

# **UNIVERSITE DE BLIDA 01**

**Faculté de Technologie**

Département des Sciences de l'Eau et Environnement

**THESE DE DOCTORAT**

Spécialité : Génie Rural

**IMPACT DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION  
SUR L'ENVASEMENT DU BARRAGE DE SIDI  
M'HAMED BEN AOUDA**

Par

**Redhouane GHERNAOUT**

Devant le jury composé de :

Mr. M. BESSENASSE	Professeur, U. de Blida 01	Président
Mr. M. MEDDI	Professeur, E.N.S.H. de Blida	Examineur
Mr. A.MEBARKI	Professeur, U. de Constantine	Examineur
Mr. A. BENKHALED	Professeur, U. de Biskra	Examineur
Mr. B. REMINI	Professeur, U. de Blida 01	Rapporteur

Blida, Décembre 2014

*Ce travail repose en grande partie sur des données pluviométriques et hydrométriques mises gracieusement à notre disposition par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) d'Alger, qu'elle trouve ici mon entière gratitude et mes plus sincères remerciements.*

## DEDICACE

Je tiens vivement à dédier ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :

- Mes très chers parents qui m'ont soutenu par leur affection et conseils, et qui ont été tout le long de mon cursus, aussi bien scolaire qu'universitaire, les plus exigeants sur ma formation et une source d'énergie inépuisable ;
- Fairouz mon épouse qui, avec son dévouement et ses sacrifices, ce travail a pu voir le jour ;
- Mes enfants « Manel et Ahmed Mahdi » à qui j'ai pris de temps pour préparer cette thèse ;
- Tous mes chers frères et sœurs ;
- La mémoire de mon beau père, que Dieu le tout puissant lui accorde sa sainte miséricorde et l'accueil en son vaste paradis ;
- Ma belle mère, et tous mes chers beaux frères et belles sœurs ;
- Toute ma famille et ma belle famille ;
- Tous les enseignants qui ont contribué à ma formation ;
- Tous mes amis sans exception.

Redhouane GHERNAOUT

## REMERCIEMENTS

Arrivé au terme de la rédaction de cette thèse, Il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma gratitude et mes remerciements à toutes celles et tous ceux qui, par leur enseignement, leur soutien et leurs conseils, m'ont aidé à sa réalisation.

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, le courage et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur et directeur de thèse Prof. REMINI Boualem pour la confiance qu'il a placée en moi, pour sa bienveillance, attention et ses multiples conseils et encouragements sans lesquels ce travail n'aurait pu être mené à bien.

Mes remerciements s'adressent tout particulièrement à Madame ABDA Lila, ingénieur hydrologue à l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) d'Alger, dont l'aide m'a été précieuse.

Mes vifs remerciements vont également à : Mr Taïbi M., directeur général; Mr BAHLOULI L., responsable des études hydriques; Mme SELLAOUI L., ingénieur hydrologue, rencontrées lors des recherches effectuées au niveau de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) d'Alger et qui ont accepté de répondre à mes questions avec gentillesse.

Je tiens également à remercier tous les membres du jury, pour avoir accepté d'en faire partie et pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette thèse.

Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de cette thèse.

Merci à tous et à toutes.

## RÉSUMÉ

Le phénomène de transport solide en suspension est très complexe dans le bassin versant de l'Oued Mina en raison d'une importante hétérogénéité des sols, un faible couvert végétal et une hydro-pluviométrie mal répartie aussi bien dans l'espace que dans le temps. L'approche méthodologique adoptée dans cette thèse consiste d'abord à rechercher un modèle régressif pouvant mieux expliquer le débit solide par le débit liquide tous les deux mesurés au niveau des deux stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali, en étudiant cette relation à différentes échelles temporelles: annuelle, saisonnière, mensuelle et journalière. Les données instantanées du débit liquide - débit solide disponibles couvrent les années (1985/1986 à 2000/2001 et 1982/1983 à 2000/2001), soit 16 et 19 années pour les deux stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali respectivement.

Une analyse qualitative à différentes échelles temporelles des paramètres a et b de la relation puissance reliant le débit solide au débit liquide est aussi présentée en vue d'une meilleure compréhension de cette relation et de relier ces paramètres aux facteurs induisant le débit solide. Les résultats obtenus ont permis d'identifier de manière assez concluante les modèles saisonniers et de montrer que cette échelle d'analyse est très représentative du phénomène de transport solide dans un bassin semi aride Nord-Africain. D'autre part, l'événement averse - crue s'est avéré l'unité hydrologique la plus adéquate pour les analyses en relation avec le transport solide. L'étude a montré que la relation en puissance reliant le débit solide au débit liquide est influencée par la précipitation, le ruissellement et l'humidité du sol, et a illustré la complexité du phénomène de transport solide en suspension.

Les relations puissance obtenues à l'échelle mensuelle, expliquant la plus grande partie de la variance, sont ensuite utilisées pour interpoler, extrapoler et analyser les apports solides fins et grossiers déposés dans la retenue du barrage de SMBA depuis sa mise en service en 1977/1978, étant donné la disponibilité des débits moyens journaliers de 1953/1954 à 2001/2002 (station de oued El-Abtal) et de 1969/1970 à 2001/2002 (station de Sidi AEK Djilali). Nous estimons à  $450.23T/Km^2/an$  et  $288.495T/Km^2/an$  les apports solides spécifiques des sédiments en suspension au droit des stations de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali respectivement. L'apport solide, fin spécifique et moyen interannuel, du bassin versant de l'Oued Mina s'élève à  $424.682T/Km^2$ . Par ailleurs, nous avons constaté que la retenue du barrage de SMBA d'une capacité initiale de stockage de  $235Mm^3$  reçoit  $2.705MT$  ( $1.691Mm^3$ ) de matériau solide fin et grossier annuellement, soit une dégradation spécifique de  $552.087T/Km^2/an$  et un taux de comblement de la retenue de  $0.72%/an$ . Ce dernier a

accumulé 67.631MT (42.269Mm<sup>3</sup>) de sédiments fins et grossiers en 25 années (septembre 1977 à Août 2002), ce qui représente 18% de sa capacité. On prévoit l'accumulation de 72.713Mm<sup>3</sup> (30.94%) à l'horizon 2020, 106.533Mm<sup>3</sup> (45.33%) à l'horizon 2040 et un comblement total de la retenue à l'horizon 2136, soit une durée de vie de 158 ans.

Enfin, la relation fondamentale entre la concentration des sédiments en suspension C d'un cours d'eau et son débit liquide Q, durant les crues, est étudiée de manière qualitative par analyse des graphiques temporels et des courbes d'hystérésis (C-Q). L'étude de 20 crues de chacune des deux stations hydrométriques du bassin versant de l'Oued Mina est orientée beaucoup plus vers l'aspect graphique et statistique que donnerait la mise en graphe de C et Q. L'analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation concentration - débit liquide a permis, à travers des séries d'événements chronologiques, de caractériser la relation (C-Q), d'élaborer une classification de cette relation et d'en ressortir les modèles de boucle d'hystérésis dominants. Les modèles sens des aiguilles d'une montre, sens contraire des aiguilles d'une montre et modèle en forme de huit sont les plus dominants sur le bassin versant de l'Oued Mina, aussi bien pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal que pour la station de Sidi AEK Djilali. L'analyse de l'hystérésis par classes a montré l'absence relative de l'effet saisonnier sur la forme de la boucle obtenue. Les saisons d'Automne, d'Hiver et de Printemps présentent une hétérogénéité des classes à cause d'une hétérogénéité du bassin du point de vue lithologie et du point de vue de la répartition spatiale des pluies (irrégularité du régime pluviométrique et hydrologique du bassin).

Mots clés: Algérie - Relizène - Bassin versant de l'Oued Mina - Oued El-Abtal - Sidi AEK Djilali, Sidi M'hamed Ben Aouda (SMBA) - Pluie - Débit - Relation de puissance - Transport solide en suspension - Courbes de transport solide - Envasement - Hystérésis.

## ABSTRACT

The phenomenon of suspended sediment load is very complex in Mina river basin because of its important soil heterogeneity, vegetation deficiency and rainfall variability in time and space. The methodological approach adopted in this paper consists initially of finding a regressive power model which may explain better the suspended sediment discharge as a function of the flow discharge collected at Wadi El-Abtal and Sidi AEK Djilali hydrometric stations, by studying this relation at various temporal scales: daily, annual, monthly and seasonal. The instantaneous measurements of both flow discharge and suspended sediment concentration cover the periods (1985/86 to 2000/01 and 1982/83 to 2000/01), that is to say 16 and 19 years for Wadi El-Abtal and Sidi AEK Djilali hydrometric stations, respectively.

Also, a qualitative analysis on various temporal scales of the parameters  $a$  and  $b$  of the sediment transport power relation is presented in order to better understand the relationship and relate these parameters to factors inducing suspended sediment discharge. The results obtained showed that the seasonal scale revealed a very distinct effect and showed that this temporal scale is very representative of the sediment transport in a semi arid North African basin. On the other hand, the storm event appeared to be the temporal unit most adequate for hydrological analyses in relation to sediment transport. The study showed that the power relationship between sediment load discharge and flow fluid is influenced by precipitation, runoff amount and soil moisture, and has illustrated the complexity of the phenomenon of suspended sediment load.

Given the availability of mean daily discharges from 1953/1954 to 2001/2002 (Wadi El-Abtal station) and from 1989/1970 to 2001/2002 (Sidi AEK Djilali station), the obtained monthly power relations, explaining the greatest part of the variance, are then used to interpolate, extrapolate and analyse suspended and bed loads deposited on Sidi M'hamed Ben Aouda (SMBA) reservoir since being in service in 1977/78. The specific suspended sediments yields at the right of Wadi El Abtal and Sidi AEK Djilali hydrometric stations were estimated to be  $450.23T/Km^2/year$  and  $288.495T/Km^2/year$ , respectively. The mean suspended sediment yield of the basin reaches  $424.682T/Km^2/year$ . In addition, it was found that the Sidi M'hamed Ben Aouda reservoir with  $235Mm^3$  initial storage capacity receives  $2.705MT$  ( $1.691Mm^3$ ) of total solid material annually, which represent  $552.087T/Km^2/year$  of sediment yield and  $0.72%/year$  of reservoir sedimentation ratio. The SMBA reservoir received  $67.631MT$  ( $42.269Mm^3$ ) in 25 years (September 1977 to August 2002) representing

18% of its initial storage capacity. We prevent the accumulation of  $72.713\text{Mm}^3$  (30.94%) in 2020,  $106.533\text{Mm}^3$  (45.33%) in 2040 and a total filling of the reservoir in 2136 representing 158 years of useful life.

Finally, the fundamental relationship between the concentration of suspended sediment  $C$  of a river and its water discharge  $Q$ , during floods, is studied qualitatively by analyzing temporal graphics and hysteresis curves ( $C$ - $Q$ ) graphics. The study of 20 floods of both gauging stations in the watershed of Wadi Mina is much more oriented toward the graphics and statistics that would give the development graph of  $C$  and  $Q$ . Analysis of the hysteresis effect on the relationship concentration - liquid flow enabled, through a series of chronological events, to characterize the relationship ( $C$ - $Q$ ), to develop a classification of this relationship, and emerge models dominant hysteresis loop. The models clockwise direction, counterclockwise direction and figure-eight are the most dominants in the Wadi Mina watershed for both Wadi El-Abtal and Sidi AEK Djilali gauging stations. The analysis of hysteresis by classes showed relatively lack of seasonal effect on the shape of the loop obtained. The seasons Autumn, Winter and Spring have a heterogeneous classes because of heterogeneity of basin concerning the lithology and the spatial distribution of rainfall (irregular rainfall-runoff of the basin).

Keywords: Algeria - Relizene - Mina river basin - Wadi El-Abtal - Sidi AEK Djilali - Sidi M'hamed Ben Aouda (SMBA) - Rainfall - Runoff - Power relation - Suspended sediment load - Rating curves - Sedimentation – Silting -Hysteresis.



## الملخص

يعتبر الحمل الرسوبي العالق ظاهرة معقدة جدا في حوض وادي مينا نظرا لعدم تجانس التربة وضعف الغطاء النباتي والتوزيع غير المنتظم للأمطار والجريان في الزمان والمكان على حد سواء. تتمثل المقاربة المنهجية المعتمدة في هذه الأطروحة في البحث أولا عن نموذج انحداري يمكن أن يفسر على نحو أفضل العلاقة بين بيانات الحمل الرسوبي العالق والتصريف المرصودة بمحطتي القياس الهيدرومتريتين وادي الأبطال وسيدي عبد القادر الجيلاي وذلك بدراسة هذه العلاقة لعدة جداول زمنية: السنوي والموسمي والشهري و اليومي. تغطي البيانات اللحظية للتصريف والحمل الرسوبي العالق المتوفرة الفترة الممتدة بين (1986/1985 إلى 2001/2000 و 1983/1982 إلى 2001/2000) أي ما يعادل 16 و 17 سنة بالنسبة للمحطتين وادي الأبطال وسيدي عبدالقادر الجيلاي على التوالي.

سمح أيضا التحليل النوعي، لجداول زمنية مختلفة، للمعاملات (a) و (b) للعلاقة "قوة" التي تربط الحمل الرسوبي بالتصريف من تفسير سلوك هذه الأخيرة وبالتالي فهم أفضل لهذه العلاقة وربط هذه المعاملات بالعوامل المحفزة لنقل الرواسب. لقد حددت النتائج وجود أنماط فصلية قاطعة وممتدة إلى حد ما لظاهرة نقل الرواسب في حوض وادي مينا من جهة، ومن جهة أخرى تبين أن الحادثة مطر- فيضان هي الوحدة الأنسب للتحاليل الهيدرولوجية فيما يتعلق بعمليات نقل الرواسب. بالإضافة إلى ذلك، أظهرت الدراسة بأن العلاقة "قوة" التي تربط بين الحمل الرسوبي العالق والتصريف تتأثر بهطول الأمطار والجريان السطحي ورطوبة التربة، كما أظهرت مدى تعقيد ظاهرة الحمل الرسوبي العالق.

ونظرا لتوفر البيانات المتعلقة بالتصريف المتوسطة اليومية من 1954/1953 إلى 2002/2001 (محطة وادي الأبطال) ومن 1970/1969 إلى 2002/2001 (محطة سيدي عبد القادر الجيلاي) فقد استخدمت بعد ذلك العلاقات اللحظية الشهرية، التي تم الحصول عليها والتي تفسر الجزء الأكبر من الانحراف المعياري، لاستيفاء واستقراء وتحليل المادة الصلبة الناعمة والخشنة المترسبة في خزان سد سيدي امحمد بن عودة منذ دخوله الخدمة عام 1978/1977. تقدر العائدات النوعية للرواسب العالقة ب: 450.23 طن/كم<sup>2</sup>/سنة بالنسبة لمحطة وادي الأبطال و ب: 288.495 طن/كم<sup>2</sup>/سنة بالنسبة لمحطة سيدي عبد القادر الجيلاي، أما بالنسبة للحوض إجمالاً فتقدر ب: 424.682 طن/كم<sup>2</sup>/سنة. بالإضافة إلى ذلك فإن خزان سيدي امحمد بن عودة بسعته الإجمالية الأولية المقدرة ب: 235 مليون متر مكعب يستقبل 2.705 مليون طن (1.691 مليون متر مكعب) من المادة الصلبة الناعمة والخشنة سنويا، أي ما يعادل عائدات نوعية مقدارها 552.08 طن/كم<sup>2</sup>/سنة ونسبة ملء للخزان مقدارها 0.72% سنويا. لقد استقبل هذا الأخير 67.631 مليون طن (42.269 مليون متر مكعب) من الرسوبات الناعمة والخشنة خلال 25 سنة (سبتمبر 1977 إلى أوت 2002) وهو ما يعادل 18% من طاقة استيعابه، ومن المتوقع أن يستقبل 72.713 مليون متر مكعب (30.94%) عام 2020

و106.533 مليون متر مكعب (45.33%) عام 2040 وامتلاء كلي للخزان بحلول عام 2136، أي ما يعادل مدة استعمال أو فترة حياة مقدارها 158 سنة.

وفي الأخير تمت دراسة العلاقة الأساسية بين تركيز الرواسب العالقة (C) والتصريف (Q) أثناء الفيضانات بصفة نوعية من خلال تحليل الرسوم البيانية الزمنية ومنحنيات التباطؤ (C-Q). تم توجيه دراسة 20 فيضان، عن كل محطة من محطتي القياس الهيدرومتريتين المذكورتين أعلاه في حوض وادي مينا، بشكل كبير نحو الجوانب البيانية و الإحصائية التي يعطيها الرسم البياني لـ: (C) و (Q). لقد سمح تحليل تأثير التباطؤ على العلاقة تركيز- تصريف، من خلال سلسلتين من الحوادث الزمنية، من تمييز العلاقة (C-Q) ووضع تصنيف لهذه الأخيرة، إضافة إلى تسليط الضوء على نماذج حلقة التباطؤ السائدة. لقد أظهر هذا التحليل أن النماذج حلقة في اتجاه عقارب الساعة و حلقة عكس اتجاه عقارب الساعة والنموذج في شكل ثمانية هي الأبرز في حوض وادي مينا وذلك بالنسبة لمحطتي القياس وادي الأبطال وسيدي عبد القادر الجيلالي. كما أظهر تحليل التباطؤ حسب الصنف الغياب النسبي للآثار الموسمية على شكل الحلقات التي تم الحصول عليها حيث تتميز فصول الخريف والشتاء والربيع بعدم تجانس في الأصناف نظرا لعدم تجانس الحوض فيما يخص الخصائص الصخرية والتوزيع المكاني للأمطار (عدم انتظام الأمطار والجريان في الحوض).

مفتاح الكلمات: الجزائر - غليزان - حوض وادي مينا - وادي الأبطال - سيدي عبد القادر الجيلالي - سيدي امحمد بن عودة - الأمطار - الجريان - العلاقة قوة - الحمل الرسوبي العالق - منحنيات الحمل الرسوبي - الترسيب - منحنيات التباطؤ.

## TABLE DES MATIERES

Titre	Page
DEDICACE.....	01
REMERCIEMENTS.....	02
RESUME.....	03
ABSTRACT.....	05
.....	07
TABLE DES MATIERES.....	09
LISTE DES FIGURES.....	12
LISTE DES TABLEAUX.....	15
LISTE DES SYMBOLES.....	18
INTRODUCTION GENERALE.....	20
CHAPITRE 1 : TRAVAUX ANTERIEURS SUR L'EROSION ET LE TRANSPORT SOLIDE.....	23
1.1 Erosion et transport solide dans le monde.....	23
1.2 Erosion et transport solide en Algérie.....	27
1.3 Travaux antérieurs en Algérie.....	30
1.3.1 Travaux de Demmak (1982).....	30
1.3.2 Travaux de Meddi (1992).....	30
1.3.3 Travaux de Kouri (1993).....	31
1.3.4 Travaux de Gomer (1994).....	31
1.3.5 Travaux de Mahieddine (1997).....	32
1.3.6 Travaux de Meddi <i>et al.</i> (1998).....	33
1.3.7 Travaux de Touabia (2000).....	33
1.3.8 Travaux de Terfous <i>et al.</i> (2001).....	33
1.3.9 Travaux de Terfous <i>et al.</i> (2003).....	34
1.3.10 Travaux de Achite et Meddi (2004).....	34
1.3.11 Travaux de Bessenasse <i>et al.</i> (2004).....	35
1.3.12 Travaux de Bouanani (2004).....	35
1.3.13 Travaux de Remini (2005).....	36
1.3.14 Travaux de Benkhaled (2006).....	37
1.3.15 Travaux de Ghenim <i>et al.</i> (2007).....	37
1.3.16 Travaux de Elahcene et Remini (2009).....	38
1.3.17 Travaux de Khanchoul <i>et al.</i> (2010).....	38
1.3.18 Travaux de Ghenim et Megnounif (2011).....	39
1.3.19 Travaux de Khanchoul <i>et al.</i> (2012).....	39
1.3.20 Travaux de Bouanani <i>et al.</i> (2013).....	40
1.3.21 Travaux de Ghernaout et Remini (2014).....	40
CHAPITRE 2 : REGION D'ETUDE ET METHODOLOGIE DE TRAVAIL.....	42
2.1 Presentation de la region d'etude.....	42
2.2 Situation géographique.....	42
2.3 Equipement du bassin versant.....	44
2.4 Morphologie du bassin versant.....	45

2.4.1	Caractéristiques physiques.....	45
2.4.1.1	Lithologie.....	45
2.4.1.2	Végétation.....	46
2.4.1.3	Pente (topographie).....	47
2.4.1.4	Répartition du degré d'érosion.....	49
2.4.2	Caractéristiques climatique et hydrologique.....	49
2.4.2.1	Climat.....	49
2.4.2.2	Température.....	51
2.4.2.3	Evapotranspiration.....	51
2.4.3	Caractéristiques hydromorphométriques.....	52
2.5	Données utilisées et methodologie.....	55
 <b>CHAPITRE 3 : PRECIPITATIONS ET ECOULEMENTS.....</b>		<b>59</b>
3.1	Etude des précipitations.....	59
3.1.1	Introduction et présentation des données pluviométriques.....	59
3.1.2	Analyse en composantes principales.....	60
3.1.3	Critique des données pluviométriques.....	67
3.1.4	Variations et ajustement des précipitations à une loi de probabilité.....	69
3.1.4.1	A L'échelle annuelle.....	69
3.1.4.2	A l'échelle mensuelle.....	71
3.1.4.3	A l'échelle journalière.....	73
3.1.5	Courbes IDF.....	76
3.2	Etude des écoulements.....	78
3.2.1	Introduction.....	78
3.2.2	Variabilité de l'écoulement.....	78
3.2.2.1	A l'échelle annuelle.....	79
3.2.2.2	A l'échelle saisonnière et mensuelle.....	83
3.2.2.3	A l'échelle journalière.....	86
3.2.2.4	A l'échelle des crues.....	87
 <b>CHAPITRE 4 : ETUDE ET ANALYSE DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION.....</b>		<b>90</b>
4.1	Chronologie de collecte des donnees.....	90
4.2	Contrôle et critiques des données.....	93
4.3	Gamme de concentrations.....	95
4.4	Etude du transport solide en suspension.....	99
4.4.1	Relation débit liquide - concentration des sédiments.....	99
4.4.2	Relations débit liquide – débit solide.....	104
4.4.2.1	Relation interannuelle.....	104
4.4.2.2	Relations annuelles.....	107
4.4.2.3	Relations intra annuelles.....	110
4.4.2.4	Relations saisonnières.....	112
4.4.2.5	Relations à l'échelle d'un événement crue.....	115
4.5	Résidus de la régression intra annuelle.....	119
4.6	Analyse des courbes de transport solide en suspension.....	124
4.6.1	Introduction.....	124
4.6.2	Analyse de la relation $Q_s = aQ_l^b$ .....	124
4.6.2.1	Echelle annuelle.....	124

4.6.2.2 Echelle saisonnière.....	131
4.6.2.3 Echelle intra annuelle.....	134
4.6.2.4 Echelle des crues.....	139
<b>CHAPITRE 5 : EROSION ET ENVASEMENT DU BARRAGE DE SMBA.....</b>	<b>148</b>
5.1 Quantification des apports solides .....	148
5.2 Ajustement des apports solides annuels.....	162
5.3 Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en susp.....	164
5.4 Relation érosion spécifique – lame d’eau ruisselée.....	169
<b>CHAPITRE 6 : ANALYSE DE L’EFFET D’HYSTERESIS SUR LA RELATION CONCENTRATION C – DEBIT LIQUIDE Q.....</b>	<b>172</b>
6.1 Introduction.....	172
6.2 Selection des crues.....	172
6.3 Identification des classes de la relation C-Q.....	173
6.4 Analyse de l’hystérésis.....	188
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>193</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>198</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>207</b>

## LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
1.1	Terres agricoles classées comme exposées à un risque d'érosion hydrique modéré à grave.....	24
1.2	Évolution de la part des terres agricoles classes comme exposées à un risque d'érosion hydrique modéré à grave.....	24
2.1	Situation géographique du bassin versant de l'Oued Mina.....	43
2.2	Réseau hydrographique et équipement du bassin versant de l'Oued Mina.....	43
2.3	Carte lithologique du bassin versant de l'Oued Mina.....	45
2.4	Carte de la couverture végétale du bassin versant de l'Oued Mina.....	46
2.5	Carte d'altimétrie du bassin versant de l'Oued Mina.....	47
2.6	Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Mina.....	48
2.7	Carte d'érosion du bassin versant de l'Oued Mina .....	49
2.8	Carte des précipitations moyennes annuelles [1922-1960 + 1969-1989 du bassin versant de l'Oued Mina.....	50
2.9	Courbes hypsométriques et rectangles équivalents du bassin versant de l'Oued Mina.....	55
3.1	Ajustement du vecteur CP1 à la loi Normale et à la loi de Gumbel.....	64
3.2	Projection des observations (données fictives).....	64
3.3	Projection des variables sur les axes 1-2, 1-3 et 2-3.....	66
3.4	Détection d'anomalies par analyse des résidus de la régression.....	68
3.5	Graphiques de double cumul entre les stations de SMBA, Sidi AEK Djilali et la station de Frenda.....	68
3.6	Exemples d'ajustement des précipitations annuelles à la loi Log-Normale (Frenda, Sidi AEK Djilali, SMBA et Kef Mehboula).....	70
3.7	Variations des précipitations mensuelles à la station de Frenda.....	71
3.8	Exemples d'ajustement des précipitations mensuelles (a) à la loi de Gumbel (b) à la loi Normale (stations de Frenda).....	72
3.9	Exemples d'ajustement des précipitations max. journalières à la loi Log-Normale (Frenda, SAEK Djilali, SMBA et Kef Mehboula).....	75
3.10	Exemples de Courbes Intensité - Durée - Fréquence (Frenda, S.AEK Djilali, SMBA et Kef Mehboula), période 82/83 à 00/01.....	77
3.11	Variation du débit moyen annuel dans le bassin versant de l'Oued Mina au cours de la période d'étude.....	81
3.12	Lames d'eau précipitée et écoulée dans le bassin versant de l'Oued Mina.....	82
3.13	Ajustement des débits moyens annuels à la loi Log-Normale.....	82
3.14	Variation mensuelle des débits dans le bassin versant de l'Oued Mina.....	84
3.15	Lames d'eau précipitée et écoulée dans le bassin versant de l'Oued Mina.....	85
3.16	Courbe des débits classés (années les plus humides).....	86
3.17	Courbe des débits classés (Années les plus sèches).....	87
3.18	Variation annuelle du débit max dans le bassin versant de l'Oued Mina.....	88
3.19	Ajustement des débits max annuels à la loi Log Normale.....	89
4.1	Fréquences des observations de la concentration durant la période d'étude.....	92

4.2	Crues de 21 Oct. 1993, 28-29 Déc. 1993 (Station de Oued El-Abtal).....	93
4.3	Crue de 22-23 Nov. 1997 (Station de Sidi AEK Djilali).....	94
4.4	Chronologie des concentrations observées durant la période d'étude (Station de Oued El-Abtal).....	95
4.5	Chronologie des Débits liquides observées durant la période d'étude (Station de Oued El-Abtal).....	95
4.6	Chronologie des concentrations observées durant la période d'étude (Station de Sidi AEK Djilali).....	96
4.7	Chronologie des Débits liquides observées durant la période d'étude (Station de Sidi AEK Djilali).....	96
4.8	Fréquences des observations selon l'ordre de grandeur de la concentration (Station de Oued El-Abtal).....	98
4.9	Fréquences des observations selon l'ordre de grandeur de la concentration (Station de Sidi AEK Djilali).....	99
4.10	Graphique de concentration - débit liquide (Station de Oued El-Abtal).....	100
4.11	Graphique de concentration - débit liquide (Station de Sidi AEK Djilali).....	100
4.12	Graphiques chronologiques des concentrations (Station Oued El-Abtal).....	102
4.13	Graphiques chronologiques des concentrations (Station de Sidi AEK Djilali).....	103
4.14	Relation interannuelle du débit liquide - débit solide (Station de Oued El-Abtal).....	105
4.15	Relation interannuelle du débit liquide - débit solide (Station de Sidi AEK Djilali).....	105
4.16	Relation interannuelle du débit liquide moyen journalier - débit solide moyen journalier.....	106
4.17	Relations annuelles du débit liquide - débit solide «94/95 et 97/98 » (Station de Oued El-Abtal).....	108
4.18	Relations annuelles du débit liquide - débit solide «94/95 et 95/96 » (Station de Sidi AEK Djilali).....	109
4.19	Relations intra annuelles du débit liquide - débit solide «Oct. et Mai » (Station de Oued El-Abtal).....	111
4.20	Relations intra annuelles du débit liquide - débit solide «Oct. et Mai » (Station de Sidi AEK Djilali).....	112
4.21	Relations saisonnières du débit liquide - débit solide (Station de Oued El-Abtal).....	113
4.22	Relations saisonnières du débit liquide - débit solide (Station de Sidi AEK Djilali).....	114
4.23	Relations débit liquide - débit solide à l'échelle des crues (Station de Oued El-Abtal).....	116
4.24	Relations débit liquide - débit solide à l'échelle des crues (Station de Sidi AEK Djilali).....	117
4.25	Résidus de la régression à l'échelle intra annuelle (Station de Oued El-Abtal), 85/86 à 00/01.....	119
4.26	Résidus de la régression à l'échelle intra annuelle (Station de Sidi AEK Djilali), 82/83 à 0/01.....	120
4.27	Ajustement des résidus intra annuelles à la loi Normal (Station de Oued El-Abtal), 85/86 à 00/01.....	121

4.28	Ajustement des résidus intra annuelles à la loi Normal (Station de Sidi AEK Djilali), 82/83 à 00/01.....	122
4.29	Test de Kolmogorov-Smirnov d'ajustement des résidus intra annuelles à la loi Normale.....	123
4.30	Variation chronologique du paramètre «a» et de l'exposant «b».....	127
4.31	Relation entre le paramètre a et l'exposant b «échelle annuelle».....	127
4.32	Variation du paramètre a en fonction de l'hydraulicité Ki.....	127
4.33	Variation du paramètre b en fonction de l'hydraulicité Ki.....	128
4.34	Variation du paramètre a en fonction de la pluie moyenne Annuelle.....	130
4.35	Variation du paramètre b en fonction de la pluie moyenne Annuelle.....	130
4.36	Variation du paramètre a en fonction de la lame d'eau ruisselée annuelle.....	130
4.37	Variation du paramètre b en fonction de la lame d'eau ruisselée annuelle.....	131
4.38	Relation saisonnière entre le paramètre a et l'exposant b.....	132
4.39	Relation entre le paramètre a et la pluie moyenne saisonnière.....	133
4.40	Variation de l'exposant b en fonction du débit liquide max. saisonnier.....	134
4.41	Relation mensuelle entre le paramètre a et l'exposant b.....	135
4.42	Relation entre le paramètre a et la pluie moyenne mensuelle.....	136
4.43	Relation entre le l'exposant b et la pluie moyenne mensuelle.....	137
4.44	Relation entre le paramètre a le débit max. mensuel.....	137
4.45	Relation entre l'exposant b et le débit max. mensuel.....	137
4.46	Relation entre le paramètre a et le débit spécifique mensuel.....	138
4.47	Relation entre l'exposant b et le débit spécifique mensuel.....	138
4.48	Relation entre le paramètre a et l'exposant b à l'échelle des crues.....	141
4.49	Relation entre le paramètre a et la hauteur de l'averse.....	142
4.50	Relation entre le paramètre a et l'intensité max. de l'averse.....	142
4.51	Variation du paramètre a en fonction de l'indice pluviométrique antérieur.....	143
4.52	Variation du paramètre a en fonction du débit max. de la crue.....	144
4.53	Variation du paramètre b en fonction du débit max. de la crue.....	144
5.1	Variation des apports solides fins aux échelles mensuelle et annuelle (Stations de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali), 77/78 à 01/02.....	153
5.2	Variation interannuelle et intra annuelle des apports solides fins déposés dans la retenue du barrage de SMBA, 77/78 à 01/02.....	156
5.3	Variation interannuelle et intra annuelle des apports solides fins et grossiers déposés dans la retenue du barrage de SMBA, 77/78 à 01/02.....	158
5.4	Variation interannuelle et intra annuelle de la capacité de stockage de la retenue de barrage de SMBA, 1977/1978 à 2001/2002.....	159
5.5	Comparaison des apports solides fins déposés dans la retenue de barrage de SMBA (77/78 à 01/02) par différentes approches .....	162
5.6	Ajustement des apports solide à la loi Log-Normale.....	163
5.7	Relation érosion spécifique - lame d'eau ruisselée.....	169
5.8	Relation érosion spécifique – débit maximum annuel.....	170
6.1	Dynamique du transport solide en suspension (Station de Oued El-Abtal).....	174
6.2	Dynamique du transport solide en suspension (Station de Sidi AEK Djilali).....	179



## LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
1.1	Taux de sédiments dans les barrages les plus envasés en Algérie.....	36
2.1	Caractéristiques des stations hydrométriques et pluviométriques du bassin versant de l'Oued Mina.....	44
2.1	Températures moyennes mensuelles en C°.....	51
2.2	Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles en mm.....	51
2.3	Répartitions altimétriques du bassin versant de l'Oued Mina.....	53
2.4	Paramètres hydromorphométriques du BV de l'Oued Mina.....	54
2.5	Classification du relief selon O.R.S.T.O.M.....	54
2.6	Classes des relations $C - Q_1$ .....	58
3.1	Précipitations annuelles des stations pluviométriques du bassin versant de l'Oued Mina (mm).....	59
3.2	Statistiques élémentaires des observations actives.....	61
3.3	Matrice des coefficients de corrélation.....	62
3.4	Valeurs propres et variances expliquées.....	62
3.5	Projection des observations (calcul des facteurs 'CP').....	63
3.6	Matrice de corrélation (variables actives – facteurs).....	65
3.7	Résumé des résultats de la méthode de double cumul.....	67
3.8	Résumé des équations de la droite de Galton pour toutes les stations pluviométriques.....	70
3.9	Précipitations annuelles (mm) pour différentes périodes de retour..... Résumé des équations des droites de Gumbel et de Galton pour la station de	71
3.10	Frenda.....	73
3.11	Précipitations mensuelles (mm) pour différentes périodes de retour selon la loi de Gumbel (Station de Frenda).....	73
3.12	Précipitations maximales journalières des stations pluviométriques du bassin versant de l'Oued Mina (mm).....	74
3.13	Résumé des équations de la droite de Galton pour toutes les stations pluviométriques.....	75
3.14	Précipitations maximales journalières (mm) pour différentes périodes de retour (calcul des quantiles).....	76
3.15	Intensités moyennes maximales pour différentes périodes de retour (T) et différentes durées (t) à la station de Frenda.....	78
3.16	Caractéristiques principales de l'écoulement de l'Oued Mina à la station hydrométrique de Oued El-Abtal (85/86 à 00/01).....	80
3.17	Caractéristiques principales de l'écoulement de l'Oued Haddad à la station de Sidi AEK Djilali (82/83 à 00/01).....	81
3.18	Résumé des équations de la droite de Galton pour les deux stations hydrométriques.....	82
3.19	Débits moyens annuels ( $m^3/s$ ) pour différentes périodes de retour.....	82
3.20	Variation intra-annuelle des débits à la station hydrométrique de Oued EL-Abtal ( $m^3/s$ ).....	83
3.21	Variation intra-annuelle (mensuelle) des débits à la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali ( $m^3/s$ ).....	84
3.22	Variation mensuelle des débits en % de débit annuel.....	85
3.23	Résumé des équations de la droite de Galton pour les deux stations	

	hydrométriques.....	88
3.24	Débits max annuels ( $m^3/s$ ) pour différentes périodes de retour.....	89
4.1	Nombre de valeurs de transport solide en suspension observées par station et année.....	91
4.2	Nombre de valeurs observées par station, saison et mois.....	92
4.3	Paramètres statistiques de la concentration C, du débit liquide Ql et débit solide Qs.....	97
4.4	Nombre d'observations selon l'ordre de grandeur de la concentration.....	98
4.5	Relations obtenues à l'échelle annuelle ( $Q_s=aQ_l^b$ ).....	109
4.6	Relations obtenues à l'échelle intra annuelle ( $Q_s=aQ_l^b$ ).....	111
4.7	Relations obtenues à l'échelle saisonnière ( $Q_s=aQ_l^b$ ).....	113
4.8	Relations obtenues à l'échelle des crues ( $Q_s=aQ_l^b$ ) (Station de Oued El-Abtal).....	117
4.9	Relations obtenues à l'échelle des crues ( $Q_s=aQ_l^b$ ) (Station de Sidi AEK Djilali).....	118
4.10	Résultats des tests d'ajustement des résidus à la loi Normale.....	123
4.11	Pluie moyenne annuelle Pan, hydraulicité Ki et paramètres de la relation de puissance.....	125
4.12	Pluie saisonnière Ps, $Q_{max}$ et paramètres de la relation de puissance.....	131
4.13	Pluie mensuelle Pm, $Q_{max}$ et paramètres de la relation de puissance.....	135
4.14	Pluie des averses Pav, Intensité maximale $I_{max}$ , Indice pluviométrique Antérieur IPA, $Q_{max}$ et paramètres de la relation de puissance (Station de Oued El-Abtal).....	139
4.15	Pav, $I_{max}$ , IPA, $Q_{max}$ et paramètres de la relation de puissance (Station de Sidi AEK Djilali).....	140
4.16	Valeurs caractéristiques des paramètres de la relation de puissance lors de la montée et de la décrue (Station de Oued El-Abtal).....	145
4.17	Valeurs caractéristiques des paramètres de la relation de puissance lors de la montée et de la décrue (Station de Sidi AEK Djilali).....	146
5.1	Apports solides fins à l'échelle annuelle (Station de Oued El-Abtal).....	149
5.2	Apports solides fins à l'échelle annuelle (Station de Sidi AEK Djilali).....	150
5.3	Apports solides fins à l'échelle mensuelle de 77/78 à 01/02 (Station de Oued El-Abtal).....	151
5.4	Apports solides fins à l'échelle mensuelle de 77/78 à 01/02 (Station de Sidi AEK Djilali).....	152
5.5	Bilan des apports solides fins à l'échelle annuelle.....	154
5.6	Bilan des apports solides fins à l'échelle mensuelle de 77/78 à 01/02.....	155
5.7	Bilan des apports solides fins et grossiers à l'échelle annuelle.....	157
5.8	Bilan des apports solides fins et grossiers à l'échelle mensuelle de 77/78 à 01/02.....	158
5.9	Bilan des apports solides fins à l'échelle annuelle pour différentes approches.....	160
5.10	Bilan des apports solides fins à l'échelle mensuelle de 77/78 à 01/02 pour différentes approches.....	161
5.11	Ajustement des apports solides à la loi Log-Normale.....	163
5.12	Apports solides pour différentes périodes de retours (MT).....	164
5.13	Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (Station de Oued El-Abtal).....	166

5.14	Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (Station de Sidi AEK Djilali).....	167
5.15	Relations érosion spécifique - lame ruisselée ( $E_s=aLr^b$ ).....	170
6.1	Chronologie des crues sélectionnées pour l'analyse d'hystérésis.....	173
6.2	Paramètres statistiques des crues sélectionnées (Station de Oued El-Abtal).....	185
6.3	Paramètres statistiques des crues sélectionnées (Station de Sidi AEK Djilali).....	186
6.4	Classement et caractéristiques des crues sélectionnées (Station de Oued El-Abtal).....	187
6.5	Classement et caractéristiques des crues sélectionnées (Station de Sidi AEK Djilali).....	188

## LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Désignation
A	Surface du bassin
Ass	Apport solide en suspension
Ast	Apport solide total
a, b	Paramètres des relations $Y = aX^b$ et $Y = aX + b$
$a_m, b_m$	Paramètre de la relation puissance lors de la montée
$a_d, b_d$	Paramètre de la relation puissance lors de la décrue
C	Concentration des sédiments en suspension
Ce	Coefficient d'écoulement
CP	Composantes principales
Cp	Coefficient d'aplatissement
Cs	Coefficient d'asymétrie
CV	Coefficient de variation
$C_{max}, C_{max}$	Concentration maximale
D	Dénivelée spécifique
Dd	Densité de drainage
Ds	Dénivelée spécifique
Dmax	Ecart maximum entre la fonction de densité cumulée observée et la fonction de répartition théorique
$D_{n,\alpha\%}$	Ecart critique à un risque d'erreur $\alpha\%$
$H_{max}, H_{min}, H_{moy}$	Altitudes maximale, minimale et moyenne
$H_{x\%}$	Altitude correspondant à $x\%$ de la surface totale du bassin
Ig	Indice de pente globale
IPA	Indice pluviométrique
Kc	Indice de compacité
Ki	Coefficient d'hydraulicité
K-S	Test de Kolmogorov Smirnov
L	Longueur du rectangle équivalent
l	Largeur du rectangle équivalent
Lcp	Longueur du cours d'eau principal
Lr, Lm	Lame ruisselée (écoulée)
Max	Valeur maximale
Méd	Médiane
Mod	Mode
n	Taille de l'échantillon
P	Périmètre du bassin
Pan	Précipitation annuelle
Pav	Pluie d'averse
Pm	Pluie mensuelle
PPC	Test de Probability Plot Correlation
Ps	Pluie saisonnière
R1 à R7	Classement du relief selon O.R.S.T.O.M.
R, r	Coefficient de corrélation
$R^2$	Coefficient de détermination
SB	Sous bassin
SC	Surfaces cumulées
SP	Surfaces partielles

t	Temps
T	Période de retour
Tc	Temps de concentration
Q, Ql	Débit liquide
Qmin, Qmax, Qmoy	Débits liquides minimum, maximum et moyen
Qspé	Débit liquide spécifique
Q's	Débit liquide mensuel spécifique
Qs	Débit solide
Qxjrs	Débit atteint ou dépassé pendant x jours
Qxmois	Débit atteint ou dépassé pendant x mois
(C/Q) <sub>m</sub>	Rapport concentration - débit pendant la montée
(C/Q) <sub>d</sub>	Rapport concentration - débit pendant la décrue
X, Y, Z	Coordonnées Lambert
$\bar{x}$ , Moy	Valeur moyenne
$\sigma$ , Var	Ecart type, variance
Q's	Débit liquide mensuel spécifique

## INTRODUCTION GENERALE

L'eau est devenue actuellement une denrée rare et précieuse de moins en moins accessible dans plusieurs régions du monde et les réserves en eau continuent de baisser depuis les cinquante dernières années, surtout dans les pays arides et semi-aride où l'eau potable, industrielle et d'irrigation ne peut être fournie qu'en stockant l'écoulement de surface. La quantité d'eau douce disponible est passée de  $17000\text{m}^3/\text{hab}$  en 1950 à  $9700\text{m}^3/\text{hab}$  en 1995 et devrait tomber à  $5100\text{m}^3/\text{hab}$  en 2025 selon plusieurs experts. On s'attend d'ici 2025 - année d'une probable pénurie d'eau - à une diminution d'un tiers d'eau disponible par personne dans le monde [1]. Les ressources en eau sont en chute libre et sont gravement menacées par la dégradation de la terre et l'envasement continues des retenues de barrages, alors que la demande augmente de façon dramatique.

Dans de nombreux pays du monde, le transport des sédiments dans le réseau hydrographique des bassins versants et leur dépôt dans les retenues pose aux exploitants des barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse. Non seulement la capacité utile est progressivement réduite au fur et à mesure que les sédiments se déposent dans la retenue mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, qui bien souvent exige que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les pays arides et semi-arides. Dans l'un et l'autre cas, il en résulte des dommages considérables à l'environnement et une mise en péril de l'économie du projet [2].

L'érosion hydrique des bassins versants constitue une vraie problématique et interpelle nombre de chercheurs de la part dans le monde à s'y intéresser. C'est un problème naturel qui devient dangereux lorsque le seuil tolérable est dépassé. L'érosion des bassins versants est très répandue dans la région du Maghreb: En Algérie, le taux d'érosion spécifique atteint la valeur de  $5000\text{T}/\text{Km}^2.\text{an}$  sur le bassin versant de l'Oued Agrioum [3]; Au Maroc, le taux d'érosion spécifique dépasse la valeur de  $2000\text{T}/\text{Km}^2.\text{an}$  dans les bassins versants de Martil de l'Ouregha [4]. Une fraction considérable de ces matériaux se dépose dans les retenues de barrages. Ceci est dû au fait que toutes les conditions sont réunies pour le déclenchement et le développement de ce phénomène à savoir: les irrégularités et

l'agressivité climatiques; la faible densité du couvert végétal; la nature géologique constitutives du substratum des bassins versants (formations marneuses peu résistantes et sensible à l'érosion); la surexploitation des terres et le caractère violent et rapide des crues [1].

En Algérie, la construction des barrages-réservoirs a commencé dès le siècle dernier, et un nombre important a été réalisé après l'indépendance. En l'espace de quelques années, le pays est passé d'une quarantaine de grands barrages à la fin des années 1970 à soixante dix aujourd'hui (2014), dont soixante huit sont déjà en exploitation [5]. En 2002, le volume de vase déposé dans les cinquante deux grands barrages à l'époque est estimé à 0.9 milliards de mètre cube, soit un taux de comblement de 17% de la capacité totale [6]. L'infrastructure hydraulique algérienne est amputée annuellement d'une capacité de 45Mm<sup>3</sup> suite à l'envasement [7] et les problèmes posés par l'érosion et le transport solide peuvent atteindre une ampleur susceptible de combler les retenues de sédiments et ainsi de stériliser les efforts d'aménagement des eaux et des rivières [8].

Edifiée en 1978 en zone semi aride d'une capacité de stockage initiale de 235Mm<sup>3</sup>, Es-saada (ou SMBA) est une grande retenue de l'Ouest de l'Algérie, et constitue par ailleurs l'une des plus importantes de l'Afrique du Nord. Comme la plupart des aménagements de ce type, ce barrage réservoir assure des fonctions multiples à savoir: la satisfaction des besoins domestiques; l'approvisionnement du secteur industriel et l'irrigation de la plaine de la Mina. Il s'agit à l'évidence d'un ouvrage stratégique dont l'arrêt des activités est susceptible de déstabiliser de manière notable l'économie de toute la Wilaya de Relizène et ses environs. Or, cette retenue est soumise à un alluvionnement constant attesté depuis quelques années par l'apparition en période de basses eaux d'affleurements sableux et la diminution progressive des profondeurs d'eau dans certaines zones caractéristiques du lac, bien qu'elle a été toujours considéré comme étant de faible taux de comblement. Ce phénomène prend de plus en plus d'ampleur, accréditant ainsi l'idée que l'ouvrage est menacé à terme.

L'importance de l'eau dans l'activité socio-économique de la région de Relizène et sa rareté d'une part et le problème de l'envasement d'ouvrages de stockage d'autre part, nous pousse à prendre des dispositions nécessaires afin d'assurer la pérennité de cette ressource et sa bonne gestion. La présente étude a pour principal objectif le développement d'une approche méthodologique de connaissance et de quantification du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Mina au droit du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda. L'analyse

du transport solide constitue le fond de la thèse et est articulée sur plusieurs aspects de quantification et de caractérisation de la relation concentration-débit liquide ou débit solide-débit liquide. Les objectifs assignés sont les suivants :

- Recherche d'un modèle régressif pouvant mieux expliquer le débit solide par le débit liquide mesuré au niveau des deux stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali, en étudiant cette relation à différentes échelles temporelles: annuelles, saisonnières, mensuelles et journalières pour trouver les meilleures relations représentatives du phénomène. Ces relations serviront à compléter les séries des débits solides afin de quantifier (estimer) les apports solides fins et grossiers déposés dans la retenue du barrage de SMBA dans la période 1977/1978 à 2001/2002 (depuis sa mise en service) et de dégager les saisons productives en sédiments.
- Estimation de l'érosion spécifique aux différents sites d'observations (stations hydrométriques).
- Caractérisation de la relation C-Q à travers une série d'événements chronologiques (crues) et élaboration d'une esquisse de classification de cette relation. Le traitement de données ayant pour objectif: l'identification et classement des principaux types de la relation C-Q; l'analyse graphique de chaque type de relation et la discussion sur les raisonnements physiographiques et hydrologiques de chaque classe ou type.
- Analyse qualitative à différentes échelles temporelles du paramètre  $a$  et de l'exposant  $b$  de la relation de puissance liant le débit solide au débit liquide pour le bassin versant de l'Oued Mina. L'analyse permettra d'expliquer le comportement de ces paramètres, en vue d'une meilleure compréhension de cette relation et de relier ces derniers aux facteurs qui induisent le débit solide.

Les résultats obtenus donnent la possibilité aux décideurs d'engager des actions permettant d'accroître la durée de vie et de préserver le potentiel de cet ouvrage. En outre, ils fournissent des éléments de comparaison appréciables pour des aménagements de cet ordre situés en milieu semi-aride Nord Africain et soumis à des phénomènes similaires.



# CHAPITRE 1

## TRAVAUX ANTERIEURS SUR L'EROSION ET LE TRANSPORT SOLIDE

### 1.1 Erosion et transport solide Dans le monde

L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène largement répandu dans les différents pays du monde. Il continue à prendre des proportions considérables notamment 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. En Afrique, on estime que 500Mha (millions d'hectares) ont subi une dégradation depuis les années 1950, portant sur 65% des terres agricoles de la région. La dégradation des terres concerne quelque 300Mha en Amérique latine, 95Mha en Amérique du Nord et 157Mha en Europe [9]. Kanwar (1982) [10] a montré au congrès de l'Association Internationale des Sciences du Sol à New Delhi que sur 13500Mha de surfaces exondées dans le monde, 22% sont cultivables et seulement 10% sont cultivés. Ces dernières années, les pertes en terres cultivables ont augmenté jusqu'à atteindre 7 à 10Mha par an, essentiellement suite à l'érosion. A ce rythme, il faudrait trois siècles pour détruire toutes les terres cultivables [11]. Cependant, L'érosion est un problème environnemental important dont la gravité varie beaucoup d'un site à un autre et d'une région à une autre comme le montre les figures (1.1) et (1.2) où presque un tiers des pays mentionnés comptaient plus de 20 % de terres agricoles exposées à un risque modéré à grave au cours de la période 2000-2002 (Corée, Espagne, Grèce, Hongrie, Italie, Mexique, Portugal, République slovaque, Turquie).

Les premières recherches scientifiques concernant les techniques de la lutte antiérosive de l'eau ont commencé en Allemagne dans les années 1890 avec les premières parcelles expérimentales [12]. L'Allemagne et d'autres pays tels que, la Finlande, l'Irlande, le Japon, les Pays-Bas, la Suède et la Suisse font état d'un risque d'érosion hydrique modéré à grave (>11T/ha.an) compris entre zéro et moins de 0.5% de la superficie totale des terres agricoles [13].

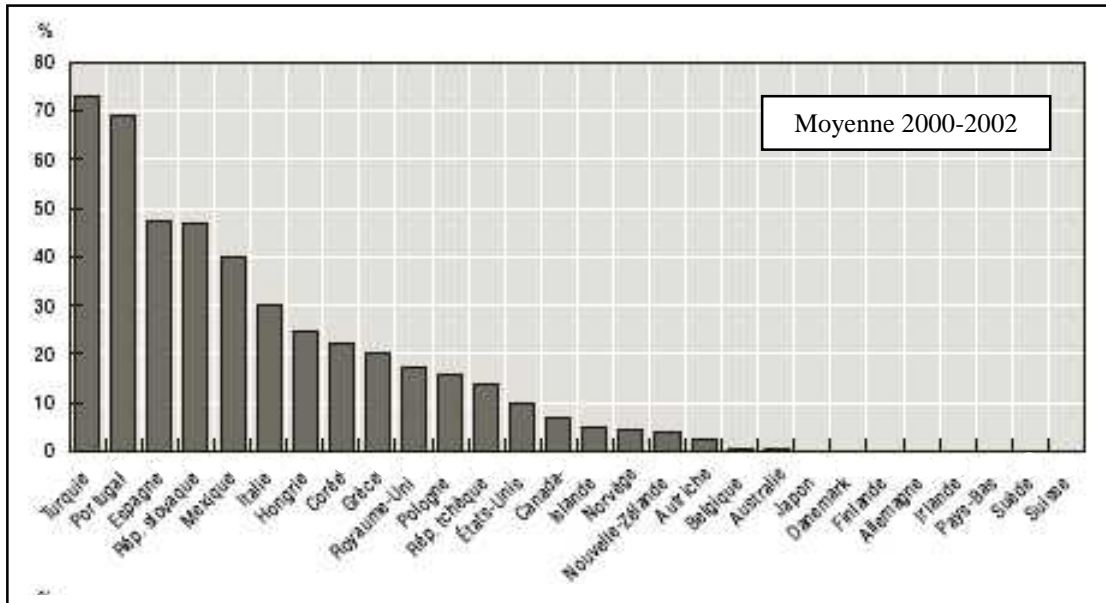


Figure (1.1): Terres agricoles classées comme exposées à un risque d'érosion hydrique modéré à grave [13]

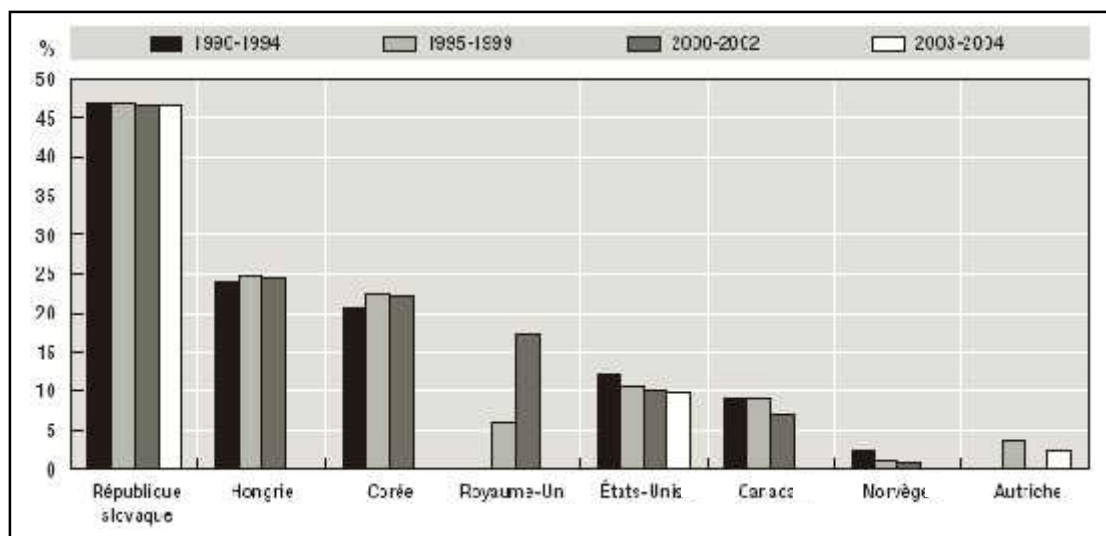


Figure (1.2): Évolution de la part des terres agricoles classées comme exposées à un risque d'érosion hydrique modéré à grave [13]

C'est entre 1925-1930, après la première guerre mondiale, que l'idée de restaurer les sols est apparue en Amérique d'abord, avec la défense et la restauration des sols axée sur la conservation de l'eau [14]. Aux États-Unis, vers 1930, 20% des terres cultivables ont été gravement endommagées par l'érosion suite à la mise en culture inconsidérée des prairies de la grande plaine par les colons européens, peu habitués à ces conditions semi-arides. Les recherches menées sur l'érosion ont abouti trente ans plus tard à la formulation de l'équation

universelle de perte en terre, connue sous le nom de USLE [15]. En 1986, Lovejoy *et al.* remarquent qu'après 50 ans d'investissement massif en hommes et en moyens, encore 25% des terres cultivées perdent plus de 12T/ha.an. En 2003, les superficies exposées à un risque modéré à grave étaient inférieures à 10% de la superficie totale des terres contre 12% en 1992 [16].

Au Canada, l'érosion hydrique des sols a quelque peu reculé au cours des années 90, avec environ 7% de la superficie des terres labourables et jachères d'été exposés à un risque modéré à grave en 2000-2002 contre 9% en 1990-1994 [17].

En Amérique du Nord, le Canada et les Etats-Unis ont enregistré un recul des surfaces exposées à des risques modérés à graves d'érosion hydrique. Cette évolution a été attribuée à une meilleure gestion des sols et une sensibilisation accrue des agriculteurs à la question de la minimisation de l'érosion. En revanche, au Mexique, l'érosion des sols pose un problème environnemental majeur, avec environ 40% des terres qui sont exposés à un risque modéré à grave d'érosion. On estime que l'agriculture mexicaine est à l'origine de près de 80% de la dégradation des sols, du fait du surpâturage, de l'écobuage, du travail excessif des sols et de la faible adoption des pratiques de conservation des sols [13].

En Europe, environ 17% de la superficie totale est touchée à des degrés divers par l'érosion, mais seulement 4% par une érosion grave. En Europe, l'érosion des sols est essentiellement due à l'eau, mais il apparaît que les risques d'érosion tendent à passer de la classe grave à tolérable [18]. En 2002, la commission européenne a publié la communication «vers une stratégie thématique pour la protection des sols» dont l'objectif est notamment de prendre en compte les mesures de protection comme une manière de traiter les problèmes d'érosion [19]. La région méditerranéenne de l'Europe est particulièrement exposée à un risque élevé d'érosion hydrique des sols, notamment l'Espagne, l'Italie, le Portugal, la Turquie, la France et dans une moindre mesure la Grèce. En effet, l'alternance de fréquentes périodes sèches et de subits épisodes pluvieux accroît les risques de grave érosion des sols, en particulier dans les zones méditerranéennes où le relief est marqué, les sols fragiles et le couvert végétal rare. Si les autres parties de l'Europe sont moins sujettes aux cas d'érosion grave, les risques d'érosion hydrique sont préoccupants en Europe centrale (Hongrie, Pologne, République slovaque et République tchèque).

Pour l'Australie, les éléments disponibles relatifs à la fin des années 90 laissent entrevoir une certaine réduction de l'érosion des sols [20]. Pour autant, en 1999, environ 11% des agriculteurs étaient confrontés à une dégradation significative des sols causée par l'érosion hydrique. En moyenne, 90% de l'érosion des terres agricoles du pays touche 20% de la superficie des terres agricoles [21].

La Nouvelle-Zélande connaît une érosion naturelle élevée liée aux conditions climatiques et topographiques extrêmes, mais c'est le surpâturage qui a exercé une pression importante sur la qualité des sols. Pour autant, environ 4% seulement des terres agricoles sont estimées être exposées à un risque modéré à grave d'érosion hydrique.

En Corée, le principal processus érosif sur les terres agricoles est l'érosion hydrique sachant que plus de la moitié des précipitations sont concentrées pendant les mois d'été. Plus de 20% des terres agricoles sont ainsi exposées à un risque modéré à grave.

En Chine, la superficie des terres arables perdues au cours de la période 1957-1990 est estimée égale à celle de toutes les terres de culture d'Allemagne, du Danemark, de France et des Pays-Bas réunis, principalement suite à la l'érosion hydrique [9]. Le taux d'érosion dépasse sur certains bassins 2500T/Km<sup>2</sup>.an. La dernière enquête par la télédétection a montré qu'il y a 3.56MKm<sup>2</sup> de sol érodé, représentant 37% de la totalité du territoire national.

Des chiffres bien plus dramatiques donnèrent l'alarme dans les pays tropicaux. Combeau (1977) [22] rapporte que 4/5 des terres de Madagascar sont soumises à l'érosion accélérée; 45 % de la surface de l'Algérie est affectée par l'érosion, soit 100ha de terre arable perdus par jour de pluie. En Tunisie, 45% de la superficie totale est menacée par l'érosion hydrique [23, 24]. Hamza (1992) [25] a évalué les transports solides moyens évacués chaque année par les différents bassins versants Tunisiens à 15000ha. Au Maroc, 40% de la superficie totale est menacée par l'érosion [26]. Le taux d'érosion spécifique dépasse la valeur de 2000T/Km<sup>2</sup>.an dans les bassins versants de Martil de l'Ouergha [4]. Le taux d'envasement des 25 barrages marocains est de l'ordre de 32Mm<sup>3</sup>/an [1].

Les sols couverts de végétation ou sous forêts bien entretenus contenant des débris végétaux de grande taille favorisent l'infiltration et sont considérés comme non sensible à l'érosion. Les travaux de labour favorisent également l'infiltration par amélioration de la

rugosité mais l'effet n'est pas durable car il suffit de deux pluies successives pour la réduire [27, 28, 29]. 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 [30].

Plus sérieux que ces affirmations dramatiques, sont les résultats des mesures de pertes en terre sur parcelle ( $100\text{m}^2$ ) mises en place sous l'impulsion du professeur Frédéric Fournier depuis les années 1950, par l'ORSTOM et les Instituts du CIRAD [31, 32, 33]. Ces pertes en terre varient de 1 à 200T/ha.an (jusqu'à 700 tonnes en montagne, sur des pentes de 30 à 60%) sous des cultures propres aux régions forestières à pentes moyennes de 4 à 25%; des pertes en terre de 0.5 à 40T/ha sous mil, sorgho, arachide, coton sur les longs glacis ferrugineux tropicaux des régions soudano sahéliennes [34, 35].

L'érosion et le transport solide sont donc des problèmes sérieux à l'échelle mondiale mais ils sont bien plus préoccupants dans certaines régions du monde, comme c'est le cas au Maghreb et plus particulièrement en Algérie.

## 1.2 Erosion et transport solide en Algérie

En Algérie, l'érosion hydrique menace 45% des zones telliennes [30]. L'érosion se manifeste par la formation de rigoles et de ravines sur tout le versant avec affleurement de la roche mère et une évolution en bad-lands [36]). L'intensité de l'érosion hydrique varie d'une zone à l'autre. La partie Ouest du pays est la plus érodée, suivie du Centre et de l'Est. L'Algérie est, de ce fait, l'un des pays les plus menacés dans le monde par l'érosion. Nous estimons pratiquement à plus de 20Mha les terres qui sont touchées par l'érosion particulièrement dans les zones montagneuses où sont implantés plus de 90% des barrages [37].

Selon Heusch (1982) [38], l'érosion spécifique des bassins versants de l'Afrique du Nord avoisine  $800\text{T}/\text{Km}^2\text{.an}$ . Il est de  $1250\text{T}/\text{Km}^2\text{.an}$  selon la SOGREAH (1967) [39]. L'Algérie (Nord) est classée parmi les pays aux sols les plus érodibles du monde où le taux d'érosion spécifique atteint selon Demmak (1982) [3] les valeurs les plus importantes, dépassant  $2000\text{T}/\text{Km}^2\text{.an}$  sur la plupart des bassins versants de l'Atlas Tellien (Rhiou, Sly, Fodda, Mazafran, Isser). Il atteint  $4000\text{T}/\text{Km}^2\text{.an}$  sur la chaîne côtière de Dahra,  $5000\text{T}/\text{Km}^2\text{.an}$  dans le bassin très dégradé de l'Oued Agrioun qui alimente le barrage d'Ighil

Emda (Bejaia) et une valeur très élevée selon Bourouba (1994) [40] de 7619T/Km<sup>2</sup>.an dans le bassin versant de Djendjen. Comme conséquence du taux d'érosion spécifique élevée, l'envasement des barrages reste une ampleur à remédier par des mesures à apprendre.

Les facteurs favorisant l'érosion sont nombreux: climat, pente (relief), nature des roches, homme et température en fin de chaîne.

Le climat du Nord du pays est très agressif avec des pluies très irrégulières. Les pluies torrentielles sont fréquentes en automne, avec des intensités dépassant souvent 45mm/h, au moment où la couverture végétale est absente, engendrant des crues fortes, rapides et chargées de sédiments dont les conséquences ont des répercussions directes, tant à l'amont par des pertes de sols et des ravinements qu'à l'aval par des inondations et des dépôts de sédiments (routes, autoroutes, barrages, plages, ...etc.), des pertes de vies humaines et matérielles, et bien évidemment le détariage des stations hydrométriques [14].

Le Nord du pays étant essentiellement montagnard, les conditions physiques, géomorphologiques sont particulièrement favorables au déclenchement et à l'accélération du phénomène d'érosion. En effet, les régions des montagnes s'étendent sur une superficie de 7.565Mha, dont 63% sont situés à plus de 800m et le ¼ des terres présente une pente supérieure à 25% [41], ce qui favorise l'érosion et le transport solide.

De plus, la lithologie constituée en majorité (75%) de roches tendres et sols fragiles (schiste, argile et limon) influent directement sur l'érosion hydrique. Les sols marneux lorsqu'ils sont secs restent non érodibles, mais dès qu'ils atteignent une certaine humidité, leur sensibilité à la détachabilité et au ruissellement augmente [28, 30]. Selon Touaïbia et *al.* (2001) [42], les zones marneuses du bassin versant de l'Oued Mina ont dépassé le seuil tolérable de 10T/ha.an.

Face à ce milieu fragile, les facteurs anthropiques ont largement contribué à l'accélération des processus érosifs par les incendies, les défrichements, le morcellement du foncier et le surpâturage, rendant les bassins versants très vulnérables au ruissellement [14]. Le faible taux du couvert végétal et la dégradation annuelle de ce dernier surtout par incendie a augmenté le taux d'érosion, en sachant que le taux de boisement actuel est de 16% pour seulement le Nord de l'Algérie, c'est à dire sans tenir compte du Sahara qui couvre 80% du

territoire national, alors que la norme généralement admise se situe entre 20 et 25%. Ainsi, suite aux colonisations successives, les paysans, repoussés dans les montagnes, ont été amenés pour survivre à exploiter les zones à risque érosif en défrichant et faisant pâturer les forêts par les troupeaux. Sous la pression démographique, les défrichements et la mise en valeur de nouvelles terres, souvent au détriment des surfaces boisées, sont en croissance continue.

Aussi, la température de l'eau, à défaut de données concernant la température de l'air, joue un rôle non négligeable dans l'explication des variations de la turbidité en saison chaude. En effet, les hautes températures accroissent l'aptitude de l'eau à détruire les agrégats du sol [43].

En Algérie, un effort louable a été entrepris depuis les années 1945 pour la lutte antiérosive, qui continue à se pratiquer jusqu'aux années 1990, mais qui aboutit souvent à des échecs. On peut citer l'exemple des banquettes réalisées lors de la période coloniale et après l'indépendance, sur plus de 66000ha de terres cultivées, plus précisément sur des marnes et des argiles, qui sont actuellement dans un état de dégradation très avancée. La reforestation de 800000ha (barrage vert) et de 350000ha aménagés en banquettes entre 1962 et 1973, n'a pas amélioré la situation [14]. Depuis 1978, la construction de banquettes a été suspendue, suite aux critiques des chercheurs, au rejet des paysans, et surtout, aux difficultés économiques. La lutte antiérosive a été restreinte à la protection des ouvrages d'art, à la reforestation, à la végétalisation des ravines et à la construction des grands barrages.

Pour les paysans, les seules actions de l'Etat concernent aujourd'hui l'amélioration foncière (c'est-à-dire, sous-solage des sols à croûte calcaire, qui augmente la productivité des céréales) et la création de petites retenues collinaires, fournissant de l'eau en tête de vallée pour le bétail, l'habitat et quelques hectares d'irrigation. Même cette politique est remise en cause par des hydrologues qui font remarquer que l'envasement des barrages n'a pas diminué depuis l'effort consenti par l'aménagement des hautes vallées. Les travaux de Heusch (1970) [44] et Demmak (1982) [3] montrent que la majorité des sédiments piégés dans les réservoirs proviennent du ravinement, des glissements de terrain, des éboulements des berges et de la divagation des oueds.

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

### 1.3 Travaux antérieurs en Algérie

De nombreux travaux de recherches, d'études et d'expérimentation sur le problème de l'érosion et du transport solide ont été menés en Algérie, sans pour autant apporter de réponses définitives aux questions posées. Parmi ces recherches on a :

#### 1.3.1 Travaux de Demmak (1982)

Demmak (1982) [3] en se basant sur les données observées durant la période 1972/1973 à 1978/1979, sur trente bassins versants de l'Algérie du Nord, particulièrement touchée par l'érosion a constaté que l'agressivité des averses est relativement faible en Afrique du Nord et que son influence sur l'érosion est négligeable. L'érosion en nappes n'apporte qu'une faible part (0.2 à 1T/ha.an) au transport solide des oueds. Pour lui l'essentiel se passe autour des oueds. Le sapement des berges est une source majeure de sédiments directement mobilisés par les oueds lors des fortes crues. Il a confirmé l'inaptitude en Algérie des techniques de lutte anti-érosives. Il a démontré que le pourcentage de marnes et d'argiles affleurantes, le pourcentage des précipitations journalières supérieures à un certain seuil (20 ou 30mm) et le coefficient de torrencialité sont déterminants pour le transport solide. Il a synthétisé ses travaux par une relation empirique valable pour les bassins de l'Atlas Tellien liant les apports solides spécifiques moyens annuels à des indices lithologiques, pluviométriques et géomorphologiques.

#### 1.3.2 Travaux de Meddi (1992)

Meddi (1992) [43] en se basant sur les données pluviométriques et du transport solide a entrepris une étude hydrologique de grande envergure sur le bassin versant de l'Oued Mina et a choisi pour ses analyses quatre sous bassins: l'Oued El-Abd, l'Oued Haddad, l'Oued Taht et l'Oued El-Abtal. L'auteur a constaté que le bassin versant de Oued Haddad a une dégradation spécifique très élevée par rapport aux autres bassins. Le contexte topographie - couvert végétal ainsi que la puissance des crues de ce bassin sont favorables à un fort



transport solide. En ce qui concerne l'explication des variations de la concentration des sédiments en suspension, Meddi tenta d'établir, pour chaque bassin, des relations entre le transport solide, la pluie et le débit liquide. Il conclut que dans l'ensemble ce sont l'humidité du sol et le débit de pointe qui expliquent les variations de la turbidité maximale de la crue. Il signala en particulier que la température de l'eau, à défaut de données concernant la température de l'air, joue un rôle non négligeable dans l'explication des variations de la turbidité en saison chaude. En effet, les hautes températures accroissent l'aptitude de l'eau à détruire les agrégats du sol.

### 1.3.3 Travaux de Kouri (1993)

Kouri (1993) [45] a entrepris une étude sur l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'Oued Mina, dont il a fait l'analyse des processus et types fonctionnels de ravins dans la zone des marnes tertiaires. L'objectif de ce travail est d'aboutir à une méthode de détermination de la sensibilité des terrains marneux aux processus d'érosion hydrique linéaire devant permettre de localiser les zones sources de sédiments.

A l'échelle des petits bassins versants, l'analyse multivariée des données relevées met en évidence le rôle déterminant des variables type de marnes, pente, exposition, utilisation des terres et morphologie des parois dans l'évolution des ravins, ce qui permet l'établissement d'une classification définissant cinq types fonctionnels de ravins bien différenciés selon la nature et l'intensité des processus de ravinement identifiés.

A l'échelle de la zone des marnes tertiaires, une approche méthodologique pour déterminer la sensibilité des terrains marneux au ravinement est développée. Les facteurs explicatifs sont relevés in situ et les données sont numérisées à l'aide du système decad et traitées par les procédures de superposition et de classement du logiciel de Sig Idrisi. Il en découle la production d'une carte de sensibilité des terrains marneux au ravinement.

### 1.3.4 Travaux de Gomer (1994)

Dans leur étude sur le bassin versant de l'Oued Mina, Gomer (1994) [12] ont élaboré un modèle pour décrire l'écoulement et l'érosion des sols des petits bassins marneux en climat semi aride méditerranéen. Plusieurs grandeurs initiales ont été analysées et paramétrées pour la description des processus en l'occurrence :

- Les conditions climatiques, en particulier la distribution spatiale des pluies extrêmes ;
- La dérivation d'une carte hydrologique des sols à partir de documents de télédétection ;

- Une analyse numérique du relief ;
- L'infiltration et la formation de l'écoulement compte tenu de l'imperméabilisation par battance des sols marneux ;
- L'érosion des sols sous l'effet de l'impulsion cinétique en fonction des conditions hydrauliques ;
- Le transport solide en fonction du type de transport.

Le modèle a été validé par la comparaison des résultats des simulations et des mesures in situ. Ils concluent que le transport des sédiments à l'exutoire des micro bassins est déterminé presque exclusivement par l'impulsion cinétique: le rôle direct de l'érosion pluviale est négligeable. L'écoulement, par conséquent l'ablation, se concentrent dans les entailles. Les surfaces agricoles ne contribuent que très peu à l'écoulement, même pour les précipitations d'intensité extrême et peuvent donc être considérées comme stable vis-à-vis de l'érosion. Les sols salins généralement exposés au sud et sensible à la météorisation favorisent beaucoup plus la formation d'écoulement et d'érosion que les sols agricoles, exposés en général au nord. Les surfaces agricoles abandonnées ne peuvent être occupées par une végétation naturelle et sont donc rapidement imperméabilisées par battance. Il en résulte une augmentation de l'écoulement et de l'érosion qui en peu d'années aboutit à la dégradation irréversible des sols. Ils trouvent aussi que le boisement par des pins et des eucalyptus en monoculture sur marnes ne protège pas de l'érosion. Ils préconisent pour cela, comme protection plus efficace, une combinaison de procédés techniques de correction torrentielle et de procédés biologiques dans les principaux ravins. Le modèle ainsi établi combiné avec un système d'information géographique offre aux décideurs un outil de planification permettant de quantifier les mesures anti-érosives dans les bassins versants marneux de l'Algérie septentrionale.

#### 1.3.5 Travaux de Mahieddine (1997)

Mahieddine (1997) [41] a étudié la quantification de l'érosion parcellaire sur le bassin versant de l'Oued Mina. L'auteur a fait des essais sur des parcelles élémentaires allant de 1 à 100m<sup>2</sup>. Il a constaté que toutes ces parcelles ont subi la même forme d'érosion: une altération par éclaboussement. Pour le flux d'écoulement qui est de faible à moyen (11.5 à 53.65%), l'érosion varie de 0.26 à 2.54T/ha sur 100m<sup>2</sup>. Dans la parcelle de 1m<sup>2</sup>, le ruissellement a été abondant (61.1 à 79.2%) et les pertes en terre se sont élevées de 1.46 à 3.45T/ha.

### 1.3.6 Travaux de Meddi *et al.* (1998)

Meddi *et al.* (1998) [46] ont présenté un travail sur le transport solide dans les pays du Maghreb Arabe. L'application des différents modèles existants de prévision de la dégradation spécifique donne une différence considérable entre les valeurs mesurées et celles estimées. Les auteurs ont développé des modèles liant la dégradation spécifique au débit liquide moyen annuel et la superficie. Ils ont utilisé les données de barrages Algériens, Marocains et Tunisiens ainsi que les données obtenues au niveau des stations hydrométriques Algériennes. Le modèle choisi a été testé sur 10 stations hydrométriques où les données de la dégradation spécifique sont disponibles. Les résultats trouvés sont satisfaisants. Les erreurs sur l'estimation de la dégradation spécifique, pour les 10 stations, sont inférieures à 10%.

D'après Meddi *et al.* (1998), le modèle trouvé peut être utilisé pour estimer le transport solide en Algérie du nord. Mais il doit être manipulé avec prudence afin d'éviter les erreurs qui peuvent être engendrées par son application.

### 1.3.7 Travaux de Touabia (2000)

Touabia (2000) [47] a délimité dix parcelles de mesure de l'érosion (type Wischmeier) de largeur uniforme (4m) en quatre lieux par groupe de deux ou de trois avec des cultures différentes et sous un mode d'exploitation différent dans le but d'estimer l'index de l'érosion de Wischmeier dans les micro bassins de l'Oued Mina. L'auteur avait comme objectif la quantification de l'érosion en nappe à l'échelle des parcelles d'érosion de Wischmeier. L'érosion en nappe a été quantifiée pour des parcelles de pente, de type de sol et de cultures différentes.

L'indice d'érosivité calculé sur la base de dépouillement de 902 pluies enregistrées à 7 pluviographes sur 2 années consécutives 1989/1990 et 1990/1991 est estimé à 16.53MT.m/ha.h. L'application de l'équation universelle de perte de sol a donné une érosion très faible variant de 0.12 à 1.09T/ha.an. Une régression significative type puissance s'est dégagée entre l'indice d'érosion et la lame d'eau précipitée expliquant en moyenne plus de 90% de la variation.

### 1.3.8 Travaux de Terfous *et al.* (2001)

Les résultats d'analyse graphique des valeurs instantanées des débits solides dans le cours d'eau de l'Oued Mouilah et leurs relations avec les débits liquides, durant les campagnes de prélèvement de 1977 à 1993, ont permis à Terfous *et al.* (2001) [48] de

montrer l'existence de deux périodes d'érosion actives, une première période en automne, la seconde, à faible ampleur, au printemps.

Les auteurs ont montré que l'Oued Mouilah apporte annuellement  $48.7\text{Mm}^3$  d'eau avec un flux moyen de  $0.335\text{MT}$  de sédiments en suspension, ce qui correspond à une dégradation spécifique relativement faible, de l'ordre de  $126.4\text{T/Km}^2\cdot\text{an}$ , valeur nettement au-dessous des estimations publiées pour des bassins voisins en Algérie et au Maghreb. Toutefois, les quantités de sédiments véhiculés par l'oued sont très variables d'une année à une autre et l'année 1986/1987 a apporté à elle seule  $2.69\text{MT}$ , soit une dégradation spécifique de plus de  $1000\text{T/Km}^2\cdot\text{an}$ .

#### 1.3.9 Travaux de Terfous *et al.* (2003)

Terfous *et al.* (2003) [49] ont déterminé, par la confrontation des données de mesure et de modèles empiriques, les dégradations spécifiques dans trois bassins de la région nord ouest de l'Algérie. Il s'agit de la Haute Tafna, de l'Isser et du Mouilah. Ils se sont basés d'une part, sur le traitement et l'analyse des données des débits solides déduits des concentrations prélevées dans les principaux cours d'eau sur une période moyenne de 10 années et d'autre part, ils ont utilisé le modèle de Sogreah (1969) pour la comparaison.

Les résultats obtenus ont donné des valeurs de dégradations spécifiques variant en moyenne de  $100$  à  $3000\text{T/Km}^2\cdot\text{an}$ . Les deux méthodes utilisées ont donné dans certains cas des valeurs pouvant atteindre 100% de différence.

#### 1.3.10 Travaux de Achite et Meddi (2004)

Achite et Meddi (2004) [8] ont montré, dans son étude relative à l'estimation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Haddad, que le bassin de l'Oued Haddad contribue significativement à l'envasement du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda sur l'Oued Mina. La méthodologie adoptée par les auteurs consiste à rechercher un modèle régressif pouvant mieux expliquer le débit solide par le débit liquide mesuré au niveau de la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali durant la période 1973/1974 à 1994/1995 en étudiant cette relation à différentes échelles temporelles. Les résultats ont montré que le modèle puissance explique la plus grande partie de la variance. Les relations puissance mensuelles obtenues pour les données journalières et instantanées ont donné les meilleurs coefficients de corrélation. Ces relations ont été utilisées, compte tenu de la disponibilité des débits liquides moyens journaliers, pour l'estimation du transport solide dans le bassin de l'Oued Haddad évalué à  $2.87\text{T/ha}\cdot\text{an}$ .

### 1.3.11 Travaux de Bessenasse *et al.* (2004)

Bessenasse (2004) [50] a présenté la construction d'un modèle numérique destiné à prédire la formation et l'évolution de dépôts de sédiments en amont d'un barrage. A partir d'informations sur les apports en eau et en sédiments en provenance du bassin versant consolidées par une analyse hydrologique en QdF, un modèle hydraulique bidimensionnel horizontal, couplant les équations de Saint Venant et une équation de convection – diffusion, est mis en oeuvre. L'application de ce modèle sur la retenue de Zardezas de la région de Skikda (Algérie) montre, à la fois, les difficultés pratiques rencontrées dans la mise en oeuvre et l'apport possible d'une telle méthode pour la gestion des retenues algériennes.

### 1.3.12 Travaux de Bouanani (2004)

Bouanani (2004) [51] a mené des analyses hydrologiques et de transport des sédiments fluviaux sur le bassin de la Tafna (Ouest de l'Algérie) sur une période de 30 années. Ces analyses ont été successivement réalisées pour développer un ensemble d'éléments et d'outils de prise de décisions pour une meilleure gestion hydraulique des principaux barrages de la Tafna (Beni Bahdel, Izdihar, Boughrara et Sikkak). Une définition préalable de l'ensemble des paramètres géomorphologiques, géologiques, hydrologiques et climatiques des sous bassins versants de la Tafna a été effectuée. L'analyse quantitative et qualitative détaillée des débits liquides et des débits solides mesurés au niveau de quatre sous bassins représentatifs (Oued Sebdou, Mouilah, Isser et Sikkak) a permis de dégager des relations entre le transport solide des oueds et leurs débits. Le développement de modèles pluie - débit liquide, par l'utilisation de l'analyse corrélatoire et spectrale, simple et croisée a été conduit. L'examen détaillé des relations entre les débits liquides et les débits solides instantanés puis saisonniers et celui des concentrations en fonction des débits de crue par l'utilisation des courbes en hystérésis ont permis d'identifier les principales classes d'évolution, qui sont les courbes simples, dans le sens des aiguille d'une montre puis dans le sens contraire et enfin en forme de huit. Le modèle en courbe simple est le plus fréquent. Il traduit une action érosive instantanée et un transport des sédiments en suspension rapide, provoqué par des averses courtes et violentes sur des sols généralement secs, fragiles et peu protégés.

### 1.3.13 Travaux de Remini (2005)

Remini (2005) [1] a montré que la mise en eau des barrages de Beni Haroun, El-Agrem et Taksebt entraînera une augmentation de l'envasement annuel de 32 à 46Mm<sup>3</sup>/an. Le barrage de Beni Haroun seul recevra annuellement un volume de vase estimé à 10Mm<sup>3</sup>/an. En 2002, le volume de vase déposé dans les 52 grands barrages est estimé par l'auteur à 0.9 milliards de m<sup>3</sup>, soit un taux de comblement de 17% de la capacité totale. Cette quantité sera de 1.35 milliards de m<sup>3</sup> en 2020 pour le même nombre de barrages. La répartition des barrages sur les cinq bassins hydrographiques indiquent clairement que les barrages de la région de Chellif-Zahrez sont les barrages les plus menacés par le phénomène de l'envasement, puisque le taux de sédimentation annuel est de 0.75%. Ceci est dû selon Remini à la forte érosion des bassins versants de la région, favorisée par la nature des sols et l'absence de boisement.

Tableau (1.1): Taux de sédiments dans les barrages les plus envasés en Algérie [1]

Barrage	Année de la mise en eau	Superficie du bassin versant (Km <sup>2</sup> )	Capacité initiale (Mm <sup>3</sup> )	Apports (Mm <sup>3</sup> )	Envasement Annuelle (Mm <sup>3</sup> /an)	Taux de comblement en 2001 (%)
Beni Amrane	1988	370	15.6	414	1.2	80
Foum Elgherza	1950	1300	47	/	0.6	65
Zerdezas	1977	/	27	/	0.45	40
Oued Elfodda	1932	800	228	83	2.31	70
Ghrib	1939	23800	280	148	3.2	71
Hamiz	1935	139	21	52	0.35	66
Fergoug	1970	566	18	/	0.72	80
Bouhnifia	1940	7000	73	/	0.38	32
Boughezoul	1934	/	55	/	0.66	80
Ighil Edma	1953	652	155	/	1.33	41
K'Sob	1977	1495	29.5	50	0.3	24
Cheurfas I**	1885	4150	14.6	/	0.3	100
Meurad	1860	18	0.9	1.5	0.005	72
M.S.Abed	1984	11	54.9	40	0.03	14
Beni Bahdel	1952	1016	63	73.8	0.2	12
Foum Elgueiss	1939	156	3	12	0.03	84

\*\* : barrage déclassé en 1966

Remini a montré également qu'il existe 16 grands barrages qui sont les plus envasés des 52 grands barrages répartis à travers le territoire national. Le taux de sédimentation

annuel est évalué à  $12\text{Mm}^3$  pour les 16 barrages, ce qui représente 38% de l'envasement annuel de l'ensemble des barrages. Cependant, il reste que le barrage Ghrib est le deuxième barrage algérien, il reçoit une quantité de vase annuelle égale à  $3.2\text{Mm}^3$  après celui de Gargar avec  $4.5\text{Mm}^3$ . Les barrages Ghrib et Oued El Fodda sont comblés à plus de 70% de leur capacité totale. Des chiffres alarmants de l'état d'envasement des barrages les plus envasés en Algérie sont présentés dans le tableau (1.1).

#### 1.3.14 Travaux de Benkhaled (2006)

Benkhaled (2006) [52], dans son étude ayant pour objectif principal la compréhension du phénomène et l'estimation du transport solide en suspension, basée sur les données observées durant la période 1974/1975 à 1989/1990 sur le bassin versant de l'Oued Ouahrane, a constaté que ce bassin a une dégradation spécifique de l'ordre de  $169\text{T/Km}^2.\text{an}$ . Cette dégradation des sols est très visible sur le terrain. Elle est due aux caractères favorables à l'érosion des sols et au sapement des berges. L'analyse de l'effet d'hystérésis montre relativement l'effet saisonnier sur la forme de boucle obtenue. Le modèle sens des aiguilles d'une montre est très dominant sur le bassin considéré. L'arrivée du pic de la concentration avant celui du débit liquide, comme ceux se produisant simultanément, est une caractéristique de ce bassin de zone semi-aride. L'étude à différentes échelles temporelles de la relation de puissance a permis d'appréhender la complexité d'approche du transport solide et d'analyser le comportement des paramètres a et b de l'équation de régression. L'analyse à l'échelle saisonnière de la relation puissance débit solide - débit liquide est très représentative du contexte semi-aride du bassin étudié.

#### 1.3.15 Travaux de Ghenim *et al.* (2007)

Ghenim *et al.* (2007) [53] ont analysé les variations des débits solides en suspension dans l'Oued Sebdou et leurs relations avec les débits liquides durant la période de prélèvement allant de 1985 à 1998. Ils ont montré l'existence d'une période de forte érosion centrée principalement sur les mois de juin et septembre et d'une irrégularité importante des apports solides, notamment à l'échelle annuelle. Les auteurs ont montré que l'Oued Sebdou apporte annuellement  $34.2\text{Mm}^3$  d'eau avec un flux moyen de  $0.34\text{MT}$  de sédiments en suspension, ce qui correspond à une dégradation spécifique de  $1330\text{T/Km}^2.\text{an}$ , valeur relativement forte comparée à d'autres sous-bassins de la Tafna mais nettement au-dessous des estimations publiées pour des bassins en Afrique du Nord. Toutefois, les quantités de sédiments véhiculées par l'oued sont très variables d'une année à une autre. Les apports

solides fins ont atteint, durant l'année 1995-1996 selon les auteurs, 1.5MT, soit une dégradation spécifique de plus de 5800T/Km<sup>2</sup>.an.

#### 1.3.16 Travaux de Elahcene et Remini (2009)

Elahcene et Remini (2009) [54] ont analysé les données acquises par la station de Sidi Ghiles, Tipaza: hauteurs d'eau H (cm), débits liquides Ql (m<sup>3</sup>/s) et la concentration en matières en suspension C (g/l) et utilisées pour la quantification du transport solide en vue d'en déterminer leurs fiabilité et validité. La corrélation entre les deux paramètres (C et Ql) durant les crues est étudiée de manière qualitative. Le rapport C/Ql a été soumis à des relations linéaire, logarithmique, polynomiale, puissance et exponentielle. Les auteurs ont constaté que les meilleurs résultats sont obtenus par une équation de type  $C=aQl^b$  lorsqu'on regroupe les débits par classe et on calcul la concentration médiane. De plus, l'on se rend compte que les coefficients de corrélation sont de même ordre de grandeur pour la série complète, des saisons ou pour la série des crues. Toutefois, la relation qu'on tire doit être considérée sous réserve de la fiabilité des résultats de mesures faites.

Les auteurs ont donc prouvé que les deux paramètres (concentration des sédiments en suspension et débit liquide) sont étroitement liés. On notera cependant que la relation n'est valable que pour le cours d'eau sur lequel elle a été établie et sur la gamme des débits liquides sur laquelle les mesures ont été effectuées. On retiendra également que bien que significative, les relations sont parfois difficilement applicables aux débits les plus élevés.

#### 1.3.17 Travaux de Khanchoul et al. (2010)

Khanchoul *et al.* (2010) [55] ont réalisé une étude visant à estimer la charge solide dans l'Oued Bouhamdane dans le nord de l'Algérie et prédire l'envasement du barrage portant le même nom et situé en amont de la station hydrométrique de Medjez Amar. Plusieurs ensembles de données (débit liquide et du débit solide) moyennes journalières mesurées durant la période (1975/1976 à 1987/1988) ont été utilisés pour développer des courbes de transport solide de petites périodes à cause de l'insuffisance d'échantillonnage. De plus, une technique (correction proposée par Fergusson en 1986) a été conçue pour corriger le biais en bas de la courbe d'estimation.

Les résultats obtenus montrent que l'apport solide fin spécifique du bassin versant de l'Oued Bouhamdane s'élève à 271T/Km<sup>2</sup>.an. Les auteurs ont montré que la retenue de barrage de Bouhamdane, d'une capacité initiale de stockage de 200Mm<sup>3</sup>, reçoit 0.331Mm<sup>3</sup> de matériau solide fin annuellement soit un taux de comblement de 0.17%/an.



### 1.3.18 Travaux de Ghenim et Megnounif (2011)

Ghenim et Megnounif (2011) [56] ont introduit un modèle non linéaire en puissance (arithmétique) autre que celui en puissance, issu de la re-transformation logarithmique entre le débit et la concentration des sédiments en suspension, présentant généralement une sous-estimation de l'apport solide en suspension. Ce travail compare la précision des deux modèles dans l'estimation de l'apport solide. Pour cela, une série de mesures relevées à l'exutoire de l'Oued Sebdou et étalées sur 14 années a été utilisée.

Les auteurs ont montré que les régressions logarithmiques et arithmétiques sont susceptibles d'estimer avec une précision acceptable l'apport solide en suspension du bassin versant de l'Oued Sebdou. Les erreurs commises sont jugées acceptables. Il est à noter que même l'apport solide basé sur les concentrations mesurées et calculées par la méthode de l'approximation trapézoïdale ne peut refléter le tonnage exact des sédiments transitant à l'exutoire. Ceci est dû principalement à l'intervalle de temps séparant 2 prises consécutives dépassant parfois les 24 heures. Une estimation appropriée de l'apport solide (par les mesures ou par les régressions) nécessite une intensification des prises d'échantillons de transport solide en suspension surtout pendant les périodes des hautes eaux ou encore procéder à des mesures continues de la charge solide transitant par l'exutoire.

### 1.3.19 Travaux de Khanchoul *et al.* (2012)

Khanchoul *et al.* (2012) [57] ont estimé dans leur travail les apports solides dans le bassin versant de l'Oued Cherf en se basant sur les données de concentration des sédiments en suspension et des débits liquides et sur l'application de modèles généraux et multivariés. Cette étude a fait également partie d'un effort élargi visant à prédire de façon fiable l'envasement du barrage de Cherf mis en exploitation en 1994. Les 19 années de données disponibles sur la concentration de sédiments (1975/1976 à 1993/1994) sont utilisées pour prédire les charges des sédiments en suspension. La méthodologie utilisée dans cette étude est développée par une courbe de transport solide et un modèle de régression multiple. La première méthode est étudiée avec les classes moyennes du débit liquide provenant des concentrations des sédiments en suspension et des débits liquides enregistrés dans le bassin versant de l'Oued Cherf (1710Km<sup>2</sup>), avant la construction du barrage de Cherf. La seconde méthode est basée sur le type d'érodabilité de roche, les variables débit moyen annuel et surface du bassin, et elle est appliquée pour le bassin non jaugé de 1735Km<sup>2</sup>. Pour le modèle de la courbe de transport solide, une analyse de régression est faite entre la concentration des

sédiments en suspension et le débit liquide instantanés sur la base de toutes les données enregistrées.

Les auteurs ont montré que la méthode d'estimation de la courbe de transport solide a donné une prévision fiable des apports solides fins. Les apports solides spécifiques ont atteint  $347.23\text{T/Km}^2\cdot\text{an}$  pour le bassin du Cherf ( $1710\text{Km}^2$ ). Pour le bassin non jaugé ( $1735\text{Km}^2$ ), l'apport moyen annuel des sédiments en suspension pour la période 1994/1995 à 2004/2005 est estimé à  $357.81\text{T/Km}^2\cdot\text{an}$ . Le taux annuel de sédimentation du barrage de Cherf est estimé  $6.74\text{Mm}^3$ , représentant 4.35% de la capacité de stockage initiale ( $155\text{Mm}^3$ ), soit un taux de comblement de 0.40% /an.

#### 1.3.20 Travaux de Bouanani *et al.* (2013)

Bouanani *et al.* (2013) [58] ont fait une étude sur la quantification du transport solide et du taux d'érosion ainsi que sur la détermination des périodes d'érosions actives et la recherche d'un modèle reliant les débits solides aux débits liquides au niveau de l'Oued Sikkak. Sous-bassin de la rivière Tafna, le bassin versant du Sikkak est situé dans le nord-ouest Algérien et couvre une surface de  $218\text{Km}^2$  où est érigé un barrage d'une capacité de  $30\text{Mm}^3$ . Les résultats d'analyse graphique des valeurs instantanées des débits solides en suspension dans l'Oued Sikkak à la station d'Aïn Youcef et leurs relations avec les débits liquides (campagnes de prélèvement de 1972 à 1990), ont permis de montrer l'existence de deux périodes d'érosion active. Le flux de matières solides en suspension dans le cours d'eau est très variable d'une année à une autre et la dégradation spécifique moyenne annuelle est estimée à  $170\text{T/Km}^2\cdot\text{an}$  variant de 4 à  $745\text{T/Km}^2$ . Ces taux de dégradation restent très modérés par rapport à ceux publiés pour d'autres bassins de l'Algérie et du Maghreb, mais très proches de ceux trouvés pour quelques sous-bassins de la Tafna.

#### 1.3.21 Travaux de Ghernaout et Remini (2014)

Ghernaout et Remini (2014) [59] ont adopté, dans leur étude d'impact du transport solide en suspension sur l'envasement du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda (SMBA), une approche méthodologique qui consiste à trouver un modèle de puissance régressive pouvant mieux expliquer le débit solide par le débit liquide mesurés au niveau des stations hydrométriques de Oued El-Abtal (1985/1986 à 2000/2001) et Sidi AEK Djilali (1982/1983 à 2000/2001) en étudiant cette relation à différentes échelles temporelles. Les relations obtenues à l'échelle mensuelle, expliquant la plus grande partie de la variance, ont permis d'interpoler, d'extrapoler et d'analyser les charges solides fines et grossières déposées dans

la retenue de barrage de SMBA depuis sa mise en service en 1977/1978. Les résultats obtenus montrent que l'apport solide fin spécifique du bassin versant de l'Oued Mina s'élève à  $425\text{T/Km}^2\cdot\text{an}$ , soit  $2.081\text{MT}$  ( $1.301\text{Mm}^3$ ) par an. La quantité des sédiments en suspension provenant du bassin versant de l'Oued Mina dans la période 1977/1978 - 2001/2002 est de  $52.024\text{MT}$  ( $32.653\text{Mm}^3$ ), ce qui représente 13.84% de la capacité de stockage du barrage.

Les auteurs ont montré également que la retenue de barrage de SMBA, d'une capacité initiale de stockage de  $235\text{Mm}^3$ , reçoit  $2.705\text{MT}$  ( $1.691\text{Mm}^3$ ) de matériau solide (fin et grossier) annuellement soit une dégradation spécifique de  $552.087\text{T/Km}^2/\text{an}$  et un taux de comblement de la retenue de 0.72%/an. Le barrage a accumulé  $67.631\text{MT}$  ( $42.269\text{Mm}^3$ ) en 25 années (Sept 1977 à Août 2002), ce qui représente 18% de sa capacité. On prévoit l'accumulation de  $72.713\text{Mm}^3$  (30.94%) à l'horizon 2020,  $106.533\text{Mm}^3$  (45.33%) à l'horizon 2040 et un comblement total de la retenue à l'horizon 2136, soit une durée de vie de 158 ans. Les résultats obtenus ont permis également aux auteurs de trouver des relations très fortes entre l'érosion spécifique et la lame d'eau ruisselée et de proposer des solutions pour les gestionnaires de l'eau et des bassins hydrographiques afin de réduire l'envasement de la retenue de barrage de SMBA.

## **CHAPITRE 2**

# **REGION D'ETUDE ET METHODOLOGIE DE TRAVAIL**

### 2.1 Presentation de la région d'étude

Situé en zone semi aride, le bassin versant de l'Oued Mina répond à notre objectif en raison de sa forte érodabilité et de la disponibilité des données pluviométriques et hydrométriques. Il a été choisi aussi afin de mettre en exergue la situation du transport solide en suspension vu l'importance que requiert cette région de l'Algérie vis à vis des ouvrages hydrauliques qui alimentent les habitants de la ville de Relizène, le secteur industriel et la plaine de la Mina (pour l'irrigation) en eau.

Le bassin versant de l'Oued Mina est assez représentatif de beaucoup de bassins de la frange semi-aride du Nord de l'Algérie en ce qui concerne les paramètres physico-climatiques et leurs influences sur les phénomènes d'érosion en général et le transport solide en particulier. On retrouve sur ce bassin beaucoup de similarité avec les bassins du Nord de l'Algérie en ce qui concerne le climat, la lithologie, le régime hydrologique, le relief (accidenté), les pentes (raides) et le couvert végétal (faible).

### 2.2 Situation géographique

Situé à environ 300Km d'Alger, entre  $0^{\circ}20'$  et  $1^{\circ}10'E$  et entre  $34^{\circ}40'$  et  $35^{\circ}40'N$ , le bassin versant de l'Oued Mina draine, au niveau de barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda (SMBA) une superficie de  $4900\text{Km}^2$  [60]. Il chevauche sur quatre wilayas: Relizène au Nord, Mascara à l'Est, Tiaret à l'Ouest et Saida au Sud. L'Oued Mina est parmi les principaux affluents de l'Oued Cheliff. Il parcourt une distance de 90Km environ entre les barrages de Bakhada et de SMBA avec une orientation SE-NO (Figures 2.1 et 2.2).

Son relief est très accidenté et est qualifié d'assez fort selon la classification d'Orstom [61], les altitudes maximales et minimales étant respectivement de l'ordre de 1339m et de 145m avec une dénivelée spécifique de 556m (Tableau 2.7). Le climat de la région est de type semi aride méditerranéen avec une précipitation moyenne annuelle de 278mm marquée par une irrégularité aussi bien saisonnière qu'interannuelle [47, 59]. Le

régime hydrologique des cours d'eau dépend essentiellement du régime pluviométrique [62, 63]. Il se caractérise par une grande variabilité spatio-temporelle, avec une succession de périodes de hautes et de basses eaux.

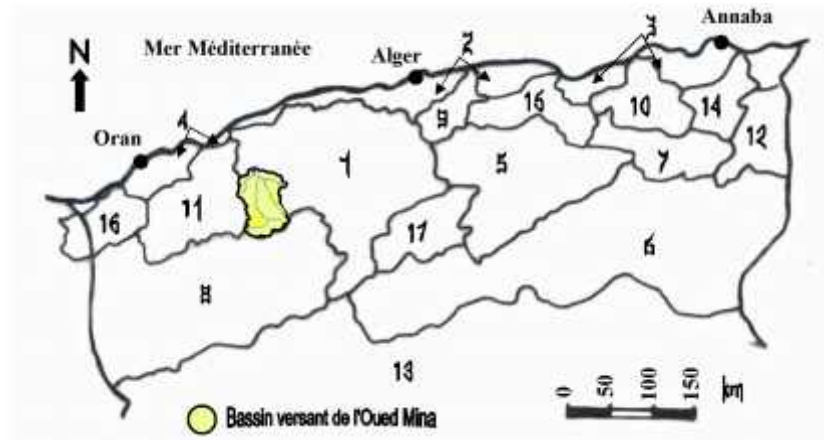


Figure (2.1) : Situation géographique du bassin versant de l'Oued Mina

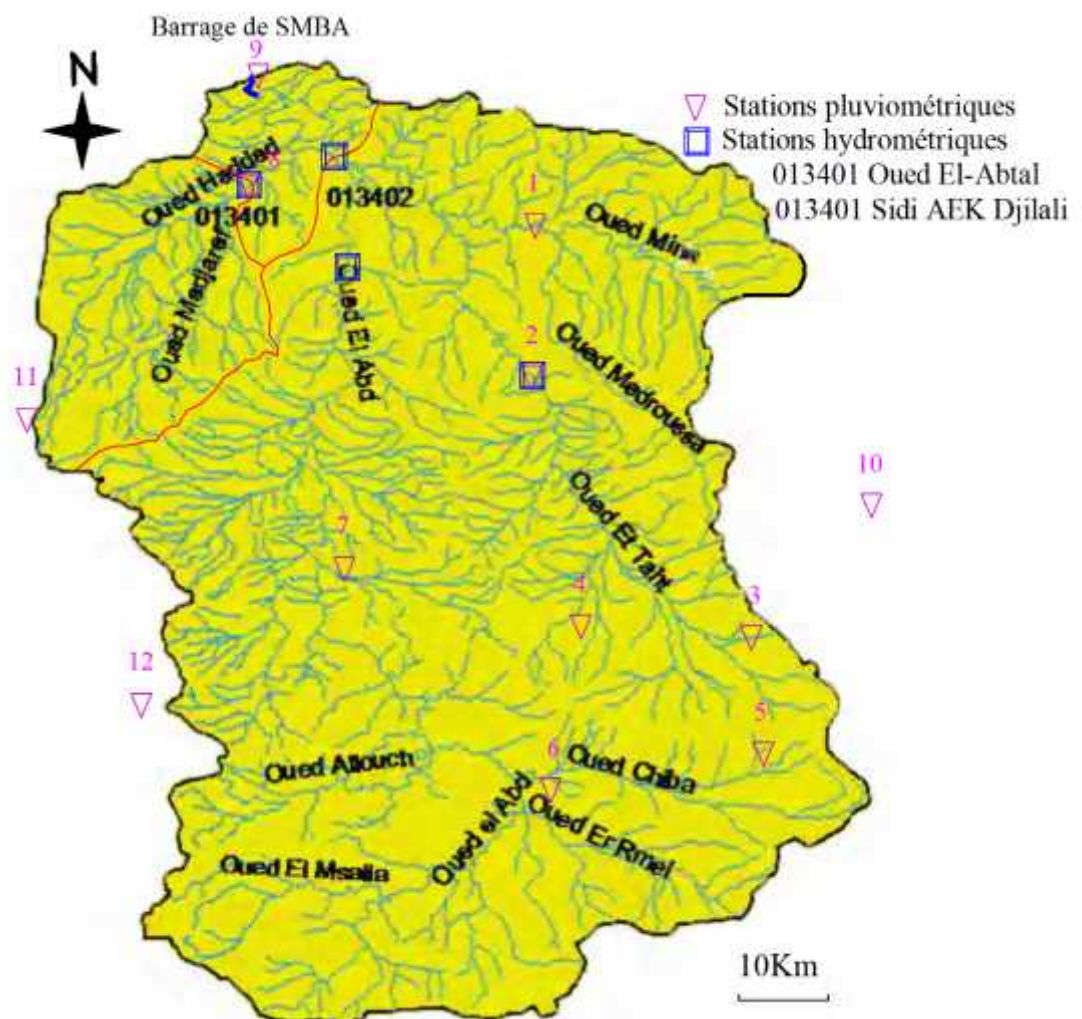


Figure (2.2) : Réseau hydrographique et équipement du bassin versant de l'Oued Mina [64]

[modifiée]

Le bassin versant de l'Oued Mina a une forme allongée de 100Km de long et environ 50Km de large en moyenne. Le sens d'écoulement de son réseau : Oued El-Abd, Oued Taht, Oued Haddad et Oued Medroussa se fait essentiellement du Sud au Nord. Les affluents se jettent dans l'Oued Mina au niveau de la zone des marnes.

### 2.3 Equipement du bassin versant de l'Oued Mina

L'ANRH exploite environ 21 stations pluviométriques à relevé journalier dans le bassin versant de l'Oued Mina, dont beaucoup n'ont été en fonction que quelques années. Seules douze (12) d'entre elles fonctionnent en présentant une période longue et commune (1982/1983-2000/2001). Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau (2.1) et leur implantation est illustrée en figure (2.2).

Tableau (2.1): Caractéristiques des stations hydrométriques et pluviométriques du bassin

Type	N°	Station	Code	X (Km)	Y (Km)	Z (m)
SH	1	Oued El-Abtal	013402	316.8	245.65	205.0
	2	Sidi AEK Djilali	013401	309.0	244.5	225.0
SP	1	Djilali Ben Amar	013102	332.5	239.25	300.0
	2	Kef Mehboula	013001	331.6	224.25	475.0
	3	Frenda	013002	348.6	197.0	990.0
	4	Ain El-Hadid	013004	334.5	197.0	829.0
	5	Ain Kermis	013201	354.55	179.85	1162
	6	Rosfa	013202	330.6	179.5	960.0
	7	Takhmaret	013304	316.4	203.1	655.0
	8	Sidi AEK Djilali	013401	308.25	244.55	225.0
	9	SMBA	013410	308.85	255.18	145.0
	10	Louhou Parat	112915	363.9	209.15	1040.0
11	Nesmoth	111418	288.96	213.52	825.0	
12	Ain Belloul	111203	296.85	190.55	1014.0	

SH : Station Hydrométrique, SP : Station Pluviométrique

Le réseau hydrométrique actuel comporte cinq (5) stations hydrométriques: la station de Oued El-Abtal sur l'Oued Mina, la station de Sidi AEK Djilali sur l'Oued Haddad, la station de Kef Mehboula sur l'Oued Taht et la station de Ain Hamara sur l'Oued El-Abd. La cinquième station (station de Takhmaret) sur l'Oued El-Abd et elle est à l'arrêt depuis 1997. Les deux premières stations sont retenues pour la détermination des apports liquides et solides au droit du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda du fait de leur emplacement au sein du bassin versant. Les apports des deux dernières stations sont contrôlés par la première station, comme le montre la figure (2.2). Les stations de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali

contrôlent respectivement des superficies de 4126Km<sup>2</sup> et 470Km<sup>2</sup>, soit 84% et 10% de la surface totale du bassin versant de l'Oued Mina au droit du barrage de SMBA.

Le barrage de SMBA (X=308.19Km, Y=245.02Km) est situé à environ 22Km vers le Sud de la ville de Relizène. Il est édifié sur le principal affluent de l'Oued Cheliff qui est la Mina en 1978 et est destiné à l'irrigation de la plaine de la Mina et à l'alimentation en eau potable de la ville de Relizène. D'une capacité totale de stockage de 235 Mm<sup>3</sup>, le barrage est caractérisé par une digue homogène d'une longueur en crête de 880m et d'une hauteur de 65m au dessus de sa plus basse fondation. L'apport liquide moyen interannuel est estimé à 72.803 Mm<sup>3</sup> par an. Il est estimé que le barrage de SMBA reçoit une quantité de sédiments en suspension d'environ 2.1MT par an (chapitres 3 et 5), ce qui menace de réduire considérablement sa durée de vie.

## 2.4 Morphologie du bassin versant

### 2.4.1 Caractéristiques physiques

#### 2.4.1.1 Lithologie

La partie Nord-Ouest du bassin versant est essentiellement constituée de marnes tertiaires très sensibles à l'érosion. Au Nord-Est, l'attaque de l'érosion est limitée malgré l'existence de marnes du fait qu'elles sont superposées de grès, de calcaire ou de dolomies jouant le rôle de couches protectrices.

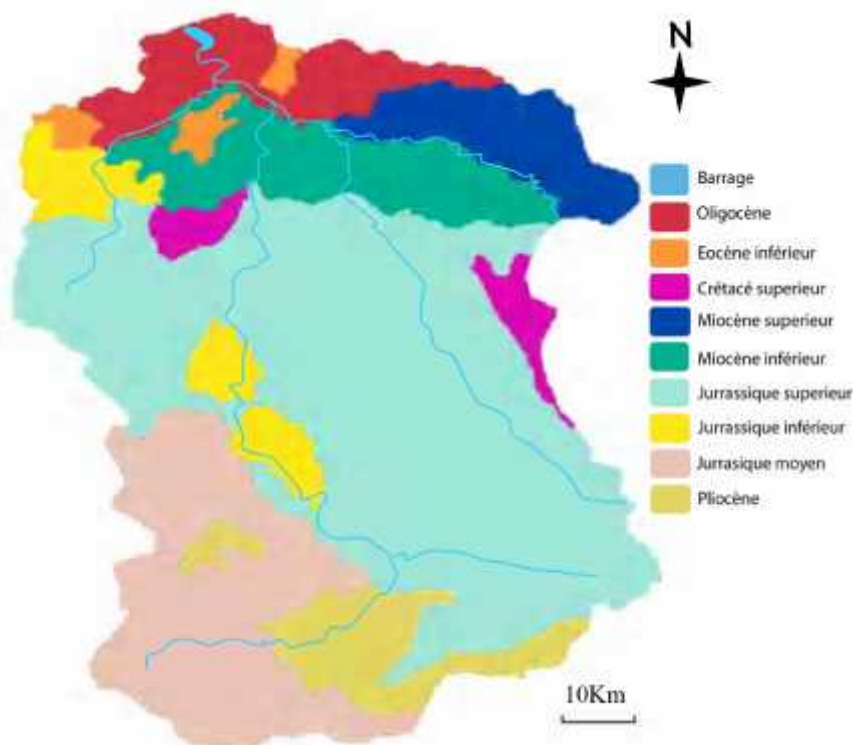


Figure (2.3): Carte lithologique du bassin versant de l'Oued Mina [41] [modifiée]

Au Centre et à l’Ouest de la partie septentrionale, aucune couche protectrice ne s’oppose au processus de l’érosion. La partie méridionale située au sud du 35°20’ de latitude est donc soumise à une érosion moins forte. Le long de cette latitude, il y a un soulèvement de terrain qui marque le début de la formation jurassique qui continu vers le Sud (Figure 2.3). Dans ces vallées du Sud, les marnes jurassiennes sont aussi sujettes à l’érosion, mais là un niveau stable d’érosion a été atteint. Cette érosion s’amplifie quand se combinent, un relief accidenté et la présence de marnes dans lesquelles il y a des intercalations de quelques bancs de carbonate [41].

#### 2.4.1.2 Végétation

L’analyse de la répartition géographique des formations végétales, leurs diversités et leurs parts respectives sur le bassin versant de l’Oued Mina est représentée sur la figure (2.4) montrant deux parties distinctes [41]:

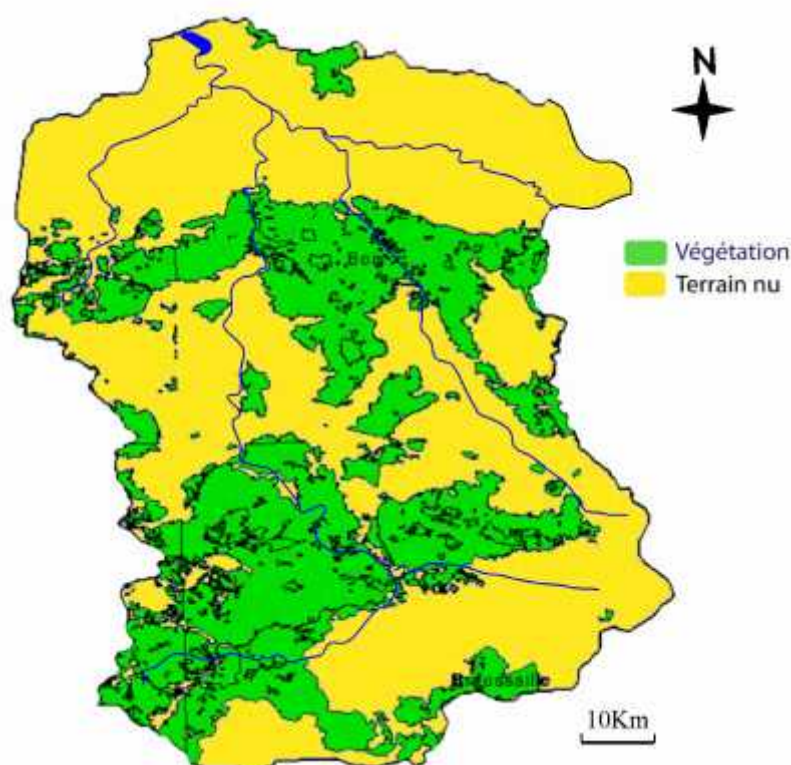


Figure (2.4) : Carte de la couverture végétale du bassin versant de l’Oued Mina [64]  
[modifiée]

➤ La zone du Nord purement marneuse, fortement érodé et dépourvue de végétation dans la plupart des terres, à l’exception de quelques îlots de reboisement du Tassalet et des plantations d’arbres fruitières dans la vallée. Les sols de cette partie du bassin sont



généralement nus et sursaturés surtout sur les terrains rocheux. L'absence d'une végétation naturelle durable a accéléré l'érosion et c'est pourquoi on trouve beaucoup de parcelles non utilisables pour l'agriculture, profondément découpées par l'érosion.

➤ La zone jurassique du Sud moins érodée où près de 50% de sa surface est recouverte par une végétation de densité variable. Les forêts (5.8%) sont dominées en grande partie par de jeunes plantations de pin d'Alep. Les maquis (32%) existent sous deux formes : maquis avec PISTACIA et OLEA et maquis avec TETRACLINIS. En plus de la végétation naturelle, les céréales sont les principales cultures annuelles appliquées.

#### 2.4.1.3 Pente (topographie)

La quantification des facteurs du milieu physique présente un intérêt particulier dans la recherche des causes de variations du régime hydrologique d'un bassin. La partie amont du bassin culmine à 1339m d'altitude. La partie aval montre un relief plus vallonné avec des pentes souvent supérieure à 3%. L'exutoire du bassin versant est à une altitude de 145m (Figure 2.5).

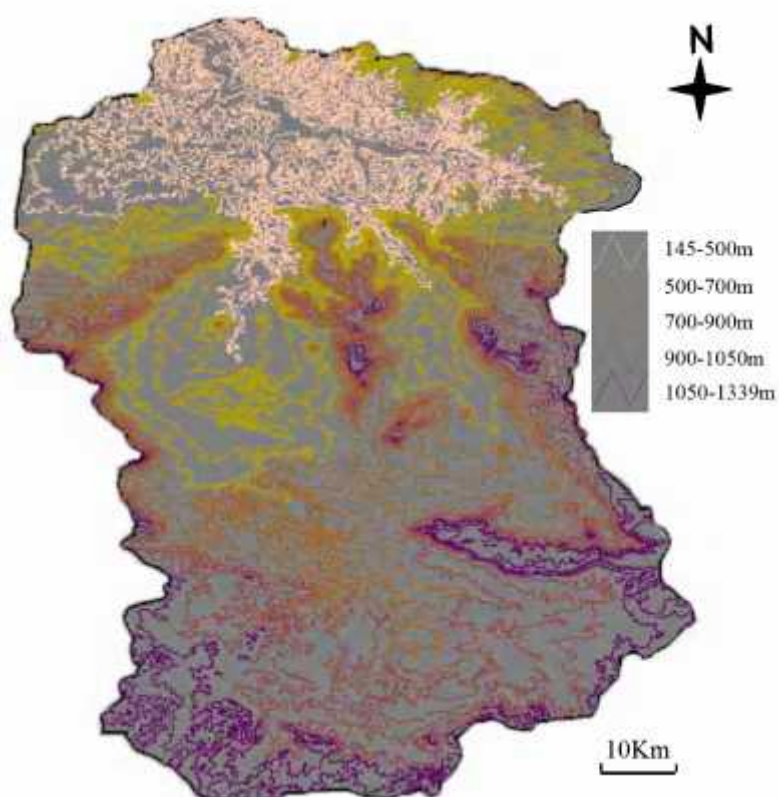


Figure (2.5) : Carte d'altimétrie du bassin versant de l'Oued Mina

[64] [modifiée]

Le degré d'inclinaison du relief est un facteur important pour déterminer son aptitude à l'érosion. Il indique d'une manière significative son degré d'érosion. Quatre types de relief (Figure 2.6) composent le bassin versant de l'Oued Mina :

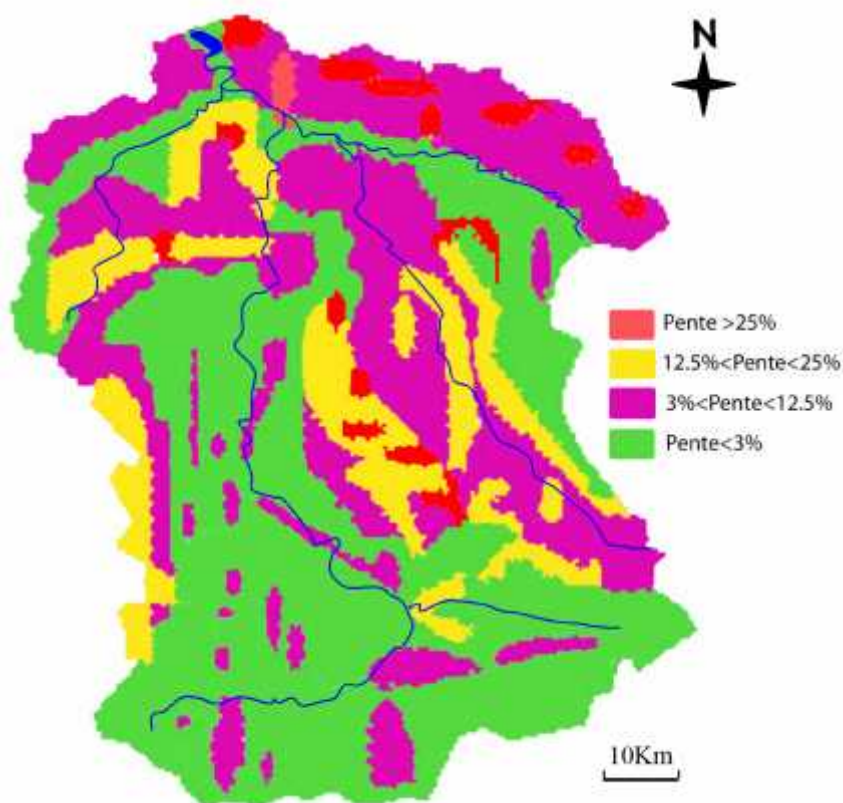


Figure (2.6): Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Mina [41] [modifiée]

- Un relief relativement plat ayant une pente inférieure à 3% qui représente environ 54% de l'ensemble du bassin versant et qui se trouve surtout dans les vallées des Oueds, dans la partie Ouest de la zone des marnes et aux niveaux des terrasses élevées du paysage jurassique faiblement raviné.
- Un relief relativement accidenté ayant une pente allant de 3 à 12% qui représente environ 40% de la surface du bassin dont une partie se trouve dans la zone des marnes (19%).
- Un relief à pente moyenne à forte allant de 12 à 25% qui représente environ 5% de la surface du bassin. Ce relief recouvert de végétation se trouve sur les montagnes du jurassique et résiste à l'érosion.

➤ Un relief accidenté ayant une pente supérieure à 25% qui représente environ 1% de la superficie du bassin versant et qui se trouve surtout au milieu de la zone des marnes.

#### 2.4.1.4 Répartition du degré d'érosion

Selon l'I.F.G. (1987) [65], l'ensemble du bassin est soumis à une érosion intense (Figure 2.7).

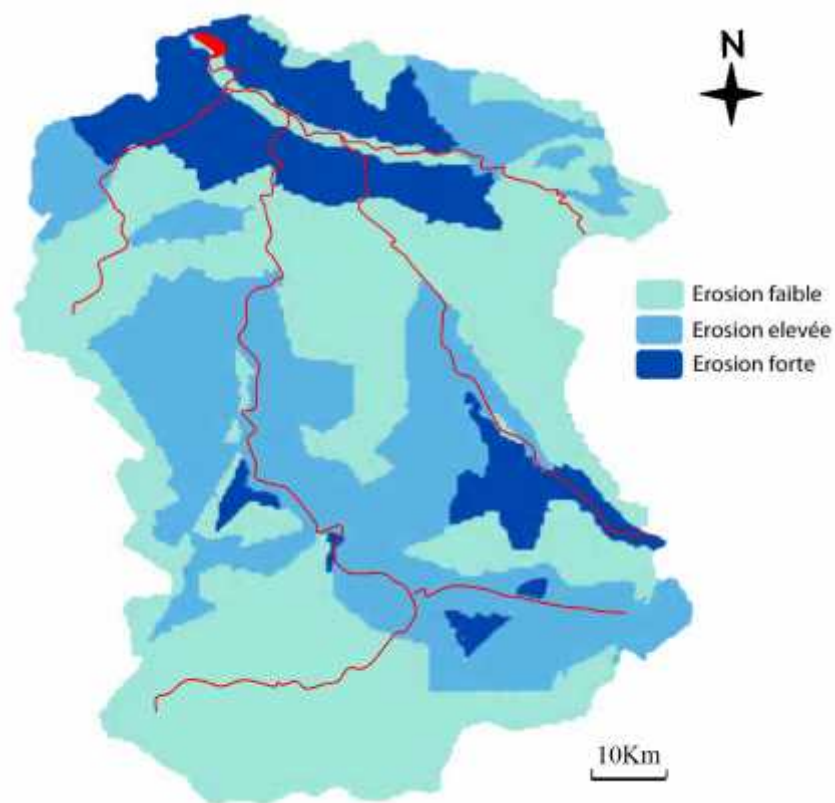


Figure (2.7) : Carte d'érosion du bassin versant de l'Oued Mina [41] [modifiée]

L'érosion est forte, surtout dans les zones d'agriculture et de pâturage où il n'existe qu'une couverture rare et pauvre. La région la plus menacée par l'érosion se situe au début du barrage de SMBA caractérisant la partie centre de la zone des marnes. La partie à l'extrême Sud-Ouest de la zone des marnes septentrionale montre une érosion faible grâce à la présence d'une couverture végétale complète et permanente, alors qu'à l'Est les bords de grès, les grès de calcaires et de dolomies ont une faible aptitude à l'érosion.

## 2.4.2 Caractéristiques climatiques et hydrologiques

### 2.4.2.1 Climat

Le climat du Tell oranais se caractérise par des étés chauds et secs peu orageux et des hivers doux et humides et peut être appelé méditerranéen semi-aride [12].

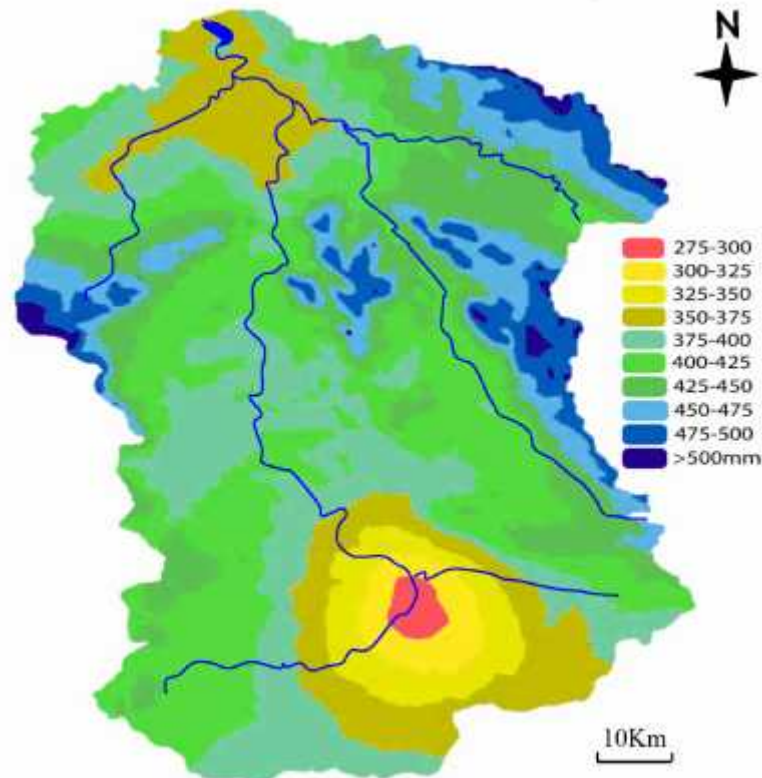


Figure (2.8) : Carte des précipitations moyennes annuelles [1922-1960 + 1969-1989] du bassin versant de l'Oued Mina [12] [modifiée]

L'Hiver est dominé en Afrique du Nord par les masses d'air polaires. Les zones de basse pression polaires circulant d'Ouest en Est rencontrent des masses d'air tropicales plus humides et engendrent ainsi des précipitations souvent sous forme d'averses. A l'approche de l'été, les masses d'air du Sahara montent vers le Nord et freinent les masses d'air polaires d'Europe générant des étés chauds et secs de rares précipitations orageuses.

Les lames d'eau précipitées diminuent du Nord au Sud et d'Est en Ouest à cause de l'affaiblissement des itinéraires des cyclones (Figure 2.8). Les averses pluvieuses dépendent de l'altitude, de la latitude et de l'exposition et sont très variables dans le temps, ce qui veut dire que les moyennes pluviométriques obtenues sur plusieurs années ne sont que des valeurs approximatives, comparées aux grandes variations d'une année à l'autre [47]. Il semble que depuis la décennie 70, les précipitations annuelles aient nettement diminué en Algérie. La station Oued El-Abtal a enregistré en 1990 un déficit de 49% par rapport à la moyenne interannuelle 1910-1992 [12]. La faible moyenne pluviométrique (271mm) enregistrée durant la période 1982-2001 sur l'ensemble du bassin versant de l'Oued Mina explique d'avantage cette tendance d'évolution des précipitations avec le temps.

### 2.4.2.2 Température

Bien qu'elle ne soit pas très représentative de l'ensemble du bassin versant de l'Oued Mina du faite qu'elle est située à une vingtaine de kilomètres à l'aval du barrage de SMBA à une altitude de 75m, la station de Relizène a été prise en référence vu l'absence de stations météorologiques sur la quasi-totalité du bassin. Les températures moyennes interannuelles enregistrées sur la période 1944-1969 sont données dans le tableau (2.2). Elles sont presque identiques à celles relevées à la station de Chélif à partir des cartes de températures établies par l'ANRH (2002) [5].

Tableau (2.2) : Températures moyennes mensuelles en C° [47]

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	M <sub>oy</sub>
Max	32	27	20	16	15	17	19	23	28	32	37	38	25
Moy	25	20	15	11	10	11	13	16	20	24	28	29	18
Min	18	13	10	6	5	5	7	9	12	16	19	20	11

Ce tableau fait ressortir l'existence de deux saisons bien distinctes; une saison froide s'étalant de Novembre à Mars correspond à la période pluvieuse, et une saison chaude s'étalant de Mai à Octobre correspond à la période sèche. Le mois le plus froid de l'année est celui de Janvier avec une moyenne de 10C° et des températures extrêmement basses pouvant atteindre -10C°. Le mois le plus chaud est celui d'Août avec une moyenne de 29C° et des maximums journaliers de 50C°.

### 2.4.2.3 Evapotranspiration

La semi aridité du climat et l'irrégularité spatio-temporelle des précipitations font que l'évapotranspiration est très fluctuante durant l'année. La station de Chelif (tableau 2.3) a été prise comme référence pour la connaissance de l'évapotranspiration dont les valeurs sont relevées à partir des cartes de l'évapotranspiration établies par l'ANRH (2002) [5].

Tableau (2.3) : Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles [52]

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Tot
Moy (mm)	154	97	53	37	43	58	99	139	181	214	245	222	1542

L'évapotranspiration passe de 37mm au mois de Décembre à 245mm au mois de Juillet. L'ETP annuelle représente plus de cinq fois le total pluviométrique du bassin versant de l'Oued Mina. Le bilan hydrique est généralement négatif, ce qui limite les possibilités de boisement ainsi que les rendements céréaliers hors irrigation.

### 2.4.3 Caractéristiques hydromorphométriques

Plusieurs caractéristiques hydromorphométriques du bassin et sous bassins versant de l'Oued Mina ont été déterminées [66, 67, 68] à savoir :

- *La surface A (Km<sup>2</sup>) et le périmètre P (Km);*
- *La longueur du cours d'eau principal L<sub>cp</sub> (Km);*
- *La densité de drainage D<sub>d</sub> (Km/Km<sup>2</sup>) qui est définie comme étant le rapport entre la longueur totale de tous les talwegs du bassin et la surface totale.*
- *Le temps de concentration T<sub>c</sub> (h) qui est définit comme étant le temps que met la particule d'eau la plus éloignée pour arriver à l'exutoire. Il peut être calculé par l'ancienne formule de Guiandotti (1937).*
- *L'indice de compacité K<sub>c</sub> qui est définit comme étant le rapport entre le périmètre du bassin et la circonférence du cercle ayant la même superficie que la bassin. Ce dernier traduit la forme du bassin versant; Il se rapproche de 1 pour un bassin ramassé et croit d'autant plus que la compacité diminue. Cet indice a également une certaine influence sur l'écoulement, il détermine dans une certaine mesure l'allure de l'hydrogramme de crue.*
- *Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius qui est une transformation purement géométrique du bassin en un rectangle de longueur L et de largeur l ayant le même périmètre et la même superficie. Selon Liamas (1993) [69], les courbes de niveaux deviennent des droites parallèles aux petits cotés du rectangle, et l'exutoire est l'un de ces petits cotés. Ce dernier permet de montrer la répartition des pentes et leur impact sur le ruissellement des eaux et de situer les zones d'accélération et de ralentissement. Il permet également de comparer les bassins versant entre eux du point de vue de l'écoulement.*
- *La courbe hypsométrique qui donne le portrait le plus précis de l'élévation d'un bassin. Cette dernière n'est qu'une représentation de la distribution statistique des altitudes (tableau 2.4) sur l'ensemble du bassin versant (ou sous bassin) portant en abscisse les surfaces partielles et en ordonnée les altitudes correspondantes. A partir de cette courbe (figure 2.9), on peut tirer les différentes caractéristiques du relief tel que Les altitudes maximale H<sub>max</sub>, minimale H<sub>min</sub>, moyenne H<sub>moy</sub> et celles correspondant à 5%, 50% et 95% de la surface totale ainsi que la dénivelée (D=H<sub>5%</sub>-H<sub>95%</sub>).*
- *L'indice de pente globale I<sub>g</sub> qui est définit comme étant le rapport entre la dénivelée et la longueur du rectangle équivalent et qui sert à classer le relief d'un bassin.*
- *La dénivelée spécifique D<sub>s</sub> qui est définit comme étant le produit de l'indice de pente global et la racine carré de la superficie du bassin et qui sert à comparer les reliefs des bassins de superficies différentes.*

Les résultats de calculs des différents paramètres cités plus haut ainsi que la classification d'O.R.S.T.O.M du relief sont illustrés dans les tableaux (2.5) et (2.6).

Tableau (2.4) : Répartitions altimétriques du bassin versant de l'Oued Mina

Bassin	Altitudes (m)	SP (Km <sup>2</sup> )	SP (%)	SC (%)
SB contrôlé par la station de Oued El-Abtal	1339-1200	37.4	0.91	0.91
	1200-1000	1060.8	25.71	26.62
	1000-800	1087.3	26.35	52.97
	800-600	1120.2	27.15	80.12
	600-400	604.8	14.66	94.78
	400-205	215.5	5.22	100.0
Somme	/	4126	100.0	/
SB contrôlé par la station de Sidi AEK Djilali	1160-1000	7.8	1.66	1.66
	1000-800	71.3	15.17	16.83
	800-600	138.2	29.40	46.23
	600-400	188.6	40.13	86.36
	400-225	64.1	13.64	100.0
Somme	/	470	100.0	/
Bassin versant de L'Oued Miana au droit du barrage de SMBA	1339-1200	30	0.61	0.61
	1200-1000	960	19.60	20.21
	1000-800	1318	26.90	47.10
	800-600	1070	21.84	68.95
	600-400	1082	22.08	91.03
	400-200	405	8.26	99.29
	200-145	35	0.71	100.0
Somme	/	4900	100.0	/

SP : Surfaces partielles, SC : Surfaces cumulées, SB : Sous bassin

On remarque à partir des mesures altimétriques dans le tableau (2.4) que plus de 45% de la surface totale est située au-dessus de l'altitude 800m. Ceci montre que notre bassin est situé dans une région montagneuse.

Pour un périmètre 315Km et une superficie de 4900Km<sup>2</sup>, le coefficient de compacité est égale à 1.26, valeur qui dénote une forme plus ou moins allongée. Elle implique par conséquent un temps de concentration lent (24h).

Les valeurs de Ds place le relief du bassin versant de l'Oued Mina dans la classe R6, soit un relief assez fort, d'après la classification d'O.R.S.T.O.M. Le bassin de l'Oued Mina montre des caractères morphométriques assez particuliers favorisant à priori le ruissellement. Pour le bassin versant de l'Oued Mina, l'indice de pente globale est de l'ordre de 0.79%. Ce qui implique une pente assez forte et par conséquent une prédominance de l'écoulement de

surface. Cette valeur peut être interprétée comme étant un indicateur du degré d'érodabilité du bassin.

Tableau (2.5) : Paramètres hydromorphométriques du BV de l'Oued Mina

Caractéristiques		Unité	SB contrôlé par la station de Oued El-Abtal	SB contrôlé par la station de Sidi AEK Djilali	BV de l'Oued Mina au droit du barrage de SMBA
X	station ou barrage	Km	316.8	309	308.19
Y		Km	245.65	244.5	254.02
Z		m	205	225	145
Superficie A		Km <sup>2</sup>	4126	470	4900
Périmètre P		Km	295	91	315
longueur Lcp		Km	90	47	135
Densité de drainage Dd		Km/Km <sup>2</sup>	4.42	2.44	4.48
Temps de concentration Tc		h	20	10	24
Indice de compacité Kc		/	1.28	1.29	1.26
Longueur L		Km	108.95	37.36	114.83
Largeur l		Km	37.87	12.58	42.67
Altitude maximale H <sub>max</sub>		m	1339	1160	1339
Altitude minimale H <sub>min</sub>		m	205	225	145
Altitude moyenne H <sub>moy</sub>		m	810	588	755
Altitude médiane H <sub>50%</sub>		m	920	624	874
Altitude H <sub>5%</sub>		m	1243	1018	1232
Altitude H <sub>95%</sub>		m	492	381	320
Dénivelée D		m	751	637	912
Indice de pente globale Ig		m/Km	6.89	17.05	7.94
Dénivelée spécifique Ds		m	442.57	369.64	555.8

Tableau (2.6) : Classification du relief selon O.R.S.T.O.M. [68]

Classe	Relief	Dénivelée Spécifique
R1	Relief très faible	Ds=10m
R2	Relief faible	Ds=25m
R3	Relief assez faible	Ds=50m
R4	Relief modéré	Ds=100m
R5	Relief assez fort	Ds=250m
R6	Relief fort	Ds=500m
R7	Relief très fort	Ds>500m

Les principaux paramètres du milieu physique analysés ci-dessus fond du bassin une géostructure plus ou moins complexe le rendant très sensible au processus d'érosion. Cette complexité s'explique en grande partie par la grande variété des faciès géologiques, des formes topographiques, du couvert végétale, des systèmes de pentes et des nuances climatiques. Les formations de sol imperméable (marneux), les terrains accidentés et les sols



nus dépourvus de végétation qui couvrent 20%, 46% et 62% de la surface totale du bassin versant respectivement, favorisent l'écoulement de surface et par conséquent l'érosion et le transport solide.

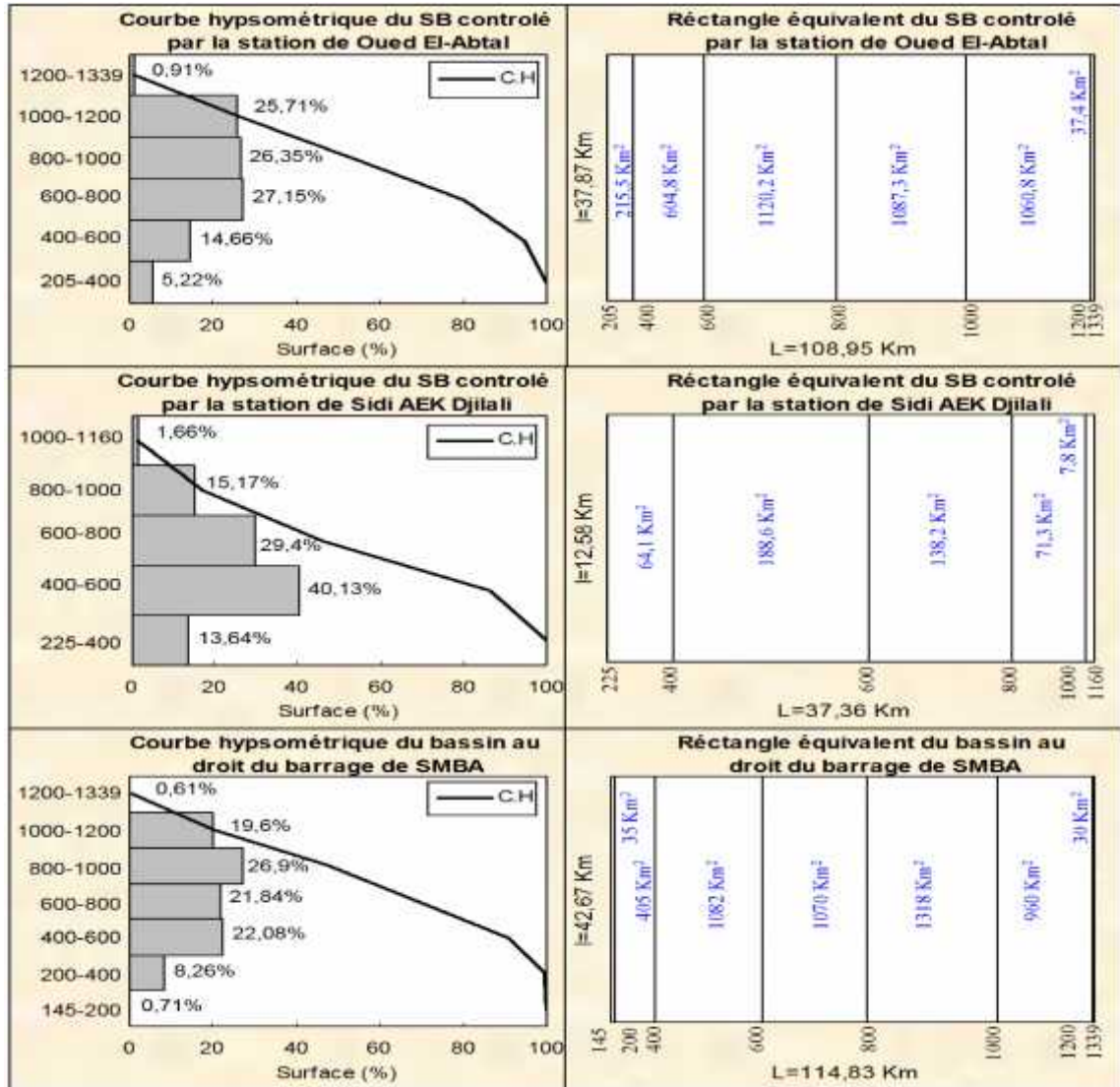


Figure (2.9): Courbes hypsométriques et rectangles équivalents du bassin de l'Oued Mina

## 2.5 Données utilisées et methodologie

Les données de base disponibles sont constituées par les débits liquides moyens journaliers en (m<sup>3</sup>/s), les débits liquides instantanés en (m<sup>3</sup>/s) et les concentrations instantanées des sédiments en suspension en (g/l) collectées sur l'Oued Mina et l'Oued Haddad au niveau des stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali, respectivement, par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) d'Alger. Elles sont constituées également par les précipitations journalières en (mm) collectées au

niveau des stations pluviométriques illustrées par la figure (2.2). L'échantillonnage uniponctuel est la méthode d'échantillonnage systématique du transport solide sur la plupart des cours d'eau Algériens. L'analyse de laboratoire des échantillons prélevés est effectuée selon les procédés classiques à savoir filtrage, séchage à l'étuve et pesée. Concernant les débits liquides, les lectures de hauteur d'eau effectuées sont transformées en débits liquides grâce aux barèmes d'étalonnage établis par les services de l'ANRH d'Alger.

Cette banque de données couvre, pour les couples de débits liquides – concentrations des sédiments instantanés ( $QI$ ,  $C$ )inst et les données des précipitations journalière, les périodes allant de 1985/1986 à 2000/2001 (station de Oued El-Abtal) et de 1982/1983 à 2000/2001 (station de Sidi AEK Djilali), soit 16 et 19 années respectivement et les périodes allant de 1953/1954 à 2001/2002 (station de Oued El-Abtal) et de 1969/1970 à 2001/2002 (station de Sidi AEK Djilali) pour les débits liquides moyens journaliers ( $Q_{moy}$ ), soit 49 et 33 années respectivement.

L'implication des phénomènes de précipitation et d'écoulement dans le processus de l'érosion hydrique, nous a incité à étudier de plus près ces deux variables. La répartition spatio-temporelle des précipitations annuelles dans le bassin versant de l'Oued Mina a été établie au moyen de l'analyse en composantes principales. Les résultats obtenus permettent de déterminer les stations pluviométriques représentatives du bassin et des sous bassins versants de l'Oued Mina et d'identifier les régions ayant des caractéristiques pluviométriques homogènes. L'étendue des variations de l'écoulement dans le temps qui sont dues essentiellement au caractère aléatoire des précipitations a été également étudiée afin d'établir les caractéristiques de la dynamique fluvio-sédimentaire dans le bassin versant de l'Oued Mina.

La concentration des sédiments en suspension  $C$  et le débit liquide  $Q$  (ou  $QI$ ) évoluent en général suivant un modèle de puissance [70, 71, 72]:

$$C = a Q^{b-1} \quad (2.1)$$

Une relation empirique, communément appelée courbe du transport solide [43, , 48, 51, 57, 59, 67, 73] lie le débit solide  $Q_s$  au débit liquide  $Q$ :

$$Q_s = a Q^b \quad (2.2)$$

Les paramètres  $a$  et  $b$  sont généralement estimés par régression linéaire des variables transformées en log. L'exposant  $b$  représente la pente de la courbe sur l'échelle log-log. Bogardi (1974) [74] suggère que l'exposant  $b$  et la constante  $a$  reflètent les caractéristiques du bassin versant, alors que Vanoni (1977) [75] considère que la constante  $a$  représente un indice d'érodabilité du sol. Selon Fleming (1969) [76], le coefficient  $a$  varie de 4 à 446

tandis que  $b$  varie de 0.72 à 1.02. Leopold et Maddok (1953) [77] ont proposé pour les rivières de l'ouest des Etats-Unis des valeurs de  $b$  entre 2 et 3. D'autre part, le coefficient  $b$  varie de 1 à 2 selon d'autres chercheurs tels que Wood (1977) [70], Batala et Sala (1992) [78], Bouanani (2004) [51], Khanchoul *et al.* (2012) [57] et Ghernaout et Remini (2014) [59].

Il a été démontré que la régression linéaire des variables transformées en log peut réduire considérablement le biais statistique introduit dans le calcul [79]. Cette analyse de régression a donné un bon coefficient de corrélation ( $R=0.92$  pour les deux stations) et les données logarithmiques ( $\ln(Q_s)-\ln(Q_l)$ ) montrent une faible dispersion autour de la partie inférieure de la droite ajustée (figures 4.14 et 4.15). En dépit de cette qualité d'ajustement, une prédiction intéressante du transport solide en suspension peut être extraite de cette technique entre les débits solides et les débits liquides.

Une approche consistant à rechercher un modèle puissance régressif pouvant mieux expliquer le débit solide par le débit liquide (coefficient de détermination  $R^2 \approx 1$ ) mesurés au niveau des deux stations hydrométriques pour différentes échelles temporelles (annuelle, mensuelle et saisonnière) a été également employée. L'optimisation de la courbe de transport solide a été validée par la comparaison des valeurs estimées aux valeurs observées. Lorsque la régression logarithmique des moindres carrés sous-estime les débits solides à cause du biais en bas de la courbe d'estimation, une correction non paramétrique peut être utilisée.

Des tests plus élaborés comme ceux du coefficient de détermination (Probability Plot Correlation PPC) et du Kolmogorov-Smirnov K-S peuvent donc être employés pour vérifier l'ajustement des résidus à la loi Normale et apportent des explications sur la précision des courbes de transport solide (courbes intra-annuelle).

Les courbes de transport solide permettent d'estimer les apports solides (sédimentation du barrage de SMBA) en utilisant plusieurs techniques en fonction des données du débit liquide disponibles. Elles permettent aussi d'estimer la contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension. L'application des courbes de transport solide aux données du débit liquide moyen journalier, comme cela est fait dans le présent travail, donne les meilleurs résultats pour la méthode. Les résultats obtenus peuvent finalement être utilisés pour identifier la meilleure relation possible entre l'apport solide spécifique et la lame d'eau ruisselée au niveau des deux stations hydrométriques (Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali) en utilisant plusieurs modèles régressifs à savoir: linéaire, logarithmique, parabolique puissance et exponentiel.

L'effet d'hystérésis sur la relation (C-Q) a été analysé à travers des séries d'événements chronologiques (crues). L'identification des différentes classes de la relation (C-Q) est élaborée sur la base des résultats graphiques et statistiques des deux variables mises en relation.

Les boucles d'hystérésis de la relation (C-Q) sont représentées dans le tableau (2.7). Ce tableau représente probablement la majorité des boucles d'hystérésis relevées à travers les différentes recherches effectuées dans plusieurs bassins du monde. Les parties montée et décrue représentent les deux zones de base pour l'analyse des classes d'hystérésis. Le critère rapport (C/Q) est un critère simple, objectif et fiable. Il est considéré comme étant le premier critère de base.

Enfin, pour déterminer la variation des paramètres a et b de la relation de puissance liant le débit solide au débit liquide, une approche à différentes échelles temporelles, basée sur les relations de régression obtenues, est adoptée en tenant compte des données hydropluviométriques du bassin versant de l'Oued Mina.

Tableau (2.7): Classes des relations (C-Q)

Classe	Modèle	Critère (C/Q)	Référence
I	Courbe simple (single line) Ligne droite  Courbe, la pente croit quand Q augmente Courbe, la pente décroît quand Q augmente	$(C/Q)_m \approx (C/Q)_d$ Les pentes des deux sections montée et décrue sont égales. $(C/Q)_m > (C/Q)_d$ Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales. $(C/Q)_m < (C/Q)_d$ Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales.	Wood (1977) [70]
II	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop)	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour toutes les valeurs de Q.	Williams (1989) [80]
III	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop)	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$ pour toutes les valeurs de Q.	Axelson (1967) [81]
IV	Linéaire simple plus une boucle (single line plus a loop)	$(C/Q)_m \approx (C/Q)_d$ pour une partie des valeurs de Q. $(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour une autre partie des valeurs de Q.	-
V	Forme en huit (figure eight)	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour une partie des valeurs de Q. $(C/Q)_m < (C/Q)_d$ pour l'autre partie des valeurs de Q.	Amborg <i>et al.</i> (1967) [82]

## CHAPITRE 3

### PRECIPITATIONS ET ECOULEMENTS

#### 3.1 Etude des précipitations

##### 3.1.1 Introduction et présentation des données pluviométriques

L'implication des phénomènes de précipitation et d'écoulement dans le processus de l'érosion hydrique, nous incite à étudier de plus près ces deux variables. La sélection des postes pluviométriques analysés repose sur des critères de qualité des données et de longueur des séries pluviométriques. La période d'étude retenue est la même que celle concernée par l'analyse du transport solide en suspension (voir Chap.4). Elle s'étale sur 19 ans de 1982/1983 à 2000/2001.

Tableau (3.1) : Précipitations annuelles des stations pluviométriques du bassin versant de l'Oued Mina (mm)

Année	Station												Moy
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
82/83	252	148	279	198	489	105	188	224	229	112	400	236	238
83/84	238	277	298	207	185	67	155	251	181	176	463	219	226
84/85	218	267	319	218	249	139	120	185	198	275	363	304	238
85/86	290	333	450	331	243	157	236	181	170	328	359	460	295
86/87	281	456	418	327	273	195	326	257	226	303	314	419	316
87/88	286	257	318	246	207	186	206	227	214	290	372	246	255
88/89	347	336	350	302	369	182	301	203	205	418	357	175	295
89/90	199	227	243	272	276	143	232	193	168	245	259	224	223
90/91	237	215	248	205	317	82	279	256	249	261	602	341	274
91/92	306	321	351	303	348	156	242	232	190	332	383	286	288
92/93	301	314	237	232	219	195	156	179	169	199	261	159	218
93/94	175	232	269	237	230	119	200	157	199	250	339	186	216
94/95	259	310	353	201	342	202	309	268	185	253	371	301	280
95/96	573	584	661	501	518	398	401	462	402	676	535	409	510
96/97	301	219	335	247	308	168	198	186	140	338	249	236	244
97/98	403	345	451	383	385	175	293	292	238	395	317	290	331
98/99	251	244	286	200	209	141	164	203	201	313	202	162	215
99/00	232	223	250	195	199	58	201	206	195	265	307	279	218
00/01	317	308	360	248	272	143	223	273	256	325	304	285	276
							Moy	271					

Afin d'obtenir des séries pluviométriques homogènes, le comblement de lacunes s'est avéré indispensable. Ainsi l'homogénéisation des pluies mensuelles a été faite par la méthode des rapports. Cette méthode utilise le rapport entre la somme des précipitations pendant une période homogène de la station à ajuster et la somme des précipitations pour la période correspondante à la station de comparaison. Les précipitations annuelles des stations pluviométriques représentées dans la figure (2.2) sont montrées dans le tableau (3.1).

La méthode de régression linéaire peut être aussi utilisée pour le comblement des lacunes d'observation à l'échelle annuelle par rapport à une station de référence proche de la station à corriger. Le facteur qui lie cette régression est le coefficient de corrélation.

### 3.1.2 Analyse en composantes principales (A.C.P)

L'Analyse en Composante Principale est une technique d'analyse des données particulièrement bien adaptée à l'étude des régimes pluviométriques. Elle permet de visualiser l'information contenue dans un tableau de données quantitatives et de concentrer l'information dans un nombre réduit de nouvelles variables (revenir à un espace de dimension réduite en déformant le moins possible la réalité). Il s'agit donc d'obtenir le résumé le plus pertinent possible des données initiales.

C'est la matrice des variance - covariance (ou celle des corrélations) qui va permettre de réaliser ce résumé pertinent, parce qu'on analyse essentiellement la dispersion des données considérées. De cette matrice, on va extraire, par un procédé mathématique adéquat, les facteurs (composantes principales) que l'on recherche. Ils vont permettre de réaliser et interpréter les graphiques désirés dans cet espace de petite dimension (le nombre de facteurs retenus), en déformant le moins possible la configuration globale des individus selon l'ensemble des variables initiales (ainsi remplacées par les facteurs).

Cette méthode, nécessitant cependant des calculs un peu plus long, est appliquée sur des données des précipitations annuelles dont nous avons à notre disposition, en formant grâce au logiciel «Hydrolab» une matrice initiale rectangulaire avec en ligne les valeurs des précipitations annuelles de douze (12) stations et en colonne les dix-neuf (19) années d'observations. Les étapes de l'analyse en composantes principales sont :

- Création de la matrice des données brutes;
- Calcul des paramètres statistiques;
- Transformation des données brute en données centrées réduites;
- Détermination de la matrice de corrélation des données centrées réduites;
- Détermination des valeurs propres, des pourcentages des variances expliquées;

- Détermination des vecteurs propres;
- Détermination des composantes principales (facteurs) CP;
- Détermination de la matrice de corrélation (facteurs – variables);
- Etude des liaisons entre les axes et les variables.

Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux (3.2), (3.3), (3.4), (3.5) et (3.6). Tout logiciel fournit la moyenne, l'écart-type, le coefficient de variation, le minimum et le maximum de chaque variable. Il s'agit donc, pour l'instant, d'études univariées (tableau 3.2). Notons au passage l'homogénéité presque des douze variables considérées : pratiquement même ordre de grandeur pour les moyennes, les écarts-types, les coefficients de variation, les minima et les maxima. Le tableau (3.3) est la matrice des corrélations. Elle donne les coefficients de corrélation linéaire des variables prises deux à deux. C'est une succession d'analyses bivariées, constituant un premier pas vers l'analyse multivariée.

Tableau (3.2) : Statistiques élémentaires des observations actives

Station	Moyenne (mm)	Ecart-type (mm)	CV	Max (mm)	Min (mm)
1	278.68	87.19	0.30	573	175
2	295.58	96.96	0.33	584	148
3	340.84	101.46	0.30	661	237
4	265.95	78.31	0.29	501	195
5	296.74	94.05	0.32	518	185
6	158.47	72.08	0.45	398	58
7	233.16	70.24	0.30	401	120
8	233.42	66.80	0.29	462	157
9	211.32	54.92	0.26	402	140
10	302.84	115.56	0.38	676	112
11	355.63	97.04	0.27	602	202
12	274.58	85.96	0.31	460	159

Remarquons que toutes les corrélations linéaires sont positives. Ce qui signifie que toutes les variables varient, en moyenne, dans le même sens, certaines étant fortes ( $0.70 \leq r < 0.90$ ), d'autres moyennes ( $0.40 \leq r < 0.70$ ), d'autres enfin plutôt faibles ( $0.20 \leq r < 0.4$ ).

Le tableau (3.4) contient les résultats des valeurs propres et des variances expliquées. Chaque ligne de ce tableau correspond à une variable virtuelle (voilà les facteurs ou composantes principales) dont la colonne (valeur propre) fournit la variance. En fait, chaque valeur propre représente la variance du facteur correspondant. La colonne (% variance expliquée) correspond au pourcentage de variance de chaque ligne par rapport au total. La colonne (% variance cumulée) représente le cumul de ces pourcentages. Le nuage de points

en dimension 12 est toujours le même et sa dispersion ne change pas. Il s'agit d'un simple changement de base dans un espace vectoriel. C'est la répartition de cette dispersion, selon les nouvelles variables que sont les facteurs ou composantes principales, qui se trouve modifiée. Les valeurs des composantes principales (facteurs) obtenues par projection des observations sont montrées dans le tableau (3.5). Les trois (03) premiers facteurs restituent à eux seuls la quasi-totalité de la dispersion du nuage (85.21%), ce qui permet de négliger les neufs (09) autres.

Tableau (3.3) : Matrice des coefficients de corrélation

Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.00											
2	0.79	1.00										
3	0.86	0.87	1.00									
4	0.85	0.85	0.90	1.00								
5	0.64	0.36	0.56	0.55	1.00							
6	0.83	0.83	0.81	0.79	0.54	1.00						
7	0.67	0.72	0.71	0.73	0.63	0.66	1.00					
8	0.81	0.73	0.78	0.68	0.63	0.68	0.72	1.00				
9	0.74	0.65	0.70	0.64	0.62	0.63	0.63	0.89	1.00			
10	0.86	0.78	0.85	0.85	0.47	0.80	0.69	0.69	0.69	1.00		
11	0.27	0.24	0.30	0.22	0.41	0.13	0.40	0.55	0.57	0.21	1.00	
12	0.36	0.56	0.66	0.53	0.26	0.34	0.55	0.48	0.42	0.40	0.43	1.00

Tableau (3.4) : Valeurs propres et variances expliquées

CP	Valeur propre	% variance expliquée	% variance cumulée
<b>1</b>	<b>8.001</b>	<b>66.678</b>	<b>66.678</b>
<b>2</b>	<b>1.317</b>	<b>10.973</b>	<b>77.651</b>
<b>3</b>	<b>0.907</b>	<b>7.560</b>	<b>85.211</b>
4	0.531	4.423	89.635
5	0.319	2.655	92.290
6	0.263	2.192	94.481
7	0.230	1.918	96.400
8	0.154	1.287	97.686
9	0.130	1.082	98.768
10	0.060	0.501	99.269
11	0.057	0.477	99.746
12	0.032	0.263	100.00

Le premier facteur (CP1) représente plus de 66.68% de la variance totale et à partir de la quatrième, la part expliquée devient très faible (moins de 5%). Les graphiques de la



figure (3.1) montrent que ce dernier s'ajuste bien à la loi Normale et à la loi de Gumbel. L'analyse globale des graphiques de projection des observations (Figure 3.2) met en évidence le caractère aléatoire (alternance) des périodes excédentaire et déficitaire. Elle met aussi en exergue l'année exceptionnelle (1995/1996) qui a connue une pluviométrie moyenne annuelle (510mm) beaucoup plus importante que la pluviométrie moyenne interannuelle (271mm) dans la période 1982/1983-2000/2001.

Tableau (3.5) : Projection des observations (calcul des facteurs 'CP')

Année-CP	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP 9	CP10	CP11	CP12
82/83	<b>-0.53</b>	<b>1.69</b>	<b>-1.79</b>	1.73	1.73	-1.31	0.34	-0.13	-0.87	-0.05	0.31	0.88
83/84	<b>-0.71</b>	<b>1.00</b>	<b>0.31</b>	-1.80	0.13	0.40	0.91	-2.58	0.34	-1.18	-1.19	-0.03
84/85	<b>-0.56</b>	<b>0.12</b>	<b>0.63</b>	-0.70	1.78	0.12	0.72	1.50	-0.38	-1.35	0.42	-1.44
85/86	<b>0.24</b>	<b>-0.34</b>	<b>2.59</b>	0.99	1.38	1.02	0.32	0.17	0.11	0.40	0.09	1.36
86/87	<b>0.69</b>	<b>-0.40</b>	<b>1.95</b>	0.64	-1.21	-1.68	0.11	-0.43	-1.27	-0.46	0.76	-0.06
87/88	<b>-0.21</b>	<b>-0.12</b>	<b>0.01</b>	-1.15	-0.13	0.18	0.54	0.83	0.50	1.74	-1.06	1.64
88/89	<b>0.35</b>	<b>-0.65</b>	<b>-1.19</b>	0.68	-1.43	2.01	-0.04	-0.15	-0.12	-1.20	1.66	0.76
89/90	<b>-0.64</b>	<b>-0.56</b>	<b>-0.19</b>	0.93	-0.91	-0.17	-0.37	0.34	-1.14	1.18	-2.02	-1.87
90/91	<b>-0.11</b>	<b>2.86</b>	<b>0.27</b>	-0.24	-1.05	1.00	-0.49	0.73	0.32	1.23	0.72	-0.45
91/92	<b>0.18</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>	0.65	0.16	0.94	0.42	-0.72	-0.09	-0.37	0.25	-1.80
92/93	<b>-0.68</b>	<b>-1.26</b>	<b>-0.69</b>	-0.83	-0.18	-0.52	2.15	-0.59	-0.56	1.79	1.71	-0.20
93/94	<b>-0.80</b>	<b>-0.09</b>	<b>-0.20</b>	-0.30	-0.74	0.78	-0.14	1.08	-1.97	-1.08	-1.10	1.32
94/95	<b>0.11</b>	<b>0.43</b>	<b>0.08</b>	1.05	-1.60	-1.53	1.20	0.38	2.14	-1.03	-0.68	0.35
95/96	<b>3.53</b>	<b>0.15</b>	<b>-0.72</b>	-1.04	0.38	-0.07	0.32	0.76	-0.14	0.02	-0.44	-0.47
96/97	<b>-0.41</b>	<b>-1.12</b>	<b>-0.39</b>	1.05	0.80	0.81	0.02	0.39	2.06	0.23	-0.42	-0.45
97/98	<b>0.92</b>	<b>-0.57</b>	<b>-0.42</b>	0.75	0.56	0.29	-1.33	-1.98	-0.25	0.63	-0.74	0.47
98/99	<b>-0.72</b>	<b>-1.24</b>	<b>-0.74</b>	-1.04	0.07	-0.71	-1.18	0.77	0.45	-0.88	-0.08	0.13
99/00	<b>-0.78</b>	<b>0.21</b>	<b>0.55</b>	-0.50	-0.18	-0.23	-1.98	-0.21	0.59	0.46	1.04	-0.59
00/01	<b>0.14</b>	<b>-0.12</b>	<b>-0.08</b>	-0.88	0.44	-1.32	-1.52	-0.14	0.29	-0.08	0.76	0.45

Le résultat fondamental concernant les variables est le tableau (3.6) des corrélations variables actives - facteurs. Il s'agit des coefficients de corrélation linéaire entre les variables et les facteurs. Ce sont des corrélations qui vont permettre de donner un sens aux facteurs (de les interpréter).

Les trois premières colonnes de ce tableau permettent, tout d'abord, de réaliser les graphiques de projection des variables (figures 3.3). Mais, ces trois colonnes permettent également de donner une signification aux facteurs, donc aux axes des graphiques. On notera que les neuf dernières colonnes ne seront pas utilisées puisqu'on ne retient que trois dimensions pour interpréter l'analyse. Les graphiques en dimensions 2 présentés ci-dessous

résumant parfaitement la configuration réelle des données qui se trouvent en dimension 12. L'objectif (résumé pertinent des données en petite dimension) est donc atteint.

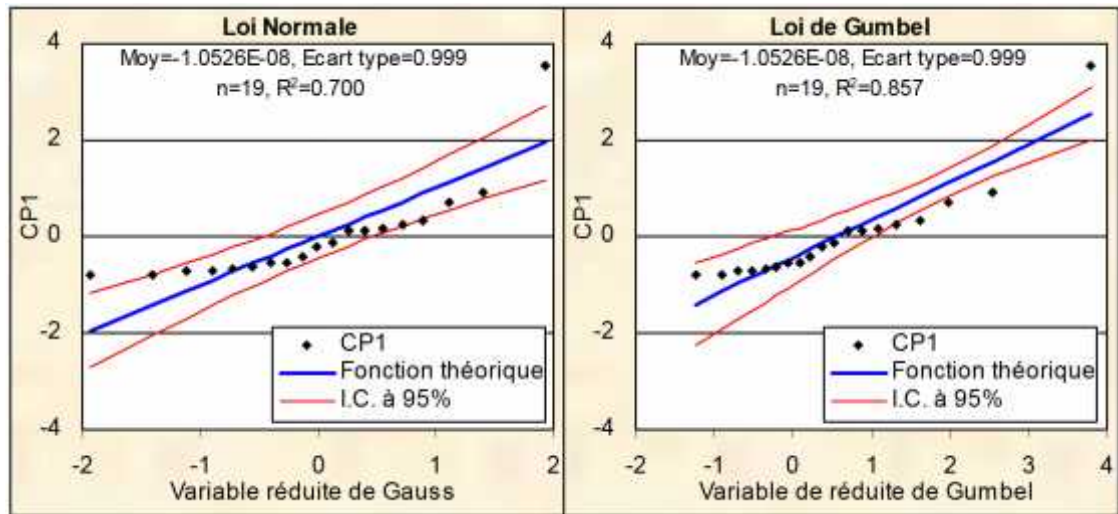


Figure (3.1): Ajustement du vecteur CP1 à la loi Normale et à la loi de Gumbel

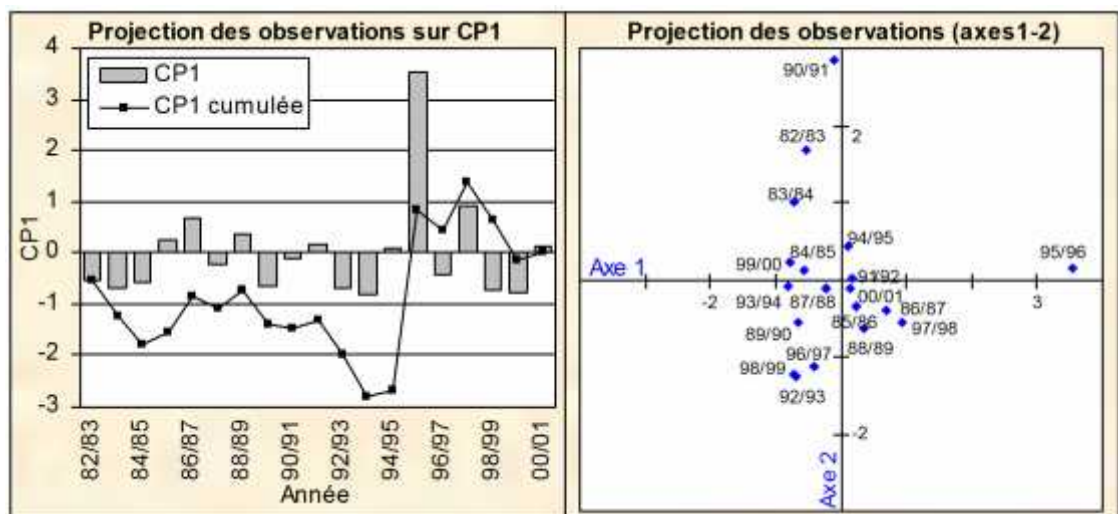


Figure (3.2): Projection des observations (données fictives)

Ainsi, on voit que le premier facteur est corrélé positivement, et assez fortement, avec chacune des douze (12) variables initiales (tableau 3.6). Le premier facteur (CP1), avec un apport maximum d'information, représente le comportement de la pluie moyenne sur l'ensemble du bassin : plus la pluie moyenne annuelle est plus grande par rapport à la pluie moyenne interannuelle 271mm (période 1982/1983-2001/2002), plus l'année en question a un score élevé sur l'axe1; réciproquement, plus la pluie moyenne annuelle est plus faible par rapport à la pluie moyenne interannuelle, plus le score annuel est négatif.

Tableau (3.6) : Matrice de corrélation (variables actives – facteurs)

Station-CP	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	CP11	CP12
1	<b>0.92</b>	<b>-0.17</b>	<b>-0.21</b>	-0.07	0.13	0.07	0.01	-0.14	0.12	0.11	0.12	0.04
2	<b>0.88</b>	<b>-0.24</b>	<b>0.23</b>	-0.15	-0.14	-0.08	0.15	-0.11	-0.10	-0.10	0.11	-0.05
3	<b>0.94</b>	<b>-0.13</b>	<b>0.17</b>	0.03	0.18	0.00	0.01	-0.04	0.05	-0.13	-0.07	0.10
4	<b>0.90</b>	<b>-0.24</b>	<b>0.09</b>	0.09	0.07	0.18	-0.03	-0.10	-0.21	0.08	-0.09	-0.03
5	<b>0.68</b>	<b>0.27</b>	<b>-0.46</b>	0.47	0.14	-0.04	0.04	0.01	-0.03	-0.06	0.04	-0.04
6	<b>0.85</b>	<b>-0.33</b>	<b>-0.12</b>	-0.02	-0.04	-0.09	0.29	0.21	0.03	0.06	-0.05	0.01
7	<b>0.84</b>	<b>0.10</b>	<b>0.06</b>	0.28	-0.44	-0.01	-0.10	-0.02	0.03	0.02	0.00	0.05
8	<b>0.89</b>	<b>0.24</b>	<b>-0.13</b>	-0.20	-0.02	-0.22	-0.06	-0.13	0.12	0.01	-0.11	-0.07
9	<b>0.84</b>	<b>0.29</b>	<b>-0.20</b>	-0.27	0.05	-0.15	-0.18	0.13	-0.17	0.01	0.04	0.05
10	<b>0.88</b>	<b>-0.27</b>	<b>-0.03</b>	-0.11	-0.02	0.26	-0.19	0.16	0.10	-0.05	0.01	-0.06
11	<b>0.44</b>	<b>0.82</b>	<b>0.04</b>	-0.17	-0.04	0.25	0.19	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.01
12	<b>0.60</b>	<b>0.27</b>	<b>0.70</b>	0.19	0.16	-0.11	-0.04	0.08	0.04	0.06	0.04	-0.03

Par contre, le second facteur avec une part de variance de 10.97%, souligne une opposition Est-Ouest. Toute fois, cette opposition ne revêt pas un caractère déterminant dans le régime pluviométrique du bassin versant de l'Oued Mina. En effet, les stations corrélées négativement et assez faiblement se situent dans la partie Est du bassin (stations 1, 2, 3, 4, 6 et 10), par contre, les stations corrélées positivement (stations 7, 8, 9, 11 et 12) se retrouvent dans la région Ouest à l'exception de la station de Ain Kermis (station 5) qui est située à l'extrême Sud-Est du bassin. Ce facteur (CP2), bien qu'il souligne une opposition Est-Ouest, ne peut être considéré comme représentatif dans la mesure où les coefficients de corrélations ne sont pas représentatifs. L'analyse de la corrélation montre une régionalisation des précipitations au niveau du bassin. Au vu de la figure (3.3), les stations pluviométriques s'organisent en 03 trois groupes :

- Le premier groupe composé des stations 1, 2, 3, 4, 6, et 10 se situe dans la partie Est du bassin versant de l'Oued Mina avec une pluviométrie moyenne de 274mm. La position de la station 6 (158mm) peut être expliquée par sa position géographique et sa couverture par une chaîne montagneuse d'une altitude allant de 1050 à 1339m
- Le deuxième groupe composé des stations 5, 7, 8, 9 et 12 se situe dans la partie Ouest du bassin versant avec une pluviométrie moyenne de 250mm. La position de la station 5 (297mm) peut être expliquée par son altitude qui est de l'ordre de 1162m.
- Le troisième groupe est constitué d'une seule station 11 présentant une pluviométrie moyenne de 356mm et se trouve dans la partie Nord-Ouest en dehors du bassin versant de l'Oued Mina. La position de cette station peut être expliquée par sa position géographique, à savoir la proximité de la mer par rapport à elle, son altitude qui est de l'ordre de 825m et l'absence de couverture par des chaînes montagneuses.

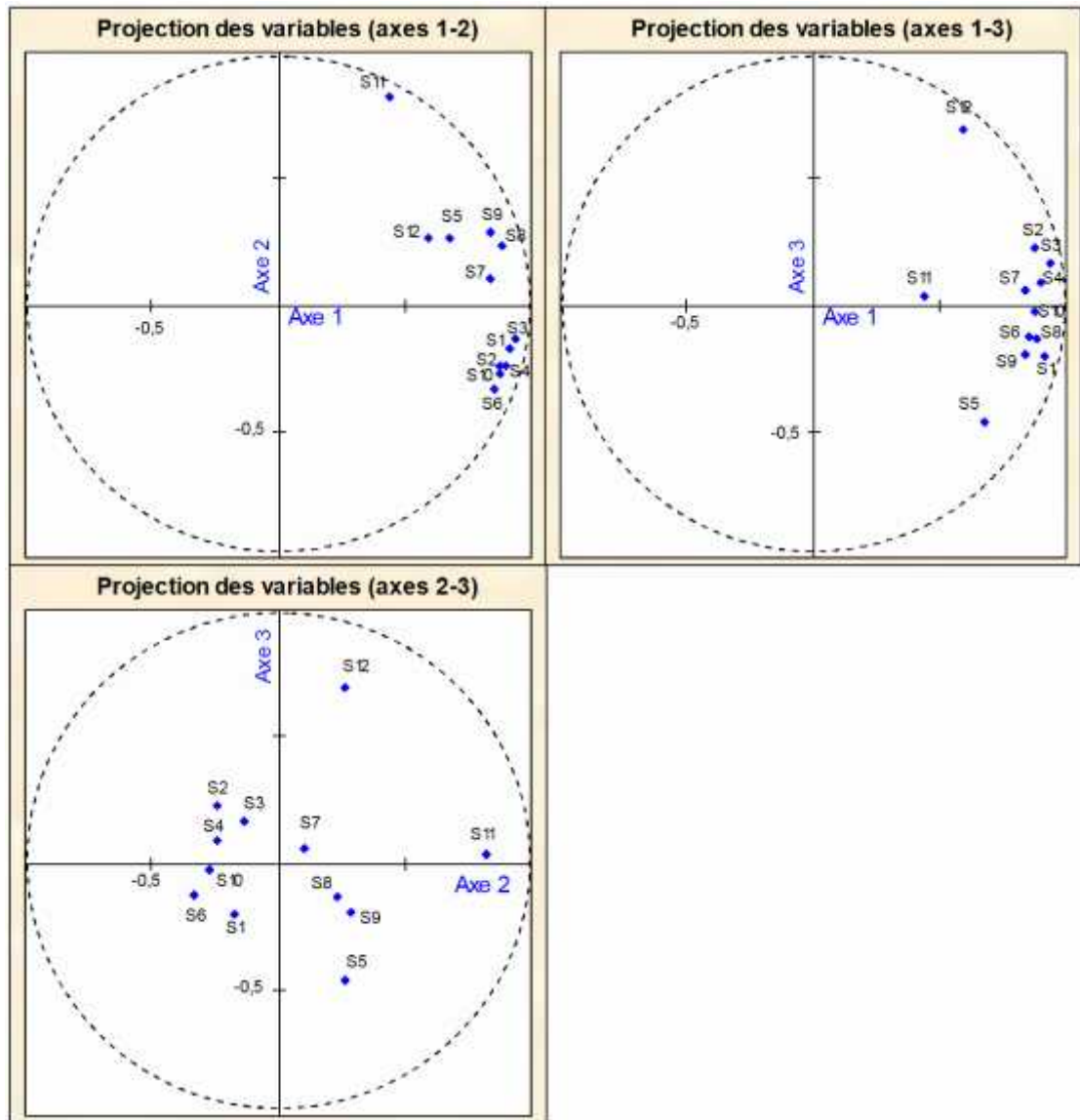


Figure (3.3): Projection des variables sur les axes 1-2, 1-3 et 2-3

L'analyse des projections des variables sur l'axe1 (CP1) permet de déterminer les stations pluviométriques représentatives du bassin versant de l'Oued Mina, et même des sous bassins. En effet, la station pluviométrique de Frenda (013002) est considérée comme station représentative du bassin versant au droit du barrage de SMBA et du sous bassin contrôlé par la station hydrométrique de Oued El-Abtal (meilleur coefficient de corrélation  $r=0.94$ ). D'autre part, la station pluviométrique de Sidi AEK Djilali (013401) est considérée comme station représentative du sous bassin contrôlé par la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali ( $r=0.89$ ).

### 3.1.3 Critique des données pluviométriques

Afin de pouvoir utiliser la série de données pour l'analyse de la tendance pluviométrique et ultérieurement dans l'analyse de la variabilité de l'écoulement et du transport solide en suspension, il est nécessaire de connaître en premier lieu s'il y a eu des dysfonctionnements des pluviomètres, et en second lieu, de s'assurer que les séries mesurées aux postes sont homogènes d'un point de vue statistique.

La critique des données pluviométriques par la méthode du cumul des résidus permet de détecter les erreurs accidentelles et systématiques et de voir l'hétérogénéité graphiquement. Cette méthode beaucoup plus puissante que la méthode de double masse, nécessitant cependant des calculs un peu plus longs, est appliquée aux valeurs annuelles de l'ensemble des stations pluviométriques, grâce toujours au logiciel «HydroLab». Les résultats du test de détection des anomalies pour les stations de Sidi M'hamed Ben Aouda, Sidi AEK Djilali, Kef Mehboula et Ain El-Hadid sont montrés dans la figure (3.4). La station pluviométrique de Frenda (station représentative du bassin versant de l'Oued Mina au droit du barrage de SMBA) est la variable de référence réputée sans erreurs.

D'après les résultats obtenus, aucune valeur ne paraît anormale au seuil standard de 95%. Les courbes du cumul des résidus sont circonscrites par l'ellipse ayant 95% de chance de contenir ces cumuls.

La méthode de double cumul (double masse) a été également employée afin de vérifier l'homogénéité des séries des postes pluviométriques. Seuls les graphiques du double cumul des stations de SMBA et Sidi AEK Djilali par rapport la station de Frenda sont montrés dans la figure (3.5). Les résultats pour les autres stations sont résumés dans le tableau (3.7). Elles montrent que les pluies cumulées de toutes les stations sont bien liés ( $R^2 > 0.990$ ) à la pluie cumulée à la station de Frenda.

Tableau (3.7) : Résumé des résultats de la méthode de double cumul ( $y=ax+b$ )

N° Station	a	b	R <sup>2</sup>	N° Station	a	b	R <sup>2</sup>
1	0.8534	-110.13	0.9985	7	0.7143	-129.73	0.9965
2	0.8912	-85.53	0.9988	8	0.6807	-24.818	0.9982
3	1.0000	0.0000	1.0000	9	0.6124	8.0497	0.998
4	0.8009	-65.644	0.9988	10	0.9288	-317.47	0.9985
5	0.8688	64.149	0.9962	11	1.037	257.2	0.992
6	0.4986	-149.79	0.9967	12	0.7925	156.78	0.9952

L'ensemble des résultats obtenus et des analyses faites confirment l'homogénéité des données des postes pluviométriques.

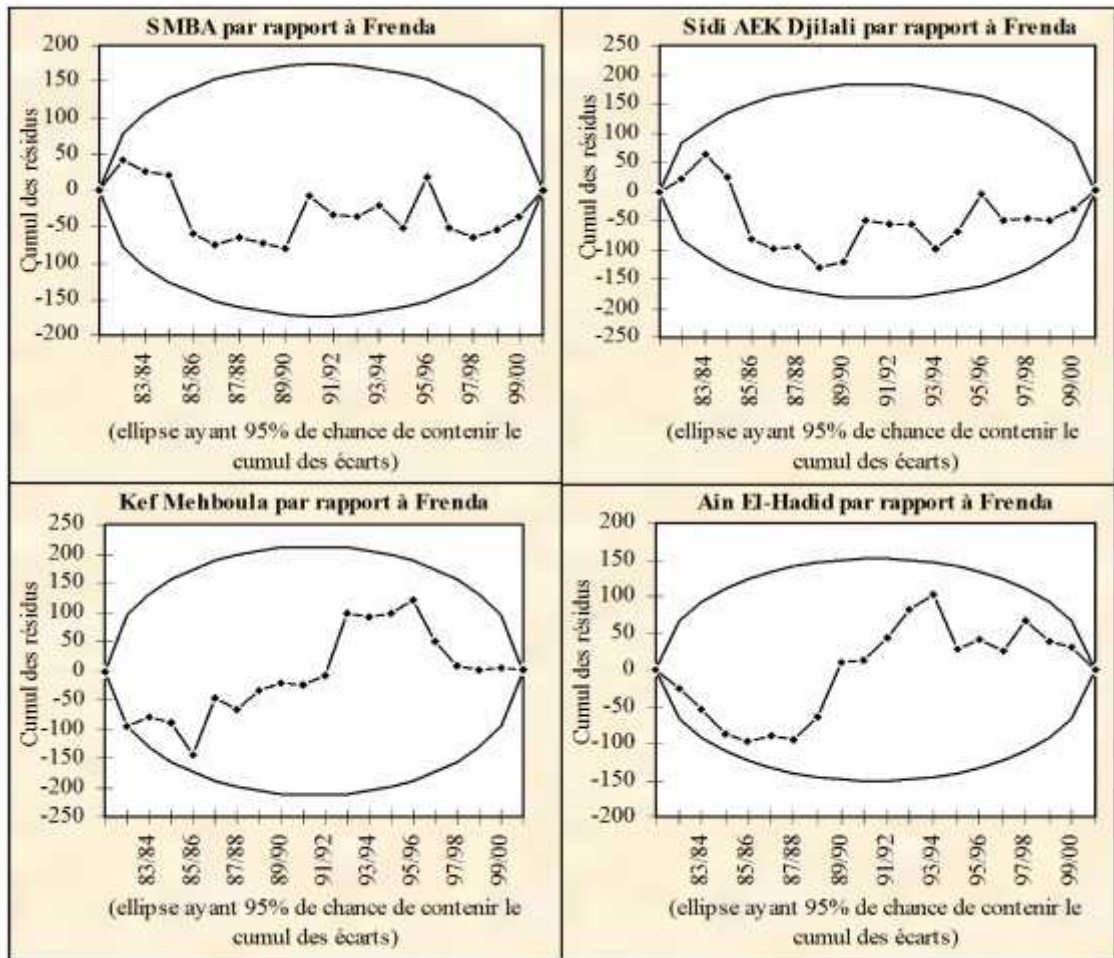


Figure (3.4) : Détection d'anomalies par analyse des résidus de la régression

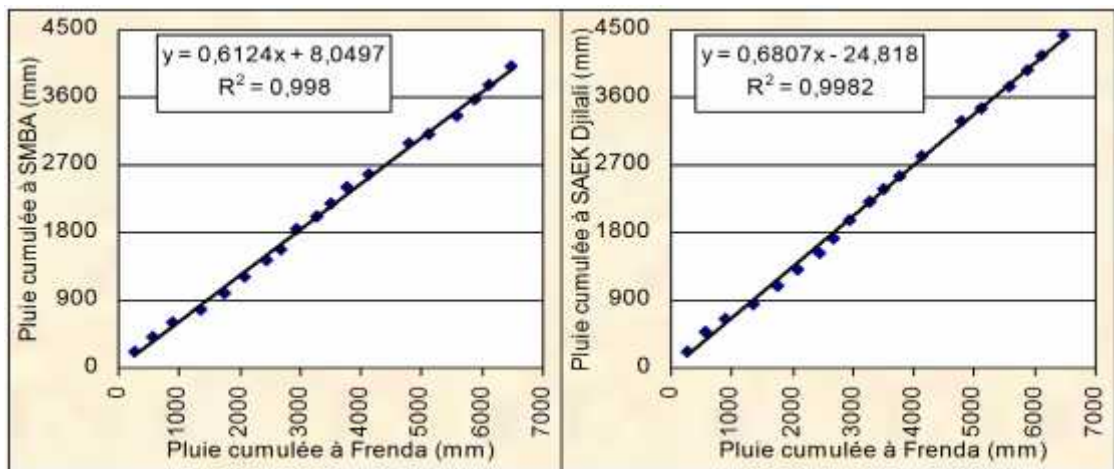


Figure (3.5) : Graphiques de double cumul entre les stations de SMBA, Sidi AEK Djilali et la station de Frenda

### 3.1.4 Variations et ajustement des précipitations à une loi de probabilité

L'analyse statistique des précipitations est réalisée à l'échelle annuelle, mensuelle et journalière. Elle est portée sur les douze stations que comporte le bassin versant de l'Oued Mina.

#### 3.1.4.1 A l'échelle annuelle

La pluviométrie annuelle a notablement changée au cours de la période d'étude (tableau 3.1). Cette dernière se traduit par des hauteurs de pluie qui vont du simple au double voir plus (cas par exemple de l'année 95/96 la plus pluvieuse qui a enregistré environ 10% de la pluie annuelle cumulée sur toute la période d'observation). L'analyse des paramètres statistiques des douze distributions a permis de remarquer que les coefficients de variation des séries pluviométriques sont moyens.

L'irrégularité des précipitations se traduit non seulement par la variation des hauteurs de pluie, mais aussi par l'existence de périodes de sécheresse consécutives (82/83 à 84/85, 87/88, 92/93 à 93/94, 96/97, 98/99 à 99/00). Les conséquences de ces périodes de sécheresse se répercutent en particulier sur le milieu. Les sols desséchés sont facilement emportés par le ruissellement qui se forme dès les premières pluies.

L'analyse statistique des précipitations annuelles a permis d'ajuster les séries d'observations des stations pluviométriques du bassin versant de l'Oued Mina. Les résultats d'ajustement montrent que les précipitations annuelles de toutes les stations s'ajustent bien à la loi Log-Normale. La figure (3.6) montre l'ajustement des précipitations annuelles des stations de Frenda (station représentative du bassin versant de l'Oued Mina et du sous bassin contrôlé par la station hydrométrique de Oued El-Abtal), Sidi AEK Djilali (station représentative du sous bassin contrôlé par la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali) et deux autres stations (SMBA et Kef Mehboula) choisis de façon arbitraire à la loi Log-Normale. Le tableau (3.8) résume les équations de la droite de Galton pour l'ensemble des stations, permettant ainsi de calculer les précipitations pour différentes périodes de retour (tableau 3.9), bien qu'en pratique la prudence exige que l'on ne recherche pas un quantile dont la probabilité d'apparition corresponde à une période de retour supérieur au double ou triple de la longueur de l'échantillon. R étant le coefficient de corrélation linéaire entre les valeurs des précipitations (données) et les valeurs théoriques correspondantes.



Tableau (3.8) : Résumé des équations de la droite de Galton pour toutes les stations pluviométriques ( $\text{Log}X_{p\%}=a+bU_{p\%}$ )

N°	Station	Code	a	b	R
1	Djilali Ben Amar	013102	2.4435	0.1142	0.9425
2	Kef Mehboula	013001	2.4513	0.1307	0.9633
3	Frenda	013002	2.5175	0.1129	0.9519
4	Ain El-Hadid	013004	2.4099	0.1120	0.9552
5	Ain Kermis	013201	2.4536	0.1284	0.9838
6	Rosfa	013202	2.1619	0.1886	0.9335
7	Takhmaret	013304	2.3492	0.1308	0.9924
8	Sidi AEK Djilali	013401	2.3548	0.1052	0.9208
9	SMBA	013410	2.3139	0.0960	0.9103
10	Louhou Parat	112915	2.4541	0.1587	0.9497
11	Nesmoth	111418	2.5366	0.1138	0.9812
12	Ain Belloul	111203	2.4190	0.1342	0.9855

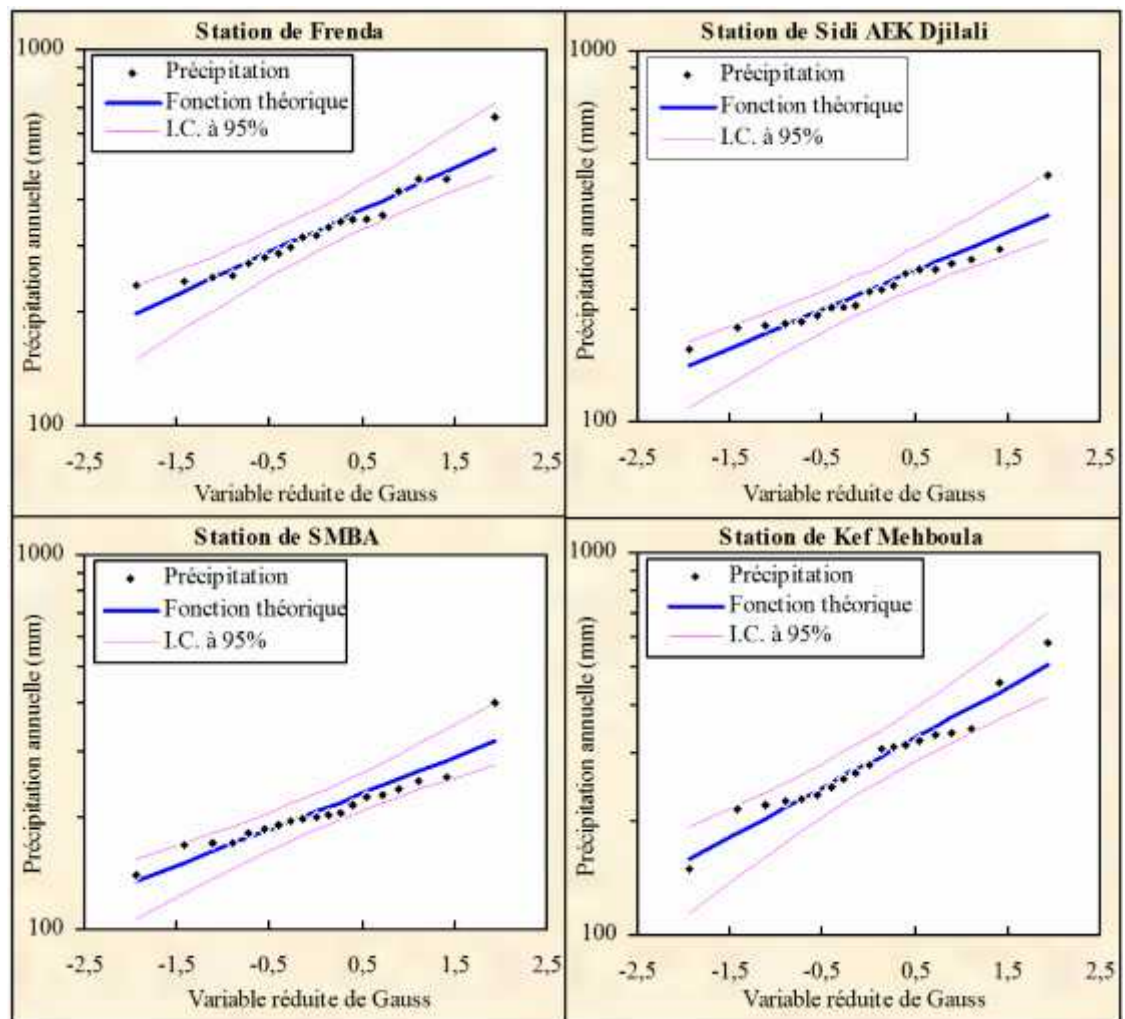


Figure (3.6) : Exemples d'ajustement des précipitations annuelles à la loi Log-Normale (stations : Frenda, Sidi AEK Djilali, SMBA et Kef Mehboula)



Tableau (3.9) : Précipitations annuelles (mm) pour différentes périodes de retour (quantiles)

N°	Station	Période de retour T (ans)						
		10	25	50	100	200	500	1000
1	Djilali Ben Amar	389	440	477	512	547	592	626
2	Kef Mehboula	416	479	525	569	614	672	717
3	Frenda	459	519	562	603	643	596	735
4	Ain El-Hadid	358	404	437	468	499	540	570
5	Ain Kermis	415	477	522	566	609	666	709
6	Rosfa	253	311	354	399	444	507	555
7	Takhmaret	329	379	415	450	485	532	567
8	Sidi AEK Djilali	309	346	372	398	423	455	479
9	SMBA	274	303	324	345	364	389	408
10	Louhou Parat	454	540	603	666	729	815	880
11	Nesmoth	481	544	589	633	676	732	773
12	Ain Belloul	390	451	495	539	582	639	682

### 3.1.4.2 A l'échelle mensuelle

La station représentative du bassin (station de Frenda) qui dispose une série pluviométrique répartie sur 19 années donne particulièrement pour les mois d'Eté des fortes variances et des valeurs moyennes faibles (Figure 3.7). Pour les mois des autres saisons (Automne, Hiver et Printemps), les précipitations sont nettement supérieures et présentent des moindres variances.

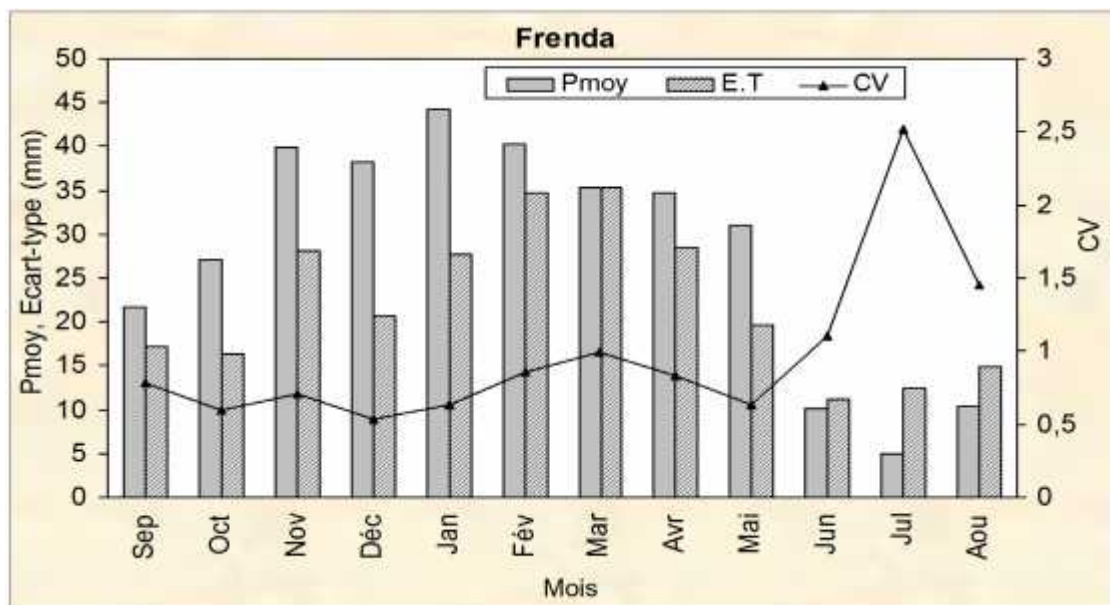


Figure (3.7) : Variations des précipitations mensuelles à la station de Frenda

Dans le but de mettre en exergue la variation des précipitations à l'échelle mensuelle, nous avons dès le départ, déterminé les paramètres statistiques des stations pluviométriques et l'ajustement des données mensuelles à une loi de probabilité. Il est à noter que les précipitations mensuelles s'ajustent beaucoup mieux à la loi de Gumbel et à la loi Normale. La figure (3.8) montre l'ajustement des précipitations mensuelles de la station de Frenda (Septembre et Avril) à la loi de Gumbel et à la loi Normale. Le tableau (3.10) donne les équations théoriques correspondantes de Gumbel et de Galton pour tous les mois permettant ainsi de calculer les quantiles (Tableau 3.11).

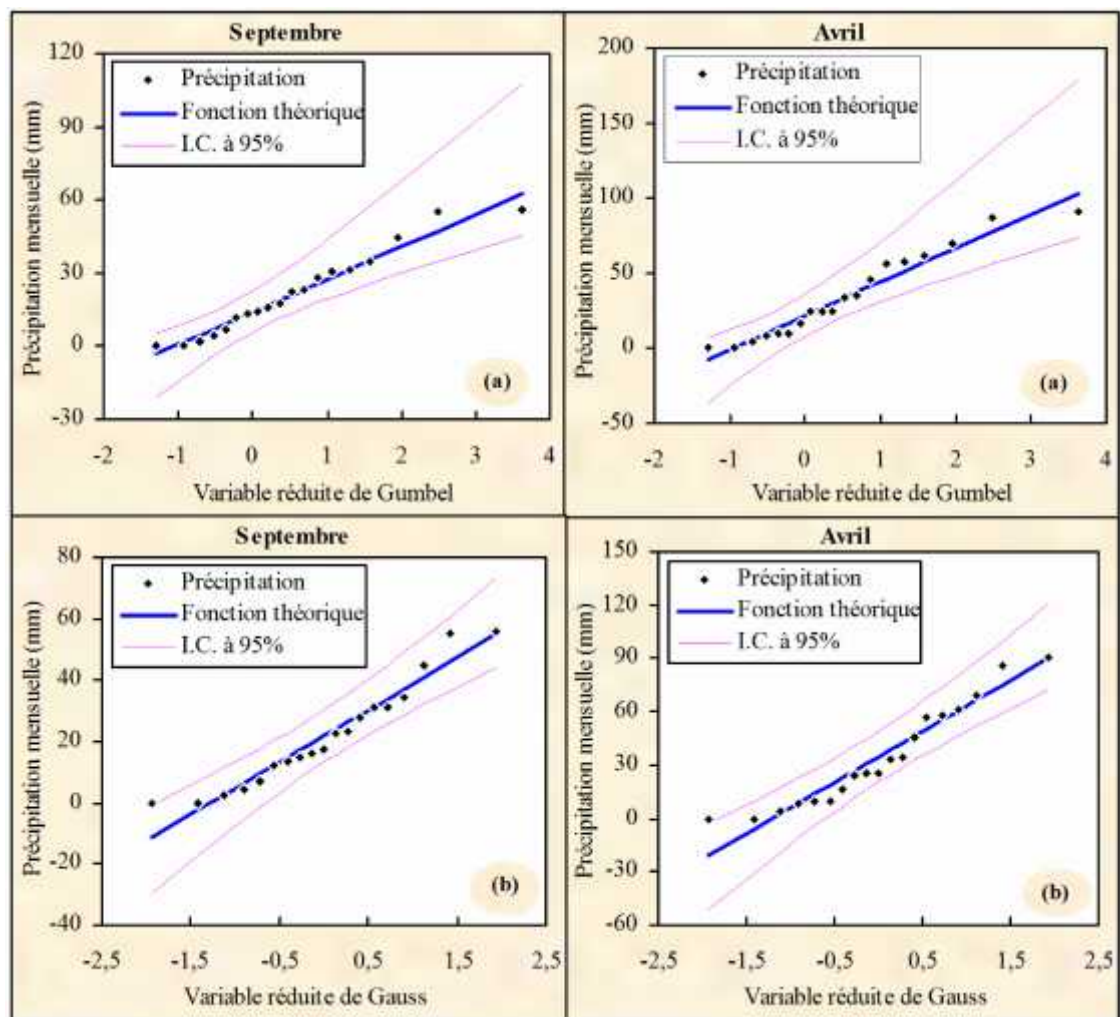


Figure (3.8) : Exemples d'ajustement des précipitations mensuelles (a) à la loi de Gumbel (b) à la loi Normale (stations de Frenda)

Tableau (3.10) : Résumé des équations des droites de Gumbel ( $X_{p\%}=m+kU_g$ ) et de Galton ( $X_{p\%}=a+bU_{p\%}$ ) pour la station de Frenda

N°	Mois	m	k	R	a	b	R
1	Septembre	14.044	13.351	0.9839	21.7474	17.1166	0.9706
2	Octobre	19.848	12.687	0.9381	27.1684	16.2649	0.9708
3	Novembre	27.307	21.916	0.9749	39.9526	28.0977	0.9207
4	Décembre	28.988	16.056	0.9843	38.2526	20.5849	0.9462
5	Janvier	31.677	21.576	0.9525	44.1263	27.6618	0.9839
6	Février	24.754	27.016	0.9831	40.3421	34.6355	0.9375
7	Mars	19.548	27.528	0.9493	35.4316	35.2919	0.9146
8	Avril	21.755	22.317	0.9795	34.6316	28.6113	0.9652
9	Mai	22.228	15.294	0.9581	31.0526	19.6077	0.9688
10	Juin	5.148	8.755	0.9761	10.2	11.2243	0.9208
11	Juillet	-0.642	9.669	0.8007	4.9368	12.3961	0.6757
12	Août	3.594	11.622	0.8684	10.3	14.8996	0.7762

Tableau (3.11) : Précipitations mensuelles (mm) pour différentes périodes de retour selon la loi de Gumbel (Station de Frenda)

N°	Mois	Période de retour T (ans)						
		10	25	50	100	200	500	1000
1	Septembre	44	57	66	75	85	97	106
2	Octobre	48	60	69	78	87	99	107
3	Novembre	77	97	113	128	143	163	179
4	Décembre	65	80	92	103	114	129	140
5	Janvier	80	101	116	131	146	166	181
6	Février	86	111	130	149	168	193	211
7	Mars	81	108	127	146	165	191	210
8	Avril	72	93	109	124	140	160	176
9	Mai	57	71	82	93	103	117	128
10	Juin	25	33	39	45	52	60	66
11	Juillet	21	30	37	44	51	59	66
12	Août	30	41	49	57	65	76	84

### 3.1.4.3 A l'échelle journalière

L'étude des précipitations journalières s'avère nécessaire pour pouvoir mettre en exergue l'irrégularité des précipitations. Le tableau (3.12) donne les pluies maximales des stations pluviométriques du bassin versant de l'Oued Mina. Le coefficient de variation maximal ne dépasse guère 60% mais il est à remarquer une faible dispersion pour la station de SMBA (CV=0.19). La corrélation entre les postes n'est bien expliquée. Les différences d'altitudes peuvent influencer les distributions spatiales de pluie. Pour la station

représentative du bassin (station de Frenda), la pluie maximale journalière apparaît en Hiver et en Printemps. Les plus fortes pluies peuvent apparaître durant toute l'année, avec une fréquence relativement élevée aux mois de Novembre, Décembre, Janvier, Mars et Avril.

Les résultats d'ajustement montrent que les précipitations maximales journalières s'ajustent bien et beaucoup mieux à la loi Log-Normale. La figure (3.9) montre l'ajustement des précipitations maximales journalières des stations de Frenda, Sidi AEK Djilali, SMBA et Kef Mehboula à la loi Log-Normale. Le tableau (3.13) donne les équations (droites de Galton) théoriques correspondantes pour toutes les stations, permettant ainsi de calculer les précipitations maximales pour différentes périodes de retour (tableau 3.14).

Tableau (3.12) : Précipitations maximales journalières des stations pluviométriques du bassin versant de l'Oued Mina (mm)

Année	Station											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
82/83	30	16	38	25	72	17	30	26	28	14	48	24
83/84	19	35	29	24	16	8	17	17	20	13	35	21
84/85	30	27	33	25	19	13	12	15	24	23	48	37
85/86	72	32	55	32	20	12	44	14	21	84	32	36
86/87	40	28	37	25	17	14	56	18	26	18	15	49
87/88	25	20	17	25	17	9	46	39	31	21	36	47
88/89	39	31	28	31	42	25	42	34	34	48	55	35
89/90	37	26	35	67	27	14	37	25	19	17	35	41
90/91	24	23	22	17	35	12	29	31	32	16	41	39
91/92	28	22	28	22	18	32	22	22	27	17	23	42
92/93	48	45	35	30	23	32	25	23	29	34	31	20
93/94	53	26	18	24	16	11	27	21	26	28	33	25
94/95	73	45	35	29	48	36	37	30	29	34	32	42
95/96	35	75	32	32	38	37	39	26	30	57	22	40
96/97	46	39	34	28	62	24	26	20	24	31	16	32
97/98	58	53	41	45	30	17	26	17	15	28	21	26
98/99	47	41	28	30	20	32	27	28	27	45	29	22
99/00	52	37	26	18	15	19	32	29	28	31	31	20
00/01	31	35	26	40	23	18	40	30	33	30	35	25
Max	73	75	55	67	72	37	56	39	34	84	55	49
Min	19	16	17	17	15	8	12	14	15	13	15	20
Moy	41	35	31	30	29	20	32	24	26	31	33	33
E.T.	15	14	9	11	16	10	11	7	5	18	11	10
CV	0.37	0.40	0.28	0.37	0.56	0.47	0.33	0.28	0.19	0.57	0.33	0.29

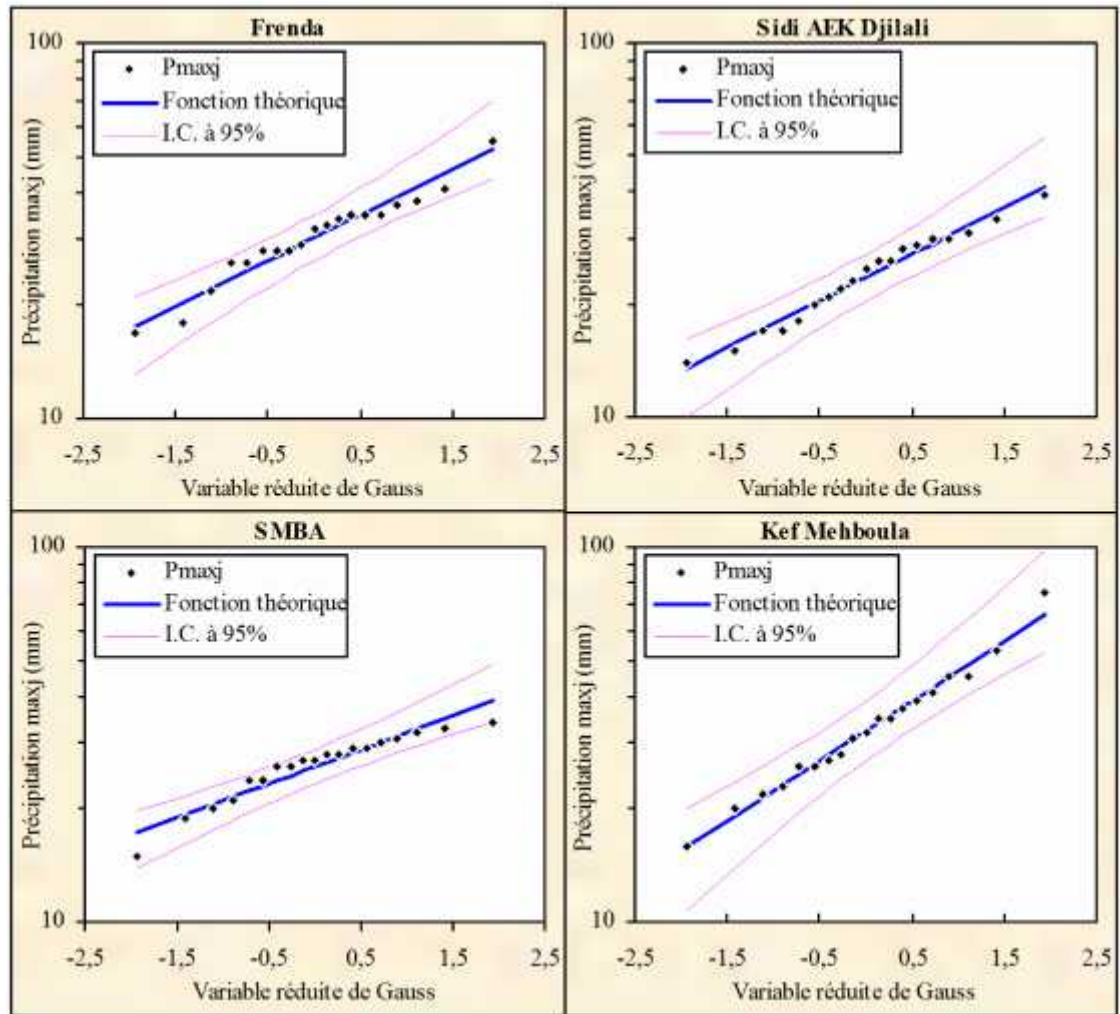


Figure (3.9): Exemples d'ajustement des précipitations max. journalières à la loi Log-Normale (Stations : Frenda, SAEK Djilali, SMBA et Kef Mehboula)

Tableau (3.13) : Résumé des équations de la droite de Galton pour toutes les stations pluviométriques ( $\text{Log}X_{p\%} = a + bU_{p\%}$ )

N°	Station	Code	a	b	R
1	Djilali Ben Amar	013102	1.5892	0.1610	0.9867
2	Kef Mehboula	013001	1.5095	0.1597	0.9857
3	Frenda	013002	1.4816	0.1211	0.9742
4	Ain El-Hadid	013004	1.4541	0.1361	0.9363
5	Ain Kermis	013201	1.4153	0.2095	0.9787
6	Rosfa	013202	1.2566	0.2081	0.9537
7	Takhmaret	013304	1.4839	0.1595	0.9806
8	Sidi AEK Djilali	013401	1.3722	0.1246	0.9875
9	SMBA	013410	1.4144	0.0909	0.9530
10	Louhou Parat	112915	1.4366	0.2175	0.9858
11	Nesmoth	111418	1.4887	0.1514	0.9748
12	Ain Belloul	111203	1.4972	0.1323	0.9553

Tableau (3.14) : Précipitations maximales journalières (mm) pour différentes périodes de retour (calcul des quantiles)

N°	Station	Période de retour T (ans)						
		10	25	50	100	200	500	1000
1	Djilali Ben Amar	62	74	83	92	101	113	122
2	Kef Mehboula	52	62	69	76	83	93	101
3	Frenda	43	49	54	58	62	68	72
4	Ain El-Hadid	43	49	54	59	64	70	75
5	Ain Kermis	48	61	70	80	90	104	116
6	Rosfa	33	42	48	55	62	72	79
7	Takhmaret	49	58	65	72	78	88	95
8	Sidi AEK Djilali	34	39	42	46	49	54	57
9	SMBA	34	37	40	42	45	47	50
10	Louhou Parat	52	66	76	88	99	116	128
11	Nesmoth	48	57	63	69	76	84	90
12	Ain Belloul	46	54	59	64	69	76	81

### 3.1.5 Courbes IDF «Intensité- Durée- Fréquence»

L'utilisation de la distribution Log-Normale des précipitations maximales journalières permet de déterminer non seulement les fréquences des pluies extrêmes (ou les pluies maximales pour différentes périodes de retour), mais aussi les intensités moyennes afférentes à des intervalles de temps donnés. Les courbes IDF caractérisent la pluviométrie et représentent les relations entre les intensités, les durées et les fréquences des pluies intenses. Elles donnent ainsi la probabilité de diverses intensités de pluie pour diverses durées (3', 9', 15', 30', 1h, 3h, 6h, 12h, 18h, 24h,...etc.).

Pour une fréquence donnée, la pluie maximale de durée (t) et l'intensité moyenne maximale sont exprimées par les relations :

$$P(t)_{p\%} = P_{\max j_{p\%}} \left( \frac{t}{24} \right)^b \dots\dots\dots(3.1)$$

Et

$$i(t)_{p\%} = \frac{P(t)_{p\%}}{t} \dots\dots\dots(3.2)$$

Avec: t : durée de la pluie ;

b : exposant climatique dépendant de la position géographique (b≈0.30 pour le bassin versant de l'Oued Mina (ANRH, 1998)) ;

$P_{\max j_{p\%}}$  : pluie maximale journalière probable d'une fréquence (ou probabilité) donnée.



L'intérêt du calcul des intensités moyennes maximales  $i(t)_{p\%}$  provient du besoin de connaître leurs influences sur le transport solide. Les pluies de courtes durées ainsi que les intensités de la station de Frenda sont données dans le tableau (3.15). La figure (3.10) illustre les courbes IDF des stations pluviométriques de Frenda, Sidi AEK Djilali, SMBA et Kef Mehboula. Ces résultats sont synthétisés par une famille de courbes donnant pour un temps de récurrence donné (période de retour), l'intensité moyenne maximale en fonction de l'intervalle de temps (t).

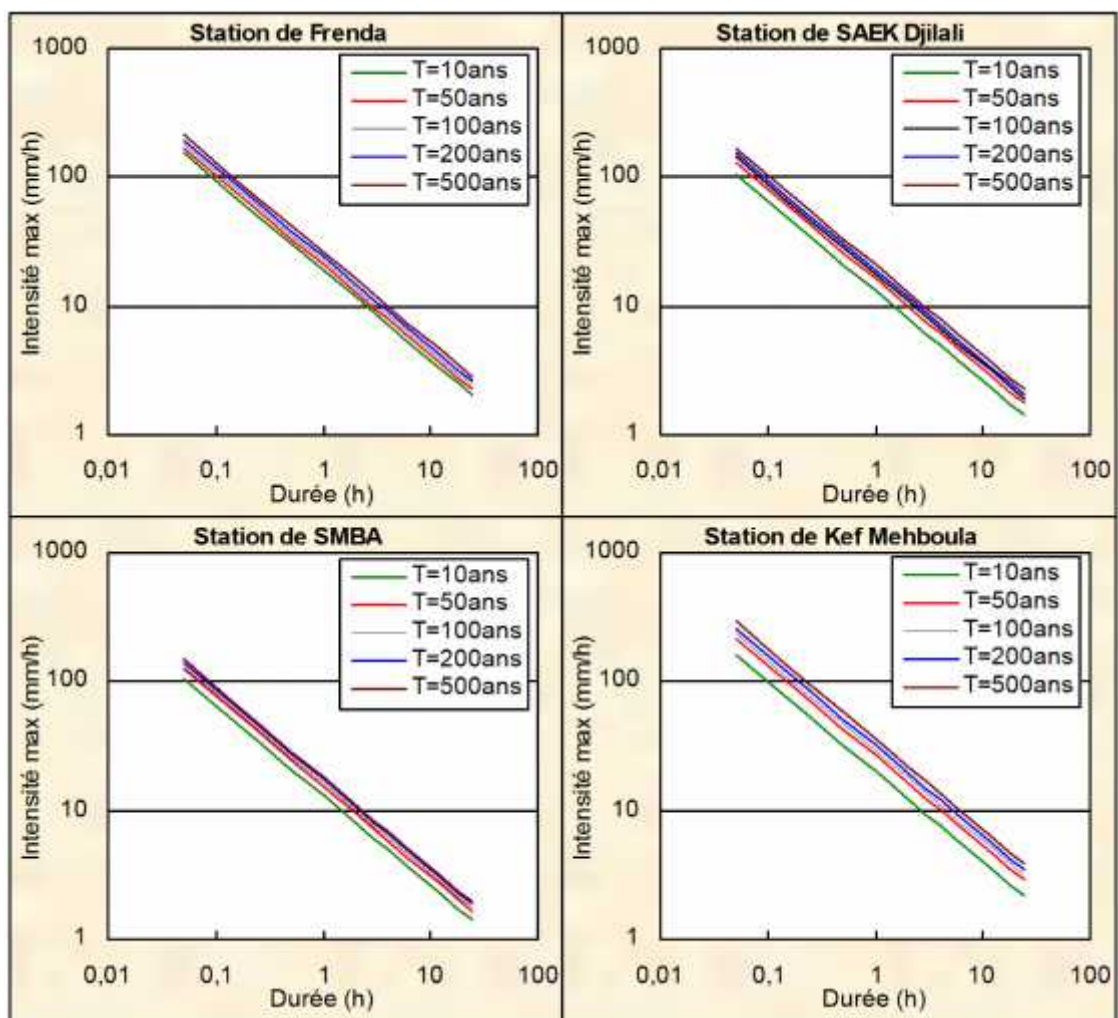


Figure (3.10): Exemples de Courbes Intensité - Durée - Fréquence (Stations : Frenda, SAEK Djilali, SMBA et Kef Mehboula), période 82/83 à 00/01

Tableau (3.15) : Intensités moyennes maximales pour différentes périodes de retour (T) et différentes durées (t) à la station de Frenda

T(ans)	Durée (t)											
	3'	9'	15'	30'	1h	2h	3h	4h	6h	12h	18h	24h
10	135	63	44	27	17	10	8	6	5	3	2	2
25	154	71	50	31	19	12	9	7	5	3	2	2
50	169	79	55	34	21	13	10	8	6	4	3	2
100	182	84	59	36	22	14	10	8	6	4	3	2
200	195	90	63	39	24	15	11	9	7	4	3	3
500	213	99	69	43	26	16	12	10	7	5	3	3
1000	226	105	73	45	28	17	13	11	8	5	4	3

### 3.2 Etude des écoulements

#### 3.2.1 Introduction

Afin d'établir les caractéristiques de la dynamique fluvio-sédimentaire dans le bassin versant de l'Oued Mina situé en zone semi aride, il est important de connaître l'étendue des variations de l'écoulement dans le temps qui sont dues essentiellement au caractère aléatoire des précipitations.

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

#### 3.2.2 Variabilité de l'écoulement

L'analyse des écoulements est réalisée à l'échelle annuelle, mensuelle et journalière, elle est portée sur les deux stations hydrométriques du bassin versant de l'Oued Mina : Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali. Les tests d'homogénéité de Man-Whitny, d'indépendance de Wald-Wolfwitz et de singularité de Grubs-beck ont été appliqués aux séries des débits (moyen annuel et maximal annuel) présentées ci-dessous et ont donné des résultats satisfaisants.



### 3.2.2.1 A l'échelle annuelle

Les variations des débits liquides ainsi que quelques caractéristiques principales de l'écoulement sont déterminées à partir des valeurs journalières des débits établis par l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (ANRH). La période d'étude retenue est la même que celle concernée par l'analyse du transport solide en suspension (voir Chap.4). Elle s'étale sur 16 ans de 1985/1986 à 2000/2001 pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et 19 ans de 1982/1983 à 2000/2001 pour la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali.

L'écoulement annuel a notablement changé au cours de la période d'étude (tableaux 3.16 et 3.17). Cette variation se traduit par des débits moyens annuels qui vont du simple au double voir plus (cas par exemple de l'année 95/96 pour la station de Oued El-Abtal et l'année 86/87 pour la station de Sidi AEK Djilali qui ont enregistrées respectivement 17.3% et 18.5% des apports annuels cumulées sur toute la période d'étude). Les écoulements exceptionnels des années 95/96 et 86/87 sont traduits par des coefficients d'hydraulicité de 2.78 et 3.53 respectivement et peuvent être attribués aux fortes crues de ces années. La variabilité de l'écoulement est bien illustrée par des valeurs remarquables du coefficient de variation.

La période 1991-1993 est caractérisée pour la station de Oued El-Abtal par une réduction sensible de l'écoulement; la moyenne interannuelle passe à  $0.857\text{m}^3/\text{s}$ , ce qui correspond à une diminution de plus de 100%. Pour la station de Sidi AEK Djilali, cette période s'étale jusqu'à 2001 avec une moyenne interannuelle de  $0.039\text{m}^3/\text{s}$  correspondant à une diminution de plus de 200% (Figure 3.11). Le caractère des précipitations (averses faibles et/ou de longues durées) semble expliquer la cause de ces importantes baisses durant ces périodes.

Les valeurs du coefficient d'hydraulicité permettent de distinguer huit (8) années sèches et huit (8) années humide pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal, et 12 années sèches et sept (7) années humides pour la station de Sidi AEK Djilali.

En vue de déterminer la tendance de la variabilité de l'écoulement fluvial en réponse aux précipitations tombées sur le bassin versant de l'Oued Mina, la lame d'eau précipitée et la lame d'eau ruisselée ont été mis en confrontation . La figure (3.12) montre que les débits n'évoluent pas toujours de la même manière que les pluies aussi bien à la station hydrométrique de Oued El-Abtal qu'à la station de Sidi AEK Djilali.

Tableau (3.16) : Caractéristiques principales de l'écoulement de l'Oued Mina à la station hydrométrique de Oued El-Abtal (1985/1986 à 2000/2001)

Année	Qmin (m <sup>3</sup> /s)	Qmax (m <sup>3</sup> /s)	Qmoy (m <sup>3</sup> /s)	Ap.moy (Mm <sup>3</sup> )	Qspé (l/s.Km <sup>2</sup> )	Lr (mm)	Ce	Ki
85/86	0.00	302.320	2.768	86.679	0.671	21.01	0.071	1.276
86/87	0.00	417.020	2.661	82.843	0.645	20.08	0.064	1.226
87/88	0.00	158.400	1.552	49.155	0.376	11.91	0.047	0.715
88/89	0.00	331.480	1.315	41.871	0.319	10.15	0.034	0.606
89/90	0.00	755.800	2.210	70.481	0.536	17.08	0.077	1.019
90/91	0.00	181.800	1.431	45.479	0.347	11.02	0.040	0.660
91/92	0.00	149.720	0.786	24.941	0.191	6.04	0.021	0.362
92/93	0.00	324.200	0.927	28.559	0.225	6.92	0.032	0.427
93/94	0.00	446.140	1.390	43.137	0.337	10.45	0.048	0.641
94/95	0.00	698.200	3.603	113.939	0.873	27.61	0.099	1.661
95/96	0.00	599.020	6.028	189.217	1.461	45.86	0.090	2.778
96/97	0.00	896.467	2.469	78.161	0.598	18.94	0.078	1.138
97/98	0.00	335.500	1.383	43.389	0.335	10.52	0.032	0.638
98/99	0.00	227.320	2.804	88.477	0.679	21.44	0.100	1.292
99/00	0.00	433.400	1.257	40.060	0.305	9.71	0.045	0.579
00/01	0.00	484.360	2.134	67.106	0.517	16.26	0.059	1.276
Moy	0.00	421.322	2.170	68.343	0.526	16.564	0.058	1.000
E.T.	0.00	220.237	1.297	40.711	0.314	9.867	0.025	0.597
CV	/	0.523	0.597	0.596	0.597	0.596	0.428	0.597
Min	0.00	149.720	0.786	24.941	0.191	6.045	0.021	0.362
Max	0.00	896.467	6.028	189.217	1.461	45.860	0.100	2.778

Lm : Lame ruisselée, Ce : Coef. d'écoulement, Ki : Coef. d'hydraulicité

L'ajustement des débits moyens annuels à des lois de probabilités montre que ces derniers s'ajustent bien et beaucoup mieux à la loi Log-Normale. La figure (3.13) montre l'ajustement des débits moyens annuels des stations de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali à la loi Log-Normale. Le tableau (3.18) résume les équations de la droite de Galton pour les deux stations, permettant ainsi de calculer les quantiles pour différentes périodes de retour (tableau 3.19).

Tableau (3.17): Caractéristiques principales de l'écoulement de l'Oued Haddad à la station de Sidi AEK Djilali (1982/1983 à 2000/2001)

Année	Qmin (m <sup>3</sup> /s)	Qmax (m <sup>3</sup> /s)	Qmoy (m <sup>3</sup> /s)	Ap.moy (Mm <sup>3</sup> )	Qspé (l/s.Km <sup>2</sup> )	Lr (mm)	Ce	Ki
82/83	0.00	192.00	0.250	7.829	0.531	16.66	0.059	2.045
83/84	0.00	44.952	0.134	4.216	0.286	8.97	0.030	1.101
84/85	0.00	34.652	0.069	2.184	0.147	4.65	0.019	0.566
85/86	0.00	47.856	0.163	4.977	0.348	10.59	0.045	1.340
86/87	0.00	130.550	0.430	13.567	0.916	28.87	0.109	3.527
87/88	0.00	54.632	0.241	7.601	0.512	16.17	0.060	1.972
88/89	0.00	43.500	0.089	2.841	0.190	6.04	0.024	0.731
89/90	0.00	195.00	0.210	6.747	0.448	14.36	0.069	1.725
90/91	0.00	61.892	0.341	10.878	0.726	23.14	0.063	2.796
91/92	0.00	15.108	0.024	0.774	0.052	1.65	0.006	0.200
92/93	0.00	22.350	0.025	0.789	0.053	1.68	0.008	0.204
93/94	0.00	88.880	0.083	2.569	0.176	5.47	0.024	0.678
94/95	0.00	188.829	0.097	3.051	0.206	6.49	0.024	0.792
95/96	0.00	131.50	0.056	1.782	0.119	3.79	0.008	0.459
96/97	0.00	25.560	0.029	0.907	0.061	1.93	0.010	0.235
97/98	0.00	24.276	0.014	0.448	0.030	0.95	0.003	0.116
98/99	0.00	43.500	0.012	0.385	0.026	0.82	0.004	0.099
99/00	0.00	4.436	0.003	0.079	0.005	0.17	0.001	0.021
00/01	0.00	88.760	0.048	1.524	0.102	3.24	0.012	0.394
Moy	0.00	69.805	0.122	3.850	0.260	8.191	0.030	1.000
E.T.	0.00	46.815	0.121	3.834	0.258	8.157	0.029	0.994
CV	/	0.671	0.994	0.996	0.994	0.996	0.967	0.994
Min	0.00	4.436	0.003	0.079	0.005	0.169	0.001	0.021
Max	0.00	192.00	0.430	13.567	0.916	28.866	0.109	3.527

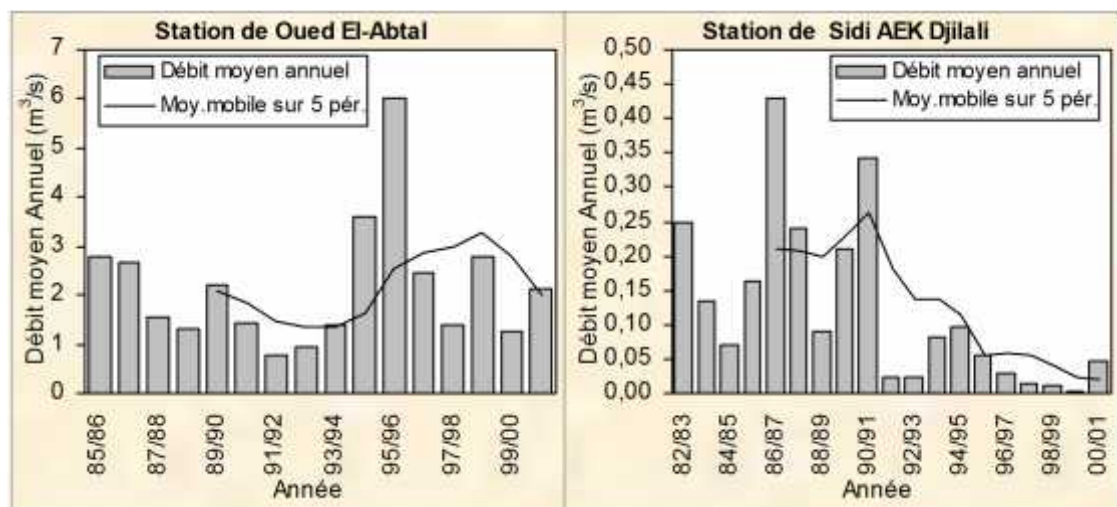


Figure (3.11): Variation du débit moyen annuel dans le bassin versant de l'Oued Mina au cours de la période d'étude

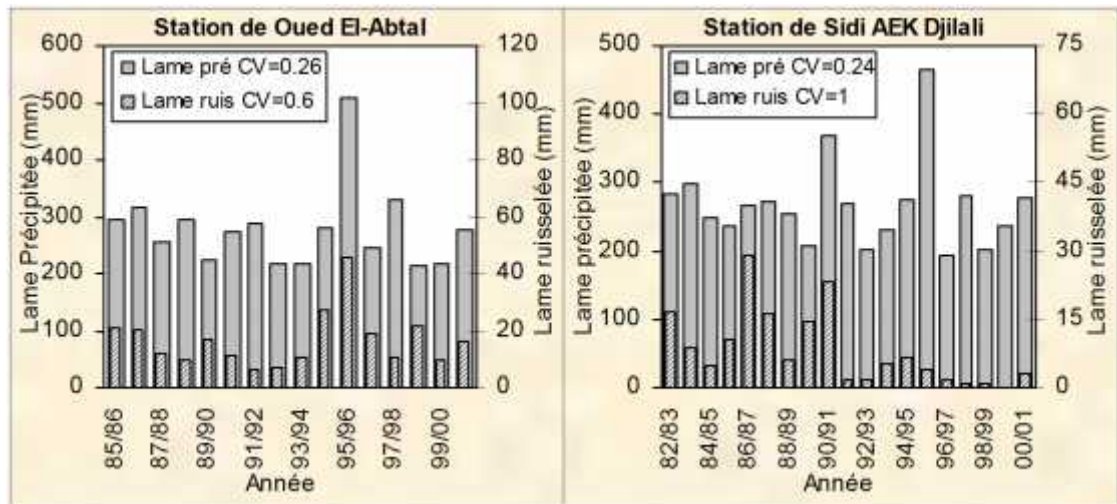


Figure (3.12): Lames d'eau précipitée et écoulee dans le bassin versant de l'Oued Mina

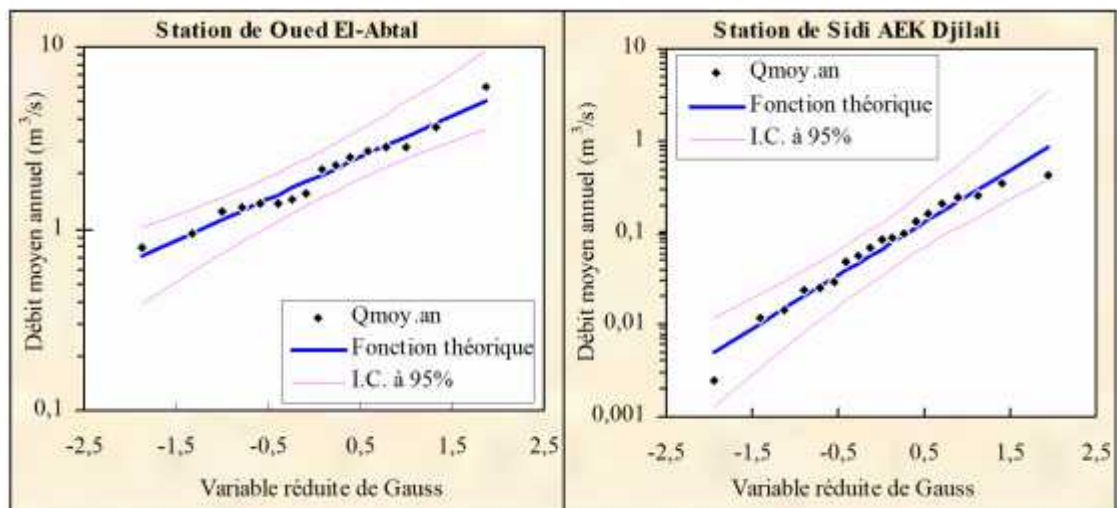


Figure (3.13) : Ajustement des débits moyens annuels à la loi Log-Normale

Tableau (3.18) : Résumé des équations de la droite de Galton pour les deux stations hydrométriques ( $\text{Log}X_{p\%} = a + bU_{p\%}$ )

N°	Station	Code	a	b	R
1	Oued El-Abtal	013402	0.2768	0.2291	0.9763
2	Sidi AEK Djilali	013401	-1.1789	0.5732	0.9306

Tableau (3.19) : Débits moyens annuels ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pour différentes périodes de retour (calcul des quantiles)

N°	Station	Période de retour T (ans)						
		10	25	50	100	200	500	1000
1	Oued El-Abtal	3.719	4.764	5.590	6.455	7.363	8.635	9.657
2	Sidi AEK Djilali	0.360	0.668	0.997	1.428	1.985	2.958	3.913

### 3.2.2.2 A l'échelle saisonnière et mensuelle

Les tableaux (3.20) et (3.21) ainsi que les graphiques de la figure (3.14) montrent la variation intra annuelle des débits. Les plus importants se produisent en saisons Automnale (33%), Printanière (31%) et Hivernale (27%) pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et en saisons Automnale (35%), Hivernale (28%) et Printanière (25%) pour la station de Sidi AEK Djilali. En réponse aux caractéristiques semi-arides du climat, le régime d'écoulement dans le bassin versant de l'Oued Mina montre une variation saisonnière des débits avec un maximum enregistré aux mois d'Octobre et de Mars pour la station de Oued El-Abtal et aux mois de Novembre et de Mars pour la station de Sidi AEK Djilali.

Tableau (3.20) : Variation intra-annuelle (mensuelle) des débits à la station hydrométrique de Oued El-Abtal (m<sup>3</sup>/s)

Année	Mois											
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
85/86	1.93	1.33	0.58	0.77	3.45	7.73	9.18	0.83	6.80	0.04	0.30	0.28
86/87	0.54	9.93	0.29	0.89	1.67	9.90	4.05	0.55	0.12	0.01	3.94	0.05
87/88	0.58	3.89	5.86	2.99	2.76	0.61	0.33	0.26	0.73	0.56	0.01	0.05
88/89	0.09	3.82	0.50	0.84	0.25	0.21	5.17	1.96	0.60	1.37	0.21	0.78
89/90	4.54	0.00	0.15	0.25	5.09	0.26	0.01	0.95	14.51	0.01	0.51	0.25
90/91	0.43	0.14	1.46	1.51	0.21	1.25	11.60	0.43	0.11	0.03	0.00	0.00
91/92	0.03	2.35	0.22	0.63	0.64	0.56	2.09	2.42	0.20	0.00	0.00	0.29
92/93	0.11	0.01	0.84	1.09	0.25	3.89	0.56	1.60	2.38	0.00	0.00	0.39
93/94	2.90	4.15	1.97	1.96	0.89	4.33	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27
94/95	17.63	16.80	3.60	0.01	0.01	0.13	4.95	0.07	0.00	0.02	0.00	0.02
95/96	0.67	3.98	0.20	2.31	7.08	19.48	11.27	4.58	9.23	8.18	5.36	0.01
96/97	3.81	0.43	0.19	0.79	2.66	0.08	0.00	9.63	0.07	0.00	0.00	11.96
97/98	4.72	1.98	6.10	0.88	0.31	0.40	0.06	0.28	1.72	0.14	0.00	0.00
98/99	0.00	0.00	0.01	0.89	7.98	6.28	18.41	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00
99/00	3.13	5.75	0.72	5.29	0.17	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
00/01	1.86	8.19	10.51	0.23	2.46	1.59	0.29	0.07	0.22	0.00	0.00	0.17
Moy	2.685	3.922	2.075	1.333	2.242	3.545	4.263	1.480	2.293	0.647	0.645	0.908
ET	4.316	4.539	2.991	1.314	2.533	5.256	5.578	2.492	4.222	2.039	1.591	2.954
CV	1.61	1.16	1.44	0.99	1.13	1.48	1.31	1.68	1.84	3.15	2.47	3.25

De même qu'aux séries pluviométriques, les stations hydrométriques du bassin (Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali) qui disposent des séries de débit d'écoulement répartis sur 16 et 19 années respectivement, donnent particulièrement pour les mois d'Été (à l'exception du mois de Juillet pour la station de Sidi AEK Djilali) des fortes variances et des valeurs moyennes faibles (Figure 3.14).

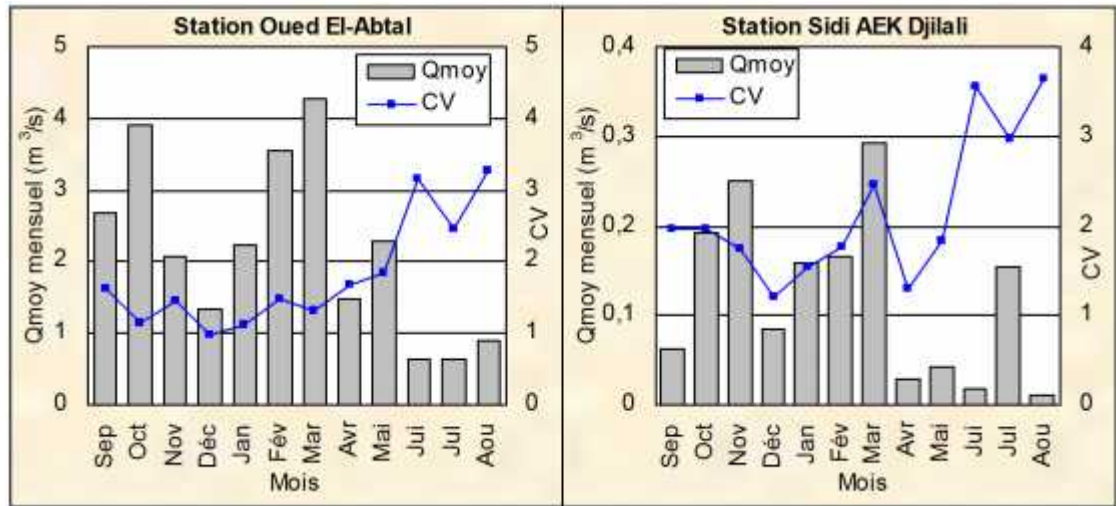


Figure (3.14) : Variation mensuelle des débits dans le bassin de l'Oued Mina

Tableau (3.21) : Variation intra-annuelle (mensuelle) des débits à la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali (m<sup>3</sup>/s)

Année	Mois											
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
82/83	0.04	0.52	1.63	0.25	0.22	0.17	0.09	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00
83/84	0.00	0.00	0.10	0.25	0.28	0.40	0.24	0.01	0.06	0.27	0.00	0.00
84/85	0.01	0.01	0.24	0.12	0.28	0.05	0.02	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00
85/86	0.01	0.00	0.04	0.04	0.22	1.06	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
86/87	0.05	1.62	0.55	0.35	0.29	0.82	0.06	0.00	0.00	0.00	1.41	0.01
87/88	0.24	0.21	1.07	0.10	0.95	0.10	0.03	0.02	0.16	0.00	0.00	0.00
88/89	0.06	0.06	0.05	0.20	0.07	0.02	0.54	0.07	0.00	0.00	0.00	0.01
89/90	0.12	0.00	0.01	0.00	0.56	0.00	0.00	0.05	0.29	0.00	1.50	0.00
90/91	0.10	0.00	0.52	0.08	0.02	0.09	3.18	0.06	0.00	0.03	0.00	0.00
91/92	0.00	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.13	0.07	0.01	0.01	0.00	0.00
92/93	0.00	0.00	0.04	0.06	0.00	0.01	0.01	0.03	0.14	0.00	0.00	0.00
93/94	0.01	0.32	0.37	0.06	0.01	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
94/95	0.51	0.34	0.01	0.00	0.01	0.04	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
95/96	0.00	0.09	0.00	0.07	0.07	0.08	0.29	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00
96/97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.18
97/98	0.02	0.08	0.04	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
98/99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
99/00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
00/01	0.01	0.40	0.07	0.00	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Moy	0.064	0.193	0.250	0.085	0.160	0.165	0.293	0.029	0.043	0.017	0.154	0.011
ET	0.125	0.381	0.435	0.103	0.245	0.292	0.722	0.038	0.079	0.061	0.459	0.041
CV	1.96	1.98	1.74	1.21	1.53	1.77	2.46	1.30	1.82	3.56	2.98	3.64

Pour les mois des autres saisons (Automne, Hiver et Printemps), les débits sont nettement supérieurs et présentent des moindres variances.

La distribution mensuelle des débits en pourcentage de débit annuel (tableau 3.22) ainsi que les graphiques de la figure (3.15) permettent de constater que la période de ruissellement ne correspond pas en général à la période pluvieuse. Les précipitations les plus importantes se produisent en saisons Hivernale (36%), Printanière (29%) et Automnale (26%) pour le sous bassin contrôlé par la station de Oued El-Abtal. Pour le sous bassin contrôlé par la station de Sidi AEK Djilali, 35% des précipitations se produisent en hiver, 30% au printemps et 29% en Automne.

Le déphasage par rapport aux périodes Hivernale et Printanière s'explique par le couvert végétal qui freine le ruissellement d'une part, et d'autre part, par le caractère violent et rapide des averses et crues caractérisant surtout la saison Automnale. Le déphasage de la période Hivernale par rapport à la période Printanière pour la station de Oued El-Abtal s'explique par l'état de saturation des sols. Au Printemps, les sols sont presque saturés et une grande partie de ce qui tombe se transforme en ruissellement. Le sous bassin contrôlé par la station de Sidi AEK Djilali est constitué essentiellement de marnes tertiaires sursaturées expliquant ainsi le non déphasage enregistré. Nous constatons, par ailleurs, une même allure d'évolution qu'à l'échelle annuelle des lames d'eau précipitée et écoulee dans le bassin versant de l'Oued Mina.

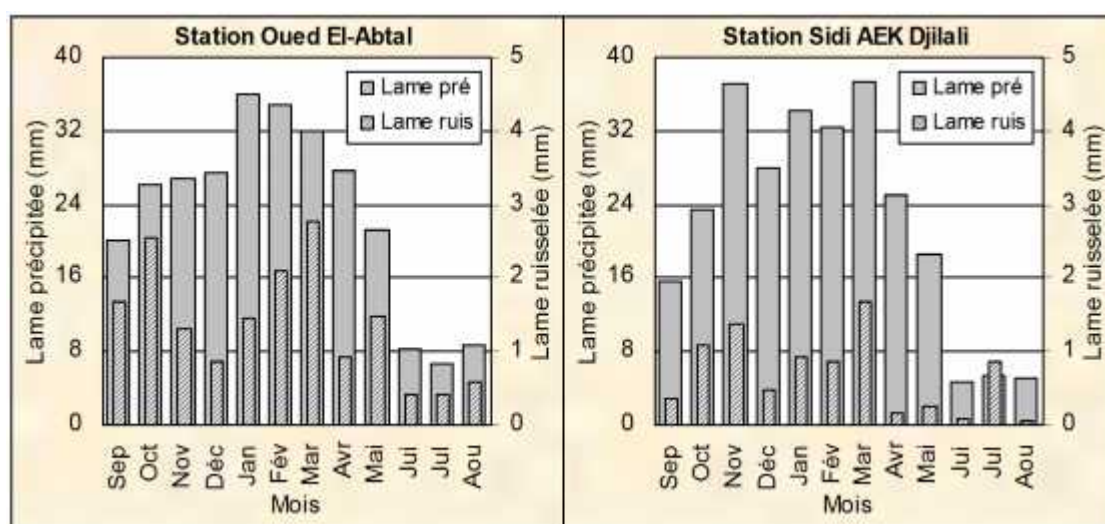


Figure (3.15) : Lames d'eau précipitée et écoulee dans le bassin versant de l'Oued Mina

Tableau (3.22) : Variation mensuelle des débits en % de débit annuel

Station	Mois												Moy
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
Oued El-Abtal	124	181	96	61	103	163	196	68	106	30	30	42	100
Sidi AEK Djilali	52	158	205	70	131	135	240	24	35	14	127	9	100



L'ajustement des débits moyens intra annuels des deux stations hydrométriques (Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali) à des lois de probabilités montre que ces derniers ne s'ajustent pratiquement à aucune loi, surtout pour les mois de la période sèche (Juin, Juillet et Août).

### 3.2.2.3 A l'échelle journalière

Pour mieux saisir les variations journalières, leurs durées ainsi que leurs fréquences, nous avons établi les courbes des débits classés relatives à deux années (Figure 3.16 et 3.17), l'une la plus humide (95/96 pour la station de Oued El-Abtal et 86/87 pour la station de Sidi AEK Djilali) et l'autre la plus sèche (91/92 pour la station de Oued El-Abtal et 99/00 pour la station de Sidi AEK Djilali). Ces graphiques montrent les valeurs des débits atteintes ou dépassées pendant un certain nombre de jours caractéristiques. Des valeurs des débits  $Q_{xjrs}$  et  $Q_{xmois}$  sont déterminées et mentionnées sur les figures :

$Q_{xjrs}$ : débit atteint ou dépassé pendant x jours ;

$Q_{xmois}$ : débit atteint ou dépassé pendant x mois ;

$Q_{moy}$  : débit moyen journalier de l'année considérée.

L'allure des courbes de débits classés laisse apparaître une concavité très prononcée, en particulier pour les années les plus sèches 91/92 et 99/00, qui traduit l'immodération du régime.

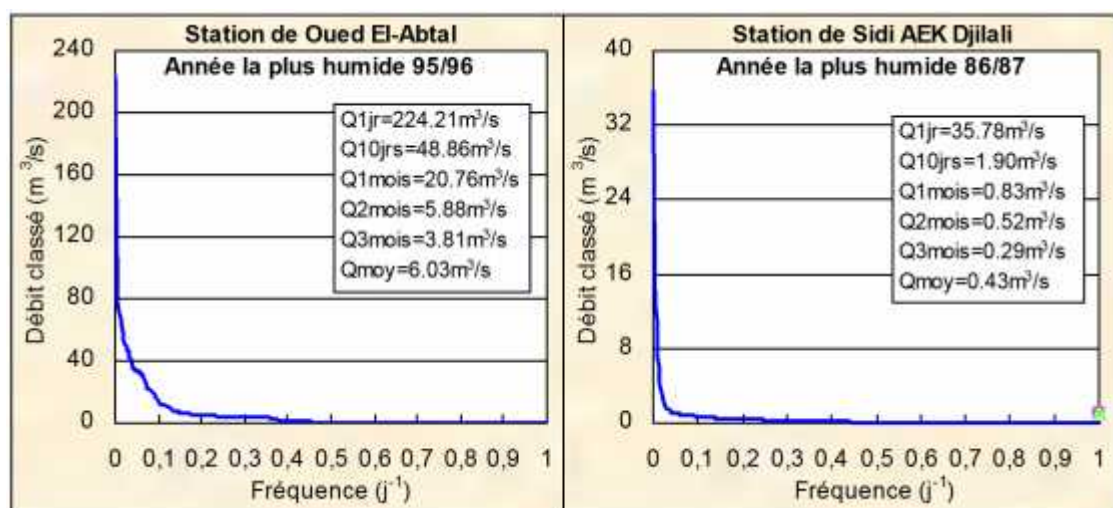


Figure (3.16): Courbe des débits classés (années les plus humides)



Le débit maximal est passé de  $224.21\text{m}^3/\text{s}$  (année 95/96) à  $51.81\text{m}^3/\text{s}$  (année 91/92) pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et de  $35.78\text{m}^3/\text{s}$  (année 86/87) à  $0.32\text{m}^3/\text{s}$  (année 99/00) pour la station de Sidi AEK Djilali. Ces valeurs illustrent bien la variation interannuelle de l'écoulement et concluent que le bassin versant de l'Oued Mina est caractérisé par un écoulement relativement faible

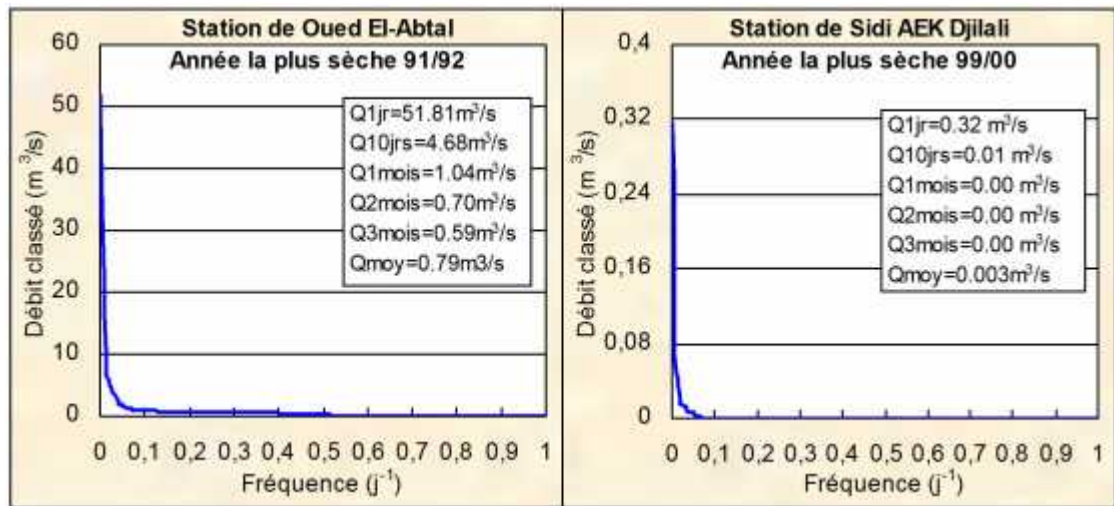


Figure (3.17): Courbe des débits classés (Années les plus sèches)

#### 3.2.2.4 A l'échelle des crues

L'estimation des crues rares et extrêmes compte tenu de ses enjeux socio-économiques a fait l'objet de nombreuses recherches. Les théories qui en résultent mettent tantôt l'accent sur des formules empiriques intégrant différentes caractéristiques du bassin versant, tantôt sur des méthodes statistiques s'intéressant directement à la variable débit, et tantôt sur des concepts physiques hydrométéorologiques plus ou moins complexes régissant les processus de transformation pluie - débit.

La partie de l'hydrogramme de crue la plus importante en ce qui concerne l'étude des dimensions à donner aux structures hydrauliques est la pointe de celui-ci ou le débit maximal fourni par une averse en raison des effets destructifs bien connus de cet événement hydrologique. Dans ce contexte, la méthode statistique a été choisie pour l'estimation des débits rares et extrêmes au niveau des deux stations hydrométriques du bassin versant de l'Oued Mina (Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali) en se basant sur le principe de la méthode des maxima annuels.

Le débit maximal annuel a notablement changé au cours de la période d'étude (tableaux 3.16 et 3.17 et figure 3.18). Cette variation se traduit par des débits maxima annuels

qui vont du simple au double voir plus (cas par exemple de l'année 96/97 pour la station de Oued El-Abtal et l'année 82/83 pour la station de Sidi AEK Djilali). La variabilité du débit maximal annuel est moins importante que celle du débit moyen annuel notamment pour la station de Sidi AEK Djilali. Cette variabilité est bien illustrée par des valeurs remarquables du coefficient de variation (0.523 pour la station de Oued El-Abtal et 0.671 pour la station de Sidi AEK Djilali) et qui sont inférieures à ceux caractérisant la variabilité du débit moyen annuel (0.597 pour la station de Oued El-Abtal et 0.994 pour la station de Sidi AEK Djilali).

L'ajustement des débits max annuels à des lois de probabilités montre que ces derniers s'ajustent bien et beaucoup mieux à la loi Log Normale. La figure (3.19) montre l'ajustement des débits max annuels des stations de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali à la loi Log Normale. Le tableau (3.23) résume les équations de la droite de Galton pour les deux stations, permettant ainsi de calculer les quantiles pour différentes périodes de retour (tableau 3.24).

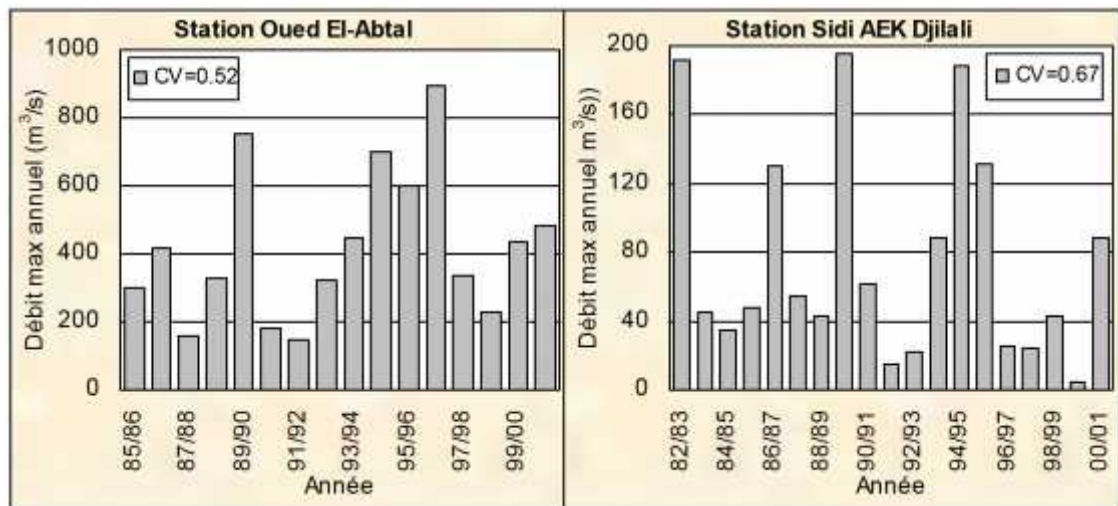


Figure (3.18): Variation annuelle du débit max dans le bassin versant de l'Oued Mina

Tableau (3.23) : Résumé des équations de la droite de Galton pour les deux stations hydrométriques ( $\text{Log}X_{p\%} = a + bU_{p\%}$ )

N°	Station	Code	a	b	R
1	Oued El-Abtal	013402	2.5670	0.2362	0.9852
2	Sidi AEK Djilali	013401	1.7173	0.4229	0.9083

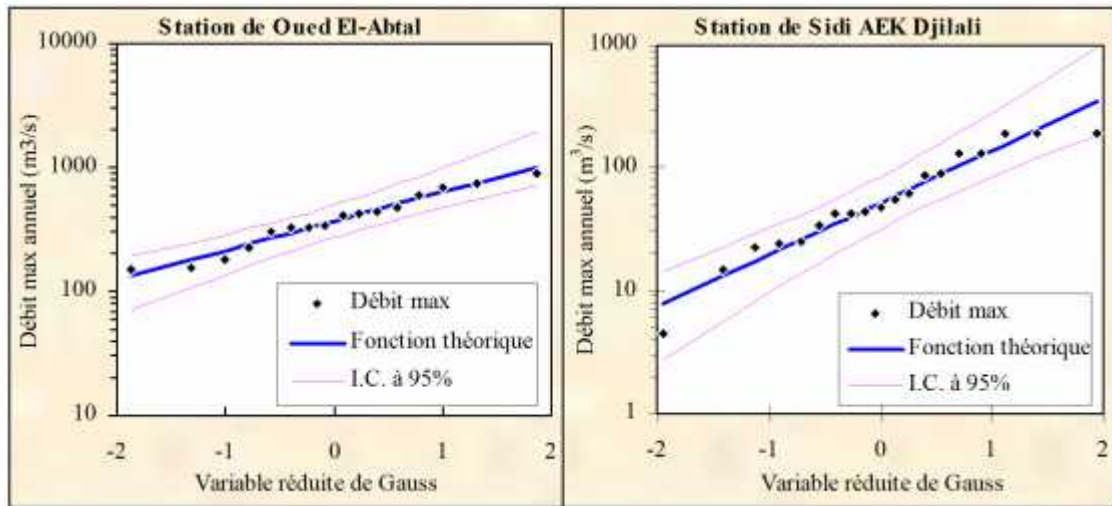


Figure (3.19): Ajustement des débits max annuels à la loi Log Normale

Tableau (3.24) : Débits max annuels ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pour différentes périodes de retour (quantiles)

N°	Station	Période de retour T (ans)						
		10	25	50	100	200	500	1000
1	OA	740.896	956.324	1127.696	1307.893	1497.911	1765.527	1981.285
2	S.AEK	181.698	286.984	385.529	502.747	640.992	860.391	1057.709

En conclusion, l'étude des précipitations et des écoulements a montré que les précipitations et les débits les plus importants ont lieu de Septembre à Mai. A cette irrégularité saisonnière s'ajoute une irrégularité interannuelle. Les précipitations annuelles et les précipitations maximales journalières de toutes les stations pluviométriques s'ajustent bien à la loi Log-Normale, tandis que les précipitations mensuelles s'ajustent beaucoup mieux à la loi de Gumbel et à la loi Normale. Les débits moyens annuels et les débits max annuels s'ajustent généralement bien et mieux à la loi Log Normale, tandis que les débits moyens intra annuels des deux stations hydrométriques (Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali) ne s'ajustent pratiquement à aucune loi de probabilité.

# CHAPITRE 4

## ETUDE ET ANALYSE DU TRANSPORT SOLIDE EN SUSPENSION

### 4.1 Chronologie de collecte des données

La collecte et la mise en forme des données, est la phase la plus délicate et la plus difficile en hydrologie. Cette étape titanesque et impérieuse a constitué l'une des étapes des plus importantes vu que la solidité de tout modèle statistique en dépend.

La période concerné par la présente analyse s'étale de 1985/1986 à 2000/2001 (station de Oued El-Abtal) et de 1982/1983 à 2000/2001 (station de Sidi AEK Djilali). Le choix de ces périodes ne s'est pas fait fortuitement, il a été guidé par des impératifs de données et de temps. La collecte des données a consisté à établir des fichiers de :

- Débits liquides instantanés ( $m^3/s$ ) - Concentrations instantanées  $C$  (g/l) ;
- Débits moyens journaliers ( $m^3/s$ ) à partir des annuaires.

Nous disposons des observations de deux (02) stations hydrométriques. La période d'exploitation et le nombre d'observations de ces stations sont donnés dans les tableaux 4.1 et 4.2. Il s'agit des stations hydrométriques suivantes :

- Station hydrométrique de Oued El-Abtal sur l'Oued Mina (013402), qui contrôle une superficie de  $4126Km^2$ .
- Station hydrométrique de Sidi AEK Djilali sur l'Oued Haddad (013401), qui contrôle une superficie de  $470Km^2$ .

Le tableau (4.1) montre la variation du nombre de mesures du transport solide en suspension. Cette variation est bien illustrée dans la figure (4.1), où l'on constate que dans le bassin versant de l'Oued Mina, la concentration des sédiments en suspension se distingue bien au cours des mois pluvieux. Le mois qui engendre le plus grand nombre de valeurs de concentration est le mois d'Octobre. Le plus petit nombre se situe au mois de juillet pour les deux stations hydrométriques. A l'échelle annuelle, ce sont les années hydrologiques

1986/1987 et 1995/1996 qui possèdent le plus grand nombre de valeurs de concentration pour les deux stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali respectivement. La diminution du nombre de mesures notamment pour les années successives 1998/1999, 1999/2000 et 2000/2001 pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et 1991/1992, 1992/1993 et 1993/1994 pour la station de Sidi AEK Djilali reste mal expliquée. Il est à noter aussi que la fréquence d'échantillonnage mensuelle est relativement homogène.

Ces données représentent une information essentielle pour une meilleure compréhension des mécanismes contribuant au comportement hydrosédimentologique du bassin versant de l'oued Mina. L'accent a été mis sur les périodes pluvieuses et les périodes de crue, car ce sont en général celles qui posent des problèmes au niveau de l'acquisition et du traitement des données.

Tableau (4.1) : Nombre de valeurs observées par station et année

Echelle temporelle	Station					
	Oued El-Abtal (013402)			Sidi AEK. Djilali (013401)		
Année	X (Km)	Y (Km)	Z (m)	X (Km)	Y (Km)	Z (m)
Coordonnées	316.8	245.65	205	309	244.5	225
1982/1983	**			91		
1983/1984	**			75		
1984/1985	**			69		
1985/1986	121			164		
1986/1987	1536			168		
1987/1988	1022			127		
1988/1989	863			78		
1989/1990	673			114		
1990/1991	757			112		
1991/1992	416			37		
1992/1993	423			49		
1993/1994	667			67		
1994/1995	744			518		
1995/1996	1365			792		
1996/1997	437			138		
1997/1998	673			322		
1998/1999	236			211		
1999/2000	264			180		
2000/2001	96			99		
Totalité des valeurs observées	<b>10293</b>			<b>3411</b>		
Moyenne	<b>643</b>			<b>178</b>		

\*\* Donnée manquante (non observée)

Tableau (4.2) : Nombre de valeurs observées par station, saison et mois

Echelle temporelle		Station			
Saison	Mois	Oued El-Abtal		Sidi AEK. Djilali	
Automne	Septembre	1154	4105	320	1218
	Octobre	1919		475	
	Novembre	1032		423	
Hiver	Décembre	832	2680	364	1199
	Janvier	975		383	
	Février	873		452	
Printemps	Mars	952	2448	472	841
	Avril	739		211	
	Mai	757		158	
Eté	Juin	333	1060	72	153
	Juillet	292		34	
	Août	435		47	
Totalité des valeurs observées		<b>10293</b>		<b>3411</b>	
Moyenne		<b>858</b>		<b>284</b>	

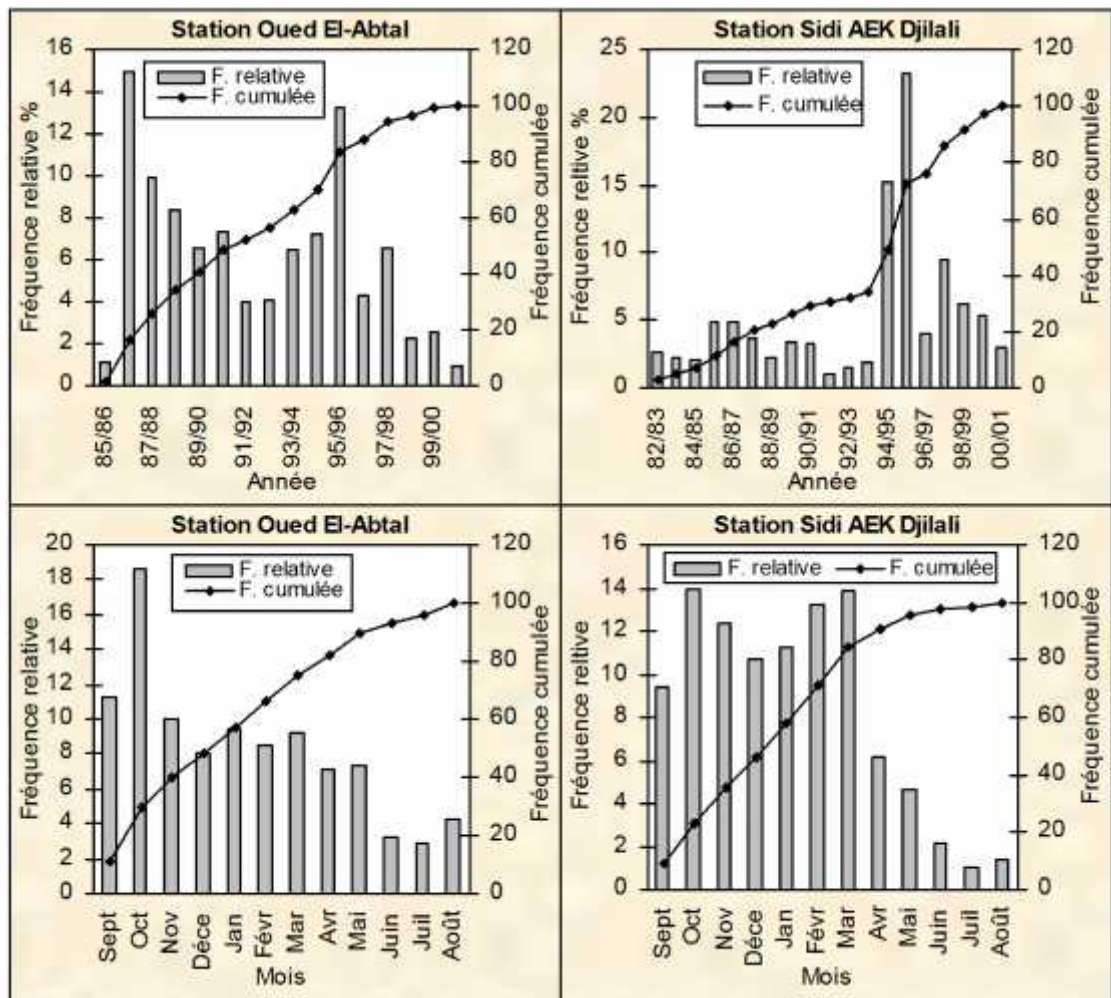


Figure (4.1) : Fréquences des observations de la concentration durant la période d'étude



#### 4.2 Contrôle et critique des données

Au cours du dépouillement des données, quelques observations ont été retenues :

1. La concentration des sédiments fin est mesurée de façon ponctuelle par le prélèvement des échantillons en un point unique soit sur le bord, soit au milieu du cours d'eau. Un seul échantillon prélevé en surface au milieu de la section ou en bordure aura une teneur en suspension moindre que la teneur moyenne sur une verticale ou sur toute la section.
2. Les erreurs de mesure qui ont été détectés après un premier contrôle grossier semblent provenir de l'observateur ou de transcripteur. On peut trouver pour le même débit et sur un intervalle de temps court une grande différence de concentration. Ceci a été observé par exemple au niveau de la station hydrométrique de Oued El-Abtal pour l'événement de crue de 28-29 Décembre 1993 où l'on a enregistré à 06 heures une concentration de 1.6g/l à la hauteur de 126cm. Une heure après, cette concentration est de 198g/l pour la même hauteur et le même débit, soit 20.6m<sup>3</sup>/s. On peut trouver aussi une concentration constante sur un intervalle de temps court ou moyennement court pour des débits liquides variables. L'exemple de la crue de 21 Octobre 1993 observée au niveau de la station hydrométrique de Oued El-Abtal est à signaler. A 07 heures le débit liquide est de 23.04m<sup>3</sup>/s à la hauteur de 84cm, et diminue progressivement à 08 heures (Q=16.2m<sup>3</sup>/s, H=72cm) puis à 09 heures jusqu'à 11.76m<sup>3</sup>/s à la hauteur 63cm pour la même concentration 28g/l. A 03 heures la concentration est de 29.5g/l pour un débit liquide de 11.76m<sup>3</sup>/s à la hauteur de 63cm. A 05 heures cette concentration a augmentée de 3g/l pour un débit liquide cinq fois plus grand, soit 55.67m<sup>3</sup>/s à la hauteur de 120cm (figure 4.2).

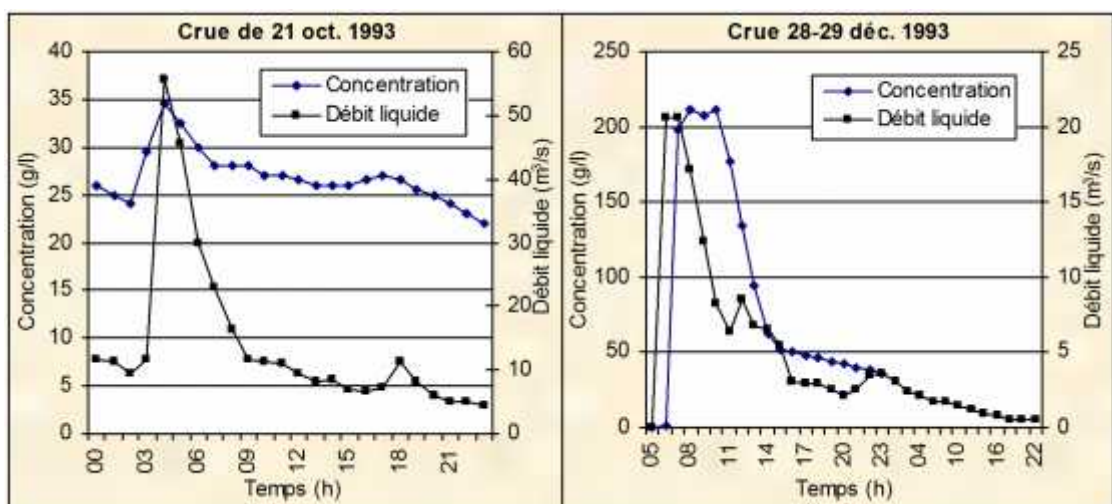


Figure (4.2) : Crues de 21 Oct. 1993, 28-29 Déc. 1993 (Station de Oued El-Abtal)

Les erreurs de mesure qui ont été détectés au niveau de la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali sont plus apparentes et plus fréquentes que celles au niveau de la station hydrométrique de Oued El-Abtal. L'exemple de la crue de 22-23 Novembre 1997 est à signaler où l'on a enregistré: à 08 heures une concentration de 6824g/l pour un débit de  $0.175\text{m}^3/\text{s}$  (H=40cm), à 12 heures une concentration de 3792g/l pour un débit de  $1.525\text{m}^3/\text{s}$  (H=52cm) et à 12 heures du 23 Novembre, une concentration de 2768g/l pour un débit de  $0.072\text{m}^3/\text{s}$  (H=20cm). L'observateur semble parfois aussi plonger la bouteille dans la boue si le prélèvement est effectué au bord de l'oued. Ceci a été observé pour l'événement de crue de 02 Mai 2000 où l'on a enregistré à 08 heures une concentration de 12.7g/l pour un débit de  $0.054\text{m}^3/\text{s}$  (H=16cm). Une heure après, cette concentration est de 918g/l pour un débit de  $0.046\text{m}^3/\text{s}$  (H=14cm). Si on se réfère à la contenance de la bouteille, l'anomalie est évidente. Les observateurs sont inexpérimentés et ne peuvent saisir l'importance d'une mesure correcte de la concentration des sédiments en suspension. Il faudra ici négliger (corriger les hydrogrammes et les turbidigrammes) les quelques points lors de l'analyse du transport solide en suspension (figure 4.3).

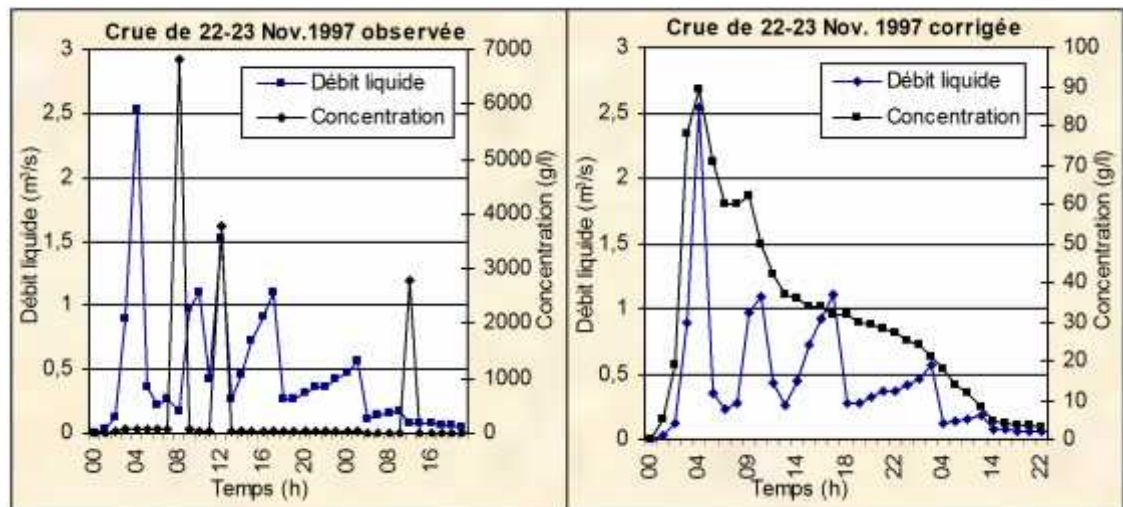


Figure (IV.3) : Crue de 22-23 Nov. 1997 (Station de Sidi AEK Djilali)

3. Les échantillons de mesure de transport solide en suspension sont pris avec une densité jugée suffisante, soit 20 mesures par jours observé en moyenne pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal, mais la différence de la concentration entre les points successifs au début des crues est parfois trop grande (Figure 4.2). Cette variation rapide échappe souvent à l'observateur. Il faudra ici éviter de négliger les quelques points lors du tracé du turbidigramme afin de ne pas permettre beaucoup de subjectivité.



### 4.3 Gamme de concentrations

Les graphiques montrés aux figures (4.4) et (4.5) sont représentatifs de 10293 valeurs instantanées de concentrations et de débits liquides observées au niveau de la station hydrométrique de Oued El-Abtal durant la période 1985/1986 - 2000/2001. Tandis ce que ceux montrés aux figures (4.6) et (4.7) sont représentatifs de 3411 valeurs instantanées de concentrations et de débits liquides observées au niveau de la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali durant la période 1982/1983-2000/2001.

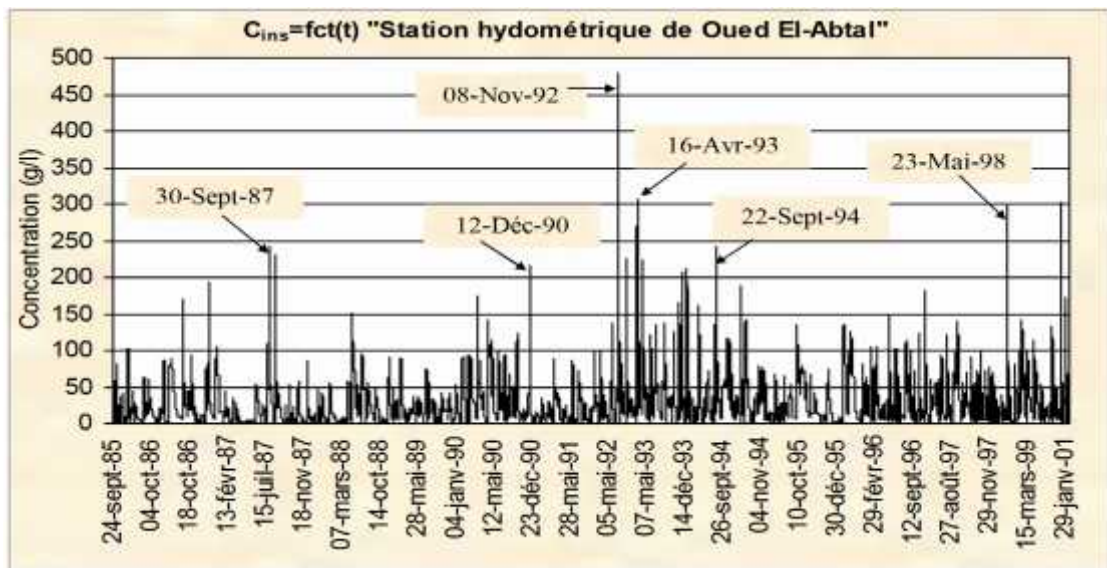


Figure (4.4) : Chronologie des concentrations observées durant la période d'étude (Station de Oued El-Abtal)

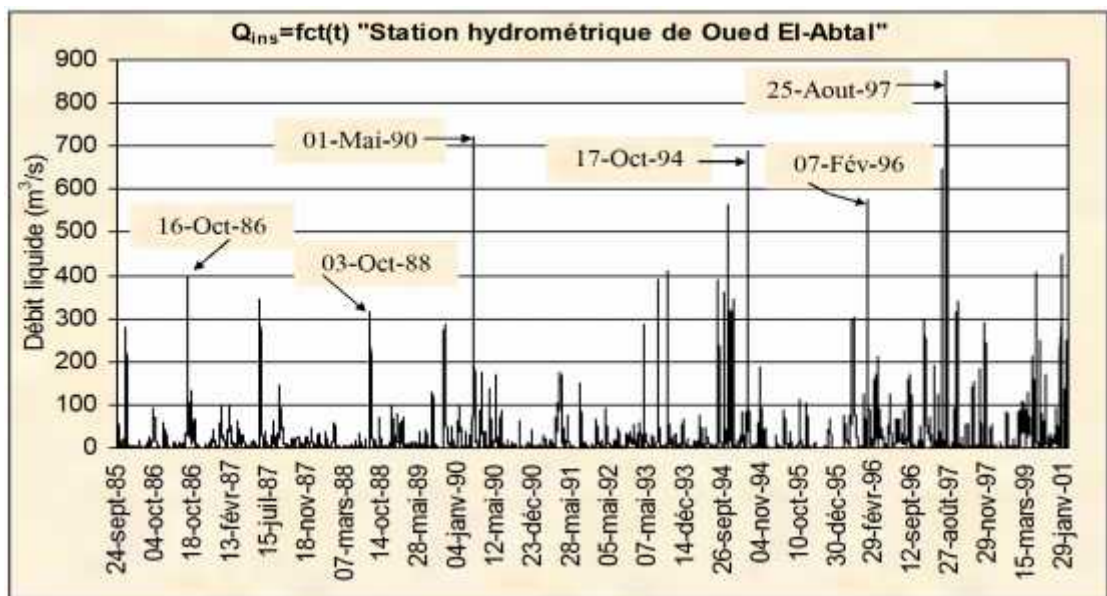


Figure (4.5) : Chronologie des débits liquides observés durant la période d'étude (Station de Oued El-Abtal)

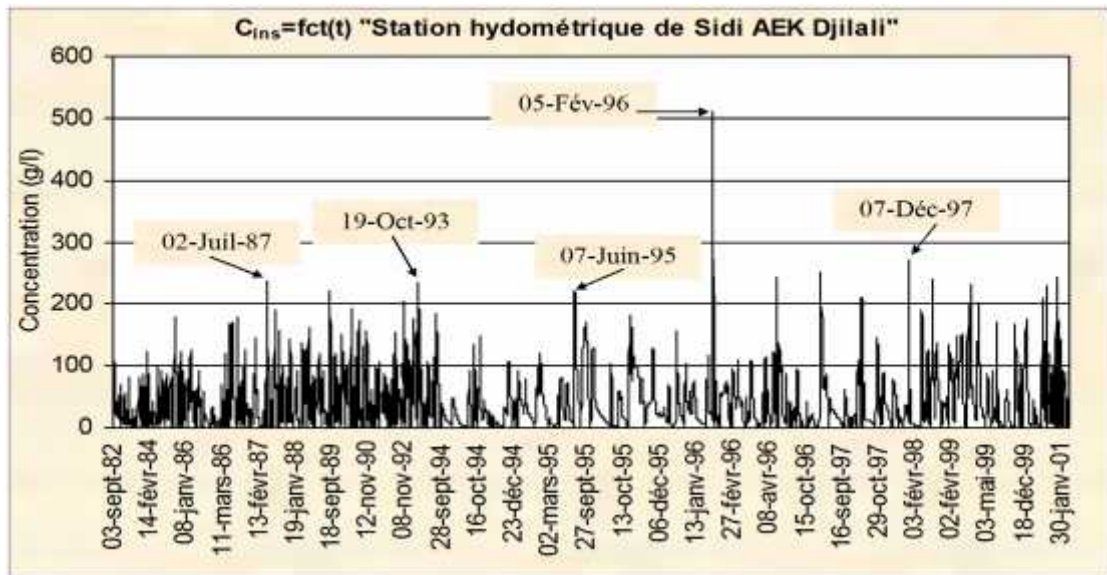


Figure (4.6) : Chronologie des concentrations observées durant la période d'étude (Station de Sidi AEK Djilali)

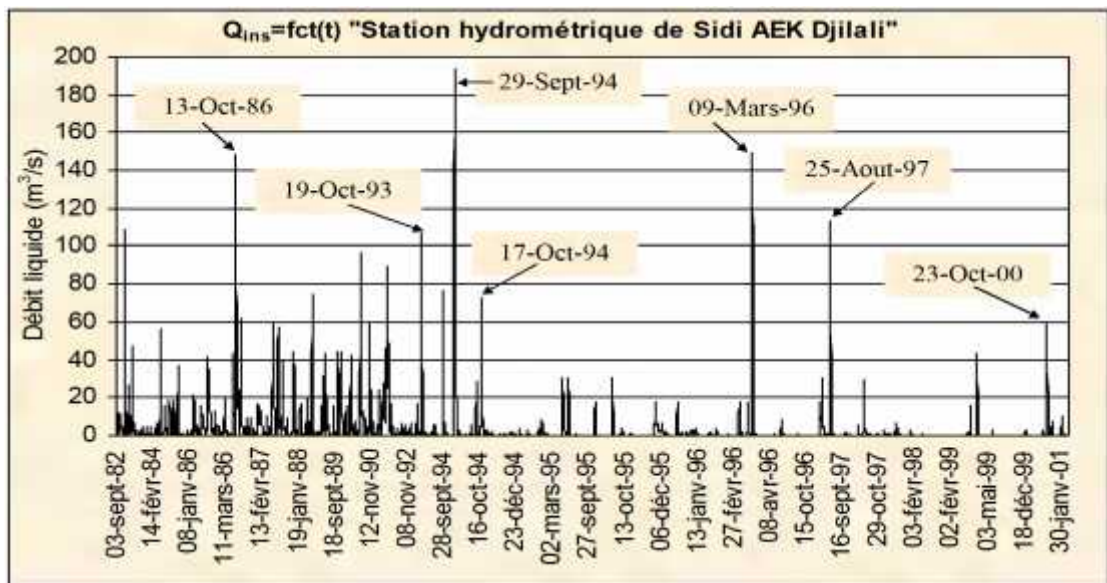


Figure (4.7) : Chronologie des débits liquides observés durant la période d'étude (Station de Sidi AEK Djilali)

Les valeurs instantanées de transport solide observées se sont échelonnées de 0.05 à 478 g/l pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et de 0.04 à 510g/l pour la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali. Les moyennes sont respectivement 27.746g/l et 41.628g/l (tableau 4.3).

Tableau (4.3) : Paramètres statistiques de la concentration C, du débit liquide Ql et débit solide Qs

Paramètres statistiques	Station Oued El-Abtal			Station Sidi AEK Djilali		
	Valeurs instantanées					
	C (g/l)	Ql (m <sup>3</sup> /s)	Qs (Kg/s)	C (g/l)	Ql (m <sup>3</sup> /s)	Qs (Kg/s)
Nbre de valeurs	10293	10293	10293	3411	3411	3411
Minimum	0.05	0.001	0.001	0.04	0.002	0.001
Maximum	478	873.267	104792.04	510	193.4	24211.69
Moyenne $\bar{x}$	27.75	21.643	1158.369	41.628	3.53	280.17
Variance	1024.77	2781.25	17540101.7	1968.31	131.815	1517344.3
Ecart-type	32.012	52.738	4188.09	44.366	11.481	1231.81
Coef. de variation	1.154	2.437	3.616	1.066	3.252	4.397
Coef. d'asymétrie	2.802	6.679	9.376	1.846	6.54	8.938
	Valeurs moyennes journalières					
Nbre de valeurs	604	604	604	166	166	166
Minimum	0.296	0.010	0.017	0.927	0.007	0.010
Maximum	256.93	320.1	19814.188	177.633	56.51	7331.51
Moyenne $\bar{x}$	23.87	16.118	630.860	47.208	5.016	363.784
Variance	671.91	959.24	2595538.3	1257.38	97.51	976037.79
Ecart-type	25.921	30.972	1611.067	35.459	9.875	987.946
Coef. de variation	1.086	1.922	2.554	0.751	1.969	2.716
Coef. d'asymétrie	3.308	5.096	5.726	0.959	3.11	4.714

Les concentrations élevées sur l'Oued Mina sont assez fréquentes et pratiquement 34.31% (soit 3531 valeurs) de l'ensemble des données dépassent la concentration moyenne au niveau de la station hydrométrique de Oued El-Abtal. 3.8% (soit 390 valeurs) de l'ensemble des données excèdent les 100g/l.

Au niveau de la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali, 36.5% (soit 1245 valeurs) de l'ensemble des données dépassent la concentration moyenne et 10.61% (soit 362 valeurs) de l'ensemble des données excèdent les 100g/l.

Les crues de 08 Novembre 1992 et 23 Mai 1998 observées au niveau de la station hydrométrique de Oued El-Abtal ont enregistré respectivement 478g/l et 285g/l. Les crues de 02 Juillet 1987, 05 février 1996 et 07 Décembre 1997, observées au niveau de la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali ont enregistré respectivement 231g/l, 510g/l et 270g/l. La plupart de ces fortes concentrations étaient le résultat des écoulements d'averses.

Pendant la période d'étude, les concentrations des sédiments en suspension mesurées au niveau des station hydrométriques de Oued El-Abtal et de Sidi AEK Djilali se sont échelonnées sur douze (12) ordres de grandeur (tableau 4.4, figures 4.8 et 4.9).

Tableau (4.4) : Nombre d'observations selon l'ordre de grandeur de la concentration

Ordre de grandeur de C	Station de Oued El-Abtal		Station de Sidi AEK Djilali	
	Nbre d'bservations	Peurcentage %	Nbre d'bservations	Peurcentage %
0 à 0.1	02	0.02	01	0.03
0.1 à 1	328	3.19	98	2.87
1 à 2	452	4.39	157	4.60
2 à 5	1124	10.92	309	9.06
5 à 10	1538	14.94	351	10.29
10 à 20	2160	20.99	549	16.09
20 à $\bar{x}$	1158	11.25	701	20.55
$\bar{x}$ à 50	1790	17.39	178	5.22
50 à 100	1351	13.13	705	20.67
100 à 200	354	3.44	336	9.85
200 à 300	33	0.32	25	0.73
300 à 520	03	0.03	01	0.03

$\bar{x}$  : Moyenne

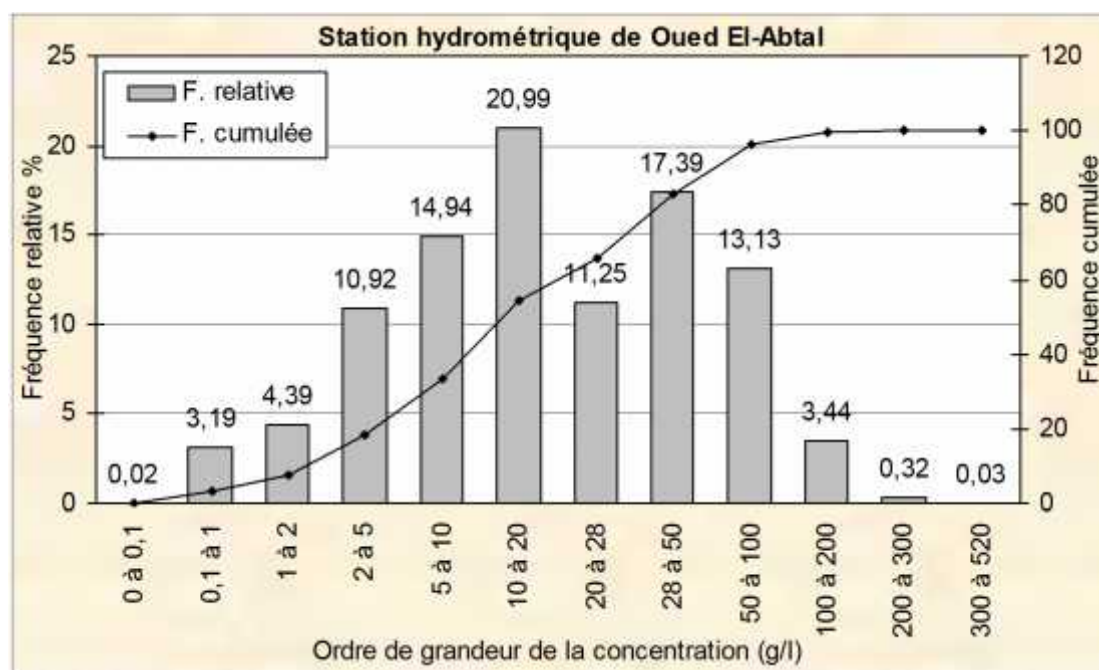


Figure (4.8) : Fréquences des observations selon l'ordre de grandeur de la concentration (Station de Oued El-Abtal)

Ces ordres de grandeurs sont choisis arbitrairement pour montrer que le plus grand nombre d'observations concernent la gamme des concentrations comprises entre 2 et 100g/l, soit 89% pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et 82% pour la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali de l'ensemble des données instantanées. La gamme comprise entre 5 et 100g/l représente près de 78% pour la station de Oued El-Abtal et 73%

pour la station de Sidi AEK Djilali de l'ensemble des données. La gamme comprise entre 5 et  $\bar{x}$  g/l représente près de 47% de l'échantillonnage disponible pour les deux stations.

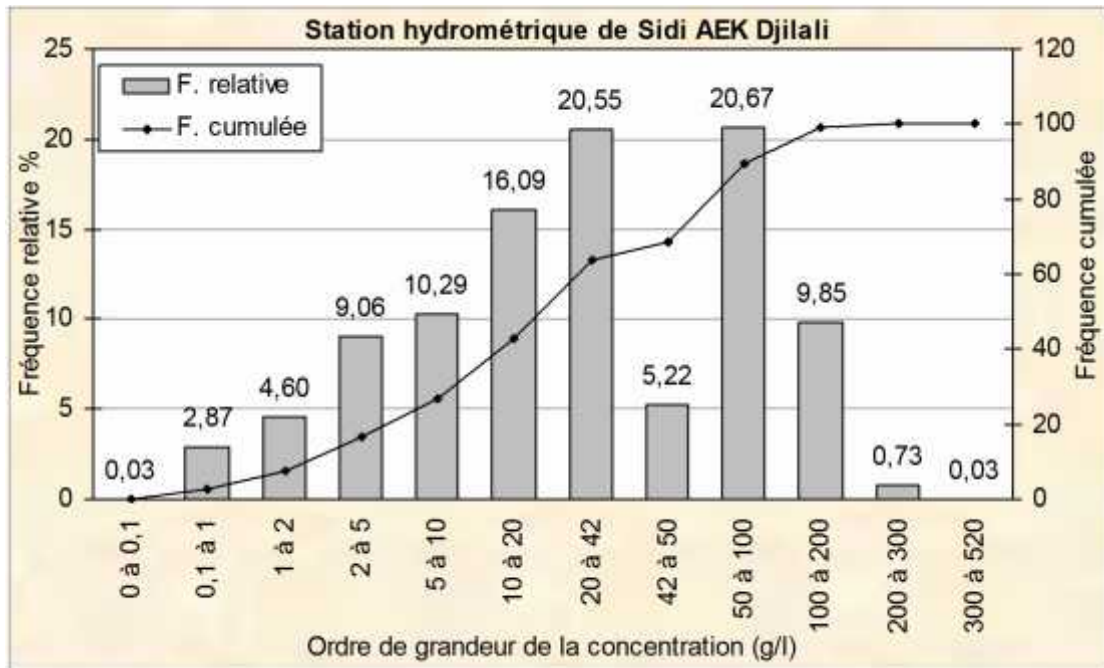


Figure (4.9) : Fréquences des observations selon l'ordre de grandeur de la concentration (Station de Sidi AEK Djilali)

Ce résultat ainsi que celui montré dans les figures (4.4), (4.5), (4.6) et (4.7) anticipent déjà sur la dispersion des points lors de l'analyse de la relation : concentration - débit liquide ainsi que sur la qualité de l'échantillonnage durant la période d'étude. Les 10293 et 3411 points des deux stations hydrométriques seront traités en tant que populations à partir desquelles plusieurs types d'échantillons seront pris et analysés.

#### 4.4 Etude du transport solide en suspension

##### 4.4.1 Relation débit liquide – concentration des sédiments

La mise en graphe des données, de concentration des sédiments en suspension et du débit liquide, enregistrées au niveau des stations hydrométriques de Oued El-Abtal et de Sidi AEK Djilali, dans les périodes 1985/1986 - 2000/2001 et 1982/1983 - 2000/2001 respectivement, montre une dispersion considérable en coordonnées linéaires et même logarithmiques. Les points sont régulièrement distribués le long de l'axe horizontal du débit liquide (figures 4.10 et 4.11). Les piles verticales de points indiquent des augmentations de concentration des sédiments en suspension pour des débits presque constants. La



concentration varie de 0.1 à 400g/l voir plus, pour des débits presque constants. L'escarpement des berges est une explication possible de la contribution soudaine des sédiments vers le cours d'eau à un niveau constant.

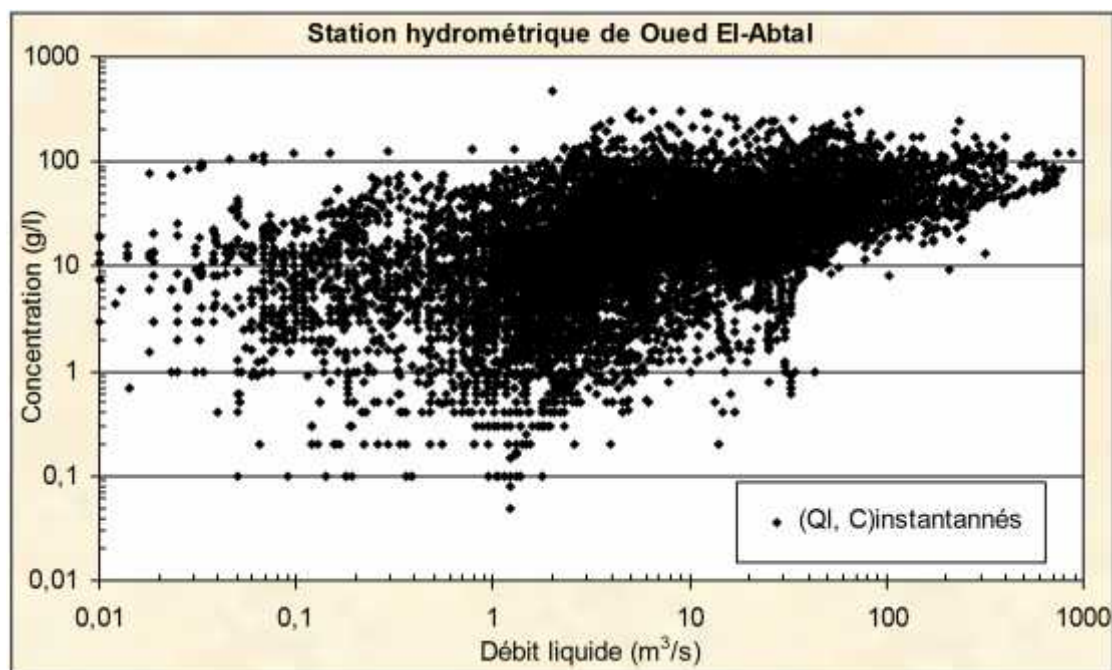


Figure (4.10) : Graphique de concentration - débit liquide (Station de Oued El-Abtal)

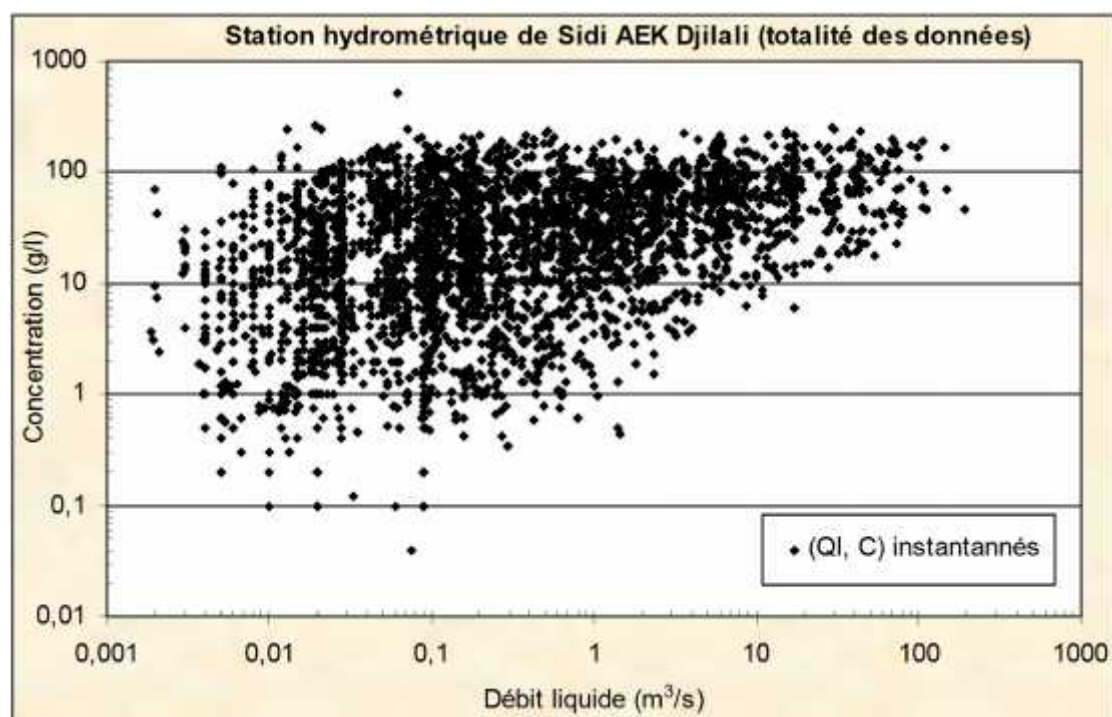


Figure (4.11) : Graphique de concentration - débit liquide (Station de Sidi AEK Djilali)

La forme des populations montrées dans les figures (4.10) et (4.11) n'encourage pas de rassembler des échantillons pour obtenir des estimations par emploi de régression des moindres carrés. L'essaim des points n'est pas linéaire. La variation verticale des points semble plus grande à la gauche qu'à la droite, et il est difficile voir impossible de concevoir un modèle linéaire (modèle puissance à l'échelle linéaire).

La relation entre le débit et la concentration des sédiments en suspension est complexe et est obscurcie par les entrées soudaines des sédiments produites par les pluies occasionnelles dans des périodes plus sèches et par les premiers éclats.

Après une longue saison sèche caractérisée par de fortes températures (été), les pluies provoquent la destruction des agrégats du sol. Le ruissellement déclenché par ces pluies assure le transport des particules détachées. En plus, en saison chaude, les sols sont très souvent nus ou mal protégés. Cette situation accentue le phénomène érosif du sol en raison des fortes énergies produites par les pluies orageuses. A ce moment-là, les concentrations des sédiments en suspension sont plus élevées que celles mesurées à des débits identiques plus tard dans la saison des pluies. D'autre côté, des concentrations élevées à des débits faibles sont également enregistrées pendant les pluies sporadiques (irrégulières) tardivement au printemps et en été.

Les graphiques chronologiques de toutes les concentrations des sédiments en suspension indiquent que la concentration instantanée varie de 0.05 à 478g/l pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et de 0.04 à 510g/l pour la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali. Pour examiner si cette variation est probablement indépendante du débit liquide, les concentrations des débits solides ont été séparées en gammes étroites de débit liquide (figures 4.12 et 4.13). Pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal, les autres graphiques sont illustrés dans l'annexe (4.1). Ces figures indiquent des variations significatives de la concentration des sédiments en suspension pour des débits presque constants d'une part. D'autre part, elles montrent que les plus faibles débits liquides peuvent véhiculer les mêmes concentrations des sédiments en suspension que les plus grands débits liquides, contrairement à ce que l'on pense. De ce fait, nous avons jugé utile d'analyser cet effet d'hystérésis de manière détaillée dans un chapitre ultérieur (chapitre 6).

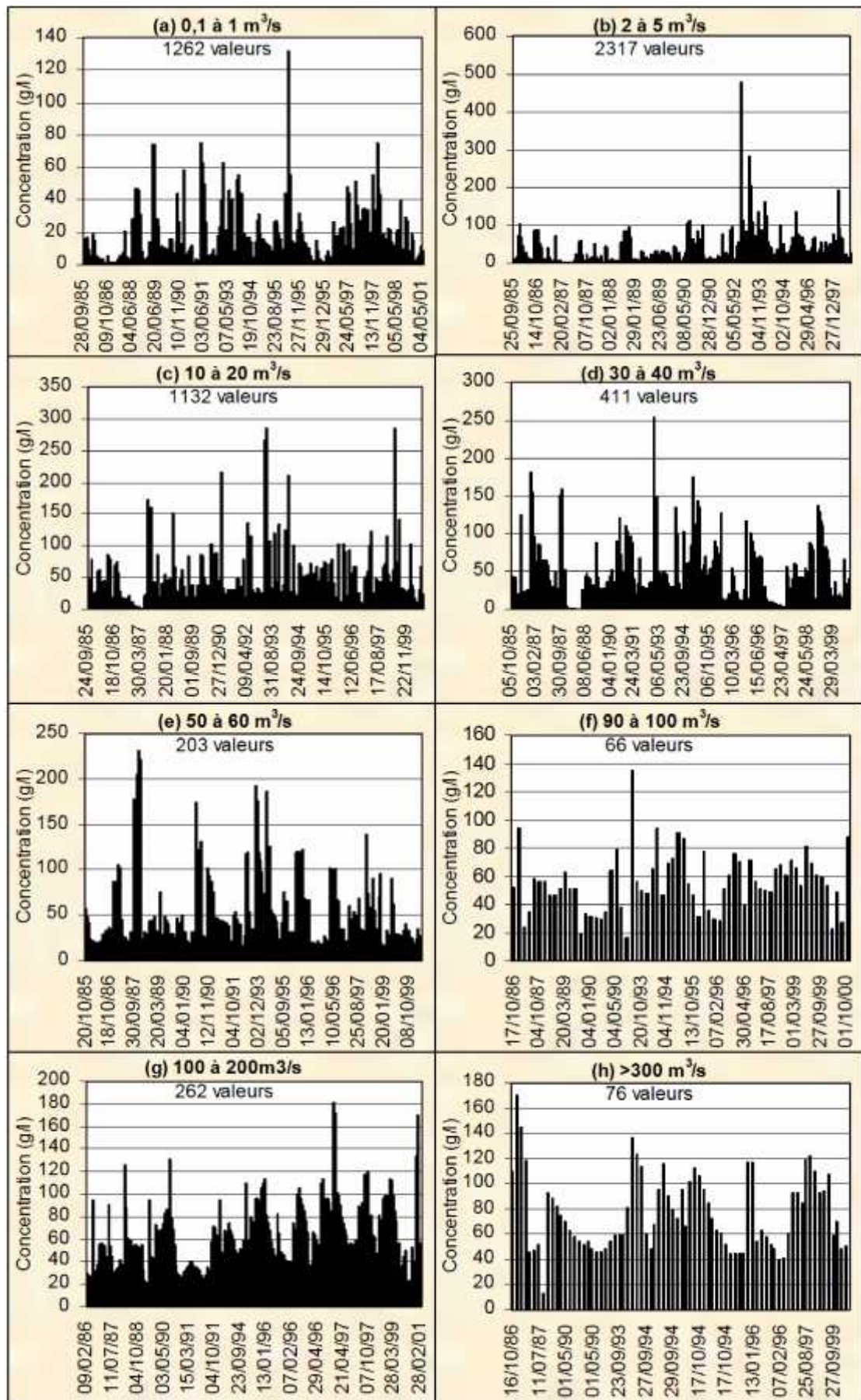


Figure (4.12) : Graphiques chronologiques des concentrations (Station O.El-Abtal)



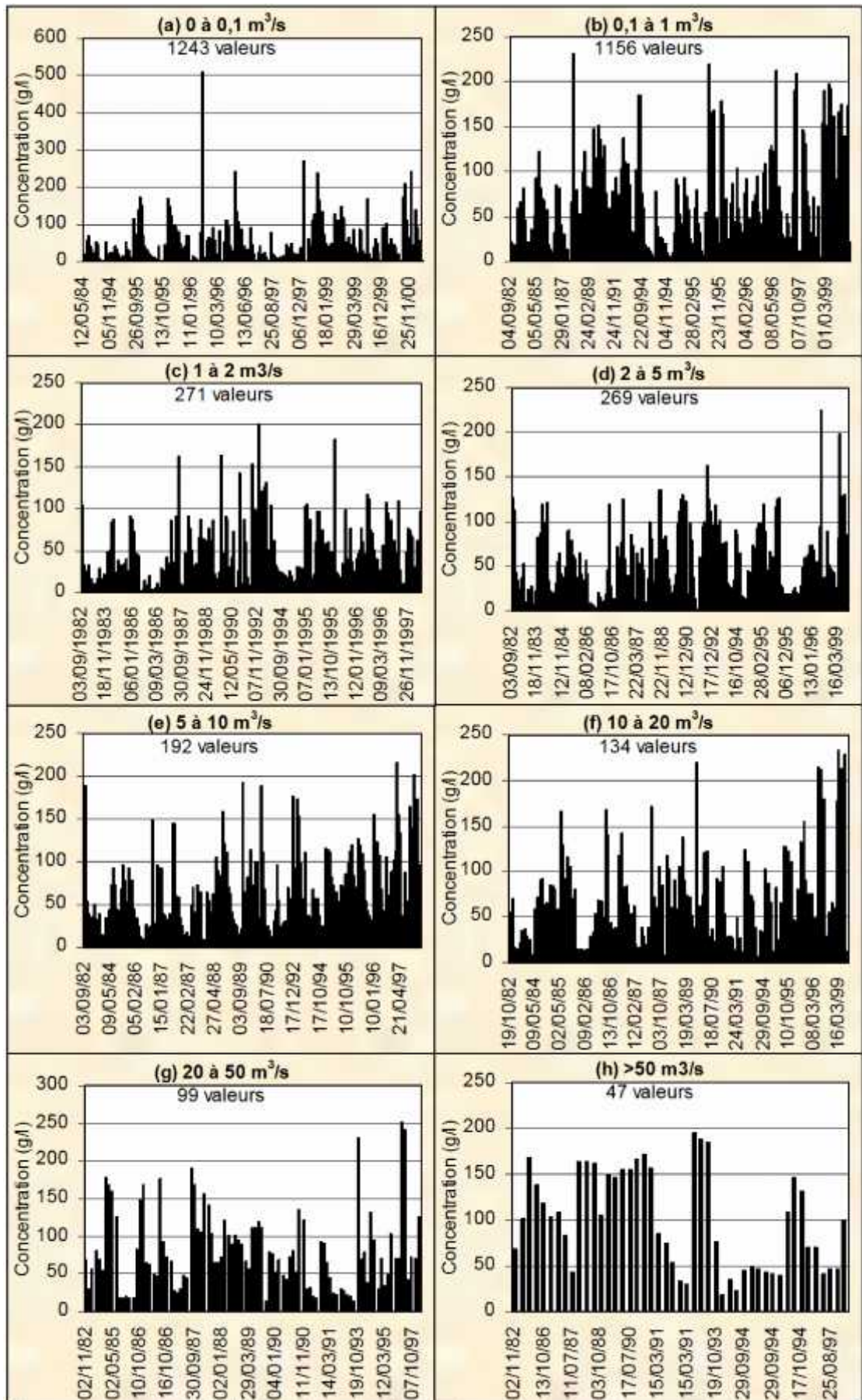


Figure (4.13) : Graphiques chronologiques des concentrations (St. S-AEK Djilali)

#### 4.4.2 Relations débit liquide – débit solide

La recherche de modèles reliant les paramètres hydro climatiques (précipitations, écoulements et/ou transport de matériaux solides) a fait l'objet de nombreuses études [3, 48, 49, 51, 52, 55, 57, 59, 71, 83, 84, 85, 86, 87,]. L'objectif de ces auteurs est d'expliquer les phénomènes de l'écoulement et du transport solide et de mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions ou des bassins versants où les mesures sont rares ou inexistantes. Les caractéristiques climatiques, morphométriques et morphologiques diffèrent d'une région à une autre ou d'un bassin à un autre. Aussi, il est admis aujourd'hui que les fluctuations climatiques sont des phénomènes quasi-cycliques [88]. En effet, du siècle écoulé, le climat du monde a changé. La pluviosité sur les continents, le débit des cours d'eau et la température ont augmenté dans plusieurs régions du monde et diminué dans d'autres [89, 90, 91, 92]. Les caractéristiques morphométriques des bassins changent aussi au cours des années, on sait par exemple que le couvert végétal se développe et se conserve ou non en fonction de la pluviosité.

Tous ces paramètres font que les modèles diffèrent d'un auteur à un autre. Chacun tente de caractériser la région ou le bassin étudié par le modèle le plus représentatif et le plus fiable.

Dans le but de l'homogénéisation des données, dont la statistique des données est résumée dans le tableau (4.3), nous avons recherché des modèles régressifs entre deux paramètres de mesure: le débit liquide et le débit solide. A cet effet, les données sont mises en graphe et leur allure oriente le choix du modèle régressif.

L'approche consiste au traitement des valeurs des débits liquides instantanés ( $Q_{l\ inst}$ ) et des débits solides instantanés ( $Q_{s\ inst}$ ) pour différentes échelles temporelles. Cette démarche est faite dans le but d'une simplification du problème et compte tenu des divers problèmes d'échantillonnage qui ne sont pas identiques pour la mesure du débit et de la concentration.

##### 4.4.2.1 Relation interannuelle (Ensemble des données)

Les figures (4.14) et (4.15) représentent les courbes de transport solide en suspension et les données des 16 et 19 années d'enregistrements effectués au niveau des stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali respectivement.

La dispersion des points associée aux mises en graphe peut être expliquée par la variabilité saisonnière de la concentration des sédiments en suspension, par l'hystérésis du

débit et de la concentration durant un événement d'averse ainsi que par l'épuisement progressif des matériaux durant une séquence de l'événement crue [71, 87].

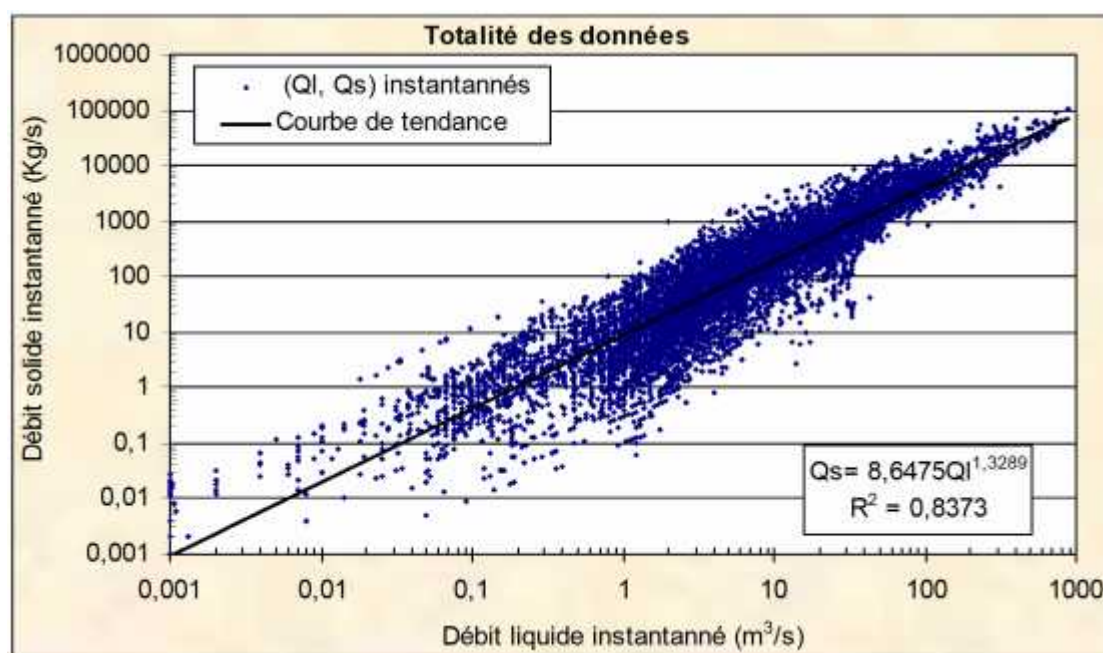


Figure (4.14) : Relation interannuelle du débit liquide - débit solide (St. de Oued El-Abtal)

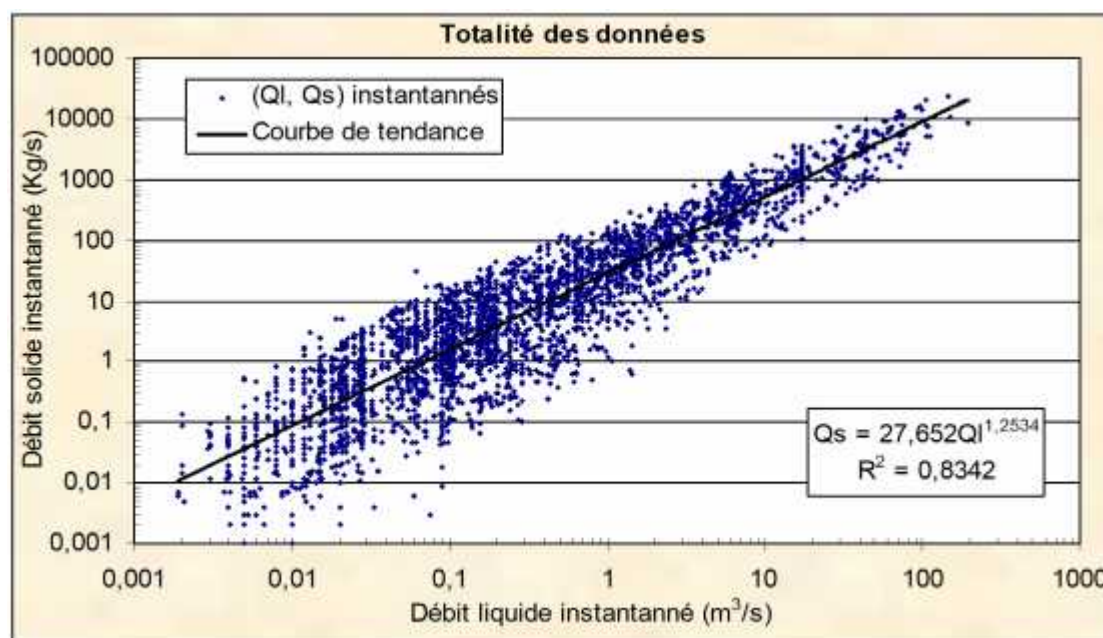


Figure (4.15) : Relation interannuelle du débit liquide - débit solide (St. de Sidi AEK Djilali)

Les relations obtenues montrent que le débit solide n'est pas une fonction simple du débit liquide. Les droites de régression montrées dans les figures (4.14) et (4.15) ont un coefficient de détermination de 0.83. Les coefficients de détermination ont sensiblement

augmenté, passant de 0.20 (0.17 pour la station hydrométrique de sidi AEK Djilali) pour la relation  $C=fct(Ql)$  à 0.83 pour celle de  $Qs=fct(Ql)$ . Le débit solide  $Qs$  varie dans des gammes jusqu'à trois ordres de grandeurs, voir plus, pour une valeur donnée de débit. Cette variation peut être attribuée aux changements des conditions du bassin et du réseau hydrographique.

Les valeurs des débits liquides et solides moyens journaliers observés ont servi à développer des relations puissance, liants les deux paramètres (figure 4.16). Ces derniers peuvent être utilisés pour calculer les valeurs des débits solides correspondant aux valeurs liquides observées pour lesquelles il n'y a pas eu d'observation des débits solides (nouvel échantillon).

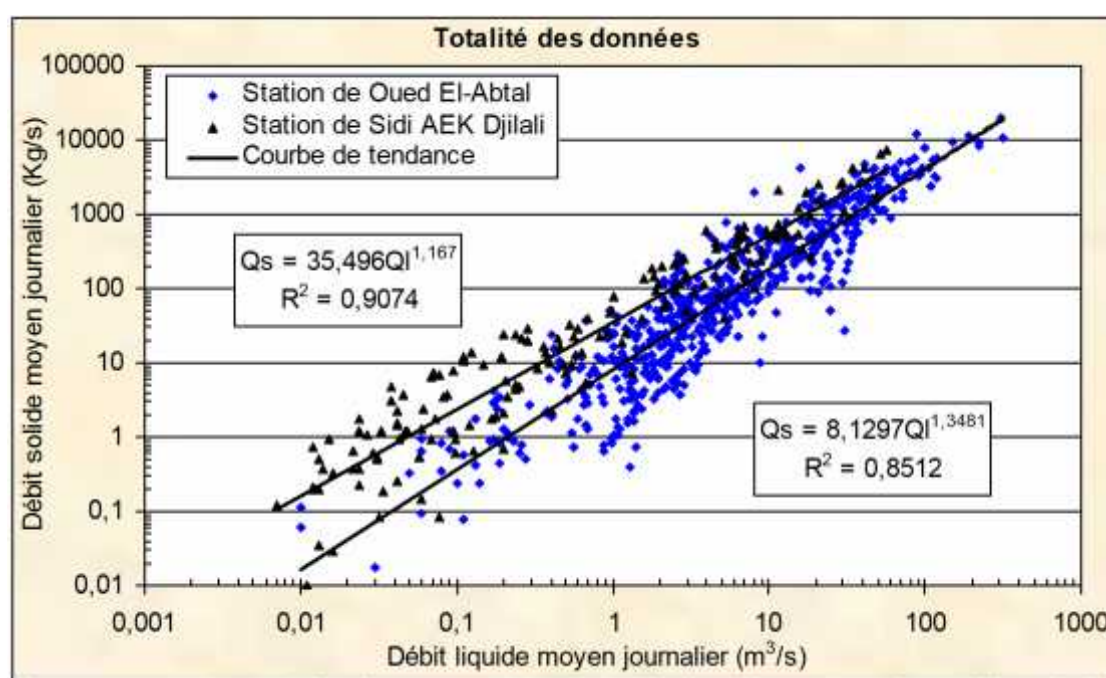


Figure (4.16) : Relation interannuelle du débit liquide moyen journalier - débit solide moyen journalier

En examinant les courbes de transport solide représentées dans les figures (4.14), (4.15) et (4.16), il apparaît immédiatement clair que la relation interannuelle de régression du débit liquide instantané – débit solide instantané est pratiquement la même que celle du débit liquide moyen journalier – débit solide moyen journalier pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal. On constate une petite différence entre les coefficients a et b de la relation en puissance pour la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali.

Les nuages de points représentés sur les figures (4.14), (4.15) et (4.16) montrent que les courbes de transport solide (relations de régression) sous estime mal les débits solide



pour les débits liquides élevés, puisque les jours avec des débits liquides élevés contribuent très fortement à la charge annuelle. On note une faible dispersion pour les débits liquides élevés, et une grande dispersion pour les faibles débits liquides.

#### 4.4.2.2 Relations annuelles

Pour étudier la réponse du bassin versant de l'Oued Mina aux débits liquides et matières en suspension, nous avons jugé utile de regrouper suivant différentes années durant la période d'étude les valeurs instantanées prélevées au niveau des deux stations de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali, et d'analyser la relation liant les débits liquides aux débits solides en suspension. Seuls les graphiques des années (1994/1995) et (1997/1998) de la station de Oued El-Abtal et (1994/1995) et (1995/1996) de la station de Sidi AEK Djilali sont donnés en figures (4.17) et (4.18). Les autres sont illustrés dans les annexes (4.2) et (4.3). Le tableau (4.5) résume les relations trouvées. Les tailles des échantillons sont illustrées dans le tableau (4.1).

Comme pour la plupart des cours d'eau, on trouve pour les deux stations hydrométriques du bassin versant de l'Oued Mina des bonnes relations en puissance [89] liant le débit des matières solides en suspension en Kg/s au débit liquide en m<sup>3</sup>/s.

Les valeurs des paramètres a et b de la relation en puissance (tableau 4.5) varient d'une année à une autre et d'une station hydrométrique à une autre dans le bassin versant de l'Oued Mina. Le paramètre a varie de 2.79 (année 2000/2001) à 17.25 (année 1994/1995) pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et de 9.33 (année 1982/1983) à 224.43 (année 2000/2001) pour la station de Sidi AEK Djilali.

L'exposant b varie dans une gamme étroite dans le bassin versant de l'Oued Mina, et est compris entre 1.26 (année 1994/1995) et 1.59 (année 2000/2001) pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et entre 1.29 (Année 1995/1996) et 1.91 (Année 1999/2000) pour la station de Sidi AEK Djilali. Ces valeurs sont proches de celles trouvées à Oued Wahrane [87] et celles trouvées dans les sous bassins des Oueds Sebdu, Mouilah, Isser et Sikkak [51] et sur la rivière Arbucies dans le Nord-Est de la péninsule Ibérique [78].

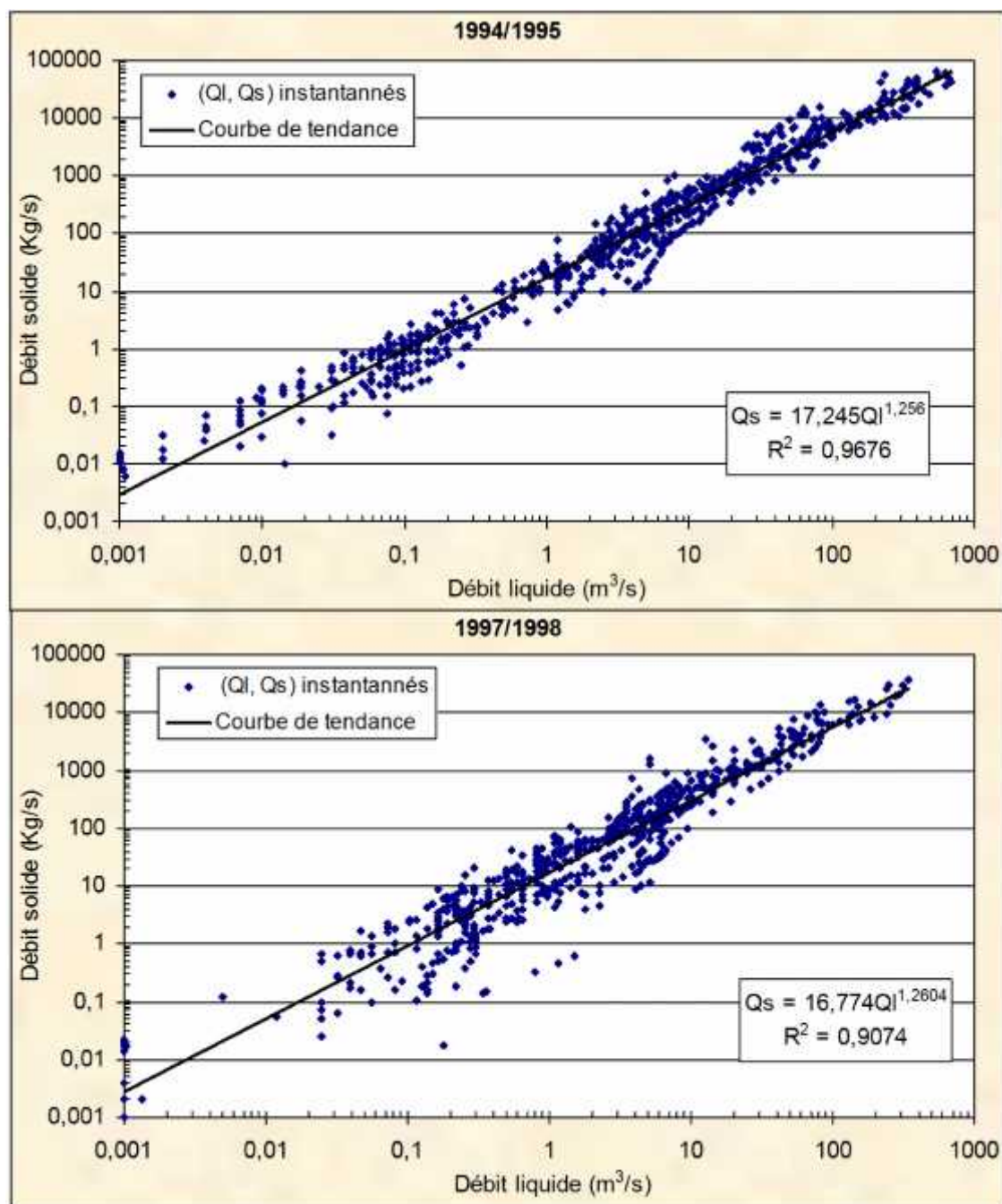


Figure (4.17) : Relations annuelles du débit liquide - débit solide «94/95 et 97/98 » (Station de Oued El-Abtal)

Le facteur a et l'exposant b sont les plus élevés au niveau de la station de Sidi AEK Djilali pour l'année 1999/2000, avec une valeur de b qui s'approche de 2. Ceci peut expliquer l'importance de la dynamique érosive en cette année.

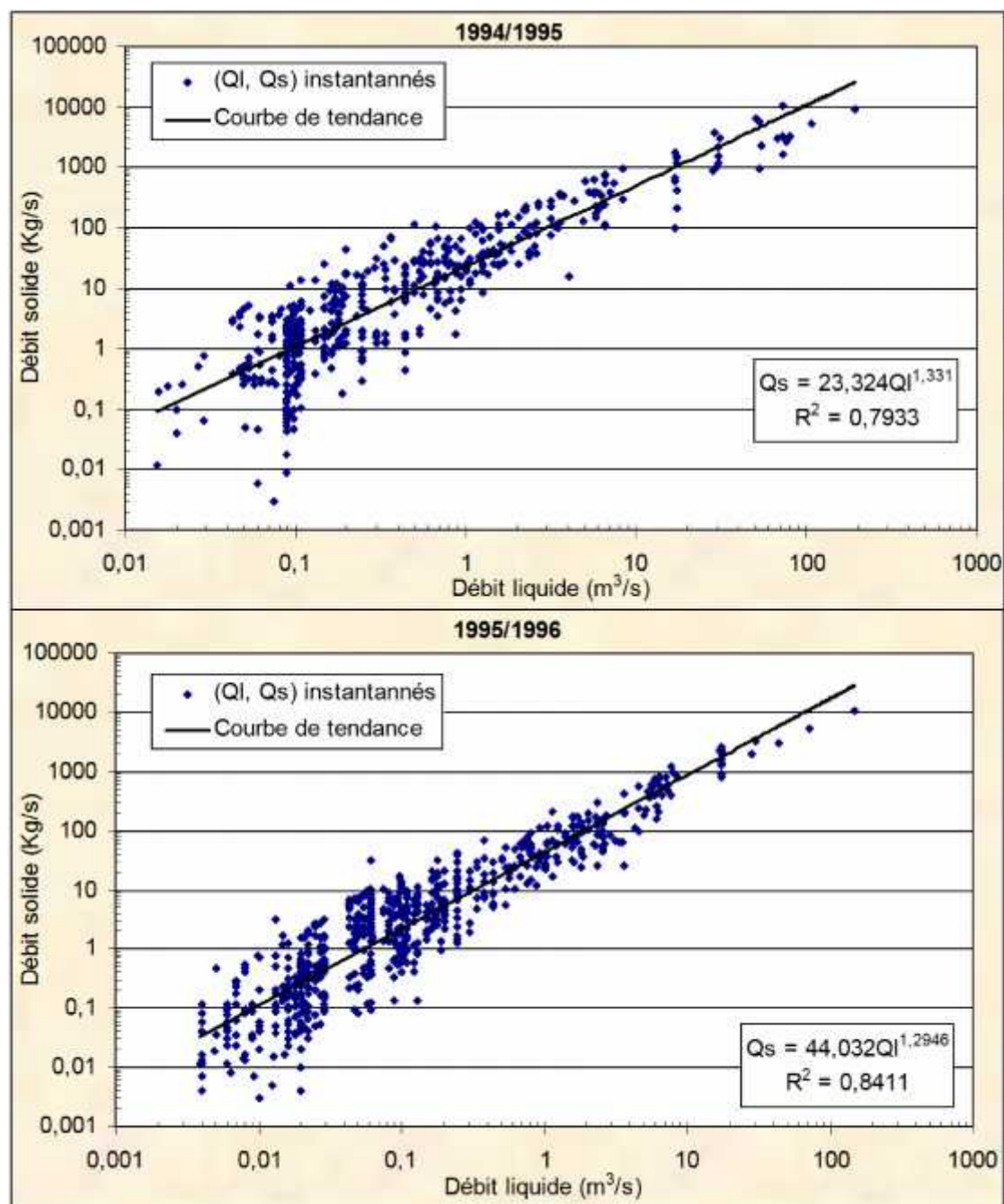


Figure (4.18) : Relations annuelles du débit liquide - débit solide «94/95 et 95/96 » (Station de Sidi AEK Djilali)

Tableau (4.5) : Relations obtenues à l'échelle annuelle ( $Q_s = aQ_l^b$ )

Echelle temporelle	Station de Oued El-Abtal			Station de Sidi AEK Djilali		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
1982/1983				9.332	1.5554	0.8727
1983/1984				19.831	1.6357	0.8162
1984/1985				25.446	1.4237	0.8992
1985/1986	3.0199	1.5301	0.8792	12.445	1.4101	0.7322
1986/1987	3.4873	1.5456	0.8019	13.462	1.5078	0.8475

1987/1988	3.9836	1.5013	0.6677	23.994	1.3088	0.8767
1988/1989	8.5622	1.3296	0.8179	16.257	1.5802	0.8435
1989/1990	7.0918	1.4355	0.8272	25.75	1.4262	0.8851
1990/1991	6.7615	1.3602	0.8062	14.987	1.3273	0.8132
1991/1992	6.6546	1.5221	0.8540	41.536	1.6498	0.7897
1992/1993	14.263	1.3734	0.8245	56.761	1.5822	0.8374
1993/1994	9.0468	1.4391	0.7455	28.021	1.5190	0.8861
1994/1995	17.245	1.2560	0.9676	23.324	1.3310	0.7933
1995/1996	11.882	1.2863	0.9133	44.032	1.2946	0.8411
1996/1997	6.5970	1.4050	0.8533	43.140	1.4896	0.9094
1997/1998	16.774	1.2604	0.9074	29.851	1.3411	0.7815
1998/1999	4.5017	1.5668	0.8464	157.85	1.3845	0.8642
1999/2000	5.9977	1.3773	0.9004	224.43	1.9146	0.7737
2000/2001	2.7863	1.594	0.9069	58.313	1.4474	0.8275

#### 4.4.2.3 Relations intra annuelles (mensuelles)

Dans le but de l'homogénéisation des données, les valeurs instantanées du débit liquide - débit solide prélevées au niveau des deux stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali ont été regroupées aussi par mois durant la période d'étude. Seuls les graphiques des mois d'Octobre et Mai sont donnés en figures (4.19) et (4.20). Les autres sont illustrés dans les annexes (4.4) et (4.5). Le tableau (4.6) résume les relations retenues. Les tailles des échantillons sont illustrées dans le tableau (4.2).

De même qu'à l'échelle annuelle, on trouve pour les deux stations hydrométriques du bassin versant de l'Oued Mina des bonnes relations liant le débit des matières solides en suspension au débit liquide. Les corrélations sont meilleures à l'échelle intra annuelle (mensuelle) car la variation annuelle du transport solide est beaucoup plus importante qu'au cours d'un mois.

Les valeurs des paramètres a et b de la relation en puissance (tableau 4.6) varient d'un mois à un autre et d'une station hydrométrique à une autre dans le bassin versant de l'Oued Mina.

Le facteur a varie de 2.64 (mois de Février) à 16.85 (mois de Juin) pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et de 19.67 (mois de Juillet) à 66.16 (mois d'Avril) pour la station de Sidi AEK Djilali.

L'exposant b varie dans une gamme étroite et est compris entre 1.07 (mois de Juin) et 1.64 (mois de Février) pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et entre 1.09 (mois de Novembre) et 1.48 (mois d'Avril) pour la station de Sidi AEK Djilali.



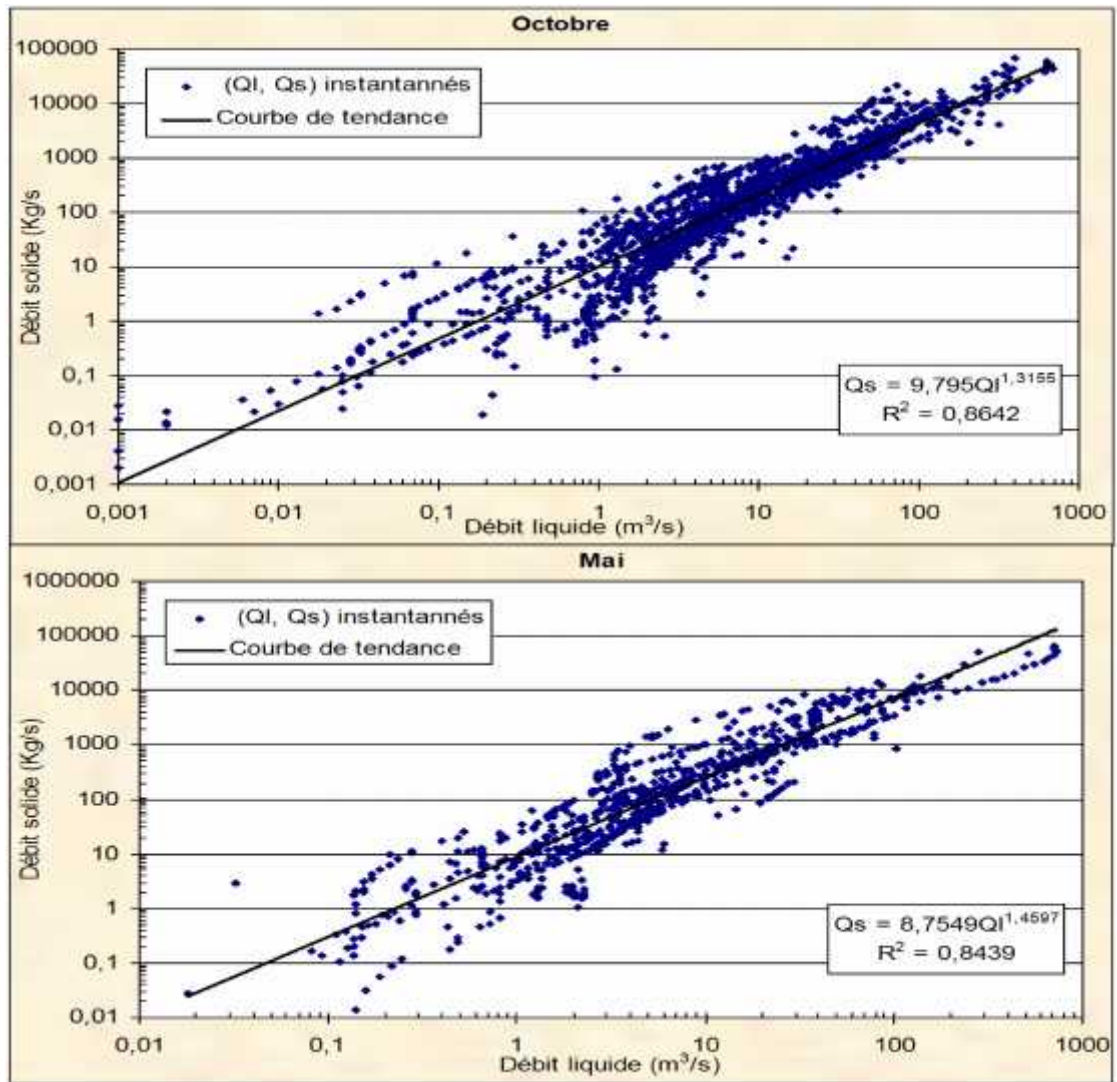


Figure (4.19) : Relations intra annuelles du débit liquide - débit solide «Oct. et Mai »  
(Station de Oued El-Abtal)

Tableau (4.6) : Relations obtenues à l'échelle intra annuelle ( $Q_s = aQ_l^b$ )

Echelle temporelle	Station de Oued El-Abtal			Station de Sidi AEK. Djilali		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
Septembre	14.982	1.2893	0.9116	28.535	1.2855	0.7965
Octobre	9.795	1.3155	0.8642	25.137	1.3832	0.9179
Novembre	10.433	1.1831	0.7593	25.069	1.0918	0.7539
Décembre	6.5527	1.3389	0.8099	30.957	1.2848	0.8227
Janvier	7.3568	1.3974	0.8789	31.036	1.2831	0.8833
Février	2.6393	1.6441	0.8899	23.056	1.1993	0.7307
Mars	3.8274	1.4808	0.8509	22.909	1.1974	0.8392
Avril	6.0893	1.4159	0.8021	66.158	1.4764	0.8784
Mai	8.7549	1.4597	0.8439	37.374	1.3080	0.8857
Juin	16.854	1.0697	0.6470	54.544	1.3335	0.8426
Juillet	7.6093	1.4956	0.8637	19.668	1.2745	0.8274
Août	11.403	1.3533	0.9073	29.269	1.2571	0.941

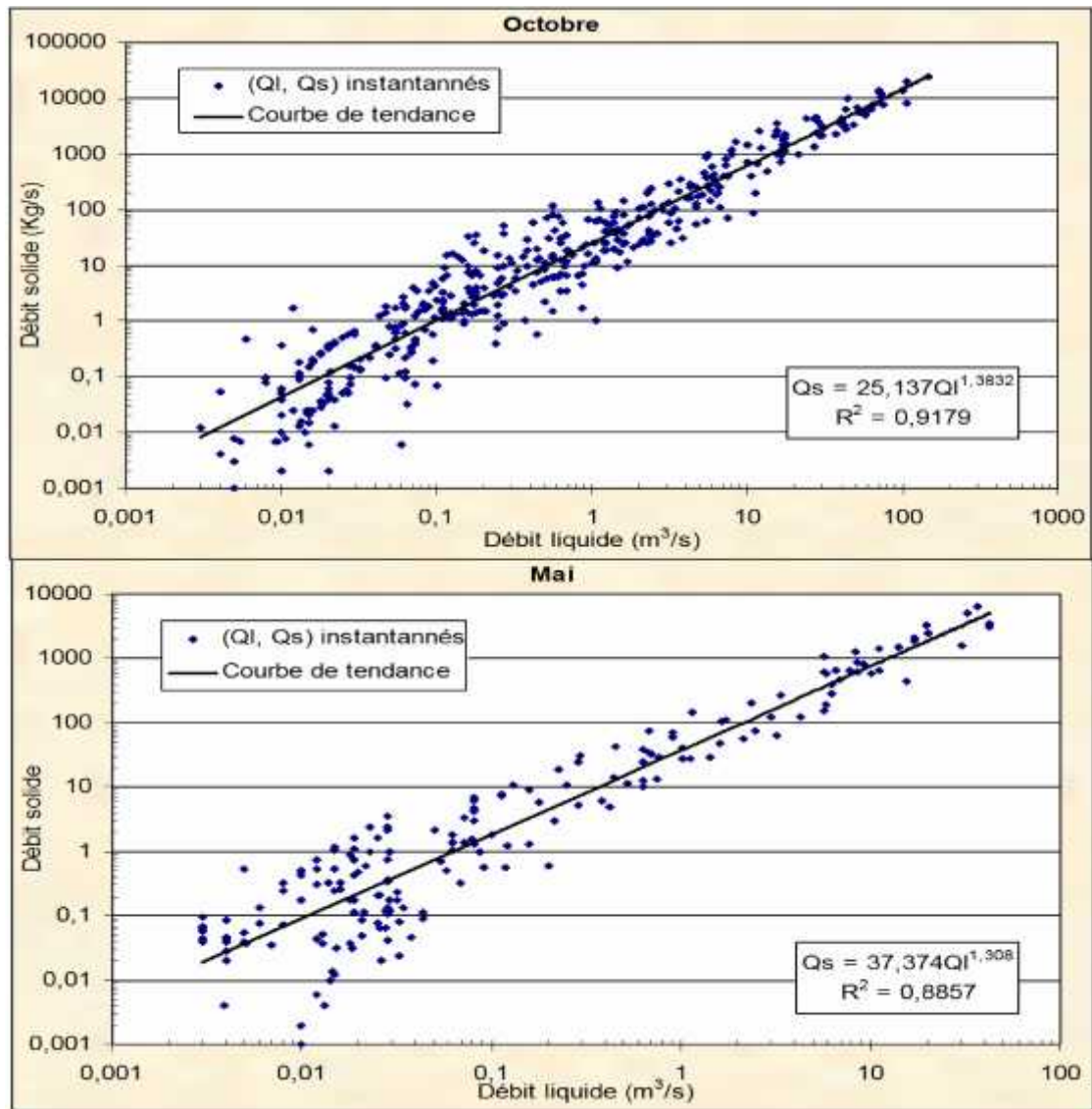


Figure (4.20) : Relations intra annuelles du débit liquide - débit solide «Oct. et Mai »  
(Station de Sidi AEK Djilali)

#### 4.4.2.4 Relations saisonnières

Afin de mettre en exergue l'effet de l'irrégularité du climat sur le transport solide en suspension, nous avons jugé utile de regrouper suivant différents saisons (Automne, Hiver, Printemps et Été) les valeurs instantanées prélevées au niveau des deux stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali. Les figures (4.21) et (4.22) illustrent les relations débit liquide - débit solide instantanées. Les résultats (relations retenues et coefficients de détermination  $R^2$ ) sont récapitulés dans le tableau (4.7). Les tailles des échantillons sont données dans le tableau (4.2).

Tableau (4.7) : Relations obtenues à l'échelle saisonnière ( $Q_s = aQ_l^b$ )

Echelle temporelle	Station de Oued El-Abtal			Station de Sidi AEK. Djilali		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
Automne	11.36	1.2763	0.8528	26.702	1.2642	0.8366
Hiver	5.89	1.4078	0.8546	27.479	1.2496	0.8081
Printemps	4.7893	1.4241	0.8251	29.158	1.2567	0.8558
Été	12.082	1.3006	0.8332	33.247	1.2177	0.8751

De même qu'à l'échelle intra annuelle, on trouve à l'échelle saisonnière pour les deux stations hydrométriques du bassin versant de l'Oued Mina des bonnes relations en puissance (bonnes corrélations) liant le débit des matières solides en suspension au débit liquide.

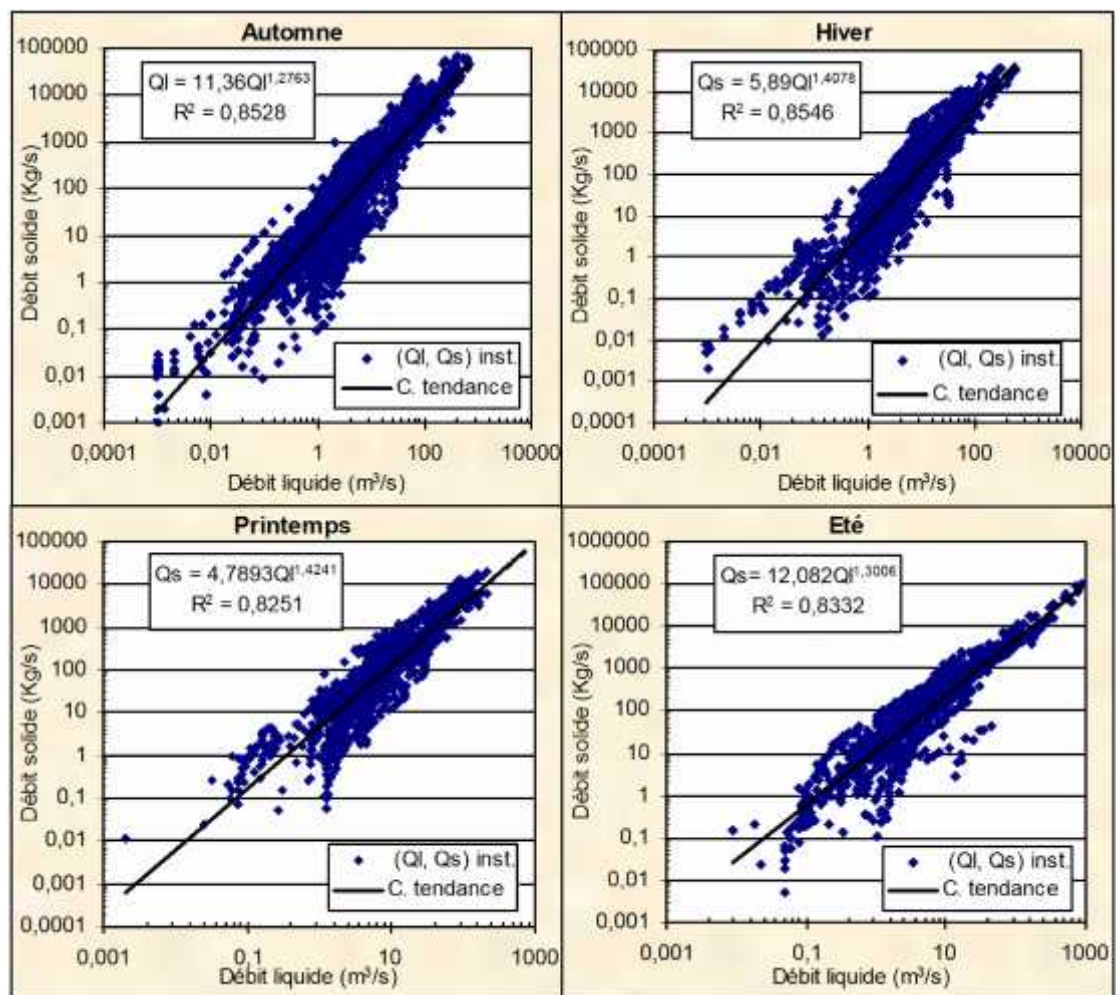


Figure (4.21) : Relations saisonnières du débit liquide - débit solide  
(Station de Oued El-Abtal)



Les valeurs des paramètres a et b de la relation en puissance (tableau 4.7) varient peu d'une saison à une autre et même d'une station hydrométrique à une autre dans le bassin versant de l'Oued Mina.

Le facteur a varie de 4.79 (saison de Printemps) à 12.08 (saison d'Eté) pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et de 26.70 (saison d'Automne) à 33.25 (saison d'Eté) pour la station de Sidi AEK Djilali.

L'exposant b varie dans une gamme étroite et est compris entre 1.28 (saison d'Automne) et 1.42 (saison de Printemps) pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et entre 1.22 (saison d'Eté) et 1.26 (saison d'Automne) pour la station de Sidi AEK Djilali.

Le facteur a et surtout l'exposant b présentent des valeurs très proches et sont proches aussi de celles des relations globales pour les deux stations hydrométriques du bassin.

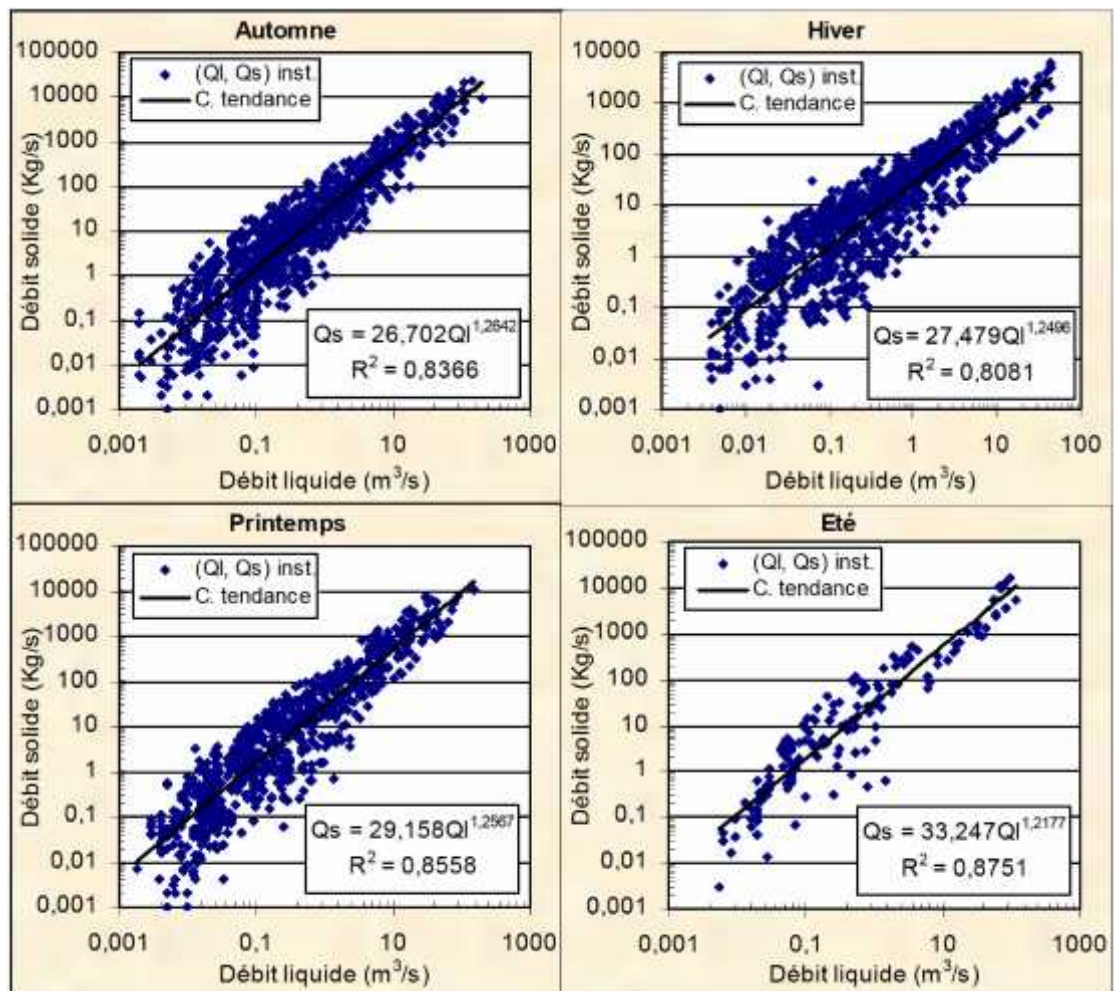


Figure (4.22) : Relations saisonnières du débit liquide - débit solide  
(Station de Sidi AEK Djilali)

Ceci exprime bien que l'irrégularité du climat n'a pas d'effet significatif sur les valeurs des paramètres  $a$  et  $b$ , et par conséquent sur le transport des matières solides en suspension. Cela montre aussi que les paramètres  $a$  et  $b$  (transport solide en suspension) varient, probablement, beaucoup plus en fonction des caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant ou des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau qu'en fonction du climat.

Le facteur  $b$  est peut être lié directement à la superficie de drainage en période de crue mais il exprime aussi l'importance du taux des transports solides. Le paramètre  $a$  exprime l'état du sol d'un bassin d'une manière générale et son degré de saturation en particulier [51, 87].

#### 4.4.2.5 Relations à l'échelle d'un événement crue

Afin de mieux comprendre le phénomène du transport solide en suspension, nous avons étudié la relation débit liquide - débit solide instantanés en se basant beaucoup plus sur les plus fortes crues enregistrées au niveau des deux stations hydrométrique de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali. Seuls les graphiques des crues de 02-06 Novembre 1994, 04-06 Février 1996, 25-26 Avril 1997 et 22-27 Août 1997 de la station de Oued El-Abtal et 13-14 Octobre 1986, 03-06 Janvier 1990, 08-10 Mars 1996 et 25 Juillet 1997 de la station de Sidi AEK Djilali sont donnés en figures (4.23) et (4.24). Les tableaux (4.8) et (4.9) résument les relations obtenues, leurs coefficients de détermination ainsi que les tailles des échantillons qui diffèrent d'une crue à un autre en fonction des précipitations, des caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant et des conditions d'échantillonnage.

L'averse est l'unité temporelle la plus adéquate pour les analyses hydrologiques en relation avec le transport solide [93]. On trouve à l'échelle des crues pour les deux stations hydrométriques du bassin versant de l'Oued Mina des bonnes relations en puissance (bonnes corrélations) liant le débit des matières solides en suspension au débit liquide.

L'analyse de quelques crues survenues durant la période considérée apporte des différences assez concluantes. Si pour les échelles temporelles précédentes la limite de variation de  $a$  et  $b$  était plutôt faible, on constate qu'elle est plus étendue à l'échelle des crues (tableaux 4.8 et 4.9).

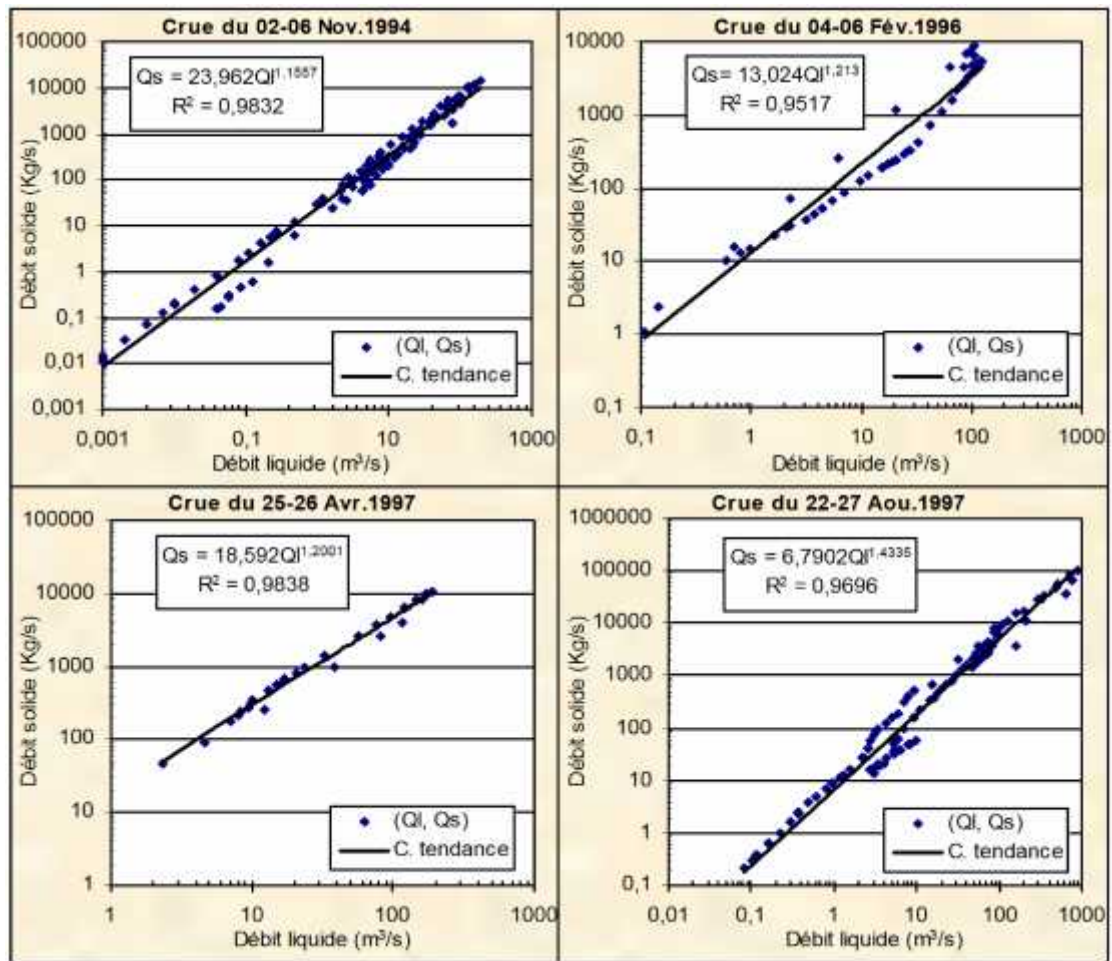


Figure (4.23) : Relations débit liquide - débit solide à l'échelle des crues  
(Station de Oued El-Abtal)

Le facteur  $a$  a varié de 2.42 (crue de 07 à 10 Oct. 1999) à 26.13 (crue de 15 à 19 Sep. 1997) pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et de 2.49 (crue de 13 à 17 Mar. 1991) à 430.79 (crue de 15 à 19 Nov. 2000) pour la station de Sidi AEK Djilali.

L'exposant  $b$  est compris entre 1.16 (crue de 02 à 06 Nov. 1994) et 1.69 (crue de 10 à 19 Nov. 2000) pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et de 1.16 (crue de 25 Jul. 1997) à 2.39 (crue de 17 Oct. 1999) pour la station de Sidi AEK Djilali.

Les coefficients de variation de  $a$  et  $b$  sont respectivement 0.64 et 0.12 pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et, 0.78 et 0.11 pour la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali. La majorité des crues marquent une évolution inverse des paramètres  $a$  et  $b$ .

Les fortes valeurs de  $a$  et  $b$  ont été apportées par les crues d'Automne, d'Hiver, de Printemps que par les crues d'Été pour la période concerné par l'analyse. Cela montre encore que les paramètres  $a$  et  $b$  (transport solide en suspension) varient, probablement, beaucoup plus en fonction des caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant ou des

conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau qu'en fonction du climat. De ce fait, nous avons jugé utile d'analyser cette variation de  $a$  et  $b$  en fonction des données hydro-pluviométriques du bassin en fin de ce chapitre (section 4.6).

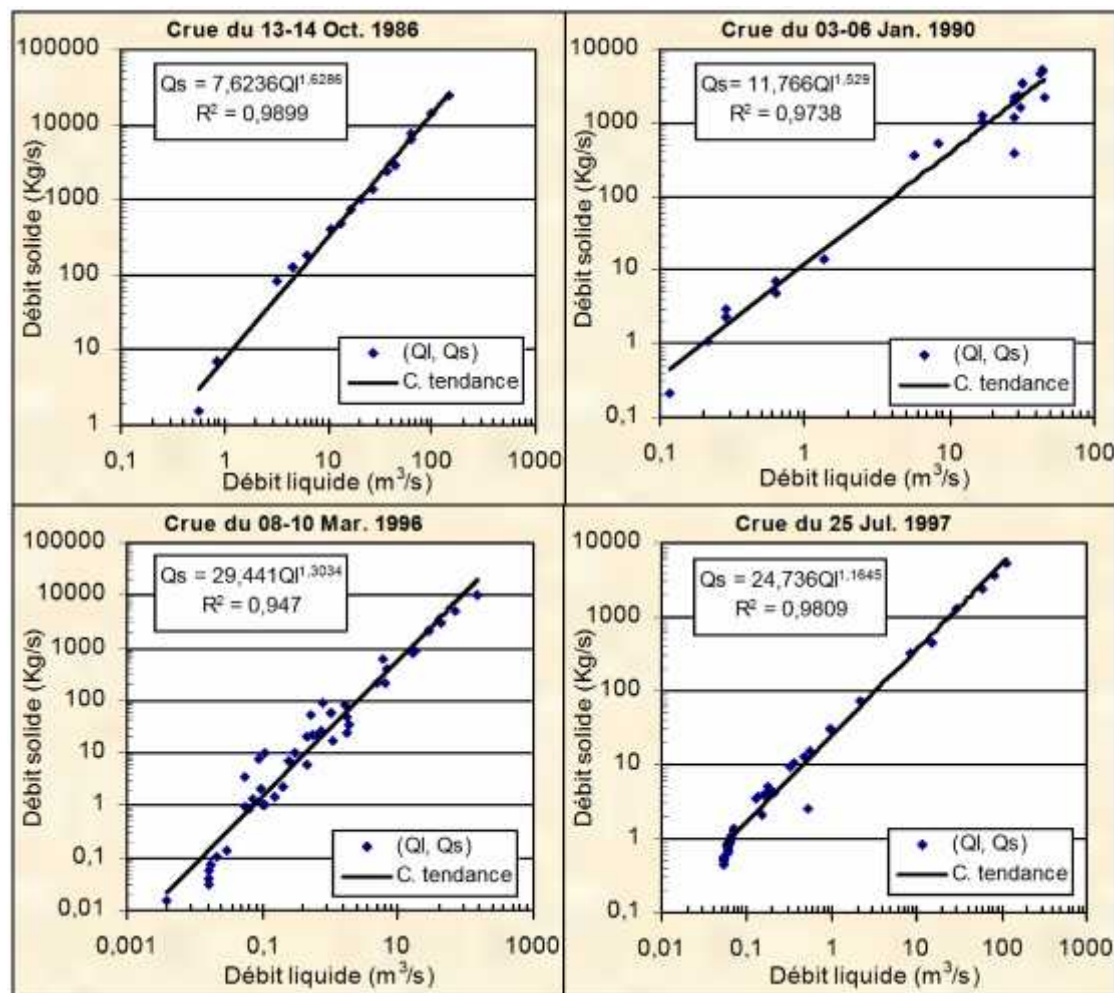


Figure (4.24) : Relations débit liquide - débit solide à l'échelle des crues  
(Station de Sidi AEK Djilali)

Tableau (4.8) : Relations obtenues à l'échelle des crues ( $Q_s = aQ_l^b$ )  
(Station de Oued El-Abtal)

Crue	Taille « n »	a	b	R <sup>2</sup>
16-20 Oct. 1986	146	6.7806	1.4397	0.9247
11-13 Jul. 1987	71	2.3115	1.6051	0.9579
03-06 Oct. 1988	106	4.1136	1.5372	0.9332
31 Aou. - 03 Sep. 1989	87	9.8197	1.2135	0.9505
01-06 Mai. 1990	165	6.6787	1.4279	0.9582
13-17 Mar. 1991	95	1.5968	1.6882	0.9420
03-05 Oct. 1991	38	19.978	1.1940	0.9697
05-07 Mai. 1993	59	9.6836	1.5374	0.9251

23-25 Sep. 1993	68	11.429	1.3362	0.9682
19-22 Oct. 1993	75	11.461	1.3016	0.9288
22 Sep. – 02 Oct.1994	202	13.856	1.3262	0.9580
16-21 Oct. 1994	92	10.907	1.3669	0.9690
02-06 Nov. 1994	108	23.962	1.1557	0.9832
12-15 Jan. 1996	119	2.9519	1.6337	0.9333
04-06 Fév. 1996	47	13.024	1.2130	0.9517
13-16 Mar. 1996	60	3.5958	1.4306	0.8523
10-12 Sep. 1996	34	2.5056	1.6913	0.9882
25-26 Avr. 1997	30	18.592	1.2001	0.9838
22-27 Aou. 1997	107	6.7902	1.4335	0.9696
15-19 Sep. 1997	96	26.125	1.2815	0.9538
06-08 Oct. 1997	48	16.012	1.2711	0.9322
27-29 Nov. 1997	48	4.5794	1.4175	0.9447
23-26 Mai. 1998	48	13.707	1.6816	0.9297
27-28 Sep. 1999	47	17.011	1.2288	0.9962
07-10 Oct. 1999	59	2.4231	1.5630	0.9780
17-18 Oct. 1999	36	3.5747	1.3948	0.9752

Tableau (4.9) : Relations obtenues à l'échelle des crues ( $Q_s=aQI^b$ )

(Station de Sidi AEK Djilali)

Crue	Taille « n »	a	b	R <sup>2</sup>
27-30 Nov. 1982	36	4.9169	1.6958	0.9455
02 Mai. 1985	11	50.816	1.3047	0.9717
13-14 Oct. 1986	16	7.6236	1.6286	0.9899
16-20 Nov. 1986	21	10.153	1.6187	0.8763
11 Jul. 1987	9	17.181	1.2001	0.8481
30 Sep. – 01 Oct.1987	21	9.6282	1.6166	0.9543
01-04 Jan. 1988	18	7.6565	1.6197	0.9060
03-04 Oct. 1988	10	22.939	1.4780	0.9421
29-31 Mar. 1989	19	8.8591	1.6203	0.9723
03-06 Jan. 1990	23	11.766	1.5290	0.9738
01-04 Mai. 1990	25	27.626	1.3602	0.9519
13-17 Mar. 1991	29	2.4857	1.7789	0.8450
19-22 Oct. 1993	14	16.72	1.5148	0.9622
28-30 Sep. 1994	89	12.386	1.3153	0.9601
16-20 Oct. 1994	71	18.433	1.4340	0.9253
11-15 Mar. 1995	52	25.438	1.2902	0.9586
08-10 Mar. 1996	43	29.441	1.3034	0.9470
20-22 Avr. 1997	34	82.932	1.4092	0.9646
25 Jul. 1997	46	24.736	1.1645	0.9809
07 Oct. 1997	45	14.889	1.4818	0.9655
13 Déc. 1997	17	20.493	1.6021	0.8370
16-17 Mar. 1999	35	106.87	1.3027	0.9519
28-29 Mar. 1999	34	104.08	1.4083	0.9436
27 Sep. 1999	23	75.429	1.6435	0.9565
17 Oct. 1999	22	430.79	2.3868	0.9495
15-19 Nov. 2000	19	58.415	1.4715	0.8514



#### 4.5 Résidus de la régression intra annuelle

Les méthodes de correction des courbes de transport solide en suspension bien qu'utilisées intensivement ne sont pas recommandées dans ce cas. La correction du biais et la réestimation des charges solides en suspension à partir des données journalières de débit liquide surestime les débits solides déjà surestimés surtout pour le biais de haut en bas de la courbe d'estimation.

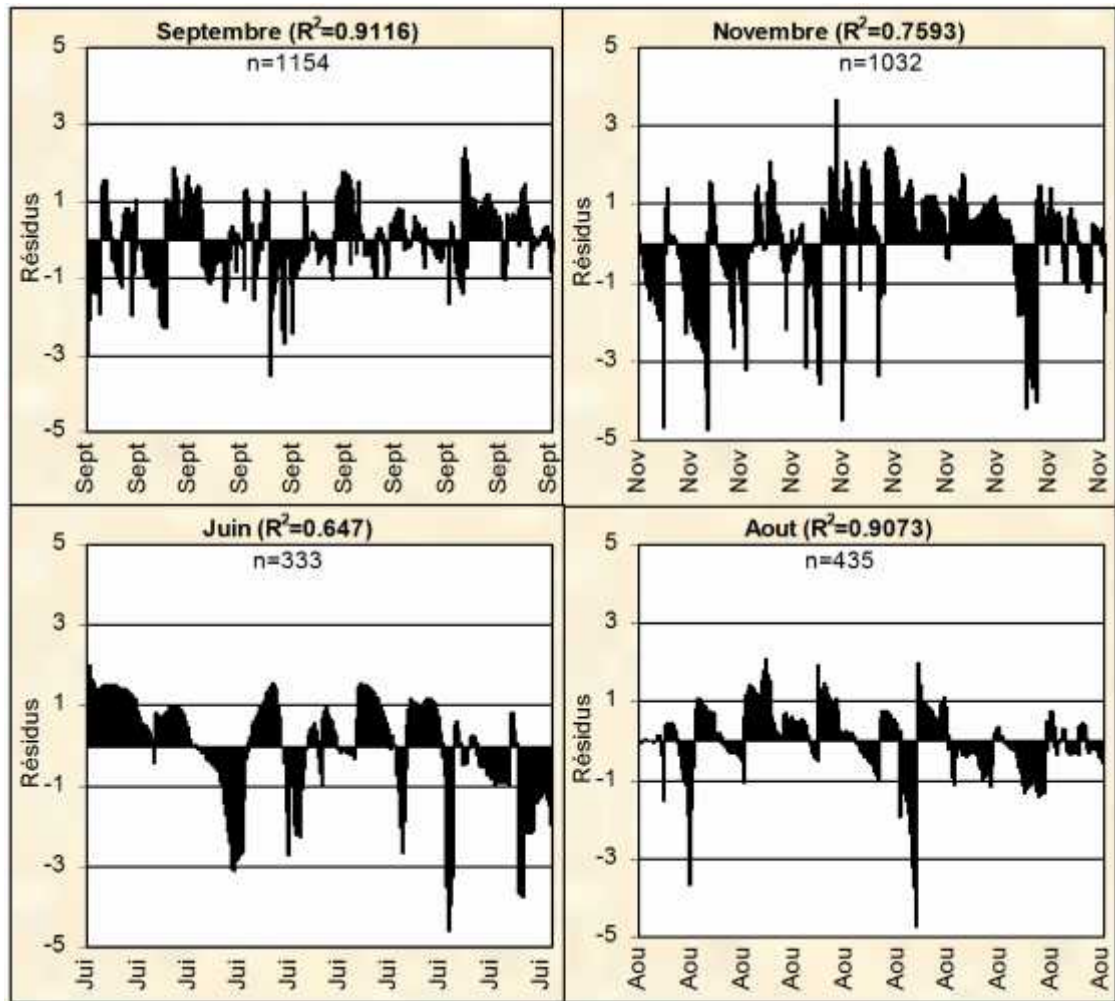


Figure (4.25): Résidus de la régression à l'échelle intra annuelle (Station de Oued El-Abtal), 1985/1986 à 2000/2001

Le calcul statistique et les résultats graphiques montrent que les courbes intra annuelles de transport solide sont faiblement biaisées. La dispersion des points autour de la droite (courbe) ajustée est faible, notamment autour de la partie supérieure des débits élevés qui contribuent très fortement à la charge solide annuelle. La variation de la concentration des sédiments en suspension à des débits identiques est aussi faible à l'échelle mensuelle.

Les coefficients de corrélation sont bonne et varient de 0.8044 (mois de Juin) à 0.9548 (mois de septembre) pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et de 0.8548 (mois de Février) à 0.9701 (mois d’Août) pour la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali. Les écarts entre les séries logarithmiques estimées et celles observées (débits solides observés - débits solides estimés) au niveau des deux stations hydrométriques pour tous les mois indiquent que les erreurs associées au prélèvement et à la dispersion de données sont à un niveau acceptable. Ils sont plus significatifs en signe moins (-) qu’en signe plus (+). Cela montre que les courbes intra annuelles d’estimation surévaluent les débits solides.

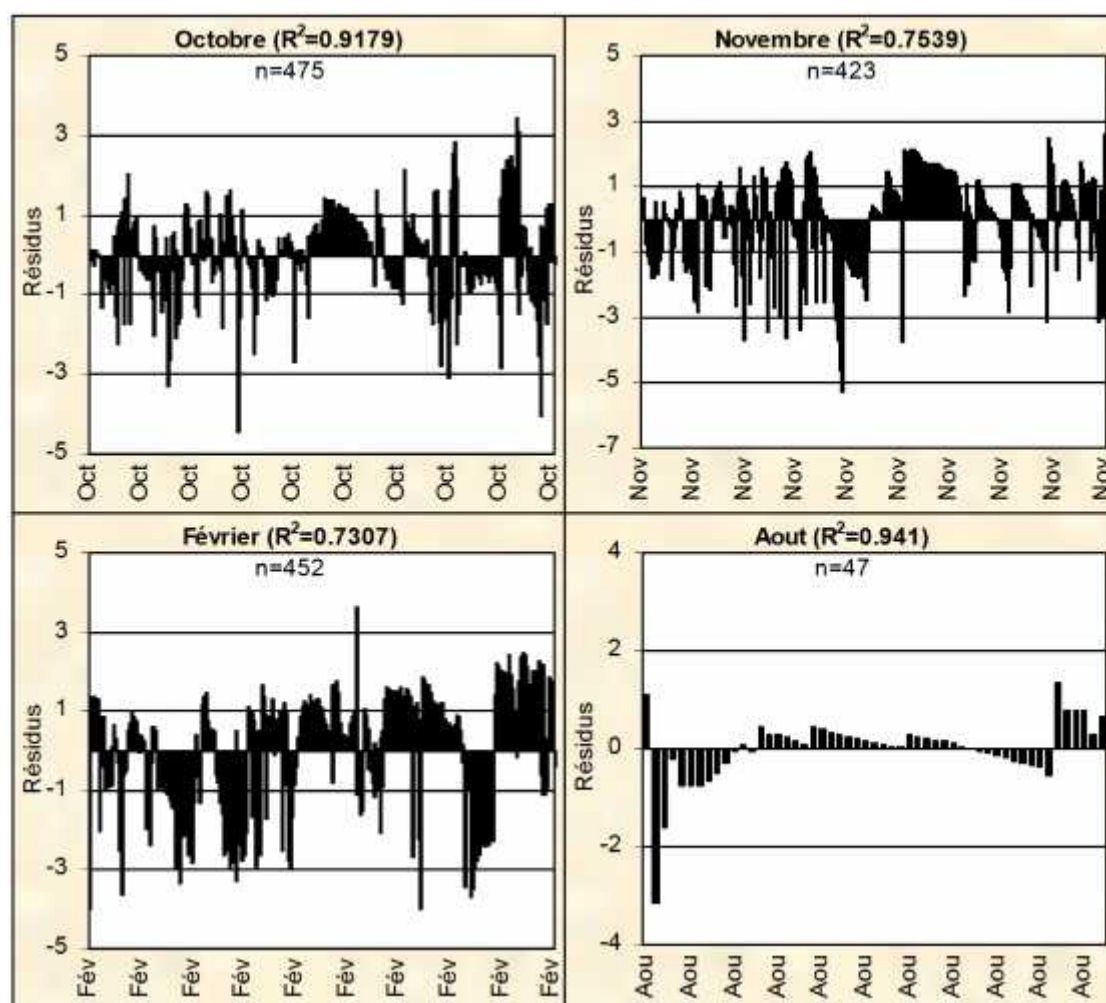


Figure (4.26): Résidus de la régression à l’échelle intra annuelle (Station de Sidi AEK Djilali), 1982/1983 à 200/2001

Seuls les graphiques des résidus de la régression pour les mois des plus faibles (Novembre et Juin pour la station de Oued El-Abtal et Novembre et Février pour la station de Sidi AEK Djilali) et plus forts (Septembre et Août pour la station de Oued El-Abtal et

Octobre et Août pour la station de Sidi AEK Djilali) coefficients de déterminations sont montrés dans les figures (4.25) et (4.26). Les autres sont donnés dans les annexes (4.6) et (4.7).

Les ajustements des résidus à la loi Normale apportent des explications sur la précision des courbes intra annuelles. Plus la dispersion des points autour de la courbe d'estimation du transport solide est faible, plus l'ajustement des résidus à la loi Normale est bon et inversement. Seuls les ajustements des résidus pour les mois cités plus haut sont montrés dans les figures (4.27) et (4.28). Les autres sont donnés dans les annexes (4.8) et (4.9).

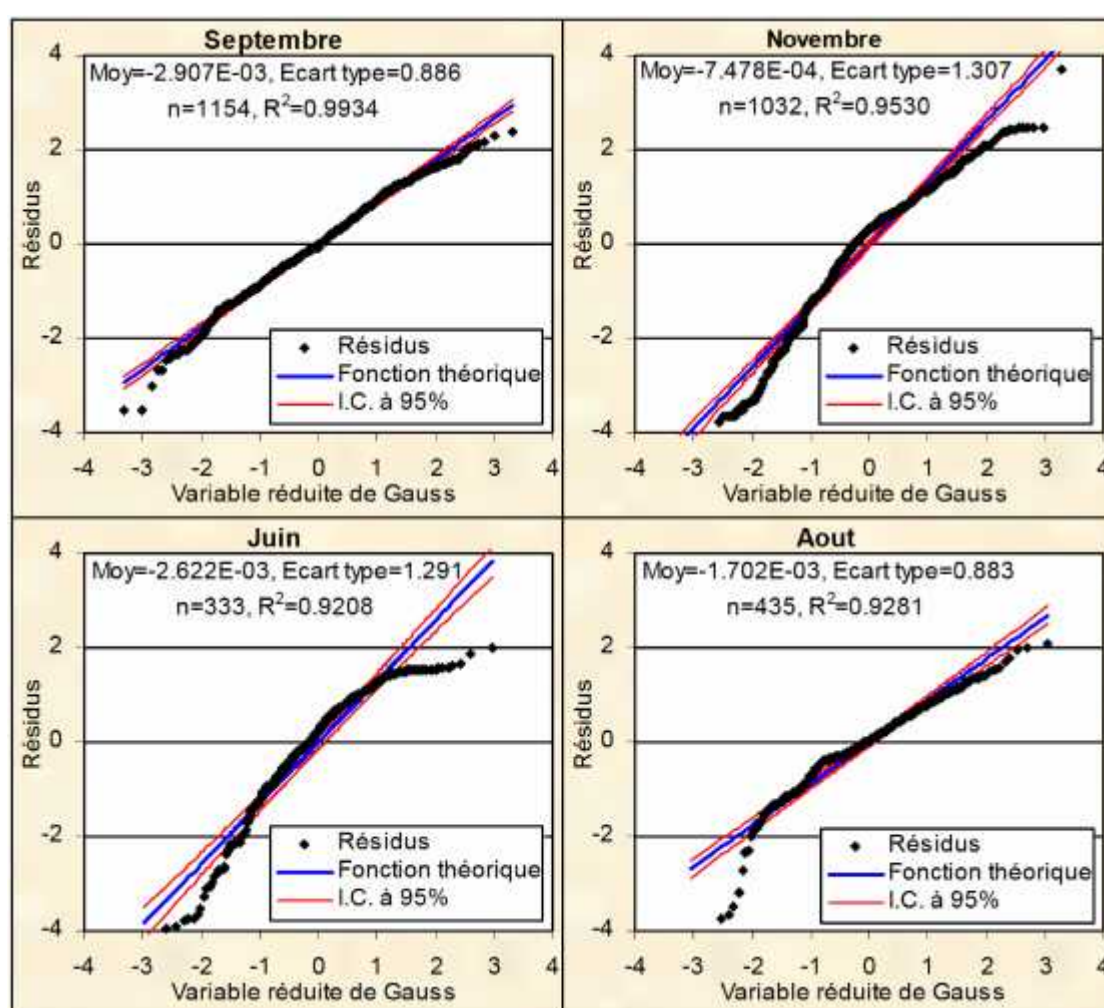


Figure (4.27): Ajustement des résidus intra annuelles à la loi Normale (Station de Oued El-Abtal), 1985/1986 à 2000/2001

L'allure des points et les résultats des tests d'adéquation, du coefficient de détermination  $R^2$  couramment appelé *Probability Plot Correlation test PPC* (figures 4.27 et

4.28) et de Kolmogorov-Smirnov K-S (figure 4.29), résumés dans le tableau (4.10) montrent que les résidus intra annuelles pour tous les mois s'ajustent en général bien à la loi Normale et répondent aux critères spécifiques des résidus (moyenne nulle et écart type  $\sigma$ ), néanmoins l'hypothèse nulle de K-S est acceptée avec précaution pour les mois de Septembre, Novembre et Juin (station de Oued El-abtal) et Février (station de Sidi AEK Djilali) du fait que les écarts maximaux de  $D_{max}$  qui existent entre la fonction de densité cumulée observée et la fonction de répartition théorique à un risque d'erreur de 1% ( $\alpha\%$ ) sont légèrement supérieures aux valeurs critiques  $D_{n,\alpha\%}$ . Les valeurs des écarts ayant des fréquences très rares correspondent à des débits solides observés douteux qui méritent d'être vérifiés. Le retour aux originaux ne met pas en évidence d'erreurs sur ces mesures de débits solide. Il faut donc considérer que ces observations sont bonnes mais qu'elles avaient des faibles probabilités d'arriver.

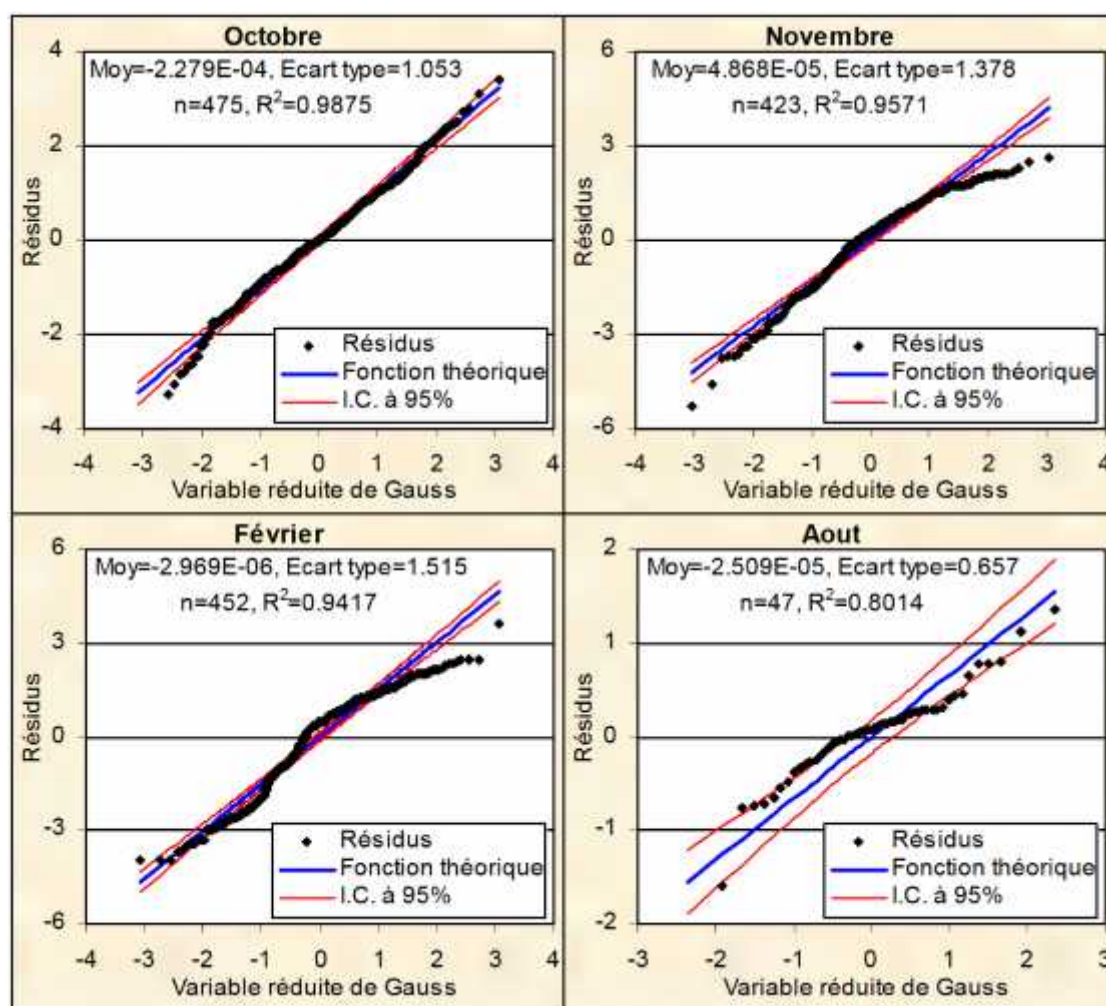


Figure (4.28): Ajustement des résidus intra annuelles à la loi Normale (Station de Sidi AEK Djilali), 1982/1983 à 2000/2001



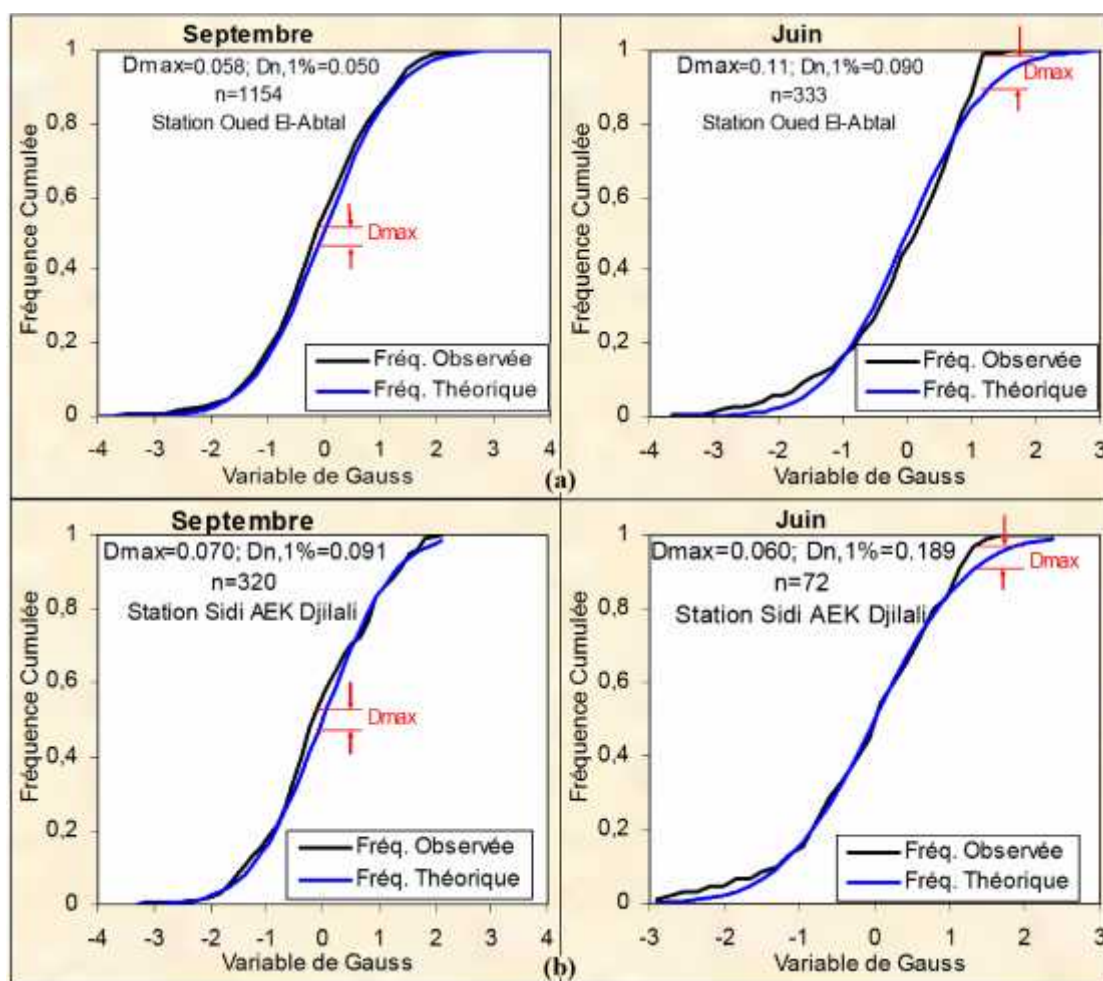


Figure (4.29): Test de Kolmogorov-Smirnov d'ajustement des résidus intra annuelles à la loi Normale (Septembre et Juin), (a) Station de Oued El-Abtal (b) Station de Sidi AEK Djilali)

Table (4.10): Résultats des tests d'ajustement des résidus à la loi Normale

Station	Station Oued El-Abtal					Station Sidi AEK Djilali				
	Test	K-S			PPC	K-S			PPC	
Mois	n	Dmax	D <sub>n,5%</sub>	D <sub>n,1%</sub>	R <sup>2</sup>	n	Dmax	D <sub>n,5%</sub>	D <sub>n,1%</sub>	R <sup>2</sup>
Septembre	1154	0.058	0.040	0.050	0.9934	320	0.070	0.076	0.091	0.9889
Octobre	1919	0.035	0.031	0.037	0.9771	475	0.062	0.062	0.075	0.9875
Novembre	1032	0.067	0.043	0.051	0.9530	423	0.064	0.066	0.079	0.9571
Décembre	832	0.055	0.047	0.057	0.9809	364	0.062	0.071	0.085	0.9943
Janvier	975	0.050	0.044	0.052	0.9869	383	0.074	0.070	0.083	0.9199
Février	873	0.051	0.047	0.053	0.9890	452	0.098	0.064	0.077	0.9417
Mars	952	0.053	0.044	0.053	0.9856	472	0.032	0.063	0.075	0.9851
Avril	739	0.058	0.050	0.060	0.9253	211	0.066	0.094	0.112	0.9554
Mai	757	0.058	0.049	0.059	0.9862	158	0.042	0.108	0.130	0.9718
Juin	333	0.110	0.075	0.090	0.9208	72	0.060	0.158	0.189	0.9611
Juillet	292	0.089	0.080	0.095	0.8755	34	0.115	0.227	0.273	0.9525
Août	435	0.067	0.065	0.078	0.9281	47	0.173	0.194	0.233	0.8014

## 4.6 Analyse des courbes de transport solide en suspension

### 4.6.1 Introduction

La relation entre le débit solide et le débit liquide dans les rivières Algériennes est inconnue et difficile à évaluer. Certaines de ces difficultés sont liées aux méthodes d'échantillonnage et au manque de données particulièrement celles relatives à la concentration des sédiments en suspension. Les hydrologues utilisent souvent les courbes de transport solides pour définir la relation débit liquide/débit solide et pour estimer les concentrations de sédiments en suspension à utiliser pour les calculs des flux.

Bien qu'il existe de nombreuses méthodes pour le développement des courbes de transport solide en suspension, la plus couramment utilisée est la fonction puissance puissance  $Y=aX^b$  reliant la concentration de sédiments en suspension (ou le débit solide) au débit liquide. Ce chapitre présente une analyse qualitative des paramètres  $a$  et  $b$  en vue d'une meilleure compréhension de cette relation et de relier ces paramètres aux facteurs induisant le débit solide.

Pour déterminer la variation des paramètres  $a$  et  $b$  de la relation de puissance liant le débit solide au débit liquide, une approche à différentes échelles temporelles, basée sur les modèles de régression obtenus au début de ce chapitre à partir de 10293 (station Oued El-Abtal) et 3411 (station Sidi AEK Djilali) valeurs instantanées de la concentration  $C$  et du débit liquide  $Q$  observées, est adoptée en tenant compte des données hydro-pluviométriques du bassin versant de l'Oued Mina. L'approche à différentes échelles temporelles fournira des informations très utiles pour l'estimation des apports solides. Elle servira aussi à décrire la dynamique sédimentaire en période de crues, propre au bassin considéré.

### 4.6.2 Analyse de la relation $Q_s=aQ_l^b$

L'analyse de la relation de puissance à l'échelle du bassin de l'Oued Mina laisse apparaître une certaine tendance d'évolution des paramètres  $a$  et  $b$ .

#### 4.6.2.1 Echelle annuelle

Les paramètres  $a$  et  $b$  de la relation de puissance liant le débit solide au débit liquide, les valeurs de la pluie moyenne annuelle  $P_{an}$  ainsi que de l'hydraulicité  $K_i$ , défini comme étant le rapport du débit moyen annuel de l'année considérée au débit moyen interannuel, représentatifs de la période d'étude sont illustrés dans le tableau (4.11). L'année hydrologique est considérée comme étant sèche si l'hydraulicité  $K_i < 1$  (valeurs soulignées) et humide si  $K_i > 1$ , notant qu'une même année hydrologique peut être sèche à la station

hydrométrique de Oued El-Abtal et humide à la station de Sidi AEK Djilali et vice versa. Cela confirme d'avantage l'irrégularité du régime pluviométrique et hydrologique du bassin versant de l'Oued Mina. Ici les valeurs de Ki sont calculées sur la base du débit moyen interannuel dans la période (1977/1978 à 2001/2002). Les résultats sont presque les mêmes que ceux présentés dans les tableaux (3.16) et (3.17) du chapitre 3.

Tableau (4.11) : Pan, Ki et paramètres de la relation de puissance

Année	Station de Oued El-Abtal					Station de Sidi AEK Djilali				
	Pan <sup>*</sup> mm	a	b	Ki	R <sup>2</sup> %	Pan <sup>**</sup> mm	a	b	Ki	R <sup>2</sup> %
82/83	238					284	9.33	1.55	1.96	87
83/84	226					298	19.83	1.64	1.06	82
84/85	238					249	25.45	1.42	<u>0.54</u>	90
85/86	295	3.02	1.53	1.32	88	237	12.45	1.41	1.29	73
86/87	316	3.49	1.54	1.27	80	266	13.46	1.51	3.39	85
87/88	255	3.98	1.50	<u>0.74</u>	67	271	23.99	1.31	1.89	88
88/89	295	8.56	1.33	<u>0.63</u>	82	255	16.26	1.58	<u>0.70</u>	84
89/90	223	7.09	1.43	1.05	83	207	25.75	1.43	1.66	88
90/91	274	6.76	1.36	<u>0.68</u>	81	369	14.99	1.33	2.69	81
91/92	288	6.65	1.52	<u>0.37</u>	85	268	41.54	1.65	<u>0.19</u>	79
92/93	218	14.26	1.37	<u>0.44</u>	82	203	56.76	1.58	<u>0.20</u>	84
93/94	216	9.05	1.44	<u>0.66</u>	74	232	28.02	1.52	<u>0.65</u>	89
94/95	280	17.24	1.26	1.71	97	275	23.32	1.33	<u>0.76</u>	79
95/96	510	11.88	1.29	2.87	91	466	44.03	1.29	<u>0.44</u>	84
96/97	244	6.60	1.40	1.17	85	192	43.14	1.49	<u>0.23</u>	91
97/98	331	16.77	1.26	<u>0.66</u>	91	282	29.85	1.34	<u>0.11</u>	78
98/99	215	4.50	1.57	1.33	85	202	157.85	1.38	<u>0.09</u>	86
99/00	218	5.99	1.38	<u>0.60</u>	90	236	224.43	1.91	<u>0.02</u>	77
00/01	276	2.79	1.59	1.02	91	278	58.31	1.45	0.38	83
Moy	278	8.04	1.42	1.03	84	267	45.72	1.48	0.96	83
CV	0.26	0.58	0.08	0.60	9%	0.24	1.19	0.10	0.99	6%
Q <sub>moy</sub>	Q <sub>moy(77/78-01/02)</sub> =2.102m <sup>3</sup> /s					Q <sub>moy(77/78-01/02)</sub> =0.127 m <sup>3</sup> /s				

\*Moyenne de toutes les stations, \*\* moyenne des stations: Sidi AEK Djilali, SMBA et Nesmoth

Au cours de la période d'observation (1985/1986-2000/2001 pour la station de Oued El-Abtal et 1982/1983-2000/2001 pour la station de Sidi AEK Djilali), la variation des paramètres de la relation de puissance est marquée par une faible variabilité de l'exposant b et une instabilité du paramètre a (figure 4.30). On constate que l'exposant b varie entre 1.26 et 1.59 pour la station de Oued El-Abtal et entre 1.30 et 1.91 pour la station de Sidi AEK Djilali alors que a varie entre 2.79 et 17.25 pour la station de Oued El-Abtal et entre 9.33 et 224.43 pour la station de Sidi AEK Djilali. Des graphes de la figure (4.31), on observe une

évolution inverse des paramètres  $a$  et  $b$  pour la station de Oued El-Abtal; lorsque  $a$  augmente  $b$  diminue et inversement. Pour la station de Sidi AEK Djilali on observe une évolution inverse des paramètres  $a$  et  $b$  sur une partie ( $b < 1.5$ ) et une même tendance d'évolution sur une autre partie ( $b > 1.5$ ). La variation du paramètre  $a$  est beaucoup plus liée à la production de sédiments en suspension.

Dans le but de connaître la variation du paramètre  $a$  en fonction de l'exposant  $b$ , les graphiques de la figure (4.31) ont été réalisés. Les relations obtenues montrent que pour les années sèches, la valeur du paramètre  $a$  est élevée,  $b$  varie très peu. Pour les années humides,  $a$  diminue de manière très nette et  $b$  varie très peu. Le bassin est bien drainé particulièrement pendant les années 1994/1995 et 1995/1996 pour la station de Oued El-Abtal et pendant les années 1982/1983, 1986/1987, 1987/1988 et 1990/1991 pour la station de Sidi AEK Djilali.

Le facteur  $b$  étant lié directement à la surface de drainage en période de crues, aux caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques des bassins versants et des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau. On observe aussi une faible variation de cet exposant tel que  $C_v = 0.08$  (moyenne = 1.42) pour la station de Oued El-Abtal et  $C_v = 0.10$  (moyenne = 1.48) pour la station de Sidi AEK Djilali. Le coefficient de variation du paramètre  $a$  est de 0.58 (moyenne = 8.04) pour la station de Oued El-Abtal et 1.19 (moyenne = 45.72) pour la station de Sidi AEK Djilali.

Le paramètre  $a$  explique, en plus de l'importance du taux du transport solide, l'état du sol d'un bassin d'une manière générale et son degré de saturation en particulier, notion très influente sur l'écoulement. Sa variation au cours des années sèches est très marquée.

Les graphiques de la figure (4.32) montrent pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal, que ce paramètre  $a$ , désignant l'érodabilité, est bien lié à l'indice  $K_i$  uniquement en période humide avec un coefficient de corrélation ( $R = 0.72$  pour un polynôme du second degré). Pour la station de Sidi AEK Djilali, la relation est très forte dans l'ensemble entre  $a$  et  $K_i$  avec un coefficient de corrélation ( $R = 0.88$  pour un modèle de puissance).



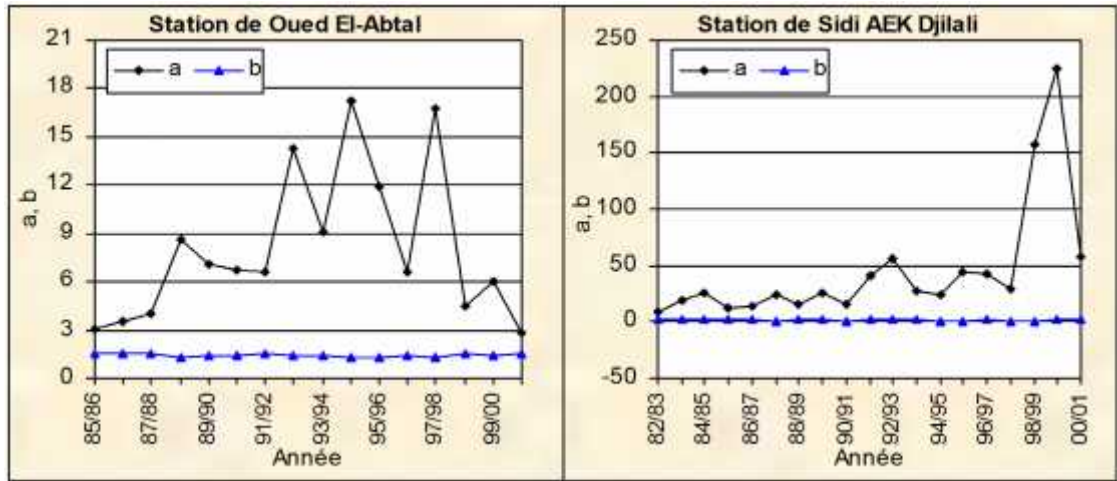


Figure (4.30) : Variation chronologique du paramètre «a» et de l'exposant «b»

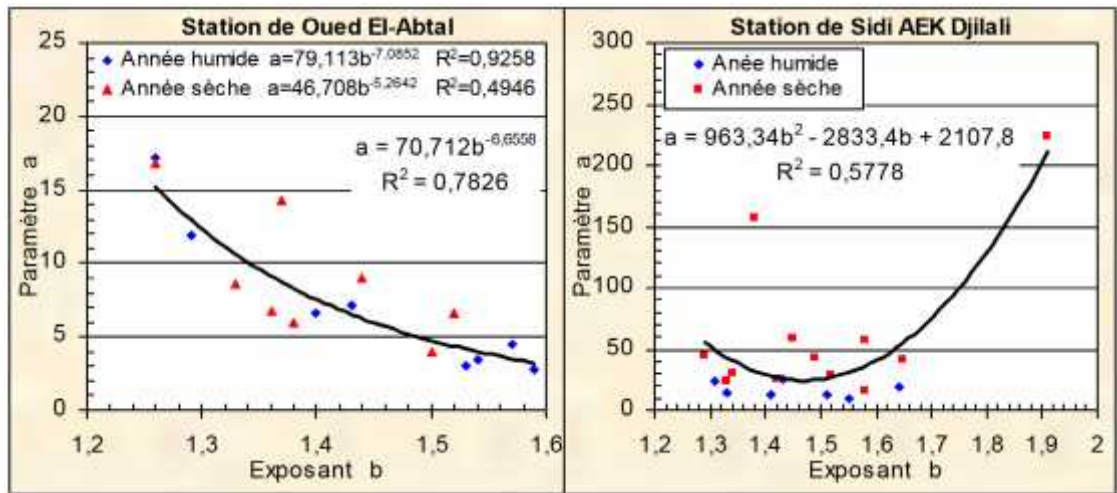


Figure (4.31) : Relation entre le paramètre a et l'exposant b «échelle annuelle»

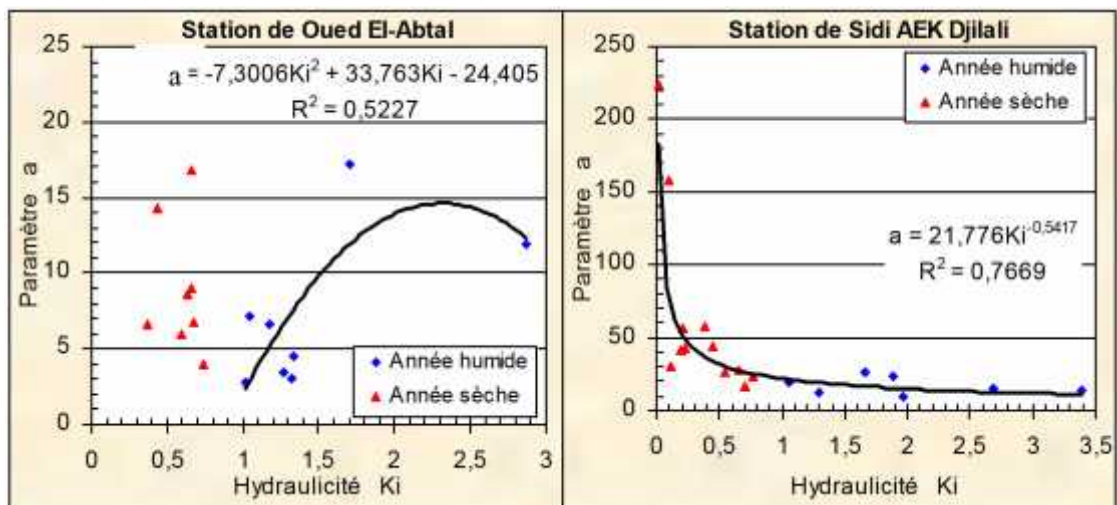


Figure (4.32) : Variation du paramètre a en fonction de l'hydraulicité Ki

Les graphiques de la figure (4.33) montrent, quant à eux, que l'exposant  $b$  est corrélé à  $K_i$  pour la station de Oued El-Abtal aussi bien en période sèche ( $R=0.77$  pour une parabole du second degré) qu'en période humide ( $R=0.70$  pour une parabole du second degré). Par contre, pour la station de Sidi AEK Djilali, il n'est corrélé à  $K_i$  (corrélation faible) qu'en période humide ( $R=0.64$  pour une parabole du second degré).

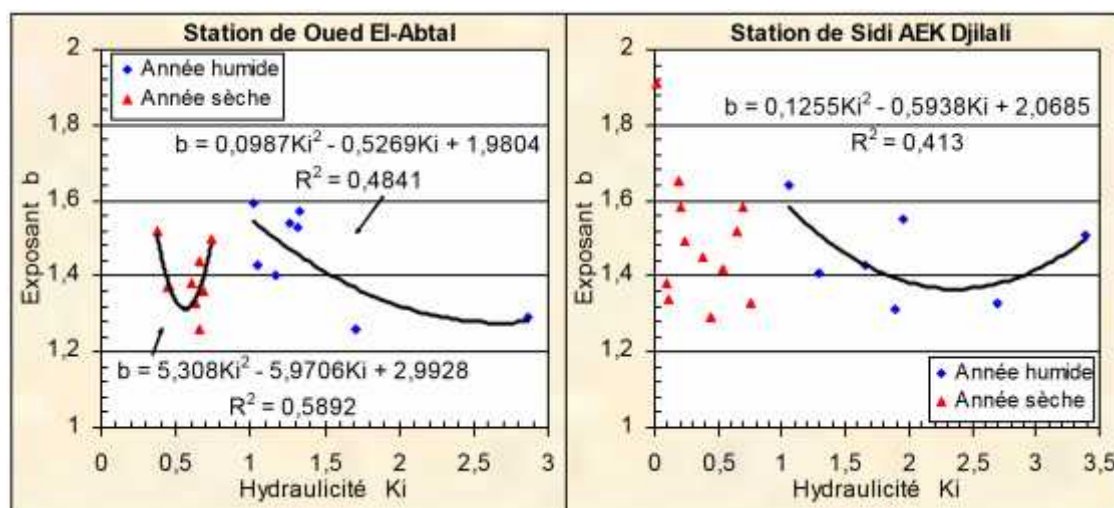


Figure (4.33) : Variation du paramètre  $b$  en fonction de l'hydraulicité  $K_i$

Les relations entre  $a$ ,  $b$  et la pluie moyenne annuelle (figures 4.34 et 4.35) ne sont pas significatives. À cette échelle, les indices  $a$  et  $b$  ne permettent pas d'appréhender les variations de la pluviométrie. Les paramètres  $a$  et  $b$  varient de manière chaotique à l'augmentation de la pluviométrie. On observe pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal que  $a$  est grand pour une pluie s'approchant à la moyenne 278mm (année 1994/1995 et 1997/1998). Par contre, pour la station de Sidi AEK Djilali,  $a$  est grand pour une pluie inférieure à la moyenne 267mm (année 1998/1999 et 1999/2000) et qu'il est petit pour une pluie s'éloignant fortement et positivement de cette moyenne.

Deux cas particuliers sont à remarquer dans cette analyse, ceux des années 1997/1998 (station de Oued El-Abtal) et 1995/1996 (station de Sidi AEK Djilali), considérées comme années à faible hydraulicité (sèches), alors qu'on enregistre des totaux pluviométriques de 331mm et 466mm respectivement. Ces derniers se concentrent surtout en Septembre, Novembre, décembre, Avril et Mai (75 %), avec un total de 247mm pour la station de Oued El-Abtal et en Janvier, Février, Mars et Avril (57%), avec un total de 264mm pour la station

de Sidi AEK Djilali. Cependant l'application de la notion d'hydraulicité leur confère le caractère d'année sèche.

La lame écoulée moyenne annuelle est de l'ordre de 17mm (station de Oued El-Abtal) et 8mm (station de Sidi AEK Djilali). Les données relatives à ce dernier paramètre ont été mises en relation avec  $a$ . La figure (4.36) montre que ce paramètre  $a$  est bien lié (modèle de puissance) à la lame ruisselée pour la station de Sidi AEK Djilali ( $R=0.87$ ). Par contre, pour la station de Oued El-Abtal, il n'est corrélé à la lame écoulée (modèle polynomiale) que pour la période humide ( $R=0.71$ ). Cela est dû au fait que le ruissellement est le facteur inductif du débit solide et particulièrement pour les petits bassins en période humide. Pour les grands bassins, d'autres facteurs sont à prendre en considération en période sèche tels que l'état du sol du bassin et son degré de saturation. Le graphe de la figure (4.36) relatif à la station de Sidi AEK Djilali montre deux zones distinctes, l'une pour la période sèche et l'autre pour la période humide. Si pour le premier intervalle de la lame écoulée (0-8mm), la variation de  $a$  en fonction de la lame écoulée est nette, Au-delà de 8mm, le paramètre  $a$  n'évolue guère. Ce constat marque bien les années à forte hydraulicité. Les graphes de la figure (4.37) montrent que la relation entre l'exposant  $b$  et la lame ruisselée annuelle est forte en période sèche à la station de Oued El-Abtal ( $R=0.75$  pour une parabole du second degré), par contre elle l'est moins pour la période humide ( $R=0.65$  pour une parabole du second degré). A la station de Sidi AEK Djilali, La relation entre  $b$  et la lame ruisselée annuelle n'est pas significative en période humide ( $R=0.62$  pour une parabole du second degré). En période sèche, la variation de  $b$  en fonction de la lame d'eau ruisselée n'est pas claire et aucune relation n'est à envisager. Cela est du probablement au fait que  $b$  est lié à la surface de drainage en période de crues, aux caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques des bassins versants et des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau. Les résultats trouvés ici confirment d'une autre manière ceux montrés en figures (4.32) et (4.33).

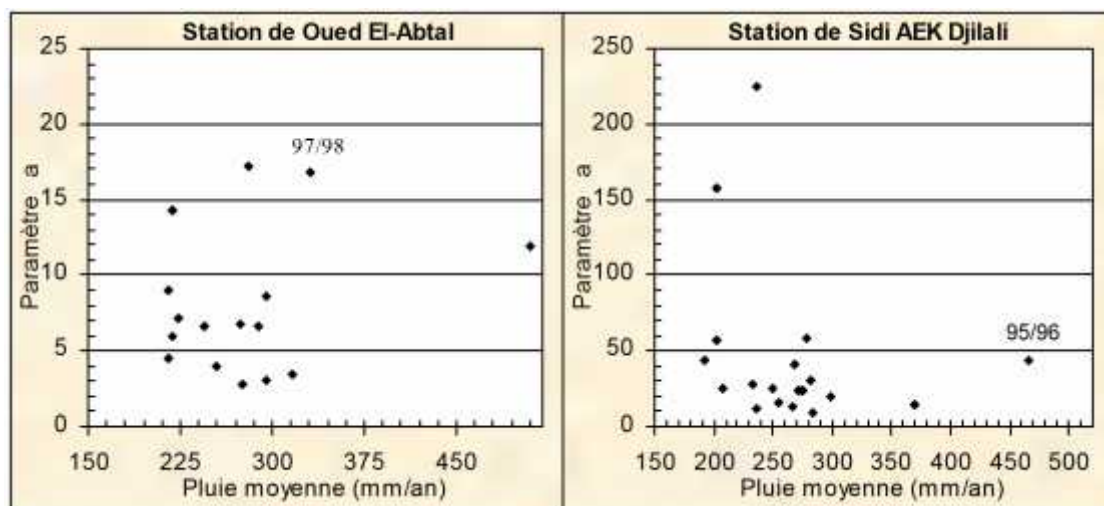


Figure (4.34): Variation du paramètre a en fonction de la pluie moyenne Annuelle

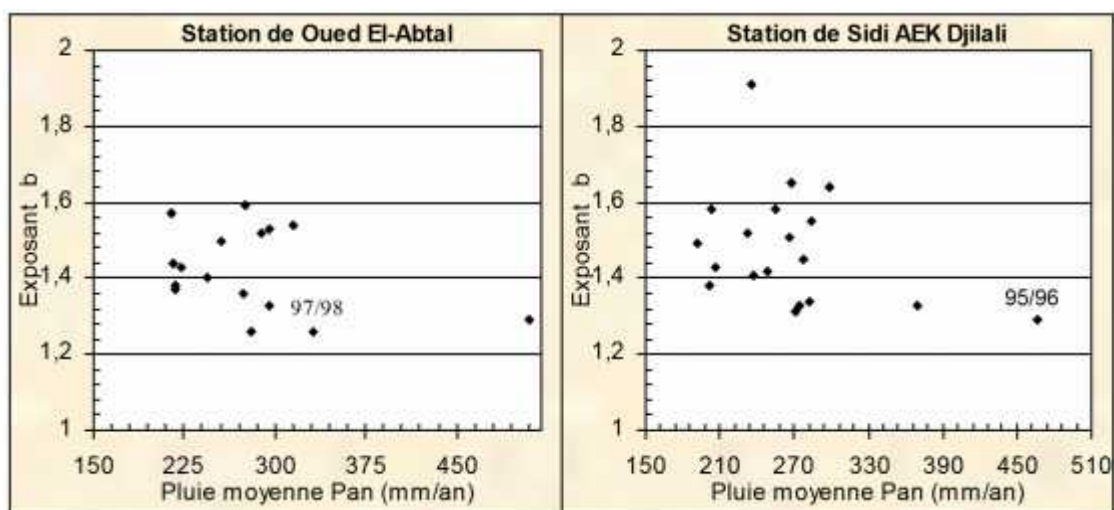


Figure (4.35): Variation du paramètre b en fonction de la pluie moyenne Annuelle

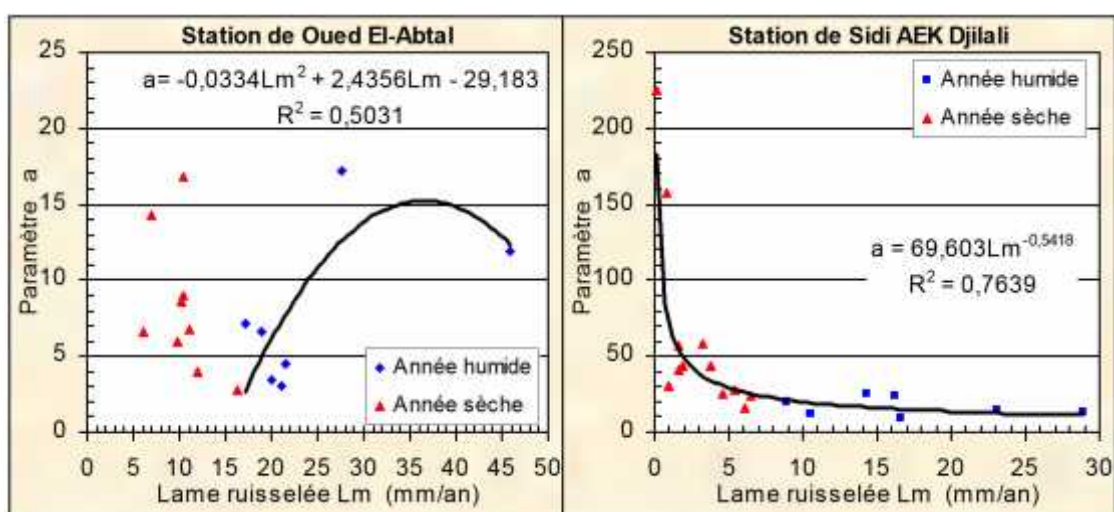


Figure (4.36) : Variation du paramètre a en fonction de la lame d'eau ruisselée annuelle



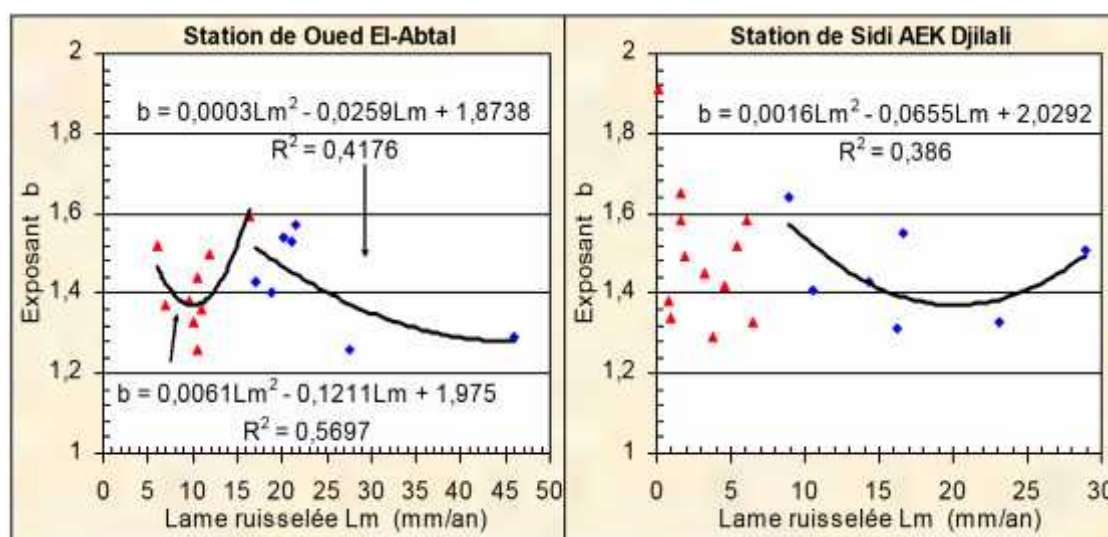


Figure (4.37) : Variation du paramètre b en fonction de la lame d'eau ruisselée annuelle

#### 4.6.2.2 Echelle saisonnière

Les paramètres a et b de la relation de puissance liant le débit solide au débit liquide, les valeurs saisonnières de la pluie  $P_s$  ainsi que de débit maximal  $Q_{max}$ , représentatifs de la période d'étude sont données dans le tableau (4.12).

Tableau (4.12) :  $P_s$ ,  $Q_{max}$  et paramètres de la relation de puissance

Saison	Station de Oued El-Abtal					Station de Sidi AEK Djilali				
	$P_s^*$ mm	a	b	$Q_{max}$ $m^3/s$	$R^2$ %	$P_s^{**}$ mm	a	b	$Q_{max}$ $m^3/s$	$R^2$ %
Aut.	73	11.36	1.28	698.20	85	76	26.70	1.26	188.83	84
Hiv.	98	5.89	1.41	599.02	85	94	27.48	1.25	47.86	81
Pri.	81	4.79	1.42	755.80	83	81	29.16	1.26	131.50	86
Eté	24	12.08	1.30	896.47	83	15	33.25	1.22	195.00	88
Moy	276	8.53	1.35	737.37	84	267	29.15	1.25	140.80	85
CV	0.12	0.44	0.05	0.17	1%	0.13	0.10	0.02	0.48	4%

\*Moyenne de toutes les stations à l'exception de Djilali Ben Ammar (période 1985-2001), \*\*Moyenne des stations: Sidi AEK Djilali, SMBA et Nesmoth (période 1982-2001)

Le facteur a et surtout l'exposant b présentent des valeurs très proches, et sont proches aussi de celles des modèles globaux pour les deux stations hydrométriques du bassin. Des graphes de la figure (4.38), on observe une évolution inverse des paramètres a et b pour la station de Sidi AEK Djilali. Pour la station de Oued El-Abtal, on observe une évolution inverse des paramètres a et b sur une partie ( $b > 1.32$ ) et une même tendance d'évolution sur une autre partie ( $b < 1.32$ ). La valeur moyenne de a est de 8.53 pour la station

de Oued El-Abtal et 29.15 pour la station de Sidi AEK Djilali avec des coefficients de variation égales à 0.44 et 0.10 respectivement. Pour l'exposant b, la valeur moyenne est de 1.35 à la station de Oued El-Abtal et 1.25 à la station de Sidi AEK Djilali avec des coefficients de variation de 0.05 et 0.02 respectivement.

Ceci exprime bien que l'irrégularité du climat n'a pas d'effet significatif sur les valeurs des paramètres a et b, et par conséquent sur le transport des matières solides en suspension. Cela montre aussi que les paramètres a et b (transport solide en suspension) peuvent varier beaucoup plus en fonction des caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant, ou des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau qu'en fonction du climat

Toutes fois, le transport solide en suspension s'affaiblit en été, où on observe parfois une absence totale du transport solide due simplement à l'absence d'écoulement. Avec les premiers orages de l'Automne, la concentration en suspension augmente brusquement, puis chute en Hiver et reprend en Mars. Cette variation est liée essentiellement aux premiers lessivages des pluies d'Automne, après une longue saison chaude où les matériaux solides fins sont déjà préparés sur place au transport. La production des sédiments en suspension à la station hydrométrique de Oued El-Abtal est très forte au Printemps et en Automne où le transport solide approche les modèles  $Q_s=4.8Ql^{1.42}$  et  $Q_s=11.4Ql^{1.28}$  respectivement. A la station de Sidi AEK Djilali, elle est très forte en Automne et en Hiver où le transport solide approche les modèle  $Q_s=26.7Ql^{1.26}$  et  $Q_s=27.5Ql^{1.25}$  respectivement.

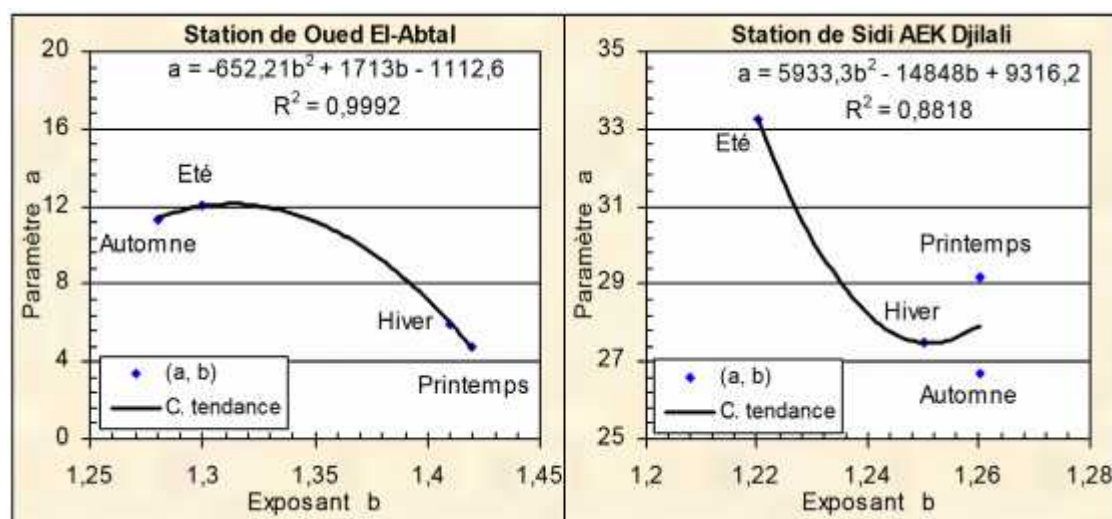


Figure (4.38) : Relation saisonnière entre le paramètre a et l'exposant b

La relation graphique entre le paramètre  $a$  et l'exposant  $b$ , illustrée dans la figure (4.38) montre que cette échelle d'analyse est très représentative du phénomène de transport solide dans un bassin semi aride.

Les graphes des figures (4.39) et (4.40) montrent que la pluie saisonnière explique fortement les variations du paramètre  $a$  aussi bien à la station hydrométrique de Oued El-Abtal ( $R=0.78$  pour une parabole du second degré) qu'à la station de Sidi AEK Djilali ( $R=0.93$  pour une parabole du second degré). A cette échelle, la pluie saisonnière et le débit liquide maximum n'expliquent pas bien la variation de l'exposant  $b$ .

À elles seules, les pluies tombées durant les saisons d'Hiver et de Printemps représenterait environ 35-36% et 29-30% du total annuel respectivement, pour les deux bassins relatifs aux stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali. Les volumes d'apports solides des saisons d'Automne (34%) et de Printemps (35%) à la station de Oued El-Abtal sont les plus élevés. A la station de Sidi AEK Djilali, les volumes d'apports solides les plus élevés sont ceux des saisons d'Automne (30%) et d'Hiver (29%), notant que l'apport solide de Printemps (28%) est très proche de celui d'Hiver. En Automne et en Hiver, l'intensité de la pluie explique mieux l'activité hydro sédimentologique du bassin de l'Oued Mina. Pour le cas de la saison de Printemps on notera ici, l'effet combiné à la fois de la hauteur de pluie et de son intensité sur l'apport de sédiments. Le faible taux de transport solide en suspension d'Hiver (20% à la station de Oued El-Abtal et 29% à station de Sidi AEK Djilali) s'explique par le fait que la plus grande partie des particules solides ont été transportées par les premières crues d'Automne, tandis ce que celui de l'Eté (11% à la station de Oued El-Abtal et 13% à la station de Sidi AEK Djilali) est due à l'absence quasi-totale de précipitation (saison sèche).

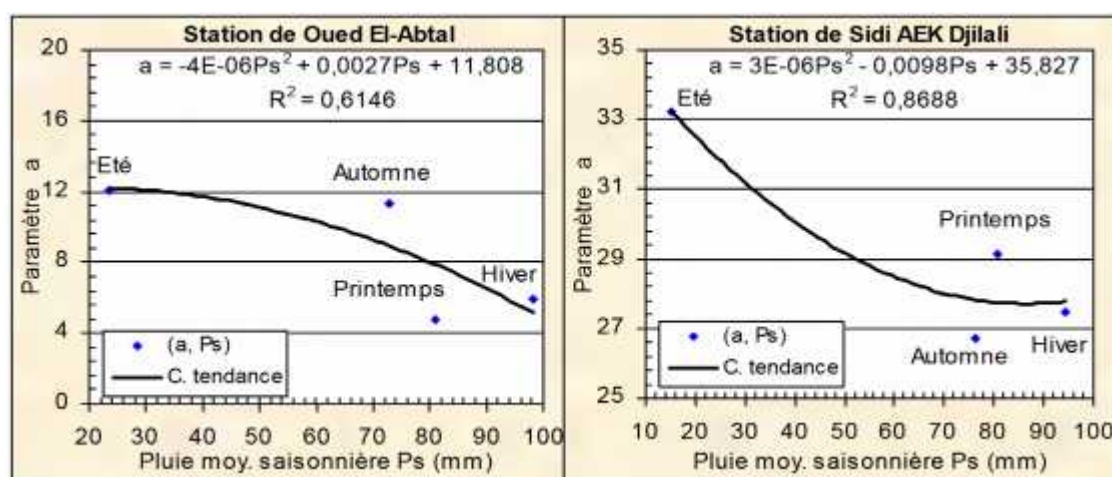


Figure (4.39) : Relation entre le paramètre  $a$  et la pluie moyenne saisonnière

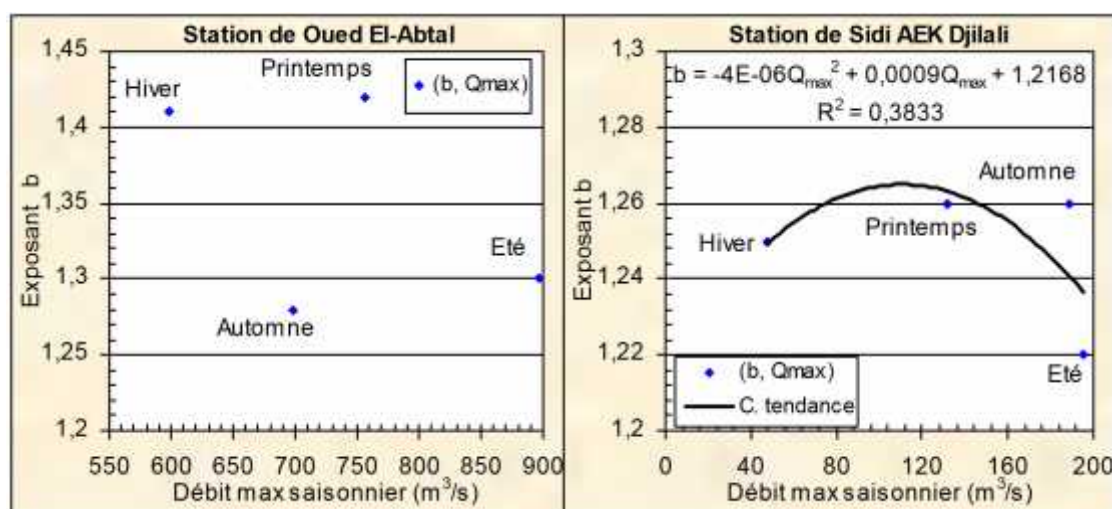


Figure (4.40) : Variation de l'exposant b en fonction du débit liquide max. saisonnier

#### 4.6.2.3 Echelle intra annuelle (mensuelle)

L'analyse effectuée à l'échelle mensuelle fait ressortir pratiquement les mêmes conclusions qu'à l'échelle annuelle. Les paramètres a et b de la relation de puissance liant le débit solide au débit liquide, les valeurs saisonnières de la pluie  $P_m$  ainsi que de débit maximal  $Q_{max}$ , représentatifs de la période d'étude sont regroupés dans le tableau (4.13). Les débits mensuels spécifiques (débit moyen mensuel/ surface du bassin) ont été calculés sur la base des débits moyen mensuels enregistrés durant la période d'étude (1985/1986-2000/2001 pour la station de Oued El-Abtal et 1982/1983-2000/2001 pour la station de Sidi AEK Djilali) et montrés aux tableaux (3.20) et (3.21).

Les valeurs des paramètres a et b de la relation en puissance varient d'un mois à un autre et d'une station hydrométrique à une autre dans le bassin versant de Oued Mina. De même qu'à l'échelle annuelle, on observe sur les graphes de la figure (4.41) une évolution inverse des paramètres a et b pour la station de Oued El-Abtal et une même tendance d'évolution sauf pour des valeurs de ( $b < 1.15$ ) pour la station de Sidi AEK Djilali. La valeur moyenne de a est de 8.86 pour la station de Oued El-Abtal et 32.81 pour la station de Sidi AEK Djilali avec des coefficients de variation de 0.47 et 0.42 respectivement, conservant ainsi pour la station de Oued El-Abtal le même ordre de variation des échelles temporelles précédentes. Par contre, pour l'exposant b, la valeur moyenne est de 1.37 pour la station de Oued El-Abtal et 1.28 pour la station de Sidi AEK Djilali avec des coefficients de variations plus faibles, 0.11 et 0.08 respectivement.



Tableau (4.13) : Pm, Q<sub>max</sub> et paramètres de la relation de puissance

Mois	Station de Oued El-Abtal					Station de Sidi AEK Djilali				
	Pm* mm	a	b	Q <sub>max</sub> m <sup>3</sup> /s	R <sup>2</sup> %	Pm** mm	a	b	Q <sub>max</sub> m <sup>3</sup> /s	R <sup>2</sup> %
Sep.	20	14.98	1.29	604.60	91	16	28.54	1.29	188.83	80
Oct.	26	9.80	1.32	698.20	86	24	25.14	1.38	130.55	92
Nov.	27	10.43	1.18	313.90	76	37	25.07	1.09	86.06	75
Déc.	28	6.55	1.34	92.80	81	28	30.96	1.28	26.84	82
Jan.	36	7.36	1.40	302.32	88	34	31.04	1.28	45.92	88
Fév.	35	2.64	1.64	599.02	89	32	23.06	1.20	47.86	73
Mar.	32	3.83	1.48	240.64	85	37	22.91	1.20	131.50	84
Avr.	28	6.09	1.42	296.80	80	25	66.16	1.48	25.56	88
Mai.	21	8.75	1.46	755.80	84	19	37.37	1.31	47.86	89
Jui.	8	16.85	1.07	152.20	65	5	54.54	1.33	10.98	84
Jul.	7	7.61	1.50	347.86	86	5	19.67	1.27	195.00	83
Aou.	9	11.40	1.35	896.47	91	5	29.27	1.26	5.56	94
Moy	23	8.86	1.37	441.72	84	22	32.81	1.28	78.54	84
CV	0.45	0.47	0.11	0.58	9%	0.56	0.42	0.08	0.86	7%

\*Moyenne de toutes les stations à l'exception de Djilali Ben Ammar (période 1985-2001), \*\*Moyenne des stations: Sidi AEK Djilali, SMBA et Nesmoth (période 1982-2001)

Le résultat à l'échelle de la saison est retrouvé sur la figure (4.41) où l'on constate une variation aléatoire nette mais faible de a et b d'un mois à un autre. La variation de b et surtout de a à la station de Oued El-Abtal est plus importante en Eté et en Hiver qu'en Automne et au Printemps, par contre, à la station de Sidi AEK Djilali, elle est plus importante au Printemps et en Eté qu'en Automne et en Hiver en raison probablement de l'activité hydro sédimentologique durant ces périodes et précisément de la nature et de l'état de surface des sols.

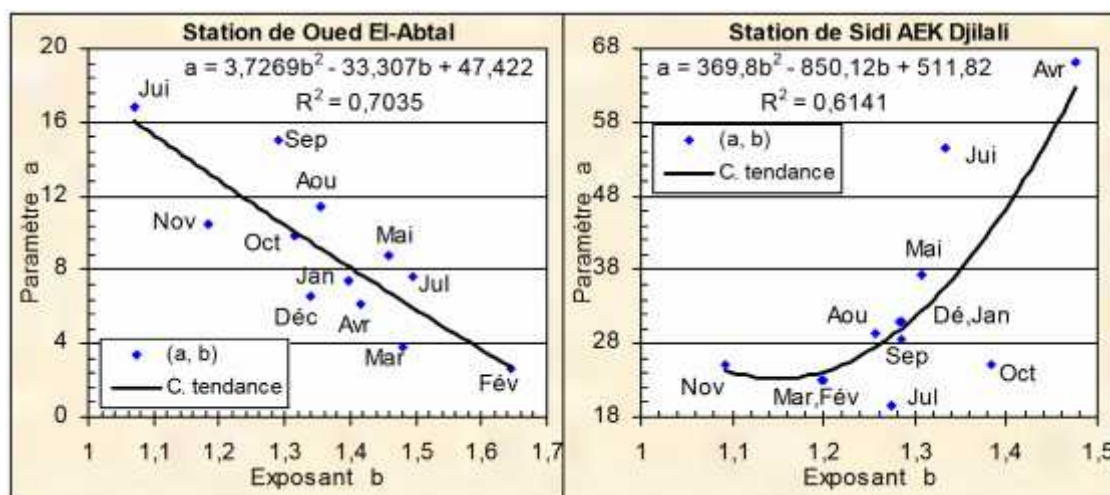


Figure (4.41) : Relation mensuelle entre le paramètre a et l'exposant b

Les graphiques de la figure (4.42) montrent que le paramètre  $a$  est bien lié à la pluie moyenne mensuelle à la station hydrométrique de Oued El-Abtal avec un coefficient de corrélation ( $R= 0.71$  pour un polynôme du second degré). Le paramètre  $a$  diminue avec l'augmentation de la pluie mensuelle. Pour la station de Sidi AEK Djilali, la relation n'est pas significative et l'indice  $a$  ne permet pas d'appréhender les variations de la pluviométrie mensuelle. La tendance est une diminution de  $a$  lorsque la pluie mensuelle augmente.

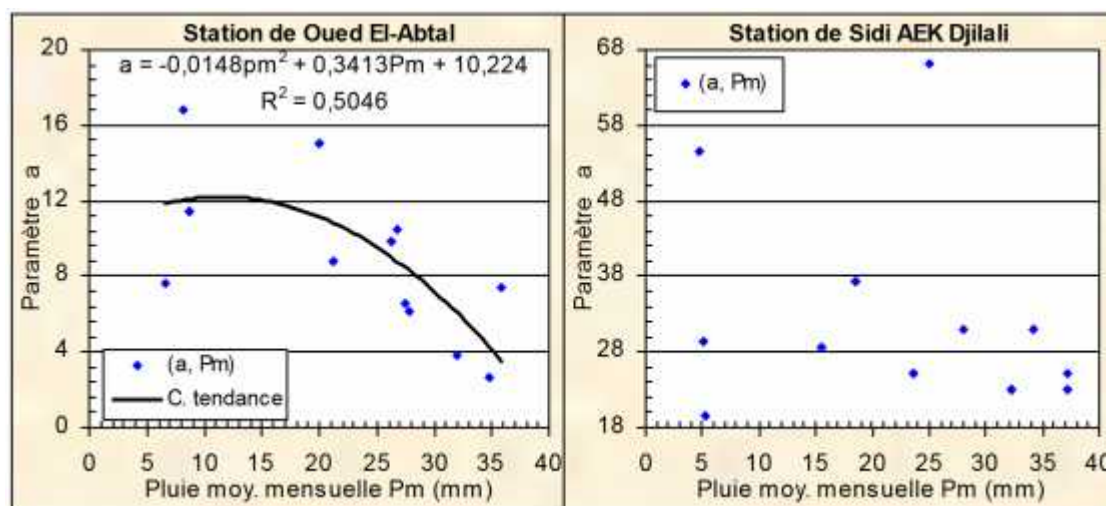


Figure (4.42) : Relation entre le paramètre  $a$  et la pluie moyenne mensuelle

Les graphiques de la figure (4.43) montrent, quant à eux, que l'exposant  $b$  est corrélé à la pluie moyenne mensuelle pour la station de Sidi AEK Djilali ( $R=0.73$  pour une parabole du second degré). L'exposant  $b$  est grand pour une pluie s'approchant à la moyenne (22 mm) et qu'il est petit pour une pluie s'éloignant de celle-ci. Par contre, pour la station de Oued El-Abtal, il n'y a aucune relation plausible. La tendance est une augmentation de  $b$  lorsque la pluie mensuelle augmente.

D'autre part, les graphes des figures (4.44) et (4.45) montrent que les relations entre le paramètre  $a$ , l'exposant  $b$  et le débit liquide mensuel maximal ne sont pas claires. De ce fait, les indices  $a$  et  $b$  ne permettent pas d'appréhender les variations du débit liquide mensuel maximal au niveau des deux stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali. La tendance est une augmentation à la station de Oued El-Abtal (diminution à la station de Sidi AEK Djilali) de  $a$  et  $b$  lorsque le débit mensuel maximal augmente.

Les particules arrachées au sol par splash ou par ruissellement sont transportées sur des distances plus ou moins longues. Les pentes des versants et le type de couvert végétal ont chacun un rôle important lié à la pluie et au ruissellement. En cherchant à intégrer le rôle du

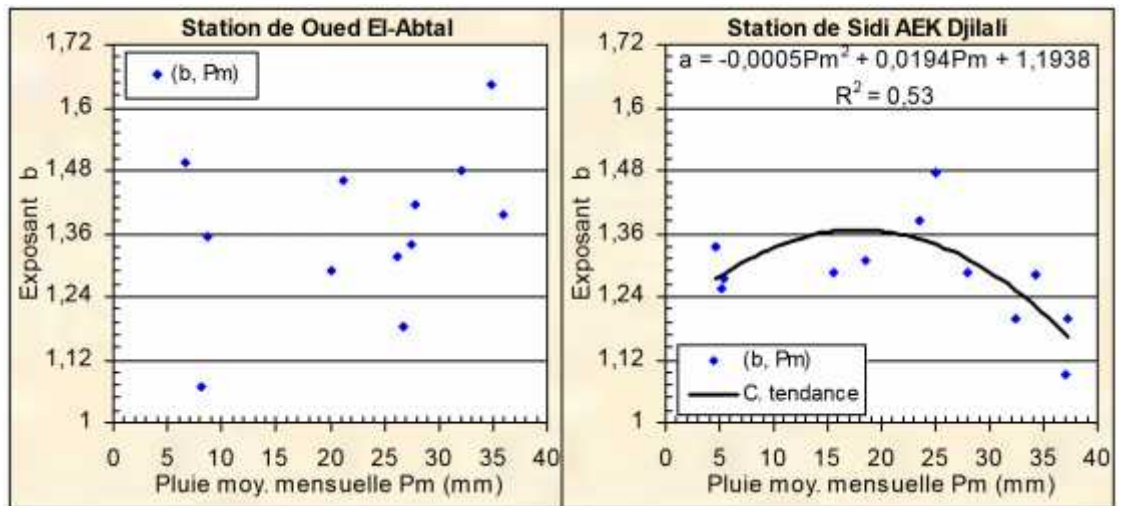


Figure (4.43) : Relation entre le l'exposant b et la pluie moyenne mensuelle

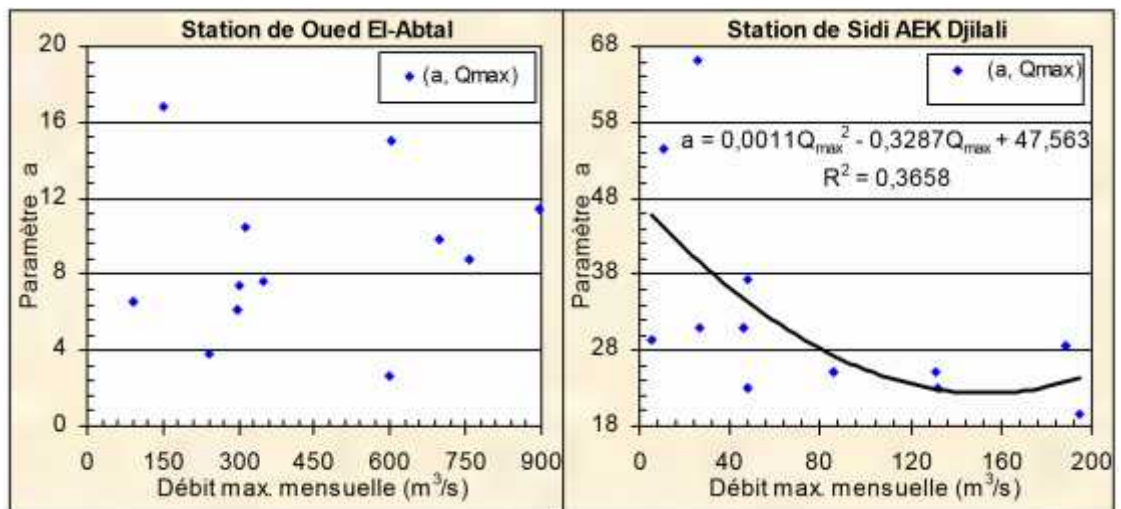


Figure (4.44) : Relation entre le paramètre a et le débit max. mensuel

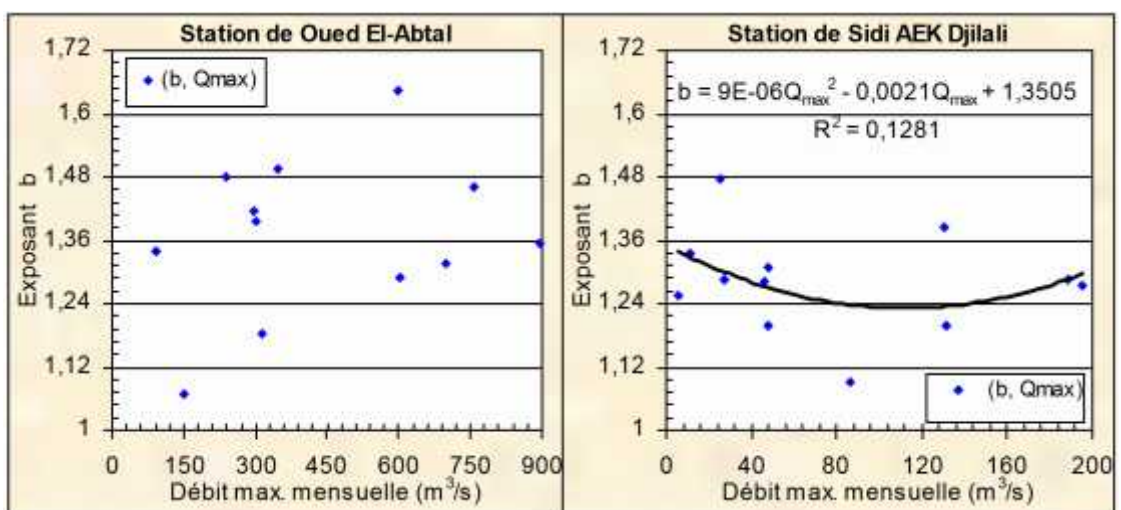


Figure (4.45) : Relation entre l'exposant b et le débit max. mensuel

relief quant à l'érodabilité des sols du bassin versant de l'Oued Mina, il paraît difficile de commenter l'aptitude au ruissellement des sols, car les pentes varient en même temps que les types de sol. Sur la base de ces considérations, nous avons essayé d'établir une relation entre les paramètres a et b en fonction du débit spécifique  $Q_s'$  (débit liquide moyen mensuel / superficie du bassin). Les figures (4.46) et (4.47) montrent qu'il n'existe aucune relation claire et significative entre ces paramètres pour la station de Oued El-Abtal. La tendance est une diminution de a (augmentation de b) lorsque le débit spécifique  $Q_s'$  augmente. Pour la station de Sidi AEK Djilali, la relation est bonne entre a et  $Q_s'$  ( $R = 0.70$  pour un Polynôme du second degré), par contre elle l'est moins entre b et  $Q_s'$  ( $R = 0.60$  pour une parabole du second degré). Les paramètres a et b diminuent avec l'augmentation du débit spécifique  $Q_s'$ .

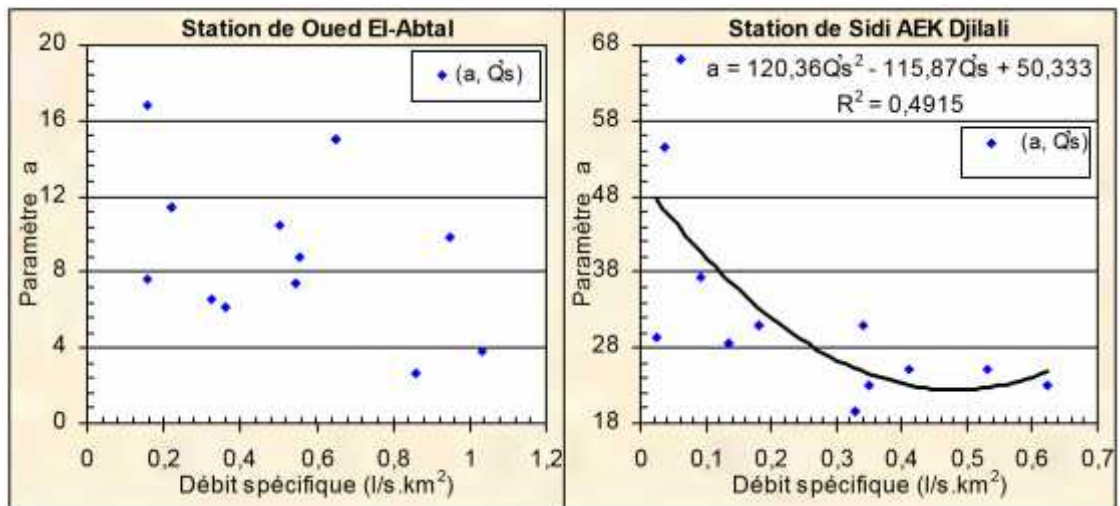


Figure (4.46) : Relation entre le paramètre a et le débit spécifique

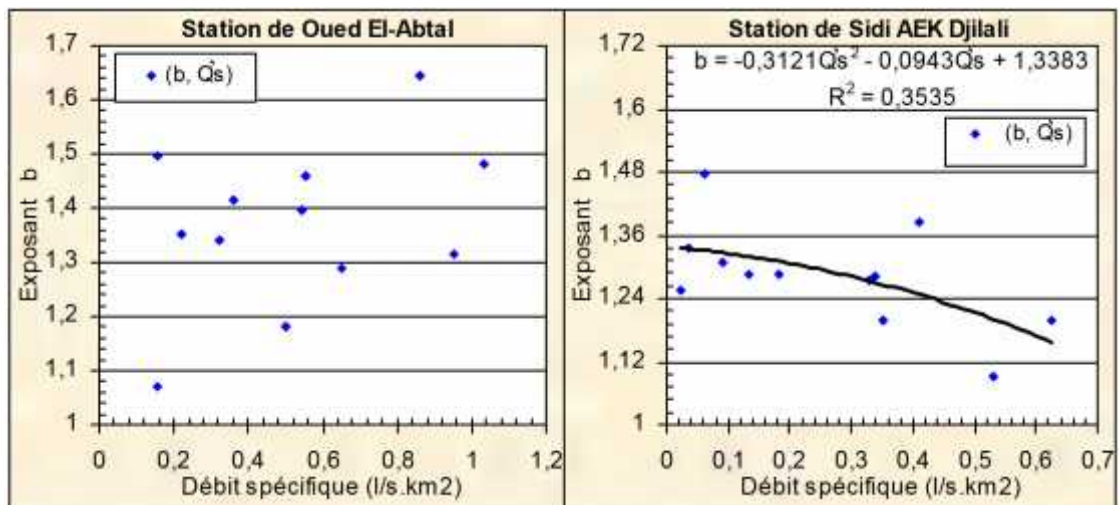


Figure (4.47) : Relation entre l'exposant b et le débit spécifique

#### 4.6.2.4 Echelle des crues

L'averse est l'unité temporelle la plus adéquate pour les analyses hydrologiques en relation avec le transport solide [93]. On trouve à l'échelle des crues pour les deux stations hydrométriques du bassin versant de l'Oued Mina des bonnes relations en puissance (bonnes corrélations) liant le débit des matières solides en suspension au débit liquide. Les paramètres a et b de la relation de puissance liant le débit solide au débit liquide, les valeurs de la pluie des averses  $P_{av}$ , de son intensité maximale  $I_{max}$ , de l'indice pluviométrique antérieur de 10 à 15 jours IPA et du débit max de quelques crues survenues durant la période d'étude sont montrés dans les tableaux (4.14) et (4.15).

L'analyse de ces crues survenues durant la période considérée apporte des différences assez concluantes. Si pour les échelles temporelles précédentes la limite de variation de a et b était plutôt faible, on constate qu'elle est plus étendue à l'échelle des crues.

Tableau (4.14) :  $P_{av}$ ,  $I_{max}$ , IPA,  $Q_{max}$  et paramètres de la relation de puissance  
(Station de Oued El-Abtal)

N	Crue	T <sup>a</sup> ille « n »	P <sub>av</sub> mm	I <sub>max</sub> mm/j	IPA mm	Q <sub>max</sub> m <sup>3</sup> /s	a	b	R <sup>2</sup> %
1	16-20 Oct. 1986	146	19	8	27	397	6.78	1.44	92
2	11-13 Jul. 1987	71	28	27	9	346.04	2.31	1.61	96
3	03-06 Oct. 1988	106	11	7	2	313.28	4.11	1.54	93
4	01-06 Mai. 1990	165	32	18	8	723.16	6.68	1.43	96
5	13-17 Mar. 1991	95	81	43	48	175.76	1.60	1.69	94
6	03-05 Oct. 1991	38	15	12	3	147.24	19.98	1.19	97
7	23-25 Sep. 1993	68	21	21	3	384.26	11.43	1.34	97
8	19-22 Oct. 1993	75	21	15	4	406.1	11.46	1.30	93
9	22Sep-2Oct1994	202	51	30	0	564.44	13.86	1.33	96
10	16-21 Oct. 1994	92	33	24	13	688.6	10.91	1.37	97
11	02-06 Nov.1994	108	15	11	34	186.75	23.96	1.16	98
12	12-15 Jan. 1996	119	59	31	23	302.32	2.95	1.63	93
13	04-06 Fév. 1996	47	55	28	21	125.2	13.02	1.21	95
14	10-12 Sep. 1996	34	14	12	13	169.56	2.51	1.69	99
15	25-26 Avr. 1997	30	42	18	33	189.8	18.59	1.20	98
16	22-27 Aou.1997	107	40	26	9	873.27	6.79	1.43	97
17	06-08 Oct. 1997	48	6	4	16	139	16.01	1.27	93
18	27-29 Nov.1997	48	30	23	38	291.7	4.58	1.42	94
19	27-28 Sep. 1999	47	15	14	4	406.1	17.01	1.23	1.0
20	07-10 Oct. 1999	59	29	18	18	244.52	2.42	1.56	98
	Moy	85	31	19	16	353.70	9.85	1.40	96
	CV	0.55	0.62	0.49	0.84	0.60	0.69	0.12	2%



Les coefficients de variation de a et b sont respectivement 0.69 et 0.12 pour la station de Oued Al-Abtal et 1.17 et 0.10 pour la station de Sidi AEK Djilali. La valeur moyenne de a est de 9.85 pour la station de Oued El-Abtal et 21.93 pour la station de Sidi AEK Djilali. Par contre, pour l'exposant b, la valeur moyenne est de 1.40 pour la station de Oued El-Abtal et 1.52 pour la station de Sidi AEK Djilali.

La valeur moyenne Pav est de 31mm pour la station de Oued El-Abtal et 26mm pour la station de Sidi AEK Djilali. Ses coefficients de variation sont respectivement 0.62 et 0.78. Pour l'intensité maximale, la valeur moyenne est de 19mm/j (CV=0.49) pour la station de Oued El-Abtal et 17mm/j (CV=0.66) pour la station de Sidi AEK Djilali. Tandis que l'indice pluviométrique antérieur est caractérisé par une moyenne de 16mm et un coefficient de variation (CV=0.84) à la station de Oued El-Abtal et une moyenne de 20mm et un coefficient de variation (CV=1.03) à la station de Sidi AEK Djilali.

Pour les deux stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali et pour l'ensemble des valeurs de a et de b, il y a une évolution inverse des deux paramètres (figure 4.48). Les crues donneraient beaucoup plus de détails sur le comportement de a et b ainsi que sur leur signification.

Tableau (4.15) : Pav, I<sub>max</sub>, IPA, Q<sub>max</sub> et paramètres de la relation de puissance  
(Station de Sidi AEK Djilali)

N	Crue	T <sup>aille</sup> « n »	Pav mm	I <sub>max</sub> mm/j	IPA mm	Q <sub>max</sub> m <sup>3</sup> /s	a	b	R <sup>2</sup> %
1	27-30 Nov. 1982	36	37	22	12	45.76	4.92	1.70	95
2	02 Mai. 1985	11	18	16	12	37.004	50.82	1.30	97
3	13-14 Oct. 1986	16	9	9	23	144.38	7.62	1.63	99
4	16-20 Nov. 1986	21	14	7	0	61.35	10.15	1.62	88
5	30Sep-1Oct1987	21	18	11	1	57.54	9.63	1.62	95
6	01-04 Jan. 1988	18	23	20	9	43.5	7.66	1.62	91
7	03-04 Oct. 1988	10	10	10	1	74.35	22.94	1.48	94
8	29-31 Mar. 1989	19	44	38	30	42.5	8.86	1.62	97
9	03-06 Jan. 1990	23	31	17	16	44.5	11.77	1.53	97
10	01-04 Mai. 1990	25	16	9	12	42.45	27.63	1.36	95
11	13-17 Mar. 1991	29	89	47	57	88.25	2.49	1.78	85
12	19-22 Oct. 1993	14	23	19	1	107	16.72	1.51	96
13	16-20 Oct. 1994	71	21	14	16	73.16	18.43	1.43	93
14	08-10 Mar. 1996	43	28	24	71	149	29.44	1.30	95
15	07 Oct. 1997	45	3	3	19	29.85	14.89	1.48	97
16	16-17 Mar. 1999	35	23	12	33	15.28	106.87	1.30	95
	Moy	27	26	17	20	65.99	21.93	1.52	94
	CV	0.58	0.78	0.66	1.03	0.59	1.17	0.10	4%

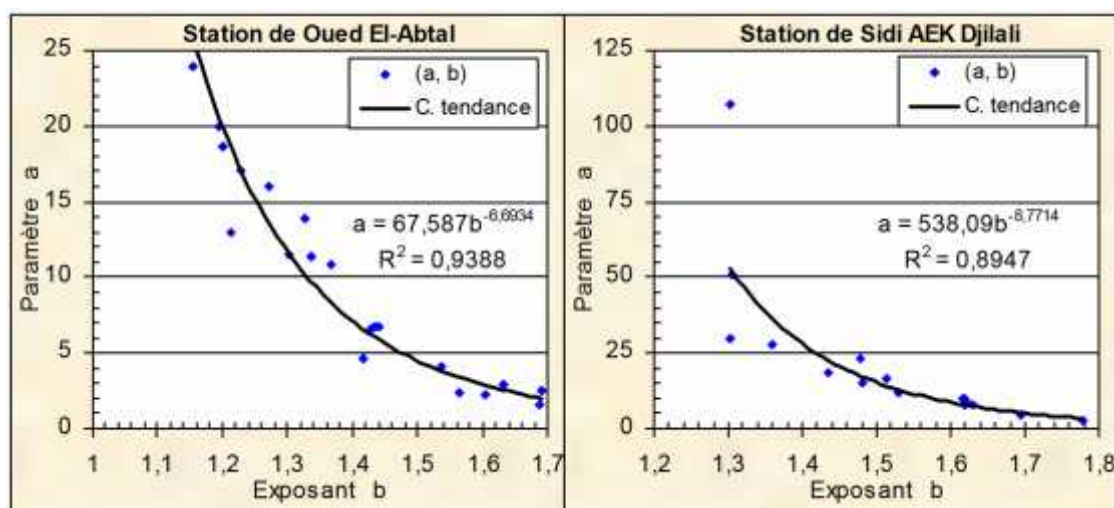


Figure (4.48) : Relation entre le paramètre a et l'exposant b

Ainsi, à la valeur la plus forte de b, correspond la valeur la plus petite de a (b = 1.6882 et a = 1.5968 pour la station de oued El-Abtal) et (b=1.7789 et a =2.4857 pour la station de Sidi AEK Djilali). Les fortes valeurs de b caractérisent les crues associées aux mois de Mars. Durant ce mois, on enregistre aussi les plus forts débits liquides moyens mensuels ( $3.685\text{m}^3/\text{s}$  pour la station de Oued El-Abtal et  $0.308\text{m}^3/\text{s}$  pour la station de Sidi AEK Djilali) pour la période concernée par l'analyse. Ce même mois enregistre pour la station de Sidi AEK Djilali la plus faible valeur de b (1.3027). L'évolution de a et b pour tous les mois n'est pas claire. Pour des crues survenues durant un même mois, les paramètres a et b peuvent présenter de faibles ou de fortes valeurs probablement en fonction des caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant, ou des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau.

Un transport solide nécessite une source d'énergie. De nombreux auteurs ont montré le rôle de la pluie dans le processus d'érosion des sols. [15, 94, 95]. L'énergie des gouttes précipitées désagrège les fines particules du sol qui peuvent ensuite être entraînées par le ruissellement en fonction de sa capacité de transport.

Le facteur a étant lié indirectement à l'état du sol, il a été corrélé avec la hauteur de l'averse ainsi qu'à son intensité max (figures 4.49 et 4.50).

À l'échelle d'un événement averse – crue, le paramètre a semble peu lié aux composantes de la pluie. La tendance est une diminution de a (augmentation de b) lorsque la hauteur et l'intensité maximale de l'averse augmentent. L'effet saisonnier n'est pas retrouvé ici.



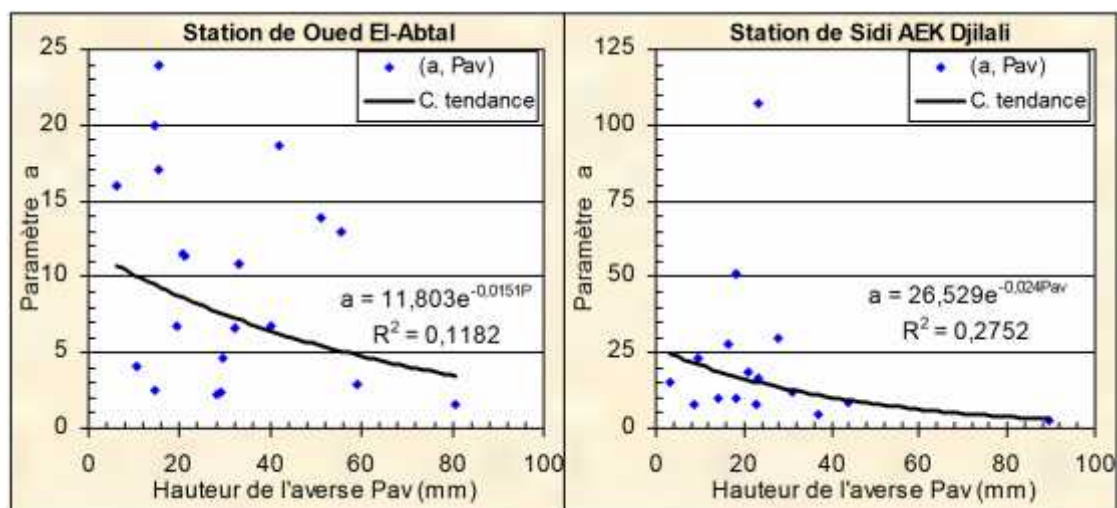


Figure (4.49) : Relation entre le paramètre a et la hauteur de l'averse

À l'échelle d'un événement averse – crue, le paramètre a semble peu lié aux composantes de la pluie. La tendance est une diminution de a (augmentation de b) lorsque la hauteur et l'intensité maximale de l'averse augmentent. L'effet saisonnier n'est pas retrouvé ici.

Les valeurs de a ont aussi été analysées en relation avec un indice pluviométrique antérieur (IPA) de 15 jours. Cette analyse montre en général que les valeurs de a les plus élevées caractériseraient un IPA faible et une forte érodabilité des sols du bassin, tandis que les faibles valeurs de a signifieraient un état de saturation du sol, soit un IPA fort et une érodabilité faible. La plus faible valeur de a s'est produite au printemps (crue de 13-17 Mar. 1991 pour les deux stations) pour un IPA plus forts ( $a=1.60$ , IPA=48mm pour la station de

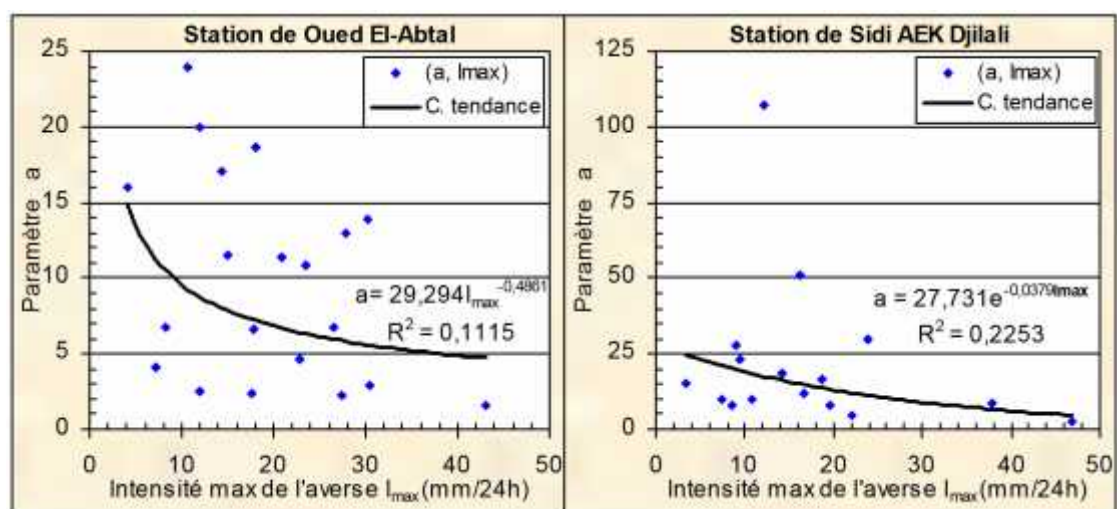


Figure (4.50) : Variation du paramètre a en fonction de l'indice pluviométrique antérieur de 15 jours

Oued El-Abtal et  $a=2.49$ ,  $IPA=57\text{mm}$  pour la station de Sidi AEK Djilali). La mise en graphe du paramètre  $a$  en fonction de l'IPA illustre la difficulté d'une telle liaison (figure 4.51).

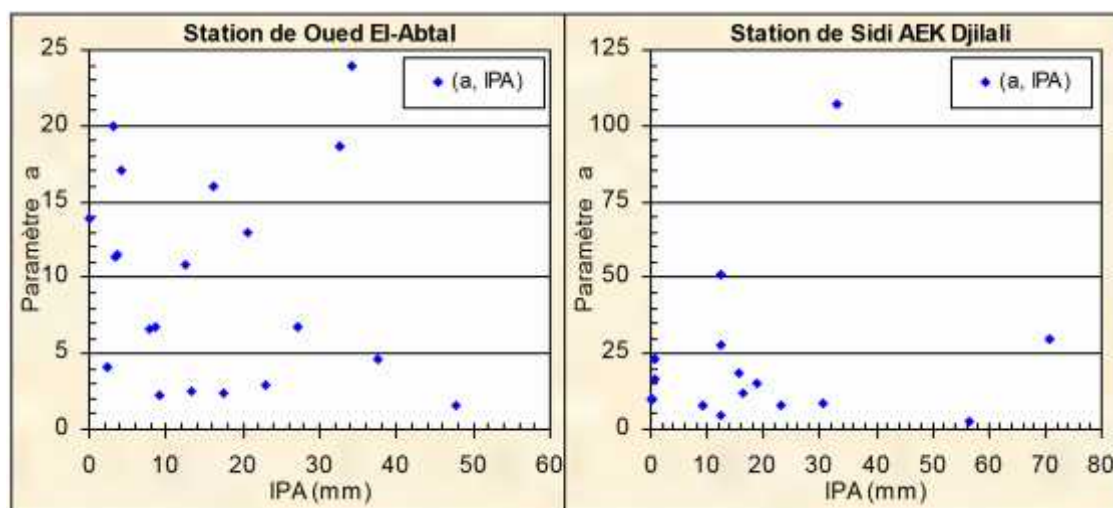


Figure (4.51) : Variation du paramètre  $a$  en fonction de l'indice pluviométrique antérieur de 15 jours

Le paramètre  $a$  a été relié au débit liquide maximal (figure 4.52). L'évolution des deux paramètres à la station de Oued El-Abtal s'effectue en trois phases différenciées par le minimum ( $a=1.60$  et  $Q_{\max}=175.76\text{m}^3/\text{s}$ ) et le maximum ( $a=13.86$ ,  $Q_{\max}=564.44\text{m}^3/\text{s}$ ) de l'hyperbole. Le facteur  $a$  diminue inversement au débit liquide max jusqu'au seuil de  $220\text{m}^3/\text{s}$  pour ensuite évoluer dans le même sens et de manière presque linéaire jusqu'au seuil de  $520\text{m}^3/\text{s}$ . Au delà de cet seuil, le facteur  $a$  diminue inversement au débit liquide max de façon presque symétrique à celle de la phase précédente. A la station de Sidi AEK Djilali, l'évolution des deux paramètres s'effectue en deux phases différenciées par le minimum de la parabole ( $a=2.49$  et  $Q_{\max}=88.25\text{m}^3/\text{s}$ ). Le facteur  $a$  diminue inversement au débit liquide max jusqu'au seuil de  $93\text{m}^3/\text{s}$  pour ensuite évoluer lentement dans le même sens et de manière presque linéaire.

Les allures des courbes ainsi que les coefficients de corrélation ( $R = 0.50$  pour la station de Oued El-Abtal et  $R=0.68$  pour la station de Sidi AEK Djilali) permettent de conclure que la relation n'est pas directe.

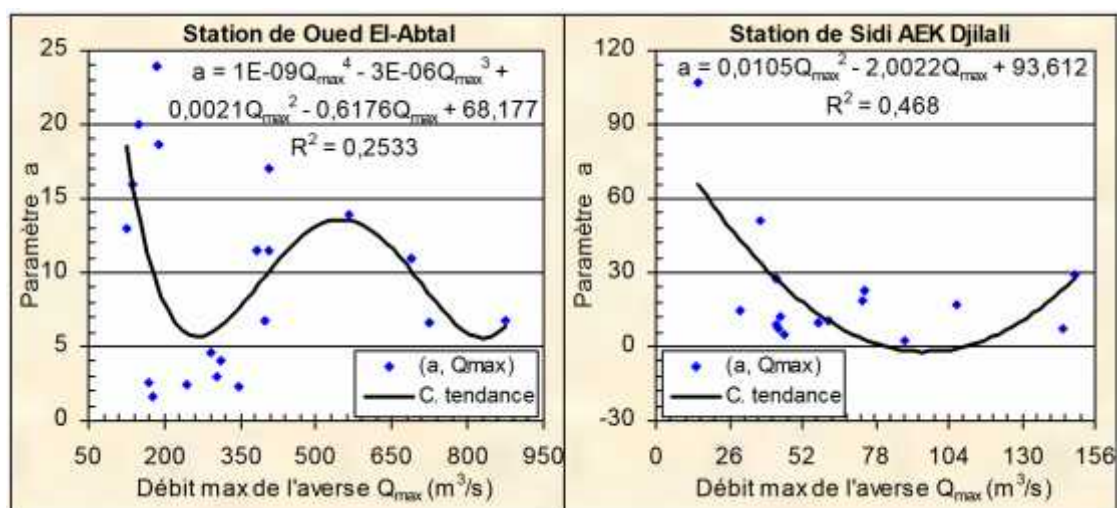


Figure (4.52) : Variation du paramètre a en fonction du débit max. de la crue

Concernant l'exposant b, celui-ci est marqué, pour les deux stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali, par les mêmes ordres de variations du paramètre a observées pour l'ensemble des données des crues analysées (figure 4.53). La diminution du paramètre a en fonction du débit liquide max entraîne une évolution dans le même sens des deux paramètres b et  $Q_{max}$ , et inversement. Cela confirme davantage l'évolution inverse des deux paramètres a et b.

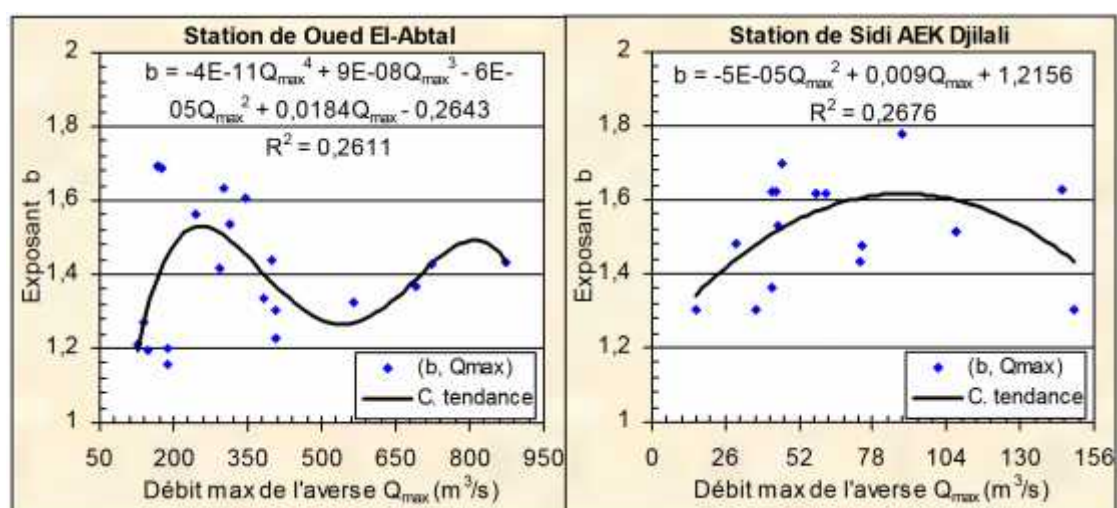


Figure (4.53) : Variation du paramètre b en fonction du débit max. de la crue

A la station hydrométrique de Oued El-Abtal, les plus fortes valeurs de b ont été obtenues au début de la deuxième phase pour les débits liquides max compris entre 170 et 350 m<sup>3</sup>/s, la valeur moyenne étant d'environ 1.60. A la station de Sidi AEK Djilali, les plus

fortes valeurs de  $b$  sont observées en général à la fin de la première phase pour les débits liquides compris entre 40 et 90m<sup>3</sup>/s, la valeur moyenne étant d'environ 1.65.

Par ailleurs, en considérant que l'exposant  $b$  est la pente de la courbe sur échelle log-log, il apparaît visiblement que les crues du 16-20 Novembre 1986 et 13-17 Mars 1991 survenues à la station de Sidi AEK Djilali sont les seuls événements qui montrent une variation de  $Q_s$  et de  $Q_l$  assez proportionnelle. Les pentes des droites d'ajustement de la variable transformée sont de 1.62 et 1.78 respectivement.

L'analyse à l'échelle de la crue a été étendue à la décomposition de l'hydrogramme selon les phases de montée et de décrue. Les résultats sont détaillés dans les tableaux (4.16) et (4.17).

Tableau (4.16) : Valeurs caractéristiques des paramètres de la relation de puissance lors de la montée et de la décrue (Station de Oued El-Abtal)

N	Montée			Décrue			$a_d/a_m$	$C_{max}$ (g/l)	Position de $C_{max}$
	$a_m$	$b_m$	$R^2$	$a_d$	$b_d$	$R^2$			
1	11.114	1.4801	0.9429	6.8182	1.4208	0.9282	0.61	170	Avec $Q_{max}$
2	74.474	0.8725	0.8804	2.0857	1.6593	0.9537	0.03	54	Avant $Q_{max}$
3	1.1882	1.4402	0.933	4.833	1.5188	0.962	4.07	56	Après $Q_{max}$
4	2.5661	1.5327	0.9615	6.5396	1.4456	0.9572	2.55	174	Après $Q_{max}$
5	7.1619	1.3813	0.9074	0.9181	1.7253	0.9937	0.13	89	Avant $Q_{max}$
6	0.7061	1.8837	0.9648	20.765	1.1994	0.9901	29.4	72	Avec $Q_{max}$
7	32.53	1.186	0.9541	9.0433	1.3818	0.9928	0.28	135	Avant $Q_{max}$
8	2.1286	1.5727	0.991	11.862	1.3168	0.9861	5.57	81	Avec $Q_{max}$
9	16.992	1.2759	0.9502	9.892	1.4123	0.9768	0.58	242	Avant $Q_{max}$
10	67.25	1.0894	0.8864	9.1017	1.2981	0.9849	0.14	143	Avant $Q_{max}$
11	23.857	1.077	0.9939	17.208	1.3369	0.9893	0.72	80	Avec $Q_{max}$
12	44.931	1.1609	0.9674	2.3099	1.5732	0.9838	0.05	126	Avant $Q_{max}$
13	23.02	1.2164	0.9933	10.715	1.1737	0.9672	0.47	82	Avant $Q_{max}$
14	0.0184	2.6731	0.9958	2.465	1.7149	0.9974	134	96	Avec $Q_{max}$
15	13.596	1.2189	0.9926	19.316	1.2166	0.9962	1.42	56.5	Avec $Q_{max}$
16	3.6803	1.5858	0.9587	9.6859	1.3833	0.994	2.63	122	Avec $Q_{max}$
17	27.222	1.3093	0.9515	8.1236	1.4428	0.9989	0.30	90	Avec $Q_{max}$
18	18.083	1.2524	0.9996	2.1053	1.616	0.9925	0.12	72	Avec $Q_{max}$
19	10.077	1.2908	0.9972	17.938	1.2218	0.9988	1.78	70	Avec $Q_{max}$
20	2.0341	1.5038	0.9584	2.879	1.5305	0.9844	1.42	53.5	Après $Q_{max}$

Les crues des mois de Janvier et de Février (saison d'Hiver) sont caractérisées par des valeurs de  $a$  en décrue plus faibles qu'en montée et des valeurs de  $b$  plus fortes en décrue. Benkhalel et Remini (2003) [87] ont trouvé le même résultat pour les crues des mois de Décembre et de Février survenues à la station hydrométrique de Ouled Farès à l'exutoire du bassin versant de Oued Ouahrane (Algérie). La variation de  $a$  est plus ou moins forte. De

plus, Les concentrations ne diffèrent pratiquement pas de celles des autres saisons et le temps de montée est égal au temps de concentration qui est de 20 heures à la station de Oued El-Abtal et de 10 heures à la station de Sidi AEK Djilali environ. Les crues des autres mois sont caractérisées par des valeurs instables de  $a$ . Il peut avoir des valeurs en décrue plus faibles qu'en montée et inversement. Le rapport de variation en décrue par rapport à la montée est également instable.

Sur l'ensemble des données, les valeurs de  $a$  pour la saison d'Automne sont les plus élevées, inversement à celles de  $b$  qui sont assez faibles. Le paramètre  $a$  peut atteindre les valeurs de 530.59 ( $b$  minimale = 0.7746) en mois d'Octobre et de 217.91 ( $b=0.8491$ ) en mois de Novembre à la station de Sidi AEK Djilali, et la valeur de 67.25 ( $b=1.0894$ ) en mois d'Octobre à la station de Oued El-Abtal. De plus, le paramètre  $a$  peut aussi avoir pour les autres saisons des valeurs importantes. Il peut atteindre les valeurs de 115.32 ( $b=0.9966$ ) en mois de Janvier et de 102.12 ( $b=1.2777$ ) en mois de Mars à la station de Sidi AEK Djilali et les valeurs de 44.931 ( $b=1.1609$ ) en mois de Janvier et de 74.474 ( $b=0.8725$ ) en mois de Juillet à la station de Oued El-Abtal.

Tableau (4.17) : Valeurs caractéristiques des paramètres de la relation de puissance lors de la montée et de la décrue (Station de Sidi AEK Djilali)

N	Montée			Décrue			$a_d/a_m$	$C_{max}$ (g/l)	Position de $C_{max}$
	$a_m$	$b_m$	$R^2$	$a_d$	$b_d$	$R^2$			
1	9.4528	1.5381	0.9763	3.0065	1.7063	0.9768	0.32	81.58	Avec $Q_{max}$
2	39.513	1.2642	0.9657	73.572	1.2354	0.9984	1.86	178.10	Avant $Q_{max}$
3	15.048	1.048	1.00	6.8594	1.6556	0.9914	0.46	167.70	Avec $Q_{max}$
4	217.91	0.8491	0.8454	10.148	1.561	0.8464	0.05	176.50	Avant $Q_{max}$
5	7.0793	1.8591	0.9886	11.701	1.8237	0.9309	1.65	189.58	Avant $Q_{max}$
6	29.899	1.4677	0.9925	3.0106	1.8273	0.9901	0.10	117.06	Avant $Q_{max}$
7	106.79	1.0627	0.9804	13.94	1.5485	0.9818	0.13	158.94	Avant $Q_{max}$
8	5.5481	1.7407	1.00	8.8532	1.6216	0.9675	1.60	89.18	Avec $Q_{max}$
9	115.32	0.9966	0.9997	11.573	1.493	0.9703	0.10	120.56	Avant $Q_{max}$
10	39.233	1.2449	0.9437	23.97	1.3757	0.9586	0.61	188.98	Après $Q_{max}$
11	25.519	1.1522	0.7691	0.6773	2.0008	0.9848	0.03	105.02	Avant $Q_{max}$
12	530.59	0.7746	0.9887	16.672	1.4703	0.9554	0.03	230.76	Avant $Q_{max}$
13	16.574	1.498	0.9228	18.816	1.3992	0.9211	1.14	147.00	Avec $Q_{max}$
14	32.081	1.1758	0.9241	30.946	1.4232	0.9755	0.96	108.00	Avant $Q_{max}$
15	6.3484	1.7411	0.9975	15.834	1.4805	0.952	2.49	72.00	Avant $Q_{max}$
16	102.12	1.2777	0.9083	123.88	1.3508	0.9904	1.21	232.64	Avec $Q_{max}$

Pour la majorité des crues, on enregistre la production de la concentration maximale avant ou après celle du débit liquide maximal. Ce décalage signifierait que  $a$  serait indépendant du débit liquide maximal, résultat confortant les analyses précédentes.

En conclusion on peut dire que l'étude à différentes échelles temporelles de la relation de puissance a permis d'appréhender la complexité d'approche du transport solide et d'analyser le comportement des paramètres de l'équation. Il a été possible de définir des relations très fortes entre les deux paramètres a et b, et des bonnes relations à l'échelle annuelle entre a et l'hydraulicité notamment pour la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali.

A l'échelle saisonnière la pluie explique fortement les variations du paramètre a aussi bien à la station hydrométrique de Oued El-Abtal qu'à la station de Sidi AEK Djilali, tandis que le débit liquide maximum n'explique pas bien la variation de l'exposant b.

A l'échelle mensuelle, la relation: paramètre a - pluie moyenne mensuelle  $P_m$  est bonne à la station de Oued El-Abtal, tandis que les relations: paramètre b – pluie moyenne mensuelle  $P_m$ , paramètre a - débit mensuel spécifique  $Q_s$ , ne sont significatives qu'à la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali.

À l'échelle d'un événement averse – crue, le modèle varie d'une crue à une autre. De plus, le comportement de a et b est plus détaillé. Ainsi, les valeurs de a et b sont inversement proportionnelles. L'évolution de a et b pour tous les mois n'est pas claire. Pour des crues survenues durant un même mois, les paramètres a et b peuvent présenter de faibles ou de fortes valeurs probablement en fonction des caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant, des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau et de la nature et de l'état de surface des sols. Le paramètre a semble faiblement lié aux composantes de la pluie. La tendance est une diminution de a (augmentation de b) lorsque la hauteur et l'intensité maximale de l'averse augmentent. Les valeurs de a les plus élevées caractériseraient un IPA faible et une forte érodabilité des sols du bassin, tandis que les faibles valeurs de a signifieraient un état de saturation du sol, soit un IPA fort et une érodabilité faible.

Aussi, comme la relation entre le débit solide en suspension et le débit liquide est généralement complexe et est influencé par la nature des averses, la variabilité spatiotemporelle de l'hydro-pluviométrie et les caractéristiques du bassin, on peut conclure que la fonction puissance de la courbe de transport solide est une méthode appropriée pour l'estimation et l'analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued Mina. Mais, il convient de souligner que toute fonction théorique n'est pas une représentation exacte du processus naturel, mais seulement une description qui se rapproche du phénomène en question et qui s'est révélée utile pour décrire les données observées.

## CHAPITRE 5

# EROSION ET ENVASEMENT DU BARRAGE DE SMBA

### 5.1 Quantification des apports solides

L'étude de la relation débit liquide - débit solide à différentes échelles temporelles montre que les corrélations sont meilleures à l'échelle intra annuelle (mensuelle) pour les deux stations hydrométriques du bassin versant de l'Oued Mina, d'autant plus que la variation du transport solide en suspension est beaucoup plus importante aux échelles interannuelle et annuelle qu'à l'échelle intra annuelle.

Ces relations nous permettent de quantifier les apports solides fins déposés dans la retenue du barrage de SMBA à l'échelle journalière, mensuelle et annuelle même au-delà de la période d'observation des débits solides (extrapolation à partir de 1977/1978, date de mise en service du barrage), étant donné la disponibilité des débits moyens journaliers de 1953/1954 à 2001/2002 (station de Oued El-Abtal) et de 1969/1970 à 2001/2002 (station de Sidi AEK Djilali). Seuls les apports solides aux échelles annuelle et mensuelle sont donnés aux tableaux (5.1), (5.2), (5.3), (5.4) et bien illustrés par la figure (5.1).

L'écoulement annuel au niveau de la station hydrométrique de Oued El-Abtal varie avec un facteur 3.22, de 20.585 à 189.217Mm<sup>3</sup> (coefficient de variation égal à 0.55) L'apport liquide moyen interannuel est estimé à 66.222Mm<sup>3</sup>. La plus faible charge solide (0.224MT) est estimée pour l'année hydrologique 1984/1985 qui est une année très sèche et qui a connue le plus faible apport liquide (20.585Mm<sup>3</sup>). La charge solide la plus élevée (6.274MT) s'est produite durant l'année hydrologique 1995/1996 qui est une année humide et qui a connue l'apport liquide le plus élevé (189.217Mm<sup>3</sup>) avec une valeur de 576.2m<sup>3</sup>/s du débit instantané caractérisant le quatrième débit max historique et un débit moyen journalier de 224.21m<sup>3</sup>/s (crue de 04 à 09 Février 1996). Le coefficient de variation de la charge solide est égal à 0.80.

L'Oued Mina véhicule au niveau de la station hydrométrique de Oued El-Abtal près de 66.22Mm<sup>3</sup> d'eau (apport liquide) en moyenne par an représentant une lame d'eau écoulée de 16.05mm, soit un coefficient d'écoulement d'environ 5.8%. Ces apports liquides ramènent en moyenne près de 1.858MT de sédiments en suspension, soit un apport



spécifique de 450.23T/Km<sup>2</sup>/an. La charge solide moyenne annuelle en suspension serait de l'ordre de 28.05g/l.

Tableau (5.1): Apports solides fins à l'échelle annuelle (Station de Oued El-Abtal)

Année	Apport liquide (Mm <sup>3</sup> )	Débit moyen annuel (m <sup>3</sup> /s)	Apport solide MT	Apport solide spécifique (T/Km <sup>2</sup> )
1977/1978	70.937	2.264	1.167	282.744
1978/1979	73.793	2.339	1.521	368.727
1979/1980	89.529	2.813	1.910	462.910
1980/1981	110.264	3.510	2.278	552.087
1981/1982	45.356	1.459	0.520	126.090
1982/1983	78.310	2.473	1.585	384.099
1983/1984	27.717	0.876	0.403	97.646
1984/1985	20.585	0.653	0.224	54.306
1985/1986	86.679	2.768	2.381	577.030
1986/1987	82.843	2.661	2.133	516.983
1987/1988	49.155	1.552	0.877	212.595
1988/1989	41.871	1.315	0.848	205.645
1989/1990	70.481	2.210	3.808	922.899
1990/1991	45.479	1.431	1.001	242.531
1991/1992	24.941	0.786	0.404	97.800
1992/1993	28.559	0.927	0.551	133.631
1993/1994	43.137	1.390	1.047	253.840
1994/1995	113.939	3.603	5.204	1261.242
1995/1996	189.217	6.028	6.274	1520.715
1996/1997	78.161	2.469	3.345	810.831
1997/1998	43.389	1.383	1.205	291.951
1998/1999	88.477	2.804	1.962	475.579
1999/2000	40.060	1.257	1.227	297.308
2000/2001	67.106	2.134	2.001	484.880
2001/2002	45.564	1.442	2.565	621.718
Somme	1655.547	52.550	46.441	/
Moyenne	66.222	2.102	1.858	450.232
Ecart type	36.554	1.163	1.487	360.297
CV	0.55	0.55	0.80	0.80

L'écoulement annuel au niveau de la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali varie avec un facteur 50.58, de 0.079 à 13.567Mm<sup>3</sup> (coefficient de variation égal à 0.88). L'apport moyen interannuel est estimé à 3.996Mm<sup>3</sup>. La plus faible charge solide (0.001MT) est estimé pour l'année hydrologique 1999/2000 qui est une année sèche et qui a connue le plus faible apport liquide (0.079Mm<sup>3</sup>). La charge solide la plus élevée (0.524MT) s'est produite durant l'année hydrologique 1986/1987 qui est une année humide et qui a connue l'apport liquide le plus élevé (13.567Mm<sup>3</sup>) avec une valeur de 144.375m<sup>3</sup>/s du débit instantané caractérisant le

troisième débit max historique et un débit moyen journalier de  $11.01\text{m}^3/\text{s}$  (crue de 13 à 14 Octobre 1986). Le coefficient de variation de la charge solide est égal à 0.98.

L'Oued Haddad véhicule au niveau de la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali près de  $3.996\text{Mm}^3$  d'eau (apport liquide) en moyenne par an représentant une lame d'eau écoulée de 8.50mm, soit un coefficient d'écoulement d'environ 3.2%. Ces apports liquides ramènent en moyenne près de 0.136MT de sédiments en suspension, soit un apport spécifique de  $288.495\text{T}/\text{Km}^2/\text{an}$ . La charge solide moyenne annuelle en suspension serait de l'ordre de 33.94g/l.

Tableau (5.2): Apports solides fins à l'échelle annuelle (Station de Sidi AEK Djilali)

Année	Apport liquide ( $\text{Mm}^3$ )	Débit moyen annuel ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Apport solide MT	Apport solide spécifique ( $\text{T}/\text{Km}^2$ )
1977/1978	4.010	0.128	0.086	183.421
1978/1979	6.032	0.194	0.186	396.037
1979/1980	6.750	0.212	0.198	420.855
1980/1981	6.167	0.197	0.179	381.279
1981/1982	3.463	0.113	0.076	161.196
1982/1983	7.829	0.250	0.228	485.191
1983/1984	4.216	0.134	0.132	280.935
1984/1985	2.184	0.069	0.057	120.541
1985/1986	4.977	0.163	0.147	312.288
1986/1987	13.567	0.430	0.524	1113.843
1987/1988	7.601	0.241	0.275	585.402
1988/1989	2.841	0.089	0.078	166.408
1989/1990	6.747	0.210	0.323	688.250
1990/1991	10.878	0.341	0.408	867.681
1991/1992	0.774	0.024	0.016	34.215
1992/1993	0.789	0.025	0.028	58.983
1993/1994	2.569	0.083	0.090	191.232
1994/1995	3.051	0.097	0.140	296.989
1995/1996	1.782	0.056	0.053	111.713
1996/1997	0.907	0.029	0.058	123.624
1997/1998	0.448	0.014	0.010	21.320
1998/1999	0.385	0.012	0.009	19.679
1999/2000	0.079	0.003	0.001	2.928
2000/2001	1.524	0.048	0.075	160.193
2001/2002	0.338	0.011	0.013	28.161
Somme	99.906	3.172	3.390	/
Moyenne	3.996	0.127	0.136	288.495
Ecart type	3.506	0.111	0.132	281.862
CV	0.88	0.88	0.98	0.98

L'écoulement mensuel au niveau de la station hydrométrique de Oued El-Abtal varie avec un facteur 3.42, de 1.613 à 9.871Mm<sup>3</sup> (coefficient de variation égal à 0.49). La plus faible charge solide (0.031MT) est estimée pour le mois de juin qui est un mois sec et qui a connu le plus faible apport liquide (1.613Mm<sup>3</sup>). La charge solide la plus élevée (0.355MT) s'est produite pour le mois de Mai qui est un mois humide et qui a connu un apport liquide important (7.543Mm<sup>3</sup>) avec une valeur de 723.16m<sup>3</sup>/s du débit instantané caractérisant le deuxième débit max historique et un débit moyen journalier de 220.83m<sup>3</sup>/s (crue de 01 à 06 Mai 1990). Le coefficient de variation de la charge solide est égal à 0.64.

Tableau (5.3): Apports solides fins à l'échelle mensuelle de 1977/1978 à 2001/2002 (Station de Oued El-Abtal)

Mois	Apport liquide moyen (Mm <sup>3</sup> )	Débit moyen (m <sup>3</sup> /s)	Apport solide MT		Apport solide spécifique (T/Km <sup>2</sup> )
				CV	
Septembre	5.239	2.021	0.232	2.16	56.260
Octobre	8.878	3.315	0.290	1.58	70.165
Novembre	6.578	2.021	0.122	1.35	29.653
Décembre	4.157	1.552	0.055	1.32	13.217
Janvier	5.443	2.032	0.112	1.61	27.115
Février	7.510	3.071	0.181	2.65	43.868
Mars	9.871	3.685	0.201	1.54	48.785
Avril	5.280	2.037	0.108	1.93	26.234
Mai	7.543	2.816	0.355	1.96	86.124
Juin	1.613	0.622	0.031	2.70	7.517
Juillet	2.220	0.829	0.079	2.37	19.251
Aout	1.889	0.705	0.091	4.27	22.042
Somme	66.222	24.707	1.858	/	450.232
Moyenne	5.518	2.059	0.155	2.12	37.519
Ecart type	2.709	1.022	0.099	0.82	23.947
CV	0.49	0.49	0.64	0.39	0.64

L'Oued Mina véhicule au niveau de la station hydrométrique de Oued El-Abtal près de 5.518Mm<sup>3</sup> d'eau (apport liquide) en moyenne par mois (137.95Mm<sup>3</sup> dans la période 1977/1978 à 2001/2002). Ces apports liquides ramènent en moyenne près de 0.155MT de sédiments en suspension par mois (3.870MT dans la période 1977/1978 à 2001/2002), soit un apport spécifique de 37.519 T/Km<sup>2</sup>/mois (937.983 T/Km<sup>2</sup>/mois dans la période 1977/1978 à 2001/2002).

Tableau (5.4): Apports solides fins à l'échelle mensuelle de 1977/1978 à 2001/2002 (Station de Sidi AEK Djilali)

Mois	Apport liquide moyen (Mm <sup>3</sup> )	Débit moyen (m <sup>3</sup> /s)	Apport solide MT		Apport solide spécifique (T/Km <sup>2</sup> )
				CV	
Septembre	0.132	0.051	0.005	2.75	11.460
Octobre	0.467	0.174	0.020	2.16	43.403
Novembre	0.558	0.215	0.015	1.87	32.127
Décembre	0.365	0.136	0.011	1.84	23.735
Janvier	0.470	0.175	0.015	1.76	32.266
Février	0.526	0.216	0.013	1.53	27.862
Mars	0.826	0.308	0.026	2.53	55.666
Avril	0.127	0.049	0.006	1.67	12.059
Mai	0.133	0.050	0.005	1.96	11.689
Juin	0.045	0.017	0.003	4.17	5.480
Juillet	0.320	0.119	0.014	3.38	30.685
Aout	0.027	0.010	0.001	4.41	2.063
Somme	3.996	1.523	0.136	/	288.495
Moyenne	0.333	0.127	0.011	2.50	24.041
Ecart type	0.247	0.094	0.008	0.99	16.093
CV	0.74	0.74	0.67	0.39	0.67

L'écoulement mensuel au niveau de la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali dans la période 1977/1978 à 2001/2002 varie avec un facteur 12.33, de 0.027 à 0.826Mm<sup>3</sup> (coefficient de variation égal à 0.74). La plus faible charge solide (0.001MT) est estimée pour le mois d'Août qui est un mois sec et qui a connu le plus faible apport liquide (0.027Mm<sup>3</sup>). La charge solide la plus élevée (0.026MT) s'est produite pour le mois de Mars qui est un mois humide et qui a connu un apport liquide important (0.826Mm<sup>3</sup>) avec une valeur de 149.0m<sup>3</sup>/s du débit instantané caractérisant le deuxième débit max historique et un débit moyen journalier de 9.39m<sup>3</sup>/s (crue de 08 à 10 Mars 1996). Le coefficient de variation de la charge solide est égal à 0.67.

L'Oued Haddad véhicule au niveau de la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali près de 0.333Mm<sup>3</sup> d'eau (apport liquide) en moyenne par mois (8.325Mm<sup>3</sup> dans la période 1977/1978 à 2001/2002). Ces apports liquides ramènent en moyenne près de 0.0113MT de sédiments en suspension par mois (0.282MT dans la période 1977/1978 à 2001/2002), soit un apport spécifique de 24.041T/Km<sup>2</sup>/mois (601.030T/Km<sup>2</sup>/mois dans la période 1977/1978 à 2001/2002).

Le cours d'eau supérieur de l'Oued Mina est limité par le barrage réservoir de Bakhada. De là, à la station hydrométrique de Oued El-Abtal, il reçoit les Oueds : Medroussa, Taht et El-Abd qui drainent une superficie de 4126 Km<sup>2</sup>. De la station de Oued El-Abtal au

barrage de SMBA, il reçoit l'Oued Haddad et plusieurs cours d'eau secondaires non jaugés. L'Oued Haddad draine au niveau de la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali une superficie de 470Km<sup>2</sup>.

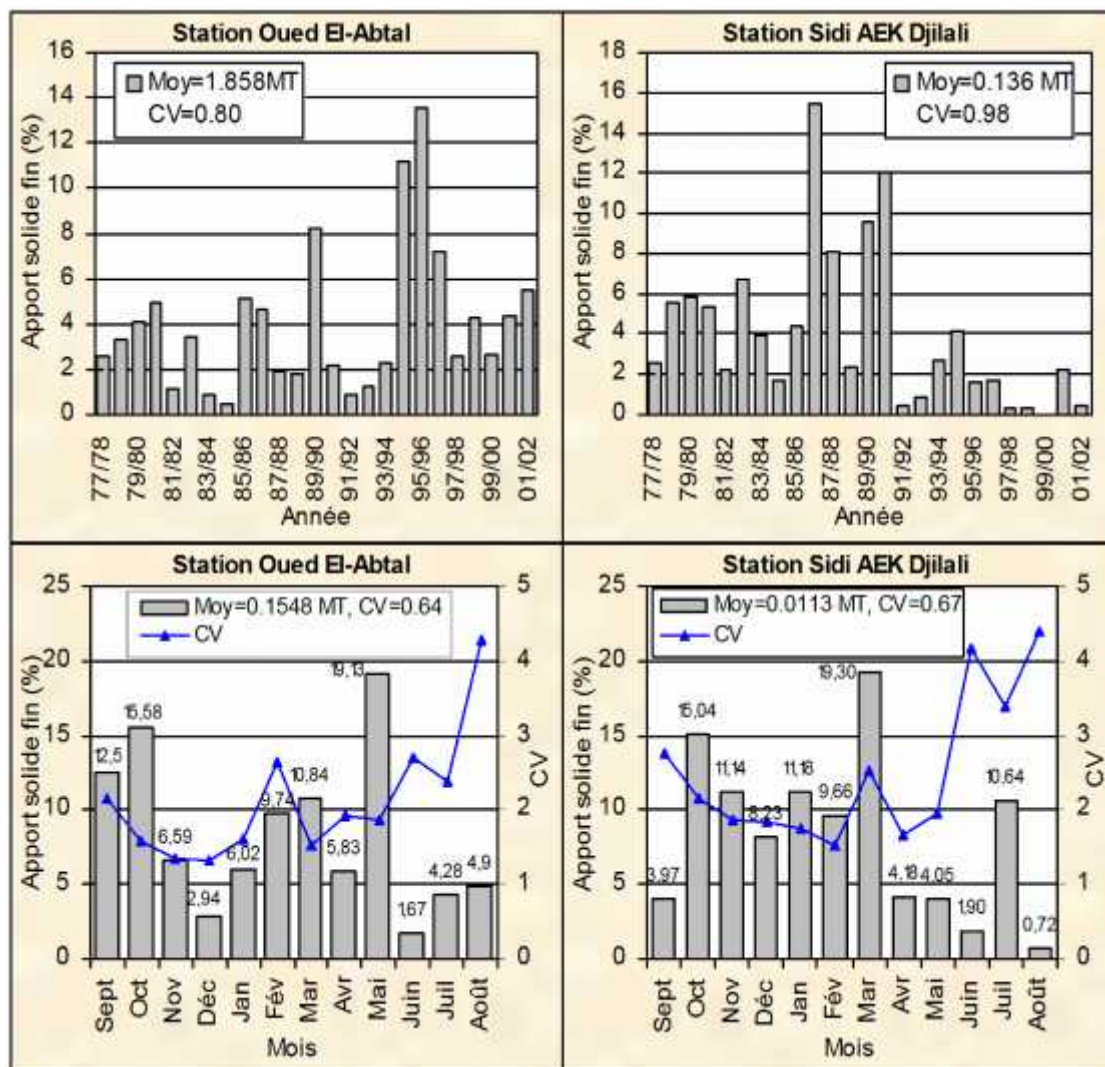


Figure (5.1): Variation des apports solides fins aux échelles mensuelle et annuelle (Stations de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali), 1977/1978 à 2001/2002

Des stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali au barrage de SMBA, les cours d'eau secondaires non jaugés drainent une superficie de 304Km<sup>2</sup>. Si on considère que ces cours d'eau ramènent en moyenne des apports solides et liquides spécifiques identiques à ceux de l'Oued Haddad (soit 288.495T/Km<sup>2</sup>/an et 0.0085Mm<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>/an respectivement), étant donné que les deux régions sont très proches (mêmes caractéristiques physiques et hydro climatiques) et que la zone du Nord à laquelle appartiennent les deux régions est purement marneuse et est dépourvue de végétation, on

obtient les bilans des apports solides fins aux échelles mensuelle et annuelle montrés aux tableaux (5.5) et (5.6) et illustrés par la (5.2).

Les résultats obtenus sur les 25 années d'exploitation du barrage de SMBA montrent qu'il existe une variation remarquable de l'apport solide tant sur les valeurs intra annuelles (coefficient de variation égal à 0.59) que celles interannuelles (coefficient de variation égal à 0.84). L'apport solide fin spécifique moyen interannuel du bassin versant de l'Oued Mina s'élève à 424.682T/Km<sup>2</sup>.

Tableau (5.5) : Bilan des apports solides fins à l'échelle annuelle

Année	Apport solide des 2 stations (MT)	Apport solide des cours non jaugés (MT)	Apport liquide total (Mm <sup>3</sup> )	Apport solide total (MT)	Apport solide spécifique (T/Km <sup>2</sup> )
1977/1978	1.253	0.056	77.540	1.309	267.094
1978/1979	1.707	0.120	83.726	1.827	372.938
1979/1980	2.108	0.128	100.645	2.236	456.314
1980/1981	2.457	0.116	120.420	2.573	525.083
1981/1982	0.596	0.049	51.059	0.645	131.633
1982/1983	1.813	0.147	91.202	1.960	400.102
1983/1984	0.535	0.085	34.661	0.620	126.613
1984/1985	0.281	0.037	24.181	0.318	64.825
1985/1986	2.528	0.095	94.875	2.623	535.293
1986/1987	2.657	0.339	105.186	2.996	611.349
1987/1988	1.152	0.178	61.672	1.330	271.421
1988/1989	0.926	0.051	46.549	0.977	199.304
1989/1990	4.131	0.209	81.592	4.340	885.761
1990/1991	1.409	0.264	63.393	1.673	341.383
1991/1992	0.420	0.010	26.216	0.430	87.837
1992/1993	0.579	0.018	29.858	0.597	121.823
1993/1994	1.137	0.058	47.367	1.195	243.905
1994/1995	5.344	0.090	118.963	5.434	1109.038
1995/1996	6.327	0.034	192.152	6.361	1298.155
1996/1997	3.403	0.038	79.655	3.441	702.160
1997/1998	1.215	0.006	44.126	1.221	249.282
1998/1999	1.971	0.006	89.111	1.977	403.466
1999/2000	1.228	0.001	40.191	1.229	250.794
2000/2001	2.076	0.049	69.615	2.125	433.612
2001/2002	2.578	0.009	46.120	2.587	527.870
Somme	49.831	2.193	1820.075	52.024	/
Moyenne	1.993	0.088	72.803	2.081	424.682
Ecart type	1.502	0.086	37.797	1.740	355.173
CV	0.75	0.98	0.52	0.84	0.84

Les années 1989/1990, 1994/1995, 1995/1996 et 1996/1997 ont fourni près de 37.63% du total de matériaux en suspension mobilisé sur la période 1977/1978 à 2001/2002.

La plus faible charge solide (0.318MT) est estimée pour l'année hydrologique 1984/1985 qui est une année sèche et qui a connue le plus faible apport liquide. La charge solide la plus élevée (6.361MT soit 12.23% du total mobilisé) s'est produite durant l'année hydrologique 1995/1996 qui est une année humide et qui a connue l'apport liquide le plus élevé. Cette année est caractérisée par un grand nombre de crues à fort taux de transport solide, et particulièrement par les crues de 04 à 07 Février 1996 et 08 à 10 Mars 1996.

Les mois d'Octobre et de Mai ont fourni près de 33.04% du total de matériaux en suspension mobilisé sur la période 1977/1978 à 2001/2002. La plus faible charge solide (0.881MT) est estimée pour le mois de Juin qui est un mois sec et qui a connu le plus faible apport liquide. La charge solide la plus élevée (9.110MT soit 17.51% du total mobilisé) s'est produite durant le mois de Mai qui est un mois humide et qui a connu l'apport liquide le plus élevé. Ce mois est caractérisé par un grand nombre de crues à fort taux de transport solide, et particulièrement par les crues de crue de 01 à 06 Mai 1990 et 05 à 07 Mai 1993.

Tableau(5.6): Bilan des apports solides fins cumulés à l'échelle mensuelle de 77/78 à 01/02

Mois	Apport solide des 2 stations (MT)	Apport solide des cours non jaugés (MT)	Apport liquide total (Mm <sup>3</sup> )	Apport solide total (MT)	Apport solide spécifique (T/Km <sup>2</sup> )
Septembre	5.938	0.087	137.078	6.025	1229.612
Octobre	7.748	0.330	244.547	8.078	1648.543
Novembre	3.436	0.244	184.615	3.680	751.054
Décembre	1.642	0.180	118.046	1.822	371.915
Janvier	3.176	0.245	154.854	3.421	698.208
Février	4.852	0.212	205.918	5.064	1033.418
Mars	5.686	0.423	279.430	6.109	1246.747
Avril	2.848	0.092	138.235	2.940	599.929
Mai	9.021	0.089	194.783	9.110	1859.151
Juin	0.839	0.042	42.948	0.881	179.725
Juillet	2.347	0.233	71.310	2.580	526.572
Aout	2.298	0.016	48.382	2.314	472.179
Somme	49.831	2.193	1820.145	52.024	/
Moyenne	4.153	0.183	151.679	4.335	884.754
Ecart type	2.519	0.122	74.661	2.558	521.996
CV	0.61	0.67	0.492	0.59	0.59

L'analyse des valeurs intra annuelles montre que l'Automne et le Printemps participent chacune avec (34 et 35% pour la station de Oued El-Abtal, 30 et 28% pour la station de Sidi AEK Djilali) du transport solide en suspension annuel, alors que l'Hiver et l'Eté participent avec (20 et 11% pour la station de Oued El-Abtal, 29 et 13% la station de Sidi AEK Djilali) respectivement. Cette variabilité s'explique par la variation du couvert



végétal durant l'année et surtout par la nature des pluies d'Automne et de Printemps (pluies importantes agressives et orageuses). Le faible taux de transport solide en suspension d'Hiver s'explique par le fait que la plus grande partie des particules solides a été transportée par les premières crues d'automne, tandis ce que celui de l'Eté est due à l'absence quasi-totale de précipitation (saison sèche).

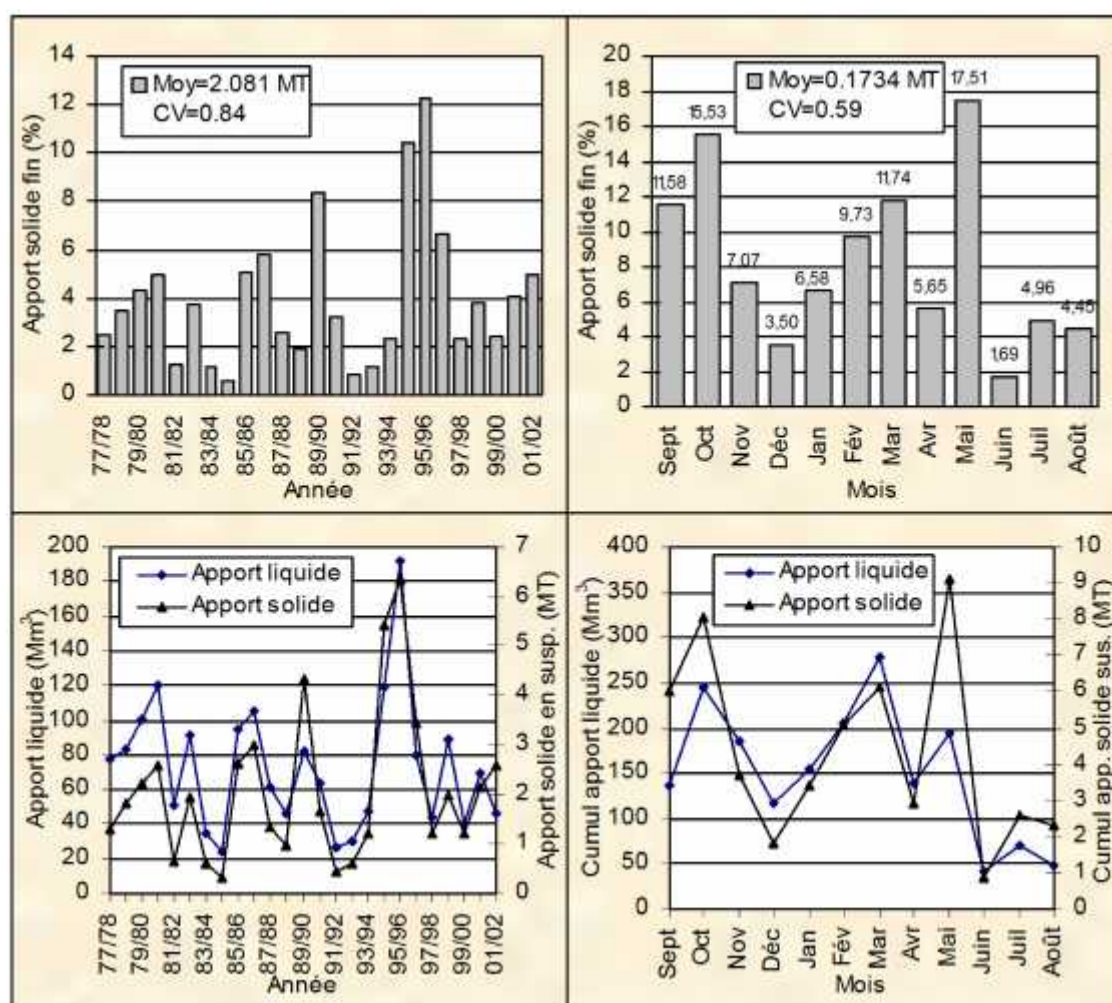


Figure (5.2): Variation interannuelle et intra annuelle des apports solides fins déposés dans la retenue du barrage de SMBA, 1977/1978 à 2001/2002

En Algérie, seul le transport solide en suspension est mesuré et le transport solide charrié est pris égal à 30 % du transport solide en suspension [12]. Les tableaux (5.7) et (5.8) et les figures (5.3) et (5.4) montrent le bilan total des apports solides fins et grossiers et la variation de la capacité de stockage de la retenue de barrage de SMBA durant la période 1977/1978 à 2001/2002 aux échelles mensuelle et annuelle.

Tableau(5.7) : Bilan des apports solides fins et grossiers à l'échelle annuelle

Année	Apport solide fin et grossier (MT)	Apport solide spécifique (T/Km <sup>2</sup> )	Volume de la vase dans la retenue (Mm <sup>3</sup> )	Capacité de la retenue (Mm <sup>3</sup> )
1977/1978	1.701	347.222	1.063	233.937
1978/1979	2.376	484.819	1.485	232.452
1979/1980	2.907	593.209	1.817	230.635
1980/1981	3.345	682.608	2.090	228.545
1981/1982	0.839	171.123	0.524	228.021
1982/1983	2.549	520.132	1.593	226.428
1983/1984	0.807	164.597	0.504	225.924
1984/1985	0.413	84.273	0.258	225.666
1985/1986	3.410	695.881	2.131	223.534
1986/1987	3.894	794.753	2.434	221.100
1987/1988	1.729	352.847	1.081	220.020
1988/1989	1.270	259.095	0.793	219.226
1989/1990	5.642	1151.489	3.526	215.700
1990/1991	2.175	443.797	1.359	214.341
1991/1992	0.560	114.188	0.350	213.991
1992/1993	0.776	158.369	0.485	213.506
1993/1994	1.554	317.077	0.971	212.535
1994/1995	7.065	1441.749	4.415	208.120
1995/1996	8.269	1687.602	5.168	202.951
1996/1997	4.473	912.807	2.795	200.156
1997/1998	1.588	324.066	0.992	199.164
1998/1999	2.570	524.506	1.606	197.557
1999/2000	1.598	326.032	0.998	196.559
2000/2001	2.762	563.696	1.726	194.832
2001/2002	3.363	686.230	2.102	192.731
Somme	67.631	/	42.269	/
Moyenne	2.705	552.087	1.691	/
Ecart type	2.262	461.725	1.414	/
CV	0.84	0.84	0.84	/

La retenue de barrage de SMBA d'une capacité initiale de stockage de 235Mm<sup>3</sup> reçoit 2.705MT (1.691Mm<sup>3</sup>) de matériau solide annuellement, soit un taux de comblement de 0.72 %/an. Ce taux montre d'après la classification établie par Remini et Hallouche (2005) [6] que le barrage de SMBA est de moyen taux de comblement, contrairement à ce que l'on pense d'après les études précédentes [96] qui classifient ce dernier parmi ceux de faible taux d'envasement. Le barrage a accumulé 67.631MT soit 42.269Mm<sup>3</sup> en 25 années (Août 2002), ce qui représente 18% de sa capacité. On prévoit l'accumulation de 72.713Mm<sup>3</sup> (30.94%) à l'horizon 2020, 106.533Mm<sup>3</sup> (45.33%) à l'horizon 2040 et un comblement total de la retenue à l'horizon 2136, soit une durée de vie de 158 ans.

Tableau (5.8) : Bilan des apports solides fins et grossiers cumulés à l'échelle mensuelle de 1977/1978 à 2001/2002

Mois	Apport solide fin et grossier total (MT)	Apport solide spécifique (T/Km <sup>2</sup> )	Volume de la vase dans la retenue (Mm <sup>3</sup> )	Capacité de la retenue (Mm <sup>3</sup> )
Septembre	7.833	1598.496	4.895	230.105
Octobre	10.501	2143.106	6.563	223.541
Novembre	4.784	976.370	2.990	220.551
Décembre	2.369	483.490	1.481	219.071
Janvier	4.448	907.670	2.780	216.291
Février	6.583	1343.443	4.114	212.176
Mars	7.942	1620.771	4.964	207.213
Avril	3.822	779.907	2.388	204.824
Mai	11.843	2416.896	7.402	197.423
Juin	1.145	233.642	0.716	196.707
Juillet	3.354	684.544	2.096	194.611
Août	3.008	613.833	1.880	192.731
Somme	67.631	/	42.269	/
Moyenne	5.636	1150.181	3.522	/
Ecart type	3.325	678.594	2.078	/
CV	0.59	0.59	0.59	/

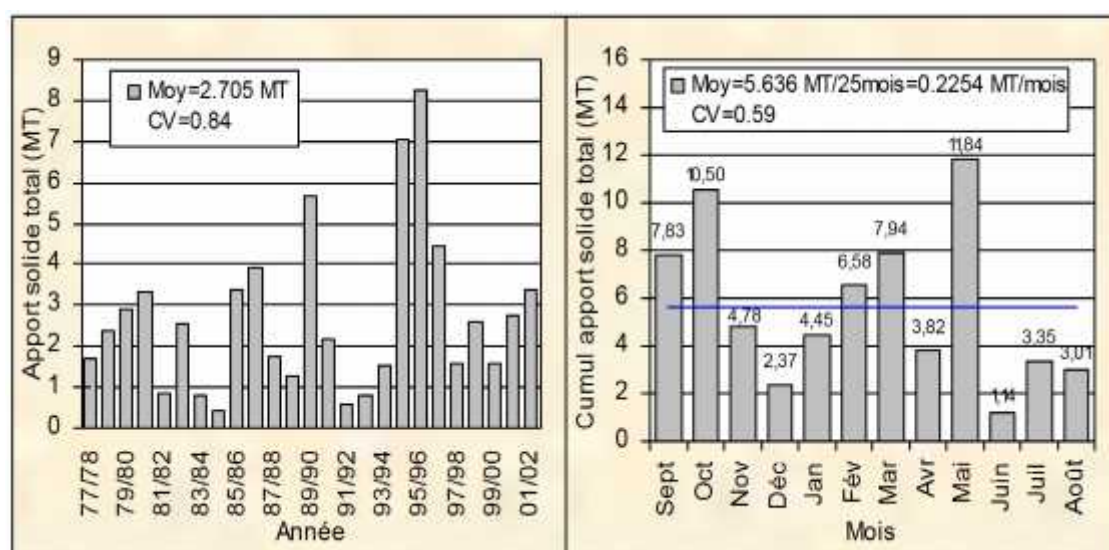


Figure (5.3): Variation interannuelle et intra annuelle des apports solides fins et grossiers déposés dans la retenue du barrage de SMBA, 1977/1978 à 2001/2002

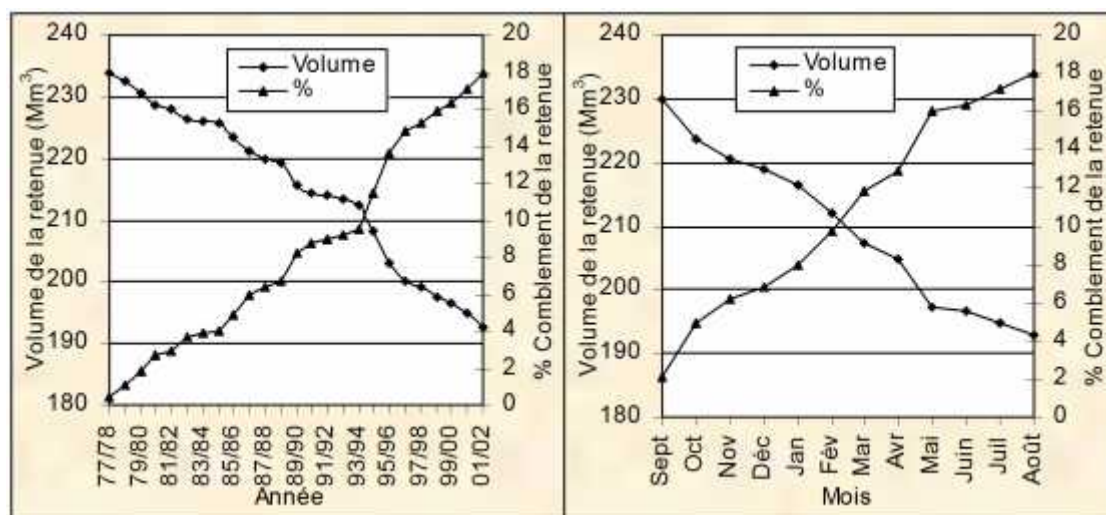


Figure (5.4): Variation interannuelle et intra annuelle de la capacité de stockage de la retenue de barrage de SMBA, 1977/1978 à 2001/2002

Les apports solides fins déposés dans la retenue du barrage de SMBA à l'échelle journalière, mensuelle et annuelle ont été calculés en utilisant quatre approches d'estimation de la charge solide à savoir :

Approche 1 : S'appuie sur l'emploi des courbes d'estimations interannuelles liant le débit solide instantané au débit liquide instantané :

$$Q_s = 8.6475Q_l^{1.3289} \text{ (station de Oued El-Abtal);}$$

$$Q_s = 27.652Q_l^{1.2534} \text{ (station Sidi AEK Djilali).}$$

Approche 2 : S'appuie sur l'emploi des courbes d'estimations interannuelles liant le débit solide moyen journalier au débit liquide moyen journalier:

$$Q_s = 8.1297Q_l^{1.3481} \text{ (station de Oued El-Abtal);}$$

$$Q_s = 35.496Q_l^{1.167} \text{ (station Sidi AEK Djilali).}$$

Approche 3 : S'appuie sur l'emploi des courbes d'estimations intra annuelles liant le débit solide instantané au débit liquide instantané qu'on a retenu précédemment pour le calcul de la charge solide déposés dans la retenue de barrage de SMBA:

$$Q_s = aQ_l^b \text{ (Tableau 4.6)}$$

Approche 4 : S'appuie sur l'emploi des courbes d'estimations annuelles liant le débit solide instantané au débit liquide instantané. La charge solide totale déposée dans la retenue de barrage de SMBA ne peut être calculée que dans la période 1985/1986 à 2000/2001.

$Q_s = aQ_l^b$  (Tableau 4.5)

Les résultats exprimés en million de tonne (MT) sont donnés aux tableaux (5.9) et (5.10) et illustrés par la figure (5.5)

Tableau (5.9) : Bilan des apports solides fins à l'échelle annuelle pour différentes approches

Année	Approche 1 (MT)	Approche 2 (MT)	Approche 3 (MT)	Approche 4 (MT)
1977/1978	1.318	1.353	1.309	/
1978/1979	1.715	1.767	1.827	/
1979/1980	2.129	2.190	2.236	/
1980/1981	2.507	2.564	2.573	/
1981/1982	0.756	0.783	0.645	/
1982/1983	2.141	2.209	1.960	/
1983/1984	0.549	0.592	0.620	/
1984/1985	0.358	0.378	0.318	/
1985/1986	2.402	2.455	2.623	1.690
1986/1987	2.863	2.955	2.996	2.464
1987/1988	1.395	1.456	1.330	1.127
1988/1989	1.061	1.089	0.977	1.037
1989/1990	2.855	2.921	4.340	3.859
1990/1991	2.136	2.165	1.673	1.679
1991/1992	0.471	0.478	0.430	0.627
1992/1993	0.557	0.561	0.597	1.048
1993/1994	1.159	1.183	1.195	1.781
1994/1995	4.669	4.822	5.434	6.505
1995/1996	5.444	5.528	6.361	6.406
1996/1997	2.613	2.676	3.441	2.833
1997/1998	1.158	1.174	1.221	1.750
1998/1999	2.337	2.358	1.977	3.014
1999/2000	1.130	1.144	1.229	0.946
2000/2001	2.314	2.372	2.125	2.615
2001/2002	1.838	1.900	2.587	/
Somme	47.877	49.073	52.024	39.383
Moyenne	1.915	1.963	2.081	2.461
Ecart type	1.226	1.253	1.740	1.788
CV	0.64	0.64	0.84	0.73

Les deux premières approches donnent pratiquement les mêmes résultats, étant donnée que les relations interannuelles de régression liant le débit solide instantané au débit liquide instantané sont pratiquement les mêmes que celles liant le débit solide moyen

journalier au débit liquide moyen journalier, pour les deux stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali. Ces deux approches montrent qu'elles conduisent en général à des faibles sous-estimations comparativement avec la troisième approche lorsque les conditions d'écoulements varient dans une large proportion. On note le plus grand écart pour les années 1989/1990, 1994/1995 et 1995/1996 et pour les mois de Septembre, Mars et Mai.

Tableau (5.10) : Bilan des cumuls des apports solides fins à l'échelle mensuelle de 1977/1978 à 2001/2002 pour différentes approches

Mois	Approche 1 (MT)	Approche 2 (MT)	Approche 3 (MT)
Septembre	4.130	4.221	6.025
Octobre	7.500	7.722	8.078
Novembre	5.044	5.205	3.680
Décembre	2.163	2.243	1.822
Janvier	3.227	3.348	3.421
Février	5.101	5.268	5.064
Mars	7.911	8.087	6.109
Avril	3.023	3.062	2.940
Mai	5.371	5.475	9.110
Juin	0.753	0.754	0.881
Juillet	2.072	2.057	2.580
Août	1.583	1.627	2.314
Somme	47.877	49.073	52.024
Moyenne	3.990	4.089	4.335
Ecart type	2.272	2.337	2.558
CV	0.57	0.57	0.59

L'approche 4 montre qu'elle conduit en général à des faibles surestimations comparativement avec la troisième approche. On note le plus grand écart pour l'année 1994/1995.

D'une manière générale, l'approche des courbes d'estimation sous-estime les hautes charges et surestime les faibles charges. Par conséquent, plus la période d'intérêt est longue plus la chance d'obtenir un équilibre entre les deux est grande.

Les cumuls des estimations des apports solides représentés dans la figure (5.5) montrent que la charge solide fin déposée dans la retenue de barrage de SMBA varie de 47.877MT et 49.073MT pour les deux premières approches à 52.024MT pour la troisième approche, soit une erreur maximale de 8%.



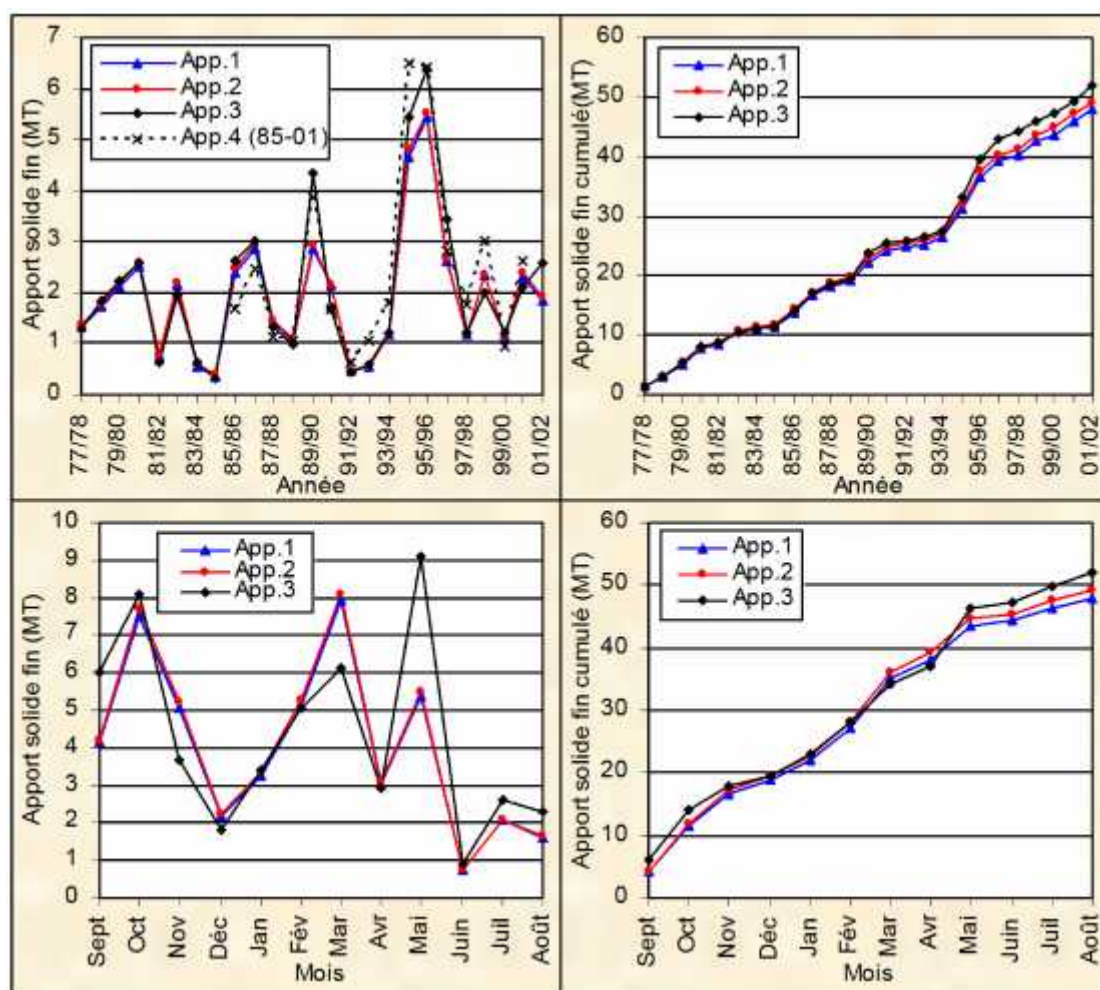


Figure (5.5): Comparaison des apports solides fins déposés dans la retenue de barrage de SMBA (1977/1978 à 2001/2002) par différentes approches d'estimation

## 5.2 Ajustement des apports solides annuels

On peut associer aux apports solides annuels estimés par les relations intra annuelles (approche 3) une formulation analytique statistique afin d'exprimer les résultats en fréquence ou en probabilité. L'expression des résultats en probabilité pose de réels problèmes, notamment le choix de la loi de probabilité qui conditionne toutes les extrapolations en admettant que l'exceptionnel est extrapolable à partir des résultats des dépôts des sédiments obtenus.

Pour cela, nous avons ajusté les résultats des apports solides au niveau des stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali et ceux déposés dans la retenue de barrage de SMBA à des lois statistiques différentes à savoir la loi Normale, la loi Log-Normale, la loi de Gumbel, la loi de Pearson III et la loi de Log-Pearson III. L'allure des points des apports solides et les tests d'adéquation de  $\chi^2$  et du coefficient de corrélation R



semble justifier la meilleure loi d'ajustement. Seuls les ajustements des apports solides à la loi Log-Normale (meilleure adéquation) ainsi que les valeurs expérimentales correspondantes de  $\chi^2$ , qui sont inférieures aux valeurs théoriques (adéquation admise), et du coefficient de corrélation R, sont illustrés dans le tableau (5.11) et la figure (5.6).

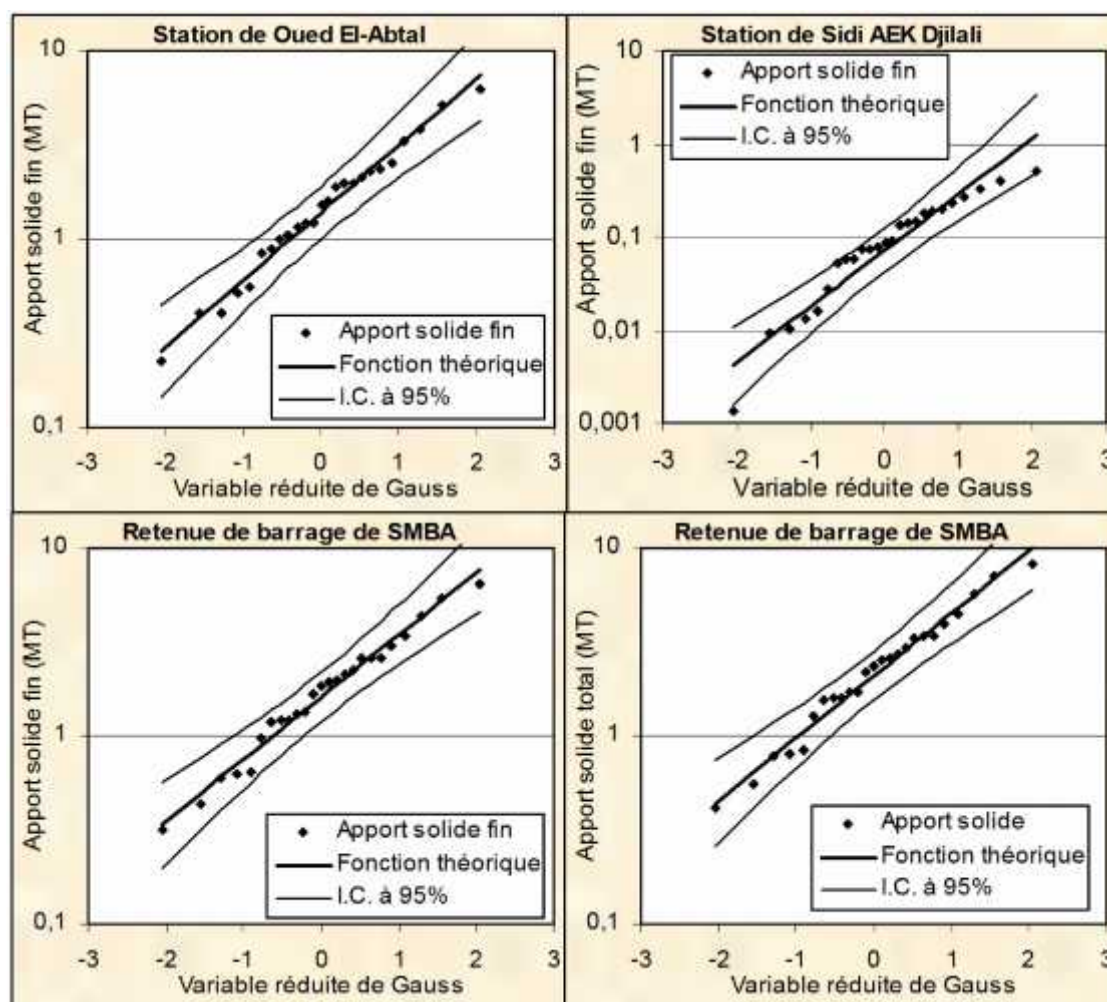


Figure (5.6): Ajustement des apports solide à la loi Log-Normale

Tableau (5.11) : Ajustement des apports solides à la loi Log-Normale

Station/retenue	Equation théorique	R	$\chi^2$
Station de Oued El-Abtal	$Ass = \exp(14.14 + 0.82U_{1-\frac{1}{T}})$	0.9893	$\chi_c^2 = 0.21 < \chi_{5,95\%}^2 = 11.07$
Station de Sidi AEK	$Ass = \exp(11.19 + 1.39U_{1-\frac{1}{T}})$	0.9312	$\chi_c^2 = 0.76 < \chi_{4,95\%}^2 = 9.49$
Retenue de barrage de SMBA	$Ass = \exp(14.29 + 0.76U_{1-\frac{1}{T}})$	0.9874	$\chi_c^2 = 0.81 < \chi_{4,95\%}^2 = 9.49$
Retenue de barrage de SMBA	$Ast = \exp(14.555 + 0.76U_{1-\frac{1}{T}})$	0.9874	$\chi_c^2 = 0.96 < \chi_{4,95\%}^2 = 9.49$

Ass : Apport solide en suspension, Ast : Apport solide total

Les ajustements ainsi faits nous permettent de calculer les apports solides pour différentes périodes de retour (tableau 5.12), bien qu'en pratique la prudence exige que l'on ne recherche pas un quantile dont la probabilité d'apparition corresponde à une période de retour supérieur au double (ou triple) de la longueur de l'échantillon. L'extrapolation est d'autant plus hasardeuse que les diverses lois divergent généralement entre elles pour les faibles fréquences, alors qu'il est difficile de choisir la plus adéquate au vu d'ajustements sur les échantillons réduits possédés, lesquels sont peu riches en valeurs rares de la variable. On ne peut donc pas exclure l'hypothèse selon laquelle la loi choisie n'est pas celle qui représente véritablement la population, une telle erreur est une erreur d'adéquation. Cette erreur s'ajoute à l'erreur d'échantillonnage pour expliquer les divergences entre les fréquences expérimentales et probabilités théoriques tirées de la loi ajustée.

Tableau (5.12) : Apports solides pour différentes périodes de retours (MT)

Station/retenue	Période de retour T (année)					
	2	5	10	20	50	100
Station de Oued El-Abtal (Ass)	1.380	2.751	3.982	5.352	7.495	9.357
Station de Sidi AEK (Ass)	0.073	0.234	0.438	0.722	1.278	1.861
Retenue de barrage de SMBA (Ass)	1.611	3.057	4.309	5.670	7.750	9.522
Retenue de barrage de SMBA (Ast)	2.095	3.975	5.601	7.371	10.075	10.378

### 5.3 Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension

La plus grande partie du transport solide en suspension est évacuée lors de quelques crues [97, 98, 99, 100]. En générale, ce sont les plus importants événements de crues qui engendrent la plus grande charge solide en suspension. Thomas (1988) [101] estime que sur une année hydrologique moyenne, il n'est pas rare de trouver que 95% de la charge solide en suspension est fournie dans environ 5% de la période annuelle. Les données instantanées de transport solide en suspension montrent qu'une grande partie de la charge solide interannuelle a été fournie sur un nombre relativement faible de jours.

En examinant les résultats journaliers de transport solide en suspension obtenus à partir des courbes intra annuelles de transport solide en suspension en tenant compte des données de débit liquide moyen journalier qui couvrent toute la période d'étude (de 1985/1986 à 2000/2001 pour la station de Oued El-Abtal et de 1982/1983 à 2000/2001 pour

la station de Sidi AEK Djilali), on peut dire que les crues sont de courte durée et la durée cumulée de tous les épisodes de crue représente un faible pourcentage de temps annuel. Il est bien évident qu'il y a une tendance positive commune au débit solide et au débit liquide pour croître ensemble.

La contribution des plus importantes crues à l'apport solide en suspension est donnée par les tableaux (5.13) et (5.14). Les crues étoilées (\*) sont de formes incomplètes mal connues (ou inconnues) étant donné que les observations recueillies de débit liquide - débit solide instantanés sont très écartées dans le temps (ou inexistantes) présentant des lacunes, et il semble difficile lors du tracé des hydrogrammes de crue et de transport solide de lier sans trop de subjectivité les points entre eux.

Les résultats illustrés par le tableau (5.13) révèlent que les années 1989/1990, 1994/1995, 1995/1996 et 1996/1997 offrent des volumes de sédiments en suspension d'un ordre de grandeur double à triple voir plus comparativement au volume moyen annuel (1.858MT). Le transport solide en suspension pour ces années est estimé à 18.631MT, soit 40.12% du total mobilisé durant la période 1977/1978 - 2001/2002. Ceci trouve, sans doute, son explication dans le fait que ces années ont été marquées par l'avènement de crues exceptionnelles en volume et en durée.

En effet, la crue de 01 à 06 Mai 1990 avait totalisée un volume de l'ordre de 2.3358MT, soit 61.34% du volume total annuel des sédiments en suspension et 5.03% du volume total dans la période 1977/1978 - 2001/2002. Si cette crue n'était pas survenue, l'année 1989/1990 aurait totalisée un volume de 1.472MT, valeur qui rejoint l'ordre de grandeur des autres années.

Les crues de 22 Septembre à 02 Octobre et 16 à 21 Octobre de l'année 1994 offrent aussi un volume des sédiments en suspension de l'ordre de 4.4645MT, soit environ 85.79% du tonnage annuel en suspension et 9.61% du volume total dans la période 1977/1978 - 2001/2002. Si ces crues n'étaient pas survenues, l'année 1994/1995 aurait totalisée un volume de 0.7395MT, valeur inférieure à la moyenne annuelle.

La crue de 04 à 09 Février 1996 donne un tonnage en suspension de l'ordre de 2.0649MT, soit 32.91% du tonnage annuel et 4.45% du tonnage total dans la période 1977/1978 - 2001/2002. A l'extraction de cette crue exceptionnelle, le volume total de l'année 1995/1996 serait réduit à 4.2091MT. Ce volume restant toujours important, d'autres crues ont été comptabilisées pour expliquer l'apport total annuel en suspension.

Tableau (5.13): Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (Station de Oued El-Abtal)

Crue	Apport solide MT	Taux annuel %		Année	Apport solide MT
9-12 Fév. 1986 *	0.6224	26.14	76.76	1985/1986	2.381
6-12 Mar. 1986 *	0.5254	22.07			
22-28 Mai. 1986 *	0.6797	28.55			
16-20 Oct. 1986	0.5171	24.24	64.76	1986/1987	2.133
12-15 Fév. 1987	0.2478	11.62			
11-13 Jul. 1987	0.6164	28.90			
03-05 Oct. 1987	0.2251	25.67	49.48	1987/1988	0.877
17-19 Nov. 1987	0.0929	10.59			
30 Nov.-03 Déc. 1988 *	0.1159	13.22			
03-06 Oct. 1988	0.2281	26.90	60.56	1988/1989	0.848
19-22 Mar. 1989	0.1102	13.00			
29-31 Mar. 1989	0.1752	20.66			
31 Aou. – 03 Sep.1989	0.6271	16.47	77.81	1989/1990	3.808
01-06 Mai. 1990	2.3358	61.34			
13-17 Mar. 1991	0.7056	70.49	70.49	1990/1991	1.001
03-05 Oct. 1991 *	0.1612	39.90	66.93	1991/1992	0.404
6-10 Avr. 1992	0.1092	27.03			
27 Fév.-01 mar. 1993 *	0.0509	9.24	57.68	1992/1993	0.551
05-07 Mai. 1993	0.2669	48.44			
23-25 Sep. 1993	0.3139	29.98	67.87	1993/1994	1.047
19-22 Oct. 1993 *	0.3967	37.89			
22 Sep. – 02 Oct.1994	2.6872	51.64	85.79	1994/1995	5.204
16-21 Oct. 1994	1.7773	34.15			
10-15 Jan. 1996	0.7253	11.56	55.31	1995/1996	6.274
04-09 Fév. 1996 *	2.0649	32.91			
09-17 Mar. 1996	0.6803	10.84			
10-12 Sep. 1996	0.4146	12.39	91.55	1996/1997	3.345
21-26 Avr. 1997	0.7918	23.67			
22-27 Aou. 1997	1.8562	55.49			
15-19 Sep. 1997	0.5066	42.04	73.91	1997/1998	1.205
27-29 Nov. 1997	0.2133	17.70			
23-26 Mai. 1998	0.1708	14.17			
18-22 Jan. 1999 *	0.4949	25.22	67.22	1998/1999	1.962
28 Fév.-04 Mar. 1999 *	0.3769	19.21			
15-18 Mar. 1999	0.4609	23.49	77.28	1999/2000	1.227
27-28 Sep. 1999	0.4374	35.65			
07-10 Oct. 1999	0.3028	24.68			
17-18 Oct. 1999	0.2080	16.95	70.74	2000/2001	2.001
24-26 Oct. 2000 *	0.8354	41.75			
15-19 Nov. 2000 *	0.5801	28.99			

Tableau (5.14): Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (Station de Sidi AEK Djilali)

Crue	Apport solide MT	Taux annuel %		Année	Apport solide MT
18-20 Oct. 1982 *	0.0606	28.58	74.37	1982/1983	0.228
01-03 Nov. 1982 *	0.0511	22.41			
27-30 Nov. 1982 *	0.0533	23.38			
23-25 Fév. 1984 *	0.0102	7.73	54.62	1983/1984	0.132
22-24 Mar. 1984 *	0.0089	6.74			
02-03 Jui. 1984 *	0.0530	40.15			
11-13 Nov. 1984 *	0.0093	16.32	59.12	1984/1985	0.057
06-08 Jan. 1985 *	0.0113	19.82			
02 Mai. 1985	0.0131	22.98			
08-12 Fév. 1986 *	0.0676	45.99	70.14	1985/1986	0.147
06-09 Mar. 1986 *	0.0163	11.09			
11-13 Mar. 1986 *	0.0192	13.06			
13-14 Oct. 1986 *	0.0618	11.79	67.65	1986/1987	0.524
16-19 Oct. 1986 *	0.1148	21.91			
10-13 Jul. 1987 *	0.1779	33.95			
30 Sep. – 04 Oct. 1987 *	0.0402	14.62	72.80	1987/1988	0.275
09-15 Nov. 1987 *	0.0703	25.56			
01-04 Jan. 1988 *	0.0897	32.62			
19-21 Mar. 1989 *	0.0143	18.33	55.77	1988/1989	0.078
29-31 Mar. 1989 *	0.0292	37.44			
03-06 Jan. 1990 *	0.0737	22.82			
01-04 Mai. 1990 *	0.0478	14.80	92.36	1989/1990	0.323
17-20 Jul. 1990 *	0.1768	54.74			
13-17 Mar. 1991 *	0.2809	68.85			
26-27 Mar. 1992*	0.0051	31.88	53.76	1991/1992	0.016
08-10 Avr. 1992 *	0.0035	21.88			
05-07 Mai 1993 *	0.0186	66.43			
19-22 Oct. 1993 *	0.0421	46.78	88.89	1993/1994	0.090
12-13 Nov. 1993 *	0.0250	27.78			
05-08 Fév. 1994 *	0.0129	14.33			
28-30 Sep. 1994	0.0721	51.50	97.07	1994/1995	0.140
16-20 Oct. 1994*	0.0423	30.21			
11-15 Mar. 1995 *	0.0215	15.36			
10-13 Oct. 1995	0.0060	11.32	68.88	1995/1996	0.053
05-06 Déc. 1995	0.0061	11.51			
08-10 Mar. 1996	0.0244	46.04			
20-22 Avr. 1997 *	0.0357	61.55	85.58	1996/1997	0.058
25 Jul. 1997 *	0.0151	26.03			
07 Oct. 1997	0.0059	59.00			
16-17 Mar. 1999	0.0024	26.67	96.67	1998/1999	0.009
28-29 Mar. 1999	0.0063	70.00			
27 Sep. 1999 *	0.0006	57.00			
23-24 Oct. 2000*	0.0647	86.27	86.27	2000/2001	0.075

Les crues de 10 à 15 Janvier et 09 à 17 Mars de l'année 1996 totalisent un volume 1.4056MT soit 22.40% du volume total annuel en suspension. L'exclusion de ces crues réduirait le volume total annuel en suspension à 2.8035MT.

De même, la crue de 22 à 27 Août 1997 offre un volume en suspension de l'ordre de 1.8562MT égal au volume moyen annuel, soit 55.49% du volume annuel et 4% du volume total dans la période 1977/1978-2001/2002. Si cette crue n'était pas survenue, l'année 1996/1997 aurait totalisée un volume de 1.4888MT, valeur qui rejoint l'ordre de grandeur des autres années.

Les résultats illustrés par le tableau (5.14) révèlent aussi que les années 1986/1987, 1987/1988, 1989/1990 et 1990/1991 offrent des volumes de sédiments en suspension d'un ordre de grandeur double à triple voir plus comparativement au volume moyen annuel (0.136MT). Le transport solide en suspension pour ces années est estimé à 1.53MT, soit 45.13% du total mobilisé durant la période 1977/1978-2001/2002. Ceci trouve également son explication dans le fait que ces années ont été marquées par l'avènement de crues exceptionnelles en volume et en durée.

En effet, Les crues de 16 à 19 Octobre 1986 et 10 à 13 Juillet 1987 offrent un volume des sédiments en suspension de l'ordre de 0.2927MT, soit environ 55.86% du tonnage annuel en suspension et 8.63% du volume total dans la période 1977/1978-2001/2002. Si ces crues n'étaient pas survenues, l'année 1986/1987 aurait totalisée un volume de 0.2313MT. L'exclusion de la crue de 13 à 14 Octobre 1987 réduirait le volume total annuel en suspension à 0.1695MT, valeur proche à la moyenne annuelle.

Les crues de 09 à 15 Novembre 1987 et 01 à 04 Janvier 1988 avaient totalisées un volume de l'ordre de 0.160MT, soit 58.18% du volume total annuel des sédiments en suspension et 4.72% du volume total dans la période 1977/1978-2001/2002. Si ces crues n'étaient pas survenues, l'année 1987/1988 aurait totalisée un volume de 0.115MT, valeur qui rejoint l'ordre de grandeur des autres années.

Les crues de 17 à 20 Juillet 1990 et 13 à 17 Mars 1991 donnent des tonnages en suspension de l'ordre de 0.1768MT et 0.2809MT respectivement, soit 54.74% et 68.85% des tonnages annuels et 5.22% et 8.29% des tonnages totaux dans la période 1977/1978-2001/2002. A l'extraction de ces crues exceptionnelles, les volumes totaux des années 1989/1990 et 1990/1991 seraient réduits à 0.1462MT et 0.1271MT, valeurs qui rejoignent l'ordre de grandeur des autres années.

Les 40 crues du tableau (5.13) et les 43 crues du tableau (5.14) totalisent des volumes de sédiments en suspension de l'ordre de 24.708MT et 1.962MT respectivement, soit

72.10% et 73.97% des totaux mobilisés durant les périodes d'observations 1985/1986 - 2000/2001 (station de Oued El-Abtal) et 1982/1983 - 2000/2001 (station de Sidi AEK Djilali). En général, nous constatons que les volumes les plus importants en transport solide en suspension se répartirent sur les quatre saisons. Les crues d'Automne et du printemps sont aussi nombreuses et participent fortement à l'envasement du barrage de SMBA.

#### 5.4 Relation érosion spécifique - lame d'eau ruisselée

Une analyse graphique de l'érosion spécifique  $E_s$  en fonction de la lame d'eau ruisselée  $L_r$  calculée au droit des stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali met en évidence de bonnes relations en puissance entre ces deux paramètres. Les coefficients de détermination pour les deux stations sont de l'ordre de 0.79 et 0.96 respectivement. La figure (5.7) montre l'évolution du taux d'érosion spécifique et de la lame d'eau ruisselée en fonction du temps et les relations liants ces deux paramètres entre eux. Le tableau (5.15) résume les relations trouvées.

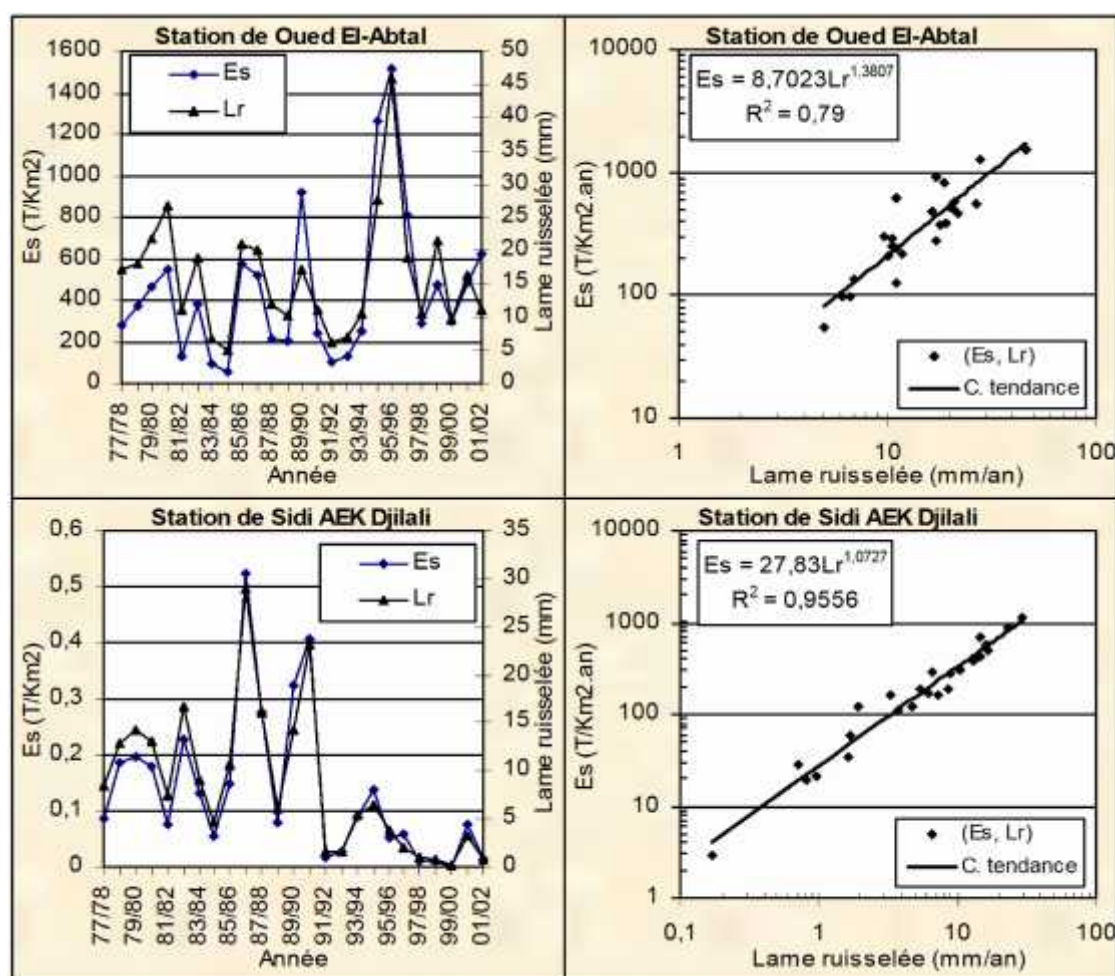


Figure (5.7): Relation érosion spécifique - lame d'eau ruisselée



Tableau (5.15): Relations érosion spécifique - lame ruisselée ( $E_s=aLr^b$ )

Station	a	b	R <sup>2</sup>
Oued El-Abtal	8.7023	1.3807	0.79
Sidi AEK Djilali	27.83	1.0727	0.9556

La mise en graphe des données de l'érosion spécifique en fonction du débit maximum annuel calculés au niveau des stations hydrométriques de Oued El-Abtal et de Sidi AEK Djilali dans la période 1977/1978 à 2001/2002 montre une dispersion considérable en coordonnées linéaires et même logarithmiques (figure 5.8).

L'essai des points n'est ni linéaire, ni logarithmique, ni exponentielle, ni parabolique, et il est difficile voir impossible de concevoir un modèle liant l'érosion spécifique au débit maximum annuel. Les piles verticales de points indiquent des variations significatives de l'érosion spécifique pour des débits maximums annuels presque constants.

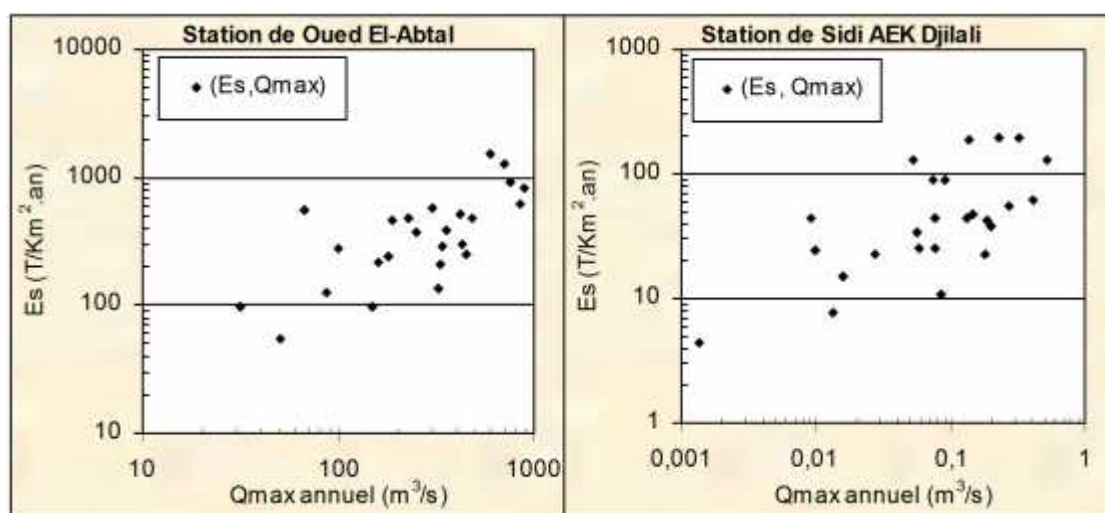


Figure (5.8): Relation érosion spécifique – débit maximum annuel

En conclusion, le barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda d'une capacité initiale de stockage de 235Mm<sup>3</sup> reçoit annuellement une grande quantité des sédiments en suspension de l'ordre de 2.081MT (1.301Mm<sup>3</sup>), soit une dégradation spécifique de 424.682T/Km<sup>2</sup>/an. La quantité des sédiments en suspension provenant du bassin versant de l'Oued Mina dans la période 1977/1978 - 2001/2002 est de 52.024MT (32.653Mm<sup>3</sup>), ce qui représente 13.84% de la capacité de stockage du barrage.

Le barrage de SMBA reçoit 2.705MT (1.691Mm<sup>3</sup>) de matériau solide fin et grossier annuellement, soit une dégradation spécifique de 552.087T/Km<sup>2</sup>/an et un taux de comblement de la retenue de 0.72%/an. Ce dernier a accumulé 67.631MT (42.269Mm<sup>3</sup>) de

sédiments fins et grossiers en 25 années (Septembre 1977 à Août 2002), ce qui représente 18% de sa capacité. On prévoit l'accumulation de  $72.713\text{Mm}^3$  (30.94%) à l'horizon 2020,  $106.533\text{Mm}^3$  (45.33%) à l'horizon 2040 et un comblement total de la retenue à l'horizon 2136, soit une durée de vie de 158 ans.

## **CHAPITRE 6**

# **ANALYSE DE L'EFFET D'HYSTERESIS SUR LA RELATION CONCENTRATION-DEBIT (C – Q)**

### 6.1 Introduction

La relation entre la concentration des sédiments en suspension  $C$ , et le débit liquide  $Q$ , d'un cours d'eau est une relation fondamentale dans le domaine du transport solide en rivière. Les types de relation  $C$ - $Q$ , dans leur ensemble restent mal connus. Dans cette analyse, on cherche à caractériser la relation  $C$ - $Q$  à travers des séries d'événements chronologiques (crues).

L'analyse à mener est orientée beaucoup plus vers l'aspect graphique que donnerait la mise en graphe selon l'ordre chronologique de  $C$  et  $Q$ .

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

- Identification et classement des principaux types de la relation  $C$ - $Q$  ;
- Analyse et discussion de chaque type de relation.

### 6.2 Selection des crues

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  $C$ - $Q$  pour les plus importantes crues au niveau des deux stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali. Nous essayons en même temps de caractériser et de classer ces différentes relations pour une meilleure compréhension du phénomène.

Vingt (20) crues pour chacune des deux stations hydrométriques réparties sur les périodes d'études ont été retenues et analysées représentant des épisodes ayant différentes caractéristiques (tableau 6.1). Cette sélection n'est pas exhaustive, mais elle permet de

fournir le maximum d'information sur la relation C-Q, en identifiant le modèle d'hystérésis dominant.

Leopold *et al.* (1964) [102] ont constaté, après avoir analysés les enregistrements des concentrations C et débits liquides Q dans plusieurs bassins versants des états unis, qu'une grande partie de la charge annuelle des sédiments s'est produite durant des crues modérées avec répétition fréquente. De plus, les périodes des crues sont de courte durée, et la durée cumulée de tous les événements de crue représente en effet un faible pourcentage de temps annuel.

Tableau (6.1) : Chronologie des crues sélectionnées

N°	Station de Oued El-Abtal		Station de Sidi AEK Djilali	
	Date	Taille n	Date	Taille n
1	16-17 Oct. 1986	63	27 Nov. 1982	10
2	03-05 Oct. 1988	64	02 Mai 1985	08
3	31 Aou. -02 Sep. 1989	63	30 Sep. 1987	15
4	01-02 Mai 1990	59	01-02 Jan. 1988	15
5	05-07 Mai 1993	49	03 Oct. 1988	07
6	23-25 Sep. 1993	68	01 Mai 1990	07
7	19-21 Oct. 1993	31	11-12 Nov. 1990	13
8	28-29 Sep. 1994	23	29-30 Sep. 1994	50
9	16-20 Oct. 1994	75	12-13 Mar. 1995	31
10	12-15 Jan. 1996	119	09-10 Oct. 1995	49
11	07-08 Fév. 1996	36	05-06 Déc. 1995	44
12	13-14 Mar. 1996	29	08-09 Mar. 1996	14
13	21-23 Avr. 1997	65	09-10 Mar. 1996	32
14	25-26 Avr. 1997	30	20-21 Avr. 1997	17
15	22-24 Aou. 1997	43	25 Aou. 1997	46
16	25-27 Aou. 1997	48	07 Oct. 1997	45
17	18-19 Sep. 1997	36	13 Déc. 1997	17
18	27-29 Nov. 1997	48	16-17 Mar. 1999	21
19	27-28 Sep. 1999	47	28 Mar. 1999	09
20	07-09 Oct. 1999	46	27 Sep. 1999	23

Les données de débit liquide Q ( $m^3/s$ ) et de concentration C (g/l) sont mises en graphe avec en ordonnée la concentration et le débit liquide, et en abscisse le temps comme variable indépendante (graphes temporels). Pour la représentation graphique de l'hystérésis, la concentration est prise en ordonnée et le débit liquide en abscisse.

### 6.3 Identification des classes de la relation C-Q

L'identification des différentes classes de relations C-Q est élaborée sur la base des résultats graphiques et statistiques des deux variables mises en relation. Les graphes

temporels et d'hystérésis des événements sélectionnés pour les deux station hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali sont représentées dans les figures (6.1) et (6.2).

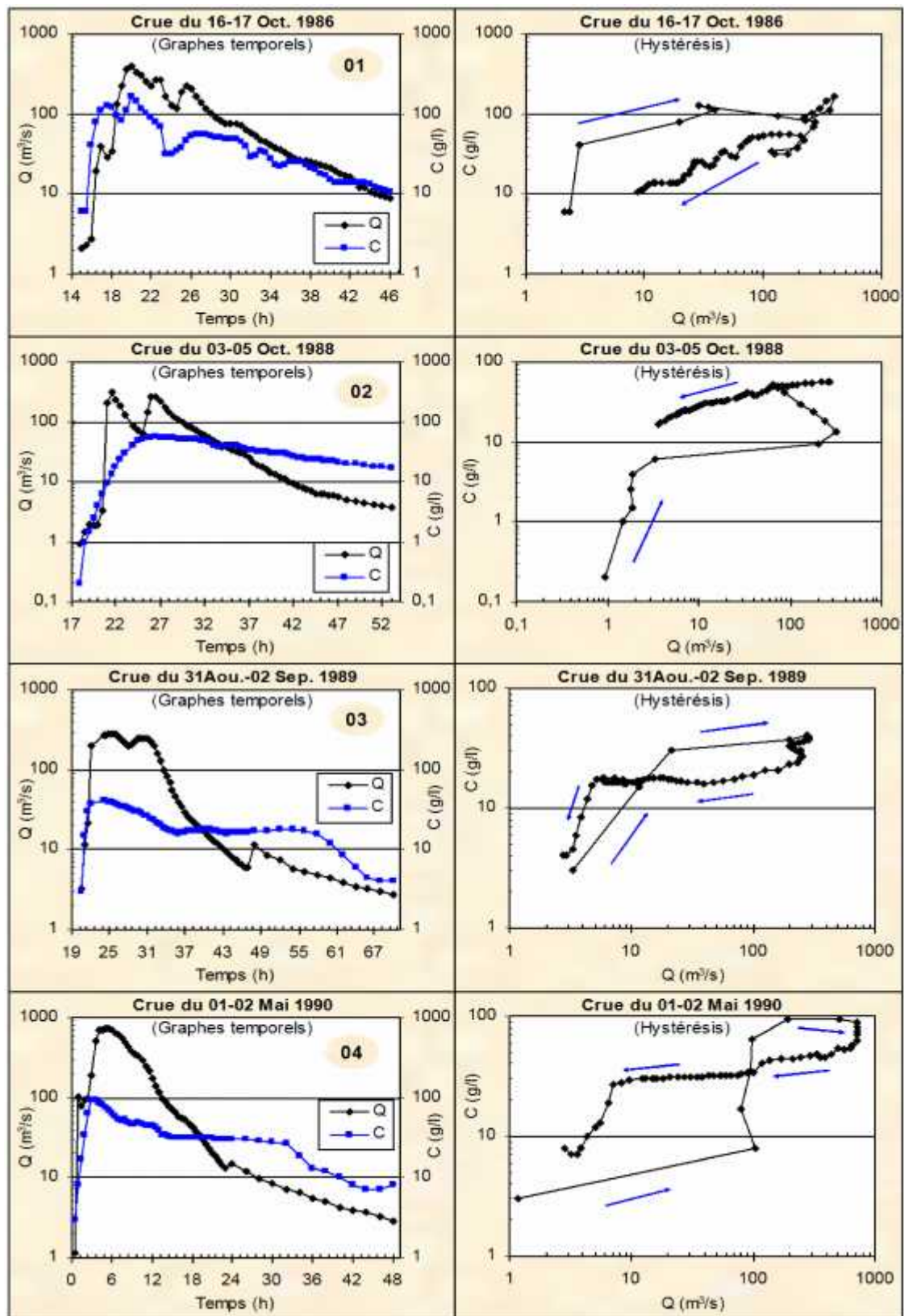


Figure (6.1) : Dynamique du transport solide en suspension (St. de Oued El-Abtal)

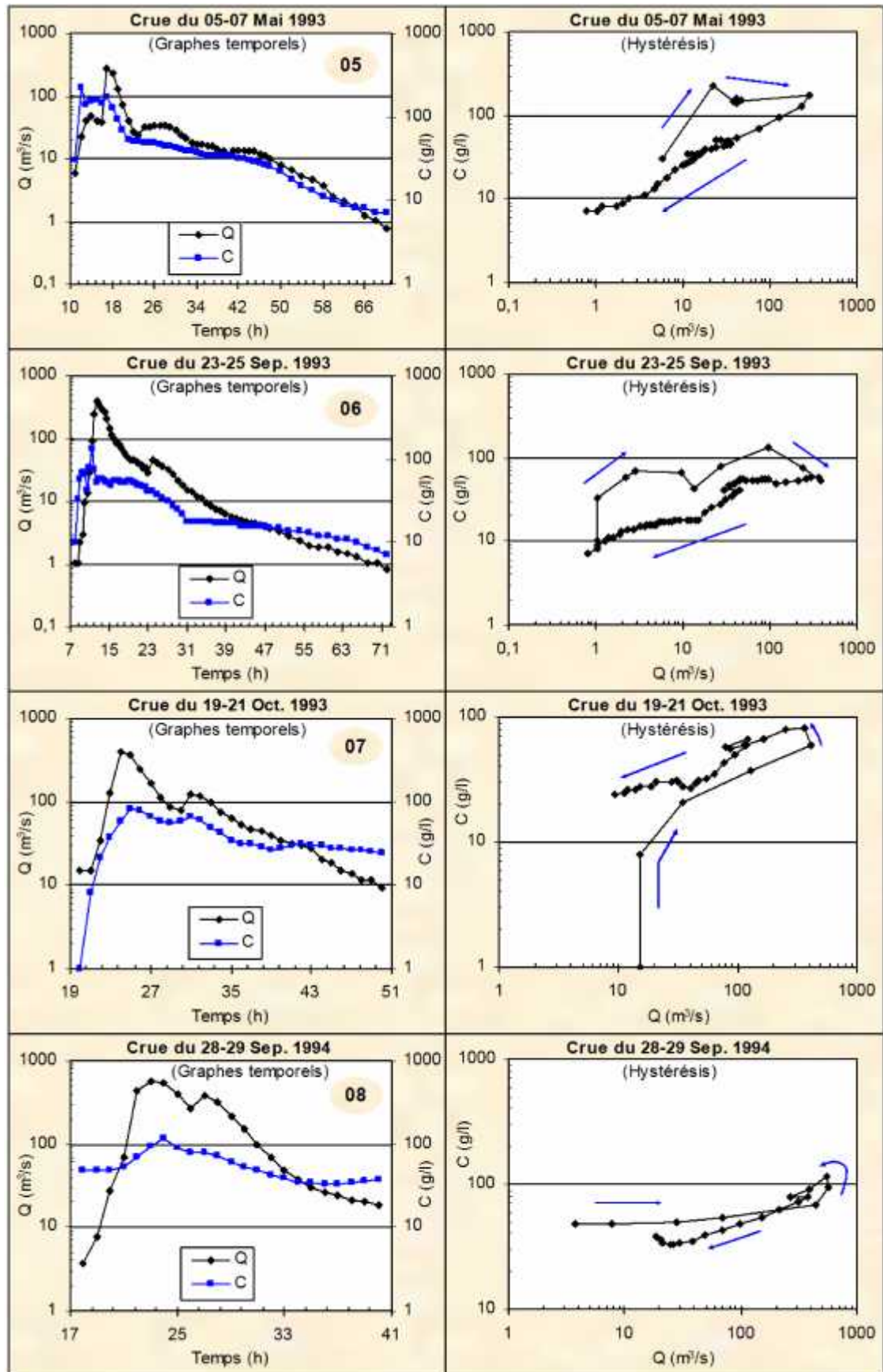


Figure (6.1) : Dynamique du transport solide en suspension (St. de Oued El-Abtal)  
« suite »



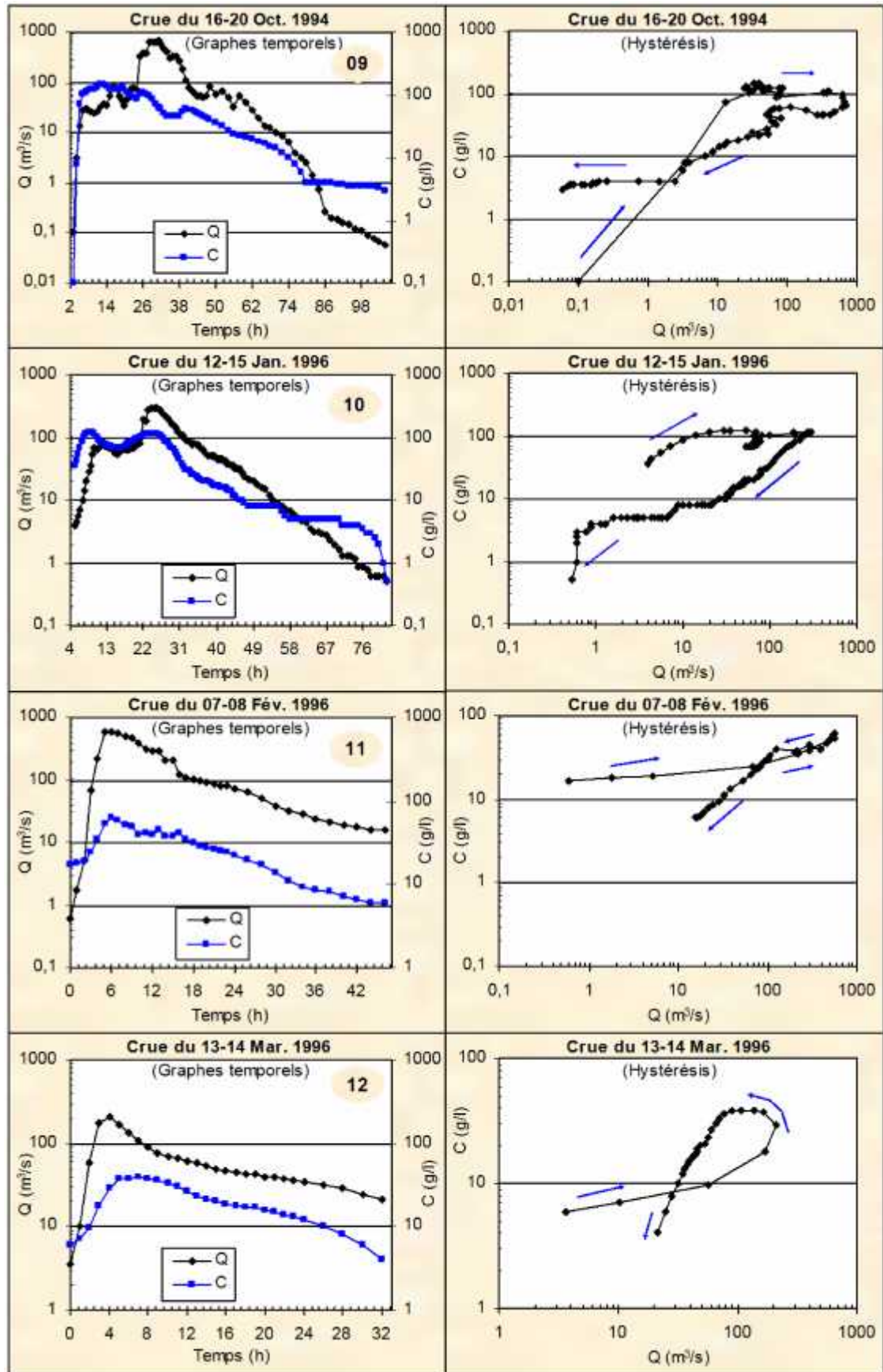


Figure (6.1) : Dynamique du transport solide en suspension (St. de Oued El-Abtal)  
« suite »



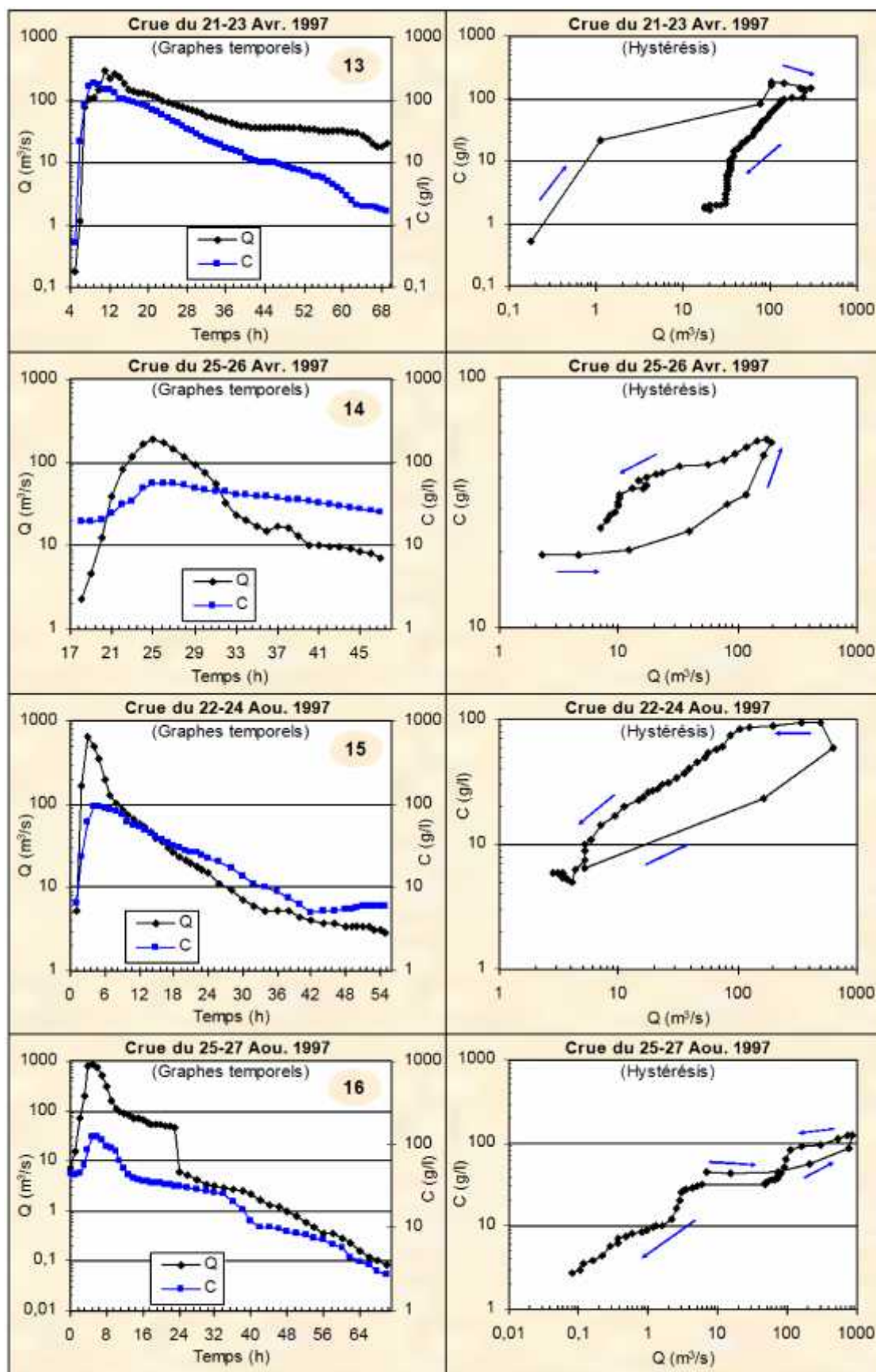


Figure (6.1) : Dynamique du transport solide en suspension (St. de Oued El-Abtal)  
« suite »

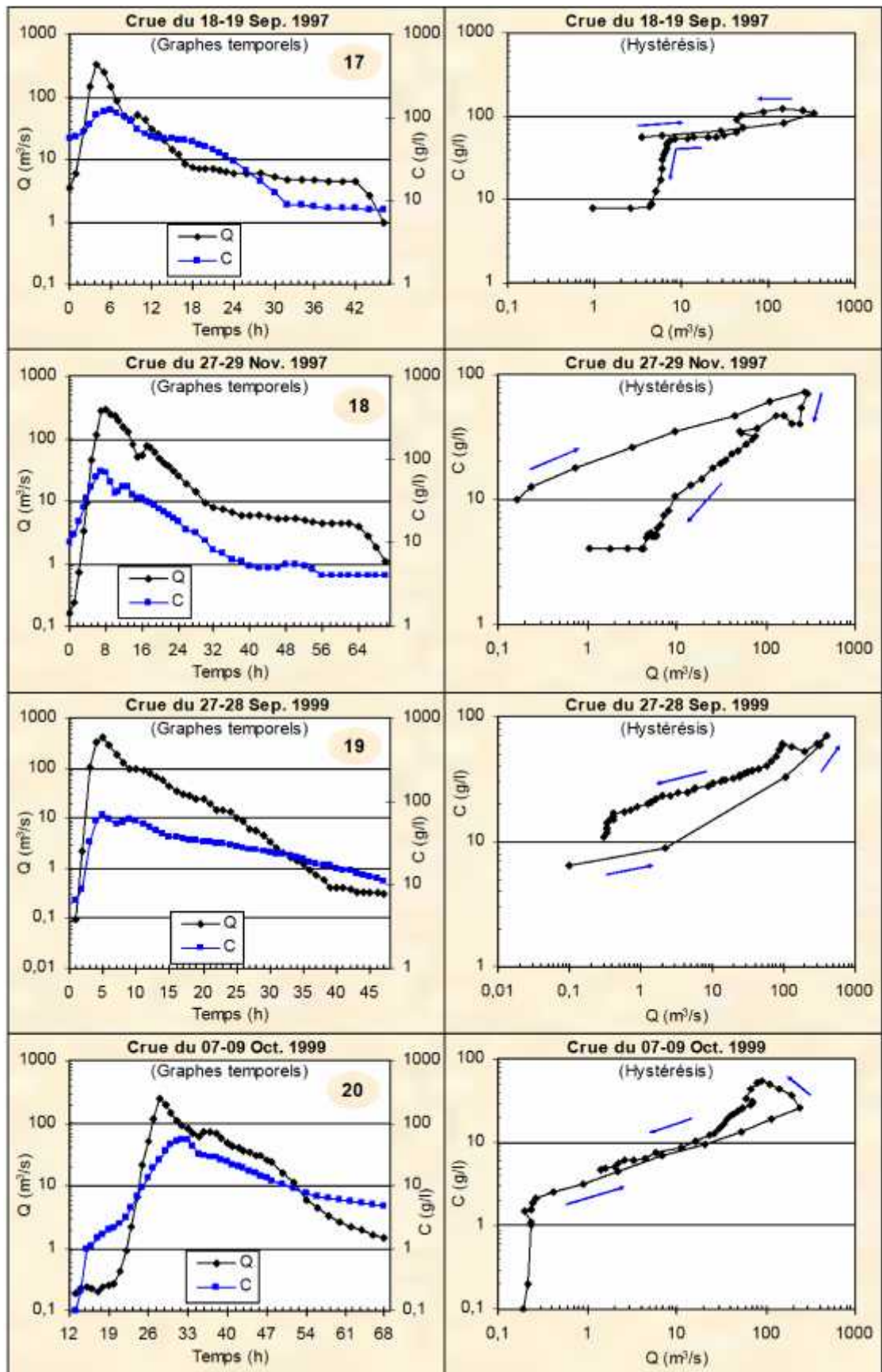


Figure (6.1) : Dynamique du transport solide en suspension (St. de Oued El-Abtal)

« suite »

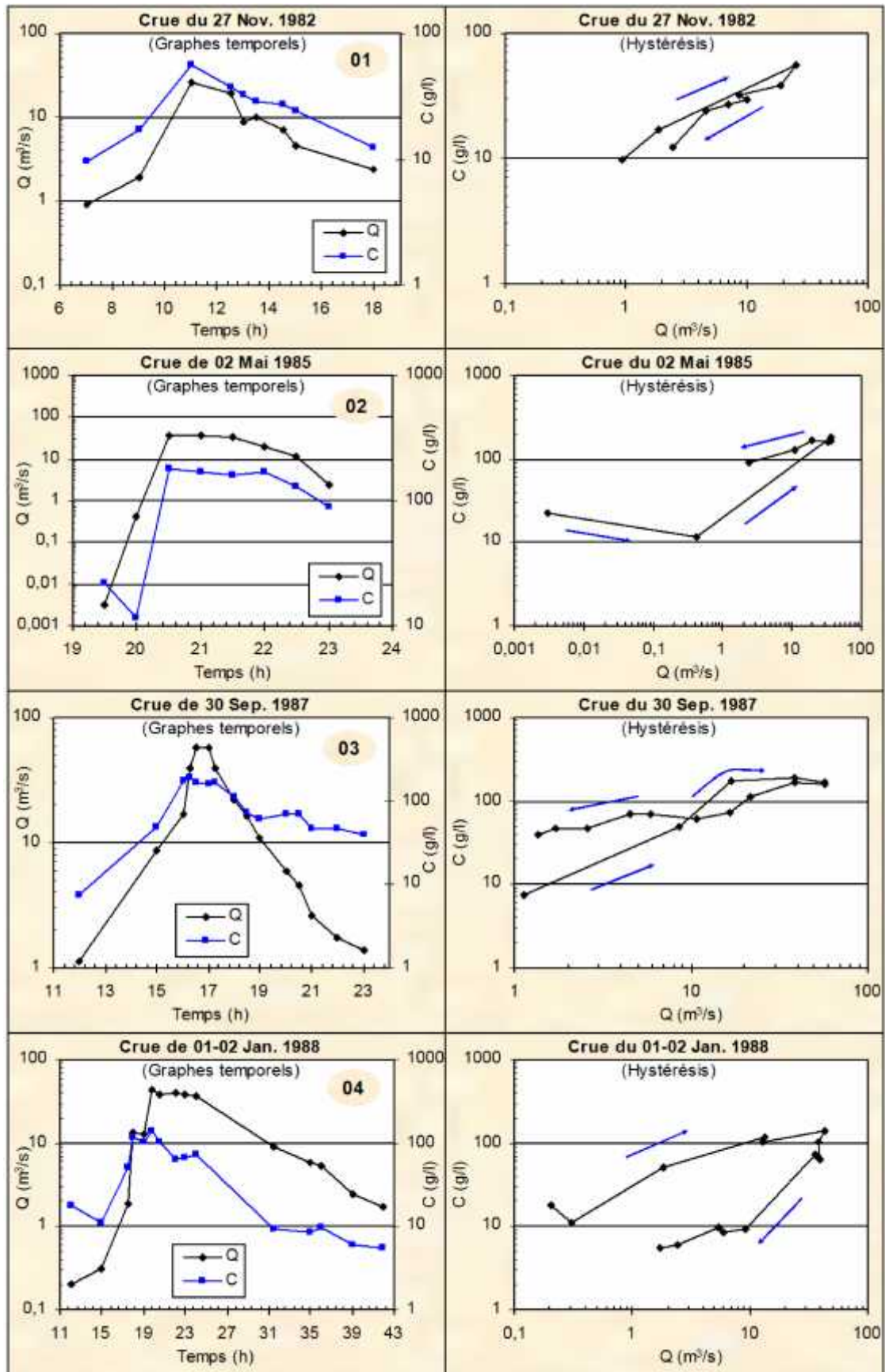


Figure (6.2) : Dynamique du transport solide en suspension (St. de Sidi AEK Djilali)



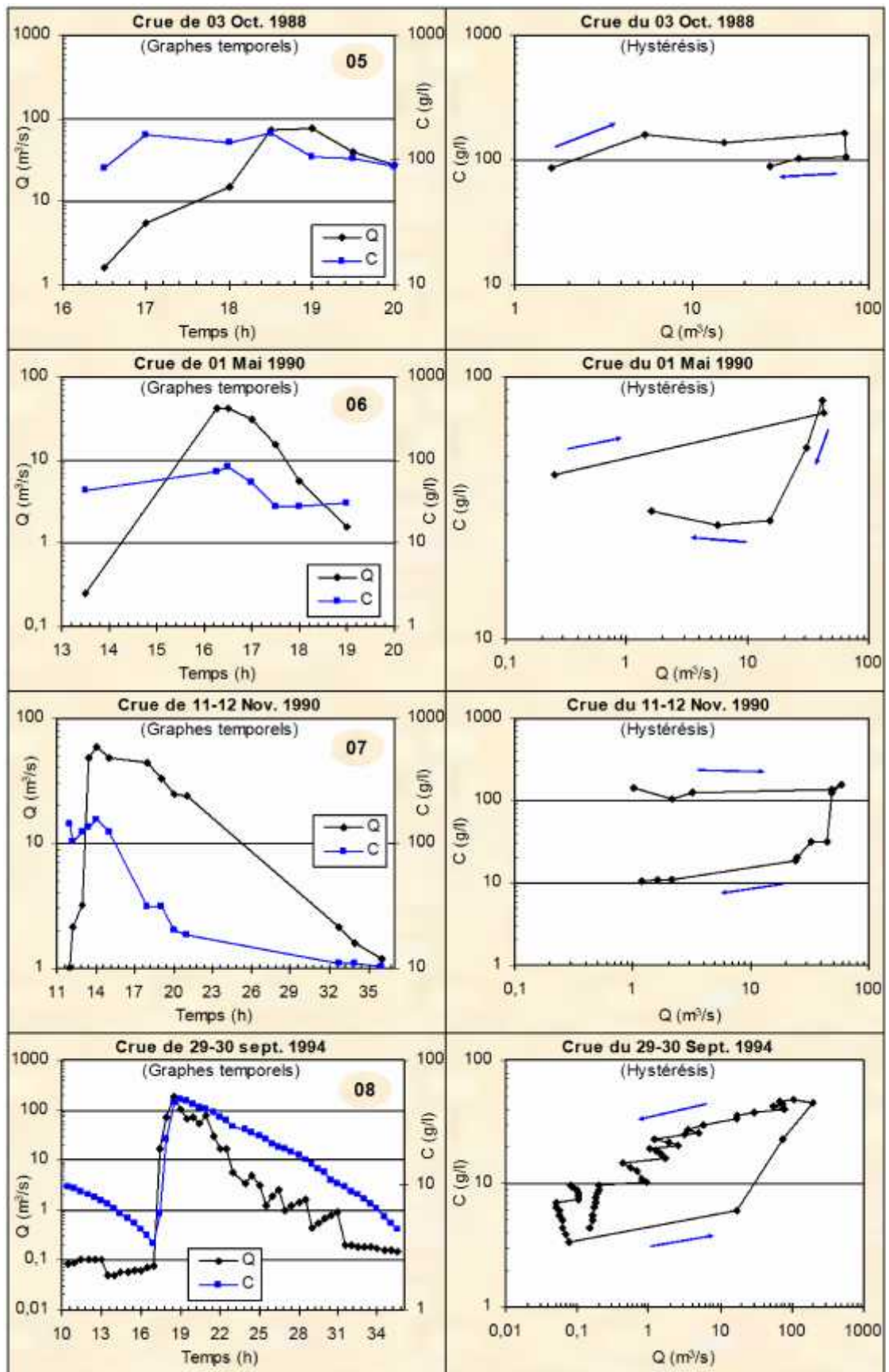


Figure (6.2) : Dynamique du transport solide en suspension (St. de Sidi AEK Djilali)

« suite »

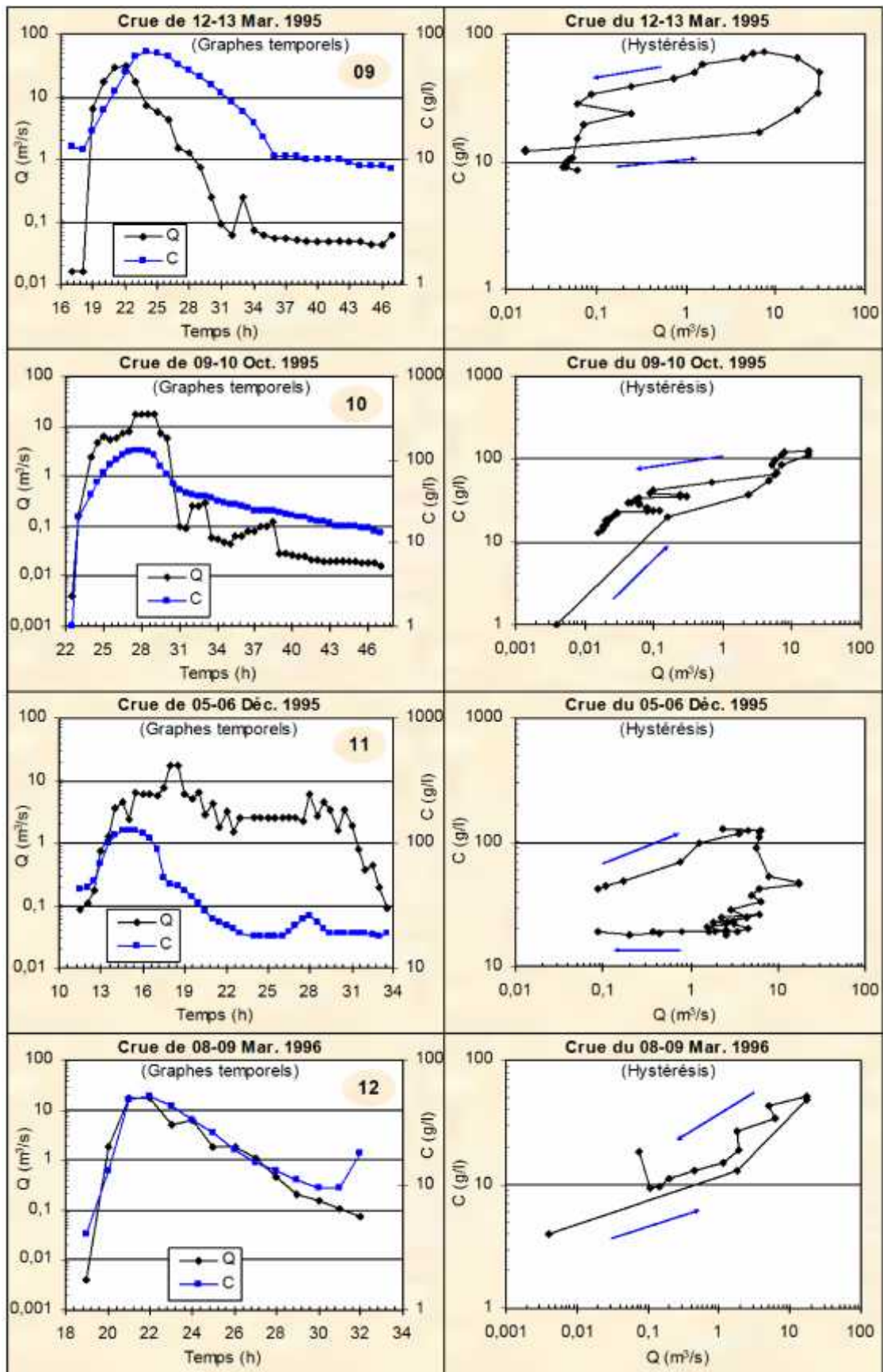


Figure (6.2) : Dynamique du transport solide en suspension (St. de Sidi AEK Djilali)

« suite »

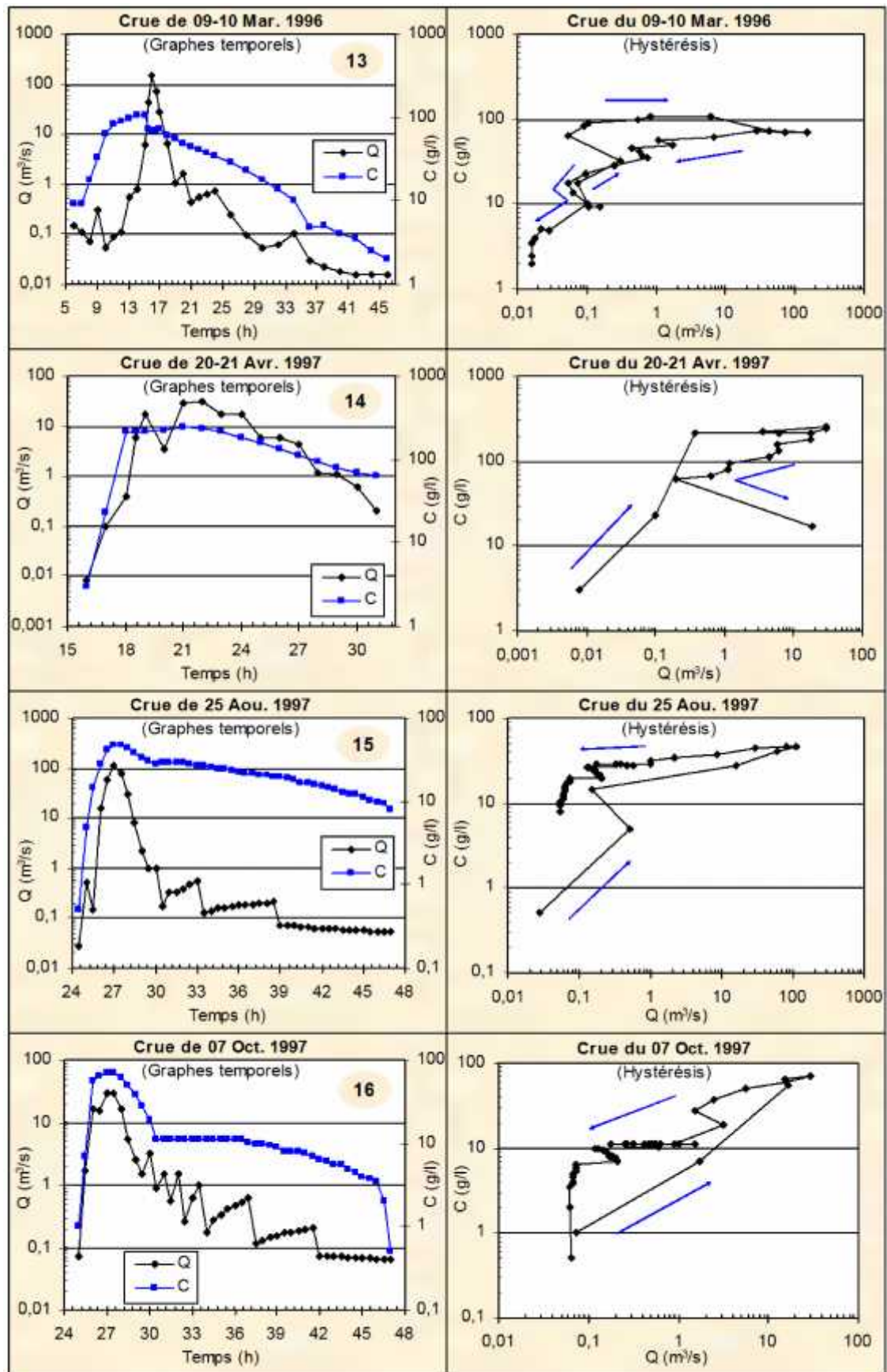


Figure (6.2) : Dynamique du transport solide en suspension (St. de Sidi AEK Djilali)

« suite »



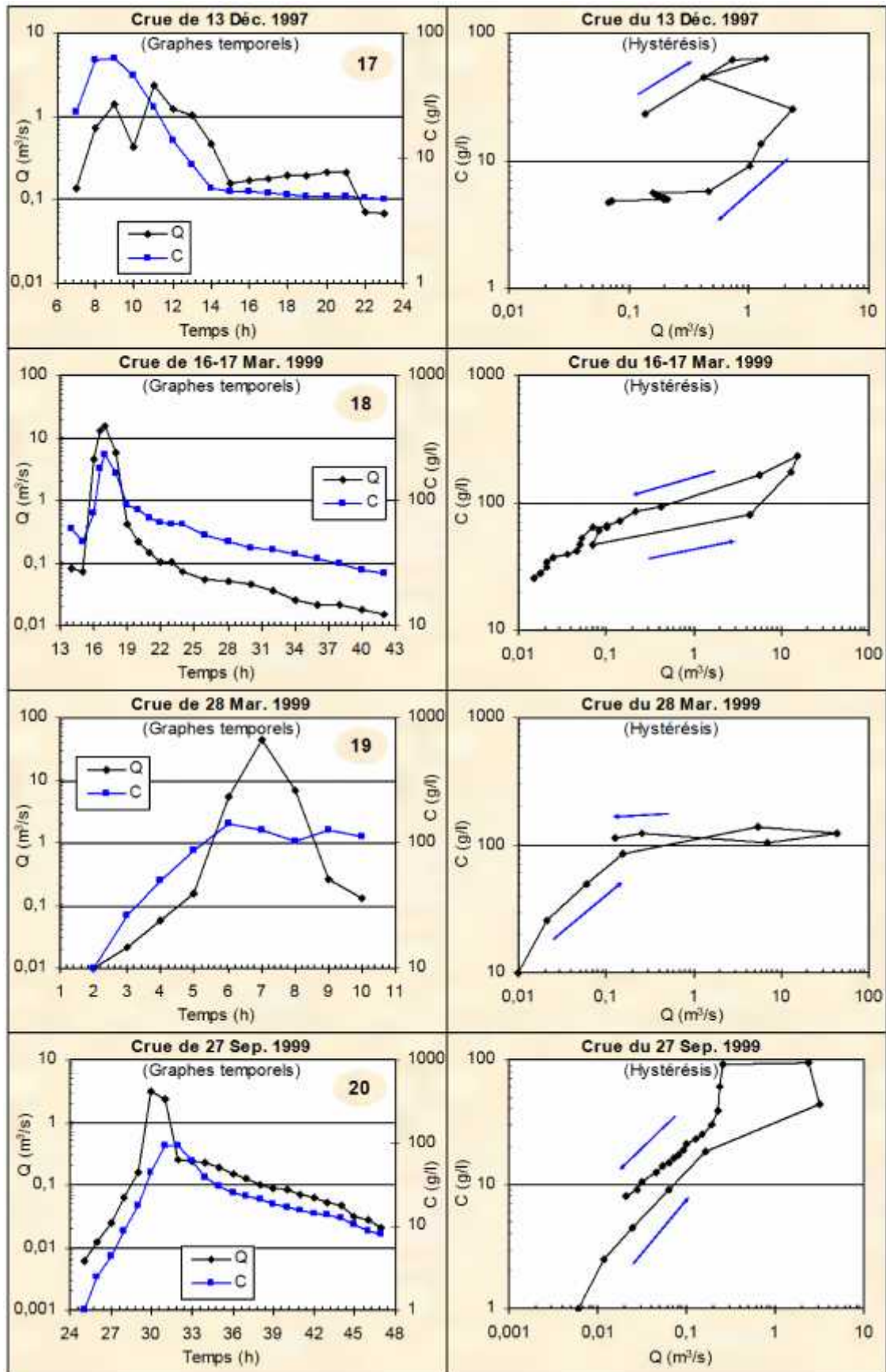


Figure (6.2) : Dynamique du transport solide en suspension (St. de Sidi AEK Djilali)  
« suite »



Les tableaux (6.2) et (6.3) présentent les grandeurs statistiques des crues sélectionnées dans cette étude. Ces paramètres fournissent des informations très importantes sur l'allure des graphes temporel et d'hystérésis et tentent d'élaborer une esquisse de classification de la relation C-Q. Les paramètres d'Aplatissement et d'Asymétrie ont été considérés comme outils d'analyse statistique, bien que le nombre de données de concentration C et de débit liquide Q pour la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali est relativement faible. Les problèmes de fréquence d'échantillonnage se répercutent sur la signification de l'utilisation de ces deux paramètres dans ce cas.

Le tracé des vingt graphes temporels et d'hystérésis permet de constater les caractéristiques types pour chaque crue. La procédure de classement des crues sélectionnées est effectuée en regroupant les boucles ayant la même orientation, et en séparant les boucles d'une même classe ayant différentes formes en analysant les critères retenus dans le tableau (2.7).

L'application de l'approche des hystérésis, pour les différentes crues enregistrées au niveau des deux stations hydrométriques de Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali durant les périodes de données disponibles, fait ressortir la distribution (tableau 6.4 et 6.5) des différentes classes d'évolution des relations concentration en sédiments transportés C - débits liquides Q et leurs fréquences relatives.

Les résultats des tableaux (6.2), (6.3), (6.4) et (6.5) confirment bien que le rapport (C/Q) est le critère fondamental dans l'identification des boucles d'hystérésis [103]. Les autres paramètres n'apportent que des détails concernant la largeur et l'orientation de la boucle. L'asymétrie n'affecte ni la forme de la boucle ni son orientation.

Tableau (6.2) : Paramètres statistiques des crues sélectionnées (Station de Oued El-Abtal)

N°	n	Var.	$\sigma$	Moy	Mod	Méd	CV	Cp	Cs	Max
1	63	Q	101.12	91.27	116.80	40.44	1.11	1.12	1.43	397.00
		C	38.10	46.38	14.00	33.50	0.82	1.30	1.37	170.00
2	64	Q	77.32	59.63	66.21	23.04	1.30	2.04	1.67	313.28
		C	15.62	31.72	50.00	30.90	0.49	-0.76	-0.19	56.00
3	63	Q	104.49	86.72	21.18	21.18	1.21	-1.03	0.87	287.60
		C	9.36	20.64	17.50	17.50	0.45	-0.10	0.56	41.00
4	59	Q	236.17	180.92	79.58	66.21	1.31	0.37	1.34	723.16
		C	21.16	37.65	32.00	32.00	0.56	0.79	0.86	94.00
5	49	Q	52.32	31.54	41.40	15.80	1.66	15.17	3.79	283.92
		C	48.78	51.45	34.00	35.00	0.95	3.05	1.90	222.00
6	68	Q	84.59	49.46	1.05	13.72	1.71	6.53	2.62	384.26
		C	23.64	35.14	18.00	29.50	0.67	3.04	1.26	135.00
7	31	Q	97.15	81.88	15.00	44.16	1.19	4.99	2.25	406.10
		C	19.60	38.90	28.00	31.00	0.50	-0.22	0.55	81.00
8	23	Q	185.75	164.29	68.52	68.52	1.13	-0.27	1.06	564.44
		C	23.16	56.13	48.00	48.00	0.41	0.48	1.08	116.00
9	75	Q	182.00	114.37	55.08	40.00	1.59	2.97	2.01	688.60
		C	46.13	55.60	45.00	46.00	0.83	-1.23	0.43	143.00
10	119	Q	74.29	64.86	64.80	49.92	1.15	2.68	1.77	302.32
		C	40.86	44.51	5.00	24.00	0.92	-1.19	0.58	126.00
11	36	Q	180.07	162.23	576.20	84.88	1.11	0.32	1.25	576.20
		C	16.02	27.85	17.00	26.00	0.58	-0.72	0.39	63.00
12	29	Q	49.73	63.98	57.36	46.20	0.78	2.22	1.63	210.60
		C	10.94	20.03	6.00	18.00	0.55	-1.02	0.43	38.50
13	65	Q	61.44	69.98	35.76	38.94	0.88	0.88	1.85	293.12
		C	48.02	38.35	21.00	15.00	1.25	-0.44	1.57	181.00
14	30	Q	57.91	50.20	10.25	17.06	1.15	0.28	1.27	189.80
		C	10.92	37.10	19.50	35.95	0.29	-0.87	0.19	56.50
15	43	Q	129.39	64.74	3.42	16.28	2.0	10.79	3.22	632.50
		C	28.23	31.01	5.90	23.50	0.91	-0.18	1.00	93.50
16	48	Q	203.79	97.18	53.64	6.59	2.10	7.59	2.87	873.27
		C	31.71	35.83	43.00	31.75	0.89	1.10	1.30	122.00
17	36	Q	72.47	38.77	6.08	6.99	1.87	9.06	2.96	335.50
		C	34.50	49.72	55.00	52.00	0.69	-0.58	0.51	120.00
18	48	Q	78.35	50.56	4.30	8.83	1.55	2.98	1.98	291.70
		C	19.11	21.31	4.00	13.75	0.90	0.28	1.06	72.00
19	47	Q	88.63	47.62	0.42	8.63	1.86	7.44	2.72	406.10
		C	16.19	30.69	33.00	28.00	0.53	-0.34	0.72	70.00
20	46	Q	53.45	39.78	71.68	22.44	1.34	4.92	2.07	244.52
		C	15.15	16.13	18.60	11.20	0.94	0.27	1.08	53.50

N° : numéro de la crue,    n : taille de la crue,    Var. : variables,     $\sigma$  : écart-type  
Moy : moyenne,    Mod : mode,    Méd : médiane,    CV : coefficient de variation  
Cp: coefficient d'aplatissement,    Cs : coefficient d'asymétrie,    Max : valeur maximale

Tableau (6.3) : Paramètres statistiques des crues sélectionnées (Station de Sidi AEK Djilali)

N°	n	Var.	$\sigma$	Moy	Mod	Méd	CV	Cp	Cs	Max
1	10	Q	8.47	9.90	18.92	7.90	0.86	-0.64	0.79	25.52
		C	13.88	28.32	37.68	28.07	0.49	0.62	0.61	56.40
2	8	Q	16.26	17.48	/	15.36	0.93	-2.13	0.18	37.00
		C	67.40	115.61	/	144.24	0.58	-1.10	-0.84	178.10
3	15	Q	19.81	18.94	/	10.81	1.05	-0.14	1.07	57.54
		C	60.00	95.19	/	69.90	0.63	-1.45	0.40	189.58
4	15	Q	17.12	16.68	/	9.09	1.03	-1.56	0.63	43.50
		C	46.97	52.41	/	51.54	0.90	-1.07	0.56	142.06
5	7	Q	30.14	33.88	/	27.58	0.89	-1.50	0.54	74.35
		C	32.03	120.25	/	104.94	0.27	-2.02	0.43	161.94
6	7	Q	18.51	19.72	/	15.37	0.94	-2.15	0.29	42.45
		C	21.98	48.05	/	42.56	0.46	-1.39	0.65	80.98
7	13	Q	22.11	22.64	/	24.22	0.98	-1.61	0.38	58.88
		C	59.44	70.56	/	31.50	0.84	-2.03	0.27	156.20
8	50	Q	35.97	15.24	17.00	0.63	2.36	12.34	3.27	193.40
		C	13.42	17.31	9.70	10.72	0.78	-0.23	1.01	48.00
9	31	Q	8.27	3.98	0.05	0.06	2.08	5.19	2.43	30.54
		C	21.59	27.65	10.00	17.00	0.78	-0.57	0.92	73.00
10	49	Q	5.05	2.56	0.02	0.08	1.98	4.03	2.21	17.48
		C	35.38	42.46	24.00	28.00	0.83	0.65	1.39	128.00
11	44	Q	3.66	3.61	1.54	2.54	1.01	7.76	2.50	17.44
		C	36.17	43.44	19.00	24.00	0.83	0.61	1.44	127.06
12	14	Q	6.02	3.84	/	1.48	1.57	2.42	1.88	17.46
		C	15.45	22.42	13.00	16.50	0.69	-0.63	0.87	51.00
13	32	Q	29.61	9.83	0.02	0.20	3.01	16.67	3.93	149.00
		C	33.45	41.93	18.00	35.75	0.80	-0.97	0.49	108.00
14	17	Q	10.16	8.29	/	4.34	1.23	0.44	1.27	30.28
		C	80.36	146.07	/	156.00	0.55	-1.27	-0.35	252.00
15	46	Q	22.04	6.89	0.06	0.16	3.20	14.56	3.79	113.25
		C	10.62	22.18	29.00	21.25	0.48	0.12	0.49	47.00
16	45	Q	7.07	2.97	0.07	0.26	2.38	8.21	2.96	29.85
		C	19.41	16.55	11.00	10.30	1.17	2.54	1.96	72.00
17	17	Q	0.62	0.54	/	0.21	1.15	3.25	1.84	2.33
		C	20.08	17.17	5.00	5.50	1.17	1.35	1.62	62.40
18	21	Q	4.36	1.90	/	0.07	2.29	5.47	2.50	15.28
		C	53.93	73.47	64.00	60.00	0.73	3.24	1.90	232.64
19	9	Q	14.21	6.28	/	0.16	2.26	8.09	2.81	43.50
		C	47.01	86.56	125	104.00	0.54	-1.13	-0.66	140.00
20	23	Q	0.78	0.33	/	0.08	2.37	9.79	3.24	3.18
		C	25.41	25.41	9.00	17.00	1.00	2.88	1.84	93.02

Tableau (6.4) : Classement et caractéristiques des crues sélectionnées

(Station de Oued El-Abtal)

Classe	Fréq.	Sous classe	Crues	Caractéristiques	Boucle d'hystérésis
II	30%	A	5, 6, 13	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ $C_{max}$ avant $Q_{max}$ $C_s > 0$ , $C_p > 0$ pour Q et varie pour C	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop). Boucle moins large sauf pour la crue 13.
		B	1, 10, 18	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ $C_{max}$ avec $Q_{max}$ $C_s > 0$ , $C_p > 0$ pour Q et varie pour C	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop). Boucle de largeur remarquable.
III	30%	A	7, 14, 15, 19	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$ $C_{max}$ avec $Q_{max}$ $C_s > 0$ , $C_p > 0$ pour Q et $C_p < 0$ pour C	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop). Boucle de largeur moyenne.
		B	2, 20	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$ $C_{max}$ après $Q_{max}$ $(C_s, C_p) > 0$ pour Q et varient pour C.	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop). Boucle rétrécie pour la crue 20 et assez large pour la crue 2.
V	40%	A	3, 4, 9	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$ pour une partie des valeurs de Q $(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour une autre partie des valeurs de Q $C_{max}$ avant $Q_{max}$ $C_s > 0$ , $C_p$ varie pour Q et C.	Forme en huit (figure eight) Boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre pendant la montée de la crue
		B	8, 11, 12, 16, 17	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour une autre partie des valeurs de Q $(C/Q)_m < (C/Q)_d$ pour une autre partie des valeurs de Q $C_{max}$ avec $Q_{max}$ $C_s > 0$ , $C_p$ varie pour Q et C.	Forme en huit (figure eight) Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre pendant la montée de la crue

Tableau (6.5) : Classement et caractéristiques des crues sélectionnées

(Station de Sidi AEK Djilali)

Classe	Fréq.	Sous classe	Crues	Caractéristiques	Boucle d'hystérésis
II	40%	A	5, 11	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ $C_{max}$ avant $Q_{max}$ $C_s > 0$ , $C_p$ varie pour $Q$ et $C$	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop). Boucle rétrécie sauf pour la crue 11.
		B	1, 4, 6, 7, 14	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ $C_{max}$ avec $Q_{max}$ $C_s > 0$ sauf pour $C$ de la crue 14, $C_p$ varie pour $Q$ et $C$	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop). Boucle de largeur remarquable sauf pour les crues 1 et 14.
		C	17	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ $C_{max}$ après $Q_{max}$ $C_s > 0$ , $C_p > 0$	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop). Boucle assez large et nette.
III	45%	A	2, 8, 10, 12, 15, 16, 18	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$ $C_{max}$ avec $Q_{max}$ $C_s > 0$ sauf pour $C$ de la crue 2, $C_p > 0$ pour $Q$ sauf pour la crue 2 et varie pour $C$	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop). Boucle rétrécie sauf pour les crues 8, 9 et 16.
		B	9, 20	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$ $C_{max}$ après $Q_{max}$ $C_s > 0$ , $C_p > 0$ pour $Q$ et varie pour $C$	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop). Boucle assez large.
V	15%	A	3, 19, 13	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$ pour une partie des valeurs de $Q$ $(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour une autre partie des valeurs de $Q$ $C_{max}$ avant $Q_{max}$ $C_s > 0$ pour $Q$ et varie pour $C$ , $C_p < 0$ pour $C$ et varie pour $Q$ .	Forme en huit (figure eight). Boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre pendant la montée de la crue.

#### 6.4 Analyse de l'hystérésis

Le schéma classique de l'hystérésis ne se répète cependant pas lors de toutes les crues. L'hystérésis peut être inverse et il est parfois difficile de trouver une explication à ce phénomène, dans la mesure où le bassin est hétérogène du point de vue lithologique et du point de vue de la répartition spatiale des pluies.

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

Les courbes (figure 6.1 et 6.2), montrent que l'évolution des concentrations en fonction des débits liquides pendant les crues, aussi bien à Oued El-Abtal qu'à Sidi AEK Djilali, suit principalement trois modèles:

Classe II. Presque 30% des crues de la station hydrométrique de Oued El-Abtal et 40% des crues de la station de Sidi AEK Djilali se présentent sous le modèle de la courbe de la classe II, boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre «clockwise loop» pour les crues survenues en Automne (50% pour la station de Oued El-Abtal et 37.5% pour la station de Sidi AEK Djilali), au Printemps (33.33% pour la station de Oued El-Abtal et 25% pour la station de Sidi AEK Djilali) et en Hiver (16.67% pour la station de Oued El-Abtal et 37.5% pour la station de Sidi AEK Djilali). Les crues d'Automne surviennent après une saison sèche 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. Pour les crues du printemps et d'Hiver, ceci peut être dû à 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.

L'apparition du pic des concentrations avant le pic des débits liquides, peut donc être due essentiellement à l'existence d'une couche de pavage, formée sur le lit de l'Oued antérieurement à la crue [82]. Les particules lâches du sol au début d'une averse sont érodées par le premier ruissellement direct en quantité appréciable. Cette situation peut avoir aussi lieu à un épuisement ou à une diminution du stock de sédiment disponible [70, 78, 82, 103, 104] ou à une limitation d'approvisionnement en matériaux solides [105] avant le maximum du débit liquide. L'épuisement ou la diminution des sédiments peut s'expliquer soit par un petit apport disponible, soit par à un débit liquide continu et/ou intense.

Selon, Heidel (1956) [106], dans les petits cours d'eau, la concentration maximum des sédiments se produit habituellement avant le débit maximum.

Classe III. L'évolution de la relation concentration des sédiments en suspension - débit liquide se présente à 30% pour les crues de la station de Oued El-Abtal et à 45% pour les crues de la station de Sidi AEK Djilali suivant le modèle de la courbe de la classe III, boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre «counterclockwise loop» pour les crues survenues en général en Automne (83.33% pour la station de Oued El-Abtal et 55.56% pour la station de Sidi AEK Djilali), et au Printemps (16.67% pour la station de Oued El-Abtal et 44.44% pour la station de Sidi AEK Djilali). Parfois en Automne et couramment au Printemps, le sol étant plus ou moins saturé par les crues antérieures (couvert au printemps) résiste à la pluie. L'érosion et le transport solide se verront légèrement retardés par rapport aux écoulements. Les irrégularités des cours d'eau du bassin versant de Oued Mina explique d'avantage ce retard qui augmente avec la distance en aval. Ainsi, ce n'est qu'après une érosion prolongée que la concentration en matières en suspension augmente. Ceci permettra, l'apparition du pic des débits liquides avant celui des concentrations notamment si l'averse est de forte intensité et de courte durée.

La variabilité spatiotemporelle de la précipitation illustrée par les différentes stations pluviométriques appartenant au même bassin semble expliquer aussi l'origine de cette forme de boucle (apparition du pic des concentrations après le pic des débits liquides). Plusieurs auteurs ont confirmé l'existence de cet effet [80, 107].

Les crues de cette classe sont caractérisées en général, par un temps de montée inférieur au temps de concentration du bassin et une concentration en sédiments très élevée.

Classe V. Presque 40% des crues de la station hydrométrique de Oued El-Abtal et 15% des crues de la station de Sidi AEK Djilali se présentent sous le modèle de la courbe de la classe V, boucle en forme de huit «figure eight» pour les crues survenues surtout en Automne (62.50% pour la station de Oued El-Abtal et 33.33% pour la station de Sidi AEK Djilali), au Printemps (25% pour la station de Oued El-Abtal et 66.67% pour la station de Sidi AEK Djilali), et à un degré moindre en Hiver (12.5% pour la station de Oued El-Abtal et 0% pour la station de Sidi AEK Djilali).

La forme en huit de la classe V, combine des parties de la classe II et III. 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 C peut être plus rapide que celle de Q 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 doucement 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.

Le phénomène s'inverse avec le temps dès l'épuisement du stock de sédiment surtout si l'averse est de forte intensité et de courte durée. L'augmentation de Q peut être plus rapide que celle de C et le pic de la concentration apparaît après ou avec celui du débit liquide. Ceci donnera une boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre pendant la montée de la crue. Après le pic, la concentration diminue doucement en fonction du temps, relativement aux débits liquides pendant la décrue et on obtient une boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre pour la relation C- Q.

Les sources majeures des sédiments en suspension directement mobilisés par les cours d'eau lors des fortes crues sont l'érosion du sol et l'érosion des berges. L'érosion en nappes des versants n'apporte qu'un faible part au transport solide des Oueds [3]. Les quantités relatives de ces deux sources dans un cours d'eau donné sont rarement connues.

Les escarpements argileux sont les plus sollicités par l'érosion, en particulier en période de crue ou l'on enregistre les charges sédimentaires les plus fortes. Pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal qui contrôle une superficie de 4126Km<sup>2</sup> (zone jurassique où près de 50% de sa surface est recouverte par une végétation de densité variable dont 5.8% de forêts de pin d'Alep) et pour un débit liquide égal ou supérieure à 300m<sup>3</sup>/s, la concentration moyenne des sédiments en suspension avoisine 75g/l. Pour la station de Sidi AEK Djilali qui contrôle une superficie de 470Km<sup>2</sup> (zone purement marneuse et dépourvue de végétation) et pour un débit liquide supérieur ou égal à 50m<sup>3</sup>/s, la concentration moyenne des sédiments en suspension avoisine 99g/l pour tous les événements considérés.

La variation de la concentration des sédiments en suspension résultant de la mobilisation, la rétention, la réduction et l'épuisement des sédiments dans le bassin fluvial amont de l'Oued Mina à l'échelle d'une crue est très grande. Elle est influencée principalement par les caractéristiques morphologiques et hydrologiques du bassin et 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 en suspension par les pratiques culturelles.

En conclusion, Les modèles sens des aiguilles d'une montre, sens contraire des aiguilles d'une montre et modèle en forme de huit sont les plus dominants sur le bassin versant de Oued Mina, aussi bien pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal que pour la station de Sidi AEK Djilali. L'analyse de l'hystérésis par classes montre relativement l'absence de l'effet saisonnier sur la forme de la boucle obtenue. Les saisons d'Automne, d'Hiver et de Printemps présentent une hétérogénéité des classes à cause d'une hétérogénéité du bassin du point de vue lithologie et du point de vue de la répartition spatiale des pluies (irrégularité du régime pluviométrique et hydrologique du bassin).

## CONCLUSION GENERALE

Ce travail a fait l'objet d'une contribution à la compréhension du phénomène et l'estimation du transport solide en suspension en zones semi-arides Nord Africaines, en particulier dans le bassin versant de l'Oued Mina au droit du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda (SMBA) dit Es-saada à base des données du débit liquide – débit solide instantanées et des données des précipitations journalières durant les périodes 1985/1986 à 2000/2001 (station de Oued El-Abtal) et 1982/1983 à 2000/2001 (station de Sidi AEK Djilali), et des données du débit liquide moyen journalier durant la période 1977/1978 – 2001/2002 (pour les deux stations). Ce bassin représente un échantillon des bassins du Nord de l'Algérie qui sont généralement caractérisés par un taux de transport solide élevé en raison de nombreux facteurs mis en jeu.

L'étude bibliographique a traité, dans le chapitre 1, l'ampleur du phénomène de transport solide dans différentes régions du monde. L'exposé des résultats des différents travaux antérieurs a permis de montrer que l'érosion et le transport solide sont des problèmes sérieux à l'échelle mondiale mais ils sont bien plus préoccupants dans certaines régions du monde, comme c'est le cas au Maghreb et plus particulièrement en Algérie. Il a permis aussi, d'adopter dans le reste du travail une approche par régression plus ou moins performante, selon le type d'échantillonnage adopté sur le réseau hydrométrique Algérien.

Les principaux paramètres du milieu physique analysés, dans le chapitre 2, fond du bassin versant de l'Oued Mina une géostructure plus ou moins complexe le rendant très sensible au processus d'érosion. Cette complexité s'explique en grande partie par la grande variété des faciès géologiques, des formes topographiques, du couvert végétal, des systèmes de pentes et des nuances climatiques. Les formations de sol imperméable (marneux), les terrains accidentés et les sols nus dépourvus de végétation qui couvrent 20%, 46% et 62% de la surface totale du bassin versant respectivement, favorisent l'écoulement de surface et par conséquent l'érosion et le transport solide.

L'étude des précipitations et des écoulements, dans le chapitre 3, a montré que les précipitations et les débits les plus importants ont lieu de Septembre à Mai et n'évoluent pas toujours de la même manière. Les régimes pluviométrique et hydrométrique se caractérisent par une grande variabilité spatio-temporelle, se traduisant par des périodes de sécheresse consécutives, dont les conséquences se répercutent en particulier sur le milieu car les sols desséchés sont facilement emportés par le ruissellement qui se forme dès les premières pluies.

Dans le chapitre 4, nous avons procédé à une approche statistique pour quantifier le transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued Mina et prévenir l'envasement du barrage de Sidi M'hamed Bena Aouda (SMBA). Un modèle puissance régressif explicatif de la variation du débit solide par le débit liquide a été développé pour différents cas de regroupements de données (annuelles, saisonnières, mensuelles et journalières). L'analyse de régression montre que la plupart des relations expliquent plus de 70% de la variance pour les deux stations hydrométrique Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali. Seule les relations puissances à l'échelle mensuelle, donnant les meilleurs coefficients de corrélation, sont retenue pour l'estimation, pendant et en dehors de la période d'observation, de la charge solide totale déposée dans la retenue de barrage de SMBA depuis sa mise en service en 1977/78 en fonction des débits liquides moyens journaliers. Le pourcentage expliqué varie de 65 % en Juin à 91 % au mois de Septembre pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal et de 73% en Février à 94% au mois d'Août pour la station de Sidi AEK Djilali. Le débit liquide, à l'échelle journalière, explique plus de 83% de la variance du débit solide.

L'étude à différentes échelles temporelles de la relation de puissance liant le débit solide au débit liquide a permis d'appréhender la complexité d'approche du transport solide et d'analyser le comportement des paramètres de l'équation. Il a été possible de définir des relations très fortes entre les deux paramètres  $a$  et  $b$ , et des bonnes relations à l'échelle annuelle entre  $a$  et l'hydraulicité notamment pour la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali. A l'échelle saisonnière la pluie explique fortement les variations du paramètre  $a$  aussi bien à la station hydrométrique de Oued El-Abtal qu'à la station de Sidi AEK Djilali, tandis que le débit liquide maximum n'explique pas bien la variation de l'exposant  $b$ . A l'échelle mensuelle, la relation paramètre  $a$  - pluie moyenne mensuelle  $P_m$  est bonne à la station de Oued El-Abtal, tandis que les relations: paramètre  $b$  - pluie moyenne mensuelle  $P_m$ , paramètre  $a$  - débit mensuel spécifique  $Q_s$ , ne sont significatives qu'à la station

hydrométrique de Sidi AEK Djilali. À l'échelle d'un événement averse – crue, le modèle varie d'une crue à une autre. De plus, le comportement de a et b est plus détaillé. Ainsi, les valeurs de a et b sont inversement proportionnelles. L'évolution de a et b pour tous les mois n'est pas claire. Pour des crues survenues durant un même mois, les paramètres a et b peuvent présenter de faibles ou de fortes valeurs probablement en fonction des caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant, des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau et de la nature et de l'état de surface des sols. Le paramètre a semble faiblement lié aux composantes de la pluie. La tendance est une diminution de a (augmentation de b) lorsque la hauteur et l'intensité maximale de l'averse augmentent. Les valeurs de a les plus élevées caractériseraient un IPA faible et une forte érodabilité des sols du bassin, tandis que les faibles valeurs de a signifieraient un état de saturation du sol, soit un IPA fort et une érodabilité faible.

Les résultats obtenus dans le chapitre 5 ont montré que le barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda d'une capacité initiale de stockage de  $235\text{Mm}^3$  reçoit annuellement une grande quantité des sédiments en suspension de l'ordre de  $2.081\text{MT}$  ( $1.301\text{Mm}^3$ ), soit une dégradation spécifique de  $424.682\text{T/Km}^2/\text{an}$ . La quantité des sédiments en suspension provenant du bassin versant de l'Oued Mina dans la période 1977/1978 - 2001/2002 est de l'ordre de  $52.024\text{MT}$  ( $32.653\text{Mm}^3$ ), ce qui représente 13.84% de la capacité de stockage du barrage.

Le barrage de SMBA reçoit  $2.705\text{MT}$  ( $1.691\text{Mm}^3$ ) de matériau solide fin et grossier annuellement, soit une dégradation spécifique de  $552.087\text{T/Km}^2/\text{an}$  et un taux de comblement de la retenue de  $0.72\%/ \text{an}$ . Ce dernier a accumulé  $67.631\text{MT}$  ( $42.269\text{Mm}^3$ ) de sédiments fins et grossiers en 25 années (septembre 1977 à Août 2002), ce qui représente 18% de sa capacité. On prévoit l'accumulation de  $72.713\text{Mm}^3$  (30.94%) à l'horizon 2020,  $106.533\text{Mm}^3$  (45.33%) à l'horizon 2040 et un comblement total de la retenue à l'horizon 2136, soit une durée de vie de 158 ans.

L'analyse graphique de l'érosion spécifique  $E_s$  en fonction de la lame d'eau ruisselée  $L_r$  calculée a mis en évidence de bonnes relations en puissance expliquant 79% et 96% de la variance pour les deux stations Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali respectivement.

L'analyse de la contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension a montré qu'une grande partie du transport solide en suspension est évacuée lors de quelques crues. En général, ce sont les plus importants événements de crues qui engendrent la plus grande charge solide en suspension. Nous estimons que sur une année

hydrologique moyenne, il n'est pas rare de trouver que 95% de la charge solide en suspension est fournie par deux ou trois crues seulement et dans environ 5% de la période annuelle.

L'analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation C-Q (concentration - débit liquide), dans le chapitre 6, a permis à travers des séries d'événements chronologiques (crues) de caractériser la relation C-Q, d'élaborer une classification de cette relation, et d'en ressortir les modèles de boucle d'hystérésis dominants. Les modèles sens des aiguilles d'une montre, sens contraire des aiguilles d'une montre et modèle en forme de huit sont les plus dominants sur le bassin versant de l'Oued Mina, aussi bien pour la station hydrométrique de Oued El-Abtal que pour la station de Sidi AEK Djilali. L'analyse de l'hystérésis par classes a montré relativement l'absence de l'effet saisonnier sur la forme de la boucle obtenue. Les saisons d'Automne, d'Hiver et de Printemps présentent une hétérogénéité des classes à cause d'une hétérogénéité du bassin du point de vue lithologie et du point de vue de la répartition spatiale des pluies (irrégularité du régime pluviométrique et hydrologique du bassin).

En se basant sur les résultats obtenus dans cette étude et sur la relation complexe entre le débit solide en suspension et le débit liquide, influencée par la nature des averses, la variabilité spatiotemporelle de l'hydro-pluviométrie et les caractéristiques du bassin, on peut conclure que la fonction puissance de la courbe de transport solide est une méthode appropriée pour l'estimation et l'analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued Mina. Mais, il convient de souligner que toute fonction théorique n'est pas une représentation exacte du processus naturel, mais seulement une description qui se rapproche du phénomène en question et qui s'est révélée utile pour décrire les données observées.

Comme le barrage de SMBA a été planifié, conçu et exploité sur l'hypothèse d'une durée de vie limitée, inférieure ou égale à 250 ans, qui finira éventuellement par être résilié par l'accumulation des sédiments transportés, des actions et des mesures pratiques peuvent être envisagées pour réduire son envasement, accroître sa durée de vie et préserver son potentiel hydraulique à savoir :

- Le reboisement du bassin versant pour protéger le sol contre l'érosion notamment dans la région Nord (marneuse) dépourvue de végétation;

- La construction des retenues collinaires, cette opération sert à alimenter les eaux souterraines d'une part, et d'autre part, elle permet de retenir des quantités importantes des sédiments;
- La construction des barrières sur les pentes pour ralentir le ruissellement;
- La construction de dissipateurs d'énergie dans les canaux pour réduire la vitesse et la capacité érosive du courant;
- Le soutirage des courants de densité par les pertuis de vidange; c'est ainsi que la perte de capacité du barrage d'Ighil Edma est réduite de plus de la moitié.

Les résultats découlant de cette étude peuvent être validés plus tard par une éventuelle enquête bathymétrique, actuellement non disponible. En outre, et du point de vue sédimentation, l'érosion du sol semble être un problème majeur dans le bassin versant de l'Oued Mina. Par conséquent, une approche intégrée doit être étudiée pour déterminer les zones productives de sédiments et lutter contre l'érosion et l'envasement du barrage de SMBA. Nous pensons, comparativement à la complexité du problème posé, que les résultats obtenus, doivent être améliorés en augmentant la taille des séries de données disponibles. Aussi, nous recommandons :

- De synthétiser les résultats, en collaboration avec d'autres chercheurs pour déterminer des modèles régionaux, maghrébins et méditerranéens;
- D'estimer la transport solide total par la mesure du charriage;
- D'étudier le processus d'épuisement des sédiments;
- D'étudier l'effet des lâchés du barrage de Bakhadda sur l'envasement du barrage de SMBA;
- D'étudier l'effet de la suspension à l'entrée de la retenue sur la formation des courants de densité;
- D'utiliser d'échantillonneurs automatiques et la méthode d'extrapolation du champ de vitesse pour améliorer la fiabilité des données au niveau des stations hydrométriques;
- D'augmenter le nombre de postes pluviométriques pour atteindre la norme: une station par 10-250Km<sup>2</sup>; et veiller à la bonne marche des postes existants.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Remini, B., *“La problématique de l'eau en Algérie”*, Edition Imprimerie Madani, Blida, 2005, Algérie, 182p.
2. Remini, B., Avenard, J.M., Kettab, A., *“Envasement des barrages”*, Edition CEDOC, Alger, 2003, 207p.
3. Demmak, A., *“Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de Docteur Ingénieur, Université Pierre et Marie Currie”*, Paris, 1982, 210p.
4. Badraoui, A., Hajji, A., *“Envasement des retenue de barrages”*, Revue la Houille Blanche, No.6/7, 2001, pp: 72-75.
5. A.N.R.H., *“Rapports Internes de l'A.N.R.H”*, MRE 2002, 2012, 2013, Alger.
6. Remini, B., Hallouche, W., *“L'alluvionnement des retenues”*, Edition Imprimerie Madani, Blida, 2005, Algérie, 102p.
7. Remini, B., Hallouche, W., *“L'Algérie : plus d'un siècle d'envasement des barrages (chap 8). In : Etat des ressources en eau au Maghreb, (UNESCO, office in Rabat, Ed), 2009, pp: 123-142.*
8. Achite, M., Meddi, M., *“Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Haddad (Nord-Ouest Algérien)”*, Revue Sécheresse No.4, Vol.15, 2004, pp: 367-373.
9. FEM, FIDA, *“Publication FIDA”*, Edition GMS GRAFICHE, Rome, 2002.
10. Kanwar, J.S., *“Managing soil resources to meet the challenge to mankind. Presidential address of 12<sup>th</sup> Int”*, Congress of Soil Science, New Delhi, India. 8-16 February 1982, Plenary session paper, pp: 1-32.
11. Zeggane, H., *“Approche cartographique de l'érosion hydrique à partir des ouvrages hydrauliques existants, cas du bassin versant de l'Oued Isser (W. Boumerdès)”*, Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique, Blida, 2005, Algérie, 195p.
12. Gomer, D., *“Ecoulement et érosion dans des petits bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen”*, Thèse Université Karlsruhe, Allemagne, 1994, 137p.

13. OCDE, *“La performance environnementale de l’agriculture dans les pays de l’OCDE depuis 1990”*, Chapitre 1-5 Sols, 2008, pp: 1-101.
14. Touaibia, B., *“Problématique de l’érosion et du transport solide en Algérie septentrionale”*, Revue Sécheresse Vol.21, No.1, 2010, pp: 1-6.
15. Wischmeier, W.H., Smith, D.D., *“Predicting rainfall erosion losses”*, A guide to conservation planning, US Department of Agriculture, Handbook No.537, 1978, 58p.
16. Claassen, R., Breneman, V., Bucholtz, S., Cattaneo, A., Johansson, R., Morehart, M., *“Environmental compliance in US agricultural policy: Past performance and future potential”*, Economic Research Service, United States Department of Agriculture (Ministère de l’Agriculture des États-Unis), Washington DC, 2004, États-Unis.
17. Lefebvre, A., Eliers, W., Chunn, B., *“Environmental Sustainability of Canadian Agriculture”*, Agri-Environmental Indicator Report, Series Report No.2, 2005, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, Canada.
18. AEE, (Agence Européenne pour l’Environnement), *“IRENA Indicator Reporting on the integration of environmental concerns into agricultural policy”*, 2005: <http://webpubs.eea.eu.int/content/irena/Latestproducts.htm>.
19. EUROPA, “Site de la Commission Européenne”, 2003: <http://europa.eu.int/comm/environment/soil>.
20. Hamblin, A., *“Land, Australia State of the Environment Report (Theme Report)”*, CSIRO on behalf of the Department of the Environment and Heritage, Canberra, 2001, Australie.
21. NLWRA, NHT, (National Land and Water Resources Audit et National Heritage Trust) *“Australians and Natural Resource Management”*, on behalf of the Commonwealth of Australia, Canberra, 2002, Australia.
22. Combeau, A., *“Erosion et conservation des sols”*, ORSTOM, 1977, Paris, 85 p.
23. Chevalier, J.J., Pouliot, J., Thomson, K., Boussama, M.R., *“Système d’aide à la planification pour la conservation des eaux et des sols (Tunisie), Système d’information géographique utilisant les données de télédétection”*, Acte du Colloque Scientifique International, Hammamet, Tunisie, 1-2 Nov. 1995, pp: 4-12.
24. Boussama, M.R., *“Système d’information pour la conservation et la gestion des ressources naturelles”*, Colloque international sur le rôle des technologies de télécommunication et de l’information en matière de protection de l’environnement, Tunis, 1-2 Nov. 1996, pp: 64-70.

25. Hamza, A., "*Quantification des pertes en terre du territoire tunisien*", Bull. Réseau Erosion 13, 1992, pp: 188-192.
26. Celik, L., Aydine, M., Yazici, U., "*A review of the erosion control studies during the republic in Turkey*", In Kapur.S, Akça.E, Eswaran.H, Kelling.G, Vita-Finzi, Mermut A-R, Ocal A-D, editor 1st International Conference on Land Degradation, Adan, Turkey 10-14 June 1996, pp: 175-218.
27. Delhoume, J.P., "*Etude en milieu méditerranéen semi-aride: ruissellement et érosion en zone montagneuses de Tunisie (Djebel Semmama), compagne 1975-1979, Tunis*", ORSTOM/DRE, 1981, 185 p.
28. Roose E. "*Introduction à la GCES*", Bulletin Pédologique FAO.76, 1994, 420 p.
29. Razafiniaina, "*Etude expérimentale de l'érosion hydrique inter rigole sous culture de MIL et d'ARACHID au Sénégal*", 2002, Dakar.
30. Chebbani, R., Djelil, K., Roose, E., "*Etude des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser, Algérie*", Bulletin Réseau Erosion 19, 1999, pp : 85-95.
31. Roose, E., "*Dix années de mesures de l'érosion et du ruissellement au Sénégal*", Agronomie Tropicale (France), Vol.22, No.2, 1967, pp: 123-152.
32. Roose, E., "*Dix-sept années de mesure expérimentale de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire*", Thèse Doc. Ing. Fac. Sci. Abidjan, No.20, 1973, 125p.
33. Roose, E., "*Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées*", Thèse Doct. ès Sciences, Université d'Orléans, 587 p. In: Travaux et documents de l'ORSTOM, Paris, No.130, 1980, 569 p.
34. Roose, E., Piot, J., "*Runoff, erosion and soil fertility restoration on the mosi plateau (central zone of upper-volta)*", Symp. Intern Challenge in African Hydrology and Water Resources, Harare Symposium, I.A.H.S. Publ, No.144, 1984, pp: 485-498.
35. Boli, Z., Bep, A., Roose, E., "*Enquête sur l'érosion en région cotonnière du Nord Cameroun*", Bull. Réseau Erosion 11, 1991, pp: 127- 138.
36. Hadjiat, K., "*Etat de dégradation des sols en Algérie*", Rapport d'expert PNAE, Banque Mondiale, 1997, 45p.
37. Mazour, M., Roose, E., "*Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans des bassins versants du Nord – Ouest*

- de l'Algérie*", Bulletin Réseau Erosion 21, IRD, Montpellier (France), 2002, pp: 320-330.
38. Heusch, B., "*Etude de l'érosion et des transports solides en zone semi-aride*", Rech. Biblio sur l'Afrique du Nord, Projet PNUD Rab/80/04, 1982, 83 p.
  39. SOGREAH, "*Etude générale des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie*", Dossier, Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, 1967, Algérie.
  40. Bourouba, M., "*Bilan comparative de l'érosion actuel dans deux bassins versants de l'Algérie orientale: le Seybouse et le Djendjen*", Méditerranée 80, ¾, 1994, pp: 31-39.
  41. Mahieddine, M., "*Quantification et variabilité parcellaire sans simulation de pluie dans le bassin versant de l'Oued Mina*", Thèse de Magister, INA, El-Harrach, 1997, Alger.
  42. Touabia, B., Gomer, D., Aidaoui, A., Achite, M., "*Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi aride de l'Algérie du Nord*", J. Science Hydrologique Vol.46, No.1, 2001, pp: 41-53.
  43. Meddi, M., "*Hydropluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'Oued Mina*", Thèse Unique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1992, 320p.
  44. Heusch, B., "*L'érosion de prérief; Etude quantitative dans les collines marneuses*", Annales Recherches Forestières du Maroc No.12, 1970, pp: 9-176.
  45. Kouri, L., "*L'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'Oued Mina. Etude des processus et type de fonctionnement des ravins dans la zone des marnes tertiaires*", Thèse de doctorat Ph.D, Université louis Pasteur, Strasbourg, 1993, France, 238p.
  46. Meddi, M., Khaldi, A., Meddi, H., "*Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du nord*", Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes (Proceedings of a symposium held at Vienna), IAHS Publ. No.249, 1998, pp: 393-397.
  47. Touaibia, B., "*Erosion - Transport solide - envasement de barrages, cas du bassin versant MINA*", Thèse de Doctorat d'Etat, INA, El-Harrach, Algérie, 2000.
  48. Terfous, A., Megnounif, A., Bouanani, A., "*Étude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien)*", Rev. Sci. Eau No.14, 2001, pp: 173-185.
  49. Terfous, A., Megnounif, A., Bouanani, A., "*Détermination des dégradations spécifiques dans trois bassins versants des régions méditerranéennes*", IAHS pub. No.278, 2003, pp: 366-372.

50. Bessenasse, M., Kettab, A., Paquier, A., “*Modélisation bidimensionnelle du dépôt de sédiments dans un barrage en Algérie*”, La Houille Blanche, N°1 (Jan-fév, 2004), pp: 31-36.
51. Bouanani, A., “*Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie)*”, Thèse de Doctorat d’Etat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2004, 250p.
52. Benkhaled, A., “*Contribution à l’étude du transport solide en suspension, bassin de Oued Ouahrane, Cheliff*”, Thèse de Doctorat Sciences, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, 2006, 215p.
53. Ghenim, A., Terfous, A., Seddini, A., “*Étude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéennes : cas du bassin versant de l’oued Sebdu (Nord-Ouest algérien)*”, Revue Sécheresse No.1, Vol.15, 2007, pp: 39-44.
54. Elahcene, O., Remini, B., “*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 No.1, 2009, pp: 132-139.
55. Khanchoul, K., Benslama, M., Remini, B., “*Regressions on Monthly Stream Discharge to Predict Sediment Inflow to a Reservoir in Algeria*”, Journal of Geography and Geology Vol. 2, No.1, 2010, pp: 36-47.
56. Ghenim, A., Megnounif, A., “*Précision des relations reliant la concentration en suspension au débit liquide - Etude comparative*”, Communication Science & technologie No.9, Janvier 2011, pp: 17-23.
57. Khanchoul, K., Boukhrissa, Z.E., Majour, H., “*Statistical modeling of suspended sediment transport in the Cherf drainage basin, Algeria*”, Rev. Mar. Sci. Agron.Vét. 1, 2012, pp: 13-17.
58. Bouanani, A., Baba-Hamed, K., Fandi, W., “*Production et transport des sédiments en suspension dans l’oued Sikkak (Tafna – Nord-Ouest Algérie)*”, Revue des Sciences de l’eau No. 26/2, 2013, pp: 119-132.
59. Ghernaout, R., Remini, B. “*Impact of suspended sediment load on the silting of SMBA reservoir (Algeria)*”, Envir. Earth Sci. J., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, No.3, Vol.72, 2014, pp: 915-929.
60. Touaibia, B., Achite, M., “*Contribution à la cartographie de l’érosion spécifique du bassin versant de l’Oued Mina en zone semi-aride de l’Algérie septentrionale*”, J. Sciences Hydrologiques No.2, Vol.48, 2003, pp: 235-242.

61. Dubreuil, P., "*Initiation a l'analyse hydrologique*", Editions Masson & C<sup>ie</sup> et ORSTOM, Paris, 1974, France.
62. Meddi, M., "*Etude de l'écoulement moyen annuel en Algérie du nord (Esquisse cartographique)*", Actes du premier colloque maghrébin sur l'hydraulique, Zéralda 16 et 17 mai 1995, ENSH, Algérie, pp: 280-288.
63. Meddi, M., "*Etude de l'écoulement moyen annuel dans le nord de l'Algérie, Proposition de formules d'estimation du débit moyen annuel*", Rev. Algérie Equipement No.8, 1996, pp: 5-8.
64. A.N.R.H., "*Annuaire (données pluviométriques et hydrométriques) et cartes hydrologiques du bassin versant de l'Oued Mina*", MRE 2010, 2011, Alger.
65. I.F.G., "*Projet d'aménagement intégré du bassin versant de l'Oued Mina*", Institut des Géosciences Appliquées, Allemagne, 1987.
66. Réménieras, G., "*L'hydrologie de l'ingénieur*", Collect. Dir. Etudes. Rech. Electr. France, Ed.Eyrolles, 1986, 465 p.
67. Achite, M., "*Contribution a l'analyse multivariée de la variable 'transport solide', cas du bassin versant de Oued Mina*", Mémoire de Magistère – Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique, ENSH-Blida, 1999, Algérie.
68. Ghernaout, R., "*Rainfall – Runoff – Sediment load relations in Mina river basin situated in the north western region of Algeria*", Master Thesis, Mosul University, Iraq, 2002, 148p.
69. Liams, J., "*Hydrologie générale: Principes et applications*", 2<sup>ème</sup> édition, Gaëtan Morin, 1993, Québec, Canada.
70. Wood, P.A., "*Controls of variation in suspended sediment concentration in river Rother*", West Sussex, England Sedimentology 24, 1977, pp: 437-445.
71. Walling, D.E., Webb, B.W., "*The reliability of suspended sediment load data, erosion and sediment transport measurement*", Proceeding of the Florence Symposium, June, 1981, IAHS Pub., No.133.
72. Etchanchu, D., Probst, J.L., "*Erosion et transport de matière en suspension dans un bassin versant en région agricole. Méthode de mesure du ruissellement superficiel, de sa charge et des deux composantes du transport solide dans un cours d'eau*", Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris, 1986, Vol.17, pp: 1063-1068.
73. Crawford, C.G., "*Estimation of suspended sediment rating curves and mean suspended sediment loads*", J. Hydrology No.226, 1991, pp: 331-348.

74. Bougard, J.L., "*Sediment transport in alluvial streams*", International Courses in Hydrology, Boudapest, Academiai Kiado Press, 1974, 812p.
75. Vanoni, V.A., "*Erosion rates from sediment sources; In engineering sedimentation*", Manual ASCE, 1977, New York, pp: 472-480.
76. Fleming, G., "*Design curves for suspended load estimation*", Proc. Inst. Civ. Eng., Vol.43, 1969, pp: 1-9.
77. Leopold, L.B., Maddock, T.G., "*The hydrometric geometry of stream channels and some physiographic implications*", Washington D.C.U.S. Geological Survey, 1953, professional paper, 252p.
78. Battala, R., Sala, M., "*Temporal variability of suspended sediment in a Mediterranean river, variability in stream erosion and sediment transport proc*", Conberra conf., IAHS, Pub No.224, 1992, pp: 229-305.
79. Cohn, T.A., "*Recent advances in statistical methods for the estimation of sediment and nutrient transport in rivers*", Rev. Geophys. No.33, suppl July 1995, pp: 1117-1130.
80. Willams, G.P., "*Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events in rivers*", J. Hydrology 111, 1989, pp: 89-106.
81. Axelson, R., Sala, M., "*The Laitaure Delta. A study of deltaic morphology and processes*", Geogr. Ann. 49A, 1967, pp: 1-127.
82. Arnborg, L., Walker, H.J., Pieppo, J., "*Suspended load in the Colville River, Alaska*", Geogr. Ann. 49A., 1967, pp:131-144.
83. Megnounif, A., Terfous, A., Bouanani, A. "*Contribution des deux composantes de l'écoulement à la production de sédiments transportés en suspension dans les zones semi-arides: cas de l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérie)*". Sem. Int. «Hydrologie des régions méditerranéennes», Montpellier 11-13 Octobre 2000, Phi-V/Doc. Tech. en hydrologie / N°51, Ed. UNESCO.
84. Kattan, Z., Gac, G.Y., Probst, J.L., "*Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin*", J. Hydrology No.92, 1987, pp: 59-76.
85. Ghenim, A., "*Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna: cas d'Oued Isser, Oued Mouilah et de la Haute Tafna*", Mémoire de Magister, Univ. Tlemcen, 2001.
86. Achite, M., "*Approche statistique d'évaluation du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Mina (Nord-Ouest Algérien)*", In : Colloque International sur l'Eau dans le Bassin Méditerranéen, 10–13 octobre, Monastir (Tunisie 2002), pp: 894-899.



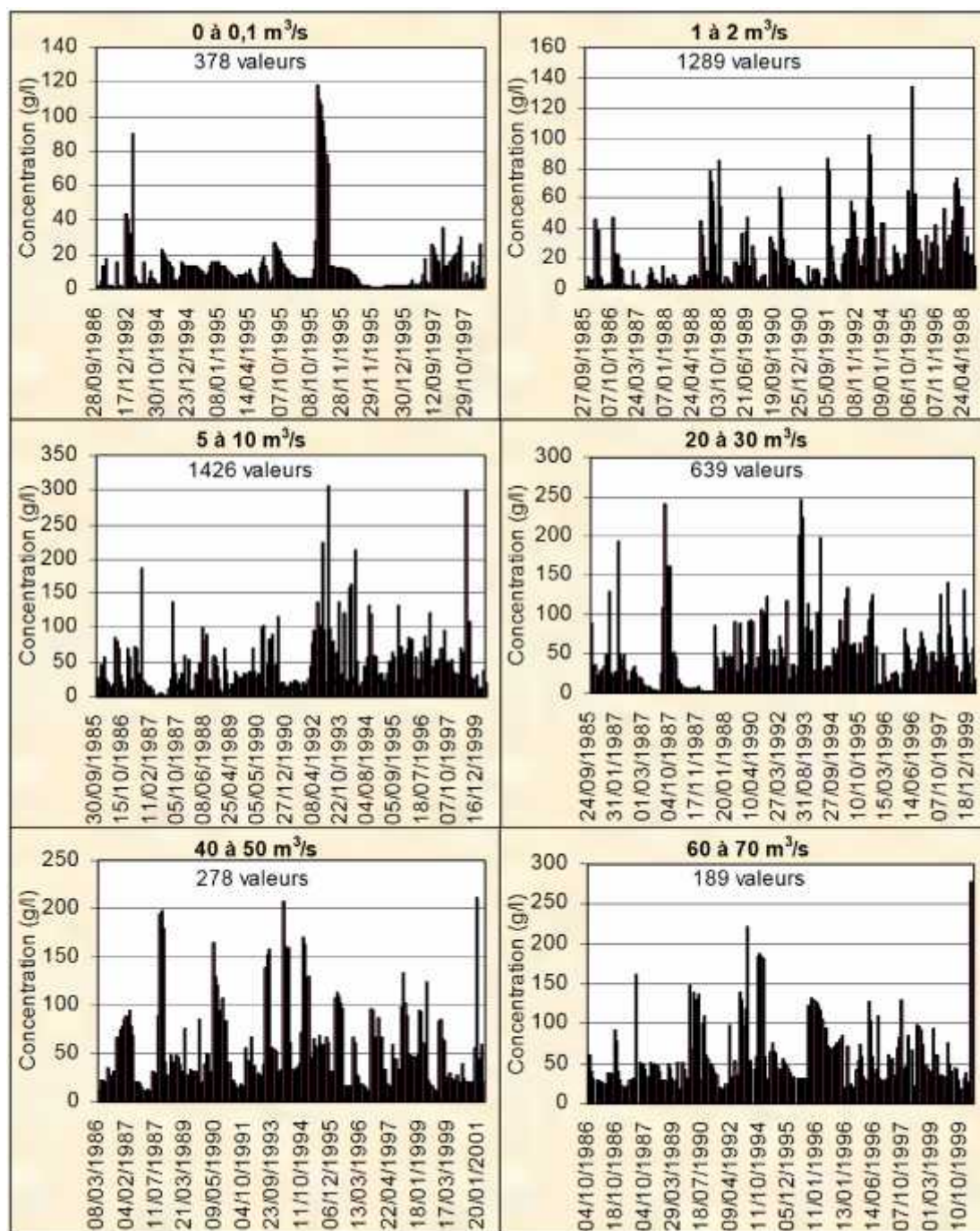
87. Benkhalel, A., Remini, B., "*Analysis of a sediment rating curve in Wahrane river basin (Algeria)*", Revue des Sciences de l'eau, Pub No.16/3, 2003, pp: 333-356.
88. Tardy, Y., "*Dynamique du paysage tropical*" (inpress) 1994.
89. Probst, J.L., Bazerbachi, A., "*Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure*", Sci. Géol. Bull., 39, 1, 1986, pp: 79-98.
90. Tardy, Y., Probst J.L., "*Sécheresses, crises climatiques et oscillations téléconnectées du climat depuis 100 ans*", Science et changements planétaires/Sécheresse, No.1, Vol.3, 1992, pp: 25-36.
91. Tardy, Y., Probst, J.L., "*Sécheresses et crises climatiques*", Encyclopedia Universalis, Universalis, 1992, pp: 167-174.
92. Tardy, Y., Mortatti J., Probst J.L., "*Erosion chimique dans le bassin de l'Amazonie, Evaluation du ruissellement par la méthode dite des réservoirs à contribution variable mais à composition constante*", C. R. Acad. Sci. Paris, t 320, série II, 1995, pp: 853-860.
93. Guy, H.P., "*An analysis of some storm period variables affecting stream sediment transport*", U.S. Geological Survey, professional paper 462-E, 1964, 46p.
94. Henensal, P., "*L'érosion externe des sols par l'eau. Approche quantitative et mécanismes*", Laboratoire des Ponts et Chaussées, rapport de recherche No.138, 1986, 76p.
95. Keith, R., Cooley, R., "*Erosivity values for individual design storms*", J of Irrigation and Drainage No.106, 1980, pp: 135-145.
96. Remini, B., Avenard, J.M., Kettab, A., "*L'envasement des barrages, magnitude et conséquences*", Publication interne, U.L.P Strasbourg, 1996, France, 23p.
97. Douglas, I., "*Intensity and periodicity in denudation process with special reference to the removal of material in solution by rivers*", Zetfrüt Geomorphology No.8, 1964, pp: 453-473.
98. Frecaut, R., "*Les transports solides des cours d'eau et leur signification morphologique*", Revue Géogr. Est, 1964, No.4, pp: 447-458.
99. Probst, J.L., "*Hydrologie du bassin de la Garonne, bilan de l'érosion*", Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Toulouse, 1983, 148p.
100. Etchanchu, D., "*Géochimie des eaux du bassin de la Garonne. Transferts de matières dissoutes et particulaires vers l'Océan Atlantique*", Thèse de doctorat, Univ. Paul Sabatier, Toulouse, 1988, France, 178 p.

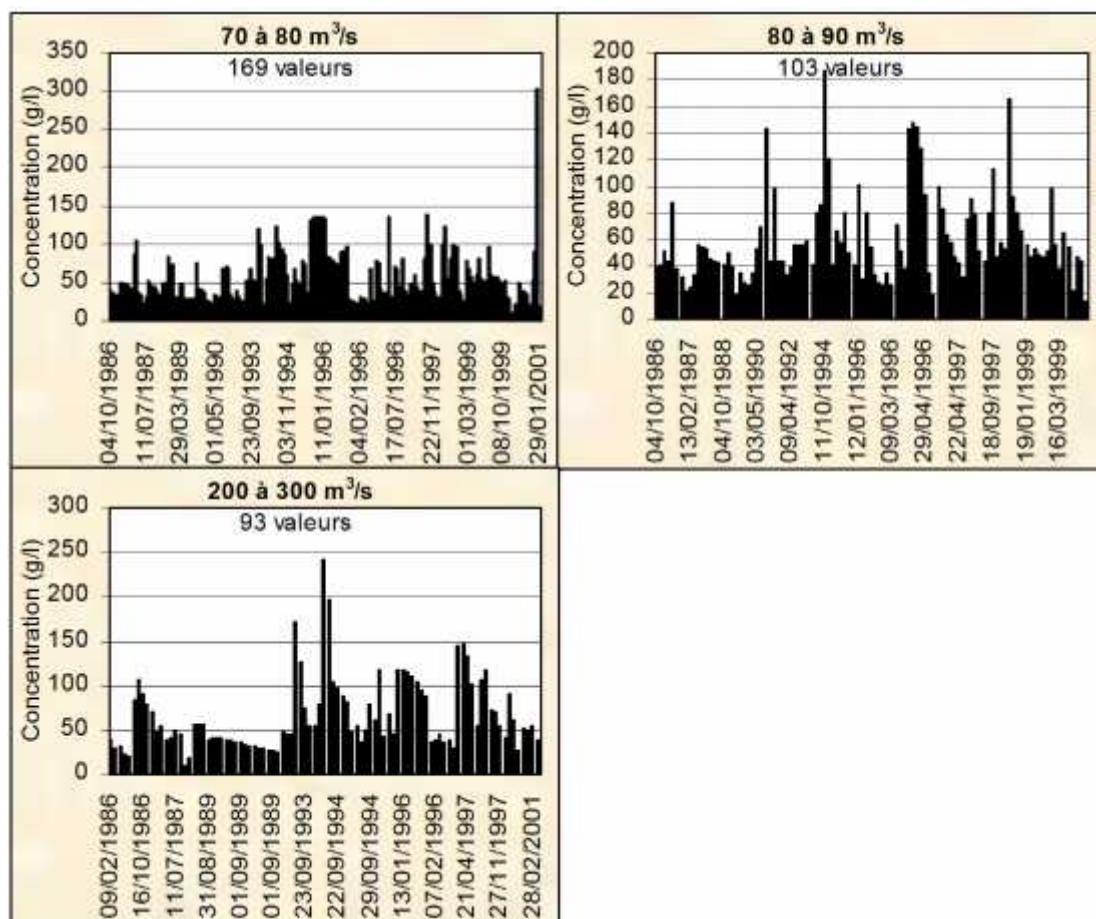
101. Thomas, R.B., "*Monitoring baseline suspended sediment in forested basins: the effects of sampling on suspended sediment rating curves*", Hydrological Sciences J. Vol.5, No.33, 1988, pp: 499-514.
102. Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P., "*Fluvial Processes in geomorphology*", Freeman and Co., San Francisco, 1964, USA.
103. Benkhaled, A., Remini, B., "*Temporal variability of sediment concentration and hysteresis phenomenon in the Wadi Wahrane basin (Algeria)*", Hydrological Sciences Journal No.48(2), 2003, pp: 243-255.
104. Walling, D.E., "*Suspended sediment and solute yield from small catchment prior to urbanisation in: Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events in rivers (ed. by G.P., Willams, 1989)*", J. Hydrology 111, 1974, pp: 89-106.
105. Moog, D.B., Whithing, P.J., "*Annual hysteresis in bed load rating curves*". Water Resour. Res. No.34(9), 1998, pp: 2393-2399.
106. Heidel, S.G., "*The progressive lag of sediment concentration with flood waves*", Trans. Am. Geophys. Union 37, 1956, pp: 56-66.
107. Zhang, J., Huang, W.W., Shi, M.C., "*Hwangue (Yellow River) and its estuary: sediment transport and deposition*", J. Hydrol. 120, 1990, pp: 203-233.

## ANNEXE (4.1)

Graphiques chronologiques des concentrations pour différentes gammes de débit  
liquide au niveau de la station hydrométrique de Oued El-Abtal

« suite »

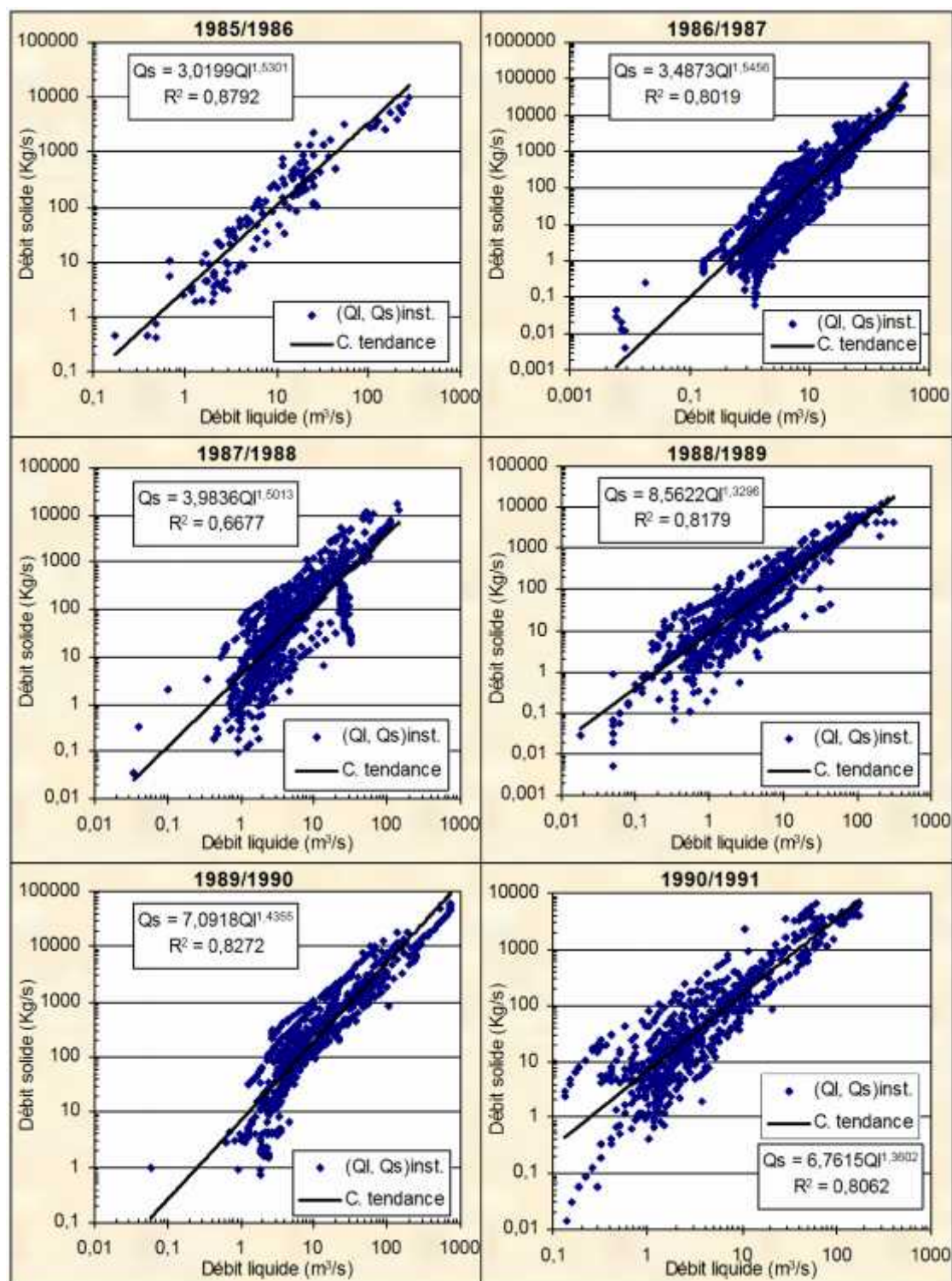


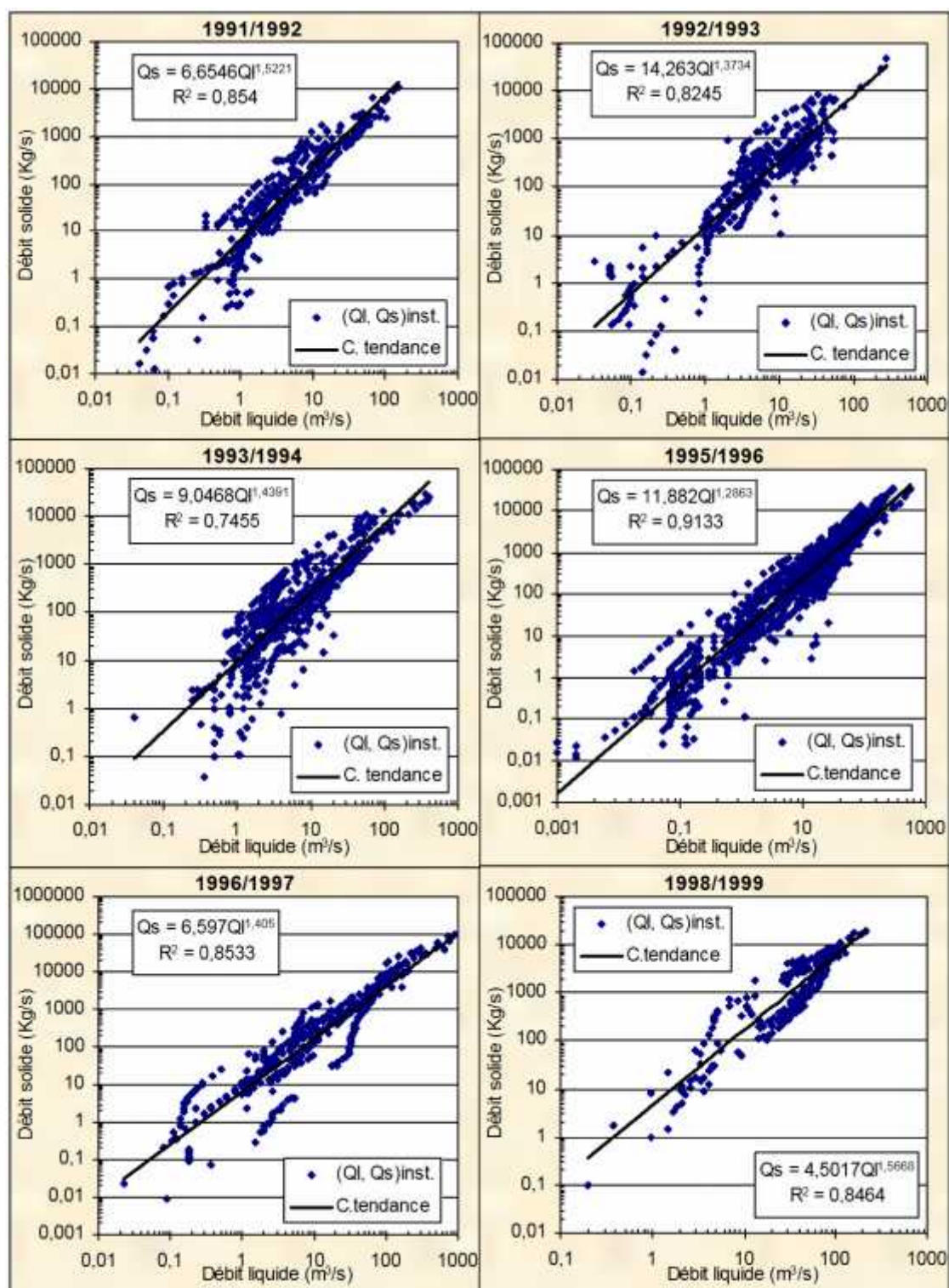




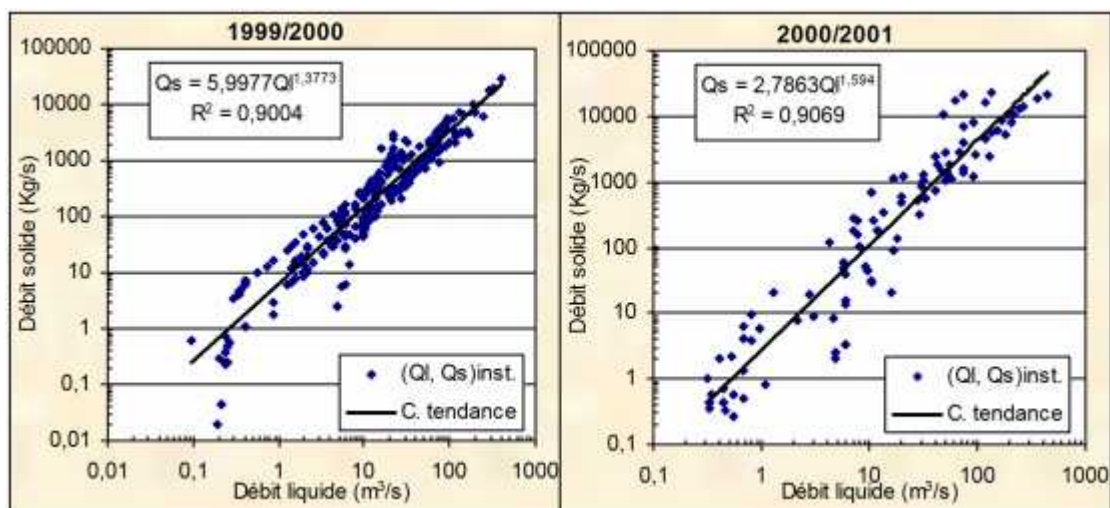
## ANNEXE (4.2)

Relations annuelles du débit liquide - débit solide à la station hydrométrique de Oued El-Abtal « suite »



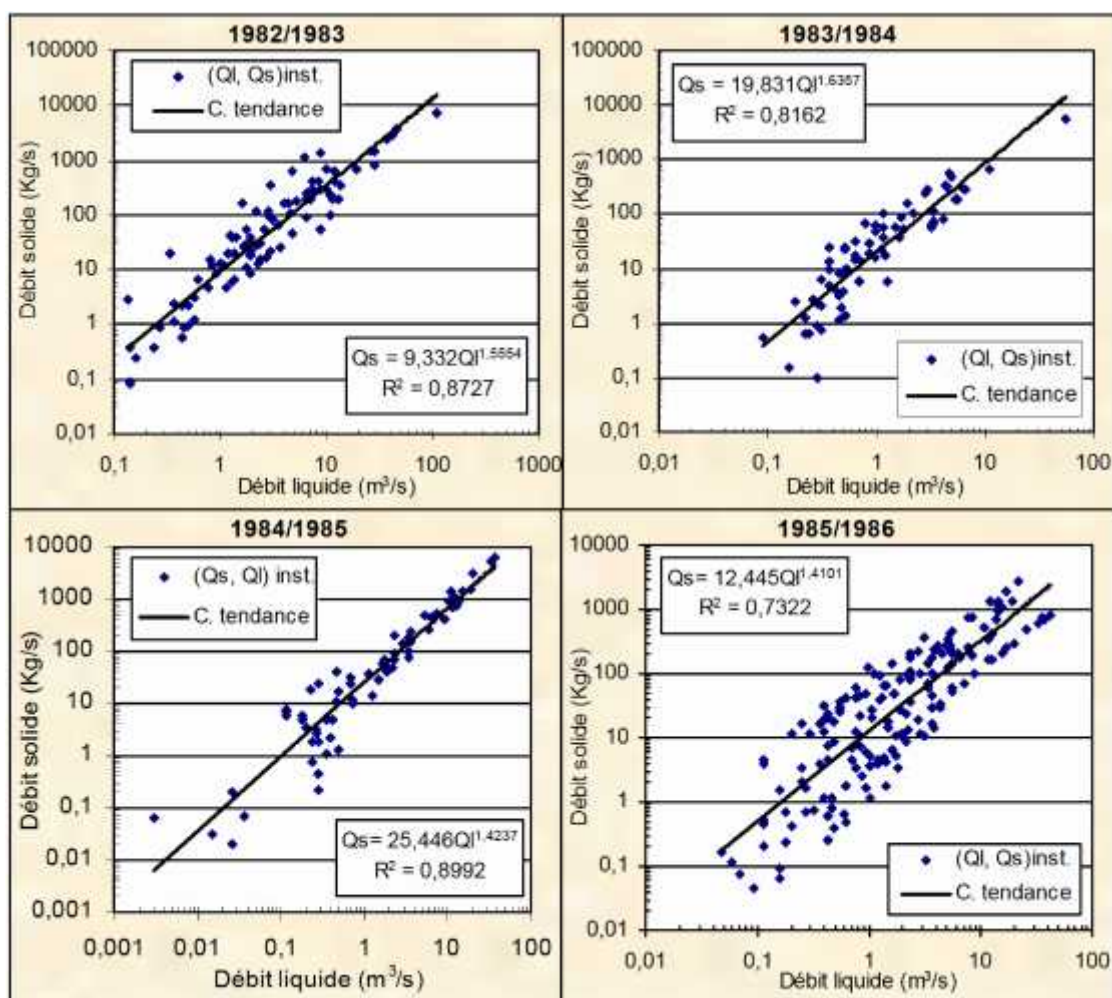




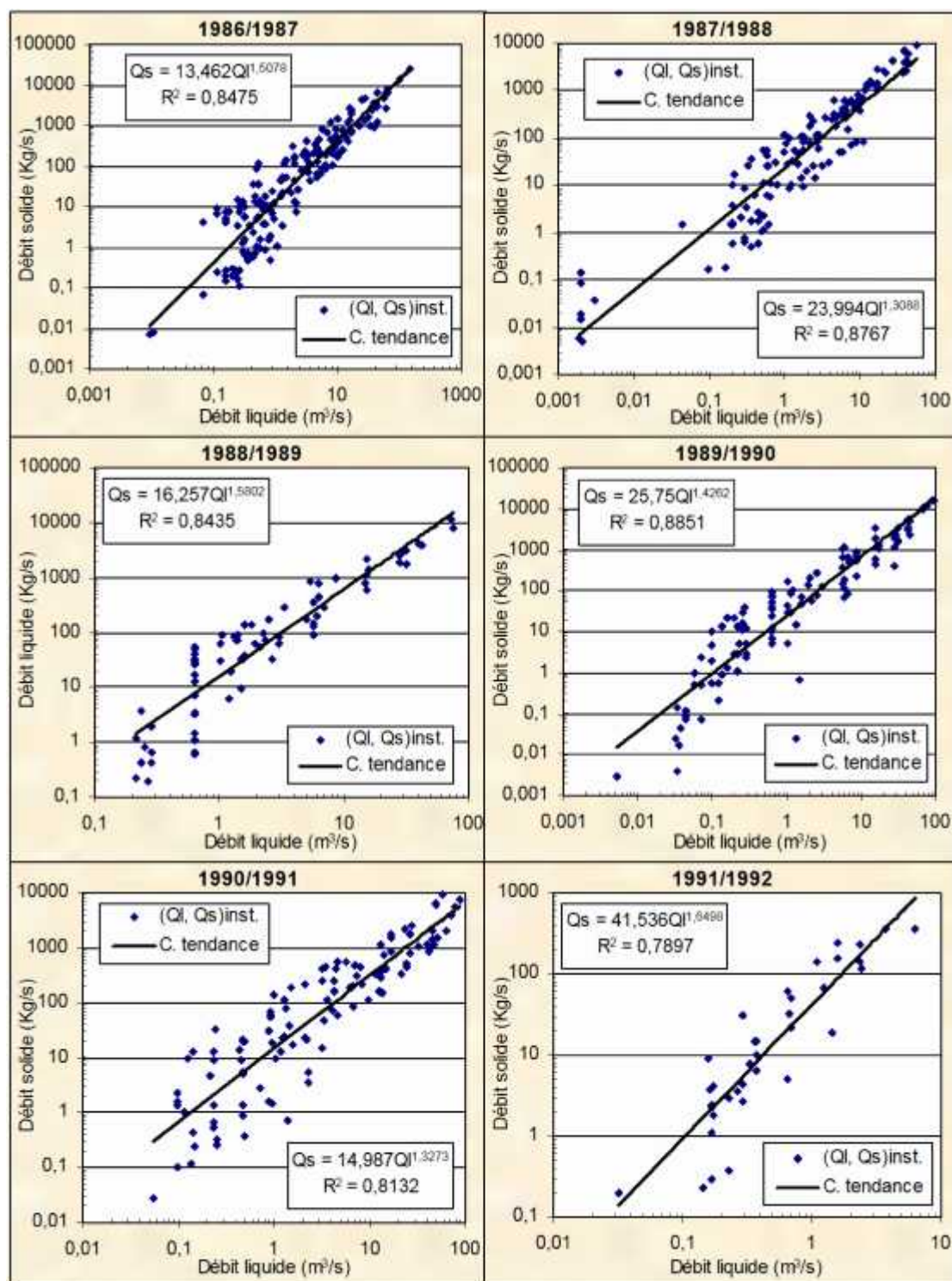


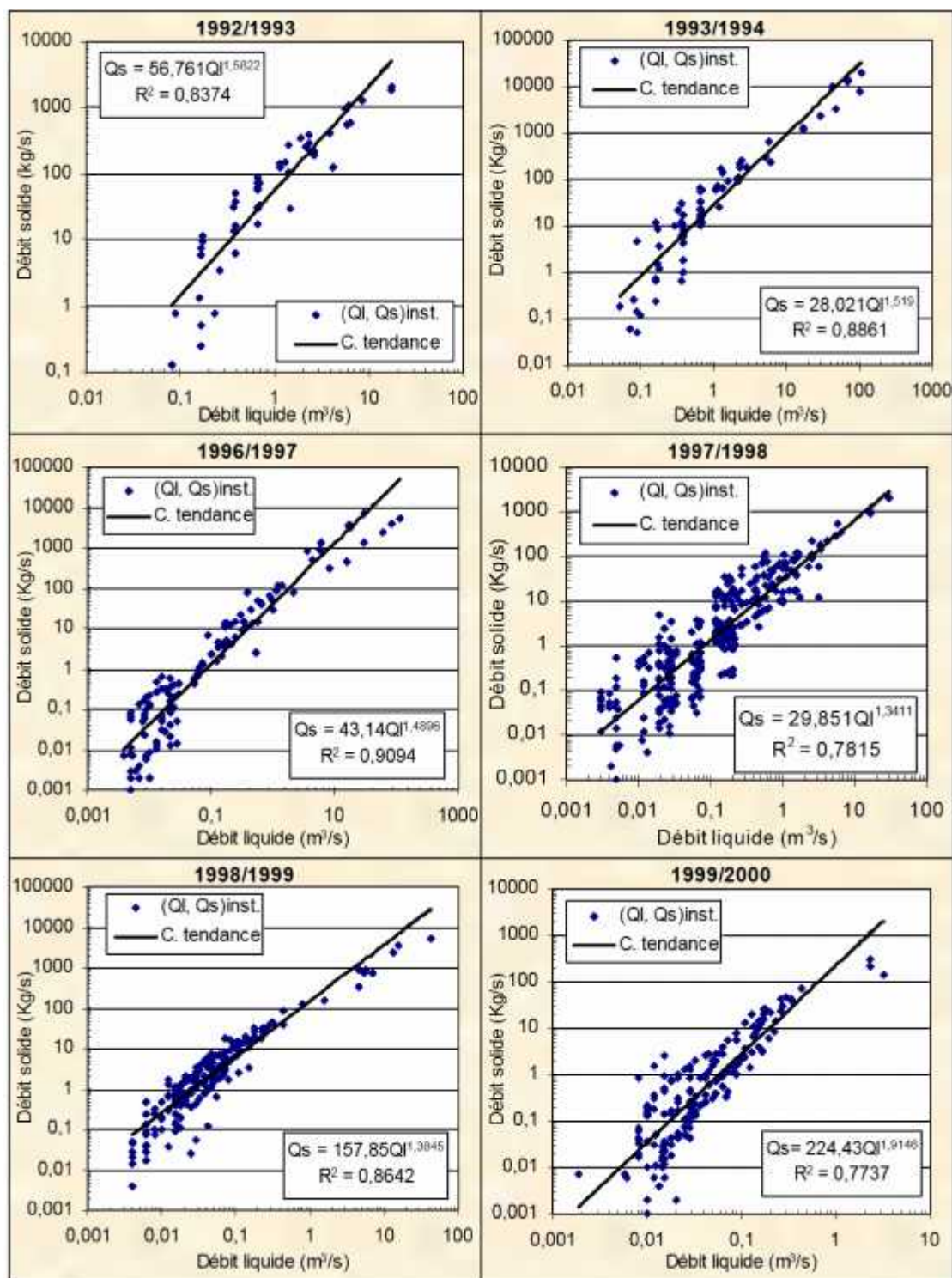
### ANNEXE (4.3)

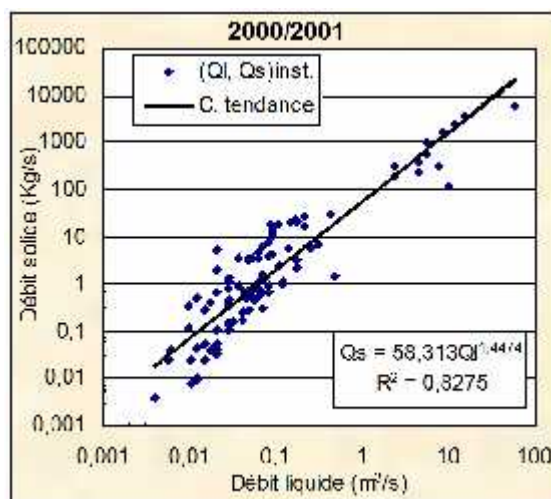
Relations annuelles du débit liquide - débit solide à la station hydrométrique de Sidi  
AEK Djilali « suite »





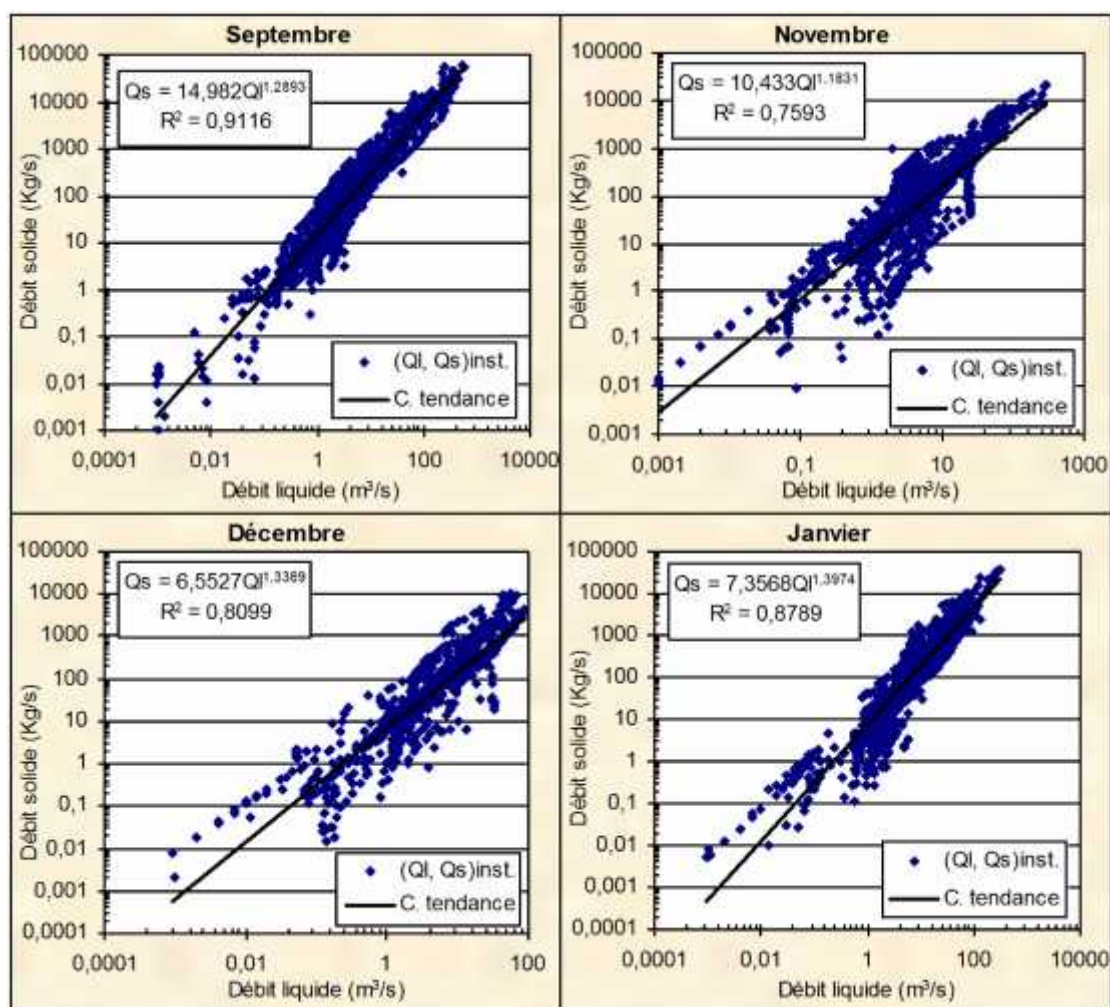




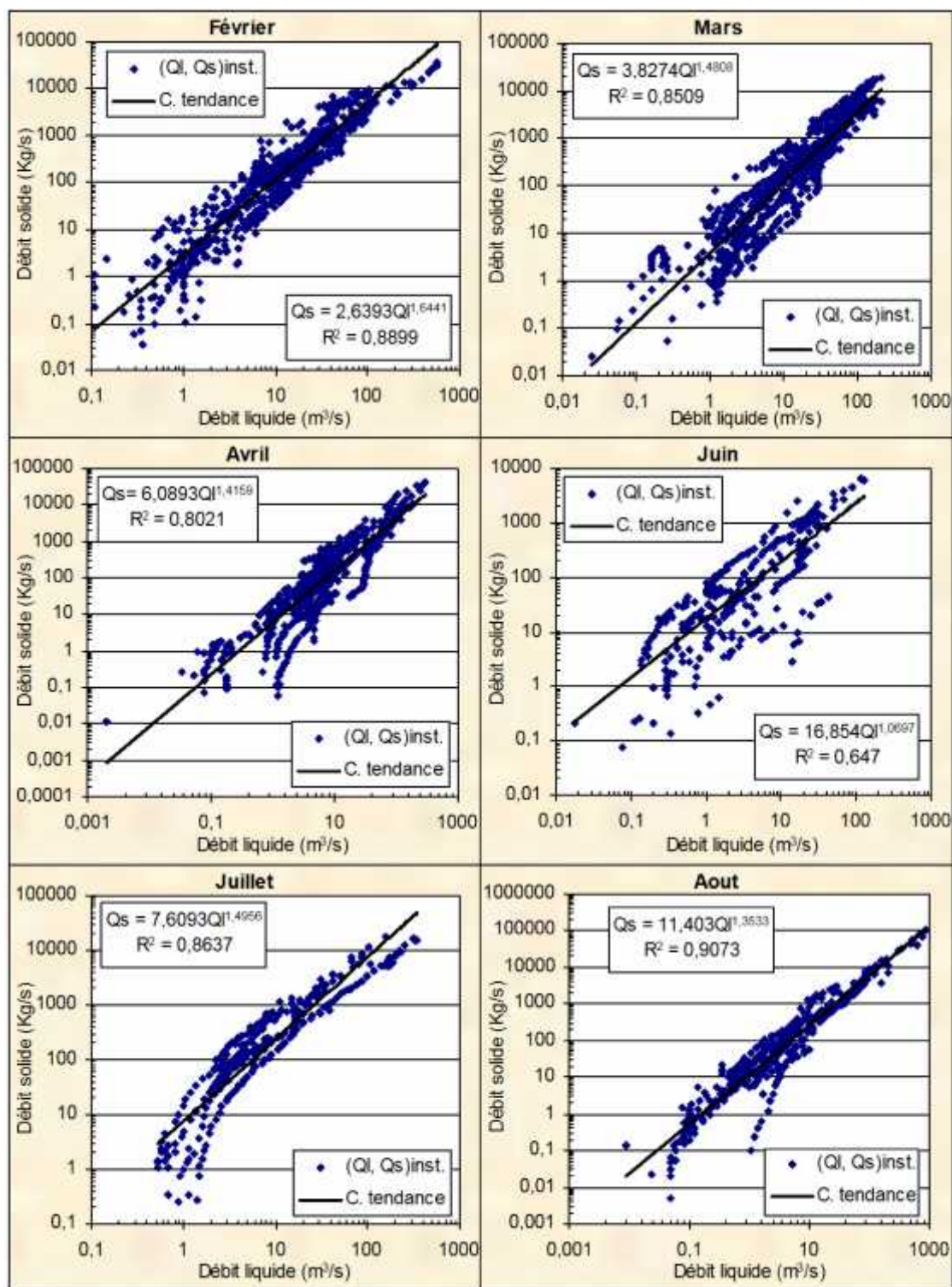


#### ANNEXE (4.4)

Relations intra annuelles du débit liquide - débit solide à la station hydrométrique de  
Oued El-Abtal « suite »

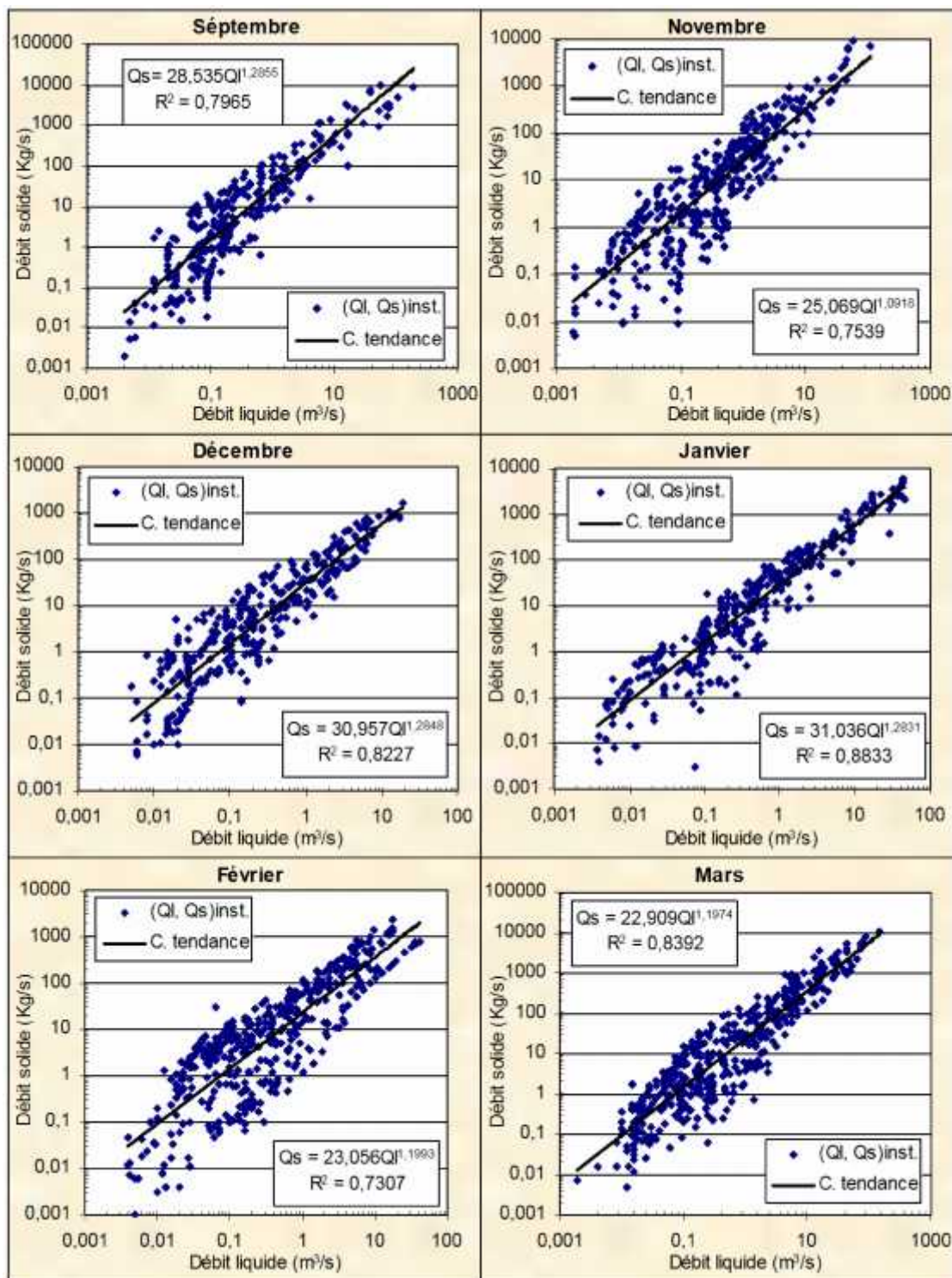


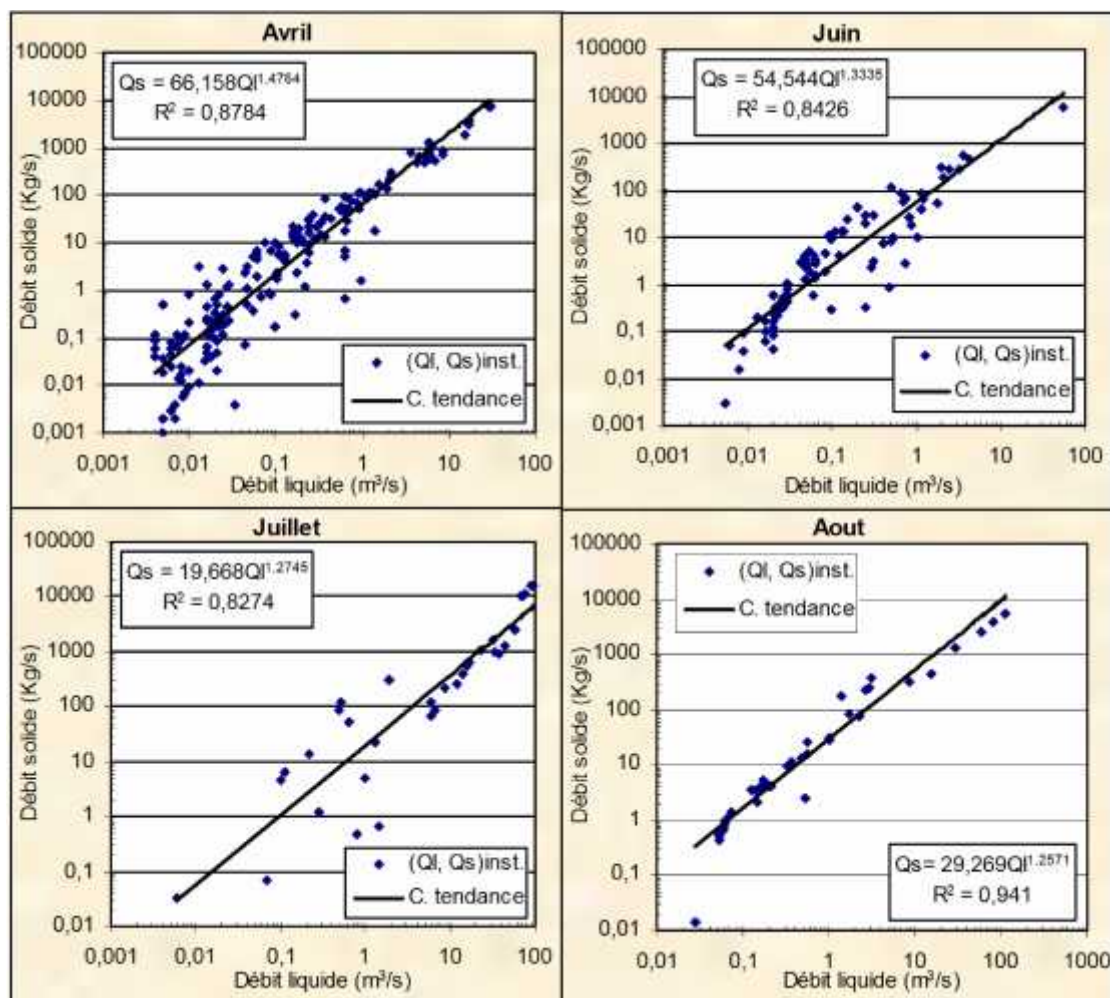




## ANNEXE (4.5)

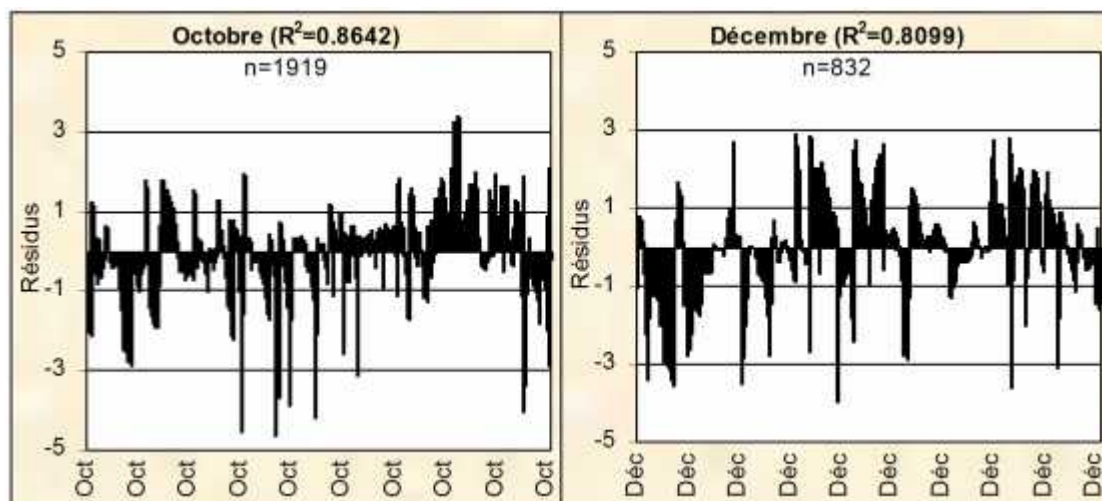
Relations intra annuelles du débit liquide - débit solide à la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali « suite »



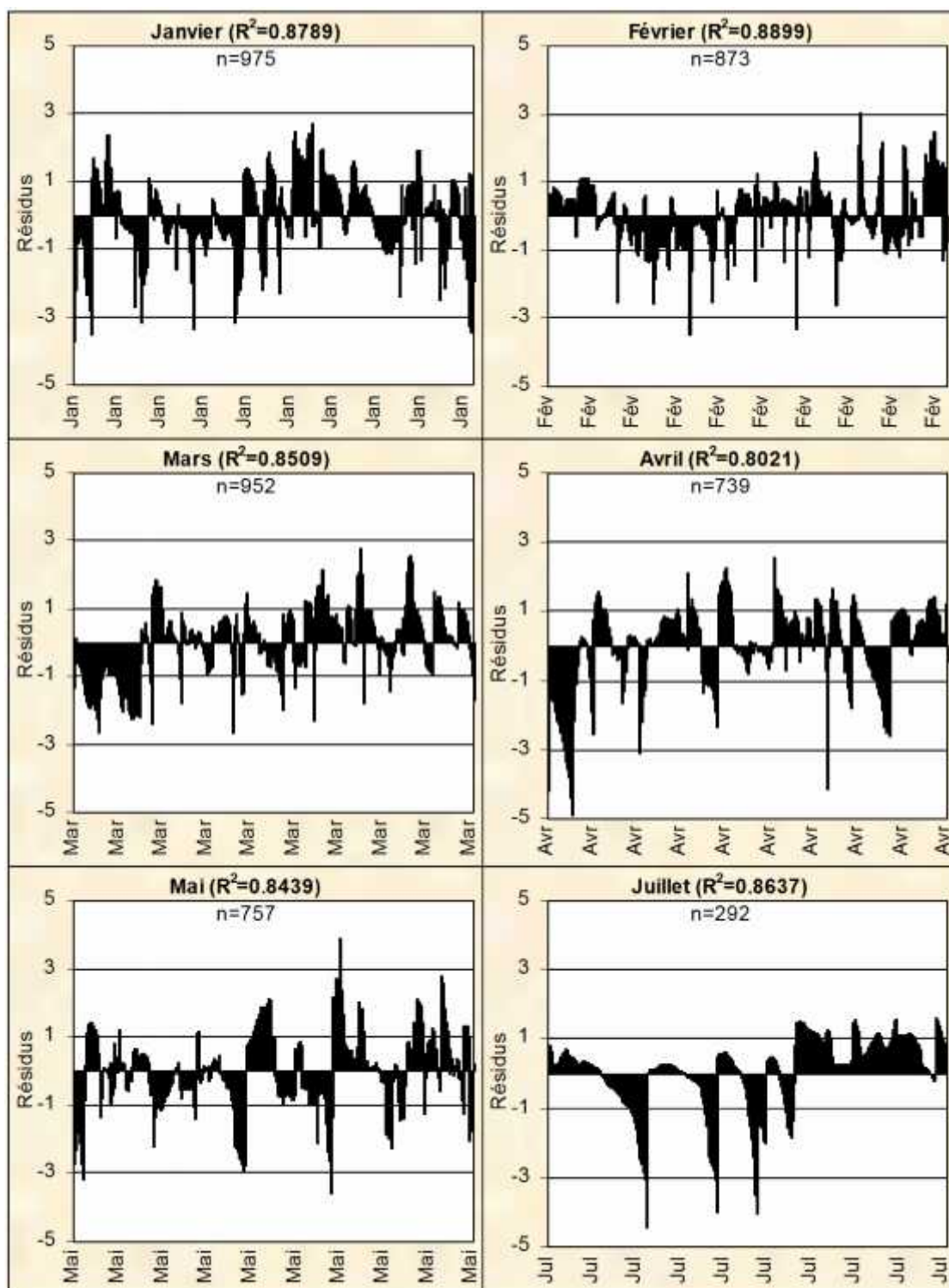


#### ANNEXE (4.6)

Résidus de la régression à l'échelle intra annuelle (Station de Oued El-Abtal),  
1985/1986 à 2000/2001 « suite »



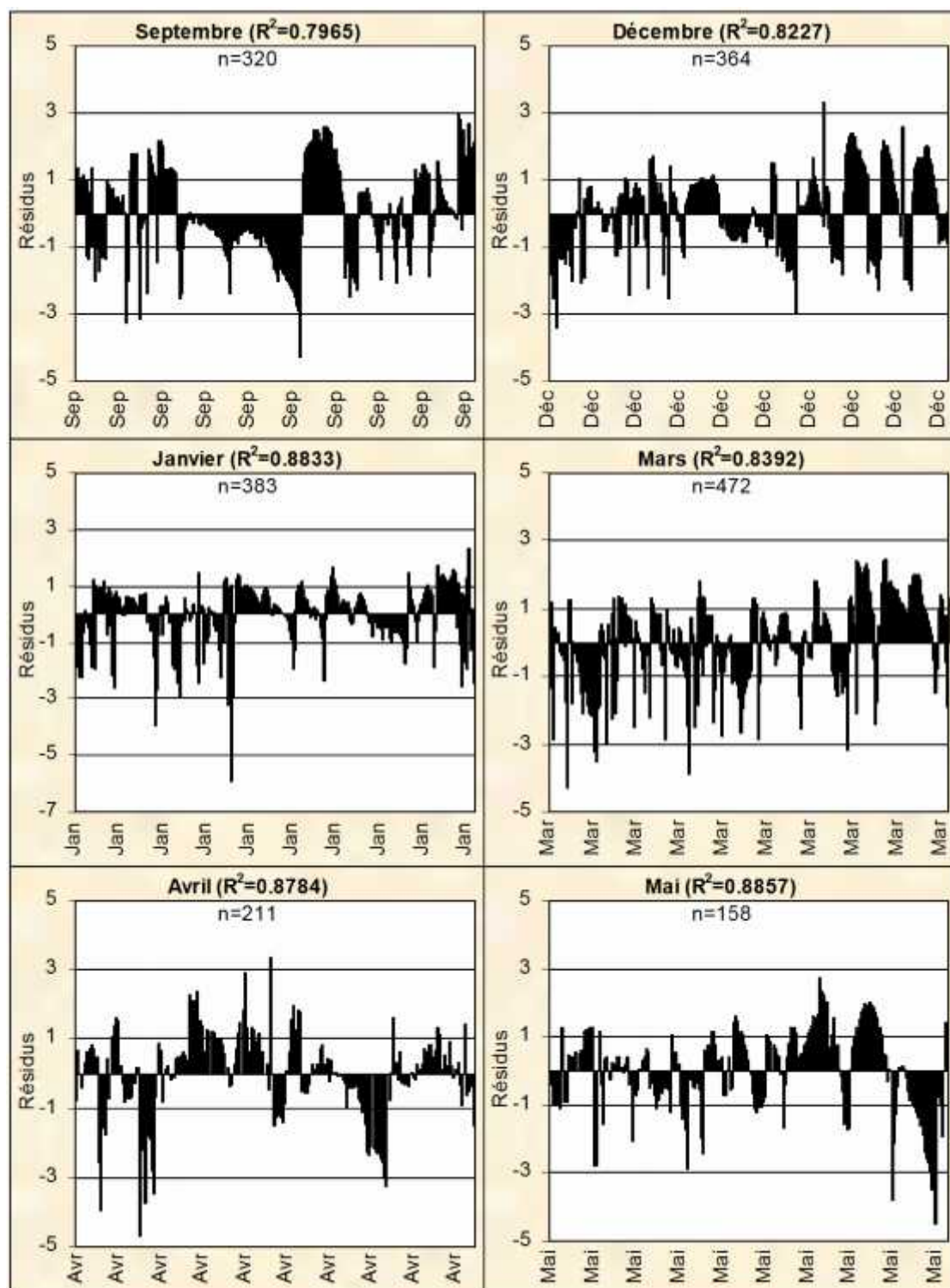


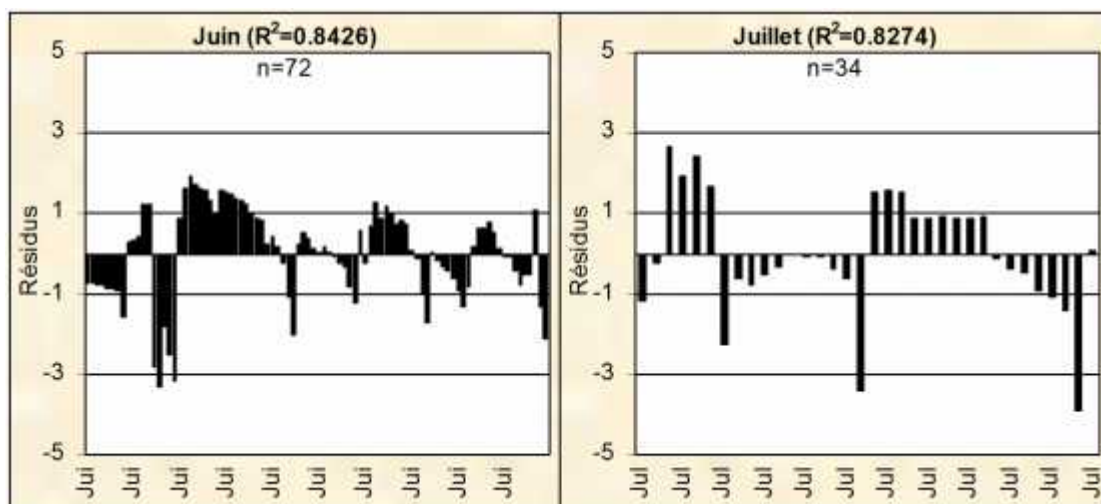




## ANNEXE (4.7)

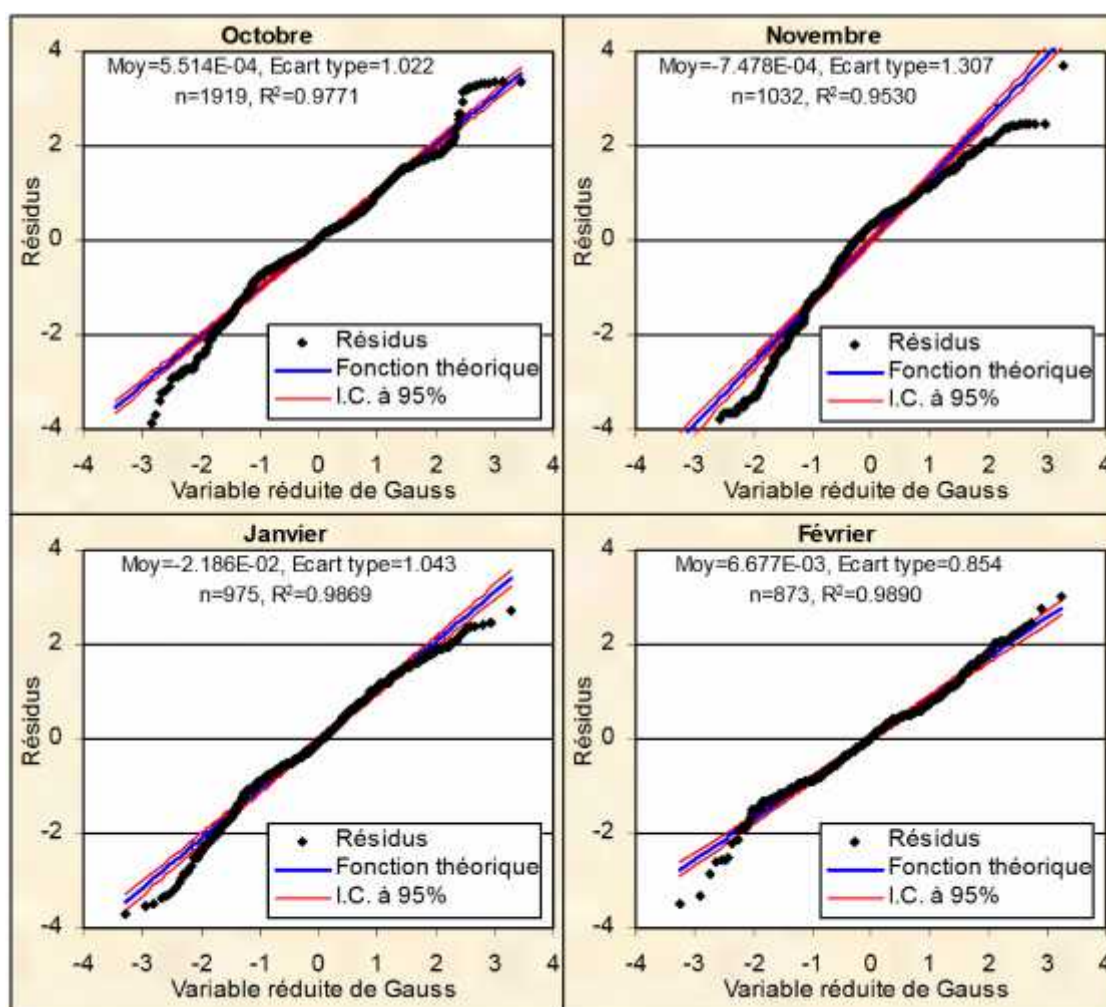
Résidus de la régression à l'échelle intra annuelle (Station de Sidi AEK Djilali),  
1982/1983 à 2000/2001 « suite »

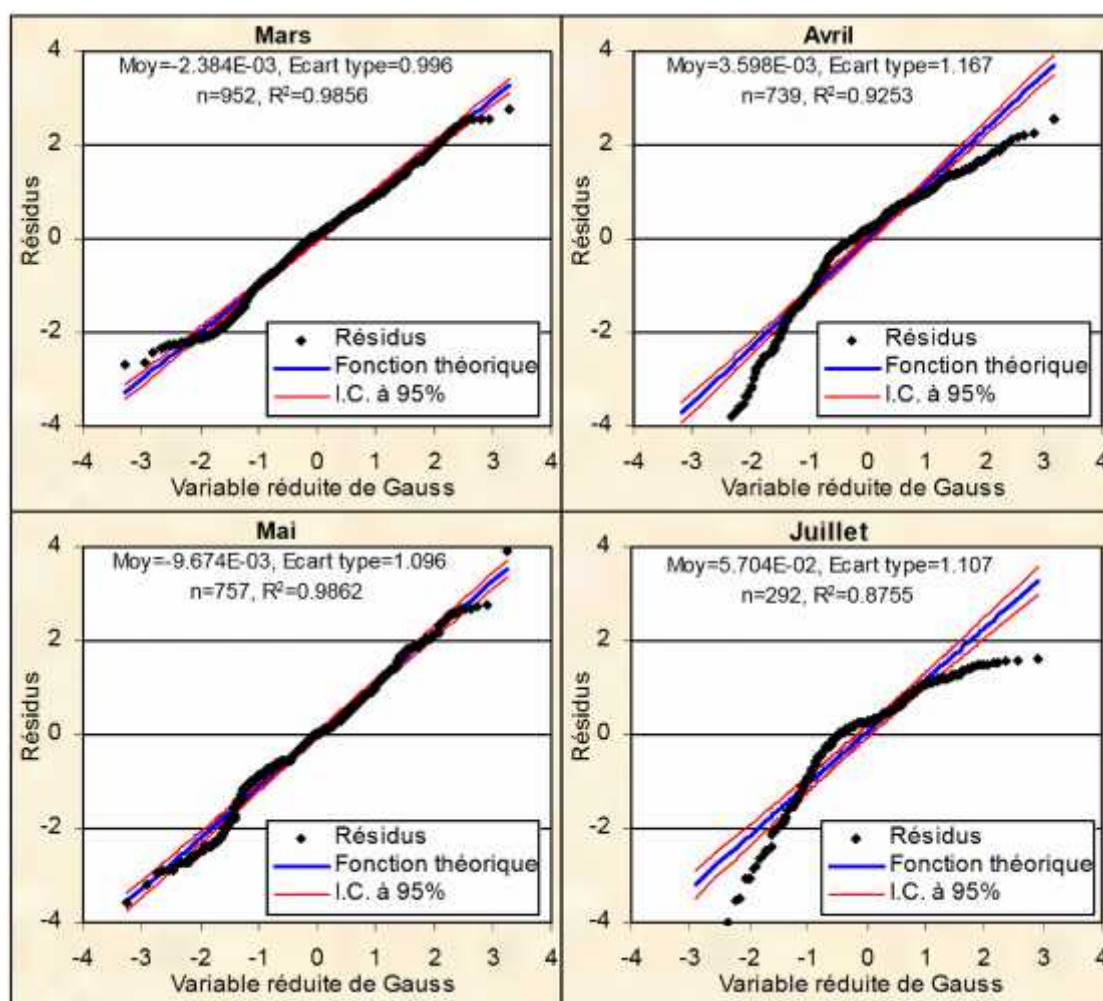




### ANNEXE (4.8)

Ajustement des résidus intra annuelles à la loi Normal (Station de Oued El-Abtal),  
1985/1986 à 2000/2001 « suite »





### ANNEXE (4.9)

Ajustement des résidus intra annuelles à la loi Normal (Station de Sidi AEK Djilali),  
1982/1983 à 2000/2001

