

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1



**FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE, DE LA GEOGRAPHIE ET DE L'AMENAGEMENT
DU TERRITOIRE**

Département d'Aménagement du Territoire

**LABORATOIRE DES SCIENCES DU TERRITOIRE, RESSOURCES NATURELLES ET
ENVIRONNEMENT (LASTERNE)**

THESE DE DOCTORAT DE 3^{ème} CYCLE (LMD)

Spécialité : Hydrologie et gestion des hydrosystèmes

Par :

Ammar DEFFAF

Sous la direction de : Dr. Abdelaziz LOUAMRI

Thème :

**Hydrologie, transport solide en suspension et envasement de barrages
dans le bassin versant de l'oued Isser**

Thèse soutenue publiquement à Constantine le 11/ 07/2022 Devant le jury composé de :

MEBARKI Azeddine	Professeur à l'Université Frères Mentouri Constantine 1	Président
LOUAMRI Abdelaziz	Maître de Conférences (A) à l'Université Frères Mentouri Const.1	Rapporteur
BRAHMIA Khaled	Professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba	Examineur
Bou an ani Abderrazak	Professeur à l'université d'Aboubeker Belkaid Tlemcen	Examineur
BOUGHERARA Ahmed	Maître de Conférences (A) à l'Université Frères Mentouri Const.1	Examineur

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu, le tout puissant pour la volonté, la force et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces longues années d'études et qui m'ont permis terminer ma thèse.

En second lieu, je suis conscient de la reconnaissance que je dois à Monsieur **LOUAMRI Abbelaziz**, mon Directeur de thèse, qui a toujours répondu favorablement pour toute sollicitation. Il m'a réservé des moments précieux de discussion et m'a facilité toutes les conditions pour mener à bien ce travail. Je tiens à lui adresser un grand merci. Je suis extrêmement fier d'avoir travaillé avec lui.

Je tiens également à remercier Monsieur **TERFOUS Abdelali** Professeur à l'université de Strasbourg, France, pour avoir dirigé une partie de mes recherches

Ma vive gratitude va à Monsieur **A. Mebarki**, Professeur à l'Université de Constantine 1, Monsieur **K. BRAHMIA**, Professeur à l'Université de Badji Mokhtar Annaba, Monsieur **A. BOUGHRARA**, Maître de conférences à l'Université de Constantine 1 et Monsieur **A. BOUANANI**, Professeur à l'université d'Aboubeker Belkaid Tlemcen, qui ont bien voulu examiner ce travail.

Ce travail repose en grande partie sur des données pluviométriques et hydrométriques mises gracieusement à notre disposition par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Alger. J'exprime ma gratitude et mes plus sincères remerciements aux ingénieurs et techniciens de l'A.N.R.H.

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

Résumé

L'étude des transports en MES dans le présent travail a été menée sur le bassin versant de l'oued Isser et ses affluents (Algérie Centrale). Elle se base sur des chroniques de débit et de concentration en MES, reconstituées à partir des prélèvements à faible fréquence au niveau de cinq stations hydrométriques. Les objectifs de ce travail sont d'une part de caractériser et d'expliquer la dynamique de MES dans le bassin-versant de l'oued Isser, d'autre part de quantifier les flux sédimentaires, et enfin d'étudier leur effet sur l'envasement des barrages. Deux approches statistiques ont été utilisées, la première est le modèle en puissance reliant le débit solide et la concentration au débit liquide, la seconde est l'analyse des phénomènes d'hystérésis. Les résultats obtenus montrent que le flux en MES augmente d'une façon très nette avec l'accroissement de la superficie de l'amont vers l'aval. La dynamique de MES révèle que les flux sédimentaires subissent une très forte variabilité temporelle, due essentiellement à l'irrégularité du régime annuel d'écoulement, lié fortement à l'influence des précipitations. En effet, l'analyse de l'évolution des exportations solides en suspension montre que l'apport sédimentaire se fait essentiellement au cours des crues violentes et de courte durée. Ces quantités de MES ont des impacts directs sur l'envasement des barrages. Les valeurs de T.S.S oscillent entre $278 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour le bassin de l'oued Isser moyen à la station de La Traille et $795 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour le bassin de l'oued Zaroua à la station de Dechemiya. L'approche par hystérésis montre que la réponse des concentrations en MES aux débits suit quatre modèles d'hystérésis : horaire, antihoraire, rectiligne plus boucle et forme de huit. Ainsi, la disponibilité en particules de sédiments est maximale à la fin de l'été en conditions de basse eaux, son épuisement se produit essentiellement en automne quand les débits augmentent, et la disponibilité est faible en hiver à très faible au printemps.

Mots clés : Algérie, bassin versant de l'Isser, transport solide, débit, concentration, flux en MES, crue, modèle en puissance, Hystérésis, disponibilité des particules, envasement.

Summary

The study of transport in MES in this work was conducted on the watershed of the Isser wadi and its tributaries (Central Algeria). It is based on MES flow and concentration chronicles, reconstructed from low-frequency samples at five hydrometric stations. The objectives of this work are on the one hand to characterize and explain the dynamics of MES in the Isser wadi watershed, on the other hand to quantify sedimentary flows, and finally to study their effect on the siltation of dams. Two statistical approaches were used, the first is the power model linking solid flow and concentration to liquid flow, the second is the analysis of hysteresis phenomena. The results obtained show that the flow of MES increases sharply with the increase in area from upstream to downstream. The dynamics of MES reveal that sedimentary flows undergo a very high temporal variability, mainly due to the irregularity of the annual flow regime, strongly linked to the influence of precipitation. Indeed, analysis of the evolution of suspended solid exports shows that sedimentary input is mainly during violent and short-lived floods. These quantities of MES have direct impacts on the siltation of dams. Sediment yield values range from $278 \text{ t.km}^{-2}.\text{year}^{-1}$ for the wadi basin Moyen at the La Traille station and $795 \text{ t.km}^{-2}.\text{year}^{-1}$ for the Zaroua wadi basin at the Dechemiya station. The hysteresis approach shows that the response of MES concentrations to flow rates follows four models of hysteresis: hourly, antihourly, rectilinear plus loop and form of eight. Thus, the availability of sediment particles is highest in late summer under low water conditions, its depletion occurs mainly in autumn when flows increase, and availability is low in winter to very low in spring.

Keywords: Algeria, Isser watershed, solid transport, flow, concentration, MES flux, flood, power model, Hysteresis, particle availability, siltation.

الملخص

يتناول هذا الموضوع دراسة الحمولة الصلبة النوعية على مستوى الحوض التجميحي لواديسر وروافده (وسط الجزائر)، وتعتمد هذه الدراسة على معطيات التدفق السائل و تركيز الحمولة الصلبة النوعية، من خلال أخذ عينات منخفضة التردد في خمس محطات هيدرومترية. تتمثل أهداف هذا العمل في تشخيص وتحليل حركة الرواسب العالقة لواديسر من جهة، و تقييم احجام التدفق الصلب من جهة اخرى، واخيرا دراسة تأثيرها على توحد السدود. استخدم نهجان إحصائين في هذه الدراسة، الأول هو نموذج الطاقة الذي يربط التدفق الصلب والتركيز بالتدفق السائل، والثاني هو تحليل الظواهر الهستيرية. تبين النتائج المحصل عليها ان تدفق المواد العالقة يتزايد مع زيادة المساحة. كما تكشف ديناميكية المواد الصلبة العالقة أن التدفقات الرسوبية تخضع لتغير زمني جد متباين، يعود أساسا إلى عدم انتظام نظام الجريان المرتبط ارتباطا قويا بتأثير الأمطار. وفي الواقع، يبين تحليل تطور التدفقات الصلبة العالقة أن الحجم الرسوبي يحدث أساسا خلال الفيضانات العنيفة قصيرة الأمد. هذه الكميات تؤثر بشكل مباشر على توحد السدود بتراوح قيم الحمولة الصلبة النوعية بين 278 طن.كم - 2سنة 1 - بالنسبة لحوض وادي زروعة في محطة دشمية. تبين الظواهر الهستيرية أن استجابة تركيز المادة العالقة للتدفقات تتبع أربعة نماذج: في اتجاه عقارب الساعة، عكس عقارب الساعة، مستقيم زائد حلقة و شكل ثمنية. كما بينت هذه الظواهر ان وفرة الرواسب العالقة تكون بشكل كبير في أواخر الصيف في ظل الظروف المائية المنخفضة، وتستنفذ بشكل رئيسي في الخريف عندما تزداد التدفقات، وتكون منخفضة في الشتاء إلى منخفضا جدا في الربيع.

الكلمات المفتاحية: الجزائر، الحوض التجميحي لواديسر، الحمولة الصلبة، التدفق السائل، التركيز، التدفق الصلب، فيضن، نموذج طاقة، الهستيرية، وفرة الرواسب، التوحد

Sommaire

page

Re me rcie ment

Ré su mé

Abstract

المخلص

INTRO DUCT IO N G É N É R A L E..... 1

CHAPITRE 1: SYNTHÈSE SUR L'ÉROSION ET LES TRANSPORTS EN MES

Introduction.....	4
1- Principaux agents de l'érosion hydrique.....	5
1-1-L' action de la pluie.....	5
1-1-1-Détachement des particules sous l' action du splash.....	5
1-1-2-L' érosivité de la pluie.....	6
1-2- Le ruissellement.....	7
a- Infiltration.....	8
b- Détention superficielle et rugosité du sol.....	8
c- Pente et bngueur de pente.....	8
d- Couvert végétal.....	8
1-3- Etat du sol.....	9
1-3-1- La croûte de battance.....	9
1-3-2- L' humidité du sol.....	10
2- Formes d'érosion hydrique.....	10
2-1- Erosion en nappe.....	10
2-2- Erosion linéaire.....	10
a- Erosion en griffes et rigoles.....	10
b- Erosion en ravine.....	11
2-3- Érosion des berges.....	11
3- Quantification de l'érosion.....	12
3-1 Formule de Wischmeier et Smith (1978).....	13
3-2 Formule de Fournier (1960).....	13
4-Transport solide.....	14
4-1-Les différents modes du transport solide.....	15
4-1-1-Le charriage.....	15
4-1-2-La suspension.....	16
4-2-Distribution des concentrations en MES dans la colonne d'eau.....	16
4-3-Rapport suspension-charriage en rivière.....	17
4-4-Origine des sédiments en suspension dansle bassin versant.....	18
Conclusion.....	19

CHAPITRE 2 : TECHNIQUE DE MESURE ET ETAT DE L'ART

Introduction.....	20
1-Mesure du transport solide en Algérie.....	21
1-1-Critique de la méthode de mesure.....	21
1-2- L'exploitation des mesures bathymétriques.....	22
2-Calcul du débit solide en suspension.....	23
3- Courbes de transport solide : relation concentration en MES et le débit	23
3-1-La correction du modèle en puissance.....	24
4-Phénomène d'hystérésis.....	27
5-Quelques données sur le transport solide.....	30
5-1- En Algérie.....	30
5-2-Au Maghreb.....	32
5-3-Dans le monde.....	32
6-Impact du facteur anthropique sur l'érosion et le transport solide.....	36
7-Les travaux effectués sur le transport solide en Algérie.....	38
7-1-Tixeront (1960).....	38
7-2-SOGREAH (1969).....	38
7-3 Formule I.N.R.H. (1982).....	38
7-4-Demmak (1982).....	39
7-5-Meddi (1992).....	39
7-6-Terfous et al (2001).....	40
7-7-Benkhaled et Remini (2003).....	40
7-8-Megnounif A, Terfous A, et Bouanani A. (2003).....	40
7-9-Megnounif A., Terfous A. Ghenaim A. et Poulet J.P. (2004).....	40
7-10-Achite M., et Meddi M. (2004).....	41
7-11-Achite M., et Meddi M. (2005).....	41
7-12-Bouanani (2004).....	41
7-13-Khanchoul, (2006).....	42
7-14-Larfi B, et Remini B. (2006).....	42
7-15-Ghenim A, Seddini A et Terfous A (2008).....	42
7-16-Remini et al (2009).....	42
7-17-Touaibia et al (2009).....	43
7-18-Cherif E, Errih M, et Madani Cherif H. (2009).....	43
7-19-Touaibia I, et Ghenim A. (2011).....	43
7-20-Bouanani et al (2013).....	44
7-21-El Mahi, A, Meddi, M, et Bravard, J.-P, (2012).....	44
7-22-Louamri, (2013).....	44
7-23-Hallouz F, Meddi M et Mahé G (2013).....	44
7-24-Ghernaout, (2014).....	45
7-25-Elahcene, et al, (2013).....	45

7-26-Megnounif, Terfous et Ouillon, (2013).....	45
7-27-Yles et Bouanani (2016).....	46
7-28- Hayet Madani Cherif, Khanchoul, Bouanani et Terfous (2017).....	46
7-29- Sid Ahmed Bougurra, Abderrazak Bouanani et Kamila Baba-hamed (2016).....	46
7-30-Remini (2017).....	47
Conclusion.....	47

CHAPITRE 3 : PRESENTATION DU BASSIN

Introduction.....	48
1-Situation géographique.....	49
2-Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'oued Isser.....	52
2-1-Altitudes et pentes.....	52
2-2-Le réseau hydrographique.....	55
3-Géologie du bassin.....	56
4-Lithogie du bassin.....	58
5-Végétation du bassin.....	61
Conclusion.....	63

CHAPITRE 4 : PRESENTATION DES DONNEES DE MESURES DEBIT- CONCENTRATION EN MES

Introduction.....	64
1-Données hydrologiques et de concentrations en MES.....	65
1-1-Chronologie de concentration en MES et de débit.....	65
1-2-Contrôle et critique des données de concentrations en MES.....	71
1-3-Ordres de grandeur des variables mesurées.....	73
2-Les données hydrométriques.....	76
Conclusion.....	76

CHAPITRE 5 : ETUDE DES PRÉCIPITATIONS

Introduction.....	77
1-Postes pluviométriques et choix de la période d'étude.....	78
1-1-Les stations de base.....	80
1-2-Ajustement des séries pluviométriques à une loi racine normale.....	80
1-3-Homogénéisation des données pluviométriques des stations de base.....	82
1-4-Analyse des résultats de l'A.C.P.....	87
1-5-Critique des données par la méthode des cumuls des résidus de régression.....	92
1-5-1-Détection des anomalies accidentelles.....	94
1-5-2-Détection des anomalies systématiques.....	95

2-Homogénéisation d'ensemble.....	96
2-1-Régression doubles avec les vecteurs régionaux.....	96
3-Variabilité des pluies annuelles.....	99
3-1-Etude fréquentielles des pluies annuelles.....	101
3-1-1-Le modèle gauss- arithmétique appliqué aux pluies annuelles.....	101
3-1-2-Les résultats obtenus.....	102
4- Cartographie automatique des pluies moyennes annuelles.....	104
4-1 Régression multiple.....	104
5-Pluies mensuelles.....	110
6-Pluies extrêmes (Pjmax annuelles).....	112
Conclusion.....	114

CHAPITRE 6: HYDROLOGIE DU BASSIN

Introduction.....	116
1-Les bassins jaugés retenus dans l'étude.....	117
1-1-Les séries de débits disponibles.....	118
1-2-Choix de la période commune.....	119
1-3-Etalonnage des données des stations.....	120
1-4-Comblement des lacunes de débits mensuels.....	124
1-4-1-Ajustement à la loi Log-Normale (Loi de Galton).....	124
1-4-1-1-Loi de Galton (log-normale ou de Gibrat-Gauss).....	124
1-4-2- Comblement des lacunes de débits mensuels (régression à deux variables).....	127
2-Débits moyens annuels.....	128
2-1-La variabilité interannuelle des débits moyens annuels.....	128
2-2-Analyse amont- aval des débits moyens annuels (période commune 1973-1985).....	130
2-3-Corrélation débit absolu- surface des bassins jaugés.....	132
2-4-Le profil hydrologique de l'Isser.....	132
2-5-Analyse statistique des débits annuels observés.....	133
2-6-Variations des débits annuels moyens spécifiques (période commune 1973-1985).....	134
2-6-1- Comparaison des débits spécifiques avec d'autres bassins algériens.....	136
3-Bilans hydrologiques annuels des bassins jaugés.....	136
3-1-Ecoulement et coefficient d'écoulement.....	137
3-2-Déficit d'écoulement.....	139
3-3-Corrélation écoulement moyen annuel – pluie moyenne annuelle.....	139
3-4-Corrélation déficit d'écoulement-pluie.....	142
4-Les écoulements mensuels et les régimes saisonniers.....	142
5-Variations journalières des débits.....	146
6-Etude des débits extrêmes (Les crues).....	148
6-1-Les débits maximaux moyens journaliers et instantanés.....	149
6-2-Les crues de saison froide.....	154

6-3-Les crues de la saison chaude	155
6-4-Puissance des crues.....	156
6-4-1-Rapport débit de pointe / débit moyen journalier maximal.....	157
6-5-Etude fréquentielle des crues maximales annuelles.....	157
7- Les barrages dans le bassin de l'oued Isser	161
7-1-Barrage de Beni Amrane.....	161
7-2-Barrage de Koudiate Acerdoune.....	162
7-3-Barrage Ladrat	164
7-4-Barrage de Beni Slimane.....	164
Conclusion.....	166

CHAPITRE 7 : MODELISATION DES TRANSPORTS EN MES

Introduction.....	167
1-Modélisation à partir de la relation débit-Concentration en MES.....	168
1-1-Relation débit liquide-concentration en MES aux stations hydrométriques.....	168
2-Relation débit liquide-débit solide aux stations hydrométriques.....	173
2-1-Relation débit liquide-débit solide à l'échelle de la totalité des données.....	173
2-2-Relation débit liquide-débit solide à l'échelle saisonnière.....	175
2-3-Relation débit liquide-débit solide à l'échelle mensuelle.....	179
2-4-Relation débit liquide-débit solide à l'échelle annuelle.....	182
3-Erreur en pourcentage (E%).....	185
4-Facteurs de correction.....	188
4-1-Nécessité des facteurs de correction.....	188
4-2-Application des facteurs de correction.....	192
5-Analyse des paramètres a et b des courbes de transport solide.....	195
5-1-Signification des paramètres a et b.....	195
5-2-Variabilité temporelle des paramètres a et b.....	195
5-3-Variabilité spatiale des paramètres a et b.....	198
5-4-Relation entre les paramètres a et b - surface des bassins versant.....	199
Conclusion.....	202

CHAPITRE 8: QUANTIFICATION DES TRANSPORTS EN MES ET ENVASEMENT DES BARRAGES

Introduction.....	204
1- Variabilité temporelle des apports liquides et solides.....	205
1-1- Variabilité interannuelle des apports liquides et solides.....	205
1-1-1-Sous bassin d'oued Isser maritime : station de Lakhdaria.....	206
1-1-2-Sous bassin d'oued Isser moyen : station de La Traïlle.....	207
1-1-3-Sous bassin d'oued Mellah Ouest : station de Beni Slimane.....	208

1-1-4-Sous bassin Mellah Ouest Kherza : station de Mezahime.....	208
1-1-5-Sous bassin d'oued Zeroua : station de Dechemiya.....	209
1-2- Variabilité mensuelle des apports liquides et solide.....	210
1-2-1-Sous bassin d'oued Isser maritime : station de Lakhdaria.....	211
1-2-2-Sous bassin d'oued Isser moyen : station de La Traïlle.....	211
1-2-3-Sous bassin d'oued Mellah Ouest : station de Beni Slimane.....	212
1-2-4-Sous bassin Mellah Ouest Kherza : station de Mezahime.....	213
1-2-5-Sous bassin d'oued Zeroua : station de Dechemiya.....	213
1-3- Variabilité saisonnière des apports liquides et solides.....	214
2- Variabilité spatiale des apports solides en suspension.....	218
3- Variabilité spatiale de la dégradation spécifique.....	220
4- Contribution des crues à la production des flux en matière en suspension.....	221
5-Conséquence du transport solide sur l'envasement des barrages.....	233
5-1- Le barrage de Beni Amrane : historique, dévasement et surélévation	233
5-1-1-Estimation de l'envasement du barrage de Beni Amrane à partir des transports solides	234
5-1-2-Comparaison entre l'envasement mesuré et l'envasement estimé.....	235
5-1-3-Estimation de la perte de capacité du barrage.....	235
5-1-4-Comparaison avec les retenues des barrages du Maghreb.....	236
5-2- Barrage de Koudiat Acerdoune et barrage Ladrat	237
Conclusion.....	239

CHAPITRE 9 : PHÉNOMÈNES D'HYSTÉRÉSIS

Introduction.....	240
1-Représentativité des données de mesure.....	241
2-Méthodologie.....	242
3-Identification des classes d'hystérésis.....	243
3-1-Classe I.....	243
3-2-Classe II : boucle horaire (Clockwise loop).....	243
3-3-Classe III : boucle antihoraire (Counterclockwise loop).....	243
3-4-Classe IV modèle rectiligne plus boucle : (Single line plus one loop).....	244
3-5-Classe V Le modèle en forme de huit.....	244
4-Application aux sous-bassins de l'oued Isser.....	246
5-Analyse des différentes classes d'hystérésis.....	250
5-1-Modèle horaire.....	250
5-2-Modèle Antihoraire.....	251
5-3-Modèle rectiligne plus boucle.....	252
5-4-Modèle en forme de huit.....	252
6-Saisonnalité des crues.....	258
7-Rendement des crues.....	259

Conclusion.....	263
Conclusion générale.....	264

Introduction générale

Le stress hydrique peut avoir des conséquences considérables sur les différentes activités humaines et environnementales. L'Organisation des Nations unies (ONU), dans son rapport annuel en 2015 sur l'or bleu, prévoit que le monde devra faire face à un déficit hydrique global de 40 % dès 2030. Les pays du Maghreb, dont l'Algérie fait partie, subissent un déficit hydrique assez important, atteignant en Algérie 1 milliard de m³ d'ici l'an 2025 (Remini, 2010). Face à cette pénurie de l'eau, l'Algérie a réalisé un effort considérable en infrastructures hydrauliques pour améliorer la disponibilité en eau des villes, l'irrigation des plaines et l'alimentation en eau des industries. Malheureusement, la sédimentation et l'envasement des retenues de barrages entraînent des pertes de capacité de stockage parfois importantes, causé par l'érosion hydrique touchant aussi bien les versants que le réseau hydrographique, du fait de la faiblesse du couvert végétal et de l'intensité des pluies qui provoquent une dégradation excessive des sols.

Les flux de sédiments dans les cours d'eau sont les résultats de différents processus d'érosion et de transport de particules sur le bassin versant. Il est donc primordial de comprendre la dynamique des matières en suspension et d'établir des bilans fiables des flux de MES transportés par les cours d'eau si on veut déterminer une bonne gestion du système fluvial et des ouvrages hydrauliques (barrages).

Des études récentes sur l'érosion et les transports solides dans les bassins maghrébins ont été réalisées. Les dégradations du sol touchent 40% des terres au Maroc (FAO, 1990), 45% de la superficie en Tunisie (Chevalier et al, 1995 ; Boussema, 1996), et 45% des zones telliennes en Algérie (Chebbani et al, 1999), soit 12 millions d'hectares. En Algérie, le taux d'érosion spécifique atteint la valeur de 5000 t.km⁻².an⁻¹ sur le bassin versant de l'oued Agrioune (Demmak, 1982). Cet auteur a estimé à environ 120 millions de tonnes les sédiments arrachés annuellement au niveau des bassins versants du nord algérien. Il faut en effet s'attendre à observer des flux en MES importants, dus à des concentrations qui peuvent dépasser la centaine de g.l⁻¹ à certains endroits pendant les crues torrentielles. Les teneurs maximales des concentrations peuvent atteindre les 500 g.l⁻¹ comme c'est le cas pour l'oued Wahran (Benkhaled et Remini, 2003). Ces valeurs reflètent l'ampleur du phénomène de transports solides et leur effet sur la dégradation du milieu et sur la réduction de la capacité des réservoirs.

L'envasement des barrages est l'une des conséquences les plus graves de l'érosion des sols et des transports solides des cours d'eau. Il constitue en Algérie une contrainte majeure qui affecte les capacités de stockage des ressources en eau superficielles. Les levés bathymétriques effectués par l'ANBT entre 2004 et 2006 sur 59 barrages en exploitation, ont permis d'estimer le volume perdu par envasement à 898 hm³ pour une capacité initiale cumulée de 6,704 Milliards de m³, soit une perte de capacité de 13,4 %. Le taux d'envasement est de 45 million de m³ par an, avec de fortes disparités d'un site à l'autre. Selon Remini (2017), l'envasement cumulé atteindrait 1.7 milliards de m³ dans les 74 barrages pour une capacité de stockage de 8.5 milliards de m³ d'eau, soit une perte de capacité de 20%. Le taux d'envasement serait de 65 million de m³ par an.

Face à cette problématique, les chercheurs se trouvent confrontés à un manque de données d'observation. On dispose malheureusement rarement de longues chroniques de mesures fiables de concentration en MES dans les cours d'eau. De plus, ces chroniques sont souvent issues de suivis discrets avec des pas de temps parfois mal adaptés à la nature des phénomènes du transport solide (Coynel, 2004). Il est alors difficile d'établir des bilans fiables des flux de MES à l'entrée et à la sortie des retenues et d'établir l'impact des règles de leur gestion à long terme (Mano, 2008).

Le bassin versant de l'oued Isser a été choisi étant donné son importance vis-à-vis des ouvrages hydrauliques qui alimentent la capitale en eau potable, l'irrigation de la plaine de la Mitidja et l'importance de l'érosion dans cette région. Actuellement, le bassin de l'Isser comporte quatre barrages fonctionnels dont le barrage réservoir de Koudiat Acerdoune, deuxième ouvrage hydraulique en Algérie, d'une capacité de stockage de 640 hm³, les barrages de Beni Amrane, Ladrat et de Beni Slimane.

Dans la présente étude, l'étude des transports solide en suspension constitue le fond de la thèse, et est articulée autour plusieurs aspects. Les objectifs du travail sont d'une part de caractériser la dynamique des MES pour un système exoréique de l'Algérie du Nord (bassin versant de l'oued Isser), de quantifier et d'analyser les flux en MES et leurs variations spatio-temporelle. D'autre part, On examine l'évolution de l'envasement des retenues de barrages.

Cette thèse est organisée en neuf chapitres comme suit :

Le premier chapitre est une synthèse sur l'érosion des sols et les transports solides en suspension. Il présente les différents processus mis en jeu sur le bassin versant et sur les cours d'eau.

Le deuxième chapitre est consacré à la technique de mesure et d'estimation des flux de matières en suspension dans les cours d'eau. Il comporte également un état de l'art sur les études des transports en MES en Algérie.

Le troisième chapitre décrit le contexte physico-géographique du bassin. Il présente les principaux facteurs qui influent sur la dynamique des matières en suspension et sur les transports solides des oueds.

Le quatrième chapitre présente les données hydrosédimentaires utilisées dans le cadre de cette thèse. Il examine plus en détail la notion de la fréquence d'échantillonnage.

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude statistique des 23 postes pluviométriques à l'échelle annuelle au niveau du bassin de l'oued Isser sur la période 1970-2009.

Le sixième chapitre est dédié à l'étude des écoulements liquides des bassins jaugés et de leur variabilité spatio-temporelle aux différents pas de temps. Il permettra d'évaluer les bilans hydrologiques annuels.

Le septième chapitre détaille le modèle en puissance utilisé dans l'étude des transports solides en suspension des cinq sous bassins de l'oued Isser. Nous tentons d'établir des régressions reliant la concentration en MES et le débit solide au débit liquide aux différentes échelles de temps. Une analyse qualitative du paramètre a et de l'exposant b permettra de relier ces derniers aux facteurs qui contrôlent le flux en MES.

Le huitième chapitre s'attache à la quantification des bilans des flux en MES, pour en déduire un taux d'érosion à l'échelle des sous bassins. Dans une seconde étape, nous analysons la contribution des événements de crues aux transports en MES. Le résultat des apports solides permet par la suite de quantifier l'envasement des barrages.

Le neuvième et dernier chapitre est destiné à une identification détaillée des boucles d'hystérésis montrées par les relations débit-concentration en MES lors des crues. Nous essayons de caractériser et de classer ces différentes relations pour une meilleure compréhension du phénomène d'hystérésis. Cette méthode permet de comprendre d'une manière approfondie la dynamique temporelle des matières en suspension à l'échelle de la crue.

Enfin, nous terminons cette thèse par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1 :
Synthèse sur l'érosion et les transports en MES

Introduction

Ce chapitre est dédié à un travail bibliographique sur l'érosion des sols et sur les transports solide en suspension. Nous essayons de préciser les mécanismes et les processus physiques mis en jeu sur l'ensemble du bassin versant, de la production des sédiments à leur transport dans le cours d'eau.

Nous nous intéressons particulièrement à l'érosion hydrique, qui est un phénomène largement répandu et dont les conséquences peuvent entraîner des pertes de terre irréversibles et une diminution des capacités de stockage des barrages.

Roose, (1994) définit l'érosion comme un processus qui concerne l'arrachement, le transport et la sédimentation des particules par l'eau, le vent ou la gravité. C'est un phénomène complexe par son caractère irrégulier, aléatoire et par sa discontinuité spatio-temporelle, difficile à décrire sous forme d'équations mathématique.

1- Principaux agents de l'érosion hydrique

Deux agents principaux sont généralement décrits comme moteurs de l'érosion des sols : la pluie et le ruissellement superficiel (fig1). Néanmoins, d'autres facteurs liés au climat, à la topographie du site, au couvert végétal et l'état hydrique initial du sol, sont à prendre en considération dans la description du phénomène.

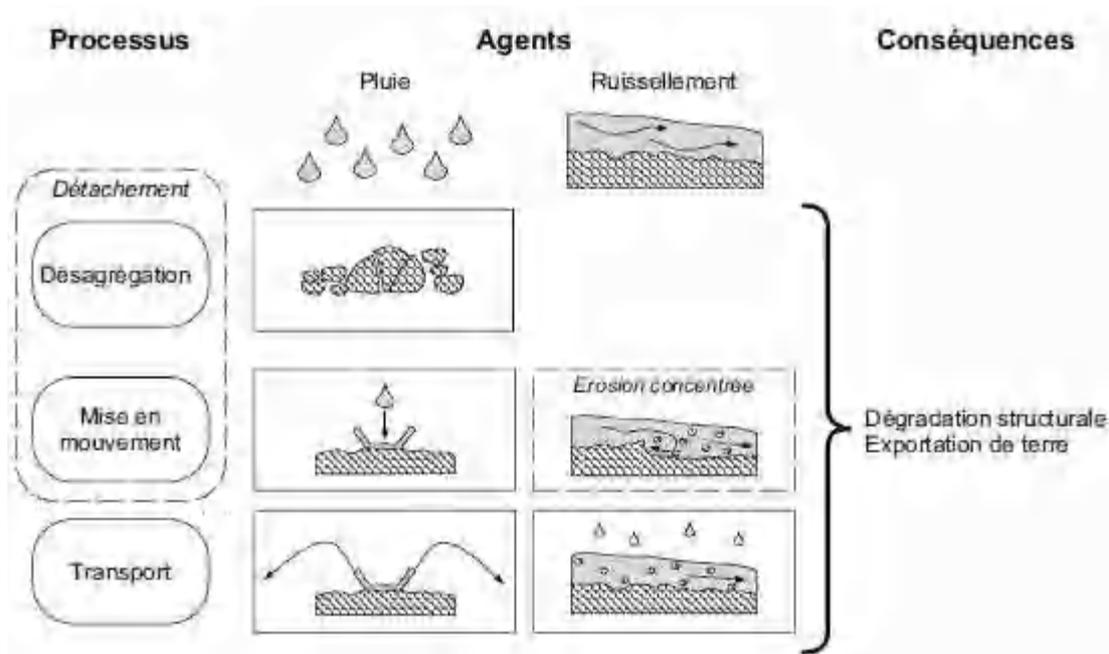


Figure 1 : Processus élémentaire de la désagrégation et de la mise en mouvement des fragments de terre. D'après Leguédois (2003).

1-1-L'action de la pluie

1-1-1-Détachement des particules sous l'action du splash

Le splash est directement lié à l'impact d'une goutte de pluie sur le sol. Après déformation de la goutte d'eau, des gouttelettes d'eau sont éjectées de la surface, puis transportées radialement autour du point d'impact (fig 2). Ce détachement est induit par l'énergie cinétique produite par l'impact de la pluie à la surface du sol et générant des forces de cisaillement localement importantes Hudson, (1975) ; Loch et Silburn, (1996).



Figure 2 : Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau ou effet splash (d'après Leguedois 2003). Photos : Pierre-Olivier Cochard.

1-1-2-L'érosivité de la pluie

La structure du sol est altérée par désagrégation de sa surface et projection de particules sous l'impact des gouttes de pluie. Le potentiel érosif de la pluie est désigné par le terme d'érosivité. L'intensité et les caractéristiques des gouttes, comme leur taille et leur vitesse, sont souvent décrites comme les paramètres principaux influençant l'érosivité (Erpul et al. 2002; Kinnell 2005). Le potentiel érosif d'une goutte d'eau de masse m tombant à la vitesse v est en effet directement lié à son énergie cinétique E_c .

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad \text{Où}$$

E_c : l'énergie cinétique en (Joules) ;

m : la masse de la goutte en (kg) ;

v : la vitesse en (m/s).

Le diamètre médian des gouttes est fonction de l'intensité pluviale I par unité de temps qui s'accroît vite au début d'un événement pluvieux, puis de plus en plus lentement du fait des rencontres et de l'éclatement des gouttes de pluie lorsqu'elles sont trop proches. Ce phénomène expliquerait la relation empirique déterminée par Wischmeier et Smith (1978) où l'énergie cinétique (E_c) est de la forme :

$$E_c = R (11.9 + 8.7 \log_{10} I)$$

Avec I , l'intensité instantanée (mm.h^{-1}) et R , les précipitations annuelles (mm).

Dans cette loi, aucun paramètre ne rend compte des facteurs sol ou couverture végétale.

1-2- Le ruissellement

L'écoulement d'une lame d'eau et les contraintes associées sont les moteurs principaux de l'érosion. Les écoulements de surface apparaissent sur un versant lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol. Le ruissellement peut entraîner les particules libres à la surface du sol, mais il est également en mesure de rompre des agrégats de sol et de les transporter.

Le détachement et le transport des sédiments par le ruissellement sont essentiellement contrôlés par la pente, la vitesse et la hauteur de l'écoulement Gimenez et Govers (2002).

Le ruissellement ne débute qu'après un cumul pluviométrique journalier de 18 à 20 mm Laouina, (1998) sur sol sec même si les pluies sont intenses ou après un cumul de 4 mm sur sol humide et compact Chibbani et al, (1997).

Ces seuils de hauteur dépendent en partie des caractéristiques des pluies (intensité, mais aussi du volume de pluie tombant après saturation du sol) et surtout de l'état de surface du sol, plus le sol est dégradé plus le ruissellement est rapide.

Selon Laouina et al, (1993), les pluies continues mais de faibles intensités permettent une certaine infiltration de l'eau et réduisent le ruissellement sur les versants, par contre les épisodes de fortes intensités entraînent un ruissellement plus important. Mais ce sont les épisodes pluvieux durables avec des événements de forte intensité et répétitifs qui occasionnent la dégradation la plus forte, avec en particulier le passage du ruissellement en nappe au ruissellement en griffes et rigoles. D'une manière générale, il est admis que la vitesse du ruissellement est le paramètre prépondérant de l'action érosive du ruissellement superficiel. En 1965, Meyer a proposé la relation suivante pour évaluer cette vitesse.

$$V_R = (I^{0.33}Q_R^{0.33})/N^{0.66}$$

Où V_R : vitesse de ruissellement ;

I : pente du terrain ;

Q_R : débit de ruissellement ;

N : rugosité du sol.

Les facteurs qui régissent le ruissellement sont principalement :

a- Infiltration :

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

Pour un sol homogène initialement non saturé, la surface du sol présente une certaine infiltrabilité définie comme le flux maximum qu'elle peut absorber lorsqu'elle est maintenue en contact avec l'eau et la pression atmosphérique. Au cours du temps, cet abaissement par l'action de la compaction des sols, que ce soit sous l'action des agents climatiques ou par l'action de l'homme, conduit à une réduction de la porosité et donc de la conductivité hydraulique. La diminution de la capacité d'infiltration constitue ainsi un facteur défavorable générateur de ruissellement et de transport de sédiments. En revanche, cette même diminution de l'infiltrabilité joue un rôle positif contre l'érosion puisqu'elle renforce la résistance au cisaillement des sols.

b- Détention superficielle et rugosité du sol

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

c- Pente et longueur de pente

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

d- Couvert végétal

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

- l'interception nette : une partie de la pluie qui tombe sur la végétation est directement reprise par l'évaporation. Elle ne participe alors, ni à l'infiltration, ni au ruissellement.

- La dissipation de l'énergie cinétique : une partie de la pluie interceptée par le feuillage continue sa course jusqu'au sol. L'énergie cinétique des gouttes s'en trouve alors modifiée.

L'expérience montre (Ruiz-Figueroa, 1983) que l'efficacité d'un couvert végétal à l'égard de l'infiltration est d'autant plus marquée que le dernier élément récepteur restera bas.

1-3- Etat du sol

L'état du sol joue un rôle extrêmement important dans les processus d'érosion. Les phénomènes d'arrachement d'agrégats sont en effet très dépendants de l'état de cohésion du sol qui définit la résistance au cisaillement.

1-3-1- La croûte de battance

L'influence de la relation entre la structure du sol et les flux de particules se fait dans les deux sens. Si l'état de la surface du sol joue un rôle important pour le processus d'érosion, ce dernier modifie l'état de surface sur les premiers millimètres.

Le retrait d'une fine couche de sol semble être la conséquence la plus évidente de l'érosion, mais la formation d'une croûte de battance peut également être observée après un évènement érosif (fig 3). La formation de particules plus fines puis leur redistribution sous l'effet du splash et du ruissellement peut en effet entraîner la fermeture de la surface du sol, les particules les plus fines venant combler les pores libres. Dans un deuxième temps, après l'arrêt de la pluie et la disparition de l'eau résiduelle en surface, les fines particules sédimentent sur le versant, générant une croûte de battance (Boiffin 1984). Ce phénomène est généralement la conséquence d'une succession d'évènements pluvieux avec des périodes intermédiaires sèches.

Les propriétés hydromécaniques de cette couche de sol peuvent être très différentes de l'état initial du sol et variables au cours du processus de formation d'une croûte de battance. La conductivité hydraulique et la cohésion sont modifiées (Cerdan et al. 2002; Cerdan et al. 2002; Le Bissonnais et al. 2005). Les taux d'infiltration diminuent fortement (Boiffin 1984; Cerdan et al. 2002; Le Bissonnais et al. 2005), entraînant généralement l'amplification du ruissellement de type hortonien.

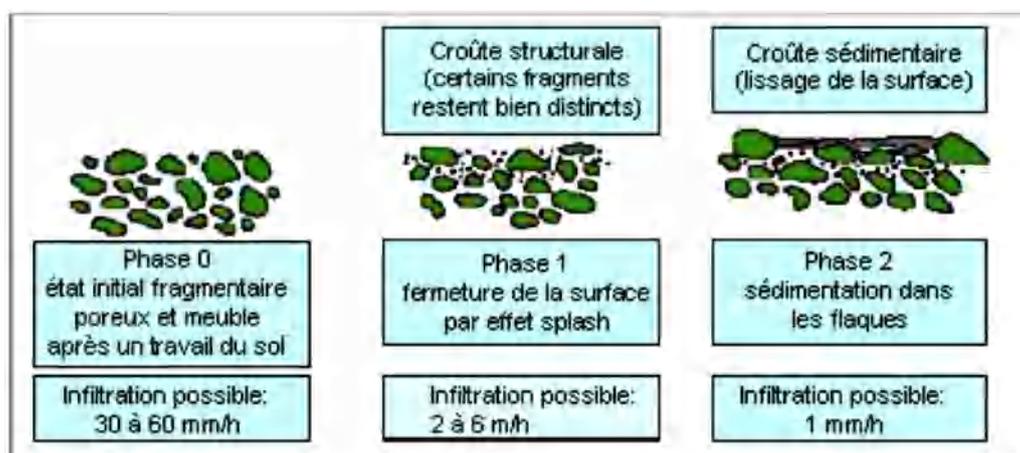


Figure 3 : Étapes de la formation d'une croûte de battance (d'après Boiffin 1984).

1-3-2- L'humidité du sol

Bryan (2000) recense des études où le même écoulement sur une surface humide produit de sept à neuf fois plus de sédiments que sur une surface sèche. Un sol humide se révélera donc plus sujet à l'érosion qu'un sol sec, puisque sa résistance au cisaillement induite par l'écoulement est plus faible.

2- Formes d'érosion hydrique

2-1- Erosion en nappe

Ce type d'érosion s'effectue sur toute la surface du sol. A la surface des terres agricoles, forestières ou à pâturages, les particules de sol sont détachées par la pluie et emportées par le ruissellement. Ceci prend la forme d'érosion dite en nappe avec une mince lame d'eau s'écoulant sur une pente douce en amont.

Quantitativement, l'érosion en nappe est très modeste en Algérie, les pertes en terres estimées par ce type d'érosion sont de 0,10 à 20 t.ha⁻¹.an⁻¹ Roose, (1993) et Chebbani, et al, (1999). Le transport des sédiments concerne particulièrement les particules fines : comme l'argile et le limon, les matières organiques de faible masse volumique telles que les résidus de culture et les déjections animales ou encore les fertilisants épandus sur les parcelles cultivées.

2-2- Erosion linéaire

Cette forme d'érosion se manifeste dès que les filets d'eau diffus se concentrent sur des lignes de plus forte pente et exercent ainsi sur le sol une force de cisaillement permettant de creuser des formes de plus en plus profondes dans le sol en arrachant des particules de plus en plus grosses: graviers, cailloux voir des blocs (Megnounif,2007) ,de petits canaux naissent que l'on peut diviser en trois types : griffes (quelques centimètres de profondeur), rigoles (la profondeur dépasse 10 cm), ravines (quelques mètres).

a- Erosion en griffes et rigoles

L'écoulement se concentre davantage pour créer son passage sous forme de griffes d'abord, ensuite, l'eau de ruissellement vient renforcer l'agrandissement de cette forme par des incisions bien définies faisant apparaître des rigoles quoique petite à la surface de la terre Heush, (1970).

b- Érosion en ravine

L'érosion en ravine est la dissection de la surface du sol par un chenal profondément découpé dans les terres se formant à l'aval d'un bief non incisé et créant ainsi une rupture de pente brutale. L'essentiel du transport solide provient des ravines et des oueds (Heush, B. 1970 ; Arabi, M. et al. 1991).

2-3- Érosion des berges

La berge est le talus incliné qui sépare le lit mineur et le lit majeur (Degoutte, 2005) (fig 4). L'érosion des berges est l'enlèvement de matériaux constitutifs de la berge sous l'action physique de l'eau et des particules déjà en suspension.

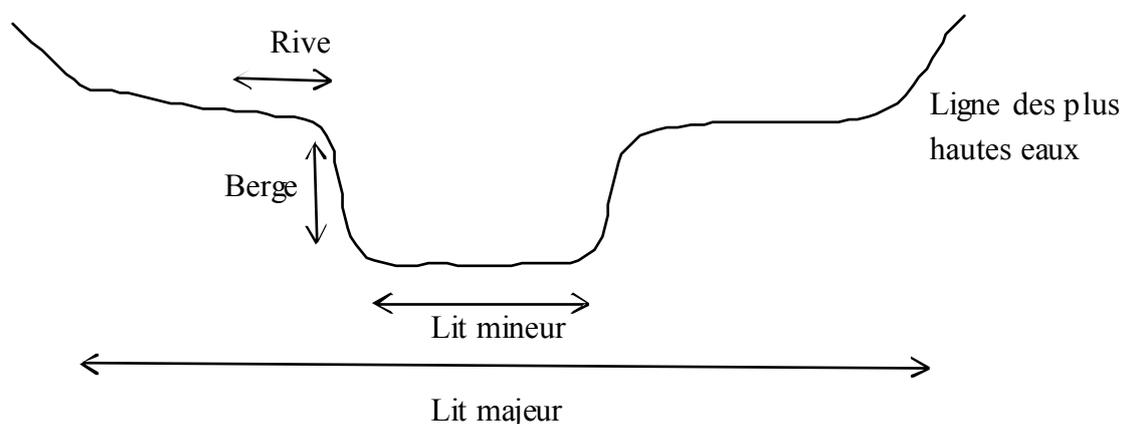


Figure 4 : Représentation schématique d'un cours d'eau et de ses abords (Lefrançois, 2006)

L'enlèvement de matériel des berges est possible lorsque la vitesse du courant et sa turbulence développent un pouvoir érosif capable de vaincre le poids des particules et leur cohésion. Il faut plus d'énergie pour démarrer un processus d'érosion que pour l'entretenir. La vitesse de l'eau dépend de la pente du cours d'eau, de la rugosité du fond, de la hauteur d'eau, de la tortuosité du chenal et de la couverture végétale sur les rives.

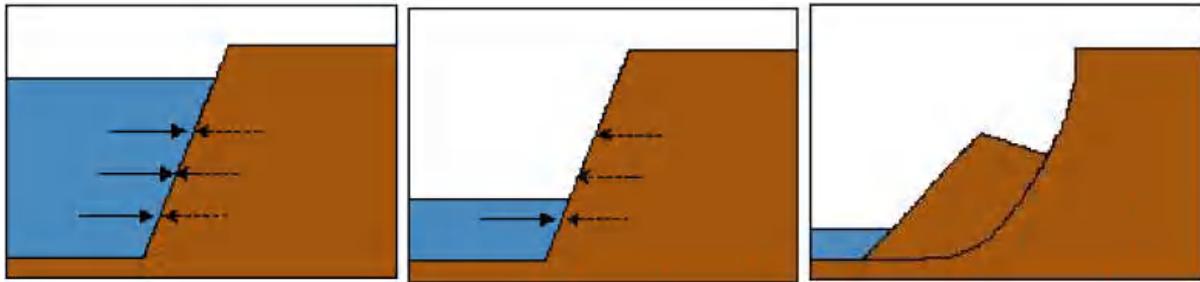


Figure 5 : Pressions et glissement de berges Lefrançois, (2007)

Le phénomène d'érosion est plus brutal lorsque la direction du courant fait un angle avec la berge. C'est donc un phénomène affectant principalement les berges concaves (fig 6.a), mais se produisant aussi dès qu'un obstacle perturbe les filets liquides. Ainsi, un embâcle peut provoquer l'érosion de la berge opposée d'une petite rivière, par courant réfléchi (fig 6.b). A l'aval d'un seuil, les tourbillons tendent à éroder les deux berges en aval, par courant de retour (fig 6.c).

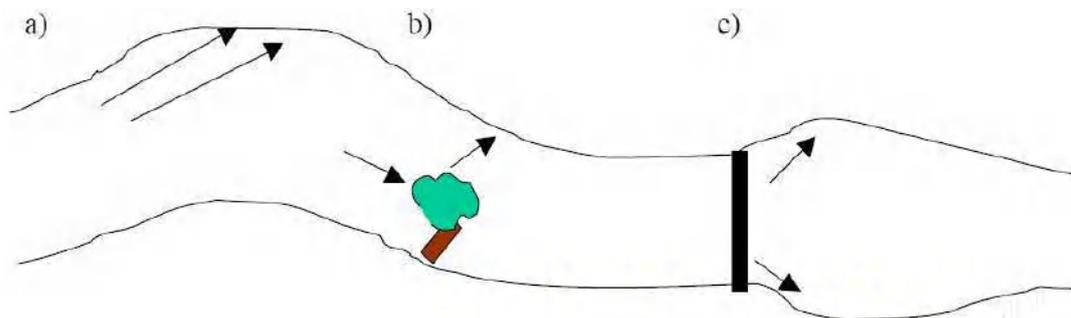


Figure 6 : Contextes favorables à une érosion de berges : courant direct (a), courant réfléchi (b), courant de retour (c). (Degoutte, 2005). D'après Lefrançois 2007

3- Quantification de l'érosion

L'intérêt croissant pour les problèmes liés à l'érosion des sols et à son accélération, ainsi qu'aux problèmes de dégradations associées au transport des particules des sols, dans plusieurs endroits du monde, a nécessité des méthodes et moyens afin de quantifier les taux d'érosion et suivre leur évolution au cours du temps.

Plusieurs formules ont été conçues pour la quantification de l'érosion hydrique. Nous ne citerons que celles qui impliquent les paramètres physiques représentatifs (morphologie du bassin, pluies, débit liquide, végétation).

3-1 Formule de Wischmeier et Smith (1978)

La moyenne annuelle des pertes de terres par hectare (A) est déterminée à partir de six facteurs :

$$A=R. K.L S .C .P$$

A : Perte en sol moyenne annuelle ($t.ha^{-1}.an^{-1}$)

R : Indice d'érosivité des précipitations (N/h).

K: Indice d'érodibilité du sol, fonction de la texture, du taux d'humus, de la structure de la couche superficielle du sol ainsi que de sa perméabilité ($t.h / N.ha$)

S : pente en % et L (longueur de la pente/longueur de la parcelle est sans unité)

C : Indice de couverture végétale et des pratiques culturales.

P : Indice d'aménagement antiérosif.

3-2 Formule de Fournier (1960)

$$Ass = (1/36) (Pm/Pam)^2 (2.65) (h/S)^2 (0.46)$$

Avec

Ass : apport solide spécifique ($t.km^{-2}.an^{-1}$)

Pm : précipitations moyennes mensuelles du mois le plus pluvieux (mm)

Pam : précipitations moyennes annuelles (mm)

h : dénivelée moyenne (m)

S : superficie du bassin versant (km^2).

4-Transport solide

Dans tout écoulement, que ce soit dans le lit du cours d'eau ou au sein du ruissellement sur un versant, des phénomènes d'érosion, de dépôt et de reprise sont observés. Ils sont essentiellement gouvernés par les conditions hydrauliques et la granulométrie des sédiments. La courbe de Hjulstrom synthétise ces phénomènes et permet de déterminer les processus prédominants (érosion, transport, dépôt) selon la vitesse du courant et le diamètre des grains (fig 7).

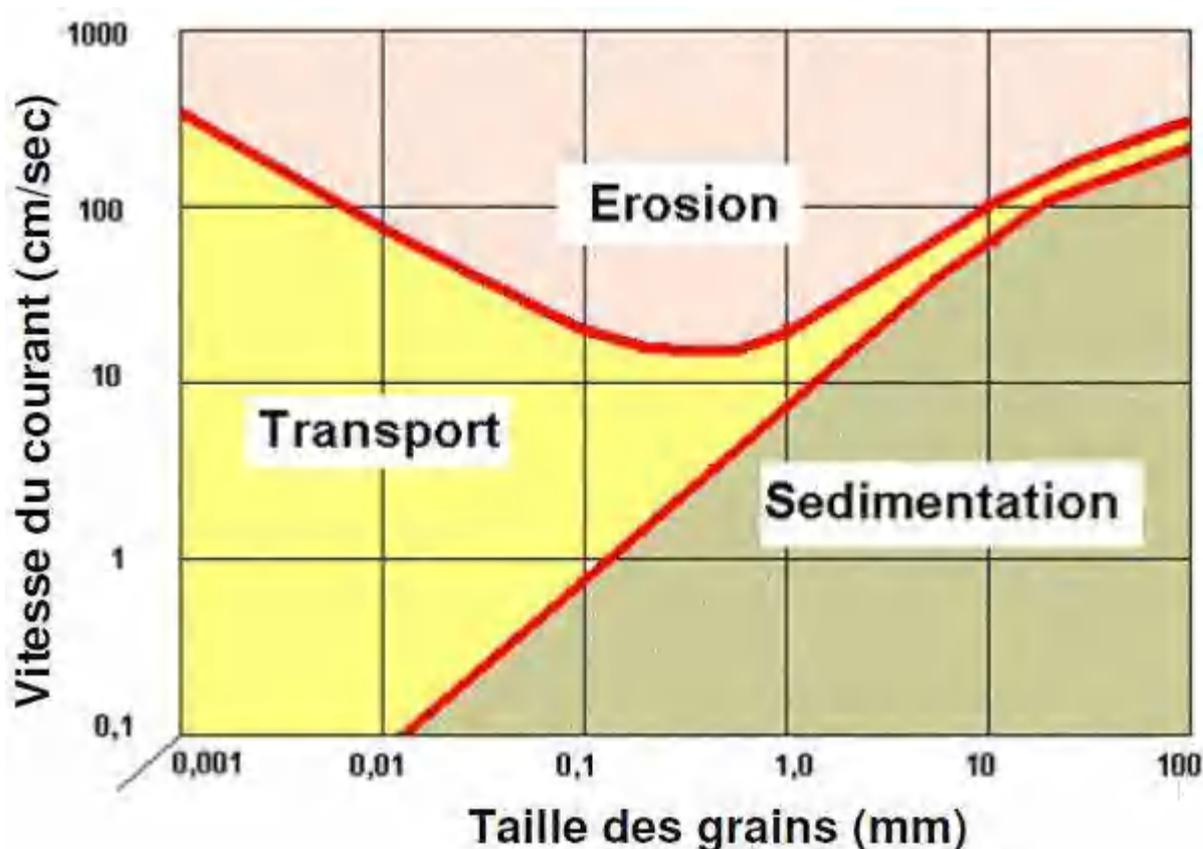


Figure 7 : Diagramme de Hjulstrom (1935) décrivant la mise en mouvement et le transport des grains du lit en fonction de leur diamètre et de la vitesse d'écoulement.

Hjulstrom, (1935) a montré qu'il existait trois zones: la zone supérieure d'érosion, la zone inférieure de sédimentation, et entre les deux, une zone de transport.

La granulométrie des particules sédimentaires a donc une influence majeure sur leur transport (et sur leur vitesse de sédimentation). La figure 7 (essentiellement basée sur des expériences en laboratoire) montre la vitesse minimale d'un courant nécessaire pour mobiliser, transporter et déposer des grains de quartz de granulométrie variable.

4-1-Les différents modes de transport solide

Le transport des sédiments par les cours d'eau est déterminé par les caractéristiques des particules (taille, forme, concentration, vitesse de chutes et densité des particules). Ce qui permet de distinguer plusieurs modes de transport solide (fig 8).

Dans les cours d'eau, on distingue essentiellement deux types de transport, le transport solide par charriage et le transport solide en suspension, chacun régi par une dynamique propre :

- **le charriage** : il transporte les éléments les plus grossiers près du fond du cours d'eau, par roulement ou glissement des grains les uns sur les autres ou par petits sauts (saltation). Ce mode de transport est favorisé par les débits élevés et ou des gradients topographiques élevés.

- **la suspension** : ce mode de transport concerne les éléments les plus fins, qui sont maintenus en suspension dans la colonne d'eau sous l'effet de la turbulence.

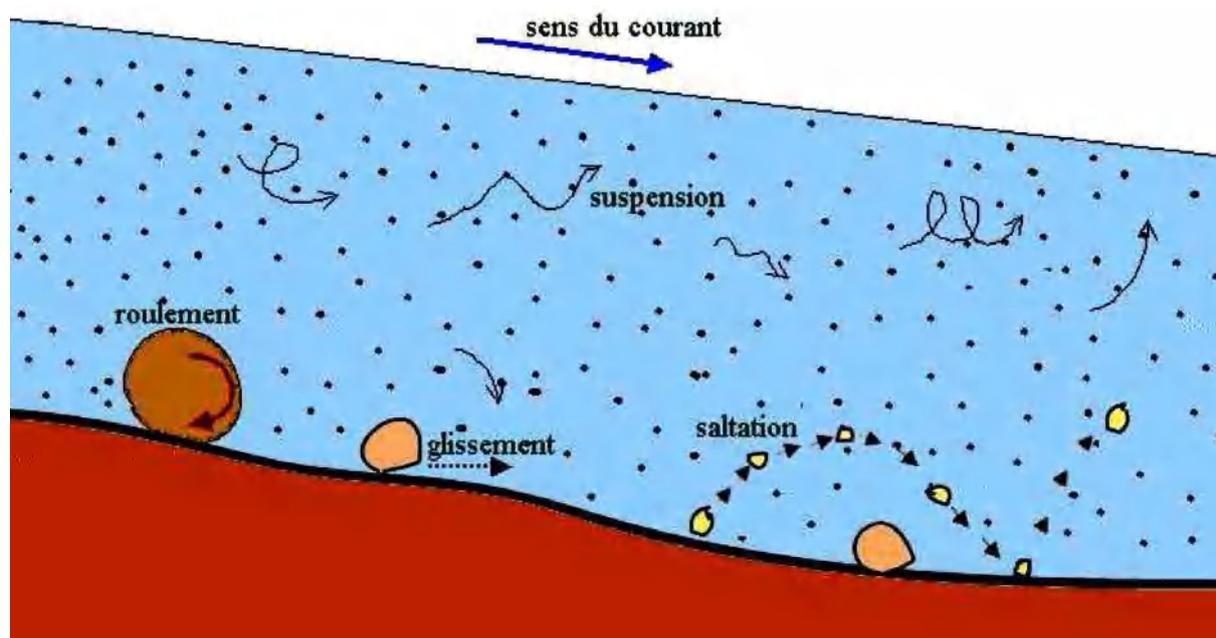


Figure 8 : Schématisation des processus de transport par charriage et de transport en suspension. D'après Lefroncois, 2005

4-1-1-Le charriage

Le charriage se produit près du fond, il ne concerne que des particules grossières (sables, gravier, galets et blocs) de diamètre supérieur à 1 mm. Ces particules commencent à se déplacer le long du lit du cours d'eau en roulant, glissant ou éventuellement par des sauts, par saltation. Leurs vitesses est inférieure à celle de l'écoulement.

Le transport solide par charriage est rarement étudié en raison des difficultés de mise en place de dispositifs adaptés pour le quantifier. La difficulté de l'évaluation de ce mode de transport est liée en particulier à l'insuffisance de données de mesures. De plus, le taux de charriage dans le transport solide global a été estimé d'une façon approximative, à environ 50% dans les formations peu érodables jusqu'à 10-15% dans les formations très érodables (PNUD, 1987).

4-1-2-La suspension

Le transport en suspension concerne les éléments les plus fins placés dans un écoulement turbulent. Contrairement au charriage, la suspension n'est pas limitée par la capacité de transport du cours d'eau. Les particules en suspension transitent de l'amont vers l'aval dans le lit du cours d'eau, sauf en cas de forte perturbation de l'écoulement comme des retenues ou des lacs.

Le transport en suspension est essentiellement contrôlé par deux phénomènes :

- *la turbulence de l'écoulement ;
- * la vitesse de chute des particules.

4-2-Distribution des concentrations en MES dans la colonne d'eau

Dans la nature, la distribution de MES dans la colonne d'eau dépend fortement de la forme des rivières et des conditions hydrologiques. Cette distribution peut être homogène ou contraire, montrer un fort gradient vertical ou horizontal Chikita et al, (2002) ; Filizola, (2003) ; Mano, (2008).

La présence des particules en suspension dans la colonne d'eau résulte d'un équilibre entre leur poids et l'agitation turbulente dont l'hétérogénéité peut créer une distribution différente de MES en profondeur et latéralement dans le cours d'eau (Mano, 2008).

Les concentrations en particules ne sont pas uniformes au sein de la colonne d'eau. Filizola (2003), montre que les MES se distribuent sur la verticale de manière non uniforme pour les fleuves provenant des Andes (Rios Solimões, Madeira, et donc Amazonas) ou de l'avant-pays andin (Rio Purús). Cette distribution verticale évolue dans le temps au cours du cycle hydrologique. En période de basses eaux, la variabilité observée est généralement faible, voire inexistante, alors qu'elle peut être très marquée en période de crue, avec un fort gradient positif des concentrations en MES avec la profondeur.

Le travail de Filizola (2003) a montré que les calculs du transport solide à partir des seules MES de surface sur l'Amazonie sont très peu différents de ceux effectués à partir de MES moyennées sur la section totale (fig. 9).

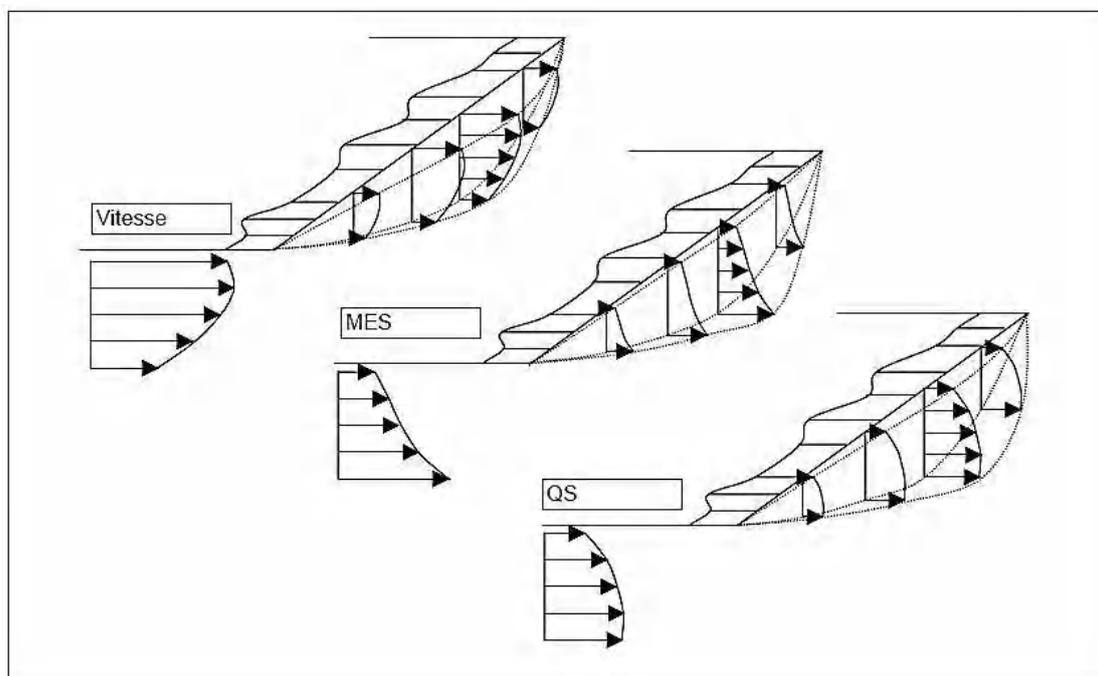


Figure 9: Distribution théorique de la vitesse, de MES et du débit solide dans une section.

D'après Filizola, 2003.

4-3-Rapport suspension-charriage en rivière

Le transport par charriage est rarement mesuré en raison des difficultés de mise en place de dispositifs adaptés pour le quantifier. De plus, dans de nombreuses études, le transport par charriage est rarement pris en compte car il est admis que ce type de transport ne représenterait que 10% du transport total, voire moins (Asselman, 2000, Syvitski, 2003). Syvitski (2003) a estimé que le flux total (charriage et suspension) de sédiments exporté vers l'océan par les fleuves et les rivières est de 18 milliards de tonnes/an avec un flux de transport par charriage représentant 2 milliards de tonnes/an. L'estimation du flux de sédiments transportés par les fleuves du continent vers l'océan à l'échelle globale est donc basée sur les flux des particules en suspension (Syvitski, 2003 ; Walling, 2006).

La proportion entre transport par charriage et par suspension peut varier d'un bassin versant à l'autre, mais également d'un événement à un autre au sein du même bassin versant (tableau 1). Pour tous les bassins versants, le transport en suspension représente plus de 50% des exportations de matériaux. Pour les grands fleuves de plaines, le pourcentage de matériaux transportés par suspension peut dépasser 85% (Walling et Webb 1987; Asselman 2000; Vericat et Batalla 2006). Même si le charriage semble prendre une place plus

importante dans les petits bassins versants montagneux, le transport en suspension demeure le processus dominant en termes de volume de matériaux transportés (tableau 1).

En Algérie, le transport solide est évalué au niveau des stations hydrométriques des bassins versants pour la quasi-totalité des épisodes d'écoulement. Généralement, on se limite au débit en suspension. La mesure du charriage est en effet un problème non encore résolu. A partir de l'évaluation du transport solide en suspension, le charriage est estimé entre 15% et 25% de la suspension, selon plusieurs auteurs (PNUD).

Tableau 1: Rapport massique entre le transport par charriage et le transport en suspension dans plusieurs bassins versants de taille et de type variés dans le monde. D'après Mano 2008

Bassin versant	Type du bassin versant	Taille de bassin versant	Pourcentage de suspension	Etude
Rivières de plaines en Allemagne	Plaines	Variable	85%	Asselman (2000)
Rivière de plaines au Royaume Uni	Plaines	Variable	70 à 95%	Walling et Webb (1987)
Ebro (Espagne)	Plaine	85 000 km ²	99%	Vericat et Batalla (2006)
Amas (Espagne)	Montagne	2.8 km ²	66% ⁽¹⁾	Lana-Renaut et Regues (2007)
Rio Cordon (Italie)	Montagne	5 km ²	67% ⁽²⁾	Lenzi et al (2003)
Marsyadi (himalaya)	Montagne	4800 km ²	67%	Pratt-Sitaula et al (2007)
Yukon (Himalaya)	Montagne	85000 km ²	90%	Chikita et al (2002)
Agly (France)	Méditerranéen	1045 km ²	99%	Serrat (1999)
Laval (France)	Méditerranéen	0.86 km ²	75% ou 67% ⁽³⁾	Mathys (2002)
Arc (France)	Montagne	1957 km ²	79%	Mamesy (2006)
(1) moyenne sur 9 épisodes				
(2) moyenne sur 16 épisodes				
(3) moyenne durant les périodes de transport important et moyenne sur la période de mesure totale				

4-4-Origine des sédiments en suspension dans le bassin versant

Les sédiments en suspension que l'on observe à l'exutoire d'un bassin versant proviennent de plusieurs origines :

- les versants : cette source dépend de certaines conditions (l'humidité du sol, l'intensité des pluies et leur répartition spatio-temporelle, la densité de la couverture végétale, les formations lithologiques, la déforestation et l'utilisation des terres). Megnounif et al

(2013) ont montré que cette source produite 23% du tonnage de sédiments en suspension exportés sur le bassin de l'oued Sebdou ;

- le lit et les berges : d'après les travaux effectués sur le bassin de l'oued Sebdou par le même auteur, les berges et le lit sont responsables de 77% du tonnage total des sédiments exportés ;
- divers : eaux urbaines, émissions industrielles. Ils représentent une infime quantité sauf si la pollution est importante.

Conclusion

Quantitativement, l'érosion en nappe est très modeste en Algérie, les pertes en terres estimées par ce type d'érosion sont de 0,10 à 20 t.ha⁻¹.an⁻¹ Roose, (1993) ; Chebbani, et al, (1999). Le transport de sédiments concerne particulièrement les particules fines : comme l'argile et le limon, les matières organiques de faible masse volumique telles que les résidus de culture et les déjections animales ou encore les fertilisants épandus sur les parcelles cultivées.

L'essentiel du transport solide provient des ravines et des oueds (Heush, 1970 ; Arabi et al, 1991). Le transport solide en suspension est celui qui transporte les volumes les plus importants de matériaux. C'est donc naturellement que l'étude de celui-ci a été privilégiée.

Chapitre 2 :
Technique de mesure et état de l'art

Introduction

Ce chapitre comprend la présentation des méthodes de mesure, de l'estimation des flux de matières en suspension, et une synthèse bibliographique des études de transports solide en suspension en Algérie.

La charge de sédiments en suspension transportées par un cours d'eau pendant un temps donné est évaluée grâce aux mesures de la turbidité au droit des stations hydrométriques. Ces mesures permettent d'analyser la variation temporelle du transport en MES, et de comprendre l'effet de différents facteurs hydro-climatiques, morphométriques et lithologiques sur les transports en MES.

1-Mesures du transport solide en Algérie

En Algérie, les données de mesure des transports solides en suspension sont disponibles à partir des années 1968-1970 grâce au réseau hydrométrique installé par l'A.N.R.H. Les mesures de turbidité s'intègrent aux techniques qui sont appliquées au niveau des stations hydrométriques. La mesure est basée sur une méthode opérationnelle qui consiste en l'application des instructions et consignes concernant la façon d'effectuer les prélèvements, leur fréquence ainsi que les analyses au laboratoire.

La méthode d'échantillonnage systématique du transport solide sur les cours d'eau algériens est l'échantillonnage uni ponctuel. On prélève un échantillon d'eau turbide sur la rive à la surface de l'oued au moyen d'un flacon de 50 cl. Les sédiments filtrés sur papier filtre (0.45µm) sont ensuite séchés à l'étuve pendant 30 minutes à une température de 105 °C. Ramenée à l'unité de volume (1 litre), cette charge est attribuée à la concentration en matières en suspension instantanée véhiculée par le cours d'eau en (g.l⁻¹).

En étiage, où la hauteur d'eau est constante au cours d'une journée, il y a lieu d'effectuer un seul prélèvement par jour, généralement à 12 heures, car on admet que c'est à ce moment que la hauteur d'eau correspond généralement à la hauteur moyenne du jour (Megnounif, 2013).

En période de crue, les mesures sont intensifiées jusqu'à des intervalles de temps d'une heure et même de 15 minutes en fonction de la vitesse d'augmentation des débits liquides.

1-1-Critique de la méthode de mesure

La technique de mesure a fait l'objet de critiques sévères de la part des chercheurs algériens.

Touat (1989) a vérifié à partir de jaugeages de transports solides en suspension qu'un échantillon ponctuel prélevé en surface peut conduire à une sous-estimation du transport solide. Il suggère que le procédé convenable consiste en la prise en considération d'un échantillon corrigé par un coefficient qui sera déterminé sur une quarantaine de jaugeages étalés sur deux ou trois ans. Le coefficient ainsi déterminé sera utilisé pour corriger les valeurs des échantillons ponctuels prélevés auparavant en appliquant la relation :

$$C = K C_p$$

Où C est la concentration corrigée, K est un coefficient correctif et C_p est la concentration ponctuelle.

Touat (1989), signale une sous-estimation de 35% par rapport à des prélèvements effectués sur plusieurs verticales et à différentes profondeurs de la section mouillée pour un oued des bassins côtiers algérois.

Demmak (1982), a montré que la principale difficulté est la non-uniformité des concentrations en sédiments dans la section de mesure et sa variabilité temporelle très importantes. Si on procède à un prélèvement en surface du cours d'eau, la teneur de l'échantillon sera nettement inférieure à la teneur de la verticale sauf si l'écoulement est très turbulent. La seconde source d'erreur est l'absence de tube d'échappement de l'air du flacon utilisé pour la mesure. Une bonne technique de mesure est l'utilisation d'une turbidisonde qui permettrait d'échantillonner l'oued en différents points selon les verticales de mesure et les différentes profondeurs.

1-2- L'exploitation des mesures bathymétriques

La mesure du colmatage des réservoirs et l'exploitation des données de mesures bathymétriques constituent une technique utilisée pour évaluer d'une façon indirecte les transports solides des cours d'eau à l'amont de la retenue.

La bathymétrie permet l'obtention de valeurs globales de transports solides, qui incluent les transports de fond, très difficiles à mesurer. Cette méthode qui a été utilisée pour mesurer l'envasement de six barrages en Tunisie présente l'inconvénient majeur qu'elle ne permet pas de connaître la variabilité temporelle du phénomène, puisqu'elle fournit des valeurs cumulées à partir de relevés fortement espacés (Ghorbel et Claude, 1977; Benmammou et Louati, 2007).

Une comparaison intégrant trois barrages et les stations hydrométriques amont a montré des écarts importants qui varient entre -31% (Ksob), -54% (Foum El Gherza) et -71% (Gueiss). Les mesures aux stations sous-estiment les apports solides totaux (Demmak, 1982). Ces écarts doivent être interprétés en lien avec les différences entre les techniques utilisées (charriage non pris en compte, incertitudes sur les densités, volume soutirés au déversés non connus).

La densité des matériaux est très mal connue sauf si on réalise une campagne de mesures et elle est très difficile à mesurer en profondeur.

2- Calcul du débit solide en suspension

Le débit solide en suspension d'un cours d'eau est calculé comme le produit du débit liquide et de la concentration de sédiments en suspension mesurés, rapporté à une période de temps (secondes). Il est exprimé par l'équation suivante :

$$Q_s \text{ (kg.s}^{-1}\text{)} = Q_l \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)} * C \text{ (g.l}^{-1}\text{)}$$

Un organigramme de la méthode de calcul d'un débit solide (Demmak, 1982) est donné à la figure 10.

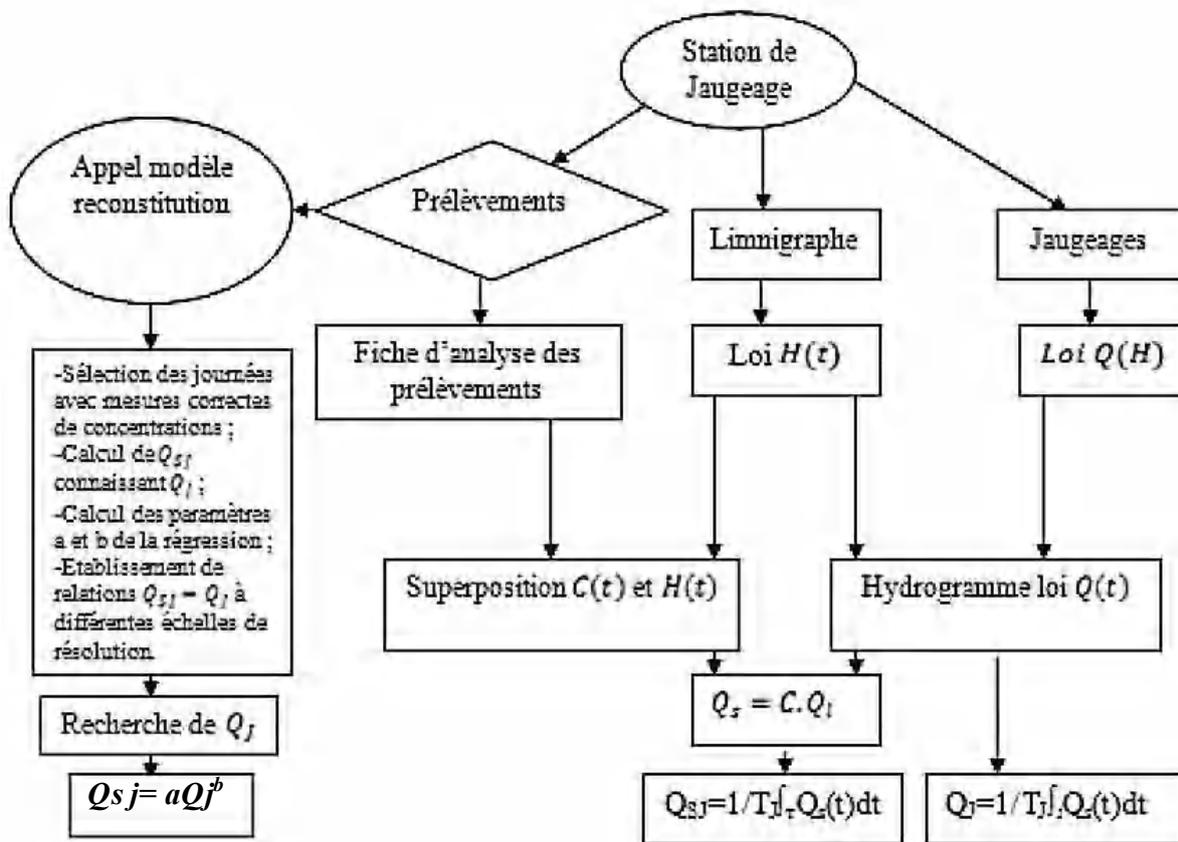


Figure 10 : Organigramme de calcul d'un débit solide moyen journalier (Demmak, 1982)

3- Courbes de transport solide : relation concentration en MES et le débit

Pour modéliser le transport solide en suspension, la méthode la plus appliquée est la courbe de transport solide (rating curve), qui représente la relation empirique entre les concentrations en MES et le débit liquide, ou bien entre le débit solide et le débit liquide pour une station hydrométrique qui représente une section d'écoulement de la rivière (Walling et Webb, 1981 ;

Asselman, 2000 ; Syvitski et al., 2000 ; Horowitz, 2003, Benkhaled et Remini, 2003 Achitte et Ouillon, 2007 ; Khanchoul et Jansson, 2008 ; Ghenim, 2008 ; Warrik, 2015).

Les relations $C=f(Ql)$ et $Qs=f(Ql)$ sont habituellement définies par une loi de puissance :

$$C = aQl^b \quad \text{ou} \quad Qs = aQl^{b+1}$$

- Avec : C : concentration en sédiment ($g.l^{-1}$).
- Ql : débit liquide ($m^3.s^{-1}$).
- Qs : débit solide ($kg.s^{-1}$).
- a et b : paramètres de la régression.

La relation $Qs=f(Ql)$ est exprimée sous forme de flux.

La précision de la relation entre les concentrations en MES et le débit liquide est souvent faible, car les points sont très dispersés. Fergusson, (1986) a démontré que cette équation sous-estimait le débit solide jusqu'à 50% et a proposé un facteur correctif basé sur des considérations statistiques.

Asselman, (2000), en compare les données de concentration observées et prévues dans le nuage de points autour de la droite de régression aussi bien sur l'échelle arithmétique que sur l'échelle logarithmique a trouvé que les courbes de transport solide peuvent sous-estimer substantiellement les concentrations réelles.

Des études ont été menées soit pour diminuer la dispersion des données (Fergusson, 1986 ; Janson, 1985), soit pour caractériser les termes de la relation empirique, soit pour déterminer les causes de la dispersion des données (Asselman, 2000).

3-1-La correction du modèle en puissance

On peut constater d'après la définition des deux modèles en puissance (logarithmique et arithmétique) que la régression en modèle puissance des données originales diffère de celle de la re-transformation logarithmique. Dans le modèle linéaire, les résidus doivent avoir une distribution normale, ce qui implique entre autres la nullité de la moyenne des résidus ($E(\varepsilon)=0$). Cependant quand les valeurs prédites par le modèle logarithmique sont re-transformées vers le domaine original, les résidus n'auront pas la distribution normale et la moyenne des résidus sera généralement supérieure à zéro (Kao et al, 2005).

Selon plusieurs auteurs (Duan, 1983 ; Jansson, 1985), cette différence est responsable de l'erreur ou biais donné par le modèle. Pour surmonter ce biais, Ferguson (1986), développe un facteur de correction FC1, basé sur des techniques purement statistiques.

Le facteur FC1 dépend de la variance (σ^2), (carré de l'écart type), entre les valeurs des logarithmes décimaux déterminées par le modèle et les valeurs mesurées.

La correction de Ferguson se définit donc par l'équation suivante :

$$FC1 = e^{2.651\sigma^2}$$

σ^2 : Correspond à la variance (carré de l'écart type) de l'estimation des concentrations.

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\log C_{imes} - \log C_{imod})^2}{N - 2}$$

Avec :

C_{imes} : concentration mesurée.

C_{imod} : concentration modélisée.

L'application de ce coefficient de correction exige une distribution log normale des résidus. Duan (1983) propose un autre facteur de correction FC2 qui est performante lorsque les résidus sont indépendants et normalement distribués. Il est donné par :

$$FC2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{e_i}$$

Avec :

$$e_i = \log C_{imes} - \log C_{imod}$$

Les facteurs de correction FC1 et FC2 sont appliqués à l'ensemble des débits solides sous la forme :

$$C_{corr} = b \cdot QI^a \cdot FC1$$

$$C_{corr} = b \cdot QI^a \cdot FC2$$

L'application du coefficient de correction a été testée dans plusieurs travaux qui ont confirmé l'amélioration de l'estimation de la charge solide. Asselman (2000), après une étude sur le bassin du Rhin conclut que l'utilisation de la loi en puissance issue de la re-transformation

logarithmique tend à sous-estimer la charge solide de 10 à 50% et que l'application du coefficient de correction apporte une diminution de cette sous-estimation.

D'autres auteurs ont discuté de l'efficacité de l'application de ces deux coefficients de correction et concluent qu'ils tendent à trop augmenter l'erreur et faussent la prédiction dans le cas d'une sur estimation. L'application de ces deux coefficients de correction peut engendrer des erreurs de plus de 16% dépassant même l'erreur engendrée avant leur application (Walling et Webb, 1988).

Pour cela et dans le cas d'une sur estimation, Kao et al (2005) établissent un autre coefficient de correction (β) applicable pour des données non transformées en domaine logarithmique, il peut s'adapter pour le cas des deux modèles (linéaire ou non linéaire), il est calculé de la manière suivante:

$$\beta = \frac{\sum_i^n (c_i)}{\sum_i^n aQ^b}$$

Avec : $\epsilon_i = C_{mes} - C_{mode}$

Ce coefficient peut être positif ou négatif ;

La concentration des sédiments en suspension corrigée sera donnée par :

$$C_{corr} = (1 + \beta) aQ^b$$

4-Phénomène d'hystérésis

Le rôle prépondérant des crues dans le transport de sédiments est très clair. En milieu méditerranéen, les crues sont également considérées comme les moments clés du transport de sédiments (Serrat et al. 2001).

Lors des événements de fort transport solide, l'augmentation des débits s'accompagne de l'accroissement des concentrations en MES dont le pic de concentration peut s'observer soit en concomitance avec celui des débits, soit déphasé avec la possibilité d'être avant ou après le pic de débit. De plus, pour une valeur de débit donnée, les concentrations en MES peuvent être plus élevées durant la phase de montée de la crue ou être plus importantes durant la décrue. Ce sont donc des épisodes clés pour comprendre les mécanismes de transport de MES sur un bassin.

Les deux cas de figures les plus fréquents sont :

-Hystérésis horaire : le pic de concentration est observé avant le pic de débit. Ce type d'hystérésis est souvent expliqué par une production rapide de sédiments (Lenzi et Marchi, 2000; Brasington et Richards, 2000; Sutter et al, 2001; Asselman, 1999). Ce phénomène peut avoir plusieurs explications : il peut tout d'abord être lié à la remise en suspension des sédiments déposés lors des basses eaux ou lors de la décrue d'un événement précédent. Mais il peut également être expliqué en termes d'érosion : une pluie érosive va produire très vite des sédiments (splash et rigoles d'érosion), qui vont rapidement arriver à l'exutoire. Il est également possible que cette arrivée rapide de sédiments soit liée à une source de production proche de l'exutoire.

On peut décomposer ce type d'hystérésis en trois phases (fig. 11) :

- phase 1 : arrivée rapide de sédiments (érosion, re-mobilisation, source proche) ;
- phase 2 : dilution des concentrations par l'augmentation des débits ;
- phase 3 : dépôt lié à la diminution des débits.

-Hystérésis antihoraire : ce type de boucle est en général expliqué par une production de sédiments répartie sur le haut du bassin versant (Lenzi et Marchi 2000; Brasington et Richards 2000; Sutter et al. 2001; Chikita et al. 2005). Les sédiments mettent alors plus de temps pour arriver à l'exutoire. Une autre explication possible de l'hystérésis antihoraire provient de la différence entre la vitesse de l'onde de crue et les vitesses de l'écoulement. En effet, les particules se déplacent à la vitesse du courant, qui est inférieure à la vitesse de l'onde de crue.

Cette différence de vitesse engendrerait alors un retard de l'arrivée des sédiments par rapport au pic de crue.

De la même manière, on peut décomposer la dynamique de ces événements en différentes phases (fig11) :

- phase 1 : pluie sur le bassin et début du ruissellement ;
- phase 2 : transport des sédiments lié aux forts débits (faible concentration due à la dilution) ;
- phase 3 : arrivée des sédiments mobilisés sur le haut du bassin versant (débit plus faible, d'où une concentration plus élevée).

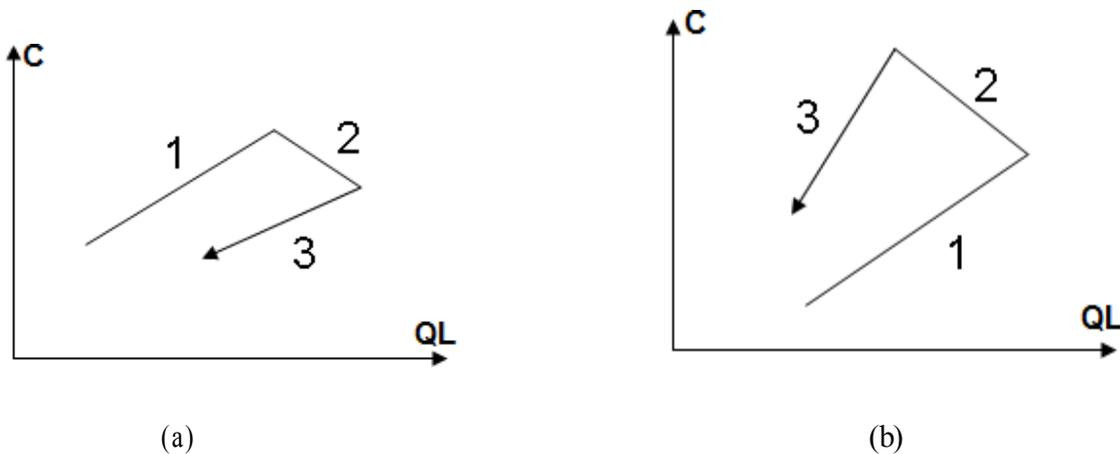


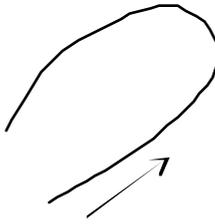
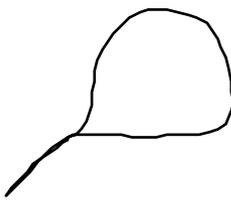
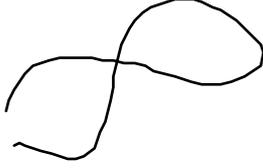
Figure 11 : Phénomène d'hystérésis dans la relation concentration – débit liquide.

(a) hystérésis horaire (b) hystérésis antihoraire.

Williams (1989) a proposé une typologie de crues basées sur le rapport C/Q durant les phases de montée de crue et de décrue. Cinq modèles des relations sont ainsi établis: ligne simple, hystérésis horaire, hystérésis antihoraire, linéaire simple plus boucle et figure en huit (tableau 2).

Des interprétations en termes de processus de chacun de ces modèles ont été proposées, la plupart de ces interprétations sont liées aux sources des sédiments actives (Walling et Webb, 1982 ; Klein, 1984; Williams, 1989; Hudson, 2003; Lefrançois et al, 2005 ; Achite et al, 2013). D'autres facteurs qui contrôlent également l'hystérésis, notamment la taille du bassin versant, la quantité de pluie et l'humidité du sol sont cités (Klein, 1984 ; Seeger et al, 2004).

Tableau 2: Classes des relations C – Ql (Williams1989)

Classe	Modèle	Rapport C/Q	La forme
I	Courbe simple (single ligne) ligne droite	Rapport C/Q de la montée égal à celui de la décrue	
II	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (clockwis loop)	Rapport C/Q de la montée supérieur à celui de la descente, pour toutes les valeurs de Q	
III	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (conterclockwis loop)	Rapport de C/Q de la montée inférieur à celui de la descente pour toutes les valeurs de Q	
IV	Linéaire simple plus une boucle (single line plus a loop)	Rapport C/Q de la montée est égal à celui de la descente pour une partie des valeurs de Q Rapport C/Q de la montée inférieur ou supérieur à celui de la descente pour une autre partie des valeurs de Q	
V	Forme de huit (figure eight)	a-) Rapport C/Q de la montée supérieur à celui de la descente pour une partie des valeurs de Q. b-) Rapport C/Q de montée inférieur par à celui de la descente pour une autre partie des valeurs de Q	

Klein (1984) a interprété les variations des relations concentration en MES-débit lors des crues pour identifier les sources des particules. La forme de la courbe est fonction de la vitesse de l'eau et de la distance de la source de sédiment par rapport au point d'enregistrement (fig. 12).

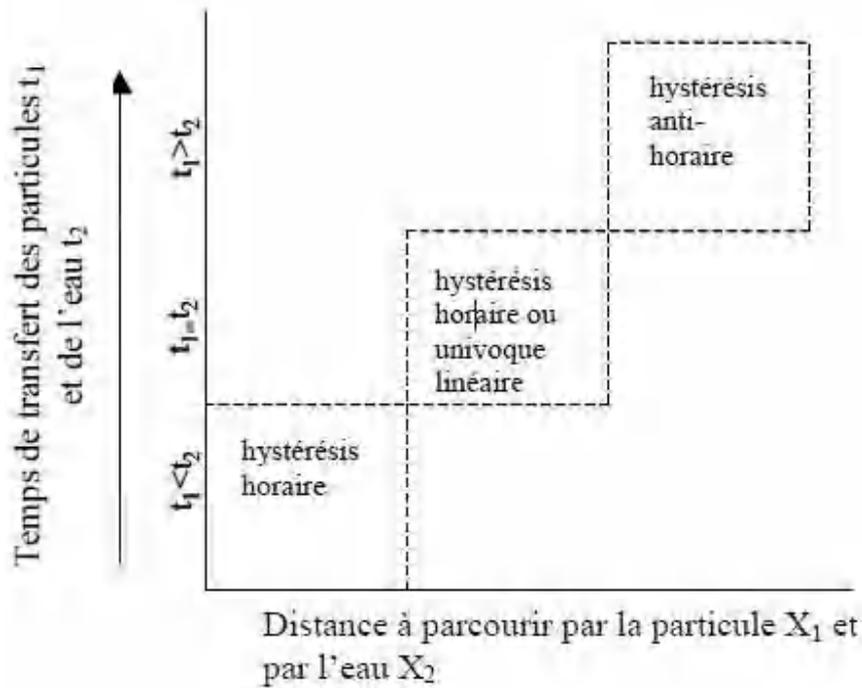


Figure 12 : Allure de l'hystérésis en fonction du temps de transport et de la localisation de la source. X_1 distance entre le centre de la source de sédiment et l'exutoire. X_2 distance entre le centre de l'aire drainée et l'exutoire. t_1 est le temps de transfert entre le centre de la source de sédiment et l'exutoire. t_2 est le temps de transfert entre le centre de l'aire drainée et l'exutoire (Klein, 1984).

5-Quelques données sur le transport

solide5-1- En Algérie

Le tableau 3 présent quelques valeurs du taux d'érosion spécifiques des sols en $t.km^{-2}.an^{-1}$ en Algérie du Nord, obtenues par différents auteurs. Ce tableau montre une forte variabilité de l'érosion spécifique d'un bassin versant à l'autre.

Tableau 3 : Valeurs des taux d'érosion spécifiques des sols publiées pour des bassins versant algériens.

Bassin versant (région)	Erosion spécifiques des sols (t.km ⁻² .an ⁻¹)	Référence
Abd	136	Achite et al., 2007
Algérie orientale	145	Bourouba, 1998
Bellah	610	Elahcene et al., 2013
Ebda	1 875	Meddi, 1999
Kebir bassin	572	Khanchoul et al., 2012
La Haute Tafna	1 120	Megnounif et al., 2003
La Tafna	150	Sogreah, 1967
L'Isser (Lakhdaria)	2 300	Bourouba, 1997
Mazafran	1 610	Bourouba, 1996
Mina	187	Achite et al., 2005
Mouilah	126	Terfous et al., 2001
Oued Agrioun	7 200	Probst et al., 1992
Saf Saf	461	Khanchoul et al., 2007
Sebdou	1 330	Ghenim et al., 2008
Sebdou	937	Bouanani, 2004
Sebdou	343	Megnounif et al., 2013
Sikkak	170	Bouanani, 2004
Cherf	114	Louamri 2013

De plus, la très grande variabilité spatiale se double d'une variabilité temporelle encore plus forte. Dans un même bassin, le transport solide peut fluctuer de plus de deux ordres de grandeur selon les années ou les mois. Ainsi, les apports solides annuels du bassin de l'Oued Mouilah (2 650 km²) ont varié de 6 à 1 038 t.km⁻².an⁻¹ entre 1978 et 1987, (Ghenim et al 2008). Les apports mensuels du bassin de l'Oued Haddad (470 km²), moyennés sur 22 ans, ont varié de 0,03 à 50 t.km⁻² (Achite et Meddi 2004). Cette hétérogénéité se retrouve également à l'échelle événementielle : les quelques événements les plus violents sont responsables de l'essentiel de l'érosion annuelle. Les fortes crues peuvent transporter des charges de sédiments en suspension supérieures à 100 g.l⁻¹, comme dans le bassin de l'Oued Berd (Remini 1997), ou celui de la Haute

Tafna (Megnounif et al 2007), voire 250 g.l⁻¹ dans l'oued Isser (Remini 1997). Cette forte concentration se manifeste surtout pendant l'automne, succédant à la période estivale pendant laquelle les oueds sont à sec.

Les valeurs instantanées des concentrations en MES mesurées aux stations hydrométriques varient dans une gamme très large et sont souvent très élevées. Demmak, (1982), cite une valeur de 407 g.l⁻¹ sur l'oued EL-Abiode. Ghernaout, (2014) a trouvé des valeurs de 510 g.l⁻¹ sur l'oued Tafna. Benkhaled et Remini, (2003), ont trouvé une valeur de 500 g.l⁻¹ dans l'oued Wahran.

L'envasement des barrages est l'une des conséquences les plus graves de l'érosion des sols et des transports solides des cours d'eau. Il constitue en Algérie une contrainte majeure qui affecte les capacités de stockage des ressources en eau superficielles. Les levés bathymétriques effectués par l'ANBT entre 2004 et 2006 pour 59 barrages en exploitation, ont permis d'estimer le volume perdu par envasement à 898 hm³ pour une capacité initiale cumulée de 6,704 Milliards de m³, soit une perte de capacité de 13,4 % ; le taux d'envasement est de 45 millions de m³ par an, avec de fortes disparités d'un site à l'autre. Selon Remini (2017), l'envasement cumulé atteindrait 1.7 milliards de m³ dans les 74 barrages pour une capacité de stockage de 8.5 milliards de m³ d'eau, soit une perte de capacité de 20%, le taux d'envasement serait de 65 million de m³ par an.

5-2-Au Maghreb

Le taux d'érosion spécifique des sols dans les pays d'Afrique du nord varie entre 1 000 à 5 000 t.km⁻².an⁻¹ (Walling, 1984). Toutefois, plusieurs auteurs ont montré que ces valeurs pouvaient être dépassées localement. On note les 5 900 t.km⁻².an⁻¹ enregistrés au niveau du bassin versant du Nekor qui alimente le barrage de Mohamed El Khettabi au Maroc (Lahlou, 1988). Parallèlement à ces fortes valeurs d'érosion spécifiques des sols, d'autres auteurs ont publié des estimations en dessous de cette fourchette. Bergaoui et al. (1998) ont évalué à 336 t.km⁻².an⁻¹ l'érosion spécifique des sols du bassin versant de Tebaga en Tunisie centrale.

5-3-Dans le monde

Syvitski et al. (2005), en se basant sur 217 fleuves mondiaux, dont les données sont considérées de bonne qualité, ont estimé le flux de sédiments à l'échelle globale à 12.6 Gt/an.

La contribution de chaque continent et de chaque fleuve aux flux solides et liquides est bien illustrée dans le tableau 4 et la figure 13. Elle est répartie comme suit :

- **Amérique du Nord** : Le flux solide transporté vers l'océan par les fleuves de ce continent est de 1910 Mt.an^{-1} avec un flux liquide de $5820 \text{ km}^3.\text{an}^{-1}$, ce qui présente respectivement 16% et 14% du flux global solide et liquide.
- **Amérique du Sud** : les fleuves en Amérique du Sud exportent 2450 Mt.an^{-1} de flux de sédiments vers l'océan et $11540 \text{ km}^3.\text{an}^{-1}$ de flux liquide, représentant 21% pour le flux global de sédiments et 30% pour le flux liquide global.
- **Europe** : Les fleuves en Europe contribuent faiblement au flux de sédiments transportés à l'échelle mondiale. Le flux solide total exporté par les fleuves européens est estimé à 680 Mt.an^{-1} pour un flux liquide total de $2680 \text{ km}^3.\text{an}^{-1}$ (Syvitski et al, 2005).
- **Afrique** : Le flux solide total exporté par les fleuves africains vers l'océan est de 800 Mt.an^{-1} pour un débit liquide de $3800 \text{ km}^3.\text{an}^{-1}$, ce qui représente respectivement 6% et 10% du flux de sédiments et de l'eau. Le faible relief, le ruissellement modéré et l'intense couverture végétale forestière dans la partie équatoriale sont responsables du faible transport solide des systèmes africains (Milliman et Meade, 1983).
- **Asie** : le flux solide exporté par les fleuves asiatiques est de 6740 Mt.an^{-1} pour un débit liquide total de $14670 \text{ km}^3.\text{an}^{-1}$ (Syvitski et al, 2005), ce qui représente, respectivement 54% et 38% des flux globaux solide et liquide. Ce continent comporte des petits fleuves montagneux, drainant la Nouvelle Zélande, Taiwan, l'Indonésie, la Malaisie et les Philippines. L'importance des petits bassins montagneux a été mise en évidence à l'échelle globale quand Milliman et Syvitski (1992) ont montré que ces systèmes peuvent avoir des taux d'érosion excessivement importants comme dans le cas des rivières en Nouvelle Zélande et à Taiwan (Milliman et Syvitski, 1992).

Le tableau 4 montre qu'il existe une forte variabilité spatiale des flux sédimentaires à l'échelle mondiale, et le continent transportant le plus de matières particulaires issues de l'érosion mécanique est l'Asie.

Tableau 4 : Tableau des surfaces, des flux liquides et des flux solides de différents continents du monde et de ses fleuves majeurs. Source : Milliman et Meade, 1983; Walling et Fang, 2003, Syvitski et al, 2005 ; Meade et Moody, 2010. D'après Thi Ha DANG 2011.

Nom	Surface (10 ⁶ km ²)	Flux liquide (km ³ /an)	Flux sédimentaire (10 ⁶ t/an)
Amerique du Nord	21	5820	1910
St. Laurent	1.03	447	4.0
Hudson	0.02	12	1.0
Mississippi	3.27	580	210
Brazos	0.11	7.0	16
Colorado	0.64	20	0.10
Columbia	0.67	251	8.0
Fraser	0.22	112	20
Yokn	0.84	195	60
Copper	0.06	39	70
Susitna	0.05	40	25
MacKenzie	1.81	306	100
Amerique du Sud	17	11540	2450
Chira	0.02	5.0	4.0
Magdalena	0.24	237	220
Orénoque	0.99	1100	210
Am azon	6.15	6300	900
Sao Francisco	0.64	97	6.0
Colorado	0.637	13	0.1
La Plata	2.83	470	83
Europe	10	2680	680
Rhone	0.09	49.0	10.0
Po	0.07	46	15
Danube	0.81	206	67
Dordogne	0.015	21.9	0.9
Seine	0.065	12.9	0.58
Rhine	0.19	72.5	3.14
Loire	0.12	27.4	0.96
Afrique	20	3800	800
Nil	2.9	83	120
Niger	1.2	192	40
Zaire-Congo	3.7	1325	32
Sénégal	0.42	22	-
Zambèze	1.4	108	48
Orange	0.94	9.4	5.1
Asie	31	9810	4740
Am ur	1.85	325	52
Lia che	0.17	6	41
Da ling	0.02	1	36
Ha iho	0.05	2	81
Hua nghe	0.77	49	1080
Ya ngtze	1.94	900	478
Hua ihe	0.26	-	14
Pearl	0.44	302	69
Fleuve Rouge	0.15	123	130
Mekong	0.79	470	160
Irra waddy	0.43	428	265
Gange/Brahm apoutre	1.48	971	1670
Mehand i	0.13	67	2
Da modar	0.02	10	-
Godavari	0.31	84	96
Indus	0.97	238	100
Tigre-Euphrates	1.02	46	-
Murray -Darling	1.06	23.6	30
Lany ang Hsi	0.0008	1.8	8.2

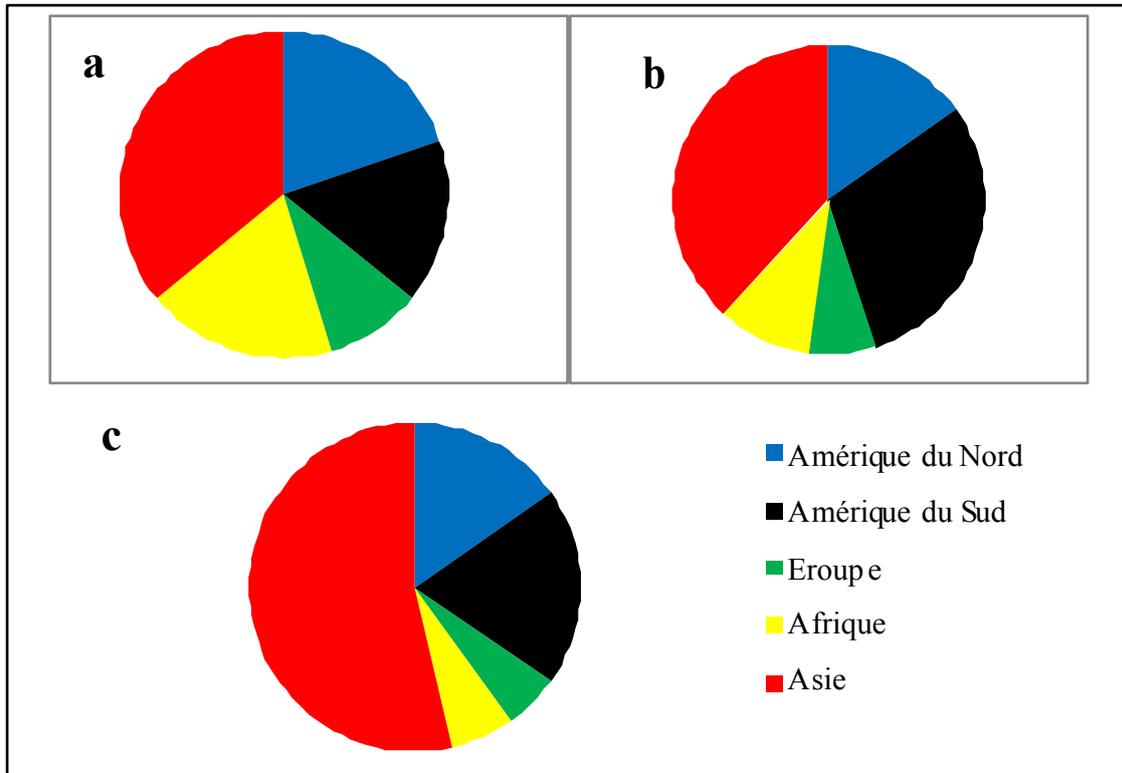


Figure 13 : Distribution relative des différents continents en terme de (a) superficies de bassins versants, (b) flux mondiaux liquides et (c) flux mondiaux solides. D'après Milliman et Meade, 1983 ; Syvitski et al, 2005.

L'équation proposée par Ludwig et al. (1998) pour estimer les taux d'exportation de matières en suspension ($t.km^{-2}.an^{-1}$) peut se résumer à trois paramètres : le ruissellement (Q), l'indice de variabilité des précipitations de Fournier (Four, calculé comme le rapport au carré des précipitations mensuelles du mois le plus humide sur les précipitations moyennes annuelles) et la pente.

$$F_{MES} = 0,020 (Q \times \text{pente} \times \text{Four}) \quad \text{nb de fleuves} = 58, \quad r=0,91.$$

En appliquant cette équation à l'ensemble des terres émergées, le flux total calculé est de $14.8 \text{ Gt}.an^{-1}$.

Cette équation peut être complexifiée pour améliorer les résultats en ajoutant un index caractérisant la dureté des roches. Les coefficients de régression de l'équation proposée varient

alors quelque peu si les fleuves et rivières sont regroupés suivant leurs caractéristiques climatiques. Il est à noter que les coefficients sont alors plus grands pour les zones sous climat sec indiquant une érodabilité plus grande que pour les zones humides. Ces équations ont été appliquées à l'ensemble des terres émergées permettant d'obtenir une carte globale des flux spécifiques (fig. 14).

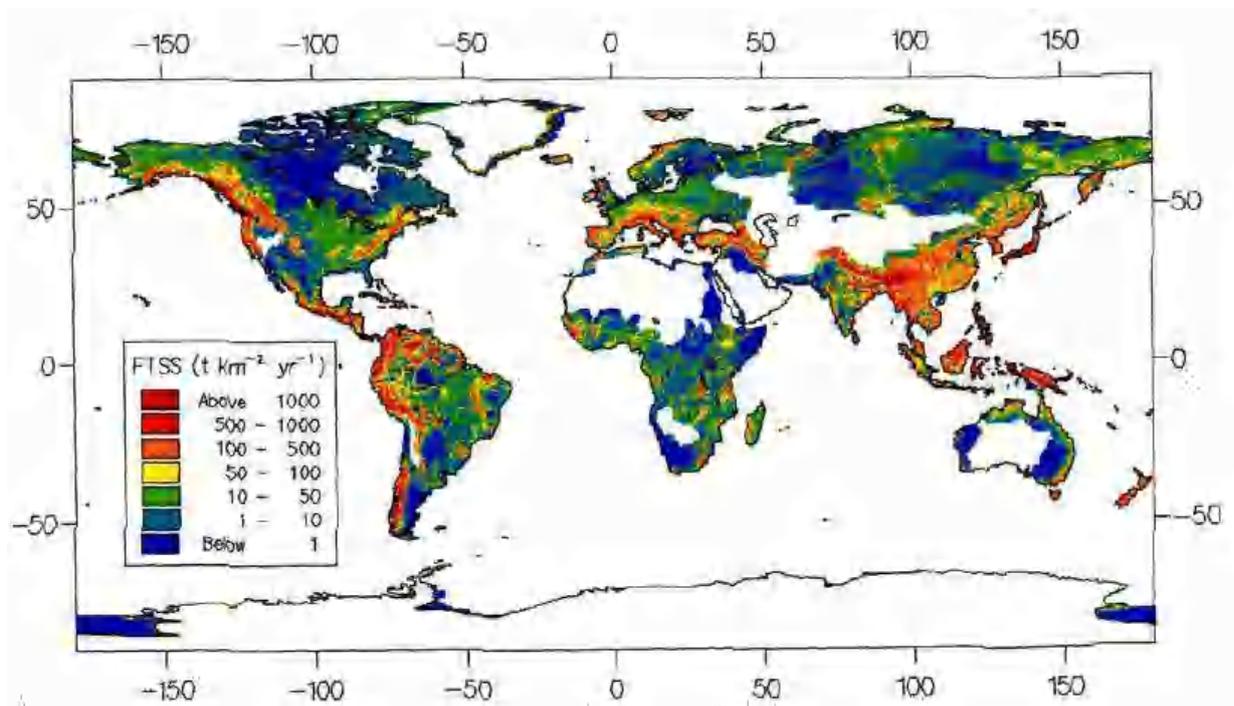


Figure 14 : Flux de sédiments spécifiques ($t.km^{-2}.an^{-1}$) sur les continents modélisés avec les relations empiriques (Ludwig, 1997). D'après Coynel (2005)

6-Impact du facteur anthropique sur l'érosion et le transport solide

De nombreuses études ont montré l'impact des activités humaines sur les transports des sédiments (Meybeck, 2002 ; Syvitski et al, 2005 ; Nilsson et al, 2005 ; Syvitski et Milliman, 2007). Farnsworth et Milliman (2003) ont montré que les changements dans les méthodes agricoles et les reforestations depuis les années 1950 ont permis de diminuer les flux de sédiments en Europe et en Amérique du Nord tandis que d'autres auteurs (Kao et Liu, 1997 ; Kao et Liu, 2002) ont montré que la construction de routes et les activités liées à l'agriculture intensive dans un bassin taiwanais ont provoqué une augmentation des flux de sédiments de 18 à 40 fois.

Syvitski et al. (2005), ont mis en évidence deux tendances opposées d'évolution des flux de sédiments à l'échelle globale pour les périodes avant et après la construction de réservoirs : d'une part, le flux de sédiments global augmente, résultant des activités de déforestation, construction de routes, urbanisation, etc. ; d'autre part, le flux de sédiments diminue en raison de la sédimentation dans les réservoirs.

Le phénomène de sédimentation dans les réservoirs a fait diminuer substantiellement les flux en MES transportés par les fleuves vers la zone côtière et l'océan. Deux exemples extrêmes de l'impact des réservoirs sur les flux de sédiments exportés sont celui du réservoir d'Assouan sur le Nil qui a réduit le flux annuel de sédiment de $100 \times 10^6 \text{ t.an}^{-1}$ à presque zéro (Walling et Fang 2003) et celui du Colorado dans le Grand Canyon dont les flux ont diminué de $135 \times 10^6 \text{ t/an}$ à $0.1 \times 10^6 \text{ t.an}^{-1}$ de sédiments exportés vers le Golfe de Californie (Holeman, 1968, Lisitzin, 1972 ; Milliman et Meade, 1983).

A l'échelle globale, Vörösmarty et al. (2003), en étudiant 45 000 barrages mondiaux, dont 633 barrages avec un volume $> 0.5 \text{ km}^3$, ont estimé que plus de 40% du flux liquide et 50% du flux solide étaient piégés dans les barrages (fig. 15).

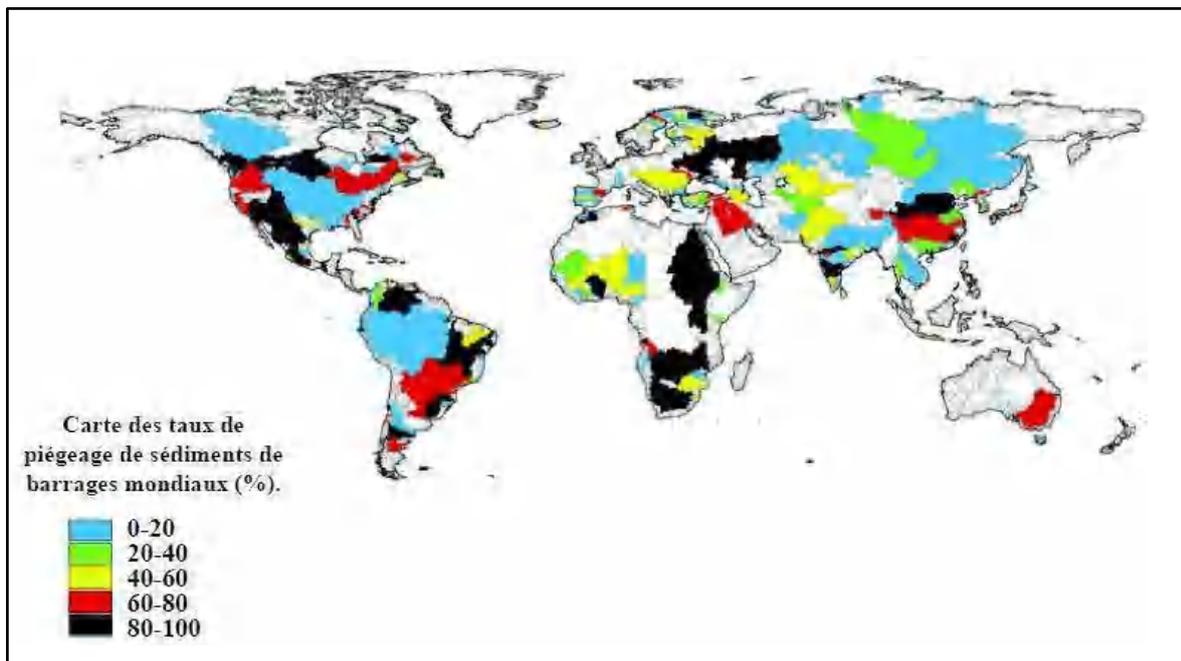


Figure 15 : Répartition géographique globale des taux de piégeage des sédiments retenus dans les grands barrages étudiés (Vörösmarty et al, 2003). D'après Coynel (2005).

7- Les travaux effectués sur le transport solide en Algérie

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

7-1-Tixeront (1960)

Ses travaux sont basés sur les données de 32 bassins d'Algérie et 9 bassins de la Tunisie, dont la superficie varie de 90 à 22300 km². Les observations portent sur une durée variant de 2 à 22 ans. L'auteur a procédé à la correction et l'homogénéisation des séries qui figurent dans les annuaires hydrologiques de l'Algérie. Après avoir regroupé les bassins en trois classes, suivant un critère régional. Tixeront propose 3 relations :

$$A = 354 R^{0.15} \text{ (bassins Tunisiens)}$$

$$A = 92 R^{0.21} \text{ (région de l'Est algérien)}$$

$$A = 200 \text{ (région centre Algérie)}$$

A : apports solides spécifiques moyens annuels (t.km⁻².an⁻¹)

R : écoulement annuel total (mm).

7-2-SOGREAH (1969)

L'étude est basée sur les données d'observation recueillies sur 27 bassins d'Algérie (dont 16 alimentant des barrages réservoirs), totalisant 282 années-stations. Les résultats Sogreah, inspirées des relations Tixeront, donnent les apports solides spécifiques A (t.km⁻².an⁻¹) en fonction de ruissellement annuel de crue (mm) et de la perméabilité des bassins :

Perméabilité élevée $A = 8.5 R^{0.15}$

Perméabilité moyenne à élevée $A = 75 R^{0.15}$

Perméabilité faible à moyenne $A = 350 R^{0.15}$

Perméabilité faible $A = 1400 R^{0.15}$

Imperméable $A = 3200 R^{0.15}$

A est la dégradation spécifique exprimée en t.km⁻².an⁻¹

R est la lame d'eau annuelle moyenne écoulée exprimée en mm.

7-3 Formule I.N.R.H. (1982)

Elaborée à partir des données recueillies dans 30 bassins versants d'Algérie, de superficie comprise entre 100 et 3000km², soumis à une pluviométrie comprise entre 300 et 1000mm.

$$TSS = 26.62IL + 5.07 IP + 9.77CT - 593.56$$

TSS : transport solide spécifique moyen annuel en $t.km^{-2}.an^{-1}$;

IL : indice lithologique= superficie des formations marneuses et argileuses du Crétacé Supérieur et du Tertiaire exprimée en pourcentage de la superficie totale du bassin ;

IP : indice des précipitations érosives , fait intervenir le pourcentage des précipitations annuelles tombées sous forme de pluies journalières supérieures à 20 mm et le nombre annuel de ce type de précipitation ;

CT : coefficient de torrentialité = $Dd * F1$ (Dd : densité de drainage, $F1$: Fréquence des thalwegs élémentaires).

La validité d'application de cette formule est limitée aux bassins comportant un pourcentage de formations marneuses érodables supérieur à 10% et une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 300 mm.

7-4-Demmak (1982)

En se basant sur les données observées, durant la période 1972/79, sur 30 bassins versants de l'Algérie du Nord, particulièrement touchée par l'érosion, l'auteur constate 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 $1 t.ha^{-1}.an^{-1}$) au transport solide des oueds. Pour lui, l'essentiel se passe autour des oueds. Le sapement des berges est une source majeure des sédiments directement mobilisés par les oueds lors des fortes crues. Il confirme l'inaptitude en Algérie des techniques de lutte antiérosives. Il a montré que le pourcentage de marnes et d'argiles affleurantes, le pourcentage des précipitations journalières supérieures à un certain seuil (20 ou 30 mm) et le coefficient de torrentialité sont déterminants pour le transport solide. Il synthétisa ses travaux par une relation valable pour les bassins de l'Atlas tellien liant les apports solides spécifiques moyens annuels à des indices lithologiques, pluviométriques et géomorphologiques.

7-5-Meddi (1992)

En se basant sur les données pluviométriques, hydrométriques et des transports solides, l'auteur a entrepris une étude hydrologique sur le bassin de l'oued Mina et a choisi pour ses analyses quatre sous bassins : l'Oued el Abd, l'oued Haddad, l'Oued Tat et Oued el Abtal. L'auteur constate que le bassin versant de l'oued Haddad a une dégradation spécifique très élevée par rapport aux autres bassins. Le contexte topographique, le 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 (1992) tenta d'établir, pour chaque bassin, des relations entre le transport solide, la pluie, le débit liquide. Il conclut que dans l'ensemble ce sont l'humidité du sol et le débit liquide de pointe qui expliquent les variations 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 les variations de la turbidité en saison chaude. En effet, les hautes températures accroissent l'aptitude de l'eau à détruire les agrégats du sol.

7-6-Terfous et al (2001)

L'étude est basée sur l'exploitation des données de prélèvements instantanés des débits liquides et des concentrations dans le cours d'eau de l'oued Mouilah entre 1977 et 1993. Les résultats obtenus montrent que le flux des matières solides en suspension dans le cours d'eau est très variable d'une année à une autre et la dégradation spécifique moyenne est estimée à $126 \text{ t.km}^2.\text{an}^{-1}$

7-7-Benkhaled et Remini (2003)

L'étude est réalisée à partir des données collectées durant la période 1972 à 1989. Ils ont étudié les variations et les caractéristiques des différentes relations qui existent entre la concentration en MES et le débit, de l'oued Ouahrane et ils ont montré que la dispersion des points de C et Q est une caractéristique très importante qui, avec d'autres aspects liés à l'allure du graphe, permet d'effectuer des combinaisons, en liaison avec le phénomène d'hystérésis.

7-8-Megnounif A, Terfous A, et Bouanani A. (2003)

Les auteurs se sont intéressés dans leur travail aux sédiments transportés en suspension par l'oued Tafna à Beni-Bahdel, pour la période allant de septembre 1988 à Aout 1993. L'analyse de la variabilité de la charge en suspension montre une production très forte en automne mais d'une faible ampleur au printemps. En automne, le flux des matières solides en suspension représente 44% de flux annuel estimé à 28600 tonnes. Au printemps, malgré l'augmentation des débits (60% de l'apport annuel), la charge en suspension diminue considérablement.

7-9-Megnounif A., Terfous A. Ghenaim A. et Poulet J.P. (2004)

Cette étude a pu mettre en évidence le rôle des crues dans la genèse et le transport des sédiments en suspension dans un petit bassin versant Méditerranéen. Les auteurs se sont intéressés à l'Oued Sebdou, cours d'eau principal drainant le bassin versant de la Haute- Tafna,

situé au nord-ouest algérien. Pour ce faire, ils ont étudié, pour différents épisodes de crue, le mode d'évolution de la charge solide en fonction des débits liquides en s'appuyant sur l'analyse des hystérésis. Les résultats obtenus montrent que le transport des matières solides en suspension se fait principalement durant les épisodes de crue. En effet, sur un apport annuel moyen en eau, estimé à 30,9 millions de m³, les crues contribuent pour 64%. Cependant, elles transportent la quasi-totalité, soit 93%, de la charge solide en suspension évaluée en moyenne annuelle à 286000 tonnes

7-10-Achite M., et Meddi M. (2004)

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

7-11-Achite M., et Meddi M. (2005)

Les données de cinq sous bassins de l'Oued Mina sur une période de 22 ans (1973 à 1995) ont été utilisées pour développer un outil statistique de quantification des apports. Les valeurs du transport solide trouvées pour l'automne sont les plus élevées. Cette variabilité s'explique par la variation du couvert végétal (sols nus) durant l'année et la nature agressive des pluies d'automne.

7-12-Bouanani (2004)

Son travail constitue une première contribution dans l'analyse des phénomènes hydrologiques, du transport solide et de la modélisation du bassin versant de la Tafna. Il apporte

beaucoup d'éléments de base à une recherche de modèles hydrologiques, régissant l'écoulement superficiel et le transport solide en suspension dans ce bassin.

7-13-Khanchoul, (2006)

Dans sa thèse d'Etat, il a procédé à l'analyse des transports solides à l'échelle des événements hydrologiques extrêmes (les crues) pour les cours d'eau dans cinq bassins de l'Est algérien dont trois situés dans la Seybouse (oued Bouhamdane à Medjez Ammar II, oued Ressoul à Ain Berda, oued Mellah à Bouchegouf).

7-14-Larfi B, et Remini B. (2006)

L'étude est basée sur les données d'observation recueillies au niveau de la station de Lakhdaria s'étalant sur la période de 1984 à 1997. Ils concluent que les volumes les plus importants en transport solide se concentrent durant la période allant de décembre à mars (parfois même jusqu'à avril). Cette étude montre que la quantification du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Isser donne les résultats très cohérents avec les mesures directes de l'envasement dans la retenue de Béni Amrane.

7-15-Ghenim A, Seddini A et Terfous A (2008)

L'étude est basée sur les mesures instantanées des débits liquides et des concentrations réalisées par les services de l'A.N.R.H. Les auteurs se sont intéressés à l'Oued Mouillah qui constitue le plus important affluent de la Tafna. Pour ce faire, ils ont étudié, pour les différents épisodes de crue, leur rôle dans l'amplification du transport solide ainsi que le comportement du bassin lors de ces événements exceptionnels. Cette étude permet de souligner l'importance des crues dans la genèse et le cheminement des particules solides vers l'exutoire des bassins. Elle met aussi en évidence la complexité de ce phénomène dans les zones semi-arides.

7-16-Remini et al (2009)

A étudié les problèmes des pertes en eau des barrages algériens. Il s'est intéressé également aux aspects techniques concernant la chasse des sédiments, le soutirage et le dragage des retenues des barrages. D'après les mesures de 2006, Remini estime l'envasement des 57 grands barrages algériens à $45 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$, avec de fortes disparités d'un site à l'autre et une importante augmentation de l'érosion dans certains bassins au cours des dernières décennies. Les mesures de l'évaporation, effectuées sur 39 grands barrages, indiquent une perte annuelle moyenne de 250

Mm³, soit 6,5 % de leur capacité maximale. Les pertes par infiltration incontrôlée dans les rives et fondations évaluées dans 22 barrages s'élèvent à 40 Mm³.an⁻¹.

7-17-Touaibia et al (2009)

Les auteurs ont examiné les données de 22 années d'observations (1973/74-1994/95) de concentrations en éléments fins en suspension observés à deux stations hydrométriques, contrôlant des sous-bassins adjacents, en zone semi-aride (bassin versant de l'oued Mina). Leurs apports se rejoignent dans le barrage en exploitation de Sidi M'hamed Bénaouda (SMB). Plusieurs approches temporelles de mise en forme et de traitement des données sont considérées. Le but principal de cette étude est de rechercher un modèle statistique significatif reliant le débit solide au débit liquide. Ils ont obtenu que l'approche mensuelle avec un modèle en loi de puissance reste la plus significative, expliquant en moyenne 80% de la variance totale. L'automne constitue une saison particulièrement productive en sédiments, véhiculant en moyenne plus de 50% de l'apport solide moyen interannuel.

7-18-Cherif E, Errih M, et Madani Cherif H. (2009)

Ce travail constitue une première contribution à l'analyse des phénomènes hydrologiques, du transport solide et de la modélisation du bassin versant de la Mekerra (Nord-Ouest de l'Algérie). Il apporte beaucoup d'éléments de base à une recherche de modèles hydrologiques, régissant l'écoulement superficiel et le transport solide en suspension dans ce bassin. Sur la base des mesures continues réalisées dans la station de Sidi Ali Benyoub (Janvier 1950–Août 2001), ils ont calculé les différentes valeurs des paramètres de l'écoulement liquide et du transport solide. Ils ont trouvé que la station de Sidi Ali Benyoub est principal foyer de production de sédiments, fournissant la grande partie des matériaux transportés par l'oued. Ceci tient surtout aux fortes pentes des versants et à l'état du couvert végétal très faible dans cette partie du bassin versant de la Mekerra. En automne, le sol est encore dénudé, alors qu'au printemps la couverture herbacée est déjà développée et réduit considérablement la mobilisation des matériaux fins.

7-19-Touaibia L, et Ghenim A. (2011)

L'étude se base sur les données de mesures instantanées de débits liquides et de concentration des sédiments en suspension enregistrées au cours de la période allant de 1973 à 1994 relevées à la station de Medjez. Cette étude examine 9 approches de quantification

statistique de l'érosion pour adopter celle qui estime l'apport solide avec un minimum d'erreur relative. Les deux modèles les plus adaptés considèrent un découpage par crue ou un découpage mensuel. La méthode qui tient compte uniquement des crues donne le meilleur résultat avec une erreur relative de 23%.

7-20-Bouanani et al (2013)

Cette étude porte sur la quantification du transport solide et du taux d'érosion ainsi que sur la détermination des périodes d'érosion actives et la recherche d'un modèle reliant les débits solides aux débits liquides au niveau de l'oued Sikkak, sous bassin de la Tafna. L'étude est basée sur les valeurs instantanées des débits solides en suspension et des débits liquides effectuées au niveau de la station d'Ain Youcef (de 1972 à 1990). Ils ont montré que 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 $170 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ variant de 4 à $745 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

7-21-El Mahi, A., Meddi, M., et Bravard, J.-P., (2012)

L'étude porte sur l'analyse des variations des flux de matières en suspension dans le bassin versant de l'Oued El Hammam, un sous bassin de l'Oued Macta. Cette approche est basée sur l'exploitation d'un nombre important de mesures des concentrations et des débits liquides, effectuées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). L'étude de la relation C-Q à l'échelle de la crue a été modélisée par une fonction puissance. Une analyse statistique de la constante a et de l'exposant b a été menée afin d'expliquer le comportement de ces deux paramètres et de mieux comprendre l'aspect aussi bien pratique que théorique des processus.

7-22-Louamri, (2013)

Dans sa thèse en Sciences, a étudié les transports solides de quatre sous- bassins équipés de stations hydrométriques de la Seybouse (oued Cherf à Aioun Settara, oued Bouhamdane à Medjez Ammar II, oued Ressoul à Ain Berda, oued Mellah à Bouchegouf). Il a procédé à l'analyse des transports solides à l'échelle inter-annuelle, et inter-mensuelle. Il a également étudié l'envasement du barrage de Hammam Debagh.

7-23-Hallouz F, Meddi M et Mahé G, (2013)

Le travail est basé sur les données du bassin versant de l'Oued Mina. Les auteurs ont entamé une étude pour mieux comprendre le phénomène des exportations de matières solides en

suspension véhiculées par les affluents du bassin de l'Oued Mina, et de quantifier le flux des sédiments susceptibles de se déposer dans le barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda (capacité de stockage de 153 millions de m³, mis en service en Février 1978). Les transports solides en suspension dans le bassin versant de l'Oued Mina se déroulent essentiellement en automne, et secondairement au printemps, avec une plus faible ampleur. La charge spécifique moyenne de l'Oued Mina est de 211 t.km⁻².an⁻¹.

7-24-Gheraout, (2014)

L'auteur a abordé une recherche d'un modèle régressif pouvant expliquer le débit solide par le débit liquide au niveau de deux stations hydrométriques d'Oued El Abtal et Sidi AEK Djilali dans le bassin de la Mina. Il montre que le T.S.S moyen annuel est de 450.23 et 288.495 t.km⁻².an⁻¹ respectivement au droit des stations d'Oued El Abtal et Sidi AEK Djilali. Par ailleurs, il constate que la retenue du barrage de SMBA reçoit annuellement 2.705 MT de sédiments fins et grossiers. Ainsi, il s'intéresse à la relation concentration-débit pendant les événements des crues. L'analyse des boucles d'hystérésis permet de faire ressortir trois modèles d'hystérésis dominants, le modèle sens des aiguilles d'une montre, sens contraire des aiguilles d'une montre et modèle en forme de huit.

7-25-Elahcene, et al, (2013)

Il s'intéresse à l'étude du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Bellah. L'étude est basée sur l'exploitation des données de prélèvements instantanés des débits liquides et des concentrations des sédiments transportés en suspension dans le cours d'eau effectués par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques entre 1974 et 2007. Les résultats obtenus montrent que la dégradation spécifique moyenne annuelle est de l'ordre de 610 t.km⁻².an⁻¹. L'analyse de l'évolution de la concentration des sédiments dans le cours d'eau et la quantification du flux de sédiments ont montré que l'apport sédimentaire se fait essentiellement pendant les crues. L'auteur distingue trois périodes d'érosion active, la première, intense en hiver, les deux autres de plus faible ampleur au printemps et en automne.

7-26-Megnounif, Terfous et Ouillon (2013)

L'étude est basée sur les données instantanées des débits liquides et des concentrations en MES lors des événements de crues d'une période de 31 ans (1973-2004) dans le bassin versant de

l'oued Sebdou. 131 crues ont été sélectionnées et analysées. Ils ont utilisé une nouvelle méthode d'analyse graphique en fonction des caractéristiques des boucles d'hystérésis pour quantifier la contribution des sources de sédiments dans le bassin versant. Sept classes d'hystérésis ont été établies. Le résultat trouvé montre que 77% des sédiments en suspension total sont attribués à l'érosion du lit ou des ravines. La partie restante soit 23% a été produite des versants. Les crues à hystérésis horaire et antihoraire sont les plus fréquentes dans ce bassin. Les auteurs ont trouvé que les cinq plus grandes crues cumulent 64% du total des flux de sédiments en suspension. La saisonnalité des crues se caractérise par des crues courtes et très forte turbidité en été, des crues fréquentes, courtes et turbides en automne, des crues longues en hiver et au printemps avec peu de turbidité en hiver et modéré au printemps.

7-27-Yles et Bouanani (2016)

Ce travail s'intéresse à l'étude de la relation entre la concentration de sédiments en suspension C et le débit liquide Q_l , pour les crues. Ils ont analysé 11 crues enregistrées sur l'oued Saïda à partir de l'allure des graphes représentant C en fonction de Q_l qui dessinent trois modèles de courbes d'hystérésis : dans le sens horaire, antihoraire et en forme de huit. Le modèle horaire est surtout observé pour des crues d'automne. Les hystérésis antihoraire et en forme de huit sont surtout caractéristiques des crues d'hiver et de printemps.

7-28- Hayet Madani Cherif, Khanchoul, Bouanani, Terfous (2017)

Ce travail étudie l'hydrodynamique et la variabilité du flux et du rendement des sédiments dans l'oued El Hammam, situé dans une région semi-aride d'Algérie. Ils ont montré que les changements dans la disponibilité des sédiments se traduisent par des effets d'hystérésis. Dans ce travail, différentes boucles d'hystérésis sont analysées: boucles d'hystérésis avec sens horaire, boucles d'hystérésis antihoraire et boucle en forme en huit. L'analyse des rendements saisonniers des sédiments a montré que la saison automnale contribue dans une grande proportion du rendement annuel des sédiments (62%).

7-29-Sid Ahmed Bouguerra, Abderrazak Bouanani et Kamila Baba-Hamed (2016)

Ce travail étudie le transport solide dans un cours d'eau en climat semi-aride, c'est le cas du bassin versant de l'Oued Boumessaoud (118 km²), situé dans le nord-ouest de l'Algérie. Ils ont basé sur les valeurs instantanées de débits liquides et de débits solides en suspension pour la

période allant de septembre 1988 à août 2004. L'exploitation de ces données a permis de mettre en évidence la variabilité annuelle et saisonnière de l'apport solide, et d'examiner l'ampleur du phénomène pendant les périodes d'érosion active de l'année où la contribution des crues s'est élevée à 71 % durant la saison de l'automne. Les résultats de ce travail montrent que la dégradation spécifique moyenne est de l'ordre de $518 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. L'approche statistique abordée, qui est une régression reliant les deux variables débit liquide (Q_L) et débit solide (Q_S), a été testée à différentes échelles temporelles; les modèles générés sont de type puissance ($Q_S = aQ_L^b$), où les débits liquides expliquent globalement plus de 80 % de la variance du transport solide.

7-30-Remini (2017)

L'étude est basée sur la collecte et le dépouillement des données d'une centaine de levés bathymétriques effectués par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts. Elle examine l'évolution de l'envasement des barrages en Algérie depuis la réalisation du premier barrage jusqu'en 2014. Les résultats obtenus montrent qu'après 160 ans d'exploitation l'envasement a atteint 1,7 milliards de m^3 dans les 74 barrages pour une capacité de 8,5 milliards de m^3 d'eau, soit une perte de capacité de 20%. Le taux d'envasement a atteint 65 millions de m^3/an . Dans ce travail, l'auteur a établi un classement des barrages sur la base du taux de comblement annuel. A la fin de l'année 2017, Remini estime le volume de boue déposé dans les 74 barrages à 1,9 milliards de m^3 .

Conclusion

La complexité et la forte variabilité spatio-temporelle du phénomène d'érosion hydrique à un impact direct sur le transport solide en suspension. Cette complexité se traduit par le nombre et la diversité des modèles de transport de MES existants. Parmi ces méthodes, la régression (rating curve) est la plus envisagée par plusieurs chercheurs. L'application de cette régression, sa fiabilité et sa précision feront l'objet du chapitre 7.

Chapitre 3:
Présentation du bassin

Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons l'étude du contexte physico-géographique pour caractériser le bassin versant de l'oued Isser et faire ressortir les principaux facteurs qui influent sur les écoulements liquides, et sur la dynamique des matières en suspension et les transports solides des oueds.

1-Situation géographique

Le bassin versant de l'oued Isser présente à l'instar des bassins à écoulement exoréique de l'Algérie du Nord, une extension latitudinale importante. Il est situé à 60 km au Sud-Est d'Alger. D'une superficie de 4149 km², il est limité au Nord Est par le bassin côtier algérois est, au Sud Est par le bassin du Chott Hodna et le bassin de la Soummam, au Sud-Ouest par le bassin du Cheliff et au Nord-Ouest par le bassin côtier algérois ouest (fig 16).

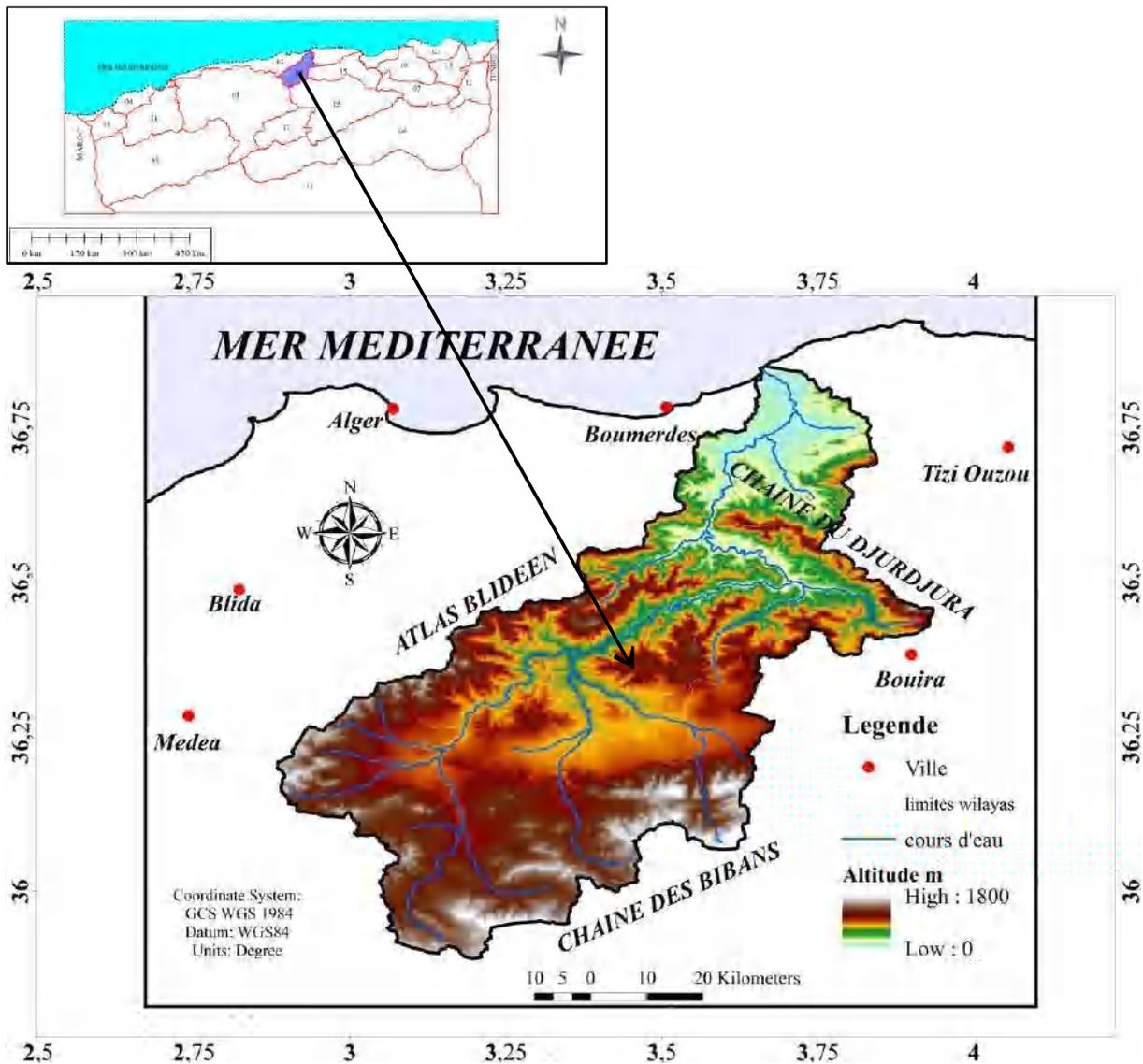


Figure 16 : Situation géographique du bassin versant de l'Isser

Le bassin versant de l'Isser présente une forme allongée d'orientation Sud-Sud-Ouest/Nord-Nord-Est. Il est situé dans une zone montagneuse, entouré par trois grands massifs (l'Atlas Blidéen, le Djurjura et la chaîne des Bibans). Les Hautes Plaines de Bouira constituent la partie centrale du bassin versant avec des altitudes entre 600 et 800 mètres.

L'Atlas Blidéen, par son versant oriental (massif de Tablat) détermine la limite du côté Nord-Ouest du bassin versant. Son point culminant est à la limite Nord-Ouest du bassin versant au djebel Tamezguida à environ 1139 mètres, tandis que les chaînes du Djurjura et des Bibans représentent l'extrême limite du bassin sur son côté Est et Sud-Sud-Est respectivement.

Du point de vue administratif, ce bassin se trouve à la limite des wilayas de Médéa au Sud-Ouest, Bouira au Sud-Est, Tizi Ouzou au Nord-Est et Boumédès au Nord-Ouest.

L'Isser débouche en mer Méditerranée dans la baie de Zemmouri, son embouchure est localisée à 60 km au Nord-Est d'Alger.

D'une manière générale, le bassin de l'oued Isser se compose d'un bassin de réception à l'amont, d'un canal d'écoulement étroit et d'un cône de déjection à l'aval. Il est subdivisé en cinq sous-bassins portant respectivement les codes 0905, 0904, 0903, 0902 et 0901 dans le répertoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) (fig 17).

Les codes et les caractéristiques géométriques des sous bassins de l'oued Isser sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau 5: Superficies et périmètres du BV de l'oued Isser et de ses SBV

Paramètre	Bassin versant de l'Isser (09)	S Bassin versant du Bas Isser (09-05)	SBV du Moyen Isser (09-04)	SBV du Haut Isser		
				SBV (09-01)	SBV (09-02)	SBV (09-03)
Superficie (km ²)	4149	548	1043	662	773	1123
Périmètre (km)	434	119	177	135	156	175

- (0905) : le sous bassin versant du Bas Isser drainé par l'oued Isser ;
- (0904) : le sous bassin versant du Moyen Isser drainé par l'oued Isser ;
- (0901-0902-0903) : ils constituent une partie du sous-bassin versant du Haut Isser, Ils sont drainés respectivement par les oueds : Malah, Yagour et Zeroua.

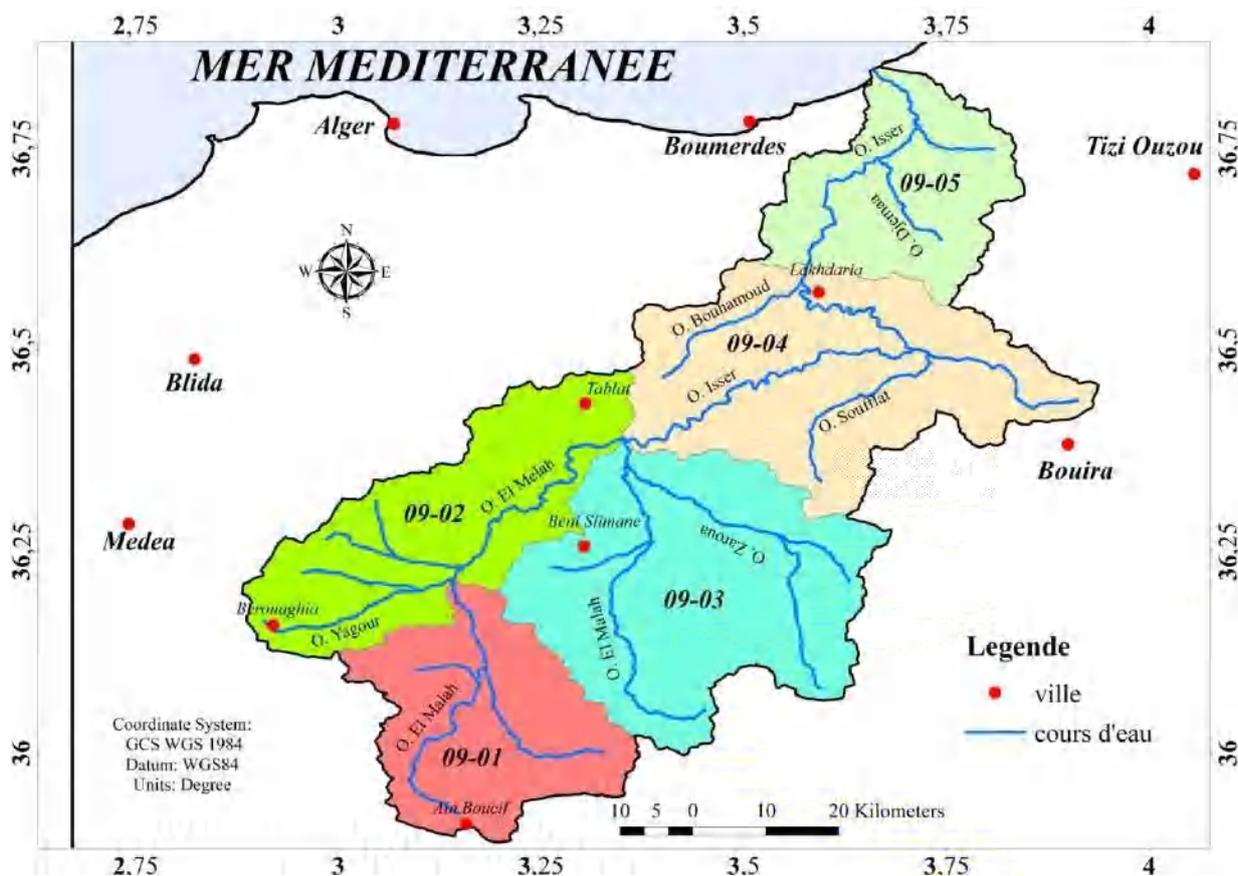


Figure 17 : Présentation des sous-bassins naturels

2- Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'oued Isser

2-1-Altitudes et pentes

Afin de mieux étudier la particularité du relief du bassin et pour mieux comprendre le comportement hydrologique du bassin versant, il est impératif de connaître ses caractéristiques morphométriques (forme, altitude, pentes...) qui conditionnent le cycle de transformation des pluies en écoulement et s'appêtent à une analyse quantifiée.

Les caractéristiques morphométriques du bassin de l'Isser à l'embouchure sont résumées dans le tableau 6. Le temps de concentration est calculé par la relation de Giandotti.

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy} + H_{min}}} \text{ Avec } L : \text{longueur de talweg principale en km ; } S : \text{surface du bassin en km}^2.$$

Tableau 6 : Principaux paramètres du bassin versant étudié

paramètres			Bassin versant
Surface	S	km ²	4149
Périmètre	P	km	434
Indice de compacité	Kc		1.88
Altitude maximale		m	1810
Altitude moyenne		m	750
Rectangle équivalent		km	98.20
Indice de pente globale	Ig	m/km	32.98
Densité de drainage		km/km ²	3.6
Temps de concentration		h	19

Le tableau 7 présente la répartition hypsométrique du bassin de l'Isser.

Tableau 7: Répartition altimétrique du bassin versant d'Isser

Tranche d'altitude (m)	moyenne (m)	Superficie Partille		
		Km ²	%	% cumulés
1600-1800	1700	1,03	0,02	0
1400-1600	1500	5,12	0,12	0,02
1200-1400	1300	76,39	1,84	0,14
1000-1200	1100	451,3	10,88	1,98
800-1000	900	891,86	21,50	12,86
600-800	700	1233,25	29,72	34,36
400-600	500	733,97	17,69	64,08
200-400	300	398,75	9,61	81,77
0-200	100	357,28	8,61	91,38
Totaux		4149	100	100

La figure 18 représente la courbe hypsométrique du bassin de l'Isser.

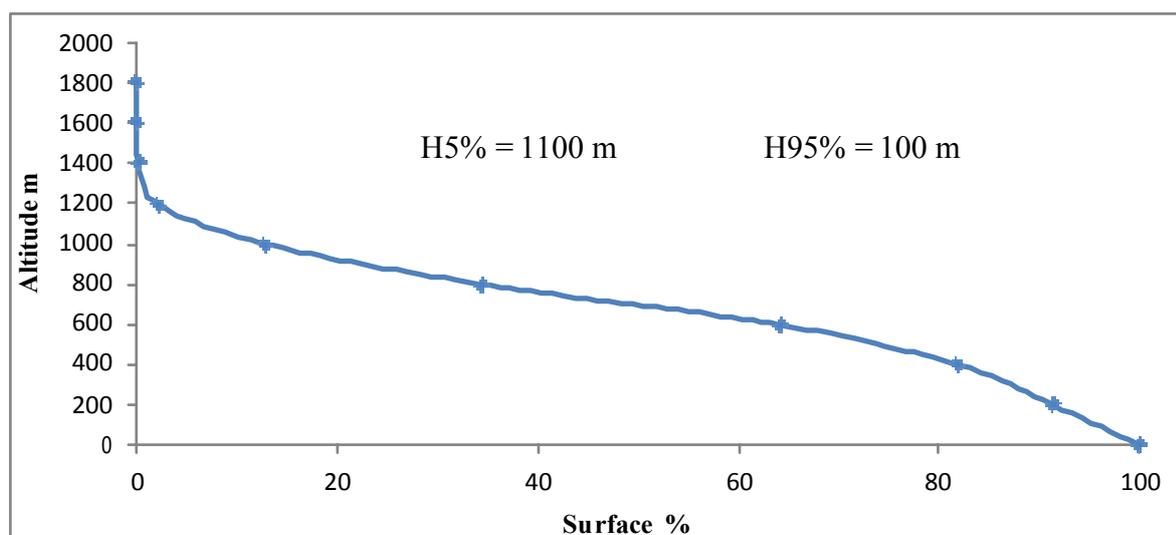


Figure 18 : Courbe hypsométrique du bassin de l'Isser

-Le Haut Isser

Son bassin versant a une superficie de 2558 km², et une altitude maximale de 1810 m au niveau de Djebel Dira qui appartient à la chaîne des Bibans. La limite avale du sous bassin coïncide avec la station du Pont de La Traille avec une altitude de 360 m. Les lignes de crête du Haut Isser se situent entre 1301m au niveau de Djebel Mahouda, 1407 m au niveau de Kef Lakhdar Cherguia, et la côte 1810 m au Djebel Dira, point culminant du bassin. Plus de 50% de la surface du Haut Isser est comprise entre les altitudes 600 à 1000 m (fig. 19).

-Le Moyen Isser

Au niveau du Moyen Isser, Le relief est plus au moins accentué, environ 64% de la superficie correspond à des altitudes qui varient entre 400 et 800m. Il se situe entre l'altitude 1130 m au Djebel Tamesguida et à 90 m à la station Lakhdaria (fig. 19).

-Le Bas Isser

Au Bas Isser, plus de 50 % de la superficie est marquée par des altitudes inférieures à 200 m. Elles sont comprises entre 0 m à l'embouchure de la baie de Zemmouri à 1031 m sur la bordure du massif occidental de Djurdjura (fig. 19).

Le massif schisto-cristallin ainsi que les roches calcaires de la dorsale kabyle divisent le Moyen Isser et le Bas Isser en deux unités distinctes. La liaison entre ces deux unités se limite à l'écoulement superficiel de l'oued Isser le long des gorges de Lakhdaria.

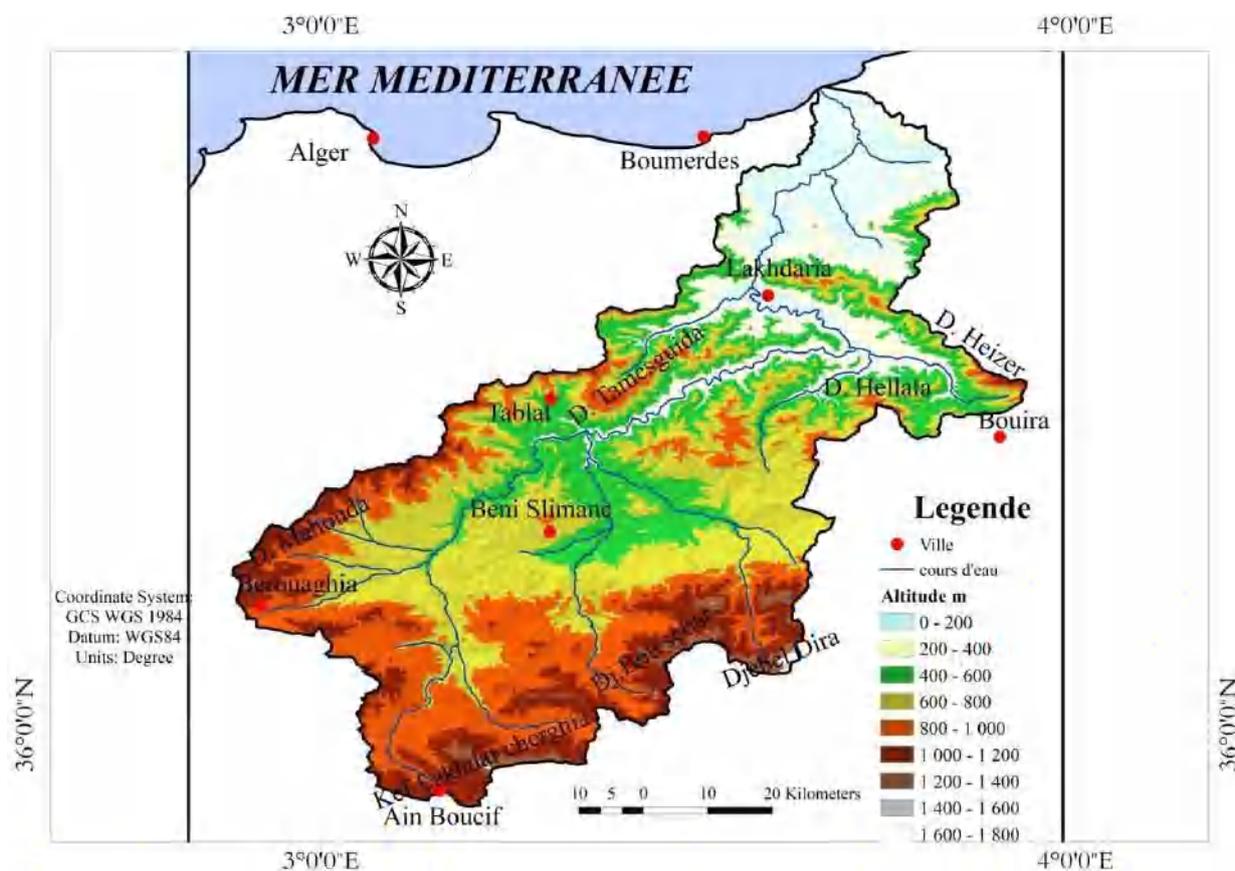


Figure 19 : Carte d'altitude du bassin versant de l'oued Isser

Le tableau 8 présente les différentes classes de pentes du bassin d'étude. La classe 12-25%, représente 34.67% de la superficie totale du bassin, ce qui favorise le ruissellement des eaux de pluies, et donc les transports des particules en suspension.

Tableau 8: Classification des pentes du bassin de l'Isser

Classe des pentes	Superficie Km ²	Pourcentage %
0-3%	281,68	6,79
3-12%	1178,48	28,40
12-25%	1438,57	34,67
25-40%	912,00	21,98
>40%	338,27	8,15

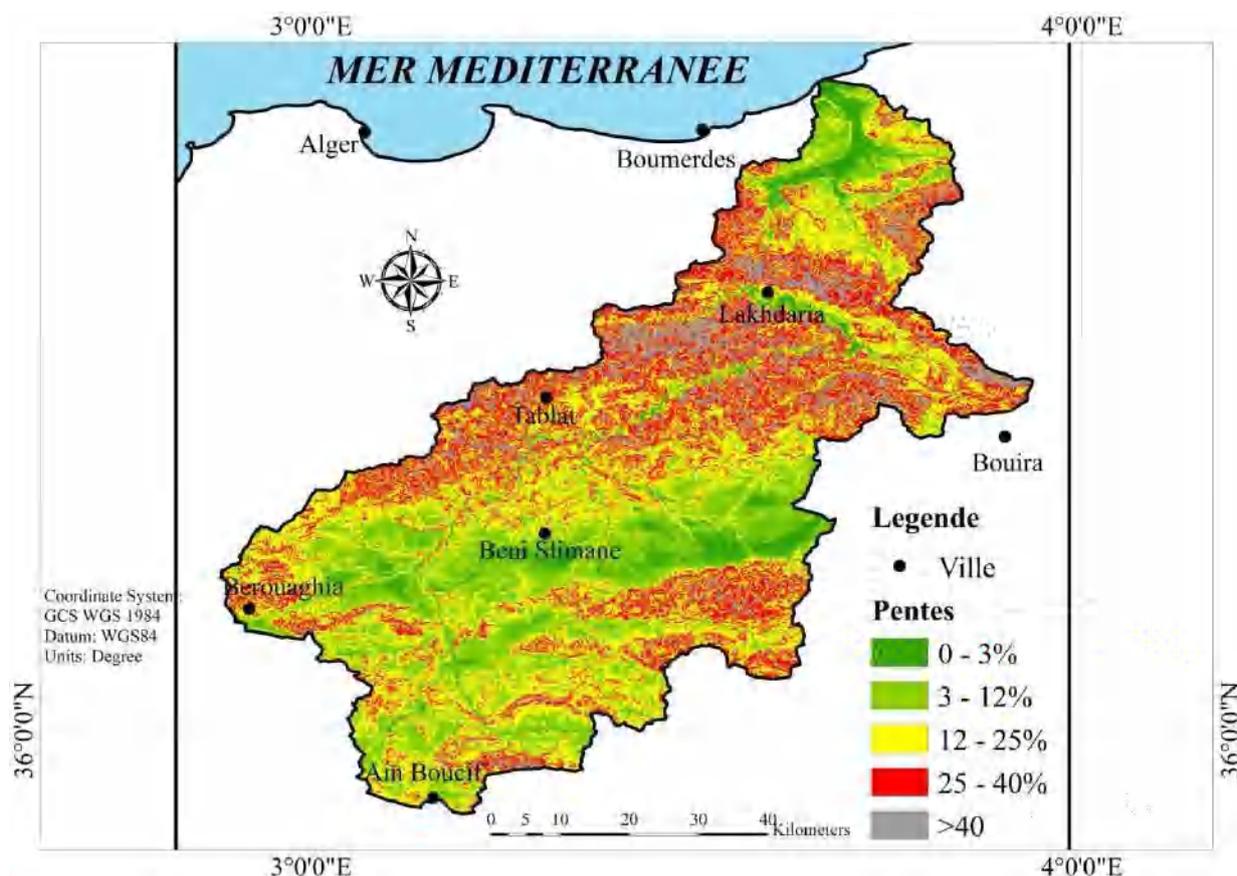


Figure 20 : Carte des pentes du bassin versant de l'oued Isser

2-2-Le réseau hydrographique

Dans le Haut Isser, les eaux qui prennent leurs sources dans les montagnes de l'Atlas tellien se rejoignent pour former l'oued EL Malah, oued Zeroua et oued Yagour. Ses derniers vont eux même se rejoindre et prendre le nom d'oued Isser au niveau du Pont de La Traille (fig 21).

Au niveau de Pont de la Traille, l'oued Isser draine environ 60% de son bassin et ne reçoit plus en aval que les oueds Soufflat, oued Bouhamoud et oued Djemaa.

Le franchissement de l'Atlas amène l'oued à changer plusieurs fois de direction avant d'atteindre les gorges de Lakhdaria qui vont lui permettre de rejoindre la plaine côtière au niveau de l'oued Isser. Il s'écoule dans une série de méandres dans la basse vallée avant de se jeter à la mer.

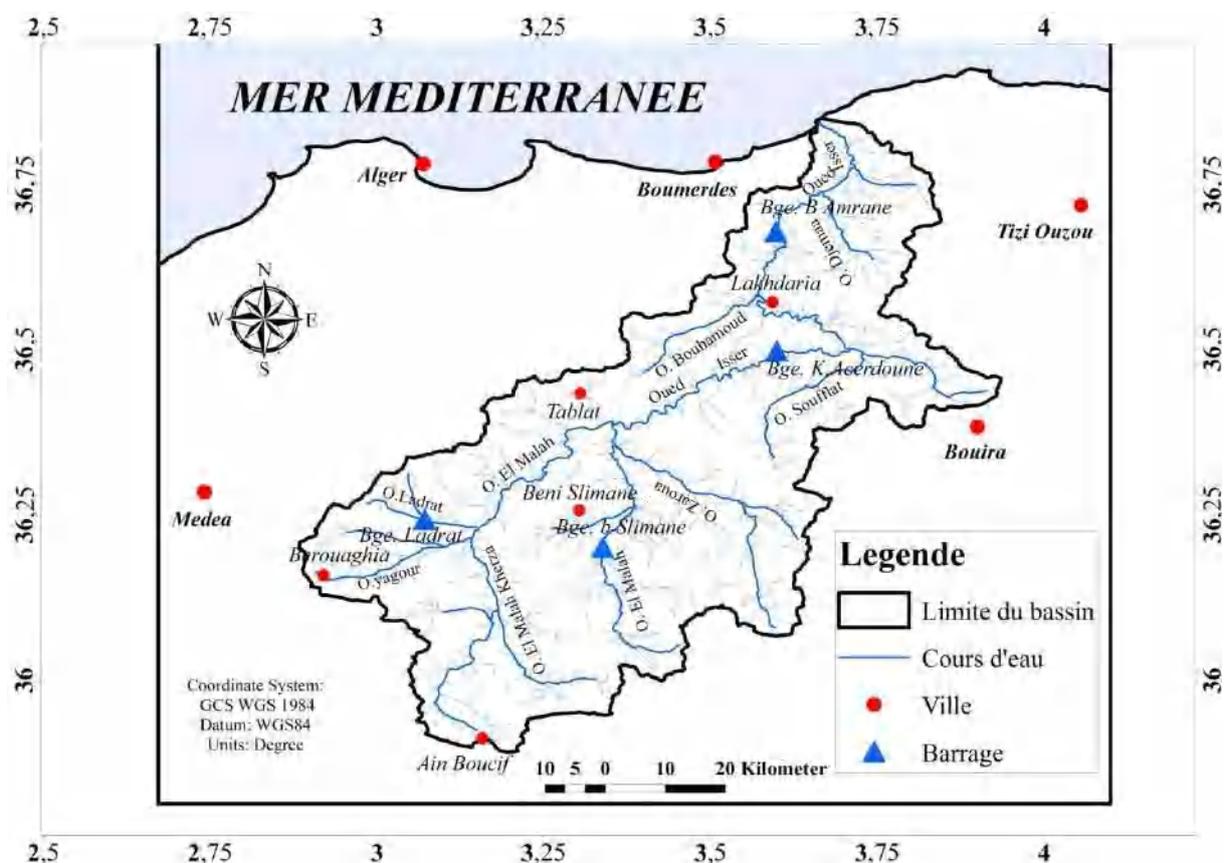


Figure 21 : Carte de réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Isser

De l'amont à l'aval, le bassin de l'oued Isser est équipé de plusieurs barrages avant d'atteindre la mer. Le barrage de Ladrat sur l'oued Ladrat, le barrage de Beni Slimane sur l'oued El Malah. Koudiat Acerdoune, en premier lieu, régularise les eaux de l'oued Isser dans le Moyen Isser. Le barrage de Beni Amrane situé plus en aval, sert au stockage des eaux après le barrage de Koudiat Acerdoune.

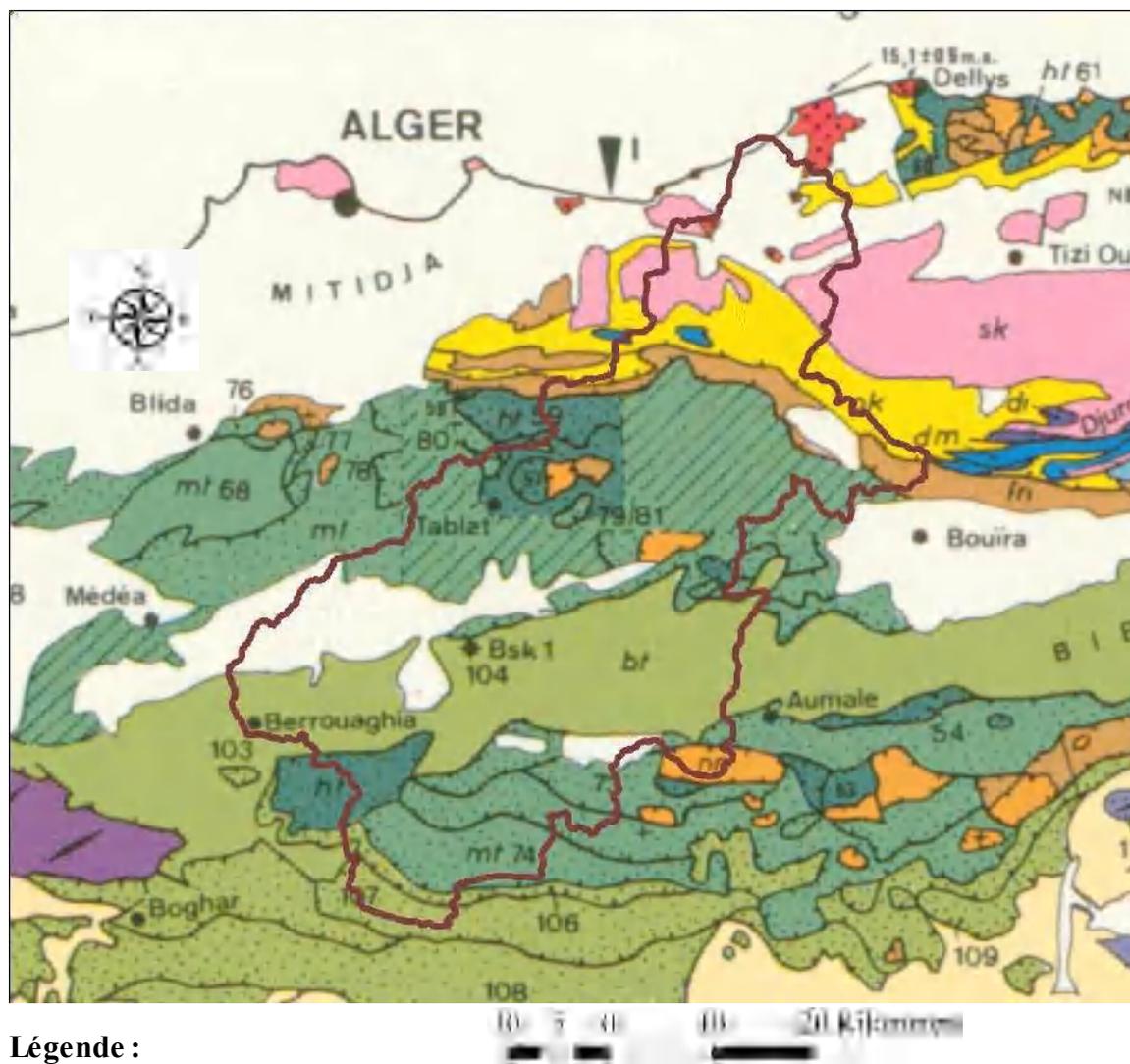
3-Géologie du bassin

Du point de vue géologique, le bassin d'étude est constitué de plusieurs structures tectoniques, qui se répartissent du Nord au Sud comme suit :

- Au Nord, dans le massif Kabyle, les épaissements de roches du socle métamorphique sont recouverts par une nappe allochtone de flyschs crétacés et paléogènes ;
- Au Sud, apparaissent la chaîne calcaire et les nappes de flysch.

La structure géologique du bassin d'étude est marquée par la présence de terrains métamorphiques précambriens, recoupés localement par des intrusions de roches basiques et acides, ainsi que par la présence de formations quaternaires. Les dépôts quaternaires sont

représentés sous forme de terrasses alluviales et marines, correspondant à la fois aux lits mineurs de l'oued Isser. Les terrasses alluviales, sont liées dans leur formation et dans leur répartition géographique, aux différents déplacements latéraux de l'oued Isser.



Légende :

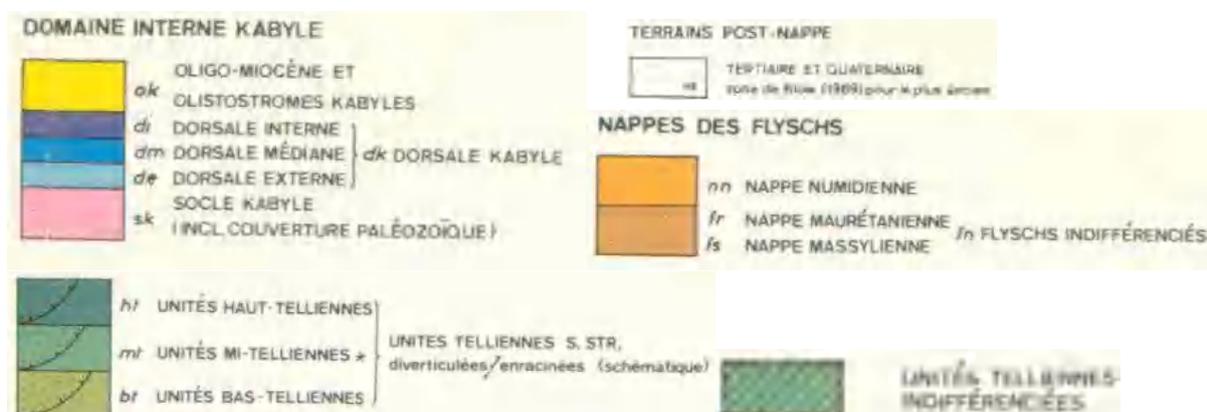


Figure 22 : Carte géologique du bassin de l'Isser d'après Wildi (1983)

4-Lithogie du bassin

La description lithologique du bassin versant nous permet de connaître le degré d'érodibilité et de dégradation.

-Le Haut Isser

Le bassin du Haut Isser est constitué à 60% de formations marneuses et marno-calcaires appartenant au Crétacé Inférieur, Moyen et Supérieur. Les argiles et les sables rouges de l'Aquitaniens continental occupent 13 % de la superficie du bassin. Les alluvions en terrasses du Quaternaire continental occupent 12% de la surface du bassin. Les faciès triasiques dans le Crétacé Supérieur ont provoqué la salure des eaux de l'oued El Malah.

Les marnes se fissurent et craquent par déshydratation pendant la saison sèche. Elles s'altèrent sur plusieurs centimètres en formant un tapis des gravillons mêlé de poussière argilo-calcaire qui partent en débâcle aux premières averses orageuses de la saison de pluie. Ces formations sont assez facilement érodables.

-Le Moyen Isser

Les schistes argileux, les marnes grises et schisteuses avec des couches de grés occupent 70 % de sa surface. Ces formations appartiennent au Crétacé Inférieur, Moyen et Supérieur.

On rencontre l'Oligocène marin dont les formations sont représentées par des conglomérats, grés et marnes constituant 13.41% de la superficie totale de bassin. Le Miocène inférieur est représenté par des grés et marnes ; ces formations constituent 4 % du bassin.

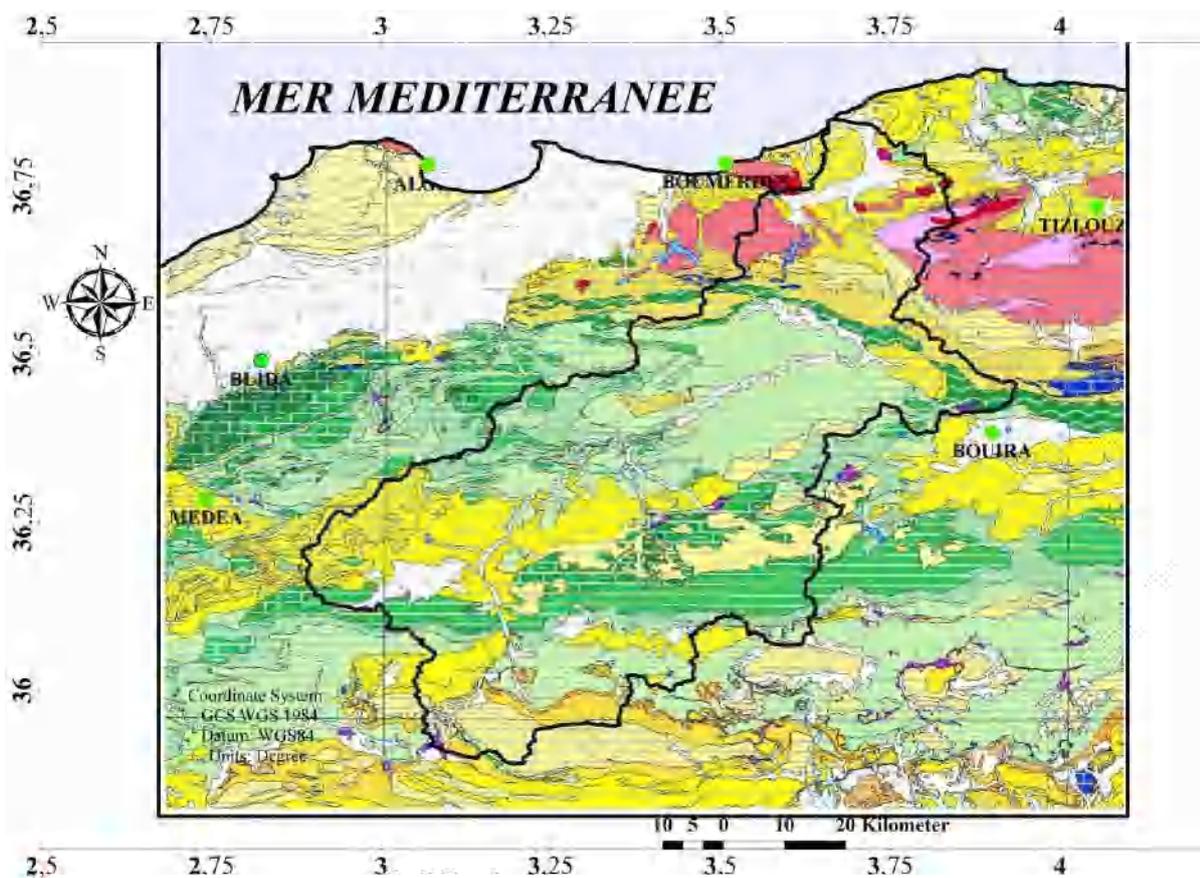
Les alluvions du Quaternaire continentales occupent 6,90% de la superficie totale. La présence des traces de Trias marin ou lagunaire formant 0,6 % du bassin est à noter.

-Le Bas Isser

Il est constitué de 43.15% des formations marneuses des grés et des conglomérats, appartenant à l'Oligocène Marin. Le Miocène inférieur marin dont les formations sont des grés et des marnes constituant 14,91% du Bas Isser. Les schistes cristallins et micacés sont respectivement des schistes à chlorite et à séricine et quartz à biotite, formant 19,84% de la superficie totale.

Le Crétacé Inférieur occupe 2,11 % du bassin. Ces formations sont représentées par des schistes argileux, des marnes grises et des grés. Les alluvions de Quaternaire continentales occupent 18.6 % du Bas Isser.

Les granites occupent 1.93 % de la superficie totale. Ces formations dures, conglomérats et granites, donnent au Bas Isser, la caractéristique la moins érodable en comparaison avec le Haut Isser.



Légende:

	Sables, graviers, limons et argiles		Mames, grés et calcaires gréseux
	Argiles, mames et grés		Mames et calcaires
	Argiles et grés		Mames grises et calcaires
	Argiles sableuses et conglomérats		Mames, schistes et calcaires
	Alternance de mames d'argiles et de grés		Schistes et quartzites
	Eluvium mameux cailloutis		Calcaires, argiles et grés
	Gneiss		Micaschistes et gneiss granulitiques

Figure 23 : Carte lithologique du bassin versant de l'oued Isser (source : carte litostratigraphique de l'Algérie ANRH)

Tableau 9: Evaluation de l'érodibilité des matériaux (Montier et al, 1998).

D'après Coynel, (2005)

Matériau	Erodibilité
<i>Alluvions</i>	forte
<i>Sédiments fluviatiles anciens (tertiaires)</i>	moyenne
<i>Terrasses</i>	moyenne
<i>Roches calcaires</i>	faible
<i>Calcaire marneux</i>	forte
<i>Craie</i>	moyenne
<i>Craie secondaire</i>	moyenne
<i>Marnes</i>	forte
<i>Argiles</i>	moyenne
<i>Matériaux argileux</i>	faible
<i>Argiles primaires, secondaires et tertiaires</i>	faible
<i>Roches argileuses</i>	faible
<i>Sables</i>	moyenne
<i>Sable alluvial ou glacio-fluvial, matériaux sableux et graveleux</i>	forte
<i>Sable éolien, dépôts locaux</i>	forte
<i>Roche sableuse</i>	faible
<i>Limons</i>	forte
<i>Limons pierreux</i>	moyenne
<i>Formations détritiques, Arkose</i>	faible
<i>Flysch, molasse</i>	forte
<i>Roches cristallines</i>	faible
<i>Schistes</i>	moyenne
<i>Schiste</i>	forte
<i>Ardoise</i>	forte
<i>Roches volcaniques</i>	faible
<i>Autres roches</i>	faible
<i>Matière organique</i>	moyenne

5- Végétation du bassin versant

-Le Haut Isser

La caractéristique la plus apparente du bassin est l'absence d'une couverture végétale arbustive dense, ce qui favorise le phénomène de l'érosion et provoque des dégâts tels que, les pertes des terres cultivables et l'envasement des ouvrages hydrauliques existants au niveau de ce bassin.

Les collines marneuses du Haut Isser sont couvertes des cultures céréalières, maraîchères et fourragères. On y trouve aussi, mais en faible quantité de l'arboriculture fruitière. Les versants abrupts sont dénudés ou couverts de broussailles clairsemées, constitués surtout de Pin d'Alep et de chêne vert.

-Le Moyen Isser

Le Moyen Isser est dépourvu d'un couvert végétal forestier dense, seuls subsistent les forêts au sud du bassin, mais elles sont souvent dégradées. Les cultures annuelles occupent la quasi-totalité des terres agricoles. Les plaines, tout au long de l'oued Isser, sont couvertes de cultures maraîchères et d'arboriculture fruitière. Les collines sont occupées par la céréaliculture et l'arboriculture.

-Le Bas Isser

Le même problème de végétation arbustive se retrouve dans le bas Isser. Les cultures annuelles dominent la partie basse du bassin à savoir l'arboriculture fruitière, les cultures fourragères et la céréaliculture.

Les collines sont couvertes d'une grande partie de céréaliculture et de cultures fourragères. Quant aux montagnes et aux piémonts, l'olivier et d'autres espèces forestières dominent.

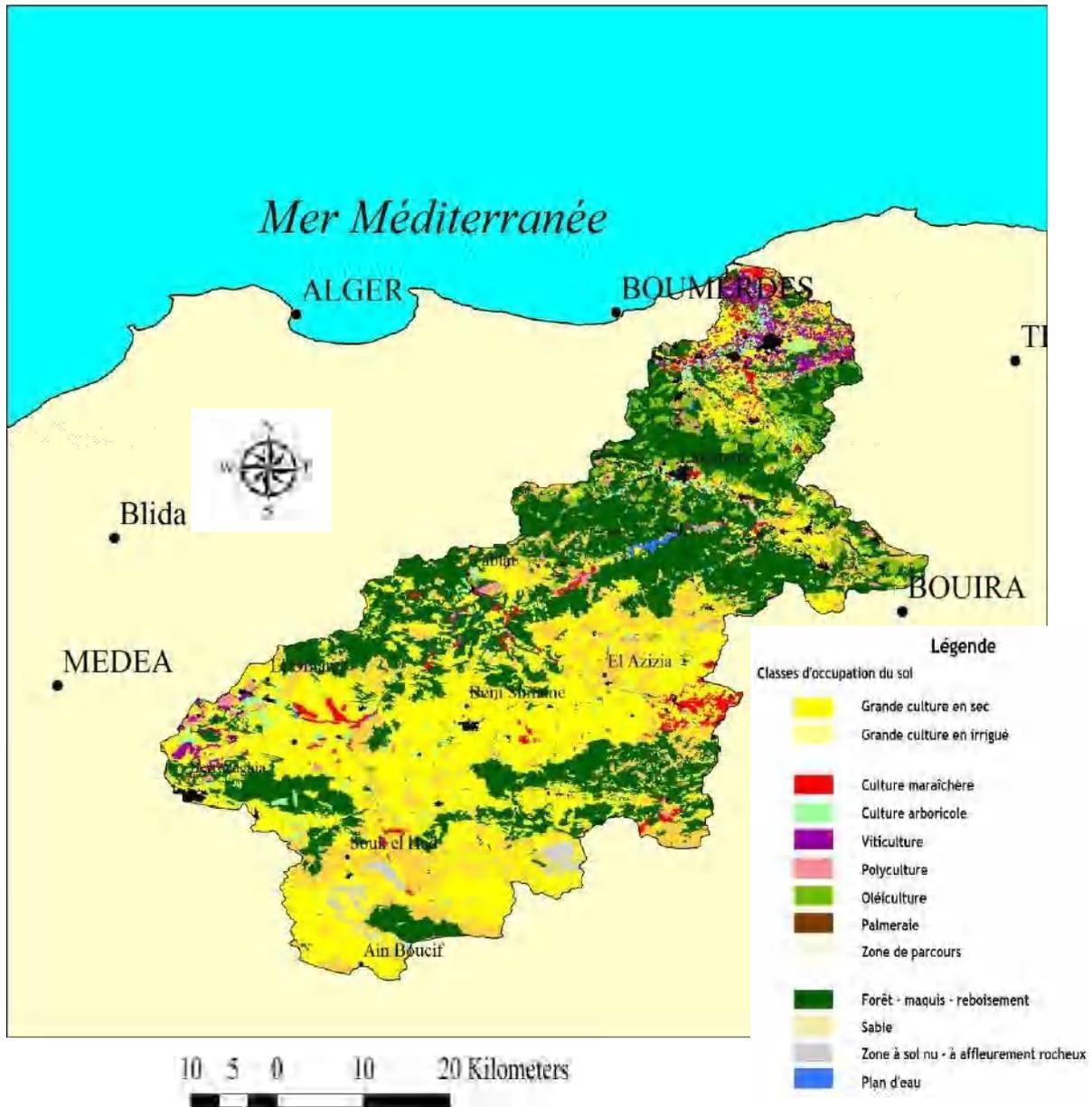


Figure 24: Carte d'occupation du sol du bassin de l'oued Isser (Source BNEDER, 2011)

Conclusion

Le bassin versant de l'Isser est situé dans une zone montagneuse. Les altitudes entre 600 à 800m s'étendent sur une superficie de 1233,25 km² soit 29.72% de la surface totale du bassin, et le tiers 34.67% présente des pentes entre 12 à 25%. Cette topographie favorise l'écoulement de surface et par conséquent le transport solide. La valeur élevée de l'indice de compacité $K_c=1,88$ est due à sa forme allongée. La lithologie y est souvent constituée de roches tendres notamment les marnes, les argiles et les calcaires sensibles à l'érosion. Le couvert végétal représente 20% de la superficie totale, le reste de la surface soit 80% est occupé par des cultures essentiellement céréalières et fourragères. La conjonction de ces différentes caractéristiques indique que le bassin versant de l'oued Isser a une potentialité érosive importante.

Chapitre 4 :
***Présentation des données de mesures débit-
concentration en MES***

Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des données de mesures débit-concentration en MES et des données pluviométriques.

Les informations hydrosédimentaires utilisées dans le cadre de cette étude sont basées sur l'acquisition de données de mesure au sein des stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Isser. Un réseau d'observation a fonctionné durant différentes périodes. Ce réseau est composé de cinq stations localisées sur les affluents de l'oued Isser de l'amont à l'aval, avec des tailles de bassins contrastées.

1-Données hydrologiques et de concentrations en MES

1-1-Chronologie des concentrations en MES et de débits

Les mesures des débits liquides instantanées et des concentrations en sédiments en suspension utilisées dans le cadre de cette étude ont été réalisées au niveau de cinq stations hydrométriques au niveau des différents sous-bassins (fig. 25).

A l'amont du bassin versant de l'oued Isser, on a trois stations hydrométriques qui contrôlent des sous-bassins unitaires de surface réduite (Mezahime, Beni Slimane et Dechemiya). La station de la Traille est située à une trentaine de kilomètres à l'amont du barrage de Koudiat Acerdoune, et contrôle un bassin de 2566 km². La station de Lakhdaria située à l'amont du barrage de Beni Amrane, contrôle une superficie de 3611 km². Ce sont des bassins emboîtés.

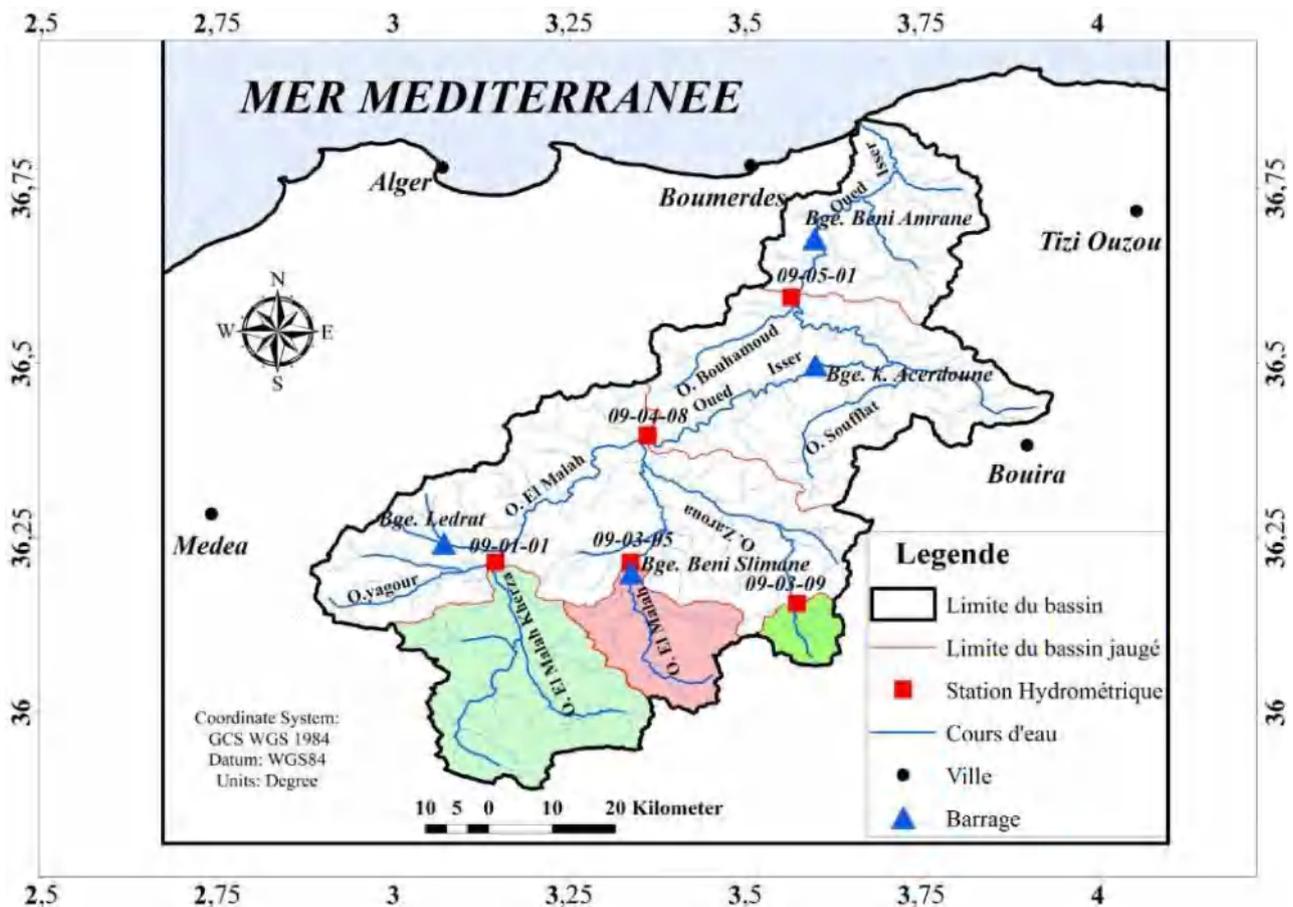


Figure 25 : Localisation des stations hydrométriques et des bassins jaugés dans le bassin versant de l'oued Isser

Les périodes de mesure et les tailles des échantillons sont différents pour les cinq stations hydrométriques. Les périodes concernées sont présentées dans le tableau 10 et les figures 26-27-28-29-30. En période de crue, les mesures de concentrations sont intensifiées jusqu'à des intervalles de temps d'une heure et même de 5 minutes en fonction de la vitesse de l'augmentation des débits liquides.

Tableau 10 : Caractéristiques des stations hydrométriques et périodes de mesure

Station Hydrométrique	Oued	Code	Taille de L'échantillon	Période de mesure	Surface
Lakhdaria	Isser maritime	09-05-01	8497	1971 - 2009	3611
La Traille	Isser moyen	09-04-08	1846	1971 - 1985	2566
Mezahime	El Mallah Kherza	09-01-01	969	1985 - 2007	662
Beni Slimane	El Mallah	09-03-05	2351	1973 - 2010	281
Dechemiya	Zeroua	09-03-09	628	1973 - 1985	83

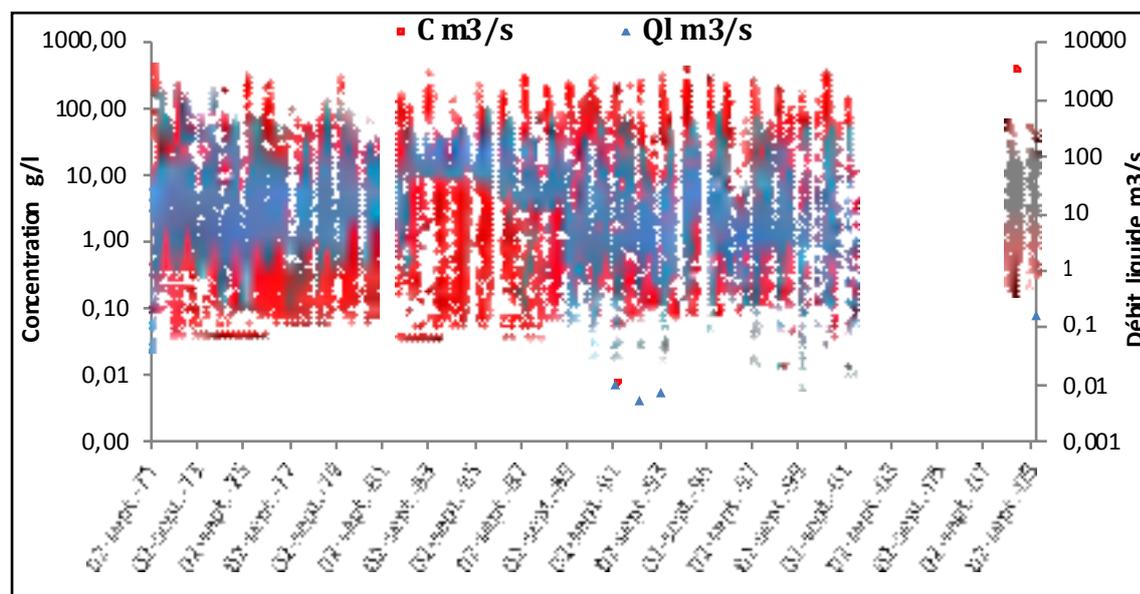


Figure 26 : Chronologie des débits et des concentrations mesurées à la station de Lakhdaria durant la période d'étude (1971/2009)

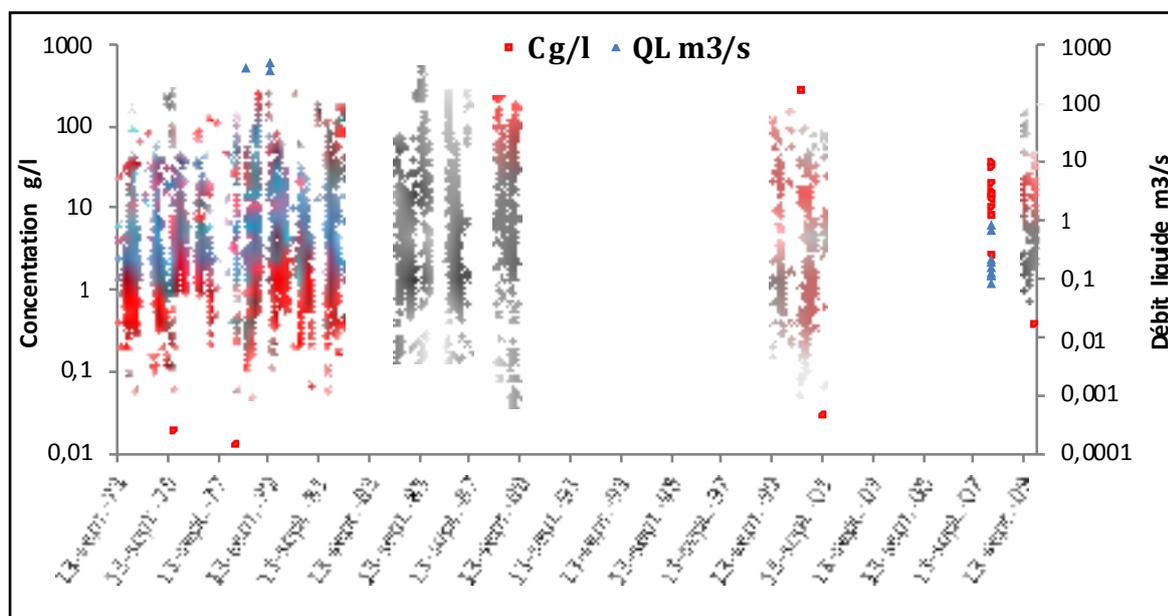


Figure 27 : Chronologie des débits et des concentrations mesurées à la station de Beni Slimane durant la période d'étude (1973/2009)

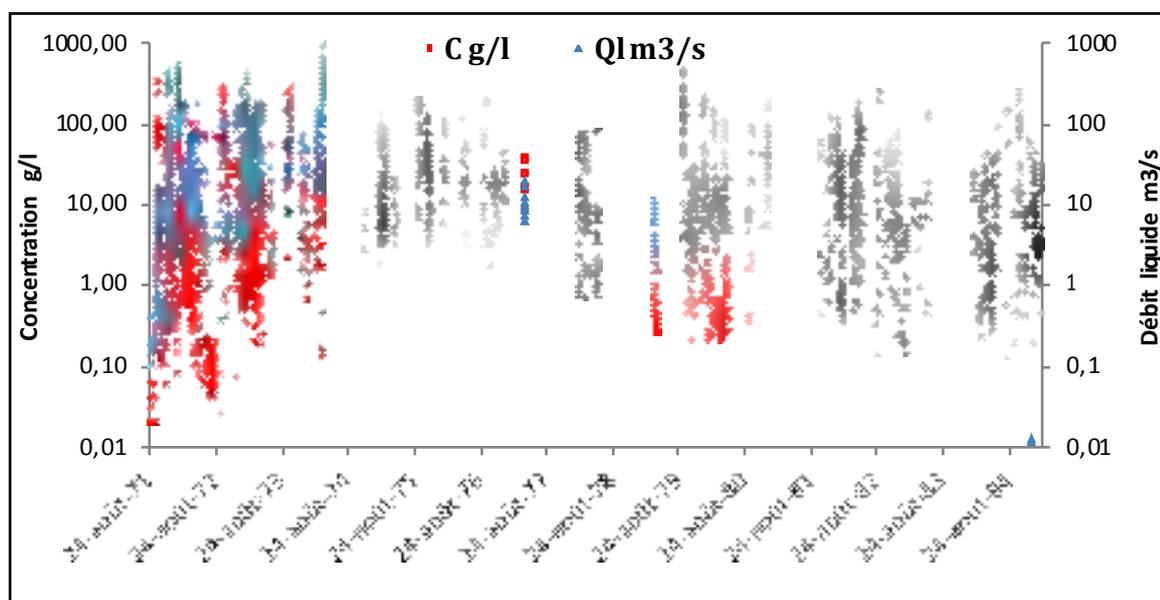


Figure 28 : Chronologie des débits et des concentrations mesurées à la station de La Traille durant la période d'étude (1971/1985)

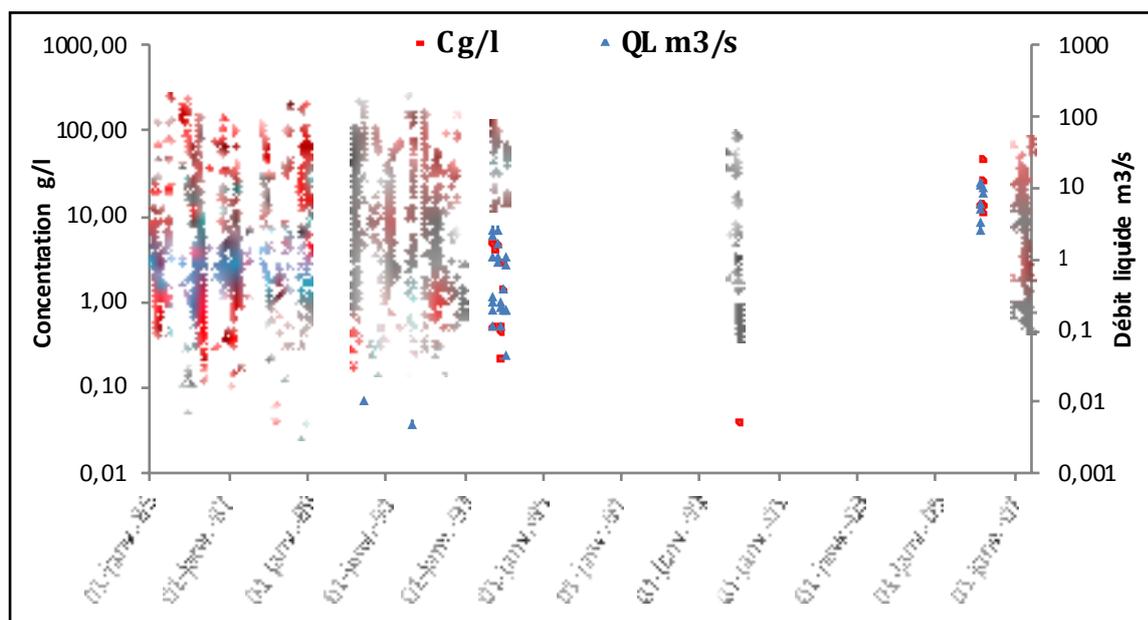


Figure 29 : Chronologie des débits et des concentrations mesurées à la station de Mezahime durant la période d'étude (1985/2007)

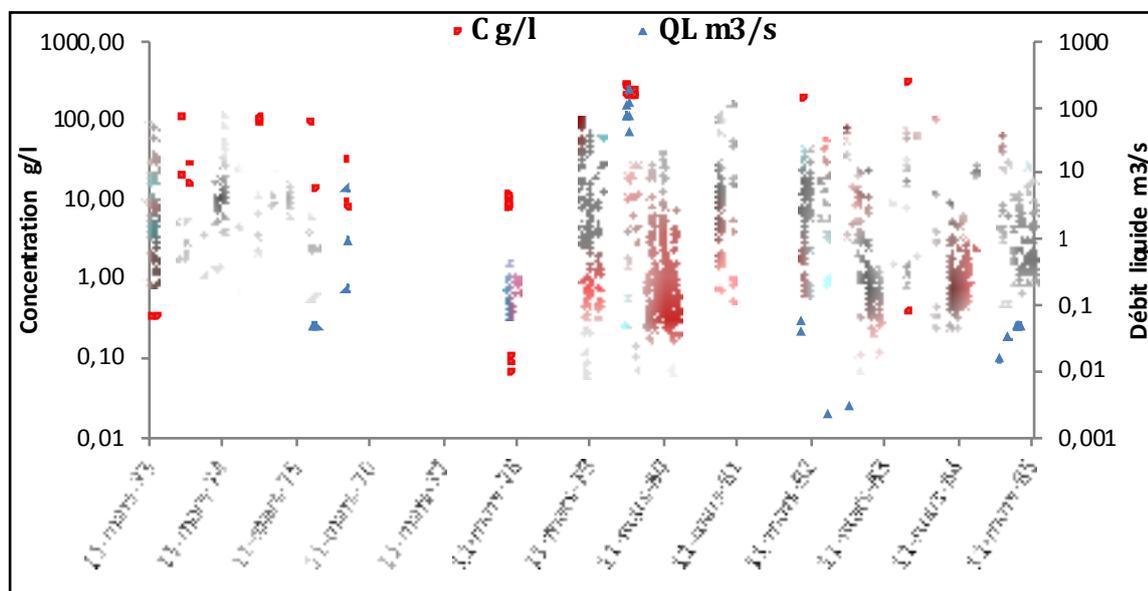


Figure 30 : Chronologie des débits et des concentrations mesurées à la station de Dechemiya durant la période d'étude (1973/198)

Le tableau 11 présente le nombre de mesure de concentration de MES dans le bassin versant de l'oued Isser par station et par saison.

Le nombre de mesure de concentration de MES est plus élevé au cours des mois pluvieux. Le mois qui enregistre le plus grand nombre de mesures de concentration de MES est le mois de Janvier pour les stations hydrométriques de Lakhdaria et Beni Slimane, le mois de mars pour les stations de La Traille et Mezahime, et le mois de février pour la station de Dechemiya. Le plus petit nombre d'échantillons se situe au mois d'aout pour les cinq stations hydrométriques.

Tableau 11 : Disponibilité des données de concentration par station, saison et mois

Echelle Temporelle	Lakhdaria	Beni Slimane	La Traille	Mezahime	Dechemiya
Automne	2001	351	477	181	63
Hiver	3284	987	663	345	303
Printemps	2476	903	615	389	242
Eté	622	110	114	54	20
septembre	593	71	177	50	24
octobre	784	126	107	75	16
novembre	723	154	163	56	23
décembre	1002	281	216	82	47
janvier	1167	379	196	151	116
Février	1115	327	251	112	140
mars	1052	329	278	155	124
Avril	713	322	206	99	79
Mai	710	252	131	135	39
Juin	306	58	66	23	11
Juillet	185	23	25	26	6
Aout	131	29	23	5	3
série complète	8497	2351	1846	969	628

D'une année à l'autre, les séries de données sont irrégulières, et présentent parfois des lacunes d'observations. Les années avec le plus grand nombre d'échantillons de mesures sont 1971/1972 pour la station de Lakhdaria (n=572) et La Traille (n=533), 1979/1980 pour les stations de Beni Slimane (n=245) et Dechemiya (n=190), et enfin l'année 1985/1986 pour la station de Mezahime (n= 160). Ces données de concentration des sédiments en suspension permettent une étude détaillée sur les transports solides en suspension dans le bassin versant de l'oued Isser et notamment au niveau de la station de Lakhdaria (tableau. 12).

Tableau 12 : Disponibilité de données de concentration par station et par année

Années	Lakhdaria	Beni Slimane	La Traille	Mezahime	Dechemiya
1971-1972	572	**	533	**	**
1972-1973	516	**	340	**	30
1973-1974	275	154	133	**	24
1974-1975	363	142	53	**	18
1975-1976	498	130	75	**	3
1976-1977	299	93	43	**	**
1977-1978	224	38	61	**	24
1978-1979	318	223	20	**	64
1979-1980	343	245	193	**	190
1980-1981	412	136	28	**	22
1981-1982	317	217	132	**	44
1982-1983	334	**	87	**	65
1983-1984	327	**	68	**	95
1984-1985	293	207	80	83	49
1985-1986	286	91	**	160	**
1986-1987	195	215	**	131	**
1987-1988	237	**	**	46	**
1988-1989	219	189	**	51	**
1989-1990	281	**	**	98	**
1990-1991	243	**	**	79	**
1991-1992	163	**	**	126	**
1992-1993	165	**	**	22	**
1993-1994	263	**	**	43	**
1994-1995	280	**	**	**	**
1995-1996	72	**	**	**	**
1996-1997	339	**	**	**	**
1997-1998	211	**	**	**	**
1998-1999	89	**	**	**	**
1999-2000	187	73	**	29	**
2000-2001	42	125	**	**	**
2001-2002	103	11	**	**	**
2002-2003	**	**	**	**	**
2003-2004	**	**	**	**	**
2004-2005	**	**	**	**	**
2005-2006	**	**	**	8	**
2006-2007	**	**	**	93	**
2007-2008	**	9	**	**	**
2008-2009	34	**	**	**	**
2009-2010	**	53	**	**	**
Série complète	8497	2351	1846	969	628

1-2-Contrôle et critique des données de concentrations en MES

La méthode d'échantillonnage systématique du transport solide sur les cours d'eau algériens est l'échantillonnage uni ponctuel dans la section mouillée. Plusieurs études sur les erreurs de la représentativité spatiale dans la section mouillée des échantillons ont été faites. En effet, les particules de sédiments varient le long d'une section de mesure (Demmak, 1982 ; Touat, 1989). Ces particules fines en suspension présenteraient un gradient vertical de concentration de la surface vers le fond (Filizola, 2003 ; Coynel, 2005 ; Mano, 2008) et un gradient horizontal plus faible sur l'ensemble d'une section de mesure (Mano, 2008).

Il faut noter que le protocole de prélèvement et la technique de mesure de transport solide basée sur un prélèvement unique à proximité de la berge, ne reflète pas la répartition réelle des concentrations des matières en suspension dans la rivière. Touat, (1989) signale une sous-estimation de 35% lié à l'échantillonnage uni ponctuel par rapport à des prélèvements effectués sur plusieurs verticales et à différentes profondeurs de la section mouillée à partir de l'analyse d'un oued des bassins côtiers algérois.

En plus de cette non uniformité spatiale de la concentration en MES dans la section de mesure, il y'a aussi la représentativité temporelle des échantillons. En effet, les échantillons de mesures sont plus nombreux au cours des mois pluvieux. Les fréquences d'échantillonnages sont irrégulières à l'échelle annuelle et d'une année à l'autre.

Les données de concentrations des matières en suspension instantanées varient dans une gamme très large sur l'ensemble des sous-bassins de l'oued Isser. Les valeurs mesurées aux stations hydrométriques peuvent être très fortes. La valeur la plus forte mesurée dans le bassin versant de l'oued Isser est de 486.80 g.l⁻¹ mesurée le 28 Septembre 1985 à 18 heures pour un débit de 33 m³.s⁻¹ (h=120cm) au niveau de la station hydrométrique de Beni Slimane.

Au niveau de la station de Lakhdaria sur l'oued Isser, les mesures de concentration de MES varient de 0.008 g.l⁻¹ jusqu'à la valeur la plus forte 410 g.l⁻¹ mesurée le 27 septembre 1971 à 13 heures pour un débit de 12.76 m³.s⁻¹ (h=68 cm). Les erreurs de mesure qui ont été détectés dans cette station sont plus apparentes par rapport aux autres stations. Certaines valeurs de mesures nous ont semblé anormalement fortes. Dans les données fournies par l'A.N.R.H. , nous avons trouvé une concentration de 1340 g.l⁻¹ à 8 heures le 28 novembre 1998 pour un débit de 11.21

$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Le 30 novembre 1998 à 11 heures on a enregistré une concentration de $1988 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ pour un débit de $28.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et à 17 heures du 24 novembre 2000 on a enregistré une concentration de $1659 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ pour un débit de $1.98 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ces valeurs n'ont pas été utilisées.

Les concentrations instantanées de MES mesurées aux stations (la Traille, Dechemiya) peuvent dépasser $300 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. A la station de Mzahime, la valeur la plus forte est de $242.91 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ mesurée le 7 septembre 1991 pour un débit de $0.34 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Les fortes valeurs de la concentration en MES sont dues à la nature des roches et des formations superficielles qui est dominée essentiellement par des marnes, des argiles et des schistes sensibles à l'érosion. Ces valeurs sont conformes aux valeurs observées dans d'autres régions, et notamment dans les bassins versant algériens. Demmak (1982) cite une valeur de $407 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ sur l'oued EL-Abiod. Ghernaout (2014) a trouvé des valeurs de $510 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$, $478 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ respectivement pour les stations Sidi AEK Djilali et oued EL-Abtal. $500 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ dans l'oued Wahran (Benkhaled et Remini, 2003), $650 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ dans l'oued Mouillah (Ghenim et al, 2008).

On constate, qu'au cours des crues, on peut trouver des concentrations constantes pour un débit liquide variable, par exemple la crue de 24-25 septembre 1975 à la station Lakhdaria est à signaler. A 12 heures, le débit liquide est de $11.58 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($h=64 \text{ cm}$) et a augmenté à 17 heures ($Q=25.22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $h=102 \text{ cm}$), puis à 7 heures jusqu'à $31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à la hauteur 114 cm . A ces trois valeurs de débits correspond la même concentration $175 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Par contre, on peut trouver, pour le même débit liquide, une grande différence de concentration, comme par exemple pour la crue du 28-29 septembre 1985 à la station de Beni Slimane, où l'on a enregistré à 18 heures une concentration de $486.80 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Après deux heures, cette concentration est passée à $220 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ pour le même débit de $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (fig. 31). Cette complexité dans la relation débit-concentration est principalement liée aux variations dans la disponibilité des particules en suspension pendant la crue. On va analyser et discuter ces relations de manière détaillée dans le chapitre 9.

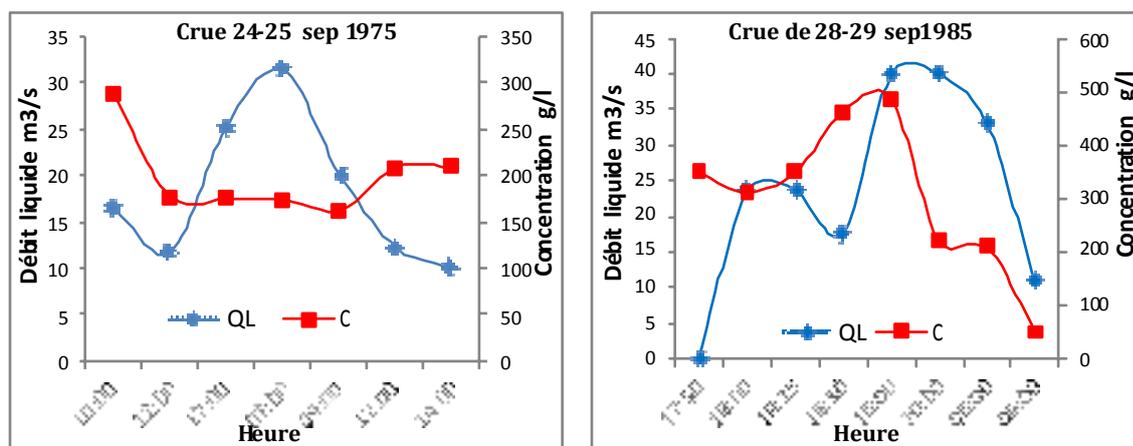


Figure 31 : Crue de 24-25 sep1975 à la station de Lakhdaria. 28-29 sep1985 à Beni Slimane

Les plus fortes valeurs des concentrations de MES sont le plus souvent enregistrées en automne, elles sont liées aux pluies violentes sur un sol fragilisé. Ces pluies produisent alors pour un faible débit liquide des concentrations élevées, par exemple à la station de Mezahime la valeur la plus forte est de 242.91 g.l⁻¹ pour un débit de 0.34 m³.s⁻¹, enregistré le 8 septembre 1991. Au niveau de la station de Beni Slimane, et pour la crue du 28 septembre 1985, on enregistre des valeurs de 364 g.l⁻¹, 349 g.l⁻¹, 312 g.l⁻¹, 349 g.l⁻¹, 463 g.l⁻¹, 486.80 g.l⁻¹, 220 g.l⁻¹ qui correspondent respectivement aux débits 1.88 m³.s⁻¹, 0.29 m³.s⁻¹, 23.78 m³.s⁻¹, 23.78 m³.s⁻¹, 17.6 m³.s⁻¹, 40 m³.s⁻¹, 40 m³.s⁻¹.

1-3-Ordres de grandeur des variables mesurées

Dans un premier temps, quelques chiffres sont présentés afin de fixer les ordres de grandeur des concentrations de MES (g.l⁻¹), débits liquides Ql (m³.s⁻¹) (tableau. 13).

Les concentrations élevées de MES (instantanées) sur l'oued Isser sont assez fréquentes. Au niveau de la station hydrométrique de Lakhdaria, 1991 valeurs de l'ensemble des données dépassent la concentration moyenne (18.5 g.l⁻¹) et 394 valeurs dépassent 100 g.l⁻¹. A la station de Beni Slimane, 463 valeurs de l'ensemble des données dépassent la concentration moyenne (17.5 g.l⁻¹) et 109 valeurs dépassent 100 g.l⁻¹. Au niveau de la station de La Traille 461 valeurs dépassent la concentration moyenne (20.4 g.l⁻¹) et 87 valeurs dépassent 100 g.l⁻¹.

Tableau 13 : Paramètres statistiques de la concentration C et débit liquide QL

	Lakh daria		Beni Slimane		La traïlle		Mezahime		Dechemiya	
Valeurs instantanées										
	C g.l ⁻¹	QL m ³ .s ⁻¹								
N	8497	8497	2351	2351	1846	1846	969	969	628	628
Min	0.008	0.005	0.013	0.0007	0.02	0.012	0.04	0.002	0.07	0.002
Max	410	1432	486.8	501.2	332.6	955	242.9	145	311.37	183
X	18.50	57.25	17.76	3.18	20.37	45.32	27.21	6.50	11.48	5.19
σ	22.7	57.37	23.12	4.49	22.54	50.7	28.48	8.57	14.88	7.36

N : nombre de valeurs. X : la moyenne. σ : écart-type.

Les séries des données des concentrations de MES mesurées au niveau des stations hydrométriques sont étalées sur 10 ordres de grandeur (Tableau 14).

Nous avons choisi ces ordres de grandeur pour montrer le nombre d'observations de chaque gamme.

La gamme des concentrations comprises entre 0.1 à 1 g.l⁻¹ présente le plus grand nombre d'observations pour les stations de Lakh daria et de Dechemiya, alors que la gamme comprise entre 1 à 5 g.l⁻¹ présente le plus grand nombre d'observations pour les stations de La Traïlle, Beni Slimane et Mezahime tableau 14.

Globalement, on remarque que la gamme des concentrations comprise entre 0.1 et 100 g.l⁻¹ présente le plus grand nombre d'observations pour toutes les stations hydrométriques Elle représente 95%, 94%, 92%, 94% et 97% respectivement de l'effectif total aux stations Lakh daria, Beni Slimane, La Traïlle, Mezahime et Dechemiya.

Tableau 14 : Nombre d'observations selon l'ordre de grandeur de la concentration

Ordres de grandeur de C	Lakhdaria		Beni Slimane		La Traïlle		Mezahime		Dechemiya	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
0 - 0.1	766	9,01	10	0,43	52	2,82	3	0,31	3	0,48
0.1 - 1	2098	24,69	464	19,74	348	18,85	123	12,69	238	37,90
1 - 5	1925	22,66	1028	43,73	430	23,29	256	26,42	183	29,14
5 - 10	883	10,39	230	9,78	247	13,38	119	12,28	107	17,04
10 - moy	834	9,82	156	6,64	308	16,68	168	17,34	36	5,73
moy - 50	1150	13,53	245	10,42	255	13,81	111	11,46	29	4,62
50 - 100	447	5,26	109	4,64	119	6,45	135	13,93	17	2,71
100 - 200	305	3,59	66	2,81	74	4,01	48	4,95	6	0,96
200 - 300	74	0,87	37	1,57	11	0,60	6	0,62	8	1,27
>300	15	0,18	6	0,26	2	0,11			1	0,16
somme	8497	100	2351	100	1846	100	969	100	628	100

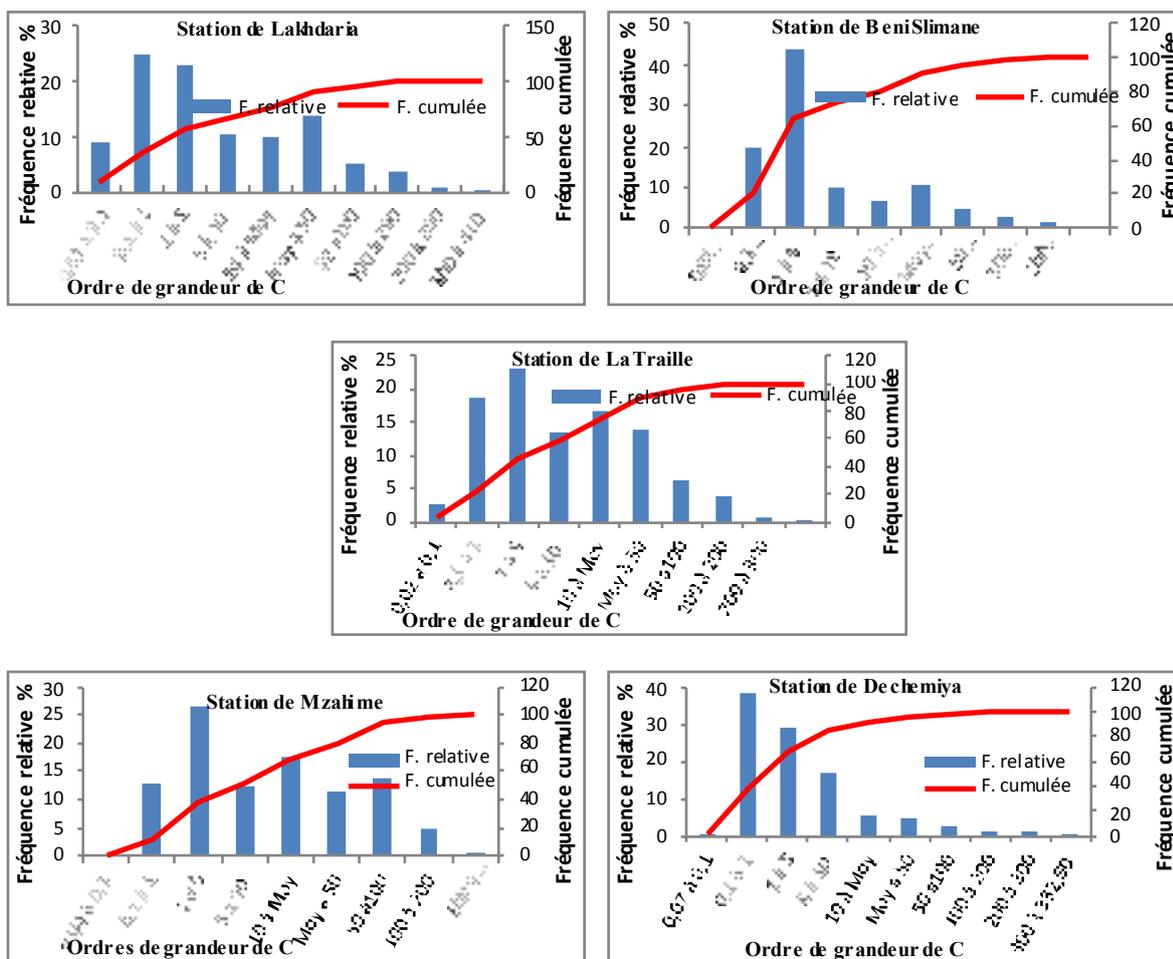


Figure 32 : Fréquence des observations selon l'ordre de grandeur de la concentration

2- Les données hydrométriques

Cinq stations hydrométriques fonctionnent dans le bassin de l'oued Isser, pour lesquelles les chroniques annuelles des débits moyens journaliers (tableau. 15).

Tableau 15 : Présentation des séries disponibles de débit liquide moyen journalier

Station Hydrométrique	Oued	Code	Surface km²	Séries disponibles
Lakhdaria	Isser maritime	09-05-01	3611	1970/71 - 2009/10
La Traille	Isser moyen	09-04-08	2566	1970/71 - 1984/85
Beni Slimane	El Mallah	09-03-05	281	1973/74 – 2008/09
Mezahime	EL Mallah Kherza	09-01-01	662	1973/74 – 2006/07
Dechemiya	Zeroua	09-03-09	83	1972/73 – 1984/85

Conclusion

La méthode d'échantillonnage du transport en MES au niveau des stations hydrométriques de l'oued Isser est l'échantillonnage uni ponctuel dans la section mouillée. Les mesures sont effectuées avec une faible fréquence temporelle et sont également discontinues. Les séries de données sont irrégulières entre les stations, et même au sein de la même la station, d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre.

Les valeurs instantanées des concentrations en MES peuvent être très élevées, atteignant la valeur de 486 g.l⁻¹ à la station de Beni Slimane. Ces fortes valeurs sont liées à la nature des roches et des formations superficielles qui est dominé essentiellement par des marnes, des argiles et des schistes sensibles à l'érosion. Elles sont conformes aux valeurs observées dans d'autres régions et notamment dans les bassins versant algériens.

D'autre part, les données des concentrations en MES instantanées varient dans une gamme très large sur l'ensemble des sous-bassins de l'oued Isser. Elles nous donnent une idée de départ sur la dispersion des points qui seront analysées lors de l'étude de la relation concentration- débit.

Chapitre 5:
Etude des précipitations

Introduction

Les précipitations constituent le facteur clef dans le comportement hydrologique d'un bassin versant. La pluie et l'écoulement sont l'un des processus hydrologiques qui ont le plus d'importance pour l'érosion hydrique des sols et les transports solides des oueds. Ils interviennent par leur variabilité spatiotemporelle.

Ce chapitre est consacré à l'étude statistique des 23 postes pluviométriques à l'échelle annuelle au niveau du bassin de l'oued Isser sur la période 1970/2009. Afin d'obtenir des séries pluviométriques complètes et homogènes, l'homogénéisation des pluies annuelles a été réalisée par la méthode de l'Analyse en Composant Principale (ACP), adoptée par l'A.N.R.H, 1993. Cette méthode nous permet d'estimer les paramètres statistiques caractéristiques des pluies annuelles dans le bassin de l'oued Isser.

La cartographie de la pluviométrie moyenne interannuelle permet le passage de l'information ponctuelle à une information spatiale dans le bassin versant. La réalisation de la carte pluviométrique a été réalisée en suivant les étapes suivantes: régression multiple, interpolation des résidus de régression, et cartographie proprement dite (logiciel Surfer).

1- Postes pluviométriques et choix de la période d'étude

Nous avons tout d'abord travaillé sur 23 postes pluviométriques au niveau du bassin de l'oued Isser. La période d'étude retenue inclut celle concernée par l'analyse du transport solide en suspension. Elle s'étale sur 40 années de 1970/71 à 2009/10 (tableau. 16). Cette période permet d'aboutir à des résultats significatifs concernant la variabilité des précipitations. La figure 33 illustre la répartition spatiale des postes pluviométriques sélectionnées.

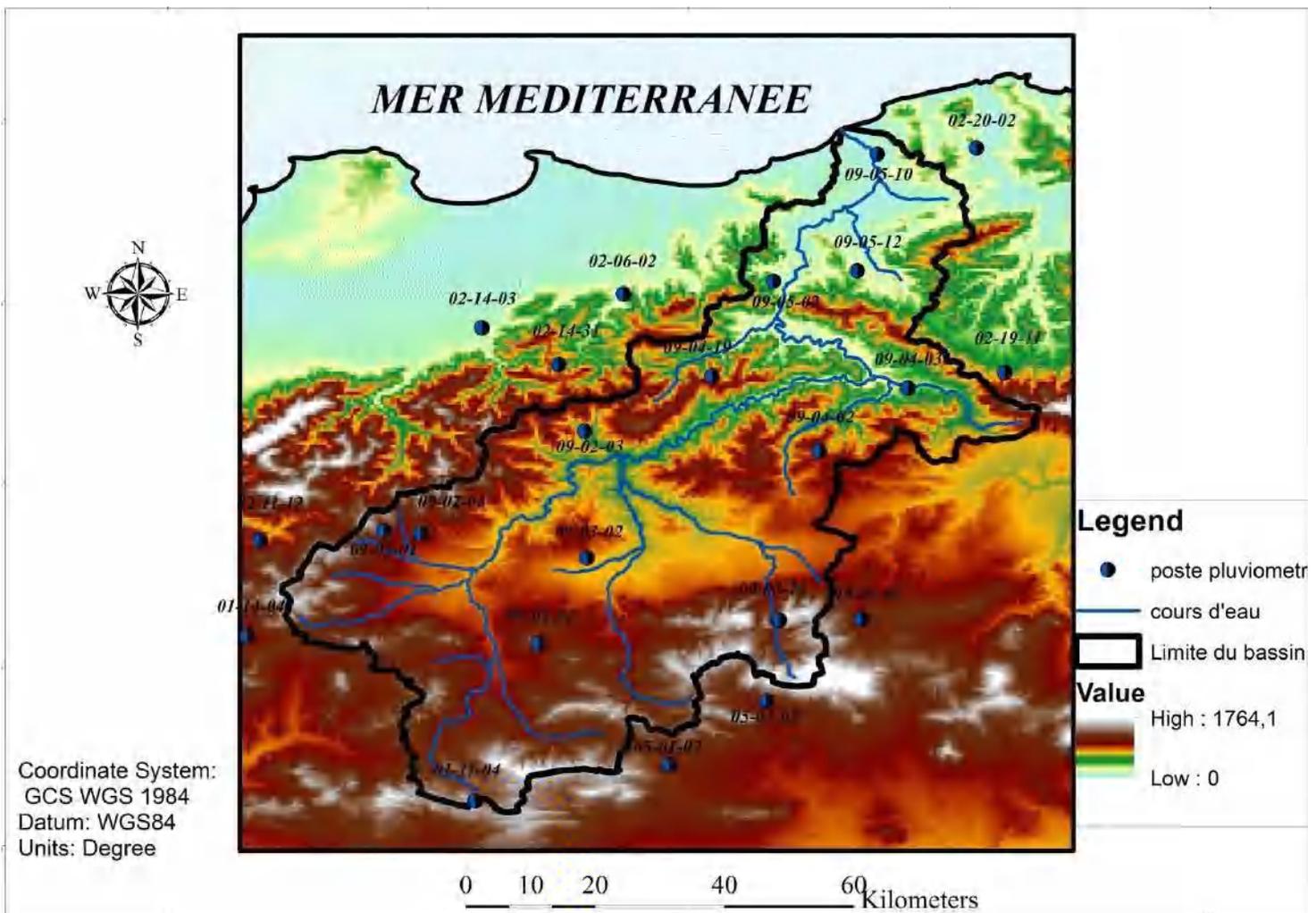


Figure 33 : Répartition spatiale des postes pluviométrique étudiés

Tableau 16 : postes pluviométriques et pourcentage d'information pluviométrique disponible (période 1970/71-2009/10)

Postes Pluviométrique	Code	X Lambert	Y Lambert	Altitude	Période	Nombre de mois lacunaires	% de lacunes
Souagui	09-01-04	548.95	312.4	810	1973-2009	69	15.54
EL Omaria	09-02-01	530.2	329.2	790	1970-2009	64	13.33
A.N.R.H	09-02-03	554.75	345.8	450	1970-2009	23	4.79
EL Omaria PEP	09-02-05	533.05	327.45	659	1974-2009	72	16.66
Beni Slimane	09-03-02	557.2	322.65	600	1970-2009	44	9.16
Dechemiya	09-03-14	578.5	316.35	850	1974-2009	51	11.80
Souk ElKhemis	09-04-02	584	343.4	782	1970-2009	36	7.5
Djebahia	09-04-03	594.8	353.45	320	1970-2009	15	3.12
Bsibsa	09-04-19	570.25	354.5	820	1970-2009	15	3.28
Lakhdaria Gorges	09-05-02	579.3	370	50	1970-2009	11	2.29
Bordj Mnaeil pep	09-05-10	577.18	390	15	1971-1995	2	0.66
Chabet ELAmur	09-05-12	589.3	371.3	235	1972-2009	13	2.85
Ain Boucif	01-11-04	540.75	287.8	1250	1970-2009	40	8.33
Mongorno	01-14-04	513.5	312.6	932	1970-2009	11	2.29
Hamiz barrage	02-06-02	558.55	367.4	130	1970-2009	3	0.62
Ouzera	02-11-12	513.25	328.4	880	1970-2009	30	6.25
Larbaa	02-14-03	541.15	362.95	100	1970-2009	2	0.41
Sakamody	02-14-31	551.4	355.6	720	1970-2009	159	33.12
Tizi letnine	02-19-11	606.9	356.1	500	1970-2009	23	4.79
Baghlia village	02-20-02	603.65	390	30	1970-2009	5	1.05
Adaoura	05-01-02	565	293.8	990	1970-2009	7	1.45
Souk Eldjema	05-01-03	576.9	304.15	830	1970-2009	147	30.62
Sour Elghozlane	15-01-01	590.6	316.45	882	1970-2009	13	2.7

1-1-Les stations de base

Parmi les 23 postes pluviométriques, on a choisi 13 postes pluviométriques de base. La sélection des postes pluviométrique de base repose sur des critères de qualité des données et de longueur des séries pluviométriques. La répartition spatiale des 13 postes de base est assez bonne pour être représentative de différents secteurs géographique du bassin étudié, avec un pourcentage de disponibilité des données de mesures de plus de 90 %.

1-2-Ajustement des séries pluviométriques à une loi racine normale

Les précipitations annuelles peuvent être distribuées selon une loi racine normale (A.N.R.H, 1993 ; Mebarki, 2005 ; Touaibia et al, 2006 et Louamri, 2013).

L'expression de la loi racine normale est :

$$F(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad \text{Avec} \quad u = \frac{\sqrt{p} - \bar{\sqrt{p}}}{\sigma\sqrt{p}}$$

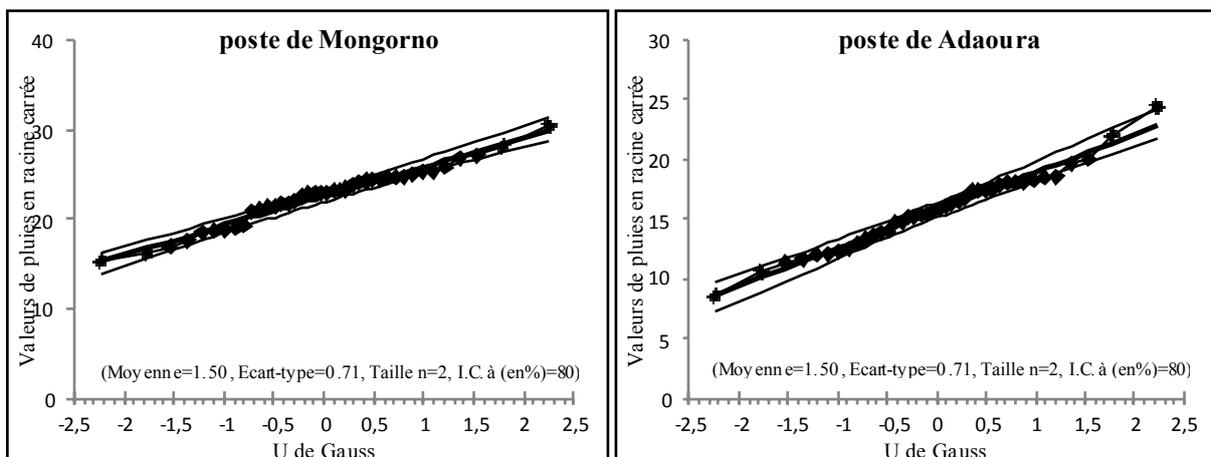
Où :

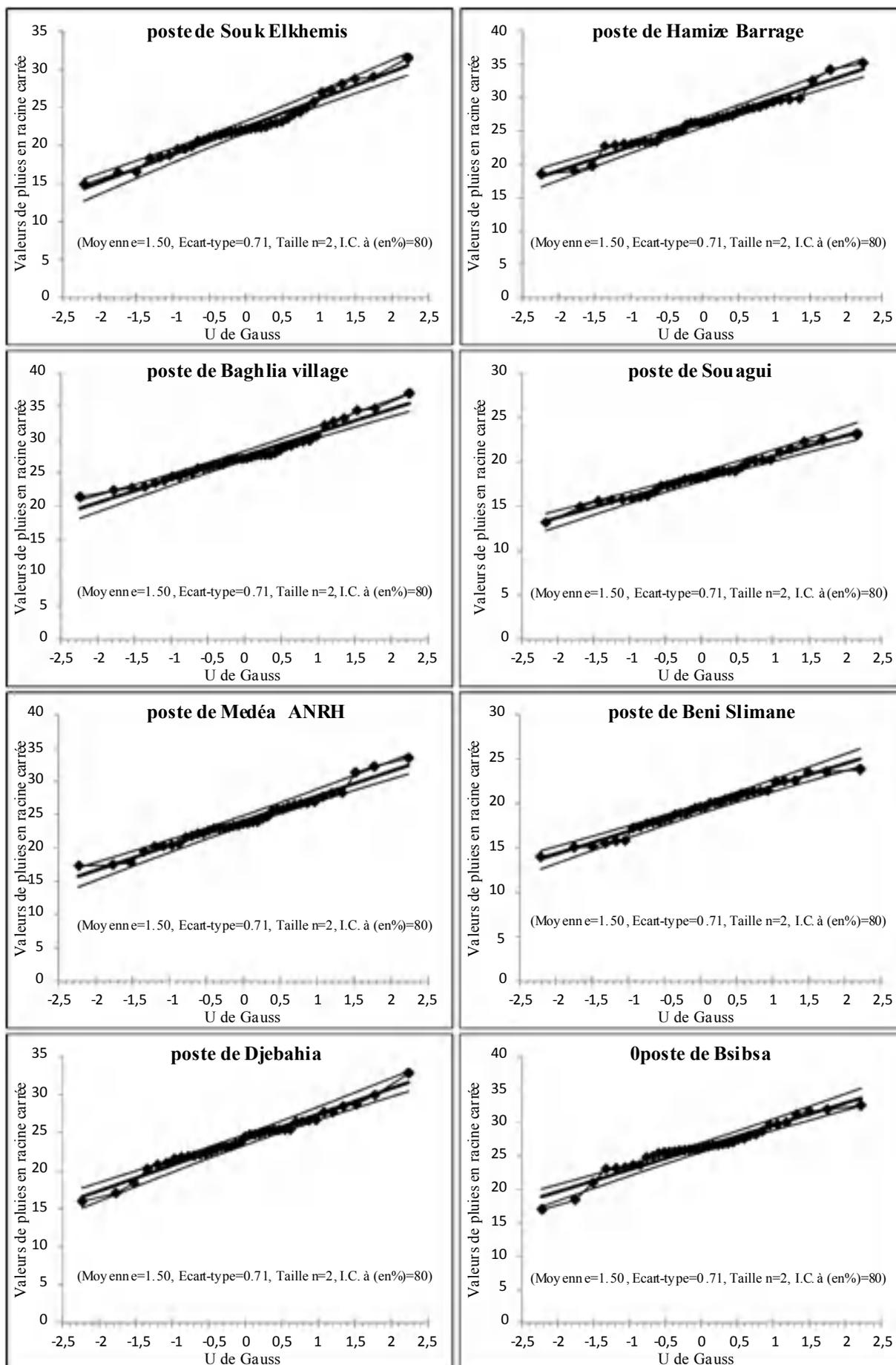
F(p) : probabilité qu'une valeur quelconque p soit inférieure ou égale à p ;

U : variable réduite de Gauss, avec P : pluie en mm ;

$\bar{\sqrt{p}}$: moyenne des racines carrées de la série d'observations ;

$\sigma\sqrt{p}$: écart-type des racines carrées de la série d'observations.





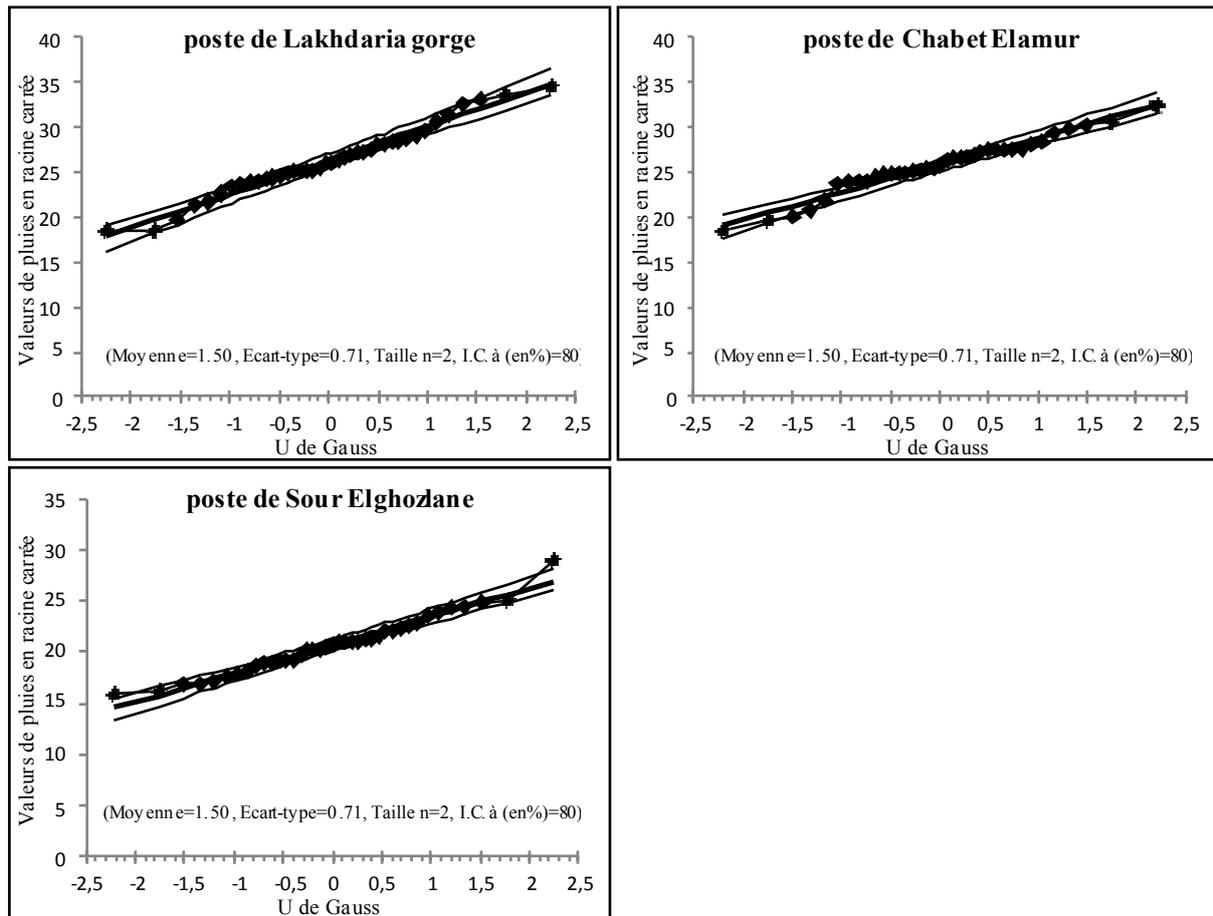


Figure 34 : Ajustement à une loi racine normale des pluies annuelles des postes pluviométriques de base (valeurs exprimées en racine carrée)

La loi racine normale est très bien adaptée aussi bien pour les postes pluviométriques situées en Hautes Plaines (Souagui, Sour Elghozlane, Mongorno) que les postes situés en zone tellienne (Lakhdaria gorges, Baghlia village, Hamiz barrage). Les graphiques de la figure 34 montrent que la loi racine normale ajuste bien les données des différents postes pluviométriques. L'intervalle de confiance à 80 % est utilisé par Laborde (2000) pour les pluies moyennes annuelles. Cet intervalle est applicable aux phénomènes à forte variabilité temporelle telles que les pluies et les débits annuels.

1-3-Homogénéisation des données pluviométriques des stations de base

La méthode d'homogénéisation des données des stations de base par A.C.P permet de combler les lacunes pour une matrice contenant à la fois des valeurs mesurées et des lacunes. Les années avec plus de 4 lacunes mensuelles, sont considérées comme lacunaires. Lorsque le nombre de mesures est inférieur ou égal à 4 pour une année, nous avons remplacé chaque

valeur mensuelle manquante par la moyenne inter-mensuelle du mois correspondant (A.N.R.H, 1993).

Nos données de départ se présentent sous la forme d'une matrice à $n_o = 40$ lignes, représentant les observations (les années) et $n_v = 13$ colonnes, représentant les variables (les stations de base). Cette matrice comporte des vides correspondant aux lacunes d'observations.

Pour expliquer cette méthode, on prendra une matrice de 7 colonnes (7 variables) et 10 lignes (10 observations) (tableau. 17).

Tableau 17: Données pour le comblement des lacunes pluviométriques annuelles par A.C.P.

Années	090403	090419	090502	090512	020602	150101	090302
1970/71	X _{1.1}	LAC	X _{3.1}	LAC	X _{5.1}	X _{6.1}	X _{7.1}
1971/72	X _{1.2}	LAC	X _{3.2}	LAC	X _{5.2}	LAC	X _{7.2}
1972/73	X _{1.3}	X _{2.3}	X _{3.3}	LAC	X _{5.3}	X _{6.3}	X _{7.3}
1973/74	X _{1.4}	X _{2.4}	X _{3.4}	X _{4.4}	X _{5.4}	X _{6.4}	X _{7.4}
1974/75	X _{1.5}	X _{2.5}	X _{3.5}	X _{4.5}	X _{5.5}	X _{6.5}	LAC
1975/76	X _{1.6}	X _{2.6}	X _{3.6}	X _{4.6}	X _{5.6}	X _{6.6}	X _{7.16}
1976/77	X _{1.7}	X _{2.7}	X _{3.7}	X _{4.7}	X _{5.7}	X _{6.7}	X _{7.7}
1977/78	X _{1.8}	X _{2.8}	X _{3.8}	X _{4.8}	X _{5.8}	X _{6.8}	X _{7.8}
1978/79	X _{1.9}	X _{2.9}	X _{3.9}	X _{4.9}	X _{5.9}	X _{6.9}	X _{7.9}
1979/80	X _{1.10}	X _{2.10}	X _{3.10}	X _{4.10}	X _{5.10}	X _{6.10}	X _{7.10}

Les données sont en dixièmes de racines de millimètres. On calcule les moyennes MX_o des racines carrées pour chaque variable.

$$MX_o = MX_o(1) \quad MX_o(2) \quad MX_o(3) \quad MX_o(4) \quad MX_o(5) \quad MX_o(6) \quad MX_o(7)$$

Dans une seconde étape, on peut alors remplacer chaque valeur lacunaire par la moyenne interannuelle $MX_o(i)$, on obtient alors une première matrice complète (tableau. 18).

On effectue une A.C.P sur cette matrice et on obtient les projections des variables (a1) et des observations (C1) pour les trois composantes principales.

Tableau 18: Comblement des lacunes pluviométriques annuelles par A.C.P.

Années	090403	090419	090502	090512	020602	150101	090302
1970/71	X _{1.1}	MXo (2)	X _{3.1}	MXo (4)	X _{5.1}	X _{6.1}	X _{7.1}
1971/72	X _{1.2}	MXo (2)	X _{3.2}	MXo (4)	X _{5.2}	MXo (6)	X _{7.2}
1972/73	X _{1.3}	X _{2.3}	X _{3.3}	MXo (4)	X _{5.3}	X _{6.3}	X _{7.3}
1973/74	X _{1.4}	X _{2.4}	X _{3.4}	X _{4.4}	X _{5.4}	X _{6.4}	X _{7.4}
1974/75	X _{1.5}	X _{2.5}	X _{3.5}	X _{4.5}	X _{5.5}	X _{6.5}	MXo(7)
1975/76	X _{1.6}	X _{2.6}	X _{3.6}	X _{4.6}	X _{5.6}	X _{6.6}	X _{7.6}
1976/77	X _{1.7}	X _{2.7}	X _{3.7}	X _{4.7}	X _{5.7}	X _{6.7}	X _{7.7}
1977/78	X _{1.8}	X _{2.8}	X _{3.8}	X _{4.8}	X _{5.8}	X _{6.8}	X _{7.8}
1978/79	X _{1.9}	X _{2.9}	X _{3.9}	X _{4.9}	X _{5.9}	X _{6.9}	X _{7.9}
1979/80	X _{1.10}	X _{2.10}	X _{3.10}	X _{4.10}	X _{5.10}	X _{6.10}	X _{7.10}

La projection des variables sur les composantes :

	a1 (1.1)	a1 (1.2)	a1 (1.3)	a1 (1.4)	a1 (1.5)	a1 (1.6)	a1 (1.7)
(a1) =	a1 (2.1)	a1 (2.2)	a1 (2.3)	a1 (2.4)	a1 (2.5)	a1 (2.6)	a1 (2.7)
	a1 (3.1)	a1 (3.2)	a1 (3.3)	a1 (3.4)	a1 (3.5)	a1 (3.6)	a1 (3.7)

La projection des observations sur les composantes :

C1	C2	C3
C1 (1.1)	C1 (1.2)	C1 (1.3)
C1 (2.1)	C1 (2.2)	C1 (2.3)
C1 (3.1)	C1 (3.2)	C1 (3.3)
C1 (4.1)	C1 (4.2)	C1 (4.3)
C1 (5.1)	C1 (5.2)	C1 (5.3)
C1 (6.1)	C1 (6.2)	C1 (6.3)
C1 (7.1)	C1 (7.2)	C1 (7.3)
C1 (8.1)	C1 (8.2)	C1 (8.3)
C1 (9.1)	C1 (9.2)	C1 (9.3)
C1 (10.1)	C1 (10.2)	C1 (10.3)

On aura calculé sur la matrice les moyennes et les écart-types :

$$MX_i(1) = MX_1(1) \quad \mathbf{MX_2(1)} \quad MX_3(1) \quad MX_4(1) \quad MX_5(1) \quad MX_6(1) \quad MX_7(1)$$

$$SX_i(1) = SX_1(1) \quad \mathbf{SX_2(1)} \quad SX_3(1) \quad SX_4(1) \quad SX_5(1) \quad SX_6(1) \quad SX_7(1)$$

Il est alors possible de reconstituer chaque observation manquante par une nouvelle valeur estimée X_e . (Exemple : la station de Bsibsa ; 09-04-19)

$$X_{e1}(2.1) = \{(MX_2(1) + SX_2(1)) * (a_{2.1} * C_{2.1}) + (a_{2.2} * C_{2.2}) + (a_{2.3} * C_{2.3})\}$$

Cependant, $X_e(i)$ est une meilleure estimation que $MX_o(i)$ puisqu'elle tient compte des observations aux autres stations pour cette année (i) (A.N.R.H, 1993). Donc, on peut remplacer dans la matrice X_o chaque MX_o par les X_e adaptés. On obtient une nouvelle matrice X_e .

Années	090403	090419	090502	090512	020602	150101	090302
1970/71	$X_{1.1}$	$X_{e2}(2.1)$	$X_{3.1}$	$X_{e4}(4.1)$	$X_{5.1}$	$X_{6.1}$	$X_{7.1}$
1971/72	$X_{1.2}$	$X_{e2}(2.2)$	$X_{3.2}$	$X_{e4}(4.2)$	$X_{5.2}$	$X_{e6}(6.2)$	$X_{7.2}$
1972/73	$X_{1.3}$	$X_{2.3}$	$X_{3.3}$	$X_{e4}(4.3)$	$X_{5.3}$	$X_{6.3}$	$X_{7.3}$
1973/74	$X_{1.4}$	$X_{2.4}$	$X_{3.4}$	$X_{4.4}$	$X_{5.4}$	$X_{6.4}$	$X_{7.4}$
1974/75	$X_{1.5}$	$X_{2.5}$	$X_{3.5}$	$X_{4.5}$	$X_{5.5}$	$X_{6.5}$	$X_{e7}(7.1)$
1975/76	$X_{1.6}$	$X_{2.6}$	$X_{3.6}$	$X_{4.6}$	$X_{5.6}$	$X_{6.6}$	$X_{7.6}$
1976/77	$X_{1.7}$	$X_{2.7}$	$X_{3.7}$	$X_{4.7}$	$X_{5.7}$	$X_{6.7}$	$X_{7.7}$
1977/78	$X_{1.8}$	$X_{2.8}$	$X_{3.8}$	$X_{4.8}$	$X_{5.8}$	$X_{6.8}$	$X_{7.8}$
1978/79	$X_{1.9}$	$X_{2.9}$	$X_{3.9}$	$X_{4.9}$	$X_{5.9}$	$X_{6.9}$	$X_{7.9}$
1979/80	$X_{1.10}$	$X_{2.10}$	$X_{3.10}$	$X_{4.10}$	$X_{5.10}$	$X_{6.10}$	$X_{7.10}$

On recommence alors une A.C.P sur la matrice X_2 . On obtient : a_2 , C_2 , M_{x2} et S_{x2} .

La projection des variables sur les composantes :

$$a_2 = \begin{matrix} a_2(1.1) & a_2(1.2) & a_2(1.3) & a_2(1.4) & a_2(1.5) & a_2(1.6) & a_2(1.7) \\ a_2(2.1) & a_2(2.2) & a_2(2.3) & a_2(2.4) & a_2(2.5) & a_2(2.6) & a_2(2.7) \\ a_2(3.1) & a_2(3.2) & a_2(3.3) & a_2(3.4) & a_2(3.5) & a_2(3.6) & a_2(3.7) \end{matrix}$$

La projection des observations sur les composantes :

C1	C2	C3
C1 (1.1)	C1 (1.2)	C3 (1.3)
C1 (2.1)	C1 (2.2)	C3 (2.3)
C1 (3.1)	C1 (3.2)	C3 (3.3)
C1 (4.1)	C1 (4.2)	C3 (4.3)
C1 (5.1)	C1 (5.2)	C3 (5.3)
C1 (6.1)	C1 (6.2)	C3 (6.3)
C1 (7.1)	C1 (7.2)	C3 (7.3)
C1 (8.1)	C1 (8.2)	C3 (8.3)
C1 (9.1)	C1 (9.2)	C3 (9.3)
C1 (10.1)	C1 (10.2)	C3 (10.3)

On calcule sur la matrice les moyennes et les écarts types :

$M_{xi} (1)$ $M_{x1} (2)$ **$M_{x2} (2)$**

$S_{xi} (1)$ $S_{x1} (2)$ **$S_{x2} (2)$**

La deuxième estimation des valeurs lacunaires se fait par :

Exemple ; station de Bsibsa, (09-04-19), valeur X2

$$X_{e2} = \{M_{x2} (2) + S_{x2} (2) * ((a_2 (1.2) * C_2 (2.1)) + ((a_2 (2.2) * C_2 (2.2)) + ((a_2 (3.2) * C_2 (2.3))))\}$$

On recommence cette procédure un certain nombre de fois (nombre d'itérations) jusqu'à ce que le processus se stabilise (diminution des écarts). A chaque itération, nous modifions les estimations pour les observations manquantes. Nous avons à chaque fois noté la moyenne et l'écart-type des modifications, ainsi que l'écart maximale. Ces résultats sont reportés dans le graphe suivant :

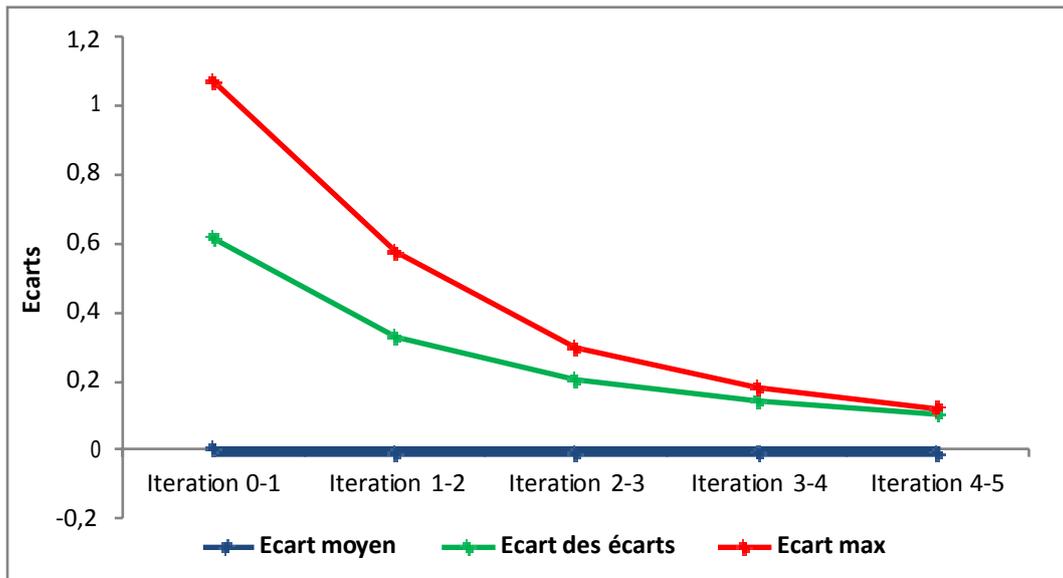


Figure 35 : Modifications des écarts entre les itérations

D'après le graphique de la figure 35, on constate une diminution des écarts d'une itération à l'autre. A partir de la 4^{ème} et la 5^{ème} itération, l'écart devient minime entre l'écart moyen et l'écart-type des écarts. Il est donc parfaitement juste de considérer que le processus est stabilisé à partir de la 5^{ème} itération.

1-4-Analyse des résultats de l'A.C.P

Seules les deux premières composantes principales sont prises en compte, puisqu'elles ont une signification spatiale. On constate que la première composante représente plus de 77.1% de la variance expliquée. Les deux premières composantes ont une variance expliquée cumulé de 84.2% et qu'à partir la troisième, la part expliquée devient très faible soit 4%.

composantes	C1	C2	C3
valeurs propres	10,028	0,925	0,594
variance expliquée	0,771	0,071	0,046
variance expliquée cumulée	0,771	0,842	0,888

Le tableau 19 montre que, la première composante est corrélée positivement avec toutes les variables. Elle représente la variabilité temporelle des pluies annuelles.

Tableau 19: Projection des variables actives sur les pluies annuelles

Stations	C1	C2	C3
01-14-04	0,789	0,456	-0,093
02-20-02	0,940	-0,119	0,004
05-01-02	0,726	0,485	-0,373
09-02-03	0,939	-0,086	0,091
09-04-02	0,910	-0,180	-0,035
09-04-03	0,935	-0,206	-0,060
09-04-19	0,929	-0,217	-0,033
09-05-02	0,913	-0,302	-0,072
09-05-12	0,936	-0,185	-0,074
15-01-01	0,732	0,269	0,579
02-06-02	0,932	-0,132	-0,022
09-03-02	0,853	0,194	0,258
09-01-04	0,840	0,292	-0,138

L'analyse globale du graphe de projection des observations sur C1, met en évidence les années excédentaires (1971/72, 1973/74 et 2002/03) et les années déficitaires (2001/02 et 1996/97) (fig 36). Lorsque la pluie moyenne annuelle est plus grande que la pluie moyenne interannuelle, l'année a une valeur positive de C1. Lorsque la pluie moyenne annuelle est plus faible par rapport à la pluie moyenne interannuelle, l'année a une valeur négative de C1.

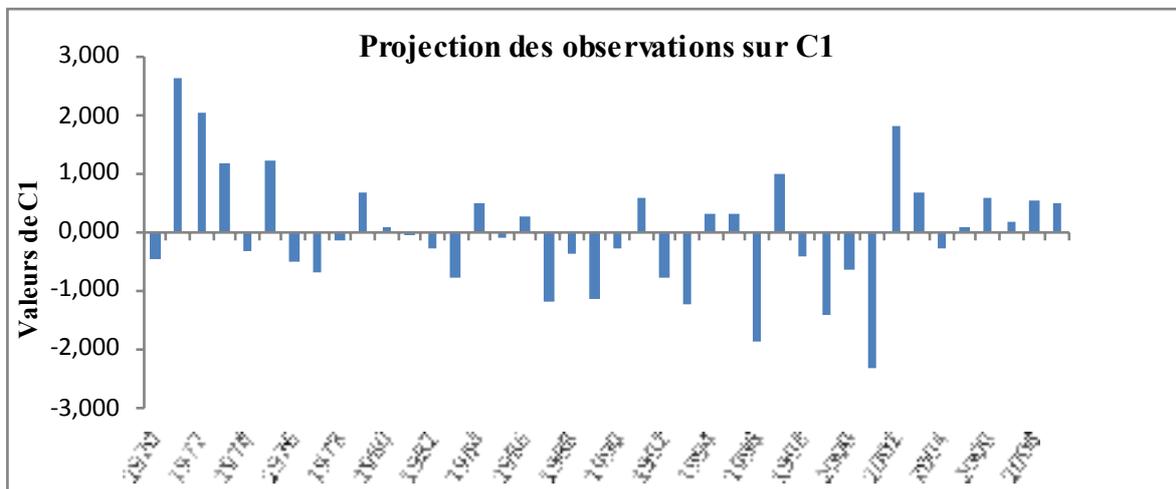


Figure 36 : Valeurs prises par la composante 1

La figure 37 indique les coefficients de corrélations entre chaque variable et la première composante 1, (projection des variables sur la composante C1). Les fortes valeurs des coefficients de corrélations correspondent aux stations situées au Nord du bassin, alors que les plus faibles valeurs des coefficients de corrélations correspondent aux stations situées dans la partie Sud du bassin.

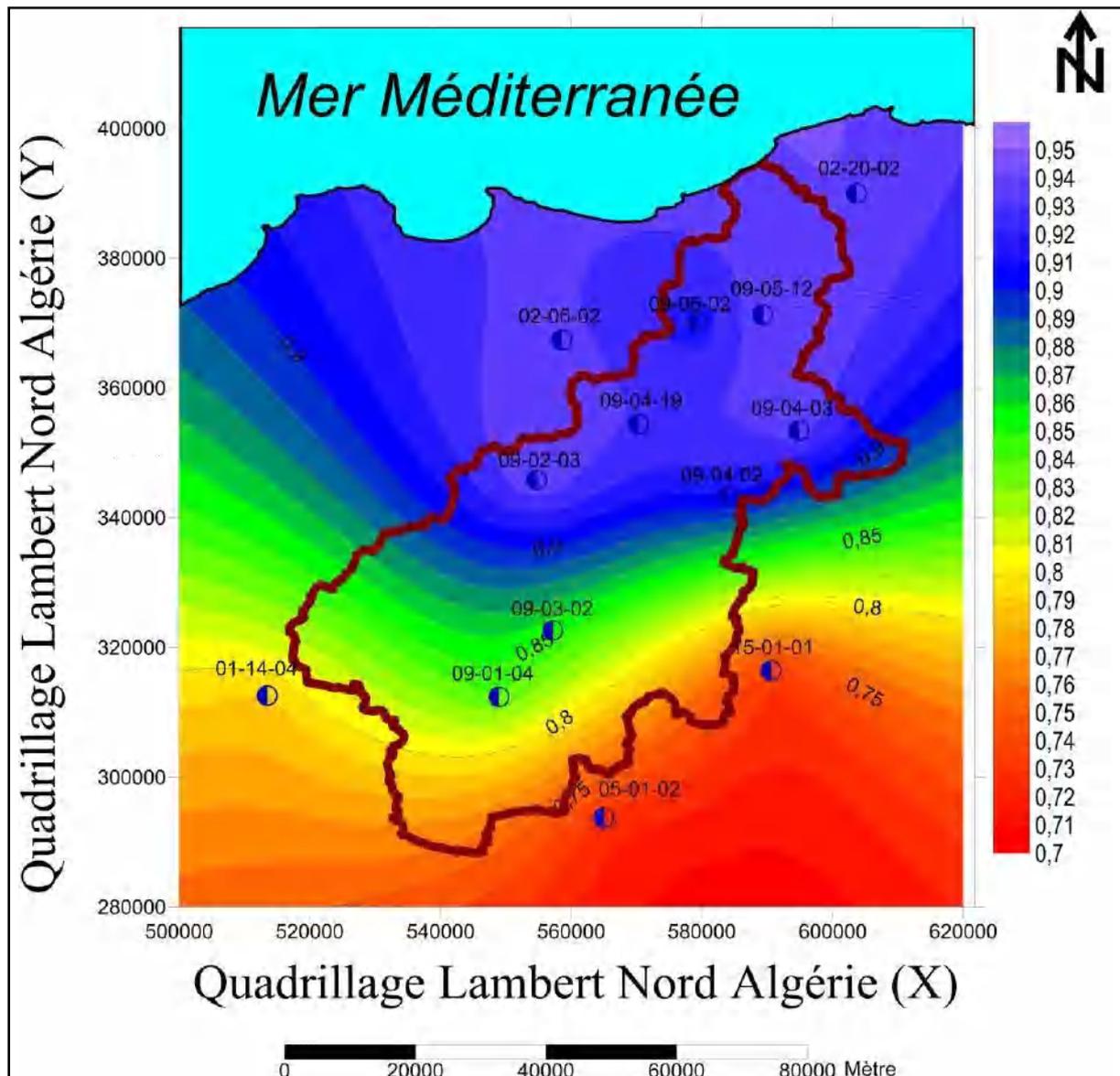


Figure 37 : Comportement des postes pluviométriques de base avec la première composante C1

La seconde composante avec une part de variance de 7.1%, présente une opposition Nord-Sud (caractère spatial). En effet, les valeurs positives des coefficients de corrélations correspondent aux stations situées dans la partie Sud du bassin, à pluviométrie faible (01-14-04, 05-01-02, 15-01-01, 09-03-02 et 09-01-04). Par contre, les stations corrélées négativement se situent dans la partie Nord du bassin (02-20-02, 09-02-03, 09-04-02, 09-04-03, 09-04-19, 09-05-02, 09-05-12 et 02-06-02) (fig 39).

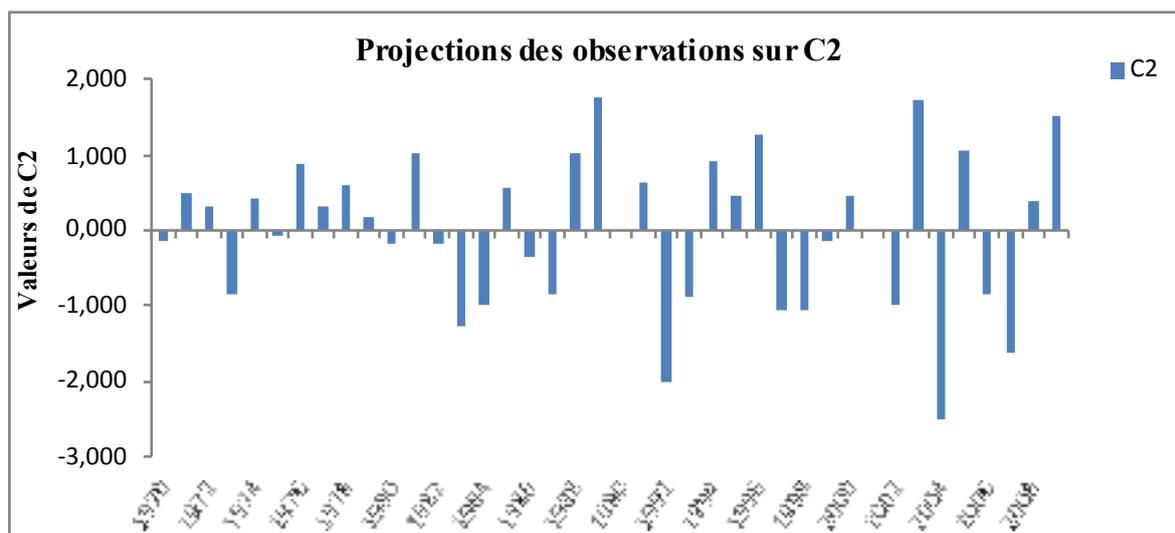


Figure 38 : Valeurs prises par la composante 2

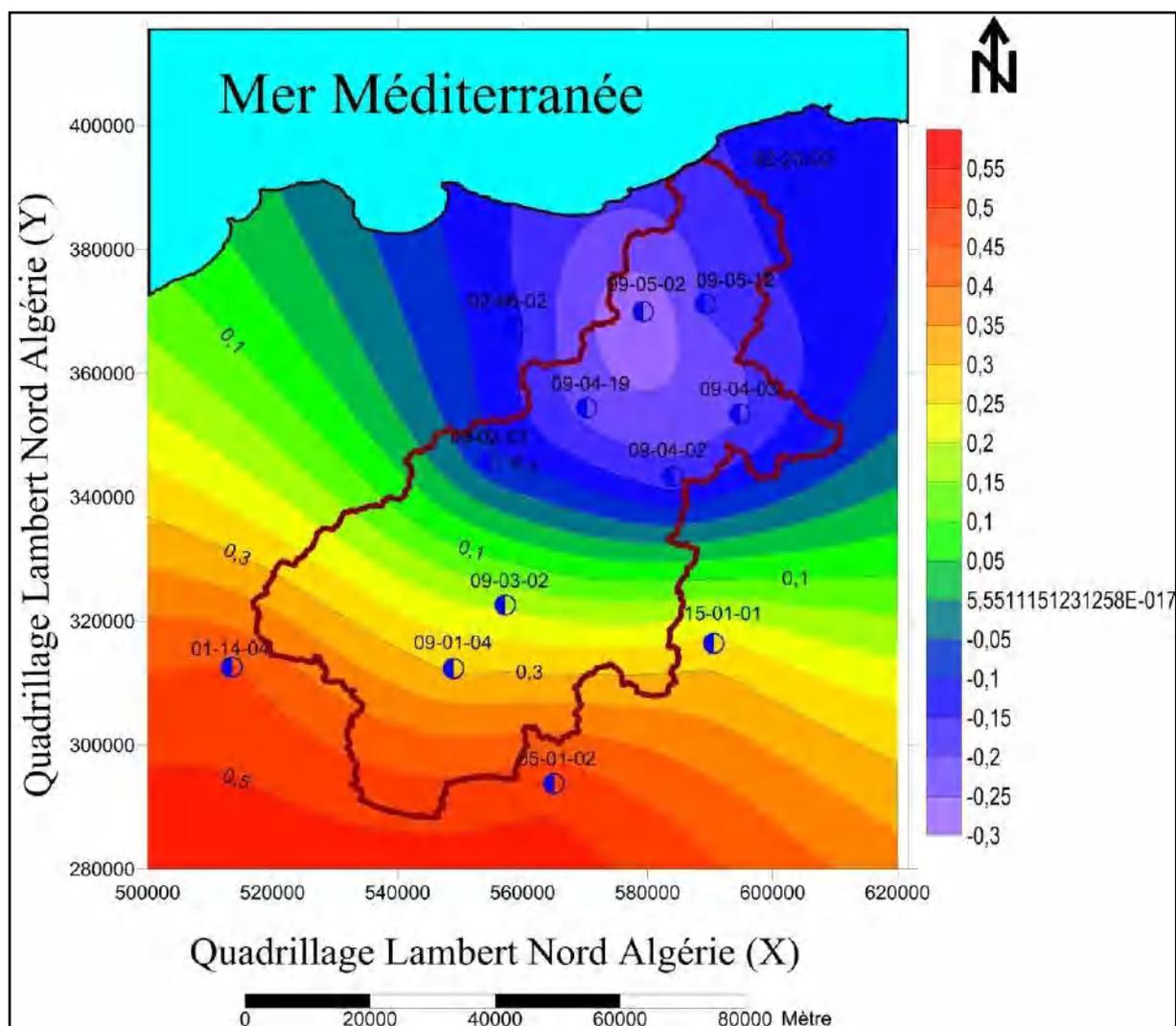


Figure 39 : Comportement des postes pluviométriques de base avec la deuxième composante C2

La troisième composante avec une faible part de variance de 4.6% n'a pas de structure spatiale nette (fig 40). Elle est considérée comme représentative des anomalies accidentelles et systématiques de mesure (erreurs).

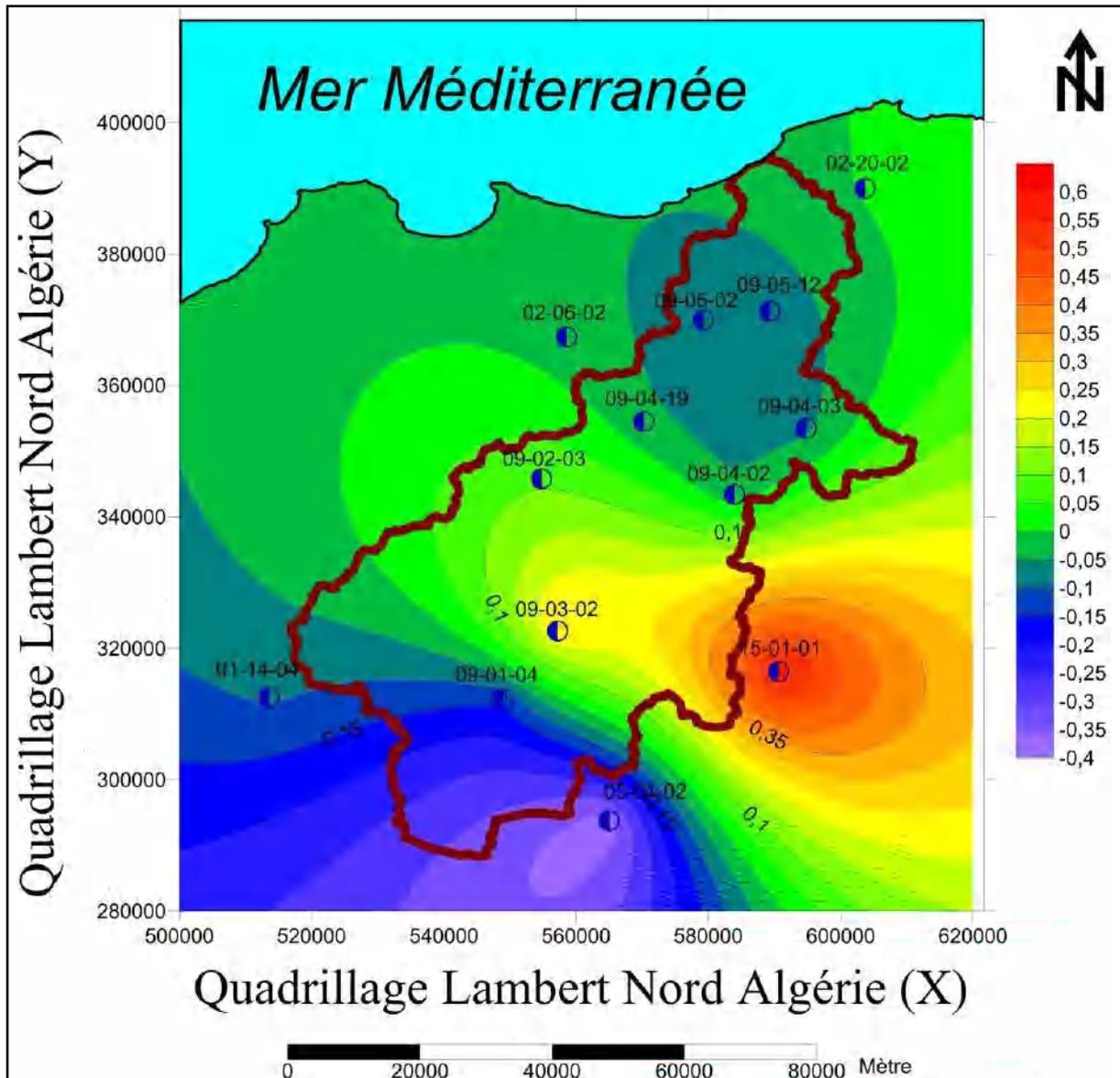


Figure 40 : Comportement des postes pluviométriques de base avec la troisième composante C3

1-5-Critique des données par la méthode des cumuls des résidus de régression

La critique des données pluviométriques par la méthode des cumuls des résidus de régression permet de détecter les erreurs accidentelles et les erreurs systématiques et de détecter l'hétérogénéité graphiquement. Cette méthode exploite les propriétés de la régression linéaire entre 2 variables X et Y.

Nous considérons que les observations (x) en un poste quelconque ne dépendent que des valeurs prises par C1, C2 et C3 et d'un résidu aléatoire. Nous avons évalué les paramètres de la régression multiple entre la variable X et les trois composantes principales C1, C2 et C3 d'après les (n) observations réellement disponibles. Ainsi pour chaque observation (x) mesurée réellement, on peut reconstituer son estimation (x estimé) à partir de ces trois composantes principales :

$$x \text{ estimé} = a C1 + b C2 + c C3 + d$$

On peut alors tester la série des données réellement observées de chacune des stations par rapport à la série fictive basée sur les trois composantes principales C1, C2 et C3 afin de détecter les anomalies systématiques et les anomalies accidentelles.

Les graphes de la figure 41 montrent que les trois composantes principales s'ajustent bien à la loi normale. Ceci permet d'homogénéiser les données pluviométriques en utilisant les composantes C1, C2 et C3.

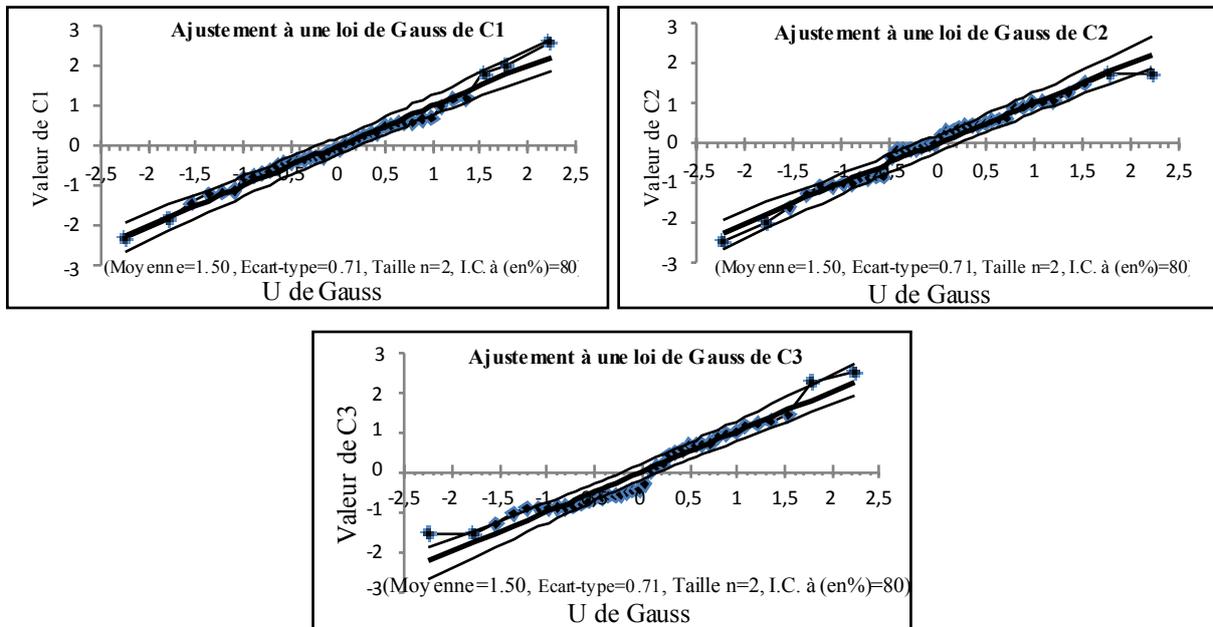


Figure 41: Ajustement à une loi normale des projections des observations actives pour les trois composantes C1, C2 et C3 (n=40)

Les résultats pour les postes pluviométriques sont résumés dans le tableau 20. Elles montrent que les pluies estimées par les composantes C1, C2 et C3 de tous les postes sont bien liées aux pluies réellement observés. Les graphiques des postes de Lakhdaria gorges et Hamiz barrage sont montrés dans la figure 42 à titre d'exemple.

Tableau 20: Résultats de régressions entres les postes pluviométriques et les composantes C1 C2C3 ($Y=aX+b$)

Poste pluviométrique	Code	a	b	R	R ²
Mongorno	01-14-04	0.82	3.89	0.95	0.91
Hamize barrage	02-06-02	0.88	3.03	0.97	0.94
Baghlia village	02-20-02	0.89	2.88	0.97	0.94
Adaoura	05-01-02	0.89	1.57	0.97	0.94
Souagui	09-01-04	0.68	5.78	0.90	0.82
ANRH	09-02-03	0.87	3.03	0.96	0.93
Beni Slimane	09-03-02	0.81	3.51	0.95	0.90
Souk Elkmis	09-04-02	0.85	3.13	0.96	0.92
Djebahia	09-04-03	0.91	2.03	0.97	0.95
Bsibsa	09-04-19	0.89	2.84	0.97	0.94
Lakhdaria gorges	09-05-02	0.92	2.04	0.98	0.96
Chabet Elamur	09-05-12	0.87	3.11	0.96	0.93
Sour Elghozlane	15-01-01	0.93	1.25	0.98	0.97

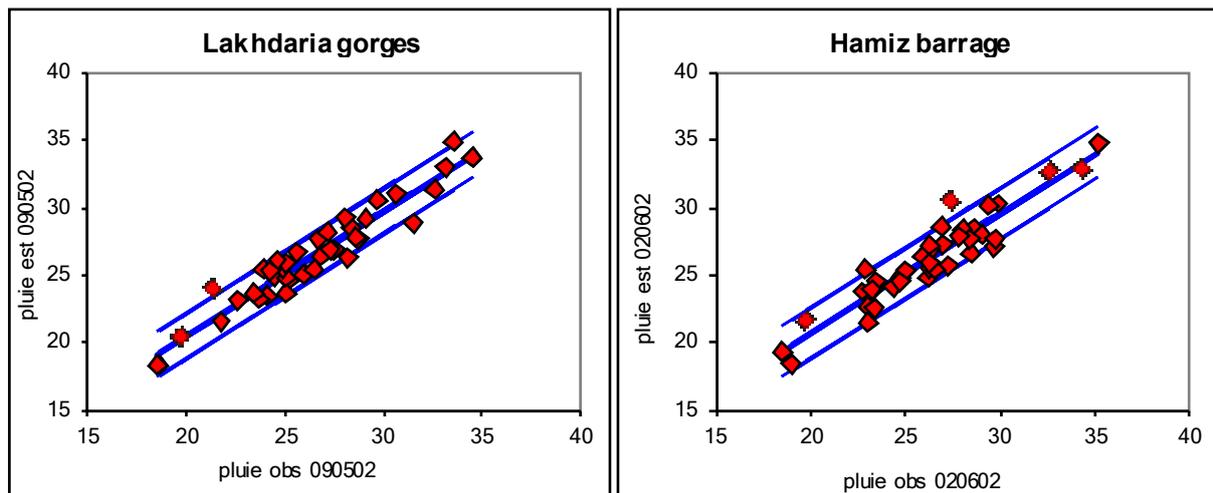


Figure 42 : pluie observée et pluie estimée par C1, C2 et C3 pour la station de Lakhdaria gorges et la station de Hamiz barrage

1-5-1-Détection des anomalies accidentelles

On travaille avec un intervalle de confiance IC de 95%. On peut considérer que pour une année donnée (i), il y'a 95% de chance pour que l'écart à la droite soit compris entre $-1.96\sigma\epsilon < E(i) < +1.96\sigma\epsilon$. ($\sigma\epsilon$; écart type des écarts). Si la valeur de l'année (i) sort de cet intervalle, elle est considérée comme une anomalie accidentelle.

Au niveau du poste pluviométrique de Mongorno (01-04-14), les valeurs des années 1983, 1991 et 1994 constituent des anomalies accidentelles. L'année 1983 est sous-estimée alors que les années 1991 et 1994 sont sur-estimées (fig 43).

Pour le poste pluviométrique de souk Elkhemis (09-04-02), les années 1977 et 1997 sont sur-estimées alors que les années 1982, 1989 et 1990 sont sous-estimées (fig 44).

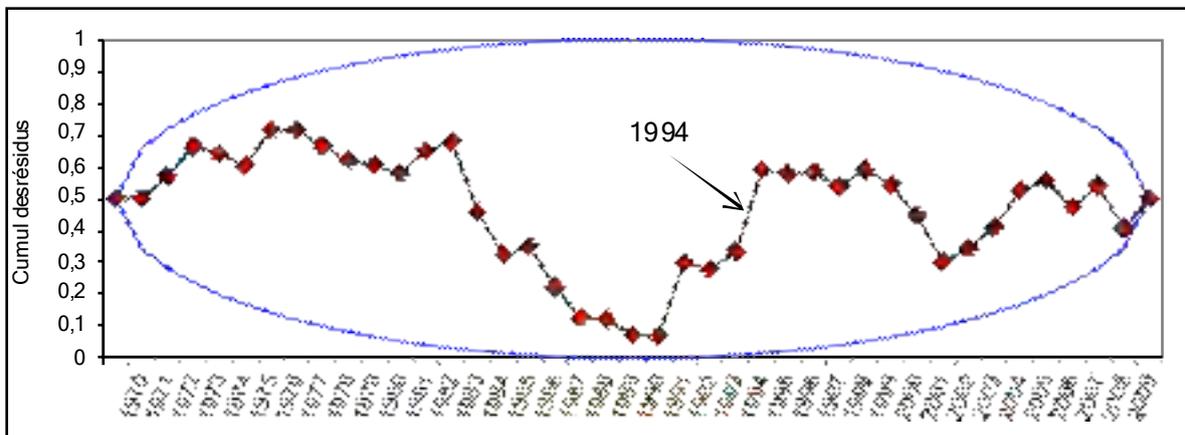


Figure 43 : Détection des anomalies accidentelles de Mongorno (01-14-04) par rapport à C1, C2 et C3

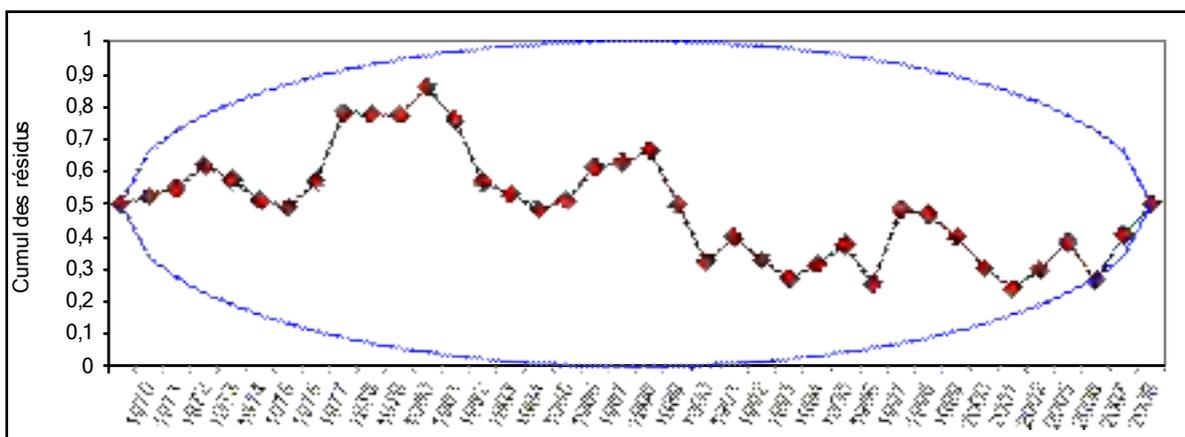
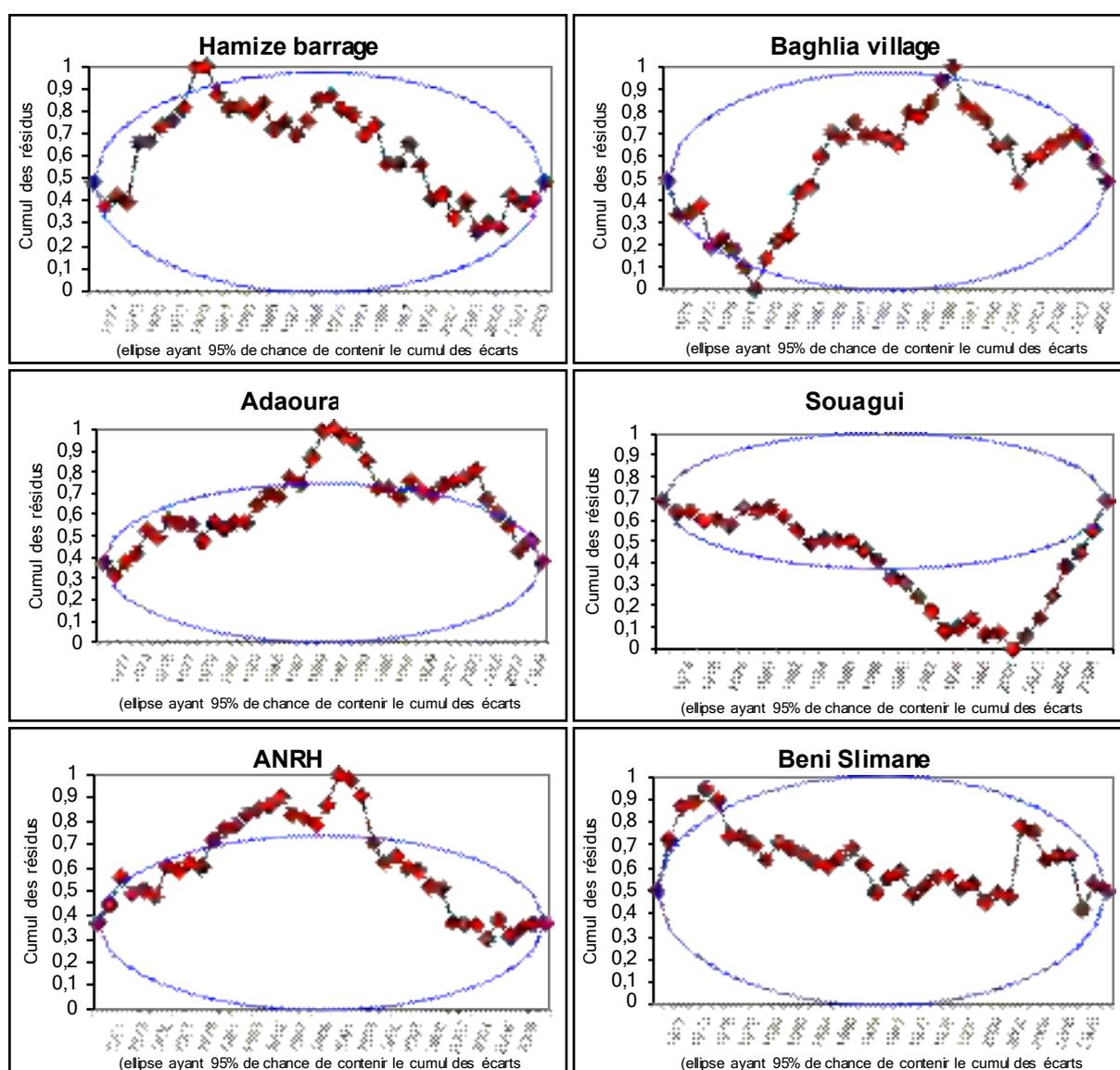


Figure 44 : Détection des anomalies accidentelles de Souk Elkhemis (09-04-02) par rapport à C1, C2 et C3

1-5-2-Détection des anomalies systématiques

On travaille avec IC de 95%, on peut considérer que pour une suite d'années données, il y'a 95% de chance pour que l'écart à la droite soit compris entre $-1.96\sigma\epsilon < E(i) < +1.96\sigma\epsilon$. Les points qui sortent de l'intervalle formé par l'ellipse constituer des anomalies systématiques.

L'application de la méthode des cumuls de résidus de régression montre que les anomalies systématiques ont été détectées pour tous les postes pluviométriques sauf pour le poste de Mongorno et le poste de Souk Elkhmis. Au niveau du poste de Lakhdaria gorges, l'année 2006 sort de l'ellipse (fig 45).



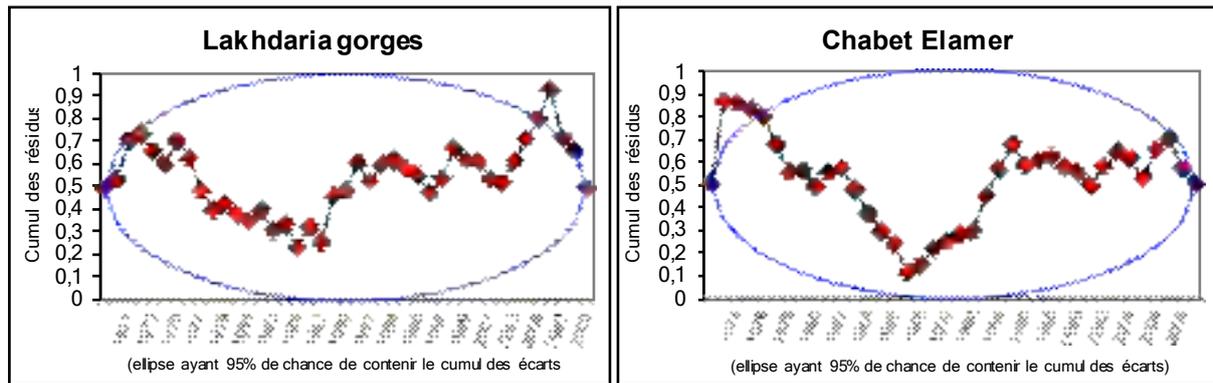


Figure 45: Détection des anomalies systématiques des postes pluviométriques par rapport C1, C2 et C3

2-Homogénéisation d'ensemble

Les données lacunaires pour les 13 postes de références sont reconstituées à l'aide des modèles de régressions linéaires multiples avec des vecteurs régionaux issus de l'analyse en composante principale (A.C.P). Nous disposons donc de deux vecteurs régionaux connus sur la période de 40 années (1970/1971-2009/2010) et nous avons un total de 23 postes pluviométriques. Dans ce cas, l'utilisation d'une régression double s'avère suffisante car deux composantes principales suffisent à caractériser la structure spatiale des pluies en expliquant 84% de la variance.

2-1-Régressions doubles avec les vecteurs régionaux

Le principe de la régression double est d'expliquer une variable X à partir de deux variables Y et Z :

$$X = aY + bZ + c$$

X : variable dépendante

Y : variable indépendante une

Z : variable indépendante deux

a et b : paramètres de la régression double

c : terme constant

• **Exemple d'application de la régression double : poste de Bordj Mnaïel (090510)**

Sur la période de 40 années, nous disposons de 25 années observées. Les 15 autres années constituent des lacunes. On aura de ce fait 15 valeurs de pluies annuelles à estimer.

En utilisant les données de 25 années réellement observées et les valeurs correspondantes des composantes principales C1 et C2, on calcule une régression double. Les étapes et les résultats des calculs sont reportés ci-dessous. Il faut toujours vérifier si les différents coefficients de corrélation calculés sont significatifs.

Les tableaux 21 détaillent les étapes de calcul pour le poste de Bordj Mnaïel (n=25)

Tableau 21 : détails de la régression double pluies annuelles à Bordj Mnaïel avec C1, C2

	Année	Bordj Mnaïel	C1	C2
1	1971	33,571	2,621	0,498
2	1972	33,215	2,028	0,320
3	1973	31,064	1,158	-0,851
4	1974	24,341	-0,341	0,435
5	1975	26,291	1,198	-0,085
6	1976	21,707	-0,523	0,881
7	1977	23,919	-0,686	0,298
8	1978	23,799	-0,141	0,594
9	1979	27,410	0,689	0,180
10	1980	24,952	0,100	-0,181
11	1981	23,565	-0,072	1,032
12	1982	26,490	-0,284	-0,168
13	1983	24,704	-0,793	-1,268
14	1984	28,385	0,496	-1,003
15	1985	26,052	-0,083	0,564
16	1986	27,333	0,267	-0,356
17	1987	22,543	-1,184	-0,868
18	1988	24,795	-0,360	1,013
19	1989	21,131	-1,120	1,762
20	1990	25,642	-0,266	-0,013
21	1991	28,837	0,604	0,620
22	1992	24,444	-0,772	-2,002
23	1993	20,909	-1,212	-0,885
24	1994	26,044	0,329	0,908
25	1995	25,681	0,330	0,471

Tableau 22: Moyennes et écart-types des trois variables

	Bordj Mnaeil	C1	C2
Moyenne=	25,87	0,079	0,075
Ecart-type=	3,273	0,946	0,857

Tableau 23 : Coefficients de corrélation totale entre les trois variables

	Bordj Mnaeil	C1	C2
Bordj Mnaeil	1	0,914	-0,078
C1	0,914	1	0,123
C2	-0,078	0,123	1

Tableau 24 : Coefficients de corrélation partielles et coefficient de corrélation multiple R

Paramètres	Valeurs
Nombre d'observation	25
Coefficient de corrélation partielle ; ri= C1/C2	0.93
Coefficient de corrélation partielle ; ri= C2/C1	-0.47
Coefficient de corrélation multiple R=	0.93

A partir de ces paramètres on évalue le coefficient de corrélation multiple entre x d'une part et C1 et C2 d'autre part, ainsi que l'équation de la régression :

$$X = aC1 + bC2 + c$$

$$X = 3.24C1 - 0.74C2 + 25.67$$

Pour chaque année manquante comme par exemple l'année de 1996, on reconstitue ainsi les hauteurs de pluies :

$$X_{1996} = 3.24C_{1996} - 0.74C_{1996} + 25.67$$

$$X_{1996} = 3.24 * -1.87 - 0.74 * 1.27 + 25.67$$

$$X_{1996} = 18.66^2 = 348 \text{ mm}$$

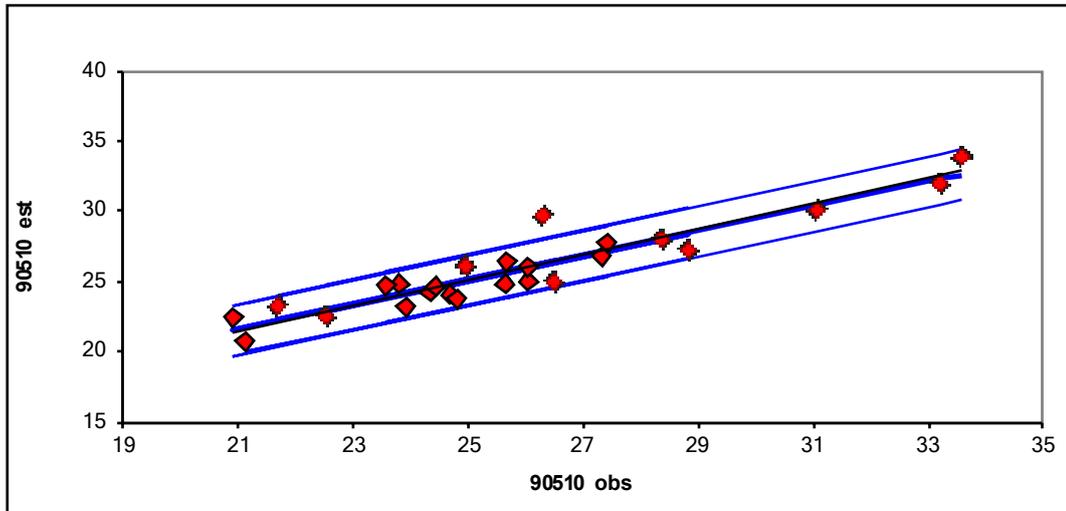


Figure 46 : Pluies observées et pluies estimées par régression double à Bordj Mnaeil

3- Variabilité des pluies annuelles

La pluviométrie annuelle varie au cours de la période d'étude. Ceci est mis en évidence à partir des valeurs des coefficients de variation (tableau. 25). Cette variabilité se traduit par des hauteurs de pluies qui vont du double à plus (exemple de l'année de 1971/72, la plus pluvieuse où a été enregistré un total annuel de 920 mm, soit 2.12 fois la pluie moyenne annuelle pour le poste d'El-Omaria. L'analyse des paramètres statistiques des 23 postes pluviométriques a permis de remarquer que les valeurs fortes de coefficient de variation correspondent aux postes situés au Sud du bassin versant.

Les figures 47, 48 et 49 montrent que l'irrégularité des précipitations se traduit non seulement par la valeur des hauteurs de pluie, mais aussi par l'existence des périodes de sécheresse et des périodes humides. On a pris un poste pluviométrique représentatif de chaque zone géographique. Les résultats montrent que la période de 1971/72 à 1973/74 est une période humide pour tous les postes pluviométriques. Par contre, les périodes de sécheresse consécutives sont (1987/88 à 1990/91, 1998/99 à 2001/02) pour le poste de Lakhdaria gorge, (1985/86 à 1989/90, 1992/93 à 1996/97 et 1998/99 à 2001/02) pour le poste de Souk Elkhemis, (1998/99 à 2001/02, 2004/05 à 2009/10) pour le poste de Souagui. Ces périodes de sécheresse ont des impacts directs sur le milieu et notamment sur les transports des matières en suspension. Les sols desséchés provoquent une augmentation de la disponibilité des particules, qui seront facilement transportées par le ruissellement qui se forme dès les premières pluies.

Tableau 25 : Paramètres statistiques des postes pluviométriques étudiés
(période: 1970/71-2009/10)

Poste pluviométrique	Code	Moyenne (mm)	Ecart-type (mm)	Max (mm)	Min (mm)	cv
Ain Boucif	01-11-04	333,81	156,60	611,90	36,90	0,47
Mongorno	01-14-04	522,10	147,50	937,20	238,40	0,28
Hamiz barrage	02-06-02	700,90	192,34	1236,60	341,40	0,27
Ouzera	02-11-12	562,78	197,08	1420,71	226,10	0,35
Larbaa	02-14-03	660,75	200,01	1176,20	201,10	0,30
Sakamody	02-14-31	822,17	375,56	1995,00	235,11	0,46
Tizi letnine	02-19-11	647,28	163,63	1004,60	314,43	0,25
Baghlia village	02-20-02	771,85	202,09	1359,60	456,90	0,26
Adaoura	05-01-02	258,41	103,28	595,28	76,70	0,40
Souk Eldjemaa	05-01-03	303,45	107,40	543,10	72,50	0,35
Souagui	09-01-04	343,53	94,62	585,72	172,35	0,28
EL Omaria	09-02-01	433,07	139,16	920,00	180,98	0,32
A.N.R.H	09-02-03	585,68	187,51	1117,90	298,70	0,32
EL Omaria	09-02-05	340,98	113,00	609,61	86,11	0,33
Beni Slimane	09-03-02	378,31	96,75	567,03	194,70	0,26
Dechemiya	09-03-14	468,45	171,98	913,90	237,14	0,37
Souk ElKhemis	09-04-02	515,89	162,46	988,00	218,92	0,31
Djebahia	09-04-03	588,43	160,41	1071,70	254,30	0,27
Bsibsa	09-04-19	714,06	183,72	1197,44	288,90	0,26
Lakhdaria Gorges	09-05-02	706,40	202,54	1189,20	342,50	0,29
Bordj Mnaeil	09-05-10	670,65	180,46	1127,00	330,10	0,27
Chabet ELAmur	09-05-12	695,17	176,92	1160,54	345,70	0,25
Sour Elghozlane	15-01-01	439,16	119,89	840,10	255,60	0,27

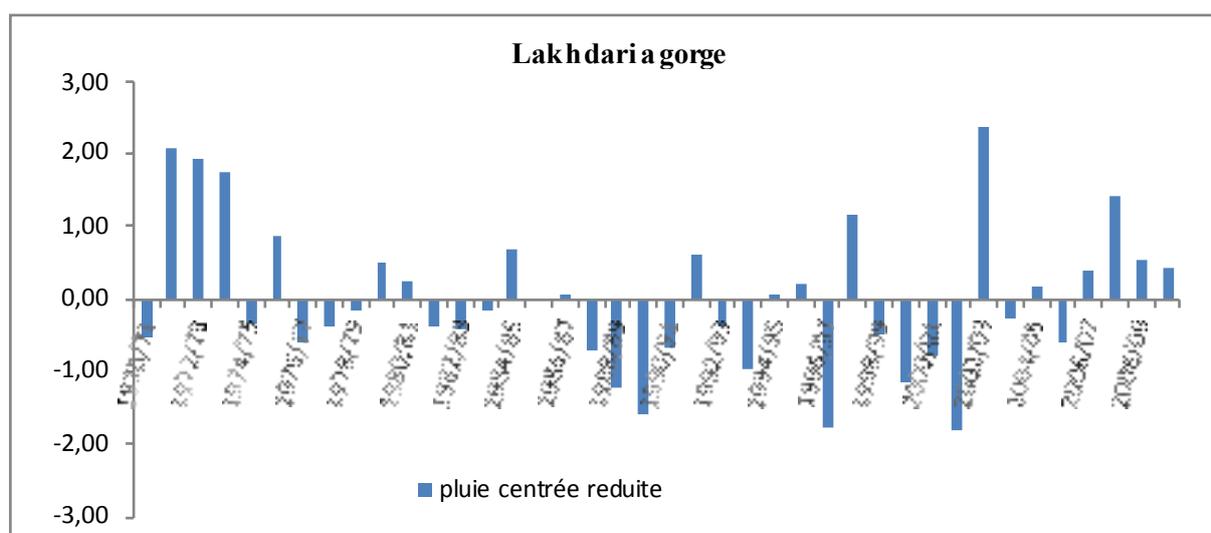


Figure 47 : pluie centrée réduite au niveau de la station de Lakhdaria gorges

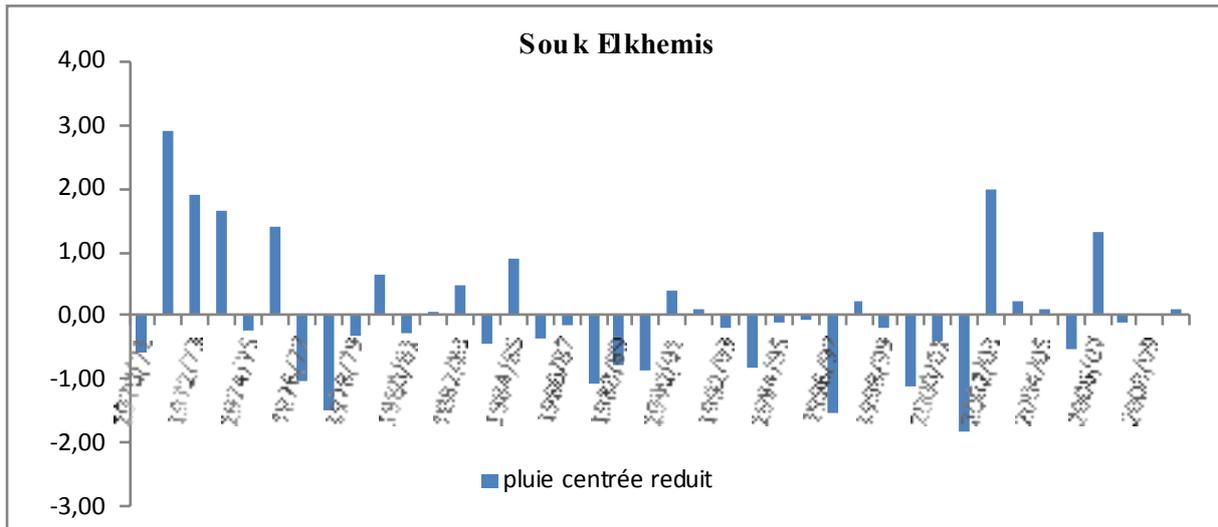


Figure 48: pluie centrée réduite au niveau de la station de Souk Elkhemis

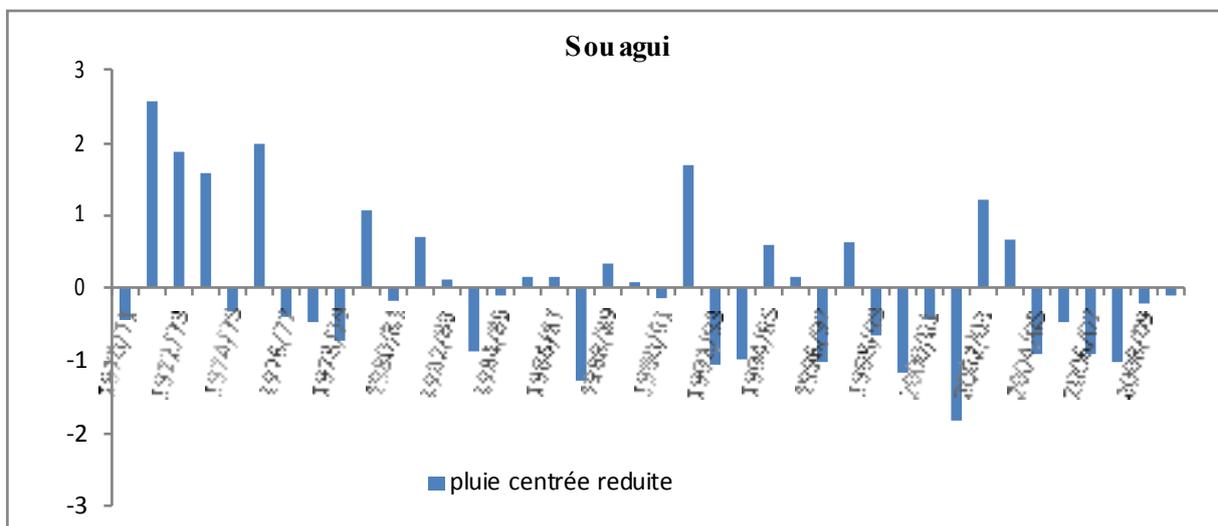


Figure 49 : pluie centrée réduite au niveau de la station de Souagui

3-1-Etude fréquentielle des pluies annuelles

3-1-1-Le modèle gauss-arithmétique appliqué aux pluies annuelles

La loi normale est bien adaptée à la statistique des précipitations annuelles. Dans cette loi, nous pouvons déterminer les précipitations annuelles pour différentes fréquences au non-dépassement (années humides et années sèches) en appliquant l'équation de la variable réduite de Gauss :

$$U_F = \frac{P_F - P_{moy}}{\sigma P}$$

Avec : U_F : variable réduite de Gauss de probabilité de F ;

P_F : pluies fréquentielles correspondant à la probabilité F en mm ;

P_{moy} : moyenne des pluies annuelles en mm ;

σP : écart-type des pluies annuelles en mm ;

Les valeurs des fréquences, des variables réduites de Gauss correspondant aux périodes de retour retenues 5, 10, 20, 50 et 100 ans sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 26: Valeurs de U de Gauss, fréquences et période de retour

	Année humide		Année sèche	
	F	U	F	U
Quantile annuel				
Pluie moyenne	0.50	0.000	0.50	0.000
Pluie quinquennale	0.80	0.8414	0.2	-0.8414
Pluie décennale	0.90	1.282	0.1	-1.282
Pluie vingtennale	0.95	1.64	0.05	-1.64
Pluie cinquantennale	0.98	2.054	0.02	-2.054
Pluie centennale	0.99	2.33	0.01	-2.33

Pour évaluer les différentes hauteurs de pluies on utilise donc l'équation suivante :

$$P_F = P_{moy} + \sigma P * U_F$$

3-1-2-Les résultats obtenus

Nous avons calculé pour chacun des 23 postes pluviométriques, les hauteurs de pluies pour différentes périodes de retour (tableau 27, 28). La faiblesse des valeurs correspondant aux années sèches sont bien mises en évidence dans le tableau 28.

Les résultats trouvés montrent que les quantiles correspondant à la pluie millénaire sèche présentent une valeur négative au niveau des postes d'Ain Boucif, Ouzera, Sakamody, Adaoura, Souk Eldjema, El Omaria et Dechemiya. Ces postes pluviométriques se situent dans le domaine des Hautes Plaines au Sud du bassin de l'oued Isser. Les valeurs négatives sont remplacées par zéro (tableau. 28).

Tableau 27 : hauteurs de pluie en mm pour différentes périodes de retour (période humide)

Poste pluviométrique	Pluie moyenne	Pluie quinquennale	Pluie décennale	Pluie vingtennale	Pluie cinquantennale	Pluie centennale
Ain Boucif	333,81	465,57	534,57	590,63	655,47	698,69
Mongorno	522,10	646,21	711,20	764,00	825,07	865,78
Hamiz barrage	700,90	862,73	947,48	1016,34	1095,97	1149,05
Ouzera	562,78	728,60	815,44	885,99	967,58	1021,98
Larbaa	660,75	829,04	917,16	988,77	1071,57	1126,77
Sakamody	822,17	1138,17	1303,64	1438,09	1593,57	1697,22
Tizi letnine	647,28	784,96	857,05	915,63	983,38	1028,54
Baghlia village	771,85	941,89	1030,93	1103,28	1186,94	1242,72
Adaoura	258,41	345,31	390,81	427,79	470,55	499,05
Souk Eldjemaa	303,45	393,82	441,14	479,59	524,05	553,69
Souagui	343,53	423,14	464,83	498,71	537,88	563,99
EL Omaria	433,07	550,16	611,47	661,29	718,90	757,31
A.N.R.H	585,68	743,45	826,07	893,20	970,83	1022,58
EL Omaria	340,98	436,06	485,85	526,30	573,08	604,27
Beni Slimane	378,31	459,72	502,34	536,98	577,03	603,74
Dechemiya	468,45	613,15	688,93	750,50	821,70	869,16
Souk ElKhemis	515,89	652,58	724,16	782,32	849,58	894,42
Djebahia	588,43	723,40	794,08	851,50	917,91	962,19
Bsibsa	714,06	868,64	949,59	1015,36	1091,42	1142,13
Lakhdaria Gorges	706,40	876,82	966,06	1038,57	1122,42	1178,32
Bordj Mnaeil	670,65	822,49	902,00	966,60	1041,31	1091,12
Chabet ELAmur	695,17	844,03	921,98	985,32	1058,56	1107,39
Sour Elghozlane	439,16	540,04	592,86	635,78	685,41	718,50

Tableau 28 : hauteurs de pluie en mm pour différentes périodes de retour (période sèche)

Poste pluviométrique	Pluie moyenne	Pluie quinquennale	Pluie décennale	Pluie vingtennale	Pluie cinquantennale	Pluie centennale
Ain Boucif	333,81	202,05	133,05	76,99	12,15	0
Mongorno	522,10	397,99	333,01	280,20	219,14	178,43
Hamiz barrage	700,90	539,07	454,32	385,46	305,83	252,75
Ouzera	562,78	396,96	310,12	239,57	157,98	103,58
Larbaa	660,75	492,46	404,34	332,73	249,93	194,73
Sakamody	822,17	506,17	340,70	206,25	50,77	0
Tizi letnine	647,28	509,60	437,51	378,93	311,18	266,02
Baghlia village	771,85	601,81	512,77	440,42	356,76	300,98

Adaoura	258,41	171,51	126,01	89,03	46,27	17,77
Souk Eldjema	303,45	213,08	165,76	127,31	82,85	53,21
Souagui	343,53	263,92	222,23	188,35	149,18	123,07
EL Omania	433,07	315,98	254,67	204,85	147,24	108,83
A.N.R.H	585,68	427,91	345,29	278,16	200,53	148,78
EL Omania	340,98	245,90	196,11	155,66	108,88	77,69
Beni Slimane	378,31	296,90	254,28	219,64	179,59	152,88
Dechemiya	468,45	323,75	247,97	186,40	115,20	67,74
Souk ElKhemis	515,89	379,20	307,62	249,46	182,20	137,36
Djebahia	588,43	453,46	382,78	325,36	258,95	214,67
Bsibsa	714,06	559,48	478,53	412,76	336,70	285,99
Lakhdaria Gorges	706,40	535,98	446,74	374,23	290,38	234,48
Bordj Mnaeil	670,65	518,81	439,30	374,70	299,99	250,18
Chabet ELAmur	695,17	546,31	468,36	405,02	331,78	282,95
Sour Elghozlane	439,16	338,28	285,46	242,54	192,91	159,82

4- Cartographie automatiques des pluies moyennes interannuelles

La cartographie de la pluviométrie moyenne interannuelle permet le passage de l'information ponctuelle à une information spatiale dans le bassin versant. Elle permet, dans une seconde phase, de calculer la pluie moyenne des sous bassins jaugés, pour la période de 1970-2009.

L'élaboration de la carte pluviométrique intègre les techniques de cartographie proprement dites et les méthodes d'interpolation. Dans ce travail, la réalisation de la carte des pluies moyennes interannuelles du bassin versant de l'oued Isser a été réalisée en appliquant le krigeage qui constitue la méthode d'interpolation la plus élaborée (Laborde, 2000, Mebarki, 2005, Louamri, 2013).

La réalisation de la carte pluviométrique a été réalisée en suivant les étapes suivantes: régression multiple, interpolation des résidus de régression, et cartographie proprement dite (logiciel Surfer).

4-1- Régression multiple

Nous avons effectué une régression multiple entre la pluie et les variables explicatives qui sont les plus utilisées : coordonnées X Lambert, Y Lambert, altitude lissée (Z liss), distance à la mer et une variable explicative, introduite par Laborde dans plusieurs travaux (2003, et 2007) et également par Assaba (2004) et Louamri (2008 et 2013), sous la forme

$e^{-d/p} * Z_{liss}$, qui exprime une exponentielle décroissante fonction de la distance à la mer que multiplie l'altitude lissée.

d : éloignement à la mer : la plus courte distance à la mer.

Z liss : altitude lissée du poste pluviométrique à partir d'un M.N.T avec une maille de 1 km*1km (fig 50).

On considère en utilisant Z_{liss} et pas l'altitude réelle du poste pluviométrique, que c'est l'environnement topographique qui explique la pluviométrie et non pas l'altitude réelle du poste.

Les calculs ont été réalisés avec le logiciel Hydrolab qui utilise la méthode par backward élimination.

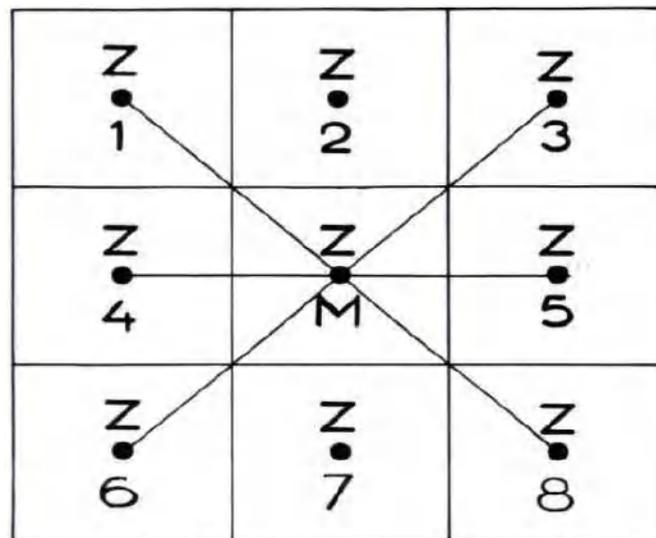


Figure 50 : Méthode de calcul de l'altitude lissée (Louamri, 2013)

La seconde étape concerne l'interpolation des résidus de régressions grâce au logiciel Hydrolab, et enfin la cartographie proprement dite (logiciel surfer).

Les étapes de réalisation de la carte de pluies moyennes 1970-2009 sont représentées dans la figure 51.

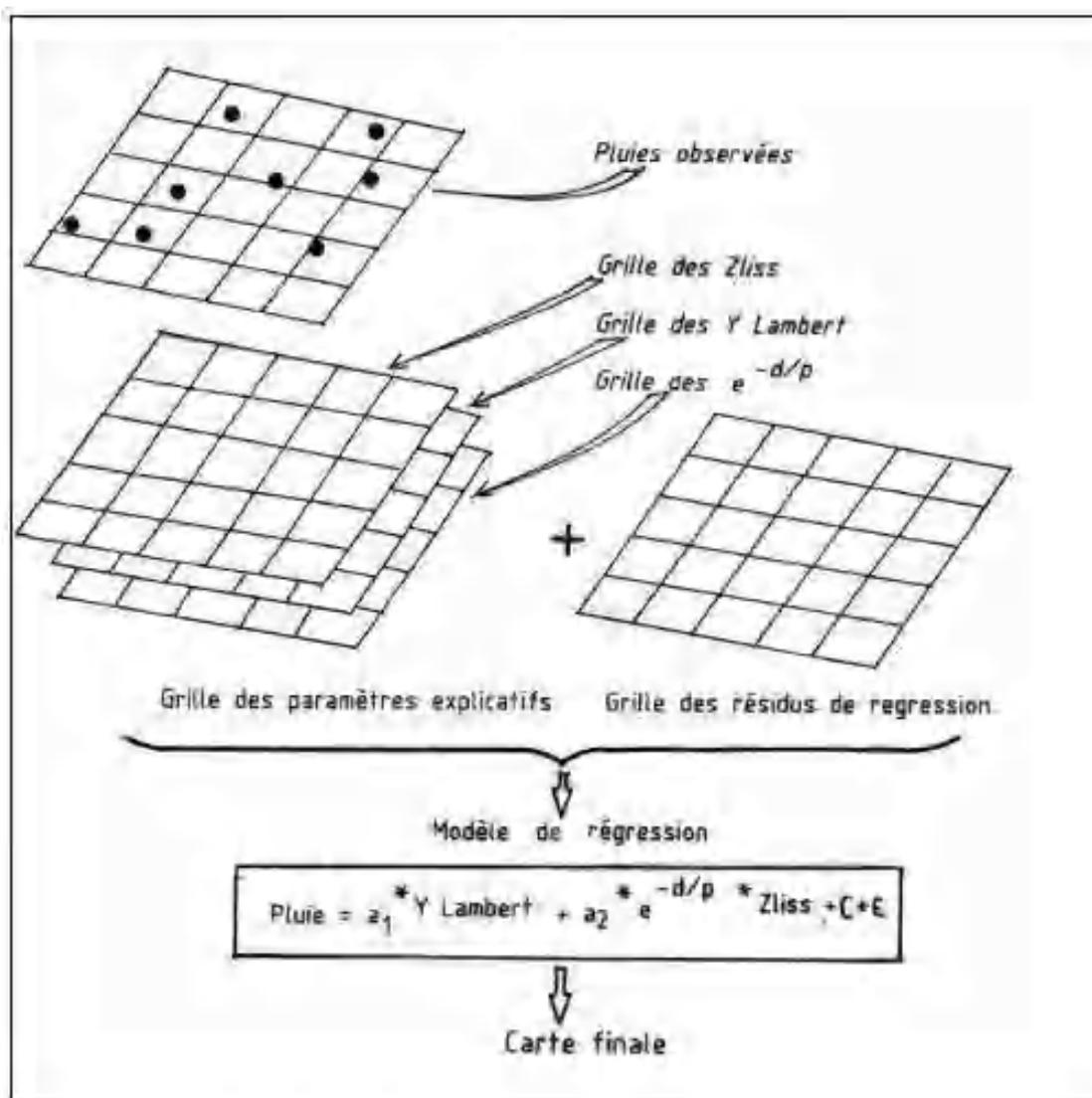


Figure 51: les étapes de la réalisation de la carte pluviométrique (Laborde, 1993 ; Assaba, 2003 ; Mebarki, 2005 ; Louamri, 2013)

Les résultats de la régression multiple linéaire pour les pluies moyennes de la période 1970-2009 sont résumés dans le tableau 29.

Tableau 29: Résultats de la régression multiple linéaire (1970/2009)

Variable	Coefficient de regression	Coefficient de corrélation partielle	
	a_i	r_i	
Y	4,990282902	0,908	
EXPD40 *Zliss	0,591384445	0,509	
ao	-1258,263869		
R :	0,914464125		

Pour les pluies de la période (1970/2009), la régression multiple linéaire retenue l'a été avec 2 variables explicatives Y Lambert et $e^{-d/p} * Z$ liss, avec un coefficient de corrélation multiple $R = 0.91$. Les deux variables Y Lambert et $e^{-d/p} * Z$ liss expliquent 82% de la variance des pluies moyennes annuelles (tableau. 29).

$$P \text{ (mm)} = 4.99 * Y + 0.59 * e^{-d/p} * Z \text{ liss} - 1258.26$$

La relation entre les pluies mesurées et celles estimées par la régression multiple est exprimée par : $P_{\text{est}} \text{ (mm)} = 0.83 * P_{\text{mes}} \text{ (mm)} + 88.73$, avec un coefficient de corrélation $R = 0.91$ (fig 52).

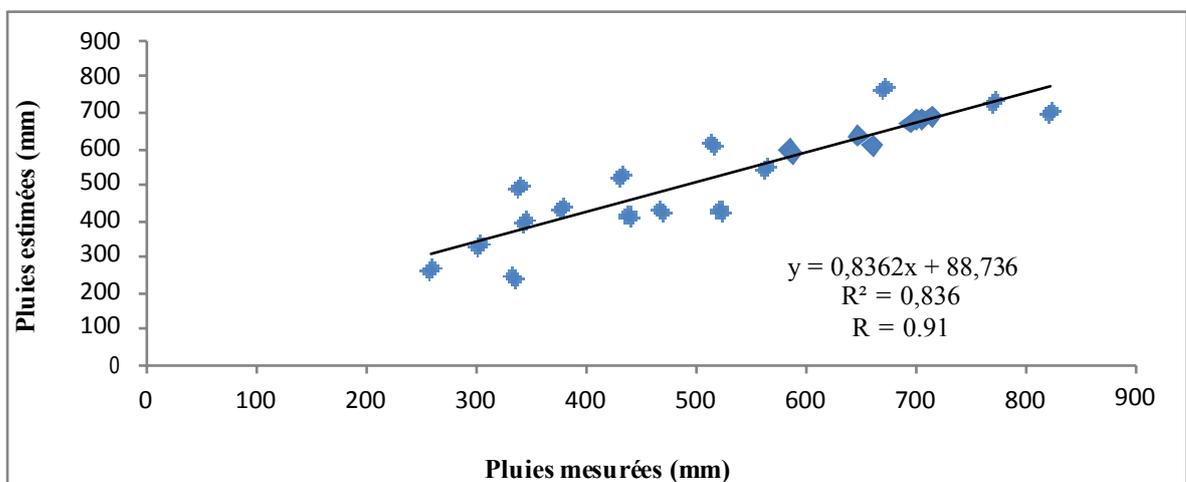


Figure 52 : Régression pluies mesurées et pluies estimées par régression multiple (1970/2009)

La variance expliquée des pluies moyennes annuelles par deux facteurs (Y Lambert et $e^{-d/p} * Z$ liss) étant de 82%. Il reste à interpoler les résidus de régression qui constituent la part de variance non expliquée par la régression multiple. L'interpolation sera réalisée par krigeage après l'élaboration d'un variogramme.

Le variogramme a été appliqué aux résidus de régression multiple 1970/2009. Le meilleur ajustement est obtenu avec un modèle sphérique (fig 53).

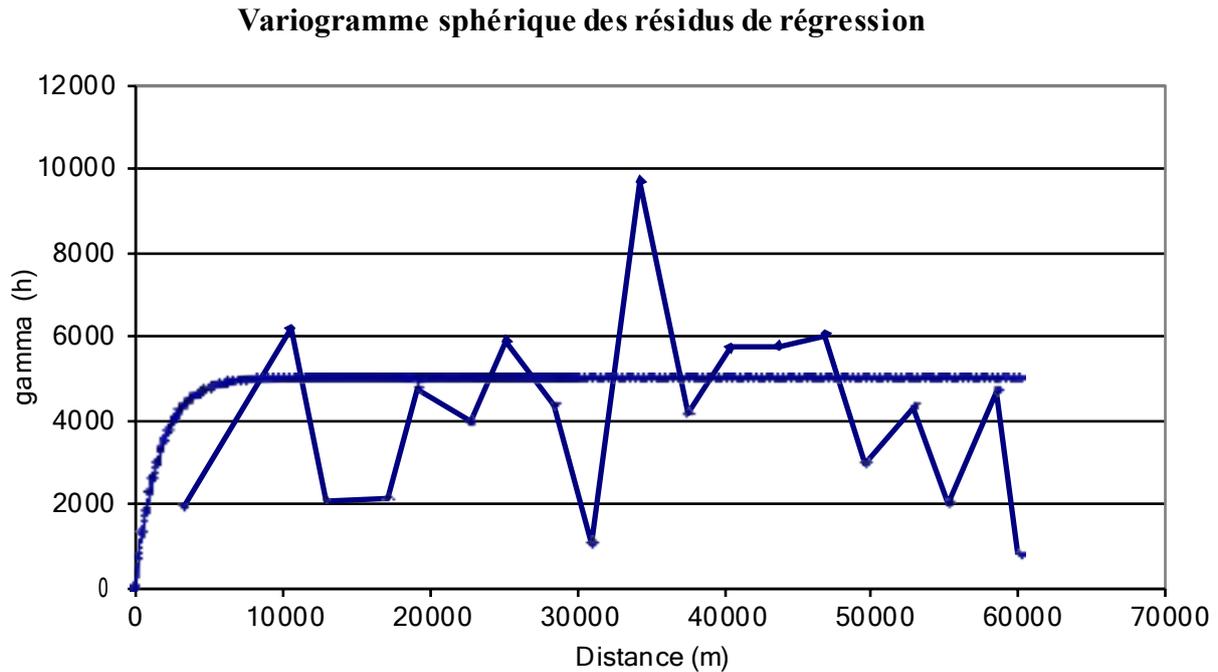


Figure 53 : Variogramme des résidus de régression (1970-2009)

La figure 54 montre la carte pluviométrique moyenne annuelle réalisée avec 23 postes pluviométriques dont les séries d'observations ont été ramenées à une période de (1970-2009). Elle présente une décroissance bien marquée de la pluviométrie dans le sens latitudinal. La carte permet de faire ressortir des zones de forte précipitation (800 mm) dans la zone montagneuse Nord-Est, Sidi Ali Bounab, ainsi que dans le massif de Zima et Bouzegza dans le Nord-Ouest. Les Hautes Plaines, malgré l'altitude supérieure à celle de zones telliennes, connaissent une décroissance importante de la pluviométrie annuelle (moins de 500 mm à 300mm) à cause de l'effet de la continentalité (éloignement de la mer).

Comparativement à la carte A.N.R.H. (1993), dont les séries d'observations ont été ramenées à une période de soixante ans (1922-1960 et 1969-1989), on enregistre une diminution moyenne de 11% des pluies moyennes interannuelles.

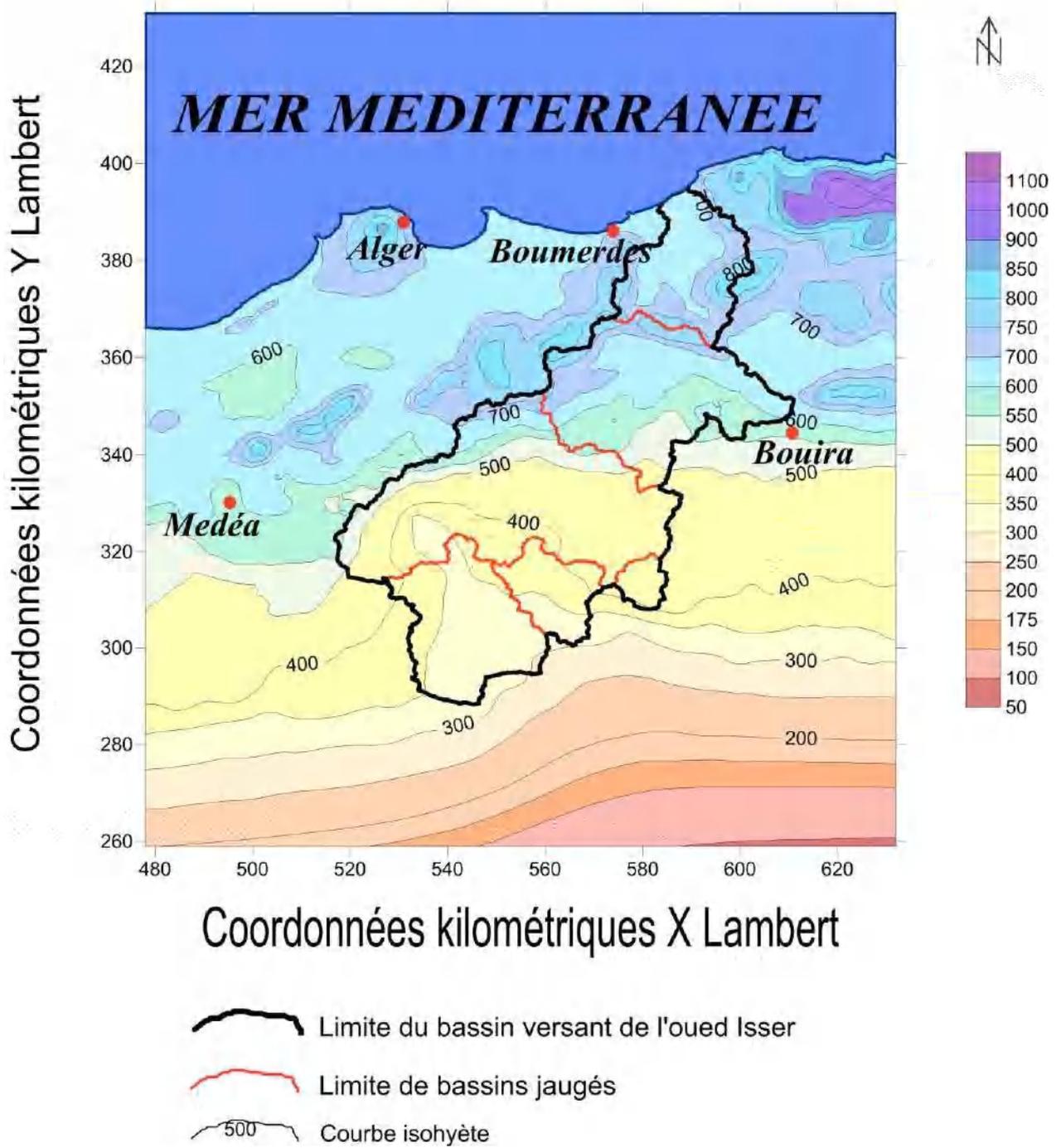


Figure 54 : Carte pluviométrique interannuelle du bassin versant de l'oued Isser (1970-2009)

5- Pluies mensuelles

La répartition mensuelle des pluies dans l'année, et ses variations d'une année à l'autre influencent en grande partie l'écoulement saisonnier. Nous nous basons sur les données de 3 postes pluviométriques pour un aperçu sur le régime mensuel des pluies au niveau des différents secteurs du bassin de l'Isser. Ces postes se situent au Bas Isser (09-05-02), Moyen Isser (09-04-02) et Haut Isser (09-01-04) choisis selon une coupe Nord-Sud pour la période 1970-2009.

Les résultats du tableau 30 traduisent bien une très forte irrégularité de la variation pluviométrique inter mensuelle, ceci est mis en évidence à partir des valeurs élevées du coefficient de variation mensuel. Les plus fortes valeurs de C.V. ont été enregistrées pendant les mois d'été avec un C.V, qui atteint 2.2 en juillet, au niveau du poste de Souagui situé en domaine semi-aride. Cela est attribué à la période de sécheresse marquée des mois secs associés à l'apparition de quelques orages violents.

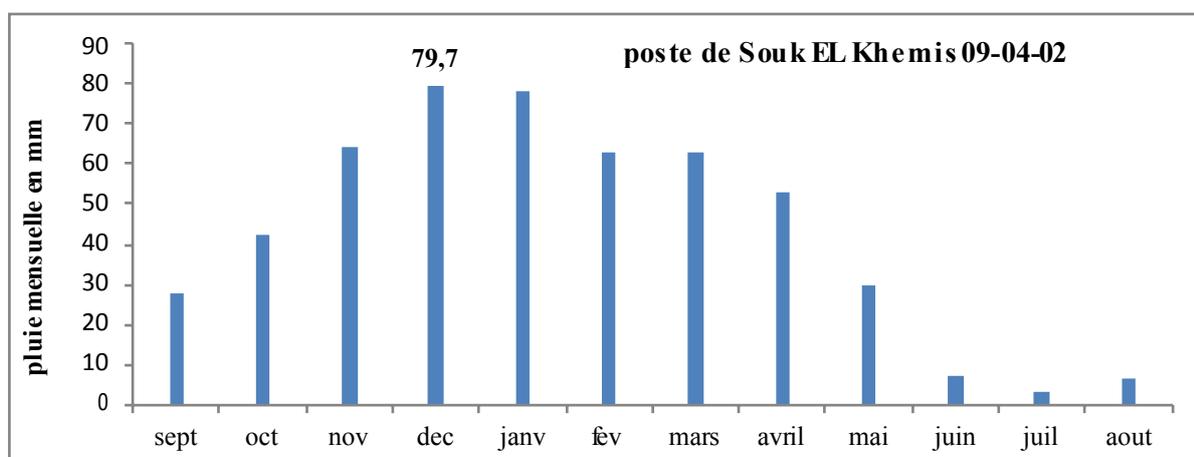
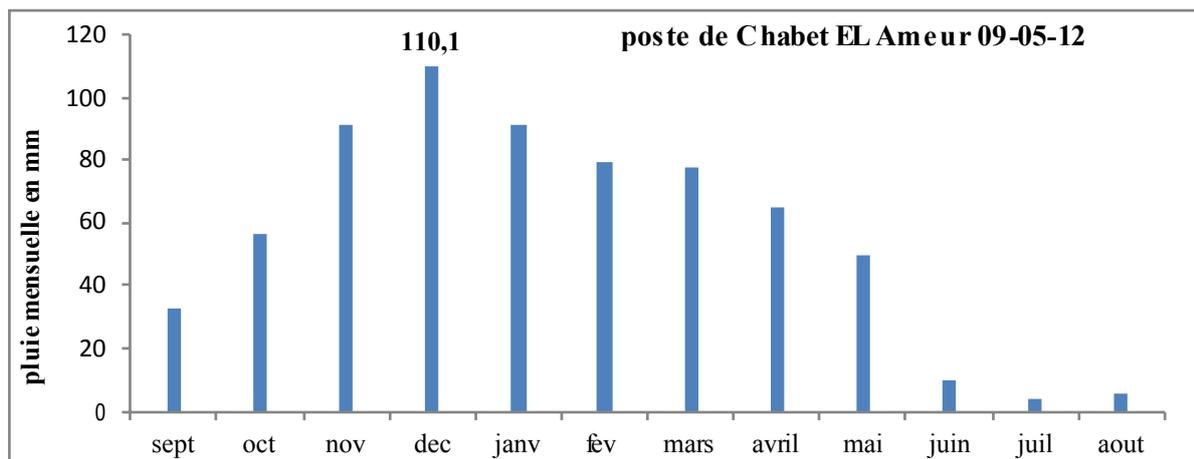
Tableau 30: Caractéristiques des pluies mensuelles de quelques postes pluviométriques

Période (1970-2009)

postes		septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	aout
09-05-12	Moyenne	32,9	56,3	91,2	110,	91,6	79,4	77,5	65,5	50,0	9,9	4,2	5,5
	Max	110,1	162,0	279,0	262,8	237,2	200,2	255,0	155,4	202,6	43,8	35,7	35,0
	Min	0,0	1,3	9,0	0,0	1,5	0,0	3,5	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0
	Ecart-type	28,5	38,9	57,8	72,0	62,8	54,1	60,3	42,0	44,7	12,8	7,6	8,1
	C.V	0,9	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,6	0,9	1,3	1,8	1,5
09-04-02	Moyenne	27,5	42,2	64,5	79,7	78,1	62,9	63,1	53,2	29,6	7,2	3,1	6,5
	Max	96,7	151,0	187,7	191,7	304,9	190,8	266,9	132,4	103,6	37,1	28,6	34,9
	Min	0,0	0,0	2,3	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Ecart-type	23,8	32,8	49,9	49,8	70,1	49,7	61,8	36,4	27,4	10,8	6,3	9,7
	C.V	0,9	0,8	0,8	0,6	0,9	0,8	1,0	0,7	0,9	1,5	2,1	1,5
09-01-04	Moyenne	26,5	30,7	30,1	40,5	39,9	37,4	34,1	38,5	36,8	9,2	7,6	9,1
	Max	102,5	92,3	88,1	159,9	129,6	98,0	132,5	87,1	130,2	34,7	79,5	38,7
	Min	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	Ecart-type	24,3	22,0	20,8	32,5	35,1	24,1	31,3	25,2	32,1	8,6	16,8	10,4
	C.V	0,9	0,7	0,7	0,8	0,9	0,6	0,9	0,7	0,9	0,9	2,2	1,1

La représentation graphique de la figure 55 montre deux périodes pluviométriques bien distinctes. Une période sèche qui correspond à la saison d'été (juin, juillet, août), caractérisée par un déficit pluviométrique bien marqué où les précipitations ne dépassent pas les 10 mm en moyenne. La seconde, est une période humide qui correspond au reste de l'année. Cette dernière est aussi marquée par une succession de mois humides et de mois relativement secs. D'autre part, le mois le plus pluvieux se situe en hiver pendant le mois de décembre pour les 3 postes pluviométriques.

Le rendement pluviométrique des saisons n'est pas homogène dans le bassin de l'Isser. Il dépend du régime pluviométrique propre à chaque secteur géographique. Le poste de Souagui représentatif du domaine semi-aride (Hautes Plaines) se caractérise par un régime un peu différencié, où les hauteurs des pluies de la saison printanière (notamment le mois d'avril) contribuent pour une grande partie de pluie.



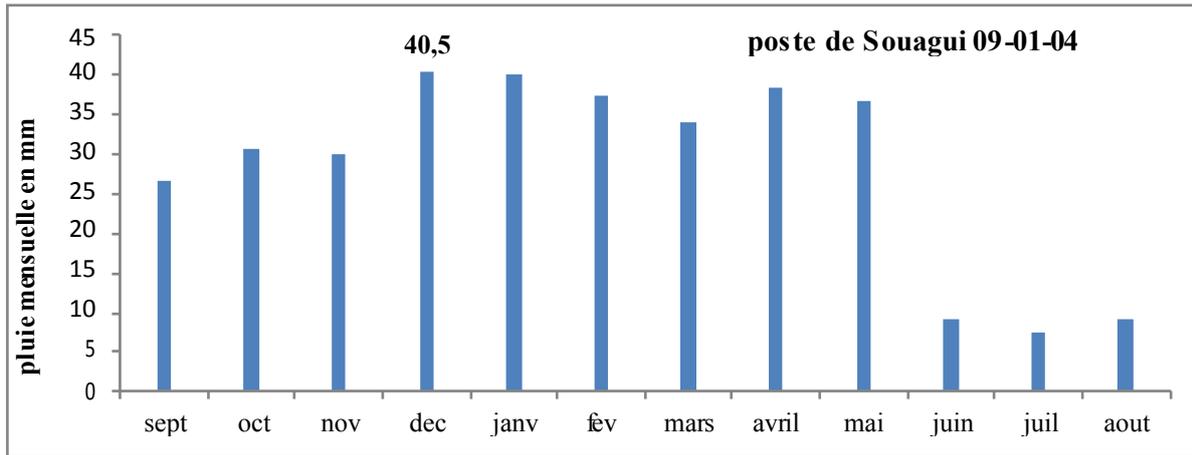


Figure 55: Variations des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin de l'Isser période 1970-2009

6- Pluies extrêmes (Pjmax annuelles)

Afin de connaître les valeurs des pluies journalières maximales annuelles (Pjmax) et leurs répartitions dans le temps et dans l'espace au niveau du bassin d'étude, nous nous basons sur les données de 3 postes représentatifs de chaque secteur géographique, selon une coupe Nord-Sud.

Le tableau 31 présente les fréquences de Pjmax de chaque poste pluviométrique. Pour le poste de Chabet AL Ameer et Souk EL Khemis, les hauteurs des Pjmax apparaissent en hiver et au printemps, avec une fréquence relativement élevée aux mois de novembre, décembre, janvier, février et mars. Pour le poste de Souagui, qui représente le secteur de Hautes Plaines (domaine semi-aride), les hauteurs de Pjmax apparaissent essentiellement aux mois de septembre et avril. Dans ce domaine, les valeurs de Pjmax peuvent apparaître durant toute l'année, même pendant les mois d'été.

Bien que la moyenne annuelle des pluies de poste de Chabet AL Ameer (09-05-12) 695 mm (domaine tellien) est supérieure à celle de Souagui (09-01-04) 343 mm (domaine des Hautes Plaines), la valeur de Pjmax de poste de Souagui est de 102.5 mm, supérieure à celle de Chabet AL Ameer soit 97.9 mm. Ces valeurs vont avoir un effet décisif sur la genèse des crues, la production des matières en suspension et sur les transports solides des oueds.

Les résultats du tableau 31 reflètent l'importance des hauteurs de Pjmax et leur variabilité spatiotemporelle dans le bassin versant de l'oued Isser.

Tableau 31: Fréquence des pluies journalières maximales en mm des postes pluviométriques du bassin d'étude (période de 1970-2009)

poste	Répartition annuelle												Hauteur maximale	C.V
	s	o	n	d	j	f	m	a	m	j	j	a		
09-05-12	2	2	6	7	7	4	5	2	2	-	-	-	97.9 (décembre)	0.28
09-04-02	1	3	5	9	7	3	7	4	1	-	-	-	117.7 (janvier)	0.43
09-01-04	6	4	4	3	2	1	3	6	4	1	1	-	102.5 (septembre)	0.48

Les résultats d'ajustement montrent que les pluies journalières maximales s'ajustent bien à la loi log normale. La figure 56 présente les résultats obtenus.

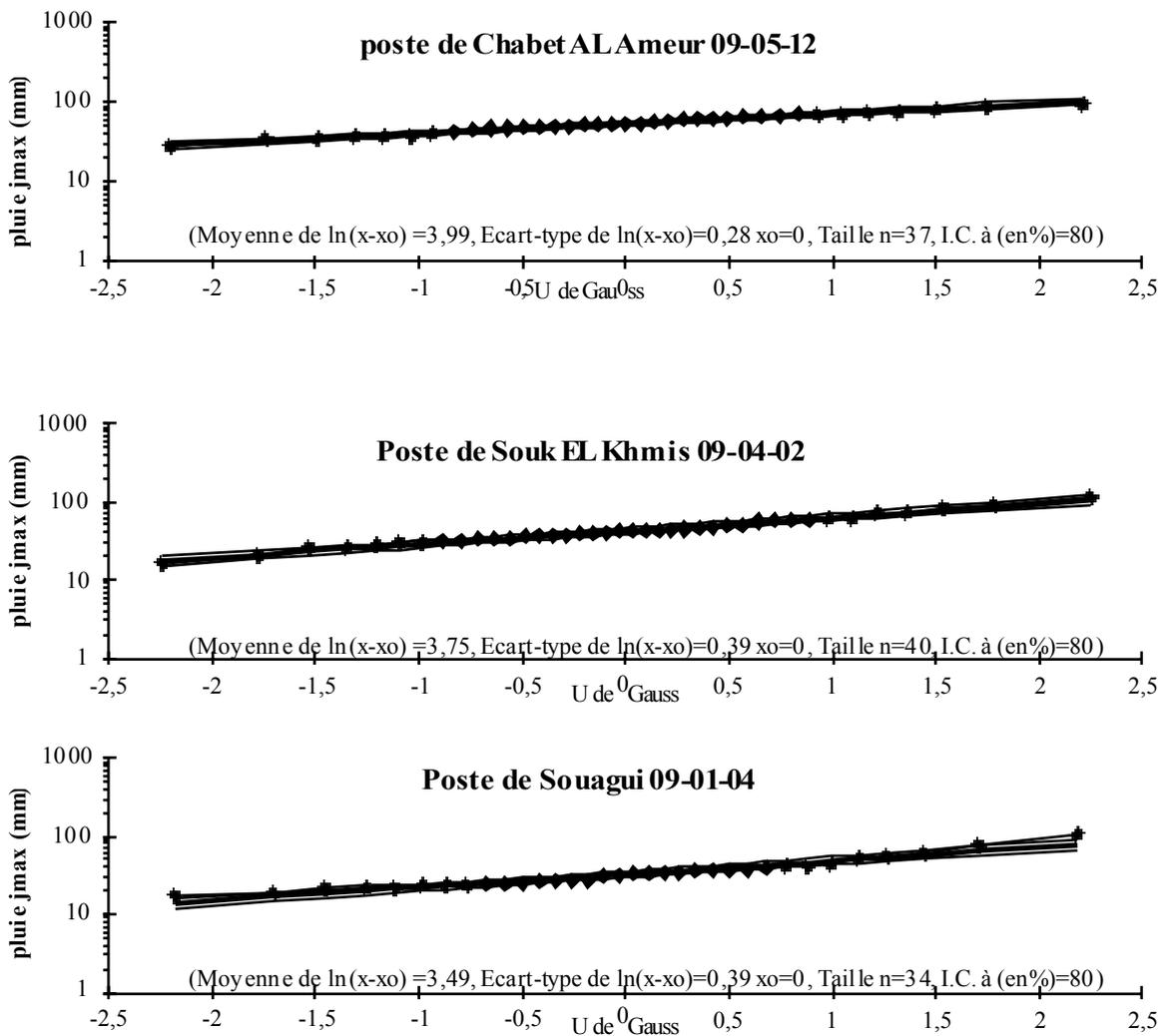


Figure 56: Ajustement des P_{jmax} à la loi Log Normale pour trois postes pluviométrique

Les équations de la droite de Galton permettent ainsi de calculer les pluies maximales pour différentes périodes de retour (tableau. 32).

Tableau 32: Pluies maximales journalières en mm pour différentes période de retour

Poste	Période de retour (ans)				
	2	10	20	50	100
09-05-12	54,30	78,08	86,55	97,19	105,00
09-04-02	42,32	69,94	80,65	94,67	105,35
09-01-04	32,91	54,39	62,71	73,61	81,91

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé à une analyse des séries de pluies du bassin de l'Isser, réalisée sur 23 postes pluviométriques de l'A.N.R.H, sur la période allant de 1970-2009.

Grace à l'étude d'homogénéisation des données pluviométriques annuelles basée sur l'application de la méthode d'Analyse en Composants Principale A.C.P, des vecteurs régionaux et des régressions multiples, nous avons étudié la très grande variabilité spatiotemporelle des précipitations annuelles dans le bassin versant de l'oued Isser.

Les précipitations moyennes annuelles présentent une alternance entre les années humides et sèches. A cette irrégularité interannuelle s'ajoute une variabilité spatiale bien marquée. La carte pluviométrique moyenne annuelle présente une décroissance bien marquée de la pluviométrie dans le sens latitudinal. Les précipitations moyennes annuelles varient entre 300-500 mm dans la partie du Haut Isser en Hautes Plaines et elles sont supérieures à 600 mm en domaine tellien.

Le régime mensuel des pluies indique deux périodes pluviométriques bien distinctes. Une période sèche correspond à la saison d'été, elle est caractérisée par un déficit pluviométrique bien marqué. La seconde, est une période humide, correspondant au reste de l'année. Ainsi, le secteur géographique du domaine des Hautes Plaines se caractérise par un régime différent du domaine tellien, où les hauteurs de pluies de la saison printanière (notamment le mois d'avril) contribuent pour une grande partie au total annuel.

Les valeurs de P_{jmax} présentent des fréquences qui ne sont pas homogènes dans le temps et dans l'espace. Elles atteignent la valeur de 117 mm au niveau du poste de Souk EL Khmeis. Les P_{jmax} des postes pluviométriques s'ajustent bien à la loi log normale.

Chapitre 6:
Hydrologie du bassin

Introduction

Après l'étude détaillée des facteurs qui conditionnent l'écoulement dans les chapitres précédents, à savoir les facteurs physico géographiques et les facteurs climatiques, en particulier les précipitations, ce chapitre est consacré à l'étude hydrologique du bassin de l'oued Isser et de ses affluents.

Afin d'établir les caractéristiques de la dynamique hydro-sédimentaire dans le bassin de l'oued Isser qui est un hydrosystème exoréique, ce chapitre est dédié aux écoulements liquides des bassins jaugés et de leur variabilité spatiotemporelle aux différents pas de temps.

Après le comblement des lacunes des séries d'observations, on va analyser les bilans hydrologiques annuels, l'évolution amont-aval des écoulements et leur relation avec les pluies, le profil apport-surface. L'étude statistique et l'estimation des valeurs fréquentielles des débits pour les cinq bassins jaugés sont réalisées.

A cause de l'importance des événements de crues dans les transports solides en suspension des oueds, une analyse détaillée des débits maximaux moyens journaliers et instantanés de crues pour les cinq bassins jaugés est entreprise.

Les superficies des bassins jaugés varient dans de grandes proportions : de 83 km² pour le bassin de l'oued Zeroua à la station de Dechemiya (09-03-09), à 3611 km² pour le bassin de l'oued Isser à la station de Lakhdaria (09-05-01) (fig. 58).

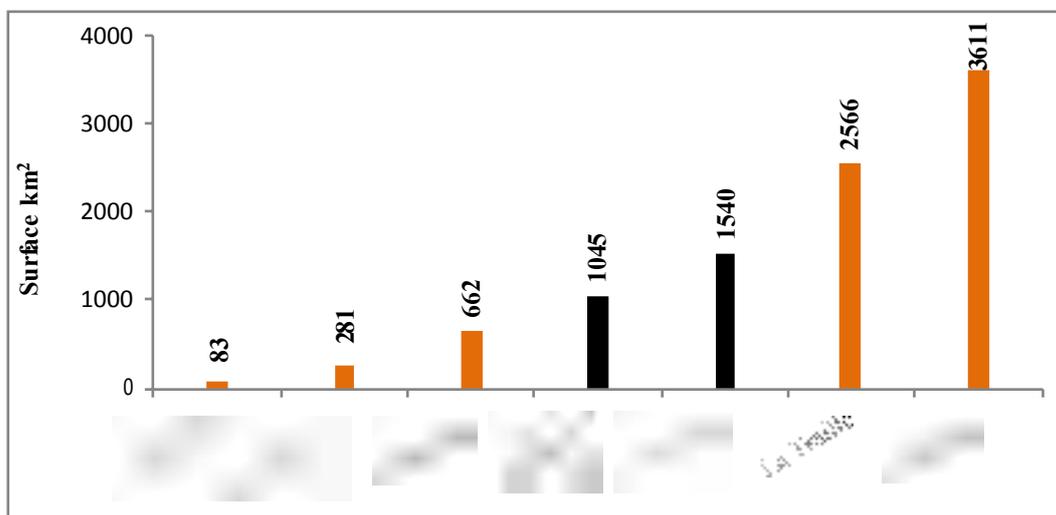


Figure 58 : Classement par ordre croissant de la superficie des bassins jaugés
(bassins unitaires, emboîtés et intermédiaires)

1-1-Les séries de débits disponibles

Les fichiers de chroniques de débits obtenus auprès de l'A.N.R.H (Alger), montrent, d'une part, que les séries de mesures hydrométriques sont différentes d'une station à une autre. D'autre part, ils montrent que le pourcentage d'information disponible de débits varie considérablement d'une station à une autre et d'une période à une autre. En effet, le taux d'information disponible de débits varie de 88.19% (station de Beni Slimane à oued Mellah) à 100% (station de Mezahime à oued Kherza et station de La Traille à oued Isser Moyen) (tableau 33, fig 59).

La période d'étude retenue dans ce chapitre correspond à celle concernée par l'analyse des précipitations et l'étude des transports solides en suspension. Nous disposons de séries de données hydrométriques pour lesquelles les périodes d'observation varient de 13 à 40 ans d'observation.

Au niveau de l'oued Kherza à la station de Mezahime, il y'a une rupture de cinq années (1994/99), où l'information hydrologique est inexistante. Pour cela, nous avons arrêté l'étude

hydrologique pour ce bassin à 1994. L'étude hydrologique s'étale sur une période de 21 ans (1973/94) où l'information hydrologique est complète à 100%.

Tableau 33 : Les stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Isser

Station Hydrométrique	Oued	Date	Surface km ²	Séries disponibles	Pourcentage d'information %
Lakhdaria	Isser maritime	09-05-01	3611	1970/10	95.64
La Traille	Isser moyen	09-04-08	2566	1970/85	96.56
Beni Slimane	Mellah Ouest	09-03-05	281	1973/09	88.19
Mezahime	Kherza	09-01-01	662	1973/94	100
Dechemiya	Zeroua	09-03-09	83	1972/85	97.43

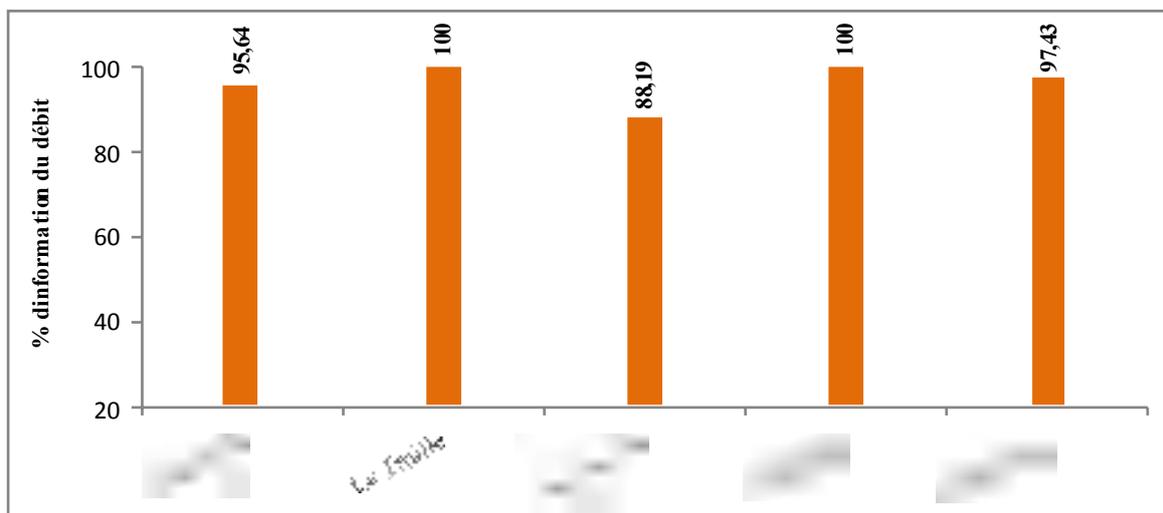


Figure 59 : Pourcentage d'information hydrométrique disponible aux stations de jaugeages

1-2-Choix de la période commune

D'après les séries de mesures hydrométriques, la période allant de septembre 1973 à aout 1985, soit 12 ans, est commune à toutes les stations de jaugeage où l'information hydrométrique est disponible à 100% pour trois stations (La Traille, Mezahime et Dechemiya) (fig. 60). En effet, le choix de cette période commune peut permettre de procéder à une étude spatiale et comparative des paramètres hydrologiques des bassins jaugés (analyse amont-aval des débits spécifiques, de la lame d'eau écoulee et des débits annuels.)

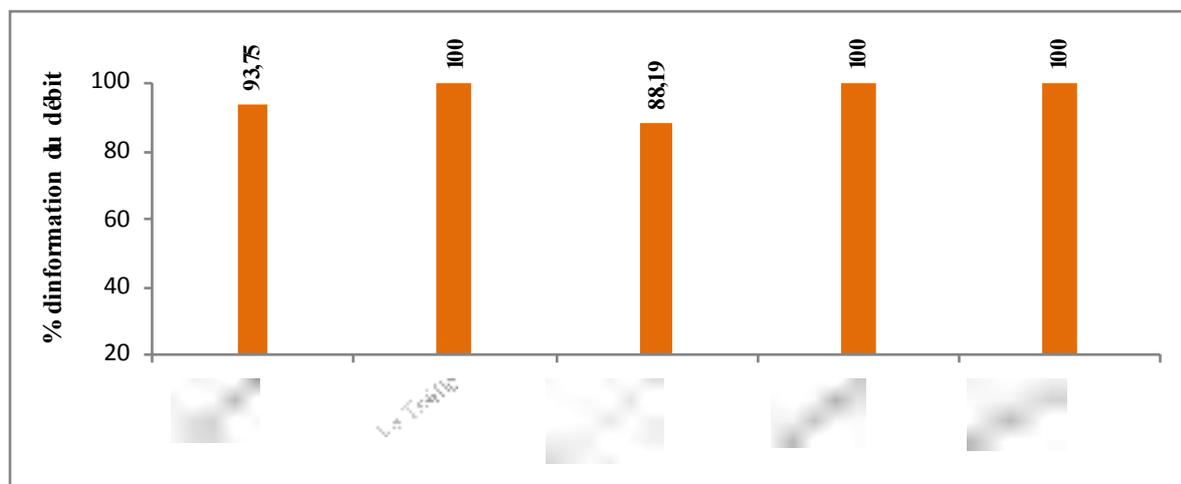


Figure 60 : Pourcentage d'information hydrométrique disponible aux stations de jaugeages (période commune : 1973/85)

1-3-Etalonnage des données des stations

Les courbes de tarages sont établies par l'A.N.R.H. à partir des couples de valeurs hauteur-débits obtenus par mesures en utilisant les différentes méthodes (moulinet, flotteur, jaugeage chimique, méthodes hydrauliques). Nous étudions les relations hauteurs-débits à partir des fichiers fournis par l'A.N.R.H.

La courbe de tarage $Q=f(H)$ représente les débits instantanés en fonction des hauteurs d'eau correspondantes. Les hauteurs d'eau (cm) en abscisses et les débits ($m^3.s^{-1}$) en ordonnées. Elle dépend essentiellement de la forme du lit (Laborde, 2009).

Comme le lit des cours d'eau est susceptible de changer, les courbes de tarage ne sont pas stables. Il est bien souvent nécessaire d'établir différentes courbes suivant les périodes de l'année. On obtient donc un faisceau de courbes de tarage auxquelles sont attachées différentes périodes de validité (Laborde, 2000).

Mebarki (1984) a montré que le réajustement des courbes de tarage s'impose continuellement dans le bassin du Kébir-Rhumel où l'instabilité des lits des oueds est extrêmement élevée ; ceci implique l'établissement de barèmes d'étalonnage hauteurs d'eau-débits d'une façon régulière.

Le lit des cours d'eau subit constamment des modifications en raison de sa nature instable, de la brutalité des crues et de l'importance des sapements de berges, imposant ainsi un réajustement continu des courbes de tarage (Taibi, 1993).

Khanchoul, 2006, montre que les stations de jaugeages sont caractérisées par une instabilité au niveau des profils en travers par affouillement ou remblaiement. Ce qui rend difficile la réalisation des courbes d'étalonnage $Q=f(H)$.

Donc, les relations hauteur - débit établies à un instant donné peuvent devenir rapidement obsolètes. Ce qui nécessite la vérification des relations hauteur - débit établies par le passé avant de les utiliser.

Selon Laborde, (2000), le tarage est plus délicat en hautes et basses eaux. Lorsque les eaux sont basses, on constate une diminution de la précision relative sur les débits. En effet, la relation hauteur-débit est perturbée en raison des modifications subies par le lit de l'oued et de l'influence de la végétation. Mebarki (2005), montre que, en hautes eaux, malgré les précautions prises, les courbes de tarage sont considérées comme approximatives pour le calcul des débits de crue.

Il est important de vérifier la validité des relations hauteur - débit qui ont été établies par le passé. La figure 61 montre que les courbes de tarage de l'oued Isser sont variées selon les cours d'eau. Seules les stations de Beni Slimane et Dechemiya ont une relative stabilité du lit de l'oued. Par contre, les autres stations se situent sur des cours d'eau où le lit est affecté par plusieurs fluctuations provoquées essentiellement par les crues. Au niveau de la station de Lakhdaria, la réalisation de la courbe d'étalonnage est difficile. De ce fait, la station hydrométrique doit être ré-étalonnée régulièrement. Le réajustement de la courbe d'étalonnage s'impose continuellement, les données de jaugeage des débits et des hauteurs d'eau ont été regroupées en période ou seuil de validité déterminé à partir de changement dans les données de débit et des hauteurs d'eau mesurées au niveau de la section naturelle. Dans cette station, plus d'une équation peuvent être utilisées afin de fournir un meilleur ajustement de la courbe de tarage et donc, une meilleure estimation de débit (fig. 62).

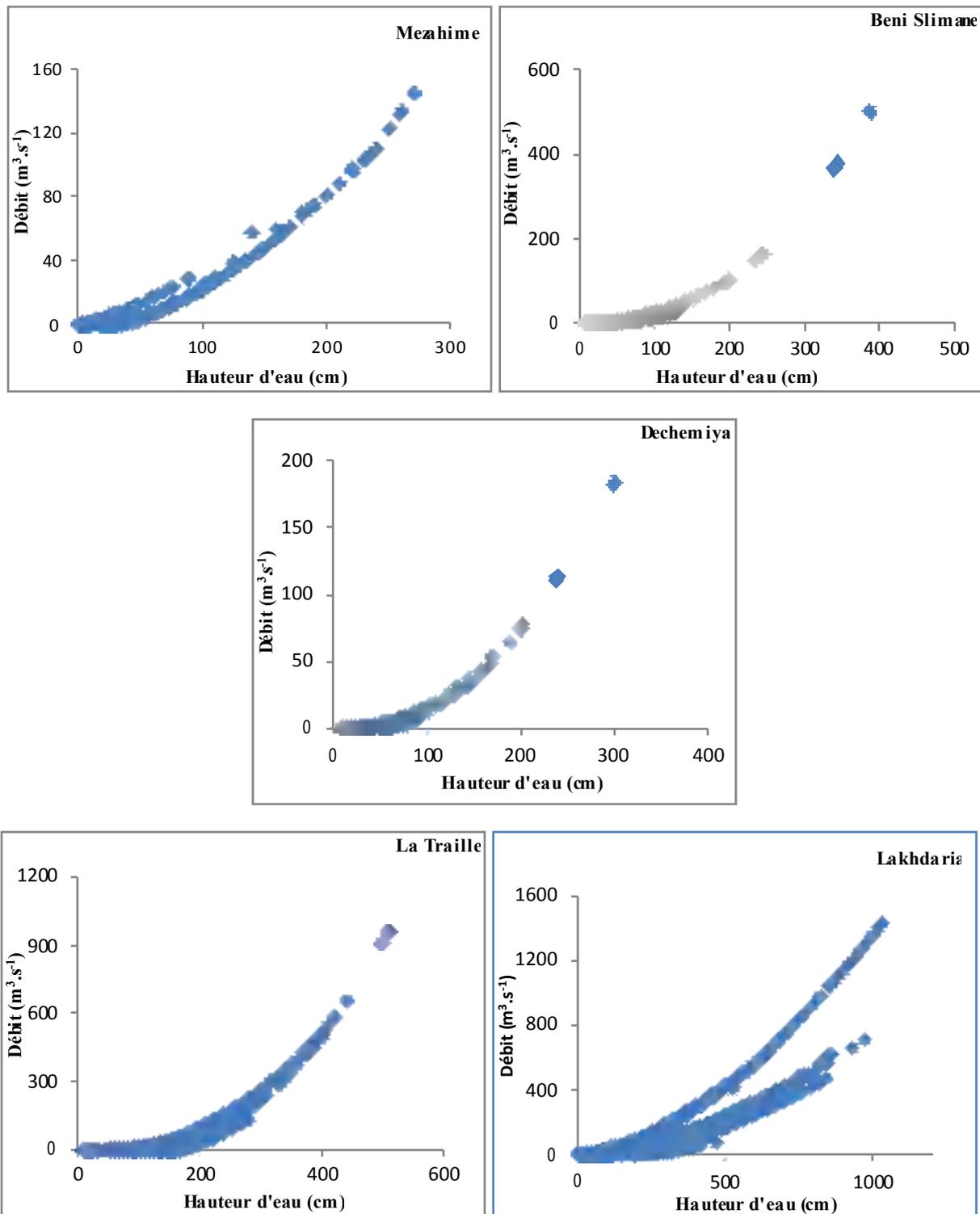


Figure 61 : Etablissement des courbes d'étalonnage dans l'oued Isser

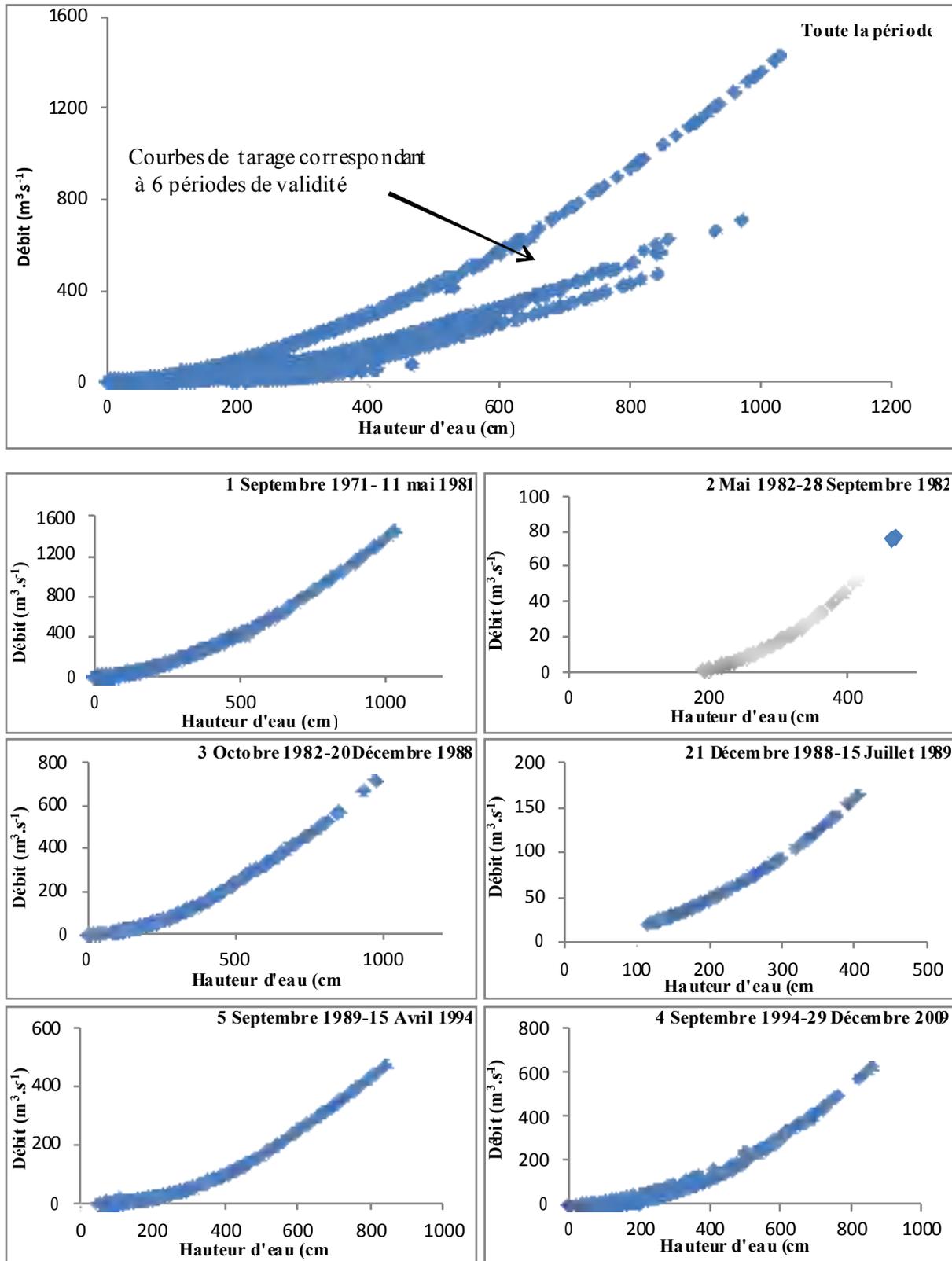


Figure 62 : Courbes d'étalonnage de la station de Lakhdaria pour différentes périodes

1-4-Comblement des lacunes de débits mensuels

Avant le comblement des lacunes d'observations à l'échelle mensuelle, il est indispensable de s'assurer graphiquement de la normalité de la variable débit mensuel. Il faut choisir une loi de probabilité qui puisse ajuster d'une manière adéquate les données hydrologiques.

1-4-1-Ajustement à la loi log-normale (loi de Galton)

Les ajustements des débits mensuels à la loi de probabilité montrent que ces derniers s'ajustent bien à la loi log-normale. Pour certains mois, et notamment au niveau des stations Beni Slimane et Mezahime, lorsque les valeurs mensuelles de débits sont nulles, on utilise la loi racine normale. Les figures 63 et 64 montrent les résultats des ajustements des débits annuels et mensuels des stations étudiées à la loi log-normale. L'équation de la droite de Galton pour chaque ajustement, permet ainsi de calculer les quantiles pour différentes périodes de retour.

1-4-1-1-Loi de Galton (log-normale ou de Gibrat-Gauss)

La fonction de la loi de Galton qui fait le mieux le parallèle avec la loi de Gauss est la suivante :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2M}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

Avec : $u = a \log(x - x_0) + b$. intervalle de définition : $x \in]x_0, +\infty[$

La variable réduite de Gauss u peut être obtenue comme suit :

$$u = \frac{\log(x - x_0) - \overline{\log(x - x_0)}}{\sigma \log(x - x_0)}$$

L'équation de la droite d'ajustement permettant de calculer un débit d'une fréquence donnée est donc la suivante :

$$\log(x - x_0) = u \cdot \sigma \log(x - x_0) + \overline{\log(x - x_0)}$$

On remarque que l'on passe de la loi de Gauss à la loi de Galton en faisant le changement de variable de x en $\log(x - x_0)$. Cette loi fait intervenir trois paramètres dont x_0 est le paramètre de position.

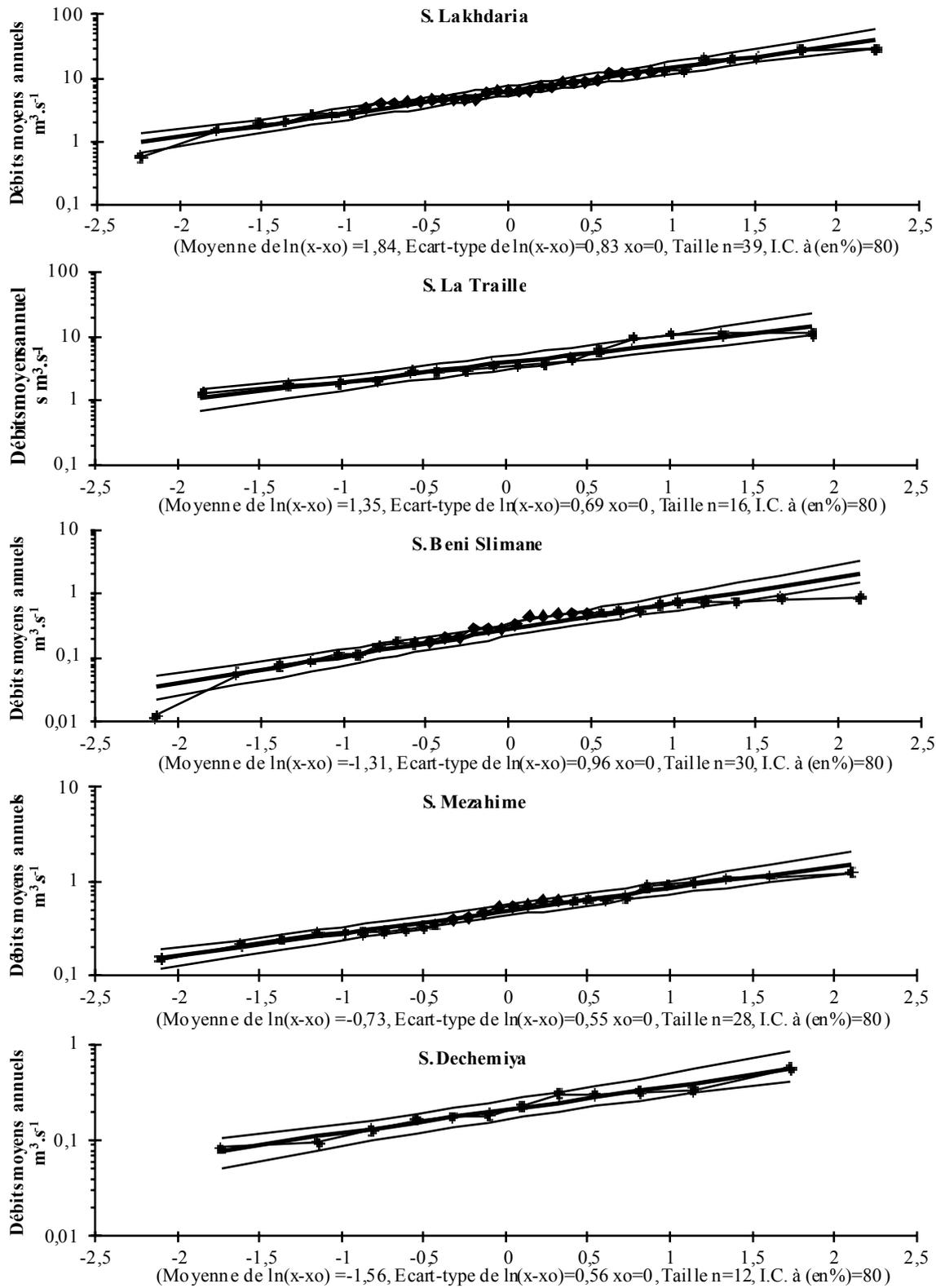


Figure 63 : Ajustements à la loi Log-Normale des débits moyens annuels

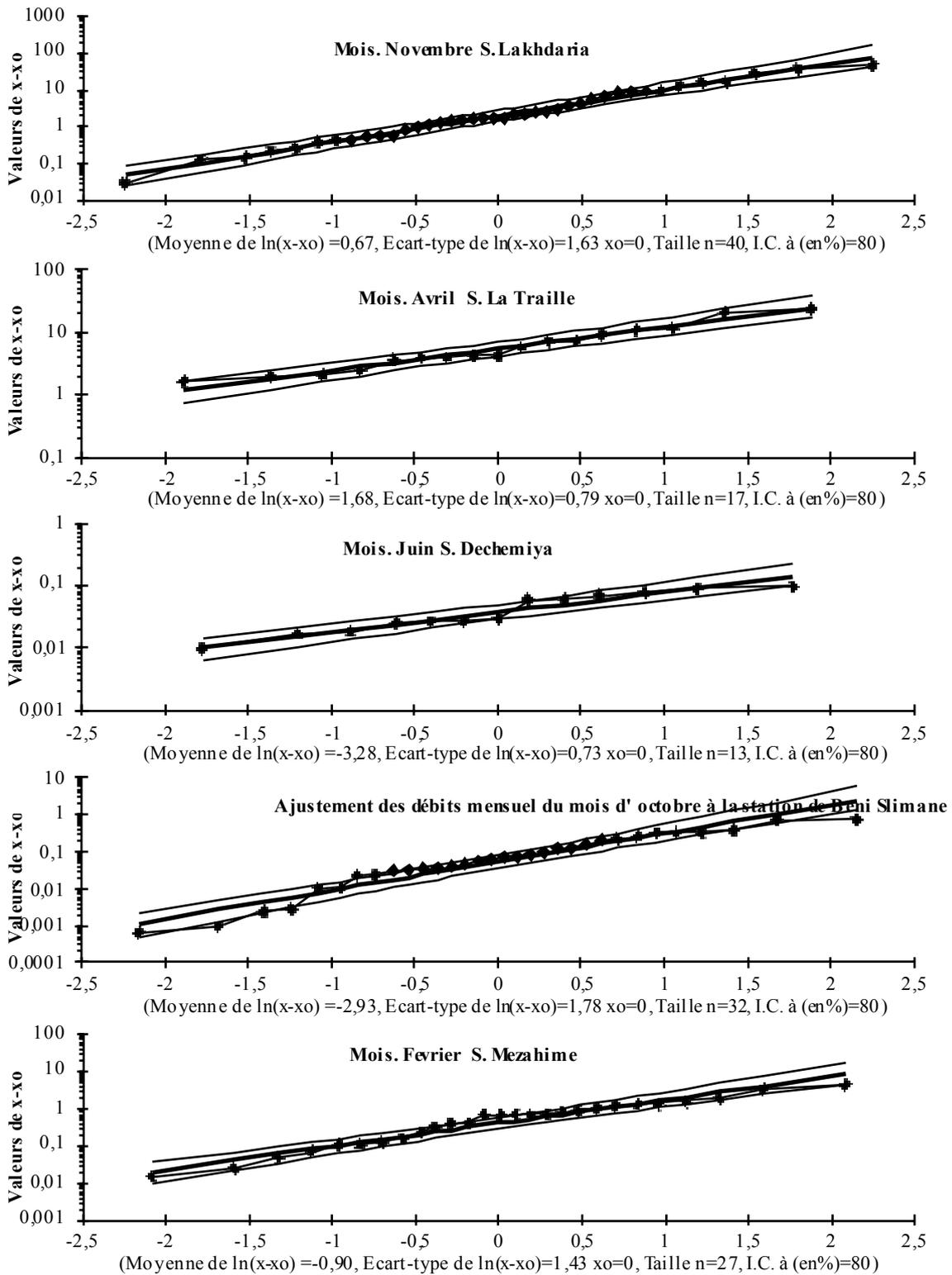


Figure 64 : Ajustements à la loi log-normale des débits mensuels

1-4-2-Comblement des lacunes de débits mensuels (régression à deux variables)

Le comblement des lacunes mensuelles a été réalisé mois par mois grâce à des régressions à deux variables sur les valeurs des débits mensuels des stations. Pour combler les lacunes d'une station Y, on choisit la station de référence X qui lui est la mieux corrélée. Par application de la régression linéaire $Y = a \cdot X + b$. Avec Y= débit mensuel manquant à la station lacunaire et X= débit mensuel connu à la station de référence (fig. 65).

On constate que les coefficients de corrélations sont plus forts pour les mois à écoulement élevé. Les débits du mois d'Aout n'ont peut-être comblés par des régressions, les coefficients de corrélation étaient inférieures à 0.5, les lacunes de ce mois ont été comblées par les moyennes inter-mensuelles aux stations (Louamri, 2013).

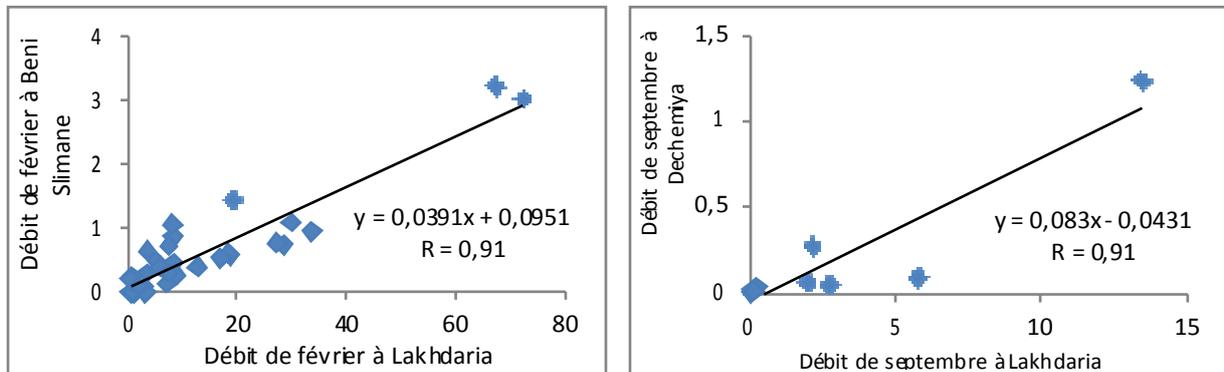


Figure 65: Exemples de régression entre les débits mensuels aux stations de références et lacunaires

Les lacunes mensuelles ont été comblées en choisissant les meilleurs coefficients de corrélation avec les stations de référence.

2- Débits moyens annuels

2-1- La variabilité interannuelle des débits moyens annuels

La figure 66 et le tableau 34 montrent bien la variabilité des débits moyens annuels pour les bassins étudiés. Cette variabilité se traduit par des débits moyens annuels qui vont du simple au double voire plus (exemple de l'année 1972/73 pour la station de Lakhdaria qui a enregistré un débit de $29.42 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). En effet, les valeurs très fortes des débits moyens des années 1971/72, 1972/73, 1973/74, 1979/80 et 2002/03 sont liées aux fortes crues enregistrées dans ces années. Les valeurs maximales des débits moyens annuels ne correspondent pas chronologiquement pour toutes les stations.

La variabilité de l'écoulement est illustrée par des valeurs remarquables du coefficient de variation qui sont fortes pour toutes les stations. Le coefficient de variation varie de 54.8% pour la station de Mezahime à 81.9% pour la station de Lakhdaria. Cette variabilité dans l'ensemble est liée à l'alimentation essentiellement pluviale irrégulière des cours d'eau.

Tableau 34: Valeurs caractéristiques des débits aux niveaux des bassins étudiés

Station	S (Km ²)	Q1 Moy (m ³ /s)	Q1 Max (m ³ /s)	Q1 Min (m ³ /s)	N d'année > moyenne	q (l/s/km ²)	CV (%)
Lakhdaria	3611	8.05	29.42 (1972/73)	0.41 (2001/02)	15 sur 40	2.22	81.9
La Traille	2566	4.46	10.97 (1971/72)	1.30 (1977/78)	4 sur 15	1.73	72.4
Mezahime	662	0.54	1.22 (1979/80)	0.14 (1992/93)	10 sur 21	0.81	54.8
Beni Slimane	281	0.38	0.86 (2002/03)	0.01 (1987/88)	17 sur 36	1.33	61.4
Dechemiya	83	0.28	0.76 (1972/73)	0.08 (1983/84)	6 sur 13	3.37	69

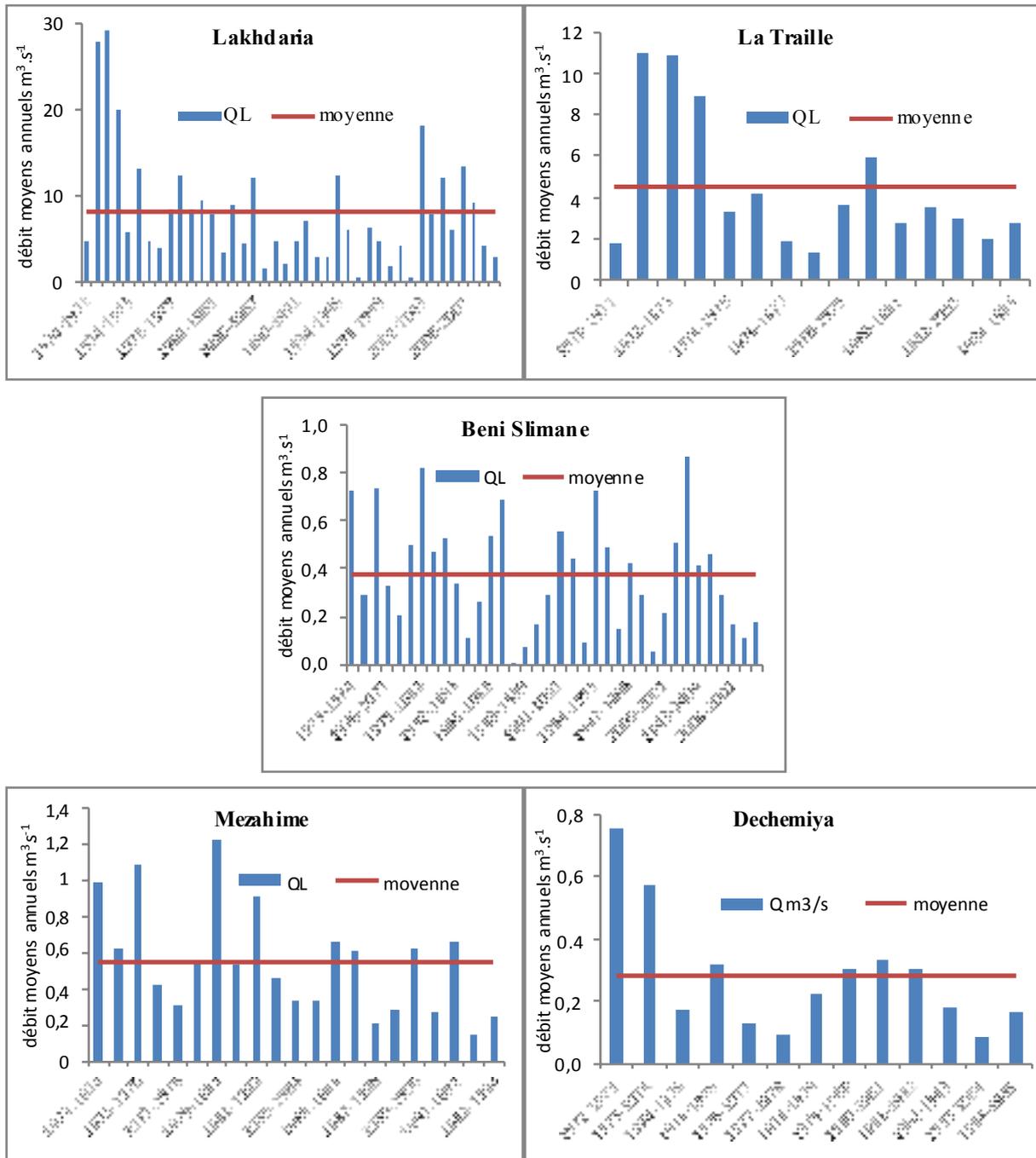


Figure 66: Variabilité interannuelle des débits moyens annuels des bassins d'étude

2-2-Analyse amont- aval des débits moyens annuels (période commune 1973-1985)

Le bassin de l’oued Isser, à l’instar des autres bassins de l’Algérie du Nord, est un hydro-système exoréique. Le cours d’eau principal s’écoule des zones semi-arides (Berrouaghia, Souagui, Beni Slimane) vers des zones subhumides et humides (Lakhdaria, Bordj Ménaiel). L’accroissement de la surface drainée de l’amont vers l’aval, est à l’origine d’un accroissement rapide des débits au niveau de ce bassin (fig. 67). Il correspond au schéma connu pour les bassins exoréiques en Algérie du Nord (Soummam, Kébir Rhumel, Seybouse).

Tableau 35: Valeurs caractéristiques des débits au niveau des bassins d’étude (période commune 1973-1985)

Station	S (Km ²)	QI Moy (m ³ /s)	QI Max (m ³ /s)	QI Min (m ³ /s)	N d’année> moyenne	q (l/s/km ²)	CV (%)
Lakhdaria	3611	8.90	20.12 (1973/74)	3.41 (1983/84)	4 sur 12	2.46	52.2
La Traille	2566	3.61	8.94 (1973/74)	1.30 (1977/78)	4 sur 12	1.40	57.2
Mezahime	662	0.64	1.22 (1979/80)	0.31 (1977/78)	4 sur 12	0.96	50
Beni Slimane	281	0.44	0.82 (1979/80)	0.11 (1983/84)	6 sur 12	1.57	50.6
Dechemiya	83	0.24	0.57 (1973/74)	0.08 (1983/84)	5 sur 12	2.89	56.6

A l’amont du bassin de l’oued Isser, trois bassins unitaires de surface réduite sont contrôlés par trois stations hydrométriques (oued El Kherza, Mellah et Zeroua). Leurs débits sont faibles à cause de leurs modestes surfaces. En second ordre, ces bassins sont localisés dans le domaine des Hautes Plaines où les précipitations sont inférieures à 400 mm/an en moyenne et l’importance relative de l’évapotranspiration. S’ajoute l’effet de la perméabilité des roches qui joue un rôle primordial dans la faiblesse des écoulements. Les débits annuels des bassins versants des oueds de l’Isser Supérieur sont toujours inférieurs à 1.5 m³.s⁻¹. L’oued El Kherza, à la station de Mezahime, avec une aire drainée de 662 km², principal affluent du Haut Isser présente un débit moyen interannuel faible de 0.64 m³.s⁻¹. Les petits bassins des oueds Mellah (281km²) et Zeroua (83km²) produisent successivement des débits moyens interannuels très faibles 0.44 m³.s⁻¹ et 0.24 m³.s⁻¹ (tableau. 35).

Au niveau du bassin de l'oued Isser à la station de La Traille, qui contrôle un bassin de 2256 km², le débit moyen interannuel s'accroît progressivement en raison de l'accroissement de la surface drainée et par les apports de nouveaux affluents qui alimentent l'oued. Le débit moyen interannuel est de 3.61 m³.s⁻¹, ce qui peut être attribué à une augmentation sensible des précipitations à la sortie du domaine des Hautes Plaines (585.68 mm à la station de A.N.R.H 09-02-03).

Plus en aval à la station de Lakhdaria, le débit moyen interannuel augmente de façon bien marquée, il atteint 8.9 m³.s⁻¹, fourni par un bassin de surface drainée de 3611 km². Ce débit est important en raison de l'étendue de la surface drainée d'un part, et d'autre part, du changement de domaine climatique (passage du domaine semi-aride vers le subhumide). Ainsi, l'oued Isser est renforcé par d'autres affluents (oued Bouhamoude, Souflont) localisés dans des secteurs bien arrosés en zone tellienne où les précipitations atteignent à 700 mm/an à la station de Bsibsba.

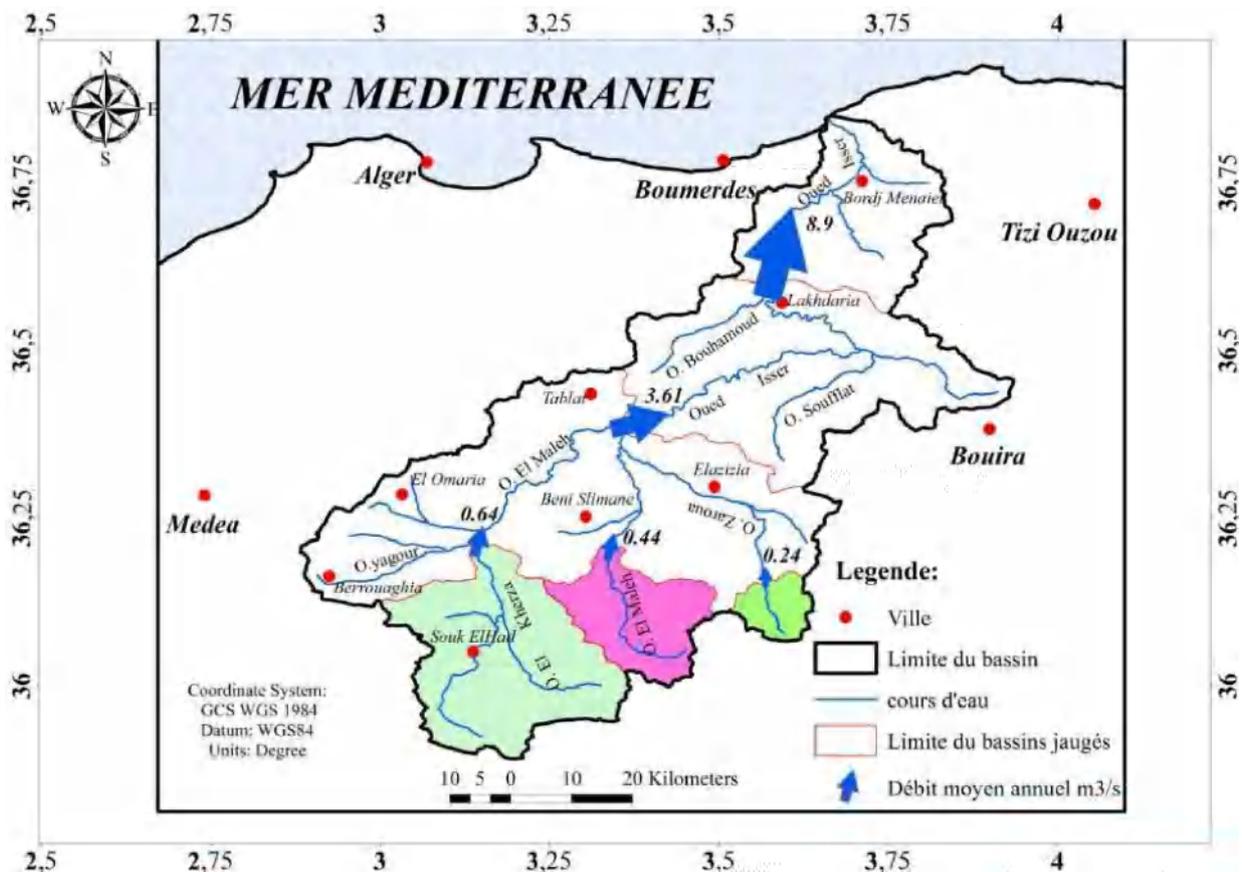


Figure 67: Débits moyens inter-annuels des bassins jaugés de l'oued Isser (période commune 1973-1985)

2-3-Corrélation débit absolu- surface des bassins jaugés

La figure 68 établie pour les cinq stations hydrométriques, représente les variables débit absolu- surface en coordonnées logarithmiques. Les débits sont reliés à la surface drainée des bassins jaugés avec un coefficient de corrélation de 0.95. (variance expliquée de 90.25%).

Pour les bassins intermédiaires, le débit a été estimé par la différence entre la station aval et la station amont. Ainsi, pour le bassin intermédiaire entre la station de Lakhdaria et la station de La Traille de surface 1045 km², le débit estimé est de 5.29 m³.s⁻¹. Par contre, pour le bassin à la station de La Traille d'une surface de 2566 km², le débit est de 3.61 m³.s⁻¹. Le débit est le résultat de l'interaction de différents facteurs climatiques (pluviométrie et évapotranspiration) et des facteurs physiographiques (lithologie et surface).

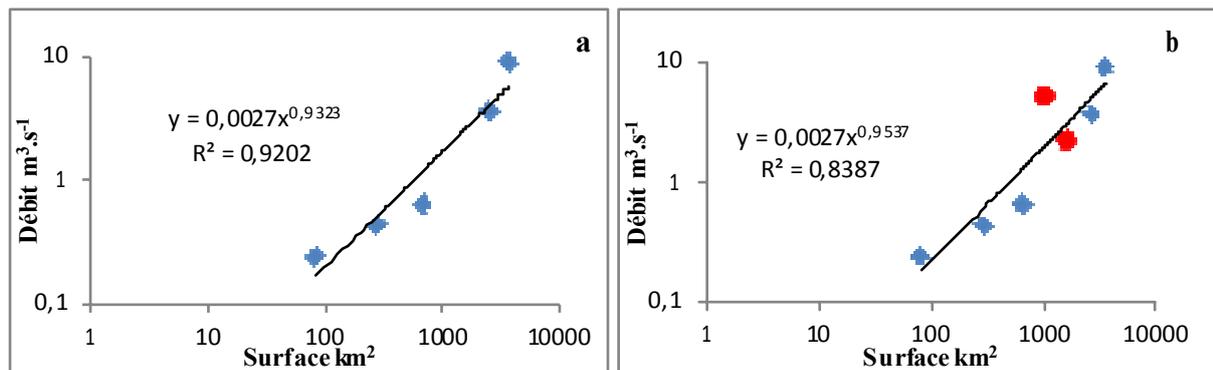


Figure 68: Relation entre la surface des bassins (km²) et les débits absolus (m³.s⁻¹). (Période commune 1973-1985). a : données des bassins jaugés ; b : données des bassins jaugés et intermédiaires

2-4-Le profil hydrologique du bassin de l'oued Isser

La figure 69 représente le profil hydrologique (module-surface) du bassin de l'Isser le long de la vallée principale. Il montre deux gradients différents de la relation débit-surface. Ceci est lié principalement aux différents domaines climatiques et physiographiques traversé par le cours d'eau principal.

Au niveau des Hautes Plaines, le profil hydrologique présente une pente faible de l'écoulement en raison des faibles débits de l'oued El kherza et oued Isser Moyen. La pente d'écoulement augmente d'une manière très nette au Nord du bassin. On passe du domaine des

Hautes Plaines (zone semi-aride avec une pluviométrie inférieure à 400 mm/an) au domaine sud tellien où les précipitations atteignent 700 mm/an.

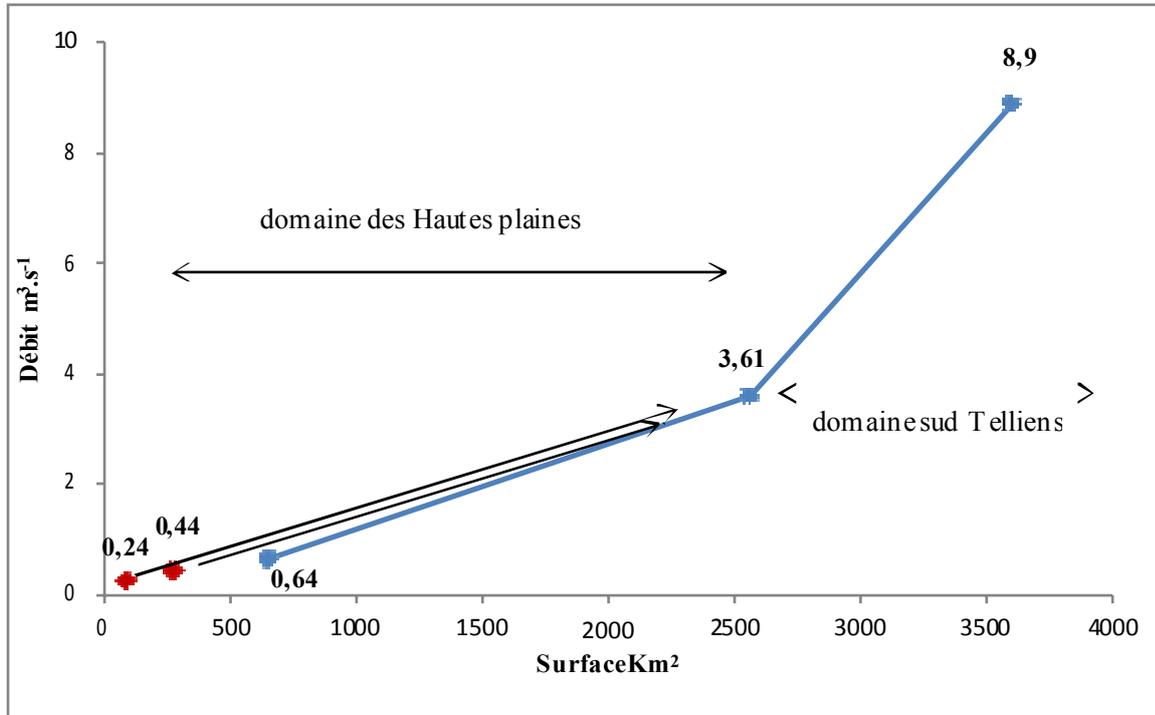


Figure 69: Profil hydrologique de l'oued Isser

2-5-Analyse statistique des débits annuels observés

L'étude statistique des débits permet de compléter la connaissance du phénomène d'irrégularité de l'écoulement annuel. Elle est prise en considération dans le cadre des projets d'aménagements hydrauliques.

L'ajustement des débits moyens annuels à la loi log-normale permet de calculer les débits fréquentiels pour différentes périodes de retour (tableau. 36).

Tableau 36: Débits fréquents annuels des bassins jaugés

Période de	1000	100	50	20	10	5	2	5	10	20	50	100	1000
Fréquence Variable	0,001	0,010	0,020	0,050	0,100	0,200	0,500	0,800	0,900	0,950	0,980	0,990	0,999
rédui	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3,090	-2,326	-2,054	-1,645	-1,282	-0,842	0,000	0,842	1,282	1,645	2,054	2,326	3,090
Lakhdaria	0,465	0,870	1,088	1,521	2,049	2,939	5,861	11,689	16,768	22,588	31,589	39,503	73,913
La traïlle	0,473	0,781	0,935	1,223	1,553	2,074	3,608	6,275	8,380	10,641	13,924	16,657	27,527
Mezahime	0,089	0,135	0,157	0,196	0,239	0,305	0,484	0,767	0,977	1,193	1,493	1,734	2,637
Beni slimane	0,014	0,029	0,038	0,056	0,079	0,121	0,271	0,607	0,924	1,309	1,936	2,513	5,222
Dechemiya	0,037	0,057	0,066	0,083	0,102	0,130	0,209	0,336	0,430	0,528	0,664	0,774	1,190

Pour les fréquences humides, les apports sont forts pour les bassins de l'Isser Maritime et Isser Moyen. Par contre, les bassins des oueds El Kherza à la station de Mezahime et oued Zeroua à la station de Dechemiya présentent des apports liquides faibles dus essentiellement à la faible valeur des pluies annuelles et à la modeste surface.

2-6-Variations des débits moyens annuels spécifiques (période commune 1973-1985)

Afin de mieux cerner la variation spatiale de l'écoulement dans les bassins d'étude, nous utilisons les modules spécifiques, car ces derniers permettent la comparaison entre les bassins en ramenant le débit à l'unité de surface. Le module spécifique varie en raison des différents facteurs climatiques et physico-géographiques des bassins, à savoir les précipitations, la lithologie, la superficie et le couvert végétal.

Le bassin de l'oued Isser présente un accroissement du module spécifique de l'amont à l'aval (fig. 70). Les valeurs de ce dernier sont particulièrement faibles pour les bassins des Hautes Plaines. Leurs débits spécifiques sont 0.97, 1.57 et 1.37 l. s⁻¹. Km⁻² respectivement pour les oueds El Kharza, Maleh et le bassin intermédiaire de La Traïlle. Ces faibles valeurs sont à attribuer essentiellement à la faiblesse des pluies (343,53mm à la station de Souagui), et aux conditions thermiques caractérisant le domaine Hautes plaines.

Le sous bassin de l'oued Zaroua qui est situé dans le même domaine fournit un débit spécifique de $2.89 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ soit une lame d'eau écoulée de 91.59 mm/an . C'est un sous bassin montagneux de surface réduite de 83 km^2 avec une précipitation moyenne de 492 mm/an , où les pentes favorisent largement l'écoulement de surface aux dépens de l'infiltration.

Dans la partie avale du bassin, le module spécifique s'accroît nettement en raison du changement de domaine climatique et de la forte pluviométrie, il atteint $5.29 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ au niveau du bassin intermédiaire de Lakhdaria (1045 km^2) soit une lame écoulée de 159.64 mm/an .

Le module spécifique de l'oued Isser à la station de Lakhdaria pour une superficie de 3611 km^2 reste modéré, il n'atteint pas $2.46 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$. Ceci traduit bien les effets de la semi aridité caractérisant les deux tiers 2/3 de la surface du bassin versant.

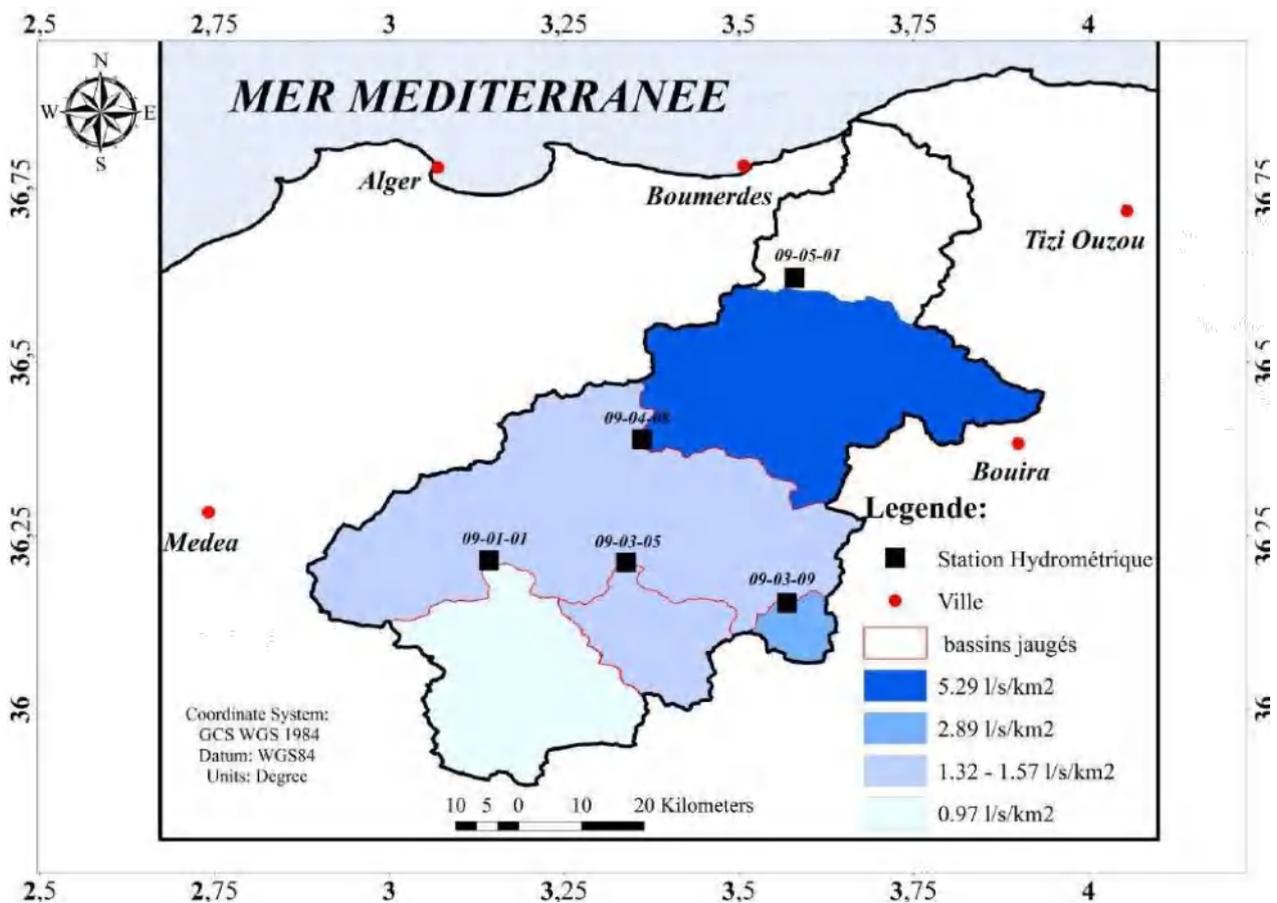


Figure 70: Débit spécifique aux bassins d'étude (période commune 1973-1985)

2-6-1-Comparaison des débits spécifiques avec les résultats d'autres bassins algériens

A titre de comparaison, les valeurs des modules spécifiques moyens annuels obtenus pour les sous-bassins de l'oued Isser sont équivalentes à celles calculés par d'autres chercheurs pour les bassins à écoulement exoréique algériens. Au niveau des sous-bassins appartiennent au Kébir. Rhumel, Mebarki (2005) sur une période similaire (1972-1984) a trouvé des valeurs de $1.04 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ à Grarem, $3.55 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ à Douar Tassadane et $6.80 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ à El Ancer. Il trouve pour le bassin de la Medjerda des valeurs de $6.04 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ à Souk Ahras et $1.88 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ à Ain Erkel. Pour l'oued bousselam $3.52 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ à Fermatou (105 km^2) et $1.50 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ à Sidi Yahia (4050 km^2).

L'étude réalisée par Bouanani (2005) sur quatre sous-bassins de la Tafna (Nord-Ouest algérien) montre que le module spécifique égal $3.73 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ pour le bassin de l'oued Sebdu, $0.64 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ pour le bassin de l'oued Mouilah, $1.18 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ pour le bassin de l'oued Isser et $2.97 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ pour le bassin de l'oued Sikkak.

Louamri (2013), a étudié six sous-bassins de la Seybouse. Les modules spécifiques sont de $0.7 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ pour le bassin de l'oued Cherf amont (1710 km^2), $2.6 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ pour le bassin de l'oued Bouhamdane, $6.2 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ pour l'oued Mellah d'une superficie de 550 km^2 et $2 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ au niveau de l'oued Seybouse à la station de Mirbeck (5955 km^2).

Ces valeurs sont supérieures à celles des bassins à écoulement endoréique où les conditions hydro-climatiques sont défavorables à l'écoulement tels que les sous bassins de chott Melrhir : oued El Arab $0.36 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ et $0.44 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ à oued El Hai, du Hodna, $0.60 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ à oued Ksob et $0.68 \text{ l. s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ à oued Soubella (Mebarki, 2005).

3-Bilans hydrologiques annuels des bassins jaugés

Le bilan hydrologique pour une période donnée s'exprime par l'équation suivante :

$$P (\text{mm}) = E (\text{mm}) + D (\text{mm})$$

P (en mm) est la tranche d'eau précipitée reçue par le bassin, E est la lame d'eau écoulée en mm. La différence entre ces deux paramètres est le déficit d'écoulement D (en mm), qui

représente essentiellement les pertes dues à l'évapotranspiration réelle ETR. Le rapport E/P constitué le coefficient moyen annuel de l'écoulement.

La moyenne des hauteurs d'eau précipitées annuelles calculées pour chaque bassin jaugeé est obtenue à partir de la moyenne arithmétique des postes pluviométriques retenus dans le bassin.

3-1-Ecoulement et coefficient d'écoulement

La gamme de la lame d'eau écoulée varie de 30.8 mm/an pour le bassin de l'oued El Kherza à la station de Mezahime à 91.59 mm/an pour l'oued Zeroua à la station de Dechemiya (tableau. 37). En effet, dans le domaine des Hautes Plaines, l'écoulement annuel est faible. Ceci est mis en évidence à partir des valeurs enregistrées dans les bassins des oueds El Kherza 30.8 mm/an, oued Mellah 49.7mm/an et oued Isser moyen 44.38 mm/an. Par contre, le bassin de l'oued Zerroua à la station de Dechemiya, est un bassin montagneux d'une superficie réduite (83 km²), la lame d'eau écoulée est importante 91.59 mm/an pour une lame précipitée de 492.76 mm/an.

Le bassin de l'oued Isser Maritime à la station de Lakhdaria qui intègre des milieux physiques différenciés (Hautes Plaines et zones Telliennes) a une lame d'eau écoulée de 77.73 mm/an pour une lame précipitée de 538.11 mm/an.

Tableau 37: Bilans hydrologiques moyens aux bassins jaugeés (période commune 1973-1985)

Bassin	Station	S (km ²)	P (mm)	QL (m ³ .s ⁻¹)	q (l. s ⁻¹ .Km ⁻²)	Ec (mm)	D (mm)	Ce (%)
Isser maritime	Lakhdaria	3611	538,11	8,9	2,46	77,73	460,38	14,44
Isser moyen	La Traille	2566	444,33	3,61	1,40	44,38	399,95	9,98
Oued Kherza	Mezahime	662	347,74	0,64	0,96	30.80	316.9	8.85
Oued Mellah	Beni Slimane	281	368.3	0.44	1.57	49.7	318.6	13.49
Oued Zeroua	Dechemiya	83	492.76	0.24	2.89	91.59	401.17	18.58

S : surface ; P : pluie moyenne ; QL : débit absolu ; q : débit relatif ; Ec : lame d'eau écoulée ;
D : déficit d'écoulement ; Ce : coefficient d'écoulement

L'écoulement dans le bassin intermédiaire entre la station de Lakhdaria et La Traille qui est situé dans le domaine tellien, est très important, 159.64 mm/an pour une pluie moyenne de 630 mm/an. Pour le bassin intermédiaire entre la station de La Traille et les trois bassins situés en amont, dans le domaine Hautes Plaines, l'écoulement est faible 46.89 mm/an pour une pluie moyenne de 440 mm/an.

Les valeurs maximales annuelles de l'écoulement pendant les années pluvieuses atteignent 91 mm/an pour le bassin de l'oued Mellah à la station de Beni Slimane (1979/80) pour une pluie de 455 mm/an et 217 mm/an pour l'oued Zeroua à la station de Dechemiya (1973/74) pour une lame précipitée de 581 mm/an. Pour le bassin de l'oued Isser Maritime à la station de Lakhdaria, la valeur maximale est de 175 mm/an enregistrée en (1973/74) pour une pluie de 714 mm/an.

Les valeurs du coefficient moyen annuel de l'écoulement mettent en évidence que seuls 8.85 % et 9.98 % de la lame d'eau précipitée s'écoulent respectivement pour les bassins des oueds El Kherza et Isser Moyen. Le restant des eaux précipitées s'évaporent dans l'atmosphère. Ceci s'explique par l'importance de l'évapotranspiration réelle (E.T.R) dans le domaine des Hautes Plaines. Les plus fortes valeurs du coefficient moyen annuel de l'écoulement sont calculées pour le bassin d'oued Zeroua 18.58% et pour le bassin de l'oued Isser maritime 14.44 % (tableau. 37).

Tableau 38: Bilans hydrologiques moyens aux bassins jaugés

Bassin	Station	Période	S (km ²)	P (mm)	QL (m ³ /s)	q (l/s/km ²)	Ec (mm)	D (mm)	Ce (%)
Isser maritime	Lakhdaria	1970/10	3611	525.98	8.05	2.22	70.34	455.63	13.37
Isser moyen	La Traille	1970/85	2566	474	4.46	1.73	54.85	419	11.57
Oued Kherza	Mezahime	1973/94	662	292.6	0.54	0.81	26.04	266.6	8.89
Oued Mellah	Beni Slimane	1973/07	281	368.8	0.38	1.33	42.1	326.7	11.41
Oued Zeroua	Dechemiya	1972/85	83	507.8	0.28	3.37	106.6	401.2	21

S : surface ; P : pluie moyenne ; QL : débit absolu ; q : débit relatif ; Ec : lame d'eau écoulee ;
D : déficit d'écoulement ; Ce : coefficient d'écoulement

3-2-Déficit d'écoulement

Le déficit de l'écoulement moyen annuel augmente du Sud vers le Nord avec l'accroissement de la pluviométrie moyenne annuelle. Il passe de 316.9 mm/an pour le bassin de l'oued El Kherza à 460.38 mm/an pour le bassin de l'oued Isser maritime.

La figure 71 montre bien les trois termes du bilan hydrologique moyen annuel des bassins d'étude. Ce bilan montre que 460.38mm, 399.95mm, 316.9mm, 318.6mm et 401.17 mm respectivement pour les oueds Isser Maritime, Isser Moyen, oued El Kherza, Mellah et Zeroua représentent l'évapotranspiration réelle (E.T.R.).

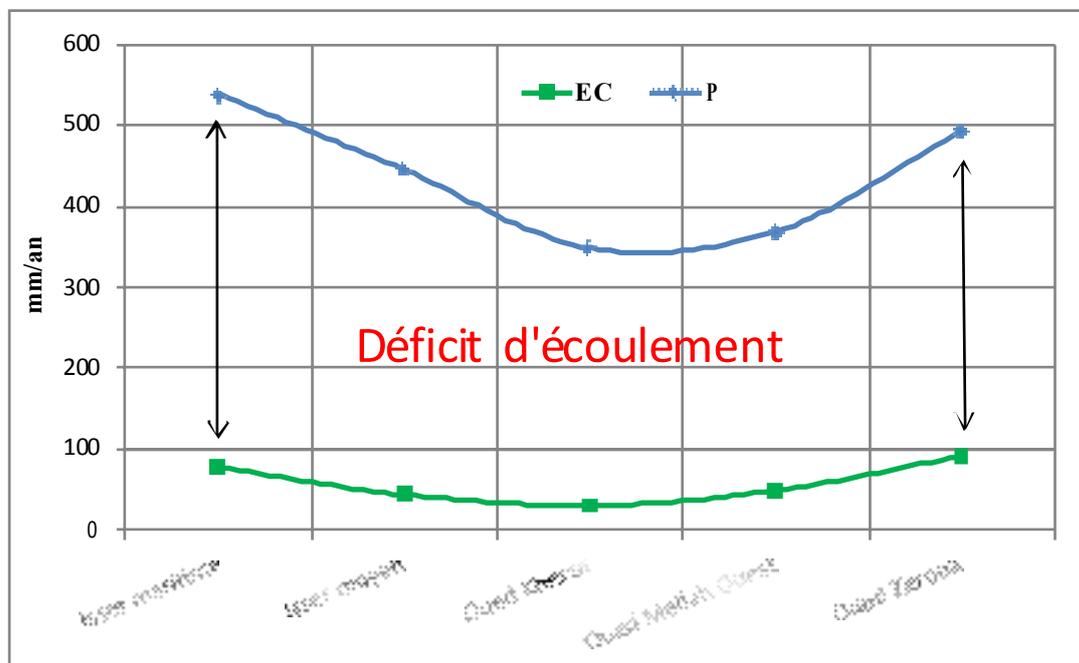


Figure 71: Variations spatiales des lames d'eau écoulées et des lames précipitées annuelles moyennes observées pour les sous-bassins jaugés de l'oued Isser

3-3-Corrélation écoulement moyen annuel – pluie moyenne annuelle

La figure 72 montre que la lame d'eau écoulée est reliée à la pluie moyenne par une relation puissance $E_c = 0.0003 \cdot \text{pluie moyenne}^{2.0093}$. Cette relation présente un coefficient de corrélation de $R = 0.84$, la variance expliquée est de 72.64%. La variance résiduelle (27.36 %) est à relier principalement à la lithologie des bassins versants.

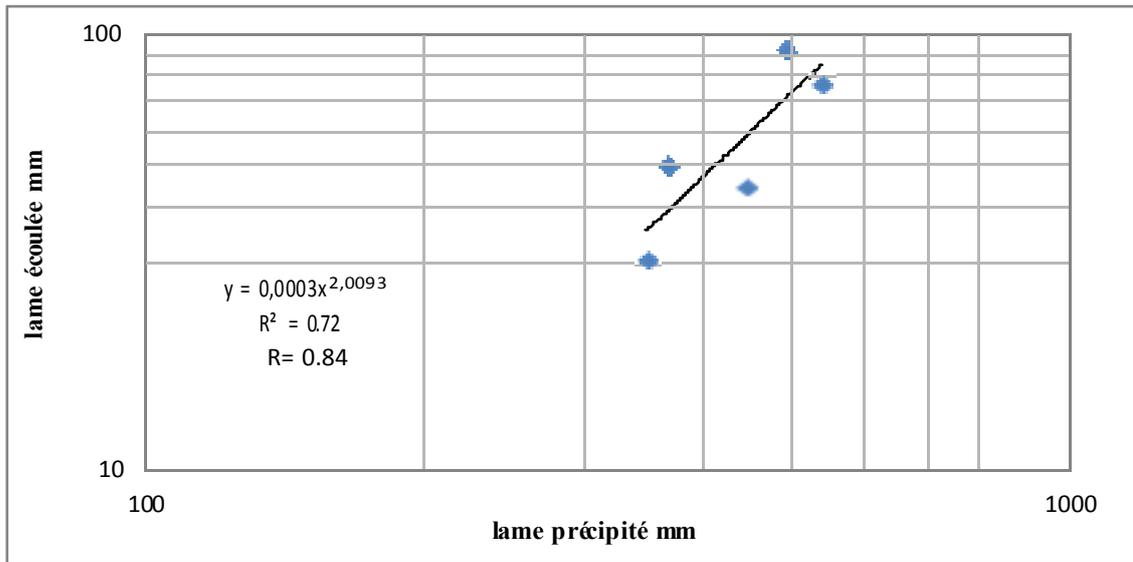


Figure 72: Relation entre la lame précipitée des bassins et la lame écoulée

Les régressions pluie-Ec à l'échelle annuelle pour les cinq bassins jaugés, montrent des coefficients de corrélation inférieures à ceux obtenus par la régression réalisée en utilisant les moyennes interannuelles des pluies de bassin et des lames écoulée. Spécialement dans les bassins du haut Isser à influence semi-aride marquée. La lame d'eau écoulée n'évolue pas toujours de la même manière que la lame précipitée. Le coefficient de corrélation est de $R = 0.59$ à la station de Mezahim (fig.73). La variance expliquée est de 35%. Alors que la variance résiduelle est de 65 % en vue de forte variabilité pluviométriques qui se traduit par un régime hydrologique très irrégulier.

Les écoulements annuels sont influencés par les valeurs de Ec mensuelles. Celles-ci sont influencées par la fréquence des écoulements de crue et les périodes de faible écoulement liées à des précipitations faibles.

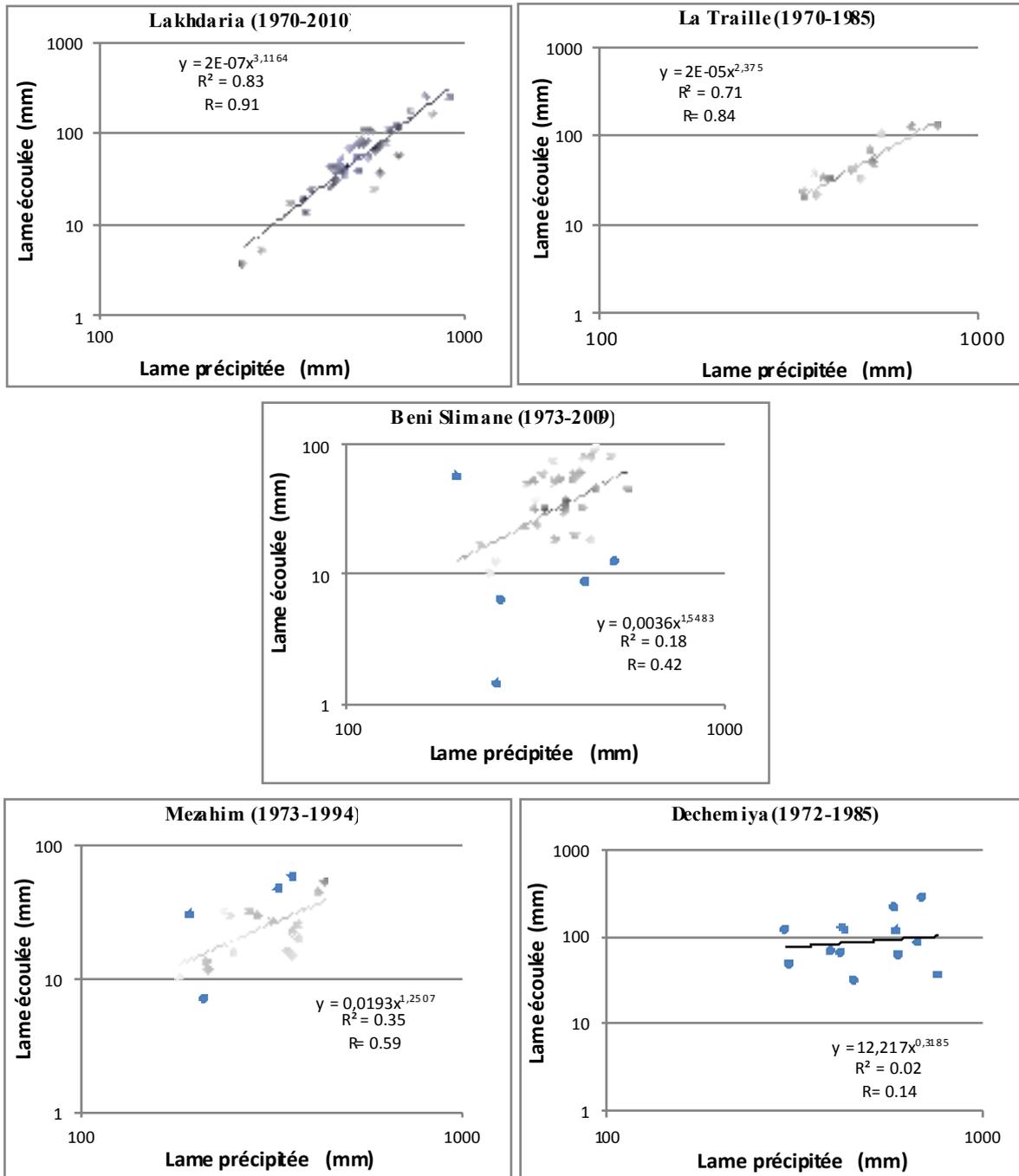


Figure 73: Relation entre la lame précipitée et la lame écoulée aux bassins jaugés de l'oued Isser

3-4 Corrélation déficit d'écoulement-pluie

La figure 74 montre que le déficit d'écoulement est très fortement corrélé avec la pluviométrie. La relation obtenue est de type puissance avec un coefficient de corrélation de $R = 0.97$. La variance expliquée est très forte 95%, supérieure à celle obtenue pour la corrélation pluie-écoulement.

$$D \text{ (mm)} = 2.1375 * P^{0.8516} \text{ (mm)}$$

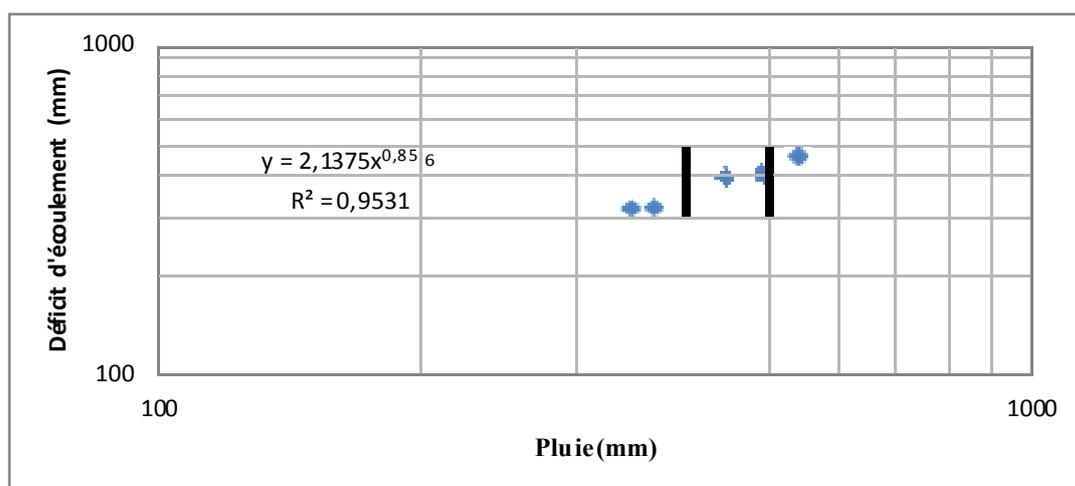
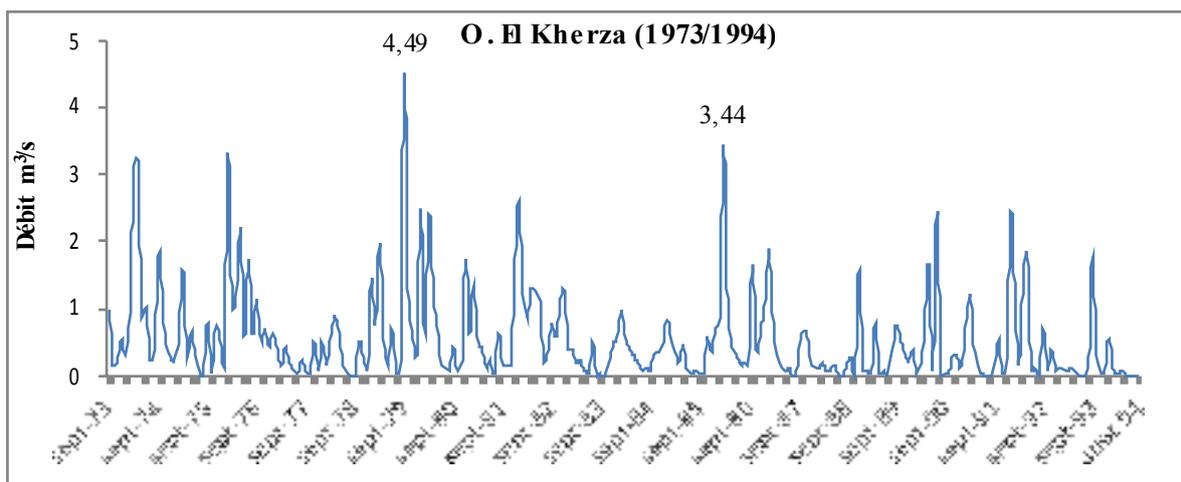
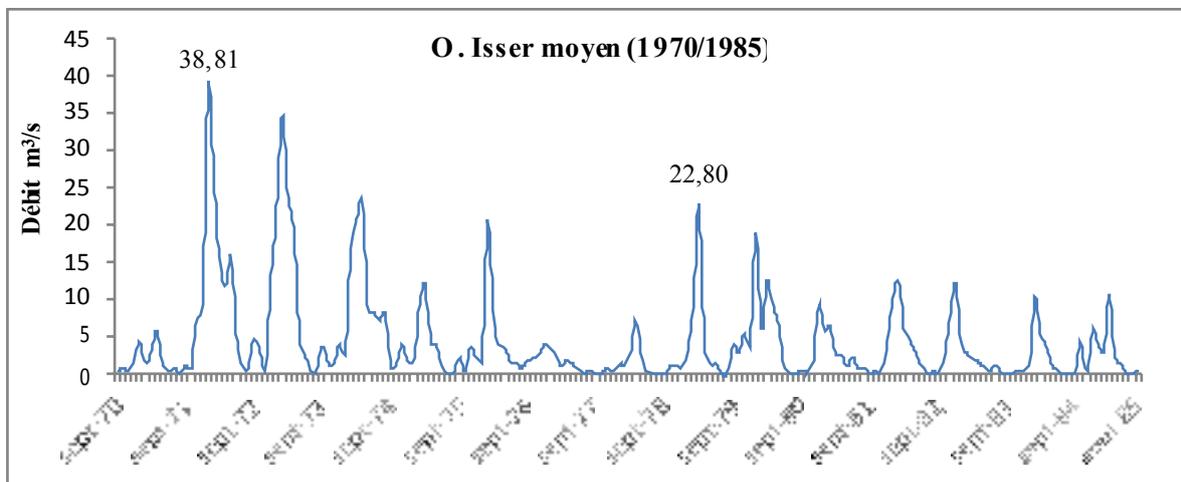
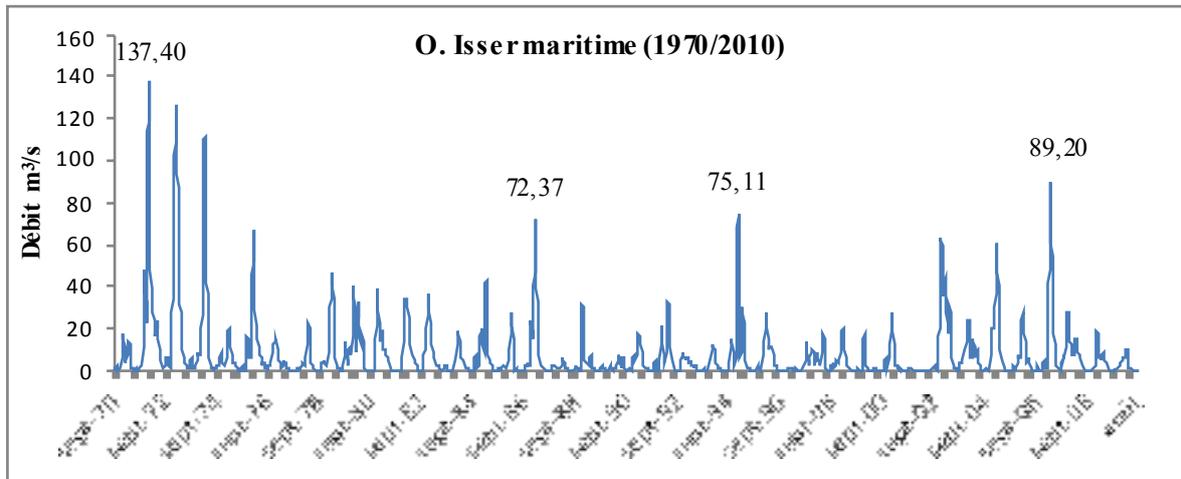


Figure 74: Relation pluie- déficit d'écoulement pour les bassins de l'Isser

4- Les écoulements mensuels et les régimes saisonniers

La figure 75 présente les variations interannuelles des débits mensuels des bassins jaugés. Elle met en évidence que les sous-bassins de l'oued Isser ont un régime caractérisé par une forte irrégularité. Les fluctuations mensuelles ne s'observent pas toujours de la même façon d'une année à l'autre. Pour tous les bassins versants, le maximum mensuel ne s'observe pas au même mois alors que le minimum est enregistré essentiellement en juillet et en août.



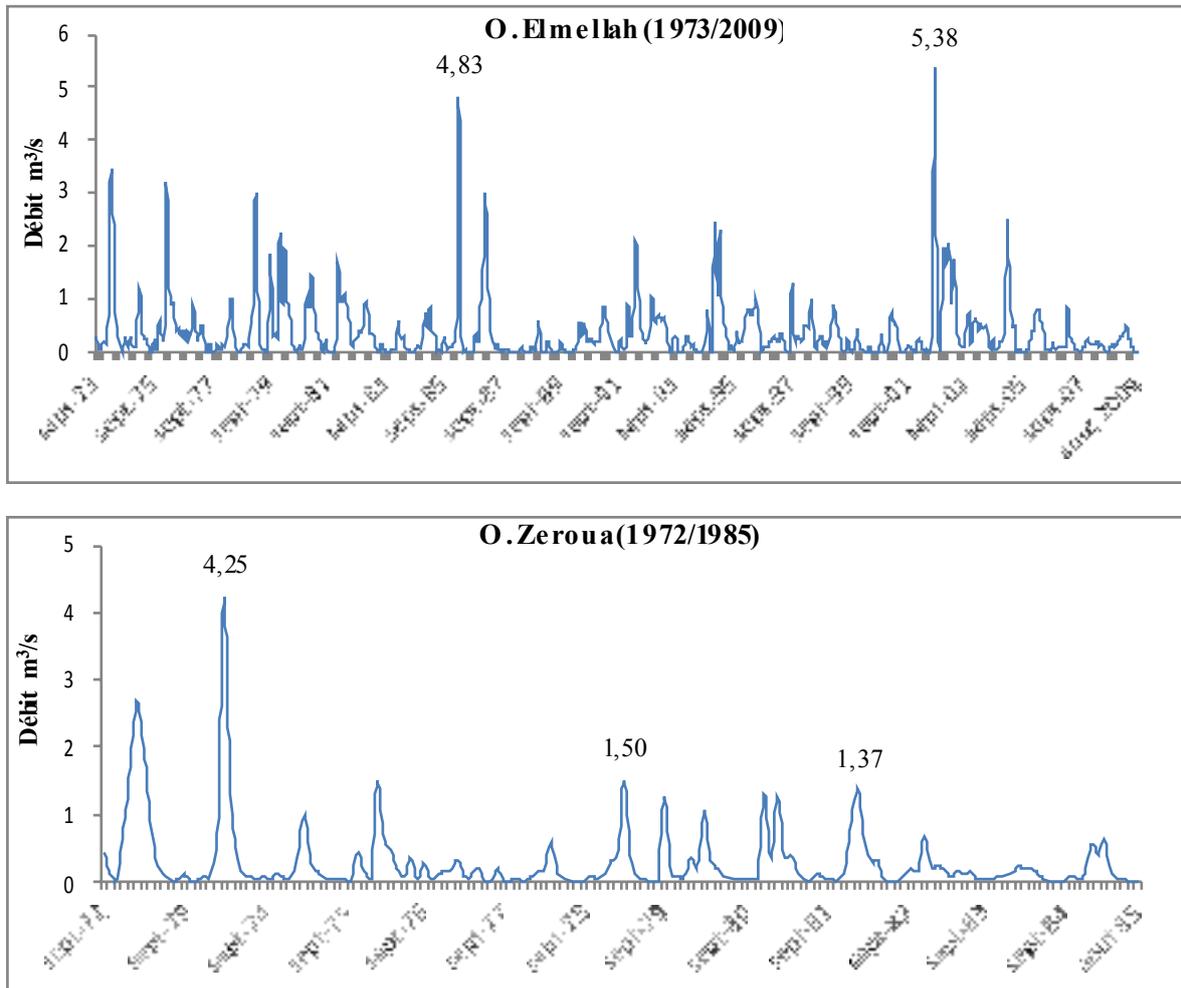


Figure 75: Variations interannuelles des débits mensuels aux bassins jaugés

L'analyse des débits moyens mensuels permet de mettre en évidence le régime des cours d'eau et leurs variations interannuelles. Ce régime peut être étudié par le coefficient mensuel de débit CMD, qui est le rapport du débit moyen mensuel au module de la période considérée. Les CMD inférieur à 1 représentent les mois de basses eaux et les CMD supérieurs à 1 correspondent aux mois de hautes eaux.

L'examen de la figure 76 montre la différence entre le régime des Hautes Plaines et le régime du Tell. Le maximum mensuel est observé au mois de février pour la station de Lakhdaria et La Traïlle et au mois de mars pour les trois stations situées en Hautes Plaines.

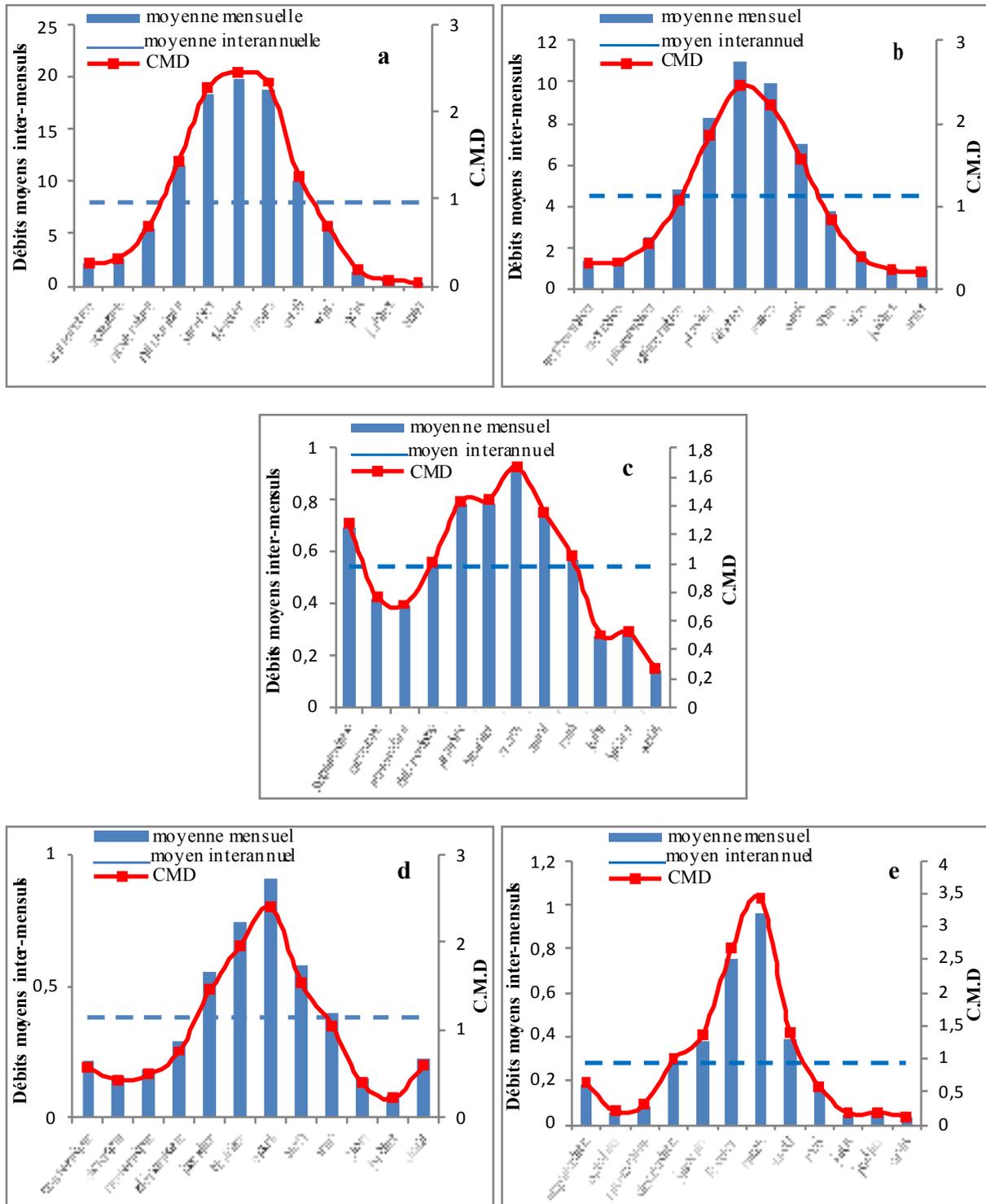


Figure 76: Variations des débits moyens inter-mensuels et coefficients mensuels des oueds (a : O. Isser maritime ; b : Isser moyen ; c : El Kherza ; d : Mellah ; e : Zeroua)

Pour les stations de Lakhdaria et de La Traille, la période des hautes eaux s'étale sur 5 mois (de décembre à avril), les 7 mois restants constituant la période des basses eaux, alors que les stations situées en Hautes Plaines se caractérisent par une période des hautes eaux qui s'étale sur 5 mois (de janvier à mai), c'est-à-dire un décalage de un mois.

Les moyennes inter-mensuelles sont très fortement influencées par les valeurs extrêmes de la période étudiée. C'est le cas de la station de Mezahime pour le mois de septembre 1979 qui enregistre le débit maximal de la période d'étude de $4.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ supérieur de 6 fois la moyenne interannuelle de ce mois $0.70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ce maximum s'explique par les orages et les pluies violentes du début d'automne. Pour la station de Lakhdaria, le débit moyen mensuel de janvier 1972 ($137.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) influe fortement sur la moyenne interannuelle du mois de janvier.

5-Variations journalières des débits

Les figures 77 à 81 représentent les hydrogrammes des débits moyens journaliers pour les années humides et sèches aux stations hydrométriques. Elles mettent en évidence une grande variabilité des écoulements journaliers pour les sous-bassins de l'oued Isser. Elles montrent clairement une différence dans le régime d'écoulement entre les années humides et les années sèches.

L'année humide est caractérisée par une période de hautes eaux, où les crues sont bien marquées et sont fréquentes. Les débits moyens journaliers maximaux sont toujours enregistrés en hiver ou au printemps. Le reste de l'année est caractérisé par une période de basses eaux.

Par contre, l'année sèche est marquée par une variation des débits journaliers plus brutale et très irrégulière, où les crues sont moins fréquentes. Les débits moyens journaliers et instantanés maximaux sont souvent enregistrés durant les mois automnaux et estivaux. Ces orages ont des effets majeurs sur l'érosion et sur la production des matières en suspension des oueds.

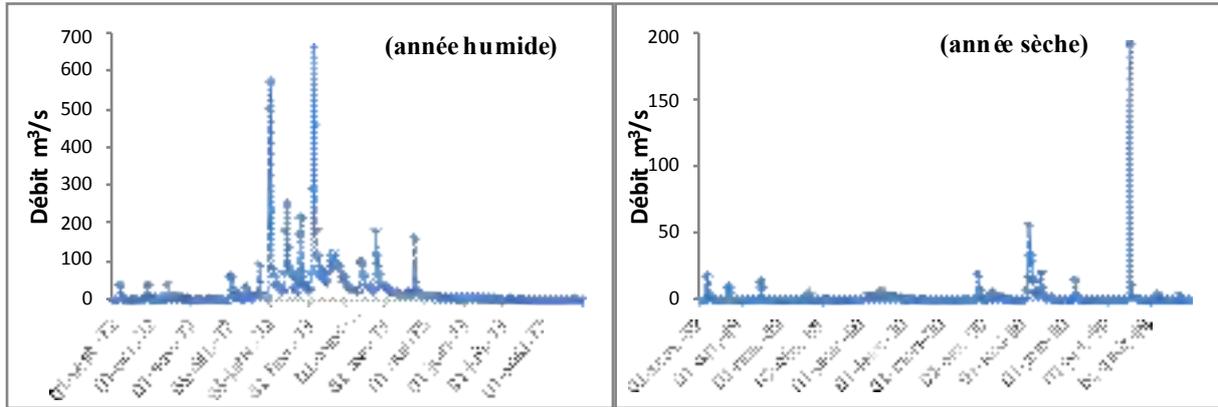


Figure 77: Variations des débits moyens journaliers d'oued Isser maritime à la station de Lakhdaria

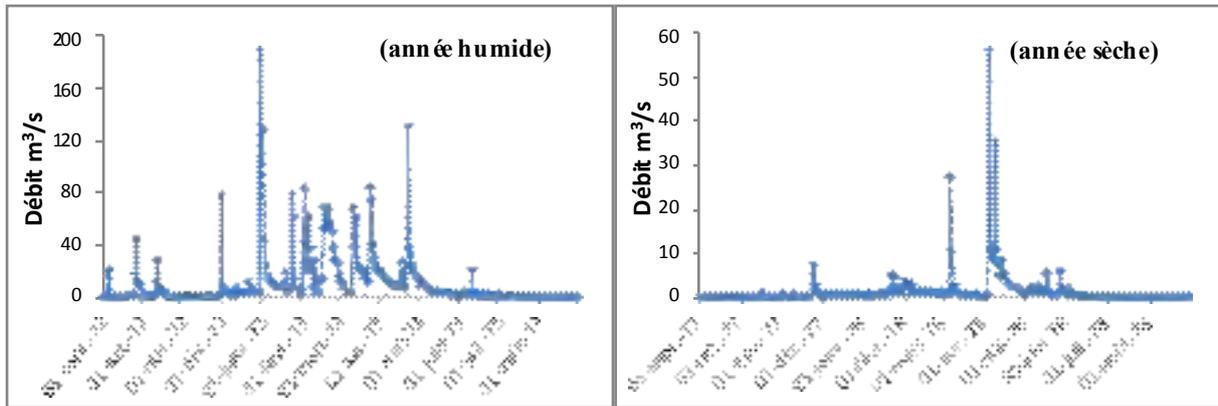


Figure 78: Variations des débits moyens journaliers d'oued Isser moyen à la station de La Traille

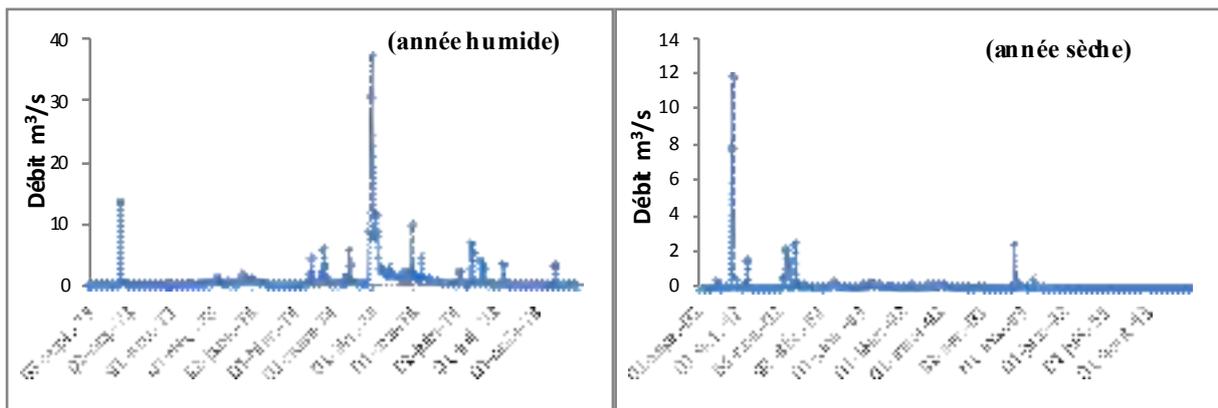


Figure 79: Variations des débits moyens journaliers d'oued El Kherza à la station de Mezahime

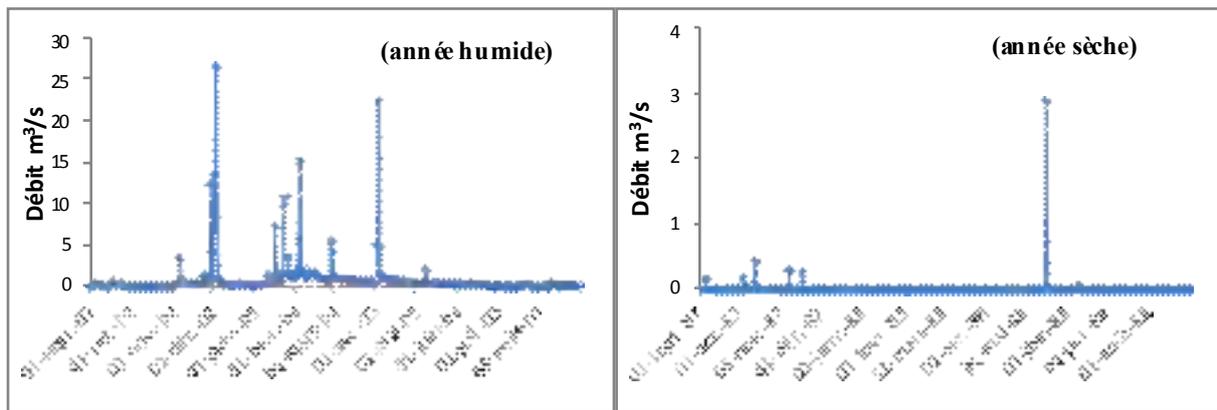


Figure 80: Variations des débits moyens journaliers d'oued Mellah à la station de Beni Slimane

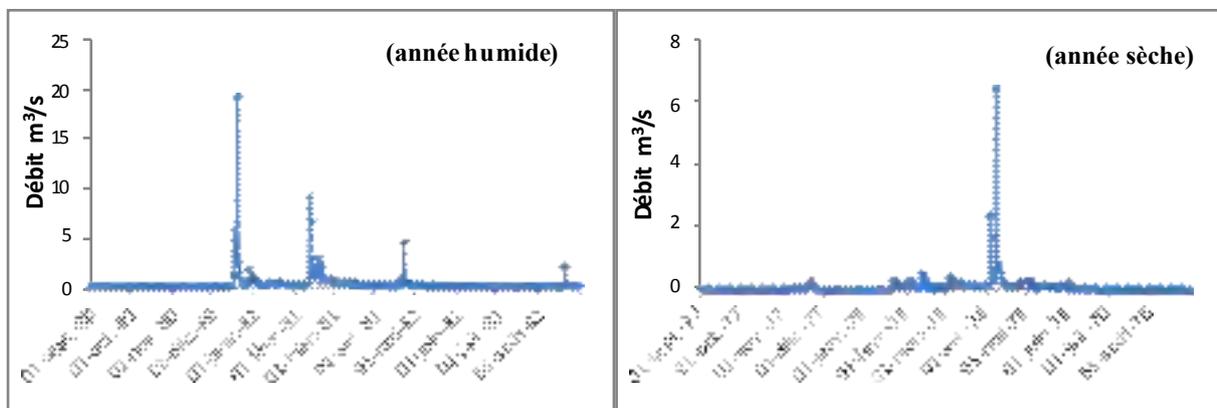


Figure 81: Variations des débits moyens journaliers d'oued Zaroua à la station de Dechemiya

6- Etude des débits extrêmes (les crues)

Une crue est un phénomène hydrologique qui s'exprime par une augmentation brutale dans le niveau des eaux d'un cours d'eau. Elle produit des débits exceptionnels qui dépassent largement les normes habituelles. Pour Dubreuil (1974), une crue est une chronique de débits instantanés ou journaliers d'une durée de plusieurs heures à plusieurs jours mais qui atteint rarement le mois.

Il est important de distinguer la différence entre les crues et les hautes eaux. Selon Frécaut (1971), les hautes eaux représentent une situation saisonnière durable, alors que les crues, constituent une situation extrême dans le comportement des cours d'eau. Il s'agit de gonflements fluviaux exceptionnels et irréguliers. D'après Remenieras (1980), la crue annuelle est le débit le plus fort observé dans l'année.

Selon Laborde (2000), la crue est la période durant laquelle le débit dépasse un certain multiple (2 à 3 par exemple) du débit moyen annuel. En fait, la définition peut changer en fonction de la taille du bassin et du phénomène engendrant la crue.

6-1-Les débits maximaux moyens journaliers et instantanés

Les tableaux 39 à 43 présentent les valeurs de débits maximaux moyens journaliers et instantanés des crues observées de saison froide et celles saison chaude pour les bassins étudiés. Elles montrent que les valeurs extrêmes des débits instantanés maximaux ont une répartition très variable dans l'année.

Tableau 39: Valeurs de débits maximaux moyens journaliers et instantanés des crues de l'oued Isser maritime à la station de Lakhdaria

Saison froide					Saison chaude				
date	A	B	Rapport A/B	E	date	A	B	Rapport A/B	E
02/04/1971	146,1	88,49	1,65	2,43	02/05/1972	436	223,77	1,95	7,25
27/11/1971	1504	863,2	1,74	25,04	28/09/1972	146,1	39,02	3,74	2,43
08/12/1971	428	214,25	2,00	7,13	25/09/1973	164	99,72	1,64	2,72
23/01/1972	2020	1197,94	1,69	33,63	29/05/1976	106,4	58,37	1,82	1,77
25/02/1972	485	281,46	1,72	8,08	20/09/1979	608	278,27	2,18	10,11
31/12/1972	1080	502,33	2,15	17,98	01/05/1980	221	151,97	1,45	3,67
04/02/1973	1029,5	661,49	1,56	17,14	30/10/1982	173,6	101,88	1,70	2,88
01/01/1974	158	95,95	1,65	2,63	23/08/1983	258	45,73	5,64	4,29
23/02/1974	343,5	236,54	1,45	5,72	11/10/1984	237,2	126,3	1,88	3,94
30/03/1974	2350	1489	1,58	39,13	26/10/1986	118,9	57,22	2,08	1,97
25/11/1974	268,2	127,87	2,10	4,47	17/07/1990	331,6	190,4	1,74	5,51
17/02/1975	257,6	164,7	1,56	4,29	05/10/1991	205,9	42,73	4,82	3,42
22/03/1975	314,5	209,23	1,50	5,24	24/09/1993	88	27,43	3,21	1,46
04/11/1975	325	144,11	2,26	5,41	30/09/1994	119	39,17	3,04	1,98
01/12/1975	188	79,96	2,35	3,13	17/10/1994	601	164,4	3,66	10
07/02/1976	365,3	271,16	1,35	6,08	25/08/1997	144,00	28,73	5,01	2,39
23/12/1976	242,3	159,55	1,52	4,03	18/09/1997	471,25	177,52	2,65	7,84
09/01/1977	133,6	51,73	2,58	2,22	24/09/1998	214,20	61,15	3,50	3,56
03/04/1978	319,53	148,12	2,16	5,32	27/10/2000	389,55	111,74	3,49	6,48
26/02/1979	901	276,92	3,25	15,00	13/09/2006	131,00	36,48	3,59	2,18
02/03/1979	541,2	326,12	1,66	9,01	23/09/2007	327,85	159,01	2,06	5,45
22/12/1979	182	93,42	1,95	3,03					
11/01/1980	575	335,68	1,71	9,57					
06/03/1980	415,35	331,2	1,25	6,92					
20/12/1980	458,72	325,4	1,41	7,64					
16/11/1982	199,05	121,91	1,63	3,31					
26/12/1982	271	224,48	1,21	4,51					
03/02/1984	191,2	100,6	1,90	3,18					
09/03/1985	288	211	1,36	4,80					

09/02/1976	128	75,78	1,69	2,13
07/03/1976	713,8	330,38	2,16	11,88
11/12/1986	315,5	192,4	1,64	5,25
06/02/1987	383,8	248,7	1,54	6,39
06/03/1988	102,5	60,06	1,71	1,71
14/12/1988	509	303,9	1,67	8,47
03/03/1990	199,3	55,84	3,57	3,32
12/12/1990	128,5	78,49	1,64	2,14
21/02/1991	424,3	205,1	2,07	7,06
26/01/1992	513,1	372,6	1,38	8,54
04/12/1992	172,2	100,5	1,71	2,87
20/01/1994	355,9	159,1	2,24	5,93
08/01/1995	510,6	263,1	1,94	8,50
14/03/1995	311,9	155,7	2,00	5,19
29/02/1996	583	321,9	1,81	9,71
23/11/1997	386,40	187,31	2,06	6,43
25/02/1998	262,50	128,52	2,04	4,37
03/03/1998	277,20	125,02	2,22	4,62
19/01/1999	181,84	96,89	1,88	3,03
19/12/1999	482,78	213,64	2,26	8,04
30/01/2001	468,64	272,86	1,72	7,80
30/12/2004	442,98	266,20	1,66	7,38
16/02/2005	176,32	125,44	1,41	2,94
01/02/2006	157,00	89,09	1,76	2,61
11/03/2007	1470,00	722,78	2,03	24,48
30/12/2007	819,78	229,15	3,58	13,65
13/01/2009	287,00	115,43	2,49	4,78

A : débit instantané maximal (m^3/s) ; B : débit moyen journalier maximal (m^3/s) ; E: coefficient de crue : $E=A / \sqrt{S}$; S : superficie du bassin (km^2)

Tableau 40: Valeurs de débits max moyens journaliers et instantanés des crues de l'oued Isser moyen à la station de La Traille

Saison froide					Saison chaude				
date	A	B	Rapport A/B	E	date	A	B	Rapport A/B	E
01/04/1971	109,37	37,35	2,93	2,16	13/10/1970	68,88	11,75	5,86	1,36
28/11/1971	820	90,09	9,10	16,19	25/09/1971	84,16	14,99	5,61	1,66
23/01/1972	583	293,01	1,99	11,51	02/05/1972	305,8	128,12	2,39	6,04
10/02/1972	197,25	98,82	2,00	3,89	11/06/1972	77,8	27,8	2,80	1,54
31/12/1972	330,5	188,77	1,75	6,53	27/09/1972	141	44,67	3,16	2,78
03/02/1973	498	82,72	6,02	9,83	11/06/1973	84,16	21,56	3,90	1,66
23/04/1973	222,6	131,13	1,70	4,39	25/09/1973	168,8	64,75	2,61	3,33
23/02/1974	178,4	126,5	1,41	3,52	23/09/1975	44,7	24,26	1,84	0,88
31/03/1974	936,6	352,8	2,65	18,49	18/07/1976	77,8	13,36	5,82	1,54
24/11/1974	158,5	39,02	4,06	3,13	29/08/1976	79,45	11,63	6,83	1,57
16/02/1975	208,6	89,84	2,32	4,12	07/09/1976	84,36	13,92	6,06	1,67
22/03/1975	135,2	86,84	1,56	2,67	20/09/1979	482	70,98	6,79	9,52
04/11/1975	125	45,09	2,77	2,47	11/10/1984	142,25	64,68	2,20	2,81

10/02/1976	195,2	83,04	2,35	3,85
23/12/1976	51,52	26,76	1,93	1,02
05/03/1978	81,04	27,4	2,96	1,60
03/04/1978	195,2	56,33	3,47	3,85
26/02/1979	112,2	67,86	1,65	2,22
02/03/1979	142	101,87	1,39	2,80
11/01/1980	220	149,41	1,47	4,34
07/03/1980	203,2	28,46	7,14	4,01
18/12/1980	196,5	69,93	2,81	3,88
22/12/1981	94	42,06	2,23	1,86
29/01/1982	132	79,68	1,66	2,61
10/03/1982	78,7	13,1	6,01	1,55
16/11/1982	74,16	53,61	1,38	1,46
26/12/1982	78,7	68,34	1,15	1,55
03/02/1984	37,85	26,46	1,43	0,75
09/03/1985	61,65	55,2	1,12	1,22

Tableau 41: Valeurs de débits max moyens journaliers et instantanés des crues de l'oued Kharza à la station de Mezahime

Saison froide					Saison chaude				
date	A	B	Rapport A/B	E	date	A	B	Rapport A/B	E
31/03/1974	44,8	36,97	1,21	1,74	13/06/1974	83,1	6,72	12,37	3,23
11/04/1975	39,32	8,48	4,64	1,53	25/09/1973	47,92	13,45	3,56	1,86
03/04/1978	21,5	10,23	2,10	0,84	21/09/1974	112,8	20,67	5,46	4,39
22/01/1979	78,16	11,5	6,80	3,04	14/10/1974	57,64	11,06	5,21	2,24
30/04/1980	70,34	21,18	3,32	2,73	28/05/1976	68,28	14,46	4,72	2,65
18/12/1980	29,2	14,84	1,97	1,14	07/09/1976	50,2	13,08	3,84	1,95
22/12/1981	85,67	22,42	3,82	3,33	06/06/1979	39,8	15,54	2,56	1,55
18/04/1982	37,88	14,53	2,61	1,47	20/09/1979	380	84,19	4,51	14,77
16/11/1982	22,08	14,65	1,51	0,86	25/10/1979	51,4	8,26	6,22	2,00
11/02/1985	25,1	6,65	3,77	0,98	23/08/1981	83,14	17,61	4,72	3,23
11/02/1986	25,1	6,7	3,75	0,98	18/04/1982	37,88	14,53	2,61	1,47
18/11/1987	26,18	10,04	2,61	1,02	04/07/1983	75,8	9,67	7,84	2,95
06/03/1988	74,56	31,62	2,36	2,90	12/10/1988	167	17,01	9,82	6,49
10/12/1989	24,1	12,54	1,92	0,94	13/10/1989	73,99	4,76	15,54	2,88
30/04/1991	113	12,2	9,26	4,39	16/07/1991	145	47,28	3,07	5,64
31/01/1992	15,44	8,41	1,84	0,60	25/09/1993	115,06	11,78	9,77	4,47
26/01/1993	49,24	109,86	0,45	1,91	22/09/1994	81,3	25,65	3,17	3,16
20/01/1995	42,17	14,43	2,92	1,64					

Tableau 42: Valeurs de débits max moyens journaliers et instantanés des crues de l'oued Mellah Ouest à la station de Beni Slimane

Saison froide					Saison chaude				
date	A	B	Rapport A/B	E	date	A	B	Rapport A/B	E
31/03/1974	80	40,6	1,97	4,77	15/09/1974	45,05	4,92	9,16	2,69
22/03/1975	17,7	8,47	2,09	1,06	03/07/1976	60,3	5,31	11,36	3,60
04/11/1975	41,6	8,26	5,04	2,48	28/08/1976	82,84	5,89	14,06	4,94
10/02/1976	20,88	10,1	2,07	1,25	28/05/1977	101,04	6,64	15,22	6,03
22/01/1979	41,5	6,51	6,37	2,48	15/08/1977	49,1	3,65	13,45	2,93
10/04/1979	80,95	6,89	11,75	4,83	16/05/1978	185	8,22	22,51	11,04
06/03/1980	48,5	19,39	2,50	2,89	19/09/1979	538,9	37,39	14,41	32,15
04/04/1984	8,26	2,26	3,65	0,49	23/08/1981	94,9	7,34	12,93	5,66
06/03/1986	110	44,43	2,48	6,56	28/09/1985	40	3,68	10,87	2,39
15/04/1988	47,5	2,88	16,49	2,83	16/10/1986	93,9	5,71	16,44	5,60
10/04/1989	45,25	3,63	12,47	2,70	16/07/1990	98,5	15,35	6,42	5,88
26/01/1992	55,5	19,29	2,88	3,31	05/08/1990	98,5	5,6	17,59	5,88
09/04/1992	63,67	21,34	2,98	3,80	23/09/1993	57,13	5,43	10,52	3,41
20/01/1994	20,8	5,89	3,53	1,24	16/10/1994	80	9,23	8,67	4,77
12/03/1995	53,9	11,37	4,74	3,22	09/10/1995	44,5	4,7	9,47	2,66
19/12/1999	22,50	6,33	3,55	1,34	16/06/1996	63,67	9,43	6,75	3,80
27/04/2001	28,2	2,94	9,59	1,68	14/07/1996	47,5	8,32	5,71	2,83
30/11/2002	74,80	12,28	6,09	4,46	25/08/2001	508	152,14	3,34	30,31
04/12/2002	98	26,50	3,70	5,85	17/10/2003	100	8,47	11,81	5,97
04/04/2003	45,10	22,44	2,01	2,69	30/09/2008	30,40	2,47	12,31	1,81
25/04/2006	40,60	4,76	8,53	2,42					

Tableau 43: Valeurs de débits maximaux moyens journaliers et instantanés des crues de l'oued Zaroua à la station de Dechemiya

Saison froide					Saison chaude				
date	A	B	Rapport A/B	E	date	A	B	Rapport A/B	E
01/01/1973	38,2	18,92	2,02	4,19	03/07/1976	218	9,23	23,62	23,93
24/03/1973	68	11,61	5,86	7,46	06/09/1976	84	6,87	12,23	9,22
30/03/1974	131,9	53,89	2,45	14,48	16/08/1977	28,8	4,87	5,91	3,16
23/03/1975	18,28	6,37	2,87	2,01	17/10/1978	18,95	1,14	16,62	2,08
08/04/1978	15,32	6,42	2,39	1,68	19/09/1979	258	23,1	11,17	28,32
22/01/1979	34,5	3,87	8,91	3,79	21/08/1981	33,5	2,07	16,18	3,68
11/01/1980	15,62	4,24	3,68	1,71	20/10/1982	35,5	3,67	9,67	3,90
06/03/1980	72,2	13,59	5,31	7,93	04/07/1983	47,6	3	15,87	5,23
20/12/1980	73	19,16	3,81	8,01					
12/02/1981	129,8	9,04	14,36	14,25					
27/02/1982	23,2	9,54	2,43	2,55					
26/12/1982	16,8	10,59	1,59	1,84					
14/03/1984	4,46	1,64	2,72	0,49					
11/02/1985	17,73	3,87	4,58	1,95					
09/03/1985	7,9	5	1,58	0,87					

La figure 82 montre que durant le même évènement de crue, la réponse aux crues est différente d'un bassin à l'autre, l'évolution des crues de l'amont à l'aval du bassin de l'oued Isser est fonction des caractéristiques des pluies génératrices de crues (intensité, durée et extension spatiale) ainsi que de l'organisation et de la densité du réseau hydrographique.

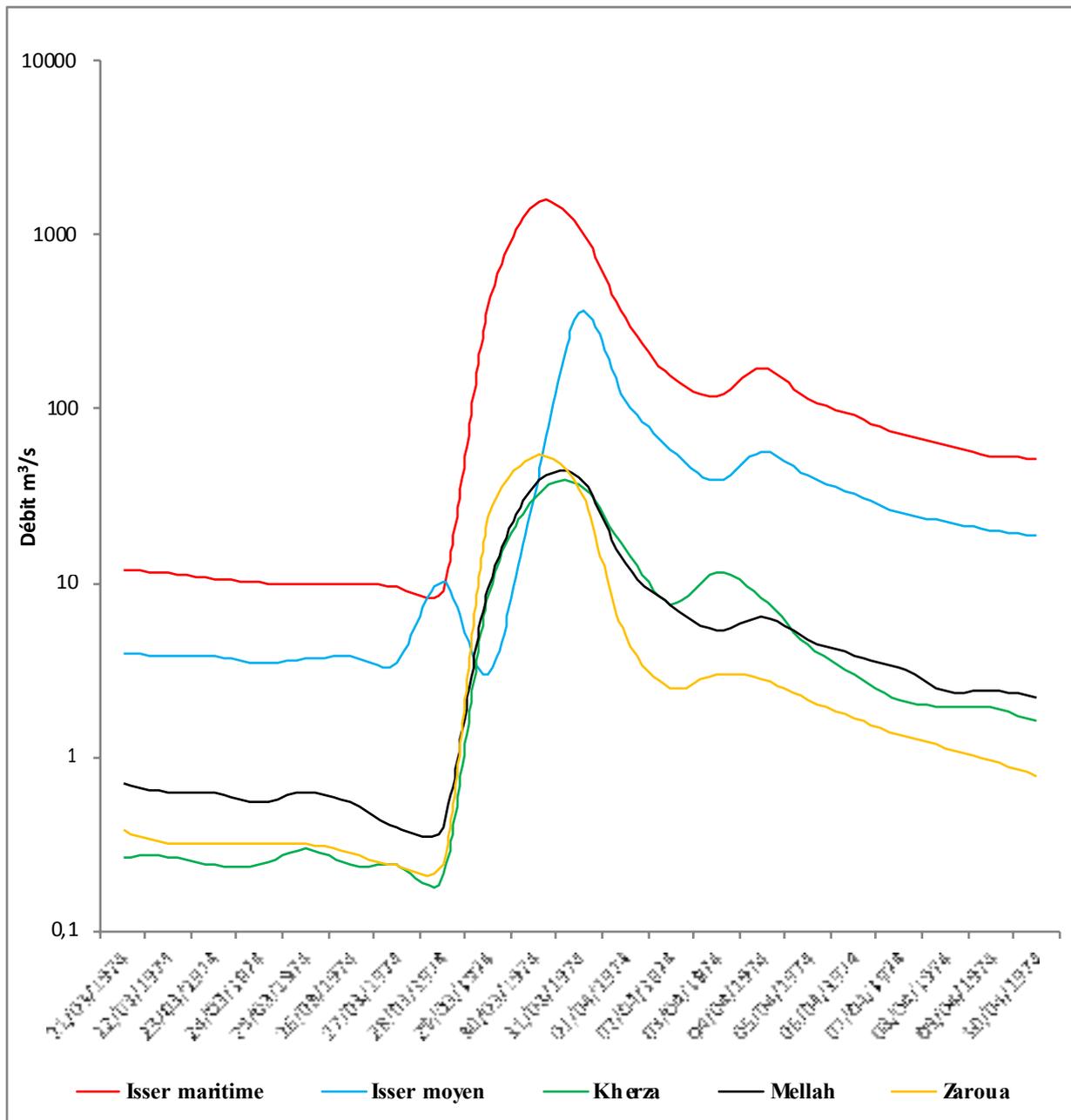


Figure 82: Hydrogrammes journaliers de crues du 28 mars au 10 avril 1974

6-2-Les crues de la saison froide

Ce sont les crues qui se déroulent de novembre à avril, et se caractérisent par des valeurs élevées de débits, dues essentiellement à l'abondance pluviométrique et à la saturation des sols. Pour le même bassin, le temps de montée des crues de la saison froide est généralement court, alors que la décrue se fait généralement de façon beaucoup plus lente. Cette phase s'étend sur plusieurs jours avant le rétablissement du débit de base (fig. 83).

Au niveau du bassin de l'oued Isser Maritime (3611km^2), les crues de la saison froide présentent des durées plus longues et une plus forte fréquence par rapport aux bassins amont, en raison des épisodes d'averses localisés plus ou moins longs de la saison froide, où on remarque plusieurs pics de débits.

Les bassins connaissent quelques crues généralisées telle que celle du 28 mars-4 avril 1974. Cette crue a enregistré un débit de pointe de $2350\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à la station de Lakhdaria (Isser Maritime), $945.8\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à la station de La Traille (Isser Moyen), $44.8\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à la station de Mezahime (oued Kherza), $80\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ au niveau de la station de Beni Slimane (oued Mellah) et $131.9\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à la station de Dechemiya (oued Zaroua) (fig 82).

Au niveau de l'oued Isser, le débit maximum moyen journalier de la période d'étude atteint la valeur de $1489.49\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, enregistrée le 30 mars 1974 à la station de Lakhdaria. C'est une crue exceptionnelle où le débit de pointe atteint $2350\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

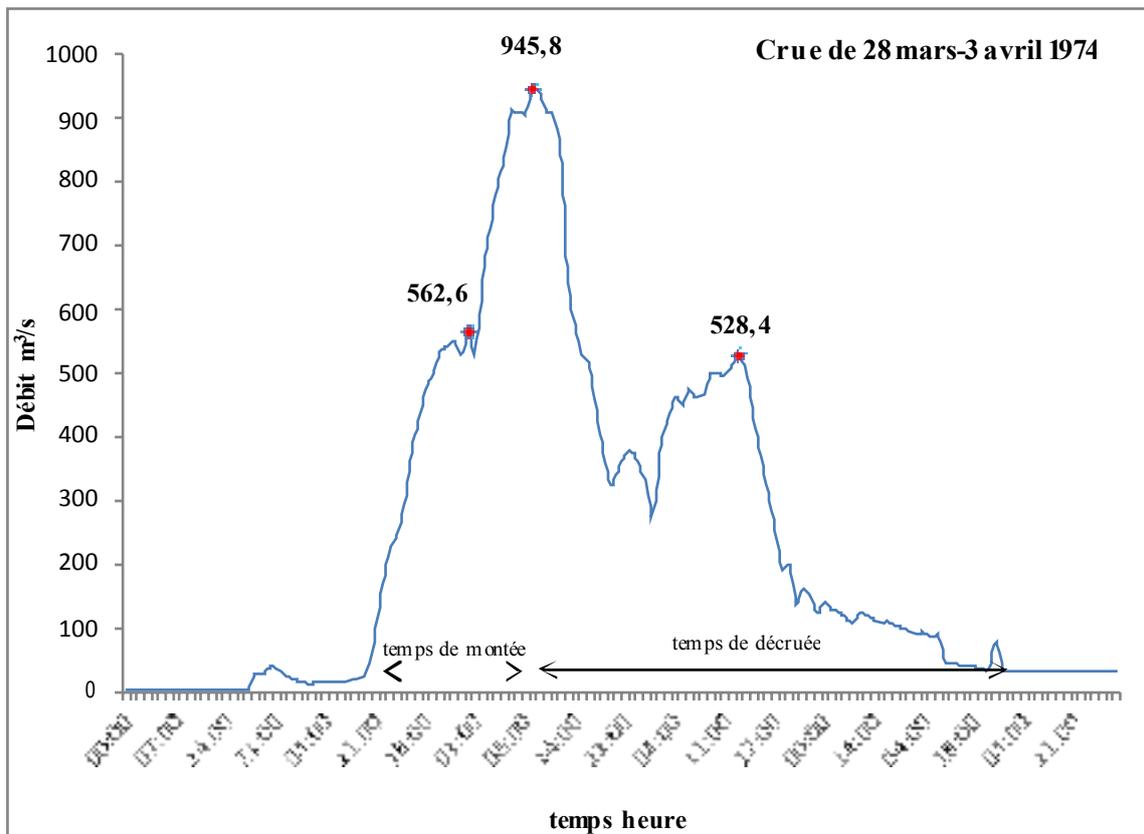


Figure 83: Hydrogramme de crue du 28 mars au 3 avril 1974 à oued Isser Moyen à la station de La Traille

6-3- Les crues de la saison chaude

Ce sont les crues qui se déroulent de mai à octobre. Elles sont engendrées par des averses limitées dans le temps et localisées dans l'espace, de durée moins longue que les crues de saison froide. Le temps de montée est en règle générale plus brutal notamment au niveau des bassins supérieurs de l'oued Isser. Ceci s'explique par la surface réduite des bassins : bassin de l'oued Kherza (662km²), bassin de l'oued Mellah (283 km²), et enfin le bassin de l'oued Zaroua (83km²), et également par la nature fréquemment orageuse des pluies d'automne et d'été dans le domaine des Haute Plaines.

Les crues de saison chaude peuvent atteindre des proportions plus élevées que celles de saison froide en période de hautes eaux, où les valeurs de débit instantané maximal de saison chaude dépassent celles de saison froide.

La figure 84 présente l'exemple de la crue du 19 au 21 septembre 1979 enregistrée à la station de Beni Slimane (oued El Mellah). Le débit est passé d'une façon très soudaine de $3.21 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à $538.9 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en une heure et 45 minutes. La décrue est également rapide en raison de l'arrêt de l'averse après la pointe de crue.

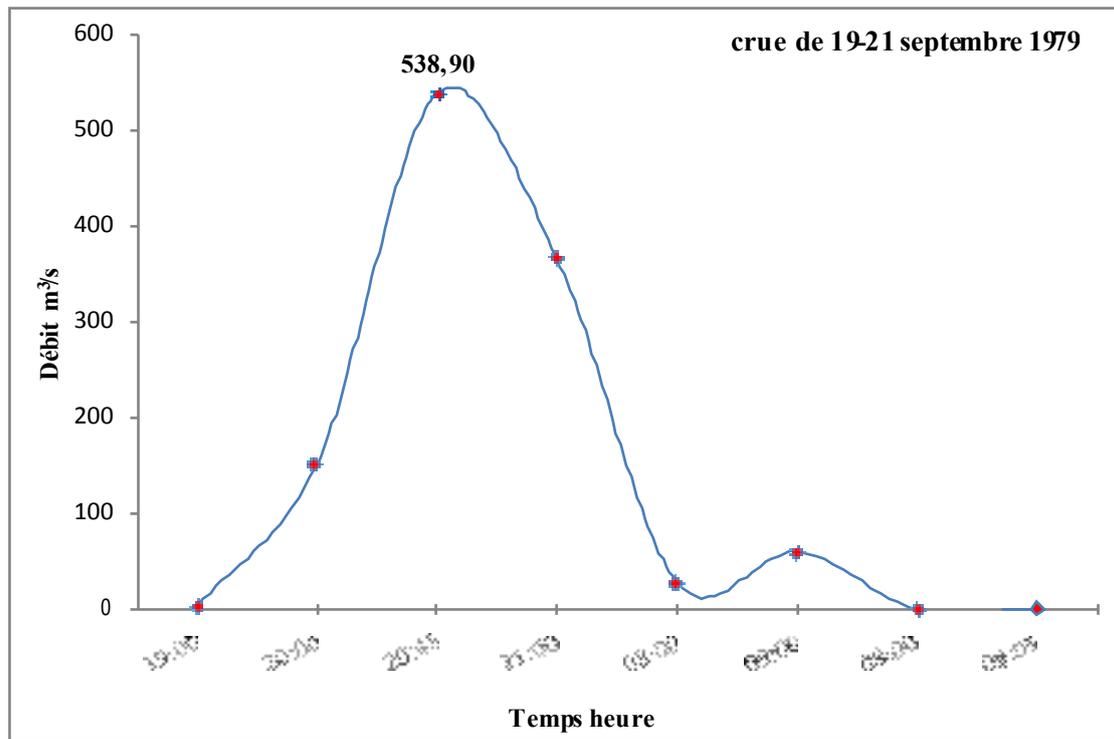


Figure 84: Hydrogramme de crue du 19 au 21 septembre 1979 à oued Mellah à la station de Beni Slimane

Les crues de saison chaude se produisent à la suite d'averses orageuses d'automne et d'été sur des sols secs et mal protégés par le couvert végétal. Ce sont donc des crues torrentielles et de courte durée qui ont des effets importants au niveau de l'érosion et des transports en suspension des oueds.

6-4-Puissance des crues

Le coefficient E de Meyer- Coutagne – Pardé constitue un bon élément d'approche dans le cadre d'une analyse comparative des crues entre des bassins de tailles différentes. Sur la base du coefficient de crue (tableaux 39 à 43), la puissance des crues des sous-bassins de l'oued Isser varie d'une région à une autre. En saison froide, le coefficient E oscille entre 0.48 (oued Zaroua à

la station de Dechemiya) et 39.13 (oued Isser maritime à la station de Lakhdaria). En saison chaude, il varie entre 0.88 (oued Isser moyen à la station de La Traille) et 32.15 (oued Mellah à la station de Beni Slimane).

Pour le bassin de l'oued Isser Maritime et celui de l'oued Isser Moyen, la puissance des crues de saison froide est plus élevée que celles de saison chaude, alors que pour la partie amont du bassin (Isser Supérieur) c'est le contraire qui se produit en raison de la particularité du régime pluviométrique de ce secteur géographique de Hautes Plaines (pluies liées aux orages estivaux).

6-4-1-Rapport débit de pointe / débit moyen journalier maximal

Les valeurs du rapport débit de pointe au débit moyen journalier maximal présentées dans les tableaux 39 à 43 sont plus élevées en saison chaude qu'en saison froide. Elles atteignent des proportions remarquables notamment dans le Haut Isser. En saison chaude, le rapport s'élève à 23.61 pour le bassin de l'oued Zaroua à la station de Dechemiya, 22.56 pour le bassin de l'oued Mellah à la station de Beni Slimane. En saison froide, il s'élève à 16.49 sur oued Mellah à la station de Beni Slimane.

Ces valeurs mettent en évidence la forte irrégularité de l'écoulement au cours d'une journée de crue notamment dans le domaine des Hautes Plaines et confirment ainsi, le caractère très aléatoire du régime méditerranéen du bassin de l'Isser.

6-5-Etude fréquentielle des crues maximales annuelles

Les ajustements des débits maximaux moyens journaliers et des débits maximaux instantanés annuels à des lois de probabilités montrent que ces derniers s'ajustent bien à la loi log normale (fig 85 et 86). Les calculs ont été réalisés avec la valeur de $x_0=0$.

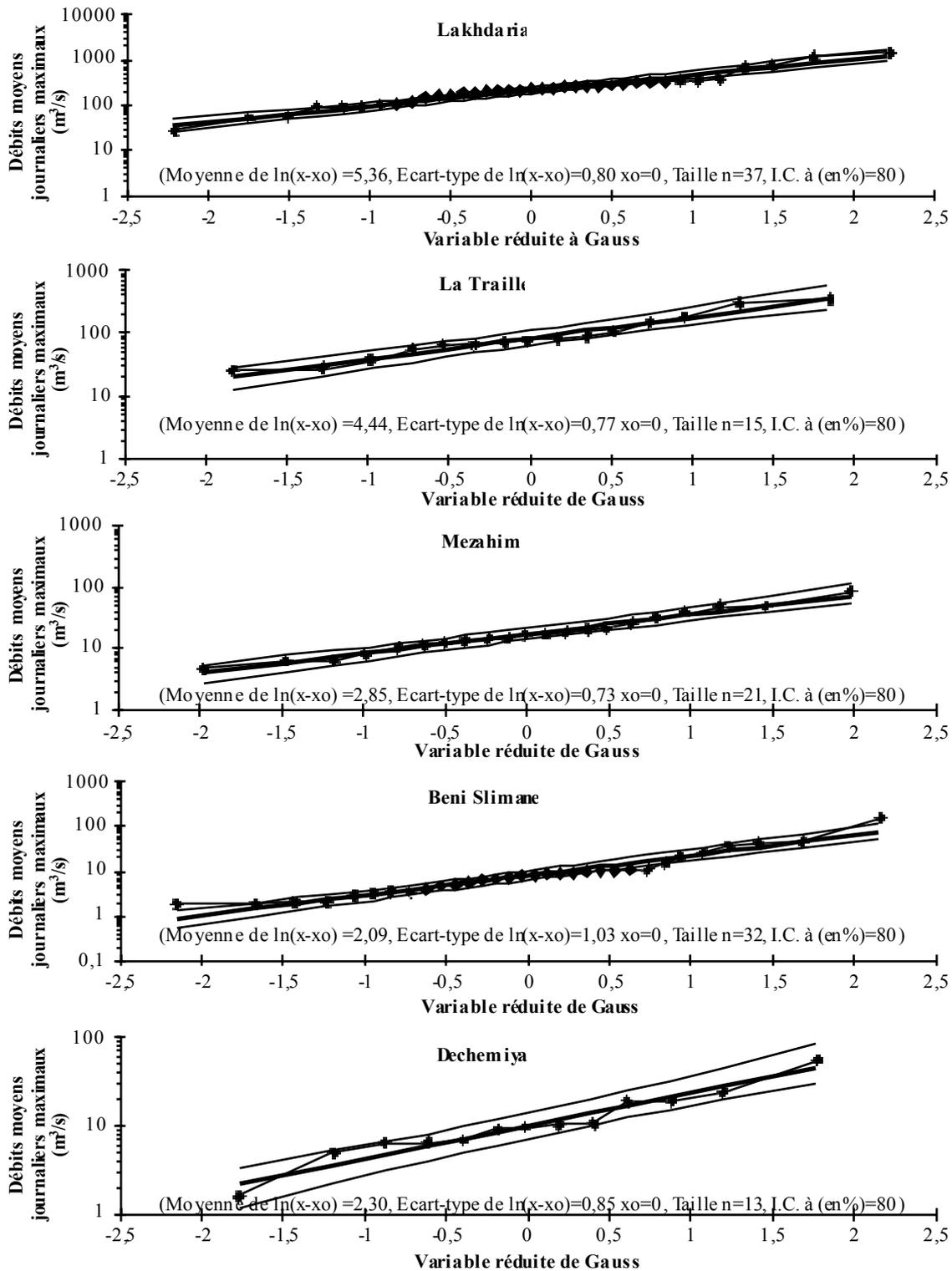


Figure 85: Ajustement des débits moyens journaliers maximaux aux stations hydrométriques

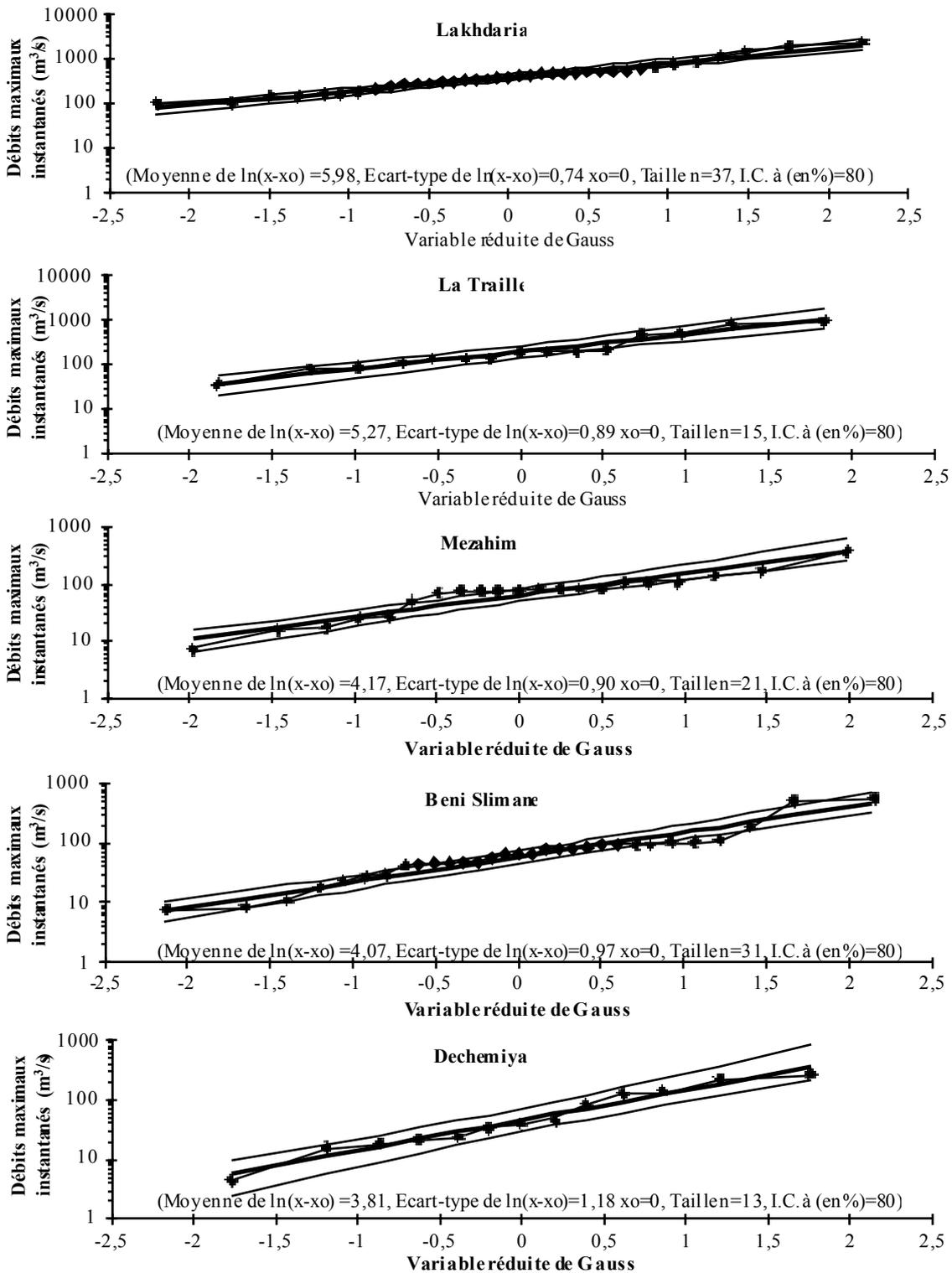


Figure 86: Ajustement des débits instantanés maximaux aux stations hydrométriques

L'application des équations de la droite de Galton permet de calculer les quantiles des débits extrêmes pour différentes périodes de retour pour les différents bassins. Les tableaux 44 et 45 présentent les résultats obtenus.

L'accroissement des débits maximaux moyens journaliers et des débits maximaux instantanés entre les fréquences biennales et centennales est énorme notamment pour les bassins du domaine des Hautes Plaines. Pour l'oued Zaroua, le débit maximal instantané d'une fréquence centennale égale 15 fois celui de fréquence biennale. Cette différence est liée principalement à l'augmentation des valeurs des pluies qui vont générer les crues.

Les valeurs des débits fréquentielles ne correspondent pas nécessairement aux mêmes fréquences pour la pluie. Selon Tcheiko, (2003), un écoulement centennal pourrait aussi bien être produit par une précipitation décennale tombant sur un sol très humide ou en revanche, par une pluie millénaire tombant sur un sol très sec.

Tableau 44: Débits moyens journaliers maximaux fréquentiels des bassins d'étude

Période de retour	2	5	10	20	50	100
Fréquence	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99
Variable réduite de Gauss	0	0.84	1.28	1.645	2.05	2.33
Isser maritime	211,9	413,9	587,5	784,4	1086,1	1349,2
Isser Moyen	84,6	161,5	226,4	299,3	409,7	505,2
El Kherza	17,3	32,0	44,1	57,6	77,6	94,8
Mellah	8,1	19,1	30,0	43,5	66,2	87,5
Zaroua	10,0	20,5	29,7	40,5	57,3	72,3

Tableau 45: Débits instantanés maximaux fréquentiels des bassins d'étude

Période de retour	2	5	10	20	50	100
Fréquence	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99
Variable réduite de Gauss	0	0.84	1.28	1.645	2.05	2.33
Isser maritime	395,6	736,2	1018,7	1332,0	1801,2	2202,7
Isser Moyen	194,3	411,3	608,8	841,7	1211,8	1545,1
El Kherza	64,5	137,1	203,4	281,8	406,6	519,2
Mellah	58,4	131,6	201,2	285,7	423,9	551,5
Zaroua	44,9	121,2	203,5	312,4	505,8	697,5

7- Les barrages dans le bassin de l'oued Isser

Le bassin est équipé de quatre barrages destinés à satisfaire les besoins en eau potable et en irrigation de la région.

7-1-Barrage de Beni Amrane

Le barrage de Beni Amrane, d'une capacité initiale de stockage de 16 M m³ est situé à l'aval de la station hydrométrique de Lakhdaria à 15 kilomètres à l'Est de la ville de Boumerdes dans la région Nord de l'Algérie. Il régularise les eaux de l'oued Isser. Le barrage a été construit et mis en service en 1988. C'est un barrage poids mixte, réalisé par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT). A partir de la plus basse fondation, la hauteur est de 39.50 m. La cote de la retenue normale initiale est de 63.50 m. Le barrage a été surélevé en juillet 2003, portant la retenue normale à 67.00 m. augmentant de 7.1 Mm³ supplémentaires la capacité de stockage. Le barrage de Beni-Amrane fait partie de l'aménagement du système Isser - Keddara - Boudouaou - Alger. L'aménagement est destiné à satisfaire les besoins en eau potable non seulement du Grand Alger mais aussi des villes se trouvant dans la zone Est de la Mitidja entre Alger et l'oued Boudouaou, Le but actuel de ce réservoir est le stockage de l'eau pour alimenter le barrage de Keddara.

A l'emplacement du barrage de Beni Amrane, la superficie du bassin est de 3711 km². Après la réalisation du barrage de Koudiat Acerdoune, le bassin versant contrôlé par Beni Amrane ne plus que de 910 km².

Tableau 46: Caractéristiques de la retenue d'eau de Beni Amrane (d'après l'ANBT)

caractéristiques	valeurs
Capacité initiale	16 hm ³
Cote de retenue normale (R.N)	67 m
Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)	76.10 m
Déversoir	10 000 m ³ /s
Vidange de fond	3100 m ³ /s
Date de surélévation	2003
Capacité après levé bathymétrique 2004	11.85 hm ³
Surface à la cote de retenue normale RN	202.50 ha
Capacité de la retenue à PHE	35.17 hm ³
Surface de la retenue à PHE	303.30 ha



Photo 1: Barrage Beni Amrane (A.N.B.T 2004)

7-2-Barrage de Koudiat Acerdoune

Le barrage de Koudiat Acerdoune est un ouvrage hydraulique réalisé en béton compacté au rouleau et mis en eau en 2008. Il se situe dans la wilaya de Bouira sur l'oued Isser Moyen, à 14 km au Sud de la ville de Lakhdaria et à environ 80 km au Sud-Est d'Alger.

De par sa position géographique, dans le cœur du Moyen Isser, cet ouvrage est considéré comme le plus grand barrage du Centre du pays. Il a permis de créer une retenue d'eau d'une superficie de 1800 hectares et d'une capacité de 640 hm³ destinés à l'irrigation du périmètre de la Mitidja-Est et de la plaine du Moyen-Isser (108 millions de m³ par an pour 19 000 Ha) ainsi qu'à l'alimentation en eau potable (AEP) d'une quinzaine d'agglomérations réparties à travers les territoires des wilayas de Bouira, M'sila, Médéa et Tizi Ouzou (70 millions de m³ par an). Il figure parmi les plus importants barrages en BCR, avec une hauteur de 121 m au-dessus des fondations, pour une longueur en crête de 425 m et une largeur à la base de 134 m.



Photo 2: Barrage de Koudiat Acerdoune (A.N.B.T 2014)

Tableau 47: Caractéristiques de la retenue d'eau de Koudiat Acerdoune (d'après l'ANBT)

caractéristiques	valeurs
Capacité initiale	640 hm ³
Cote de retenue normale (R.N)	311 m
Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)	319.64 m
Capacité après levé bathymétrique 2014	618.54 Hm ³
Surface à la cote de retenue normale RN	1754 Ha
Surface de la retenue à PHE	2074 Ha
Capacité de la retenue à PHE	783.91 hm ³
Volume annuel régularisable	178 hm ³
Volume utile	520 hm ³

7-3-Barrage Ladrat

C'est un petit barrage dans le Haut Isser avec une capacité de stockage initiale de 10 hm^3 drainant un bassin versant d'une superficie de 73 Km^2 . Il se situe sur l'oued Ladrat à 20 kilomètres de la ville de Médéa et a été mis en eau en 1990. Cet ouvrage est destiné à l'irrigation avec un apport moyen annuel de l'ordre de 7.8 hm^3 .



Photo 3: Barrage de Ladrat (ANBT. 2004)

Tableau 48: Caractéristiques de la retenue d'eau de Ladrat (d'après l'ANBT)

caractéristiques	valeurs
type	Terre
Capacité initiale	10 hm^3
Cote de retenue normale (R.N)	675,80 m
Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)	679,80 m
Capacité après levé bathymétrique 2004	8.47 Hm^3
Déversoir	seuil libre
Volume annuel régularisable	3 hm^3
Volume utile	7 hm^3

7-4-Barrage de Beni Slimane

Le barrage est situé dans la wilaya de Médéa, à environ 7 km au sud de la ville de Beni Slimane. Il contrôle un bassin versant de 180 km^2 , et a pour objectif de stocker et régulariser les apports de l'oued Mellah dans la wilaya de Médéa. Le barrage forme une retenue d'une capacité de 28 hm^3 , à la côte de retenue normale 715, avec un volume régularisé de $6,7 \text{ hm}^3/\text{an}$. Cet ouvrage est destiné à l'AEP et l'irrigation de la zone à l'aval (2000 Ha).



Photo4: Barrage de Beni Slimane (ANBT, 2018)

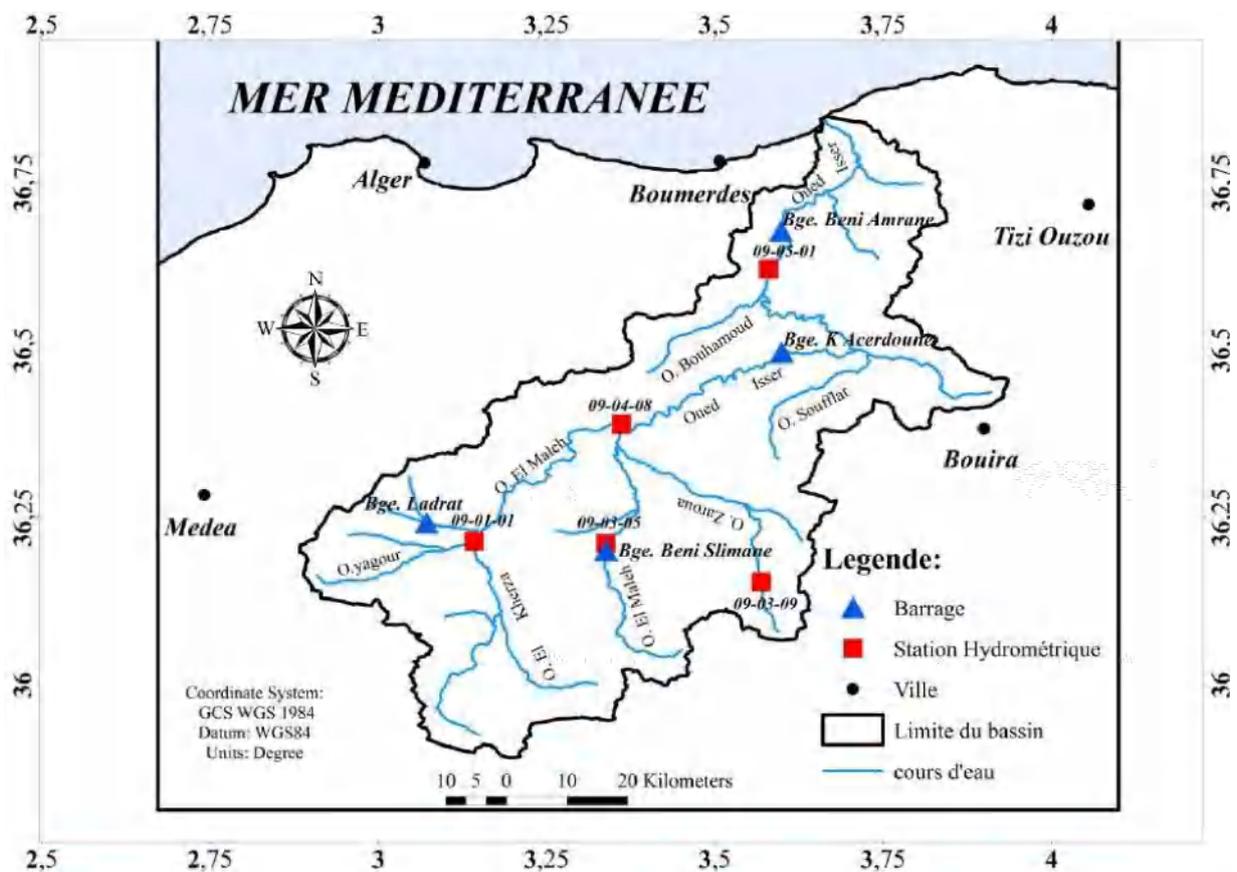


Figure 87: Localisation de barrages dans le bassin de l'oued Isser

Conclusion

Les sous-bassins présentent des caractères différents par la taille, la topographie, la lithologie, l'occupation du sol et le climat. La conjonction de ces différentes caractéristiques génère un régime hydrologique marqué par une période d'abondance de débit en hiver et au printemps et une période de basses eaux en été.

La variabilité spatiale de l'écoulement est mise en évidence et très marquée, où le débit moyen interannuel passe de $0.24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sur le bassin de Zaroua (Isser Supérieur) à $8.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au niveau de Isser Maritime. L'accroissement du débit de l'amont vers l'aval est lié au changement de domaine climatique du semi-aride vers le subhumide, et en second lieu à l'accroissement de la surface drainée.

De plus, la variabilité spatiale se double d'une variabilité temporelle très forte, où pour un même bassin, l'écoulement peut fluctuer de plus de deux ordres de grandeur selon les années, les saisons et les mois. Cette variabilité est très accentuée à l'échelle journalière.

L'évaluation des bilans hydrologiques fait ressortir la faiblesse des coefficients d'écoulement dans le domaine des Haute Plaines notamment au niveau de l'oued Kherza (8.85%) et l'importance de l'évapotranspiration caractérisant ce domaine. Les plus fortes valeurs du coefficient d'écoulement sont calculées pour le bassin de l'oued Isser Maritime (14.44%) et le bassin de l'oued Zaroua à la station de Dechemiya (18.58%).

A l'échelle des crues, les débits maximaux moyens journaliers et maximaux instantanés s'ajustent bien à la loi log-normale. Les sous-bassins sont soumis à des crues torrentielles particulièrement en fin d'été et au début d'automne dûs principalement aux pluies à caractère orageux. Ces épisodes ont des effets importants dans la production des particules et les transports solides en suspension.

Chapitre 7:
Modélisation des transports en MES

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude de la relation débit liquide-concentration, débit liquide-débit solide caractérisant les cinq sous bassins de l'oued Isser. On exploite les données de mesures au pas de temps instantané pour effectuer des régressions à différentes échelles de temps sur des périodes variant d'une station à une autre.

En Algérie, une attention particulière est donnée par plusieurs travaux sur différents bassins versants à la compréhension et la prédiction du transport solide en suspension. Ces travaux sont basés sur l'exploitation des données de mesures issues de stations hydrométriques. La majorité de ces études ont opté pour le modèle de régression en puissance, soit sous la forme : $Q_s = aQ_l^{b+1}$ (Demmak, 1982 ; Touaibia et al, 2001 ; Terfous et al, 2001 ; Achitte et Meddi, 2004 ; Megnounif et Remini, 2008 ; Khanchoul, 2006 ; Bouanani, 2004 ; louamri, 2013), soit sous la forme : $C = aQ_l^b$ (Achitte et Ouillon, 2007 ; Khanchoul et Jansson, 2008 ; Ghenim, 2008).

1-Modélisation à partir de la relation débit-concentration en MES

1-1-Relation débit liquide-concentration en MES aux stations hydrométriques

L'étude est réalisée sur les valeurs instantanées des débits liquides en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ et des concentrations en MES en g.l^{-1} , mesurées au niveau des bassins versants des oueds Isser maritime, Mellah ouest, Isser moyen, Mellah ouest kerza et Zeroua, respectivement aux stations de Lakhdaria, Beni Slimane, La Traille, Mezahime et Dechemiya.

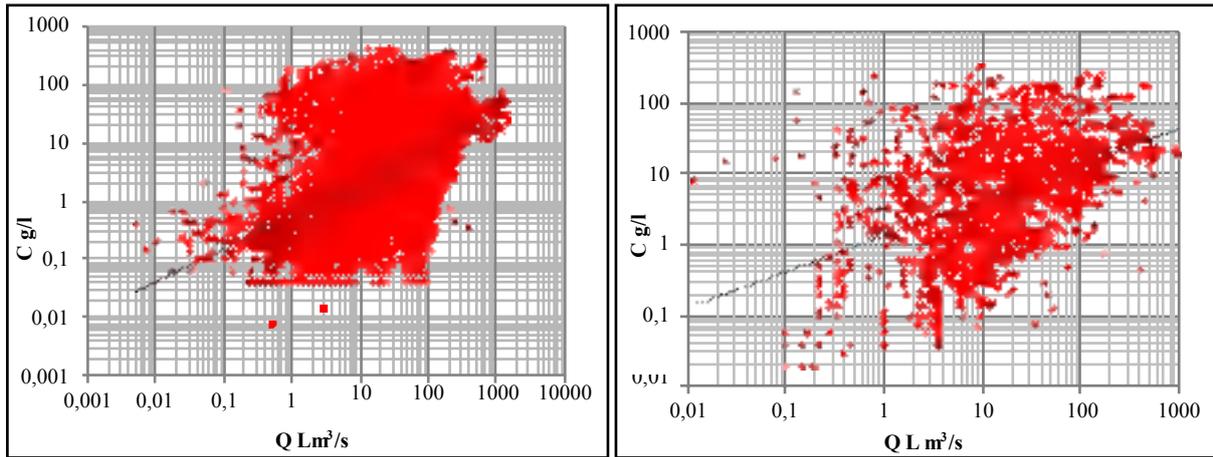
Les courbes des transports sédimentaires varient d'un bassin à l'autre, les coefficients de corrélation varient de 0.37 à la station de Beni Slimane à 0.52 à la station de Dechemiya, ils montrent une corrélation faible entre les concentrations en MES-débit. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 49.

Tableau 49: paramètre du modèle $C = aQL^b$ et coefficient de corrélation

Station	Taille de l'échantillon	Coefficient de corrélation r	Relations obtenues
Lakhdaria	8497	0.41	$C=0.5353QL^{0.5602}$
La Traille	1846	0.44	$C=1.3724 QL^{0.5059}$
Beni Slimane	2351	0.37	$C=4.8887QL^{0.3284}$
Mezahime	969	0.50	$C=7.4008QL^{0.5105}$
Dechemiya	628	0.52	$C=2.9356QL^{0.4233}$

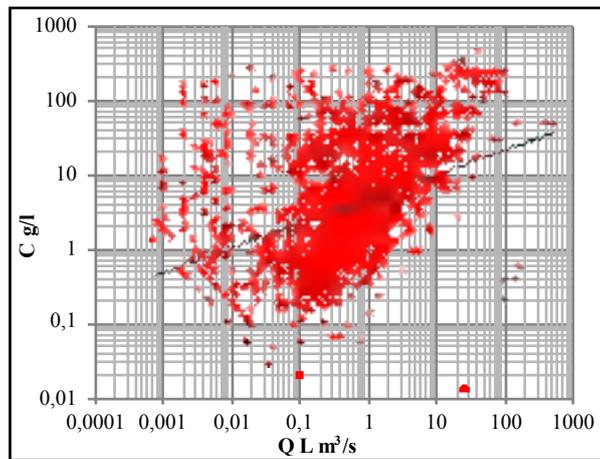
La mise en graphe des données des débits liquides et des concentrations en matières en suspension dans les bassins d'étude, montre une dispersion considérable des points autour de la courbe de transport solide (fig 88). On remarque que les plus faibles débits liquides peuvent véhiculer des concentrations en matières en suspension très élevées.

La grande distribution verticale des points indique que les concentrations en matière en suspension varient dans des gammes jusqu'à quatre ordres de grandeurs pour des débits liquides équivalents. Cette variabilité dans la relation concentration en matières en suspension-débit est principalement attribuée a des variations temporelles dans la disponibilité des matières en suspension dans les bassins versants.

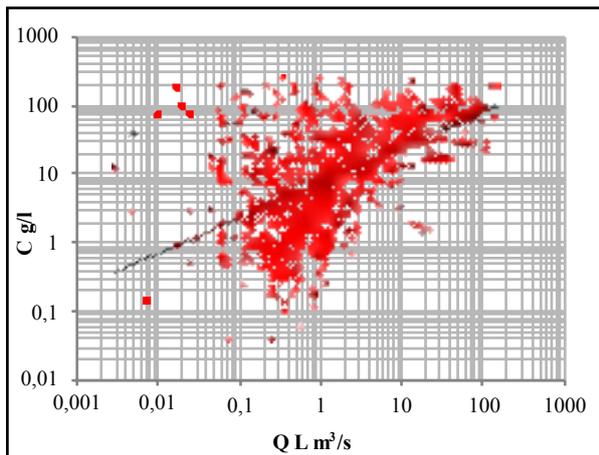


(a)

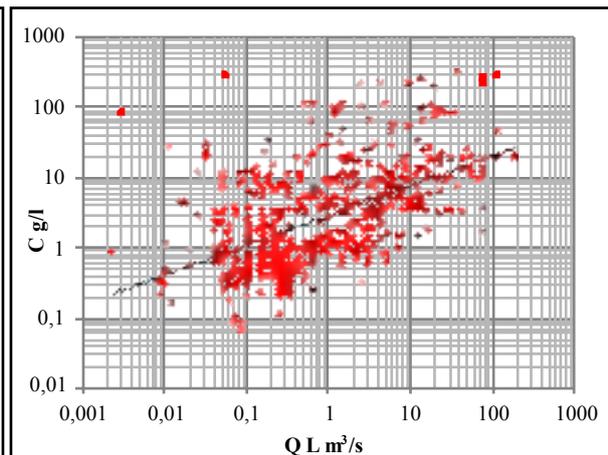
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 88 : relation débit-concentration en MES instantanées aux bassins d'étude : (a) station de Lakhdaria, (b) la traïlle, (c) Beni Slimane, (d) Mzahime et (e) Dechemiya

Les concentrations de matières en suspension dans les cours d'eau s'accroissent avec la disponibilité des sédiments en suspension. Cette dernière est définie comme la quantité de particules mobilisables, qui dépend elle-même du stock de sédiments déposés et du nouvel apport de particules produites par érosion. Les matières en suspension proviennent essentiellement du cours d'eau lui-même, et en second lieu de l'érosion des berges et de l'érosion des sols des versants (Lefrancois, 2006). Le stock de sédiments permet aussi d'expliquer la mauvaise corrélation entre les concentrations en matières en suspension et les débits. En effet, le stock de sédiments déposés est maximal à la fin de l'été en condition de bas débits. Son épuisement se produit en automne quand les débits liquides augmentent, et le stock de sédiment en suspension est faible en hiver.

La dispersion des points des concentrations en MES et des débits liquides s'explique par le fait que les concentrations en matières en suspension sont contrôlées par plusieurs facteurs tels que la lithologie, l'intensité des pluies et l'état du couvert végétal et ne dépend pas directement des débits liquides.

Les données de concentrations en matières en suspension et de débits liquides, ont été subdivisées pour mettre en valeur les deux influences majeures sur la dispersion des points autour des courbes de transports sédimentaires, à savoir les effets saisonniers et les effets des crues par hystérésis (tableau.50).

De la même façon que pour la totalité de données, on trouve à l'échelle saisonnière de mauvaises relations en puissance liant les concentrations en matières en suspension aux débits liquides. Les coefficients de corrélation sont faibles et différents d'une station à une autre et d'une saison à une autre. On remarque que la dispersion des points augmente à l'échelle de la saison de printemps, au niveau des stations de Lakhdaria, La Traille et Beni Slimane et en été pour les stations de Mezahime et Dechemiya.

D'après le tableau 50, les régressions reliant les couples débits-concentration à l'échelle des crues sont également caractérisées par une mauvaise corrélation. On remarque que la dispersion des points autour des courbes de transport solide augmente, et de ce fait, les coefficients de corrélation diminuent pour tous les sous bassins jaugés.

Tableau 50: Valeurs de a et b , et coefficients de corrélation des différentes courbes de transport solide

	Echelle	N	b	a	r
Lakhdaria	automne	2100	0.62	1.47	0.44
	hiver	3284	0.67	0.25	0.53
	printemps	2476	0.65	0.25	0.42
	été	622	1.05	0.15	0.55
	crue	1228	0.28	6.11	0.28
La Traïlle	automne	477	0.71	3.31	0.67
	hiver	663	0.61	0.69	0.60
	printemps	615	0.45	1.01	0.36
	été	114	1.05	0.40	0.44
	crue	568	0.17	7.17	0.14
Beni Slimane	automne	351	0.38	16.45	0.47
	hiver	987	0.51	4.71	0.65
	printemps	903	0.20	3.19	0.24
	été	110	0.37	14.29	0.34
	crue	108	0.37	21.43	0.26
Mezahime	automne	181	0.39	26.15	0.50
	hiver	345	0.62	4.34	0.63
	printemps	389	0.52	5.45	0.54
	été	54	0.28	33.17	0.44
	crue	163	0.38	11.23	0.29
Dechemiya	automne	63	0.25	19.97	0.44
	hiver	303	0.43	2.59	0.58
	printemps	242	0.45	1.87	0.62
	été	20	0.32	12.87	0.44
	crue	96	0.35	3.49	0.40

Lors des crues, pour une valeur de débit donnée, les concentrations en MES peuvent être plus élevées durant la phase de montée de la crue, produisant une hystérésis horaire (Walling et Webb, 1981; Asselman, 1999; Coynel 2005) ou être plus importante durant la décrue pour une hystérésis antihoraire (Coynel 2005).

L'analyse des concentrations en matières en suspension en fonction des débits liquides au niveau de l'oued Isser met en évidence des courbes d'hystérésis, expliquant la dispersion des points pour les débits liquides équivalents (fig 89).

- ❖ La première crue du 18 au 20 janvier 1972 (boucle horaire) montre que pour un débit de $102 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ lors de la montée de crue, la concentration en MES est de $76.4 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Lors de la décrue, pour un débit de $104 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, la concentration en matière en suspension est de $23.3 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$.

- ❖ La deuxième crue du 18 au 22 octobre 1990 (boucle antihoraire) montre que pour un débit de $4.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ lors de la phase de montée de la crue, la concentration des matières en suspension est de $40.6 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Lors de la décrue, pour un débit de $5.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, la concentration en MES est de $147.41 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$.

Cette différence de comportement est à l'origine d'une mauvaise corrélation entre les débits et les concentrations en MES. L'écart entre les concentrations en MES mesurées pour des mêmes valeurs de débits situées soit lors des phases montantes, soit lors des phases descendantes, est grand.

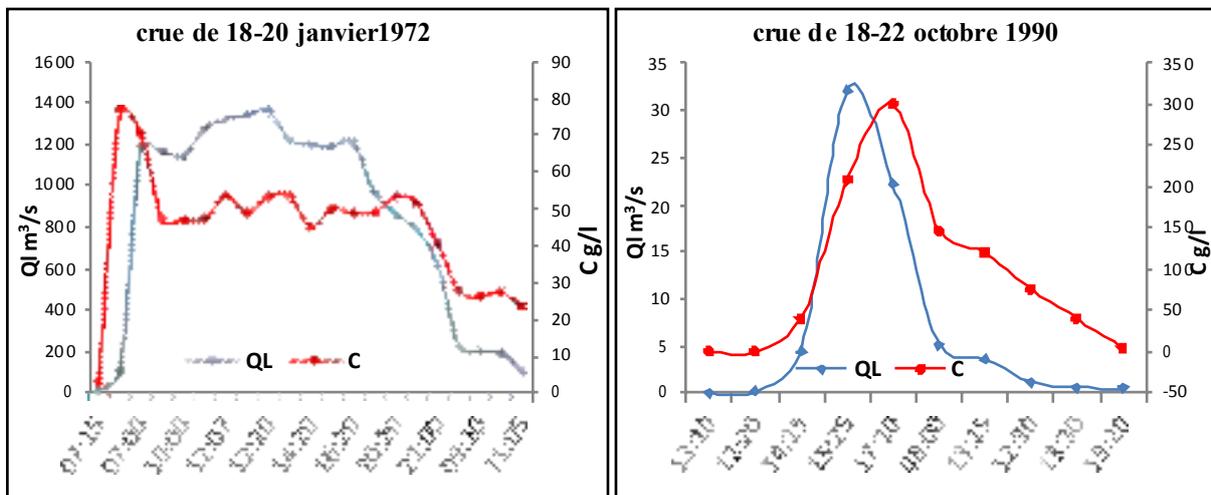


Figure 89: évolution des concentrations en MES avec les débits lors des crues (station de Lakhdaria)

Nous consacrons le chapitre neuf à l'analyse de l'effet d'hystérésis de manière détaillée.

Par comparaison avec d'autres études, l'établissement de la relation $C = aQ^b$ a aussi donné de faibles valeurs du coefficient de corrélation r . Selon Asselman (2000), au niveau de 5 stations de mesure le long de la rivière du Rhin en Allemagne, la valeur de r varie de 0.4 à 0.66 pour la totalité des données. Pour les différents regroupements établis à l'échelle saisonnière, la meilleure valeur de r est de 0.7 correspondant à la saison d'hiver. Syvitski (2000) a effectué une étude sur 2 rivières Saskatchewan et Colorado, et a trouvé un coefficient de corrélation de 0.90 pour la première et 0.20 pour la seconde. Au niveau du bassin versant d'oued Abd cette valeur est de 0.66 pour la totalité des données (Achite et Ouillon, 2007).

2- Relation débit liquide-débit solide aux stations hydrométriques

2-1-Relation débit liquide-débit solide à l'échelle de la totalité des données

L'étude est réalisée sur les valeurs instantanées des débits liquides en $m^3.s^{-1}$ et des débits solides en $kg.s^{-1}$, l'ensemble des données représente un total de mesures pour le bassin de l'oued Isser maritime de 8497, l'oued Isser moyen de 1846, Mellah ouest (2351), Mellah ouest kerza (969) et Zeroua (628). La représentation graphique du modèle puissance $Q_s = aQ_l^b$ à l'échelle annuelle est illustre dans la figure 90.

Les courbes de transport solide en suspension dans les bassins d'études montrent qu'il existe une relation puissance forte entre les débits liquides et les débits solides en suspension. Le nuage de points est plus large pour les faibles débits et il est plus resserré pour les valeurs de débits fortes. Ces dernières ne véhiculent pas des concentrations en matière en suspension élevées, mais elles engendrent des flux de sédiments en suspension très importants.

Les coefficients de corrélation r sont significatifs pour l'ensemble des bassins versants étudiés. Ils varient entre 0.78 à la station de Lakhdaria et 0.90 à la station de Dechemiya. Les valeurs des paramètres a et b des courbes de transport solide varient d'un bassin à l'autre. Pour le paramètre a (ordonnée à l'origine), il varie de 0.53 à la station de Lakhdaria et 7.40 à la station de Mezahime. L'exposant b est compris entre 1.32 à la station Beni Slimane et 1.56 à la station de Lakhdaria. Ces valeurs sont proches des valeurs trouvées dans d'autres bassins versants algériens. Le tableau 51 résume les résultats trouvés.

Tableau 51: paramètres du modèle $Q_s = aQ_l^b$ et coefficient de corrélation

Station	Taille de l'échantillon	Coefficient de corrélation r	Relations obtenues
Lakhdaria	8497	0.78	$Q_s=0.5353Q_l^{1.5602}$
La Traille	1846	0.83	$Q_s=1.3724 Q_l^{1.5059}$
Beni Slimane	2351	0.86	$Q_s =4.8887Q_l^{1.3284}$
Mezahime	969	0.87	$Q_s =7.4008Q_l^{1.5105}$
Dechemiya	628	0.90	$Q_s =2.9356Q_l^{1.4233}$

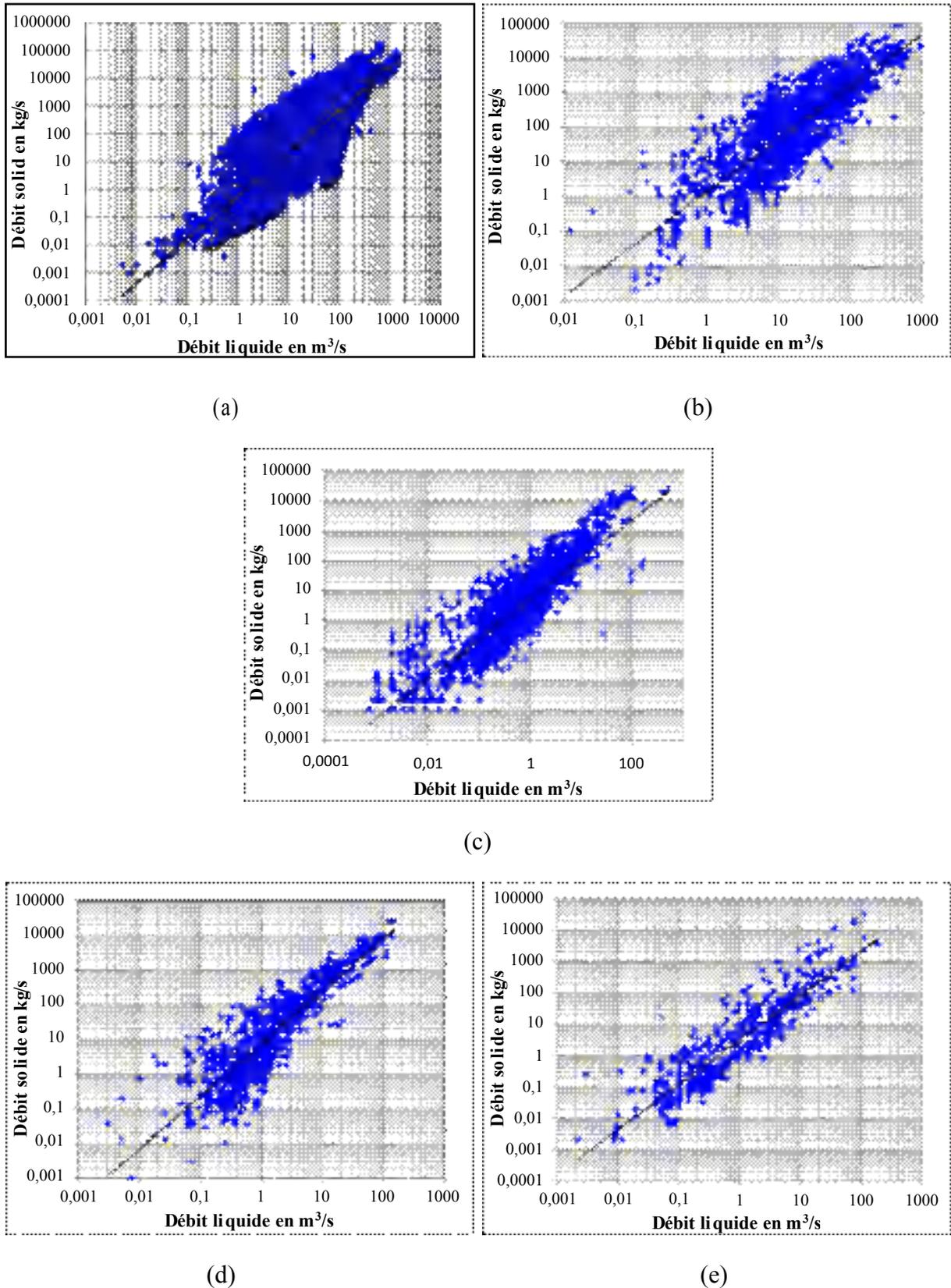


Figure 90: relations débit liquide-débit solide instantanés pour les bassins d'étude :
 (a) station de Lakhdaria, (b) la traïlle, (c) Beni Slimane, (d) Mzahime et (e) Dechemiya

2-2-Relation débit liquide-débit solide à l'échelle saisonnière

A la suite des travaux de nombreux auteurs (Demmak, 1982 ; Sogreah, 1983), nous avons regroupé à l'échelle saisonnière les valeurs instantanées des débits liquides et des débits solides en matière en suspension, et analysé les courbes de transport solide. Le tableau 52 résume les résultats trouvés.

Tableau 52: Paramètres des modèles $Q_s = aQL^b$ saisonniers obtenus pour les bassins étudiés

	Saison	N	b	a	r
Lakhdaria	Automne	2100	1.62	1.47	0.79
	Hiver	3284	1.67	0.25	0.84
	Printemps	2476	1.65	0.25	0.76
	Été	622	2.05	0.15	0.80
Beni Slimane	Automne	351	1.38	16.45	0.88
	Hiver	987	1.51	4.71	0.92
	Printemps	903	1.20	3.19	0.83
	Été	110	1.37	14.29	0.80
La Traille	Automne	477	1.71	3.31	0.90
	Hiver	663	1.61	0.69	0.88
	Printemps	615	1.45	1.01	0.78
	Été	114	2.05	0.40	0.70
Mzahime	Automne	181	1.39	26.15	0.90
	Hiver	345	1.62	4.34	0.90
	Printemps	389	1.52	5.45	0.88
	Été	54	1.28	33.17	0.91
Dechemiya	Automne	63	1.25	19.97	0.92
	Hiver	303	1.43	2.59	0.92
	Printemps	242	1.45	1.87	0.93
	Été	20	1.32	12.87	0.90

Les courbes sédimentaires à l'échelle saisonnière montrent de bonnes corrélations entre les débits liquides et débits solides en suspension. On remarque que les points de couples QL-Qs autour des courbes de régressions sont un peu plus dispersés pour la saison d'été par rapport aux autres saisons (fig 91 à 95). Les coefficients de corrélation sont significatifs, ils varient de 0.70 en saison d'été à la station de La Traille à 0.93 en saison de printemps à la station de Dechemiya.

Les valeurs des paramètres a et b du modèle $Q_s = aQL^b$ varient d'une station à l'autre entre les bassins et même d'une saison à l'autre pour une même station. Il faut signaler que la valeur du paramètre a de la régression varie dans un intervalle large, elle varie de 0.15 en saison d'été à la station de Lakhdaria à 33 en saison d'été à la station de Mzahime. On remarque que la valeur du paramètre a en saison d'automne est la plus élevée par rapport à d'autres saisons, sauf à la station de Mzahime mais elle reste toujours élevée (26.15 pour Mzahime). Ceci peut s'expliquer par l'importance de la dynamique érosive en cette saison. Les sédiments issus de l'érosion sont disponibles en quantité en automne. L'exposant b varie dans un intervalle étroit, il est compris entre 1.20 en saison de printemps à la station de Beni Slimane et 2.05 en été à la station de Lakhdaria.

D'après les résultats, on peut dire que l'irrégularité du climat dû à la composante saisonnière est un facteur ayant un effet non négligeable sur le transport solide en suspension. Ceci est mis en évidence à partir des variations des valeurs du facteur a.

L'exposant b varie beaucoup plus en fonction des caractéristiques physiques et hydrologiques des bassins versants.

Globalement le facteur a et l'exposant b sont liés à plusieurs facteurs relatifs des bassins versants tels que : la lithologie, la surface, l'état du couvert végétal et le climat (intensité des pluies, composante saisonnière des pluies et des débits). Toutes ces conditions sont donc la cause de la distinction entre les valeurs des paramètres a et b des modèles en puissance d'un bassin à un autre.

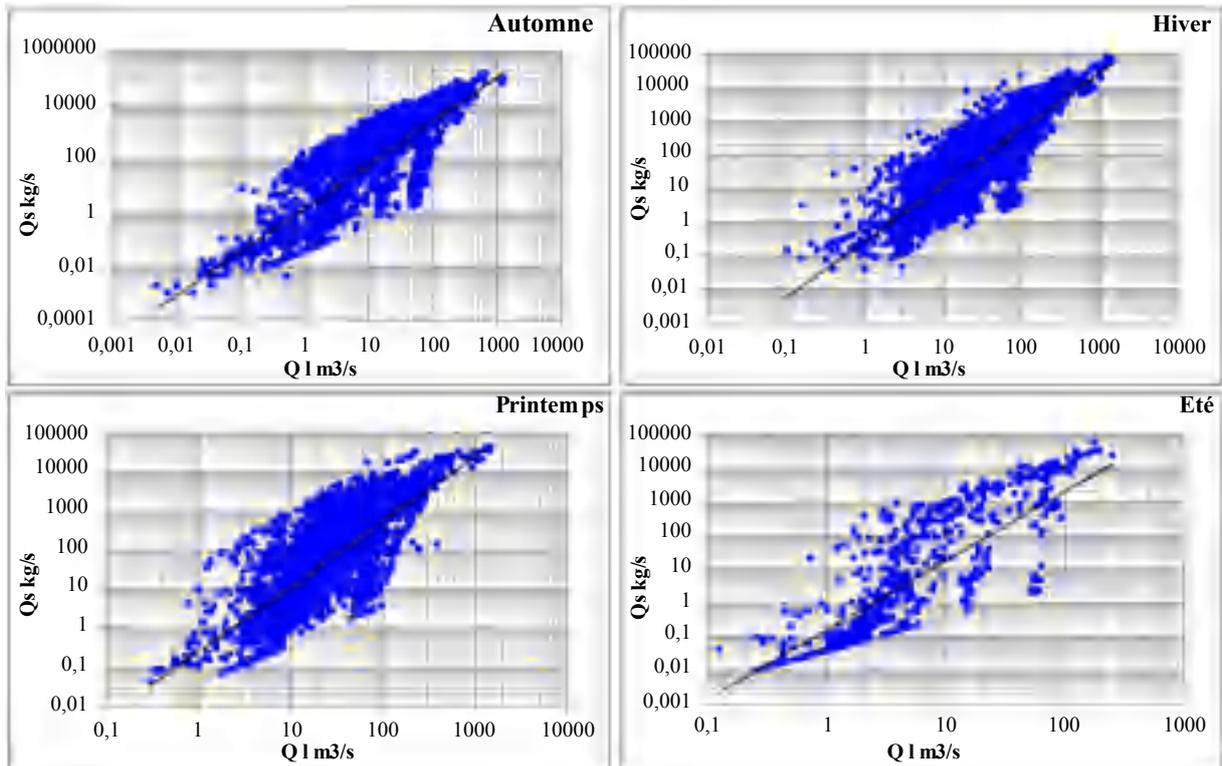


Figure 91: relations saisonnières entre les débits liquides-débits solides instantanés à la station de Lakhdaria

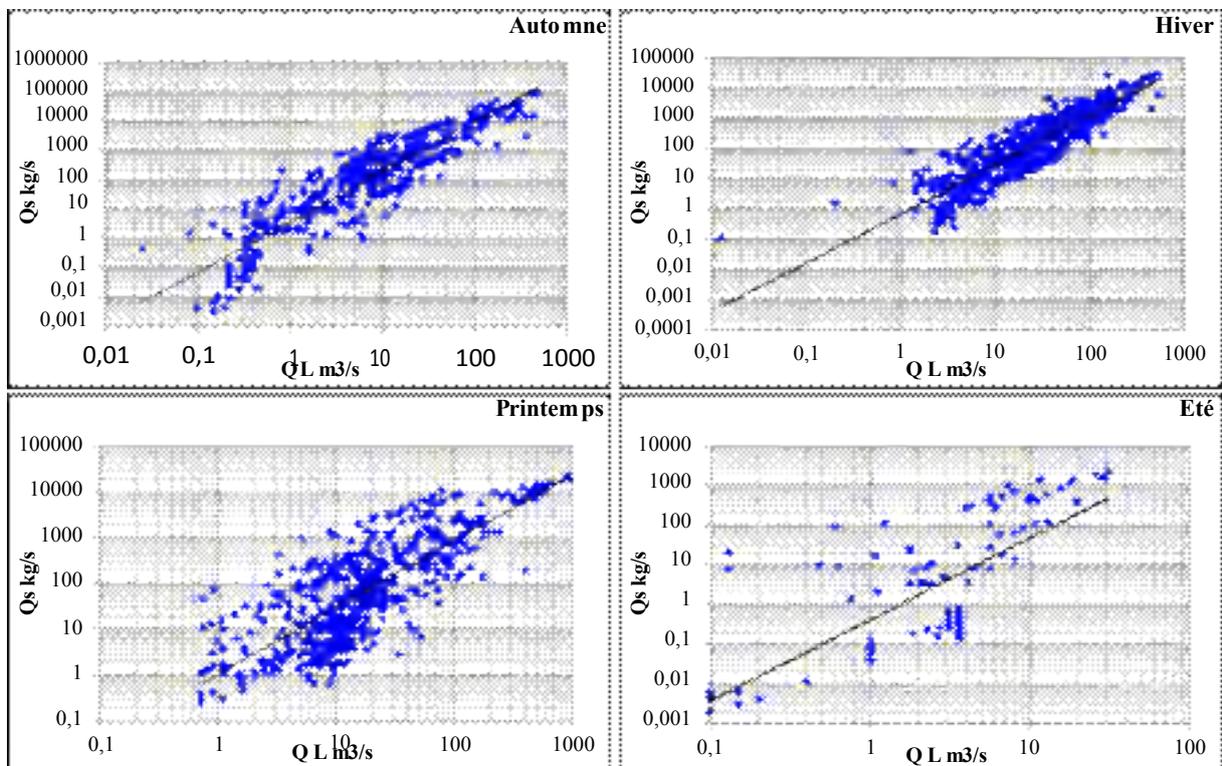


Figure 92: relations saisonnières entre les débits liquides-débits solides instantanés à la station de La Traille

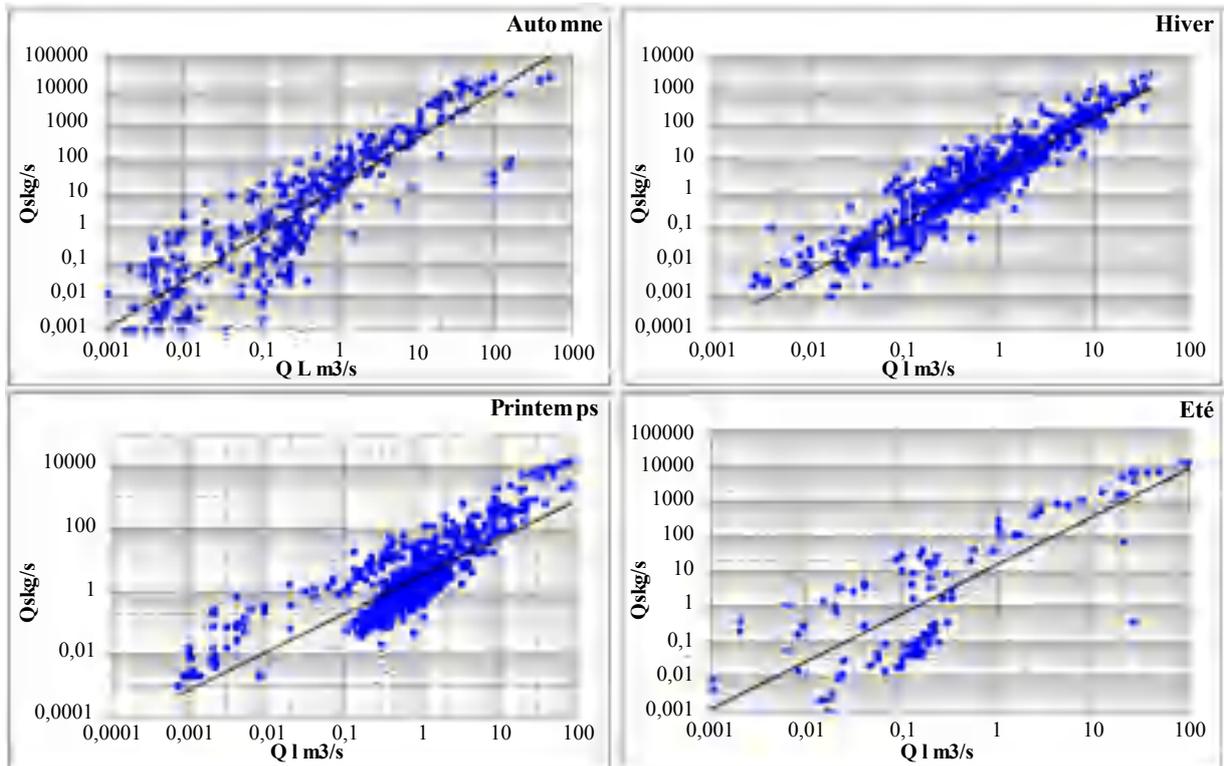


Figure 93: relations saisonnières entre les débits liquides-débits solides instantanés à la station de Beni Slimane

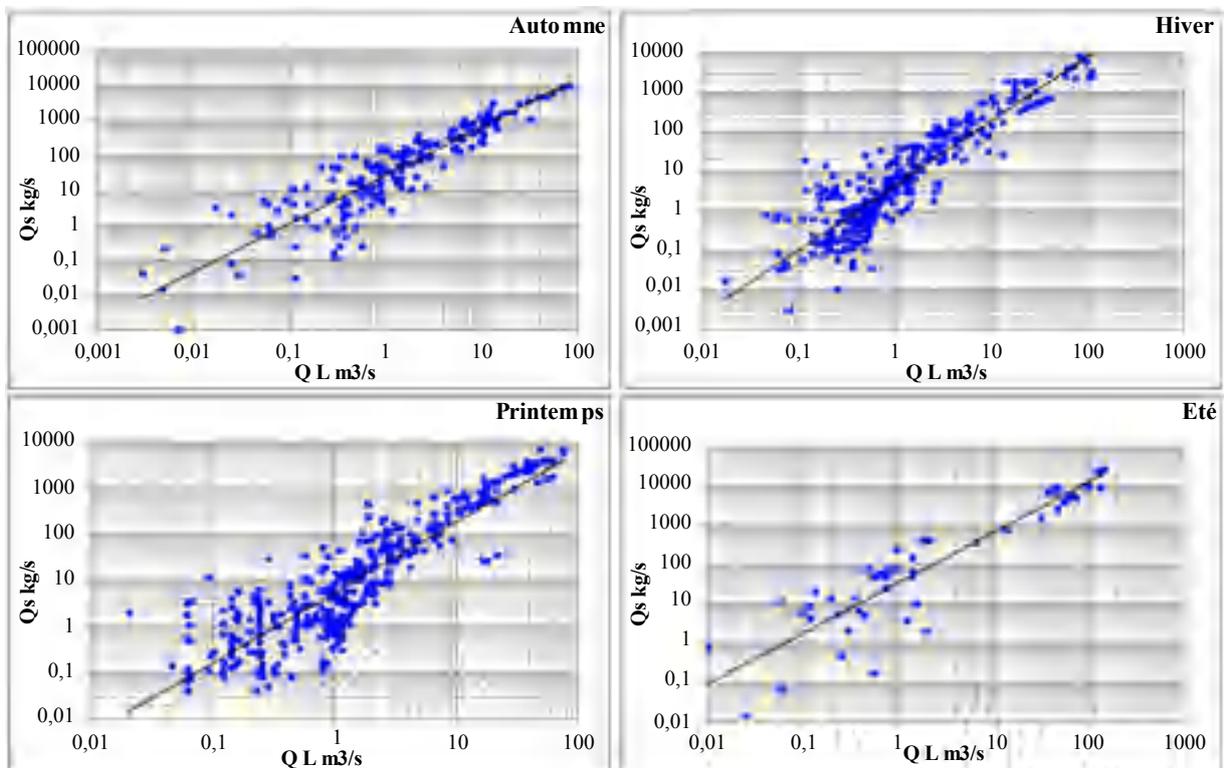


Figure 94: relations saisonnières entre les débits liquides-débits solides instantanés à la station de Mezahime

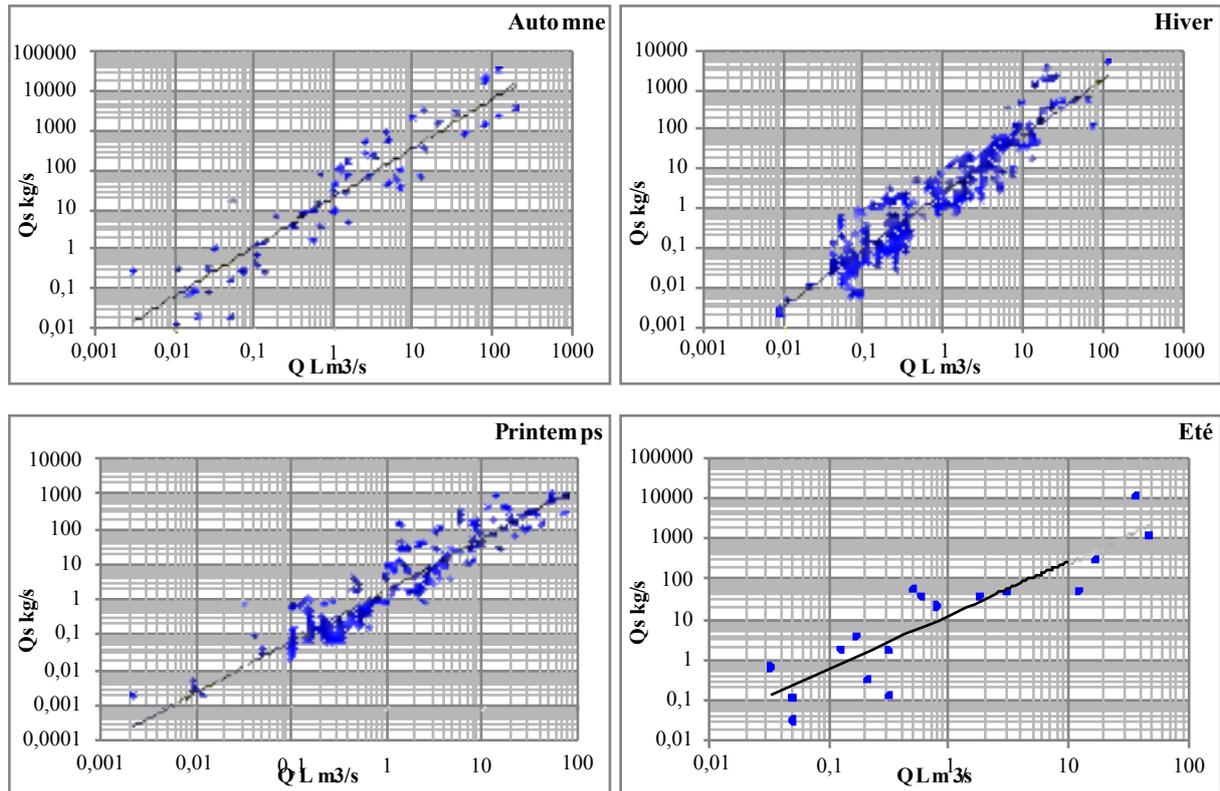


Figure 95: relations saisonnières entre les débits liquides-débits solides instantanés de la station de Dechemiya

2-3-Relation débit liquide-débit solide à l'échelle mensuelle

Pour l'ensemble des bassins étudiés, les regroupements mensuels des données font ressortir les mêmes conclusions qu'à l'échelle saisonnière, c'est-à-dire de bonnes relations liant les débits solides en matière en suspension aux débits liquides. La représentation graphique du modèle $Q_s = aQ_L^b$ à l'échelle mensuelle est illustrée dans la figure 96.

Les coefficients de corrélations sont significatifs pour tous les mois, sauf pour le mois d'août à la station de Mzahime soit 0.03 (n=5 couples). Cette faible valeur de r peut être expliquée par la taille de l'échantillon, cinq valeurs des couples de débit liquide et débit solide.

Tableau 53: Paramètres des modèles $Q_s = aQL^b$ mensuels obtenus pour les bassins étudiés

	Lakhdaria			la traïlle			Beni Slimane			Mzahime			Dechemiya		
	a	b	r	a	b	r	a	b	r	a	b	r	a	b	r
Sep	2.63	1.61	0.76	5.31	1.79	0.92	38.9	1.32	0.91	23.4	1.37	0.92	39.3	1.06	0.92
Oct	1.69	1.67	0.82	2.30	1.81	0.90	29.49	1.44	0.92	29.3	1.27	0.84	27.5	1.47	0.95
Nev	0.68	1.65	0.83	2.95	1.52	0.91	6.64	1.32	0.87	24.6	1.50	0.91	9.41	1.15	0.90
déc	0.43	1.64	0.83	1.57	1.54	0.90	5.75	1.64	0.92	6.94	1.67	0.92	2.67	1.20	0.92
Jan	0.24	1.63	0.83	0.17	1.91	0.95	5.78	1.51	0.94	3.9	1.54	0.91	3.87	1.47	0.91
Fév	0.13	1.82	0.90	0.48	1.64	0.86	3.52	1.49	0.90	3.31	1.89	0.89	1.89	1.48	0.93
Mar	0.17	1.65	0.78	0.84	1.47	0.84	2.70	1.40	0.84	4.07	1.67	0.93	1.64	1.48	0.95
Avr	0.15	1.77	0.76	0.46	1.66	0.75	3.60	1.16	0.86	3.06	1.21	0.67	1.59	1.38	0.83
Mai	0.24	1.89	0.76	1.36	1.45	0.67	3.35	1.24	0.77	9.89	1.41	0.90	4.02	1.08	0.83
Jui	0.36	1.67	0.61	1.04	2.14	0.76	2.86	1.14	0.70	39.7	1.18	0.70	7.72	1.63	0.91
Juil	0.10	2.36	0.91	0.06	1.31	0.87	105.6	1.29	0.96	13.5	1.52	0.97	3.02	1.86	0.96
Aout	0.14	2.01	0.82	0.18	0.92	0.45	38.74	1.59	0.88	16.1	0.12	0.03	41.7	-1.2	0.97

Les valeurs de paramètres a et b varient d'un mois à un autre, le tableau 53 résume les résultats trouvés. La valeur du paramètre a varie dans un intervalle étroit pour les stations de Lakhdaria et La Traïlle entre 0.10 au mois de juillet à la station de Lakhdaria et 5.31 au mois de septembre à la station de La Traïlle. Elle varie dans une large gamme pour les autres stations hydrométriques entre 1.59 au mois d'avril à la station de Dechemiya et 105.6 au mois de juillet à la station de Beni Slimane. On remarque que les fortes valeurs de a sont calculées pour les mois de septembre, octobre, novembre, juin, juillet et aout et sont conformes à la période sèche alors que les faibles valeurs sont calculées aux mois de décembre, janvier, février, mars, avril et mai, qui correspondent à la période humide.

La valeur de l'exposant b varie dans un intervalle étroit pour tous les bassins de l'oued Isser. Elle varie de 1.06 au mois de septembre à la station de Dechemiya à 2.36 au mois de juillet à la station de Lakhdaria.

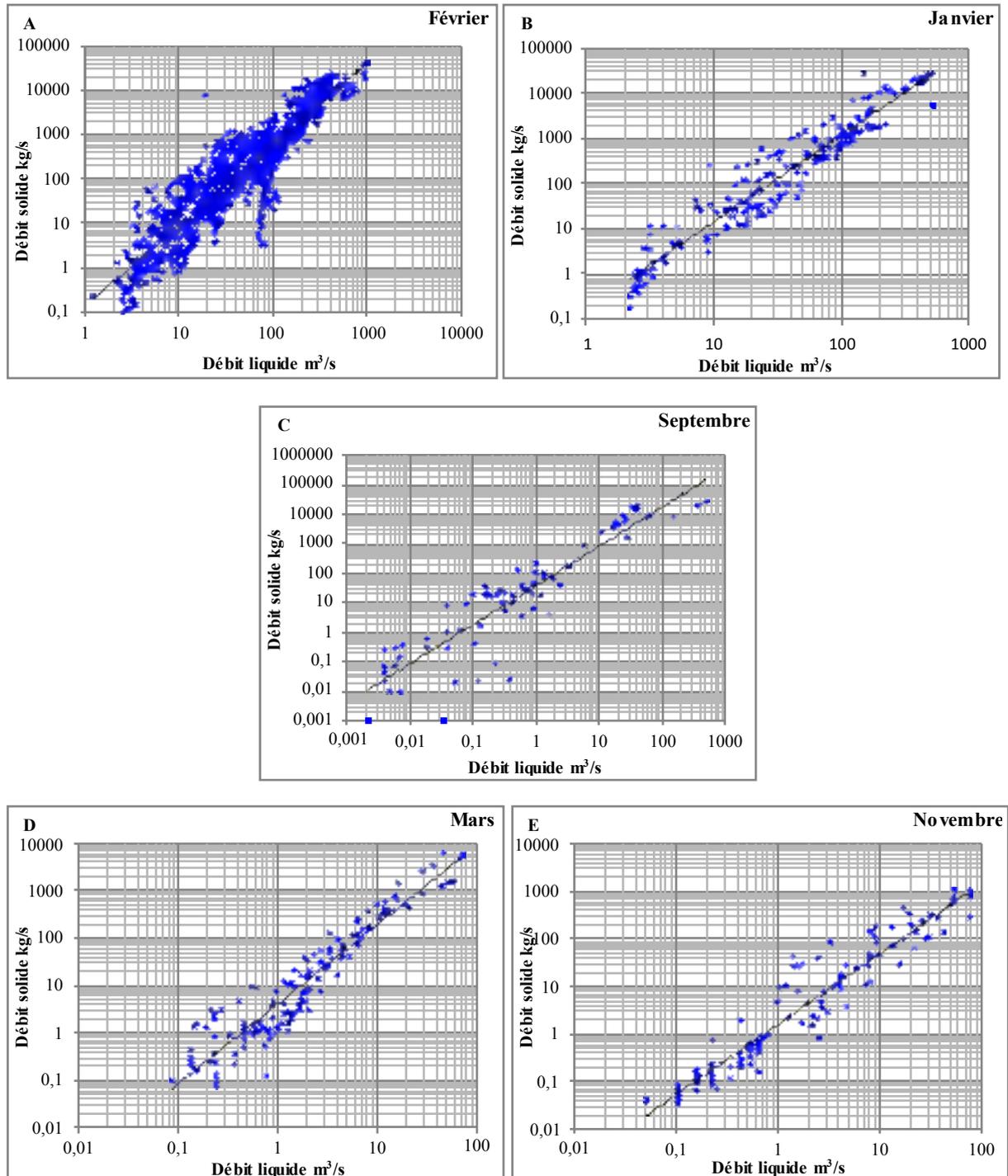


Figure 96: Quelques relations mensuelles entre les débits liquides-débits solides instantanés aux bassins d'étude : A : station de Lakhdaria, B : la trailla, C : Beni Slimane, D : Mzahime et E : Dechemiya

2-4-Relation débit liquide-débit solide à l'échelle annuelle

L'analyse de données des débits liquides et des débits solides en matières en suspension à l'échelle annuelle a révélé les résultats qui apparaissent au tableau 54.

La mise en graphe des données des débits liquides et des débits solides en suspension instantanés à l'échelle annuelle est bien illustrée dans la figure 97.

Les courbes de transport sédimentaire peuvent varier significativement d'une année à l'autre pour chaque station. La dispersion des points autour de la courbe de transport solide est moins bonne à l'échelle annuelle qu'à l'échelle mensuelle et saisonnière, puisque la variation annuelle des matières en suspension est beaucoup plus importante qu'au cours d'un mois ou d'une saison

Les valeurs des paramètres a et b du modèle puissance à l'échelle annuelle varient d'une station à l'autre et d'une année à l'autre dans le bassin versant de l'oued Isser. La variation du facteur a est très irrégulière, elle varie entre 0.01 pour l'année 1985/1986 à la station de Lakhdaria et 63.7 pour l'année 1976/1977 à la station de La Traille. Ceci dénote la complexité des mécanismes qui contrôlent le phénomène de l'érosion et du transport solide.

Pour cette échelle, l'exposant b varie dans une gamme étroite, il atteint 3.24 pour l'année 1983/1984 pour la station de Lakhdaria. Pour cette station, et pour la période 1981/1982 - 1988/1989, les valeurs de la pente b sont supérieures à 2. Ceci s'explique par la forte dynamique des matières en suspension durant ces années.

Tableau 54: Paramètres des modèles $Q_s = aQL^b$ annuels obtenus pour les bassins étudiés

	Lakhdaria			la traïlle			Beni Slimane			Mzahime			Dechemiya		
	a	b	r	a	b	r	a	b	r	a	b	r	a	b	r
71-72	0.26	1.81	0.90	0.43	1.74	0.88	**	**	**	**	**	**	**	**	**
72-73	0.15	1.87	0.90	1.62	1.33	0.80	**	**	**	**	**	**	3.78	1.23	0.71
73-74	0.07	1.99	0.93	3.03	1.33	0.87	2.02	1.44	0.81	**	**	**	7.38	1.05	0.90
74-75	0.05	2.06	0.91	8.86	1.01	0.88	3.96	1.80	0.89	**	**	**	14.5	1.47	0.92
75-76	0.13	1.94	0.88	27.7	1.12	0.81	3	1.25	0.86	**	**	**	14.1	0.65	0.93
76-77	0.26	1.85	0.81	63.7	0.60	0.50	7.01	1.89	0.87	**	**	**	**	**	**
77-78	0.17	1.98	0.90	6.35	1.06	0.71	5.55	1.46	0.83	**	**	**	32.6	2.34	0.59
78-79	0.35	1.72	0.87	0.36	1.48	0.86	5.61	1.63	0.95	**	**	**	2.88	1.52	0.94
79-80	0.08	2.03	0.84	0.30	1.84	0.84	3.25	1.69	0.89	**	**	**	2.13	1.50	0.91
80-81	0.12	1.76	0.80	10	1.20	0.92	2.50	1.83	0.90	**	**	**	2.66	1.29	0.86
81-82	0.01	3.24	0.88	3.67	1.44	0.70	5.37	1.79	0.90	**	**	**	3.22	1.38	0.90
82-83	0.01	2.19	0.47	4.95	1.15	0.71	**	**	**	**	**	**	2.83	1.52	0.87
83-84				3.09	1.25	0.64	**	**	**	**	**	**	2.14	1.25	0.67
84-85	0.01	2.29	0.54	7.37	1.26	0.90	5.48	1.30	0.83	5.57	2.04	0.77	3.99	0.76	0.76
85-86	0.01	2.80	0.74	**	**	**	28.4	1.59	0.94	4.60	1.62	0.85	**	**	**
86-87	0.56	1.52	0.57	**	**	**	5.25	1.29	0.83	3.81	2.20	0.84	**	**	**
87-88	0.09	2.01	0.72	**	**	**	**	**	**	13.4	1.52	0.78	**	**	**
88-89	0.12	2.03	0.68	**	**	**	18.1	1.15	0.92	22.2	1.31	0.87	**	**	**
89-90	4.15	1.85	0.91	**	**	**	**	**	**	8.04	1.63	0.94	**	**	**
90-91	1.61	1.55	0.84	**	**	**	**	**	**	11.1	1.28	0.82	**	**	**
91-92	1.02	1.64	0.86	**	**	**	**	**	**	7.63	1.29	0.88	**	**	**
92-93	0.62	1.73	0.84	**	**	**	**	**	**	12.3	1.87	0.91	**	**	**
93-94	1.92	1.56	0.83	**	**	**	**	**	**	11.9	1.44	0.91	**	**	**
94-95	1.50	1.55	0.77	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
95-96	1.27	1.63	0.81	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
96-97	0.54	2.26	0.92	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
97-98	1.61	1.71	0.91	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
98-99	0.78	1.76	0.80	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
99-00	5.53	1.43	0.89	**	**	**	15.2	1.61	1.91	2.99	1.83	0.96	**	**	**
00-01	2.65	1.62	0.88	**	**	**	3.35	1.16	0.87	**	**	**	**	**	**
01-02	2.88	1.56	0.94	**	**	**	46.9	2.86	0.79	**	**	**	**	**	**
02-03	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
03-04	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
04-05	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
05-06	**	**	**	**	**	**	**	**	**	7.46	1.43	0.89	**	**	**
06-07	**	**	**	**	**	**	**	**	**	9.47	1.31	0.91	**	**	**
07-08	**	**	**	**	**	**	12.6	0.93	0.70	**	**	**	**	**	**
08-09	0.55	1.54	0.78	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
09-10	2.57	1.35	0.83	**	**	**	13.7	1.56	0.76	**	**	**	**	**	**

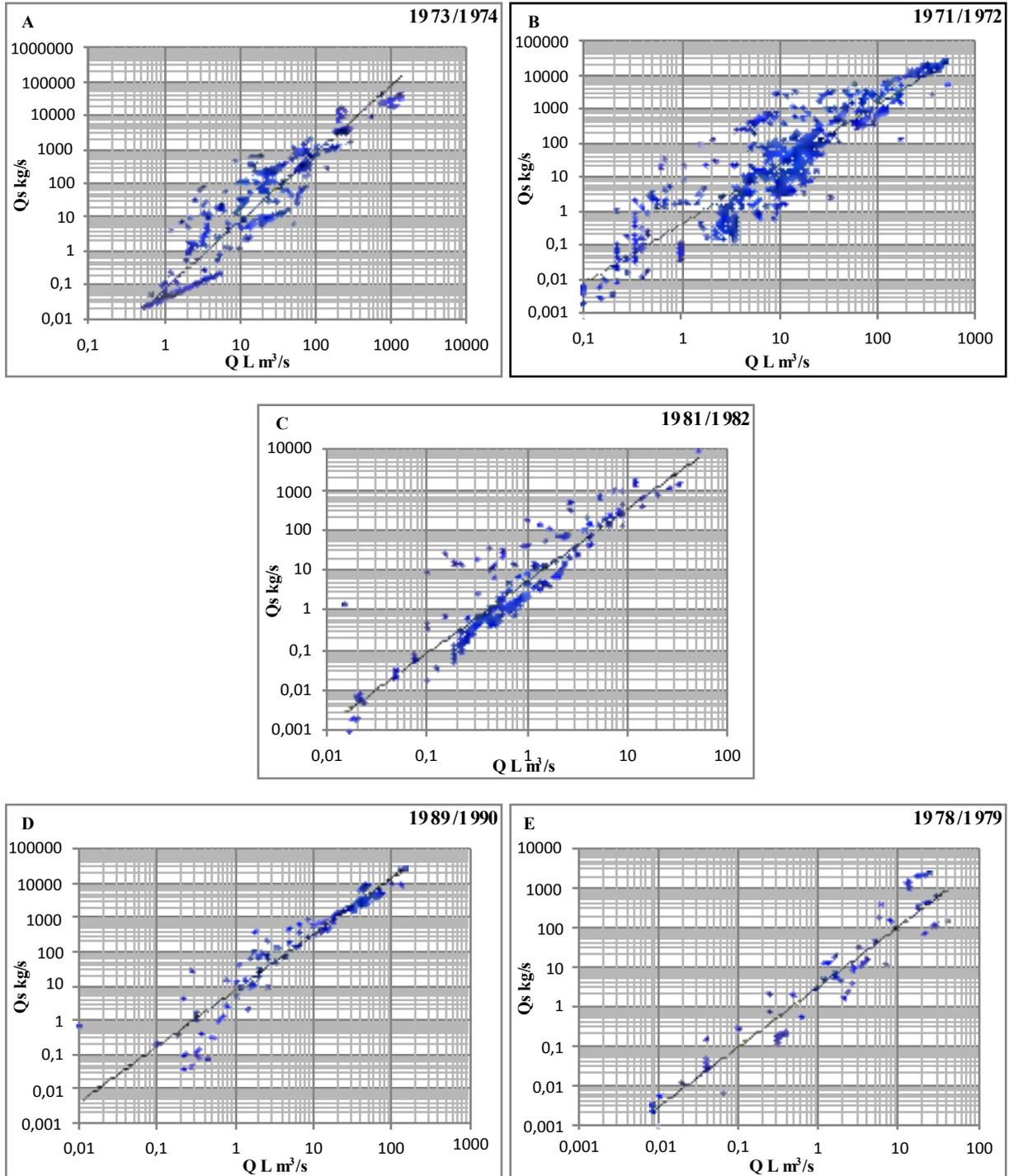


Figure 97: Quelques relations annuelles entre les débits liquides-débits solides instantanés pour les bassins d'étude : A : station de Lakhdaria, B : la traille, C : Beni Slimane, D : Mzahime et E : Dechemiya

3- Erreur en pourcentage (E%)

L'utilisation du modèle $Q_S = a * Q_L^b$ a fait l'objet d'un certain nombre de critiques. En effet, la courbe d'estimation peut significativement sur-estimer ou sous-estimer le flux de la charge solide en suspension (Horowitz, 2003). Ce modèle engendre une sous-estimation des flux en suspension (Cohn et al, 1989). Cette sous-estimation peut dépasser 50% (Jansson, 1985 ; Thomas, 1985 ; Ferguson, 1986 ; Cohn et al, 1989). L'erreur en pourcentage est donnée par l'équation suivante :

$$Er (\%) = \left(\frac{\text{flux solide estimé par le modèle}}{\text{flux solide observé}} - 1 \right) * 100$$

Ce pourcentage est considéré comme un indice reflétant l'exactitude de l'estimation. Le signe (-) indique une sous-estimation par rapport à l'apport solide mesuré. Le signe (+) indique une surestimation.

La variation des valeurs des erreurs partielles engendrées par l'application du modèle en puissance pour chaque regroupement au niveau de chaque station est illustrée dans les figures 98 à 102.

Tableau 55: Flux mesurés et estimés en $kg.s^{-1}$ et erreurs globales engendrées par l'application du modèle $Q_S = a * Q_L^b$ pour les bassins d'étude

station	Lakhdaria		la traïlle		Beni Slimane		Mzahime		Dechemiya	
	F mes	F est	F mes	F est	F mes	F est	F mes	F est	F mes	F est
Série complète	1643	593	1497	850	253	54	441	307	229	74
Erreur%	-63.88		-43.20		-78.54		-30.22		-67.53	
saisonnaire	1643	781	1497	1515	253	184	441	334	229	141
Erreur%	-52.44		+1.14		-27.30		-24.12		-38.37	
mensuelle	1643	838	1497	2111	253	345	441	408	229	128
Erreur%	-48.98		+40.98		+36.41		-7.44		-44.28	
annuelle	1643	1480	1497	859	253	225	441	401	229	360
Erreur%	-9.94		-42.65		-11.05		-8.98		+56.62	

Le tableau 55 montre que l'application du modèle en puissance $Q_s = a * Q^b$ pour différents regroupements de données ne donne pas les mêmes résultats par rapport à la qualité d'estimation des flux solide en suspension. Chaque sous bassin réagit différemment du fait que la meilleure d'estimation du flux solide en suspension. La meilleure estimation au niveau de la station de La Traille et Dechemiya est réalisée par l'application du modèle en puissance à l'échelle saisonnière, alors que la meilleure estimation au niveau de la station de Lakhdaria et Beni Slimane est réalisée par l'application du modèle en puissance à l'échelle annuelle. La meilleure estimation au niveau de la station Mzahime est réalisée par l'application du modèle en puissance à l'échelle mensuelle. Il n'y a pas un regroupement systématiquement plus performant qu'un autre.

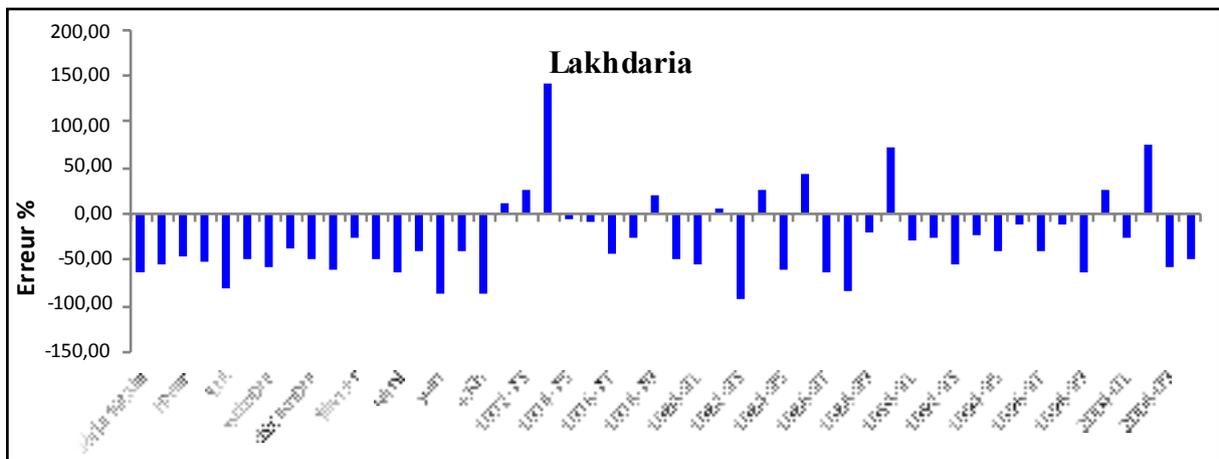


Figure 98: Variation des erreurs en pourcentage au niveau de la station de Lakhdaria

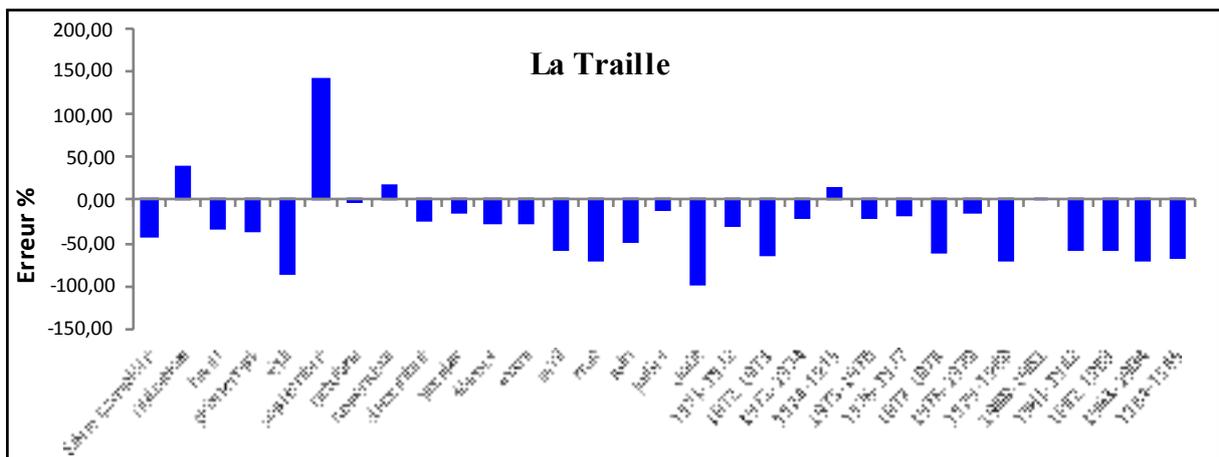


Figure 99: Variation des erreurs en pourcentage au niveau de la station de La Traille

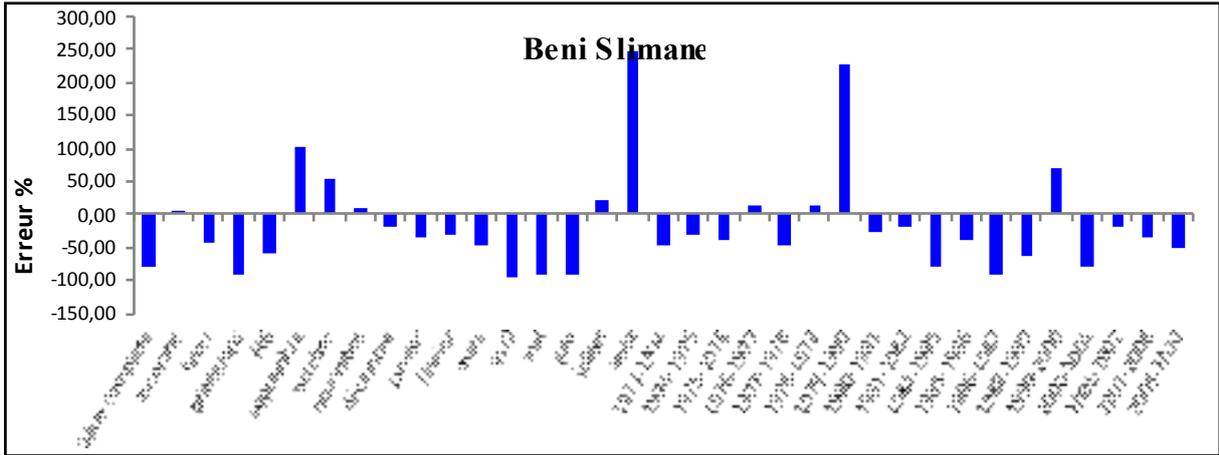


Figure 100: Variation des erreurs en pourcentage au niveau de la station de Beni Slimane

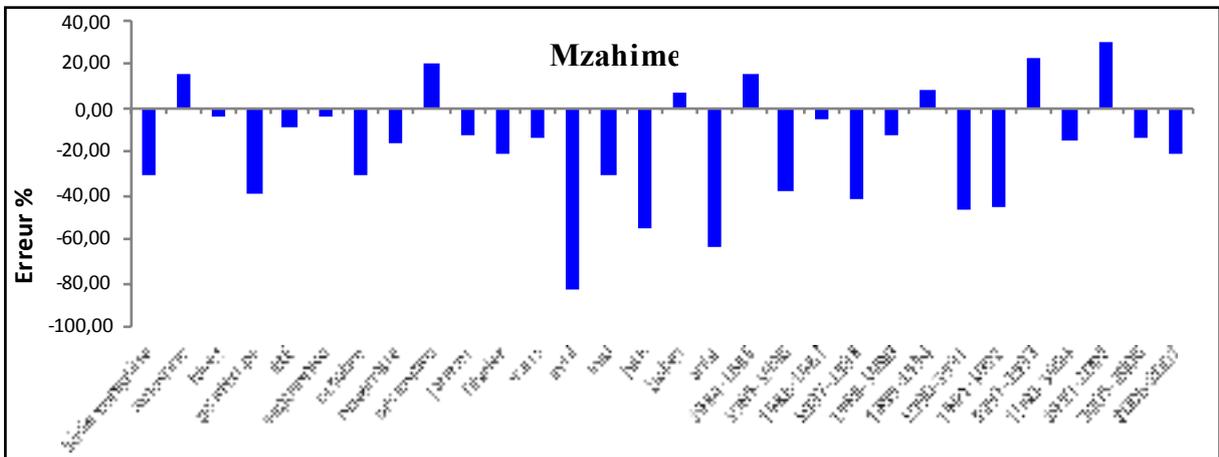


Figure 101: Variation des erreurs en pourcentage au niveau de la station de Mezahime

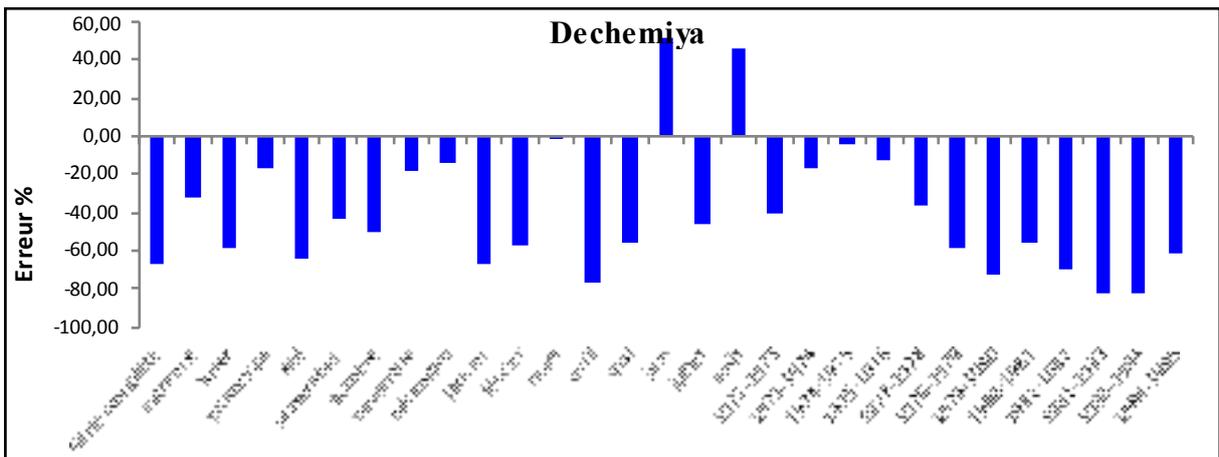


Figure 102: Variation des erreurs en pourcentage au niveau de la station de Dechemiya

Dans le bassin versant de l'oued Isser et d'après les résultats trouvés, le modèle en puissance $Q_s = a \cdot Q_t^b$ sous-estime souvent les flux solides en suspension pour toutes les stations hydrométriques à toutes les échelles de temps. Cette sous-estimation est la conséquence du passage de l'espace logarithmique $\log C = a \log Q + b$ à l'espace arithmétique $C = a Q^b$ (Duan, 1983 ; Newman et al 1992 ; Walling et al, 1988 ; Jansson, 1985 ; Janson, 1996 ; Asselman, 2000). Par ailleurs, le biais ou bien le degré de sous-estimation est proportionnel au degré de dispersion des points autour de la courbe de transport solide (Ferguson, 1986 ; Asselman, 2000).

4-Facteurs de correction

4-1-Nécessité des facteurs de correction

D'après les résultats du calcul de l'erreur en pourcentage, il est évident qu'il existe une sous-estimation des flux solides en suspension pour toutes les stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Isser. Le degré de la sous-estimation varie d'un sous bassin à un autre et d'un regroupement à un autre. Ceci exige la correction des valeurs estimées par le modèle en puissance par les facteurs de correction existant dans la littérature scientifique (Duan, 1983, Jansson, 1986 ; Ferguson, 1986 ; Walling 1988 ; Kao, 2005).

Ferguson (1986) a montré que, pour enlever un tel biais, le flux calculé à partir de l'équation $C = a Q^b$ devait être multiplié par un facteur de correction (Fc), dépendant de l'erreur type (sigma) entre les valeurs exprimées en logarithmes décimaux déterminées à partir des courbes de régressions et les valeurs observées. Ce facteur s'exprime selon l'équation :

$$F_c = e^{2.651 \cdot \sigma^2} \text{ où } \sigma^2 = \frac{\sum (\log C_{i \text{ mes}} - \log C_{i \text{ mod}})^2}{n-2} \quad (\text{Ferguson, 1986})$$

L'application du facteur de correction de Ferguson sur les courbes de transport solide exige une distribution log-normale des résidus (Asselman, 2000 ; Van_campenhout, 2013). La formule de Ferguson (1986) permettant de corriger le biais dû à la détransformation logarithmique sur les deux axes n'est réellement efficace que lorsque les résidus de C suivent une distribution log-normale et que C soit une fonction de puissance de Q (Asselman, 2000).

Pour cela, il faut en première lieu, tracer les diagrammes des résidus à toutes les échelles de temps pour juger et vérifier l'adéquation du modèle aux données. Les diagrammes des résidus sur la totalité des données au niveau des cinq stations hydrométriques sont représentés dans la figure 103.

La vérification de l'adéquation du modèle en puissance aux données se détecte visuellement sur le diagramme des résidus qui représente la dispersion des valeurs prédites de la concentration en abscisses et les résidus (ϵ) en ordonnées (Weisberg, 2005; Helsel et Hirsch, 2002). Le résidu de la régression ϵ est la différence entre les valeurs observées et les prédictions ponctuelles de la régression.

$$\epsilon = C_{mes} - C_{prédite}$$

Les diagrammes des résidus du modèle en puissance sur la totalité des données au niveau des stations hydrométriques montrent une distribution non log-normale, à cause de l'existence des valeurs négatives. L'allure des résidus autour de l'axe 0 présente une forme de cône où on observe des valeurs inférieures à 0 (fig. 103). Cette constatation se généralise pour tous les diagrammes des résidus établis au niveau de chaque regroupement.

A partir des résultats trouvés de l'écart entre les séries logarithmiques mesurées et celles estimées ($\log C_{mes} - \log C_{est}$) au niveau des stations hydrométriques, l'application du coefficient de correction de Ferguson n'est pas recommandée puisque la distribution des résidus n'est pas log normale.

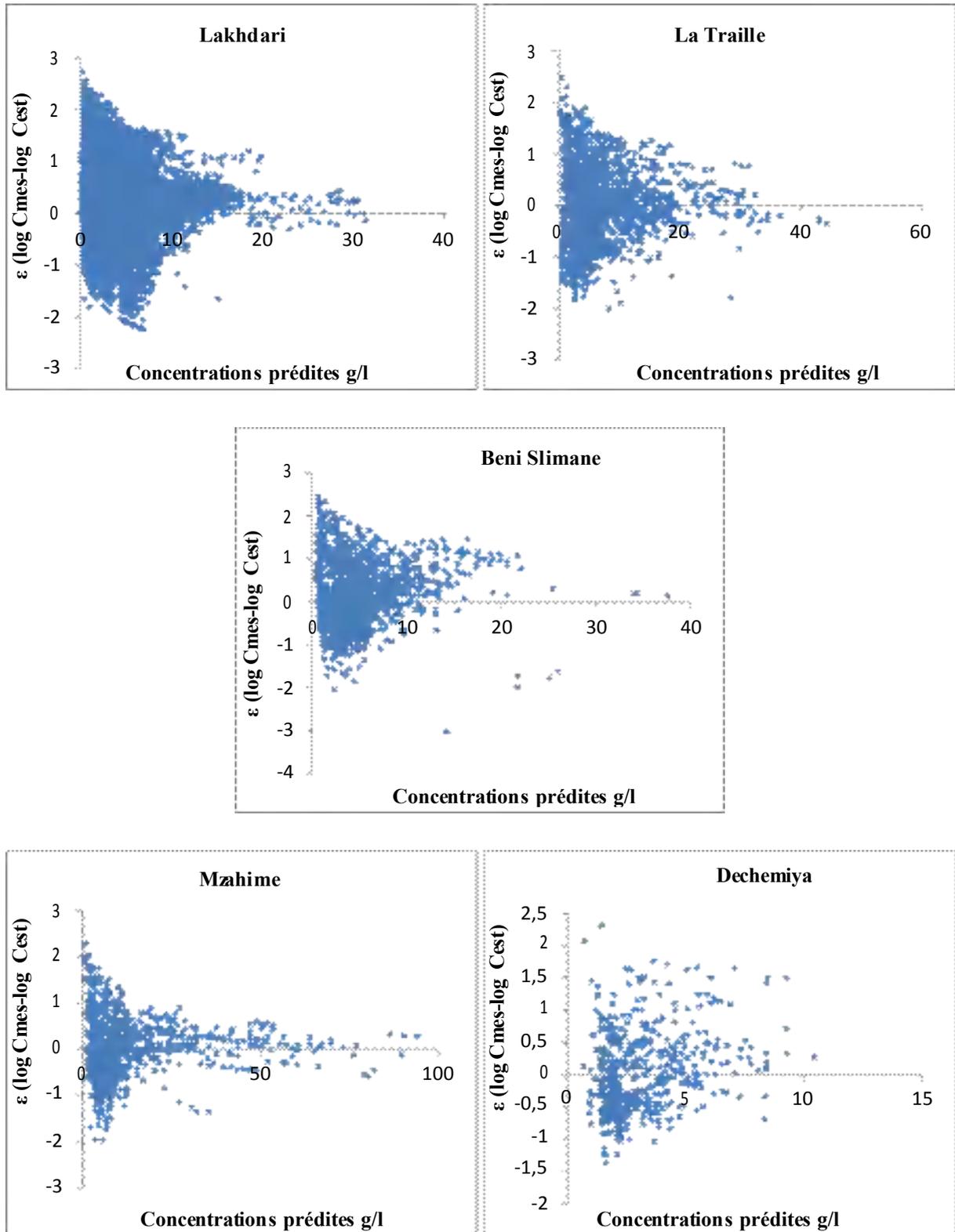


Figure 103: Résidus du modèle en puissance à l'échelle de la totalité de données aux stations hydrométriques étudiées

Par ailleurs, les ajustements des résidus à la loi normale (fig 104) apportent des éclairages sur la précision des courbes de transport solide. Plus la dispersion des points autour de la courbe d'estimation est faible, plus l'ajustement des résidus à la loi normale est bon et inversement. Cette constatation se généralise pour tous les diagrammes des résidus établis à différentes échelles de temps.

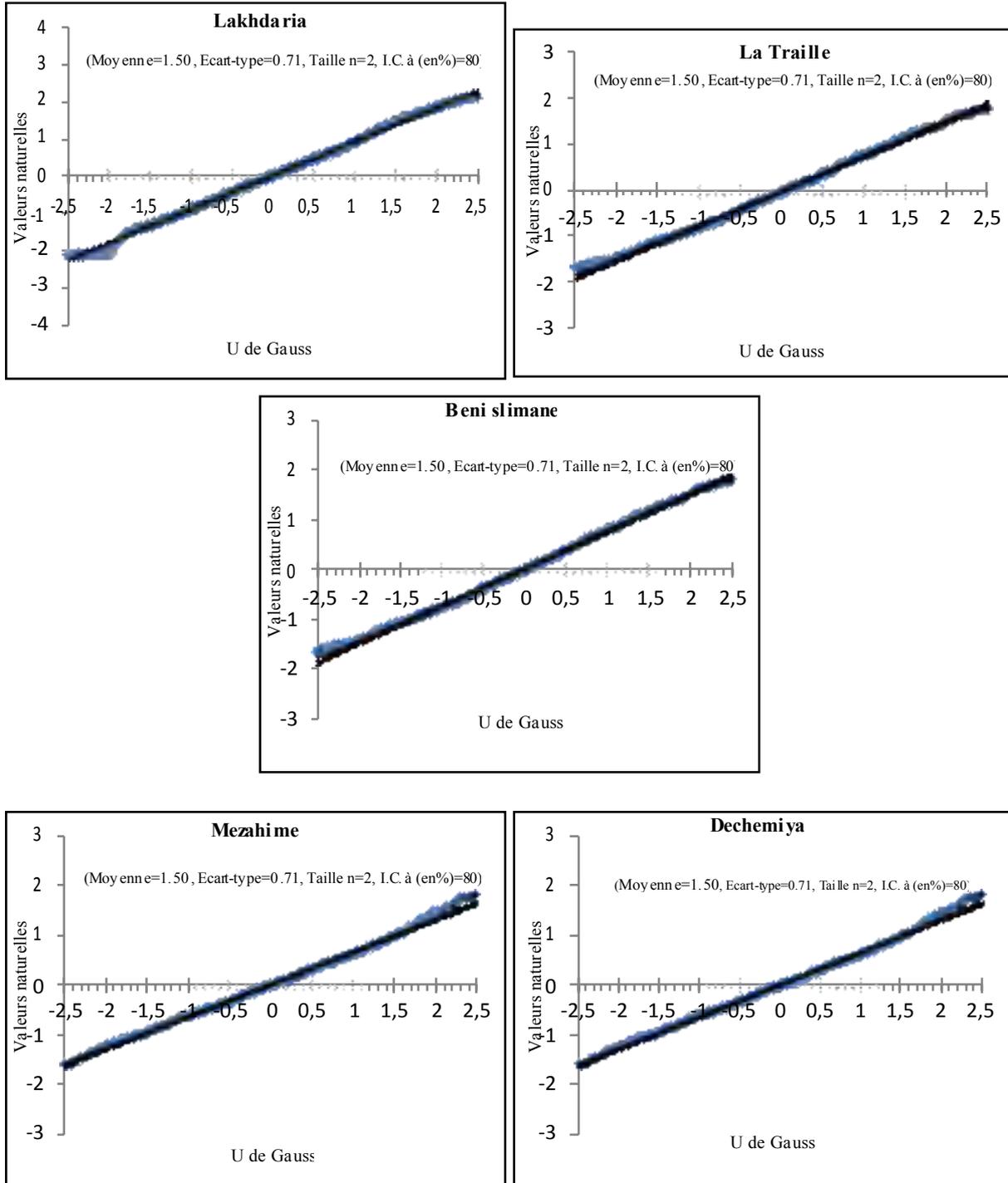


Figure 104: Ajustement des résidus à la loi normale

4-2-Application des facteurs de correction

Dans cette étude, nous avons préféré l'application du facteur de correction de Duan (1983) qui est performante lorsque les résidus sont indépendants et normalement distribués (Walling et Webb, 1988). Par ailleurs, nous avons appliqué le facteur de correction proposé par Kao et al (2005) applicable pour des données non transformées en domaine logarithmique. Il peut s'adapter pour le cas des deux modèles linéaire ou non linéaire.

Pour connaître l'influence apportée par l'application de ces facteurs de correction, la figure 105 représente les débits solides en suspension mesurés et modélisés avant et après la correction au niveau des cinq sous bassin étudiés.

La première remarque montre l'importance du flux solide en suspension calculé après application des facteurs de correction de Duan au niveau de cinq stations et pour la majorité des regroupements de données.

Après l'application des facteurs de correction à toutes les échelles de temps, on recalcule l'erreur apportée dans l'estimation des flux solide en suspension, les résultats figurent dans le tableau 56.

La figure 105 et le tableau 56 montrent que l'application du facteur de correction de Duan sur le modèle en puissance à toutes les échelles de temps pour toutes les stations hydrométriques, transforme la précision du modèle d'une sous-estimation à une surestimation avec des erreurs très élargies. Ce facteur est efficace pour le cas d'une grande sous-estimation notamment au niveau de la station de Beni Slimane à l'échelle de la totalité des données, il diminue la sous-estimation de -78.54% à -2.17%, tandis que pour des erreurs moyennes et faibles, il engendre des surestimations très importantes.

L'application du facteur de correction de Kao et al (2005) sur différents regroupements de données aux stations hydrométriques diminue aussi bien la sous-estimation que la surestimation des flux solides en suspension par le modèle. Pour tous les cas, les écarts entre les valeurs des flux solides estimées par le modèle et celles corrigées par le Fc2 de Kao est proche de zéro.

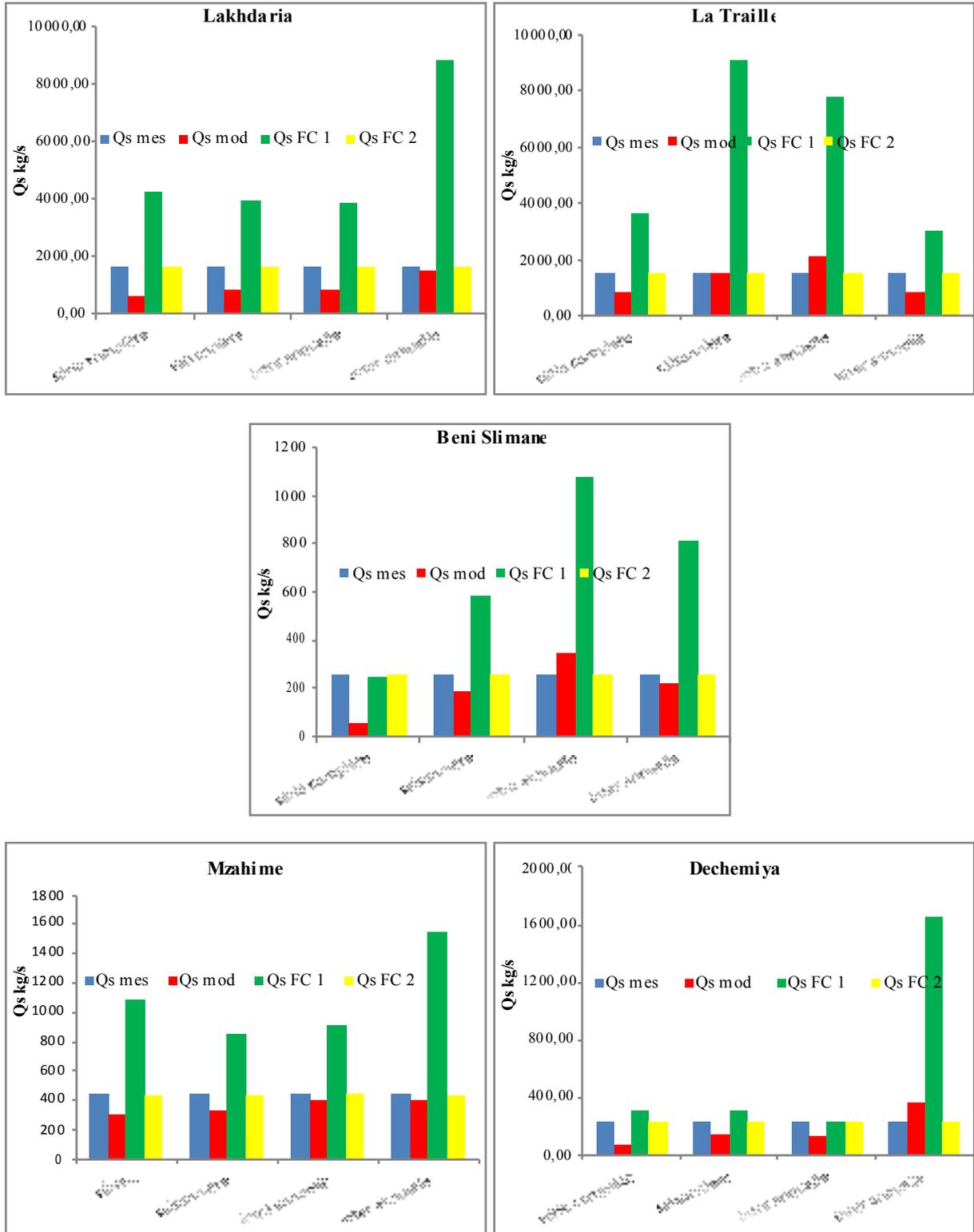


Figure 105: Evolution des débits solide en suspension mesurés, modélisés et corrigés au niveau des stations hydrométriques étudiées

Tableau 56: Erreurs apportées par le modèle en puissance avant et après la correction au niveau de cinq stations hydrométriques étudiées

Echelle		Série complète		Saisonnnière		Intra annuelle		Inter annuelle	
Station	variable	Qs kg.s ⁻¹	E%	Qs kg.s ⁻¹	E%	Qs kg.s ⁻¹	E%	Qs kg.s ⁻¹	E%
Lakhdaria	Qs mes	1643	/	1643	/	1643	/	1643	/
	Qs mod	593	-63.89	781	-52.44	838	-48.98	1480	-9.94
	Qs FC1	4249	+158.4	3955	+140.63	3857	+134.6	8793	+434.9
	Qs FC2	1637	-0.36	1641	-0.13	1643	-0.02	1643	-0.04
La Traïlle	Qs mes	1497	/	1497	/	1497	/	1497	/
	Qs mod	850	-43.2	1515	+1.14	2111	+40.98	859	-42.65
	Qs FC1	3641	+143	9045	+503.8	7771	+418.8	3023	+101.8
	Qs FC2	1496	-0.04	1500	+0.13	1499	+0.09	1494	-0.21
Beni Slimane	Qs mes	253	/	253	/	253	/	253	/
	Qs mod	54	-78.54	184	-27.30	345	+36.41	225	-11.05
	Qs FC1	247	-2.17	583	+130.4	1074	+324.2	815	+221.9
	Qs FC2	252	-0.24	252	-0.41	252	-0.41	252	-0.41
Mezahime	Qs mes	441	/	441	/	441	/	441	/
	Qs mod	307	-30.22	334	-24.12	408	-7.44	401	-8.98
	Qs FC1	1087	+146.3	847	+91.97	910	+106.39	1546	+250.4
	Qs FC2	440	-0.22	438	-0.59	440	-0.22	437	-0.79
Dechemiya	Qs mes	229	/	229	/	229	/	229	/
	Qs mod	74	-67.53	141	-38.37	128	-44.28	360	+56.62
	Qs FC1	301	+31.16	303	+31.88	238	+3.63	1645	+615.7
	Qs FC2	228	-0.80	228	-0.80	228	-0.80	226	-1.32

En résumé, dans le bassin versant de l’oued Isser, lorsqu’on applique le modèle en puissance sur différents regroupements de données, on obtient des résultats différents pour toutes les stations hydrométriques, le plus souvent sous-estimés. L’application des facteurs de correction de Duan provoque une surestimation qui peut être importante, alors que le facteur de correction de Kao permet de diminuer au maximum l’écart.

5-Analyse des paramètres a et b des courbes de transport solide

5-1-Signification des paramètres a et b

Les paramètres des régressions des courbes sédimentaires ont une interprétation physique. Peters-Kümmerly (1973) et Asselman (2000) affirment que le coefficient a représente l'érosivité du bassin versant. Une valeur élevée de ce paramètre reflète un bassin caractérisé par des matériaux fortement dégradés, pouvant être facilement transportés. Par contre, l'exposant b est un coefficient qui traduit la puissance érosive de la rivière (Peters-Kümmerly, 1973 in Asselman, 2000 ; Yang et al, 2006). Une valeur élevée de b indique une rivière dont une petite augmentation de débit implique une grande augmentation de la force érosive de la rivière. Par ailleurs, le coefficient b indique la disponibilité de nouvelles sources de sédiments lorsque le débit augmente (Asselman, 2000; Yang et al, 2006 ; Jean Van Campenhout, 2013).

5-2-Variabilité temporelle des paramètres a et b

Les valeurs du paramètre a et de l'exposant b varient saisonnièrement et pourrait être reliée aux caractéristiques du bassin évoluant elles-mêmes avec le temps (disponibilité des matières en suspension et débit maximum). Le paramètre (a) possède une forte valeur en automne par rapport aux autres saisons pour tous les bassins. Ceci peut expliquer l'importance de la dynamique érosive durant cette saison, où la disponibilité des matières en suspension est très élevée. Les valeurs de la pente b varient dans un intervalle étroit.

À l'échelle annuelle, la figure 106 montre que les variations des paramètres de la relation de puissance sont marquées par une faible variabilité de l'exposant b et une très forte variabilité du paramètre a. Ce dernier possède l'écart le plus faible à oued Isser maritime à la station de Lakhdaria dont les valeurs varient entre 0.01 et 5.53 alors que l'écart le plus élevé est observé pour les trois bassins situés à l'amont (Isser supérieur) dont les valeurs du paramètre a varient entre 0.3 et 63.7 au niveau de la station de La Traille.

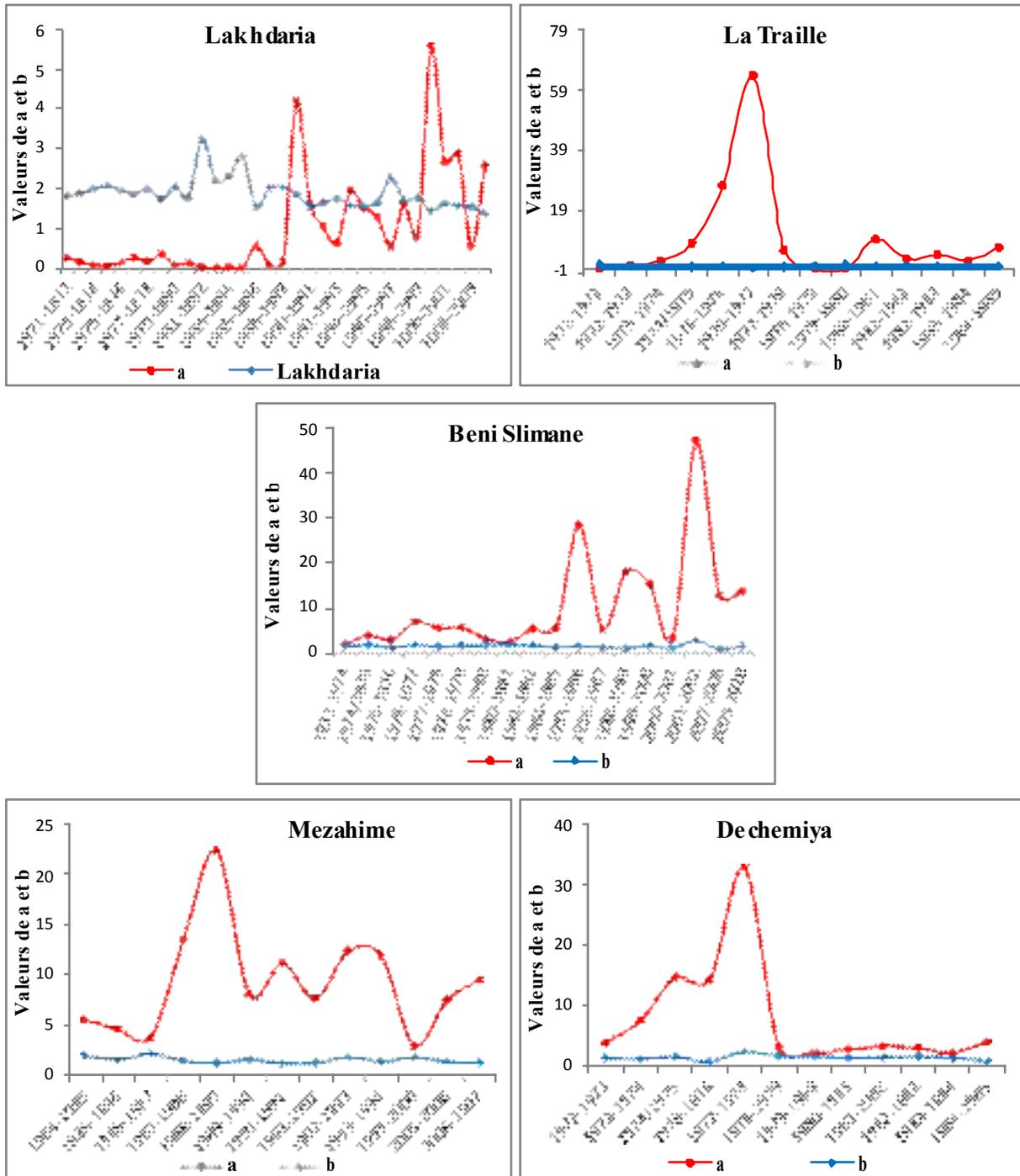


Figure 106: Variations annuelles des paramètres a et de l'exposant b aux bassins d'étude

La représentation graphique de la figure 107 montre que les couples annuels des paramètres a et de l'exposant b se répartissent de manière linéaire sur une échelle semi-logarithmique. Ces deux variables sont inversement corrélées. Cette remarque est observée par plusieurs auteurs (Asselman, 2000 ; Syvitski et al, 2000 ; Yang et al, 2006 ; Achite et Ouillon, 2007 ; El Mahi et al, 2012 ; Jean Van Campenhout, 2013 ; Warrick, 2015).

Les relations obtenues du paramètre a et de l'exposant b ont des coefficients de corrélation significatifs pour Lakhdaria (r=0.80), La Traille (r=0.90) et Mezahime (r=0.60). Alors que la station de Beni Slimane (r=0.16) et de Dechemiya (r=0.45) présentent des relations faibles où les points sont assez dispersés.

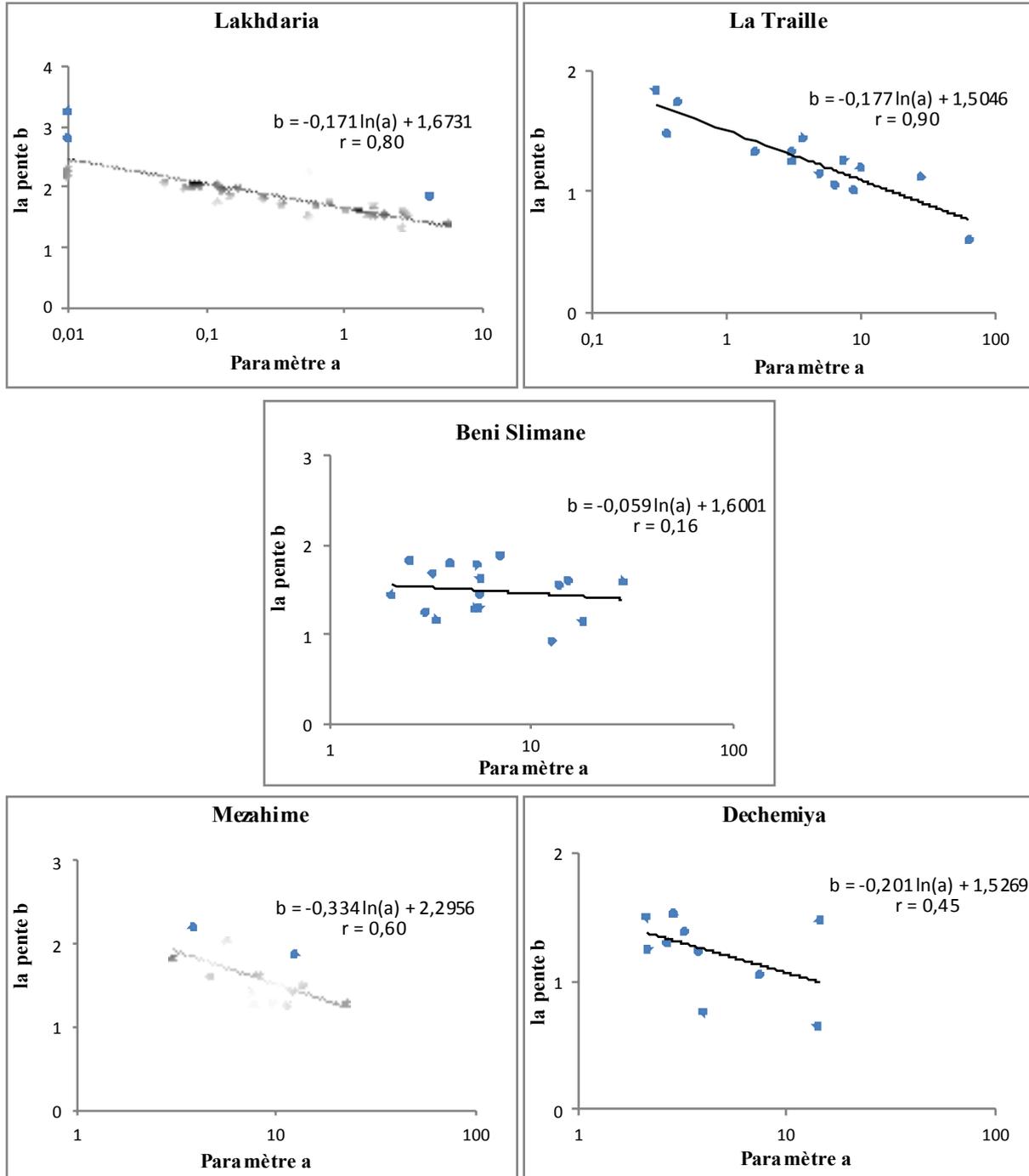


Figure 107: Relation entre les paramètres a et la pente b de la relation $Q_s = aQ_L^b$ à l'échelle annuelle dans les bassins d'étude

5-3-Variabilité spatiale des paramètres a et b

Afin de faciliter les comparaisons des paramètres a et b des sous bassins de l'oued Isser, les courbes de transport sédimentaire à l'échelle de la totalité des données ont été regroupées sur un même graphique (fig 108). L'exposant b est la pente entre les données de débit liquide et de débit solide transformées en logarithmes décimaux, et l'ordonnée a est la valeur (y-intercept), (Syvitski, 2000 ; Warrick, 2015).

On constate que les sous-bassins contrôlés par les stations de Mezahime et Beni Slimane possèdent des valeurs élevées du paramètre a par rapport aux autres sous bassins (soit 7.4 et 4.88). Ces sous-bassins se situent à l'amont du bassin de l'Isser (Isser supérieur) dans un domaine semi-aride où les pluies ont un caractère agressif. D'autre part, ces deux bassins se caractérisent par des matériaux facilement érodibles (marnes et argiles), pouvant être facilement érodés et rendus disponibles pour le transport par les oueds. La valeur de l'exposant b la plus élevée est observée pour le sous bassin de l'oued Isser maritime contrôlé par la station de Lakhdaria est de 1.56 (fig 108).

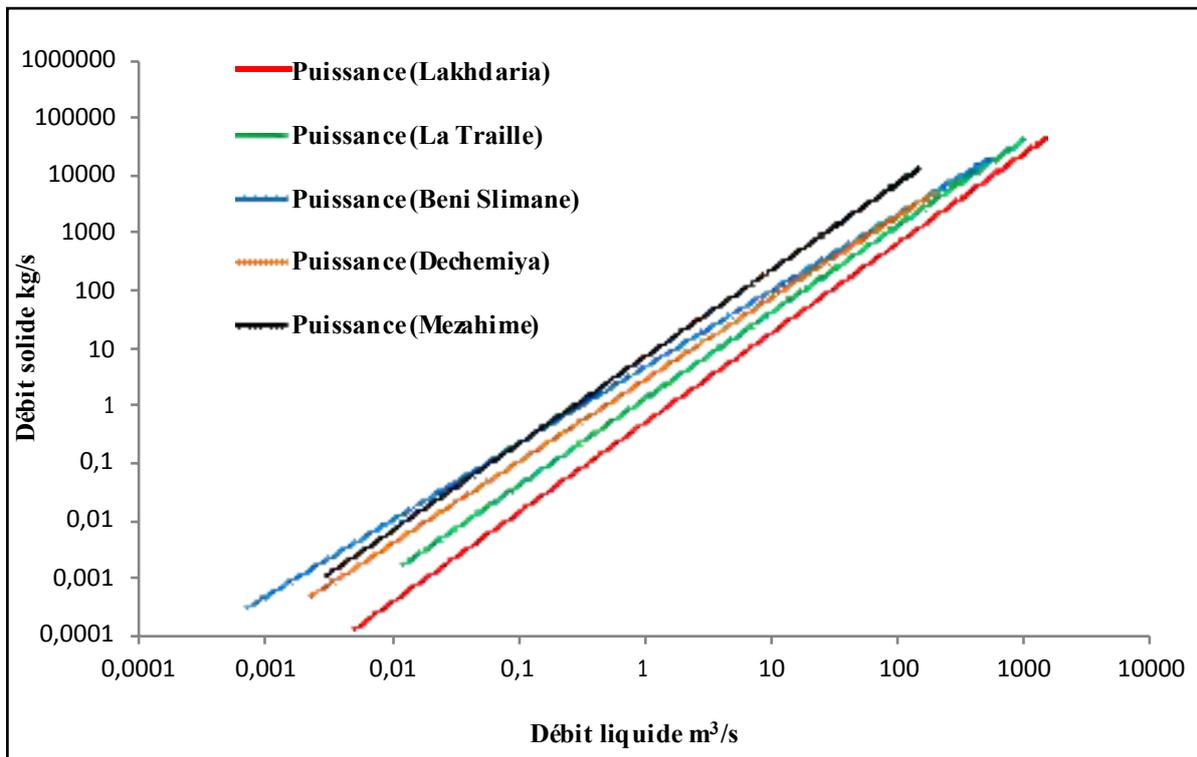


Figure 108: Les courbes de transport solide des sous bassins de l'oued Isser

5-4-Relation entre les paramètres a et b et la surface des bassins versants

Pour connaître les variations des paramètres a et celles de l'exposant b en fonction de la superficie du bassin, le graphe de la figure 109 est réalisé.

L'exposant b est bien relié à la surface drainée du bassin avec un coefficient de corrélation $r = 0.75$. On observe l'effet évident du caractère régional sur l'exposant b en fonction de la taille du bassin versant. Benkhaled et Remini, (2003) ont montré que l'exposant b est lié directement à la surface de drainage en période de crue. Par contre, on observe une évolution inverse du paramètre a avec la superficie du bassin versant avec un coefficient de corrélation $r = -0.73$. Jean Van Campenhout, (2013) a montré dans son étude que le paramètre a de la relation en puissance est inversement lié à la superficie du bassin versant.

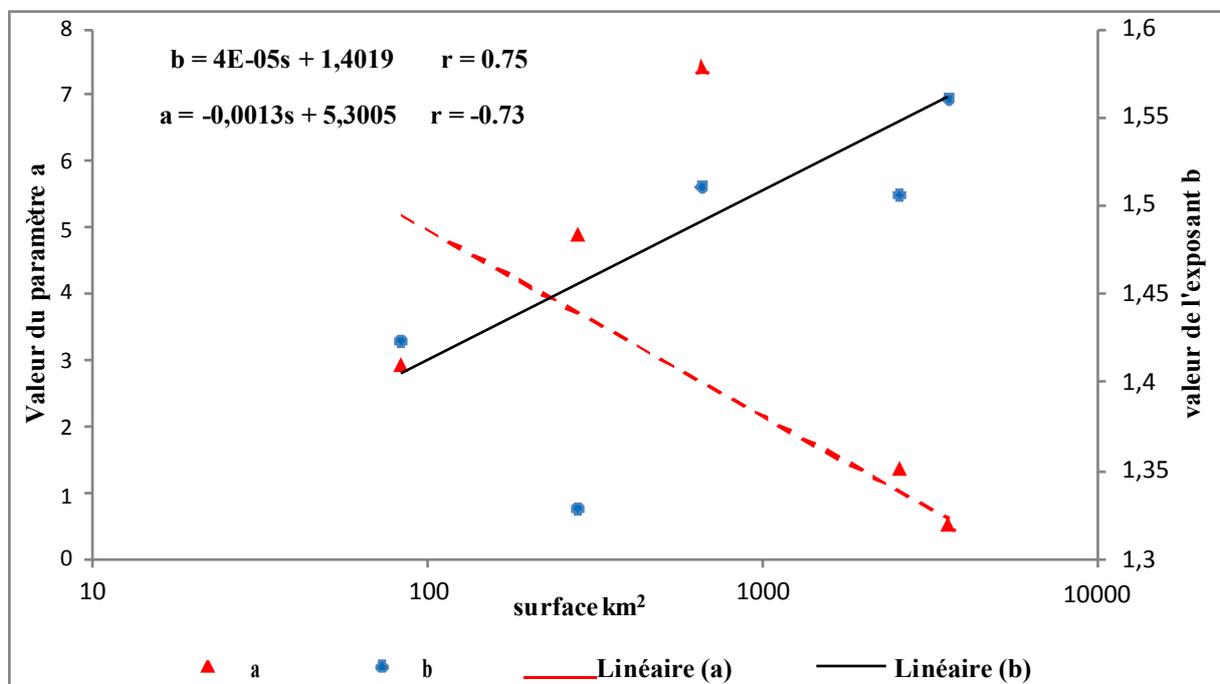


Figure 109: Relation entre le paramètre a et de l'exposant b et la superficie du bassin versant

Pour connaître les variations du paramètres a en fonction des caractéristiques hydroclimatiques du bassin, les graphes de la figure 110 ont été réalisés.

La relation entre le paramètre a et l'hydraulicité (rapport du débit moyen annuel de l'année considérée au débit moyen interannuel) montre une décroissance du paramètre a lorsque l'hydraulicité augmente. Cependant, la dispersion des valeurs du paramètre a est plus élevée pour les années sèches que pour les années humides (fig. 110). Les valeurs les plus fortes de a sont observées durant les années sèches alors que pour les années humides, les valeurs du paramètre a diminuent d'une manière très nette.

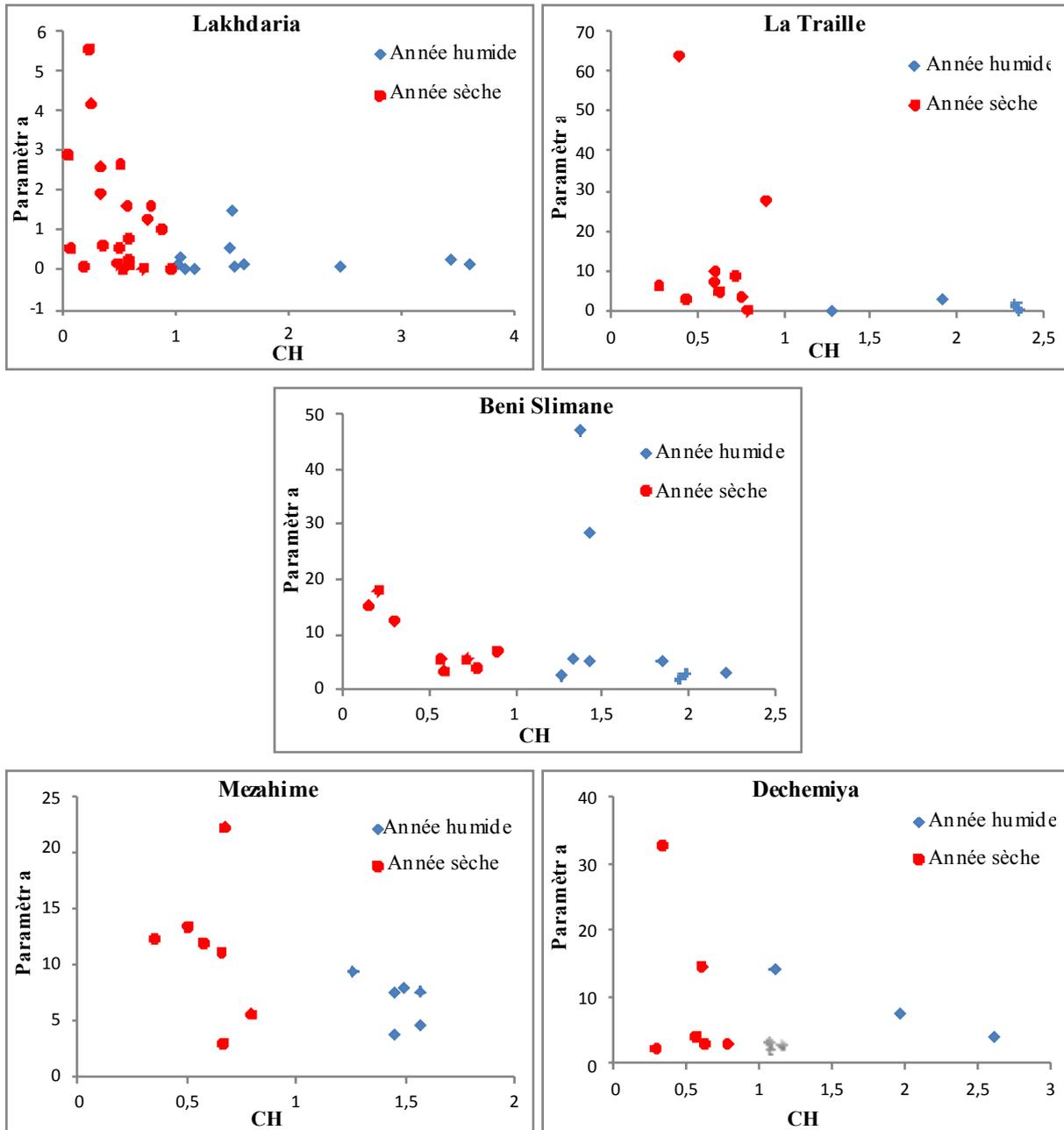


Figure 110: Relation du paramètre a en fonction de l'hydraulicité (CH)

Le paramètre a et la pluie moyenne annuelle sont inversement corrélés pour les cinq bassins. On constate que les fortes valeurs du paramètre a sont enregistrées au cours des années sèches pour tous les bassins. En effet, les années sèches se caractérisent par des averses orageuses de courte durée, qui sont plus fréquentes en automne et en été, et qui tombent sur des sols secs et mal protégés par le couvert végétal. A cause de cela, l'indice de l'érodabilité est considérablement élevé avec les années sèches. C'est l'exemple de la station

de Beni Slimane pour l'année 2001/2002 où la pluie moyenne annuelle est de 194.7 mm et le paramètre a égale à 46.9.

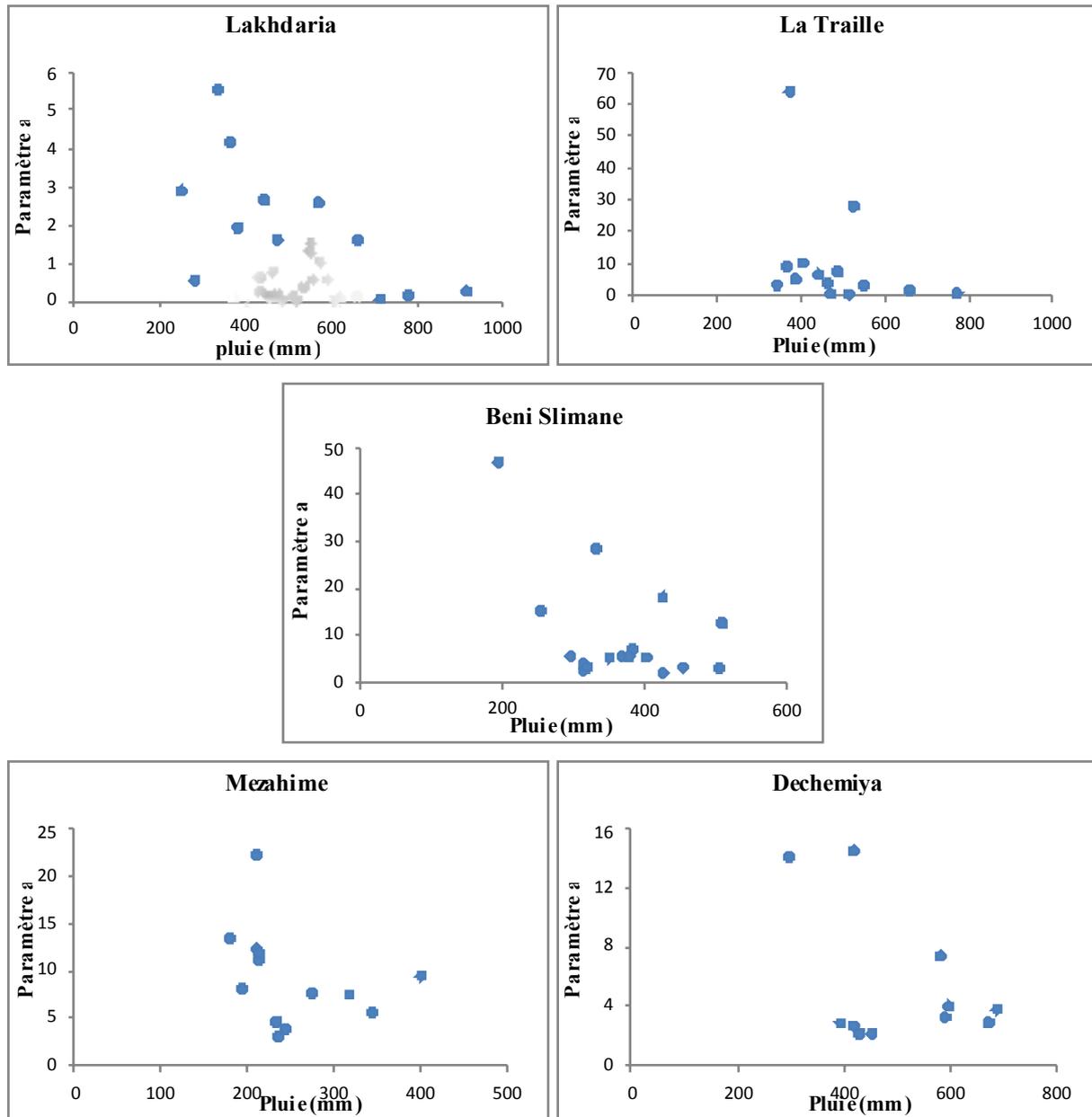


Figure 111: Relation du paramètre a en fonction de la pluie moyenne annuelle

Les bassins du Haut Isser qui se situent dans un domaine semi-aride possèdent des valeurs élevées du paramètre a. L'exposant b marque une forte puissance érosive au niveau de l'oued Isser maritime à la station de Lakhdaria. Les valeurs du paramètre a et de l'exposant b sont les résultats de l'interaction de plusieurs conditions hydro-climatiques, morphologiques, géologiques et de couvert végétal.

Conclusion

Dans le bassin versant de l'oued Isser, la relation entre la concentration en MES et le débit montre une dispersion considérable des points autour de la courbe de transport solide avec des coefficients de corrélation faibles. Elle montre que le débit ne permet pas à lui seul d'expliquer la variabilité de la concentration en MES. Celle-ci est liée aux variations temporelles de la disponibilité des matières en suspension dans le bassin versant. Ainsi, l'effet d'hystérésis permet d'expliquer la mauvaise corrélation entre QL-C observé lorsque les concentrations en MES présentent différentes valeurs à des débits identiques.

La relation reliant les débits solides aux débits liquides est de type puissance de forme $Q_s = a Q_l^b$. Cette relation est appliquée pour différentes échelles de temps au niveau des 5 sous bassins. L'application de ce modèle en puissance pour les différents regroupements de données ne donne pas les mêmes résultats pour la qualité d'estimation des flux solides en suspension. Il n'y a pas un regroupement plus performant qu'un autre.

Le modèle en puissance sous-estime souvent les flux solides en suspension pour tous les bassins à toutes les échelles de temps. Cette sous-estimation est conséquente au passage de l'espace logarithmique à l'espace arithmétique. Par ailleurs, le biais ou bien le degré de la sous-estimation est proportionnel au degré de dispersion des points autour de la courbe sédimentaire. Ceci exige la correction des valeurs estimées par un facteur de correction.

L'application du facteur de correction de Duan transforme la précision du modèle d'une sous-estimation à une surestimation avec des erreurs très élargies. Il est efficace pour les cas d'une grande sous-estimation, alors que le facteur de correction de Kao diminue à la fois la sous-estimation et la surestimation.

Les paramètres du modèle en puissance sont inversement corrélés, caractérisés par une faible variabilité de l'exposant b et une forte variabilité du paramètre a . Ces valeurs sont les résultats de l'interaction de plusieurs conditions hydro climatiques, morphologiques, géologiques et de couvert végétal. On constate que les sous bassins qui se situent dans le Haut Isser (domaine semi-aride) possèdent des valeurs élevées du paramètre a ; les pluies qui tombent sur des matériaux facilement érodables (marnes et argiles), ont un caractère aléatoire et agressif impliquant l'effet de Splash. On constate l'effet évident de la surface sur l'exposant b , ainsi, une décroissance du paramètre a qui traduit l'érodabilité est constatée

lorsque la superficie augmente, à cause des possibilités d'accumulation sédimentaires avant l'exutoire qui sont élevées.

Chapitre 8:

***Quantification des transports en MES et envasement
des barrages***

Introduction

Dans ce chapitre, nous utilisons les régressions saisonnières entre le débit liquide et le débit solide en utilisant les données de débits moyens journaliers pour l'extrapolation des apports solides. Un bilan moyen des exportations des matières en suspension est réalisé et on en déduit un taux d'érosion à l'échelle du bassin versant. Dans une seconde étape, on étudie la contribution des événements de crues aux transports des matières en suspension. Par la suite, les résultats des apports solides permettent de quantifier l'envasement des barrages.

1- Variabilité temporelle des apports liquides et solides

L'analyse de la variabilité temporelle des apports hydrosédimentaires est réalisée aux échelles de temps interannuelle et intra-annuelle (mensuelle et saisonnière), et à l'échelle des crues.

1-1- Variabilité interannuelle des apports liquides et solides

Les variations interannuelles révèlent que les apports liquides et solides connaissent une forte irrégularité, se traduisant par les valeurs assez élevées des coefficients de variation enregistrés durant les périodes d'étude. Ces grandes fluctuations sont la conséquence d'une irrégularité du régime annuel d'écoulement, lié principalement à l'influence des précipitations, par leurs valeurs extrêmes très dispersées et leurs intensités très variable.

Tableau 57: Valeurs des apports liquides en hm³, apport solide en suspension en 10³ tonne et des dégradations spécifiques en t.km⁻².an⁻¹

Station	Lakhdaria			La Traille			Beni Slimane			Mezahime			Dechemiya		
	Al	As	Ds	Al	As	Ds	Al	As	Ds	Al	As	Ds	Al	As	Ds
1970-71	139,7	283,0	78,4	55,8	138,7	54,1									
1971-72	805,9	18553,0	5125,6	343,6	3656,2	1424,8									
1972-73	891,7	7428,4	2052,1	338,3	2690,2	1048,4							19,9	84,0	1011,9
1973-74	610,9	8367,3	2313,0	279,4	2016,7	785,9	22,6	144,7	514,9	31,0	726,1	1096,9	18,1	125,5	1511,5
1974-75	171,4	1024,9	282,7	104,4	686,9	267,7	9,0	71,6	254,7	19,4	590,5	892,0	5,5	22,2	267,6
1975-76	377,0	2250,5	630,7	127,8	844,0	328,9	22,7	221,8	789,3	33,8	798,6	1206,3	9,9	73,9	890,5
1976-77	144,6	538,8	148,9	57,9	219,5	85,5	10,4	83,4	296,7	13,1	290,6	439,0	4,0	37,5	452,3
1977-78	110,2	324,1	89,0	40,8	120,4	46,9	6,6	43,5	154,9	9,8	152,5	230,4	3,0	7,5	89,8
1978-79	258,4	1692,7	467,7	115,8	584,3	227,7	15,6	102,9	366,3	17,4	347,0	524,1	7,2	25,9	311,5
1979-80	345,6	3239,0	895,0	187,6	1510,8	588,7	25,5	415,0	1476,9	38,5	2003,0	3025,6	9,6	148,1	1784,5
1980-81	251,1	1043,2	287,7	88,2	257,2	100,2	14,7	96,7	344,0	16,5	309,8	468,0	10,3	47,1	567,8
1981-82	11,0	36,4	4,6	109,5	425,9	166,0	0,0	0,1	0,4	28,9	522,8	789,7	9,5	32,9	396,2
1982-83	242,9	1877,7	520,6	92,7	835,3	325,5	3,8	17,3	61,6	14,6	414,8	626,5	5,7	41,7	502,8
1983-84	100,1	193,9	52,7	62,3	161,7	63,0	3,5	12,0	42,8	10,3	71,0	107,3	2,6	5,6	67,5
1984-85	269,8	1308,6	361,8	88,7	901,7	351,4	8,3	40,8	145,0	10,5	89,9	135,9	5,1	14,8	177,8
1985-86	132,7	666,3	184,3				16,9	113,1	402,4	19,0	346,1	522,9			
1986-87	365,2	1758,2	485,9				21,1	170,1	605,2	19,0	374,5	565,7			
1987-88	44,7	146,1	40,3				0,4	2,5	9,0	6,5	139,4	210,6			
1988-89	148,3	706,1	195,2				2,5	23,3	82,9	9,0	158,8	239,8			
1989-90	46,0	769,9	395,2				5,3	118,6	422,2	19,8	879,2	1328,1			
1990-91	139,5	409,2	111,5				9,1	47,5	169,2	8,7	90,2	136,2			
1991-92	185,5	1429,7	394,2				17,3	129,2	459,9	20,5	449,0	678,3			
1992-93	84,5	550,8	152,3				13,9	122,4	435,5	4,6	151,8	229,4			

1993-94	85,5	320,4	88,6				2,8	30,8	109,7	7,6	389,8	588,8			
1994-95	387,1	2865,8	791,4				22,9	201,1	715,6						
1995-96	163,2	790,8	216,5				15,2	146,4	521,1						
1996-97	17,7	35,5	9,8				4,7	17,4	61,9						
1997-98	153,6	2107,5	582,3												
1998-99	143,6	520,9	144,0												
1999-00	57,7	379,3	104,9				1,5	12,3	43,6						
2000-01	128,8	997,3	275,8				5,9	24,8	88,4						
2001-02	5,6	3,6	0,9				16,3	1295,9	4611,8						
2002-03							26,8	314,2	1118,2						
2003-04							12,3	116,9	416,2						
2004-05	372,0	1673,7	462,8				3,4	15,9	56,5						
2005-06	172,7	571,8	158,1				7,8	30,6	108,8						
2006-07	384,1	3094,3	854,1				4,9	25,1	89,2						
2007-08	272,2	3138,6	867,4				3,4	16,9	60,2						
2008-09	117,1	256,9	71,0				5,6	25,5	90,9						
2009-10	83,5	165,1	45,7												
Moyenne	221,6	1882	524,8	139,5	1003,3	391	10,7	125	445	17,06	442,8	668,6	8,5	51,3	617,8
Ecart type	198,9	3311,4	913,8	100,9	1043,6	406,6	7,8	226,7	806,7	9,38	427,5	645,8	5,4	44,7	538,0
C.V	0,89	1,75	1,74	0,72	1,04	1,04	0,73	1,81	1,81	0,54	0,96	0,96	0,63	0,87	0,87
Max	891,7	18553	5125,6	343,6	3656,2	1424,8	26,8	1295,9	4611,8	38,5	2003	3025,6	19,9	148,1	1784,5
Min	5,6	3,6	0,9	40,8	120,3	46,9	0,03	0,11	8,96	4,62	71	107,2	2,6	5,6	67,5

Le tableau 57 présente les apports liquides, solides et les dégradations spécifiques au niveau des différents sous bassins pour les différentes périodes d'étude. L'analyse de ces résultats, est réalisée pour les sous bassins aux stations hydrométriques :

1-1-1-Sous bassin d'oued Isser Maritime : station de Lakhdaria

Dans le cas du sous bassin de l'oued Isser Maritime à la station de Lakhdaria, sur une plus longue période de mesure de 40 années, de 1970 à 2010, l'apport liquide moyen interannuel est estimé à 221.6 hm³, et la charge solide moyenne interannuelle à 1.88 millions de tonnes. L'année hydrologique (1971/72) est exceptionnelle avec un apport solide de 18.5 millions de tonne, soit 25.95% du tonnage global. Cet apport représente neuf fois la valeur moyenne interannuelle de la période d'étude. Durant cette année, la concentration en MES moyenne est de 16.77 g.l⁻¹, et atteint la valeur de 410 g.l⁻¹. La crue survenue du 18 au 24 Janvier 1972 a été exceptionnelle avec un débit liquide instantané de 1360 m³.s⁻¹ et un débit solide correspondant de 72216 kg.s⁻¹. La plus faible charge solide 0.0036 Millions de tonnes est estimée durant l'année hydrologique 2001/02, qui est une année très sèche et qui a connu

le plus faible apport liquide 5.64 hm^3 . Les dégradations spécifiques varient entre 0.9 (2001/02) à $5125 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1971/72), avec une moyenne annuelle de $524 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

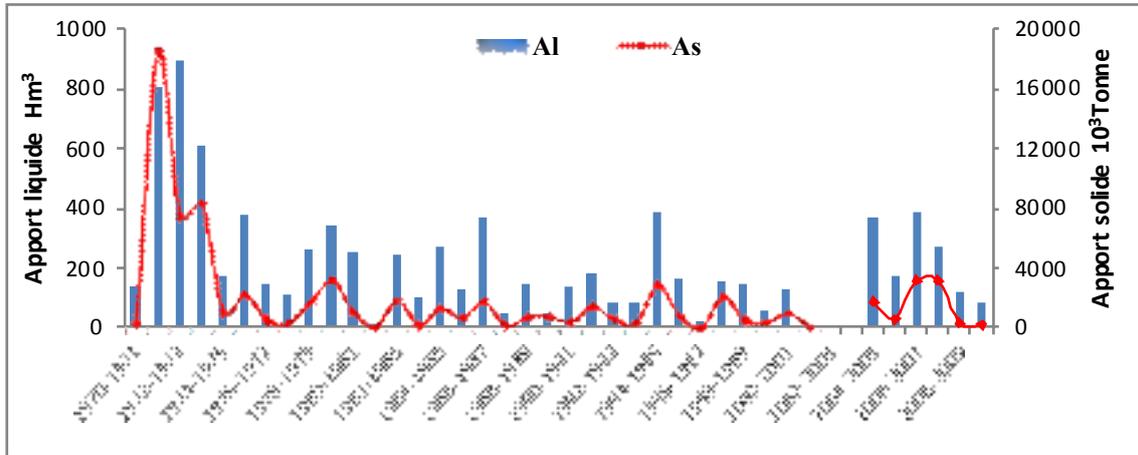


Figure 112: Variation annuelle des apports liquides et solides au niveau de la station de Lakharia

1-1-2-Sous bassin de l'oued Isser Moyen : station de La Traille

Au niveau de cette station, pour la période de 1970/85, l'apport liquide moyen interannuel est de 139.5 hm^3 et l'apport solide moyen interannuel est estimé à 1.003 million de tonnes. La plus faible charge solide est de 0.12 million de tonnes estimées pour l'année hydrologique 1977/78 qui a connu le plus faible apport liquide soit 40.8 hm^3 . La charge solide la plus élevée (3.6 millions de tonnes) est produite durant l'année hydrologique 1971/72 qui a connue l'apport liquide le plus élevé soit 343.6 hm^3 . La charge solide de cette année représente quatre fois la valeur moyenne interannuelle (fig. 113). Les dégradations spécifiques varient de 46.9 (1977/78) à $1424.8 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ (1971/72), avec une moyenne de $391 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

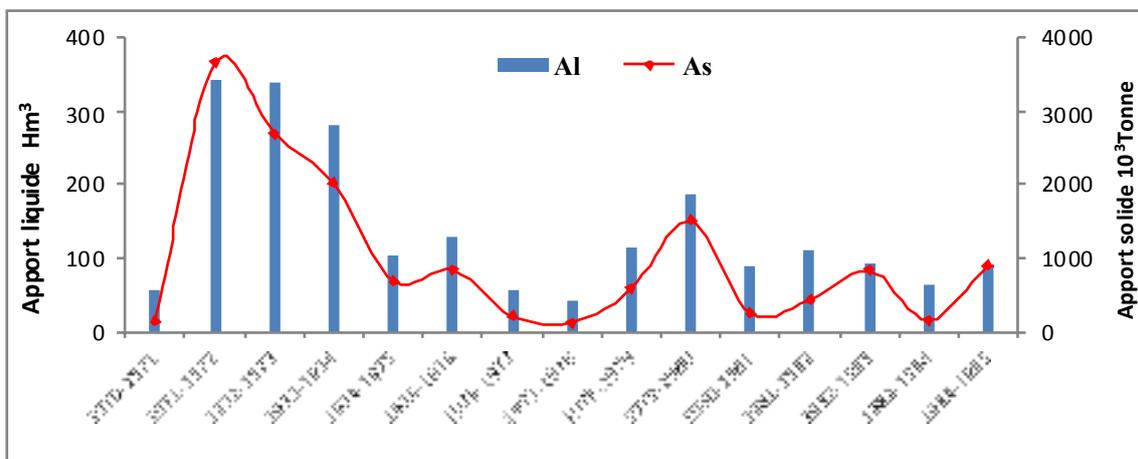


Figure 113: Variation annuelle des apports liquides et solides au niveau de la station de La Traille

1-1-3-Sous bassin de l’oued Mellah Ouest : station de Beni Slimane

Pour le bassin de l’oued Mellah Ouest, sur une période de 36 ans 1973/2009, l’apport liquide moyen interannuel est estimé à 10.7 hm³, la charge solide moyenne interannuelle est de 0.12 millions de tonnes. L’année hydrologique 2001/02 a été exceptionnelle avec un apport solide de 1.29 million de tonnes, soit 30.49% du tonnage total, il représente dix fois la valeur moyenne interannuelle de la période d’étude. La plus faible charge solide est de 0.0001 million de tonnes, estimée durant l’année hydrologique 1981/82 qui est une année très sèche et qui a connu le plus faible apport liquide 0.03 hm³. Dans ce bassin la dégradation spécifique moyenne interannuelle est de 444.9 t.km⁻².an⁻¹, elle varie de 8.96 t.km⁻².an⁻¹ (1981/82) à 4611 t.km⁻².an⁻¹ (2001/02) (fig 114).

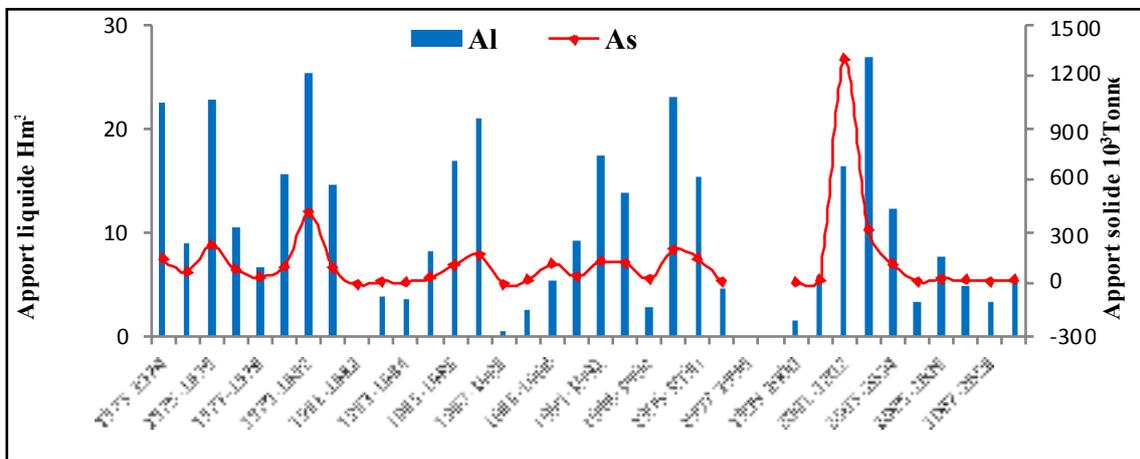


Figure 114: Variation annuelle des apports liquides et solides au niveau de la station de Beni Slimane

1-1-4-Sous bassin Mellah Ouest Kherza : station de Mezahime

Pour le sous bassin de Mellah Ouest Kherza, sur la période de 1973/1995, l’apport liquide moyen interannuel est estimé à 17.06 hm³, et l’apport solide moyen interannuel est de 0.4 million de tonnes. La plus faible charge solide 0.07 million de tonnes est estimée pour l’année hydrologique 1983/84. L’année hydrologique 1979/80 est responsable de 21% du tonnage global soit 2 millions de tonnes, ce qui représente cinq fois l’apport moyen interannuel. Cette année a connue l’apport liquide le plus élevé 38.47 hm³. La dégradation spécifique moyenne est de 668.6 t.km⁻².an⁻¹, elle varie entre 105 t.km⁻².an⁻¹ (1983/84) et 3025 t.km⁻².an⁻¹ (1979/80) (fig 115).

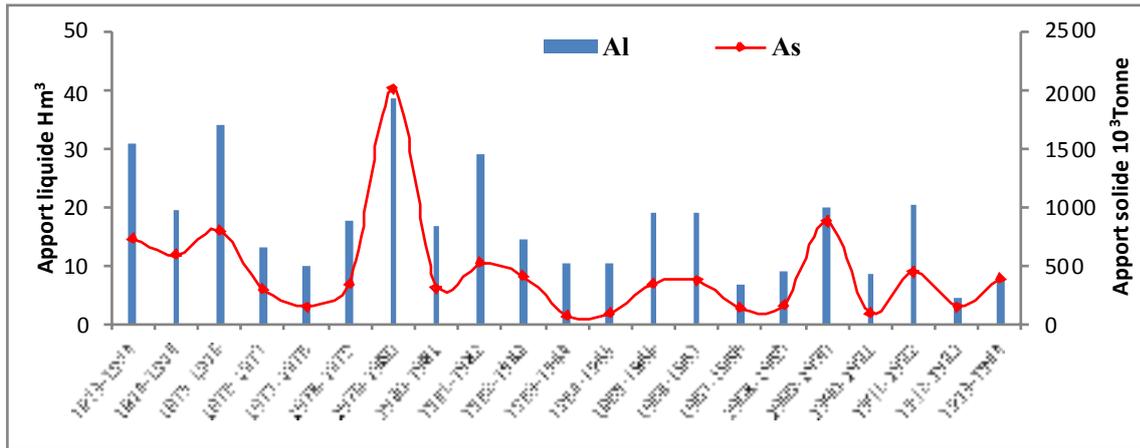


Figure 115: Variation annuelle des apports liquides et solides au niveau de la station de Mezahime

1-1-5-Sous bassin d’oued Zeroua : station de Dechemiya

Au niveau du bassin de l’oued Zeroua, durant la période de 1972/85, l’apport liquide moyen interannuel est estimé à 8.48 hm^3 ; c’est le plus faible apport par rapport aux d’autres sous bassins. La charge solide moyenne interannuelle est estimée à 0.05 million de tonnes. L’année hydrologique 1979/80 a charrié plus de 22% du tonnage global, soit 0.14 million de tonnes, durant cette année, la concentration en MES moyenne est de 12.78 g l^{-1} , et atteint 293 g l^{-1} , le débit de pointe atteint la valeur de $183 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et un débit solide correspondant de 3667 kgs^{-1} . La plus faible charge solide, 0.005 millions de tonnes est estimée pour l’année hydrologique 1983/84 qui est une année sèche, et qui enregistre le plus faible apport liquide 2.61 hm^3 . Les dégradations spécifiques varient entre $67.47 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ (1983/84) et $1784 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ (1979/80) avec une moyenne de $617 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$.

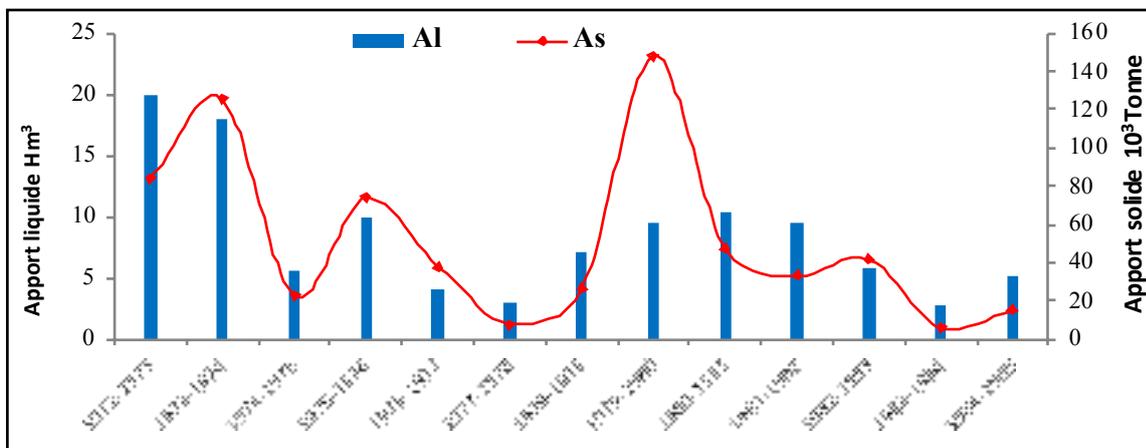


Figure 116: Variation annuelle des apports liquides et solides au niveau de la station de Dechemiya

1-2- Variabilité mensuelle des apports liquides et solides

Les variations des apports liquides moyens mensuels et des apports solides en suspension qui leur correspondent, donnent un aperçu quant à la tendance globale de la susceptibilité des sous bassins versant à la production des sédiments en suspensions. Ils mettent en évidence une forte variabilité mensuelle des apports liquides et solides.

Le mois de mars a le plus important apport liquide moyen inter-mensuel pour tous les sous bassins. Concernant la charge solide moyenne inter-mensuelle pour les différents sous bassins, l'action érosive est la plus active pendant certains, qui contribuent fortement aux apports solides annuels. Cette variabilité mensuelle de l'apport solide en suspension est attribuée à la fréquence des crues importantes en lien avec la fréquence des orages violents.

Le tableau 58 contient les apports liquides moyens mensuels, les charges solides en suspension et les dégradations spécifiques mensuelles pour les différents sous bassins.

Tableau 58: Valeurs des apports liquides moyens mensuels en hm^3 , apports solides moyens mensuels en 10^3 tonnes et des dégradations spécifiques en $t.km^{-2}.mois^{-1}$

Station	Lakhdaria			La Traille			Beni Slimane			Mezahime			Dechemiya		
	Al	As	Ds	Al	As	Ds	Al	As	Ds	Al	As	Ds	Al	As	Ds
Septembre	5,6	110,2	30,5	3,5	100,3	39,1	0,5	14,3	51,0	1,8	143,6	217,0	0,4	13,5	162,2
Octobre	7,0	90,9	25,1	3,9	77,5	30,2	0,4	7,7	27,6	1,1	45,0	68,0	0,1	2,2	27,0
Novembre	13,5	435,8	120,5	6,4	180,6	70,4	0,5	8,9	31,5	1,0	34,7	52,5	0,2	4,1	49,4
Décembre	26,7	139,2	38,5	12,8	66,8	26,0	0,8	6,0	21,4	1,5	15,9	24,0	0,6	2,9	34,6
Janvier	45,8	392,6	108,6	22,2	172,7	67,3	1,4	10,0	35,7	2,1	30,7	46,4	1,0	4,1	49,4
Février	46,5	267,5	74,0	26,4	153,4	59,8	1,7	11,9	42,3	1,9	15,2	22,9	1,8	7,2	86,6
Mars	50,9	371,8	102,8	26,5	129,4	50,4	2,5	11,8	42,1	2,5	32,3	48,8	2,6	12,5	151,1
Avril	25,1	78,8	21,8	18,1	67,4	26,3	1,5	6,3	22,3	1,9	20,6	31,1	1,0	1,9	23,3
Mai	0,5	28,8	8,0	10,0	30,4	11,8	1,0	3,7	13,0	1,5	16,9	25,6	0,4	0,5	5,9
Juin	3,7	3,3	5,2	4,5	12,5	4,9	0,4	5,2	18,5	0,7	29,4	44,4	0,1	0,7	8,0
Juillet	1,6	18,9	5,2	2,7	6,0	2,3	0,2	4,5	15,9	0,8	42,9	64,8	0,1	2,3	27,5
Aout	0,9	2,0	0,6	2,3	6,3	2,5	0,6	42,8	152,2	0,4	16,0	24,2	0,1	1,1	13,8
Max	50,9	435,8	120,5	26,5	180,6	70,4	2,5	42,8	152,2	2,5	143,6	217,0	2,6	13,5	162,2
Min	0,5	2,0	0,6	2,3	6,0	2,3	0,2	3,7	13,0	0,4	15,2	22,9	0,1	0,5	5,9

1-2-1-Sous bassin de l'oued Isser Maritime : station de Lakhdaria

Les valeurs mensuelles des apports liquides et solides en suspension révèlent une forte variabilité mensuelle avec des coefficients de variation très élevés. Environ 75% de la charge solide est réalisée au cours de quatre mois seulement : novembre 22.64%, janvier 20.23%, février 13.78 et mars 19.16%. Pour les mois restants, l'apport solide est modeste à faible. La charge solide moyenne mensuelle la plus élevée 0.43 millions de tonnes est produite au cours du mois de novembre (fig 117). Ainsi, par exemple durant l'année hydrologique 1971/72, 53% de la charge solide annuelle en suspension ont été mesurés lors de la crue survenue les 27 et 28 novembre 1971, avec une concentration en MES égale à 76 g.l^{-1} et un débit liquide instantané de $1214 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ a produit un débit solide de 92932 kg.s^{-1} . la réponse du bassin en matière en suspension durant le mois de novembre est donc très élevée.

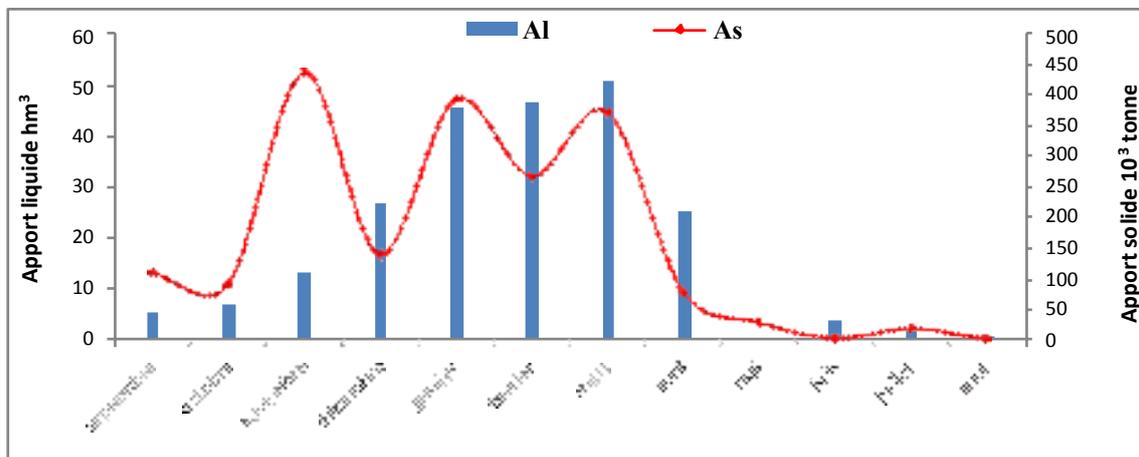


Figure 117: Variation mensuelle des apports liquides et solides au niveau de la station de Lakhdaria

1-2-2-Sous bassin d'oued Isser moyen : station de La Traille

Au niveau du bassin de l'oued Isser Moyen à la station de La Traille, pour la période de 1970/85, les mois de novembre, janvier, février et octobre ont une action érosive très active, avec plus de 63 % de la charge solide globale assurée. L'apport solide le plus élevé est toujours enregistré au mois de novembre 0.18 million de tonnes soit 18 % de l'apport global de l'année en moyenne. La fréquence des orages violents explique en grande partie la variabilité de la charge solide en suspension. La plus importante crue enregistrée durant ce mois, est celle survenue les 27 et 28 novembre 1971 avec un débit liquide de pointe égal à $428 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; la concentration en MES est élevée durant cette crue, elle atteint 69 g.l^{-1} .

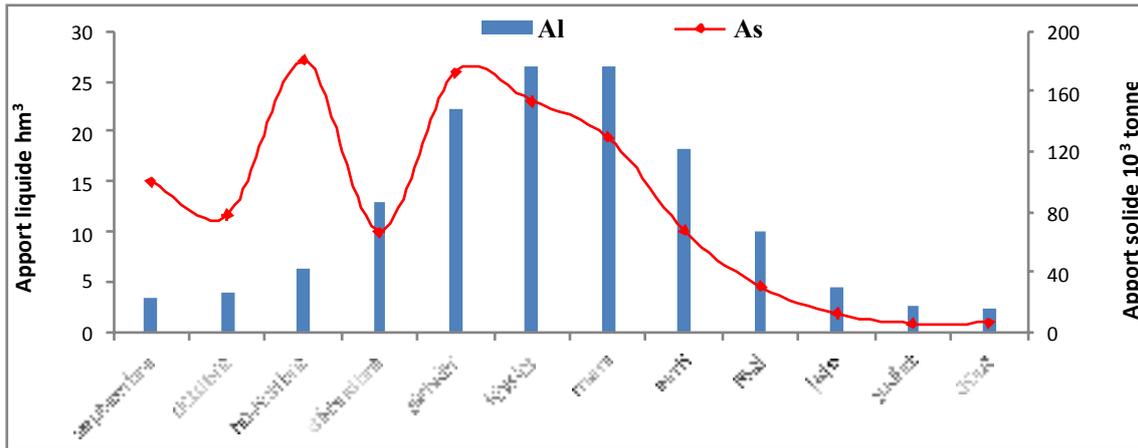


Figure 118: Variation mensuelle des apports liquides et solides au niveau de la station de La Traille

1-2-3-Sous bassin d'oued Mellah Ouest : station de Beni Slimane

Le bassin de l'oued El Mellah à la station de Beni Slimane situé dans le domaine des Hautes Plaines a un climat semi-aride, où l'action érosive est très marquée notamment en fin d'été et début d'automne. Pendant les mois d'août et septembre, l'action érosive est la plus active (fig 119). L'apport solide en suspension représente 32% du total annuel au mois d'août, et 10.76% au mois de septembre. En effet, après une saison sèche, les premières pluies très intenses avec un caractère orageux, tombent sur un sol particulièrement fragilisé, mal protégé par le couvert végétal, et facilement érodable, provoquent une érosion et un transport solide important. L'année hydrologique 2001/02, est caractérisée par la plus importante crue de la période, survenue les 24 et 25 août 2002 avec un débit de pointe de $508 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, qui a produit un apport solide en suspension de 1.28 millions de tonnes soit 99% de la charge annuelle.

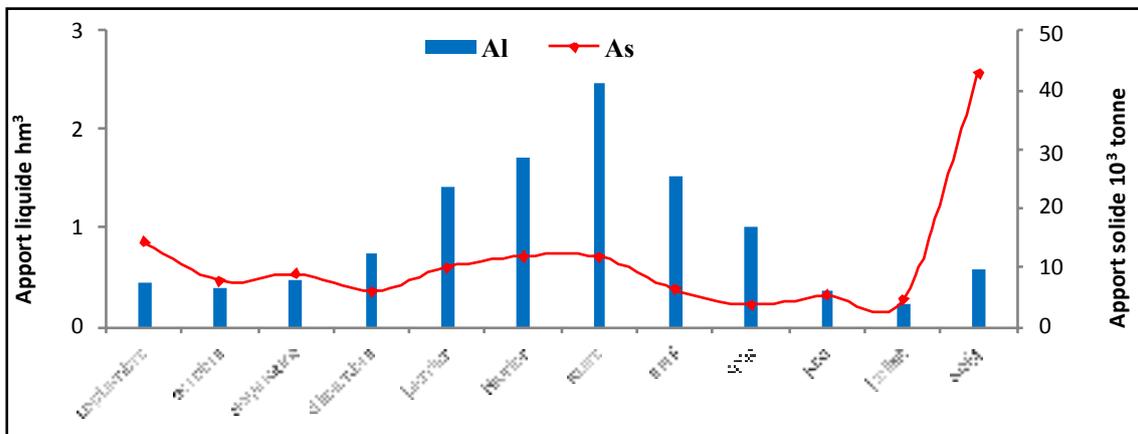


Figure 119: Variation mensuelle des apports liquides et solides au niveau de la station de Beni Slimane

1-2-4-Sous bassin Mellah Ouest Kherza : station de Mezahime

Au niveau de cette station, le mois de septembre assure près de 32.39% des apports solides annuels. Les crues sont responsables de la plus grande partie des transports solides en suspension du bassin versant. L'année 1993/94 est marquée par une crue avec une forte turbidité, enregistrée du 22 et 24 septembre 1993, où la concentration en MES égale 115 g l^{-1} pour un débit liquide instantané de $81 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Cette crue a produit un apport solide en suspension de 0.27 millions de tonnes, soit 71.59% de la charge annuelle.

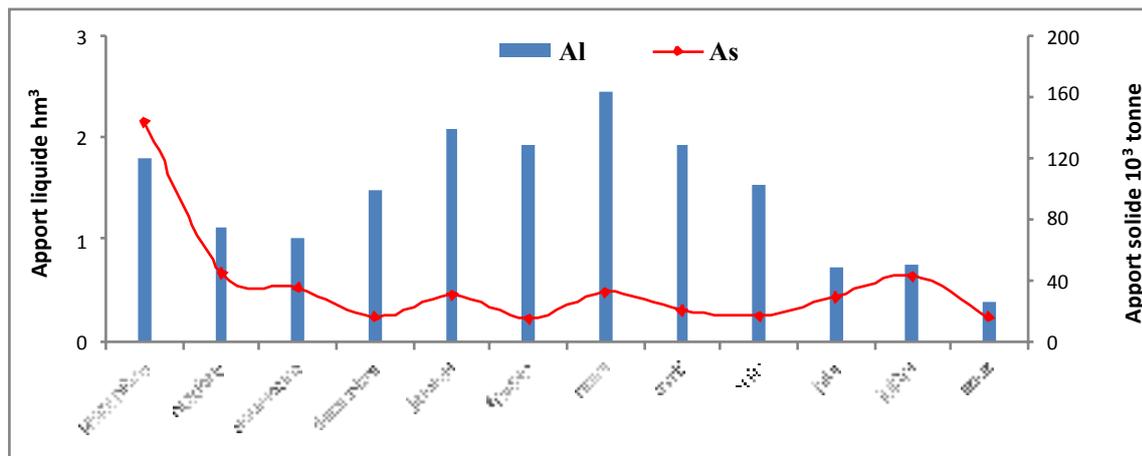


Figure 120: Variation mensuelle des apports liquides et solides au niveau de la station de Mezahime

1-2-5-Sous bassin d'oued Zeroua : station de Dechemiya

Le comportement du bassin de l'oued Zeroua à la station de Dechemiya diffère par rapport aux autres sous bassins, puisque c'est un petit bassin montagneux caractérisé par des pentes très fortes et par une superficie réduite, donc la réponse du bassin aux événements hydrologiques est très rapide. Les mois de septembre et mars sont responsables de 49% des apports solides en suspension de l'année. Le mois de septembre, malgré un apport liquide relativement faible, produit l'apport solide le plus élevé. L'érosion est active dès les premières pluies, qui, même si elles produisent un faible débit liquide peuvent véhiculer des apports solides élevés comme la crue du 19 et 20 septembre 1979 avec un débit de pointe de $258 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ qui a produit une charge en suspension de 0.11 millions de tonnes soit 78.37 % du tonnage annuel.

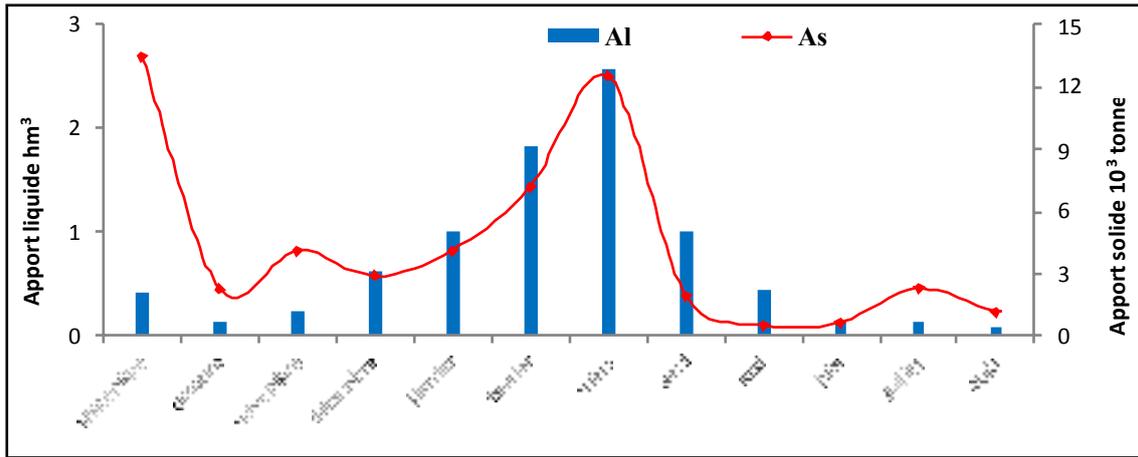


Figure 121: Variation mensuelle des apports liquides et solides au niveau de la station de Dechemiya

1-3- Variabilité saisonnière des apports liquides et solides

Pour mieux appréhender le phénomène de l'érosion et du transport solide en suspension, nous analysons la répartition saisonnière des flux hydro-sédimentaires dans les cinq sous bassins. Le tableau 59 représente les apports liquides moyens saisonniers et les apports solides correspondants au niveau de chaque sous bassin pour les différentes périodes d'étude.

Tableau 59: Valeurs des apports liquides moyens saisonniers en hm^3 , des apports solides moyens saisonniers en 10^3 tonnes

Station	Lakhdaria		La Traille		Beni Slimane		Mezahime		Dechemiya	
	Al	As	Al	As	Al	As	Al	As	Al	As
Automne	26,1	637,0	13,8	358,4	1,3	30,9	3,9	223,4	0,8	19,8
Hiver	119,0	799,3	61,5	392,9	3,9	27,9	5,5	61,8	3,5	14,2
Printemps	76,5	479,5	54,7	227,2	5,0	21,7	5,9	69,8	4,0	15,0
Eté	6,1	24,2	9,5	24,9	1,2	52,4	1,9	88,3	0,3	4,1
Max	119,0	799,3	61,5	392,9	5,0	52,4	5,9	223,4	4,0	19,8
Min	6,1	24,2	9,5	24,9	1,2	21,7	1,9	61,8	0,3	4,1

- **En Automne**

Les apports liquides moyens saisonniers représentent 11,4, 9,9, 21, 22,8 et 9 % respectivement pour les stations de Lakhdaria, La Traille, Beni Slimane, Mezahime et Dechemiya. Ces valeurs restent faibles par rapport aux saisons d'hiver et de printemps mais les apports ont véhiculé des charges en suspension importantes notamment pour les bassins de

l'Isser Supérieur dans le domaine des Hautes Plaines en climat semi-aride. Quant à l'automne, avec un apport liquide de trois fois et même quatre fois plus faible qu'en hiver et au printemps, l'apport solide représente 32.8%, 35.7%, 23%, 50.3% et 37% respectivement pour les stations de Lakhdaria, La Traille, Beni Slimane, Mezahime et Dechemiya. Ces quantités peuvent être attribuées à la disponibilité des sédiments en suspension, liées à la présence d'un stock important de sédiments en suspension, car après une saison sèche, le sol est particulièrement fragilisé, mal protégé par le couvert végétal donc facilement érodable, associées à des pluies pouvant être violentes et de courte durée. L'érosion et active dès les premières pluies qui, même si elles sont relativement faibles, peuvent véhiculer des concentrations des sédiments en suspension très élevées.

- **En hiver et au printemps**

D'après le tableau 59 et les figures 122 à 126, l'hiver et le printemps se distinguent par leurs apports liquides élevés, qui représentent 85, 83, 87, 66 et 87% du total annuel respectivement pour les stations de Lakhdaria, La Traille, Beni Slimane, Mezahime et Dechemiya.

Le rendement des apports solides en suspension en hiver est le plus élevé pour les bassins de l'oued Isser Moyen et Isser Maritime, du essentiellement à l'abondance hivernale des écoulements de crues. Dans le domaine des Hautes Plaines (Isser supérieur), le rendement des flux en suspension est faible. En effet, les eaux de ruissellements sont moins chargées en particules en suspension puisque la quasi-totalité des sédiments des lits et des versants a été transportée lors des premières crues de la saison d'automne.

Au printemps, pour les stations de Mezahime et Dechemiya, les apports solides du printemps contribuent en seconde position après l'automne mais avant l'hiver. L'explication possible est la relative forte fréquence des crues du printemps. Par ailleurs, le printemps se caractérise par les mouvements de masse et l'effondrement des berges.

- **En Été**

L'été reste une saison sèche correspondant au régime d'étéage, avec des pluies et des crues plus rares. Cette saison représente 3%, 7%, 10%, 10% et 4% des apports liquides globaux respectivement pour les stations de Lakhdaria, La Traille, Beni Slimane, Mezahime et Dechemiya. Ces valeurs sont faibles à nulles sans conséquence généralement sur le transport solide. Mais parfois des orages estivaux ramènent des quantités considérables de

matières en suspension. L'action érosive de cette saison est bien marquée au niveau des bassins situés dans le domaine des Hautes Plaines à climat semi-aride. C'est le cas du bassin de l'oued Mellah Ouest à la station de Beni Slimane, où trois orages exceptionnels du mois d'août ont produit des apports solides très importants : la crue des 24 et 25 août 2002 avec un débit de pointe de $508 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ qui a généré un apport liquide de 14.27 hm^3 et un apport solide de 1.28 millions de tonnes ; la crue du 28 août 1976 avec un débit de pointe de $82.84 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, un apport liquide de 0.50 hm^3 et une charge solide de 14163 tonnes ; la crue du 23 août 1981 avec un débit de pointe de $94.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, un volume d'eau de 0.63 hm^3 et un apport solide en suspension de 19171 tonnes.

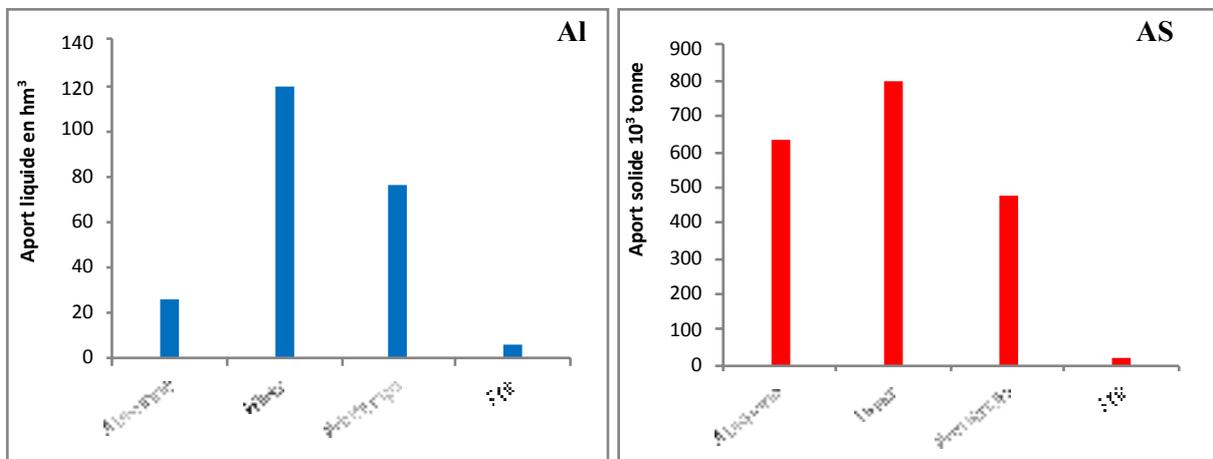


Figure 122: Répartition saisonnière des apports liquides et solides au niveau de la station de Lakhdaria (1970/2010)

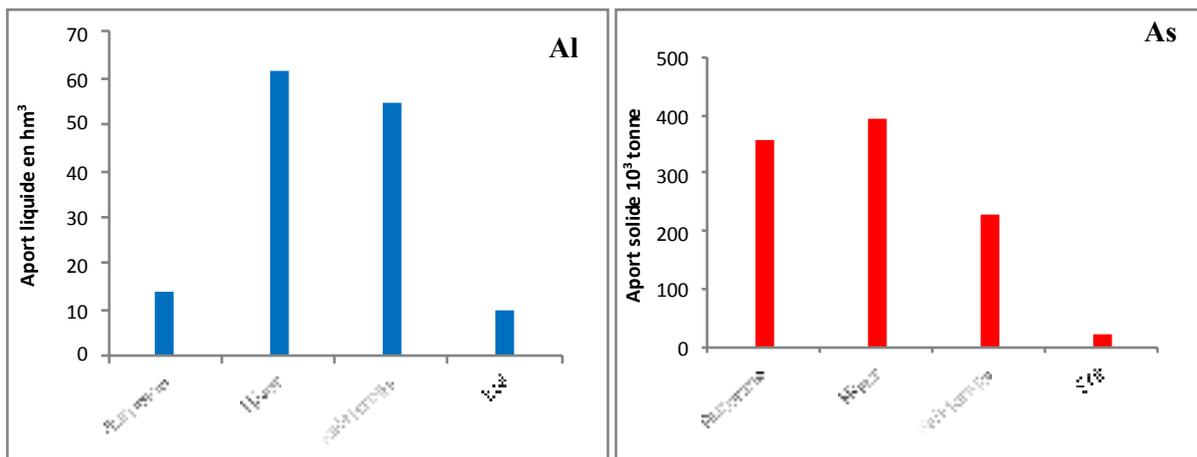


Figure 123: Répartition saisonnière des apports liquides et solides au niveau de la station de La Traille (1970/1985)

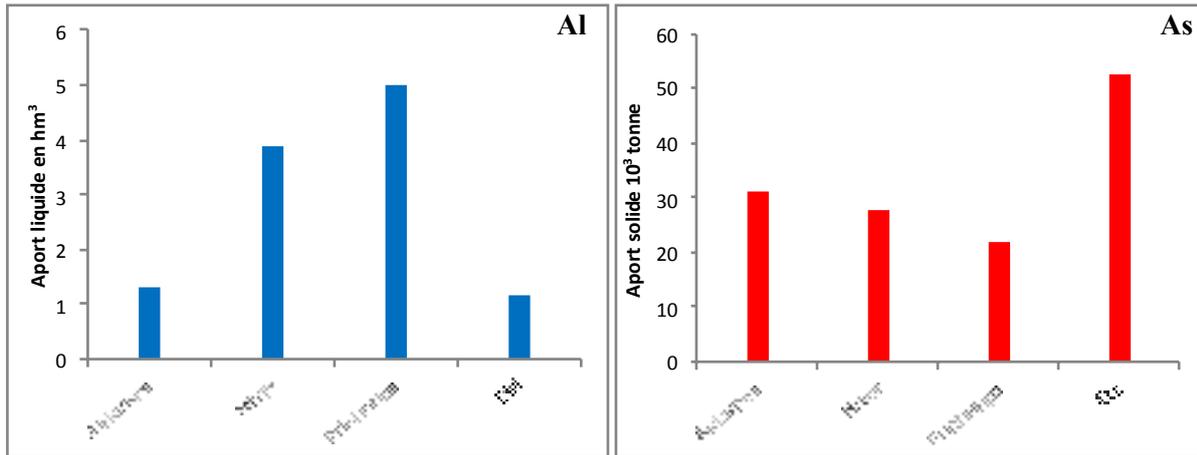


Figure 124: Répartition saisonnière des apports liquides et solides au niveau de la station de Beni Slimane (1973/2009)

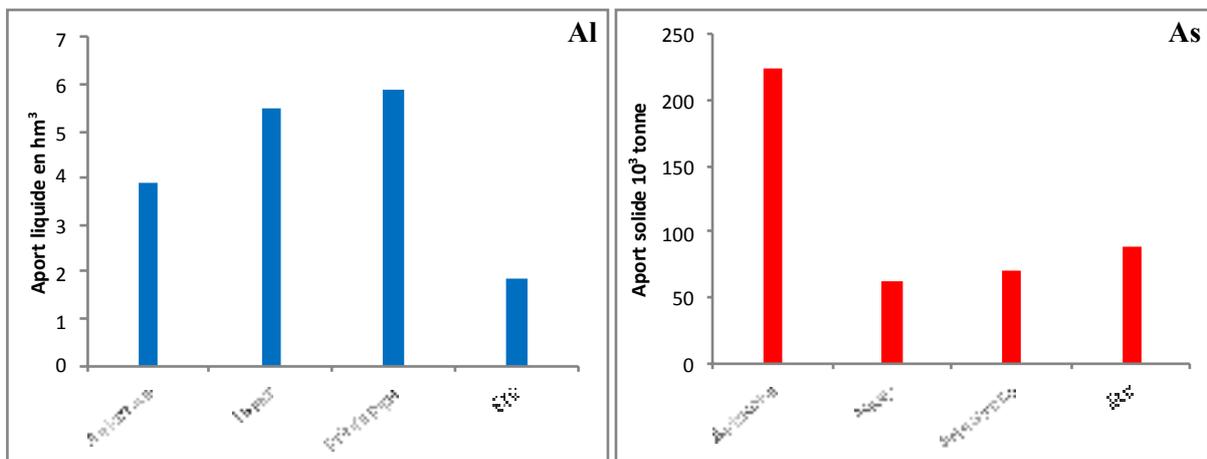


Figure 125: Répartition saisonnière des apports liquides et solides au niveau de la station de Mezahime (1973/1994)

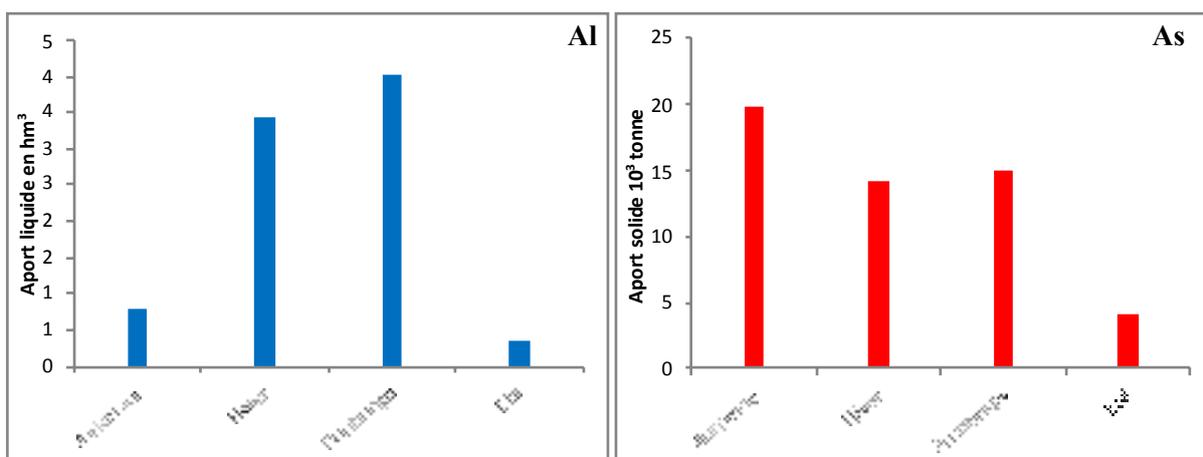


Figure 126: Répartition saisonnière des apports liquides et solides au niveau de la station de Dechemiya (1972/1985)

2- Variabilité spatiale des apports solides en suspension

Le tableau 60 présente l'apport solide en suspension et les dégradations spécifiques moyennes interannuel au niveau des différents sous-bassins pour les différentes périodes d'étude : période d'étude propre à chaque station et également la période commune pour toutes les stations (1973/74-1984/85).

Tableau 60: Apport solide en suspension moyen annuel en MT et taux d'érosion des bassins d'étude pour différentes périodes

Stations	Lakhdaria		La Traille		Beni Slimane		Mezahime		Dechemiya	
	1970/10	1973/85	1970/85	1973/85	1973/09	1973/85	1973/94	1973/85	1972/85	1973/85
As (MT)	1.88	1.82	1	0.71	0.12	0.10	0.44	0.52	0.05	0.048
D.S t.km ⁻² .an ⁻¹	524	504	391	278	445	370	668	795	617	522

Pour la période commune aux cinq bassins, (1973/74-1984/85), l'apport solide moyen interannuel est de 1.82, 0.71, 0.52, 0.10 et 0.048 millions de tonnes respectivement pour les stations Lakhdaria, La Traille, Mezahime, Beni Slimane et Dechemiya (tableau .60).

On remarque, l'effet de la surface de drainage des bassins sur la production des charges en suspension. L'apport solide en suspension est relié positivement à la surface du bassin versant avec un coefficient de corrélation de 0,99 (fig 127).

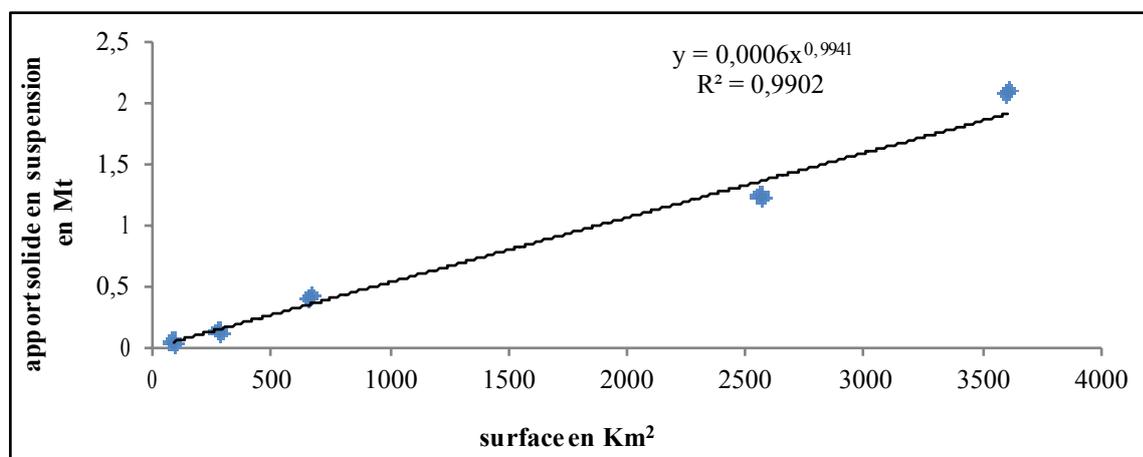


Figure 127: Relation entre la superficie et l'apport solide en suspension dans les sous-bassins de l'oued Isser pour la période de (1973/74-1984/85)

La figure 128 montre que la variabilité spatiale des apports solides en suspension de l'amont vers l'aval pour le bassin de l'oued Isser est semblable à la variation spatiale de débit liquide. L'apport solide en suspension moyen annuel augmente d'une façon très nette de l'amont vers l'aval, il passe de 0.04 million de tonnes pour le bassin de l'oued Zaroua (83 km²) à 1.82 million de tonnes pour le bassin de l'oued Isser Maritime (3611 km²).

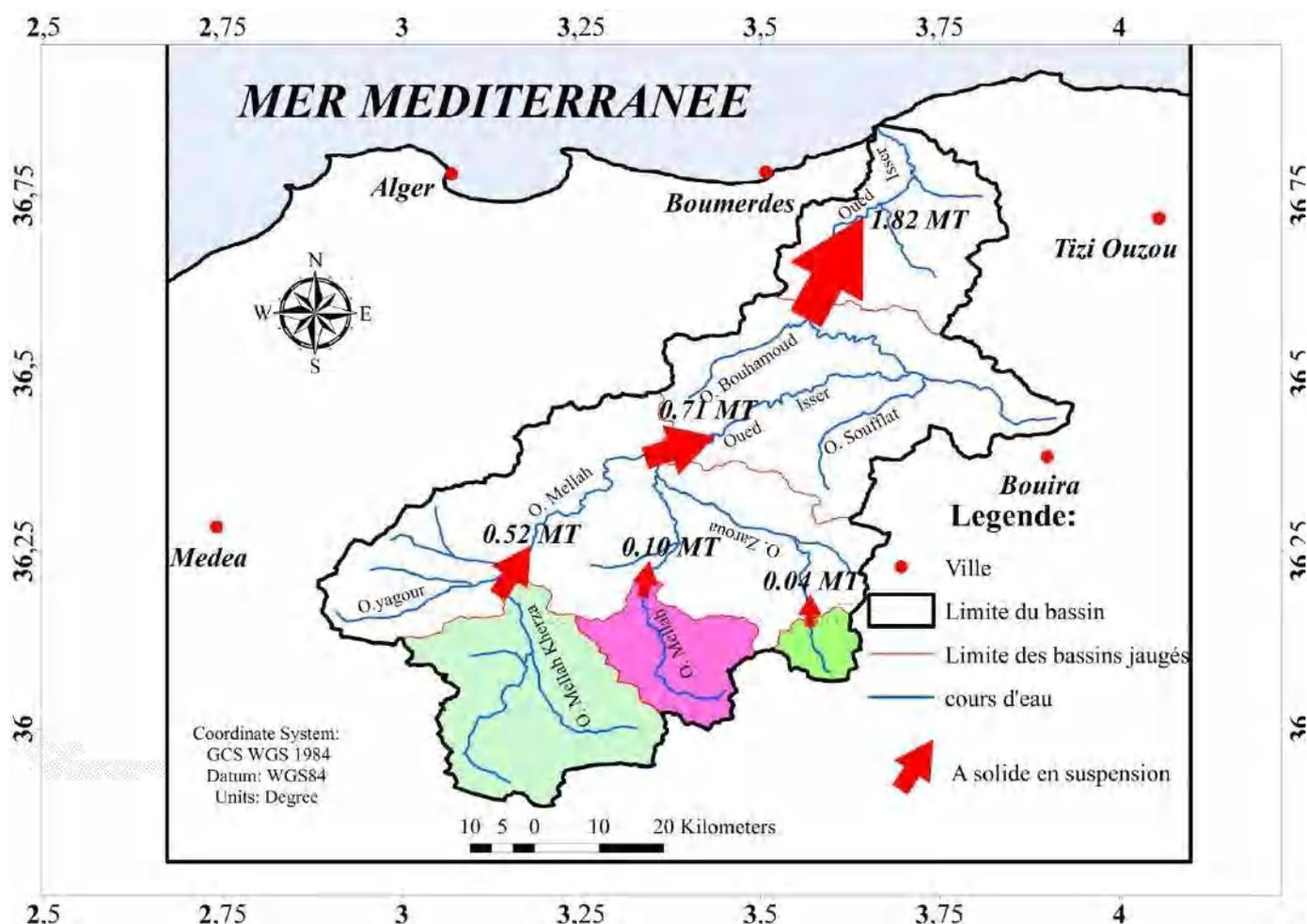


Figure 128: Variabilité spatiale des apports solides en suspension moyens interannuels, bassin de l'oued Isser pour la période de (1973/74-1984/85)

3- Variabilité spatiale de la dégradation spécifique

La dégradation spécifique moyenne interannuelle est de 504, 278, 370, 795 et 522 t.km⁻².an⁻¹ respectivement au niveau des stations hydrométriques de Lakhdaria, La Traïlle, Beni Slimane, Mezahime et Dechemiya pour la période de 1973/74-1984/85 (fig. 129).

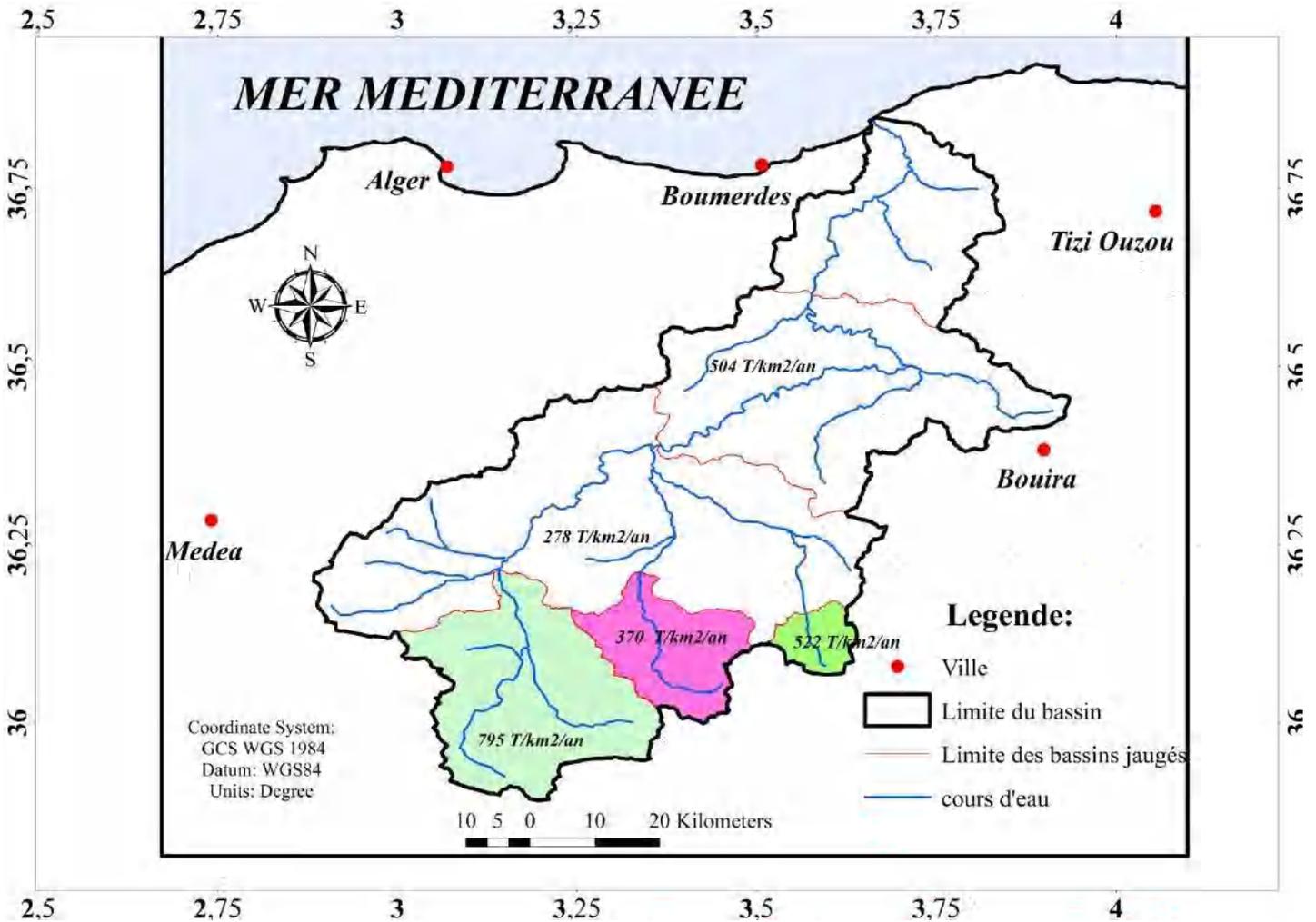


Figure 129: Variabilité spatiale des dégradations spécifiques moyennes inter-annuelles au niveau du bassin de l'oued Isser pour la période de (1973/74-1984/85)

La figure 130 montre une relation négative entre la superficie des bassins versants et la dégradation spécifique avec un coefficient de corrélation de -0.28.

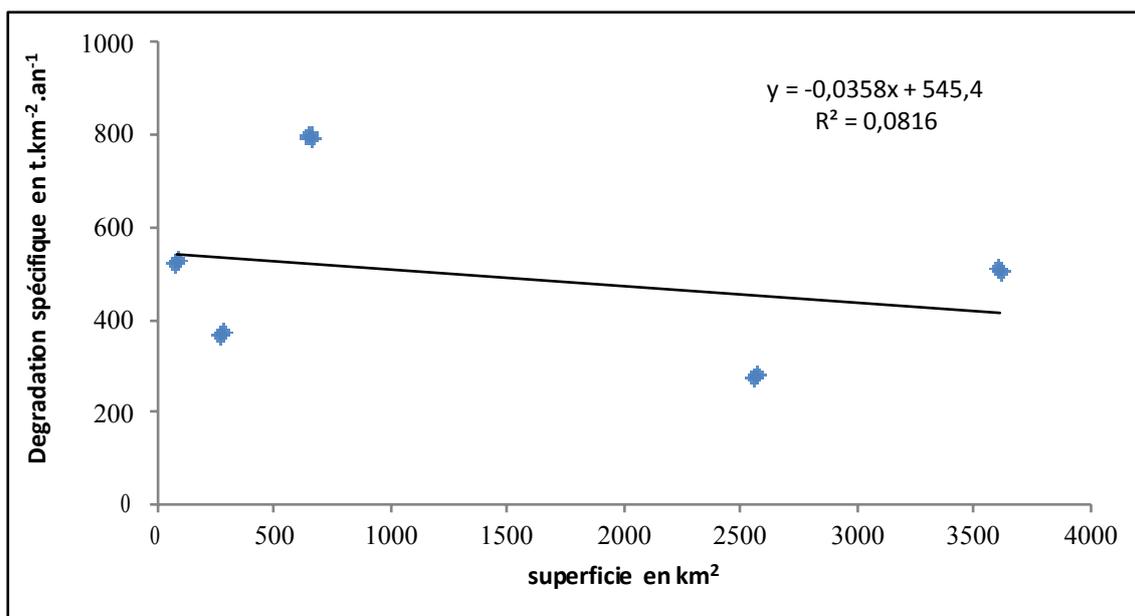


Figure 130: Relation entre la superficie et la dégradation spécifique dans le bassin versant de l'oued Isser pour la période de (1973/74-1984/85)

Milliman et Syvitski (1992), à partir d'une étude sur 280 rivières mondiales recouvrant toutes les tailles de bassins ont montré que les taux spécifiques de MES sont inversement corrélés avec la taille des bassins versants.

Cependant, la surface des bassins n'explique pas à elle-seule la variabilité spatiale de la dégradation spécifique. Les facteurs qui contrôlent la dégradation spécifique et sa variabilité spatiale sont la lithologie, la topographie, le couvert végétal et l'occupation des sols.

4- Contribution des crues à la production des flux en matière en suspension

Les événements de crues sont responsables du transport de la majorité des sédiments en suspension. Megnounif et Ouillon (2013), ont montré, pour le bassin de l'oued Sebdou, que cinq crues seulement pouvaient exporter 64% du flux total de sédiments au cours de la période 1973-2004.

La figure 131 illustre l'importance des événements de crue sur le flux total annuel. L'apport solide cumulé de MES durant l'année est reporté en fonction de la progression des jours de l'année 1971/72 au niveau des stations de Lakhdaria et La Traille, 1979/80 au niveau des stations de Beni Slimane et Dechemiya et de l'année 1985/86 au niveau de la station de Mezahime. L'analyse de deux exemples montre :

-Station de Beni Slimane : jusqu'à 18 septembre 1979/80 (18^{ème} jour), le flux en MES total est faible autour de 5267 tonnes. L'évènement des 19 et 20 septembre (19^{ème} au 20^{ème}

jour) a contribué avec 1935135 tonnes. Cette crue de 2 jours (soit 0.45% du temps), contribue pour plus de 90% du flux total de l'année.

-Station de Lakhdaria : On remarque que, jusqu'en novembre 1971/72 (86^{ème} jour), l'apport solide est faible autour de 1.41 millions de tonnes et ce sont deux événements, l'un daté du 26 au 27 novembre (87^{ème} au 88^{ème} jour) et l'autre du 18 au 20 janvier (140^{ème} au 142^{ème} jour) qui ont contribué fortement à l'apport final de 18.8 million de tonnes. L'association de ces deux épisodes, dont la durée totale est de 5 jours (soit 1.36 % du temps de l'année), a contribué pour plus de 66% du flux total, soit 12.33 millions de tonnes.

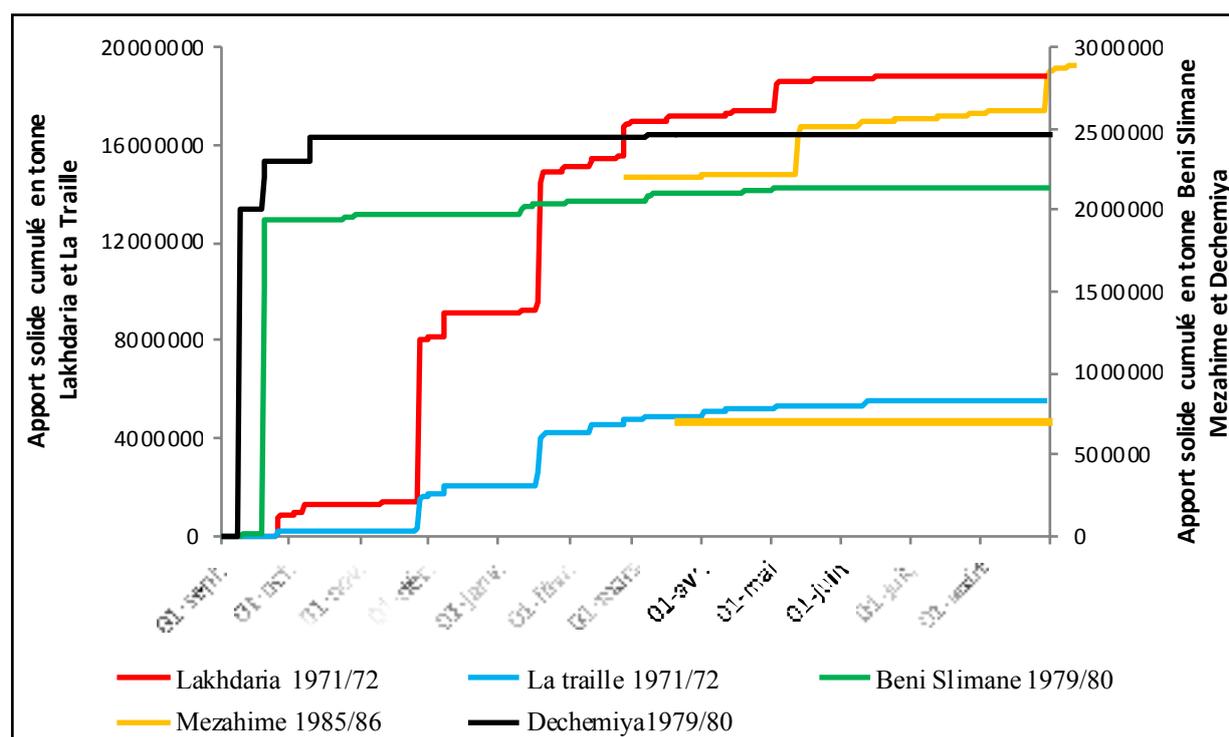


Figure 131: Evolution des apports solides en suspension annuels au niveau des stations hydrométriques et importance des crues: Lakhdaria (1971/72), La Traille (1971/72), Beni Slimane (1979/80), Mezahime (1985/86) et Dechemiya (1979/80)

La figure 131 montre qu'une grande partie de l'apport solide en suspension interannuel est fourni pendant un nombre faible de jours.

D'importantes quantités de transport en MES ont pu être observées sur toute l'année et sont conséquents à des événements hydrologiques extrêmes et brefs.

La contribution des plus importantes crues à l'apport solide en suspension annuel est fournie par les tableaux 61 à 65. Les valeurs journalières des apports solides en suspension sont obtenues à partir des régressions saisonnières.

Tableau 61: Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (station de Lakhdaria)

Année	Apport (MT)	Crue	Saison	Apport de la crue (MT)	Taux annuel (%)	
1970/71	0.28	13-14 oct 1970	Automne	0.030	10.92	44
		2-7 jan 1971	Hiver	0.041	14.71	
		1-3 avri 1971	printemps	0.050	17.91	
1971/72	18.55	27-28 nov 1971	Automne	9.74	52.54	89
		19-24 jan 1972	Hiver	6.78	36.57	
1972/73	7.42	31 dec-2 jan 1973	Hiver	1.92	25.89	57
		3-6 fév 1973	Hiver	2.31	31.13	
1973/74	8.36	29 mars-2 avril 1974	printemps	6.86	82	82
1974/75	1.02	24-26 nov 1974	Automne	0.41	40.07	85
		16-18 fév 1975	Hiver	0.25	25.12	
		21-24 mars 1975	printemps	0.20	20.24	
1975/76	2.25	4-5 nov 1975	Automne	0.49	21.91	70
		6-13 fév 1976	Hiver	0.87	39.08	
1976/77	0.53	18-23 nov 1976	Automne	0.11	20.89	48
		23-27 déc 1976	Hiver	0.14	26.78	
1977/78	0.32	6-8 mars 1978	printemps	0.04	14.5	75
		3-14 avril 1978	printemps	0.19	60.14	
1978/79	1.69	25 fév-7 mars 1979	Printe+ Hiver	1.34	80	80
1979/80	3.23	20-21 sep 1979	Automne Hiver	1.29	39.98	58
		11-12 jan 1980	Automne Hiver	0.59	18.42	
1980/81	1.04	17-22 déc 1980	Hiver	0.67	64.94	65
1981/82	0.036	10-20 mai 1982	Eté	0.011	32.18	84
		31 mai-4 juin 1982	Eté	0.018	51.59	
1982/83	1.87	30-31 oct 1982	Automne	0.25	13.74	65
		16-18 nov 1982	Automne	0.51	27.39	
		24-28 déc 1982	Hiver	0.44	23.48	
1983/84	0.19	2-5 fév 1984	Hiver	0.065	33.65	57
		15-25 fév 1984	Hiver	0.045	23.62	
1984/85	1.30	11-12 oct 1984	Automne	0.37	28.98	72
		29-31 déc 1984	Hiver	0.15	12.21	
		7-12 mars 1985	printemps	0.40	31.24	
1985/86	0.66	6-10 mars 1986	printemps	0.48	72.84	73
1986/87	1.75	10-12 déc 1986	Hiver	0.16	9.57	57
		5-7 fév 1987	Hiver	0.30	17.09	
		13-24 fév 1987	Hiver	0.53	30.65	
1987/88	0.14	11-12 oct 1987	Automne	0.041	28.69	84
		15-17 nov 1987	Automne	0.053	36.33	
		6-8 mars 1988	printemps	0.028	19.28	
1988/89	0.70	14-17 sep 1988	Automne	0.064	9.18	84
		8-15 déc 1988	Hiver	0.52	74.95	
1989/90	0.76	17 juil 1990	Eté	0.66	85.85	86
1990/91	0.40	12 déc 1990	Hiver	0.033	8.29	54
		21-22 fév 1991	Hiver	0.18	45.58	
1991/92	1.42	25-28 jan 1992	Hiver	0.56	39.79	76
		9-11 avril 1992	printemps	0.52	36.63	
1992/93	0.55	3-5 nov 1992	Automne	0.44	80.60	81
1993/94	0.32	24-25 sept 1993	Automne Hiver	0.029	9.17	72
		20-22 jan 1994	Automne Hiver	0.20	62.85	
1994/95	2.86	13-17 oct 1994	Automne	0.65	22.84	73
		7-17 jan 1995	Hiver	1.44	50.35	
1995/96	0.79	6-8 fév 1996	Hiver	0.086	10.97	74
		28-29 fév 1996	Hiver	0.41	52.56	
		26-29 avril 1996	printemps	0.083	10.54	
1996/97	0.035	2-3 sep 1996	Automne	0.004	13.95	86
		22-23 avril 1997	printemps	0.003	9.41	
		25-26 aout 1997	Eté	0.02	62.86	
1997/98	2.10	17-20 sep 1997	Automne	0.93	44.38	74
		23 nov 1997	Automne	0.63	30	
1998/99	0.52	24-25 sep 1998	Automne	0.10	21	57
		26-30 nov 1998	Automne	0.10	20.30	

		2-7 fév 1999	Hiver	0.078	15.31	
1999/2000	0.37	19-23 déc 1999	Hiver	0.36	95.19	95
2000/01	0.99	26-27 oct 2000	Automne	0.35	35.84	88
		14-15 jan 2001	Hiver	0.17	17.16	
		29-31 jan 2001	Hiver	0.34	34.51	
2001/02	0.0036	17-19 jan 2002	Hiver	0.0005	14.02	67
		31 mai-2 juin 2002	Pri+ Eté	0.00051	14.10	
		26-28 aout 2002	E	0.0014	40.54	
2004/05	1.67	14 nov 2004	Automne	0.12	7.69	54
		30 déc-1 jan 2005	Hiver	0.40	24.25	
		15-24 fév 2005	Hiver	0.36	21.99	
2005/06	0.57	15 oct 2005	Automne	0.07	12.42	67
		30 jan-6 fév 2006	Hiver	0.11	20.48	
		23 fév-3 mars 2006	Hiver+print	0.19	34.21	
2006/07	3.09	8-13 mars 2007	printemps	2.34	75.87	76
2007/08	3.13	23 sep 2007	Automne	0.48	15.44	99
		30 oct 2 nov 2007	Automne	1.05	33.50	
		26-30 nov 2007	Automne	1.56	49.82	
2008/09	0.25	13-23 jan 2009	Hiver	0.12	47.42	64
		27-30 jan 2009	Hiver	0.022	8.74	
		11-14 avril 2009	printemps	0.019	7.53	
2009/2010	0.16	29 sep-3 oct 2009	Automne	0.014	8.89	68
		9-10 nov 2009	Automne	0.030	18.29	
		12-16 jan 2010	Hiver	0.012	7.40	
		27 jan 2010	Hiver	0.011	7.12	
		8-15 mars 2010	printemps	0.043	26.24	

Tableau 62: Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (station de La traillé)

Année	Apport (MT)	Crue	Saison	Apport de la crue (MT)	Taux annuel (%)	
1970/71	0.13	13 octobre 1970	Automne	0.019	14.09	44
		18-21 janvier 1971	Hiver	0.011	8.45	
		1-3 avril 1971	Printemps	0.029	21.17	
1971/72	3.65	27-29 novembre 1971	Automne	1.21	33.63	69
		18-28 janvier 1972	Hiver	1.27	34.91	
1972/73	2.69	26-28 septembre 1972	Automne	0.25	9.53	46
		31 déc-3 janvier 1973	Hiver	0.60	23.06	
		17-24 février 1973	Hiver	0.35	13.05	
1973/74	2.01	24-25 septembre 1973	Automne	0.42	20.88	65
		23-24 février 1974	Hiver	0.24	12.32	
		30 mars-5 avril 1974	Printemps	0.63	31.61	
1974/75	0.68	24-25 novembre 1974	Automne	0.26	37.91	77
		16-18 février 1975	hiver	0.14	20.77	
		21-25 mars 1975	printemps	0.12	17.98	
1975/76	0.84	23-24 septembre 1975	Automne	0.087	10.33	66
		4 novembre 1975	Automne	0.19	23.22	
		6-16 février 1976	hiver	0.27	32.53	
1976/77	0.21	6-7 septembre 1976	Automne	0.028	12.75	30
		18-22 novembre 1976	Automne	0.035	16.36	
1977/78	0.12	23-25 novembre 1977	Automne	0.015	12.64	75
		5-7 mars 1978	Printemps	0.014	12.24	
		3-10 avril 1978	Printemps	0.060	50.31	
1978/79	0.58	25 fév-10 mars 1979	Hiver+prin	0.44	76.60	77
1979/80	1.51	20 septembre 1979	Automne	0.42	28.23	59
		15-18 novembre 1979	Automne	0.16	11.19	
		11-16 janvier 1980	Hiver	0.29	19.31	
1980/81	0.25	17-21 décembre 1980	Hiver	0.097	38.09	47
		28 déc-2 janvier 1981	Hiver	0.022	8.59	
1981/82	0.42	22-23 décembre 1981	Hiver	0.032	7.60	60
		23 jan-1 février 1982	Hiver	0.18	44.30	
		26-28 février 1982	Hiver	0.036	8.47	
1982/83	0.83	29-31 octobre 1982	Automne	0.13	15.58	68

Chapitre 8: Quantification des transports en MES et envasement des barrages

		16-18 novembre 1982 25-28 décembre 1982	Automne hiver	0.34 0.098	40.81 11.83	
1983/84	0.16	2-17 février 1984 10-17 mars 1984	Hiver Printemps	0.071 0.019	44.41 11.94	56
1984/85	0.90	10-11 octobre 1984 4-6 décembre 1984 7-10 mars 1985	Automne Hiver printemps	0.63 0.044 0.061	70.73 4.93 6.82	82

Tableau 63: Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (station de Beni Slimane)

Année	Apport (MT)	Crue	Saison	Apport de la crue (MT)	Taux annuel (%)	
1973/74	0.14	24-25 septembre 1973 23-25 février 1974 29 mars-6 avril 1974	Automne Hiver printemps	0.014 0.013 0.075	9.71 9.40 52.27	71
1974/75	0.071	15 septembre 1974 24-25 novembre 1974 16-18 février 1975 21-24 mars 1975	Automne Automne Hiver Printemps	0.012 0.015 0.0098 0.087	18.09 21.18 13.73 12.27	65
1975/76	0.22	4 novembre 1975 17 novembre 1975 5-12 février 1976 28-29 août 1976	Automne Automne Hiver Eté	0.026 0.0091 0.054 0.016	11.97 4.10 24.36 7.51	48
1976/77	0.083	6-7 septembre 1976 18 novembre 1976 6-9 janvier 1977 15 août 1977	Automne Automne Hiver Eté	0.020 0.0043 0.0077 0.0073	24.63 5.18 9.31 8.79	48
1977/78	0.043	23-24 novembre 1977 7-8 avril 1978 16-17 mai 1978 1 juin 1978	Automne Printemps Printemps Eté	0.0064 0.0032 0.0045 0.013	14.85 7.37 10.53 31.93	65
1978/79	0.10	20 octobre 1978 22 janvier 1979 25 fév-10 mars 1979	Automne Hiver Hiver+prin	0.0061 0.0069 0.058	5.92 6.78 56.62	69
1979/80	0.41	19-20 septembre 1979 11 janvier 1980	Automne Hiver	0.27 0.016	66.03 4.03	70
1980/81	0.096	18-22 décembre 1980 13-24 février 1981 23 août 1981	Hiver Hiver Eté	0.014 0.016 0.019	15.12 17.40 19.83	52
1984/85	0.040	10-11 octobre 1984 6-9 janvier 1985 8-12 mars 1985	Automne Hiver Printemps	0.0082 0.0043 0.0027	20.22 10.74 6.80	38
1985/86	0.11	18-19 septembre 1985 28 septembre 1985 6-12 mars 1986 19-23 mars 1986	Automne Automne Printemps printemps	0.0083 0.0086 0.057 0.009	7.37 7.67 51.07 7.96	74
1986/87	0.17	16 octobre 1986 27-28 décembre 1986 31 janvier 7 février 1987 13-16 février 1987	Automne Hiver Hiver Hiver	0.015 0.0089 0.035 0.011	9.36 5.26 21.12 6.81	43
1987/88	0.0025	15 mai 1988	Printemps	0.0011	45.38	45
1988/89	0.023	15 septembre 1988 13 octobre 1988 8-11 décembre 1988 14 décembre 1988	Automne Automne Hiver Hiver	0.0032 0.0013 0.0039 0.010	14.04 5.64 16.96 44.60	81
1989/90	0.11	4-5 septembre 1989 5 juin 1990 16 juillet 1990 5 août 1990	Automne Eté Eté Eté	0.012 0.025 0.052 0.013	10.31 21.18 44.58 11.15	87
1990/91	0.047	18 octobre 1990 21 février 1991	Automne Hiver	0.0079 0.0030	16.63 6.42	23
1991/92	0.129	5 octobre 1991 26-28 janvier 1992	Automne Hiver	0.0076 0.033	5.89 25.97	46

Chapitre 8: Quantification des transports en MES et envasement des barrages

		9-11 avril 1992	Printemps	0.017	13.77	
1992/93	0.122	3-4 novembre 1992	Automne	0.036	29.72	46
		9-10 novembre 1992	Automne	0.0080	6.61	
		1-4 août 1993	Été	0.012	10.08	
1993/94	0.030	10 septembre 1993	Automne	0.0057	18.67	86
		23 septembre 1993	Automne	0.014	48.21	
		20 janvier 1994	Hiver	0.006	19.47	
1994/95	0.20	27-30 septembre 1994	Automne	0.012	6.04	46
		12+16 octobre 1994	Automne	0.057	28.56	
		18-22 janvier 1995	Hiver	0.023	11.47	
1995/96	0.14	9 octobre 1995	Automne	0.012	8.31	47
		16 juin 1996	Été	0.027	18.49	
		14-15 juillet 1996	Été	0.029	20.41	
1996/97	0.017	15-17 octobre 1996	Automne	0.0017	10.17	25
		17-19 novembre 1996	Automne	0.0015	8.75	
		17-19 mai 1997	Printemps	0.0010	6.22	
1999/2000	0.012	19-20 décembre 1999	Hiver	0.010	86.06	92
		25 mai 2000	Printemps	0.00076	6.27	
2000/01	0.024	29 jan - 5 février 2001	Hiver	0.0082	33.09	44
		15-19 février 2001	Hiver	0.0015	6.29	
		27 avril 2001	Printemps	0.0011	4.71	
2001/02	1.29	24-25 août 2002	Été	1.28	99.05	99
2002/03	0.31	30 novembre - 5 déc 2002	Hiver	0.13	44.37	64
		24-27 janvier 2003	Hiver	0.0311	9.92	
		4-5 février 2003	Hiver	0.0310	9.88	
2003/04	0.11	24-25 septembre 2003	Automne	0.015	12.97	56
		14-17 octobre 2003	Automne	0.050	43.33	
2004/05	0.015	13-15 novembre 2004	Automne	0.0044	28.03	43
		31 décembre-3 jan 2005	Hiver	0.0010	6.31	
		5-10 mai 2005	Printemps	0.0013	8.62	
2005/06	0.030	29 jan-3 février 2006	Hiver	0.0035	11.67	33
		24 fév-10 mars 2006	Hiver+print	0.0066	21.72	
2006/07	0.025	12-13 septembre 2006	Automne	0.0070	28.06	63
		8-13 mars 2007	Printemps	0.0086	34.50	
2007/08	0.016	21-23 septembre 2007	Automne	0.0018	10.87	53
		3 octobre 2007	Automne	0.0010	6.39	
		1-2 novembre 2007	Automne	0.00095	5.63	
		27-30 novembre 2007	Automne	0.0050	29.87	
2008/09	0.025	30 septembre 2008	Automne	0.0049	19.48	39
		14-15 octobre 2008	Automne	0.0025	10.16	
		5-7 mars 2009	printemps	0.0023	9.39	

Tableau 64: Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (station de Mezahime)

Année	Apport (MT)	Crue	Saison	Apport de la crue (MT)	Taux annuel (%)	
1973/74	0.72	24-25 sep 1973	Automne	0.15	21.71	69
		29 mars-4 avril 1974	Printemps	0.28	39.34	
		13-14 juin 1974	Été	0.058	8.06	
1974/75	0.59	15-16 sep 1974	Automne	0.062	10.54	72
		20-22 sep 1974	Automne	0.24	41.33	
		14-15 oct 1974	Automne	0.088	14.99	
		11 juin 1975	Été	0.030	5.15	
1975/76	0.79	9 sep 1975	Automne	0.042	5.31	36
		23-24 sep 1975	Automne	0.061	7.66	
		6-10 fév 1976	Hiver	0.077	9.70	
		28-29 mai 1976	Printemps	0.052	6.53	
		28-29 août 1976	Été	0.053	6.73	
1976/77	0.29	6-7 sep 1976	Automne	0.12	43.52	61
		4-5 nov 1976	Automne	0.0180	6.19	
		18 nov 1976	Automne	0.0184	6.35	
		15-16 août 1977	Été	0.014	5.08	
1977/78	0.15	22-24 nov 1977	Automne	0.054	35.66	67

Chapitre 8: Quantification des transports en MES et envasement des barrages

		5-6 mars 1978 3 avril 1978 1 juin 1978	Printemps Printemps Eté	0.012 0.016 0.019	8.28 10.68 12.84	
1978/79	0.34	18-20 octo 1978 22-25 jan 1979 2-6 mars 1979 6-7 juin 1979	Automne Hiver Printemps Eté	0.040 0.067 0.042 0.11	11.67 19.45 12.11 32.94	76
1979/80	2.002	19-20 sep 1979 24-27 oct 1979	Automne Automne	1.55 0.10	77.50 5.13	83
1980/81	0.30	24-26 sep 1980 18-21 déc 1980 27 juin 1981 23 aout 1981	Automne Hiver Eté Eté	0.023 0.055 0.029 0.11	7.66 18.04 9.40 37.37	72
1981/82	0.52	22-23 déc 1981 27-30 jan 1982 18 avril 1982 3 juin 1982 9-10 juin 1982	Hiver Hiver Printemps Eté Eté	0.096 0.10 0.027 0.033 0.037	18.49 19.93 5.32 6.35 7.11	57
1982/83	0.41	12 sep 1982 30 octo 1982 16-18 nov 1982 26-27 déc 1982 4-5 juillet 1983	Automne Automne Automne Hiver Eté	0.071 0.031 0.10 0.032 0.063	13.33 7.67 25.79 7.85 15.29	74
1983/84	0.071	23-27 nov 1983 2-5 fév 1984 3-5 juin 1984	Automne Hiver Eté	0.010 0.0085 0.0072	14.80 12.04 10.18	37
1984/85	0.89	11-12 oct 1984 11-13 nov 1984 11 fév 1985	Automne Automne Hiver	0.0085 0.0068 0.0081	9.50 7.57 9.10	26
1985/86	0.34	17-18 nov 1985 30-31 jan 1986 6-9 mars 1986	Automne Hiver Printemps	0.087 0.018 0.12	25.30 5.30 36.17	67
1986/87	0.37	8-12 oct 1986 16-17 oct 1986	Automne Automne	0.17 0.042	47.55 11.21	59
1987/88	0.14	16-17 sep 1987 11-13 oct 1987 10-15 nov 1987 23-24 juin 1988	Automne Automne Automne Eté	0.009 0.034 0.035 0.010	6.44 24.53 25.30 7.25	64
1988/89	0.15	14-15 sep 1988 13 oct 1988 10-15 dec 1988 21 aout 1989	Automne Automne Hiver Eté	0.010 0.019 0.052 0.029	6.56 12.49 33.30 18.41	71
1989/90	0.87	4-5 sep 1989 30 avril 3 mai 1990 16-17 juillet 1990	Automne Printemps été	0.091 0.095 0.53	10.35 10.82 60.46	82
1990/91	0.090	9-10 nov 1990 26-27 nov 1990 15-16 mars 1991 31 mars- 1 avril 1991	Automne Automne Printemps printemps	0.015 0.013 0.010 0.013	16.94 14.67 11.26 14.54	57
1991/92	0.44	5 oct 1991 26-28 jan 1992 9-10 avril 1992 4-5 mai 1992	Automne Hiver Printemps Printemps	0.051 0.22 0.042 0.036	11.40 49.73 9.42 8.22	79
1992/93	0.15	24-25 sep 1992 3-6 nov 1992 10 nov 1992	Automne Automne Automne	0.10 0.019 0.008	72.23 12.56 5.29	90
1993/94	0.38	22-24 sep 1993 28 sep 1993 24 oct 1993 20 janv 1994	Automne Automne Automne Hiver	0.27 0.047 0.019 0.028	71.59 12.05 5.07 7.4	96

Tableau 65: Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (station de Dechemiya)

Année	Apport (T)	Crue	Saison	Apport de la crue (T)	Taux annuel (%)	
1972/73	83991	1 jan 1973	Hiver	15409	18.34	63
		23-25 jan 1973	Hiver	9980	11.88	
		4-7 fév 1973	Hiver	14305	17.03	
		22-26 févr 1973	Hiver	6401	7.62	
		24-25 mars 1973	Printemps	6816	8.11	
1973/74	125456	29 mars- 1 avril 1974	Printemps	100173	79.84	80
1974/75	22207	21 sep 1974	Auto mne	1900	8.55	74
		24-25 nov 1974	Auto mne	6075	27.35	
		16-17 fév 1975	Hiver	2359	10.62	
		22-26 mars 1975	Printemps	6128	27.59	
1975/76	73909	4-5 nov 1975	Auto mne	16500	22.32	69
		5-7 fév 1976	Hiver	10629	14.38	
		10 mars 1976	Printemps	3017	4.08	
		3 juillet 1976	Eté	21218	28.70	
1976/77	37540	6 sep 1976	Auto mne	19353	51.55	81
		4-5 nov 1976	Auto mne	2091	5.57	
		16 aout 1977	Eté	9084	24.19	
1977/78	7452	20-24 nove 1977	Auto mne	967	12.97	62
		3 avril 1978	Printemps	576	7.73	
		7-11 avril 1978	Printemps	3069	41.17	
1978/79	25857	17 oct 1978	Auto mne	2034	7.86	78
		22 jan 1979	Hiver	1571	6.07	
		26 fév-9 mars 1979	H+prin	16529	63.92	
1979/80	148116	9 sep 1979	Auto mne	7423	5.01	88
		19-20 sep 1979	Auto mne	116104	78.39	
		6 mars 1980	Printemps	7241	4.88	
1980/81	47125	18-21 déc 1980	Hiver	20255	42.98	68
		12-13 fév 1981	Hiver	8734	18.53	
		21 aout 1981	Eté	2919	6.19	
1981/82	32887	23 jan 1982	Hiver	2258	6.86	61
		27 jan-5 fév 1982	Hiver	10105	30.72	
		26-28 fév 1982	Hiver	7836	23.82	
1982/83	41731	11 sep 1982	Auto mne	2514	6.02	70
		20-21 oct 1982	Auto mne	9245	22.15	
		15-16 nov 1982	Auto mne	5273	12.63	
		26-27 déc 1982	Hiver	7563	18.12	
		4 juillet 1983	Eté	4776	11.44	
1983/84	5600	25-29 oct 1983	Auto mne	349	6.24	20
		19-21 nov 1983	Auto mne	456	8.15	
		14 mars 1984	Printemps	332	5.94	
1984/85	14757	10-11 oct 1984	Auto mne	1800	12.20	63
		15-17 oct 1984	Auto mne	795	5.38	
		6 jan 1985	Hiver	771	5.22	
		18-19 jan 1985	Hiver	1682	11.40	
		11-12 fév 1985	Hiver	1880	12.74	
		7-10 mars 1985	printemps	2301	15.59	

• **Station de Lakhdaria**

Dans le bassin de l'oued Isser Maritime à la station de Lakhdaria, le volume total de sédiments en suspension au cours de la période 1970/71-2009/2010 est de de 71.32 millions de tonnes, avec une moyenne interannuelle de 1.87 millions de tonne/an. Les flux de sédiments en suspension engendrés lors des crues est de 54 millions de tonnes avec une moyenne interannuelle d'apport de crue de 1.43 millions de tonnes, soit 76.31% du tonnage

global de la période d'étude. On peut trouver que 95% de la charge solide en suspension est fournie pendant 0.82% du temps annuel comme la crue de 19 à 23 décembre 1999 (fig 132).

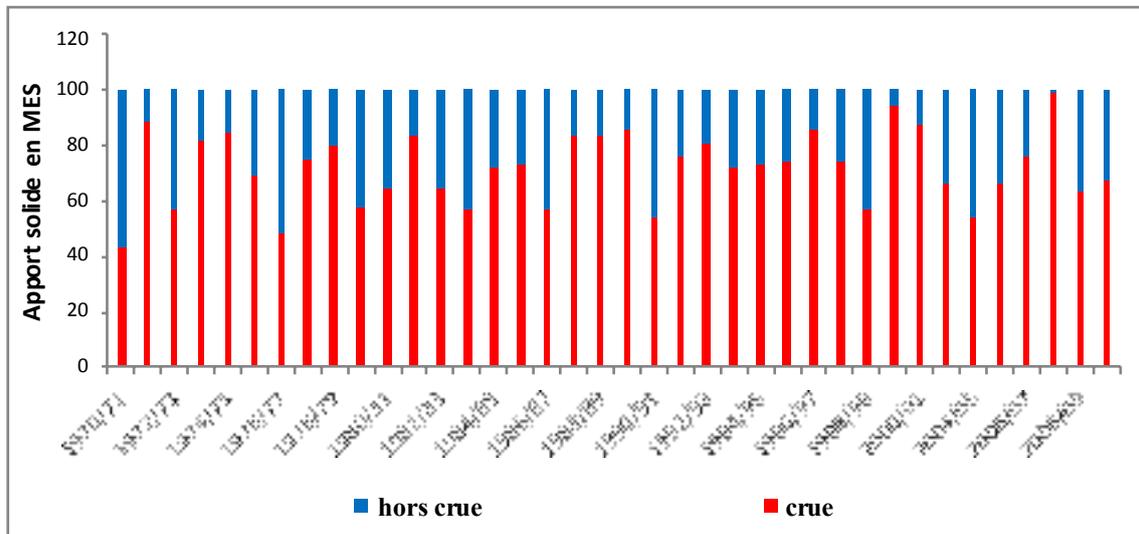


Figure 132: Flux de MES en pourcentage lors des crues et hors crues au niveau de la station de Lakhdaria

L'année 1971/72 a connu deux crues exceptionnelles qui ont contribuent à 89.11% du tonnage annuel et 23.13% du tonnage global de la période d'étude. La plus grande crue en terme de flux de sédiments en suspension est celle des 27/28 novembre 1971 (automne). Elle a permis de transporter 9.74 millions de tonnes de sédiments en suspension, soit 52.54 % du tonnage de l'année et 13.65% du tonnage global. Cette charge est supérieure par rapport au volume annuel de toutes les autres années.

- **Station de La Traille**

Le volume total de sédiments en suspension au cours de la période 1970/71-1984/85 est de 15 millions de tonnes, avec une moyenne interannuelle de 1 million de tonnes/an. Durant cette période, 39 crues ont été enregistrées et ont engendré une charge de sédiments en suspension de 9.44 millions de tonnes, soit 62.3% du tonnage global. L'apport solide pendant les crues de l'année 1984/85 est de 82% du flux annuel (fig.133).

L'année 1971/72 a connu deux crues produisant 2.48 millions de tonnes qui ont contribué à 69% du tonnage annuel et 16.55% du tonnage global. La crue qui a duré du 18 au 28 janvier 1972 est la plus productive en termes de flux de sédiments en suspension, elle a produit 1.27 millions de tonnes, soit 34.91% du tonnage annuel et 8.47% du tonnage global.

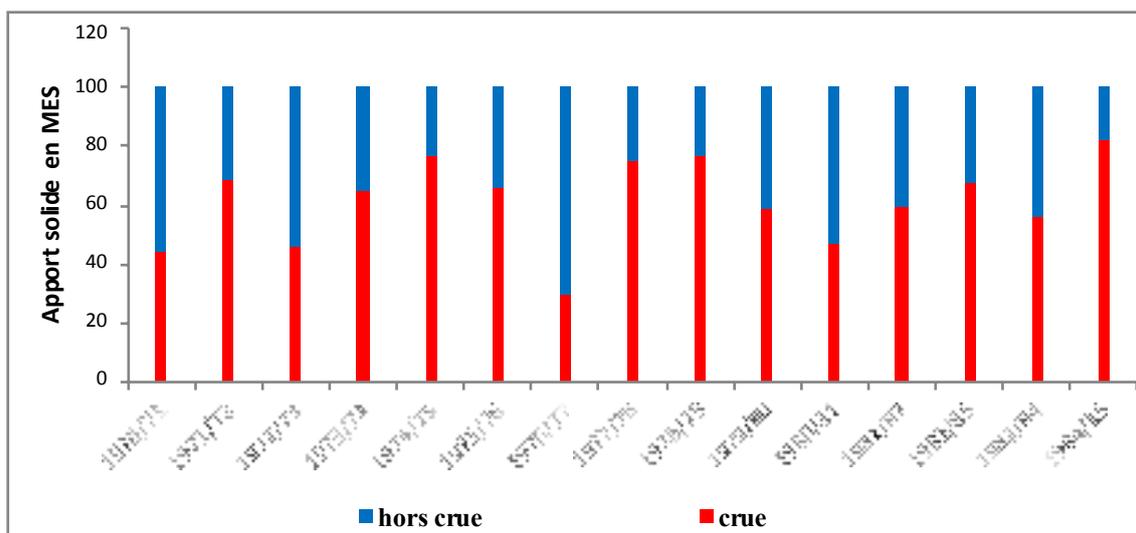


Figure 133: Flux de MES en pourcentage lors des crues et hors crue au niveau de la station de La Traille

- **Station de Beni Slimane**

Le tableau 63 montre que le volume total de sédiments en suspension au cours de la période 1973/74-2008/09 est de 4.16 millions de tonnes. La charge de sédiments en suspension engendrée lors des crues a été de 3.01 millions de tonnes, soit 72.34% du tonnage global pendant 2.5% du temps global.

L'année 2001/02 a connu un évènement exceptionnel en été (crue des 24-25 aout 2002) qui a produit une charge de sédiment en suspension de l'ordre de 1.28 millions de tonnes, soit 99% du flux annuel et 30% du volume global. Cette charge est supérieure par rapport aux volumes annuels de toutes les autres années et supérieur de plus de 9 fois au volume moyen interannuel (0.13MT). Les trois crues principales ont fourni des volumes de sédiments en suspension supérieurs au volume moyen interannuel. Ces crues ont produit une charge de sédiment en suspension de l'ordre de 1.68 M de tonnes, soit 40.37% du total transporté durant la période d'étude.

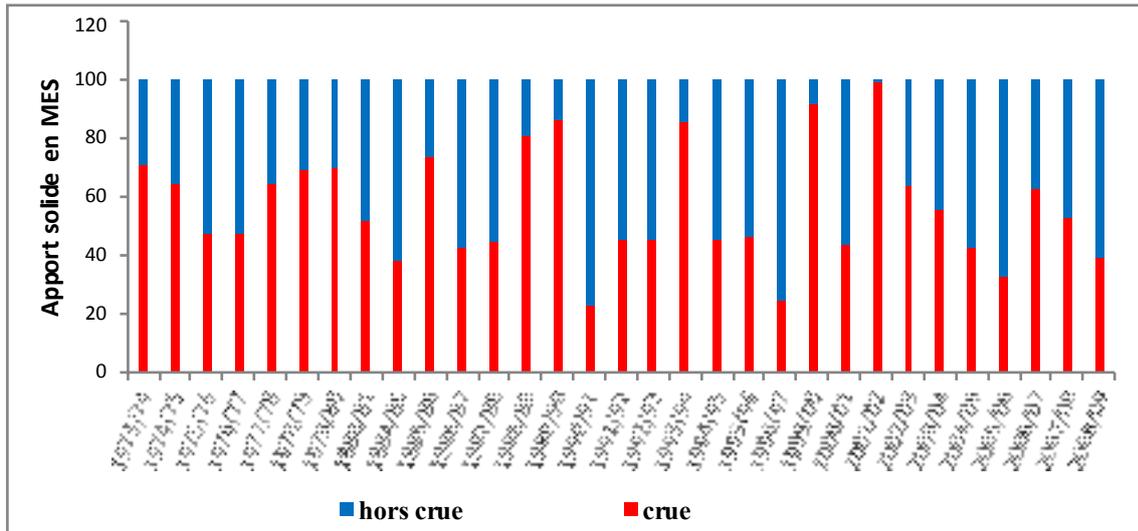


Figure 134: Flux de MES en pourcentage lors des crues et hors crue au niveau de la station de Beni Slimane

- **Station de Mezahime**

Le tableau 64 montre que le volume total des sédiments en suspension au cours de la période 1973/74-1994/95 est de 10 millions de tonnes, avec une moyenne interannuelle de 0.47 millions de tonnes/an. Le flux de sédiments en suspension engendré lors des crues é été de 6.72 millions de tonnes, soit 67.28% du tonnage global. Au cours de l'année 1993/94, l'apport solide pendant les crues a atteint plus de 96% du flux annuel.

L'année 1979/80 est caractérisée par une crue exceptionnelle en automne (crue des 19-20 septembre 1979), qui a donné un tonnage en suspension de 1.55 M de tonnes, soit 77.50% du tonnage annuel et 15.5% du tonnage global. Cette charge est trois fois supérieure au volume moyen interannuel.

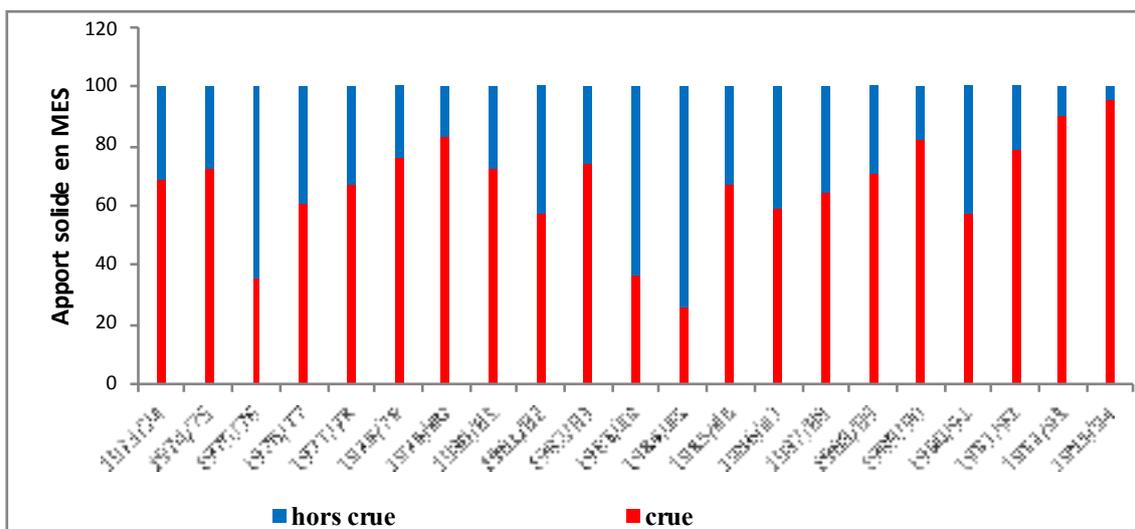


Figure 135: Flux de MES en pourcentage lors des crues et hors crue au niveau de la station de Mezahime

- **Station de Dechemiya**

D'après le tableau 65, le volume total de sédiments en suspension au cours de la période 1972/73-1984/85 est de 0.66 M de tonnes. La charge de sédiments en suspension lors des crues a été de 0.49 M de tonnes, soit 74.82% du tonnage global.

La crue des 19-20 septembre 1979 a donné un tonnage en suspension de l'ordre de 0.11 M de tonnes, soit 78.39% du tonnage annuel et 17.41% du tonnage global, De même, la crue de 29 mars-1 avril 1974 a donné une charge en suspension de l'ordre de 0.10 M de tonnes, soit 79.84% du tonnage annuel et 15.02% du tonnage global. Ces deux crues ont produit un apport solide supérieur au volume moyen interannuel (0.05MT) et représentant 32% des exportations global de sédiments en suspension.

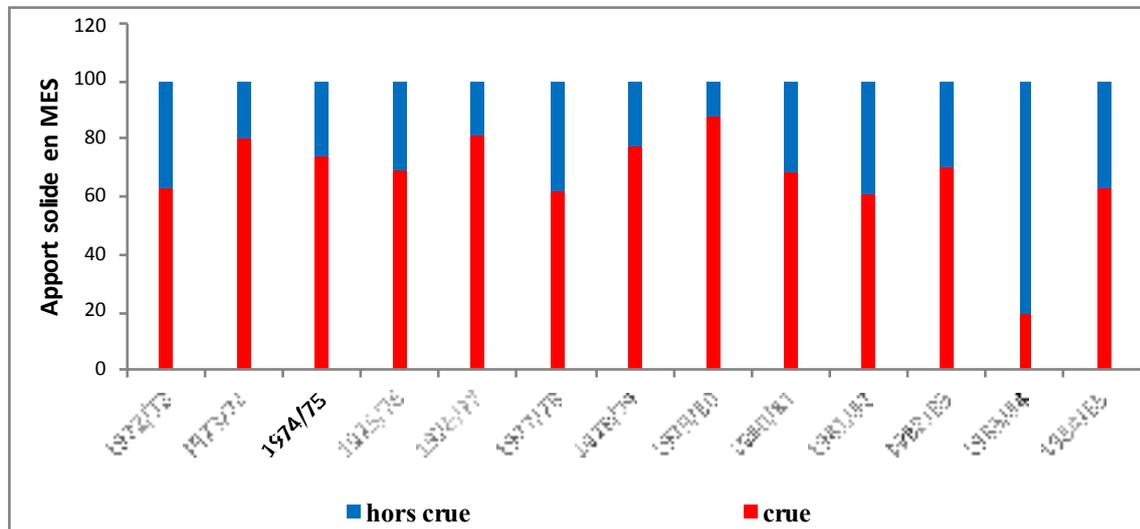


Figure 136: Flux de MES en pourcentage lors des crues et hors crue au niveau de la station de Dechemiya

Le bassin de l'oued Isser est caractérisé par des crues violentes et de courte durée. Cette caractéristique impacte fortement les exportations des matières en suspension. La plus grande partie des transports solides en suspension est exportée au cours des crues violentes et de courte durée. Ainsi, la durée cumulée de tous les événements des crues représente un faible pourcentage de temps annuel, avec des années extrêmes comme 2001/02 à la station de Beni Slimane, où en 2 jours (24-25 aout 2002) soit 0.54 % du temps annuel, 99.05% des matières en suspension totales de l'année ont été exportées.

5-Conséquences du transport solide sur l'envasement des barrages

L'envasement des barrages est l'une des conséquences les plus graves de l'érosion des sols et des transports solides des cours d'eau. Il constitue en Algérie, une contrainte majeure qui affecte les capacités de stockage des ressources en eau superficielles. C'est un phénomène qui exige un contrôle régulier de la quantité des dépôts de sédiments pour déterminer le taux d'envasement et par conséquent la capacité utile du barrage et sa durée de vie.

Avant 1988, le bassin de l'oued Isser fonctionnait selon un cycle naturel, avec des transports solides qui aboutissaient à la mer méditerranée. La construction et la mise en eau des barrages ont changé cette situation. Après la construction et la mise en eau du barrage de Beni Amrane en 1988, la continuité des transports solides a été rompue, les sédiments sont piégés au niveau de la retenue du barrage de Beni Amrane.

Le barrage de Ladrat, qui contrôle un bassin de 73 km² a été mis en eau en 1990. Etant donné la faible surface qu'il contrôle (1.75% de la superficie du bassin versant de l'oued Isser), son influence sur les apports hydrosédimentaires peut être considérée comme négligeable.

En 2008, la mise en eau du barrage de Koudiat Acerdoune d'une capacité totale initiale de 640 hm³, situé à l'amont du barrage de Beni Amrane a changé cette situation, il reçoit en premier les apports liquides et solides de son bassin d'alimentation, d'une superficie de 2900 km². De ce fait, le barrage de Beni Amrane reçoit les apports hydrosédimentaires produits par le bassin intermédiaire entre les barrages de Koudiat Acerdoune et Beni Amrane, en plus des lâchés du barrage de Koudiat Acerdoune.

5-1- Le barrage de Beni Amrane : historique, dévasement et surélévation

Lorsque l'envasement d'un barrage atteint un seuil critique, plusieurs méthodes pour récupérer les volumes perdus sont possibles. Concernant le barrage de Beni Amrane d'une capacité initiale de 16 Mm³, deux techniques de dévasement ont été utilisées, la première technique appliquée est l'ouverture périodique des vannes de fond, indispensable pour enlever les dépôts vaseux près des pertuis de vidange, mais peu efficace au-delà. Au barrage de Beni Amrane, six vannes de fond ont évacué environ 3 Mm³ de vase entre 1988 et 2000. La deuxième technique est le dragage. Le barrage de Beni Amrane a fait l'objet d'un dévasement par dragage durant une courte durée entre Février 2001 et le 9 octobre 2001 dégageant 40792 m³ de vase. En juillet 2003, le barrage a été surélevé par des housses droites sur le seuil libre de l'évacuateur de crue, fabriquées en béton armé, améliorant de 7.1 Mm³ supplémentaires la capacité de stockage.

5-1-1- Estimation de l'envasement du barrage de Beni Amrane à partir des transports solides

Pour estimer l'envasement probable de la retenue du barrage de Beni Amrane depuis la mise en eau 1988, on applique les régressions saisonnières QI-Qs sur les débits liquides moyens journaliers au niveau de la station de Lakhdaria pour estimer les apports solides du bassin de l'oued Isser Maritime. L'hypothèse retenue étant que le débit liquide moyen journalier peut être considéré comme un débit liquide instantané appliqué à l'estimation des apports solides (Touaibia, 2000 ; Louamri, 2013).

Depuis la mise en eau en 1988 du barrage de Beni Amrane jusqu'à 2008, date de la mise en eau du barrage de Koudiat Acerdoune situé à 30 km à l'amont, l'estimation des apports solides a été réalisée sur 20 années d'exploitation. Après 2008, les apports hydrosédimentaires du barrage de Beni Amrane sont influencés par le barrage de Koudiat Acerdoune. Donc, après 2008, l'estimation des apports solides au barrage de Beni Amrane à partir de la station hydrométrique de Lakhdaria n'est plus applicable, puisque les apports sédimentaires sont piégés au barrage de Koudiat Acerdoune.

L'estimation de l'envasement tient compte du charriage, estimé à 15% du transport en suspension (PNUD 1987), et d'une densité moyenne des sédiments de 1,6. Après 20 années d'exploitation, le barrage de Beni Amrane a reçu un volume de vase cumulé estimé de 15.7 Mm³ (suspension + charriage), soit un comblement de 68.57%. Le taux de comblement est de 3.42% par an. L'année 2002/03 a produit le plus fort volume de vase de 2.89 Mm³, soit 18.34% de volume total de la période d'exploitation. L'année 2001/02 a produit le plus faible volume de vase de 0.003 Mm³ (fig 137).

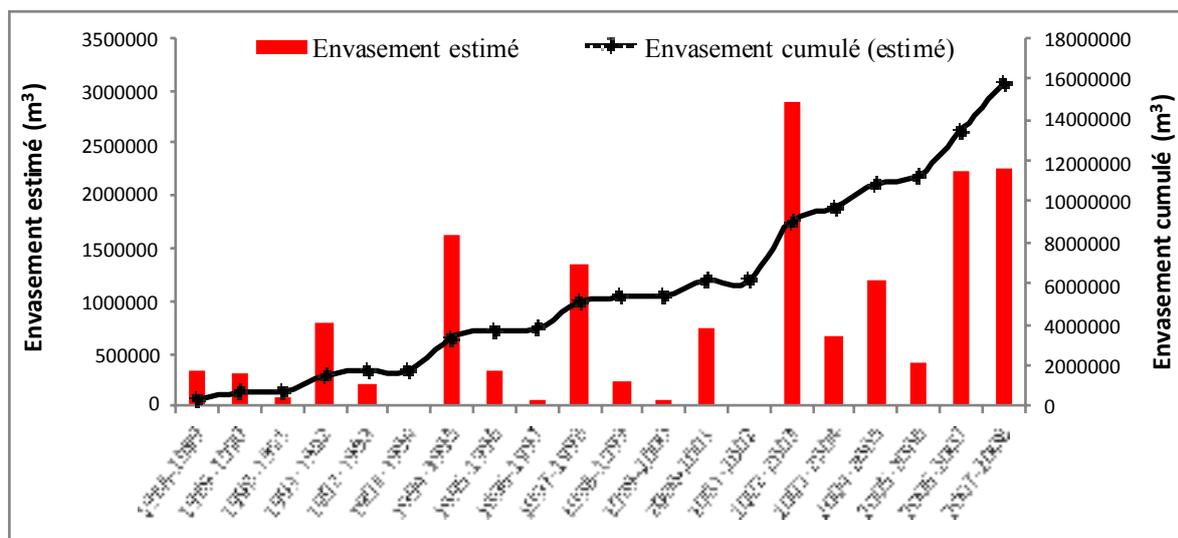


Figure 137: Envasement annuel et cumulé estimés dans le barrage de Beni Amrane (1988-2008)

5-1-2-Comparaison entre l'envasement mesuré et l'envasement estimé

La bathymétrie est utilisée en Algérie pour déterminer l'envasement de barrages, en appliquant un sondage ponctuel selon les techniques de l'IRD (ORSTOM). Les points de mesures ainsi obtenus sont intégrés dans un système d'information géographique, puis interpolés par krigeage à l'échelle de la surface de la retenue. Le volume total de sédiments piégés est calculé ensuite par la différence entre le volume initial et celui obtenu par krigeage.

La campagne bathymétrique réalisée en octobre 2004 par l'ANBT a abouti à un volume de vase de 11.25 Mm^3 , soit un envasement moyen de $0.70 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$. Si on ajoute le volume de vase évacué par le dragage et par l'ouverture périodique des vannes de fond, le volume total est de 14.29 Mm^3 , soit un envasement moyen de $0.89 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$, la dégradation spécifique est de $395 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Pour la même période (1988-2004), notre estimation de l'envasement en tenant compte du charriage, estimé à 15% du transport en suspension (PNUD 1987), est de 12.67 Mm^3 , soit un envasement moyen de $0.79 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$. La dégradation spécifique du bassin versant serait de $350 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

Les valeurs calculées de la charge solide et de la dégradation restent inférieures à la bathymétrie. Cette différence entre les deux valeurs est liée au protocole de prélèvement des concentrations à la station hydrométrique. La technique de mesure de transport solide basée sur un prélèvement unique à proximité de la berge, ne reflète pas la répartition réelle des concentrations des matières en suspension dans l'oued. De même que l'estimation de la part que représente le charriage varie en fonction des auteurs et des méthodes de calcul.

5-1-3-Estimation de la perte de capacité du barrage

Après 15 années d'exploitation, de 1988 jusqu'à 2003, date de surélévation de la digue, l'envasement mesuré du barrage de Beni Amrane est de 9.02 Mm^3 . Ce sont 56% de la capacité initiale qui se trouvent remplacés par les dépôts de sédiments (suspension et charriage), ce qui correspond à $0.60 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$ soit 3.75% de perte annuelle de la capacité initiale de stockage.

De 2003 jusqu'à 2008, la cuvette du barrage reçoit 6.75 Mm^3 de vase, soit 29,35% de la capacité totale (capacité initiale à laquelle s'ajoute 7.1 Mm^3 de surélévation), ce qui correspond à $1,35 \text{ Mm}^3.\text{an}^{-1}$ soit 5,87% par an de la capacité totale.

L'estimation de l'envasement depuis la mise en eau jusqu'à 2008, après 20 ans d'exploitation est de $15,77 \text{ Mm}^3$, soit un comblement de 68,57% et un taux de comblement annuelle de 3,42% (fig 138).

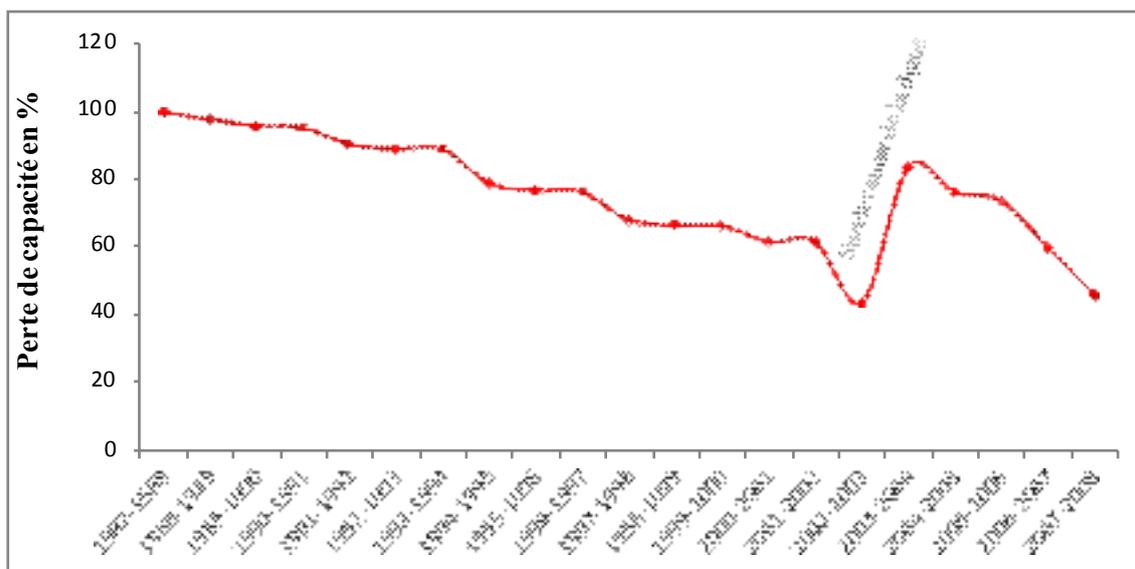


Figure 138: Perte de capacité du barrage Beni Amrane en pourcentage (1988-2008)

L'estimation de la durée de vie du barrage de Beni Amrane dépend de deux facteurs : la production de sédiments du bassin intermédiaire entre le barrage de Koudiat Acerdoune et le barrage de Beni Amrane, et les lâchés du barrage de Koudiat Acerdoune.

5-1-4-Comparaison avec les retenues des barrages du Maghreb

Depuis la mise en eau du barrage de Beni Amrane, le 18 février 1988 jusqu'à octobre 2004, date du levé bathymétrique, le barrage de Beni Amrane après 16 ans d'exploitation, était déjà à moitié envasé, environ 49% de la capacité totale après surélévation, soit 11.25 Mm³, correspond à une perte moyenne de 3.05% par an. En négligeant le soutirage la perte moyenne serait de 3.88% par an. Le barrage de Beni Amrane se classe dans la catégorie des retenues qui sont gravement menacés par le phénomène de l'envasement (Remini, 2017). Cet auteur cite des pertes de capacité allant de 0.6% par an pour le barrage de Meurad (entre 1960 et 2014, soit 54 ans) à 4.6% par an pour le barrage de Mexa (entre 1998 et 2014, soit 16 ans). Les barrages tunisiens perdent annuellement 0.5% à 1% de la capacité initiale par envasement (Ben Mamou et Louati, 2007). Au Maroc, selon Lahlou, 1994, l'alluvionnement moyen annuel varie de 0.07Mm³ (Nakhla) à 10 Mm³ (Mohamed V). Les pertes de capacité rapportées par Badraoui et Hadji (2001) et Lahlou (2005) pour le Maroc sont très variables, allant de 0,05% pour le barrage d'Abdelmoumen à 5,71% pour le barrage de Sidi Driss, la moyenne est de 1,09%.

5-2-Barrage de Koudiat Acerdoune et barrage Ladrat

L'estimation de l'envasement est basée sur les résultats obtenus par les campagnes bathymétriques réalisées par l'ANBT en 2005 au niveau du barrage Ladrat et en 2014 au niveau du barrage de Koudiat Acerdoune. D'autre part, on s'est basé sur la formule de Chamov qui permet d'estimer l'envasement prévisible à différents horizons en tenant compte de la capacité initiale de la retenue et de l'envasement moyen annuel.

$$W_t = W_{rn} (1 - a_0^t)$$

Où :

W_t = envasement de la retenue pour l'année t (Hm^3)

t = nombre d'années écoulées depuis la mise en eau du barrage

W_{rn} = capacité initiale (correspondant à la côte de retenue normale)

a_0 = paramètre caractérisant la capacité d'évacuation des matériaux en suspension au travers du barrage par chasses, soutirage, déversements, et qui peut être estimé par la relation :

$$a_0 = 1 - (W_1 / W_{rn})$$

W_1 = envasement durant la première année d'exploitation (On admet que W_1 soit égal à l'apport solide moyen annuel au barrage).

Tableau 66: calcul de l'envasement de barrage de Koudiat Acerdoune

Barrage de Koudiat Acerdoune :

Année de mise en eau : 2008

Capacité initiale : 640 hm^3

Capacité au dernier levé bathymétrique (2014) : 618.54 hm^3

Nombre d'années d'exploitation : 6 ans

Envasement observé sur 6 ans : **21.46 hm^3**

Envasement moyen annuel $W_1 = 3.57 \text{ hm}^3$

a_0 chamov = $1 - (3.57/640) = 0.994422$

Estimation de l'envasement prévisible par chamov :

Envasement **2014** = **21.12 hm^3**

Envasement 2020 = 41.54 hm^3

Envasement 2030 = 74.10 hm^3

Envasement 2050 = 134 hm^3

Tableau 67: calcul de l'envasement de barrage de Ladrat

Barrage de Ladrat :

Année de mise en eau : 1990

Capacité initiale : 10 hm³

Capacité au dernier levé bathymétrique (2005) : 8.47 hm³

Nombre d'années d'exploitation : 15 ans

Envasement observé sur 15 ans : **1.53 hm³**

Envasement moyen annuel W1= **0.102 hm³**

$a_0 \text{ chamov} = 1 - (0.102/10) = 0.98980$

Estimation de l'envasement prévisible par chamov :

Envasement 2000 = 0.97 hm³

Envasement **2005 = 1.42 hm³**

Envasement 2010 = 1.85 hm³

Envasement 2020 = 2.64 hm³

Envasement 2030 = 3.36 hm³

Envasement 2050 = 4.59 hm³

La prévision par la formule de Chamov, basée sur la bathymétrie. D'après les tableaux 66 et 67, les estimations de l'envasement des retenues de barrages de Koudiat Acerdoune, pour l'année 2014, et Ladrat, pour l'année 2005 par la formule de CHAMOV donne des résultats du même ordre de grandeur que la bathymétrie.

L'envasement du barrage de Koudiat Acerdoune depuis sa mise en eau jusqu'à 2014 (date du levé bathymétrique) est évalué à 21.46 hm³, soit 3.35% de sa capacité initiale, ce qui correspond à une perte moyenne annuelle de 3.57 hm³.an⁻¹. Le taux de comblement est de 0.55%/an. A ce rythme d'envasement, on prévoit un comblement total de la retenue à l'horizon 2187, soit une durée de vie de 179 ans.

Par contre le barrage de Ladrat reçoit de faibles volumes de vase comparés au barrage de Beni Amrane et au barrage de Koudiat Acerdoune, puisque la superficie du bassin alimentant la retenue est plus réduite (73 km²). Le barrage de Ladrat reçoit 0.102 hm³ de matériaux fins et grossières annuellement, le taux de comblement de la retenue est de 1.02%/an, on prévoit un comblement total de la cuvette du barrage à l'horizon 2088, soit une durée de vie de 98 ans.

Conclusion

La dynamique des MES dans le bassin de l'oued Isser révèle que les flux sédimentaires connaissent une très forte variabilité temporelle, due, d'une part, à la disponibilité des sédiments dans les versants et les oueds, et d'autre part, à l'irrégularité du régime annuel d'écoulement, liée principalement à l'influence des précipitations. A cette variabilité temporelle s'ajoute la variabilité spatiale, l'apport solide en suspension augmente d'une façon très nette avec l'accroissement de la superficie de l'amont vers l'aval. Il passe de 0.04 million de tonnes pour le bassin de l'oued Zaroua d'une superficie de 83 km² à 1.82 millions de tonnes pour le bassin de l'oued Isser maritime pour une superficie de 3611 km².

La majorité des exportations solides en suspension est exportée au cours des crues violentes et de courte durée. Ainsi, la durée cumulée de tous les événements de crues représente un faible pourcentage de temps annuel, avec des années extrêmes comme 2001/02 à la station de Beni Slimane, où en 2 jours (24-25 août 2002) soit 0.54 % du temps annuel, 99.05% des matières en suspension totales de l'année ont été exportées.

Les valeurs de la dégradation spécifique moyenne interannuelle varient de 504, 278, 370, 795 et 522 t.km⁻².an⁻¹ respectivement au niveau des bassins aux stations hydrométriques de Lakhdaria, La Traille, Beni Slimane, Mezahime et Dechemiya pour la période de (1973/74-1984/85). Les différences sont liées à la lithologie, au couvert végétal, à la topographie.

Les résultats de la bathymétrie montrent que l'envasement moyen annuel des barrages est de 2.84% pour Beni Amrane. 0.55% au barrage de Koudiate Acerdoune et 1.02% au barrage de Ladrat. Ces taux d'envasement se situent dans la fourchette des valeurs trouvées par d'autres chercheurs au niveau des barrages maghrébins.

Chapitre 9:
Phénomènes d'hystérésis

Introduction

L'objectif de ce chapitre est l'identification détaillée des boucles d'hystérésis montrées par les relations débit-concentration en MES lors des crues. Nous essayons par la suite de caractériser et de classer ces différentes relations pour une meilleure compréhension du phénomène d'hystérésis. Cette méthode nous permet de comprendre d'une manière plus approfondie la dynamique temporelle des matières en suspension à l'échelle de la crue.

Dans ce chapitre nous nous sommes basés sur les travaux de Williams (1989). Selon cet auteur, les relations entre les concentrations des sédiments en suspensions C et les débits liquides Q pour un événement hydrologique tel que les crues, peuvent être étudiées qualitativement par l'analyse des courbes des concentrations et des débits liquides en fonction du temps. L'auteur propose une classification de ces relations basées sur le rapport C/Q durant les phases de montée de crue et de décrue. Cinq modèles de relations sont ainsi établis.

L'interprétation des modèles dans ce travail a été faite en s'inspirant de plusieurs travaux sur ce thème qui ont été publiés en Algérie et dans le monde. Wood (1977), Lefrançois (2007), Lenzi et Marchi (2000), Benkhaled et Remini (2003), Bouanani (2004), Achite et al (2005), Touaibia et al (2011), et enfin Khanchoul (2006) ont apporté une contribution à l'analyse et à la tentative d'explication du phénomène d'hystérésis et ont montré la variabilité temporelle de C et Q caractéristique de leurs bassins d'études.

1- Représentativité des données de mesure

La fréquence d'échantillonnage des matières en suspension a un impact non négligeable sur la précision de l'estimation du bilan sédimentaire annuel (Horowitz, 2003). Un échantillonnage aléatoire réparti sur l'année hydrologique aura une tendance à sous-estimer le bilan sédimentaire annuel, puisque les crues génératrices de la majeure partie du transport en suspension, ne seront pas correctement échantillonnées.

A partir des données du bassin versant de l'oued Isser, les crues hivernales sont relativement mieux échantillonnées pour les concentrations que les crues automnales et estivales. Les fréquences d'échantillonnage sont irrégulières à l'échelle annuelle et interannuelle, elles présentent parfois des lacunes d'observation notamment pour les crues d'automne qui sont souvent très soudaines surtout aux stations de Mezahime et de Dechemiya où la fréquence d'échantillonnage est faible à très faible.

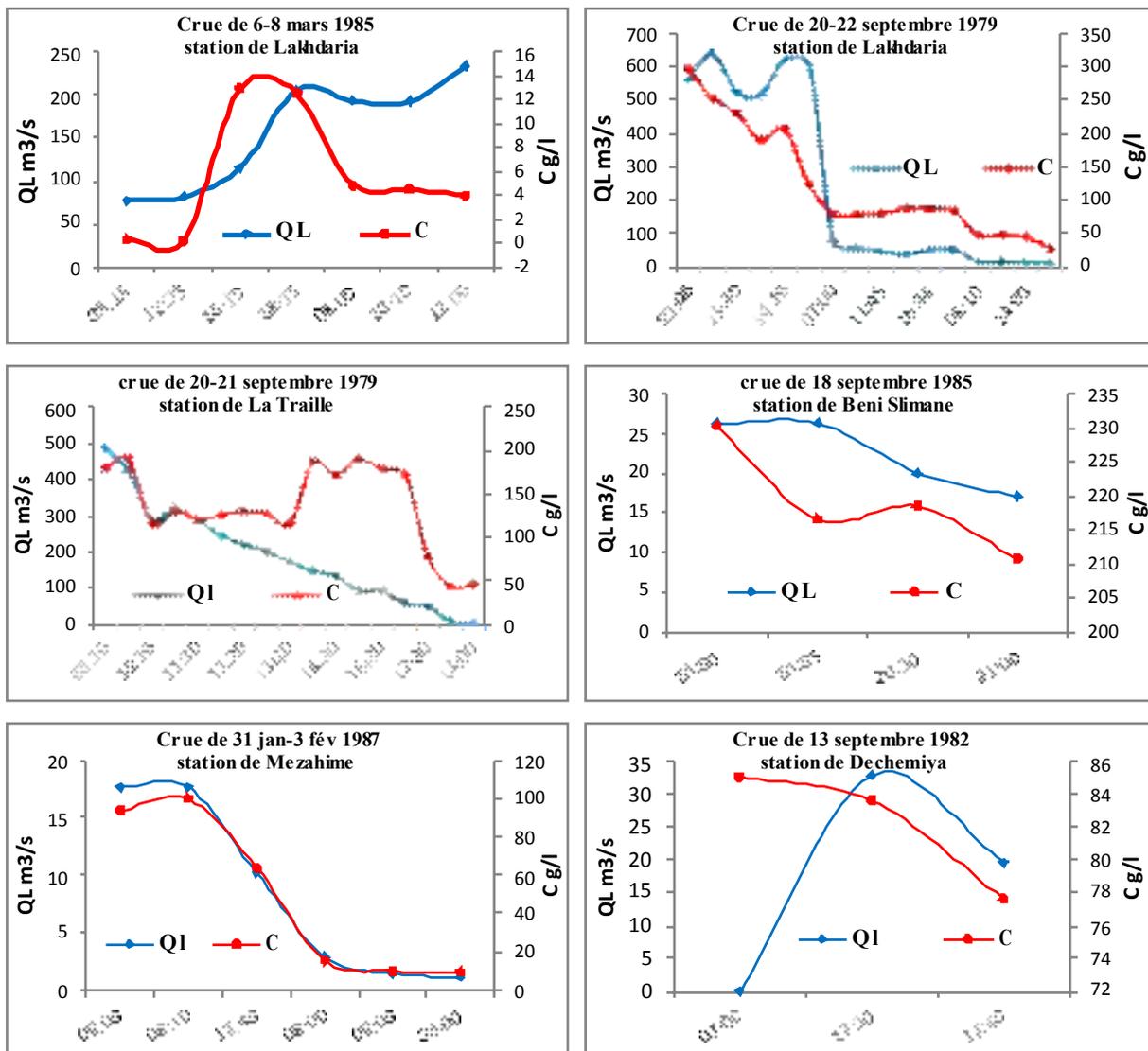


Figure 139: Exemples d'évènements non retenus

On a procédé à une sélection selon des critères sévères qui nous a permis de faire ressortir 222 évènements de fort transport solide qui ont été détectés et bien échantillonnés. L'échantillonnage des évènements est inégalement réparti sur les cinq sous bassins de l'oued Isser.

La figure 139 correspond à des crues mal échantillonnées, qui montrent que les mesures ont été réalisées soit pendant la montée uniquement, ou la décrue ou par insuffisance de points de mesures. De ce fait, ces données sont insuffisantes pour tracer un hydrogramme et un turbidigramme parfait de la crue.

2-Méthodologie

La démarche de la réalisation des relations C-Q se présente en deux étapes :

- 1- Les données de débit et de concentration en suspension sont mises en graphe avec en ordonnées, la concentration (g.l^{-1}) et le débit liquide ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), et en abscisse le temps comme variable indépendante (heure).
- 2- Les données des deux variables C-Q de chaque crue sont mises en relation, pour déterminer le phénomène d'hystérésis et discuter le comportement hydro sédimentaire des crues.

Les critères de sélection des crues sont:

- Le débit liquide dépasse la moyenne annuelle ;
- La réalisation d'un hydrogramme et d'un turbidigramme complet avec une montée de crue et une décrue ;
- Une crue non complexe ;
- Un échantillon comportant des crues fortes et faibles de débit ;
- Une fréquence d'échantillonnage de la crue suffisante (turbidigramme bien suivi).

Dans ce chapitre, 222 crues contenant les couples de mesures de concentration en MES-débit sont analysées, réparties de la manière suivante :

- 84 crues enregistrées au niveau de la station de Lakhdaria (période de 1971-2009).
- 58 crues enregistrées au niveau de la station de La Traille (période de 1971-1985).
- 42 crues enregistrées au niveau de la station de Beni Slimane (période de 1973-2001).
- 25 crues enregistrées au niveau de la station de Mezahime (période de 1985-2007).
- 13 crues enregistrées au niveau de la station de Dechemiya (période de 1973-1985).

3-Identification des classes d'hystérésis

3-1-Classe I

Cette classe représente la relation débit-concentration la plus simple. Ce modèle indique que les concentrations en matières en suspension doivent augmenter ou diminuer en parfaite synchronisation avec le débit liquide (fig 140). Dans cette classe, la disponibilité en particules ne se limite pas au cours de la crue (Williams, 1989 ; Jansson, 2002 ; Lefrançois, 2007).

3-2-Classe II : boucle horaire (Clockwise loop)

Dans le modèle boucle horaire, le pic de la concentration arrive avant le pic de débit (fig 140). L'augmentation des concentrations en MES accompagne d'abord l'augmentation du débit en début de crue. Puis, le débit continue à augmenter mais les concentrations en MES diminuent. Donc, La disponibilité en particules n'est plus suffisante pour poursuivre la tendance initiale, soit parce que cette disponibilité a diminué dans l'absolu, soit parce que le débit augmente plus vite entraînant un effet de dilution (Lefrançois, 2007). Ce type d'hystérésis est souvent expliqué par un épuisement du stock de sédiments disponible avant le maximum du débit (Aromborg et al, 1967 ; Walling, 1974 ; Walling et Webb, 1981 ; Wood, 1977 ; Wansickel et Beschta, 1983 ; Seeger et al, 2004). On peut aussi expliquer ce type d'hystérésis par la distance entre les sources de sédiments et l'exutoire. Lorsque ces sources actives sont localisées près de l'exutoire, on assiste à une arrivée rapide de sédiments, produisant des boucles d'hystérésis horaire.

3-3-Classe III : boucle antihoraire (Counterclockwise loop)

Le pic de la concentration arrive plus tard que le pic de débit et la relation concentration-débit décrit une boucle d'hystérésis antihoraire (fig 140). Ce type s'explique par une production de sédiments répartie sur le haut du bassin versant et qui ne sont pas épuisés rapidement (Lenzi et Marchi, 2000 ; Brasington et Richards, 2000 ; Suter et al 2000 ; Seeger et al, 2004 ; Chikita et al 2005). Les sédiments mettent alors plus de temps à arriver à l'exutoire. Une autre explication possible de l'hystérésis antihoraire provient de la différence entre la vitesse de l'onde de crue « *Glossaire International d'Hydrologie (1992) Onde de crue : Montée du débit jusqu'à un maximum, suivie d'une baisse. Elle est due à une période de précipitation ou de fonte de neige, à une rupture de barrage ou à une lâchure d'une usine hydroélectrique* » et la vitesse de l'écoulement. En effet, les particules se déplacent à la vitesse du courant, qui est inférieure à la vitesse de l'onde de crue (Williams 1989). Cette différence de vitesse engendrerait alors un retard de l'arrivée des sédiments par rapport au pic de la crue. On peut aussi expliquer cette classe par

l'effondrement des berges juste après le passage du pic de la crue (Sarma, 1986 et Ashbridge, 1995 in Lefrançois, 2007).

3-4-Classe IV modèle rectiligne plus boucle : (Single line plus one loop)

Ce modèle combine le modèle I et les modèles II ou III. La concentration des sédiments en suspension augmente et diminue en synchronisation avec le débit liquide pendant les premières et les dernières phases de la crue. Lors de la crue, le pic de concentration vient avant celui du débit liquide, il produit une hystérésis plus boucle dans le sens horaire. Inversement, lorsque le pic de la concentration vient après le pic de débit, on obtient une hystérésis plus boucle dans le sens antihoraire.

3-5-Classe V : Le modèle en forme de huit

L'hystérésis en huit, n'a été décrite que dans quelques publications (Arnborg et al. 1967, Williams 1989 ; Seeger, 2004). La forme en huit combine des parties des modèles II et III. Les conditions de genèse de la forme en huit, sont le développement d'une boucle de huit indépendamment des pics des variables Q et C, les deux parties de huit sont dirigées séquentiellement dans les directions opposées, le rapport C/Q pour différentes valeurs de Q explique l'orientation des courbes en fonction du temps sous une forme en huit pour les relations C-Q. En effet, bien que les maximums des concentrations et des débits arrivent au même moment, l'augmentation de C est plus rapide que celle de Q et le pic de la concentration vient avant celui de débit. Ceci donne une boucle horaire, pendant la montée de la crue. Après, le pic de la concentration diminue doucement en fonction du temps, relativement au débit liquide, pendant la décrue et on obtient une boucle antihoraire.

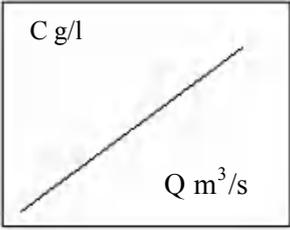
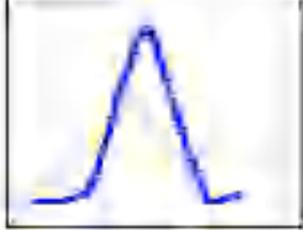
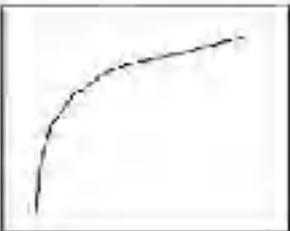
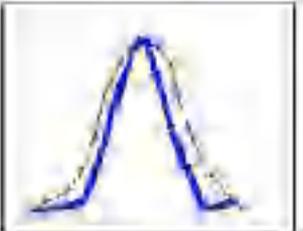
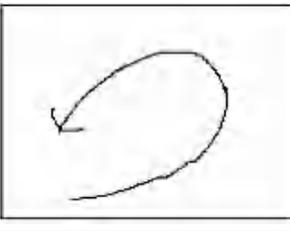
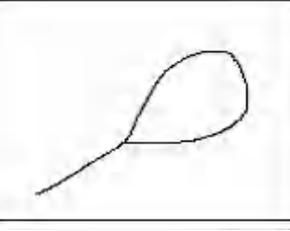
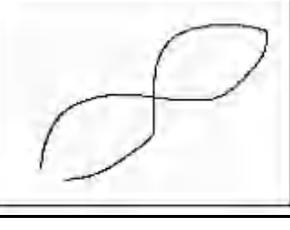
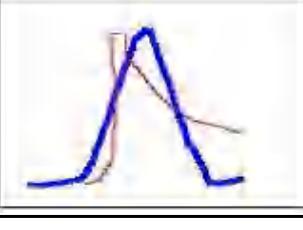
Classe	Type de relation	Illustration 	Débit	Concentration MES
I	a- Rectiligne			
	b- Curviligne convexe			
	c- Curviligne concave			
II	Boucle horaire (clockwise loop)			
III	Boucle antihoraire (counterclockwise loop)			
IV	Rectiligne plus boucle (single line plus one loop)			
V	Figure en huit (figure eight)			

Figure 140: Les différentes classes d'hystérésis dans les relations Concentration en MES- Débit liquide (Williams, 1989, Lefrançois, 2007)

4-Application aux sous-bassins de l'oued Isser

Les tableaux 68 à 72 indiquent les résultats des classements et des caractéristiques hydro-sédimentaires des crues sélectionnées aux stations hydrométriques. La fréquence des crues indique le nombre total de crues saisonnières par rapport au nombre total de la période.

Tableau 68: Classement et caractéristiques hydro sédimentaires des crues sélectionnées à la station de Lakhdaria (période de 38 ans 1971-2009)

Classe	Saison	F	D	C moy	Q moy	C max	AL	AS
Horaire	Automne	5/20	15.65	99.53	94.21	386	127.3	12.67
	Hiver	10/20	72.4	21.70	217.29	81.67	1433.7	31.11
	Printemps	5/20	31.1	14.16	243.04	52	652.95	9.24
	Été							
	Total de 38ans	20/20	123.1	45.13	184.8	386	2214	53.03
Anti horaire	Automne	10/35	30.84	91.87	35.62	300.89	94.9	8.71
	Hiver	8/35	61.12	25.85	135.21	98.28	714	18.45
	Printemps	14/35	87.08	28.59	99.3	153.4	747.1	21.34
	Été	3/35	11.17	97.45	50.91	194.51	49.13	4.78
	Total de 38 ans	35/35	190.21	60.93	80.26	300.89	1605.1	53.28
Plus boucle	Automne	1/11	2.41	94.64	56.84	134.4	11.83	1.12
	Hiver	8/11	61.5	34.78	45.86	79.94	243.6	8.47
	Printemps	1/11	5.3	26.12	208.21	56	95.34	2.49
	Été	1/11	4.17	100.2	93.72	341.7	33.76	3.38
	Total de 38 ans	11/11	73.38	63.94	101.1	341.7	384.6	15.46
Forme huit	Automne	7/18	19.17	63.69	74.56	311.86	123.5	7.87
	Hiver	7/18	53.48	20.37	184.5	73.92	852.5	17.3
	Printemps	4/18	24.88	13.24	182.8	46.16	392.9	5.18
	Été							
	Total de 38 ans	18/18	97.56	32.43	147.2	311.86	1368.9	30.35
Total	Automne	23/84	68.07	87.43	65.3	386	357.54	30.37
	Hiver	33/84	252.5	25.67	145.72	98.28	3243.8	75.33
	Printemps	24/84	148.3	20.52	183.3	153.4	1888.3	38.25
	Été	4/84	13.34	98.84	72.31	341.7	82.89	8.16
	Total de 38 ans	84/84	482.21	58.11	116.66	386	5572.5	152.11
Moyenne interannuelle		2.21	12.68	58.11	116.66	386	146.64	4.002

F, fréquence des crues; D durée de la crue (jour) ; C, concentration en MES moyenne en (g.l⁻¹) ; Q, débit liquide moyen en (m³.s⁻¹) ; C max, concentration maximale ; Al, apport liquide en (hm³) ; As, Apport solide en (*10⁶ tonnes)

Tableau 69: Classement et caractéristiques hydro sédimentaires des crues sélectionnées à la station de La Traille (période de 14 ans 1971-1985)

Classe	Saison	F	D	C moy	Q moy	C max	AL	AS
Horaire	Automne	9/29	17	50.13	66.42	244.9	83.60	6.04
	Hiver	11/29	24	19.99	94.09	118.62	161.33	4.18
	Printemps	9/29	15	30.55	162.9	180	130.17	3.06
	Eté							
	Total de 14 ans	29/29	56	33.55	107.8	244.9	375.1	13.28
Anti horaire	Automne	4/19	7	65.85	31.86	332.4	14.86	1.07
	Hiver	6/19	10	20.34	77.03	54.44	66.69	1.46
	Printemps	8/19	19	9.17	55.33	43.25	63.75	0.68
	Eté	1/19	4	30.5	9.93	73.76	3.43	0.17
	Total de 14 ans	19/19	40	31.46	43.53	332.4	148.73	3.38
Plus boucle	Automne							
	Hiver	5/7	10	15.81	102.15	180	95.09	1.88
	Printemps	2/7	2	10.16	53.94	23.96	9.32	0.11
	Eté							
	Total de 14 ans	7/7	12	12.98	78.04	180	104.41	1.99
Forme huit	Automne	1/3	1	84.98	82.45	113	7.12	0.62
	Hiver	1/3	1	13.52	41.74	17.44	3.6	0.053
	Printemps							
	Eté	1/3	3	45.97	11.93	79.04	3.09	0.19
	Total de 14 ans	3/3	5	48.15	45.37	113		0.86
Total	Automne	14/58	25	66.98	60.24	332.4	105.58	7.73
	Hiver	23/58	45	17.41	78.75	180	326.71	7.57
	Printemps	19/58	36	16.62	90.72	180	203.24	3.85
	Eté	2/58	7	38.23	10.93	79.04	6.52	0.36
	Total de 14 ans	58/58	113	34.81	60.16	332.4	642.05	19.51
Moyenne interannuelle		4.14	8.07	34.81	60.16	332.4	45.86	1.39

F, fréquence de la crue ; D durée de la crue (jour) ; C, concentration en MES moyenne en ($g\ l^{-1}$) ; Q, débit liquide moyen en ($m^3.s^{-1}$) ; C max, concentration maximale ; Al, apport liquide en (hm^3) ; As, Apport solide en ($*10^6$ tonnes)

Tableau 70: Classement et caractéristiques hydro sédimentaires des crues sélectionnées à la station de Beni Slimane (période de 28 ans 1973-2001)

Classe	Saison	F	D	C moy	Q moy	C max	AL	AS
Horaire	Automne	6/20	12	54.9	5.77	161.4	4.41	0.32
	Hiver	11/20	46	18.34	7.5	81.54	21.33	0.42
	Printemps	3/20	14	21.59	4.2	144.3	5.03	0.16
	Eté							
	Total de 28 ans	20/20	72	31.61	5.82	161.7	30.77	0.9
Anti horaire	Automne	3/15	5	169.37	62.58	486.8	37.75	2.64
	Hiver	3/15	6	39.92	8	115.74	4.9	0.15
	Printemps	8/15	28	63.95	14.25	261	28.55	1.67
	Eté	1/15	1	59.23	18.59	137.48	1.6	0.09
	Total de 28 ans	15/15	40	83.11	25.85	486.8	73.1	4.55
Forme huit	Automne	2/7	5	131.84	29.35	257.38	13.6	3.26
	Hiver	2/7	12	13.69	5.84	38.33	5.39	0.10
	Printemps	3/7	3	43.53	13	115.58	3.28	0.19
	Eté							
	Total de 28 ans	7/7	20	63.02	16.06	257.38	22.27	3.55
Total	Automne	11/42	22	118.7	32.56	486.8	55.76	6.22
	Hiver	16/42	64	23.98	7.11	115.74	31.62	0.67
	Printemps	14/42	45	43.02	10.48	261	36.86	2.02
	Eté	1/42	1	59.23	18.59	137.48	1.6	0.09
	Total de 28 ans	42/42	132	61.23	17.18	486.8	125.8	9
Moyenne interannuelle		1.5	4.71	61.23	17.18	486.8	4.49	0.32

*F, fréquence de la crue ; D durée de la crue (jour) ; C, concentration en MES moyenne en (g.l⁻¹) ; Q, débit liquide moyen en (m³.s⁻¹) ; C max, concentration maximale ; Al, apport liquide en (hm³) ; As, Apport solide en (*10⁶ tonnes)*

Tableau 71: Classement et caractéristiques hydro sédimentaires des crues sélectionnées à la station de Dechemiya (période 12 ans 1973-1985)

Classe	Saison	F	D	C moy	Q moy	C max	AL	AS
Horaire	Automne	2/10	2	42.18	59.29	85.07	7.97	0.19
	Hiver	2/10	3	32.79	15.80	105.24	4.04	0.10
	Printemps	5/10	6	8.07	20.44	34.29	10.77	0.11
	Eté	1/10	1	62.1	17.47	311.3	1.51	0.18
	Total de 12 ans	10/10	12	36.28	28.25	311.3	24.29	0.58
Anti horaire	Automne							
	Hiver	1/1	1	40.54	12.89	196.4	1.11	0.066
	Printemps							
	Eté							
	Total de 12 ans	1/1	1	40.54	12.89	196.4	1.11	0.066
Forme huit	Automne							
	Hiver	2/2	2	6.32	7.49	21.98	1.30	0.012
	Printemps							
	Eté							
	Total de 12 ans	2/2	2	6.32	7.49	21.98	1.30	0.012
Total	Automne	2/13	2	42.18	59.29	85.07	7.97	0.19
	Hiver	5/13	6	21.49	10.92	196.4	6.45	0.17
	Printemps	5/13	6	8.07	20.44	34.29	10.77	0.11
	Eté	1/13	1	62.1	17.47	311.37	1.51	0.18
	Total de 12 ans	13/13	15	33.46	27.03	311.37	26.7	0.65
Moyenne interannuelle		1.08	1.25	33.46	27.03	311.37	2.22	0.054

F, fréquence de la crue ; D durée de la crue (jour) ; C, concentration en MES moyenne en ($g\ l^{-1}$) ; Q, débit liquide moyen en ($m^3.s^{-1}$) ; C max, concentration maximale ; Al, apport liquide en (hm^3) ; As, Apport solide en ($*10^6$ tonnes)

Tableau 72: Classement et caractéristiques hydro sédimentaires des crues sélectionnées à la station de Mezahime (période de 22ans 1985-2007)

Classe	Saison	F	D	C moy	Q moy	C max	AL	AS
Horaire	Automne	3/12	6	50.94	6.69	129	2.66	0.21
	Hiver	5/12	12	22.44	9.77	63.07	5.87	0.16
	Printemps	3/12	8	42.9	10.27	105	7.26	0.29
	Eté	1/12	1	88.66	54.84	171.81	4.73	0.41
	Total de 22 ans	12/12	27	51.23	20.39	171.81	20.52	1.07
Anti horaire	Automne	2/9	2	81.46	24.21	115.8	3.38	0.33
	Hiver	5/9	13	33.45	11.92	121.4	12.64	0.61
	Printemps	2/9	5	45.24	24.87	81.92	7.78	0.35
	Eté							
	Total de 22 ans	9/9	20	53.38	20.33	121.41	23.8	1.29
Forme huit	Automne							
	Hiver	1/4	1	49.63	52.97	94.17	4.57	0.28
	Printemps	3/4	6	62.63	18.61	242	6.54	0.45
	Eté							
	Total de 22 ans	4/4	7	56.13	35.79	242	11.11	0.73
Total	Automne	5/25	8	66.2	15.45	115.83	6.04	0.54
	Hiver	11/25	26	35.17	24.88	121.41	23.08	1.05
	Printemps	8/25	19	50.25	17.91	242	21.58	1.09
	Eté	1/25	1	88.66	54.84	171.81	4.73	0.41
	Total de 22 ans	25/25	54	60.07	28.27	242	55.43	3.09
Moyenne interannuelle		1.13	2.45	60.07	28.27		2.51	0.14

F, fréquence de la crue ; D durée de la crue (jour) ; C, concentration en MES moyenne en ($g\ l^{-1}$) ; Q, débit liquide moyen en ($m^3.s^{-1}$) ; C max, concentration maximale ; Al, apport liquide en (hm^3) ; As, Apport solide en ($*10^6$ tonnes)

5- Analyse des différentes classes d'hystérésis

L'application de l'approche expliquée ci-dessus au niveau des cinq sous bassins contrôlés par les stations hydrométriques durant les périodes de données disponibles a permis d'aboutir à l'existence de quatre types d'hystérésis.

5-1-Modèle horaire

Les crues à hystérésis horaire se déroulent essentiellement en hiver au niveau des stations de Lakhdaria, La Traille, Beni Slimane, Mezahime et au printemps au niveau de la station de Dechemiya. Ce type est lié à la remise en suspension des sédiments déposés lors des basses eaux ou lors de la décrue des événements précédents d'automne. Cependant, les fortes valeurs de débit liquide en hiver peuvent réduire significativement la disponibilité des

sédiments en suspension, surtout si l'averse est de faible intensité et de longue durée, ceci permet l'apparition du pic des concentrations avant le pic de débit. Ce modèle est aussi fréquent en automne où l'épuisement du stock des sédiments déposé dans le cours d'eau est rapidement mobilisé pendant la montée de la crue. Ceci est confirmé par les valeurs fortes des concentrations en MES observées au début de la crue pour des débits liquides faibles.

Lors des crues à hystérésis horaire, l'augmentation des concentrations en MES accompagne d'abord l'augmentation du débit en début de crue. Puis, le débit continue à augmenter mais les concentrations en MES diminuent. Ceci s'explique par le fait que les sources de sédiments en suspension sont limitées et rapidement épuisées. La disponibilité en particules n'est plus suffisante pour poursuivre la tendance initiale, soit parce que cette disponibilité a diminué dans l'absolu, soit parce que le débit augmente plus vite entraînant un effet de dilution.

A l'échelle d'un petit bassin versant, le pic de la concentration en MES se produit habituellement avant le pic de débit (Heidel, 1956 in Khanchoul, 2005 et Bouanani, 2005). Allen et Peterson (1981) ont montré que les crues à hystérésis antihoraire dans un petit bassin n'ont lieu que très rarement. Cette constatation a été faite au niveau de la station de Dechemiya qui contrôle un sous bassin de surface réduite (83 km²), et pour laquelle 10/13 des évènements sont de type à hystérésis horaire, soit 77% des crues sélectionnées.

5-2-Modèle antihoraire

Les crues de ce modèle surviennent essentiellement au printemps pour les stations de Lakhdaria, La Traille et Beni Slimane et en hiver pour les stations de Mezahime et Dechemiya. En effet, en hiver et couramment au printemps, le sol étant plus au moins saturé, les écoulements sont très élevés avec une moyenne de débit assez élevée, ce qui engendre l'effondrement des berges juste après le passage du pic de la crue. L'érosion et le transport solide se voient légèrement retardés par rapport aux écoulements, on obtient donc des hystérésis antihoraires.

La localisation des évènements pluvieux définit les zones de production de sédiments en suspension et explique l'origine de cette forme de boucle. De plus, les sources de sédiments en suspension sont lointaines et répandues dans tout le bassin versant. C'est cet éloignement qui fait que les sédiments en suspension transportés depuis l'amont du bassin ont besoin de beaucoup de temps pour arriver à l'exutoire.

Les crues de ce modèle sont caractérisées par des concentrations en MES très élevées pour tous les sous-bassins. Au niveau de la station de Lakhdaria qui contrôle 83% de la surface totale du bassin de l'oued Isser, Les concentrations en MES sont plus élevées pour l'hystérésis antihoraire 60.93 g.l^{-1} que pour l'hystérésis horaire 45.13 g.l^{-1} . Elles s'expliquent par le fait que la partie avale du bassin (sources proche de la station de jaugeage) est caractérisée par des couverts forestiers bien développés et fournit moins de sédiments en suspension par rapport à la partie amont du bassin (sources lointaines de la station de jaugeage). La partie amont se caractérise par un couvert végétal faible et dégradé, elle est occupée par des cultures essentiellement céréalière et fourragères. De plus, la variabilité spatiale des roches et des formations superficielles peut aussi expliquer cette différence. En effet, la partie amont du bassin se caractérise par des formations érodibles (argiles et marnes), elle fournit donc plus de matières en suspension que la partie aval du bassin.

5-3-Modèle rectiligne plus boucle

Le modèle rectiligne plus boucle est moins fréquent dans les sous-bassins de l'oued Isser. Il n'apparaît que pour deux stations et représente respectivement 13% et 12% des événements pour les stations de Lakhdaria et La Traille. Ce modèle combine des parties des modèles I et II ou III et se déroule essentiellement en hiver pour les deux stations. La crue du 1 au 3 mai 1972 à la station de Lakhdaria illustre ce type d'hystérésis (fig 141). Pour cette crue, la concentration des sédiments en suspension augmente et diminue en synchronisation avec le débit pendant les premières et les dernières phases de la crue. Lors de la crue, l'augmentation de la concentration en MES survient plus tard que celle du débit et le pic de la concentration survient après celui du débit. Cette crue donne une hystérésis plus boucle dans le sens antihoraire.

5-4-Modèle en forme de huit

Les crues de ce modèle surviennent essentiellement en hiver et au printemps sauf pour la station de Lakhdaria qui montre un nombre non négligeable des crues se déroulant aussi en automne. La forme en huit combine des parties des modèles II et III. La crue du 6 au 7 décembre 1997 enregistrée au niveau de la station de Lakhdaria (fig 141) illustre ce type d'hystérésis. Pour cette crue, l'augmentation de la concentration en MES est plus rapide que celle du débit et la concentration maximale arrive avant le débit de pointe, ceci donne une boucle dans le sens horaire. Après le pic de la concentration de MES, la disponibilité des sédiments en suspension reste assez élevée et on remarque une diminution moins rapide de la

concentration avec le temps, lors de la décrue. Le rapport C/Q est plus grand qu'en montée de crue. C'est donc une boucle antihoraire qui se produit. L'allure du graphe de la concentration et de débit indique ainsi que la crue correspond à un modèle de forme en huit.

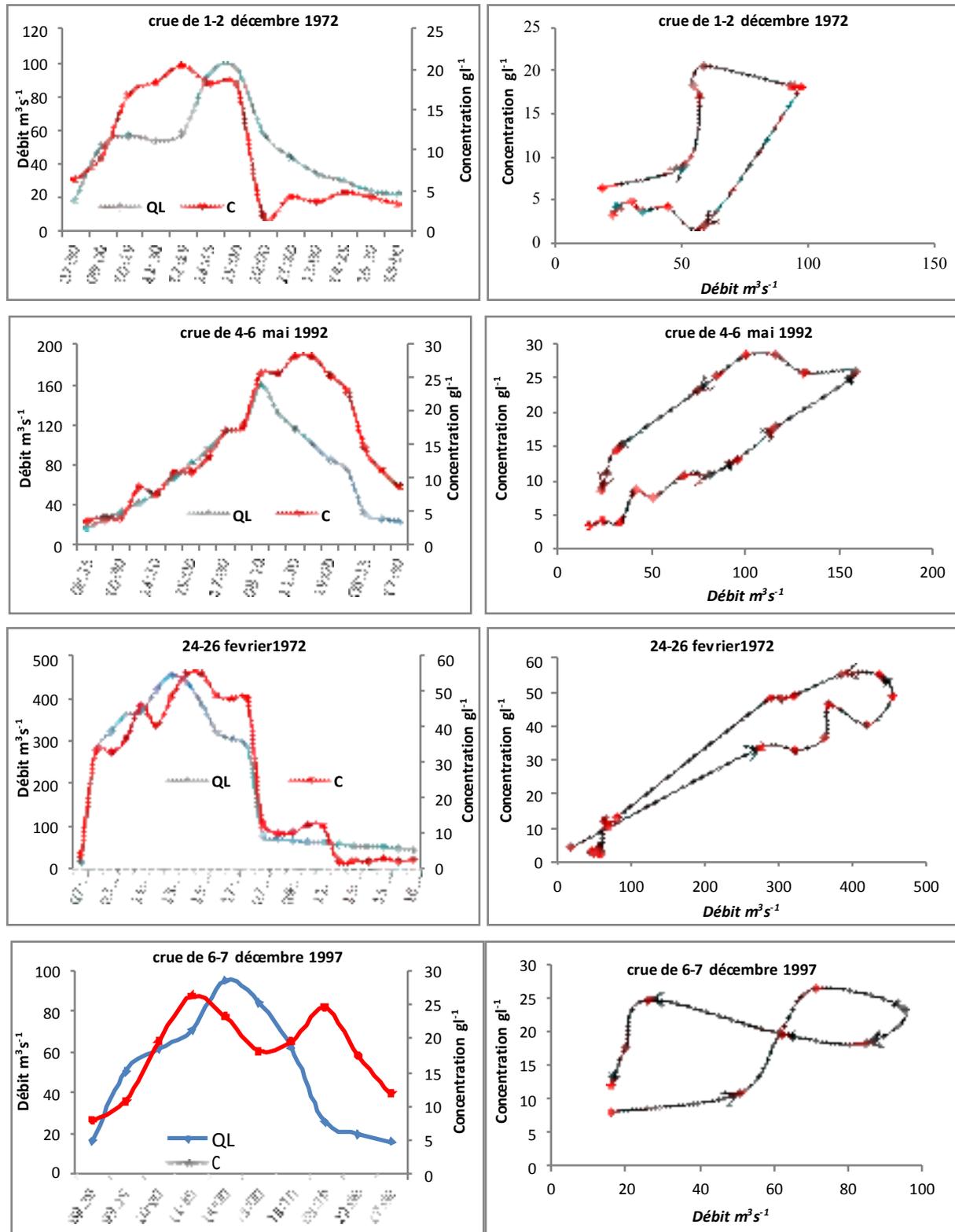


Figure 141: Evolution des concentrations en MES et des débits en fonction du temps pendant quelques crues au niveau de la station de Lakhdaria et classification des relations C-Ql

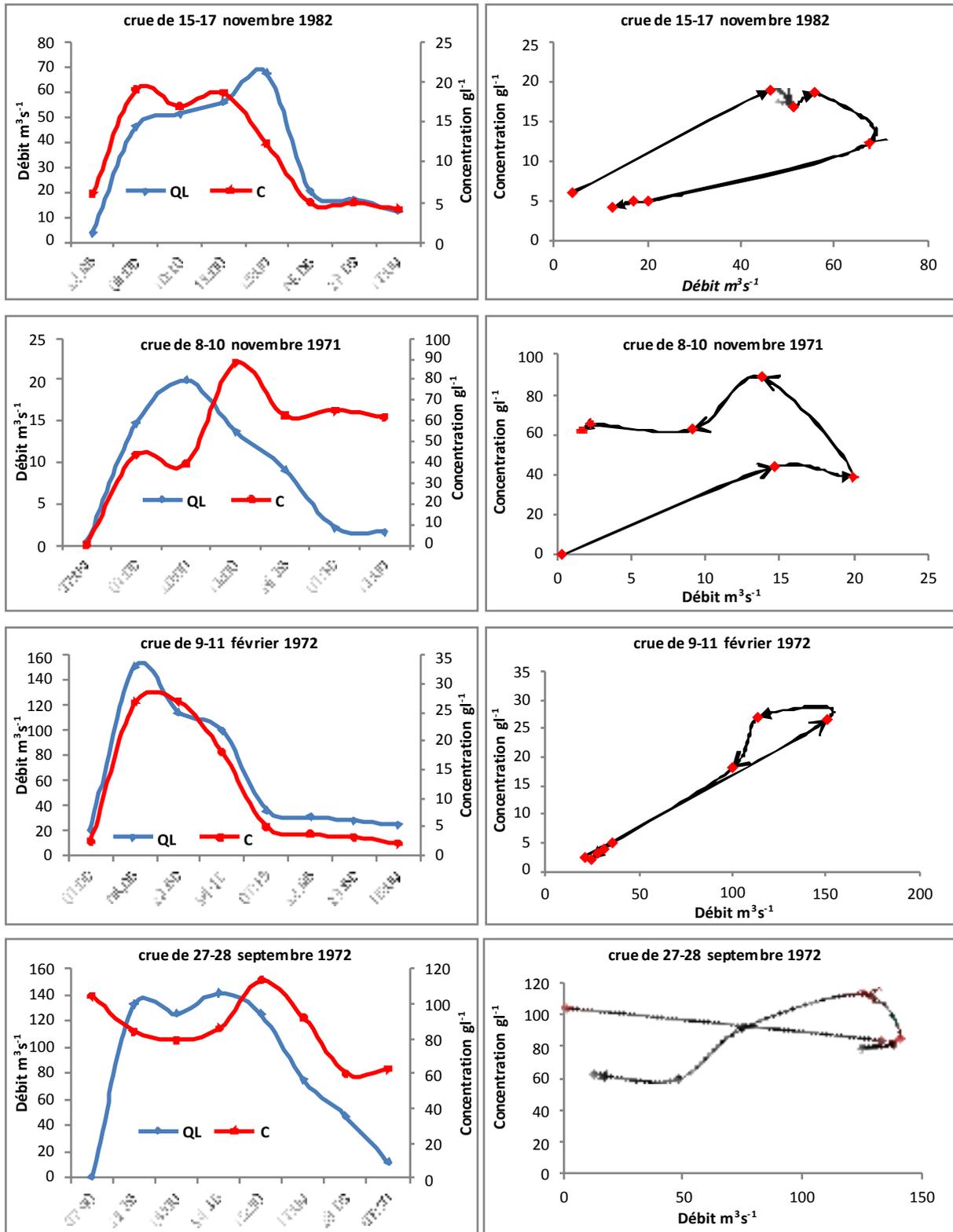


Figure 142: Evolution des concentrations en MES et des débits en fonction du temps pendant quelques crues au niveau de la station de La Traille et classification des relations C-QL

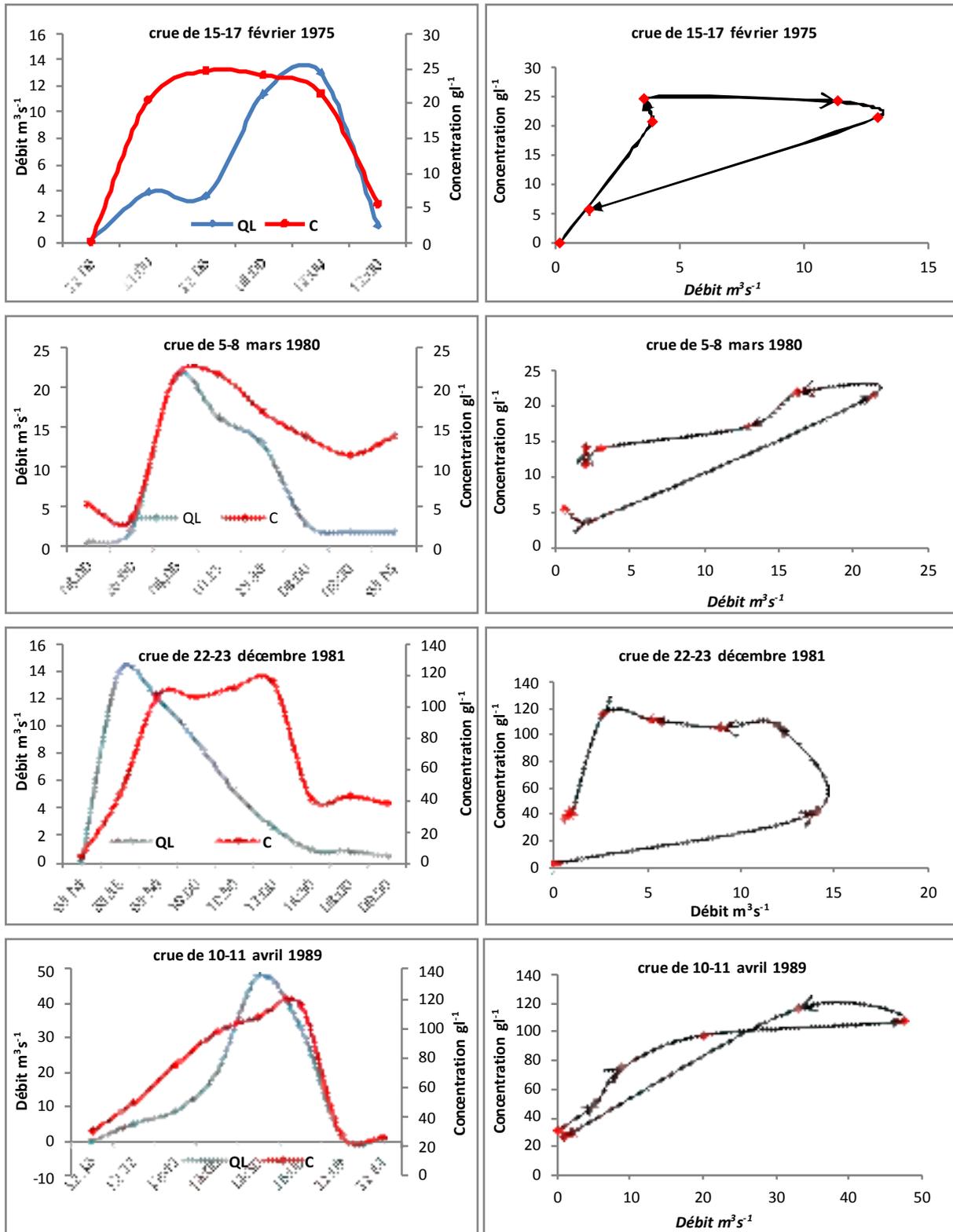


Figure 143: Evolution des concentrations en MES et des débits en fonction du temps pendant quelques crues au niveau de la station de Beni Slimane et classification des relations C-QL

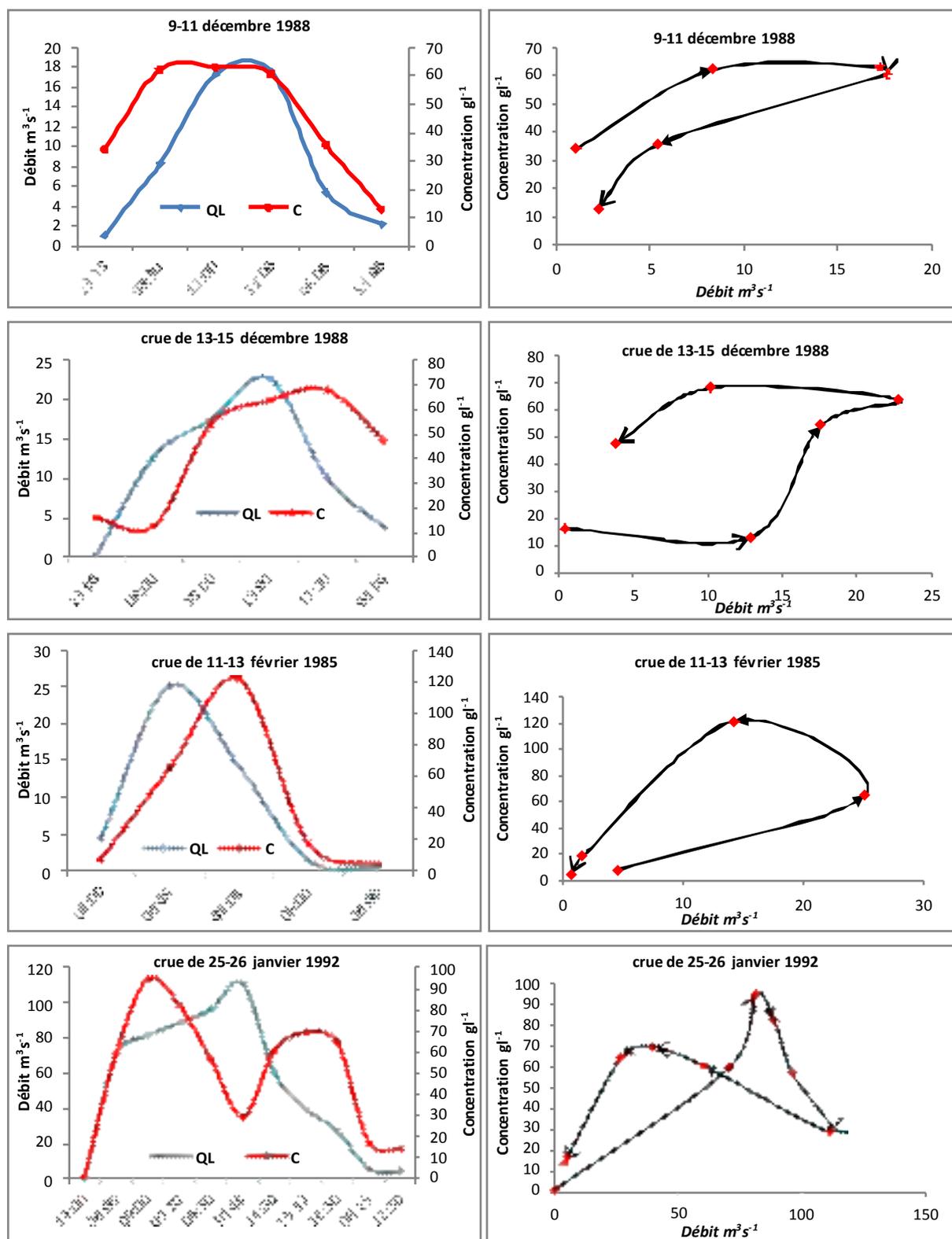


Figure 144: Evolution des concentrations en MES et des débits en fonction du temps pendant quelques crues au niveau de la station de Mezahime et classification des relations C-QL

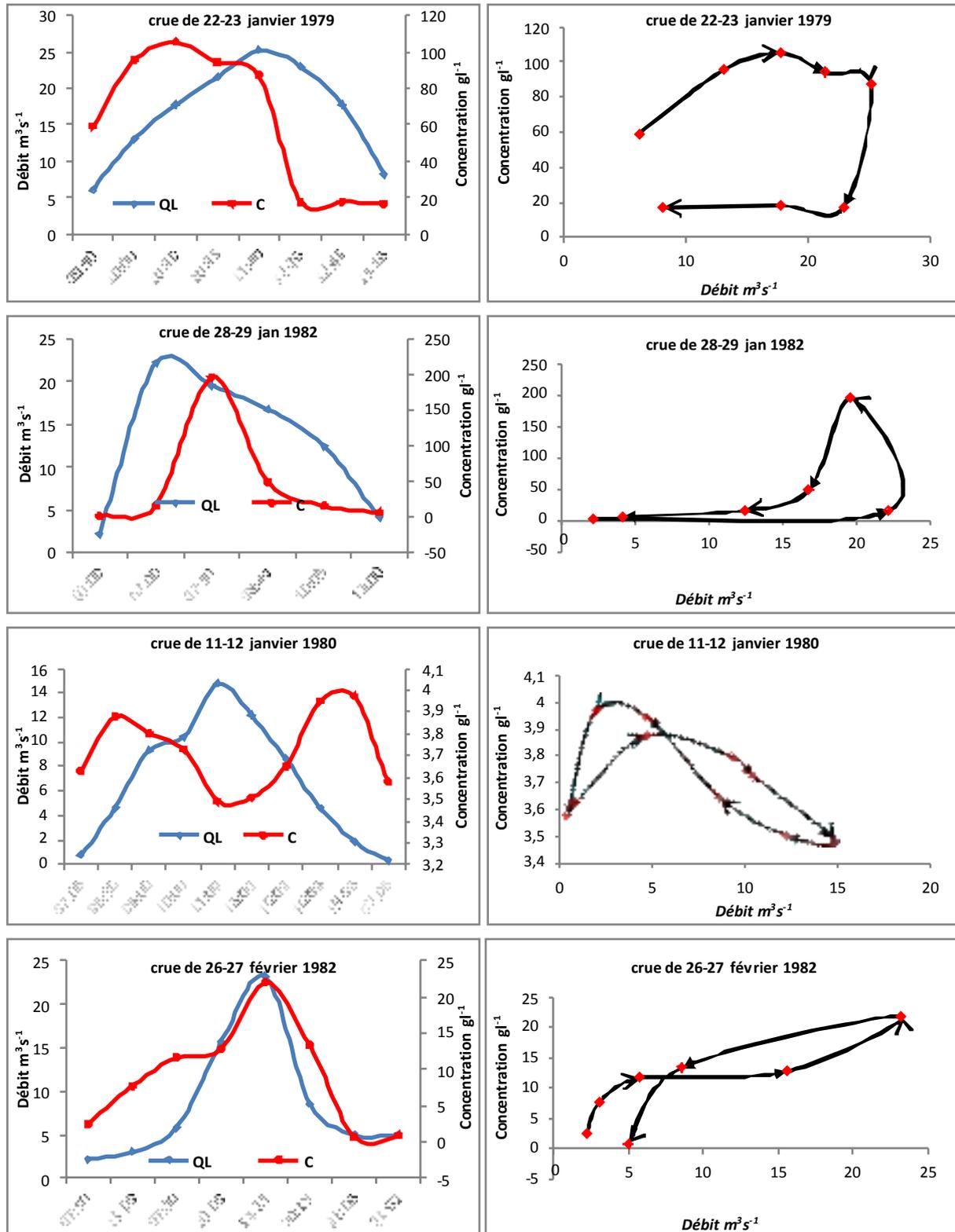


Figure 145: Evolution des concentrations en MES et des débits en fonction du temps pendant quelques crues au niveau de la station de Dechemiya et classification des relations C-QL

6-Saisonnalité des crues

L'étude de la relation concentration en MES-débit appliquée aux sous bassins de l'oued Isser pendant les différentes périodes d'étude a mis en évidence une forte variabilité saisonnière de la dynamique des matières en suspension. Cette dernière est liée d'une part aux variations du débit au cours de l'année, et d'autre part, aux variations de la disponibilité des particules (fig 146).

En automne, les crues sont caractérisées par une courte durée et par de fortes valeurs des concentrations en MES. Au niveau de la station de Beni Slimane, la moyenne arithmétique de la concentration des crues d'automne est de 118.7 g.l^{-1} pour plus de 11 évènements. Cette turbidité est à attribuer à la disponibilité de MES liée à la présence d'un stock important de particules en suspension accumulées pendant la saison estivale. En effet, le sol est particulièrement fragilisé, mal protégé par le couvert végétal donc facilement érodable. Ces facteurs sont associés à des pluies pouvant être agressives et de courte durée, l'érosion est active dès les premières pluies qui, même si elles génèrent un faible débit liquide, peuvent véhiculer des concentrations de sédiments en suspension très élevées. Donc, on constate un épuisement progressif des particules en suspension des versants et du cours d'eau lui-même.

En hiver et au printemps, les crues sont plus fréquentes et de longue durée par rapport aux crues d'automne notamment au niveau de la station de Lakhdaria qui contrôle un bassin de 3611 km^2 . Les évènements de ces saisons se caractérisent par des débits liquides élevés et des concentrations en matières en suspension faibles en hiver et encore plus faibles au printemps. Les eaux de ruissellements sont donc moins chargées en particules en suspension puisque la quasi-totalité des sédiments du lit et du versant a été transportée lors des premières crues de la saison d'automne, d'une part. D'autre part, les fortes valeurs de débits liquides entraînent un effet de dilution. Durant ces deux saisons, le sol, plus ou moins saturé et bien couvert résiste mieux à la pluie. L'érosion et le transport solide sont légèrement retardés par rapport aux écoulements. En effet, les particules en suspension proviennent essentiellement du cours d'eau lui-même, l'érosion des berges constitue une source importante de sédiments correspondant aux berges désolidarisées voire effondrées dans le cours d'eau.

En été, la fréquence des évènements est très faible parce que cette saison correspond au régime d'étiage, avec des pluies et des crues plus rares. Les quelques crues d'été se déroulent principalement en août, elles sont caractérisées par une courte durée et une turbidité élevée. Cette saison constitue une période d'accumulation des particules en suspension.

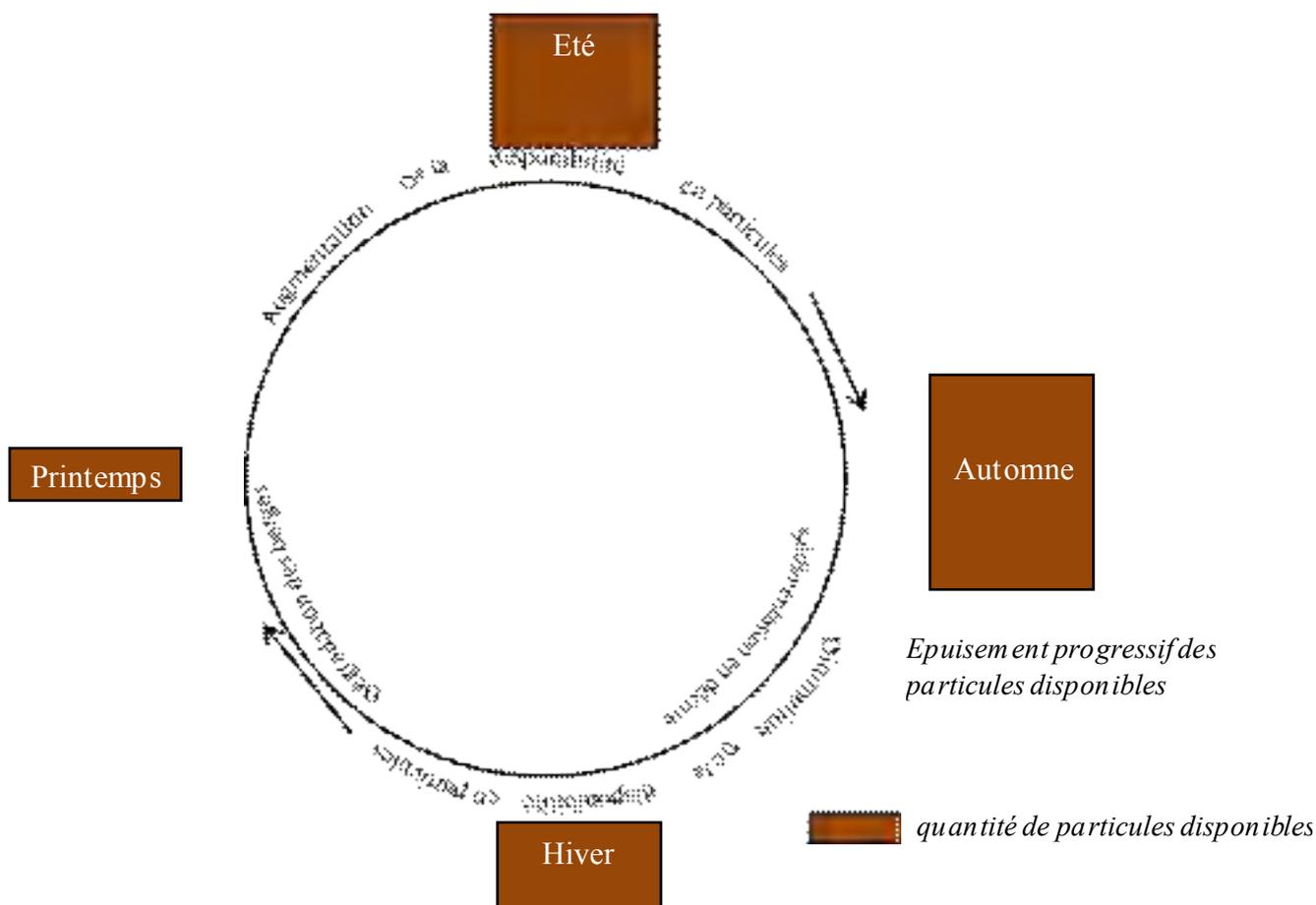


Figure 146: Fonctionnement des sous-bassins étudiés à partir des données de débits et de concentrations en MES

7-Rendement des crues

Les évènements de crue ne représentent qu'une faible part du temps par rapport aux années étudiées. Les crues représentent environ 3.47%, 2.21%, 1.29%, 0.67% et 0.34 % du temps respectivement pour les stations de Lakhdaria, La trailla, Beni Slimane, Mezahime et Dechemiya. Les crues à hystérésis horaire et antihoraire, qui sont les crues les plus largement rencontrées, contribuent à la majorité des flux de matières en suspension, alors que les classes à hystérésis linéaire plus boucle et forme en huit ne contribuent que faiblement aux flux sédimentaires en suspension.

Le rapport de la charge solide en suspension dérivé varie considérablement d'une crue à une autre en fonction de nombreux facteurs, tels que la durée de la crue, la saison, type de la crue et son débit de pointe.

L'apport solide en suspension moyen annuel estimé pour les crues est de 4.002, 1.39, 0.32, 0.14 et 0.054 millions de tonnes, correspondant à une dégradation spécifique aux crues de 1108, 541, 1138, 211 et 650 t.km⁻².an⁻¹ en moyenne interannuelle, respectivement pour les stations de Lakhdaria, La trailla, Beni Slimane, Mezahime et Dechemiya.

L'analyse des rendements saisonniers des flux sédimentaires indique que l'automne contribue pour une grande partie des sédiments au niveau des stations de La Traille 39.72%, Beni Slimane 69.11% et Dechemiya 29.32%. Par contre, la contribution la plus importante est en hiver pour la station de Lakhdaria 49.52% et au printemps à la station de Mezahime 35.27% (fig 147 à 151).

Lorsque les pluies automnales qui sont très intenses, avec des gouttes de grosse taille tombent sur le sol, la force de leur impact permet de briser les agrégats et de disperser les particules qui forment le sol. Ainsi, les sables fins, les limons et les argiles sont facilement emportés par les gouttes d'eau, car ce sont des particules très fines. Le ruissellement se produit lorsque l'eau sur une pente ne peut pas s'infiltrer assez vite dans le sol ou qu'elle ne peut pas être interceptée par des obstacles naturels. Plus les précipitations et le ruissellement sont de forte intensité, plus la quantité des particules déplacées est grande.

Les pluies de la saison d'hiver ont, par contre, de faibles intensités, mais elles durent longtemps et couvrent de grandes surfaces. Elles produisent l'abondance hivernale des crues, donc des apports liquides importants, qui engendrent un apport sédimentaire important même les concentrations en MES sont modestes. Les eaux de ruissellement, importantes en volume, produisent donc un effet de dilution.

La dégradation spécifique lors crues par l'approche d'hystérésis est plus élevée que la dégradation estimée par régression. Ceci est mis en évidence à partir des résultats de toutes les stations sauf pour la station de Mezahime. Pour cette station, la fréquence d'échantillonnage étant très faible, et avec parfois des lacunes d'observation, les crues génératrices de la majeure partie du transport en suspension ne seront pas correctement échantillonnées. La dégradation spécifique estimée par régression intègre les différents cycles de l'écoulement annuel (basses, moyennes et hautes eaux) d'une part, d'autre part elle est le résultat de la régression $QS=a QI^b$, qui sous-estime le flux solide jusqu'à 56% au niveau de la station de Lakhdaria.

Les événements des crues constituent donc des processus clés dans la production et l'estimation des charges sédimentaires. L'association de la forte variabilité temporelle des transports et de l'impossibilité de restreindre les épisodes de transports significatifs à une période donnée impose la nécessité d'avoir recours à une fréquence d'échantillonnage forte si l'on veut déterminer correctement les transports en MES.

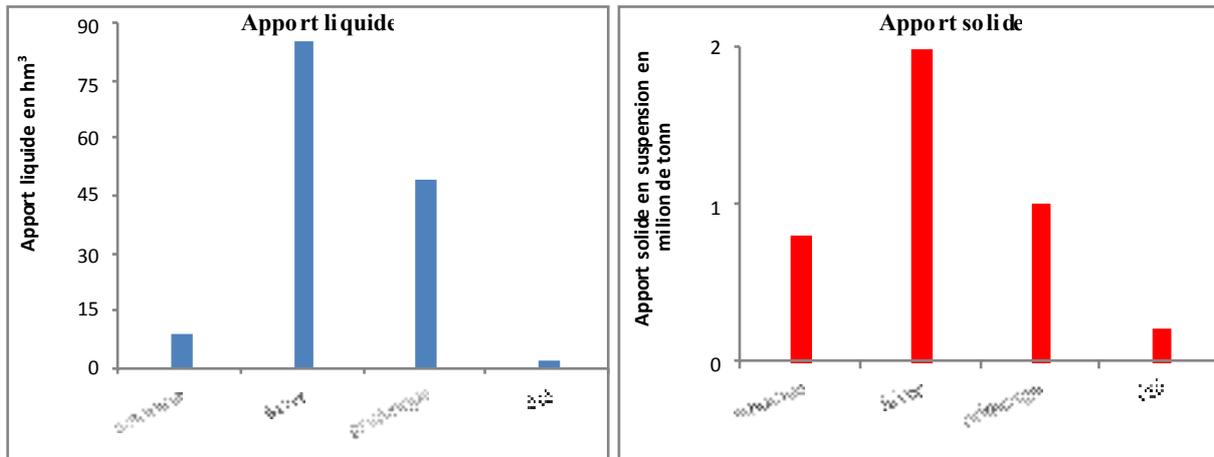


Figure 147: Répartition saisonnière des flux hydrosédimentaires des crues sélectionnées au niveau de la station de Lakhdaria (période de 38 ans 1971-2009)

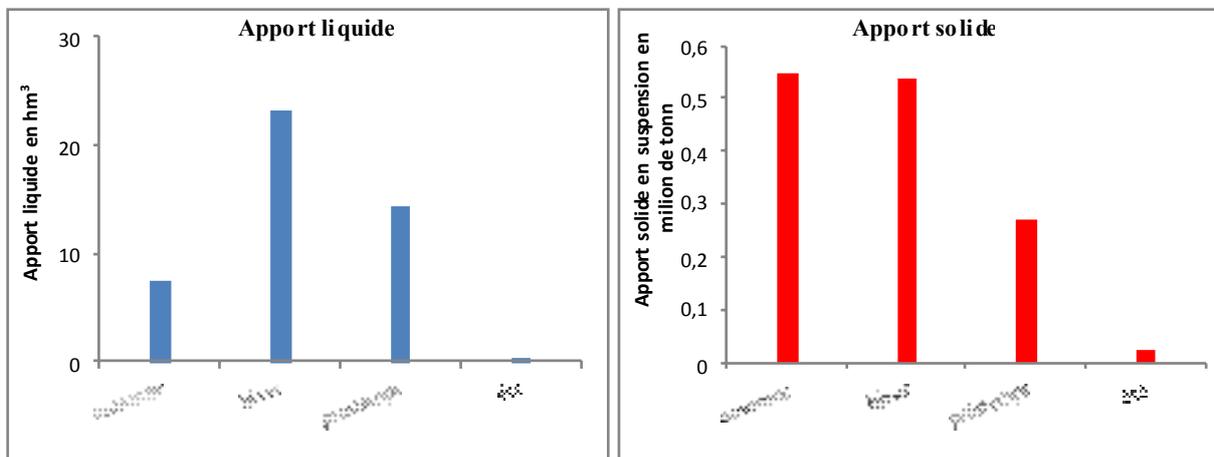


Figure 148: Répartition saisonnière des flux hydrosédimentaires des crues sélectionnées au niveau de la station de La Traïlle (période de 14 ans 1971-1985)

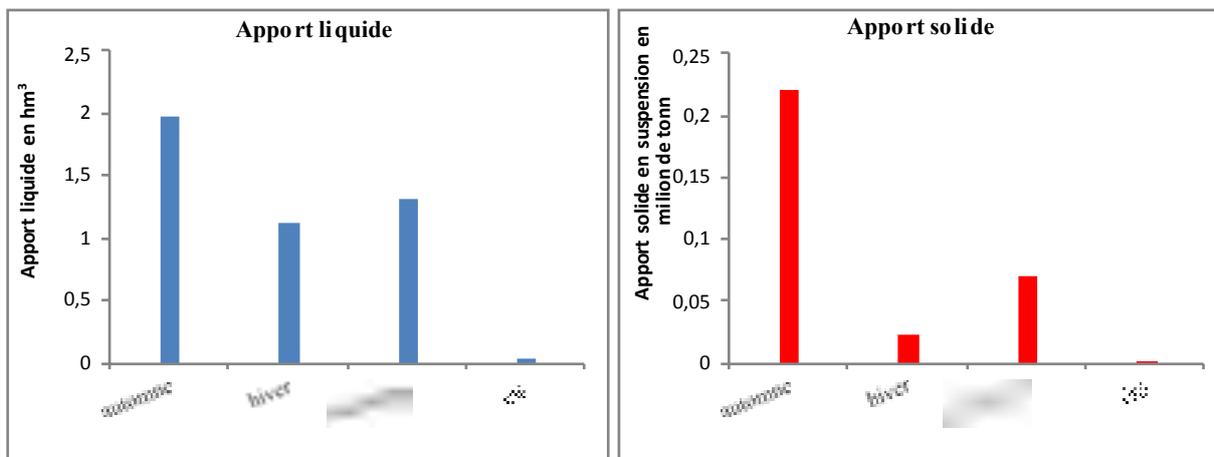


Figure 149: Répartition saisonnière des flux hydrosédimentaires des crues sélectionnées au niveau de la station de Beni Slimane (période de 28 ans 1973-2001)

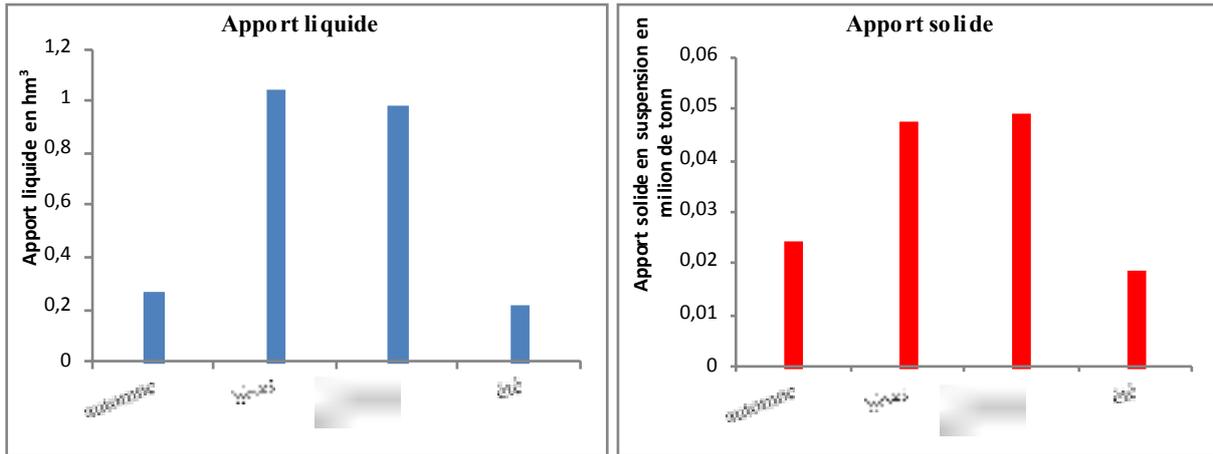


Figure 150: Répartition saisonnière des flux hydrosédimentaires des crues sélectionnées au niveau de la station de Mezahime (période de 22ans 1985-2007)

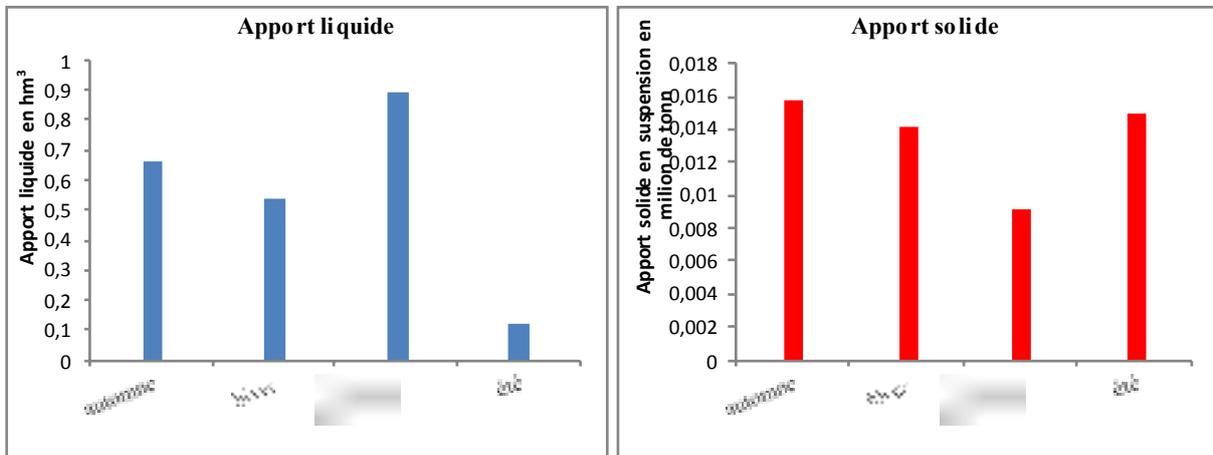


Figure 151: Répartition saisonnière des flux hydrosédimentaires des crues sélectionnées au niveau de la station de Dechemiya (période de 12ans 1985-2007)

Dans le bassin versant de l'oued Isser, la plus grande crue en termes de flux de sédiments en suspension a eu lieu en automne (17-20 septembre 1997) à la station de Lakhdaria avec une hystérésis de type horaire. Cette crue a enregistré un volume d'eau de 41 hm³ avec un débit liquide moyen de 160 m³.s⁻¹ et un débit de pointe égal 473 m³.s⁻¹. Cet évènement est arrivé après une longue période sèche de presque une année, où le stock de sédiments accumulé a été important. La concentration moyenne a été de 129 g.l⁻¹ et la concentration maximale de 202 g.l⁻¹. Cette crue a permis de transporter 6.68 MT de sédiments en suspension.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné la relation entre la concentration des sédiments en suspension C et le débit liquide QL pendant les crues dans les sous bassins jaugés de l'oued Isser.

Les résultats basés sur les données représentant 222 événements de crues, indiquent que le bassin de l'Isser est caractérisé par des concentrations de matières en suspension très élevées qui atteignent la valeur de 410 g.l^{-1} . L'analyse statistique des variables QL et C montre une variabilité saisonnière très importante. Cette variabilité est encore plus forte à l'échelle événementielle. Nous avons constaté que la disponibilité en particules de sédiments déposés est maximal à la fin de l'été en conditions de basse eaux, son épuisement se produit essentiellement en automne quand les débits augmentent, et la disponibilité est faible en hiver à très faible au printemps.

L'évolution des concentrations des sédiments en fonction des débits liquides pendant les crues présente quatre modèles d'hystérésis : horaire, antihoraire, rectiligne plus boucle et figure en huit. L'analyse par hystérésis montre que l'effet saisonnier et le caractère régional (taille du bassin) influent sur la forme des boucles obtenues. L'hétérogénéité du bassin du point de vue de la lithologie et la répartition spatiale des pluies ont un effet important sur le type d'hystérésis. L'analyse saisonnière des crues montre que les crues d'automne de courte durée ont une turbidité assez forte ; en hiver et au printemps, les crues sont de longue durée avec une turbidité assez faible.

La charge solide en suspension dérivée varie considérablement d'une crue à une autre en fonction de nombreux facteurs, tels que la durée de la crue, la saison, type de la crue et son débit de pointe.

Les crues à hystérésis horaire et antihoraire, qui sont les crues les plus largement rencontrées, contribuent à la majorité des flux de matières en suspension, alors que les classes à hystérésis linéaire plus boucle et forme en huit ne contribuent que faiblement aux flux sédimentaires en suspension.

L'analyse des rendements saisonniers des flux sédimentaires indique que l'automne contribue pour une grande partie des sédiments au niveau des stations de La Traille 39.72%, Beni Slimane 69.11% et Dechemiya 29.32%. La contribution la plus importante est en hiver pour la station de Lakhdaria 49.52% et au printemps à la station de Mezahime 35.27%.

Conclusion générale

Cette étude est une contribution à la compréhension de la dynamique et la quantification des transports solides en suspension dans un système exoréique de l'Algérie du Nord, est le bassin versant de l'oued Isser et ses affluents (Algérie centrale). Notre recherche fondée sur une base de données pluviométriques et des données de mesure hydrosédimentaires (débit-concentration) au droit de cinq stations hydrométrique répartie dans le bassin versant de l'oued Isser.

Après l'étude bibliographique qui a présenté les différents processus à l'échelle du bassin versant et le cours d'eau lui-même. Le présent travail a abordé des étapes successives : la présentation de contexte physico-géographique du bassin et faire ressortir les principaux facteurs qui influent sur les transports solides des oueds, un aperçu sur les données disponibles et une étude fréquentielle des données, une étude statistiques des pluies moyennes annuelles et fréquentielles, une études statistique des débits annuels, mensuels, journaliers et instantanés de crues, et finalement l'étude des transports en MES, leur modélisation, leur quantification et leur impact sur l'envasement des barrage.

Le bassin versant de l'Isser fait partie de l'ensemble de l'Atlas tellien, zone plissée alpine de l'Afrique du Nord, caractérisée par sa complexité lithologique et structurale. Il se divisé en trois parties à savoir le Bas Isser correspond au domaine tellien du Nord, le Moyen Isser correspond au domaine Sud Tellien et le Haut Isser correspond au domaine Hautes plaines. Les caractéristiques topographiques du bassin favorisent l'écoulement de surface et par conséquent le transport solide. Les formations lithologiques constituent de roches tendres sensibles à l'érosion notamment les marnes, les argiles et les calcaires. Le couvert végétal représente 20% de la superficie totale, le reste de la surface soit 80% est occupé par des cultures essentiellement céréalières et fourragères. La conjonction de ces différentes caractéristiques montre que le bassin versant de l'oued Isser a une potentialité érosive importante.

Principaux résultats

L'étude statistique des pluies du bassin de l'Isser a été réalisée sur 23 postes pluviométriques allant de 1970-2009. L'homogénéisation des données de pluies annuelles basée sur l'application de la méthode d'Analyse en Composants Principale (A.C.P), des vecteurs régionaux et des régressions multiples, met en évidence une variabilité spatiale qui se traduit par une baisse pluviométrique latitudinale du Nord vers le Sud. De plus, les pluies moyennes annuelles présentent une irrégularité temporelle bien marquée, années humides et sèches.

L'étude des écoulements liquides nous a permis de mettre en évidence un accroissement de débit de l'amont vers l'aval en raison du changement de domaine climatique de semi-aride vers le subhumide, et en seconde lieu par l'accroissement de la surface drainée. En effet, le débit moyen interannuel passe de $0.24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sur l'oued Zaroua (Haut Isser) à $8.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au niveau de l'Isser maritime à la station de Lakhdaria. La variabilité spatiale de l'écoulement se double d'une variabilité temporelle encore plus forte, où pour un même sous bassin, l'écoulement peut fluctuer de plus de deux ordres de grandeur selon les années, les saisons et les mois.

L'évaluation des paramètres hydrologiques fait ressortir la faiblesse de coefficients d'écoulement en domaine des Hautes plaines notamment au niveau de oued El Mallah Kherza (8.85%) et l'importance de l'évapotranspiration caractérisant ce domaine. Alors que les fortes valeurs de coefficients d'écoulement sont calculées pour le bassin de Isser maritime (14.44%) et à oued Zaroua (18.58%).

L'analyse des débits moyens mensuels par le coefficient mensuel de débit CMD montre deux types de régime. Le régime des Hautes Plaines qui correspond au haut Isser, domine sur les deux tiers du bassin de l'Isser, et le régime Tellien.

A l'échelle des crues, les débits max moyens journaliers et max instantanés s'ajustent bien à la loi Log-Normale. Les cinq sous-bassins sont soumis à des événements torrentiels particulièrement en fin d'été et au début d'automne dus principalement aux pluies à caractère orageux. Ces épisodes ont une influence directe sur les moyennes interannuelles de la période d'étude.

L'étude des transports solide en suspension a été réalisée selon une approche statistique reliant le débit solide et la concentration au débit liquide pour analyser et estimer le flux en MES dans les cinq sous bassins de l'oued Isser. Le modèle en puissance $C = a Q_l^b$ montre une dispersion considérable des points autour de la courbe de transport solide avec des coefficients de corrélation faibles. Il montre que le débit liquide ne permet pas à lui seul d'interpréter la variabilité de la concentration en MES, mais aussi également elle est liée aux variations temporelles dans la disponibilité des particules en suspension.

L'application du modèle en puissance $Q_s = a Q_l^b$ pour différents regroupement ne donne pas les mêmes résultats sur la qualité d'estimation des flux solide en suspension, chaque sous bassin réagit différemment du fait que la meilleure d'estimation des flux solides. La précision du modèle en puissance a été évaluée par l'erreur relative qui a montré souvent une sous-estimation de flux en MES pour tous les sous bassins à tous les échelles de temps. Les calculs ont été également réalisés en appliquant le facteur de correction de Duan, provoque une surestimation qui peut être importante, alors que le facteur de correction de Kao apporte des bons résultats.

Les paramètres du modèle en puissance a et b sont inversement corrélés, marqués par une faible variabilité de l'exposant b et une instabilité du paramètre a . Ces valeurs sont les résultats de l'interaction de plusieurs conditions hydroclimatiques, morphologiques, lithologiques et le couvert végétal. On constate que les sous bassins situent dans le Haut Isser en domaine semi-aride possèdent des valeurs élevées du paramètre a , où les pluies ont un caractère agressive, tombent sur des matériaux facilement érodables (marnes et argiles). Alors qu'on constate l'effet évident du caractère régional (surface) sur l'exposant b . ainsi, une décroissance de l'érodabilité (paramètre a) lorsque la superficie augmente, où les possibilités d'accumulation sédimentaires avant l'exutoire sont élevées.

Le flux en MES calculé par les régressions saisonnières débit liquide-débit solide, augmente d'une façon très nette avec l'accroissement de la superficie de l'amont vers l'aval, il passe de 0.04 millions de tonne pour le bassin de l'oued Zaroua avec une superficie de 83 km² à 1.82 millions de tonne à oued Isser maritime pour une superficie de 3611 km². La dynamique de MES révèle que les flux sédimentaires subissent une très forte variabilité temporelle, due essentiellement à la conséquence d'une irrégularité du régime annuel d'écoulement, lié principalement à l'influence des précipitations, par leurs valeurs extrêmes très dispersées et leurs

intensités très variable. La contribution saisonnière au flux sédimentaires indique que le transport solide en suspension est plus accentué en automne et en hiver et faible ampleur au printemps.

La majorité des exportations solides en suspension est réalisée au cours des crues violentes et de courte durée. Ainsi, la durée cumulée de tous les événements des crues représente un faible pourcentage de temps annuel, avec des années extrêmes comme 2001/02 à la station de Beni Slimane, où en 2 jours, soit 0.54 % du temps annuel, ce sont 99.05% des matières en suspension totales de l'année qui ont été exportées.

Les valeurs de T.S.S pour la période commune (1973/74-1984/85), varient entre 278 à la station de La Traille et 795 t.km⁻².an⁻¹ pour Dechemiya. Cette disparité est due à la différence de la lithologie, du couvert végétal et de la topographie. Ainsi, la dégradation spécifique varie considérablement d'une année à l'autre, on passe de 1 à 5125 t.km⁻².an⁻¹ à la station de Lakhdaria, de 9 à 4611 t.km⁻².an⁻¹ à la station de Beni Slimane. Par comparaison avec les bassins du Maghreb, Walling, 1984 estime que les valeurs de T.S.S varient entre 1000 et 5000 t.km⁻².an⁻¹.

Les résultats de la bathymétrie montrent que l'envasement moyen annuel des barrages est de 2.84% pour Beni Amrane. 0.55% au barrage de Koudiate Acerdoune et 1.02% au barrage de Ladrat. Ces taux d'envasement se situent dans la fourchette des valeurs trouvées par d'autres chercheurs au niveau des barrages Maghrébins. Remini, 2017 cite des pertes de capacité allant de 0.6% par an pour le barrage de Meurad à 4.6% par ans pour le barrage de Mexa. Les barrages Tunisiens perdent annuellement 0.5% à 1% de la capacité initiale par envasement (Ben M amou et Louati, 2007). Au Maroc, les pertes de capacité rapportées par Badraoui et Hadji (2001) et Lahou (2005) sont très variables, allant de 0,05% pour le barrage d'Abdelmoumen à 5,71% pour le barrage de Sidi Driss, la moyenne étant de 1,09%.

Les résultats de la bathymétrie réalisée en octobre 2004 par l'ANBT au niveau du barrage de Beni Amrane, a abouti à un envasement moyen annuel de 0.89 M m³.an⁻¹, soit en terme de dégradation spécifique de 395 t.km⁻².an⁻¹. Pour la même période (1988-2004), notre estimation de l'envasement en tenant compte du charriage, estimé à 15% du transport en suspension (PNUD 1987, Remini, 2004), est de 0.79M m³.an⁻¹. La dégradation spécifique du bassin versant est de 350 t.km⁻².an⁻¹. Cette valeur reste inférieure à la bathymétrie. La différence entre les deux valeurs est liée au protocole de prélèvement des concentrations à la station hydrométrique. De même que

l'estimation de la part que représente le charriage varie en fonction des auteurs et des méthodes de calcul.

L'étude de la relation concentration-débit par l'approche d'hystérésis, à travers des séries d'évènements chronologiques de crues, a montré que la réponse des concentrations aux débits suit quatre modèles d'hystérésis : horaire, antihoraire, rectiligne plus boucle et figure en huit. L'analyse par hystérésis montre l'influence de l'effet saisonnier et le caractère régional (taille du bassin) sur la forme des boucles obtenues. L'hétérogénéité du bassin du point de vue lithologie et la répartition spatiale des pluies ont encore un effet important sur la boucle obtenue. L'analyse saisonnière des crues montre que les crues d'automne sont de courte durée avec une turbidité assez forte. En hiver et au printemps, les crues sont de longue durée avec une turbidité assez faible. Les crues à hystérésis horaire et antihoraire, sont les crues les plus largement rencontrées, et contribuent à la majorité des flux de matières en suspension.

Ainsi, l'approche d'hystérésis a nous donnée une aide sur le cycle de la disponibilité en particules de sédiments. Elle est maximale à la fin de l'été en conditions de basse eaux, son épuisement se produit essentiellement en automne quand les débits augmentent, et la disponibilité est faible en hiver à très faible au printemps.

Dans un contexte de changement climatique, les activités anthropiques ont un impact important sur les phénomènes d'érosion et les transports de sédiments dans les bassins versants. Les phénomènes hydrologiques extrêmes (pluies de forte intensité et crues, étiages), et la succession d'années sèches, liés aux changements climatiques, provoquent une exacerbation de l'érosion et des transports solides dans les oueds. L'intensification de l'occupation de l'espace, sous l'effet des activités anthropiques, aussi bien par l'agriculture, que par les infrastructures ont rendu le milieu naturel plus sensible à l'érosion. D'autre part, la réalisation des barrages dans les bassins versants fait qu'une grande partie des flux sédimentaires est piégée dans les réservoirs, et n'atteignent pas la mer, et ont donc des conséquences sur la géomorphologie et la dynamique des côtes.

Perspectives

Pour une étude de l'évaluation des transports solides, et la connaissance de leur effet sur les ouvrages hydraulique comme un barrage. Toutes les fonctions théoriques ne sont pas une représentation exacte du processus naturel, elles restent une description qui se rapproche du phénomène. Ainsi, La méthode de mesure existante doit être revue et les recommandations suivantes doivent être prises en compte :

- la première chose à faire est d'utiliser des échantillonneurs automatiques à haute fréquence sur de longues périodes, et d'utiliser la méthode d'extrapolation du champ de vitesse dans l'ensemble de la section de mesure pour améliorer la fiabilité des données ;
- Faire des études sur les mesures du transport par charriage ;
- Etude de la part de matériaux en suspension à l'intérieur de la retenue ;
- Identifier et quantifier les sources des matières en suspension à l'échelle de la crue ;
- Etude de l'érosion par d'autres approches (cartographie) pour déterminer le modèle le plus performant en Algérie et au Maghreb ;
- Des actions de protection et de conservation des sols doivent être entreprises à l'échelle des zones les plus vulnérables à l'érosion et elles doivent être menées parallèlement avec la construction de l'ouvrage. La construction des retenues collinaires dans les parties amont du bassin versant permettent de protéger les grands ouvrages contre un alluvionnement rapide.

Liste des figures

		page
Figure 1	Processus élémentaire de la désagrégation et de la mise en mouvement des fragments de terre. D'après Leguédais (2003).	5
Figure 2	Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau ou effet splash (d'après Leguédais 2003). Photos : Pierre-Olivier Cochard.	6
Figure 3	Étapes de la formation d'une croûte de battance (d'après Boiffin 1984).	9
Figure 4	Représentation schématique d'un cours d'eau et de ses abords (Lefrançois, 2007).	11
Figure 5	Pressions et glissement de berges Lefrançois, (2007)	12
Figure 6	Contextes favorables à une érosion de berges : courant direct (a), courant réfléchi (b), courant de retour (c). (Degoutte, 2005). D'après Lefrançois 2007	12
Figure 7	Diagramme de Hjulstrom (1935) décrivant la mise en mouvement et le transport des grains du lit en fonction de leur diamètre et de la vitesse d'écoulement.	14
Figure 8	Schématisation des processus de transport par charriage et de transport en suspension. D'après Lefrançois, 2005	15
Figure 9	Distribution théorique de la vitesse, de MES et du débit solide dans une section. D'après Filizola, 2003.	17
Figure 10	Organigramme de calcul d'un débit solide moyen journalier	23
Figure 11	Phénomène d'hystérésis dans la relation concentration – débit liquide. (a) hystérésis horaire (b) hystérésis antihoraire.	28
Figure 12	Allure de l'hystérésis en fonction du temps de transport et de la localisation de la source. X1 distance entre le centre de la source de sédiment et l'exutoire. X2 distance entre le centre de l'aire drainée et l'exutoire. t1 est le temps de transfert entre le centre de la source de sédiment et l'exutoire. t2 est le temps de transfert entre le centre de l'aire drainée et l'exutoire (Klein, 1984).	30
Figure 13	Distribution relative des différents continents en terme de (a) superficies de bassins versants, (b) flux mondiaux liquide et (c) flux mondiaux solide. D'après Milliman et Meade, 1983 ; Syvitskiet al, 2005.	35
Figure 14	Flux de sédiments spécifiques ($t.km^{-2}.an^{-1}$) sur les continents modélisés avec les relations empiriques (Ludwig, 1997). D'après Coynel 2005	36
Figure 15	Répartition géographique globale des taux de piégeage des sédiments retenus dans les grands barrages étudiés (Vörösmarty et al, 2003). D'après Coynel (2005).	37
Figure 16	Situation géographique du bassin versant de l'Isser	49
Figure 17	Présentation des sous-bassins naturels.	51
Figure 18	Courbe hypsométrique du bassin de l'Isser	53
Figure 19	Carte d'altitude du bassin versant de l'oued Isser	54
Figure 20	Carte des pertes du bassin versant de l'oued Isser	55
Figure 21	Carte de réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Isser	56

Figure 22	Carte géologique du bassin de l'Isser d'après Wildi (1983)	57
Figure 23	Carte lithologique du bassin versant de l'oued Isser (source : carte Litostratigraphique de l'Algérie ANRH)	59
Figure 24	Carte d'occupation du sol du bassin de l'oued Isser à l'échelle du 1:25000 (Source BNEDER, 2011)	62
Figure 25	Localisation des stations hydrométriques et des bassins jaugés dans le bassin versant de l'oued Isser	65
Figure 26	Chronologie des débits et des concentrations mesurées à la station de Lakhdaria durant la période d'étude (1971/2009).	66
Figure 27	Chronologie des débits et des concentrations mesurées à la station de Beni Slimane durant la période d'étude (1973/2009).	67
Figure 28	Chronologie des débits et des concentrations mesurées à la station de La Traïlle durant la période d'étude (1971/1985).	67
Figure 29	Chronologie des débits et des concentrations mesurées à la station de Mezahime durant la période d'étude (1985/2007).	68
Figure 30	Chronologie des débits et des concentrations mesurées à la station de Dechemiya durant la période d'étude (1973/1985).	68
Figure 31	Crue de 24-25 sep 1975 à la station de Lakhdaria. 28-29 sep 1985 à Beni Slimane	73
Figure 32	Fréquence des observations selon l'ordre de grandeur de la concentration	75
Figure 33	Répartition spatiale des postes pluviométrique étudiés	78
Figure 34	Ajustement à une loi racine normale des pluies annuelles des postes pluviométriques de base (valeurs exprimées en racine carrée)	82
Figure 35	Modifications des écarts entre les itérations	87
Figure 36	Valeurs prises par la composante	88
Figure 37	Comportement des postes pluviométriques de base avec la première composante C1	89
Figure 38	Valeurs prises par la composante 2	90
Figure 39	Comportement des postes pluviométriques de base avec la deuxième composante C2	90
Figure 40	Comportement des postes pluviométriques de base avec la troisième composante C3	91
Figure 41	Ajustement à une loi normale des projections des observations actives pour les trois composantes C1, C2 et C3 (n=40)	92
Figure 42	pluie observée et pluie estimée par C1, C2 et C3 pour la station de Lakhdaria gorges et la station de Hamiz barrage	93
Figure 43	Détection des anomalies accidentelles de Mongorno (01-14-04) par rapport à C1, C2 et C3	94
Figure 44	Détection des anomalies accidentelles de Souk ElKhemis (09-04-02)	94

	par rapport à C1, C2 et C3	
Figure45	Détection des anomalies systématiques des postes pluviométriques par rapport C1, C2 et C3	96
Figure46	Pluies observées et pluies estimées par régression double à Bordj Mnaeil	99
Figure47	pluie centrée réduite au niveau de la station de Lakhdaria gorge	100
Figure48	pluie centrée réduite au niveau de la station de Souk Elkhemis	101
Figure49	pluie centrée réduite au niveau de la station de Souagui	101
Figure50	Méthode de calcul de l'altitude lissée (Louamri, 2013)	105
Figure51	les étapes de la réalisation de la carte pluviométrique (Laborde, 1993 ; Assaba, 2003 ; Mebarki, 2005 ; Louamri, 2013)	106
Figure52	Régression pluies mesurées et pluies estimées par régression multiple (1970/2009)	107
Figure53	Variogramme des résidus de régression (1970-2009)	108
Figure54	Carte pluviométrique interannuelle du bassin versant de l'oued Isser (1970-2009)	109
Figure 55	Variations des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin de l'Isser période 1970-2009	112
Figure 56	Ajustement des Pjmax à la loi Log Normale pour trois postes pluviométrique	113
Figure57	Localisation des stations hydrométriques dans le bassin versant de l'oued Isser et présentation des bassins jaugés (Bassins unitaires, emboîtés et intermédiaires)	117
Figure58	Classement par ordre croissant de la superficie des bassins jaugés (Bassins unitaires, emboîtés et intermédiaires)	118
Figure59	Pourcentage d'information hydrométrique disponible aux stations de jaugeages	119
Figure60	Pourcentage d'information hydrométrique disponible aux stations de jaugeages (période commune : 1973/85)	120
Figure61	Etablissement des courbes d'étalonnage dans l'oued Isser	122
Figure62	Courbes d'étalonnage de la station de Lakhdaria pour différentes périodes	123
Figure63	Ajustements à la loi Log-Normale des débits moyens annuels	125
Figure64	Ajustements à la loi Log-Normale des débits mensuels	126
Figure 65	Exemples de régression entre les débits mensuels aux stations de références et lacunaires	127
Figure 66	Variabilité interannuelle des débits moyens annuels des bassins d'étude	129
Figure 67	Débits moyens annuels des bassins jaugés de l'oued Isser (période commune 1973-1985)	131
Figure 68	Relation entre la surface des bassins (km ²) et les débits absolus (m ³ .s ⁻¹). (Période commune 1973-1985). a : données des bassins jaugés ; b : données des bassins jaugés et intermédiaires	132
Figure 69	Profil hydrologique de l'oued Isser	133

Figure 70	Débit spécifique aux bassins d'étude (période commune 1973-1985)	135
Figure 71	Variations spatiales des lames d'eau écoulées et des lames précipitées annuelles moyennes observées aux bassins d'étude	133
Figure 72	Bilans d'écoulements annuels moyens des oueds étudiés	140
Figure 73	Relation entre la lame précipitée et la lame écoulée aux bassins jaugés de l'oued Isser	141
Figure 74	Relation pluie- déficit d'écoulement pour les bassins de l'Isser	142
Figure 75	Variations interannuelles des débits mensuels aux bassins jaugés	144
Figure 76	Variations des débits moyens inter-mensuels et coefficients mensuels des oueds (a : O. Isser maritime ; b : Isser moyen ; c : El Kherza ; d : Mellah ; e : Zeroua)	145
Figure 77	Variations des débits moyens journaliers d'oued Isser maritime à la station de Lakhdaria	147
Figure 78	Variations des débits moyens journaliers d'oued Isser moyen à la station de La Traille	147
Figure 79	Variations des débits moyens journaliers d'oued El Kherza à la station de Mezahime	147
Figure 80	Variations des débits moyens journaliers d'oued Mellah à la station de Beni Slimane	148
Figure 81	Variations des débits moyens journaliers d'oued Zaroua à la station de Dechemiya	148
Figure 82	Hydrogrammes journalières de crues 28mars-10avril 1974	153
Figure 83	Hydrogramme de crue de 28 mars -3 avril 1974 à oued Isser moyen à la station de La Traille	155
Figure 84	Hydrogramme de crue de 19-21 septembre 1979 à oued Mellah	156
Figure 85	Ajustement des débits moyens journaliers maximaux aux stations hydrométriques	158
Figure 86	Ajustement des débits instantanés maximaux aux stations hydrométriques	159
Figure 87	Localisation de barrages dans le bassin de l'oued Isser	165
Figure 88	relation débit-concentration en MES instantanées aux bassins d'étude : (a) station de Lakhdaria, (b) la traïlle, (c) Beni Slimane, (d) Mzahime et (e) Dechemiya	169
Figure 89	évolution des concentrations en MES avec les débits lors des crues (station de Lakhdaria)	172
Figure 90	relations débit liquide-débit solide instantanées aux bassins d'étude : (a) station de Lakhdaria, (b) la traïlle, (c) Beni Slimane, (d) Mzahime et (e) Dechemiya	174
Figure 91	relations saisonnières entre les débits liquides-débits solides instantanées à la station de Lakhdaria	177
Figure 92	relations saisonnières entre les débits liquides-débits solides instantanées à	177

	la station de La Traille	
Figure 93	relations saisonnières entre les débits liquides-débits solides instantanées à la station de Beni Slimane	178
Figure 94	relations saisonnières entre les débits liquides-débits solides instantanées à la station de Mezahime	178
Figure 95	relations saisonnières entre les débits liquides-débits solides instantanées de la station de Dechemiya	179
Figure 95	Figure 96: Quelques relations mensuelles entre les débits liquides-débits solides instantanés aux bassins d'étude : A : station de Lakhdaria, B : la traillle, C : Beni Slimane, D : Mzahime et E : Dechemiya	181
Figure 97	Quelques relations annuelles entre les débits liquides-débits solides instantanées aux bassins d'étude : A : station de Lakhdaria, B : la traillle, C : Beni Slimane, D : Mzahime et E : Dechemiya	184
Figure 98	Variation des erreurs en pourcentage au niveau de la station de Lakhdaria	186
Figure 99	Variation des erreurs en pourcentage au niveau de la station de La Traillle	186
Figure 100	Variation des erreurs en pourcentage au niveau de la station de Beni Slimane	187
Figure 101	Variation des erreurs en pourcentage au niveau de la station de Mezahim	187
Figure 102	Variation des erreurs en pourcentage au niveau de la station de Dechemiya	187
Figure 103	Résidus du modèle en puissance à l'échelle de la totalité de données aux stations hydrométriques étudiées	190
Figure 104	Ajustement des résidus à la loi Normale	191
Figure 105	Evolution des débits solide en suspension mesurés, modélisés et corrigés au niveau des stations hydrométriques étudiées	193
Figure 106	Variations annuelles des paramètres a et de l'exposant b aux bassins d'étude. Relation entre les paramètres a et la pente b de la relation $Q_s = aQ^b$ à l'échelle	196
Figure 107	annuelle dans les bassins d'études	197
Figure 108	Les courbes de transport solide des sous bassins de l'oued Isser	198
Figure 109	Relation entre le paramètre a et de l'exposant b et la superficie du bassin versant	199
Figure 110	Relation du paramètre a en fonction de l'hydraulicité (CH)	200
Figure 111	Relation du paramètre a en fonction de la pluie moyenne annuelle	201
Figure 112	Variation annuelle des apports liquides et solide au niveau de la station de Lakhdaria	207
Figure 113	Variation annuelle des apports liquides et solide au niveau de la station de La Traillle	207
Figure 114	Variation annuelle des apports liquides et solide au niveau de la station de Beni Slimane	208
Figure 115	Variation annuelle des apports liquides et solide au niveau de la station de Mezahime	209
Figure 116	Variation annuelle des apports liquides et solide au niveau de la station de Dechemiya	209
Figure 117	Variation mensuelle des apports liquides et solides au niveau de la station de	211

	Lakhdaria	
Figure 118	Variation mensuelle des apports liquides et solide au niveau de la station de La Traille	212
Figure 119	Variation mensuelle des apports liquides et solide au niveau de la station de Beni Slimane	212
Figure 120	Variation mensuelle des apports liquides et solide au niveau de la station de Mezahime	213
Figure 121	Variation mensuelle des apports liquides et solide au niveau de la station de Dechemiya	214
Figure 122	Répartition saisonnière des apports liquides et solides au niveau de la station de Lakhdaria (1970/2010)	216
Figure 123	Répartition saisonnière des apports liquides et solides au niveau de la station de La Traille (1970/1985)	216
Figure 124	Répartition saisonnière des apports liquides et solides au niveau de la station de Beni Slimane (1973/2009)	217
Figure 125	Répartition saisonnière des apports liquides et solides au niveau de la station de Mezahime (1973/1994)	217
Figure 126	Répartition saisonnière des apports liquides et solides au niveau de la station de Dechemiya (1972/1985)	217
Figure 127	Relation entre la superficie et l'apport solide en suspension dans les sous-bassins de l'oued Isser pour la période de (1973/74-1984/85)	218
Figure 128	Variabilité spatiale des apports solides en suspension moyen interannuel au niveau du bassin de l'oued Isser pour la période de (1973/74-1984/85)	219
Figure 129	Variabilité spatiale des dégradations spécifiques moyennes annuelles au niveau du bassin de l'oued Isser pour la période de (1973/74-1984/85)	220
Figure 130	Relation entre la superficie et la dégradation spécifique dans le bassin versant de l'oued Isser pour la période de (1973/74-1984/85)	221
Figure 131	Evolution des apports solides en suspension durant l'année au niveau des stations hydrométriques ; Lakhdaria (1971/72), La Traille (1971/72), Beni Slimane (1979/80), Mezahime (1985/86) et Dechemiya (1979/80)- importance des crues	222
Figure 132	Flux de MES en pourcentage lors crue et hors crue au niveau de la station de Lakhdaria	229
Figure 133	Flux de MES en pourcentage lors crue et hors crue au niveau de la station de La Traille	230
Figure 134	Flux de MES en pourcentage lors crue et hors crue au niveau de la station de Beni Slimane	231
Figure 135	Flux de MES en pourcentage lors crue et hors crue au niveau de la station de Mezahime	231
Figure 136	Flux de MES en pourcentage lors crue et hors crue au niveau de la station de	232

	Dechemiya	
Figure 137	Envasement annuel et cumulé estimés dans le barrage de Beni Amrane (1988/89-2016/17)	234
Figure 138	Perte en eau de barrage Beni Amrane en pourcentage (1988/89-2016/2017)	236
Figure 139	Exemples des évènements non retenus	241
Figure 140	Les différentes classes d'hystérésis dans les relations Concentration en MES- Débit liquide (Williams, 1989, Lefrançois,2007)	245
Figure 141	Evolution de la concentration en MES transportés et des débits en fonction du temps pendant quelques crues au niveau de la station de Lakhdaria et Classification des relations C-QI	253
Figure 142	Evolution de la concentration en MES transportés et des débits en fonction du temps pendant quelques crues au niveau de la station de La Traille et Classification des relations C-QI	254
Figure 143	Evolution de la concentration en MES transportés et des débits en fonction du temps pendant quelques crues au niveau de la station de Beni Slimane et Classification des relations C-QI	255
Figure 144	Evolution de la concentration en MES transportés et des débits en fonction du temps pendant quelques crues au niveau de la station de Mezahime et Classification des relations C-QI	256
Figure 145	Evolution de la concentration en MES transportés et des débits en fonction du temps pendant quelques crues au niveau de la station de Dechemiya et Classification des relations C-QI	257
Figure 146	Fonctionnement des sous-bassins étudiés à partir de données des débits et des concentrations en MES	259
Figure 147	Répartition saisonnière des flux hydrosédimentaires des crues sélectionnées au niveau de la station de Lakhdaria (période de 38 ans 1971-2009)	261
Figure 148	Répartition saisonnière des flux hydrosédimentaires des crues sélectionnées au niveau de la station de La Traille (période de 14 ans 1971-1985)	261
Figure 149	Répartition saisonnière des flux hydrosédimentaires des crues sélectionnées au niveau de la station de Beni Slimane (période de 28 ans 1973-2001)	261
Figure 150	Répartition saisonnière des flux hydrosédimentaires des crues sélectionnées au niveau de la station de Mezahime(période de 22ans 1985-2007)	262
Figure 151	Répartition saisonnière des flux hydrosédimentaires des crues sélectionnées au niveau de la station de Dechemiya (période de 12ans 1985-2007)	262

Liste des Tableaux

		page
Tableau 1	Rapport massique entre le transport par charriage et le transport en suspension dans plusieurs bassins versants de taille et de type variés dans le monde. D'après Mano 2008	18
Tableau 2	Classes des relations C - Q	29
Tableau 3	valeurs des taux d'érosion spécifiques des sols publiées pour des bassins versant algériens.	31
Tableau 4	Tableau des surfaces, des flux liquides et des flux solides de différents continents du monde et de ses fleuves majeurs. Source : Milliman et Meade, 1983; Walling et Fang, 2003, Syvitski et al, 2005 ; Meade et Moody, 2010. D'après Thi Ha DANG 2011	34
Tableau 5	Superficies et périmètres du BV de l'oued Isser et de ses SBV	50
Tableau 6	Principaux paramètres hydrométriques du bassin versant étudié	52
Tableau 7	Répartition altimétrique du bassin versant d'Isser	52
Tableau 8	Classification des pentes du bassin de l'Isser	54
Tableau 9	Evaluation de l'érodibilité des matériaux (Montier et al, 1998). D'après Coynel , D'après Coynel,(2005)	60
Tableau 10	Caractéristiques des stations hydrométriques et périodes de mesure	66
Tableau 11	Disponibilité des données de concentration par station, saison et mois	69
Tableau 12	Disponibilité de données de concentration par station et par année	70
Tableau 13	Paramètres statistiques de la concentration C et débit liquide QL	74
Tableau 14	Nombre d'observation selon l'ordre de grandeur de la concentration	75
Tableau 15	Présentation des séries disponibles de débit liquide moyen journalier postes pluviométriques et pourcentage d'information pluviométrique disponible (période 1970/71-2009/10)	76
Tableau 16	Données pour le comblement des lacunes pluviométriques annuelles par A.C.P.	79
Tableau 17	Comblement des lacunes pluviométriques annuelles par A.C.P.	83
Tableau 18	Projection des variables actives sur les pluies annuelles	84
Tableau 19	Résultats de régressions entre les postes pluviométriques et les composantes C1 C2C3 ($Y=aX+b$)	88
Tableau 20	détails de la régression double pluies annuelles à Bordj Mnaeil avec C1, C2	93
Tableau 21	Moyennes et écart-types des trois variables	97
Tableau 22	Coefficients de corrélation totale entre les trois variables	98
Tableau 23	Coefficients de corrélation partielles et coefficient de corrélation multiple R	98
Tableau 24	Paramètres statistiques des postes pluviométriques étudiés (période: 1970/71-2009/10)	98
Tableau 25	Valeurs de U de Gauss, fréquences et période de retour	100
Tableau 26	hauteurs de pluie en mm pour différentes périodes de retour (période	102
Tableau 27		103

	humide)	
Tableau 28	Hauteurs de pluie en mm pour différentes périodes de retour (période sèche)	103
Tableau 29	Résultats de la régression multiple linéaire (1970/2009)	106
Tableau 30	Caractéristiques des pluies mensuelles de quelques postes pluviométriques Période (1970-2009)	110
Tableau 31	Fréquence des pluies journalières maximales en mm des postes pluviométriques du bassin d'étude (période de 1970-2009)	113
Tableau 32	Pluies maximales journalières en mm pour différentes période de retour	114
Tableau 33	Les stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Isser	119
Tableau 34	Valeurs caractéristiques des débits aux niveaux des bassins d'étude	128
Tableau 35	Valeurs caractéristiques des débits aux niveaux des bassins d'étude (période commune 1973-1985)	130
Tableau 36	Débits fréquentiels annuels des bassins jaugés	134
Tableau 37	Bilans hydrologiques moyens aux bassins jaugés (période commune 1973- 1985)	137
Tableau 38	Bilans hydrologiques moyens aux bassins jaugés	138
Tableau 39	Valeurs de débits max moyens journaliers et instantanés des crues de l'oued Isser maritime à la station de Lakhdaria	149
Tableau 40	Valeurs de débits max moyens journaliers et instantanés des crues de l'oued Isser moyen à la station de La Traille	150
Tableau 41	Valeurs de débits max moyens journaliers et instantanés des crues de l'oued Kharza à la station de Mezahime	151
Tableau 42	Valeurs de débits max moyens journaliers et instantanés des crues de l'oued Mellah Ouest à la station de Beni Slimane	152
Tableau 43	Valeurs de débits max moyens journaliers et instantanés des crues de l'oued Zaroua à la station de Dechemiya	152
Tableau 44	Débits moyens journaliers maximaux fréquentiels des bassins d'étude	160
Tableau 45	Débits instantanés maximaux fréquentiels des bassins d'étude	160
Tableau 46	Caractéristiques de la retenue d'eau de Beni Amrane (D'après ANBT)	161
Tableau 47	Caractéristiques de la retenue d'eau de Koudiat Acerdoune (D'après ANBT)	163
Tableau 48	Caractéristiques de la retenue d'eau de Ladrat (D'après ANBT)	164
Tableau 49	paramètre du modèle $C = aQL^b$ et coefficient de corrélation	168
Tableau 50	Valeurs de a et b, et coefficients de corrélation des différentes courbes de transport solide	171
Tableau 51	paramètre du modèle $Q_s = aQL^b$ et coefficient de corrélation	173
Tableau 52	Paramètres des modèles $Q_s = aQL^b$ saisonnières obtenus pour les bassins étudiés	175
Tableau 53	Paramètres des modèles $Q_s = aQL^b$ mensuels obtenus pour les bassins étudiés	180
Tableau 54	Paramètres des modèles $Q_s = aQL^b$ annuels obtenus pour les bassins étudiés	183

Tableau 55	Flux mesurés et estimés en kg/s et erreurs globales engendrées par l'application du modèle $Q_S=a*Q_L^b$ aux bassins d'étude	185
Tableau 56	Erreurs apportée parle modèle en puissance avant et après la correction au niveau de cinq stations hydrométriques étudiées	194
Tableau 57	Valeurs des apports liquides en hm ³ , apport solide en suspension en 10 ³ tonne et des dégradations spécifiques en t.km ⁻² .an ⁻¹	205
Tableau 58	Valeurs des apports liquides moyens mensuels en hm ³ , apports solides moyens mensuels en 10 ³ tonnes et des dégradations spécifiques en t.km ⁻² .mois ⁻¹	210
Tableau 59	Valeurs des apports liquides moyens saisonniers en hm ³ , des apports solides moyens saisonniers en 10 ³ tonnes	214
Tableau 60	Apport solide en suspension moyen annuel en MT et taux d'érosion aux bassins d'étude pour différentes période	218
Tableau 61	Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (station de Lakhdaria)	223
Tableau 62	Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (station de La traïlle)	224
Tableau 63	Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (station de Beni Slimane):	225
Tableau 64	Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (station de Mezahime)	226
Tableau 65	Contribution des plus importantes crues annuelles au transport solide en suspension (station de Dechemiya)	228
Tableau 66	calcul de l'envasement de barrage de Koudiat Acerdoune	237
Tableau 67	calcul de l'envasement de barrage de Ladrat	238
Tableau 68	Classement et caractéristiques hydro sédimentaires des crues sélectionnées à la station de Lakhdaria (période de 38 ans 1971-2009)	246
Tableau 69	Classement et caractéristiques hydro sédimentaires des crues sélectionnées à la station de La Traïlle (période de 14 ans 1971-1985)	247
Tableau 70	Classement et caractéristiques hydro sédimentaires des crues sélectionnées à la station de Beni Slimane (période de 28 ans 1973-2001)	248
Tableau 71	Classement et caractéristiques hydro sédimentaires des crues sélectionnées à la station de Dechemiya (période 12 ans 1973-1985)	249
Tableau 72	Classement et caractéristiques hydro sédimentaires des crues sélectionnées à la station de Mezahime (période de 22ans 1985-2007)	250

Référence bibliographique

- Abdellaoui, B., et al., 2002.** Bilan hydrologique et envasement du barrage Saboun (Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau*, 15 (4), 737-748. http://www.rse.inrs.ca/art/volume15/v15n4_737.pdf [Accédé le 21 mars 2013]
- A.N.R.H., 1993.** Carte Pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle 1/500000. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Ministère de l'Équipement. Ed. I.N Alger.
- A.N.R.H., 2010.** Les changements climatiques et leur impact sur les ressources en eau en Algérie. Assises Nationales sur l'Eau. ANRH. Alger, 41 p.
- Achite, M. et Meddi, M., 2004.** Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'Oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse*, 15 (4), 367–373. http://www.jle.com/fr/revues/agro_biotech/sec/e-docs/00/04/0A/10/article.md?type=text.html [Accédé le 21 mars 2013]
- Achite, M. et Meddi, M., 2005.** Variabilité spatio-temporelle des apports liquides et solides en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'Oued Mina (Nord-Ouest algérien). *Revue des Sciences de l'Eau*, 18 (n° spécial), 37–56. http://www.rse.inrs.ca/art/volume18/v18nS_37.pdf
- Achite, M. et Ouillon, S., 2007.** Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). *Journal of Hydrology*, 343, 187–202.
- Arnborg, L., Walker, H. J., Peipo, J., 1967.** Suspended load in the Colville River, Alaska. *Geogr. Ann.* 49 A, pp 131-144.
- Assaba M. et Laborde J-P., 2000.** La prise en compte du relief dans l'estimation des pluies mensuelles : le cas de la Corse, *Publications de l'Association internationale de Climatologie*, vol. 13, pp. 149-157.
- Asselman, N.E.M., 2000.** Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, 234 (3–4), 228–248.
- Asselman, N.E.M., 1999.** Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the River Rhine. *Hydrol. Proc.* 13, 1437–1450.
- Badraoui, A. et Hadji, A., 2001.** Envasement des retenues de barrages. *La Houille Blanche*, 6–7, 72–75.

Baca, P., 2008. Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybárik basin, Slovakia. *Hydrol. Sci. J.* 53 (1), 224–235.

Battala, R. J. et Sala, M. 1992 - Temporal variability of suspended sediment in a Mediterranean River, International Conference Canberra Australia, International Association of Hydrological Sciences Publication 224, 229–305.

Benkhalel, A. et Remini, B., 2003. Analyse de la relation de puissance: débit solide–débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie). *Revue des Sciences de l'Eau*, 16/3, 333–356. http://www.rse.inrs.ca/art/volume16/v16n3_333.pdf [Accessed 31 October 2012].

Benkhalel, A., Remini, B., 2003. Variabilité temporelle de la concentration en sédiments et phénomène d'hystérésis dans le bassin de l'Oued Wahrane (Algérie). *J. Sci. Hydrol.* 48 (2), 243–255.

Ben Mammou, A. et Louati, M.H., 2007. Évolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 20 (2), 201–210. <http://www.erudit.org/revue/rseau/2007/v20/n2/015813ar.pdf> [Accédé le 21 mars 2013].

Bergaoui, M., Camus, H., Nouvelot, J.F., 1998. Essai de modélisation du transport solide sur les micro bassins versants de Tebaga (Tunisie centrale). *Sècheresse*. Volume 9. N° 1, pp 51-57.

Boiffin J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action de la pluie. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique de Paris Grignon.

Bouanani, A., 2004. Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques sous-bassins de la Tafna. Thèse de doctorat, Université Tlemcen, Algérie.

Bouanani A et al., 2013. Production et transport des sédiments en suspension dans l'oued sikkak (Tafna – nord-ouest algérie) *Revue des Sciences de l'Eau* 26(2)(2013) 119-13.

Bouchelkia H., Belarbi F., Remini B., 2011: Estimated flows of suspended solids by the statistical analysis of outfall drainage basin of Tafna (Algeria). *Soil & Water Res.*, 8: 63–70.

Bouguerra H., Bouanani A., Khanchoul K., Derdous O., Tachi S.E., 2017. Mapping erosion prone areas in the Bouhamdane watershed (Algeria) using the Revised Universal Soil Loss Equation through GIS. *Journal of Water and Land Development*. No. 32 p. 13–23. DOI: 10.1515/jwld2017-0002.

Bouguerra, S. A., Bouanani, A. et Baba-Hamed, K., 2016. Transport solide dans un cours d'eau en climat semi-aride : cas du bassin versant de l'Oued Boumessaoud (nord-ouest de

l'Algérie). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 29(3), 179–195.
<https://doi.org/10.7202/1038923ar>

Bourouba, M., 1998 Phénomène de transport solide dans les Hauts Plateaux Orientaux. Cas de Oued Lougmene et Oued Leham dans le bassin de la Hodna. *Revue des Sciences et Technologie*, 9, 5–11.

Bourouba, M., 1997. Les variations de la turbidité et leurs relations avec les précipitations et les débits des oueds semi-arides de l'Algérie orientale. *Bulletin de l'ORSTOM*, 17, 345–360.

Boussema H-R., 1996. Système d'information pour la conservation et la gestion des ressources naturelles. Colloque international sur le rôle des technologies de télécommunications et de l'information en matière de protection de l'environnement, Tunisie, Tunisie, 17-19 Avril 1996, 112-116.

Brasington J. et Richards K., 2000. Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills. *Hydrological Processes* 14, pp. 1448–1463.

Bryan R.B. (2000). Soil erodability and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology* 32(3-4), pp. 385–415.

Cerdan O., Souchere V., Lecomte V., Couturier A. et Le Bissonnais Y. (2002). Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model : sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management. *Catena* 46(2-3), pp. 189–205.

Chebbani R., Djilli K., ROOSE ERIC. 1999. Etude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. *Bulletin ORSTOM, Rés. Rros.*, (19), p. 85-95.

Cherif E, Errih M, et Madani Cherif H., 2009. Modélisation statistique du transport solide du bassin versant de l'Oued Mekerra (Algérie) en zone semi-aride méditerranéenne. *Hydrological Sciences Journal*, volume 54, 2009 p 338-348.

Chevalier J-J., Pouliot J., Thomson K., Boussema M-R. 1995. Systèmes d'aide à la planification pour la conservation des eaux et des sols (Tunisie). Systèmes d'information géographique utilisant les données de télédétection. Actes du colloque scientifique international, Hammamet, Tunisie, 1-2 novembre 1994. 4-12.

Chikita K., Kemnitz R et Kumai R., 2002. Characteristics of sediment discharge in the subarctic Yukon River, Alaska. *Catena* 48, p. 235-253.

- Chikita K.A., Kemnitz K. et Kumai R., 2005.** The effect of floods on the transport of suspended sediments and contaminants : a case study from the estuary of the Dese River (Venice Lagoon, Italy). *Environmental International* 31, pp. 948–958.
- Cohn, T.A., De Long, L.L., Gilroy, E. J., Hirsh, R.M., Well, D.K., 1989.** Estimating constituent loads. *Water Resources Res.* N° 25, pp 937-942.
- Coynel, A., 2005.** Erosion mécanique des sols et transferts géochimiques dans le bassin Adour-Garonne. Thèse de l'Université de Bordeaux I, France. http://hydrologie.org/the/coynel_a.pdf
- Degoutte G., 2005.** Cours d'hydraulique, dynamique et morphologie fluviale. Cours en ligne et diaporama – Hydraulique. www.engref.fr/Publisenligne_cours.html.
- Demmak, A., 1982.** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse Docteur Ingénieur, Université de Paris, France.
- Duan N., 1983.** *Smearing estimate: A non parametric retransformation method.* *Journal of the American Statistical Association*, 78 (383): 605-610.
- Dubreuil P., 1974.** Initiation à l'analyse hydrologique, Paris, Masson-ORSTOM, 216p.
- Elahcene, O., et al., 2013.** Etude de la dynamique sédimentaire dans le bassin versant de l'Oued Bellah (Algérie). *Hydrological Sciences Journal*, 58 (1), 224–236.
- El Mahi, A., Meddi, M., et Bravard, J.-P., 2012.** Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued El Hammam (Algérie du Nord). *Hydrological Sciences Journal*, 57 (8), 1642–1661.
- E. Roose, M. Arabi, K. Brahamia, R. Chebbani, M. Mazour et B. Morsli, 1995.** Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVII, n° 2, 1993 : 289-308
- Erpul G., Norton L.D. et Gabriels D., 2002.** Raindrop-induced and wind-driven soil particle transport. *Catena* 47(3), pp. 227–243.
- Farnsworth K.L., Milliman J.D., 2003.** Effects of climatic and anthropogenic change on small mountainous rivers The Salinas River example. *Global and Planetary Change* 39, 53-64.
- Filizola N. 2003** Transfert sédimentaire actuel par les fleuves amazoniens. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 292 pp.
- Ferguson, R.I., 1986.** River loads underestimated by rating curves. *Water Research*, 22, 74–76.
- Fournier F., 1960.** Climat et érosion. Paris, Presses Universitaires de France, 201 pp.

Ghenim, A., Seddini, A., et Terfous, A., 2008. Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'Oued Mouilah (Nord-Ouest algérien). *Hydrological Sciences Journal*, 53 (2), 448–456, doi:10.1623/hysj.53.2.448.

Ghenim, A., Terfous, A., et Seddini, A., 2007. Etude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéenne: cas du bassin versant de l'Oued Sebdo (Nord-Ouest algériens). *Sécheresse*, 18 (1), 39–44.

Gimenez R. et Govers G. (2002). Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soil Science Society of America Journal* 66(5), pp. 1475–1483.

Ghorbel, A. et Claude, J., 1977. Mesure de l'envasement dans les retenues de sept barrages en Tunisie: estimation des transports solides. In: *International Association of Hydrological Sciences, ed., Erosion and solid matter transport in inland waters. IAHS Publ., 122, 219–232.* Disponible en ligne à: http://iahs.info/redbooks/a122/iahs_122_0219.pdf [Accessed 31 October 2012].

Gheraout R., 2014. Impact du transport solide en suspension sur l'envasement du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda. Thèse de doctorat, Université de Blida, Algérie, 222p.

Gheraout R., Zeggane H., Remini B. 2020. Dynamique du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Isser au droit du barrage de Kouliat Acerdoune (Nord Algérie). *La Houille Blanche* : 15–32

Hallouz F., Meddi M., Mahe G., 2013. Modification du régime hydroclimatique dans le bassin de l'oued Mina (Nord-Ouest d'Algérie). *Revue des Sciences de l'Eau*, 26(1), 33-38.

Hayet Madani Cherif, Kamel Khanchoul, Abderezzak Bouanani, Abdellali Terfous., 2017. Prediction of sediment yield at storm period in Northwest Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* DOI10.1007/s12517-017-2983-3

Heidel, S.G., 1956. The progressive lag of sediment concentration with flood waves. *Trans. Am. Geophys. Union* 37, 56–66.

Helsel D R, Hirsch R M., 2002. *Statistical Methods in Water Resources*. Chapter A3. *Techniques of water-resources investigations of the united states geological survey. Book 4, Hydrologic analysis and interpretation*, 510 p.

HEUSCH B., 1970. L'érosion du pré-rif : une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines mameuses du pré-rif occidental. Rabat : Station de Recherches Forestières de Rabat, 176 p

- Hjulstrom F., 1935.** Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by river Fyris. Bulletin of the Geological Institution, 25 : 221-455.
- Horowitz A.J., 2003.** An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. Hydrological Processes 17(17), pp. 3387–3409.
- Hudson N.W. 1975** The factor determining the extent of soil erosion *in* Gremland R. ed., Soil conservation and management in the Humid Tropics, John Wiley and Sons.
- Hudson, P.F., 2003.** Event sequence and sediment exhaustion in the lower Panuco basin, Mexico. Catena 52, 57–76.
- Jansson, M.B., 1985.** A comparison of detransformed logarithmic regressions and power function regressions. *Geografiska Annaler*, 67A (1–2), 61–70.
- Jansson, M.B., 1996.** Estimating a sediment rating curve of the Reventazon River at Palomo using logged mean loads within discharge classes. *Journal of Hydrology*, 183, 227–241.
- Jansson, M.B., 2002.** Determining sediment source areas in a tropical river basin, Costa Rica. Catena 47, 63–84 .
- Jean Van Campenhout, et al., 2013.** Flux des sédiments en suspension dans les rivières du bassin de la meuse : proposition d'une typologie régionale basée sur la dénudation spécifique des bassins versants. BSGLG, 61, 2013, 15-36.
- Kao S J, Lee T Y, Milliman J D., 2005.** Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from Mountainous Rivers in Taiwan. TAO, 16 (3): 653-675.
- Kao S.J. et Liu K.K., 2002.** Exacerbation of erosion induced by human perturbation in a typical Oceania watershed Insight from 45 years of hydrological records from the Lanyang-Hsi River, northeastern Taiwan.
- Kao S.J. et Liu K.K., 1997.** Fluxes of dissolved and nonfossil particulate organic carbon from an Oceania small river (Lanyang Hsi) in Taiwan. Biogeochemistry 39, 255-269.
- Kassoul, M., Abdelgader, A., Belorgey, M., 1997.** Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie. Rev. Sci. Eau 3, 339–358 .
- Kassoul, M., 1999.** Prédétermination de la durée de vie des barrages en Algérie. *La Houille Blanche*, 3–4, 89–94.
- Khanchoul, K., 2006.** Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains bassins versants du Nord-Est algérien. Thèse de Doctorat, Université Annaba, Algérie.
- Khanchoul, K., Jansson, M.-B., 2008.** Sediment rating curves developed on stage and seasonal

means in discharge classes for the Mellah Wadi, Algeria. *Geogr. Ann.* 90A (3), 227–236.

Kinnell P.I.A. (2005). Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction : a review. *Hydrological Processes* 19(14), pp. 2815–2844.

Klein, M., 1984. Anti clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms: Holbeck catchment; Yorkshire, England. *Catena* 11, 251–257.

Laborde J-P., 2000. Hydrologie de surface, Cours Université de Nice- Sophia Antipolis, 191 p.

Lahlou A., 1988. Etude actualisée de l'envasement des barrages au Maroc. *Rev Sci Eau* 1988 ; 6 : 337-56.

Laouina, A., 1998. L'érosion en milieu méditerranéen : une crise environnementale, Mise au point sur l'érosion des sols à travers l'exemple des versants des collines et des montagnes du nord du Maroc. Actes du 2ème Cong. Géogr. Africains. Rabat- Agadir, pp. 191-219.

Laouina, A., Chaker, M., Naciri, R. et Nafaa, R., 1993. L'érosion anthropique en pays méditerranéen. Le cas du Maroc septentrional. *Bull. Ass. Géogr Français*, Paris, pp. 383-398.

Larfi, B.; Remini, B., 2006. Le transport dans le bassin versant de l'Oued Isser ; impact sur l'envasement du barrage de Beni Amrane (Algérie). *Larhyss J* 5 (2006) 63–73.

Le Bissonnais Y., Cerdan O., Lecomte V., Benkhadra H., Souchere V. et Martin P. (2005). Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena* 62(2-3), pp. 111–124.

Lefrançois, J. Grimaldi, C. Gascuel, O. Gilliet, N. 2003. Origins and dynamic sediment in small agricultural catchment. The Fourth In ter- Celtic colloquium on Hydrology, Guimares Portugal. July 11 -14, 1 -13.

Lefrançois, J., Grimaldi, C., Gascuel-Oudou, C. & Gilliet, N. 2007 Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments. *Hydrol. Processes* 21, 2923–2933

Leguedois S. (2003). Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés. Thèse de doctorat, Université d'Orléans- INRA Orléans. France.

Lenzi, M. A. & Marchi, L. 2000 Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena* 39, 267–282.

Loch R.J. and Silburn D.M., 1996. Constraints to sustainability - soil erosion in Clarke L. and Wylie P.B. eds., Sustainable Crop Production in the Sub-tropics: an Australian perspective, QDPI.

Louamri, A., Mebarki, A., et Laignel, B., 2013. Variabilité interannuelle et intra-annuelle des transports solides de l'Oued Bouhamdane, à l'amont du barrage Hammam Debagh (Algérie orientale). *Hydrological Sciences Journal*, 58 (7), 1–14.

Ludwig W, Probst JL., 1998. River sediment discharge to the oceans: present-day controls and global budgets. *American Journal of Science* 298 : 265-295.

Mano, V., 2008. Processus conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues— optimisation des méthodes de mesure et modélisation statistique. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, France. <http://hydrologie.org/THE/MANO.pdf>

Mebarki A., 1982. Le bassin du Kébir-Rhumel (Algérie). *Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau*, thèse doctorat de 3^e cycle, université de Nancy II, 304 p. (Edition :

Mebarki A., 2005. Hydrologie des bassins de l'Est algérien : ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse d'Etat, Université Mentouri de Constantine, 360 p.

Meddi, M., 1992. Hydro-pluviométrie et transport solide dans le bassin-versant de l'Oued Mina (Algérie). Thèse de doctorat Uniq, université Louis Pasteur, Strasbourg, France.

Megnounif, A., Terfous, A., et Bouanani, A., 2000. Etude du transport solide dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). Colloque Méditerranéen Eau–Environnement (Alger), 128–132.

Megnounif, A., Terfous, A., et Bouanani, A., 2003. Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (Nord-Ouest Algérien). *Revue des Sciences de l'Eau*, 16 (3), 369–380. http://www.rse.inrs.ca/art/volume16/v16n3_369.pdf [Accessed 31 October 2012].

Megnounif, A., et al., 2007. Key processes influencing erosion and sediment transport in a semi-arid Mediterranean area: the Upper Tafna catchment, Algeria. *Hydrological Sciences Journal*, 52 (6), 1271–1284. <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1623/hysj.52.6.1271> [Accédé le 21 mars 2013]

Megnounif, A., Terfous, A., Ghenaïm, A., Poulet, J.B., 2007. Key processes influencing erosion and sediment transport in a semi-arid Mediterranean area: the upper Tafna catchment, Algeria. *Hydrol. Sci. J.* 52 (6), 1271–1284.

Megnounif, A., Terfous, A. Ouillon, S. 2013. A Graphical method to study suspended sediment dynamics during flood events in the Wadi Sebdo. N.W (Algeria) (1973 -2004). *Journal of hydrology* 497, 24 -36.

- Meybeck M., 2002.** Riverine quality at the Anthropocene Propositions for global space and time analysis, illustrated by the Seine River., *Aquatic Sciences* 64, 376-393.
- Milliman JD, Meade RH, 1983.** World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology* 91 : 1-21.
- Milliman J.D. et J.P.M. Syvitski., 1992.** Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean the importance of small mountainous rivers. *Journal of Geology* 100, 525–544.
- Newman, B.D., Campbell, A.R., Wilcox, B.P., 1992.** Lateral subsurface flow pathways in a semi arid ponderosapine hillslope. *Water Resources Research*. N° (34) 12, pp 2541-2545.
- Nilsson C., C.A. Reidy, M. Dynesius and C. Revenga., 2005.** Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems, *Science* 308, 405–408.
- Peters-Ku"mmerly, B.E., 1973.** Untersuchungen u"ber Zusammensetzung und Transport von Schwebstoffen in einigen Schweizer Flu"ssen. *Geographica Helvetica* 28, 137–151.
- Picouet, C., Hingray, B., et Olivry, J.C., 2000.** Modélisation conceptuelle globale du régime du transport particulaire sur les fleuves tropicaux d'Afrique: application aux bassins du Niger supérieur et du Bani, Mali *Revue des Sciences de l'Eau*, 13 (4), 463–481. http://www.rse.inrs.ca/art/volume13/v13n4_463.pdf [Accessed 31 October 2012].
- Picouet, C., Hingray, B., Olivry, J.C., 2001.** Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the upper Niger river basin. *J. Hydrol.* 250, 19–39.
- PNUD / UNDP (Programme des Nations Unies pour le développement/ United Nations Development Programme), 1987.** Guide maghrébin pour l'exécution des études et des travaux de retenues collinaires. Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du Nord. Projet RAB/80/011, Alger, Algérie.
- Probst, J.L. et Amiotte Suchet, P., 1992.** Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrological Sciences Journal*, 37 (6), 621–637. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626669209492628>.
- Remini, b. 2010.** La problématique de l'eau en Algérie du Nord, Office des publications Universitaires, 2005, 162 p, fig
- Remini, b. 2017** une nouvelle approche de gestion de l'envasement des barrages. *larhyss journal*, issn 1112-3680, n°31, sept 2017, pp. 51-81

Remini, B. et Avenard, J.M., 1999. Les conséquences de l'envasement des barrages: quelques exemples algériens. *Techniques Sciences et Méthodes*, 4, 55–62.

Remini, B. et Hallouche, W., 2004. La sédimentation dans les barrages algériens. *Gestion du risque Eau en pays semi-aride. La Houille Blanche*, 1, 60–64.

Remini, B., Leduc, C., et Hallouche, W., 2009. Evolution des grands barrages en régions arides: quelques exemples algériens. *Sécheresse*, 20 (1), 96–103. http://www.jle.com/fr/revues/agro_biotech/sec/e-docs/00/04/49/CE/article.phtml [Accédé le 21 mars 2013].

ROOSE E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Rome : FAO, 438 p. (Bulletin Pédologique de la FAO ; 70). ISBN 92-5-203451-X.

Roose, E., Arabi, M., Chebbani, M., Mazour, M., Morsli, B., 1998. Les montagnes méditerranéennes d'Algérie. Impact de l'intensification de l'agriculture de montagne sur l'environnement et les revenus. *ORSTOM Actualité Spécial Erosion* 56, 26–27.

Seeger, M., Errea, M. P., Begueria, S., Arnaez, J., Marti, C. & Garcia-Ruiz, J. M. 2004 Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *J. Hydrol.* **288**, 299–311.

Serrat P., Ludwig W., Navarro B. et Blazi J.L., 2001. Spatial and temporal variability of sediment fluxes from a coastal mediterranean river : the Tet (France). *Comptes rendus de l'académie des sciences, Série II Fascicule A : Sciences de la Terre et des Planètes* 333(7), pp. 389–397.

SOGREAH, 1969. Etude générale des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie. *Sogtha-sogreah*. 11 volumes Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire. Alger

Sutter R.D., Verhoven R. et Krein A., 2001. Simulation of sediment transport during flood events : laboratory and field experiments. *Hydrological sciences Journal - Journal des Sciences Hydrologiques* 46(4), pp. 599–610.

Syvitski JPM, Morehead MD, Bahr DB, Mulder T. 2000. Estimating fluvial sediment transport: the rating parameters. *Water Resources Research* 36: 2747–2760.

Syvitski J.P.M., 2003. Supply and flux of sediment along hydrological pathways: research for the 21st century. *Global and Planetary Change* **810**, p. 1-11.

Syvitski J.P.M., Milliman J.D., 2007. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. *Journal of Geology* 115, 1-19.

Syvitski J.P.M., Peckham S.D., Hilberman R. and Mulder T., 2003. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective. *Sedimentary Geology* 162 (1-2), p. 5-24.

Syvitski J.P.M., Vörösmarty C.J., Kettner A.J., Green P., 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308, 376-380.

Taibi R., 1993. Contribution à l'étude de l'écoulement des cours d'eau de l'Algérie septentrionale, DEA Nationale d'hydrologie, Université Montpellier II- Science et Techniques du Languedoc, 114 p.

Terfous, A., Megnounif, A., et Bouanani, A., 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). *Revue des Sciences de l'Eau*, 14 (2), 175–187. http://www.rse.inrs.ca/art/volume14/v14n2_173.pdf [Accessed 31 October 2012].

Thomas, R.B., 1985. Estimating total suspended sediment yield with probability sampling. *Wat. Resour. Res.* N° 21 (9), pp 1381-1388.

Tixeront, J., 1960. Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. In : IAHS Publ., 53 : pp 26-42.

Touaibia, B., 2010. Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. *Sécheresse*, 21 (1), 1–6.

Touaibia B, Bouaichi I., 2009. Abaques pour la quantification de l'érosion spécifique en zones éparses : bassin-versant du Cheliff. Huitième congrès de l'IAHS, septembre 2009, Hyderabad, Inde.

Touaibia I et Ghenim A., 2011. Estimation du biais du modèle regressif puissance concentration-débit : cas du bassin versant du K'sob. *Revue scientifique et Technologie LJEE* n°19, décembre 2011.

Touat, S., 1989. Contrôle de la représentativité des échantillons des transports solides en suspension. *Eaux et sols d'Algérie*, 2, 48–54.

Vericat D. et Batalla R.J., 2006. Sediment transport in a large impounded river : the lower Ebro, NE Iberian Peninsula. *Geomorphology* 79(1-2), pp. 72–92.

Vörösmarty, C., Meybeck M., Fekete B., Sharma K., Green P., Syvitski J., 2003. Anthropogenic sediment retention major global-scale impact from the population of registered impoundments., *Global Planetary Changes* 39, 169-190.

Walling, D.E., 1974. Suspended sediment and solute yield from a small catchment prior to urbanization. In : *Fluvial Processes in Instrumented watersheds*. Institute of British Geographers. Special Pub N° 6, pp 169-192

Walling, D.E., 1984. The sediment yields of Africa rivers. In: D.E. Walling, S.S.D. Foster, and P. Wurzel, eds., *Challenges in African hydrology and water resources (Harare Symposium)*. Wallingford, UK: IAHS Press, IAHS Publ. 144, 265–283. Disponible en ligne à : http://iahs.info/redbooks/a144/iahs_144_0265.pdf [Accessed 31 October 2012].

Walling D.E., 2006. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology* 79(3-4), pp. 192–216.

Walling DE et Fang D., 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change* 39 : 111-126.

Walling, D.E., Webb, B.W., 1981. The reliability of suspended load data. *Erosion and Sediment Transport Measurement*, vol. 133. IAHS Publication, pp.177–194.

Walling, D.E., Webb, B.W., 1982. *Sediment Availability and Prediction of Stormperiod Sediment Yields*, vol. 13. IAHS Publication, pp. 327–337.

Walling D.E. et Webb B.W., 1987. *Suspended load in gravel bed rivers : UK experience*. John Wiley and Sons.

Walling, D.E., Webb, D.W., 1988. The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield; some further comments. In *Sediment Budgets* (ed. Bordas, M.P., Walling D.E.), IAHS Publication No. 174. IAHS Press. Wallingford. UK, pp 337-350

Warrick JA, Madej MA, Goñi MA, Wheatcroft RA. 2013. Trends in the suspended-sediment yields of coastal rivers of northern California, 1955–2010. *Journal of Hydrology* 489: 108–123.

Warrick JA, 2015. Trend analyses with river sediment rating curves. *Hydrol. Process.* 29, 936–949 (2015)

Warrick JA, Rubin DM. 2007. Suspended-sediment rating-curve response to urbanization and wildfire, Santa Ana River, California. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface* 112: F02018.

Weisberg S. 2005. *Applied linear regression*. University of Minnesota. School of statistics, Minneapolis, Minnesota. Wiley interscience, 310 p.

Williams, G.P., 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *J. Hydrol.* 111, 89–106.

Wischmeier W.H. et Smith D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook 537, 58pp.

Wood P.A. (1977). Controls of variation in suspended sediment concentration in the River Rother, West Sussex, England”, *Sedimentology*, 24, p. 437-445. DOI : 10.1111/j. 1365-3091.1977.tb00131.x.

Yang G, Chen Z, Yu F, Wang Z, Zhao Y, Wang Z. 2006. Sediment rating parameters and their implications: yangtze river, China. *Science direct. Geomorphology*, 85: 166-175.

Yles, F. et Bouanani, A., 2016. Sédiments en suspension et typologie des crues dans le bassin versant de l’oued Saïda (Hauts plateaux algériens). *Revue des sciences de l'eau*, 29(3), 213–229.