



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

– جامعة حسيبة بن بوعلي – الشلف –

Université Hassiba BEN BOUALI CHLEF

كلية العلوم

Faculté des Sciences

قسم البيولوجيا

Département de Biologie

Mémoire en Vue de l'obtention du diplôme de Magister

Spécialité: Ecologie et Environnement

Option: Ecopédologie, Eau et Environnement

Thème

Dégradation spécifique et transport solide en zone semi aride -Cas du bassin versant de l'Oued Ouahrane-

Présenté par : SENOUCI Fatima

Devant le Jury composé de:

Président: Mr. BOUTHIBA A.
Encadreur: Mr. ACHITE M.
Examineurs: Pr. SAED HAMOUDI A.
Pr. BOUANANI A.
Mr. MEHIEDDINE M.

Professeur, U.H.B Chlef
Maître de conférences (A), U.H.B Chlef
Professeur, U.H.B Chlef
Professeur, U.A.B.B Tlemcen
Maître assistant (A), U.H.B Chlef

Année universitaire : 2012 - 2013

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mon sincère gratitude à toutes les personnes qui nous ont apporté conseils, encouragement et assistance.

*Je tiens particulièrement à remercier Mr. **ACHITE M.**, mon promoteur, pour ses encouragements, sa patience, ces bons conseils et ses orientations précieuses le long de ce travail.*

*Mes remerciements également à Mr. **BOUTHIBA A.** pour avoir accepté d'honorer de sa présence en président le jury.*

*Mes remerciements s'adressent aussi à Mr. **SAED HAMOUDI A.** d'avoir accepté d'examiner ce travail et participer au jury sans oublier son aide et ses renseignements.*

*Mes remerciements vont à Mr. **BOUANANI A.** pour avoir accepté d'examiner ce travail et honorer le jury.*

*Je remercie vivement Mr. **MEHIEDDINE M.** d'avoir accepté d'examiner ce travail et honorer le jury.*

*Je apprécie la précieuse collaboration des responsables des directions visitées au cours de cette étude, notamment à Mr. **BELRADIA**, Melle **Fatima**, Melle **Farida**, et à toute l'équipe de l'ANRH Chlef, pour leurs accueil, leurs conseil, et leurs repenses à nos demandes.*

Aux personnels de l'ANRH Blida, ONM Chlef et de l'ABH-CZ.

C'est pour mon autant un plaisir qu'un devoir d'exprimer mon gratitude et reconnaissance, à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci infiniment à tous.

DEDICACE

Je remercie Dieu le tous puissant de m'avoir aidé à l'élaboration de ce modeste travail, ainsi que les personnes qui ont contribué de près ou de loin qu'ils trouvent ici le témoignage de ma gratitude.

Je dédie ce présent mémoire :

- A mes très chers et adorables parents que dieu les gardent, qui m'ont bien encouragé pour atteindre mon but et je les remercie surtout pour leur amour et leur soutien moral,

-A mes frères et ma sœur;

-A mon mari Abdelkader, pour son soutien moral et matériel, et qui n'a ménagé aucun effort pour me venir en aide tout au long de la préparation de ce mémoire, que Dieu le protège et le garde à sa famille ;

-A ma petite fille Israa que Dieu la garde et la protège ;

-A toute mes grandes familles : SENOUCI, HAMIS et LOUMI ;

- A la promotion de l'Ecopedologie, eau et environnement et la promotion de l'irrigation et gestion de l'eau ;

Et à tous ceux qui me sont chers je dédie ce travail.

Fatima

Table des matières

Remerciements	II
Dedicace	II
Résumé :	VII
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XII
Liste des abréviations	XIV
Introduction générale	1

Chapitre I : Aperçu bibliographique

I.1.Généralité	4
I.2. Principaux agents de l'érosion hydrique	4
I.2.1.Intensité et agressivité des précipitations	4
I.2.2.Le ruissellement.....	6
I.2.3. Etat hydrique initial	9
I.3.Formes de manifestation de l'érosion hydrique	9
I.3.1. Erosion en nappe	9
I.3.2. Erosion linéaire.....	10
I.4.Quantification de l'érosion hydrique.....	10
I.4.1. Equation universelle de perte des sols	11
I.4.2. Formule de Gavrilovic (1960)	11
I.4.3. Formule de L'A.N.R.H (1970)	12
I.4.4. Formule de Tixeront (1960).....	13

I.4.5. Formule de Fournier (1960)	14
I.5. Le transport solide	14
I.5.1. Le transport solide par charriage	15
I.5.2. Le transport solide en suspension	16
I.5.3. Mesure du débit solide	17
I.5.3.1. Cas de charriage	17
I.5.3.2. Cas du transport solide en suspension	19
I.6. Quelques exemples de travaux réalisés dans le monde et en l'Algérie sur la problématique du transport solide	24
I.6.1. Dans le monde	24
I.6.2. En Algérie	29

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction	35
II.2. Situation géographique de la zone d'étude	35
II.3. Caractéristiques hydromorphologiques	36
II.4. Géologie et sol du bassin	40
II.5. La végétation et l'occupation du sol	43
II.6. Caractéristiques climatiques	45
II.6.1. Paramètres climatiques	45
II.6.1.1. Les températures	45
II.6.1.2. Les précipitations	47
II.6.1.3. L'indice xérothermique de Bagnouls et Gaussen (1957)	47

II.6.1.4. Evapotranspiration.....	48
II.6.1.5. Humidité relative	49
II.6.1.6. Les vents	49
II .6.1 .7. Le bilan hydrique.....	50
II.7. Hydrologie du bassin	51
Chapitre III : Etude de la variabilité du régime pluviométrique dans le bassin de l’oued Ouahrane	
III.1. Introduction	54
III.2. Détection de ruptures et étude de tendance au sein des séries pluviométriques.....	54
III.3. Méthodes statistiques de détection de ruptures utilisées	55
III.4. Analyse des résultats.....	58
III.5. Discussion et conclusion	61
Chapitre IV : Présentation et mise en forme des données	
IV.1. Collecte et mise en forme des données.....	64
IV.1.1. Collecte des données.....	64
IV.1.1.1. Méthode de mesure	64
IV.1.2. Mise en forme et traitement des données	68
IV.1.2.1. Estimation des apports solides par régression.....	68
IV. 1.2.2. Relation : Débit liquide instantané – Débit solide instantané (1 ^{ère} approche)	69
IV.1.2.3. Relation : Débit liquide moyen journalier observe (Qlmj) -Débit solide moyen journalier (Qsmj) (2 ^{ème} approche)	85

IV.1.3. Discussion des résultats	86
IV.1.4. Conclusion	87
Chapitre V: Estimation des apports solides dans le bassin versant de l'oued Ouahrane	
V.1. Introduction.....	89
V.2. Application de la courbe d'estimation du transport solide en suspension.....	89
V.3. Variabilité temporelle des apports liquides et solides dans le bassin versant de l'oued Ouahrane.....	90
V.4. Estimation des apports solides dans le bassin versant d'oued Ouahrane par les formules empiriques	97
V.5. Modélisation du transport solide	98
V.5.1. A l'aide du coefficient de ruissellement.....	98
V.5.2. A l'aide des débits de pointe de crues	99
V.5.3. A l'aide de la pluviométrie.....	99
V.5.4. A l'aide du coefficient d'hydraulicité	99
V.5.5. A l'aide de la lame d'eau ruisselée	100
V.6. Impact de la variabilité climatique sur le transport solide dans le bassin versant de l'oued Ouahrane.....	102
Conclusion générale	105
Références bibliographiques	108

Résumé :

Cette étude butant à la quantification du transport solide ainsi qu'à la détermination des périodes d'érosion active dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie et ce pour une période de 35 ans (1972-2007), sur le bassin versant de l'oued Ouahrane (270,15 km²). L'approche suivie est d'établir des relations de régression entre le débit liquide Ql et le débit solide Qs, en étudiant cette relation à différentes échelles temporelles: annuelles, saisonnières, mensuelles et journalières pour trouver la meilleure relation représentative du phénomène. Les résultats montrent que le modèle puissance explique la plus grande partie de la variance. Les modèles obtenus à l'échelle journalière et instantanée ont donné le meilleur coefficient de détermination. 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. Le transport solide d'hiver reste le plus élevé (61%), dépassant significativement les autres saisons. La dégradation spécifique moyenne au niveau de ce bassin est de l'ordre de 738,54 t/km² an.

Le modèle puissance traduit bien la relation entre le transport solide et les autres facteurs explicatifs. Les modèles développés peuvent être utilisés pour l'estimation du transport solide en cas d'absence des données des concentrations des matières en suspension.

Mots clés : Nord-Ouest de l'Algérie, bassin versant, oued Ouahrane, transport solide, érosion, débit liquide, modélisation.

Abstract:

This study abuts the quantification of sediment transport and the determination of periods of active erosion in the northwestern part of Algeria and for a period of 35 years (1972-2007), in the watershed wadi Ouahrane (270.15 km²). The approach is to establish regression relationships between water discharge (Ql) and sediment discharge (Qs), in examining this relationship at different time scales: annual, seasonal, monthly and daily to find the best relationship represents the phenomenon. The results show that the power model explains most of the variance. The resulting models on a daily scale and instant gave the best coefficient of determination. Given the availability of data on a daily scale, sediment transport was evaluated using the model obtained at this scale. Winter sediment transport remains the

highest (61%), significantly exceeding the other seasons. The average specific degradation at this basin is of the order of 738.54 t/km²year.

The model reflects the power relationship between sediment transport and other explanatory factors. The models developed can be used for estimation of sediment transport in the absence of data on the concentrations of suspended solids.

Keywords: northwestern part of Algeria, watershed, Wadi Ouahrane, sediment transport, erosion, liquid flow, modelisation.

ملخص:

تهدف هذه الدراسة الى القياس الكمي لنقل الرواسب وتحديد فترات الانجراف النشطة في الجزء الشمالي الغربي من الجزائر و لمدة 35 عاما (1972-2007)، بحوض وادي وهران (270.15 كم²). الطريقة المتبعة تتطلب البحث عن علاقات احصائية بين تدفق المياه و تصريف الرواسب ، درسنا هذه العلاقة لفترات زمنية مختلفة: السنوية ،الموسمية، الشهرية واليومية للعثور على أفضل علاقة لتمثيل الظاهرة. وأظهرت النتائج أن النموذج الاحصائي "اس" يفسر معظم الفرق. وقدم نموذج البيانات اليومية والفورية أفضل معامل تحديد.و نظرا لتوافر البيانات اليومية، جرى تقييم نقل الرواسب باستخدام هذا الاخير. سجلت أعلى نسبة لنقل الرواسب في فصل الشتاء (61٪)، وقد تجاوزت بشكل ملحوظ المواسم الأخرى. قدر الانجراف الخاص في هذا الحوض ب 738.54 طن / كم² سنويا. النموذج المحصل يفسر العلاقة بين نقل الرواسب والعوامل التفسيرية الأخرى. يمكن استخدام النماذج المطورة لتقدير انتقال الرواسب في حالة عدم وجود بيانات عن تركيزات المواد الصلبة العالقة. **مفتاح الكلمات:**شمال غرب الجزائر،حوض وادي وهران ، نقل الرواسب ، الانجراف ، التدفق السائل، نماذج.

Liste des figures

Figure I.1: Critères de suspension	17
Figure II.1: Situation du bassin d'étude (Oued Ouahrane)	36
Figure II.2: Carte de l'altimétrie du bassin d'oued Ouahrane.....	37
Figure. II.3 : Carte des pentes du bassin d'oued Ouahrane.....	38
Figure. II.4 : Géologie du bassin d'oued Ouahrane.	41
Figure. II.5: Lithologie du bassin d'oued Ouahrane.	43
Figure .II.6: Carte d'occupation du sol du bassin d'oued Ouahrane.....	44
Figure. II.7: Carte de localisation des stations pluviométriques et hydrométrique du bassin d'oued Ouahrane.	46
Figure. II.8 : Diagramme ombro thermique de Bagnouls et Gausson du bassin d'Oued Ouahrane (1999 -2008).	48
Figure .II.9: Variations mensuelles de l'ETP de station de Chlef (1999-2008).....	49
Figure. II.10 : Carte de réseau hydrographique du bassin d'oued Ouahrane.	51
Figure.III.1 : Variabilité des précipitations annuelles et droites linéaires de tendance pour les stations d'Ouled Farès et Bénaïria (1972-2007).....	59
Figure .III.2 : Calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance pour la station d'Ouled Farès et la station de Bénaïria.	60
Figure.III. 3 : Test de Buishand et ellipse de Bois et son intervalle de confiance pour la station d'Ouled Farès et la station de Bénaïria.	61
Figure IV.1 .Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé (totalité des données) (1972-2007).	69

Figure IV.2. Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé à l'échelle annuelle (1972-2007).	74
Figure IV.3. Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé à l'échelle mensuelle (1972-2007).	78
Figure IV.4 .Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé à l'échelle saisonnière (1972-2007).	81
Figure IV. 5. Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé pour la saison humide et la saison sèche (1972-2007).	82
Figure IV.6. Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé pour l'année humide et l'année sèche (1972-2007).	83
Figure IV.7 .Relation débit solide moyen journalier /débit liquide moyen journalier observé (totalité des données) (1972-2007).	86
Figure V.1: Variabilité mensuelle des apports liquides et solides dans le bassin versant de l'oued Ouahrane (1972-2007).	91
Figure V.2: Variabilité interannuelle des apports liquides et solides dans le bassin versant d'oued Ouahrane (1972-2007).	91
Figure V.3: Variabilité interannuelle des apports solides spécifiques et des précipitations dans le bassin versant d'oued Ouahrane (1972-2007).	92
Figure V.4: Variabilité interannuelle des apports liquides et des précipitations dans le bassin versant d'oued Ouahrane (1972-2007).	92
Figure V.5: Variabilité interannuelle des débits liquides et des précipitations dans le bassin versant d'oued Ouahrane (1972-2007).	93
Figure V.6: Contribution saisonnière des apports liquides et solides dans le bassin versant d'oued Ouahrane (septembre 1972- aout 2007).	94

Figure V.7: Variabilité interannuelle des apports solides spécifiques calculés et des apports solides estimés par Tixeront et par Fournier dans le bassin versant d’oued Ouahrane (1972-2007)..... 97

Figure V.8 : Relation entre les apports solides spécifique et les apports solides estimés par Tixeront à la station d’Ouled Farès. 98

Figure V.9 : Relation entre les apports solides et les paramètres explicatifs du transport solide à la station d’Ouled Farès..... 101

Figure V.10:Variation interannuelle de la dégradation spécifique à la station d’Ouled Farès (1972-2007)..... 102

Liste des tableaux

Tableau II.1: Caractéristiques hydromorphologiques du bassin versant d'oued Ouahrane.	39
Tableau II.2 : Répartition lithologique des différentes formations géologiques du bassin versant d'oued Ouahrane.....	42
Tableau II.3 : Coordonnées des stations pluviométriques et hydrométrique.	45
Tableau II.4 : Températures moyennes à la station d'Ouled Farès (1999 -2008).....	46
Tableau II.5 : Paramètres bioclimatiques calculés selon Bagnouls et Gausсен.	48
Tableau II.6 : Evapotranspirations mensuelles en mm (1999-2008).....	48
Tableau II.7 : Humidité relative moyenne mensuelle à la station d'Ouled Farès (1999-2008).	49
Tableau II.8 : Vitesses du vent moyennes à la station d'Ouled Farès (1999 -2008).....	50
Tableau II.9: Bilan hydrologique pour l'année la plus sèche à la station d'Ouled Farès, par la méthode de Thornthwaite (1999/2008).	50
Tableau III.1 : Stations retenues dans l'étude et leurs caractéristiques (1972-2007).....	55
Tableau III. 2: Les résultats des tests et la différence en % des moyennes de la pluviométrie annuelle pendant la période d'étude (1972-2007).....	59
Tableau IV.1 : Nombre de valeurs observées pour la station par année et par mois.	67
Tableau IV.2 : Valeurs de R ² calculées à l'échelle interannuelle.....	69
Tableau IV.3 : Valeurs de R ² calculées à l'échelle annuelle.	71
Tableau IV.4: Valeurs de R ² calculées à l'échelle mensuelle.	77
Tableau IV.5 : Valeurs de R ² calculées à l'échelle saisonnière.	80

Tableau IV.6 : Valeurs de R^2 calculées pour la saison humide et la saison sèche.	82
Tableau IV.7 : Valeurs de R^2 calculées pour l'année humide et l'année sèche.	83
Tableau IV.8 : Formules des modèles calculés pour différentes échelles temporelles.	84
Tableau IV.9: Valeurs de R^2 calculées (2 ^{ème} approche).....	85
Tableau IV.10 : Formule de modèle retenu pour la 2 ^{ème} approche.	86
Tableau V.1: Exemples des coefficients (a, b) de la courbe d'estimation du transport solide en suspension donnés par différents auteurs.	90
Tableau V.2 : Bilan annuel des précipitations, des apports liquides, des apports solides, du coefficient d'écoulement et des dégradations spécifiques à la station de Larbâa à Ouled Farès (septembre 1972- Aout 2007)	95
Tableau V.3 : Dégradation spécifique de plusieurs régions et bassin versant dans le bassin méditerranéen.	96
Tableau V.4 : Principaux paramètres statistiques de la précipitation, débit liquide et l'apport solide spécifique dans le bassin versant de l'oued Ouahrane.	103

Liste des abréviations

ANRH: Agence National des Ressources Hydrauliques

BRH: Bureau des Ressources Hydriques

EUPS: Equation Universelle des Pertes de Sol

IRD : Institut de recherche pour le développement

MES: Matière En Suspension

MUSLE: Equation Universelle de Perte des Sols Modifiée

ONM: Office National de la Météorologie

SIG: Système d'Information Géographique

SRC: Sediment Rating Curves, (Courbes d'Estimation de Sédiment).

Introduction générale

L'ampleur de l'érosion et du transport solide dans les bassins versants des zones semi-arides méditerranéennes a suscité l'intérêt d'un grand nombre de chercheurs et ingénieurs qui ont multiplié cette dernière décennie, les études et les investigations, pour essayer de comprendre et d'expliquer les mécanismes de ces phénomènes, leurs causes et leurs conséquences.

L'intensité de l'érosion hydrique varie d'une zone à l'autre. La partie Ouest, où l'érosion touche 47% de l'ensemble des terres, est la région la plus érodée du pays. Viennent ensuite les régions du Centre (27%) et de l'Est. L'érosion moyenne varie entre 2000 et 4000 t/km²/an (Demmak, 1982), et le taux d'envasement est supérieur à 15% (Achite et *al.*, 2006). L'Algérie est de ce fait l'un des pays les plus menacés dans le monde par l'érosion.

En Algérie, par exemple les études d'aménagement hydromécaniques butent sur le problème de manque de données sur le transport solide afin dévaluer son importance. Cela conduit l'ingénieur a utilisé les méthodes empiriques disponibles pour évaluer les quantités solides transportées annuellement par le cours d'eau étudié.

La recherche de modèles reliant les paramètres hydroclimatiques (précipitations, écoulements et/ou transport de matériaux solides) a fait l'objet de nombreuses études. On peut citer les travaux de (Walling et *al.*, 1981; Demmak,1982; Megnounif et *al.*, 2000, 2003; Katlan et *al.*, 1987 ; Probst et *al.*, 1992; Terfous et *al.*, 1999, 2001, 2003 ; Ghenim,2001 ; Achite et Meddi,2002; Benkhaled et Remini., 2003),... L'objectif de ces auteurs est d'expliquer les phénomènes de l'écoulement et du transport solide et de mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions ou des bassins versants où les mesures sont rares ou inexistantes. Le transport solide en Algérie, est mesuré dans les stations hydrométriques des bassins versants pour la quasi-totalité des épisodes d'écoulement. Généralement, on se limite au débit en suspension. L'estimation du charriage représente toujours un problème dont la solution n'est pas complète. (Larfi et Remini ,2006) et (Bouanani ,2004).

La plupart des travaux de recherche menés dans le monde ont montré l'utilité de la relation débit solide ou concentration-débit liquide (rating curves), comme une méthode permettant l'estimation du transport solide sur la période considérée (Walling et *al.*,1988 ; Crawford,1996 ; Cordova et Gonzalez, 1997 ; Sickingabula, 1998 ; Horowitz, 2003 ;

Asselman, 2000 ; Serrat et *al.*, 2001 ; Terfous et *al.*, 2003 ; Meybeck et *al.*, 2003 ; Moliere et *al.*, 2004 ; Achite et *al.*, 2004).

En Algérie, jusqu'à l'heure actuelle, les recherches traitant le problème de l'érosion hydrique des sols sont très limitées (complexité et manque de données pour l'étude du phénomène...).

Dans ce contexte, nous allons étudier la problématique de l'érosion hydrique et de transport solide en Algérie du nord. Dans le bassin versant de l'oued Ouahrane, comme dans l'ensemble de la région semi aride, l'érosion hydrique pose de nombreux problèmes ; les principaux sont liés à l'évaluation de la dégradation spécifique et des transports solides. Cet aspect de la dynamique découle des mécanismes complexes de la morphogénèse de versants et particulièrement. L'objectif principal de cette étude sera la quantification du transport solide et la dégradation spécifique ainsi qu'à la détermination des périodes d'érosion active et la recherche d'un modèle reliant les débits solides aux débits liquides au niveau de l'oued Ouahrane à partir des données observées entre 1972 et 2007 au droit de la station hydrométrique de Larbâa à Ouled Farès.

Nous achèverons ce travail et nous l'avons structuré en cinq chapitres :

- Le premier chapitre comprend une synthèse bibliographique sur la problématique de l'érosion et du transport solide en suspension ;
- Le deuxième chapitre, est consacré à la description de la région d'étude (situation géographique, étude topographique, étude hydrographique, étude hydroclimatographique,...) ;
- Le troisième chapitre porte sur l'étude de la variabilité du régime pluviométrique dans le bassin de l'oued Ouahrane ;
- Dans le quatrième chapitre, nous présentons les données et la mise en forme des données du transport solide ;
- Le dernier chapitre, constitue l'essentiel de ce mémoire, lequel porte les résultats et discussion ainsi le travail s'achève avec une conclusion.

Chapitre I : Aperçu bibliographique

I.1.Généralité

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

L'érosion hydrique constitue en Algérie un phénomène très grave qui affecte durement le patrimoine foncier. Elle touche 45% des zones telliennes soit 12 millions d'hectares cultivables.

Ce phénomène devient encore plus grave si l'on sait que 85% des surfaces cultivables, sont situées dans les zones les plus sensibles à l'érosion (Chibanni et *al.*, 1999).

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

I.2. Principaux agents de l'érosion hydrique

I.2.1.Intensité et agressivité des précipitations

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

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot V^2 \quad (I-1)$$

Où, m est la masse de la goutte de pluie (kg) et V la vitesse (m/s), E_c l'énergie cinétique (joules).

L'évaluation de l'énergie cinétique des gouttes reste un bon critère d'évaluation de l'agressivité des pluies. Il existe d'ailleurs une relation empirique reliant l'intensité d'une pluie et son énergie cinétique.

$$E_c = 11.9 + 8.73 \log I_p' \quad (I-2)$$

avec, E_c : Energie cinétique en $\text{j/m}^2/\text{mm}$ et I_p' : intensité de pluie en mm/h .

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

Plusieurs phases sont à considérer lors d'une averse. Les premières gouttes de pluies qui arrivent au sol y pénètrent proportionnellement à son ameublissement et sa porosité. Cette première phase s'accompagne d'un déplacement de particules et d'un tassement du sol. Puis la couche superficielle s'humidifie, et l'on assiste au développement quasi simultané de trois processus : la désagrégation de la structure, la formation d'une pellicule de battance et l'érosion par "splasch" ou érosion par rejaillissement (Benkhadra, 1997).

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

$$D_p = a \cdot E_c^b \quad (I-3)$$

Où D_p est la masse détachée et E_c l'énergie cinétique de la pluie. Les coefficients a et b dépendent essentiellement de la texture et de la structure du sol.

Feodoroff et *al.*, (1965), donnent des valeurs de 15 tonnes de terre remuées par hectare pour une averse de 25 mm et de 300 tonnes par hectare pour une averse de 100 mm.

Ces processus de désagrégation de la surface du sol et d'érosion par rejaillissement conduisent à la fermeture des pores à la surface du sol et à la réduction de son infiltrabilité en formant une croûte de battance.

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

I.2.2.Le ruissellement

Le ruissellement apparaît dès que l'intensité d'une pluie devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol. Il est nettement plus élevé sur sol nu que sous cultures. Les plus faibles ruissellements proviennent des pluies tombantes après une période sèche. Par contre, les ruissellements et les pertes en terres les plus élevées ont eu lieu à une époque où le sol est déjà très humide et dans le cas de pluies exceptionnelles et des orages d'automne et de printemps (Chibbani, et *al.*, 1999).

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.*, 1999).

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 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 (Meyer, 1965) :

$$V_R = (I^{0.33} \cdot Q_R^{0.33}) / n^{0.66} \quad (I-4)$$

Où :

V_R : vitesse de ruissellement

I : pente du terrain

Q_R : débit du ruissellement

n : rugosité du sol.

Les facteurs qui régissent le ruissellement sont principalement :

a)- L'infiltration

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

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 cette baisse 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. L'équation de Coulomb donnant la charge de rupture (τ) montre le rôle des deux paramètres essentiels :

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg}\varphi \quad (I-5)$$

avec, C : la cohésion qui dépend des forces capillaires et de la teneur en eau du sol.

Φ : l'angle de frottement interne qui dépend de la porosité du matériau et donc de la compacité du sol.

b)- Détention superficielle et rugosité du sol

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

c)- Pente et longueur de pente

L'influence de la pente est complexe. Le plus souvent, l'érosion augmente avec la pente.

Il se développe une érosion en rigoles dix fois plus agressive que l'érosion en nappe (Roose et *al.*, 1999). Quant à la longueur des pentes, il semble que son influence sur la naissance de rigoles dépend de diverses interactions avec la rugosité et la perméabilité du sol, le type et l'abondance du couvert végétal.

d)- Le couvert végétal

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

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

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

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

I.2.3. Etat hydrique initial

L'état hydrique du sol au moment d'une pluie a une très forte influence sur la dégradation, la formation des croûtes et la réduction de l'infiltrabilité résultante. Les agrégats secs sont plus sensibles à l'éclatement. En effet l'intensité de ce processus croît avec le volume d'air piégé (Boiffin, 1984 et Le Bissonnais, 1988) en particulier sous des pluies de forte intensité qui peuvent former des croûtes très rapidement.

L'état hydrique initial influence aussi la succion exercée à la surface du sol par les couches sous-jacentes et donc l'infiltration au travers de cette surface.

Lorsque le sol en surface est argileux sensible à la dispersion par l'effet de l'impact des gouttes de pluie à la désagrégation mécanique par l'alternance des cycles de dessiccation et d'humectation, il y a mobilisation des particules argileuses sous l'action de l'impact des pluies (Chibbani et *al.*, 1999). En effet, l'humectation des sols argileux entraîne un gonflement qui est une forme analogue de désagrégation. Cette argile mobilisée migre dans l'eau de l'infiltration, couvre la périphérie des agrégats et colmate les interstices intra-agrégats ou bien se dépose à la surface du sol pour former une croûte. La formation des croûtes ou organisation pelliculaire de surface, entraîne une réduction de l'infiltrabilité, accroît les risques de ruissellement et d'érosion.

I.3. Formes de manifestation de l'érosion hydrique

I.3.1. Erosion en nappe

Elle se produit lorsque l'écoulement et l'érosion se font sur toute la surface du sol, ce qui provoque une usure homogène non perceptible dans la majorité des cas.

Quantitativement, l'érosion en nappe est très modeste. En Algérie, les chercheurs de l'INRF et de l'OROSTOM ont évalué les pertes en terres par ce type d'érosion de 0,10 à 20 t/ha/an (Chibbani, et *al.*, 1999).

Ce type d'érosion entraîne des conséquences morphologiques et pédologiques fâcheuses suite à un décapage de l'horizon superficiel diminuant insidieusement sa réserve en éléments fertilisants et un entraînement préférentiel des particules les plus fines, de la matière organique et du carbonate de calcium.

I.3.2. Erosion linéaire

Elle se manifeste lorsque la concentration des eaux conduit à la formation de chenaux de dimension croissante : griffes (quelques centimètres de profondeur), rigoles (incision dans la couche labourée), ravines (incision dépassant la couche labourée).

a- Erosion en griffes et rigoles

Elle se produit lorsque l'écoulement d'eau se concentre et choisit son passage. Dès qu'une griffe s'établit, l'eau de ruissellement tend à se réunir, et plus elle se creuse plus il y a appel d'eau dans la rigole. Ainsi le phénomène de creusement s'accélère de lui-même.

De point de vue quantitatif, ce type d'érosion reste dans les mêmes proportions que l'érosion en nappe.

b- Erosion par ravinement

Les ravines suivent la ligne de plus grande pente des versants. Puisque le ruissellement provenant des versants peut atteindre 50 à 80% durant les averses exceptionnelles tombant sur les terres battues ou compactées, l'essentiel du transport solide provient des ravines et des oueds (Heusch, 1970 et Arabi, 1991).

Lorsque le sol est peu perméable, saturé et peu couvert, le ruissellement est abondant. Ce dernier creuse des ravines et augmente les pointes de crue des oueds, ce qui favorise le sapement des berges et les glissements de terrain, et par conséquent l'envasement des barrages, la destruction des infrastructures et la dégradation des terres. En Algérie, l'érosion ravinant a déplacé 90 à 300 t/ha/an ce qui correspond à une vitesse d'altération des versants de 8 à 17 mm/an (Chibbani, et *al.*, 1999).

I.4. Quantification de l'érosion hydrique

Les dégâts graves et intenses causés par l'érosion au fil des siècles ont poussé l'homme par le biais de différentes formules empiriques à quantifier les pertes en sols. Ces formules restent toujours à utiliser avec précaution du fait de leur limite d'application.

Parmi ces méthodes, nous pouvons citer :

I.4.1. Equation universelle de perte des sols

Les U.S.A (service Américain de conservation des sols) ont exploité plusieurs milliers de mesures sur des parcelles pour établir une équation dite de Wischmeir qui consiste à quantifier seulement l'érosion en nappe. L'équation fait intégrée l'ensemble des facteurs qui déterminent le phénomène d'érosion; tel que: le facteur d'érosivité de la pluie (R), le facteur d'érodibilité du sol (K), le facteur topographique (Ls), le paramètre du couvert végétal (C) et le facteur des pratiques anti - érosives.

Cette équation est de la forme suivant (Leviandier, 1989) :

$$Y = R \cdot K \cdot Ls \cdot C \cdot P \quad (I-6)$$

où :

Y : Pertes en sols (T / Ha. an);

R : Index d'érosion

K: érodibilité des sols;

Ls: facteur de longueur et de pente:

C: facteur de végétation, fonction des travaux agricoles des résidus des cultures

P: facteur de pratique de protection, fonction des rotations de cultures et des pentes.

I.4.2. Formule de Gavrilovic (1960)

Il a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnelle à la température, la pluie et un coefficient d'érosion. L'équation est donnée par l'expression suivante :

où:

$$Es = 3.14 \cdot T \cdot P_0 \cdot \sqrt{Z^3} \quad (I-7)$$

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

T : coefficient de température.

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0.1 \quad (I-8)$$

avec:

t_0 : température moyenne annuelle en °C

P_0 : pluie annuelle en (mm).

Z : coefficient d'érosion.

$$Z = y \cdot [x \cdot a] \cdot [\delta + \sqrt{I_{\text{moy}}}] \quad (\text{I-9})$$

y : valeur réciproque du coefficient de la résistance du sol dû à l'érosion. Il dépend de la roche mère, du climat et de type de sol. Il est tabulé.

[x.a]: coefficient de régularisation du bassin versant ou de la région érodable, se rapportant à la protection des sols, des influences des phénomènes atmosphériques des forces érosion liées aux conditions naturelles. Il est aussi tabulé.

δ : Equivalent numérique des processus visibles et nettement prononcé dans le bassin versant. Il est tabulé.

I_{moy} : Indice de pente moyen du bassin versant

I.4.3. Formule de L'A.N.R.H (1970)

L'équation est donnée par l'expression suivante :

$$T_{ss} = 26.62I_e + 5.07I_p + 9.77C_t - 593.59 \quad (\text{I-10})$$

Où:

T_{ss} : Transport solide spécifique moyen annuel (t/Km².an).

I_e : Indice lithologique. (%)

I_p : Indice des précipitations. (%)

C_t = D_d · F_l : coefficient de torrentialité

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A} \quad (\text{I-11})$$

D_d : Densité de drainage

L_i : Longueur de tous les cours d'eau d'ordre « 1 » (km).

$F1 = \frac{\text{Nombre de talwegs}}{\text{surface}}$; Fréquence des thalwegs élémentaires

Cette formule est applicable dans les conditions suivantes :

$I_e > 10 \%$

$P_o > 300$

I.4.4. Formule de Tixeront (1960)

La formule de Tixeront prend la forme:

$$E_s = [S_1 \cdot Ta_1 + S_2 \cdot Ta_2 + \dots + S_n \cdot Ta_n] \quad (\text{I-12})$$

avec: E_s : Erosion spécifique (t/km²·an)

Ta_1 , Ta_2 , Ta_n : taux d'abrasion fonction de la perméabilité du pole dans les sous bassin (t/km²).

S : la superficie totale du bassin versant (km²).

S_1, S_2, \dots, S_n : surfaces des sous bassin versant (km²).

Si nous considérons que la totalité des sous bassin versant ont la même perméabilité la formule de Tixeront prend la forme:

$$E_s = K \cdot (L_0)^{0,15} \quad (\text{I-13})$$

Où : E_s : érosion spécifique (T/Km²/an)

L_0 : Lamme d'eau ruisselée moyenne interannuelles en mm.

K : constantes.

K c'est un coefficient qui est déterminé en fonction de la perméabilité des terrains. Cependant,

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

K= 75 pour les terrains d'une perméabilité moyenne à élevée;

K= 350 pour les terrains d'une perméabilité faible à moyenne;

K = 1400 pour les terrains d'une perméabilité faible;

K= 3200 pour les terrains imperméables.

I.4.5. Formule de Fournier (1960)

L'équation est donnée par l'expression suivante :

$$Q_s = \frac{1}{36} \left(\frac{p}{p_a} \right)^{2.65} \left(\frac{H_{\text{moy.}}^2}{S} \right)^{0.46} \quad (\text{I-14})$$

Où : Q_s : Apport solide moyen interannuel (en t / Km². an) ;

p : La pluviométrie moyenne du mois le plus arrosé, (en mm) ;

p_a : La pluviométrie moyenne interannuelle, (en mm) ;

H_{moy} : L'altitude moyenne, (en m);

S : La superficie du bassin versant, (en Km²).

I.5. Le transport solide

Le transport solide représente l'entraînement de granulats sous l'action d'un écoulement fluide. Il existe dans différents phénomènes physiques, naturels ou industriels, et constitue un écoulement à surface libre ou en charge.

Le transport solide dans les cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion. Il relève essentiellement du ruissellement et met en jeu diverses formes d'écoulement de l'eau dans la nature (Hug, 1975).

Les matériaux alluvionnaires constituant le lit des cours d'eau proviennent de : (Probst, et *al.*, 1992).

- L'élaboration des éléments de surface, en général des matériaux meubles du bassin versant. Si l'on ne tient compte que de l'érosion en nappe évaluée au maximum à 20t/ha/an, cette ablation est de l'ordre de 1.3 mm/an (Chibbani, et *al.*,1999).

- L'érosion des berges du lit des cours d'eau et de leurs affluents. D'après les travaux effectués sur le fleuve du Sénégal, la Garonne et sur des rivières des Etats Unis, ce type d'érosion produit 20 à 30% du tonnage total des sédiments exportés (Probst, et *al.*, 1986). Il est évalué à 32 % de la charge total pour la Haute Tafna en Algérie (Megnounif, et *al.*, 2003).

Ces sédiments localisés dans les lits des oueds sont transportés par les crues pour être déposés soit sur des plaines à faible pente, soit dans des cuvettes de barrage ou encore en arrivant jusqu'à la mer.

Généralement deux modes de transport solide sont considérées : le transport solide par charriage et le transport solide en suspension. Les deux modes diffèrent par deux aspects essentiels : dans le premier cas, les particules se déplacent par roulement et glissent sur le fond et leurs vitesses est inférieure à celle de l'écoulement. Dans le deuxième cas, les particules se déplacent au sein de l'écoulement avec une vitesse de même ordre de grandeur que celle du fluide. Il n'existe pas de délimitation nette entre ces deux modes de transport. Il y a même des auteurs qui considèrent un troisième mode caractéristique intermédiaire, la saltation, où les particules se déplacent par des bonds, en alternant le charriage et la suspension (Probst, et *al.*, 1986).

Le mode de transport dépend essentiellement d'un paramètre fondamental : la taille du sédiment transporté.

I.5.1.Le transport solide par charriage

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

Les mesures sur le terrain du transport solide par charriage sont très onéreuses à cause des perturbations de l'écoulement. De ce fait, les évaluations de ce type de transport sont difficiles à mener en l'absence de bases de données. On se contente généralement d'études sur modèles réduits pour déterminer la proportion du charriage par rapport à la suspension ou au transport total. Pour quelques bassins versants le taux de charriage a été estimé à 12.5 % de la suspension.

I.5.2. Le transport solide en suspension

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

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

$V/W > 0.10$ début de transport par charriage.

$V/W > 0.40$ début de transport en suspension.

Les critères de suspension, donnés par Bagnold, Van Rijn, Eugelund et Schiedls sont représentés dans la figure I.1.

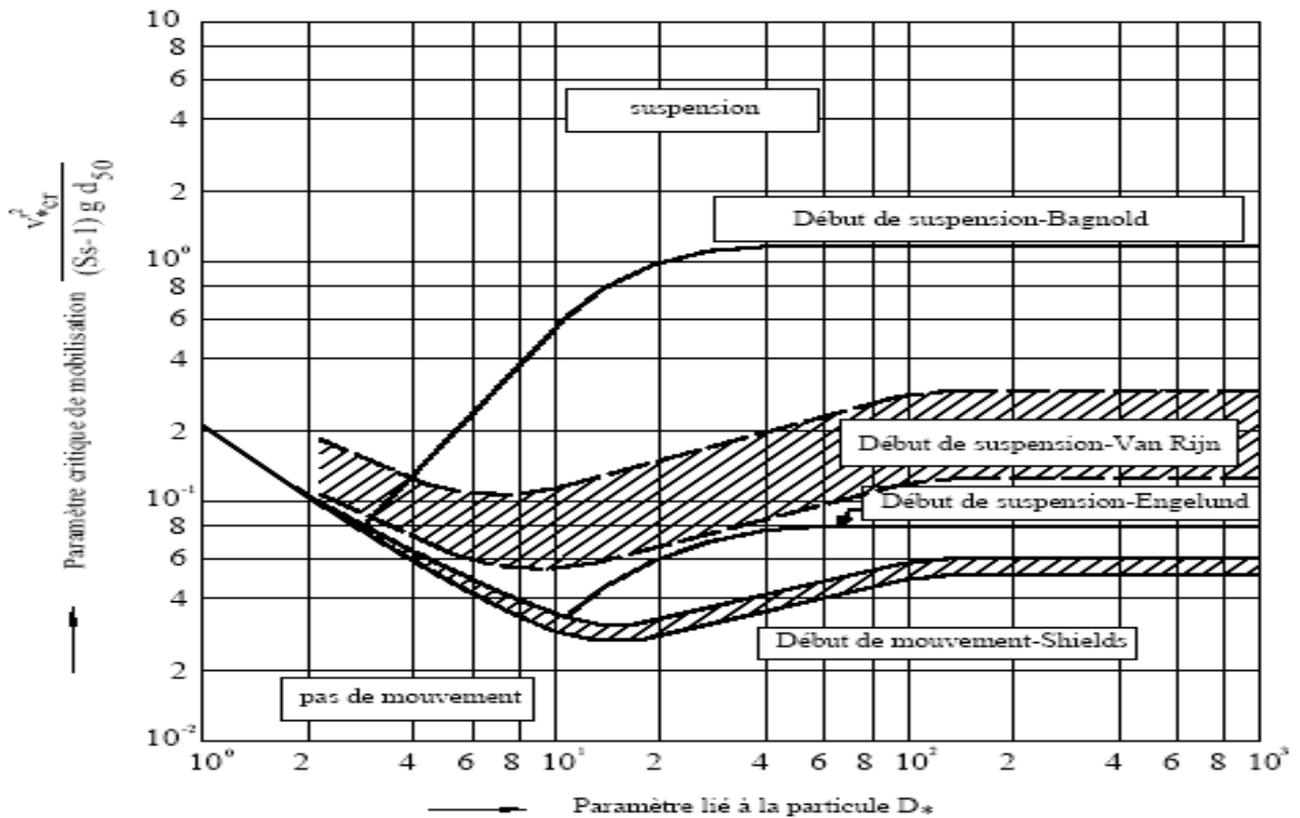


Figure I.1: Critères de suspension (Van Rijn, 1984)

Le transport en suspension se fait par flottaison et ne comporte que très épisodiquement des retombées des sédiments sur le fond. La turbulence est le facteur principal de la suspension des sédiments.

1.5.3. Mesure du débit solide

1.5.3.1. Cas de charriage

La mesure du débit solide par charriage peut être réalisée par diverses méthodes.

La plus directe consiste disposer d'une trappe déposée transversalement sur toute la largeur du lit et de piéger les sédiments qui vient de l'amont. Cette méthode a été mise au point la première fois aux Etats Unis; Certaines installations permettent de mesurer le débit solide d'un cours d'eau, pour des largeurs de 30 m (Hug, 1975).

Ce type d'appareil recueille pratiquement 100 % du charriage, à la suite d'un pompage au d'extraction des matériaux piégés dans la trappe.

- **Détecteurs hydrophoniques**

C'est une sorte de boîte qui se dépose sur le lit de la rivière. La face amont de cette boîte est constituée par une plaque vibrante qui est orientée normalement au courant grâce à un gouvernail de direction. A l'intérieur de la boîte, se trouve un microphone qui transmet les percussions reçues par la plaque vibrante par un câble souple au casque de l'opérateur.

- **Nasses de prises en rivières**

Connaissant le débit de charriage à partir des détecteurs hydrophoniques, on peut quantifier le charriage par la nasse.

Les premières nasses ont été utilisées par **Enrenberger** et **Muhlhofer**. C'est une ossature métallique, grillagée, parallépipédique ouverte sur une de ces faces dont les dimensions sont :

Longueur = 0,75 m, Largeur = 0,50 m, Hauteur = 0,25 m.

La suspension de la nasse est assurée par 4 tringles métalliques. La nasse comporte un gouvernail de profondeur. Il a pour effet de créer une poussée verticale dirigée vers le bas maintenant la nasse sur le fond du lit.

La nasse est déposée au fond du lit pour une durée déterminée (1mn), puis ramenée à la surface où le matériau solide capté est mesuré.

Pour obtenir des valeurs rapprochées du débit solide, il faut tenir compte du coefficient d'efficacité de la nasse, introduit par Muhlhofer. Ce coefficient d'efficacité est de l'ordre de 0,45. Il est indépendant du degré de remplissage de la nasse tant que la nasse ne dépasse pas le 1/3 de sa capacité maximale. Il varie avec le calibre des éléments véhiculés.

L'utilisation de la nasse est très limitée. La vitesse maximale de fond pour laquelle l'appareil peut être utilisée est de 3,5 m / s. Or, la plus grande partie des matériaux charriés par les cours d'eau se fait lors des plus grandes crues.

- **Traceurs radio - actifs**

La vitesse de déplacement des particules en rivières peut-être estimée en mesurant celle des traceurs radio - actifs. On mélange une faible quantité d'alluvions à un certain pourcentage d'un corps radioactive, parés passage de l'échantillon dans une pile métallique. Le déplacement de ce sable est détecté au compteur Geiger - Muller. Cette méthode est prometteuse et très coûteuse.

- **Procédés topographiques**

Nous pouvons mesurer le charriage en quantifiant les dépôts d'un cône d'alluvions dans une retenue ou un lac naturel par des procédés topographiques. Mais dans ce cas, on mesure aussi le transport solide en suspension.

1.5.3.2. Cas du transport solide en suspension

La mesure du transport se fait sur toute la largeur de la section de mesure. Les mesures sont effectuées au niveau des stations hydrométriques.

- **Méthode approchée**

La méthode consiste à effectuer à l'aide des prélèvements d'échantillons en bordure du cours d'eau. Nous mesurons la concentration « C » de l'échantillon au laboratoire par filtration, étuvage et pesée (C: sera exprimé en g/l). Aussi, le débit solide, exprimé en Kg / s, n'est que le produit du débit liquide Q_l (l / s) par la concentration C (g / l).

$$Q_s = Q_l \cdot C \quad (\text{I - 15})$$

Q_s est exprimée en kg/s.

- **Méthode par exploration du champ de concentration**

La méthode consiste à explorer à travers une section droite du cours d'eau, le champ de concentration en matière en suspension de déterminer de débit solide par intégration. Nous procédons à des prélèvements d'échantillons aux différents points de la section de mesure, vu que la concentration des sédiments varie souvent de la surface vers le fond et d'une rive à

l'autre (fig .I.2). La détermination du champ de concentration et du champ de vitesse pour la mesure du débit liquide est effectuée simultanément.

Le dépouillement d'un jaugeage de débit solide se fait de la même façon que celui du débit liquide. Un certain nombre de points sont répartis sur plusieurs verticales, pour lesquels on dispose d'une mesure de vitesse (V) et d'une mesure de concentration des matériaux en suspension (C).

Pour une verticale i nous reportons le produit $C.V.$ en fonction de la profondeur h_i . Nous traçons les épures des vitesses de chaque verticale (fig. I.2).

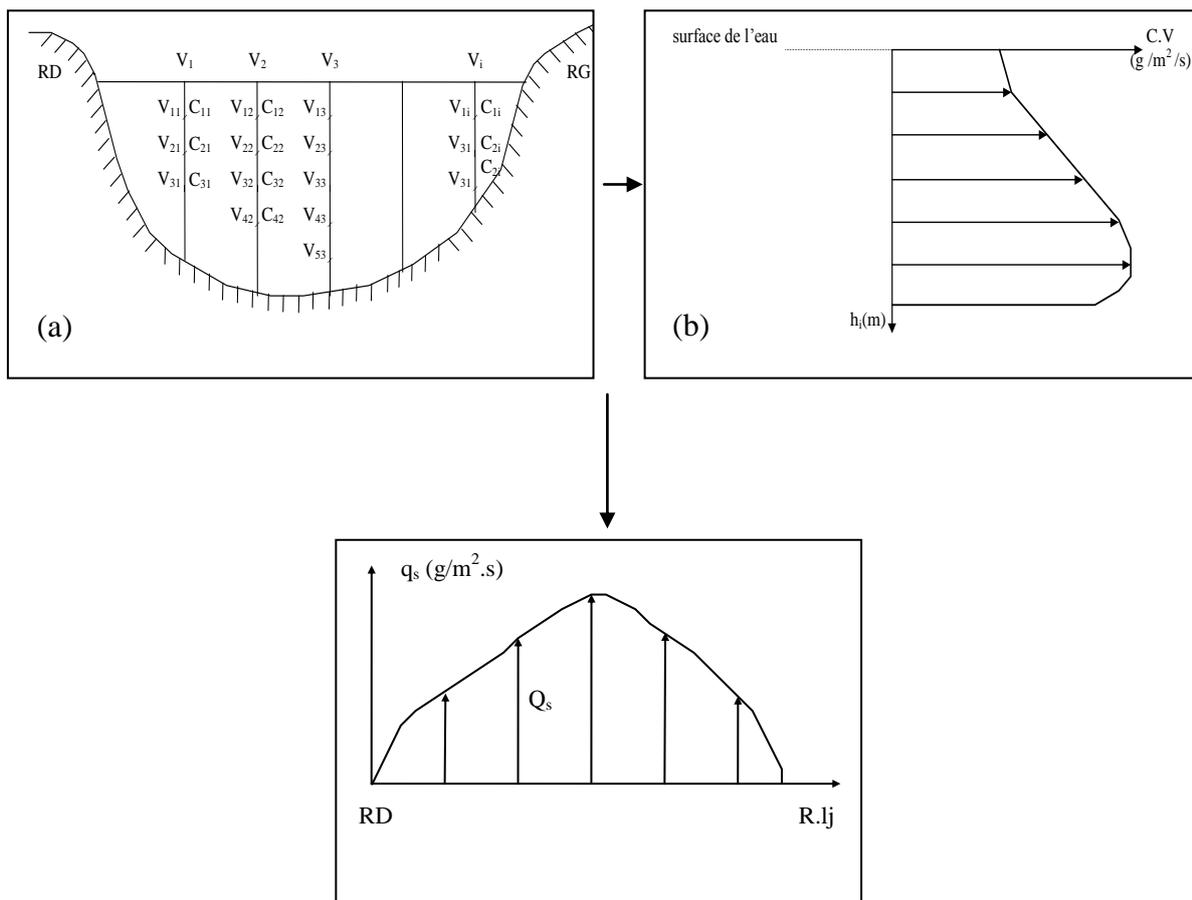


Figure I.2 : Epure du débit solide. (a) : Section de mesure ;(b) Epure des débits solides élémentaires.

d'où:

$$q_s = \int_0^{H_i} CV dh \quad (\text{I - 16})$$

avec: h: profondeur du point de prélèvement,

h_i : profondeur de la verticale i.

C'est le même procédé pour toutes les verticales.

L'équation aux dimensions de q_s est :

$q_s = \text{concentration} \times \text{vitesse} \times \text{hauteur}$

$$M L^{-1} T^{-1} = M L^{-3} \times L T^{-1} \times L$$

Le débit solide à travers toute la section de mesure est obtenu par intégration des débits solides unitaires (fig. I.2).

$$Q_s = \int_0^{L_i} q_s dl = \int_0^{L_i} \int_0^{H_i} c.v.dh.dl \quad (\text{I- 17})$$

avec:

L_i : abscisse de la verticale i ;

L: largeur totale de la section;

Le débit solide total aura pour équation aux dimensions:

$$M L^{-1} . T^{-1} . L = M T^{-1}$$

et sera exprimé souvent en kg/s ou en Tonne/an.

- **Mesure des concentrations par prélèvements selon Guillot et al. (1990)**

Il est possible également avec certains appareils comme une turbidisonde de faire la mesure par intégration en aller-retour surface – fond - surface, ce qui permet d'obtenir le débit solide par unité de champ de concentration

Cet Appareil permettant d'effectuer des prélèvements d'échantillons d'eau en n'importe quel point de la section du cours d'eau sans altération de l'écoulement. Néanmoins, des conditions de prélèvements restent à respecter:

- prise d'eau parallèle au sens du courant d'eau;
- champ de vitesse au voisinage de l'ajutage non perturbé;
- vitesse de pénétration dans le tube de prise voisine de la vitesse de courant;
- distribution granulométrique des sédiments prélevés équivalente à celle de sédiments écoulés.

La mesure de la concentration peut se faire également à l'aide d'une bouteille. Cette méthode est utilisée pour les faibles courants d'eau.

Les résultats de ces mesures sont exploités pour l'estimation des apports solides moyens annuels et l'érosion spécifiques des bassins.

- **Mesure directe des concentrations**

Il existe des possibilités pour mesurer les concentrations in situ sans faire des prélèvements. En utilisant l'absorption et / ou la diffusion du rayonnement par les matières en suspension. Toutefois, cette méthode nécessite un étalonnage préalable des appareils en laboratoire et des corrections sur site en fonction de la température de l'eau, de la granulométrie et éventuellement de la composition chimique des sédiments et des sels dissous (Guillot, 1990).

L'utilisation des méthodes optiques (transmission ou diffusion de la lumière) sont peu répandues, car, elles ne permettent pas de mesurer des concentrations qui peuvent dépasser 10 à 15 g/l.

Par contre, ces méthodes fondées sur la mesure de l'absorption ou de la diffusion d'un rayonnement radioactif sont les plus utilisées.

On distingue principalement:

- Les jauges à absorption gamma mesurent l'atténuation d'un rayonnement à travers une tranche d'eau contenant des éléments en suspension, cette atténuation est fonction

de la densité du milieu liquide dans lequel évolue la sonde et par la même de la turbidité. La méthode nous permet de mesurer des concentrations allant de 2 à 300 g/l.

- Les jauges à diffusion: utilisent le phénomène de diffusion des photons δ dans le milieu qui entoure l'ensemble source - détecteur. Elles sont surtout conçues pour des turbidités élevées.

- Des appareils permettant de mesurer la radioactivité naturelle des matières en suspension. En effet, lorsque les particules ont un faible diamètre, la radioactivité ambiante n'est plus négligeable. Elle est fonction de la turbidité qui peut être mesuré par un détecteur que l'on plonge dans l'eau. Cette méthode est plus simple, mais elle ne doit être utilisée que pour des concentrations élevées (supérieure à quelques centaines de grammes par litre).

• **Evaluation de la concentration des matériaux en suspension par les formules**

Nous pouvons citer :

* *Formule d'O'Brien (1933)*

Cette formule montre que le taux de concentration dépend directement de la cote Z des points de prélèvement et qu'ils sont notamment plus spécialement élevés près du fond.

$$\frac{C}{C_0} = \left(\frac{h-Z}{Z} \cdot \frac{Z_0}{h-Z_0} \right)^{w/ku_*} \quad (\text{I - 18})$$

Nous désignons par:

C: taux de concentration volumique à la cote Z (g/l),

C₀: taux de concentration volumique à la cote Z₀ (g/l),

h: hauteur du liquide (m),

w: vitesse de décantation des grains (m/s),

k: constante universelle de Karman,

u*: vitesse étoilée de l'écoulement (m/s):

$$u_* = (\tau g : \delta)^{1/2} \quad (\text{I - 19})$$

La formule est applicable pour des écoulements rigoureusement uniformes ne comptant aucune sorte de fluctuation plus au moins aléatoire de vitesse, des écoulements assez gros, quartzeux de 0.10 à 0.16 mm de diamètre dans des écoulements de 0.54 à 1.13 m/s sous 7 à 15 cm d'eau.

*** Formules d'Abalianz (1958)**

$$\bar{C} = 26 \frac{\bar{U}^3}{h^{3/4} \cdot w} \quad (\text{I- 20})$$

Où:

\bar{C} : Valeur moyenne du taux de concentration des matériaux (g/l) ;

\bar{U} : vitesse moyenne de l'écoulement (m/s) ;

w: vitesse de décantation des grains dans l'eau (m/s) ;

h: hauteur du liquide (m).

I.6. Quelques exemples de travaux réalisés dans le monde et en l'Algérie sur la problématique du transport solide

L'érosion et l'envasement des barrages constituent, par leurs importances, un problème majeur dans le monde et en Algérie. L'érosion, le transport solide et la sédimentation sont la cause de la dégradation des sols agricoles, l'alluvionnement des retenues et de nombreux dégâts dont les coûts sont considérables. Afin d'étudier cette problématique et pour évaluer son importance beaucoup de travaux ont été faite pour la bonne maitrise et la lutte contre cette problématique. Dans ce contexte, on cite à titre d'exemple, quelques travaux scientifiques réalisés dans le monde et en Algérie.

I.6.1. Dans le monde

Mendicino. (1999): L'auteur a utilisé des données de terrain mesurées sur un bassin versant expérimental dans le sud de l'Italie, une analyse de sensibilité faite par les SIG à base de différentes méthodologies pour l'estimation du facteur " longueur de pente" a été développé, dans le but de déterminer laquelle de celles-ci est la plus fiable pour l'évaluation spatiale des risques d'érosion. Les résultats obtenus ont montré que parmi les approches utilisées pour

décrire le cheminement des eaux de ruissellement le long des versants, le système bidimensionnel semble être plus réaliste à la fois sur les surfaces divergentes et convergentes.

Kao et Liu. (2001) : L'étude est basée sur les données hydrométriques de la période allant de 1950 à 1994 archivées par le bureau des ressources hydriques (BRH) enregistrées au niveau de la station de jaugeage à proximité de l'embouchure de la rivière Lanyang-Hsi au Taiwan (980 km²) qui ont été retraitées pour établir des séries chronologiques de taux de sédiments en suspension. La méthode de la courbe d'estimation à biais corrigé est utilisée pour estimer la charge de sédiments. L'analyse statistique fournit un critère pour la construction d'une efficace courbe d'estimation. Dans la plupart des cas, les données annuelles ont été utilisées pour établir les courbes d'estimation. Les résultats estimés ont montré de fortes variations interannuelles de charge de sédiments, allant de 0,05 à 37 Mt an⁻¹, qui diffèrent de la gamme étroite (7,9 à 8,1 Mt an⁻¹) de la moyenne à long terme rapportés dans les annuaires Hydrologique. Cette étude indique que la méthode de la moyenne à long terme des données hydrométriques fait disparaître les variations temporelles, en conséquence, elles ratent d'importantes informations présentes dans les données. En revanche, nous suggérons que des données historiques doivent être retraitées pour estimer la charge annuelle de sédiments, ce qui peut mener à une meilleure compréhension du processus d'érosion et à sa réponse aux perturbations humaines.

Lee. (2004) : L'étude vise à l'évaluation du risque d'érosion du sol et sa vérification à Boun (68,43 km²), en Corée, en utilisant un système d'information géographique (SIG) et télédétection. Les précipitations, la topographie, le sol, et les données d'utilisation des terres, ont été collectées, traitées, et construites dans une base de données spatiales à l'aide des SIG et des données de télédétection. Les zones qui ont subi l'érosion des sols ont été analysées et cartographiées à l'aide de l'équation universelle des pertes de sol (EUPS). La carte d'érosion des sols a été vérifiée par l'utilisation des données de localisation des glissements de terrain. Les endroits des glissements de terrain ont été identifiés dans le domaine de Boun par l'interprétation de photographies aériennes et des enquêtes sur le terrain.

Zhang et al., (2004): L'étude base sur la production de sédiment et son rapport avec des facteurs climatiques et hydrologiques dans le bassin versant de la fleuve de Dasha(460 km²)au Chine pour la période de 1954 à 1999. Les résultats ont prouvé que la précipitation de la ligne de partage de fleuve de Dasha a une variabilité élevée. Dans ces 46 années, 34% de précipitations du printemps, 58% de précipitations d'été et 30% des précipitations annuelles

seront considérés anomalie. L'analyse de corrélation prouve que la décharge de sédiment se corrèle le plus étroitement avec la fréquence de la tempête de pluie avec une précipitation quotidienne au-dessus de 100 mm, deuxièmement avec la fréquence de la tempête de pluie avec une précipitation quotidienne de 50-100 mm, et troisièmement avec le nombre de jours pluvieux. Leurs coefficients de corrélation sont 0.98, 0.90 et 0.85 respectivement.

Gupta et Chakrapani. (2005) : L'étude a été réalisée à partir des données de vingt-deux années de débit journaliers des eaux de dix-neuf emplacements, les concentrations de sédiments données à quatorze endroits dans l'ensemble du bassin de la rivière Narmada (98.796 km²) dont le but de quantifier et d'observer les variations des débits liquides et les charges de sédiments dans la rivière du bassin de la Narmada. Les résultats montrent que seulement quelques jours pendant la mousson sont responsables à des grands débits d'eau dans la rivière avec une charge de sédiments varie 5,82 à 28,93.10⁶ t/an à différents endroits du bassin étudié.

Rovira et Batalla. (2006) : Le but de cette étude est d'analyser la variabilité de la charge de sédiments en suspension à différentes échelles temporelles (variabilité intra-inondation, mensuel saisonnières et annuelles) dans la rivière Tordera (894 km²), située dans le nord-Espagne. Les échantillons de sédiments en suspension ont été obtenus au cours des débits de base ($Q \leq 3,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) et les inondations ($Q \leq 3.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). L'analyse de la variabilité dans les sédiments en suspension est structurée en deux étapes consécutives: (i) la construction de relations statistiques entre les concentrations de sédiments en suspension (C) et le débit (Q) et (ii) l'application de ces relations pour évaluer le rendement des sédiments en suspension. Les résultats montrent que, en un seul événement, le pic de sédiments précède généralement le débit de pointe, à la suite d'une boucle dans le sens horaire hystérésis. Le montant total des sédiments en suspension transportés pendant une inondation est donc lié à sa durée et le temps (au cours de l'année) ainsi que de son ampleur. À l'échelle annuelle, les résultats montrent une forte variabilité inter-annuelle en fonction du nombre d'inondations enregistrées chaque année, depuis presque toutes les charges suspendues sont transporté au cours de ces événements.

Sadeghi et Mizuyama. (2007) : L'objectif est d'estimer la production sédimentaire due à la pluie et l'écoulement d'un orage à l'exutoire du bassin versant de Khanmirza (395km²) situé dans l'ouest de l'Iran. L'estimation a été effectuée pour six événements orageux à l'aide de l'Equation Universelle Modifiée de Perte des Sols (MUSLE). Toutes les données requises

pour la mise en œuvre du modèle ont été déterminées grâce au suivi de l'écoulement et de la concentration en sédiments lors des événements, et à des études de terrain dans la zone d'étude. L'applicabilité du modèle à la zone d'étude a ensuite été évaluée par comparaison de ses estimations avec les données sédimentaires mesurées. Les résultats de cette étude montrent l'efficacité du modèle MUSLE pour estimer la production sédimentaire événementielle, sauf pour un événement orageux, dans la zone d'étude, avec un haut niveau de satisfaction et des différences non significatives entre les moyennes estimées et les valeurs mesurées des événements étudiés.

Faran Ali et De Boer. (2007) : L'objectif principal de cette étude est d'expliquer la variation dans la production de sédiments en suspension dans le bassin de l'Indus, l'un des plus grands fleuves du Sud 'Asie, a une longueur totale de 2880 km et un bassin de 912.000km² qui s'étend à travers des parties du Pakistan, en termes des variables climatiques, régimes hydrologiques et la taille du bassin versant. L'analyse des données hydraulique-climatologiques disponibles indique que le bassin supérieur d'Indus peut être subdivisé dans trois régions caractéristiques basées dessus si la production d'écoulement est commandée par la température, précipitation provoquée par mousson et perturbations occidentales, ou une combinaison de les deux.

Smith. (2008) : Dans cette étude, l'auteur a examiné les apports de sédiments en suspension dans un petit affluent de sous-bassin hydrographique (1,64 km²) à l'exutoire du bassin versant d'étude (53,5 km²) dans le sud-est de l'Australie. Le suivi de la concentration de sédiments en suspension et de décharge a été effectuée pour une période de près de deux ans et utilisé pour estimer les charges de sédiments en suspension. L'estimation du total des exportations de sédiments en suspension au cours de la période de surveillance ont été 24,16 t des sous-bassins et 550,3 t du bassin versant, qui sont généralement moins que les rapports antérieurs de petits bassins versants dans le sud-est de l'Australie. L'ampleur de l'apport de sédiments a été examinée en utilisant les ratios entre le site de production de sédiments spécifiques par unité de surface et de longueur de canal incisé. Les conclusions de cette étude suggèrent une grande partie de sédiments en suspension exporté à partir de petits sous-bassins versants de montagne incisés (1-2 km²) peut être remis à atteint en aval dans des conditions pluviométrie moyenne, qui, en conjonction avec les résultats de recherches antérieures soutient l'importance potentielle des contributions provenant de ces zones à des charges de sédiments en suspension dans les rivières de plaine durant les périodes à haut débit.

López-Tarazón et al., (2009) : L'objectif de l'étude est d'analyser la dynamique des sédiments en suspension et des charges dans un environnement fortement sensible à l'érosion fluviale dans le bassin versant de la rivière Isábena (445 km²) situé au centre de sud de Pyrénées d'Ebro au cours d'une période sèche de 3 ans. Les analyses ont été menées à différentes échelles de temps de comparer la contribution des débits de base et les inondations de la production annuelle de sédiments, en décrivant le caractère saisonnier du transport de sédiments en suspension par rapport aux précipitations et du ruissellement dans le bassin versant, et d'étudier les facteurs qui expliquent la variabilité de la réponse de sédiment en suspension de la rivière. Des techniques d'interpolation ont abouti à une charge moyenne annuelle de sédiments 184.253 t/an pour la période d'étude, avec un rendement spécifique de 414 t/km²/an.

Delmas et al., (2010) : Dans cette étude, les méthodes de calcul classiques (calcul de la moyenne des estimateurs, les estimateurs et les courbes de taux de notation) sont testées en utilisant 61 ensembles de données hydrographiques de la base de la qualité des rivières françaises (données rares, mais à long terme). Les analyses et les résultats montrent que les méthodes de calcul de la moyenne sont insuffisantes pour dériver les flux de sédiments à partir de données de débits journaliers (Q) et la concentration des sédiments (C). Considérant les courbes de relation puissance, des analyses des relations $C(Q)$ pour les 61 ensembles de données montrent des différences significatives entre les saisons, les variations de débit et en fonction des conditions antécédentes des flux. Les équations de la courbe de notation $C=a Q^b$, y compris la dynamique de décharge, sont mises en place et testés. Une approche est choisie: l'amélioration de l'approche de la courbe de notation, qui combine la dynamique des stocks de sédiments avec la variation de flux. Cette méthode a été validée avec des ensembles de données. Cette équation de la courbe de notation peut être utilisée pour quantifier les apports de sédiments à partir des données rares, pour de nombreux bassins hydrographiques des zones tempérées.

Peng et Maria. (2012) : Cette étude se base sur des données de concentration des sédiments en suspension rassemblées de 2008 à 2010 dans une ligne de partage agricole de taille moyenne à New York central, les auteurs ont examiné la première fois les propriétés statistiques de la concentration des sédiments en suspension (C) et de débit associée de l'eau(Q). Après, ils ont identifié deux procédés différents de transport dans deux gammes de débit séparées par différent seuil de (Q) pour chaque saison. Les différents exposants des

courbes d'estimation de sédiment (SRCs) dans chaque saison ont indiqué que le sédiment a été transporté près de la capacité pendant des débits inférieures mais bon au-dessous de la capacité pendant des débits plus élevées. La persistance de ces deux tendances en toutes les saisons suggère que le transport de sédiment ait été généralement approvisionnement limité. Le meilleur ajustement de (SRC) pour des données de trois ans combinées comparées à ceux pendant différentes années indique que les changements saisonniers du transport de sédiment sont limités.

I.6.2.En Algérie

Les bassins versants algériens dominés par un climat semi-aride sont caractérisés par une pluviométrie saisonnière et interannuelle irrégulière. Cette irrégularité a un impact direct sur l'action érosive et notamment sur le transport solide en suspension. Ce dernier dépend de plusieurs facteurs dont l'agressivité des averses, l'état du sol et la turbulence de l'écoulement.

Les valeurs de la dégradation spécifique varient d'un bassin à un autre et d'une région à l'autre.

Bourouba. (1997,1998) : L'auteur a fait ces études dans la partie Est de l'Algérie. Il a étudié les périodes de l'activité érosive où il enregistre des taux d'érosion de 680 t/km²/an pour oued Medjerda à Souk Ahras en 1997 et de 150 t/km²/an pour la Macta au barrage Cheurfa en 1998.

Les résultats obtenus montrent que les crues de l'automne et du printemps sont responsables de l'essentiel du transport solide. En effet, pendant l'été connu pour ces chaleurs intenses, le sol se dessèche, se fissure, se fragmente et voit son couvert végétal réduit, ce qui permet aux premières averses de l'automne de laver le sol de ces éléments fins détachés. Pendant le printemps qui succède à la saison hivernale froide et pluvieuse, les crues coïncident avec des versants saturés et déblayés.

L'activité érosive dépend alors des mouvements de masses et des sapements de berges qui se produisent dans les zones mal protégés au bas des versants .On assiste alors pendant ces crues à une croissance rapide du volume ruisselé et de la turbidité. Pour la crue du 17 avril 1979 à oued Medjerda supérieur, le débit liquide et la concentration enregistrés sont 8 fois supérieurs aux valeurs moyennes mensuelles.

Ces périodes de crues de l'automne et du printemps représentent une courte période de forte érosion qui dure entre 2 et 4 mois mais responsable de la majeure partie du transport solide et le reste de l'année est à érosion faible.

Annuellement, le comportement morphologique irrégulier des bassins versants algériens passerait d'une année à l'autre d'un régime méditerranéen à érosion élevée et à écoulement abondant au régime de la zone tempérée caractérisée par un écoulement abondant et une érosion faible ou encore au régime de la frange aride à érosion élevée et à faible écoulement.

Touaibia et al., (2001) : L'étude butant pour l'estimation de l'érosion spécifique du bassin versant de l'oued Haddad (6200Km²) dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie par une approche statistique. Vingt deux années de mesures de concentrations en éléments fins en suspension (1973/74-1994/95) sont étudiées; l'approche statistique consiste à les homogénéiser par la recherche d'un modèle régressif significatif reliant le débit solide au débit liquide, à différentes échelles temporelles, permettant ainsi de quantifier d'une part l'érosion et de dégager d'autre part la saison productive en sédiments. L'approche mensuelle avec un modèle en loi de puissance reste la plus significative, expliquant en moyenne 80% de la variation totale. L'automne constitue une saison particulièrement productive en sédiments, véhiculant en moyenne plus de 50% de l'apport solide moyen interannuel.

Terfous et al., (2001) : L'objectif de l'étude est de mieux comprendre le phénomène des exportations de matières solides en suspension véhiculées par le cours d'eau dans le bassin de l'oued Mouilah situé au noud-ouest de l'Algérie (2650km²), et de quantifier le flux de sédiments de se déposer dans le barrage de Hammam Boughrara. Les résultats d'analyse graphique des valeurs instantanées des débits solides en suspension dans le cours d'eau de l'oued Mouilah et leurs relations avec les débits liquides, durant les campagnes de prélèvements de 1977 à 1993, ont permis de montrer l'existence de deux périodes d'érosion actives. 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 annuelle sur les 16 années d'étude est estimée à 126 t/ km². Cette valeur est relativement faible par rapport à celles trouvées pour d'autres régions à régime hydrologique similaire.

Benkhaled et Remini. (2003) : Les auteurs ont effectué une étude dans le bassin versant de l'Oued Wahrane (270,15 km²) situé dans la partie nord du grand bassin de Cheliff.

Ils ont effectué une étude à différentes échelles pour appréhender la complexité d'approche du transport solide et d'analyser le comportement des paramètres de la relation puissance $Y=aX^b$. Bien que la validité d'une telle relation n'est pas à prouver, une analyse quantitative de la constante a et de l'exposant b a été effectuée pour le bassin versant.

Les résultats ont permis d'identifier de manière assez concluante les modèles saisonnières. L'échelle saisonnière est très représentative du phénomène de transport solide dans le bassin versant. D'autre part, l'événement averse-crue s'est avéré l'unité hydrologique la plus adéquate pour les analyses en relation avec le transport solide.

Megnounif et al., (2003) : Les chercheurs s'intéressent aux sédiments transportés en suspension par le cours d'eau dans le bassin de l'oued Tafna à Beni-Bahdel situé au nord-ouest de l'Algérie (256km²). Une analyse de la variabilité de la charge en suspension de l'eau quant aux fluctuations des régimes hydro climatiques, pour la période allant de septembre 1988 à aout 1993, montre que la production des sédiments est très forte en automne mais de faible ampleur au printemps. Cependant, les sédiments ramenés par le cours d'eau sont produit par le ruissellement superficiel sur les versants soit arrachés du lit et des berges du cours d'eau, cette dégradation spécifique est estimée à environ de 1120t/km²/an.

Achite et Meddi. (2004) : Ils ont estimé le transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad (470Km²), l'un des affluents de l'oued Mina dans la partie Nord Ouest le l'Algerie, contribue à l'envasement du barrage d'Es-Saâda sur l'oued Mina. L'approche méthodologique adoptée consiste à rechercher un modèle régressif pouvant expliquer le débit solide par le débit liquide mesuré au niveau de la station de Sidi Abdelakader El Djillali, en étudiant cette relation à différentes échelles : annuelles, saisonnières, mensuelles et journalières pour trouver la meilleure relation représentative du phénomène pour une période de 22ans. Les résultats montrent que le modèle puissance explique la plus grande partie de la variance. Les modèles obtenus à l'échelle journalière et instantanée 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. Ce résultat confirme ceux trouvés par différents chercheurs en Algérie et au de Maroc.

Achite et Meddi. (2005) : Dans cette étude ils ont développé une approche statistique de quantification des apports solides dans les cinq sous bassins de l'oued Mina (4900 Km²)

drainés par la station hydrométrique en amont de barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda. Sur une période d'observation de 22ans, les résultats montrent une grande variabilité spatio-temporelle des apports solides et liquides où les valeurs maximales sont enregistrées au début d'automne et à la fin du printemps avec une charge spécifique de 187 t/Km²/an pour le bassin de l'oued Mina.

Larfi et Remini. (2006) : Les auteurs ont effectué une étude dans le bassin versant de l'Oued Isser (3615 km²). Il se situe à l'amont du barrage de Béni Amrane dans la partie Nord-Est de l'Algérie. Les résultats montrent que les volumes les plus importants en transport solide se concentrent durant la période allant de Décembre à Mars.

La recherche d'une corrélation entre le taux d'érosion spécifique calculé et quelques paramètres hydro climatiques tels que la pluie annuelle, l'indice climatique de Fournier, le débit maximum annuel et la lame ruisselée a permis de trouver des relations hautement significatives. Les résultats de la quantification du transport solide (1100t/Km²/an) semblent très cohérents avec les mesures directes de l'envasement dans la retenue de Béni Amrane.

Lekfir et al., (2006) : Cette étude décrit une nouvelle méthode d'estimation des flux de matières en suspension (MES) au niveau d'un barrage algérien (barrage de Beni Amrane) situé dans le bassin versant d'oued Isser (4000Km²) basée sur la logique floue. Cette dernière utilise des termes flous tels que « faible », « moyen » et « élevé », pour décomposer le processus débit-MES en plusieurs sous-ensembles flous et d'en déduire les quantités de matières solides en fonction du débit observé de la rivière. Les performances de cette méthode ont été évaluées en période de calage, mais aussi en période de validation, pour mieux juger de la capacité prédictive du modèle à ces deux échelles. En comparant la logique floue avec un modèle empirique régressif utilisant une relation de puissance, nous avons démontré la robustesse du modèle flou en tant qu'outil de quantification du transport solide (2000 t/Km²/an).

Achite et Ouilon. (2007) : L'étude butant sur la quantification du transport solide dans la partie nord-ouest de l'Algérie et pour une période de 22 ans (1973-1995), sur le bassin de l'oued Abd (2480 km²). L'approche suivie est d'établir des relations de régression entre le débit liquide Q et la concentration de sédiments en suspension C qui sont calculés à partir de 1432 mesures appariées dans l'oued Abd, conduisant à des équations en loi de puissance de

type $C = a Q^b$. Les résultats acquis montrent que l'apport solide se fait principalement en automne (48,4%) et au printemps (32,7%) avec un taux d'érosion de 136 t/km²/an pour le bassin d'oued Abd.

Khanchoul et Jansson. (2008) : L'étude est faite dans la partie Nord-est de l'Algérie dont l'objectif était d'estimer la charge en suspension de sédiments du bassin versant du Mellah (550 km²) durant les tempêtes sur une période de 23 ans. Les résultats obtenus montrent que le rendement moyen annuel de sédiments en suspension a été de 373T/km².an. Le transport des sédiments est dominé par les tempêtes hivernales qui représentent 61% de la charge annuelle.

Meguenni et Remini. (2008) : L'étude a été consacré d'une part à la quantification des apports solides en suspension dans le bassin de l'Oued Harreza (142Km²) et de prévenir l'envasement du barrage Harreza d'autre part, destiné à l'irrigation d'une partie des terres du haut Cheliff. L'utilisation des données de la teneur en sédiment et le débit liquide de l'oued Harreza d'une durée de 20 années, a donné une relation puissance entre les deux paramètres pour une série globale de crues.

Les résultats montrent que l'érosion spécifique annuelle ainsi déduite est de l'ordre de 470 t/km².an. Par ailleurs, le taux d'érosion spécifique, déduit à partir de la formule de Tixeront, est comparable à la valeur moyenne calculée.

Khanchoul et al., (2010) : Les auteurs ont effectué une étude dans l'extrême nord de l'Algérie. Ils ont étudié les variables taux d'érosion et concentration des sédiments et ils présentent une méthode pour prédire les charges de sédiments dans le bassin versant Kebir (681 km²) et le bassin réservoir Mexa (651 km²). La méthodologie est développée par une courbe de tarage des sédiments et un modèle de régression multiple. Le rendement moyen annuel de sédiments en suspension de deux bassins de drainage Kebir et le bassin réservoir Mexa menées au cours des 24 ans (1975/1976 -1998/1999) et les 9 ans (1999/2000-2007/2008) sont respectivement 895 T km²/an et 572 T km²/an. La grande quantité de sédiments produite à partir de l'étude du bassin versant est fonction de plusieurs facteurs climatiques et physiques, y compris la forte proportion de matériaux argileux et la quantité de sol nu exposé.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction

Le bassin versant de l'oued Ouahrane a été choisi comme bassin d'application de notre travail pour la diversité des données qui y sont disponibles grâce aux stations pluviométriques et hydrométrique situées sur la zone d'étude.

Nous présentons ici les principales caractéristiques du bassin, les données du milieu physique dont nous disposons, et l'interprétation que nous pouvons en faire quant au fonctionnement hydrologique de notre site d'étude.

Les cartes présentées ici dans ce chapitre sont à la base du support papier de thèse doctorat Benkhald 2006. Les cartes sont faites à l'aide du logiciel cartographique ArcGis version 9.3 qui nous a permis de faire de différentes opérations telles que le géoréférencement et la digitalisation pour extraire les différentes couches d'informations.

II.2. Situation géographique de la zone d'étude

Le bassin versant est de forme allongée dans l'axe du cours d'eau principal, et d'une orientation Nord, Nord-Ouest. L'oued Ouahrane est un affluent de l'oued Cheliff. L'exutoire se trouve à 13Km au Nord Ouest de la ville de Chlef. La température moyenne dans ce bassin est 18°C.

Le bassin versant d'Oued Ouahrane appartenant au bassin Ras – Ouahrane .Il s'étend sur 270.15km² au Sud de Ténès et se situe au Nord de l'ensemble hydrographique Cheliff-Zahrez (fig. II.1).

Le bassin oued Ouahrane est limité à l'est par le bassin d'oued Fodda, à l'ouest par le bassin oued Ras, au nord par le bassin de l'oued Allala et au sud par le bassin de l'oued Sly. Il s'étend entre les longitudes 1° et 1° 3' E et entre les latitudes 36° et 36° 24' N. C'est une zone relativement large limitée par l'embouchure du Cheliff et el massif du Zaccar. Il forme une unité géographiquement homogène et appartient à la chaîne de l'Atlas Tallien Méridional.

L'essentiel des affluents appartient au Pliocène et au Miocène, d'altitude modérée ne dépassant pas 900 m. Cette région est soumise à un climat méditerranéen de type semi aride.

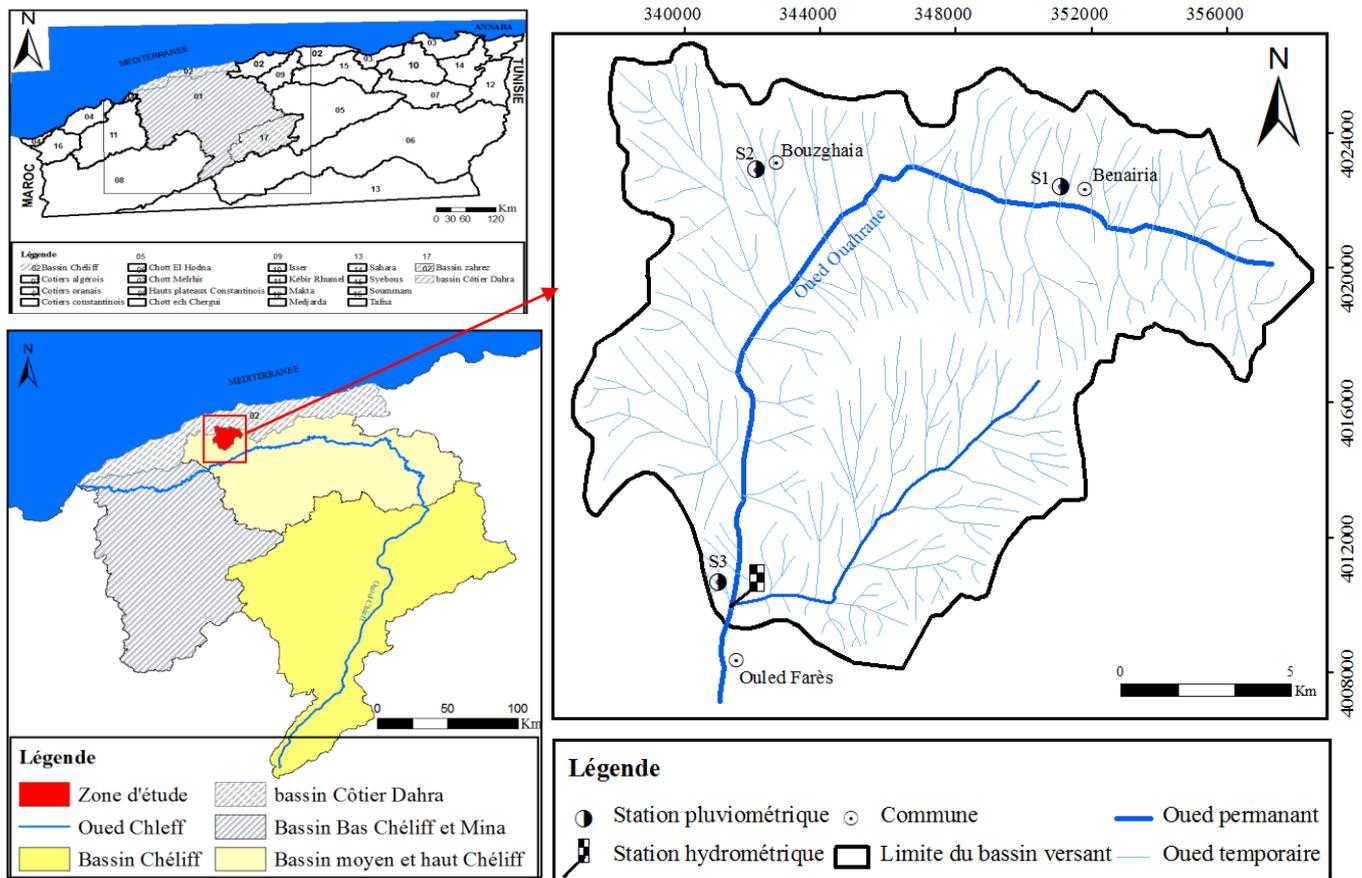


Figure II.1: Situation du bassin d'étude (Oued Ouahrane)

II.3. Caractéristiques hydromorphologiques

La connaissance des paramètres morphométriques d'un bassin versant est nécessaire afin de connaître leur effet sur la variation du régime hydrologique de ce dernier.

Le relief joue un rôle capital, dans la plus ou moins grande aptitude au ruissellement des terrains. Son appréciation peut être faite à l'aide de la répartition hypsométrique sur le bassin, et l'indice de pente de Roche (1960) qui sert à déterminer la pente moyenne avec les données réelles du bassin versant.

C'est un bassin de piedmonts, situé sur le versant Sud de la barrière montagneuse Dahra-Zacar. Il constitue par là une zone d'ombre pluviométrique. La partie amont du bassin versant culmine à 954 mètres d'altitude. La partie aval montre un relief plus vallonné, avec des pentes souvent supérieures à 12%. L'exutoire du bassin versant est à une altitude de 118 mètres (fig. II.2).

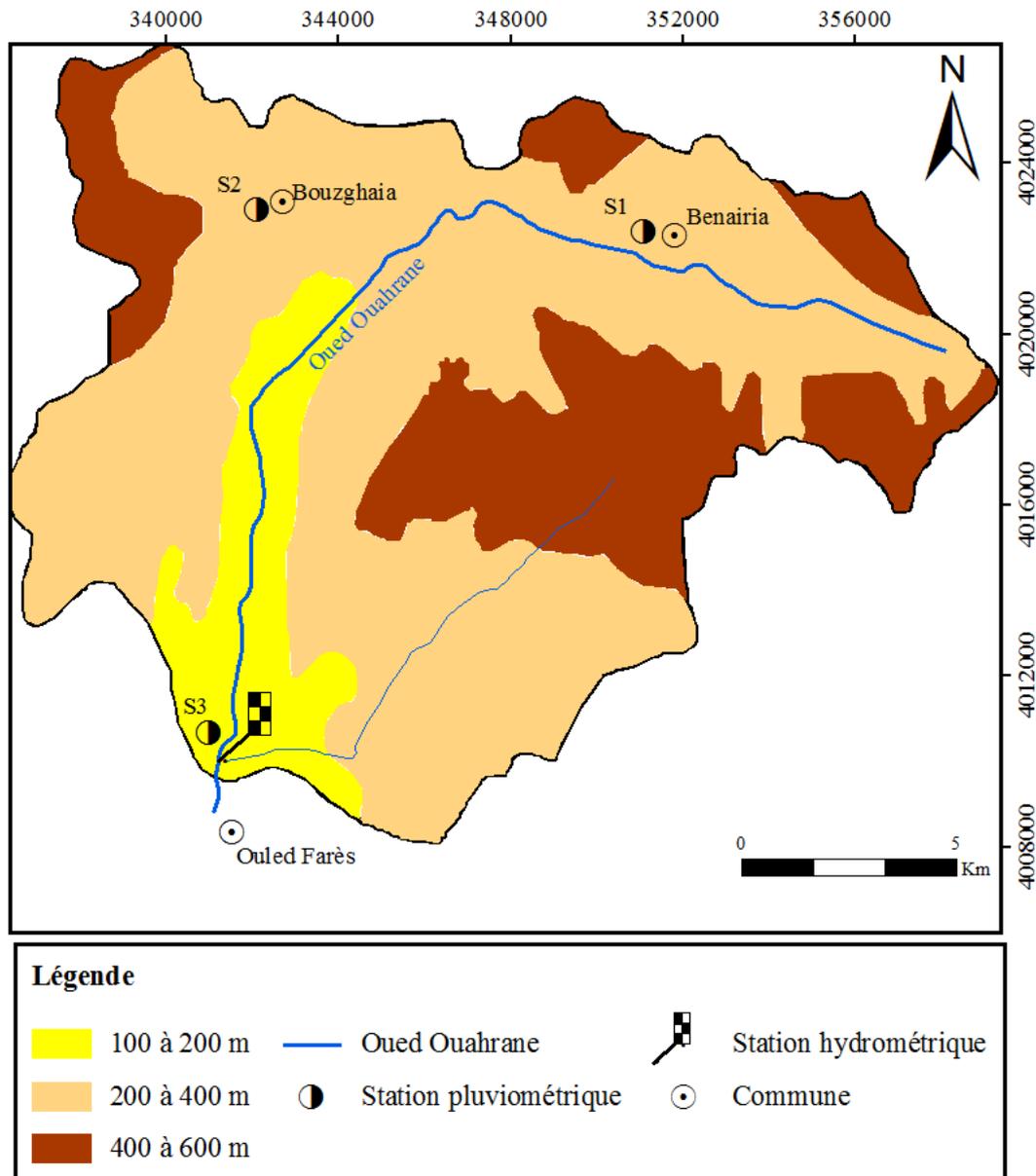


Figure II.2: Carte de l'altimétrie du bassin d'oued Ouahrane.

En Algérie du nord, les pentes représentent un facteur limitant important. L'étude du Bneder (1984) a montré que la proportion des terrains à forte pente est la plus grande (les surfaces où les pentes sont comprises entre 12.5 et 25%, représentent 39.75%).

La carte de pentes représentée à la fig. II.3 illustre une des principales caractéristiques physiques du bassin en liaison avec l'érosion. Le bassin est subdivisé en deux principales classes de pentes pouvant correspondre à deux types de relief dominants. Le premier, les plaines et terrasses et qui concernent la zone alluviale et celle des bas piedmonts (classes de 3

à 12%). Le second type de relief est représenté par les collines et concerne la zone argilo-marneuse avec la plus grande superficie (classe de 12 à 25%).

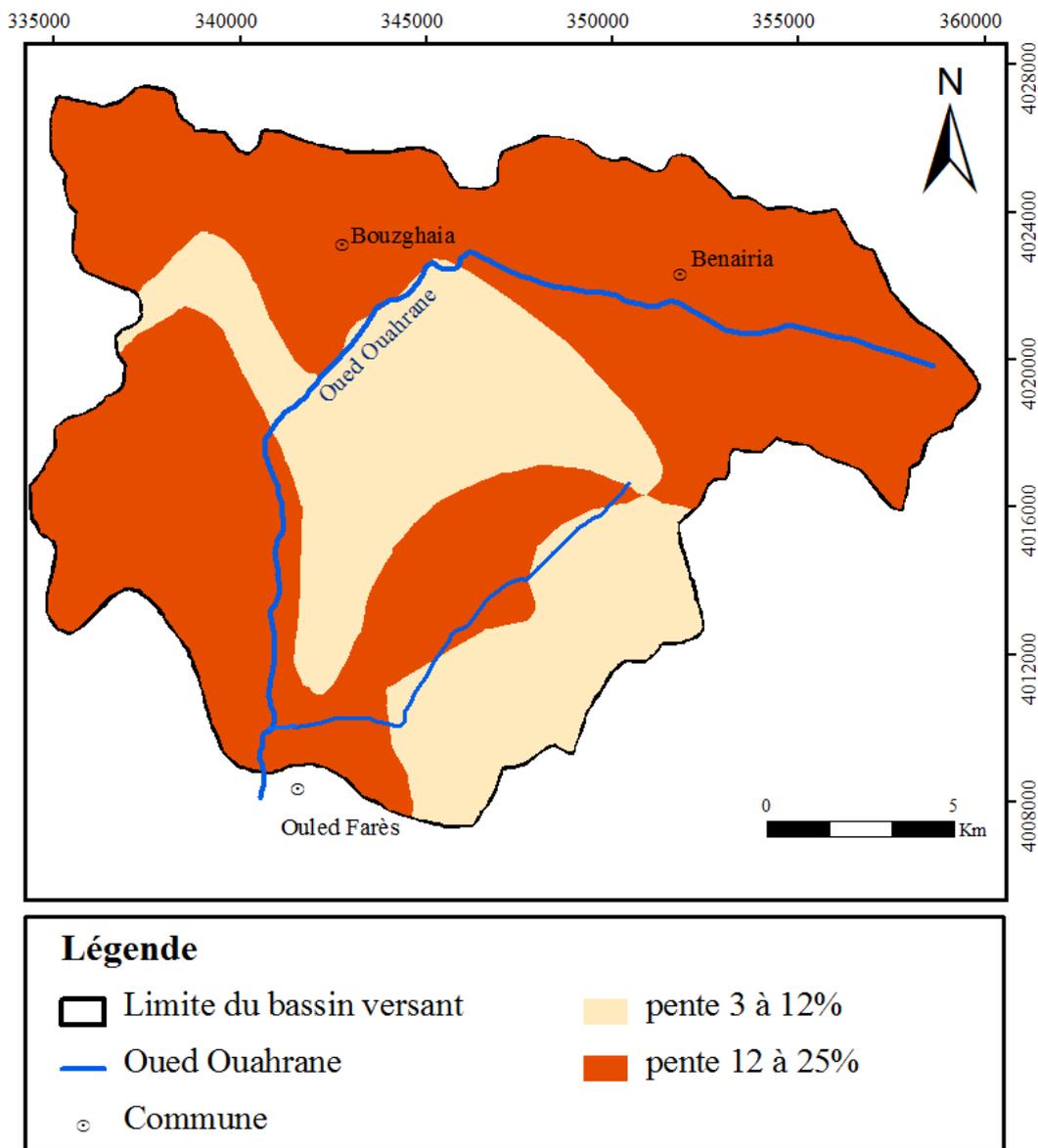


Figure. II.3 : Carte des pentes du bassin d'oued Ouahrane.

Le tableau II.1 montre les résultats de calcul des paramètres hydromorphologiques.

Ces paramètres morphométriques et hydrographiques du bassin versant comprennent :

- L'indice de compacité sert à mesurer la compacité du bassin, c'est à dire, qu'il est sensé rendre de la plus au moins grande vitesse de concentration à l'exutoire des eaux de ruissellement en provenance des diverses parties du bassin. La valeur $K_c = 1,50$

indique que le bassin a une forme assez allongée, donc elle implique un temps de concentration lent.

Tableau II.1: Caractéristiques hydromorphologiques du bassin versant d'oued Ouahrane.

Paramètres	Symbole	Unité	Valeur
Superficie du bassin versant	S	Km ²	270,15
Périmètre du bassin versant	P	Km	88
Indice de compacité de GRAVELIUS	Kc	/	1,5
Longueur du rectangle équivalent	L _R	Km	36,65
Largeur du rectangle équivalent	L _T	Km	7,37
Indice de pente de Roche	I _p	%	0,14
Indice de pente global	I _g	%	0,10
Dénivelée spécifique	D _s	/	175,70
Type de relief		modéré	
Altitude Minimale	H _{min}	M	118
Altitude Maximale	H _{max}	M	954
Altitude Moyenne	H _{moy}	M	375,24
Longueur des thalwegs retenus	L _{pt}	Km	1393,5
Longueur des thalwegs permanents	L _p	Km	43,5
Longueur des thalwegs temporaires	L _t	Km	1350
Densité de drainage totale	D _d	Km/Km ²	5,15
Densité de drainage permanente	D _d	Km/Km ²	0,16
Densité de drainage temporaire	D _d	Km/Km ²	4,99
Pente moyenne de l'oued Ouahrane	I _{cmoy}	%	5,8
Coefficient de torrentialité	C _t	/	11,23
Temps de concentration	T _c	Heures	10

- L'indice de pente globale I_g est un indice qui caractérise l'influence de la pente sur le régime hydrologique du bassin. Il sert aussi à classer le relief du bassin versant et cela en calculant la dénivelée spécifique D_s avec $D_s = I_g \cdot \sqrt{S} = 172,60m$. d'après la

classification de l'O.R.S.T.O.M, le bassin de l'oued Ouahrane à un relief de la classe R₅, c'est-à-dire relief assez fort.

- La densité de drainage peut nous renseigner sur l'importance de drainage du bassin et son aptitude au ruissellement superficiel.
- Le bassin versant d'oued Ouahrane draine bien sa superficie avec une densité de drainage $D_d = 5,15 \text{ Km/Km}^2$.

II.4. Géologie et sol du bassin

Deux cartes géologiques concernant le bassin d'étude ont été établies ; Pour le bassin d'oued Ouahrane, Anderson a établi en 1936 la première carte géologique du bassin à l'échelle 1/200000 (fig. II.4). Boulaine (1957) établit une même carte mais à l'échelle 1/50000.

Il existe dans ce bassin des formations géologiques Autochtones et Allochtones. Les sédiments plus âgés que le Post-Miocène se trouvent dans la partie (N-E) du bassin, le reste est couvert par des sédiments moins âgés représentés par les roches du Post-Miocène (sable, gravier, argiles).

Selon les affleurements naturels et les forages, les formations qui existent sous les couches du Post-Miocène sont des formations Autochtones : les sédiments du Jurassique et des Crétacés inférieurs. Ces derniers sont des points de vue lithologiques très variables (fig.II.5). Ces formations Autochtones sont partiellement superposées par les sédiments du Numidien où prédominent les grés.

Vers le Nord-Est le Miocène inférieur diminue légèrement d'épaisseur tout en évaluant vers des faciès à tendances continentales. La série détritique de base fait respectivement une centaine de mètres à l'oued Ouahrane, où elle est par ailleurs moins grossière, et est de 350 m l'oued Tsighaout où elle prend un faciès continental, bien qu'elle débute par un calcaire Conglomératique franchement marin.

La série marneuse suit la même évolution (600m) dans la vallée de l'oued Ouahrane où elle revêtue localement de teintes brunes et violacées et s'enrichit en lame de Gypse et fait 1000 m au Sud de la ville de Chlef, où se développent des marnes sableuses bigarrées à intercalation de sables et de graviers.

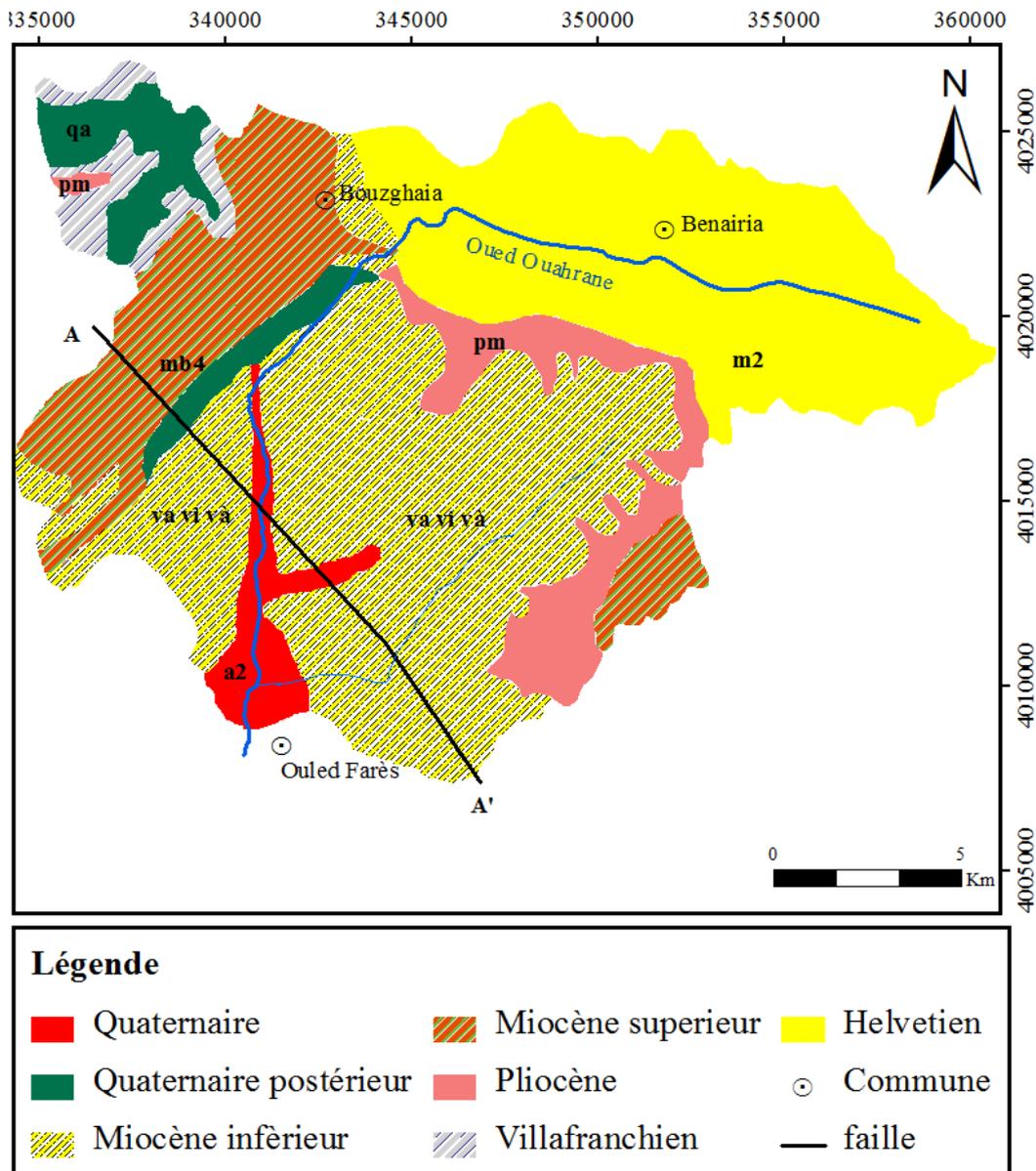


Figure. II.4 : Géologie du bassin d'oued Ouahrane.

A la base de cette série, deux bancs de cinérites bien consolidés renfermant des Feldspaths, suggèrent un milieu de dépôt lagunaire. La série détermine ici par quelques 600 m de conglomérats rouges entrecoupés de lits de sables et de marnes bariolées.

Plus à l'Est dans l'extrémité du bassin, le Miocène inférieur est représenté par une série limoneuse plus ou moins détritique de teinte, en général, gris rosé à violacé, indiquant l'envahissement de cette région par des facies saumâtres au cours du Miocène inférieur (Benkhaled, 2006).

Concernant le comportement hydrogéologique des différentes formations dans le bassin d'oued Ouahrane, les séries anciennes localisées au Nord du bassin sont constituées de terrains dont la nature lithologique ne permet des infiltrations qu'au niveau superficiel. Les séries plus récentes localisées dans la partie Sud du bassin sont constituées de terrains à perméabilité moyenne et même faible dans quelques parties (Benkhaled, 2006). Pour ce qui est du classement dans les séries sédimentaires, on distingue en fonction de la nature lithologique :

- Le Quaternaire, le Villafranchien (Vc) : ces formations sont essentiellement constituées de calcaire et présentent une bonne perméabilité et favorisent une bonne infiltration des eaux de pluie. Leurs superficies est de 48.15km², c'est-à-dire 18% de la superficie du bassin.
- Le Villafranchien rouge (Va), le Pliocène (Pm), le Miocène (m2) et le Medjanien : qui sont essentiellement marneux et argileux et qui correspondent aux formations imperméables. Ces sols représentent une superficie d'environ 222km², soit près de 82% du bassin versant est imperméable.

Il ressort de l'examen du tableau II.2, ci-dessous, que la majorité des sols de ce bassin sont constitués de marnes et d'argiles imperméables, substrat faiblement résistant à l'érosion, ce qui explique l'importance des quantités de sédiments transportés.

Tableau II.2 : Répartition lithologique des différentes formations géologiques du bassin versant d'oued Ouahrane.

Couches	Superficie (km ²)	Superficie (%)	Perméabilité des formations
Alluvions	39.75	14.76	Perméable
Marnes	110.1	40.90	Imperméables
Conglomérats et sables rouges	49.87	18.53	Perméabilité moyenne
Gypse	0.58	0.31	Très perméable
Grès	10.73	3.98	Perméabilité moyenne
Calcaires	4.65	1.73	Très perméable
Argiles	44	16.34	Imperméable
Grès et carténien	6.97	2.59	Perméabilité moyenne
Marnes à bancs de calcaires	-	-	Imperméable
Argiles et grès	2.32	0.86	Perméabilité faible

(Source : Boulaine, 1957)

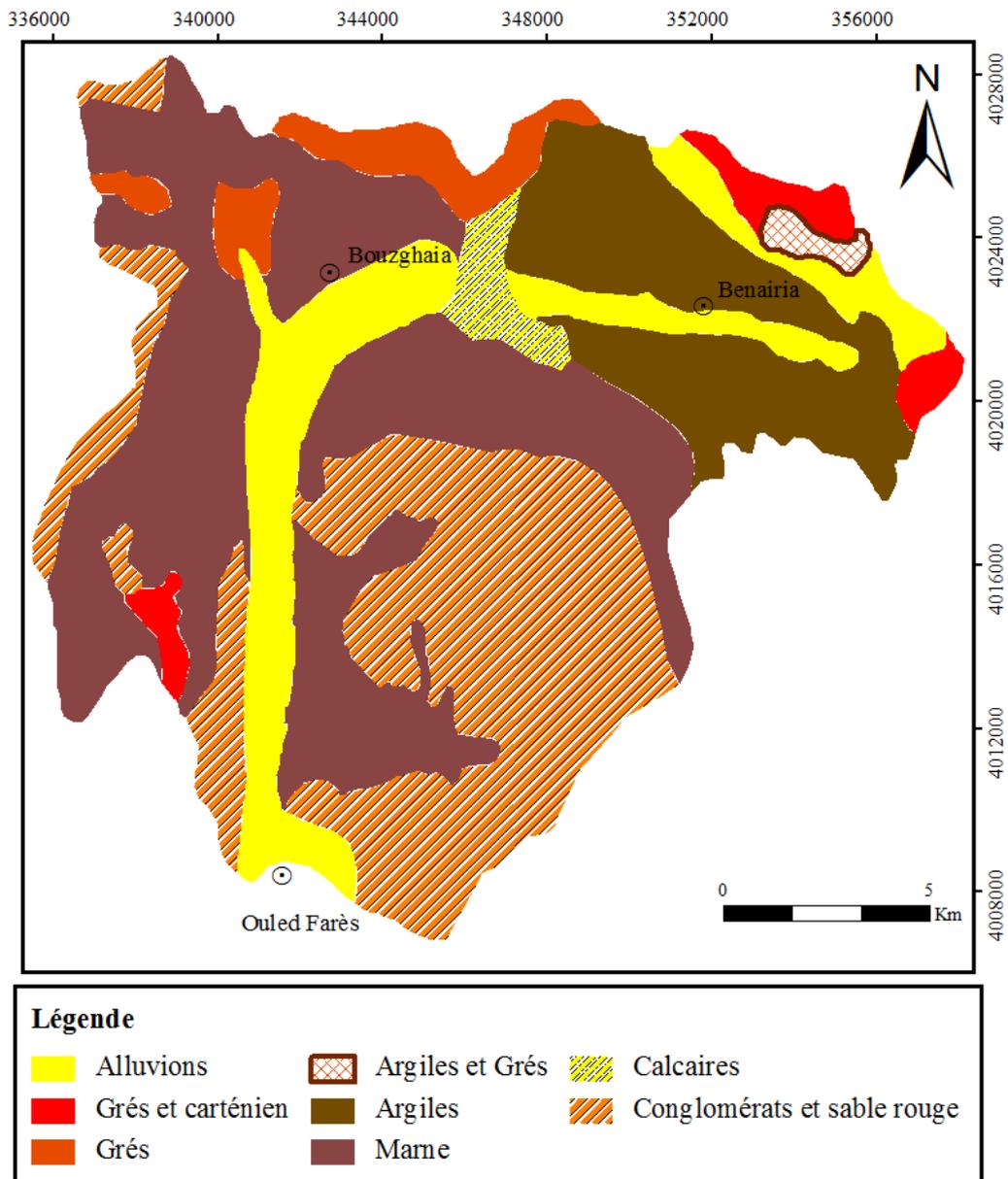


Figure. II.5: Lithologie du bassin d'oued Ouahrane.

II.5. La végétation et l'occupation du sol

Le bassin est en majeure partie affecté par un régime climatique semi aride qui détermine la couverture végétale. En matière d'érosion des sols, c'est le facteur « taux de couverture végétale » qui intervient le plus. Bollinne (1982) avait noté une baisse des pentes en sols sur les parcelles de froment au fur et à mesure du développement des épis.

Le diagramme d'occupation du sol fait ressortir d'emblée deux zones nettement opposées (fig. II.6).

- Au niveau des secteurs de faible pente (2 à 5 %) et faiblement soumis à l'érosion, on observe une prédominance des cultures céréalières et maraichères limitées au niveau des affleurements Miocène, des plaines et des terrasses alluviales.
- Au niveau des parties amont du bassin, où les pentes sont relativement fortes (10 à 18%), les cultures sont installées essentiellement sur les marnes sénoniennes et les argiles médjaniennes. Ces formations constituent des sous bassement fragiles et très favorables à l'érosion. Sur l'oued, on observe des sols légers, de sable fin et limon plus ou moins sableux, profond et très perméable.

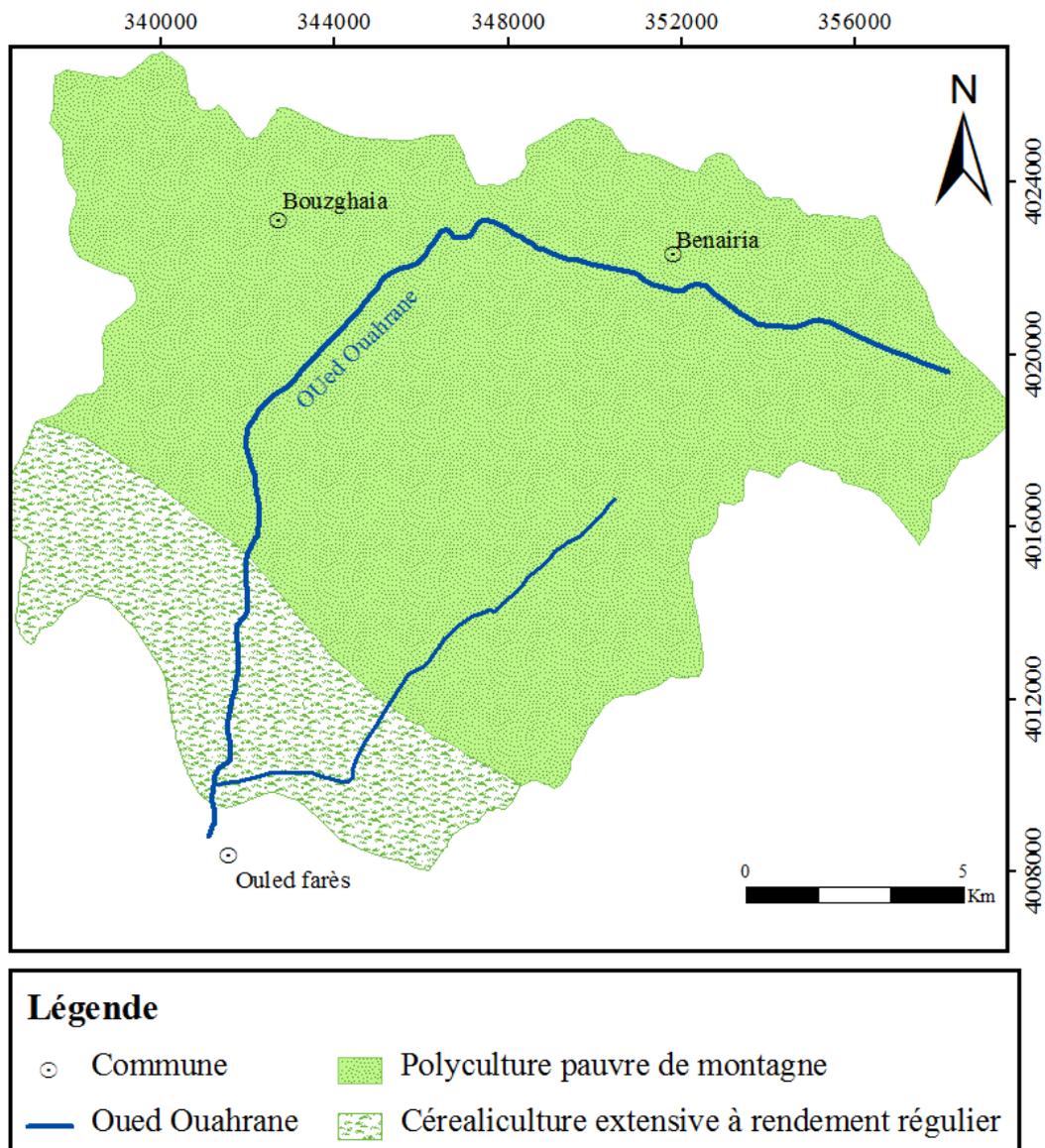


Figure .II.6: Carte d'occupation du sol du bassin d'oued Ouahrane.

La céréaliculture, dont le taux de couverture est faible n'est présente que sur les terrains à pente faible pour faciliter justement l'emploi de la mécanisation.

Dans le bassin d'étude, l'agriculture pratiquée, de type traditionnel, est à base de céréales et de jachères. Les terres concernées par cette activité ont des pentes assez variables, atteignant par certains endroits 25%. Sur des terres aussi pentues, les labours facilitent l'ablation des éléments fins lors des pluies orageuses d'automne (Benkhaled, 2006).

II.6. Caractéristiques climatiques

Ce bassin est contrôlé par trois postes pluviométriques et une station de jaugeage (fig.II.7), dont les coordonnées sont données au tableau II.3.

Tableau II.3 : Coordonnées des stations pluviométriques et hydrométrique.

Stations	Coordonnées Lambert			Code
	X(m)	Y(m)	Z(m)	
<u>1-Pluviométriques</u>				
Larbâa Ouled Farès	368,10	326,10	116	01-22-01
Bénaïria	378,15	338,40	320	01-22-05
Bouzghaïa	369,2	338,85	217	01-22-24
<u>2-Hydrométrique</u>				
Larbâa Ouled Farès	368,10	326,65	116	01-22-01

(Source : ANRH de Chlef).

II.6.1. Paramètres climatiques

II.6.1.1. Les températures

Le tableau II.4 des températures fait ressortir l'existence de deux saisons bien marquées. La première, froide correspondant à la période pluvieuse s'étale entre Octobre-Novembre et avril. La seconde chaude (Mai-Septembre) coïncide avec la période sèche.

En ce qui concerne les températures, c'est surtout l'impact des extrêmes (maxima et minima) qui agit le plus sur l'évolution de du milieu. Leur influence se manifeste particulièrement sur le plan de la dynamique, car les variations diurnes fréquentes et nombreuses entretiennent une gélification qui s'attaque à certaines roches déjà altérées.

Ces formations (gréseuses, grés quartzitiques, marno-calcaires), sous l'effet des variations de températures brusques, fournissent un matériel qui est repris par le ruissellement.

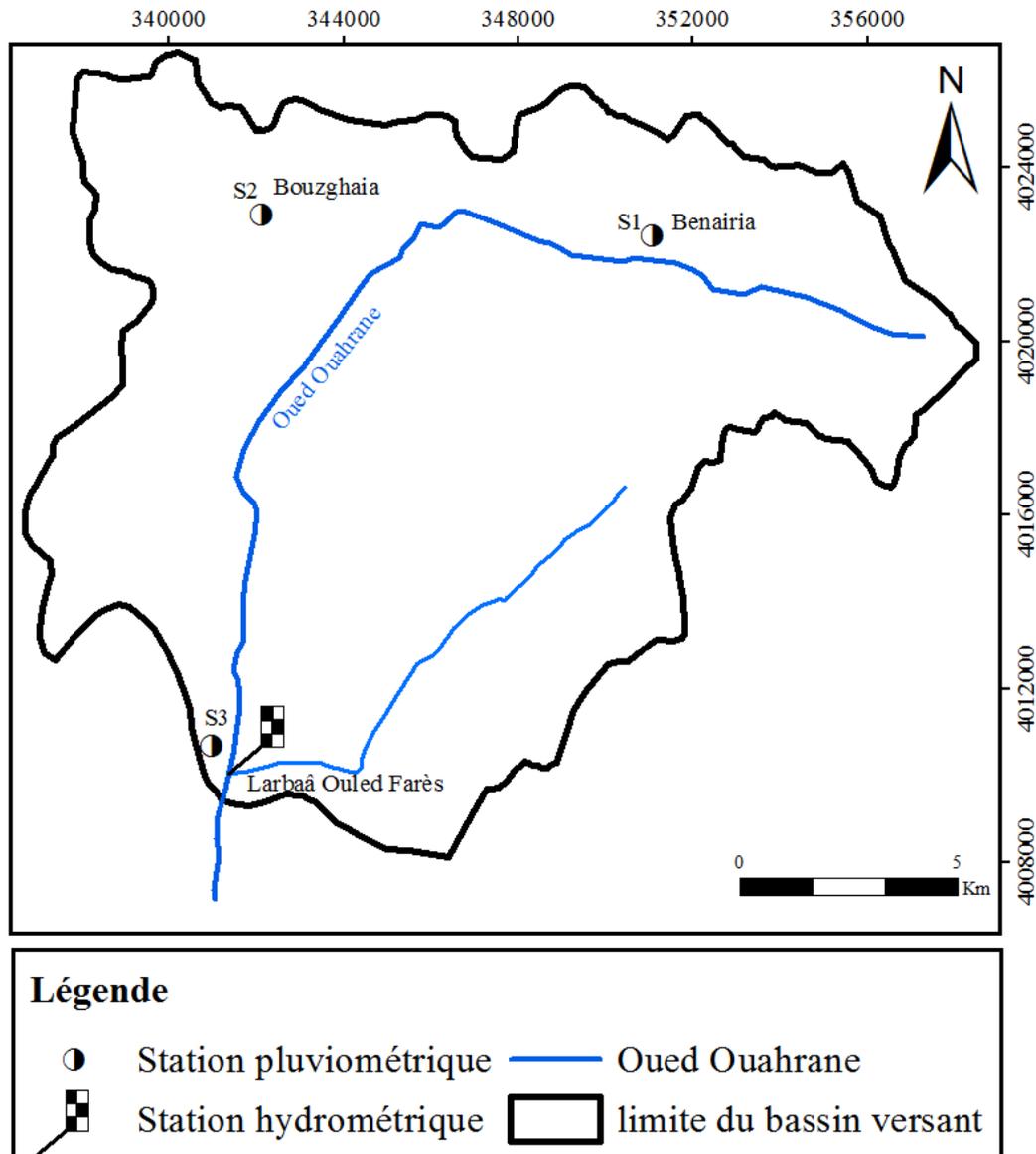


Figure. II.7: Carte de localisation des stations pluviométriques et hydrométriques du bassin d'oued Ouahrane.

Tableau II.4 : Températures moyennes à la station d'Ouled Farès (1999 -2008).

Mois	Sep	Oct	nov	déc	Jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août
T (°C)	26,3	22,1	19,0	20,2	10,3	11,7	14,7	17,8	21,9	27,2	30,9	30,3

(Source : ONM, 2008)

Les minima enregistré pour les mois les plus froids sont généralement liés au facteur de l'altitude et l'éloignement par rapport à la mer. Ils varient entre 5,0 et 22,6°C. Pour les maxima des mois les plus chauds, ils sont en général enregistrés au mois de Juillet pour tout le bassin. Ils varient entre 15,6 et 39,2°C.

II.6.1.2. Les précipitations

Le climat du Cheliff se caractérise par des étés chauds et secs peu orageux et des hivers doux et humides et peut être appelé méditerranéen semi-aride (Troll et *al.*, 1964 in Gomer, 1994). Le bassin d'oued Ouahrane appartient au bioclimat semi-aride moyen tempéré. La température moyenne annuelle est de 21,03°C. La pluviométrie moyenne interannuelle est de 353,7 mm. L'humidité relative est de 69%. La saison pluvieuse s'étale sur 9 mois (de septembre à Mai) avec un maximum enregistré entre février et Mars.

La répartition spatiale des précipitations indique deux tranches pluviométriques opposant deux secteurs différents :

- Le secteur de Ouled Farès recevant moins de 400 mm de pluie qui se situe à l'Ouest du bassin au dessous de 200 m. Il occupe près de 40% de l'étendue du bassin.
- Le secteur de Banairia situé dans la partie Est du bassin et à plus de 350 m. La moyenne pluviométrique annuelle varie entre 210 et 743 mm. Ce secteur occupe environ 60% de l'étendue du bassin.

II.6.1.3. L'indice xérothermique de Bagnouls et Gaussen (1957)

L'indice I_x , est calculé en retranchant du nombre de jours de la période sèche (suite de mois secs) le nombre de jours pluvieux ou supposés humides (degré hygrométrique élevé). Les valeurs obtenues représentent le nombre de jours « biologiquement secs » au cours de la période sèche. Cet indice complète le diagramme ombrothermique qui montre l'importance de la période sèche (fig. II.8).

Tableau II.5 : Paramètres bioclimatiques calculés selon Bagnouls et Gausson.

Mois	Sep	Oct	nov	Déc	Jan	fév	Mars	Avr	mai	juin	juil	août
P (mm)	21,4	36,3	42,8	52,9	40,4	62,0	25,0	33,2	34,0	2,5	0,2	3,0
T (°C)	26,3	22,1	19,0	20,2	10,3	11,7	14,7	17,8	21,9	27,2	30,9	30,3

Source (ONM, 2008)

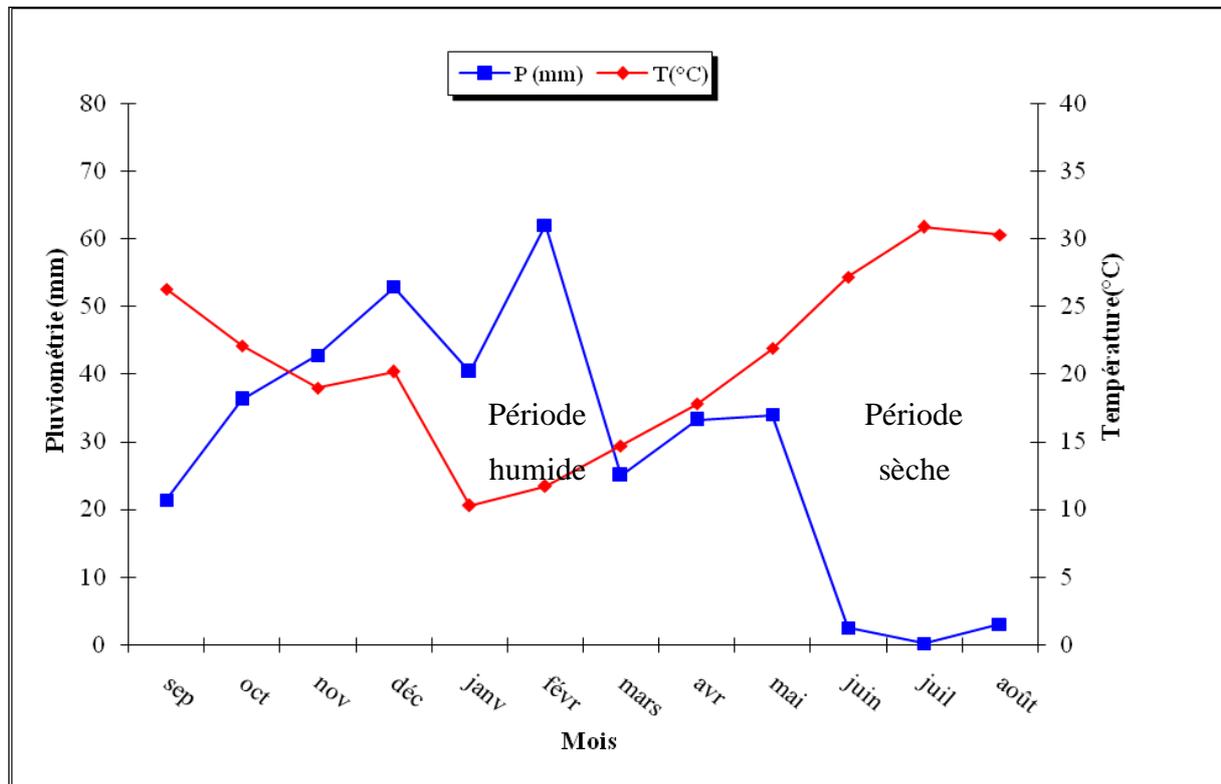


Figure. II.8 : Diagramme ombro thermique de Bagnouls et Gausson du bassin d'Oued Ouahrane (1999 -2008).

II.6.1.4. Evapotranspiration

L'aridité du climat et l'irrégularité spatio-temporelle des précipitations du bassin d'oued Ouahrane, font que l'évaporation est très fluctuante dans l'année. Elle passe de 37 mm au mois de décembre à 237 mm au mois de juillet (tableau II.6).

Tableau II.6 : Evapotranspirations mensuelles en mm (1999-2008).

Station	Sep	Oct	Nov	déc	Jan	fév	mar	Avr	mai	juin	juil	août	Annuel
Chlef	143	98	52	37	42	57	95	130	174	207	237	217	1499

Source (ONM, 2008)

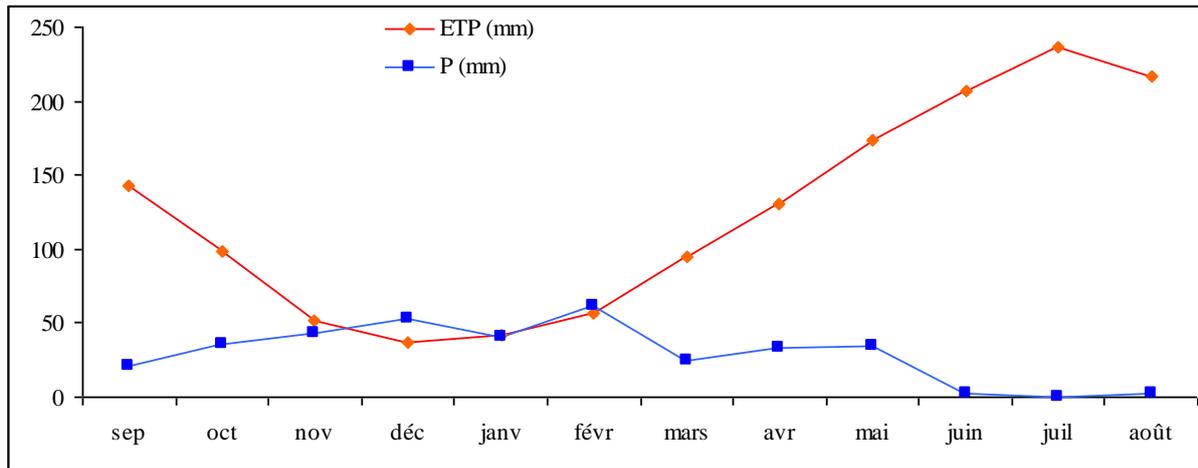


Figure .II.9: Variations mensuelles de l’ETP de station de Chlef (1999-2008).

II.6.1.5. Humidité relative

L’humidité relative est le rapport de la tension de vapeur à la tension maximum correspondant à la température mesurée au thermomètre sec, exprimée en %. A la station d’Ouled Farès (1999/2008), les moyennes mensuelles varient de 80% en hiver au mois de Février à 53% en été au mois de Juillet. La moyenne annuelle étant de 69% (tab. II.7).

Tableau II.7 : Humidité relative moyenne mensuelle à la station d’Ouled Farès (1999-2008).

Mois	Sep	oct	nov	déc	Janv	févr	Mars	avr	Mai	juin	juil	août	annuelle
Humidité(%)	60	66	70	79	79	80	77	74	69	60	53	55	69

Source (ONM, 2008)

II.6.1.6. Les vents

Les vents prédominants dans la région sont de Nord-Ouest. Ces vents sont relativement pluvieux. En été les vents du sud (secs et froids en hiver) deviennent très desséchants (le Sirocco).

La fréquence du nombre de Sirocco varie entre 17 et 17.1 jours an⁻¹. (Benkhaled, 2006). La vitesse moyenne du vent est généralement inférieure à 3m/s pour toute l’année (tab. II.8).

Tableau II.8 : Vitesses du vent moyennes à la station d'Ouled Farès (1999 -2008).

Mois	Sep	Oct	nov	déc	janv	févr	Mars	Avr	Mai	Juin	juil	août
Vent (m/s)	2,8	2,3	2,2	2,4	2,2	2,5	2,5	2,8	3,0	3,1	2,5	2,9

Source (ONM, 2008)

II .6.1 .7. Le bilan hydrique

Pour la détermination du bilan hydrique, nous avons choisi la méthode de Thornthwaite compte tenu des données disponibles. Les principaux paramètres recherchés sont l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'excédent (Exc.) ou infiltration efficace.

Tableau II.9: Bilan hydrologique pour l'année la plus sèche à la station d'Ouled Farès, par la méthode de Thornthwaite (1999/2008).

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
T °C	10,30	11,70	14,70	17,80	21,90	27,20	30,90	30,30	26,30	22,10	19,00	20,20
P (mm)	40,4	62,0	25,0	33,2	34,0	2,5	0,2	3,0	21,4	36,3	42,8	52,9
K	0,7	0,8	1	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7
I	2,99	3,62	5,12	6,84	9,36	12,99	15,76	15,30	12,35	9,49	7,55	8,28
A	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
ETP (mm)	12,32	18,76	39,24	72,48	125,29	204,22	272,25	240,44	160,18	88,54	55,98	56,23
ETR (mm)	12,32	18,76	39,24	72,48	80,48	2,50	0,2	3	21,40	36,30	42,8	52,9
RFU (mm)	100	100	85,76	46,48	0	0	0	0	0	0	0	0

L'observation du tableau du bilan hydrologique nous amène à dire que l'ETP est importante du mois d'avril jusqu'au mois d'octobre, avec des valeurs atteignant les 272,25mm au mois de juillet (1999/2008), rendant ainsi nécessaire l'irrigation. A partir du mois de novembre, on assiste à une reconstitution du stock qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU, qui atteint son maximum entre les mois de janvier et avril. Au-delà de cette période, on assiste à une baisse de la RFU, traduisant un épuisement du stock.(tab.II.9).

II.7. Hydrologie du bassin

Le drainage du bassin est assuré par l'Oued Ouahrane, cours d'eau appartenant au grand système Cheliff-Zahrez. Il reçoit en rive gauche un petit affluent relativement important, qui draine la zone conglomérats et sables (fig. II.10).

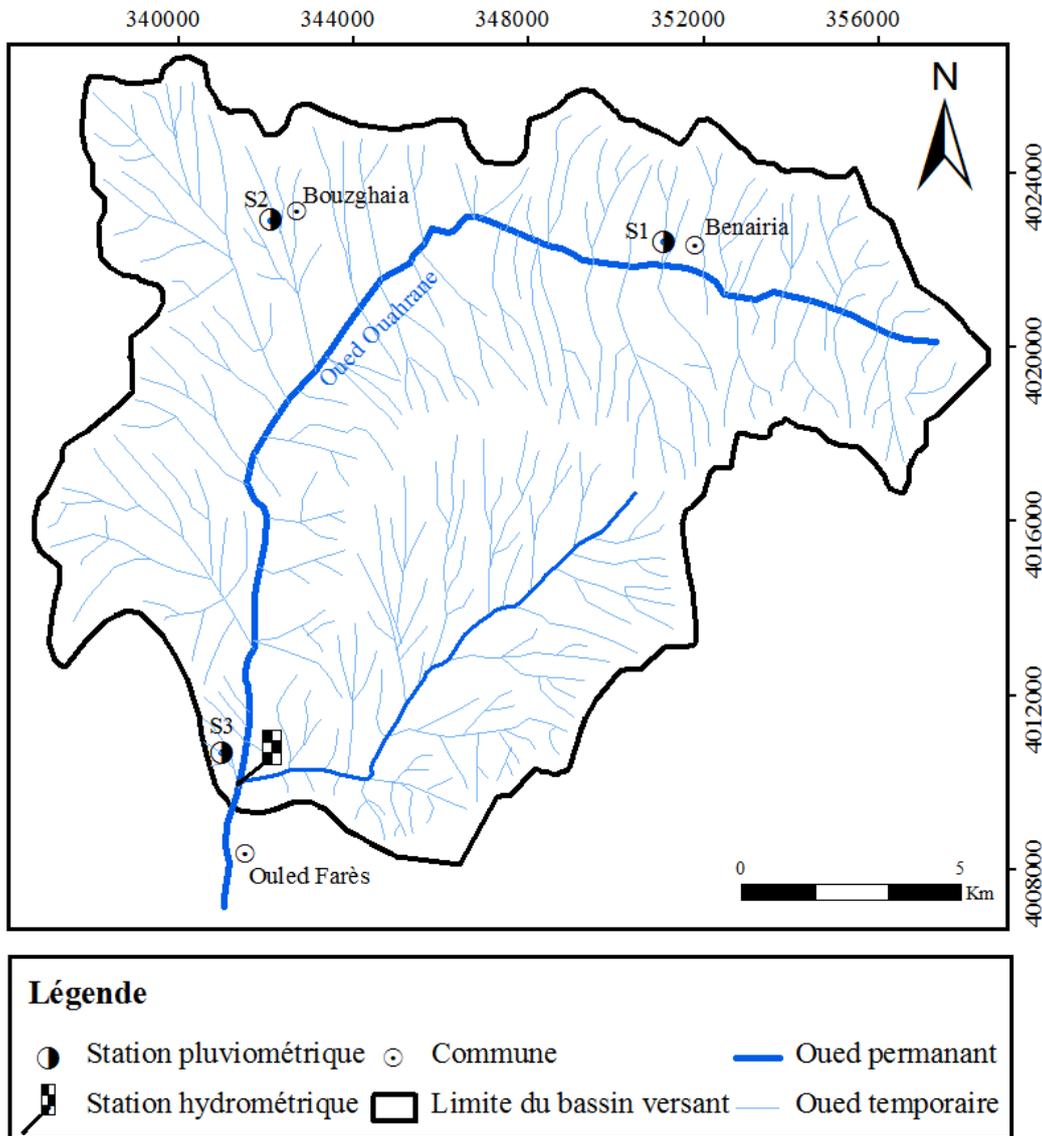


Figure. II.10 : Carte de réseau hydrographique du bassin d'oued Ouahrane.

Sur le plan hydrologique, le régime méditerranéen est calqué sur le régime des précipitations. On a donc hautes eaux de saison froide et de basses eaux de saison chaude. Le rapport entre les hautes eaux et les basses eaux est fort.

Les conditions stratigraphiques, lithologiques, tectoniques et morphométriques d'Oued Ouahrane sont défavorables à la constitution de réserves d'eau souterraine. Cependant quelques formations perméables (alluvions, calcaires et conglomérats) permettent l'infiltration des eaux de surface. En l'absence de véritable nappe, le volume des eaux circulantes stockées dans le sous-sol argilo-marneux est insuffisant pour assurer le soutien de l'étiage. L'Oued Ouahrane tarit donc chaque été.

Chapitre III : Etude de la variabilité du régime pluviométrique dans le bassin de l'oued Ouahrane

III.1. Introduction

La caractérisation des fluctuations du régime pluviométrique repose sur l'analyse statistique des séries chronologiques des pluies dans des sites différents et sur des périodes les plus longues possibles.

Le bassin versant d'Oued Ouahrane est couvert par trois stations pluviométriques aux durées d'observation variables. Le pluviographe de Bénéria et le pluviomètre de Ouled Farès ont été opérationnels à partir de la première moitié des années 70. Le poste de Bouzghaïa ayant démarré à partir de 1995, il résulte qu'en vue d'une meilleure exploitation statistique des données pluviométriques, nous avons considéré uniquement les données des postes de Bénéria et de l'Ouled Farès (tab. III.1).

III.2. Détection de ruptures et étude de tendance au sein des séries pluviométriques

Une « rupture » peut être définie par un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées (Lubés et *al.*, 1994).

Le choix des méthodes retenues repose sur les conclusions d'une étude de simulation de séries aléatoires artificiellement perturbées et ayant fait leurs preuves dans d'autres régions du globe. Elles permettent de détecter un changement dans la moyenne de la variable traitée dans la série (Bonneaud, 1994).

A l'exception de l'approche de Pettitt « elles supposent un non-changement de la variance de la série étudiée ».

Les tests statistiques de Pettitt (1979), de Lee Heghinian(1977), U de Buishand (1984) et la méthode de segmentation de Hubert (1989), permettant de déceler d'éventuels changements dans le régime pluviométrique, sont regroupés dans le logiciel Khronostat

réalisé par l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et l'université de Montpellier (Boyer, 1998).

Tableau III.1 : Stations retenues dans l'étude et leurs caractéristiques (1972-2007)

Station	Code	Longitude (m)	Latitude (m)	Altitude (m)	P (mm)
Bénaïria	01-22-05	378,15	338,40	320	443
Ouled Farès	01-22-01	368,10	326,10	116	353

Afin d'obtenir des séries pluviométriques homogènes (Hiez, 1977), un comblement des lacunes s'est avéré nécessaire. Le comblement des lacunes annuelles, entre stations, a été fait en utilisant la régression linéaire. Par la suite et afin de combler les séries à l'échelle mensuelle, la méthode des rapports (Ghachi, 1986) a été utilisée. Cette dernière se base sur le rapport entre les mois et les années de la station de base et celle à combler.

$$P_{mij2} = P_{mij1} * (P_{ani2} / P_{ani1}) \quad \text{(III-1)}$$

Avec P_{mij2} : Pluie du mois j de l'année i de la station à combler ;

P_{mij1} : Pluie du mois j de l'année i de la station de base ;

P_{ani2} : Pluie de l'année i de la station à combler ;

P_{ani1} : Pluie de l'année i de la station de base.

III.3. Méthodes statistiques de détection de ruptures utilisées

- **Test de Pettitt**

L'approche de Pettitt (1979) est non paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney. L'absence de rupture dans la série (x_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N, les séries chronologiques (x_i) $i = 1$ à t et t + 1 à N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$ définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^N D_j \quad (\text{III-2})$$

Où $D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j)$

avec $\text{sgn}(x) = 1$ si $x > 0$; 0 si $x = 0$ et -1 si $x < 0$.

($x = x_i - x_j$)

Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$.

- **Méthode bayésienne de Lee & Heghinian**

La méthode bayésienne de Lee & Heghinian (Lee et Heghinian, 1977) propose une approche paramétrique.

Elle nécessite une distribution normale des valeurs de la série. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle. Le modèle de base de la procédure est le suivant :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i=1, \dots, T \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & i=T+1, \dots, N \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

Les ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 ; τ et δ représentent respectivement la position dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de moyenne. La méthode établit la distribution de probabilité a posteriori de la position dans le temps d'un changement. Lorsque la distribution est unimodale, la date de la rupture est estimée par le mode avec d'autant plus de précision que la dispersion de la distribution est faible.

- **Statistique U de Buishand**

La procédure de Buishand (1982 ; 1984) fait référence au même modèle et aux mêmes hypothèses que l'approche de Lee et Heghinian.

En supposant une distribution a priori uniforme pour la position du point de rupture t , la statistique de Buishand est définie par : 2

$$U = \frac{\sum_{K=1}^{N-1} \left(\frac{S_K}{D_K} \right)^2}{N(N+1)} \quad \text{(III-4)}$$

Où
$$S_K = \sum_{i=1}^K (x_i - \bar{x}) \quad \text{(III-5)}$$

Pour $k=1, \dots, N$ et D_x désigne l'écart type de la série.

En cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test. Outre cette procédure, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser l'homogénéité de la série de (x_i) . La variable S_k , définie ci-dessus, suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance $[k(N-k)\sigma^2]/N$, $k=0, \dots, N$ sous l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série des (x_i) . Il est donc possible de définir une région de confiance dite ellipse de contrôle associée à un seuil de confiance contenant la série des S_k .

- **Segmentation de Hubert**

Le principe de cette procédure (Hubert et *al.*, 1989) est de « découper » la série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s). Une telle méthode est appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne.

La segmentation est définie de la façon suivante.

Toute séries x_i , $i= i_1, i_2$ avec $i_1 \geq 1$ et $i_2 \leq N$

Où $(i_1 < i_2)$ constitue un segment de la série initiale des (x_i) , $i = 1, \dots, N$.

Toute partition de la série initiale en m segments est une segmentation d'ordre m de cette série. A partir d'une segmentation particulière d'ordre m pratiquée sur la série initiale, on définit :

$$-i_k, k = 1, 2, \dots, m ;$$

$$-N_k = i_k - i_{k-1} .$$

$$x_k = \frac{\sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} x_i}{N_k} \quad (\text{III-6})$$

$$D_m = \sum_{k=1}^{k=m} d_k \quad (\text{III-7})$$

$$d_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} (x_i - \bar{x}_t)^2 \quad (\text{III-8})$$

La segmentation retenue doit être telle que pour un ordre m de segmentation donné, l'écart quadratique D_m soit minimum. Cette condition est nécessaire mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre la contrainte selon laquelle les moyennes de deux segments contigus doivent être significativement différentes.

Cette contrainte est satisfaite par application du test de Scheffé (Dagnélie, 1970).

III.4. Analyse des résultats

L'étude des pluies annuelles aux deux stations a permis de constater une grande variabilité spatiale des moyennes pluviométriques. Bénéaïria reçoit plus de pluie qu'Ouled Farès. A cette échelle, le nombre d'années, où l'écart de pluies moyennes annuelles dépasse 90 mm entre les deux stations (fig.III.1).

L'analyse de l'évolution des valeurs annuelles de la pluie au cours de la période (1972-2007) a révélé les changements suivants :

- Une période de baisse de précipitation observée entre 1979 et 1994,
- Une hausse de précipitation observée au début de la série (1972-1978) et à la fin de la série d'observation entre 1995 et 2006.

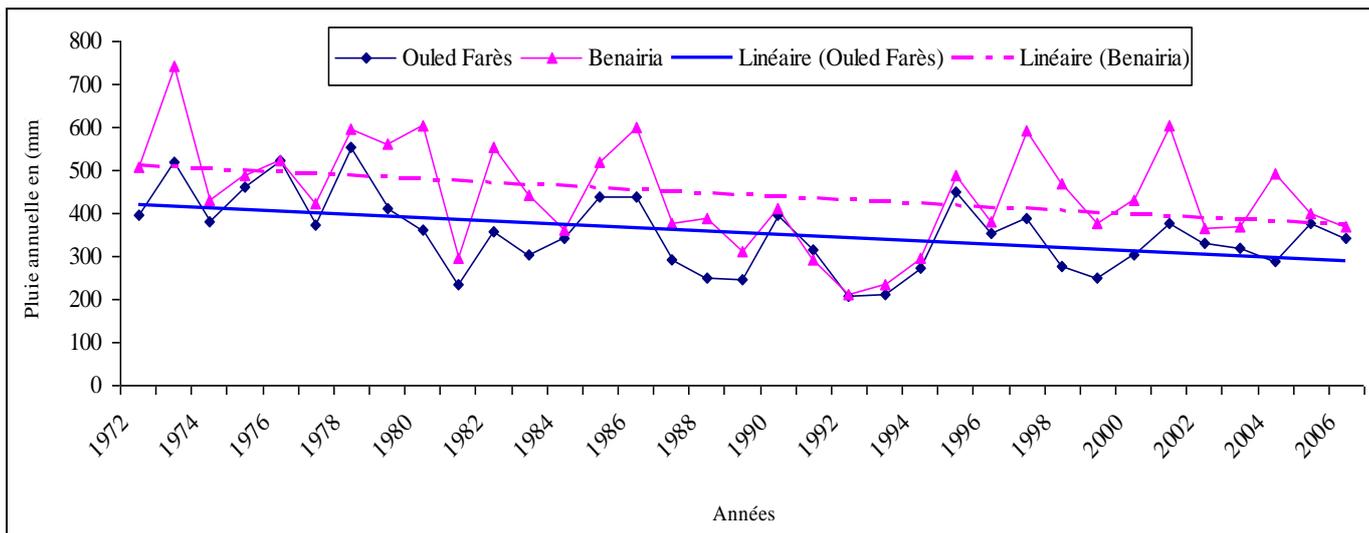


Figure.III.1 : Variabilité des précipitations annuelles et droites linéaires de tendance pour les stations d'Ouled Farès et Bénéâria (1972-2007).

L'irrégularité se traduit non seulement par la variation des hauteurs de pluie, mais aussi par l'existence de périodes de sécheresse consécutives (les années 1979-1985 et 1987 - 1994).

Les conséquences de ces périodes de sécheresse se répercutent particulier sur le milieu. Les sols desséchés sont facilement emportés par le ruissellement qui se forme dès les premières pluies.

Tableau III. 2: Les résultats des tests et la différence en % des moyennes de la pluviométrie annuelle pendant la période d'étude (1972-2007).

Stations	Test Buishand	Test Pettitt	Méthode Lee-Heghinian	Test Hubert	Moyenne avant Rupture	Moyenne après Rupture	Différence (%)
Bénéâria	R	1986	1980	1986	510,2	393	23
O. Farès	R	1986	1979	1979	452,75	323,40	29

A: hypothèse nulle (Absence de rupture dans la série chronologique) acceptée;

R: hypothèse nulle rejetée.

Au niveau de la série hydrologique de l'Ouled Farès, la méthode bayésienne de Lee et Heghinian (1977) signale une rupture en 1979 alors que cette méthode signale une rupture en 1980 pour la série de Bénéâria. De même, une rupture très significative a été détectée 1979 au niveau de la série du Ouled Farès et en 1986 pour la série de Bénéâria par le test de Hubert. Ce niveau de signification associé à la rupture traduit l'importance du changement sur la moyenne au sein de la série.

Les différences entre les moyennes établies avant et après rupture indiquent une diminution des précipitations et des écoulements. Elle est comprise entre 23% et 29% pour les séries pluviométriques (tab. III.2).

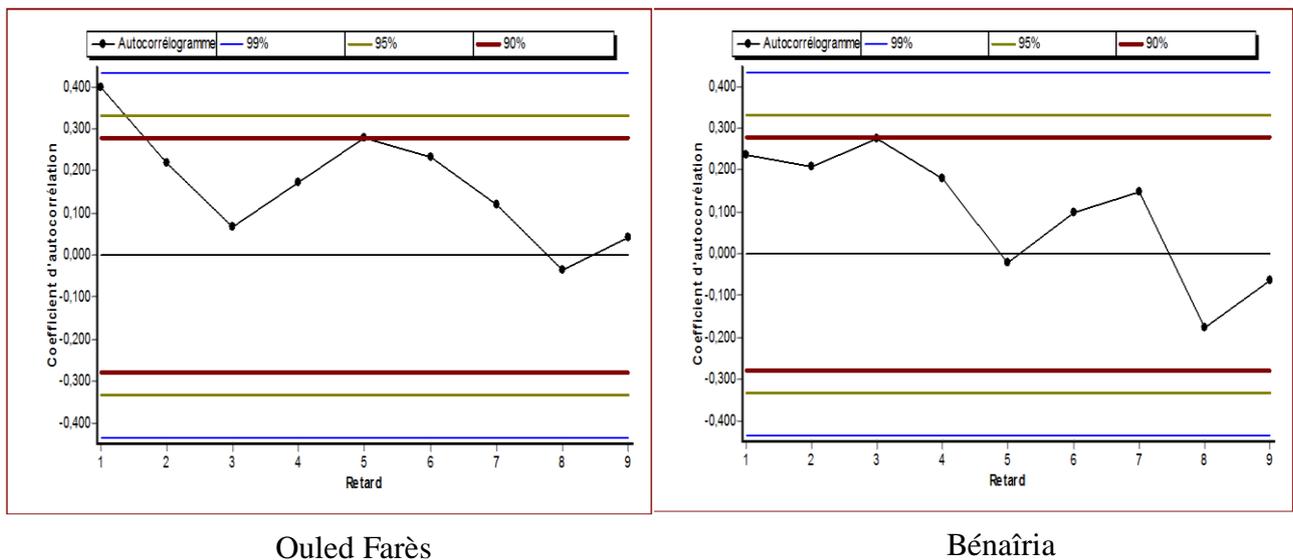


Figure .III.2 : Calcul de l'autocorrélogramme et de son intervalle de confiance pour la station d'Ouled Farès et la station de Bénéâria.

La figure III.2 présente la vérification du caractère aléatoire de la série pluviométrique de la station d'Ouled Farès et la station de Bénéâria. Il n'existe pas de dépendances significatives entre les termes successifs de ces séries ; de même la fonction décroît rapidement vers la valeur nulle.

La figure III.3 montre la fonction du test de Buishand et ellipse de Bois et son intervalle de confiance pour la station d'Ouled Farès et la station de Bénéâria. Le résultat confirme que le caractère « aléatoire » détecté précédemment correspond à une grande variabilité de la pluviométrie annuelle, caractérisée par une « rupture » dans la série pour un

intervalle de confiance 95 %, c'est-à-dire un changement de moyenne de part et d'autre de la date de cette rupture ; en revanche, pour un intervalle de confiance de 99 % la rupture est acceptée pour la station d'Ouled Farès.

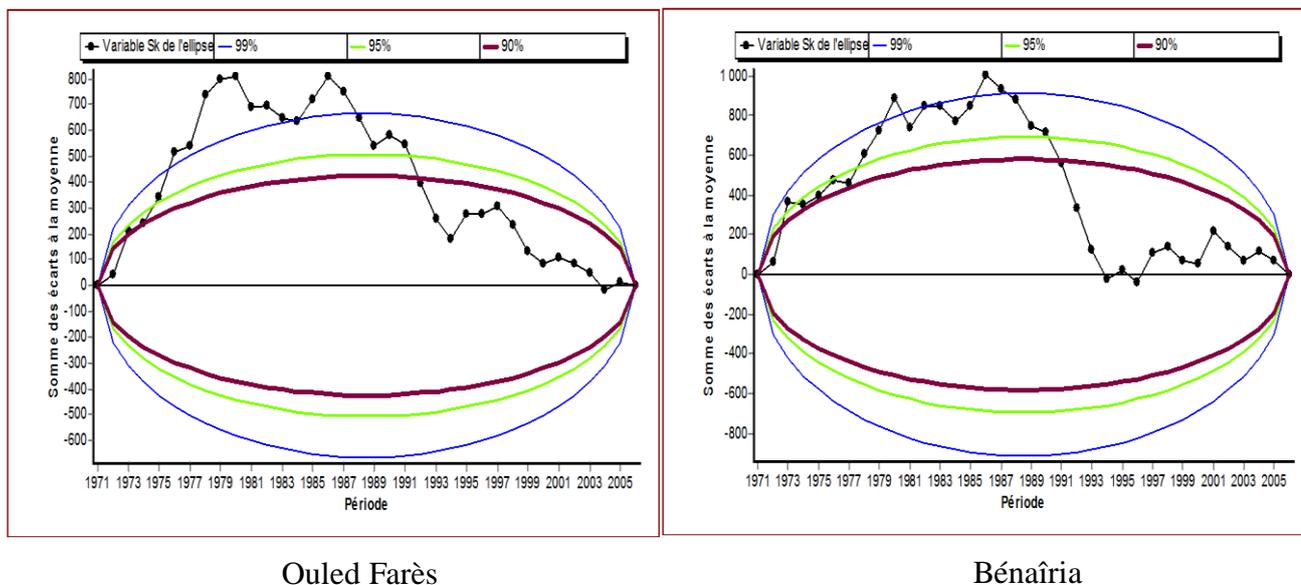


Figure.III. 3 : Test de Buishand et ellipse de Bois et son intervalle de confiance pour la station d'Ouled Farès et la station de Bénéâria.

III.5. Discussion et conclusion

Les dates de rupture obtenues pour les séries pluviométriques sont comprises entre 1979 et 1986 quelle que soit la méthode utilisée. Ces années s'insèrent dans la période de rupture de la plupart des stations pluviométriques du Chélif, à savoir 1979-1980 (Amrani, 2011).

Les déficits pluviométriques enregistrés au niveau des stations énumérées plus haut varient entre 23 et 29 %. Ils sont du même ordre que ceux obtenus par Amrani, (2011) qui tournent autour de 26,9 % et peuvent dépasser 39,45 %.

Ces résultats confirment ainsi l'apparition au Maroc d'un déficit pluviométrique à partir de 1970 et la poursuite de celui-ci durant la décennie 1980-1990, épisode de sécheresse extrêmement sévère et long. A l'échelle de l'Afrique du Nord, les résultats obtenus par Meddi et *al.*, (2009) en Algérie qui montrent une baisse des précipitations annuelles qui

Chapitre III : Etude de la variabilité du régime pluviométrique dans le bassin de l'oued Ouahrane

dépasse 36 % dans la région de Mascara et dans l'extrême Ouest, et par Sebbar et *al.*,(2011), signalent la même période de rupture et montrent l'extension spatiale de la sécheresse accompagnée d'une nette réduction pluviométrique. Cette concordance des dates de rupture montre que le régime des cours d'eau est fortement lié à celui des précipitations.

Chapitre IV : Présentation et mise en forme des données

IV.1. Collecte et mise en forme des données

La collecte et la mise en forme des données, constitue la phase initiale de toute étude statistique. Duband., (1989), affirme sans exagération que celle représente 30 à 50 % du travail. Ambroise., (1998) montre que l'application de tout modèle mathématique suppose au préalable la connaissance des données nécessaires à son élaboration.

IV.1.1. Collecte des données

Cette étape, est très fastidieuse, et très importante, car la fiabilité de tout modèle est subordonnée à la qualité de l'information en notre possession.

Ainsi, la collecte des données brutes recueillies auprès des services de l'**A.N.R.H** (de Blida et Chlef) a constitué l'étape la plus longue et la plus délicate pour la mise en forme.

IV.1.1.1. Méthode de mesure

Le prélèvement des échantillons de transport solide en suspension ainsi que la lecture des hauteurs d'eau au niveau de la station hydrométrique ont été réalisés par les services de l'agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH). Les débits sont calculés de deux façons à l'aide de la courbe de tarage adéquate (régulièrement contrôlée et actualisée), soit à partir des hauteurs d'eau lues sur une échelle limnimétrique soit à partir du dépouillement des hauteurs d'eau enregistrées par un limnigraphe à flotteur. Pour la mesure de concentration en sédiments en suspension, à chaque mesure de débit, on prélève au moyen d'un flacon de 50 cl un échantillon d'eau turbide sur la rive à la surface de l'oued. Les sédiments recueillis sur papier filtre sont ensuite séchés à l'étuve pendant 30 min à une température de 105°C. Le filtre utilisé pour les mesures de transports solides en suspension est un filtre Laurent (Φ : 32 cm) sans pores avec une filtration moyenne. Ainsi, la charge solide mesurée représente les éléments fins et très fins véhiculés en suspension par les oueds. Elle est mesurée selon la formule suivante:

$$\text{La concentration ou la turbidité (g/l)} = 1000 (P2 - P1) / V \quad (\text{IV-1})$$

D'où :

P1: le poids du papier-filtre sec et vide évalué en grammes avant la pesée de l'échantillon.

P2 : le poids du papier-filtre avec les sédiments en suspension évalué en grammes.

V : le volume de l'échantillon.

Ramenée à l'unité de volume (1 litre, L), cette charge est attribuée à la concentration en suspension véhiculée par le cours d'eau et ses affluents en g/L.

La cadence de prise des mesures varie selon l'ampleur de l'événement. En période de crue, les prises sont intensifiées jusqu'à des intervalles de temps d'une heure ou même 30 min en fonction de la vitesse de l'augmentation des débits liquides. En période d'écoulement normal ou en période d'étiage, on se contente d'une prise quotidienne effectuée généralement à 12 h.

Ce mode de détermination de la concentration affecte durement sa représentativité car il ne tient pas compte des variations de la teneur en suspension d'un point à l'autre dans la section mouillée ni le long d'une verticale (Touat, 1989). En conséquence, l'estimation des apports solides est de loin inférieure à l'ensemble du flux des sédiments en suspension produits par la dynamique érosive régissant le bassin versant étudié.

Les transports solides spécifiques sont évalués par le rapport des apports solides à la superficie totale du bassin versant. Ils sont calculés par:

$$Ass = As / S \quad (\text{IV- 2})$$

Où Ass est l'apport solide spécifique ou dégradation spécifique ($t \text{ km}^{-2} \text{ an}^{-1}$), As est l'apport solide ($10^6 t$), et S est la superficie du bassin versant (km^2).

Ces données disponibles qui consiste à établir des fichiers de :

- Débits liquides instantanés (m^3 / s) : A partir de la confrontation entre les hauteurs d'eau disponible avec la courbe de tarage, $Q = f(H)$;

- Concentration C en (g/l) : Obtenue à partir des fiches d'analyse des eaux;
- Débits solides instantanés (Kg / s);
- Débits moyens journaliers (m^3 / s), à partir des annuaires.

Il est essentiel de collecter un nombre suffisant de données fiables afin de rechercher un modèle en vue de le caler pour estimer correctement les apports solides.

Les données d'observations sont mises sous forme d'un fichier contenant : le numéro de l'observation, la date, l'heure, la hauteur d'eau, la concentration, le débit liquide et le débit solide observé sur une période d'observation allant de 1972/73 à 2006/2007. Il s'agit de la station de Larbâa de Ouled Farès sur l'Oued Ouahrane.

Les années (76/77), (90/91), (95 à 97), (98 à 01) et (04 à 06) ne sont pas observées à cause de :

- Véhicule en panne ;
- Manque de filtre ;
- Etuve en panne ;
- Et parfois l'observateur en congé.

Tableau IV.1 : Nombre de valeurs observées pour la station par année et par mois.

Echelle Temporelle	Oued Ouahrane	Echelle Temporelle	Oued Ouahrane
Totalité des valeurs observées	4464	1995/1996	**
1972/1973	276	1996/1997	**
1973/1974	397	1997/1998	01
1974/1975	363	1998/1999	**
1975/1976	323	1999/2000	**
1976/1977	140	2000/2001	**
1977/1978	**	2001/2002	77
1978/1979	212	2002/2003	20
1979/1980	270	2003/2004	19
1980/1981	167	2004/2005	**
1981/1982	140	2005/2006	**
1982/1983	225	2006/2007	166
1983/1984	116	Septembre	272
1984/1985	195	Octobre	411
1985/1986	301	Novembre	473
1986/1987	345	Décembre	515
1987/1988	269	Janvier	554
1988/1989	112	Février	571
1989/1990	58	Mars	530
1990/1991	**	Avril	442
1991/1992	37	Mai	294
1992/1993	94	Juin	166
1993/1994	17	Juillet	148
1994/1995	124	Août	88

** : Année non observée.

IV.1.2. Mise en forme et traitement des données

L'homogénéisation des données consiste à déterminer des relations régressives entre deux paramètres mesurés, permettant ainsi de combler les lacunes et d'étendre les séries à partir des séries de données existantes. Avant la recherche d'un modèle régressif quelconque, les données sont mises en graphe, l'allure de ce dernier peut justifier l'existence d'une relation mathématique et orienter le choix du modèle. Cinq modèles régressifs sont utilisés : le modèle linéaire, logarithmique, parabolique, puissance et exponentiel.

Pour homogénéiser les séries du transport solide en suspension. Plusieurs approches de traitement sont tentées, le but de trouver un modèle mathématique pouvant expliquer la relation débit liquide - débit solide à savoir :

1ère approche : Débit liquide instantané ($Q_{l_{inst}}$) et débit solide instantané ($Q_{s_{inst}}$). Ce travail est effectué sur différentes échelles temporelles (annuelle, mensuelle, saisonnière, saison humide, saison sèche, année humide et année sèche).

2ème approche : Débit liquide moyen journalier (annuaire) - débits solide moyen journalier observé. Ce travail est effectué à l'échelle annuelle.

IV.1.2.1. Estimation des apports solides par régression

L'approche méthodologique adoptée consiste à développer un modèle de régression qui permet d'évaluer les valeurs journalières du débit solide à partir des valeurs du débit liquide observées.

Après plusieurs essais sur différents types d'ajustement, en se basant sur le coefficient de détermination r^2 (Dagnellie, 1992), le modèle puissance ($Q_s = a Q_l^b$) offre le meilleur ajustement avec 62% de contribution. Le modèle retenu a permis de calculer les apports solides et l'érosion spécifique pour la station hydrométrique d'Ouled Farès.

IV. 1.2.2. Relation : Débit liquide instantané – Débit solide instantané (1^{ère} approche)

IV.1.2.2.1. Ensemble des données (Relation interannuelle)

Ce traitement a porté sur la station hydrométrique de Larbâa.

Les couples ($Q_{l_{inst}}$, $Q_{s_{inst}}$) sont mis en graphe (Fig.1). Ce dernier montre une légère dispersion. Les calculs de la régression sous différentes formes ont permis de conclure que la forme puissance est la plus acceptable, car elle présente le meilleur coefficient de détermination « R^2 » (tableau IV.2).

Tableau IV.2 : Valeurs de R^2 calculées à l'échelle interannuelle.

Echelle Temporelle	Type du modèle	Oued Ouahrane
Relations Interannuelles	Linéaire	0,77
	Logarithmique	0,16
	Parabolique	0,77
	Puissance	0,87
	Exponentiel	0,21

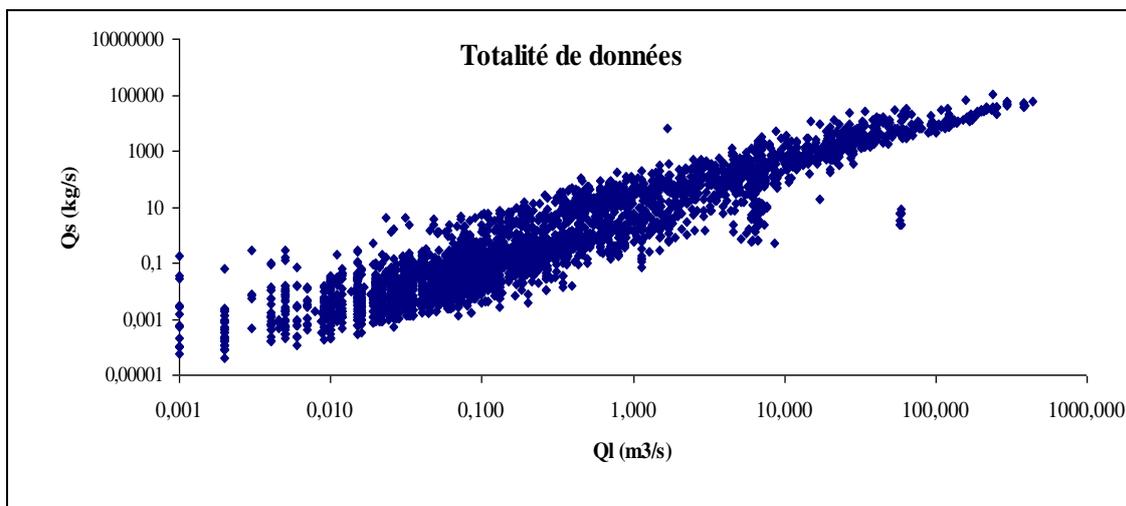


Figure IV.1 .Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé (totalité des données) (1972-2007).

IV.1.2.2.2. Données partielles

Nous montrons ici, les graphes des relations obtenues à la station de Larbâa.

- ***Relation annuelle***

Pour ce la, nous avons représenté les données graphiquement année par année, montrant ainsi la forme que pourrait avoir les relations $Q_s = f(Ql)$ pour chaque année.

De la même manière, l'analyse de la régression sous différentes formes, montre que le modèle puissance est toujours acceptable, les résultats de cette analyse sont présentés sur le tableau IV.3. La figure IV.2 montre ces relations annuelles à la station de Larbâa.

Les résultats de calcul de la régression sont donnés dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Valeurs de R² calculées à l'échelle annuelle.

Echelle Temporelle	Type du modèle	Larbâa (Ouled Farès)	Echelle Temporelle	Type du modèle	Larbâa (Ouled Farès)
72/73	Linéaire	0,83	90/91	Linéaire	**
	Logarithmique	0,15		Logarithmique	
	Parabolique	0,95		Parabolique	
	Puissance	0,94		puissance	
	Exponentiel	0,36		Exponentiel	
73/74	Linéaire	0,87	91/92	Linéaire	0,98
	Logarithmique	0,29		Logarithmique	0,48
	Parabolique	0,88		Parabolique	0,98
	Puissance	0,91		puissance	0,92
	Exponentiel	0,35		Exponentiel	0,52
74/75	Linéaire	0,68	92/93	Linéaire	0,96
	Logarithmique	0,20		Logarithmique	0,32
	Parabolique	0,68		Parabolique	0,99
	Puissance	0,86		puissance	0,80
	Exponentiel	0,40		Exponentiel	0,31
75/76	Linéaire	0,91	93/94	Linéaire	0,98
	Logarithmique	0,28		Logarithmique	0,49
	Parabolique	0,92		Parabolique	0,98
	Puissance	0,94		puissance	0,98
	Exponentiel	0,30		Exponentiel	0,49
76/77	Linéaire	0,93	94/95	Linéaire	0,63
	Logarithmique	0,29		Logarithmique	0,43
	Parabolique	0,98		Parabolique	0,77
	Puissance	0,91		puissance	0,54
	Exponentiel	0,42		Exponentiel	0,46
77/78	Linéaire	**	95/96	Linéaire	**
	Logarithmique			Logarithmique	
	Parabolique			Parabolique	

	Puissance			puissance	
	Exponentiel			Exponentiel	
78/79	Linéaire	0,92	96/97	Linéaire	**
	Logarithmique	0,45		Logarithmique	
	Parabolique	0,93		Parabolique	
	Puissance	0,96		puissance	
	Exponentiel	0,54		Exponentiel	
79/80	Linéaire	0,26	97/98	Linéaire	**
	Logarithmique	0,12		Logarithmique	
	Parabolique	0,27		Parabolique	
	Puissance	0,75		puissance	
	Exponentiel	0,32		Exponentiel	
80/81	Linéaire	0,71	98/99	Linéaire	**
	Logarithmique	0,29		Logarithmique	
	Parabolique	0,78		Parabolique	
	Puissance	0,85		puissance	
	Exponentiel	0,53		Exponentiel	
81/82	Linéaire	0,56	99/00	Linéaire	**
	Logarithmique	0,23		Logarithmique	
	Parabolique	0,57		Parabolique	
	Puissance	0,85		puissance	
	Exponentiel	0,51		Exponentiel	
82/83	Linéaire	0,01	00/01	Linéaire	**
	Logarithmique	0,17		Logarithmique	
	Parabolique	0,41		Parabolique	
	Puissance	0,69		puissance	
	Exponentiel	0,08		Exponentiel	
83/84	Linéaire	0,86	01/02	Linéaire	0,69
	Logarithmique	0,35		Logarithmique	0,54
	Parabolique	0,98		Parabolique	0,74
	Puissance	0,88		puissance	0,79
	Exponentiel	0,40		Exponentiel	0,34

84/85	Linéaire	0,44	02/03	Linéaire	0,17
	Logarithmique	0,18		Logarithmique	0,20
	Parabolique	0,45		Parabolique	0,44
	Puissance	0,84		puissance	0,70
	Exponentiel	0,67		Exponentiel	0,37
85/86	Linéaire	0,75	03/04	Linéaire	**
	Logarithmique	0,38		Logarithmique	
	Parabolique	0,79		Parabolique	
	Puissance	0,83		puissance	
	Exponentiel	0,63		Exponentiel	
86/87	Linéaire	0,67	04/05	Linéaire	**
	Logarithmique	0,18		Logarithmique	
	Parabolique	0,76		Parabolique	
	Puissance	0,94		puissance	
	Exponentiel	0,47		Exponentiel	
87/88	Linéaire	0,81	05/06	Linéaire	**
	Logarithmique	0,15		Logarithmique	
	Parabolique	0,96		Parabolique	
	Puissance	0,81		puissance	
	Exponentiel	0,34		Exponentiel	
88/89	Linéaire	0,97	06/07	Linéaire	0,70
	Logarithmique	0,68		Logarithmique	0,28
	Parabolique	0,97		Parabolique	0,72
	Puissance	0,97		puissance	0,87
	Exponentiel	0,71		Exponentiel	0,44
89/90	Linéaire	0,78			
	Logarithmique	0,27			
	Parabolique	0,98			
	Puissance	0,87			
	Exponentiel	0,62			

** : Année non observée.

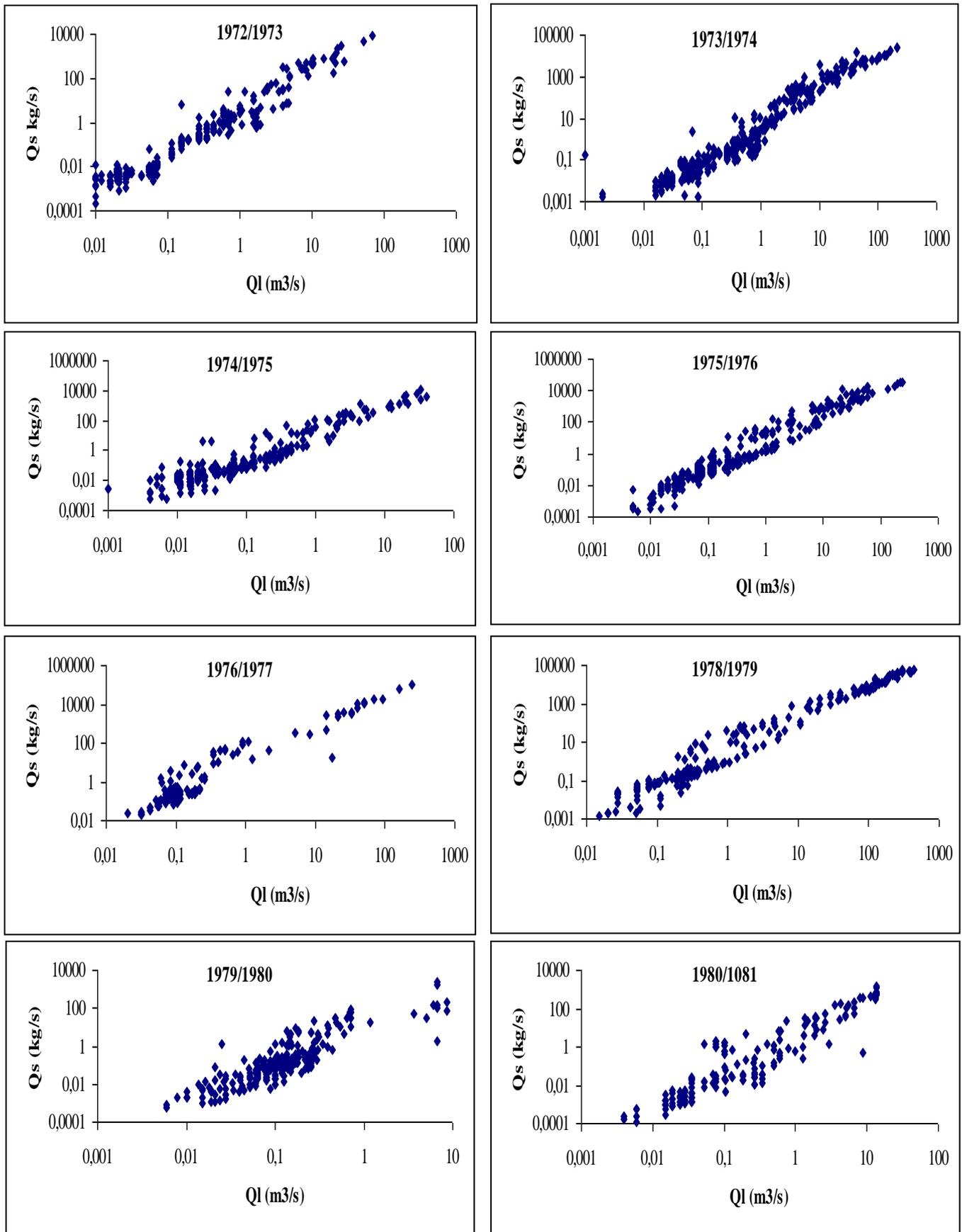


Figure IV.2. Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé à l'échelle annuelle (1972-2007).

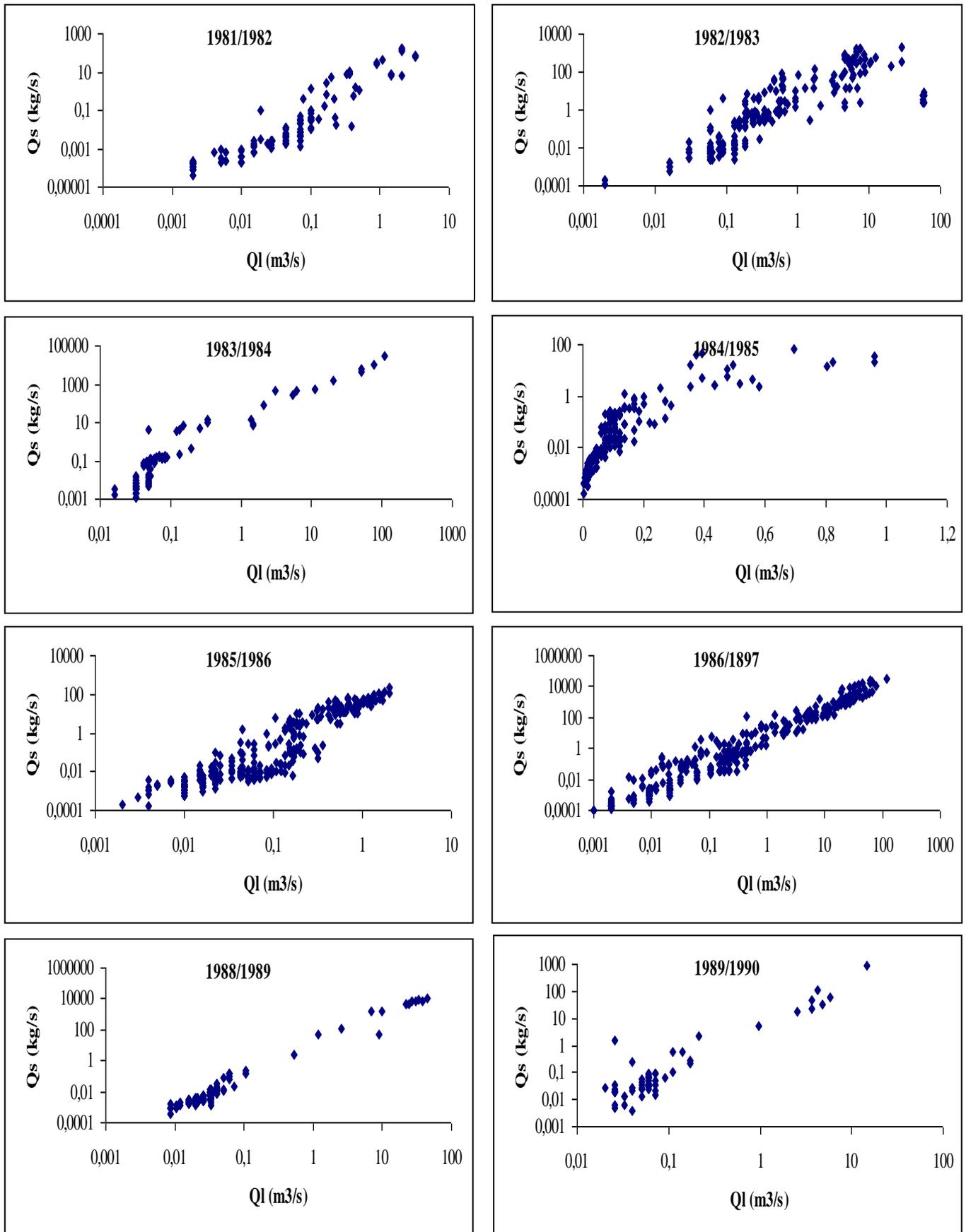


Figure IV.2. Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé à l'échelle annuelle (1972-2007). (Suite).

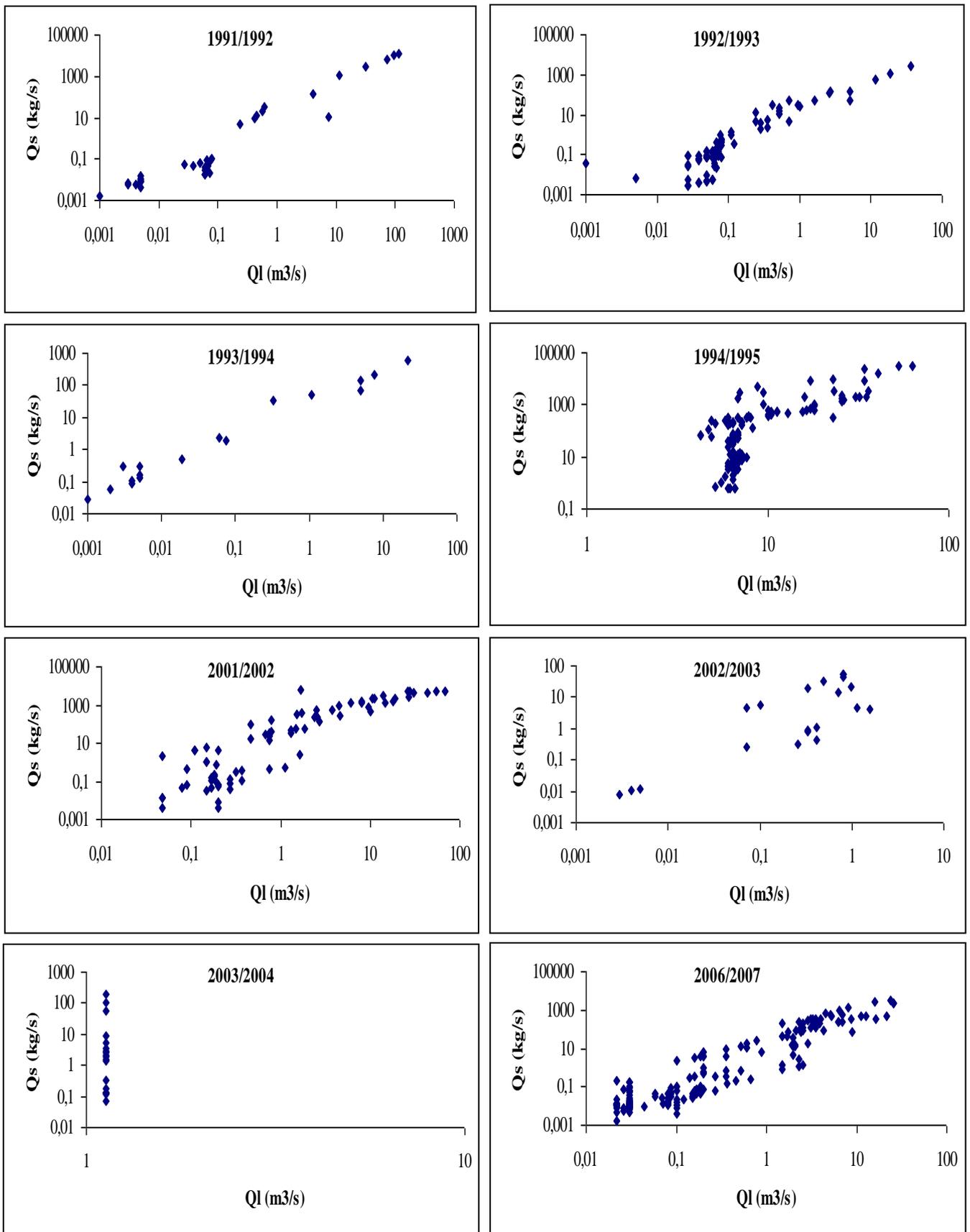


Figure IV.2. Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé à l'échelle annuelle (1972-2007). (Fin).

- *Relation mensuelle*

Une autre tentative de traitement, serait un traitement par mois, Au niveau mensuel les corrélations sont meilleures, car la variation du transport solide au cours d'un mois n'est pas importante par rapport à la variation du transport solide lors de l'année, Le modèle puissance est maintenu dans tous les cas (meilleur coefficient de détermination). Les figures IV.3 illustrent ces relations à la station de Larbâa. Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4: Valeurs de R² calculées à l'échelle mensuelle.

Echelle Temporelle	Type du modèle	Larbâa (Ouled Farès)	Echelle Temporelle	Type du modèle	Larbâa (Ouled Farès)
Septembre	Linéaire	0,97	Mars	Linéaire	0,95
	Logarithmique	0,19		Logarithmique	0,27
	Parabolique	0,99		Parabolique	0,97
	Puissance	0,87		Puissance	0,84
	Exponentiel	0,24		Exponentiel	0,32
Octobre	Linéaire	0,78	Avril	Linéaire	0,69
	Logarithmique	0,38		Logarithmique	0,20
	Parabolique	0,78		Parabolique	0,71
	Puissance	0,89		Puissance	0,90
	Exponentiel	0,46		Exponentiel	0,40
Novembre	Linéaire	0,74	Mai	Linéaire	0,97
	Logarithmique	0,19		Logarithmique	0,21
	Parabolique	0,80		Parabolique	0,98
	Puissance	0,88		Puissance	0,80
	Exponentiel	0,29		Exponentiel	0,26
Décembre	Linéaire	0,70	Juin	Linéaire	0,08
	Logarithmique	0,23		Logarithmique	0,05
	Parabolique	0,78		Parabolique	0,08
	Puissance	0,86		Puissance	0,76
	Exponentiel	0,47		Exponentiel	0,44

Janvier	Linéaire	0,19	Juillet	Linéaire	0,35
	Logarithmique	0,20		Logarithmique	0,29
	Parabolique	0,59		Parabolique	0,35
	Puissance	0,71		Puissance	0,45
	Exponentiel	0,18		Exponentiel	0,35
Février	Linéaire	0,91	Aout	Linéaire	0,21
	Logarithmique	0,27		Logarithmique	0,28
	Parabolique	0,95		Parabolique	0,46
	Puissance	0,88		Puissance	0,60
	Exponentiel	0,32		Exponentiel	0,17

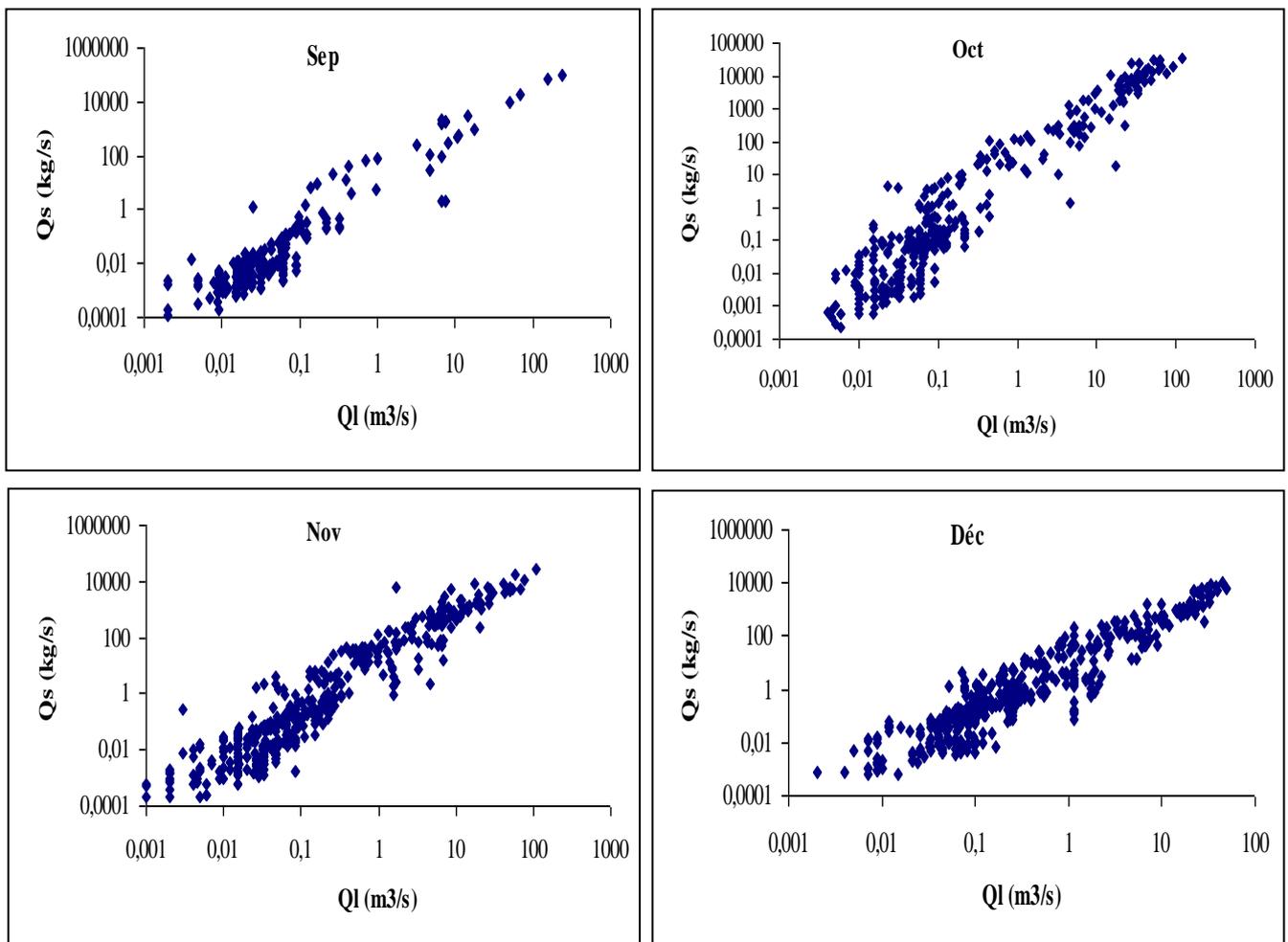


Figure IV.3. Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé à l'échelle mensuelle (1972-2007).

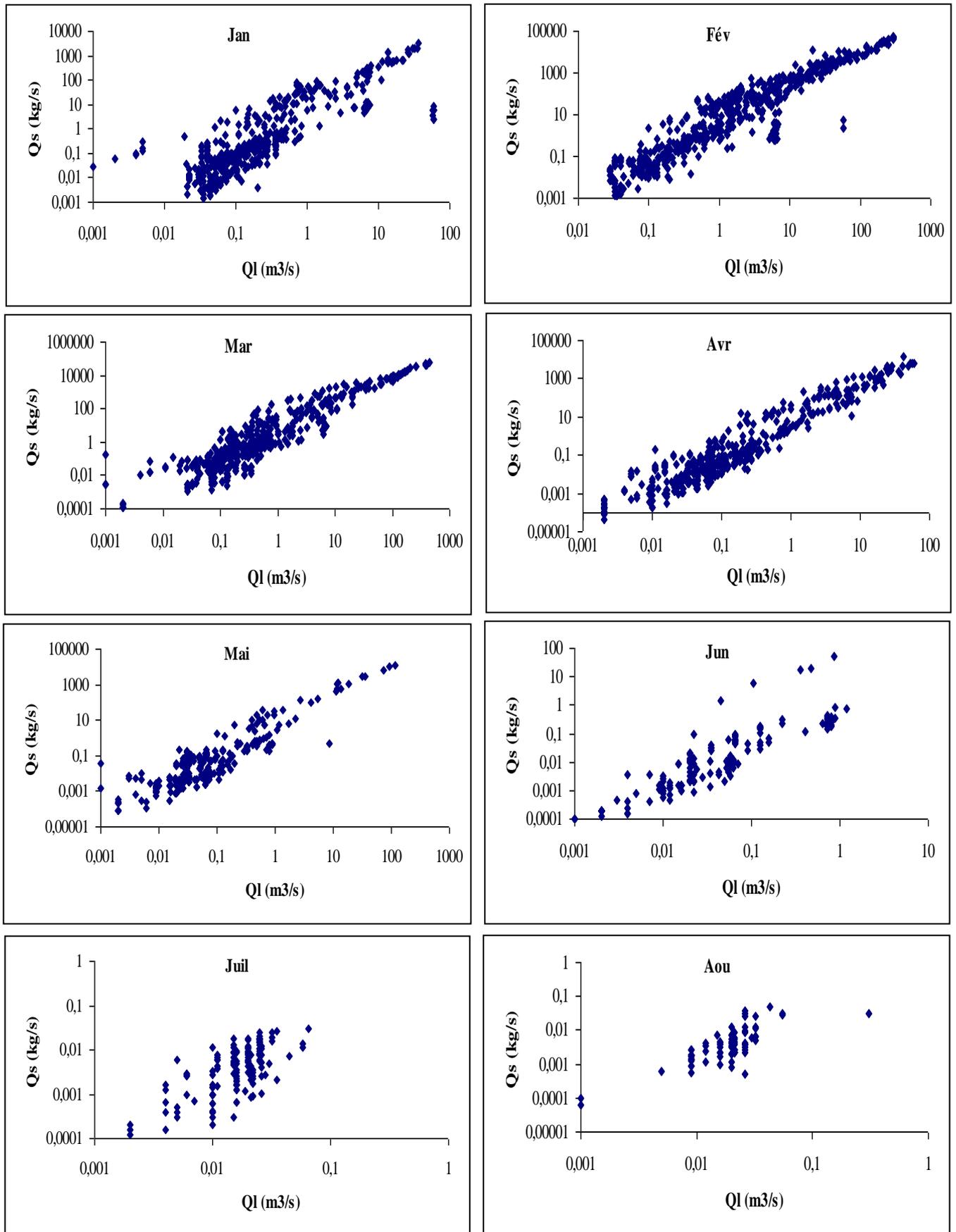


Figure IV.3. Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé à l'échelle mensuelle (1972-2007). (Suite)

• *Relation Saisonnière*

Les données observées sont regroupées en quatre saisons :

- Automne : septembre, octobre et novembre;
- Hiver : décembre, janvier et février ;
- Printemps : mars, avril et mai;
- Eté : juin, juillet et août.

Nous avons suivi le même raisonnement à cette échelle, Afin de remarqué l’effet de l’irrégularité climatique sur le transport solide (Fig. IV.4). L’analyse de la régression montre que le modèle puissance est maintenu (tableau IV.5). La variation des coefficients de corrélation d’une saison à une autre montre l’effet de cette irrégularité climatique sur le transport solide.

Tableau IV.5 : Valeurs de R² calculées à l’échelle saisonnière.

Echelle Temporelle	Type du modèle	Larbâa (Ouled Farès)	Echelle Temporelle	Type du modèle	Larbâa (Ouled Farès)
Automne	Linéaire	0,83	Printemps	Linéaire	0,94
	Logarithmique	0,17		Logarithmique	0,18
	Parabolique	0,89		Parabolique	0,96
	Puissance	0,89		puissance	0,87
	Exponentiel	0,29		Exponentiel	0,21
Hiver	Linéaire	0,89	Eté	Linéaire	0,09
	Logarithmique	0,18		Logarithmique	0,05
	Parabolique	0,94		Parabolique	0,09
	Puissance	0,84		puissance	0,72
	Exponentiel	0,24		Exponentiel	0,40

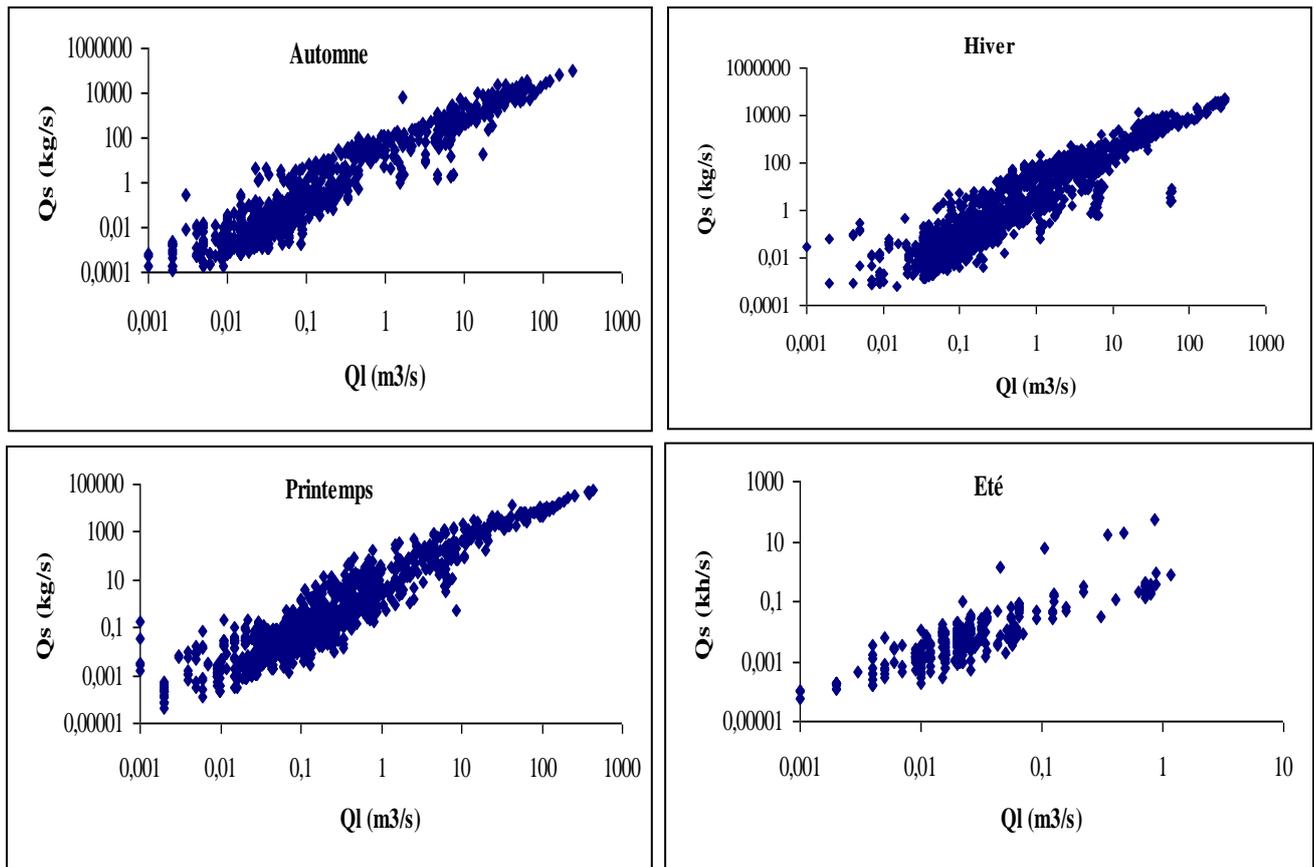


Figure IV.4 .Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé à l'échelle saisonnière (1972-2007).

- *Saison Humide - Saison Sèche*

Cette fois, nous allons diviser les données observées de chaque station en deux grandes saisons, une humide et l'autre sèche. La figure IV.5 et montre ces relations à la station de Larbâa. L'analyse de la régression montre toujours que le modèle puissance est meilleur (tableau IV.6). Les résultats de ce traitement sont reportés sur le tableau IV.6.

Tableau IV.6 : Valeurs de R² calculées pour la saison humide et la saison sèche.

Echelle Temporelle	Type du modèle	Larbâa (Ouled Farès)
Saison humide	Linéaire	0,74
	Logarithmique	0,16
	Parabolique	0,75
	Puissance	0,86
	Exponentiel	0,22
Saison sèche	Linéaire	0,94
	Logarithmique	0,16
	Parabolique	0,96
	puissance	0,88
	Exponentiel	0,20

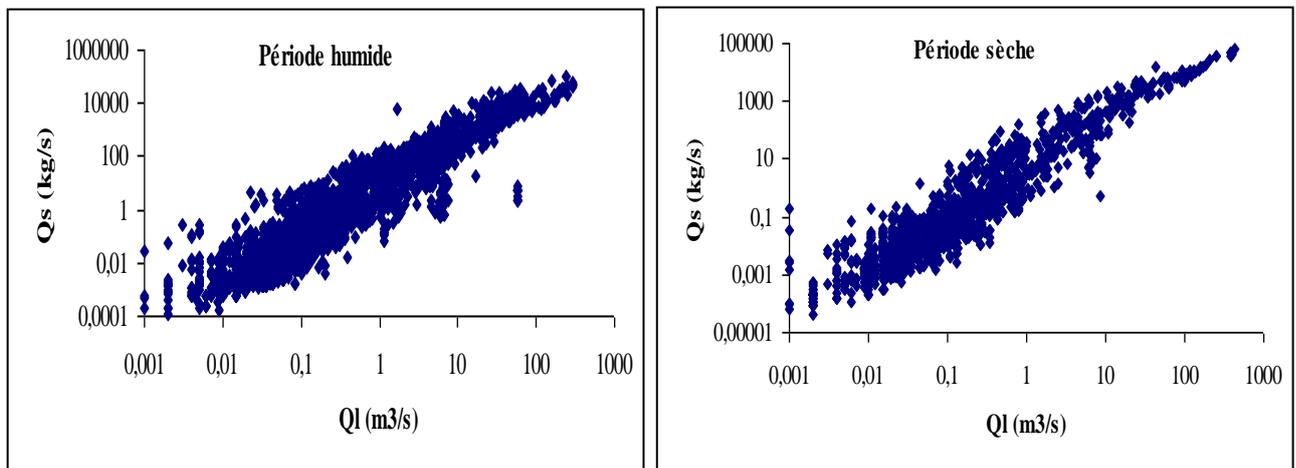


Figure IV. 5. Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé pour la saison humide et la saison sèche (1972-2007).

• *Année Humide – Année Sèche*

Cette fois, nous allons diviser les données observées de chaque station en deux années, une humide et l'autre sèche. La figure IV.6 montre ces relations à la station de Larbâa. L'analyse de la régression montre toujours que le modèle puissance est meilleur (tableau IV.7). Les résultats de ce traitement sont reportés sur le tableau IV.7.

Tableau IV.7 : Valeurs de R² calculées pour l'année humide et l'année sèche.

Echelle Temporelle	Type du modèle	Larbâa (Ouled Farès)
Année humide	Linéaire	0,86
	Logarithmique	0,22
	Parabolique	0,87
	puissance	0,92
	Exponentiel	0,27
Année sèche	Linéaire	0,63
	Logarithmique	0,07
	Parabolique	0,86
	puissance	0,81
	Exponentiel	0,17

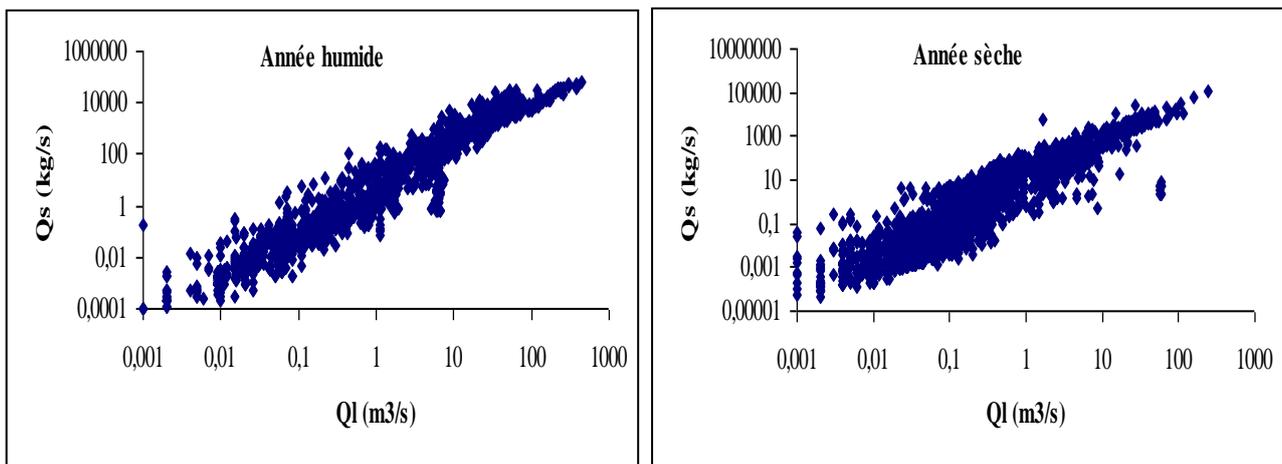


Figure IV.6. Relation débit solide instantané /débit liquide instantané observé pour l'année humide et l'année sèche (1972-2007).

Les formules des modèles retenus sont présentées dans le tableau IV.8.

Tableau IV.8 : Formules des modèles calculés pour différentes échelles temporelles.

Echelle Temporelle	Larbâa (Ouled Farès)	Echelle Temporelle	Larbâa (Ouled Farès)
Totalité des données	$Q_s = 4,9453 \cdot QI^{1,6945}$	1997/98	**
1972/73	$Q_s = 2,7224 \cdot QI^{1,8093}$	1998/99	**
1973/74	$Q_s = 3,7532 \cdot QI^{1,7177}$	1999/00	**
1974/75	$Q_s = 8,6517 \cdot QI^{1,574}$	2000/01	**
1975/76	$Q_s = 5,8357 \cdot QI^{1,7436}$	2001/02	$Q_s = 11,454 \cdot QI^{1,9736}$
1976/77	$Q_s = 13,843 \cdot QI^{1,7169}$	2002/03	$Q_s = 13,78 \cdot QI^{1,2508}$
1977/78	**	2003/04	**
1978/79	$Q_s = 3,3522 \cdot QI^{1,6969}$	2004/05	**
1979/80	$Q_s = 7,7238 \cdot QI^{1,8815}$	2005/06	**
1980/81	$Q_s = 2,8104 \cdot QI^{1,8405}$	2006/07	$Q_s = 7,2411 \cdot QI^{1,8378}$
1981/82	$Q_s = 3,6033 \cdot QI^{1,8608}$	Septembre	$Q_s = 5,9218 \cdot QI^{1,8186}$
1982/83	$Q_s = 2,0375 \cdot QI^{1,6078}$	Octobre	$Q_s = 12,153 \cdot QI^{1,8531}$
1983/84	$Q_s = 8,9118 \cdot QI^{2,0077}$	Novembre	$Q_s = 11,514 \cdot QI^{1,7483}$
1984/85	$Q_s = 12,167 \cdot QI^{2,2684}$	Décembre	$Q_s = 6,1396 \cdot QI^{1,6904}$
1985/86	$Q_s = 22,73 \cdot QI^{2,1391}$	Janvier	$Q_s = 2,6222 \cdot QI^{1,4165}$
1986/87	$Q_s = 6,4343 \cdot QI^{1,6909}$	Février	$Q_s = 3,8024 \cdot QI^{1,7394}$
1987/88	$Q_s = 13,028 \cdot QI^{1,8111}$	Mars	$Q_s = 4,0259 \cdot QI^{1,6095}$
1988/89	$Q_s = 7,9127 \cdot QI^{2,0229}$	Avril	$Q_s = 5,0769 \cdot QI^{1,7677}$
1989/90	$Q_s = 4,974 \cdot QI^{1,6028}$	Mai	$Q_s = 2,9588 \cdot QI^{1,6049}$
1990/91	**	Juin	$Q_s = 0,9125 \cdot QI^{1,3867}$
1991/92	$Q_s = 8,8038 \cdot QI^{1,4503}$	Juillet	$Q_s = 1,0653 \cdot QI^{1,3852}$
1992/93	$Q_s = 13,128 \cdot QI^{1,7126}$	Aout	$Q_s = 0,5253 \cdot QI^{1,2581}$
1993/94	$Q_s = 31,151 \cdot QI^{0,9753}$	Saison humide	$Q_s = 5,6115 \cdot QI^{1,6839}$
1994/95	$Q_s = 0,0566 \cdot QI^{3,3404}$	Saison sèche	$Q_s = 3,81 \cdot QI^{1,6834}$
1995/96	**	Année humide	$Q_s = 3,8513 \cdot QI^{1,6929}$
1996/97	**	Année sèche	$Q_s = 6,567 \cdot QI^{1,7529}$

** : Année non observée.

IV.1.2.3. Relation : Débit liquide moyen journalier observe (Q_{lmj}) -Débit solide moyen journalier (Q_{smj}) (2^{ème} approche)

Cette nouvelle tentative d'homogénéisation nous donne l'occasion de voir les résultats obtenus à partir de l'analyse de la régression sur les valeurs moyennes journalières.

Un premier examen nous a permis d'obtenir des échantillons de tailles suffisantes et représentatives. La taille des échantillons de station de l'Ouled Farès est 3582.

Les valeurs des débits liquides et solides moyens journaliers observés ont servi à développer un modèle liant les deux paramètres. Ce dernier a été utilisé pour calculer les valeurs des débits solides correspondant aux valeurs liquides observées (pour lesquelles il n'y a pas eu d'observation des débits solides). De cette manière, un nouvel échantillon a été constitué. Un nouveau modèle a été développé sur la base des nouvelles séries des débits liquides et solides (fig. IV.7)

Cette approche est généralement utilisée pour estimer le transport solide au niveau des sites non équipé en moyens de mesure. De nombreux chercheurs (Meddi *et al.*, 1998 en Algérie, Lahlou ; 1994 au Maroc, Steegen *et al.* ; 1998 en Belgique, Herry *et al.* ; 1997 en Zambie, Kassoul *et al.* ; 1997 en Algérie) ont mis au point des modèles de prévision du transport solide. Ces modèles sont utilisés pour palier le manque de données au niveau d'un site destiné à un aménagement.

Les couples sont reportés sur le graphe (fig.IV.7). L'allure de ce graphe, explique que le modèle puissance est le mieux ajusté à la station d'Ouled Farès avec R^2 de 0,79. Nous optons pour le modèle puissance. Les résultats de calcul sont reportés sur le tableau IV.9.

Tableau IV.9: Valeurs de R^2 calculées (2^{ème} approche).

Echelle Temporelle	Type du modèle	Larbâa (Ouled Farès)
<i>2^{ème} approche</i>	Linéaire	0,61
	Logarithmique	0,06
	Parabolique	0,69
	Puissance	0,79
	Exponentiel	0,20

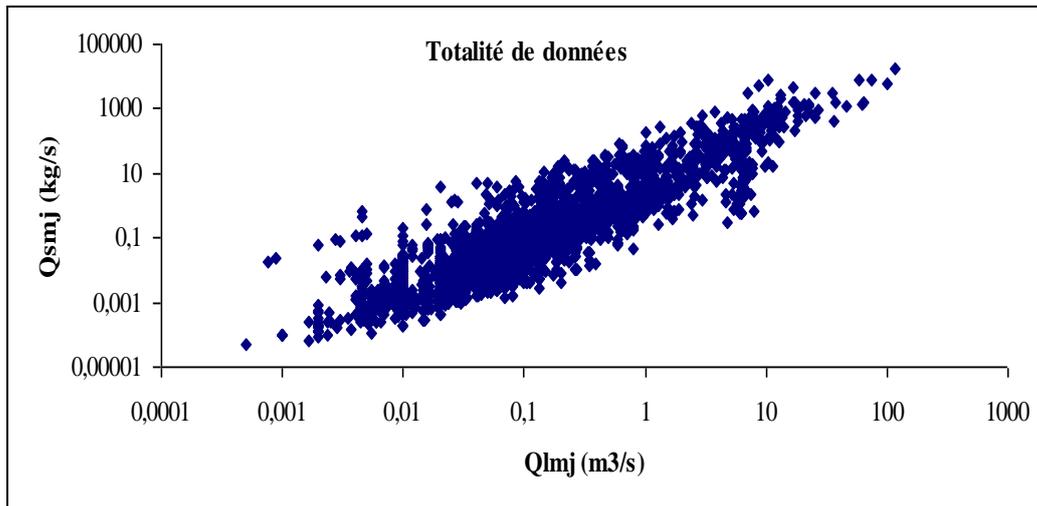


Figure IV.7 .Relation débit solide moyen journalier /débit liquide moyen journalier observé (totalité des données) (1972-2007).

Tableau IV.10 : Formule de modèle retenu pour la 2^{ème} approche.

Stations	Larbâa (Ouled Farès)
2 ^{ème} approche	$Q_s = 2,9226Q_l^{1,5443}$

IV.1.3. Discussion des résultats

Du fait de la complexité du phénomène du transport solide et, malgré l'existence de nombreux modèles de par le monde en général et en Algérie en particulier, il n'existe aucun modèle théorique ou procédure de calcul standard. Les modèles, dans leur majorité, expliquent plus de 70 % de la variance. Les résultats trouvés confirment la nature du modèle développé par rapport à ceux obtenus en Algérie (Meddi ,1993) et au Maroc (Lahlou, 1994).

Le calcul de la régression pour différent approches a permis de conclure que le modèle puissance est le mieux approprié.

Les coefficients de déterminations à différentes échelles temporelles pour le bassin versant d'oued Ouahrane sont significatifs. A titre d'exemple, à l'échelle annuelle le coefficient de détermination R^2 à la station de Larbâa est de 0,87.

IV.1.4. Conclusion

Vu la complexité du phénomène du transport solide, il n'existe aucun modèle théorique ou procédure de calcul à l'époque actuelle qui puisse être accepté comme parfait.

L'homogénéisation des données par l'approche statistique, reste toujours fiable. Le résultat obtenu après analyse de la régression montre que pratiquement tous les modèles maintenus expliquent plus de 70 % de la variance. Dans ces circonstances, nous avons essayé de contribuer à une modélisation statistique du transport solide en suspension à différentes échelles temporelles, afin de pouvoir évaluer les apports solides transités par le cours d'eau. Aussi, pour mieux cerner le dimensionnement des ouvrages hydrotechniques et d'accroître leurs durée de vie.

Ainsi, les relations établies peuvent servir de base pour l'extension des séries courtes, le contrôle des observations et combler le manque d'information.

Chapitre V: Estimation des apports solides dans le bassin versant de l'oued Ouahrane

V.1. Introduction

La quantification des apports solides est souvent difficile, vue le grand nombre de paramètres entrant en jeu. Dans ce chapitre on essayant d'estimer ces apports solides à différentes échelles temporelles dans le bassin versant de l'oued Ouahrane et d'expliquer cette variation des apports solides à l'aide des paramètres conditionnant ce phénomène.

V.2. Application de la courbe d'estimation du transport solide en suspension

Selon Ghenim et *al.*, (2007), la relation en puissance [$Q_s = a.Q_l^b$] reliant le débit solide au débit liquide proposée dès 1895 par Kennedy a été vérifiée pour la plupart des cours d'eau dans le monde,(Lefort,1992). L'exposant b , est en fonction des caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques des bassins-versants ou des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau.

La relation retenue pour cette étude est de la forme suivante :

$$Q_s = 2,9226Q_l^{1,5443} \quad (N=3582 ; R^2=0,79)$$

Les valeurs des paramètres a et b sont proches de celles trouvées à la Tafna (Bouanani, 2004), à Oued Abd (Achite et Ouillon, 2007), à Oued Ouahrane (Benkhaled et Remini, 2003) et à Oued Sebdou (Ghenim et *al.* ; 2007) (tab. V.1).

Tableau V.1: Exemples des coefficients (a, b) de la courbe d'estimation du transport solide en suspension donnés par différents auteurs.

Référence	Oued	Bassin versant semi-aride	Précipitation (mm/an)	a	b
Chikita (1996)	Ikushunbetsu, japan	Non	1418	$4,28.10^{-3}$	2,11
Morehead et al. (2003)	Nord Saskatchewan, Alberta	Non	-	$1,3.10^{-5}$	1,58
Asselman (2000)	Rhine, Allemagne	Non	600-2500	$7,7.10^{-7}$ $1,7.10^{-6}$	1,22 1,44
Achite et Ouillon (2007)	Abd, Algerie	Oui	250	1,71	0,75
Touaibia et al., (2001)	Haddad, Algerie	Oui	249	5,79 25,13 3,62	0,36 0,74 0,44
Sutheland et Bryan, (1990)	Katorin, Kenya	oui	640	43	0,30
Benkhaled et Remini, (2003)	Ouahrane, Algerie	Oui	389	1,46 à 6,43	1,32 à 1,95
Bouanani, (2004)	Tafna	Oui	481,5	0,41 à 0,26	1,5 à 2
Ghenim et al ; 2007	Sebdou	Oui	412,6	0,26	1,64
Senouci, cette étude	Ouahrane, Algerie	Oui	352	2,92	1,54

V.3. Variabilité temporelle des apports liquides et solides dans le bassin versant de l'oued Ouahrane

Le transport solide en suspension de l'oued Ouahrane présente des variations considérables. Elles sont dues essentiellement au régime pluviométrique, au couvert végétal et à la lithologie. En général, les variations saisonnières des apports solides suivent celles des apports liquides. Les valeurs maximales des apports solides, pour l'ensemble du bassin versant, s'observe à la fin d'automne et à la fin d'hiver-début du printemps. Généralement, les apports solides minimaux mensuels sont enregistrés en été. Cette saison est caractérisée par une faible pluviométrie et par conséquent un faible écoulement superficiel.

La contribution moyenne mensuelle la plus forte de la dégradation spécifique est enregistrée au mois de février (fig.V.1). Elle représente 28% des transports solides annuels.

Pendant ce mois où l'apport liquide moyen ($3,50 \times 10^6 \text{m}^3$) est le plus important après celui du mois de décembre.

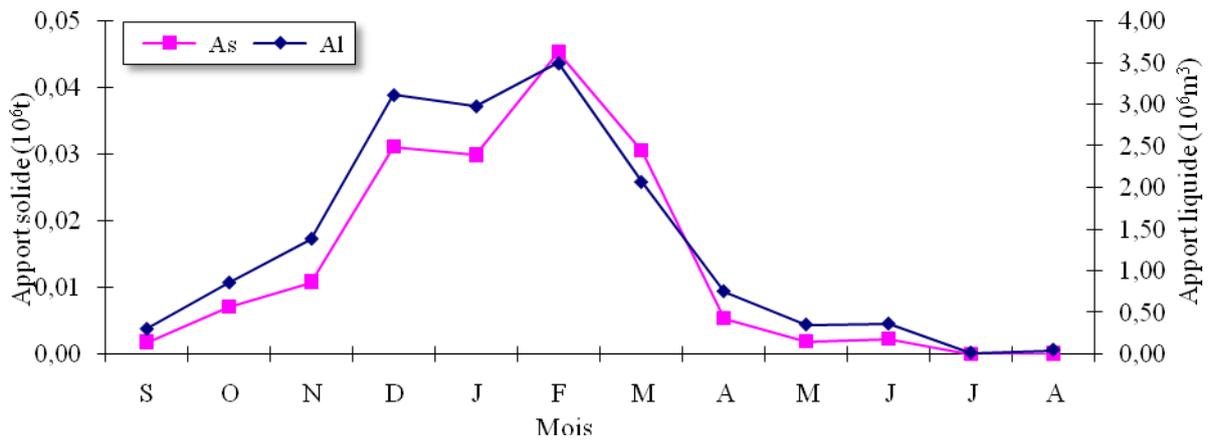


Figure V.1: Variabilité mensuelle des apports liquides et solides dans le bassin versant de l'oued Ouahrane (1972-2007).

A l'échelle interannuelle, la variabilité temporelle des apports liquides et solides est remarquable pour le bassin versant d'oued Ouahrane (fig.V.2). Les apports liquides ont varié de $0,68 \times 10^6 \text{m}^3$ (1993/94) à $117,57 \times 10^6 \text{m}^3$ (2004/05). L'apport liquide moyen annuel sur la période (1972/2007) est de l'ordre $15,76 \times 10^6 \text{m}^3$. Quant aux apports solides ont varié de $0,0024 \times 10^6 \text{tonnes}$ (1977/78) à $1,87 \times 10^6 \text{tonnes}$ (2004/05). L'apport moyen annuel est de $0,20 \times 10^6 \text{tonnes}$ à la station de Larbâa.

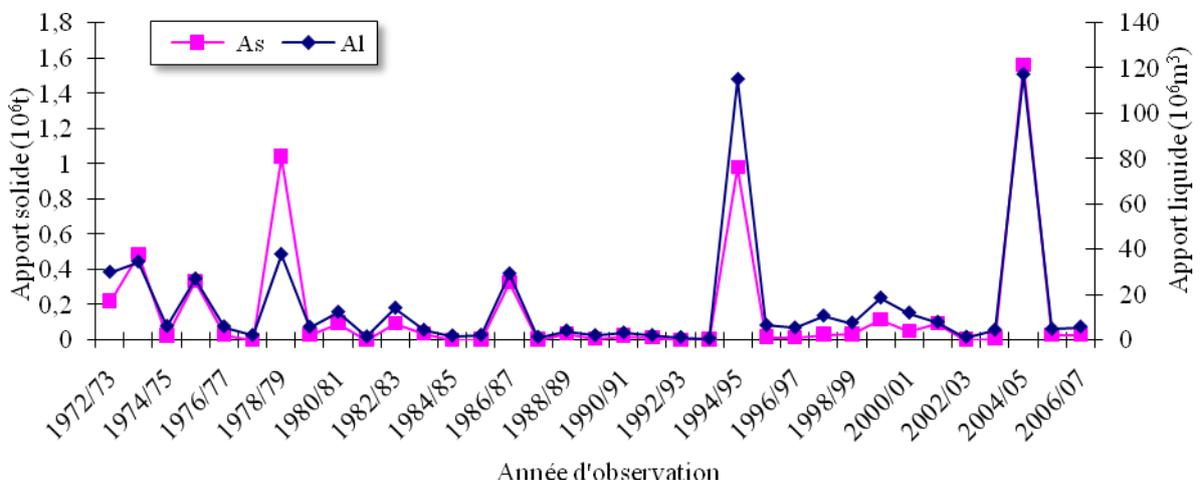


Figure V.2: Variabilité interannuelle des apports liquides et solides dans le bassin versant d'oued Ouahrane (1972-2007).

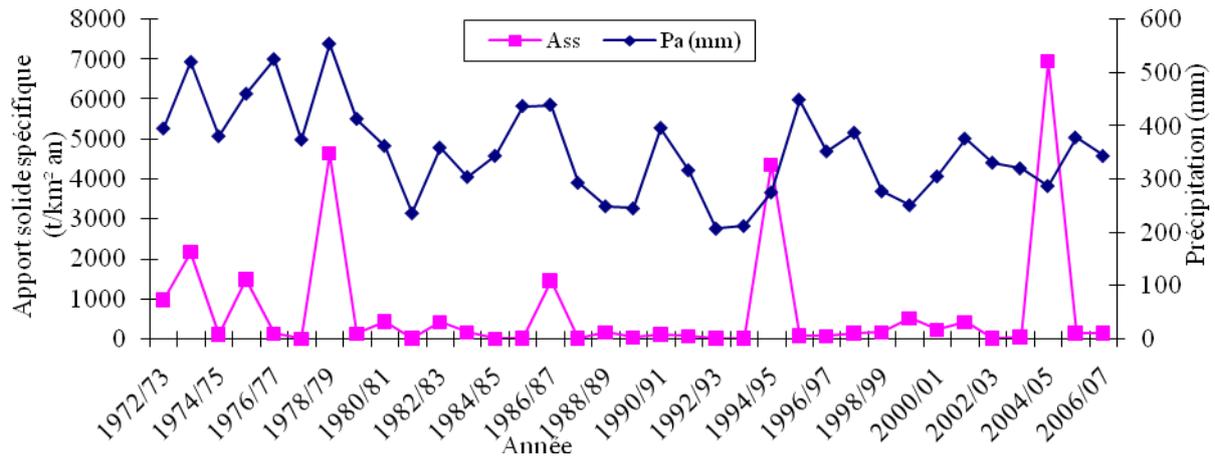


Figure V.3: Variabilité interannuelle des apports solides spécifiques et des précipitations dans le bassin versant d'oued Ouahrane (1972-2007).

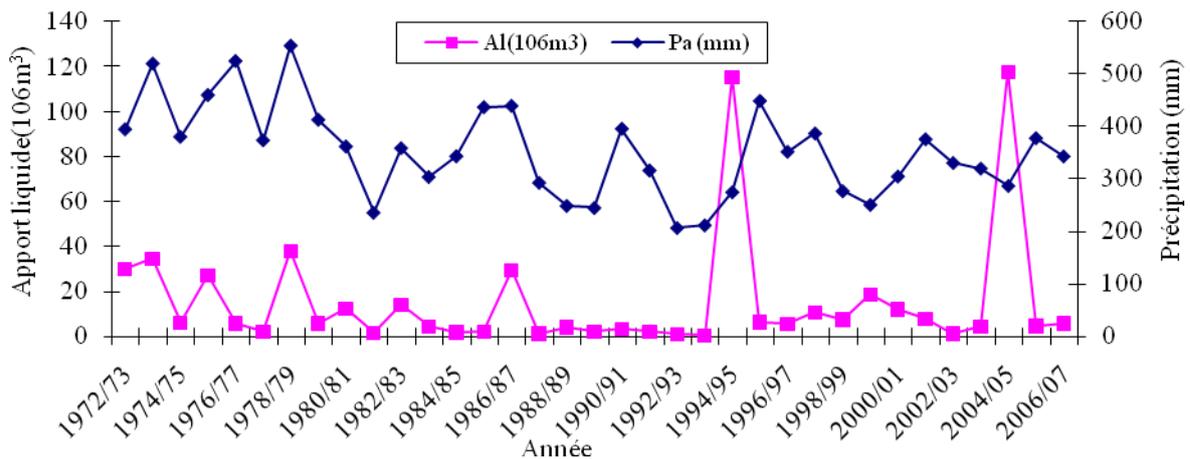


Figure V.4: Variabilité interannuelle des apports liquides et des précipitations dans le bassin versant d'oued Ouahrane (1972-2007).

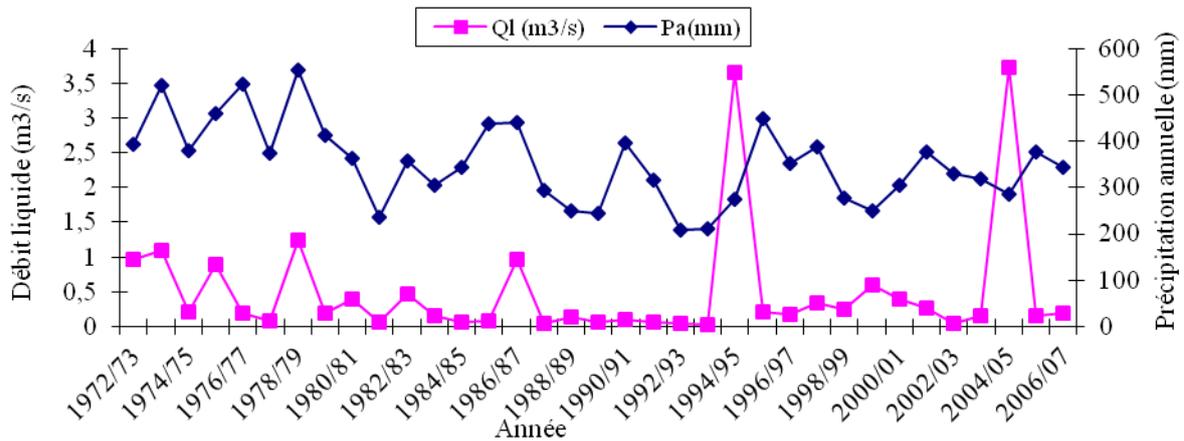


Figure V.5: Variabilité interannuelle des débits liquides et des précipitations dans le bassin versant d'oued Ouahrane (1972-2007).

L'analyse de la figure V.6 montre que la saison d'hiver contribue en moyenne pour 61% de l'écoulement liquide annuel et pour 64 % de l'apport solide annuel du bassin versant d'oued Ouahrane à la station d'Ouled Farès. Elle est de 61% pour le bassin versant du Mellah où le transport des sédiments est dominé par les tempêtes hivernales (Khanchoul et Jansson, 2008). Le transport solide d'hiver reste le plus élevé (Benkhaled et Remini, 2003), dépassant significativement les autres saisons. Cette variabilité s'explique par la nature agressive des pluies et par les apports dus aux sapements des berges du cours d'eau, par l'état du sol et par les pratiques culturelles.

Selon Bourouba, (1999), cette saison est la saison la plus arrosée et aussi la saison de plus forte érosion dans 8 bassins versants. Les variations des transports solides spécifiques de l'hiver dépendent fortement des précipitations élevées et des débits forts qui compensent la faiblesse des turbidités dans les bassins versants telliens. Ces bassins versants ressemblent beaucoup, par leur comportement morphologique et leur fonctionnement hydrologique durant l'hiver, aux bassins italiens (Guigo, 1975).

Pendant le reste de l'année, la contribution saisonnière de l'apport liquide et de la dégradation spécifique est relativement faible.

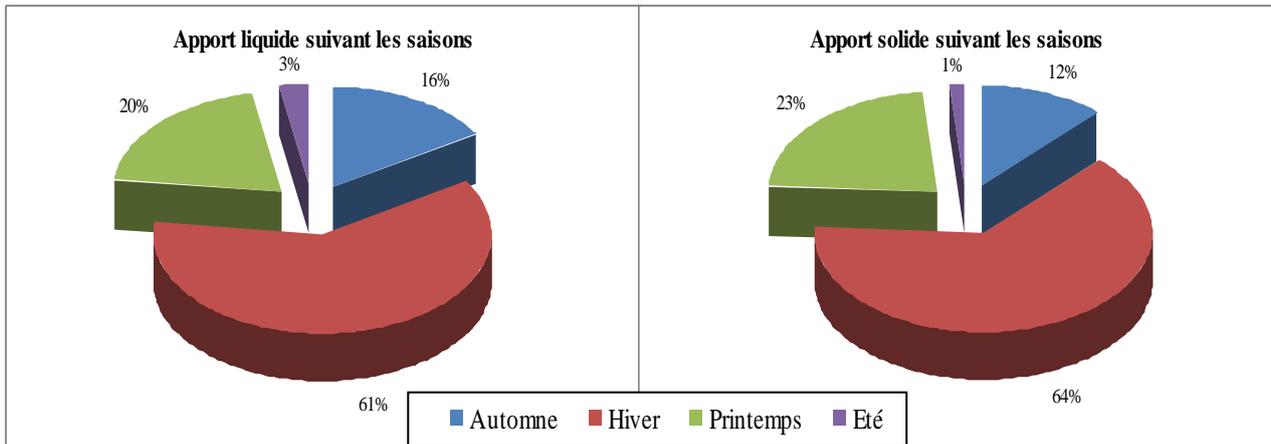


Figure V.6: Contribution saisonnière des apports liquides et solides dans le bassin versant d'oued Ouahrane (septembre 1972- aout 2007).

Les dégradations spécifiques annuelles enregistrées sont en majorité importantes, variant entre 9,01 et 6938.47 t km⁻² an⁻¹ (Tab.V.2). La moyenne inter-annuelle qui vaut 738,54 t km⁻²an⁻¹, est 3.3 fois inférieur à celle de (2442 t km⁻² an⁻¹) estimée par Benkhaled,(2006) pour le même bassin versant (période 1974–1990), et 1,5 fois plus faible que 1 120 t km⁻² an⁻¹ estimée par Megnounif et *al.*, (2003) dans le bassin versant Tafna, à l'Ouest d'Algérie et 3,9 fois et 5,4 fois supérieur à celles de 187 t km⁻² an⁻¹ et 136 t km⁻² an⁻¹ estimée par Achite et Meddi, (2005) et Achite et Ouillon, (2007) dans les bassins versants Mina et Abd respectivement, elle est poche de 895 t km⁻² an⁻¹, et 572 t km⁻² an⁻¹ estimée par Khanchoul et *al.*, (2010) dans l'ensemble du bassin versant de Kebir et Reseroir Mexa à l'extrême nord-est de l'Algérie (tab.V.3).

Tableau V.2 : Bilan annuel des précipitations, des apports liquides, des apports solides, du coefficient d'écoulement et des dégradations spécifiques à la station de Larbâa à Ouled Farès (septembre 1972- Aout 2007)

Année	P (mm)	Al (10 ⁶ m ³)	As (10 ⁶ t)	Ce(%)	Ass (t/km ² an)	As Tixeront (t/km ² an)	As Fournier (t/km ² an)
1972/73	395,00	30,14	0,27	28,24	983,82	709,90	4 988,01
1973/74	520,00	34,66	0,59	24,67	2171,18	724,94	3 885,02
1974/75	380,60	6,22	0,03	6,05	109,19	560,27	6 380,17
1975/76	460,20	27,22	0,40	21,89	1487,58	699,12	3 718,70
1976/77	525,00	6,03	0,03	4,25	125,30	557,73	2 166,00
1977/78	374,00	2,21	0,00	2,19	9,22	479,64	4 341,03
1978/79	554,00	38,02	1,25	25,40	4633,59	735,06	2 846,84
1979/80	413,00	5,87	0,04	5,26	129,87	555,45	427,12
1980/81	362,20	12,47	0,12	12,74	432,26	621,88	7 341,97
1981/82	236,00	1,57	0,00	2,46	17,45	455,73	2 481,54
1982/83	359,00	14,27	0,11	14,72	418,62	634,61	3 679,99
1983/84	304,00	4,50	0,05	5,48	169,43	533,74	304,63
1984/85	343,60	1,99	0,00	2,14	9,01	472,20	492,08
1985/86	437,00	2,27	0,00	1,93	14,62	481,74	1 158,62
1986/87	439,50	29,45	0,40	24,80	1462,53	707,43	11 548,26
1987/88	293,00	1,38	0,01	1,74	19,55	446,88	415,50
1988/89	249,00	4,23	0,04	6,29	155,83	528,81	4 172,54
1989/90	245,00	2,12	0,01	3,21	33,54	476,88	488,06
1990/91	396,00	3,29	0,03	3,08	116,64	509,25	716,76
1991/92	316,60	2,16	0,02	2,53	64,30	478,23	745,33
1992/93	207,00	1,28	0,00	2,29	11,39	442,07	1 533,88
1993/94	212,00	0,68	0,00	1,18	13,65	401,68	138,96
1994/95	275,00	115,43	1,18	155,37	4356,30	868,31	483,04
1995/96	449,00	6,61	0,02	5,45	84,68	565,38	2 034,20
1996/97	352,00	5,51	0,02	5,79	74,54	550,18	17 764,55
1997/98	387,00	10,78	0,04	10,32	142,48	608,20	5 517,21
1998/99	277,00	7,73	0,04	10,33	154,31	578,79	2 904,45
1999/00	251,00	18,77	0,14	27,67	515,89	661,20	12 991,65
2000/01	305,00	12,10	0,06	14,68	231,87	619,06	1 085,54
2001/02	376,00	8,05	0,11	7,92	420,94	582,34	14 118,61
2002/03	330,80	1,44	0,00	1,62	12,31	450,02	1 284,69
2003/04	320,10	4,58	0,01	5,30	47,07	535,12	334,43
2004/05	287,00	117,57	1,87	151,64	6938,47	870,71	2 119,12
2005/06	378,00	4,91	0,04	4,81	140,90	540,82	1 110,07
2006/07	343,30	5,94	0,04	6,40	140,55	556,35	1 164,43
Moyenne	352,94	15,76	0,20	17,42	738,54	577,14	3 625,23

P : Précipitation, Al : Apport liquide, As : Apport Solide, Ce : Coefficient d'écoulement, Ass : Apport solide spécifique.

Tableau V.3 : Dégradation spécifique de plusieurs régions et bassin versant dans le bassin méditerranéen.

Références	Bassin versant ou région	Superficie (km ²)	Précipitation (mm/an)	Dégradation spécifique (t/km ² an)
Tamrazyan (1989)	Global	135,1×10 ⁶	-	120
Milliman et Meade (1983)	Global	88,6 ×10 ⁶	-	150
Tamrazyan (1989)	Afrique	30,3× 10 ⁶	-	32
Tamrazyan (1989)	hémisphère oriental (Afrique, Europe, Asie, Australie)	92,8×10 ⁶	-	133
Tamrazyan (1989)	Sud d'Amérique	18,1× 10 ⁶	-	138
Tamrazyan (1989)	Région équatoriale (10°N_10°S)	30,3× 10 ⁶	-	153
Tamrazyan (1989)	Asie	43,4× 10 ⁶	-	242
Tamrazyan (1989)	Région tropicale (10_30°N)	-	-	253
Probst et Amiotte-Suchet (1992)	Maghreb	-	-	400
Serrat et al (2001)	Têt, France	1380	750	40
Serrat (1999)	Agly, France	1045	700	103
Bourouba (1997)	Leham, Est Algérie	5600	154	104
Bourouba (1998)	Medjerda, Est Algérie	217	598	113
Terfous et al (2001)	Mouilah, NO Algérie	1680	300	126
Achite et Ouillon (2007)	Abd, Algérie	2480	250	136
Ghachi (1986)	Seybousse, Est Algérie	6450	577	137
Megnounif et al (2003)	Haute Tafna, Ouest Algerie	256	419	1120
Ghenim et al (2010)	Mouilah, NO Algerie	2650	297	165,3
Benkhaled (2006)	Ouahrane, Algerie	270,15	392	2442
Khanchoul et al (2010)	Kebir, Algerie	681	693-775	895
	Reseroir Mexa, Algérie	651		572
Achite et Meddi (2005)	Mina, Algerie	4900	305	187
Senouci, cette étude	Ouahrane, Algerie	270,15	352	738,54

V.4. Estimation des apports solides dans le bassin versant d'oued Ouahrane par les formules empiriques

Vu la particularité des bassins versants, les formules empiriques proposées par quelques auteurs pour l'estimation de la dégradation spécifique ne peuvent s'appliquer à tous les bassins. Ici nous essayons d'appliquer la formule de Tixeront et celle de Fournier pour le bassin de l'oued Ouahrane.

Le modèle Tixeront permet de calculer l'érosion spécifique à partir des valeurs des lames d'eau écoulées et les caractéristiques des terrains tels que la perméabilité

Les résultats montrent que l'érosion spécifique annuelle ainsi déduite est de l'ordre de 738,54 t/km².an. Par ailleurs, le taux d'érosion spécifique, déduit à partir de la formule de Tixeront, est comparable à la valeur moyenne calculée (fig. V.7 et fig. V.8).

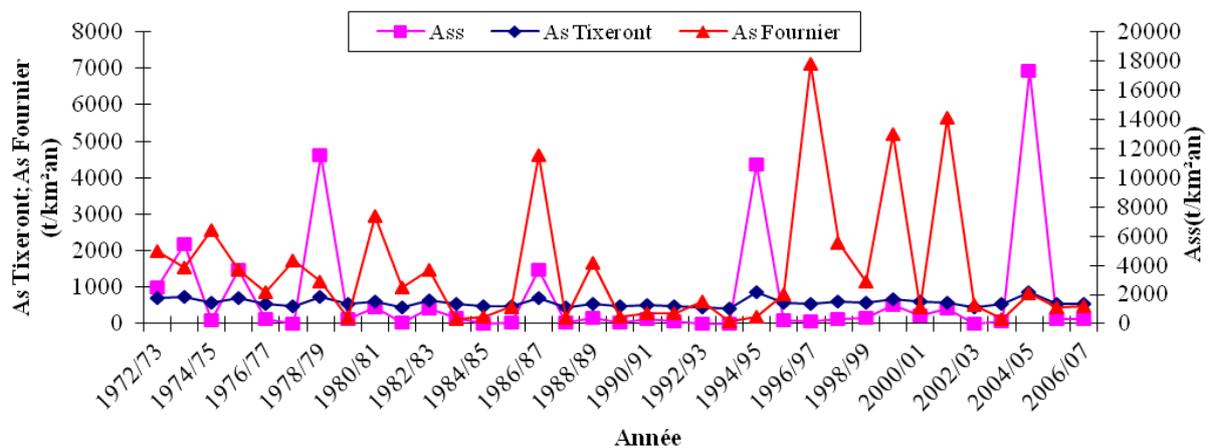


Figure V.7: Variabilité interannuelle des apports solides spécifiques calculés et des apports solides estimés par Tixeront et par Fournier dans le bassin versant d'oued Ouahrane (1972-2007).

Pour la recherche d'un modèle ou relation qui peut expliquer la relation Ass et As Tixeront, cinq modèles statistiques de type mathématiques sont utilisés, à savoir, linéaire, exponentiel, puissance, logarithmique et parabolique. Les résultats concernant les valeurs de R² pour le choix du modèle qui répond le mieux (Dagnellie, 1992), montre que le modèle puissance reste le plus significatif (fig. V.8) en expliquant plus de 90% de la variance totale.

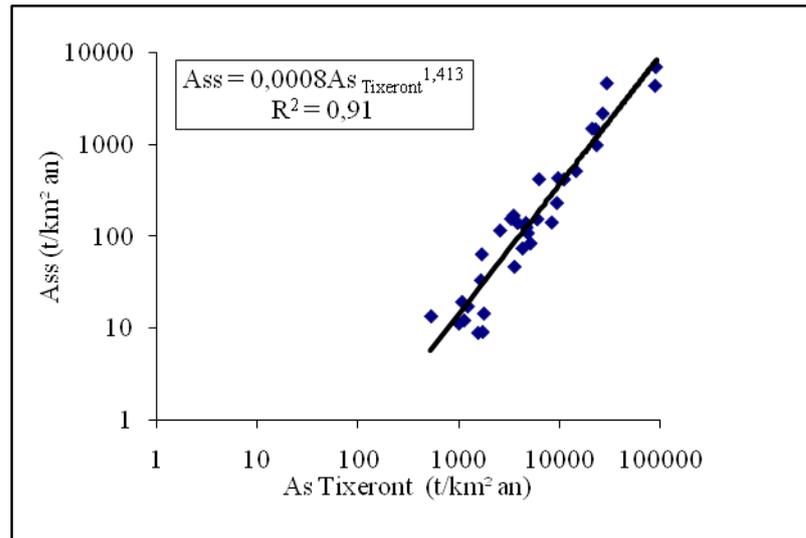


Figure V.8 : Relation entre les apports solides spécifique et les apports solides estimés par Tixeront à la station d'Ouled Farès.

La relation retenue est de la forme :

$$Ass = 0,0008As_{Tixeront}^{1,413} \quad (R^2 = 0,91)$$

L'emploi du modèle de Tixeront a donné un résultat significatif dont la relation proposée reste valable pour la quantification de l'érosion hydrique dans notre zone d'étude surtout en absence des données sur le transport solide (concentration).

V.5. Modélisation du transport solide

V.5.1. A l'aide du coefficient de ruissellement

Après avoir développé un modèle liant le transport solide au débit liquide, il nous a paru judicieux de mettre au point un modèle explicatif du transport solide en fonction des paramètres conditionnant ce phénomène.

Le coefficient de ruissellement (Ce) dépend des facteurs suivants : la pluviométrie, la nature du sol, le relief, la géologie et le couvert végétal. Ces derniers peuvent également être considérés comme des facteurs explicatifs du transport solide. A partir de cette démarche et étant donné la disponibilité des données concernant le coefficient de ruissellement (Ce), un

modèle puissance de type $A_s = a C_e^b$ a été développé pour le bassin versant d'oued Ouahrane. La figure (V.9.a) présente la relation trouvée.

La relation présente une corrélation très importante ($R^2=0,87$) qui permet d'expliquer plus le phénomène du transport solide pour le bassin versant d'oued Ouahrane.

V.5.2. A l'aide des débits de pointe de crues

La mise en relation des apports solides et des débits de pointe de crues permet de mettre en évidence une corrélation un peu acceptable ($R^2 = 0,47$). Ce type de relation serait un moyen de prévision des apports solides qui pourraient se déposer notamment dans l'oued Ouahrane.

Durant ces crues, on a enregistré un débit maximum de $457\text{m}^3/\text{s}$ pour l'année (1978/79), soit que la moyenne interannuelle des débits max ($75,67\text{ m}^3/\text{s}$) est de 150 fois plus que le débit liquide interannuel ($0,50\text{ m}^3/\text{s}$) sur 35 ans. En conséquence, les apports liquides ainsi que les dégradations spécifiques de crue dépendent essentiellement du débit de pointe (fig. V.9.b).

V.5.3. A l'aide de la pluviométrie

La pluie est l'agent principal de l'érosion. L'énergie des gouttes précipitées désagrège les fines particules du sol qui peuvent ensuite être entraînées par le ruissellement en fonction de sa capacité de transport. Dans le but de trouver une équation reliant la pluie annuelle (P) à l'apport solide (A_s), nous avons représenté sur la figure (V.9.c) la variation de ces paramètres.

Les points obtenus suggèrent une loi d'ajustement de type puissance avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,13$.

V.5.4. A l'aide du coefficient d'hydraulicité

De la même façon, nous avons développé un modèle reliant l'apport solide avec le coefficient d'hydraulicité. La représentation graphique de l'apport solide (A_s) en fonction du coefficient d'hydraulicité (fig. V.9.d), nous a permis de proposer une relation de type puissance avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,91$.

V.5.5. A l'aide de la lame d'eau ruisselée

La majorité des évènements pluvieux sont entièrement absorbés par le sol et le ruissellement ne débute qu'après un seuil de pluie qui dépend des conditions d'humidité préalable. La lame ruisselée dépend de la pluviométrie et de la température moyenne annuelle du bassin versant. La représentation graphique de l'apport solide (A_s) en fonction de la lame d'eau ruisselée L_o (fig. V.9.e), nous a permis de proposer, avec un coefficient de corrélation $R^2=0,91$, la relation suivante : $A_s=0,0004L_o^{1,8141}$

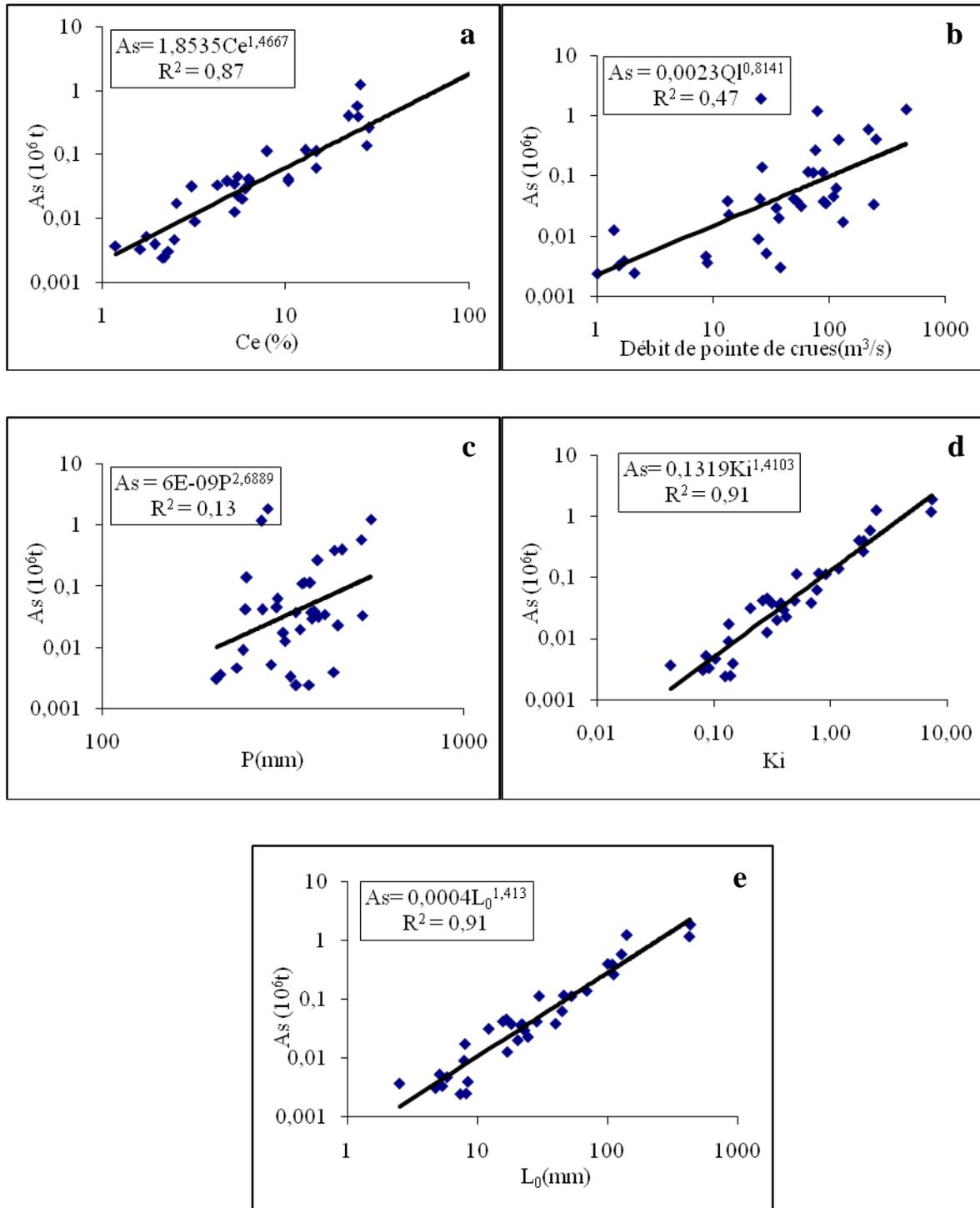


Figure V.9 : Relation entre les apports solides et les paramètres explicatifs du transport solide à la station d'Ouled Farès.

V.6. Impact de la variabilité climatique sur le transport solide dans le bassin versant de l’oued Ouahrane

La variation du transport solide en suspension montre une variabilité interannuelle significative ($cv = 208,49\%$, fig. V.10), qui est plus grande que la variabilité saisonnière. La variabilité annuelle de rendement de sédiment exprime une amplification des variations de débit liquide ($cv = 171,50\%$) qui sont elles-mêmes le résultat d’une amplification de la variabilité de précipitation ($cv = 24,75\%$) (tab. V.4).

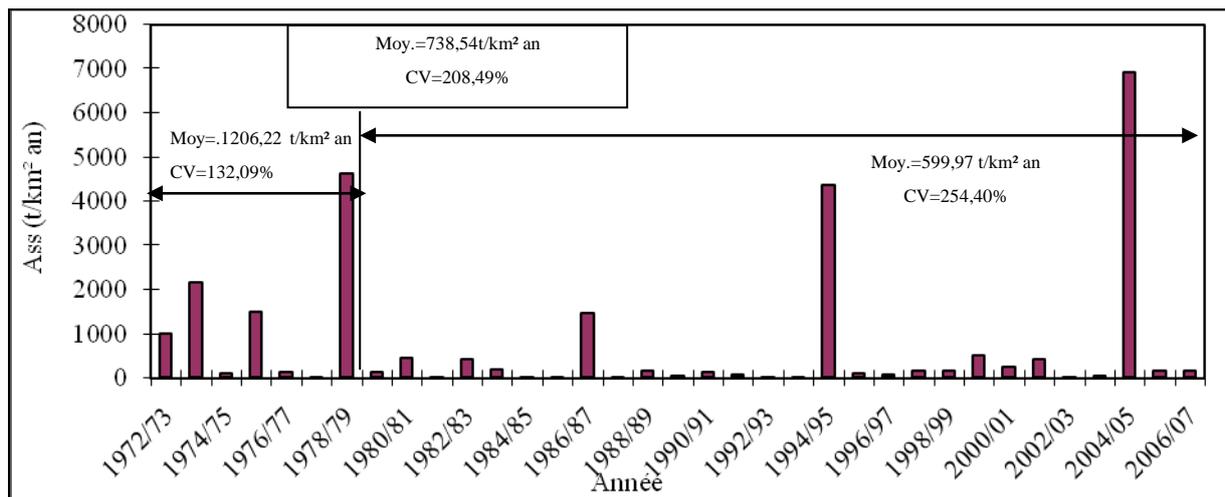


Figure V.10: Variation interannuelle de la dégradation spécifique à la station d’Ouled Farès (1972-2007).

La figure V.10 montre clairement la diminution considérable du rendement annuel des sédiments en suspension avec un taux de réduction de 50% dès 1979-1980, l’année qui est considérée comme année de rupture et elle montre que le régime des cours d’eau est fortement lié à celui des précipitations qui ont diminuées de 29% et en parallèle une baisse du débit liquide de 22%. La dégradation spécifique moyenne est 1206,22 t/km² an pour la période 1972-1979, et de 599,97t/km² an pour la période 1979-2007 (tab. V.4).

Tableau V.4 : Principaux paramètres statistiques de la précipitation, débit liquide et l'apport solide spécifique dans le bassin versant de l'oued Ouahrane.

	1972-2007			1972-1979			1979-2007		
	P (mm)	Ql m ³ /s	Ass(t/km ² an)	P(mm)	Ql m ³ /s	Ass(t/km ² an)	P(mm)	Ql m ³ /s	Ass(t/km ² an)
Min.	207,00	0,02	9,01	374,00	0,07	9,22	207,00	0,02	9,01
Max.	554,00	3,73	6938,47	554,00	1,24	4633,59	449,00	3,73	6938,47
Moy.	352,94	0,50	738,54	452,72	0,60	1206,22	323,37	0,47	599,97
CV (%)	24,75	171,50	208,49	15,92	80,48	132,09	20,98	201,11	254,40

Cette diminution considérable du rendement annuel des sédiments en suspension peut être expliquée par des aménagements anti-érosion implantés en amont de la station hydrométrique tels que l'implantation de la retenue collinaire de Bénaïria et l'augmentation de l'activité agricole en amont de l'oued par des cultures sous serre sur le bassin de l'oued Ouahrane qui peuvent contribuer à la lutte contre cette problématique du transport solide.

Conclusion générale

Le problème de disponibilité des données relatives au transport solide se pose avec acuité en Algérie. Par ce travail, dans un premier temps, des modèles explicatifs de la variation du débit solide par le débit liquide ont été développés pour différents cas de regroupements de données (interannuelles, annuelles, mensuelles et saisonnières).

Au cours de cette étude, il a été possible de définir une approche statistique d'évaluation des apports solides en suspension basée sur les relations débit liquide-débit solide. Cette approche globale semble satisfaisante pour la quantification des apports solides dans les bassins versants jaugés à partir des données observées de débit liquide et de concentration en matière en suspension.

L'étude des séries pluviométriques du bassin versant de l'oued Ouahrane, par l'application des méthodes statistiques de détection de ruptures, a montré que la période de rupture est apparue au cours des années 1979 où on note une diminution plus ou moins marquée de la pluviométrie annuelle avec des déficits pluviométriques variant entre 23 et 29%.

Les modèles obtenus aux échelles journalière et mensuelle ont donné les meilleurs coefficients de détermination. A titre d'exemple, à l'échelle annuelle le coefficient de détermination R^2 à la station de Larbâa est de 0,87. La disponibilité des données du débit liquide à l'échelle journalière nous a conduit à utiliser, pour quantifier le transport solide dans le bassin versant de l'oued Ouahrane, le modèle développé à cette échelle. La contribution moyenne mensuelle la plus forte de la dégradation spécifique est enregistrée au mois de février, elle représente 28% des transports solides annuels. Le transport solide d'hiver reste le plus élevé (61%), dépassant significativement les autres saisons. Cette variabilité s'explique par la nature agressive des pluies et par les apports dus aux sapements des berges. La dégradation spécifique moyenne au niveau de ce bassin est de l'ordre de 738,54 t/km² an.

Le modèle puissance traduit bien la relation entre le transport solide et les autres facteurs explicatifs. Les modèles développés peuvent être utilisés pour l'estimation du transport solide en cas d'absence des données des concentrations des matières en suspension.

Nous pensons que les résultats obtenus, doivent être améliorés en terme de quantité et de qualité et au fur et à mesure que de nouvelles techniques de mesure et d'analyse apparaissent. Nous recommandons :

- D'étudier le processus d'épuisement des sédiments, à la condition qu'un grand nombre de données concernant les surfaces ou états de sol soient disponibles ;
- Déterminer les formes d'érosion dominantes dans ce bassin ;
- Détermination des taux d'érosion des berges ;
- Estimation du transport solide total par la mesure du charriage.

Références bibliographiques

- Achite M. & Ouillon S., (2007).** Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). *Journal of Hydrology* 343, 187– 202.
- Achite M. & Meddi M., (2004).** Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Revue Sécheresse*, 4, vol, 15, pp : 367–373.
- Achite M. & Meddi M., (2005).** Spatial and temporel variability of streamflow and solid yields in semiarid areas. Case of the oued Mina basin (Northwest Algeria).). *Rev. Sci. Eau* 18, 37–56.
- Achite M., Touaibia B. et Ouillon S., (2006).** Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences et Perspectives. 14th International Soil Conservation Organisation Conference *Water Management and soil conservation in Semi-Arid Environnements* Marrakech, Morocco, May 14-19.
- Achite M. & Meddi M., (2002).** Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse* 2004 ; 15 (4) : 367-73
- Ambroise B., (1998).** Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : Processus et facteurs. *Revue des Sciences de l'Eau*, 11 : 471-785.
- Amrani R., (2011).** Variabilité spatio-temporelle de la sécheresse dans le bassin versant de l'Oued Chélif, Algérie, mémoire de Magister. Université de Chlef .87p.
- Anderson V. L ., (1936).** Carte géologique du bassin de oued Ouahrane 1/200000.
- Arabi M., (1991).** Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu méditerranéen à Médéa. Algérie. Thèse de Doctorat. Université de Grenoble. (France).
- Asselman N.E.M., (2000).** Fitting and interpretation of sediment rating curves, *Journal of hydrology*, 234,228-248.
- Benkhadra H., (1997).** Battance, ruissellement et érosion diffuse sur les sols limoneux cultivés-Déterminisme et transfert d'échelle de la parcelle au petit bassin versant. Thèse de Doctorat de l'université d'Orléans (France).
- Benkhaled A. & Remini B., (2003).** Analyse de la relation puissance, débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algerie), *Rev. Sci. Eau* 16/3 .333-356.
- Benkhaled A., (2006).** Contribution à l'étude du transport solide en suspension. Bassin de oued Ouahrane bassin hydrographique Cheliff –Zahraz ; Thèse de doctorat en science, USTMBO, 175p.
- BNEDER. , (1984).** Etude du schéma d'aménagement intégré Dahra-Zaccar (2vol).
- Boiffin J., (1984).** La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Doc. Ing. INAPG, Paris, 320 p.

- Bollinne A., (1982).** Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique. Thèse Doctorat Sciences Géographiques. Liège.356 p.
- Bonneaud S., (1994).** Méthodes de détection des ruptures dans les séries chronologiques. Projet de fin d'études, Institut des sciences de l'ingénieur de Montpellier, France.
- Bouanani A., (2004).** Hydrologie, transport solide et modélisation -Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie). Thèse doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 250p.
- Boulaine J., (1957).** Carte géologique du bassin de oued Ouahrane 1/50000.
- 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. Bull. ORSTOM 17, 345–360.
- Bourouba M., (1998).** Phénomène de transport solide dans les Hauts Plateaux Orientaux Cas de l'Oued Logmane et de l'Oued Leham dans le bassin de la Hodna. Revue des Sciences et Technologie 9, 5–11.
- Bourouba M., (1999).** Comparaison de la charge solide en suspension dans les oueds Algériens: essai de synthèse 358-374.
- Boyer JF., (1998).** Khronostat statistical time series analyses software. Montpellier : UMR 5569 Hydrosiences, IRD-Maison des sciences de l'eau.
- Buishand T. A., (1982).** Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *J. Hydrol.* 50, 11-27.
- Buishand T. A., (1984).** Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *J. Hydrol.* 73, 51-69.
- Chibbani R., Djilli K. & Roose E., (1999).** Étude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. *Bull. ORSTOM, Rés. Eros.* 19, 85-95.
- Chikita K., (1996).** Suspended sediment discharge from snowmelt: Ikushunbetsu River, Hokkaido, Japan. *J. Hydrol.* 186, 295–313.
- Cordova J.R. & Gonzalez M., (1997).** Sediment yield estimation in small watersheds based on streamflow and suspended sediment discharge measurements, *Soil Technology*, 11, pp: 57-65.
- Crawford C.G., (1996).** Estimating mean constituent loads in rivers by the rating –curve and flow duration rating –curve methods, Unpublished PhD dissertation, Indiana University: Bloomington, IN; 245p.
- Dagnélie P., (1970).** Théorie et méthodes statistiques. Volume 1 et 2. Gembloux : Duculot éditions.
- Dagnellie P., (1992).** Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques de Gembloux, Belgique ,463p.

- Delmas M., Cerdan O., Cheviron B. et Mouchel J. M., (2010).** River basin sediment flux assessments. *Hydrol. Process.*
- Demmak A., (1982).** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie Septentrionale, Thèse doct, Ing, Paris, 323p.
- Duband D., (1989).** Statistiques appliquées en hydrologie. Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique. France.
- Faran Ali K. & De Boer D.H., (2007).** Spatial patterns and variation of suspended sediment yield in the upper Indus River basin, northern Pakistan. *Journal of Hydrology* : 334, 368–387.
- Feodorroff A., (1965).** Mécanismes de l'érosion par la pluie. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique* (2) VII, 2, 149-163, Paris.
- Fournier F., (1960).** Climat et Erosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Presses Universitaires de France, Paris, France, 203 p.
- Gavrilovic S., (1960).** Ingénierie des cours d'eau torrentiels et de l'érosion. Yougoslavie.
- Ghachi A., (1986).** Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie: Bassin de la Seybousse. Thèse Doctorat 3e cycle. Ed. Office des Publications Universitaires (OPU), Alger, 508p.
- Ghenim A., (2001).** Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna : cas de oued Isser, oued Mouilah et la Haute Tafna. Thèse de magister, université de Tlemcen, Algérie.
- Ghenim A., Seddini A. et Terfous A., (2010).** Temporal variation of the specific sediment yield of the Wadi Mouilah basin (northwest Algeria), *Hydrological Sciences Journal*, 53: 2, 448- 456
- Ghenim A., Seddini A. et Terfous A., (2007).** Production et exportation des sédiments en suspension lors des événements de crue. Cas du bassin versant de l'oued Mouilah. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, N° 06, pp. 35-44.
- Gomer D., (1994).** Ecoulement et érosion dans des petits bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen. Thèse Université de Karlsruhe/Allemagne. 137p.
- Graf W.H (1971).** *Hydraulics of sediment transport.* McGraw-Hill Eds., New York, 513p.
- Guigo M., (1975).** Les variations de la turbidité et leurs relations avec le débit et les précipitations sur le Magra, Fleuve de la Ligurie orientale. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, XVII, 3, 259 - 278.
- Guillot J. L., Call H., & Cortes J., (1990).** Transport de matières dissoutes et particulaires des andes vers Rio de la Plata par les tributaires Boliviens (Rios Pilcomayo & Bermejo) du Rio Paraguay. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 35, 6, pp. 45-58

- Gupta H. & Chakrapani G.J., (2005).** Temporal and spatial variations in water flow and sediment load in Narmada River Basin, India: natural and man-made factors *Environ Geol* 48: 579–589.
- Herry M., & Sichingabula., (1997).** Problems of sedimentation in small dams in Zambia. Human Impact on Erosion and Sedimentation. Proceedings of the Robat Synosuin; 245: 251-9.
- Heusch B., & Milles-Lacroix A., (1971).** Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin. Application au Maghreb. *Mines et Géologie Rabat*, 33, 21-39.
- Hiez G., (1977).** L'homogénéité des données pluviométriques. *Cahiers ORSTOM, Série hydrologie*, vol XIV, n°2, 129-172.
- Horowitz A.G., (2003).** An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations, *Hydrol, Process*, 17, pp:3387-3409.
- Hubert P., Carbonnel J.P., et Chaouche A., (1989).** Segmentation des séries hydrométéorologiques: Application à des séries de précipitations et de débits en Afrique de l'ouest. *Journal of Hydrology* 110 : 349-67.
- Hug M., (1975).** Mécanique de fluide appliqué. Edts Dunod, Paris, France, 1195p.
- Kao S. J., & Liu K.K., (2001).** The Suspended Sediment Load by Using the Historical Hydrometric Record from the Lanyang-Hsi Watershed TAO, Vol. 12, No. 2, 401-414.
- Kassoul M., Abdelgader A., et Belorgey M., (1997).** Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie. *Revue des Sciences de l'Eau* 3, 339–358.
- Kattan Z., Gac J.Y., et Probst J.L., (1987).** Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin – Estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. *J Hydrol* ; 92 : 59-76.
- 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.*, 90 A (3): 227–236.
- Khanchoul K., Boukhrissa Z., Acidi A., et Altschul R., (2010).** Estimation of suspended sediment transport in the Kebir drainage basin, Algeria. *Quaternary International*, doi:10.1016/j.quaint.2010.08.016,1-7.
- Lahlou A., (1994).** Envasement des barrages au Maroc. Casablanca (Maroc) : Éditions Wallada, 1994 ; 277 p.
- Laouina A., (1998).** Dégradations des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb. *Bull Orstom* 1998 ; 18 : 33-53.

- Laouina A., Chaker M., Naciri R. & Nafaa R. (1993).** L'érosion anthropique en pays méditerranéen, le cas du Maroc septentrional, Bull. Assoc. Géogr. Franç., Paris, pp. 384-398.
- Larfi B. & Remini B., (2006).** Le transport solide dans le bassin versant de l'Oued Isser impact sur l'envasement du barrage de Beni Amrane (Algérie). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°05, pp.63-73
- Le Bissonnais Y., (1988).** Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France.196 p.
- Lee AFS., & Heghinian SM., (1977).** A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables - A bayesian approach. Technometrics 19 : 503-6.
- Lee S., (2004).** Soil erosion assessment and its verification using the Universal Soil Loss Equation and Geographic Information System: a case study at Boun, Korea DOI 10.1007/s00254-003-0897-8 Environmental Geology, 45:457-465.
- Lefort P., (1992).** Cours de transport solide dans le lit des cours d'eau. Grenoble : Institut national polytechnique de Grenoble (INP).
- Lekfir A., Benkaci Ali T., et Dechemi N., (2006).** Quantification du transport solide par la technique floue, application au barrage de Beni Amrane (Algérie), Revue des sciences de l'eau, vol. 19, n° 3, p. 247-257.
- Leviandier Th., (1989).** Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux. CEMAGREF, France, 540p.
- López-Tarazón J.A., Batalla R.J., Verica D. et Francke T., (2009).** Suspended sediment transport in a highly erodible catchment: The River Isábena (Southern Pyrenees), Geomorphology 109:210-221.
- Lubès H., Masson J.M., Servat E., Paturel J.E., Kouame B., Boyer J.F., (1994).** Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques-Etude bibliographique. Rapport N° 3 Programme ICCARE. Montpellier : Orstom éditions.
- Meddi H & Meddi M., (2009).** Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. Sécheresse 20 : 57-65. doi: 10.1684/ sec.2009.0169.
- Meddi H., (1993).** Étude du transport solide dans le bassin-versant de Kebir Rhumel. Mémoire de fin d'études, Institut de génie rural, université de BLIDA, Algérie.
- Meddi M., Khaldi A., & Meddi H., (1998).** Étude du transport solide dans le nord de l'Algérie. In : Summer W, Klaghofer E, Zang W, eds. *Proceedings of an International Symposium held at Vienna from « Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes », 13 to 17 July 1998.* IAHS publication n° 249. Wallingford (Royaume-Uni) : International Association of Hydrological Sciences (IAHS).

- Megnounif A., Terfous A. & Bouanani A., (2003).** Production and transport of suspended sediment transport in the Upper-Tafna river basin (North West Algeria). *Rev. Sci. Eau* 16 (3), 369–380.
- Megnounif A., Terfous A., & Bouanani A., (2000).** Étude du transport solide dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). *Colloque Méditerranéen Eau-Environnement*. Alger. 128-132.
- Meguenni K., & Remini B., (2008).** Evaluation du débit solide dans le bassin versant de Herreza (Algérie). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 07, 7-19
- Mendicino G., (1999).** Sensitivity Analysis on GIS Procedures for the Estimate of Soil Erosion Risk Natural Hazards, Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. 20: 231–253.
- Meybeck M., Laroche L., Durr H.H., et Syvitski J.P.M., (2003).** Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers, *Global and planetary change*, 39, pp: 65-93.
- Meyer L. D. & Monke J. E., (1965).** Mechanics of soil erosion by rainfall and overland flow. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.* 8, 572-5.
- Milliman J.D., & Meade R.H., (1983).** World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J. Geol.* 91, 1–21.
- Moliere D R., Evans K.G., Saynor M.J., et Erskine W.D., (2004).** Estimation of suspended sediment loads in a seasonal stream in the wet-dry tropics, Northern Territory, Australia, *Hydrol, Prosses.*, 18, pp: 531-544.
- Morehead M.D., Syvitski J.P., Hutton E.W.H., & Peckham S.D., (2003).** Modeling the temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basins. *Global Planetary Change* 39 (1–2), 95–110.
- Peng G., & Maria J., (2012).** Variations temporelles du transport solide en sédiment dans le bassin d'Oneida, centre de New Yourk, *Journal of Hydrology* 34p.
- Pettitt A. N., (1979).** A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.* 28(2), 126-135.
- Poesen J.W.A., Hook J.M., (1997).** Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environment of southern Europe. in : *Suspended sediment transport in flash floods of the semiarid northern Negev, Israel.* (ed..by. Alexandrov, y., Laronne, J.B.) IAHS pub. no.278.-2003. 346-352.
- Probst J.L., Amiotte Suchet P., (1992).** Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrol. Sci. J.*, 37, 621- 637.
- Probst J.L., & Bazerbachi A., (1986).** Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. *Sci. Géol. Bull.*, 39, 1, 79-98.

- Roose E., Chibbani R., & Bourougaa L., (1999).** Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Bull. ORSTOM, Rés. Eros.*,19, 85-95.
- Rovira A., & Batalla R.J ., (2006).** Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera (NE SPAIN), *Geomorphology* 79: 58–71.
- Rui-Figueroa J.F., (1983).** Les micro-organisations pelliculaires superficielles formées sous pluie simulée sur des sols ferrallitiques de savane (Centre Nord de la Côte d'Ivoire). Comportement hydrodynamique et mécanique de ces pellicules de battance en relation avec la texture, la couverture du sol et la levée du riz pluvial. Thèse Paris. 167p.
- Sadeghi S. H. R., & Mizuyama T., (2007).** Applicability of the Modified Universal Soil Loss Equation for prediction of sediment yield in Khanmirza watershed, Iran, *Journal–des Sciences Hydrologiques*, 52(5).
- Sebbar A., Badri W., Fougrach H., Hsaine M., & Saloui A., (2011).** Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). *Sécheresse* 22 :139-48. doi : 10.1684/sec.2011.0313.
- Serrat P., (1999).** Dynamique sédimentaire actuelle d'un système fluvial méditerranéen: l'Agly (France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences IIA* 329, 189–196.
- Serrat P., Ludwig W., Navarro B., & Blazi J.L., (2001).** Spatial and temporal variability of sediment fluxes from a coastal Mediterranean river: the Têt (France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences IIA* 333 (7), 389–397.
- Sichingabula H.M., (1998).** Factors controlling variations in suspended sediment concentration for single-valued sediment rating curves, Fraser River, British Columbia. Canada, *hydrol, Process.*, 12,pp:1869-1894.
- Smith H.G., (2008).** Estimation of suspended sediment loads and delivery in an incised upland headwater catchment, south-eastern Australia, *Hydrol. Process.* 22, 3135–3148.
- Steegeen A., Govers G., Beuselinck L., Nachtergaele J., Takkon I., & Posen J., (1998).** Variations in sediment yield from an agricultural drainage basin in central Belgium. IAHS publication n° 249. Wallingford (Royaume-Uni): International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 1998 : 177-85.
- Sutherland R.A., & Bryan R.B., (1990).** Flow dynamics and the variability of suspended sediment in a semiarid tropical stream, Baringo district, Kenya. *Geografiska Annaler Series A: Physical Geography* 72 (1), 23–39.
- Tamrazyan G.P., (1989).** Global peculiarities and tendencies in river discharge and wash-down of the suspended sediments – The earth as a whole. *J. Hydrol.* 107 (1–4), 113–131.
- Terfous A., Bouanani A., & Megnounif A., (1999).** Evaluation du transport solide dans le bassin de l'Isser (N-O Algérien) 2^e séminaire maghrébin sur l'eau ; Tizi Ouzou, 28-29 juin.
- Terfous A., Megnounif A., & Bouanani A., (2001).** Étude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). *Rev. Sci. Eau*, 14, 175-185.

- Terfous A., Megnounif A., & Bouanani A., (2003).** Détermination de la dégradation spécifique dans trois bassins versant des régions Méditerranéennes Algériennes, Hydrology of the Mediterranean and semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Monpellier), IAHS Publ. N°278.
- Tixeront J., (1960).** Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. In IAHS Publ., 53: 26-42.
- Touaibia B., Aidaoui A., Gomer D., & Achite M., (2001).** Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi-aride de l'Algérie du Nord. Hydrol. Sci. J. 46 (1), 41-53.
- Touat S., (1989).** Contrôle de la représentativité de l'échantillon de transport solide en suspension. Revue Eaux et Sols d'Algérie N°3 pp 48-54.
- Van Rijn LC., (1984).** Suspended load sediment, journal of hydraulic engineering, vol 110, n°11, p.1613 – 1641.
- Walling D.E., & Webb D.W., (1981).** The reliability of suspended sediment load data: Erosion and sediment transport measurement, Proceedings of the Florence Symposium, Florence:IAHS publ, 133, pp, 177-194.
- Walling D.E., & Webb D.W., (1988).** The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield: some further comments, In Sediment Budgets, Bordas MP, Walling DE (eds), IAHS Publication N°, 174, IAHS Press:Wallingford, UK; 337-350.
- Zhang J.C., Zhang W., Li J.H., Shi Z.G., & Pu S.Y., (2004).** Relation between precipitation and sediment transport in the Dasha river watershed, science Press, Beijing, China Volume 14, Number 2, pp.129-134.