - Roose E et De Noni G., 2004. "Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique ": revue et perspectives. *Sécheresse* 2004 ; 15 (1) : 121, p. 9.
 - Seeger M., M.P. Errea, S. Begueria, J. Arnaez, C. Marti et J.M. Garcia-Ruiz, 2004. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *J. Hydrol.*, 288, 299-311.
 - Shaban A. et M. Khawlie, 1998. Geoenvironmental assessment of riparian zones under extreme climatic events: a case study of representative rivers in Lebanon. *Mediterranean Rivers and Riparian Zones-processes and Management Symposium*, 21 septembre au 2 octobre, Saragosse, Espagne, 25 p.
 - Slattery M.C., P.A. Gares et J.D. Philips, 2002. Slope-channel linkage and sediment delivery on North Carolina coastal plain cropland. *Earth Surf. Process. Land.*, 27, 1377-1387.
 - Stephen T, 2000. Process, from and change in dry land rivers: a review of recent research. *Earth-Sci. Rev.*, 51, 67- 107.

Références bibliographiques

- Tavares J.P, 2010. Érosion des sols du Cap Vert : processus et quantification à l'échelle de trois bassins versants de l'île de Santiago. Thèse de Doctorat, Univ. Bourgogne, Département des sciences de la terre et de l'environnement, France, 227 p.
- Touahir S, 2007. Étude comparative du transport solide en suspension entre les sous-bassins des oueds Zeddine et Tikazale(Chelif). hèse de Magister, ENSH, Blida, 145 p.
- Touahir S, Asri A, Remini B et Saad H, 2018. « Prédiction de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Zeddine et de l'envasement du barrage Ouled Mellouk (Nord-Ouest algérien) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement* [En ligne], vol. 24 – n° 2 | 2018, mis en ligne le 26 juin 2018, consulté le 03 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/12083> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.12083
- Touaibia, 28 Février au 1 Mars 2009 , Hydrologie des Retenues, SEMINAIRE, Retenues Collinaires, Corne d'Or. TIPAZA.
- Vansickel J. et R.L. Beschta, 1983. Supply-based models of suspended sediment transport in streams. *Water Resour. Res.*, 19 (3), 768-778.
- Walling D.E, 1974. Suspended sediment and solute yield in small catchment prior to urbanization. *T. I. Brit. Geogr. Spec. Pub.*, 6, 169-192.
- Walling, D. E et Webb, D. W., 1981. The reliability of suspended sediment load data. *Erosion and sediment transport measurement, Proceedings of the Florence (Symposium, june 1981) IAHS Publ. No. 133.*
- Walling, D.E., 1984. The sediment yields of Africa rivers. In: D.E. Walling, S.S.D. Foster, and P. Wurzel, eds., *Challenges in African hydrology and water resources (Harare Symposium)*. Wallingford, UK: IAHS Press, IAHS Publ. 144, 265–283. Disponible en ligne à: http://iahs.info/redbooks/a144/iahs_144_0265.pdf [Accessed 31 October 2012].
- Williams G.P, 1989. Sediments concentrations versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *J. Hydrol.*, 111, 89-106.
- Wood P.A, 1977. Controls of variation in suspended sediment concentration in river Rother, West Sunex, England. *Sedimentology*, 24, 437-445.
- Yles F. et A. Bouanani, 2012. Quantification et modélisation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Saïda (Hauts Plateaux Algériens). *Sécheresse*, 23 (4), 289-296.

Références bibliographiques

- Yles F, 2014. Hydrologie - Modélisation pluie-débit et transport solide dans le bassin versant de l'oued Saïda. Thèse de Doctorat, Univ. Tlemcen, Algérie, 142 p.
- Zabaleta A., M. Martinez, J.A. Uriarte et I. Antiguedad, 2007. Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. *Catena*, 71 (1), 179- 190.

Webographie

<http://www.risques-meteo.ac-versailles.fr/Cruces-lentes> consulté le 08/03/17 .

<http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1/II.Formes.html> consulté le 19/04/17 .

<http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1/II.Formes.html> consulté le 08/03/17 .

<http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1/I.Origine.html> consulté le 22/3/2017 .

<http://lhe.epfl.ch/rapport/DEAJodeau.pdf> consulté le 17/05/17 .

<http://www.documentation.eaufrance.fr/entrepotsOAI/AERMC/R217/77.pdf> consulté le 23/05/17 .

Annexe

