

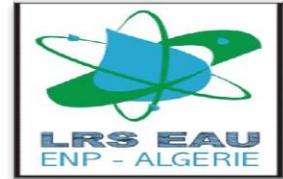
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département d'Hydraulique



Laboratoire de Recherches en Sciences de l'Eau (LRS-Eau)

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
Hydraulique

**Modélisation et quantification du transport
solide en suspension dans les bassins versants de
l'oued BOUMESSAOUD et de l'oued ISSER
(N-O Algérien)**

Présenté par :

M.ZERROUK Nassim
M. AKKOUCHE Atmane
Sous la direction de
M.Salah Eddine Tachi

Présenté et soutenu publiquement le 23/06/2018

Composition du jury :

Président	Mme.Saâdia Benmamar,	Professeur	ENP
Promoteur	M. Salah Eddine Tachi,	MAB	ENP
Co-Promoteur	M. Hamza Bouguerra,	Doctorant	UABT
Examineurs	M. Salim Benziada,	MAA	ENP
	M. Khaled Kouider	MCB	USTHB
	M. Boukhemacha M.A	MCA	ENP

ENP.2018

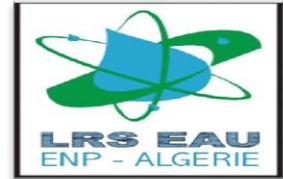
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département d'Hydraulique



Laboratoire de Recherches en Sciences de l'Eau (LRS-Eau)

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
Hydraulique

**Modélisation et quantification du transport
solide en suspension dans les bassins versants de
l'oued BOUMESSAOUD et de l'oued ISSER
(N-O Algérien)**

Présenté par :

M.ZERROUK Nassim
M. AKKOUCHE Atmane
Sous la direction de
M.Salah Eddine Tachi

Présenté et soutenu publiquement le 23/06/2018

Composition du jury :

Président	Mme.Saâdia Benmamar,	Professeur	ENP
Promoteur	M. Salah Eddine Tachi,	MAB	ENP
Co-Promoteur	M. Hamza Bouguerra,	Doctorant	UABT
Examineurs	M. Salim Benziada,	MAA	ENP
	M. Khaled Kouider	MCB	USTHB
	M. Boukhemacha M.A	MCA	ENP

ENP.2018

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À ma Mère qui a tout fait pour que j'en sois là aujourd'hui. La femme qui a tout donné pour que je devienne ce que je suis.

À mon père qui s'est tant sacrifié pour moi

À mon frère et ma sœur

À mon binôme Athmane

À Lyna qui m'a beaucoup aidé, encouragé et qui a été toujours là pour me soutenir.

À mes amis, en particulier Sofiane qui a toujours été comme un grand frère

À toute ma famille du petit au grand

À tous ceux qui m'ont connu de près ou de loin

Z. Nassim

Dédicace

A mes chers parents, qui ont œuvré à la réussite de mes études, par leur soutien, leur amour et leurs précieux conseils ;

A ma chère tante, Choumicha;

A mon frère, Madjid qui m'a assisté durant mes études et ma servi d'exemple ;

A ma sœur, Rachida qui a toujours cru en moi et n'a jamais cessé de m'encourager ;

A mon beau-frère Lyes ;

A mon neveu Rayan et ma nièce Yarra, qui illuminent mes journées ;

A mon binôme Nassim ;

A tous mes amis ;

A toute ma famille ;

A toute la promotion : Hydraulique 2018 ;

A ceux que j'ai de plus chers.

Je dédie ce mémoire en témoignage de mon grand amour, mes sincères reconnaissances et ma gratitude infinie

A. Atmane

Remercîments

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience pour mener à bien ce projet de fin d'études.

En second lieu nous tenons à remercier nos chers parents de nous avoir offert tout ce dont nous avons besoin pour être toujours à la hauteur et réussir dans notre vie.

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur **M Tachi Salah-Eddine** et notre Co-encadreur **M Bouguerra Hamza** pour leur disponibilité, compétences, grande patience et expérience qui ont suivi et dirigé ce travail.*

Un grand merci au Professeur Benmamar, ses qualités humaines, son soutien, sa disponibilité et sa patience nous a aidés à mener ce travail à terme et Professeur Bermad pour son aide pour élaborer notre travail.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont honoré notre soutenance et accepté de lire et d'évaluer ce modeste mémoire.

Enfin, Nous tenons à remercier également tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique et spécialement, ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation, par leurs précieux conseils techniques et pour leur temps mis à notre disposition.

ملخص :

من بين المخاطر البيئية الأكثر خطورة التي تواجه علماء الهيدرولوجيا اليوم هو تحميل الرواسب في مستجمعات المياه بعد التآكل. تحاول هذه الدراسة تحديد كمية تدفقات الرواسب العالقة في وادي بومسعود ووادي يسر في حوض التافنا في شمال غرب الجزائر. يتكون هذا العمل من خطوتين ، في أول عرض لنا نماذج الانحدار التي أجريت على أزواج من تدفق السائل والبيانات تدفق الصلبة من أجل العثور على أفضل العلاقة بين هذين في مقاييس زمنية مختلفة (السنوية ، الموسمية ، الجافة والرطوبة) : وفي الثانية ، استخدمت النماذج المختارة لقياس حمل الرواسب في الحوضين المدرستين مع الأخذ بعين الاعتبار جودة البيانات المستخدمة في هذا العمل.

الكلمات الدالة : التآكل ، النقل الصلب ، تدفق السائل ، الترسيب ، نماذج الانحدار ، مستجمعات المياه ، بومسعود ، يسر ، تافنا

Abstract:

Among the most critical environmental risks facing hydrologists today is the loading of sediments into watersheds following erosion. This study attempts to quantify the fluxes of suspended sediments in Oued Boumessaoud and Oued Isser in the Tafna basin in northwestern Algeria. This work consists of two steps, in the first we presented the regression models performed on the instantaneous pairs of liquid flow and solid flow data in order to find the best relationship between these two at different time scales (annual, seasonal, dry and humid); And in the second, the selected models were used to quantify the sediment load in the two basins studied.

Keywords:

erosion, solid transport, liquid flow, sedimentation, regression models, watershed, boumessaoud, isser, tafna.

Résumé :

Parmi les risques environnementaux les plus critiques auxquels les hydrologues sont confrontés de nos jours, il y a la charge des sédiments dans les bassins versants suite à l'érosion. Cette étude tente de quantifier les flux des sédiments en suspension dans l'oued Boumessaoud et l'oued Isser du bassin de Tafna au nord-ouest de l'Algérie. Ce travail comprend deux étapes, dans la première, nous avons présenté les modèles de régression effectués sur les couples de données instantanées du débit liquide et débit solide afin de trouver la meilleur relation entre ces deux derniers à différentes échelles temporelles (annuelle, saisonnière, sèche et humide); Et dans la deuxième, les modèles choisis ont été utilisés pour quantifier la charge des sédiments dans les deux bassins étudiés.

Mots clés : érosion, transport solide, debit liquide, sédimentation, modèles de régression, bassin versant, boumessaoud, isser, tafn

Table des matières

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE.....	13
INTRODUCTION.....	16
1.1 EROSION	16
1.1.1 DEFINITION.....	16
1.1.2 LES PHASES DE L'EROSION	16
1.1.2.2 <i>Le transport des sédiments</i>	17
1.1.2.3 <i>Le dépôt : la sédimentation</i>	17
1.1.3 LES TYPES DE L'EROSION.....	18
1.1.3.1 <i>Erosion éolienne</i>	18
1.1.3.2 <i>Erosion hydrique</i>	18
1.1.4 LES FORMES DE L'EROSION	20
1.1.4.1 <i>L'érosion en nappe (laminaire ou surface)</i>	20
1.1.4.2 <i>L'érosion linéaire</i>	21
1.1.4.3 <i>Mouvements de masse</i>	24
1.1.4.4 <i>Le sapement des berges</i>	24
1.1.5. L'AMPLEUR DE L'EROSION HYDRIQUE	25
1.1.6 LES IMPACTS DE L'EROSION SUR L'ENVIRONNEMENT	28
1.1.6.1 <i>Perte de sol arable</i>	28
1.1.6.2 <i>Envasement des barrages</i>	29
1.2 TRANSPORT SOLIDE	29
1.2.1 DEFINITION.....	29
1.2.2 LES PRINCIPAUX FACTEURS DES APPORTS SOLIDES D'UN BASSIN VERSANT	29
1.2.3 LE DEBIT SOLIDE	30
1.2.4 LES MODES DE TRANSPORT	30
1.2.6 LES METHODES DE MESURES IN SITU	31
1.2.6.1 <i>La mesure des débits liquides</i>	31
1.2.6.2 <i>La mesure de concentration (prélèvement)</i>	34
1.2.6.3 <i>La mesure des débits solides :</i>	35
1.2.7. QUELQUES TRAVAUX EFFECTUES SUR LE TRANSPORT SOLIDE EN ALGERIE.....	35
CONCLUSION.....	39
INTRODUCTION.....	41
2.1. LES METHODES D'INTERPOLATION ET LES METHODES D'EXTRAPOLATION..	41
2.1.1. INTERPOLATION	42
2.1.2 EXTRAPOLATION.....	44
2.1.2.1 <i>Technique utilisée : La corrélation et la régression</i>	45
2.1.2.2 <i>La construction d'un bon modèle</i>	46
2.1.2.3 <i>Principaux modèles existants</i>	48
CONCLUSION.....	55
INTRODUCTION.....	57

3.1 BASSIN VERSANT DE LA TAFNA.....	57
3.1.1 PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE LA TAFNA :	57
3.1.2 LA SUBDIVISION DE L'OUED TAFNA	57
3.1.3 DELIMITATION DU BASSIN VERSANT DE TAFNA	58
3.2 LES SOUS-BASSINS VERSANTS ETUDIES BOUMESSAOUD ET ISSER	59
3.2.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE	59
3.2.1.1 Oued Boumessaoud	59
3.2.1.2 Oued Isser	59
3.2.2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES :	60
3.2.2.1 Surface, périmètre et longueur du thalweg	60
3.2.2.2 Forme du bassin :	61
3.2.2.3 Etude du relief	62
3.2.2.4 Etude du réseau hydrographique :	69
3.2.3 APERÇU CLIMATIQUE	74
CONCLUSION.....	75
4.1 MODELISATION ET TRANSPORT SOLIDE DANS LES BASSINS VERSANTS ISSER ET BOUMESSAOUD	77
INTRODUCTION.....	77
4.1.1 RELATIONS ENTRE LE DEBIT LIQUIDE, LA CONCENTRATION ET LE DEBIT SOLIDE	78
4.1.2 DONNEES ET METHODOLOGIES	78
4.1.3 ANALYSE DES DEBITS INSTANTANES	79
4.1.4 ANALYSE SAISONNIERE.....	81
4.1.5 ANALYSE EN PERIODE SECHE ET PERIODE HUMIDE.....	83
CONCLUSION	85
4.2 QUANTIFICATION DU TRANSPORT SOLIDE.....	85
INTRODUCTION	85
4.2.1 CALCUL DES APPORTS.....	86
4.2.1.1 Apports liquides	86
4.2.1.2 Apports solides	88
CONCLUSION.....	100
CONCLUSION GENERALE	102
BIBLIOGRAPHIE	104

Liste des tableaux

<i>Tableau 1. 1 Bilan sédimentaire à l'échelle continentale (Musy et Higy, 2003).</i>	27
<i>Tableau 1. 2 Quelques estimations de la dégradation spécifique en Algérie (Baloul, 2012).</i>	27
<i>Tableau 2. 1 Les procédures d'interpolation et leurs significations (Baloul, 2012).</i>	43
<i>Tableau 3. 1 Caractéristiques de forme des oueds BOUMESSAOUD et ISSER.</i>	61
<i>Tableau 3. 2 Répartition altimétrique du sous bassin Isser</i>	63
<i>Tableau 3. 3 Répartition altimétrique du sous bassin Boumessaoud.</i>	64
<i>Tableau 3. 4 Altitude caractéristique des bassins BOUMESSAOUD et ISSER.</i>	66
<i>Tableau 3. 5 Classification du relief selon I_g par l'ORSTOM</i>	67
<i>Tableau 3. 6 Indices de pentes et nature du relief.</i>	67
<i>Tableau 3. 7 Classification du relief selon D_s de l'O.R.S.T.O.M.</i>	68
<i>Tableau 3. 8 La dénivelée et la dénivelée spécifique et leur classe.</i>	68
<i>Tableau 3. 9 Récapitulatif de l'étude du chevelu hydrographique.</i>	73
<i>Tableau 4. 1 Quelques modèles utilisés en Algérie (Ferguson, 1986)</i>	77
<i>Tableau 4. 2 Paramètres de la relation débit solide – débit liquide pour les bassins BOUMESSAOUD et ISSER.</i>	79
<i>Tableau 4. 3 Paramètres des modèles saisonniers pour les bassins de BOUMESSAOUD et ISSER.</i>	81
<i>Tableau 4. 4 Paramètres des modèles périodiques pour les bassins de BOUMESSAOUD et ISSER.</i>	84
<i>Tableau 4. 5 Apports liquides annuels d'oued Isser.</i>	86
<i>Tableau 4. 6 Apports liquides annuels d'oued Boumessaoud.</i>	87
<i>Tableau 4. 7 Apports solides annuels (modèle instantané) d'oued ISSER</i>	88
<i>Tableau 4. 8 Apports solides saisonniers d'oued ISSER</i>	93
<i>Tableau 4. 9 Apports solides saisonniers d'oued Boumessaoud</i>	94
<i>Tableau 4. 10 Apports solides périodiques d'oued ISSER</i>	97
<i>Tableau 4. 11 Apports solides périodiques d'oued BOUMESSAOUD.</i>	98

Liste des figures

<i>Figure 1. 1 Erosion en nappe (source :http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1).....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 1. 2 Erosion en griffes (source : http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1)</i>	<i>22</i>
<i>Figure 1. 3 Erosion en rigoles (source : http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1)</i>	<i>22</i>
<i>Figure 1. 4 Ravins profonds (source : comité scient.2011_Elbarakka.pdf).....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 1. 5 Mouvement de masse (source : http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1).....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 1. 6 Carte de la dégradation des sols dans le monde (Baloul, 2012).</i>	<i>26</i>
<i>Figure 1. 7 Carte du taux de sédiments en suspension transportés (Baloul, 2012).</i>	<i>27</i>
<i>Figure 1. 8 Différents types de transport solide en rivière. (Komercu. M, Onsoy. H, Kankal. M, Karasu. S).....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 1. 9 Schéma des modes de transport, d'après (Graf et Altinakar dans Ildefonseet al. (1997)</i>	<i>31</i>
<i>Figure 1. 10 Le moulinet.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 2. 1 Schématisation de la variation temporaire du débit solide (Baloul, 2012).....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 2. 2 Cercle de transformation de la courbure vers la linéarité (Mosteller et Turkey, 1977). ...</i>	<i>47</i>
<i>Figure 2. 3. Diagnostic par le diagramme des résidus (Helsel D R, Hirsch R M., 2002).</i>	<i>48</i>
<i>Figure 2. 4. Droite de régression linéaire (Oosterbaan, 1994).</i>	<i>50</i>
<i>Figure 3. 1 Délimitation du bassin versant de la Tafna (Bemoussat, 2012).....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 3. 2 Situation géographique des deux bassins versants BOUMESSAOUD et ISSER.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 3. 3 Courbe hypsométrique « Oued Isser »</i>	<i>63</i>
<i>Figure 3. 4 Courbe hypsométrique « Oued Boumessaoud ».....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 3. 5 Carte de pente des deux bassins versants BOUMESSAOUD et ISSER.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 3. 6 Réseau hydrographique des bassins versants BOUMESSAOUD et ISSER</i>	<i>70</i>
<i>Figure 3. 7 Profil en long d'oued BOUMESSAOUD.....</i>	<i>73</i>
<i>Figure 3. 8 Profil en long d'oued ISSER.....</i>	<i>73</i>
<i>Figure 4. 1 Evolution des débits instantanés d'oued BOUMESSAOUD.</i>	<i>80</i>
<i>Figure 4. 2 Evolution des débits instantanés d'oued ISSER.</i>	<i>80</i>
<i>Figure 4. 3 Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour les bassins versants de BOUMESSAOUD et ISSER.....</i>	<i>82</i>
<i>Figure 4. 4 Diagramme ombrothermique.</i>	<i>84</i>
<i>Figure 4. 5 Modèles périodiques reliant les débits solides aux débits liquides pour les bassins versants de BOUMESSAOUD et ISSER.....</i>	<i>85</i>
<i>Figure 4. 6 Apports solides et liquides annuels (modèle instantané) d'oued ISSER.....</i>	<i>91</i>
<i>Figure 4. 7 Apports solides et liquides mensuels (modèle instantané) d'oued ISSER.....</i>	<i>91</i>
<i>Figure 4. 8 Apports solides et liquides annuels (modèle instantané) d'oued BOUMESSAOUD.</i>	<i>92</i>
<i>Figure 4. 9 Apports solides et liquides mensuels (modèle instantané) d'oued BOUMESSAOUD.</i>	<i>92</i>
<i>Figure 4. 10 Apports solides et liquides annuels (modèle saisonnier) d'oued ISSER.</i>	<i>95</i>
<i>Figure 4. 11 Apports solides et liquides mensuels (modèle saisonnier) d'oued ISSER.....</i>	<i>95</i>
<i>Figure 4. 12 Apports solides et liquides annuels (modèle saisonnier) d'oued BOUMESSAOUD.</i>	<i>96</i>

<i>Figure 4. 13 Apports solides et liquides mensuels (modèle saisonnier) d'oued BOUMESSAOUD.....</i>	<i>96</i>
<i>Figure 4. 14 Apports solides et liquides annuels (modèle périodique) d'oued ISSER.</i>	<i>99</i>
<i>Figure 4. 15 Apports solides et liquides mensuels (modèle périodique) d'oued ISSER.</i>	<i>99</i>
<i>Figure 4. 16 Apports solides et liquides annuels (modèle périodique) d'oued BOUMESSAOUD.</i>	<i>100</i>
<i>Figure 4. 17 Apports solides et liquides mensuels (modèle périodique) d'oued BOUMESSAOUD. ..</i>	<i>100</i>

INTRODUCTION

GENERAL

Introduction générale

L'eau est une ressource élémentaire à la vie, elle est indispensable pour l'homme, l'animal et tous types de plantes. De nos jours, elle couvre plus de 70% de l'espace sur la planète inégalement répartie mais seulement 0.7% est accessible à la consommation humaine comme l'alimentation en eau potable, l'irrigation et l'industrie où la production d'énergie nécessite un stockage préalable dans des réservoirs tels les retenues collinaires et les barrages, cette quantité est estimée suffisante mais le besoin en ressources hydriques d'un pays augmente proportionnellement à ses exigences économiques.

De nombreux phénomènes agitent les ressources en eau aujourd'hui auxquels les hydrologues sont confrontés dont l'érosion hydrique dans les bassins versants et le transport solide dans les cours d'eau. Ce transport solide exerce de sérieux problèmes où les écosystèmes peuvent être endommagés par la sédimentation qui est transportée par le ruissellement lorsque la quantité d'eau pluviale est élevée. Les barrages se retrouvent depuis plusieurs années envasés suite à un dépôt de grandes quantités de sédiments dont l'origine semble être l'érosion hydrique des sols et des terres agricoles du bassin versant. Les rejets de sédiments en suspension dans une rivière constituent un paramètre important pour la gestion des projets hydrauliques et un indice de l'état de l'érosion des sols et de l'environnement écologique d'un bassin versant.

De nombreuses études ont été réalisées par différents auteurs afin de créer des modèles reliant les paramètres hydro climatiques (les précipitations, écoulements et/ou transport de matériaux solides. Ces études avaient pour objectif d'expliquer les différents phénomènes de l'écoulement et du transport solide et ainsi mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions ou à des bassins versants où les mesures sont rares, inachevées ou même inexistantes.

Afin de développer des plans efficaces de contrôle de cette érosion et réduire la sédimentation, il est important de quantifier le rendement des sédiments et identifier les zones essentiellement vulnérables à ce sujet. Au cours des dernières décennies, plusieurs modèles de simulation ont été développés pour estimer, quantifier, améliorer la compréhension de l'espace et la variabilité temporelle de l'érosion et identifier les zones qui contribuent fortement aux sédiments au niveau des bassins hydrographiques et sur de vastes zones.

L'objectif principal de ce projet de fin d'études est de quantifier le transport solide et l'érosion spécifique des deux bassins versants de l'oued BOUMESSAOUD et de l'oued ISSER et d'ajuster une relation débit liquide – débit solide par différents modèles régressifs.

Pour la réalisation de ce travail, nous avons suivi le plan ci-dessous :

Le premier chapitre définit les éléments de base du phénomène de l'érosion hydrique et le transport solide ; Le deuxième chapitre apporte une brève littérature des modèles de régression utilisés pour quantifier les sédiments en suspension ; Le troisième chapitre comporte une étude hydrologique détaillée sur les deux sous bassins versants de l'oued Boumessaoud et Isser.

Et enfin le quatrième et dernier chapitre, nous montrons la quantification de la charge de sédiments en suspension et le taux d'érosion spécifique des zones étudiées à différentes échelles.

CHAPITRE 01

EROSION ET

TRANSPORT SOLIDE

Introduction

Depuis plus d'un demi-siècle, la dégradation des ressources naturelles s'est considérablement accentuée dans l'Afrique du nord sous l'effet de multiples contraintes climatiques et anthropiques. Le sol appauvri en végétation devient très vulnérable à l'érosion et à la dégradation suite à l'apparition subite d'averses intenses sous forme de pluies torrentielles. (Bouguerra, 2014).

1.1 Erosion

1.1.1 Définition

On peut définir l'érosion de différentes manières. Certains auteurs la considèrent comme étant l'ensemble des processus qui affectent la roche regroupant: l'altération, le détachement des particules, le transport et le dépôt sous l'effet des actions externes des agents atmosphériques, des eaux et des glaciers, alors que d'autres auteurs la considèrent comme étant seulement le détachement et l'enlèvement des particules du sol déjà ameubli et préparé par l'altération superficielle.

1.1.2 Les phases de l'érosion

L'érosion comporte trois phases étroitement liées : destruction du matériel rocheux (l'ablation du matériel), le transport et l'accumulation des débris (dépôt du sédiment). Elle se manifeste par l'enlèvement, l'arrachement, la mise en solution, puis le dépôt, de particules détachées de la surface du sol et des roches. Le résultat est une ablation qui se traduit par un modelé d'érosion (par exemple le ravin ou l'auge). Sous l'action de la pesanteur, seule (éboulis, éboulement) ou assistée par les agents d'érosion qui sont l'eau, la glace, les vagues et le vent, les débris sont déplacés. Ce transport à plus ou moins longue distance aboutit à des accumulations créatrices de modèles construits (cône de déjection, cordon littoral, dune, moraine) ou fournit la matière première des sédiments lorsque ceux-ci se déposent au fond d'un lac ou d'un océan. L'érosion implique que les constituants des substrats rocheux puissent être mobiles. Son action s'exerce immédiatement sur tous les matériaux meubles (sable, argile, limon, sol, dépôt caillouteux) dès l'instant qu'ils sont exposés à l'air libre, sans protection du couvert végétal. Il n'en est pas de même pour les roches mécaniquement dures (granite, calcaire, grès) pour lesquelles une transformation préalable, la météorisation, s'impose.

1.1.2.1 L'ablation (altération)

La séparation des éléments d'une roche par l'action de phénomènes physiques et chimiques provoque l'altération des roches et donc la destruction du matériel rocheux. C'est donc l'ensemble des processus qui décomposent et désagrègent les roches produisant des grains sédimentaires et des constituants dissous. Elle transforme donc les roches en particules appelées sédiments. Il existe trois mécanismes d'altération :

- Les mécanismes chimiques qui représentent les mécanismes les plus importants en provoquant une modification de la composition chimique ou une dissolution des minéraux de la roche. Pour leur action, Ils nécessitent la présence d'eau.
- Les mécanismes physiques entraînent une fragmentation mécanique de la roche sans que la composition des minéraux ne change.
- Les mécanismes biologiques qui induisent aussi une fragmentation ou une détérioration chimique des roches par l'action d'organismes vivants (animaux, plantes, bactéries).

1.1.2.2 Le transport des sédiments

Pour certains auteurs, c'est là que commence le processus d'érosion. Il s'agit de la mobilisation des produits de l'altération. Les sédiments issus des mécanismes d'altération sont, dans la plupart des cas, transportés de leur lieu de formation vers un bassin d'accumulation (un lac ou un océan). La manière dont ces produits sont transportés dans un fluide dépend de plusieurs facteurs : leur taille, la turbulence du fluide et sa viscosité, nécessitant des agents de transport qui sont le vent, l'eau et la glace.

1.1.2.3 Le dépôt : la sédimentation

Ce processus de dépôt est appelé sédimentation qui correspond à l'accumulation de particules sédimentaires après leur transport par l'action des eaux, des glaciers, du vent ou d'autres agents physiques. Cette dernière entraîne la formation des roches sédimentaires. La granulométrie des particules, la texture des sédiments, la géométrie des dépôts sont d'importants indices sur l'agent de transport, sa vitesse au moment du dépôt, sa direction, ...etc.

Le dépôt de ces sédiments a lieu lorsque la vitesse de l'agent de transport diminue ou lorsque cet agent de transport disparaît (par exemple : fonte de la glace).

- Les particules transportées par un fluide en mouvement (vent, rivière, courant marin) se déposent quand celui-ci ralentit ou s'arrête.
- Les sédiments charriés par les glaciers s'accumulent lorsque la glace fond.
- Le matériel déplacé en masse sous l'action principale de la gravité (éboulement, glissement) se sédimente quand un nouvel état d'équilibre est atteint.

1.1.3 Les types de l'érosion

1.1.3.1 Erosion éolienne

Le vent qui souffle constamment au même endroit finit par modifier la texture du sol, il est généralement actif dans les zones qui souffrent d'un déficit pluviométrique et d'une température importante, c'est le cas des régions arides et semi-arides où il est accentué pendant les saisons sèches. L'érosion éolienne endommage les cultures en soumettant les plantules ou les plants repiqués à l'abrasion, en enterrant les plants ou les semences et en exposant les semences, ce qui peut se répercuter sur la croissance et les rendements végétaux. L'équation de quantification de cette érosion éolienne est sous la forme (Lefkir,2009) :

$$E = f (l, k, C, L, V) \dots\dots\dots 1$$

Avec :

- E : Perte potentielle du sol.
- l : Erodabilité du sol.
- k : Rugosité de la surface du sol par billons.
- C : Facteur climatique.
- L : Distance couverte par le vent sur le champ dénudé.
- V : Couverture végétale équivalente.

Il existe trois modes de transport des particules :

- Déplacement par roulement à la surface du sol pour les particules de 1 à 2 mm de diamètre
- Par saltation pour les particules de 0,1 à 1 mm de diamètre ;
- Par suspension dans l'atmosphère pour des diamètres inférieurs à 0,1 mm.

1.1.3.2 Erosion hydrique

L'érosion hydrique comporte deux processus qui sont le détachement des particules comme phase préparatoire puis leurs transports à un lieu de dépôt. Son facteur moteur réside dans les précipitations.

1.1.3.2.1 Les agents de l'érosion hydrique

a. Les précipitations

Les caractéristiques d'une pluie sont : le volume (pluviosité), la durée (T) et l'intensité (I) qui représente le paramètre le plus important. D'une part, ce dernier paramètre agit sur le débit du ruissellement, et donc sur le détachement et la capacité de transport de l'écoulement et d'autre part, elle influence directement le détachement du sol par l'effet splash (Baloul, 2012).

b. Le ruissellement

Le ruissellement est l'agent le plus important de transport et dans certains cas le principal agent de détachement dès lors que le volume non infiltré dépasse la capacité de rétention superficielle du sol.

Manning a proposé une formule reliant la vitesse d'écoulement à la pente et l'état du sol :

$$V = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot Rh^{2/3} \cdot I^{1/2} \dots\dots\dots 2$$

Avec:

Rh : Rayon hydraulique ;

I : Pente de terrain ;

$\frac{1}{n}$: Coefficient dépendant de la rugosité des parois et du fond du canal.

La limite de déclenchement du ruissellement varie entre 20 mm sur sol sec à 3 mm sur sol humide. Les longues averses généralisées et de faibles intensités tombant en hiver sur des sols saturés des vastes régions couvertes provoquent les plus forts débits de pointe dans les oueds, ces forts débits chassent les sédiments préparés et stockés avant alors qu'un orage avec une intensité moins de 10 mm/h n'engendre pas d'érosion.

Le ruissellement est régi par le sol, la couverture végétale et la topographie.

c. Le sol

Les sols varient énormément en fertilité et en vulnérabilité à l'érosion. L'érodabilité du sol est une mesure de la facilité avec laquelle le sol est érodé. Certains sols résistent bien à l'érosion, d'autres beaucoup moins. L'érodabilité du sol dépend surtout de sa « stabilité structurale ». La stabilité structurale est une propriété qui se mesure par un tamisage dans l'eau et est un indice de la résistance à la désagrégation d'un sol. C'est une mesure de la cohésion des agrégats et de leur capacité à ne pas se désagréger sous l'effet de la pluie (Baloul, 2012).

La stabilité structurale dépend des propriétés qui donnent une cohésion au sol :

- La texture.
- La matière organique.
- Le type de cation dans le sol.
- La stabilité structurale.

d. La couverture végétale

Le couvert végétal est de loin le facteur le plus important. La végétation vivante protège la surface du sol de l'impact des gouttes de pluie, et donc du détachement par le splash; les tiges et troncs forment des obstacles qui ralentissent la vitesse du ruissellement, ce qui réduit le détachement par le ruissellement ainsi que sa capacité de transport. Les racines forment un réseau près de la surface qui tient le sol en place augmentant ainsi sa résistance au détachement. Les feuilles mortes et débris végétaux protègent la surface de l'impact des gouttes, ralentissent le ruissellement, et ajoutent de la matière organique au sol, ce qui le rend plus résistant à l'érosion. Cette dernière est une fonction décroissante de la couverture végétale qui est elle-même fonction croissante de la pluie.

e. La topographie

Trois aspects de la topographie sont à prendre en compte : l'inclinaison de la pente, la longueur de la pente, et la présence de concavités (talweg) et convexités. L'érosion est étroitement liée à ces facteurs qui ne sont pas entièrement indépendants.

Sur les pentes fortes, l'eau de pluie ruisselle vite et cause une érosion grave. Sur les pentes concaves, l'érosion est moins intense par rapport aux pentes convexes, la perte en terre est plus grande que sur pentes rectilignes. La longueur de la pente est moins importante que son gradient et sa forme, mais à précipitation égale, il s'accumule sur une pente plus longue un plus grand volume d'eau et le temps d'absorption par le sol est plus grand donc moins de ruissellement et d'érosion.

1.1.4 Les formes de l'érosion

1.1.4.1 L'érosion en nappe (laminaire ou surface)

Une fois que le sol arrête d'absorber toute la quantité d'eau de pluie, l'excès de cette eau ne pourra plus s'infiltrer et ruissellera donc sur la surface du sol en déplaçant les particules arrachées de cette dernière par la battance de la pluie. Lors de leur écoulement sur les surfaces, la vitesse de l'eau de ruissellement simultanément avec les particules exercent un effet mécanique capable d'entraîner le détachement d'autres particules.

Il est difficile de détecter l'érosion laminaire sur le terrain car les sols perdent une mince couche de façon plus ou moins uniforme mais d'un autre côté, cette érosion laminaire est un processus ou un procédé idéalisé et parfait qui existe rarement dans les champs en raison du microrelief du terrain, l'eau de ruissellement tend à se concentrer et à creuser les surfaces sous forme de rigoles. (Lefkir, 2009).

L'érosion laminaire dépend de 03 facteurs :

- L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement.
- L'énergie cinétique des pluies qui détachent les particules.
- L'état du sol : c'est-à-dire la durée des pluies et/ou l'humidité avant les pluies.



Figure 1. 1 Erosion en nappe (source : <http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1>)

1.1.4.2 L'érosion linéaire

Ce type d'érosion se manifeste dès que les courant d'eau (filets d'eau) se concentrent sous forme de lignes de plus forte pente et exercent ainsi sur le sol une force de cisaillement permettant de creuser des allures de plus en plus profondes dans le sol en arrachant et divisant des particules de plus en plus grosses : graviers, cailloux voir même des blocs. Les petits canaux peuvent être divisés en trois types : griffes (quelques centimètres de profondeur), rigoles (la profondeur dépasse les 10 cm) et ravines (de quelques mètres de profondeur), (Bouguerra, 2014).

a- Erosion en griffes et rigoles

L'érosion en rigole fait suite à l'érosion en nappe par la concentration du ruissellement dans les creux .L'écoulement se concentre d'avantage pour créer à son passage des griffes qui

sont parallèles; par une incision peu profonde, elles font apparaître de petites rigoles à la surface de la terre (Bouguerra, 2014).



Figure 1. 2 Erosion en griffes (source : <http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1>)

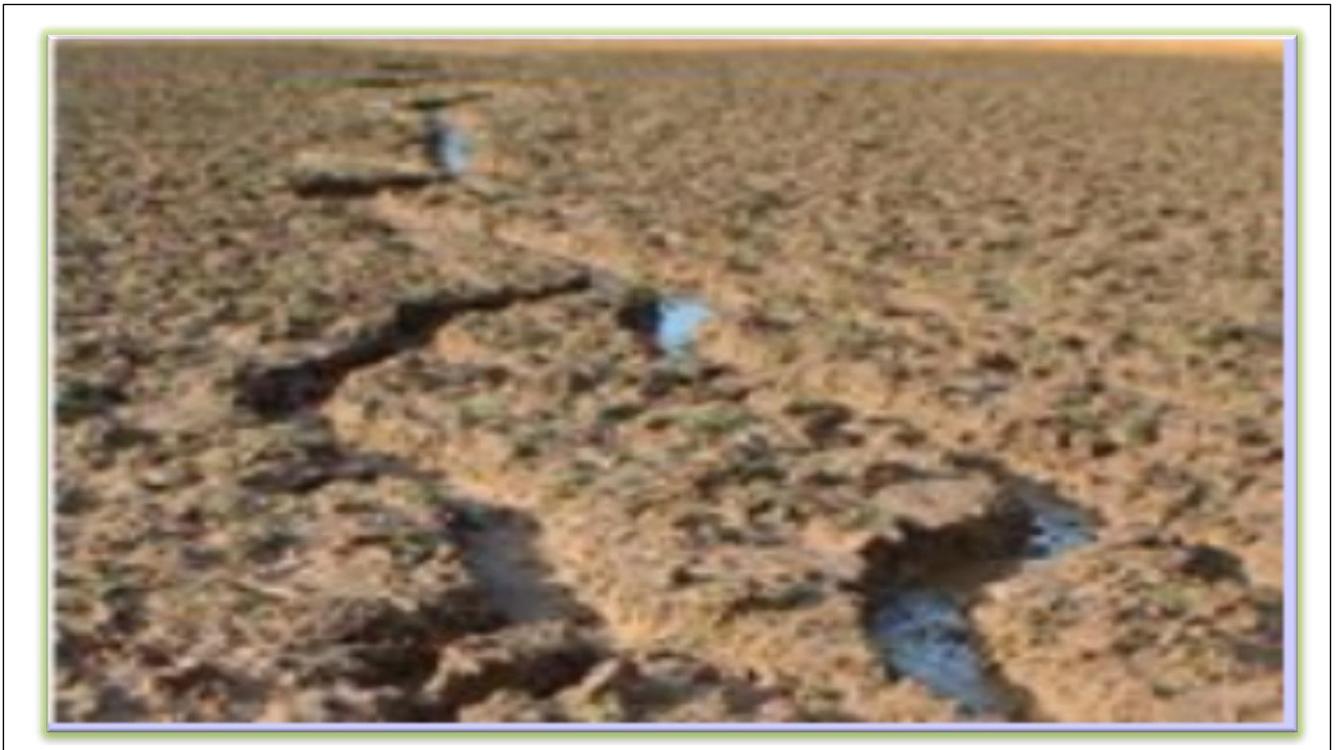


Figure 1. 3 Erosion en rigoles (source : <http://nwww.ma.auf.org/erosion/chapitre1>)

b- Erosion en ravine

L'érosion en ravine est une incision linéaire, cette forme d'érosion est créée par le ruissellement et survient lorsque les rigoles touchent non seulement à l'horizon de surface mais érodent également les horizons sous-jacents à un point tel que les pratiques agricoles ne peuvent effacer les traces.

Le ravinement est un facteur prépondérant dans le processus global de l'érosion, lorsque les ravines creusent les horizons du sol, parfois elles peuvent atteindre un sous-sol plus résistant à l'érosion provoquant l'allongement des ravines vers le haut de la pente.

Tout comme l'érosion en nappe et en rigoles, l'érosion en ravine déplace les sols sous forme de particules ou d'agrégats de façon lente. Pour le déplacement des blocs du sol de façon spontanée se fera par des mouvements de masse et des coulées de boue (Lefkir, 2009)



Figure 1. 4 Ravins profonds (source : comité scient.2011_Elbarakka.pdf)

1.1.4.3 *Mouvements de masse*

Le mouvement de masse du sol est tout déplacement de terre sous l'effet de la gravité selon des formes non définies, comme exemple de ce mouvement : les glissements de terrain, les avalanches de débris, l'éboulement et les coulées de terre, le fluage et les torrents de débris.

Les glissements de terrain sont souvent utilisés comme un terme générique pour inclure toutes les formes de mouvements de masse du sol qui présentent un mouvement perceptible ; Cependant, de nombreux mouvements de masse du sol imperceptibles se produisent également.

Ces conditions sont prononcées dans les zones montagneuses escarpées qui connaissent des précipitations abondantes et prolongées ou une fonte des neiges rapide.

Se présente essentiellement sous formes :

- i. Mouvement humide : causé par l'écoulement et le sapement latérale ; il provoque un état de déséquilibre des berges, ce qui détruit des masses de sol dans le talweg.
- ii. Mouvement à sec : il existe deux types :
 - *Ecrroulement et chute des pierres* : elle est de volume inférieur à 1 dm³, qui tombe brusquement sur les versants de pente assez redressée.
 - *Eboulements* : Ils sont très dangereux, car il s'agit de gros blocs qui se détachent des hauts versants de fortes pentes, et avec leurs masses et se déplacent avec une vitesse extraordinaire jusque au piedmont où ils éclatent.



Figure 1. 5 Mouvement de masse (source : <http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1>)

1.1.4.4 *Le sapement des berges*

La force cinétique reliée à l'écoulement de l'eau peut exercer un stress sur les berges et y éroder les matériaux les plus fragiles. Le sapement des berges provoque l'éboulement de

masses importantes de sols dans les cours d'eau dans lesquels ces masses se fragmentent et s'incorporent à la charge du cours d'eau, à noter que le sapement des berges contribuait aux mouvements de masses surtout dans la zone aval des bassins versants, (Lefkir, 2009).

1.1.5. L'ampleur de l'érosion hydrique

La dégradation des sols est un phénomène mondial qui menace tous les continents comme l'illustre la carte ci-dessous (figure 1.6). La surface érosive mondiale totale est estimée à 25 millions de km², ce qui correspond à 16.8% de la surface totale des continents, environ 28% de cette dégradation est causée par l'érosion éolienne et 56% par l'érosion hydrique qui constitue la principale menace pour les sols en Europe, elle atteint les 260 000 km².

En France, 5 millions d'hectares de terres agricoles sont affectés qui représente environ 17% de la surface totale, contre 0.5 millions d'hectares menacés par l'érosion éolienne, principalement situés au sud du pays, en Belgique, les terres exposées à l'érosion hydrique sont estimées à environ 10%. Une grande partie des terres est déjà touchée au Portugal, en Grèce, en Espagne et en Italie avec 68%, 43%, 41% et 27% respectivement. Et environ 37% des terres cultivées en Angleterre et au Pays de Galles affichent des taux d'érosion supérieurs au seuil de tolérance.

Sur le continent Américain, le Mexique représente le pays souffrant le plus de la dégradation des sols.

La présence de facteurs favorables tels la nature torrentielle des pluies, la forte vulnérabilité des terrains (roches tendres, sols fragiles, pentes raides et couverts végétales souvent dégradés), le surpâturage et l'impact défavorable des activités humaines fait que les pays de la méditerranée ne soient pas à l'écart de ce phénomène. Au Maroc 40% et en Tunisie 45% de la superficie du pays est menacée par ce dernier. En Algérie c'est la partie Ouest qui est la plus touchée avec 47% des terres, suivie par le Centre avec 27% et l'Est avec 26%.

En Turquie on note des pertes de terre de 500 à 600 millions de tonnes /an, en Syrie ces pertes varient de 0.5 à 2 tonnes/km² /an dans de nombreuses régions du pays et dépasse même les 2 tonnes/ha/an dans les chaînes montagneuses côtières, au Liban, les prévisions sont de 0.5 à 0.7 tonnes/km²/an dans les montagnes.

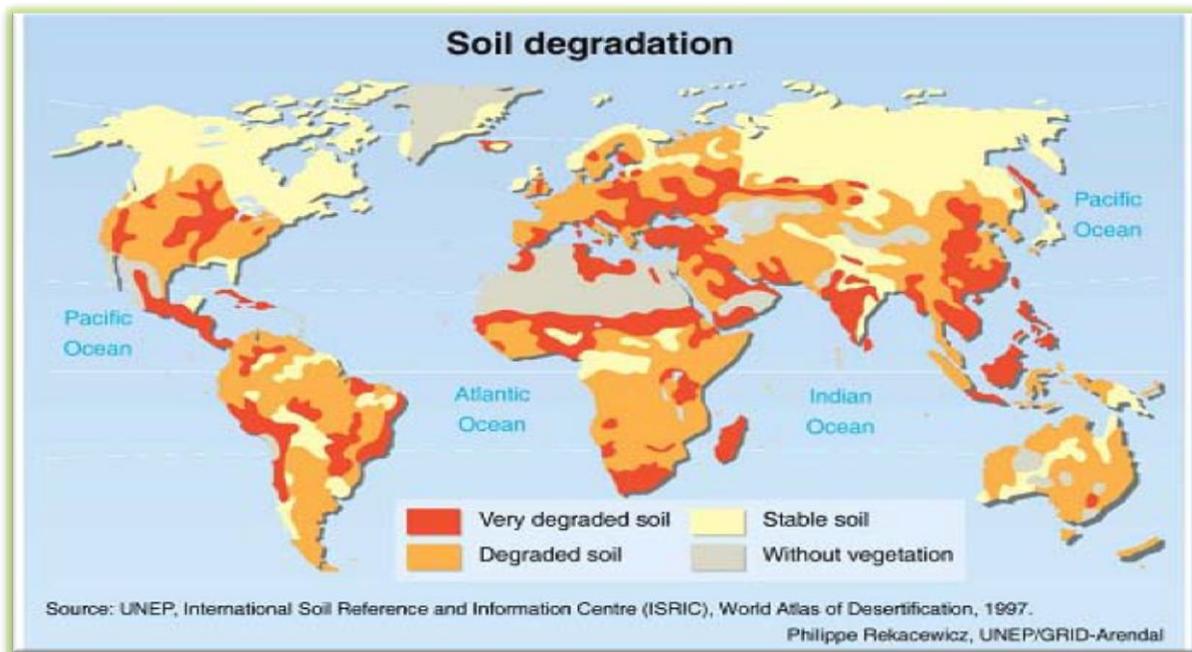


Figure 1. 6 Carte de la dégradation des sols dans le monde (Baloul, 2012).

La carte (figure 1.7) illustre la distribution spatiale du transport pour ce qui est de la suspension des bassins versant à travers le monde et le taux de sédiments en suspension à l'embouchure des plus grandes rivières mondiales.

Les différents phénomènes naturels comme l'érosion sont inégalement répartis à travers le monde, à cause de la sensibilité aux variations des débits dans les cours d'eau et aux caractéristiques des bassins versants. La valeur d'estimation de l'apport solide en suspension mondiale la plus citée varie entre moins de 15 à 20 milliards de tonnes/an, dont 25% est considéré retenue par les barrages.

Les plus grandes valeurs qui figurent d'après la carte correspondent respectivement au cours d'eau de Gange-Brahmapoutre au Bangladesh par 3200 tonnes/km²/an, les îles océaniques par 3000 tonnes/km²/an et le fleuve jaune (Huang He) en Chine par plus de 1700 tonnes/km²/an.

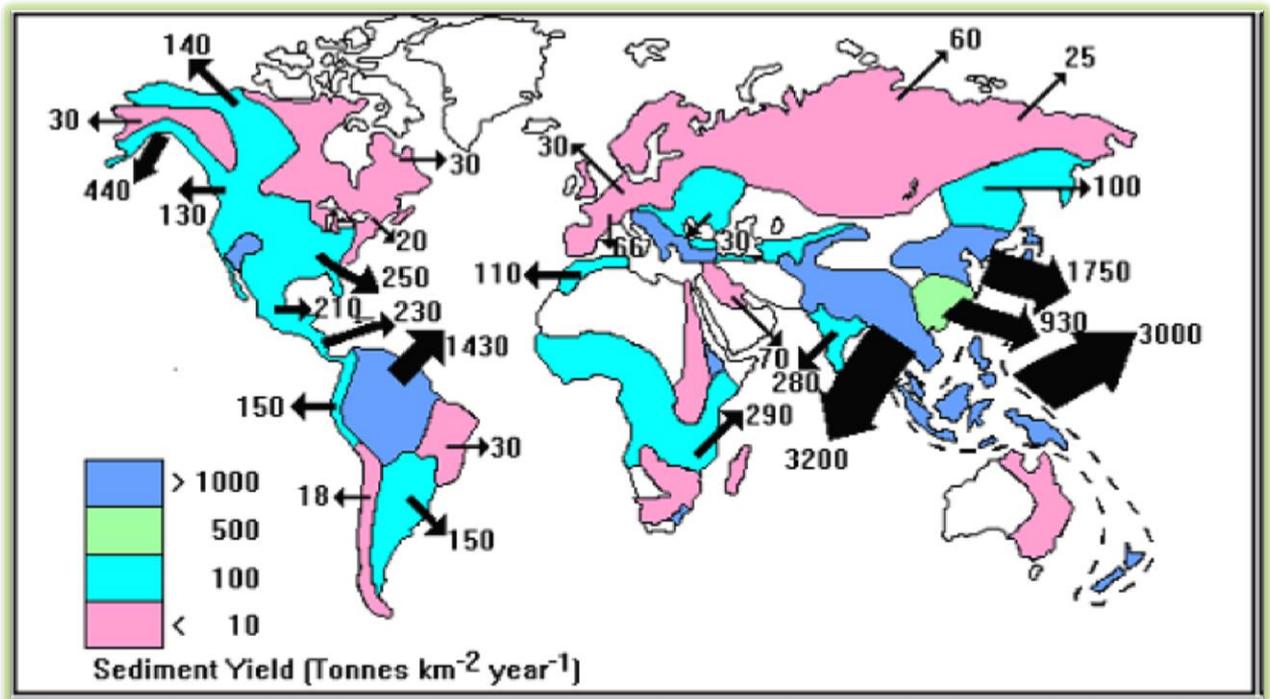


Figure 1. 7 Carte du taux de sédiments en suspension transportés (Baloul, 2012).

On note une multitude de publications concernant la contribution des continents dans le bilan sédimentaire. Ces valeurs sont difficiles à obtenir et manquent de précision. Elles diffèrent d'un auteur à un autre. Ainsi, on se limite à présenter celles citées par Musy et Higy en 2003 dans le tableau qui suit:

Tableau 1. 1 Bilan sédimentaire à l'échelle continentale (Musy et Higy, 2003).

Continent	Charge sédimentaire (t/km ² /an)	Masse sédimentaire (10 ⁶ t/an)
Europe	49.9	230
Afrique	32.6	500
Asie	376.1	6349
Amérique du Nord	83.5	1462
Amérique du Sud	99.9	1788
Australie et Océanie	588.8	3062
Reste du monde	7.5	84
Total	116	13475

Il est à signaler D'après le tableau 1.2, l'hétérogénéité des valeurs publiées par certains auteurs pour un même bassin versant. Ceci s'il n'est pas dû à la différence de l'étendue de la

série de données exploitées, il est le résultat de la différence des méthodes de calcul utilisées pour l'estimation des apports solides ou bien de la fiabilité des données exploitées.

Tableau 1. 2 Quelques estimations de la dégradation spécifique en Algérie (Baloul, 2012).

Bassin Versant		Ass (t/ km2 / an)	Auteurs
30 bassins versant étudiés dont la superficie entre 100 – 3000 km2		>500	(Demmak, A., 1984)
le bassin versant de la Tafna	Tafna	150	(Megnounif et al, 2003) (D'après SOGREAH)
	Sebdou (1988-89 à 1992-93)	1119	(Megnounif et al, 2003)
	Sebdou (1985-86 à 1997-98)	937	(Bouanani, A., 2004)
	Sebdou (1985-86 à 1997-98)	1330	(Ghenim, A., 2008)
	Mouilah (1977-78 à 1992-93)	126	(Terfous et al, 2001)
	Mouilah (1977-78 à 1994-95)	364	(Bouanani, A., 2004)
	Isser (1988-89 à 1997-98)	180	(Bouanani, A., 2004)
	Sikkak (1972-73 à 1989-90)	170	(Bouanani, A., 2004)
Le bassin versant d'Oued mina	Sidi A.E.K.Djilali (73-74 à 94-95)	300	(Touïbia B et al, 2001)
	Oued Al Abtal (1973-74 à 1994-95)	210	
	Oued Abd (1973-74 à 1994-95)	136	(Achite M, Ouillon S., 2007)
	Oued Abd (1973-74 à 1994-95)	117	(Achite M, Meddi M., 2005)
	Oued Haddad (1973-74 à 1994-95)	212	
	Oued Taht (1973-74 à 1994-95)	191	
	Oued Hamara (1973-74 à 1994-95)	65	
Oued Mellah (1975-76 à 1997-98)		373	(Khanchoul K, Jansson M., 2008)
Harreza (Chellif) (1973-74 à 1996-97)		470	(Megueni K, Remini B., 2008)

1.1.6 Les impacts de l'érosion sur l'environnement

1.1.6.1 Perte de sol arable

L'érosion peut être un processus lent et ignoré, par ailleurs, il peut prendre des proportions alarmantes, entraînant une perte énorme de sol arable (fertile). De ce fait, il peut en résulter une réduction du potentiel de production, une réduction de la qualité de l'eau de surface et même l'encrassement des réseaux de drainage. (Lefkir, 2009).

1.1.6.2 Envasement des barrages

Les retenues créées par des barrages sur les cours d'eau naturels sont toutes confrontées au problème de l'alluvionnement. Si la rétention de grandes quantités d'eau lors des crues à un effet protecteur sur les régions sises à l'aval, les matériaux solides déposés dans les retenues peuvent en revanche porter préjudice aux ouvrages annexes, et réduire le cas échéant de manière significative la capacité d'accumulation d'eau. La quantité de sédiments déposés dans les 100 barrages algériens était évaluée à 560 106 m³ en 1995 soit un taux de comblement de 12.5%.

L'envasement présente aussi un grand risque pour la stabilité de l'ouvrage par l'effet qui peut être provoqué par la poussée de la vase (de densité 1.6) dont la valeur progresse au carré de la hauteur. Un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement de quelques organes annexes aux barrages tels que : le vidange de fond, les canaux d'irrigation. (Lefkir, 2009)

1.2 Transport solide

1.2.1 Définition

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion, on peut le définir comme étant la quantité de sédiments, des boues les plus fines aux rochers les plus grossiers, que le courant puisse entraîner. Le transport solide dans les cours d'eau dépend essentiellement de la morphologie du cours d'eau et des terrains traversés. On peut définir deux modes de transport des sédiments : la suspension et le charriage.

1.2.2 Les principaux facteurs des apports solides d'un bassin versant

Les apports solides venant de l'amont, sont fonction essentiellement des facteurs suivants :

- Volume et intensité des précipitations ;
- Géologie et nature du sol ;
- Couverture du sol (végétation, fragment de roches) ;
- Utilisation et exploitation de sol (méthode de culture, exploitation forestières, chantiers de construction) ;
- Géomorphologie et topographie ;
- Réseau hydrographique (pente, forme, dimensions et tracé des canaux) ;
- Ruissellement ;
- Caractéristiques des sédiments (granulométrie, minéralogique...) ;
- Hydraulique du lit (rugosité, rayon hydraulique...)

1.2.3 Le débit solide

Par définition, le débit solide dans une section donnée représente le poids des matériaux en phase solide qui traverse la section pendant un intervalle de temps connu. Généralement, on l'exprime en kg ou en tonnes par seconde suivant son importance (Radjah, 2017).

1.2.4 Les modes de transport

Le débit solide d'un cours d'eau est constitué de deux modes de transport :

- *Le transport en suspension* : concerne les particules fines qui sont maintenues en suspension sous l'effet de la turbulence des eaux (argiles, limons, sables fins).
- *Le transport par charriage* : ou transport de fond : il affecte uniquement les matériaux grossiers de diamètre supérieur à 0,5 mm (sables moyens ou grossiers, graviers, gros blocs) (Radjah, 2017).

Le charriage s'effectue :

- *Par saltation* : sables moyens et grossiers, plus rarement graviers et galets. Les matériaux se déplacent par petits bonds successifs au-dessus du fond.
- *Par roulement sur le fond du lit* : sables et cailloux.
- *Par glissements en vrac au fond* : galets et gros blocs (Radjah, 2017)

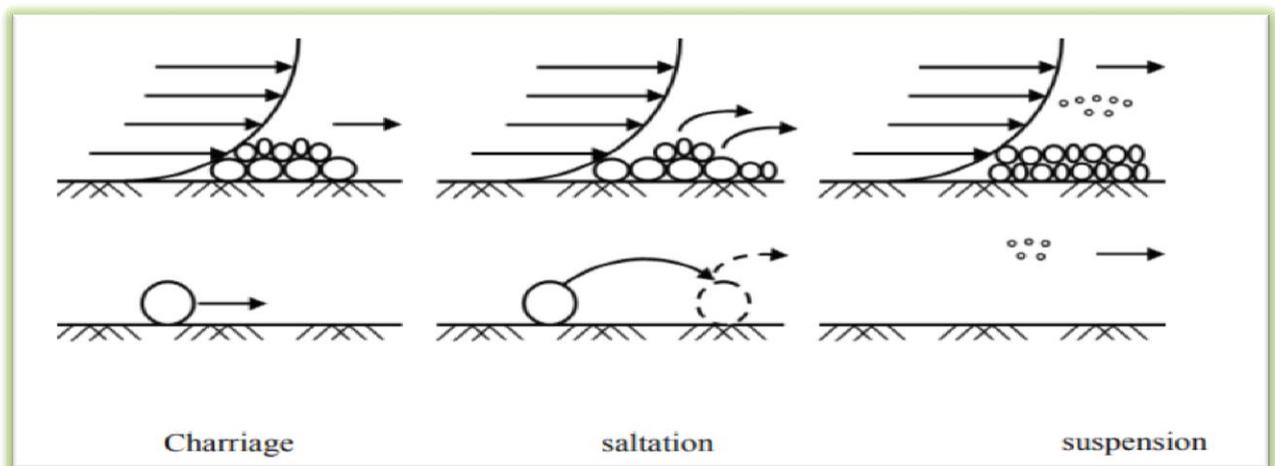


Figure 1. 8 Différents types de transport solide en rivière. (Komercu. M, Onsoy. H, Kankal. M, Karasu. S)

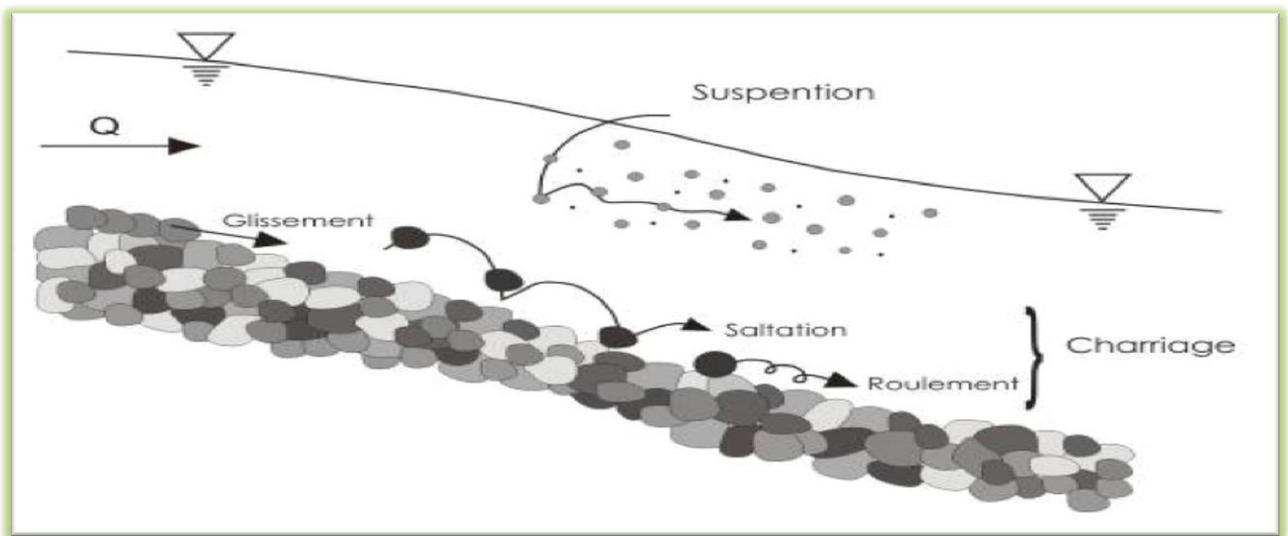


Figure 1. 9 Schéma des modes de transport, d'après (Graf et Altinakar dans Ildefonseet al. (1997)

1.2.6 Les méthodes de mesures in situ

La mesure directe du débit est une opération complexe qui ne peut être réalisée que ponctuellement. Sauf cas d'espèce très particulier, on ne peut pas réaliser un suivi direct et continu du débit. C'est la hauteur d'eau que l'on mesure en continu, le débit est ensuite recalculé à partir d'une relation liant le débit à la hauteur d'eau : la courbe de tarage. Cette relation est propre à chaque site de mesure et peut varier dans le temps, en particulier à la suite d'une crue si celle-ci a creusé ou déposé du sédiment dans le lit du cours d'eau. Il est donc nécessaire de mesurer régulièrement le débit pour définir la relation hauteur-débit et suivre son évolution. Une mesure ponctuelle de débit est appelé jaugeage.

Au niveau de la station hydrométrique de contrôle du bassin versant on effectue ces mesures.

Les données employées dans cette étude ont été collectées après de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) qui gère toutes les mesures nécessaires (hydro-climatologique) des cours d'eau et contrôle les ressources en eau par les stations hydrométriques, postes pluviométriques et par les analyses de la qualité de l'eau.

1.2.6.1 La mesure des débits liquides

Pour mesurer le débit d'un écoulement naturel (cours d'eau, canal, dérivation...), il existe plusieurs méthodes ; parmi elles, les plus utilisées par l'ANRH sont : les méthodes "d'exploration du champ de vitesse" qui consistent à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section, tout en mesurant la surface de la section mouillée. Ces

techniques nécessitent un matériel spécifique (moulinet, perche, saumon, courantomètre...) et un personnel formé à son utilisation.

La vitesse d'écoulement n'est jamais uniforme dans la section transversale d'un cours d'eau. Le principe de cette méthode consiste donc à calculer le débit à partir du champ de vitesse déterminé dans une section transversale du cours d'eau (en un certain nombre de points, situés le long de la verticale judicieusement réparties sur la largeur du cours d'eau). Parallèlement à cette exploration du champ de vitesse, on relève le profil en travers du cours d'eau en mesurant sa largeur et en effectuant des mesures de profondeur.

Le débit Q (m^3/s) s'écoulant dans une section d'écoulement S (m^2) d'une rivière peut être défini à partir de la vitesse moyenne V (m/s) perpendiculaire à cette section par la relation :

$$Q = V.S \dots\dots\dots 3$$

Parmi les nombreuses méthodes d'exploration du champ de vitesse, les jaugeages au moulinet.

Le jaugeage au moulinet :

Le moulinet hydrométrique permet de mesurer la vitesse ponctuelle de l'écoulement. Le nombre de mesures sur une verticale est choisi de façon à obtenir une bonne description de la répartition des vitesses sur cette verticale. De manière générale, on fera entre 1, 3 ou 5 mesures suivant la profondeur du lit.

Le jaugeage au moulinet consiste à explorer le champ des vitesses dans la section à travers laquelle on veut mesurer le débit liquide.



Figure 1. 10 Le moulinet

La vitesse d'écoulement est mesurée en chacun des points à partir de la vitesse de rotation de l'hélice situé à l'avant du moulinet (nombre de tours n par unité de temps). La fonction $v = f(n)$ est établie par une opération d'étalonnage (courbe de tarage du moulinet). Suivant le mode opératoire adopté pour le jaugeage, le moulinet peut être monté sur une perche rigide. Dans le cas du montage sur perche, le moulinet manœuvré directement par l'opérateur placé dans l'écoulement (jaugeage à gué), la perche reposant sur le fond du lit du cours d'eau. Cette méthode est utilisable dans des sections de profondeur inférieure à 1 mètre et avec des vitesses d'écoulement inférieures à 1 m/s.

Finalement, le calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement sur l'ensemble de la section S de longueur L se fait par intégration des vitesses V_i définies en chacun des points de la section de profondeur P_i (variant pour chaque verticale de 0 à une profondeur maximale P) et d'abscisse X_i (variant pour chaque verticale de 0 à L).

La formule à utiliser pour calculer les vitesses à partir du nombre de tours par seconde de l'hélice est:

$$V = a n + b \dots\dots\dots 4$$

Avec :

V : Vitesse du courant en m/s.

n : Nombre de tours d'hélice par seconde.

a : Pas réel de l'hélice en m.

b : Vitesse dite de frottement en m/s .

a , pas réel de l'hélice, a une valeur différente pour chaque hélice : on la détermine par tarage. On n'appelle pas nominal une valeur arrondie de a caractérisant un grand nombre d'hélices. Le pas nominal est donc une caractéristique de constructeur et le pas réel un résultat de mesure.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si } n < 1.08 \Rightarrow V = 0.2257 n + 0.04 \\ \text{Si } n \geq 1.08 \Rightarrow V = 0.2590 n + 0.004 \end{array} \right\} \dots\dots\dots 5$$

Après avoir réalisé le jaugeage et les calculs, on peut établir les courbes de tarage du moulinet soit manuellement ou par le logiciel HYDRACCESS ; Ce logiciel traite à la fois les données d'hydrométrie (débit liquide, débit solide, concentration solide, salinité et conductivité) et de climatologie (pluviométrie, évaporation, vent (direction et vitesse), humidité relative et température).

1.2.6.2 La mesure de concentration (prélèvement)

Une large gamme d'options est aujourd'hui disponible pour mesurer la quantité des sédiments en suspension transportés par un cours d'eau. La méthode la plus rigoureuse pour obtenir une estimation de la charge solide en suspension consiste en la mesure de la concentration par prélèvement d'eau, on mesure une concentration en Matières En Suspension (MES) qui correspond à la quantité de matériaux en suspension ; Elle s'exprime en milligrammes par litre (mg/l) d'eau brute.

1.2.6.2.1 Les techniques de prélèvement

a. Le lieu de prélèvement :

- *Période de crue* : le prélèvement se fait sur la bordure de l'oued (à 25 cm de profondeur).
- *Période normale* : le prélèvement se fait à mi-profondeur.

b. Le matériel de prélèvement :

Une fiole généralement de 500 ml.

c. Le nombre de prélèvement par jour :

- *Période de crue* : fonction de la hauteur (chaque 10 cm) 4 à 5 prélèvement par jour.
- *Période normale* : un seul prélèvement par jour.

d. Le laboratoire :

- Placer le buvard dans l'étuve pour dégager l'humidité.

- On mesure le poids du buvard (P)
- On mesure le volume eau + boue (V)
- Décantation (de 15 à 35 *min*)
- Faire chauffer le buvard + boue et mesurer leur poids (B)
- On fait le calcul du poids de la boue :

$$P = B - p \dots\dots\dots 6$$

- On calcule la concentration :

$$C = \frac{P \cdot 1000}{V} \dots\dots\dots 7$$

1.2.6.3 La mesure des débits solides :

Pour mesurer le débit solide on applique la relation suivante :

$$Q_S = Q_L * C \dots\dots\dots 8$$

Avec :

Q_S : Débit solide

Q_L : Débit liquide

C : Concentration

1.2.7. Quelques travaux effectués sur le transport solide en Algérie

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

Megnounif et al, (2003)

Les auteurs se sont intéressés dans leur travail aux sédiments transportés en suspension par oued Tafna à Beni-Bahdel. Pour la période allant septembre 1988 à Aout 1993. L'analyse de variabilité de la charge en suspension montre une production très forte en automne mais d'une faible ampleur au printemps. En automne le flux des matières solides en suspension représente 44% de flux annuel estimé à 28600 tonnes, au printemps malgré l'augmentation des débits (60% de l'apport annuel) la charge en suspension diminue considérablement. La production du ruissellement superficiel en matières solides représente 62% du flux annuel alors que l'érosion du cours d'eau contribue par 38%..

Megnounif et al, (2004)

Cette étude a pu mettre en évidence le rôle des crues dans la genèse et le transport des sédiments en suspension dans un petit bassin versant Méditerranéen. Les auteurs se sont intéressés à l'Oued Sebdou, cours d'eau principal drainant le bassin versant de la Haute-Tafna, situé au nord-ouest algérien. Pour ce faire, ils ont étudié, pour différents épisodes de crue, le mode d'évolution de la charge solide en fonction des débits liquides en s'appuyant sur l'analyse des hystérésis. Les résultats obtenus montrent que le transport des matières solides en suspension se fait principalement durant les épisodes de crue. En effet, sur un apport annuel moyen en eau, estimé à 30,9 millions de m³, les crues contribuent par 64%. Cependant, elles transportent la quasi-totalité, soit 93%, de la charge solide en suspension évaluée en moyenne annuelle à 286 000 tonnes.

Achite et Meddi, (2004)

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

Achite et Meddi, (2005)

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

Larfi et Remini, (2006)

L'étude est basée sur les données d'observation recueillies au niveau de la station de Lakhdaria s'étalant sur la période de 1984 à 1997. Ils concluent que les volumes les plus importants en transport solide se concentrent durant la période allant de décembre à mars

(parfois même jusqu'à avril). Cette étude montre que la quantification du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Isser dont les résultats semblent très cohérents avec les mesures directes de l'envasement dans la retenue de Béni Amrane.

Ghenim et al, (2007)

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

Cherif et al, (2009)

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

Bouchelkia et al, (2011)

L'étude consiste à évaluer le transport solide en suspension dans le bassin versant de l'oued Mouillah. Le principe adopté est basé sur des données hydrométriques des stations de jaugeage de Sidi Belkheir contrôlant le bassin versant de l'oued Mouillah, et des analyses saisonnières et annuelles sur la période 1975-2000, et a permis de définir une méthode appropriée d'estimation des apports solides. Cette approche a permis de quantifier le transport solide en suspension, les résultats obtenus ont montré que les apports solides les plus

abondants et réguliers sont en hiver. Ils attestent que le bassin versant de l'oued Mouillah est d'une érodabilité modérée, puisque la valeur maximale annuelle des apports solides trouvée est de $7,53 \cdot 10^4$ t.

Touaibia et Ghenim, (2011)

L'étude se base sur les données de mesures instantanées de débits liquides et de concentration des sédiments en suspension enregistrées au cours de la période allant de 1973 à 1994 relevées à la station de Medjez. Cette étude examine 9 approches de quantification statistique de l'érosion pour adopter celle qui estime l'apport solide avec un minimum d'erreur relative. Les deux modèles les plus adaptés considèrent un découpage par crue ou un découpage mensuel. La méthode qui tient compte uniquement des crues donne le meilleur résultat avec une erreur relative de 23%.

Hallouz et al, (2012)

Le travail est basé sur les données du bassin versant de l'Oued Mina. Les auteurs ont entamé une étude pour mieux comprendre le phénomène des exportations de matières solides en suspension véhiculées par les affluents du bassin de l'Oued Mina (Oued Cheliff), et de quantifier le flux des sédiments susceptibles de se déposer dans le barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda (capacité de stockage de 153 millions de m³ (mis en service en Février 1978). Les transports solides en suspension dans le bassin versant de l'Oued Mina se déroulent essentiellement en automne, et secondairement au printemps, avec une plus faible ampleur. La charge spécifique moyenne de l'oued Mina est de 211 t/km²/an.

Tachi SE, (2017)

Ce travail a pour objectif la proposition d'un modèle basé sur les réseaux de neurones régularisé, ce dernier permet une estimation efficace et rapide de la charge sédimentaire dans deux bassins ; le bassin d'Isser et le bassin de Sebaou.

L'étude a été portée en premier lieu sur la rivière Isser, en amont du barrage Beni Amran, au nord de l'Algérie, en utilisant 30 ans de données instantanées de débits solides et liquides (1971-2001). En deuxième étape, elle a été appliquée sur la rivière Sebaou à l'aval du barrage Taksebt; unique barrage dans le bassin versant de la Grande Kabylie. L'analyse a été effectuée en considérant les débits liquides et solides enregistrés dans une période de 9 ans (1978- 1987). Les deux techniques ont été évaluées et comparées à l'aide du coefficient de détermination (R^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Les résultats obtenus à l'issue de ces deux étapes indiquent que le réseau de neurone régularisé par le critère d'arrêt prématuré

donne de meilleurs résultats et ce, dans les deux zones étudiées, on constate également que cette technique donne de meilleurs résultats dans le cas de la rivière d'Isser.

Conclusion

Depuis longtemps, la description qualitative des formes d'incision et des formes d'accumulation a montré l'importance du jeu de l'érosion dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans les pays méditerranéens. Une primordiale quantification devrait être tentée par des méthodes précises et économiques.

CHAPITRE 02

METHODES DE

REGRESSION

Introduction

Depuis les années 1970, et pour diverses raisons l'intérêt de l'estimation et de la quantification du transport solide en suspension s'est accru. On peut citer plusieurs exemples comme l'évaluation de l'érosion et de la perte en sol, l'évaluation de l'impact environnemental, le traitement des eaux et l'association des polluants aux particules sédimentaires ainsi que l'estimation des volumes morts des retenues de barrages et leur influence sur la sous ou la sur estimation des capacités de ces dernières (Baloul, 2012).

Généralement, on peut déduire la charge solide à partir des mesures directes qui sont le moyen le plus fiable mais elles restent très coûteuses et non disponibles au niveau de tous les cours d'eau et aussi difficiles à opérer lors des événements importants, peu fréquents et imprévisibles lorsqu'ils caractérisent les régions arides et semi-arides. On peut également déduire cette charge à partir des équations du transport solide, ces dernières, nécessitent des informations sur les caractéristiques des particules et sur l'écoulement. Elles doivent tenir compte des conditions morphologiques et hydroclimatiques de la région d'étude (Baloul, 2012).

Deux approches peuvent être utilisées comme moyen de substitution vu la problématique suscitée : une approche spatiale et une autre ponctuelle, la première approche a pour but d'estimer le transport solide au niveau d'un site non équipé à partir d'autres sites voisins disposants de stations de mesure, tandis que la deuxième, consiste à étendre la série de mesures afin de reconstituer le passé ou de prévoir le future.

La charge solide totale est la résultante d'une charge en suspension et d'une charge de fond (charriage). Dans notre travail, on s'intéresse uniquement au transport solide en suspension. Quoi que le transport solide en charriage joue un rôle considérable dans l'équilibre et la stabilité des lits fluviaux, il n'est pas mesuré et son estimation varie de 15 à 25% de la suspension (Baloul, 2012).

2.1. Les méthodes d'interpolation et les méthodes d'extrapolation

Le flux sédimentaire pour une période de temps déterminée (mois, année ou période de crue) pour une rivière donnée est estimé à partir du traitement des données du transport solide.

On peut regrouper les méthodes de traitement des données en 02 grandes classes : les méthodes d'interpolation et les méthodes d'extrapolation.

2.1.1. Interpolation

On obtient à partir des mesures effectuées au niveau des stations hydrométriques qui siègent au niveau des cours d'eau la concentration des sédiments en suspension et le débit liquide. L'apport solide en suspension $As (g)$ est calculé par intégration du produit du débit solide en suspension $Qs (g/s)$ dans le temps $t(s)$ comme schématisé sur la figure 2.1. (Baloul,2012)

$$As = \int_0^t Qs (t) . dt \dots\dots\dots 9$$

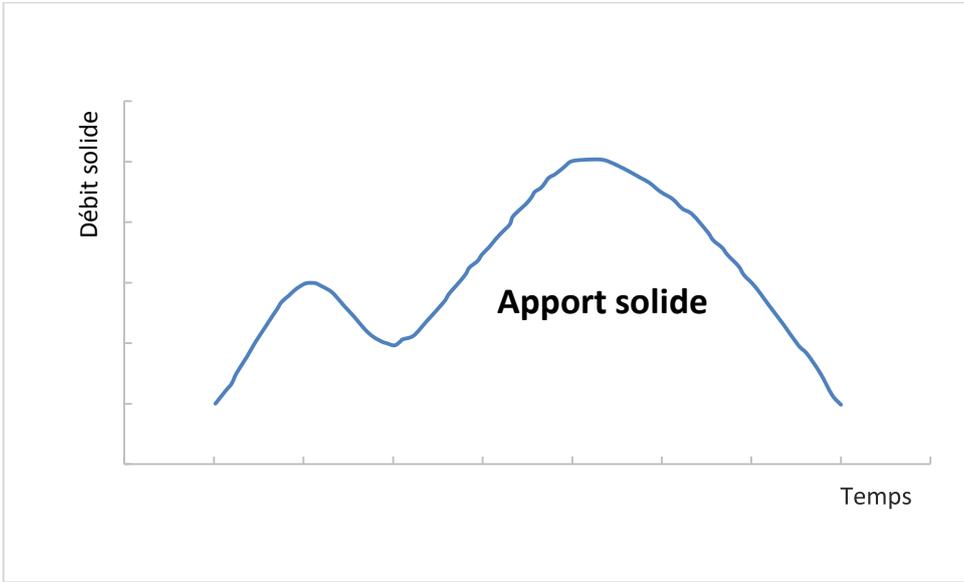


Figure 2. 1 Schématisation de la variation temporaire du débit solide (Baloul, 2012).

Cependant la mesure directe du débit solide n'est pas possible, l'apport solide se calcule donc par le produit du débit liquide $Q (l/s)$ et la concentration (g/l) (Baloul, 2012) :

$$As = \int_0^t C(t) . Q (t) dt \dots\dots\dots 10$$

En considérant la variation linéaire du débit solide dans le temps, l'apport solide moyen pour la période entre les temps t_i et t_{i+1} est donné par la relation (Baloul, 2012):

$$As_i = \frac{1}{2} (Q_i C_i + Q_{i+1} C_{i+1}) (t_{i+1} - t_i) \dots\dots\dots 11$$

La somme arithmétique des apports solides élémentaires pendant une période donnée (mois, saison, année et crue) donnera l'apport solide de cette période. Le tonnage spécifique ou l'apport spécifique exprimé en tonne par kilomètre carré (T/km²), est obtenu en divisant

l'apport total par la surface du bassin versant couverte par la station de mesure. Ceci permet de comparer les valeurs obtenues sur différents bassins de tailles différentes (Baloul, 2012).

De même l'apport liquide correspondant est donné par la relation:

$$Al_i = \sum_0^t \frac{1}{2} (Q_i + Q_{i+1})(t_{i+1} - t_i) \dots \dots \dots 12$$

Dans la littérature il existe six procédures de calcul de la charge solide données dans le tableau suivant (Tableau 2.1) :

Tableau 2. 1 Les procédures d'interpolation et leurs significations (Baloul, 2012).

Méthode	Procédure numérique	signification
1	$K \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \right) \left(\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n} \right)$	C'est le produit de la concentration moyenne de n échantillons et du débit moyen des mêmes échantillons multiplié par un coefficient tenant compte du temps.
2	$K \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i Q_i}{n} \right)$	Somme de la moyenne des produits des couples (Q, C) de chaque intervalle multipliée par un coefficient tenant compte du temps.
3	$K \overline{Q_r} \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \right)$	C'est le produit d'un facteur temps, le débit moyen et le rapport des concentrations par le nombre de mesures.
4	$\frac{k \sum_{i=1}^n (C_i Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \overline{Q_r}$	Combinaison entre la concentration moyenne pondérée par le débit multiplié par le débit liquide moyen.

5	$K \sum_{i=1}^n (C_i \overline{Q_{Pi}})$	C'est la somme des produits de la concentration d'échantillon et le débit moyen pour un intervalle.
6	$K \sum_{i=1}^{12} (\overline{C_m} \overline{Q_m})$	C'est la somme sur 12 mois des produits entre les concentrations moyennes mensuelles et les débits moyens mensuels.

Avec :

C_i = Concentration instantanée mesurée ;

Q_i = Débit instantané mesuré ;

Q_r = Débit moyen durant la période de mesure ;

Q_{pi} = Débit moyen pour l'intervalle entre les mesures ;

$\overline{C_m}$ = Concentration moyenne mensuelle ;

$\overline{Q_m}$ = Débit moyen mensuel ;

K = Facteur de conversion tenant compte la période de mesure ;

n = Nombre de mesures.

Afin d'identifier la méthode qui évalue avec fiabilité l'apport solide en suspension. Plusieurs discussions montrent que les résultats obtenus en utilisant ces procédures présentent un faible degré de dispersion (mesuré par le coefficient de variation) conjugué à une bonne estimation de l'apport solide (mesuré par l'erreur) et vice versa. Ils concluent que l'intensification des prises d'échantillons influe largement sur la qualité d'estimation par les différentes méthodes. De même, le résultat obtenu par l'application d'une méthode ou d'une autre doit être interprété avec précaution. (Baloul, 2012).

2.1.2 Extrapolation

Lorsqu'on a des périodes non échantillonnées, on opte à extrapoler (étendre) les mesures du transport solide disponibles par la recherche d'une relation continue entre la concentration des sédiments en suspension ou le débit solide, et le débit liquide sous la forme : $C = f(Q)$ ou $QS = f(Q)$ dite courbe de tarage ou courbe d'estimation de la charge solide en suspension, plusieurs auteurs l'ont définie comme étant la courbe qui explique la relation moyenne entre le débit solide ou la concentration et le débit liquide. Elle peut être classée selon la période

des données de base qui la définissent ou selon le type du débit solide qu'elle représente (charriage ou suspension).

La relation entre les deux variables aléatoires (C, Q) est une approche purement statistique. Elle permet d'une part de caractériser le lien entre ces deux variables et d'autre part elle offre la possibilité d'adopter une variété de modèles déterminés par les techniques de régression (Baloul, 2012).

La recherche d'une telle relation n'est qu'une approche de modélisation du phénomène. Un modèle est une représentation schématique d'un phénomène permettant de mieux l'étudier ou d'analyser son influence. Cette représentation peut être physique ou mathématique.

2.1.2.1 Technique utilisée : La corrélation et la régression

Le but d'une corrélation est de détecter la tendance entre deux variables ou plus. Elle est exprimée par le coefficient de corrélation linéaire qui traduit le degré de dépendance entre deux variables.

Le paramètre de corrélation le plus utilisé est le « r » de Pearson appelé coefficient de corrélation linéaire. Il mesure cette association linéaire, il est donné par la formule (Baloul, 2012):

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})}{s_x} \frac{(y_i - \bar{y})}{s_y} \dots\dots\dots 13$$

Avec :

$$Cov(x, y) = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \dots\dots\dots 14$$

$$Var(x) = S_x^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \dots\dots\dots 15$$

$$Var(y) = S_y^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \dots\dots\dots 16$$

Où :

$Cov(x, y)$: La variance.

$Var(x)$: La variance de x .

$Var(y)$: La variance de y .

- $r = +1$ indique que x et y sont en parfaite relation linéaire positive et que y augmente proportionnellement avec x ;
- $r = -1$ indique une relation linéaire négative ;

- $r = 0$ implique une relation non linéaire ;

La dépendance n'est pas liée forcément à la corrélation puisque r n'évalue qu'une dépendance linéaire. Dans le cas contraire c'est le coefficient de détermination R^2 qui reflète la qualité du modèle.

L'une des extensions de la corrélation est la régression, elle fournit des équations permettant d'obtenir une variable à laquelle on s'intéresse (variable dépendante) à partir d'une ou plusieurs variables observées de façon courante (variable indépendante). Ainsi, la régression est un bon outil pour la prédiction de la concentration en sédiment en suspension C (g/l) à partir du débit liquide Q (m³/s).

Récemment, la technique la plus utilisée pour la régression est la méthode des moindres carrés. Elle consiste à trouver une expression mathématique d'une relation entre deux variables de façon que la somme des carrés des écarts de y à la ligne de régression sera minimum (Baloul, 2012).

En se basant sur la relation qui existe entre deux variables, il est possible d'avoir plusieurs types de modèles. Ceux qui sont connus et disponibles comme fonctions standards des courbes d'ajustement d'Excel, d'autres nécessitent une programmation et une exploitation du complément Microsoft Excel Solver ou l'utilisation de logiciels spécifiques.

2.1.2.2. La construction d'un bon modèle

Généralement, on retient le modèle avec un coefficient de détermination R^2 élevé pour avoir le meilleur mais ceci n'est pas toujours adéquat, il faut suivre plusieurs étapes pour pouvoir aboutir au bon modèle :

Selon le nuage de points, on peut détecter si les points semblent alignés suivant une ligne droite ou non.

- Si la relation semble non linéaire, il faut chercher un nouveau x soit par transformation de x ou changer une autre variable.
- Si la variation de y semble différente pour différent niveau de x (variances non constantes) ou même les deux, cela nécessite une transformation de x ou de x et y dans le but d'avoir une régression linéaire. Mosteller et Turkey 1977 ont établi une méthode qui aide au choix du type de la transformation (figure 2.2.) : une transformation avec $\theta > 1$ peut être utilisée pour rendre la pente positive plus symétrique. Allant en haut on fait monter l'échelle de x par augmentation de sa

puissance (x^2, x^3 etc.) et allant en bas on fait baisser x par l'application d'une transformation avec $\theta < 1$ ($\log x, \sqrt{x}, 1/x$, etc.) (Baloul, 2012).

θ : Est l'exposant de la force soit : 1, 2, 3 ...pour $\theta > 1$, ou 0, 1/2, 1/3 ...pour $\theta < 1$

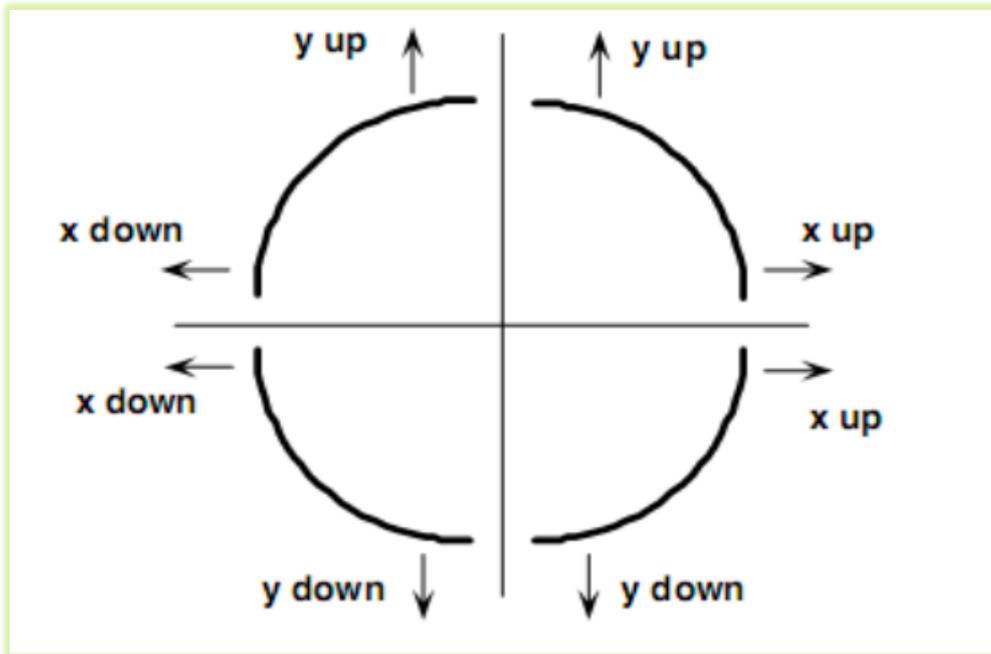


Figure 2. 2 Cercle de transformation de la courbure vers la linéarité (Mosteller et Turkey, 1977).

Après application des transformations convenables, les calculs par la méthode des moindres carrés doivent être repris pour les variables transformées, faire sortir le coefficient de détermination R^2 , les paramètres de la droite de régression linéaire et voir si les résultats sont raisonnables. Vérifier si les hypothèses initiales liées aux termes d'erreurs sont vérifiées (distribution symétrique suivant une loi normale, variance constante, les erreurs ε_i indépendantes). La vérification de ces hypothèses et la violation du modèle se détectent visuellement sur le diagramme des résidus qui représente la dispersion de n points constituant les valeurs prédites (en abscisse) et les résidus ε_i (en ordonnée).

ε_i : Est la différence entre les vraies valeurs observées y_i et les prédictions ponctuelles de la régression.

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y} \dots \dots \dots 17$$

La figure suivante montre les différents cas rencontrés de diagrammes des résidus :

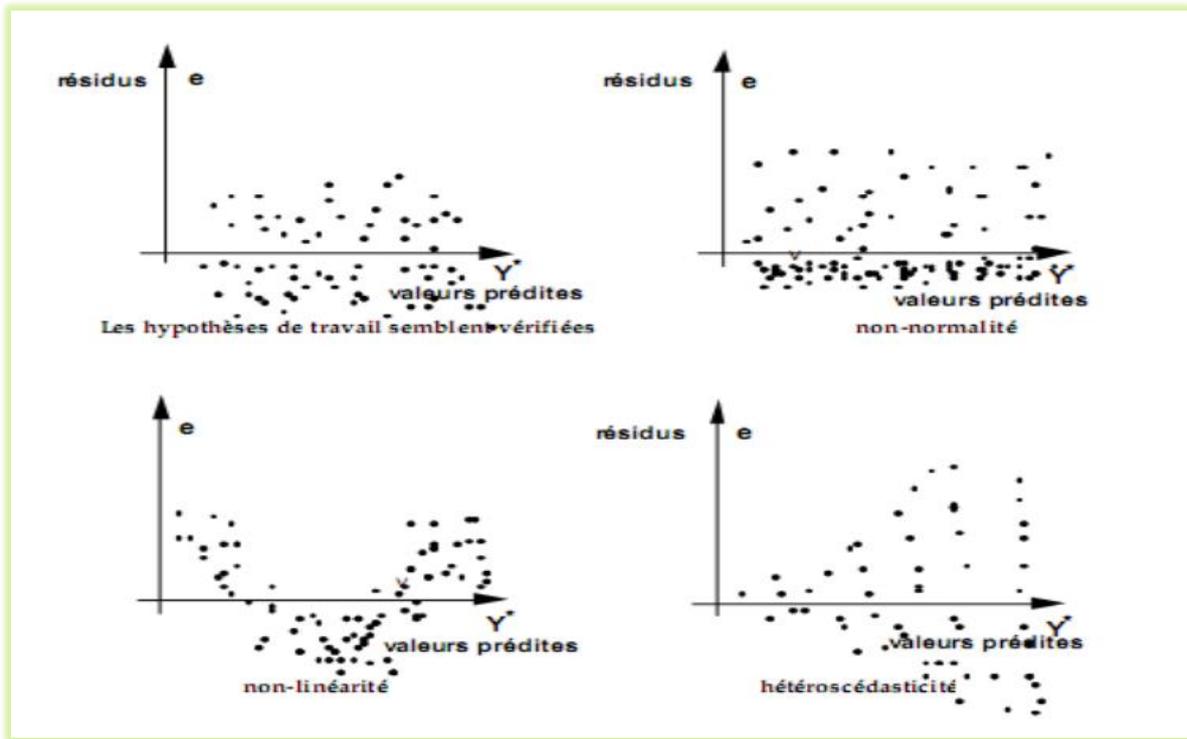


Figure 2. 3. Diagnostic par le diagramme des résidus (Helsel D R, Hirsch R M., 2002).

La figure montre l'utilité du diagramme des résidus dans la validation d'un modèle car il fournit un nombre important d'informations non interprétables par d'autres indices.

Dans le cas de non linéarité, non normalité ou d'hétéroscédasticité, il est possible de remédier soit en tentant une régression non linéaire ou en optant pour une transformation des variables de la même manière citée précédemment (Baloul, 2012).

2.1.2.3 Principaux modèles existants

On peut citer quelques modèles existants qui pourraient être appliqués dans le domaine de l'hydrologie :

2.1.2.3.1 Ligne tracée à l'œil

C'est une droite tracée visuellement afin de représenter un nuage de points. C'est la méthode la plus simple pour la construction des courbes de sédiments. Cette méthode offre une représentation moyenne des données. Son application exige des données regroupées et non dispersées pour faciliter le traçage de la droite moyenne.

2.1.2.3.2 Le modèle linéaire

La relation linéaire est la relation la plus simple et la plus pratique qu'on peut établir entre deux variables, mais elle ne s'applique pas dans tous les cas. Sa propriété principale est la proportionnalité de x et y . Elle est appliquée surtout pour vérifier l'existence d'une relation.

Le modèle linéaire est donné sous la forme :

$$y_i = ax_i + b + \varepsilon_i \dots\dots\dots 18$$

Les vrais valeurs de a et b sont inconnues cependant il est possible d'établir une équation de la droite de régression sous la forme :

$$\hat{y} = ax + b \dots\dots\dots 19$$

Avec :

y_i : La i ème observation de la variable dépendante.

x_i : La i ème observation de la variable indépendante.

b : L'interception.

a : La pente de la droite.

ε_i : Le résidu qui mesure l'écart de l'observation y_i à la droite de régression.

\hat{y} : La valeur prédite de y_i par la droite de régression : $\hat{y} = y_i - \varepsilon$

La droite de régression passe toujours par le point central des données (\bar{x} ; \bar{y}) donc la ligne droite passant par le point (x , y) peut être représenté par :

$$y_i - \bar{y} = a(x_i - \bar{x}) \dots\dots 20$$

\bar{x} ; \bar{y} Sont respectivement les moyennes de x et y .

Puisque les données (x_i, y_i) ne coïncide pas avec la ligne, la meilleure représentation de la régression est:

$$(y_i - \bar{y}) = a(x_i - \bar{x}) + \varepsilon \dots\dots 21$$

En remplaçant : $\hat{y} = y_i - \varepsilon$ dans l'équation précédente on obtient :

$$(\hat{y} - \bar{y}) = a(x_i - \bar{x}) \dots\dots 22$$

$$\hat{y} = ax_i + \bar{y} - a\bar{x} \dots\dots 23$$

On remplace: $b = \bar{y} - a\bar{x}$ on aura l'équation de la droite de régression.

Pour avoir les meilleurs coefficients de la régression, il faut minimiser la somme des carrées de ε .

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - ax - b)^2 \dots\dots\dots 24$$

La valeur de cette fonction est minimum lorsque les dérivées de S par rapport à a et b s'annulent. On a donc :

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n y_i - nb - a \sum_{i=1}^n x_i = 0 \dots \dots \dots 25$$

Et en divisant par non aura: $\bar{y} = a\bar{x} + b$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n y_i x_i - b \sum_{i=1}^n x_i - a \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0 \dots \dots \dots 26$$

On remplace b par sa valeur :

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n y_i x_i - (\bar{y} - a\bar{x}) \sum_{i=1}^n x_i - a \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0 \dots \dots 27$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \bar{y} \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i} \dots \dots \dots 28$$

En divisant le numérateur et le dénominateur par n on retrouve :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{cov(x,y)}{var(x,y)} \dots \dots \dots 29$$

Le rapport : $\sum \varepsilon^2 / \sum (y_i - \bar{y})^2 = 1 - R^2$ dont R^2 est le coefficient de détermination qui traduit le degré de succès de la régression. Dans le cas de la régression linéaire, le coefficient R égale la valeur absolue du coefficient de corrélation r (Baloul, 2012).

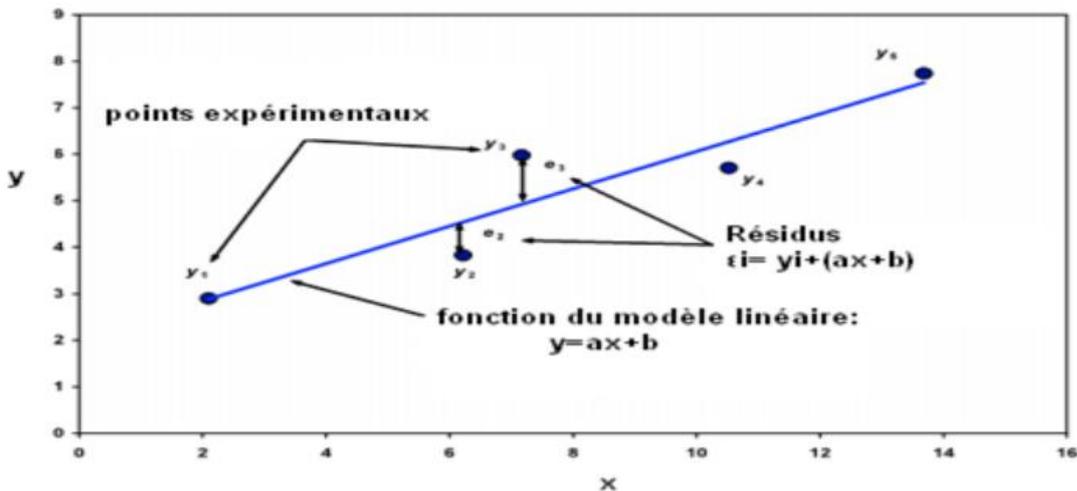


Figure 2. 4. Droite de régression linéaire (Oosterbaan, 1994).

2.1.2.3.3 Le modèle logarithmique (Népérien)

Ce modèle utilise l'équation suivante pour calculer les moindres carrés:

$$y = a \ln x + b \dots \dots \dots 30$$

Ce modèle n'est qu'une autre forme de la régression linéaire qui consiste en une application de la technique de transformation citée antérieurement de x à $\ln x$ (Rakotomalala, 2009).

Il exprime une variation proportionnelle de y au taux de variation de x .

Les paramètres de la droite de régression se déduisent de la même manière que pour le modèle linéaire.

2.1.2.3.4 Le modèle polynomiale

Il est sous la forme générale :

$$y = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 \dots\dots\dots 31$$

L'exemple simplifié est le polynôme de deuxième ordre : $y = a_1x + a_2x^2$

Ce type de modèle est utile lors de l'existence d'un minimum ou d'un maximum pour les variables dépendantes. Plus l'ordre du polynôme augmente plus la courbe tend à mieux représenter les données et devient plus sinueuse. Ce modèle est généralement utilisé comme approximation et rarement utilisé pour la représentation des modèles physiques (Baloul, 2012).

2.1.2.3.5 Le modèle exponentiel

Il est sous la forme:

$$Y = \alpha e^{\beta X} \dots\dots\dots 32$$

Où α et β sont des paramètres à déterminer.

Cette relation n'est pas linéaire, elle représente une évolution (croissance ou décroissance) à un taux constant ou en accélération, surtout utilisé dans le cas où x = temps. Il est possible de la linéarité par la transformation de y en $\ln Y$ et x en X et ceci en introduisant le logarithme népérien sur les deux parties de l'équation ce qui donne la relation linéaire :

$$y = ax + b \dots\dots\dots 33$$

Avec :

$a = \ln \alpha$ et $b = \beta$, pour éviter toute réfutation il faut ajouter un terme d'erreur ε , ce qui permet d'avoir le modèle linéaire déjà abordé antérieurement: $y = ax + b + \varepsilon$ qu'on peut traiter de la même manière par la technique des moindres carrées (Baloul, 2012).

2.1.2.3.6 Le modèle en puissance

Il est sous la forme: $y = ax^b$. Il est souvent adopté pour la construction des courbes de sédiments où y représente la variable dépendante C (concentration) et x représente la variable indépendante Q (débit liquide). Il se décompose en :

a. Modèle en puissance logarithmique :

C'est un modèle sous une forme linéaire issu de l'application du logarithme sur les deux côtés du modèle en puissance afin d'avoir une équation linéaire sous la forme :

$$\log y = \log a + b \log x \dots\dots\dots 34$$

Avec : $\log a$ et b sont des paramètres de la droite de régression calculés par la méthode des moindres carrée.

$$b = \frac{\sum \log x \log y - n \overline{\log x} \overline{\log y}}{\sum (\log x)^2 - n (\overline{\log x})^2} \dots\dots\dots 35$$

$$\log a = \overline{\log y} - b \overline{\log x} \dots\dots\dots 36$$

$$a = 10^{\overline{\log y} - b \overline{\log x}} \dots\dots\dots 37$$

Ce modèle issu de la re-transformation logarithmique est appliqué au couple (débit liquide-concentration) pour la première fois par Kennedy en 1895 sous sa forme : $C = aQ^b$ puis par Campbel et Bauder en 1940 qui l'ont appliqué pour le couple (débit liquide-débit solide).

Abrahams et Kellerhals en 1973 ont signalé que le débit solide n'est pas une variable mesurée comme la concentration des sédiments en suspension et qu'il est calculé à partir des valeurs du débit et de la concentration ($Q_s = CQ$) , Ceci revient à corrélérer x avec $(x \times y)$, ce qui peut mener à des conclusions erronées sur C . Ils conclurent que l'équation sous la forme : $\log C = a + b \log Q + \log \varepsilon$ représente mieux la relation entre C et Q , où ε représente l'erreur commise log-normalement distribuée et a, b sont les coefficients de régression dont a est un index de sévérité d'érosion et b exprime la force érosive de la rivière. (Asselman, 2000) Après re-transformation à l'échelle arithmétique, cette relation s'écrit :

$$C = a Q^b \varepsilon \dots\dots\dots 38$$

Où ε est normalement distribuée.

b. Modèle en puissance avec transformation en racine quatre:

L'une des transformations appliquées est celle élaboré par Sadeghi dans une étude sur huit stations dans un petit bassin versant au Japon, parmi plusieurs modèles de régression et de

transformations, le modèle en puissance traité par la méthode des moindres carrés après la transformation en racine quatre des données offre les meilleurs résultats avec une sur-estimation de 113% à 430% pour les données des stations prises individuellement.

c. Modèle en puissance arithmétique :

La fonction de la régression non-linéaire en puissance s'écrit :

$$C = a Q^b + \delta \dots\dots\dots 39$$

Avec : a et b sont les paramètres de la régression et δ l'erreur normalement distribuée.

d. Modèle en puissance avec terme additif :

C'est l'un des modèles appliqués par Asselman (2000), il consiste en un modèle en puissance avec terme additif (p) sous la forme suivante :

$$C = a Q^b + \delta + p \dots\dots\dots 40$$

Ce modèle se résout de la même façon itérative que le modèle non linéaire avec trois paramètres a , b et p .

e. Modèle non linéaire avec maximisation de r^2 :

C'est une approche sous la forme :

$$\log(y) = \log a + b (\log x)^c \dots\dots\dots 41$$

Avec: y est le débit solide et x est le débit liquide.

La détermination des paramètres résulte de l'emploi de la méthode des moindres carrées pour les deux variables $\log Q_s$ et $(\log Q)^c$ ou c est une variable déduite itérativement afin d'atteindre la valeur maximum de r^2 .

Pour le cas d'une valeur du paramètre $c = 1$, on aboutit au modèle (a):

$$\log(y) = \log a + b (\log x) \dots\dots\dots 42$$

f. Méthode stratifiée suivant les classes du débit :

Afin d'avoir l'équation de la droite de régression pour les valeurs des concentrations et débits moyens, la régression linéaire de la re-transformation logarithmique des valeurs moyennes de C et Q sera appliquée pour aboutir à l'équation :

$$\log C_m = \log a + b \log Q_m \dots\dots\dots 43$$

Avec : C_m Est la concentration moyenne de la classe de débit ;

Q_m Est le débit liquide moyen en classe de débit.

g. La correction du modèle en puissance:

Il est constatable d'après la définition des deux modèles en puissance (logarithmique et arithmétique) que la régression en modèle puissance des données originales diffère de celle de la re-transformation logarithmique, cette différence selon plusieurs auteurs est responsable de l'erreur ou biais donné par le modèle. Pour surmonter ce biais on a développé un facteur de correction adapté à la transformation au logarithme décimal tiré d'après le coefficient de correction de Miller pour le logarithme naturel :

$$CF_1 = 10^{1.151S^2} \dots\dots\dots 44$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_1^n (\log C_{obs} - \log C_{cal})^2 \dots\dots 45$$

CF_1 : Facteur de correction de Ferguson

S : Erreur standard

n : Taille de la série

$\log C_{obs}$: Logarithme décimal la concentration observée

$\log C_{cal}$: Logarithme décimal de la concentration calculée par la régression.

L'application de ce coefficient de correction exige une distribution normale des résidus. On a proposé un autre facteur de correction qui ne dépend d'aucune supposition sur la distribution d'erreur. Il est donné par :

$$CF_2 = \frac{1}{n \sum 10^{\varepsilon_i}} \dots\dots\dots 46$$

Avec :

ε_i : Résidu de l'observation i ;

$$\varepsilon_i = \log(C_{obs}) - \log(C_{cal}) \dots\dots 47$$

Après application du coefficient de correction, on aura :

$$C = (aQ^b).CF \dots\dots\dots 48$$

L'application de ces deux coefficients de correction peut engendrer des erreurs de plus de 16% dépassant même l'erreur engendrée avant leur application, pour cela et dans le cas d'une sur estimation, Kao et d'autres auteurs établissent un autre coefficient de correction (β)

applicable pour des données non transformées en domaine logarithmique, il peut s'adapter pour le cas des deux modèles (linéaire ou non linéaire), il est calculé de la manière suivante:

$$\beta = \frac{\sum_i^n (\varepsilon_i)}{\sum_i^n a Q^b} \dots\dots\dots 49$$

Avec : $\varepsilon_i = C_{obs} - C_{est}$

Ce coefficient peut être positif ou négatif ;

La concentration des sédiments en suspension corrigée sera donnée par :

$$C_{cor} = (1 + \beta)aQ^b \dots\dots\dots 50$$

Conclusion

Afin d'avoir des résultats de calculs fiables, il faut d'abord bien choisir le modèle de la relation à envisager. Donc pour choisir tel model ou un autre, doit se baser sur certaines règles :

- L'élément essentiel pour l'adaptation du bon modèle est la connaissance théorique du phénomène étudié ou du terrain où se déroule l'étude dans le cas des phénomènes à des distributions évidentes.
- Pour le choix de la nature de la courbe la plus proche, le nuage des points aide considérablement, essentiellement s'il n'existe pas des connaissances préalables de la distribution du phénomène.

Fréquemment ces deux précédentes n'aboutissent pas à spécifier le modèle le plus représentatif vu que la majorité des phénomènes à étudier sont souvent nouveau. Ainsi, le caractère aléatoire des phénomènes naturels fait les complexités et difficultés d'obtenir un nuage de point qui adhère à une courbe quelconque. Il est donc favorable de choisir une sélection de modèles à base du plus grand coefficient de détermination puis justifier le choix du modèle final en fonction d'autres paramètres qui évaluent la fiabilité d'estimation des modèles.

CHAPITRE 03

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Introduction

Ce chapitre a pour but d'étudier les paramètres hydrologiques et morphologiques des sous bassins versants BOUMESSAOUD et ISSER afin d'évaluer et de quantifier le transport solide dans ces deux derniers.

3.1 Bassin versant de la Tafna

3.1.1 Présentation du bassin versant de la Tafna :

Le bassin versant de la Tafna est situé au Nord-Ouest du territoire algérien, s'étend sur toute la wilaya de Tlemcen et déborde sur le royaume du Maroc, avec une superficie de 7245 km², il se localise entre 1°00' et 1°45' longitude Ouest et 32°40' et 35° 20' latitude Nord.

L'Oued Tafna représente le principal cours d'eau de ce bassin, il est d'une longueur de 170Km, prenant sa source dans les monts de Tlemcen au niveau de la grotte de Ghar Boumaaza (Sebdou) à environ 1100 Km d'altitude, ensuite vient se jeter dans la méditerranée au niveau de la plage de Rachgoune.

Trois oueds représentent les principaux affluents de l'oued Tafna :

- Oued Mouilah : affluent rive gauche de la Tafna et le plus important avec un sous-bassin de 1680 km². Il conflue avec la Tafna à 260 m d'altitude au niveau de la plaine de Maghnia.
- Oued Khemis : affluent rive gauche de la Tafna, d'une longueur de 36 km. Il atteint la Tafna au niveau du barrage de Beni Bahdel à 660 m d'altitude.
- Oued Isser : affluent rive droite de la Tafna, d'une longueur de 118 km. Il reçoit l'oued Chouly à 870 m d'altitude et oued Sikkak au niveau de la plaine de Remchi à 80 m d'altitude. (Bouanani, ..,2004)

3.1.2 La subdivision de l'oued Tafna

Le cours de cet oued peut se subdiviser en trois parties : la haute Tafna, la moyenne Tafna et la basse Tafna.

- i. Haute Tafna : d'un périmètre de 165 km et d'une superficie de 1016 Km², ce bassin est régularisé par le barrage de Béni Bahdel. Elle s'étend depuis la résurgence de l'oued Tafna au niveau de Ghar Boumaaza au sud de Sebdou, il creuse son chemin en recevant des ramifications. Il traverse une vallée encaissée. Aux environs de Beni Bahdel, il reçoit l'Oued Sebdou et l'Oued Khemis. A l'aval du barrage, il se reforme grâce aux résurgences.

ii. Moyenne Tafna : à partir de Sidi Medjahed, l'oued pénètre dans le bassin tertiaire et coule dans une vallée peu profonde dans des terrains plus ou moins argileux, cette partie du bassin tertiaire est sillonnée par de nombreux affluents parmi lesquels certains sont importants :

➤ **Sur la rive droite** : la Tafna reçoit 03 oueds : l'oued Boumessaoud, l'oued Zitoun et l'oued Isser qui représente l'affluent le plus important par son long parcours et son fort débit. Il prend naissance dans les terrains jurassiques des monts de Tlemcen et s'étend ainsi vers l'Est de la région de la haute Tafna. A son entrée dans le bassin tertiaire, Il est grossi au Nord d'Ouled Mimoun par l'oued Lakhdar (Ex : Chouly) (rive gauche) et l'oued AinTellout (rive droite).

Au Nord de la plaine d'Ouled Mimoun, il traverse la petite plaine d'El Fehoul. A l'extrémité occidentale de cette plaine, il reçoit sur la gauche un cours d'eau assez important : l'oued Sikkak qui descend du plateau de Terny.

➤ **Sur la rive gauche** : les affluents sont moins importants que sur la rive droite, seul l'oued Mouilah qui prend naissance au Maroc est remarquable par son parcours et son débit. L'oued Boukiou, moins important, prend naissance dans les monts des Traras pour rejoindre le cours de la Tafna dans la plaine des Ghossel.

iii. Basse Tafna : elle est comprise entre la région volcanique d'Ain Témouchent (Ouled Ben Adda) à l'Est et le massif des Traras (Béni Khelad) à l'ouest.

L'oued Tafna reçoit l'oued Isser au niveau des plaines de Remchi dont il traverse, et perce la muraille des montagnes des Traras pour enfin rejoindre la mer Méditerranée. Elle est caractérisée par ses terrains Tertiaires.

3.1. 3 Délimitation du bassin versant de Tafna

On peut délimiter le bassin versant de la Tafna comme suit:

- Nord-ouest : commune de Bab el Assa, Djebala, Nedrouma, Beni Khelad et Honaine
- Nord : la mer Méditerranée
- Nord-est : wilaya d'Ain Témouchent
- Sud : commune de Bouhi, El Gor, Sidi Djilali, El Aricha
- Ouest : le Maroc

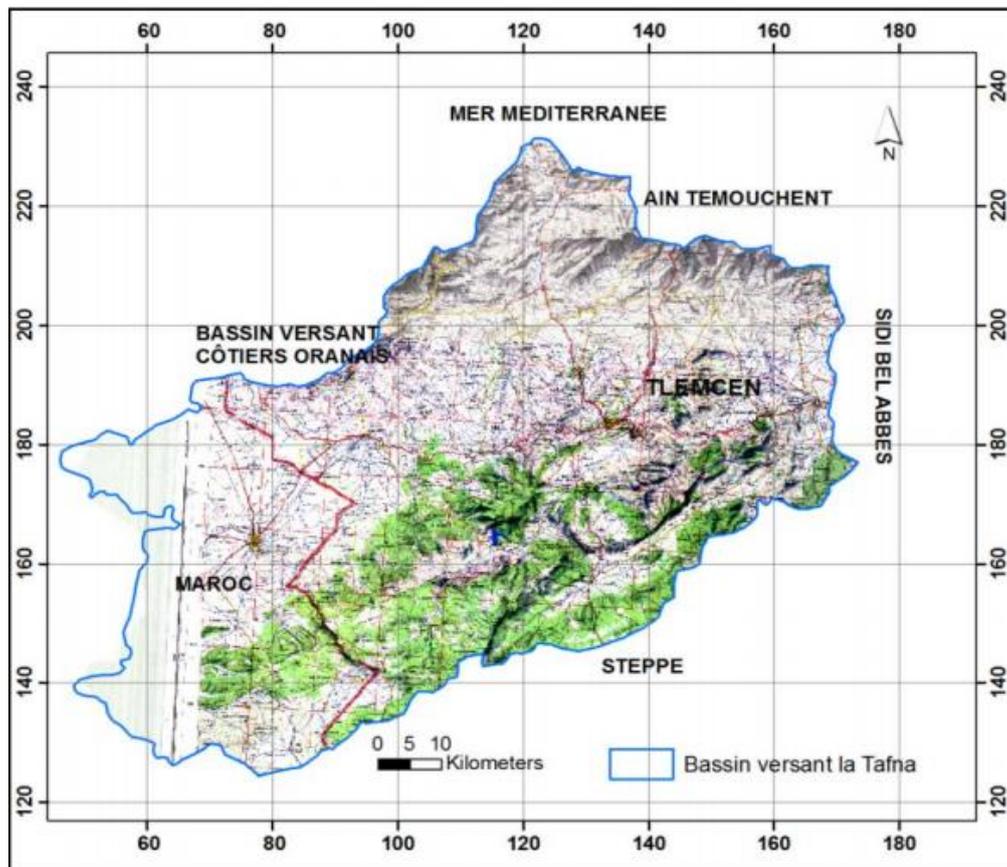


Figure 3. 1 Délimitation du bassin versant de la Tafna (Bemoussat, 2012)

3.2 Les sous-bassins versants étudiés BOUMESSAOUD et ISSER

3.2.1 Situation géographique

3.2.1.1 Oued Boumessaoud

Le bassin de l'oued Boumessaoud relève du grand bassin versant de la Tafna qui s'étend au nord-ouest de l'Algérie. Situé entre les longitudes 1°20' et 1°30' O, et les latitudes 34°51'15'' et 35°05' N dans la partie la plus septentrionale de la Tafna, les limites du sous bassin à l'est le sous bassin versant de l'oued Sikkak, à l'ouest le sous bassin de l'oued Mouilah et au sud le sous bassin de l'oued Sebdou.

3.2.1.2 Oued Isser

Le bassin de l'oued Isser relève aussi du grand bassin versant de la Tafna qui s'étend au nord-ouest de l'Algérie. Situé entre les longitudes 1°00' et 1°20' O, et les latitudes 34°40'05'' et 35°17' N dans l'extrême nord-est de la Tafna, ses limites à l'ouest sont le sous bassin versant de l'oued Sikkak et au sud le sous bassin de l'oued Sebdou.

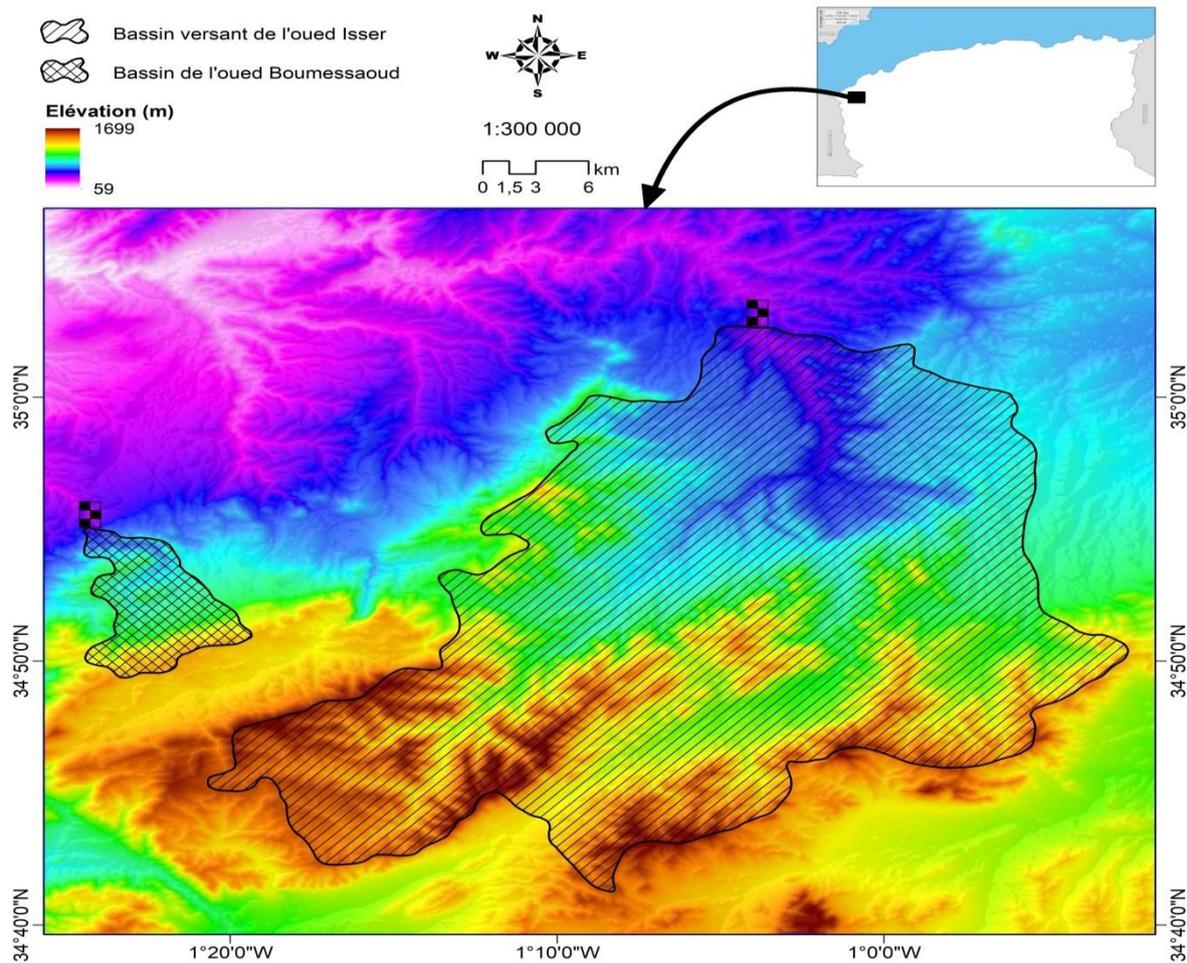


Figure 3. 2 Situation géographique des deux bassins versants BOUMESSAOUD et ISSER

3.2.2 Caractéristiques physiques :

Le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage et la réponse hydrologique d'un bassin sont influencés par ses caractéristiques physiographiques.

En premier lieu, on définit la taille du bassin (sa surface) comme caractéristique morphologique puis sa forme, son élévation, sa pente et son orientation, on peut ajouter à ces facteurs le type de sol, le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique. Ces derniers, d'ordre purement géométrique ou physique, peuvent être estimés aisément à partir de cartes adéquates ou en recourant à des techniques digitales et à des modèles numériques.

3.2.2.1 Surface, périmètre et longueur du thalweg

La surface du bassin versant ainsi que son périmètre et la longueur du thalweg ont été déterminé par l'utilisation d'un Système d'Information Géographique, qui établit un Modèle Numérique du Terrain (M.N.T) de ce bassin. Cette technique nous a permis l'estimation de ces caractéristiques physiques avec une grande précision illustrée dans le tableau qui suit (Tableau 3.1.) :

Tableau 3. 1 Caractéristiques de forme des oueds BOUMESSAOUD et ISSER

Bassin	Surface	Périmètre	Longueur du thalweg
BOUMESSAOUD	46	36	14,70
ISSER	878	162	57,75

3.2.2.2 Forme du bassin :

i. Indice de compacité

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

On peut caractériser le milieu et comparer des bassins versants entre eux par différents indices morphologiques. Citons comme exemple l'*indice de compacité de Gravelius* (1914) K_G , défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface:

$$K_G = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots 51$$

Avec :

- K_G : Indice de compacité de Gravelius
- A : Surface du bassin versant en km^2
- P : Périmètre du bassin en k.

Le coefficient est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire, et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée. Pour le cas de nos deux bassins étudiés, la valeur du coefficient de compacité est de 1.48 pour le bassin de BOUMESSAOUD et de 1.54 pour le bassin d'ISSER ce qui les rend assez allongés.

ii. Rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius

Le rectangle équivalent de dimensions (L et l) définit respectivement par les formules suivantes :

$$L = \frac{K_C \sqrt{S}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right] \dots\dots\dots 52$$

$$l = \frac{K_C \sqrt{S}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right] \dots\dots\dots 53$$

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent en (km) ;

l : Largeur du rectangle équivalent en (km) ;

S : La superficie du bassin versant (km²) ;

K_C : Le coefficient de compacité ou de Gravelieus.

3.2.2.3 Etude du relief

La morphologie du bassin ainsi que les paramètres hydrométéorologiques qui varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) font que l'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément. En outre, la pente influe sur la vitesse de ce dernier. Le relief se détermine lui aussi par les caractéristiques suivants :

a. La courbe hypsométrique :

Le relief d'un bassin est souvent caractérisé par la courbe hypsométrique qui fournit une vue synthétique de la pente du bassin. Cette courbe porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée, donc cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude, elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude.

La courbe hypsométrique nous informe sur le comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage. Plusieurs renseignements qualitatifs sont fournis sur l'allure du relief. Par exemple une pente forte à l'origine (vers les plus basses altitudes) indique souvent des plaines ou des pénéplaines ; si la pente est très forte, il y a des chances pour qu'on ait de vastes zones d'inondation. Une pente forte dans le milieu ou dans les hautes altitudes indique probablement un grand plateau. Une pente très faible dans la même région révèle au contraire une vallée encaissée etc.

Les diagrammes de fréquences altimétriques et les courbes hypsométriques sont établis à partir de la répartition de la surface de nos bassins par tranche d'altitude représentés par les figures 3.4 et 3.5 et les tableaux 3.2 et 3.3.

Tableau 3. 2 Répartition altimétrique du sous bassin Isser

Sous-bassin	Tranche d'altitude	Altitudes cumulées (%)	Ai (km ²)	Ai cumulées (km ²)	Ai (%)	Ai cumulées (%)
<i>Isser</i>	385,45-400	1,19	1,55	877,44	0,18	100
	400-500	9,39	23,63	875,89	2,69	99,82
	500-600	17,60	65,84	852,26	7,50	97,13
	600-700	25,80	120,38	786,42	13,72	89,63
	700-800	34,00	95,95	666,05	10,94	75,91
	800-900	42,20	90,30	570,10	10,29	64,97
	900-1000	50,40	96,89	479,80	11,04	54,68
	1000-1100	58,60	90,83	382,91	10,35	43,64
	1100-1200	66,80	90,62	292,08	10,33	33,29
	1200-1300	75,00	80,65	201,46	9,19	22,96
	1300-1400	83,20	84,73	120,80	9,66	13,77
	1400-1500	91,40	30,09	36,07	3,43	4,11
	1500-1604	100	5,98	5,98	0,68	0,68

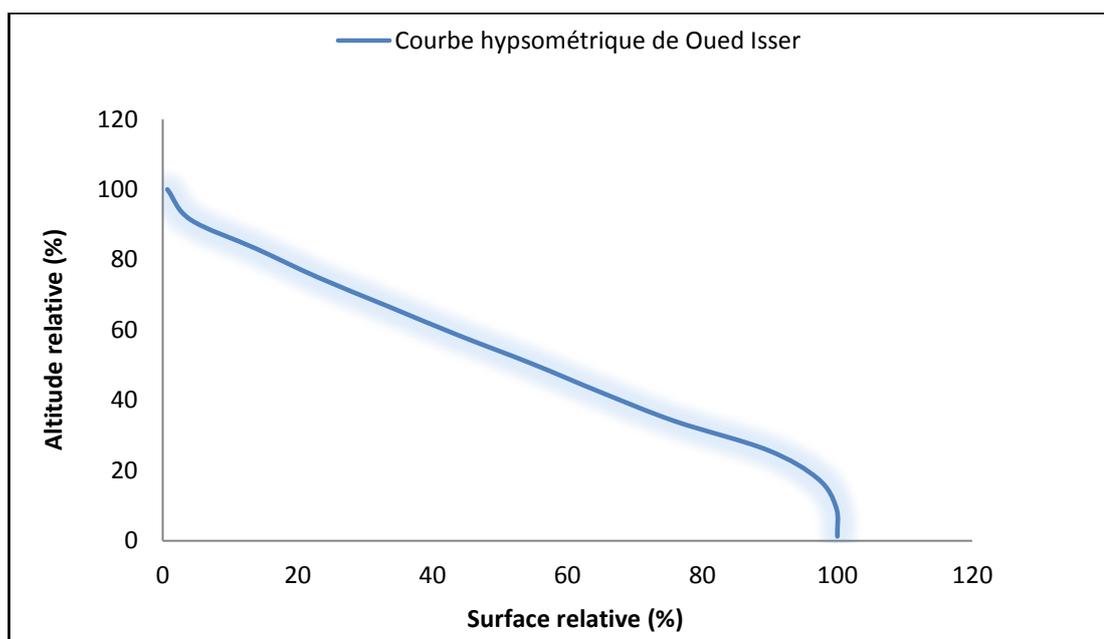


Figure 3. 3 Courbe hypsométrique « Oued Isser »

Tableau 3. 3 Répartition altimétrique du sous bassin Boumessaoud.

Sous-bassin	Tranche d'altitude	Altitudes cumulées (%)	Ai (km ²)	Ai cumulées (km ²)	Ai (%)	Ai cumulées (%)
<i>Boumessaoud</i>	407,08-500	11,00	0,30	46,14	0,64	100,00
	500-600	22,85	1,97	45,85	4,27	99,36
	600-700	34,69	4,79	43,88	10,38	95,09
	700-800	46,53	13,86	39,09	30,04	84,71
	800-900	58,38	9,71	25,23	21,05	54,67
	900-1000	70,22	2,91	15,52	6,30	33,62
	1000-1100	82,06	4,31	12,61	9,33	27,32
	1100-1200	93,91	6,28	8,30	13,62	17,99
	1200-1251,46	100,00	2,02	2,02	4,37	4,37

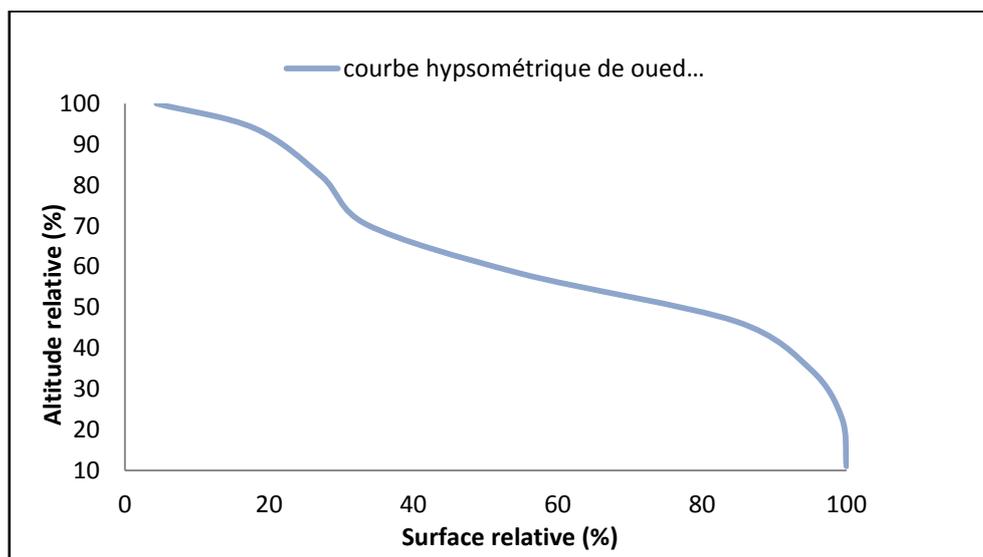


Figure 3. 4 : Courbe hypsométrique « Oued Boumessaoud »

b. Altitudes caractéristiques du bassin :

*** Altitude maximale et minimale :**

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température et la précipitation.

*** Altitude moyenne du bassin versant**

L'altitude moyenne du bassin est un indice important qui intègre et présente l'influence de la zonalité climatique verticale et elle est déterminée par la somme du produit de la surface partielle S_i comprise entre les courbes de niveau, et des altitudes moyennes correspondantes H_i . On peut définir l'altitude moyenne comme suit :

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i \cdot h_i}{A} \dots\dots\dots 54$$

Avec :

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin en m.

A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau en km^2 .

h_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau en m

A : Superficie totale du bassin versant en km^2 .

*** L'altitude médiane :**

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique, cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne si la pente de la courbe est régulière.

*** L'altitude $H_{95\%}$:**

L'altitude $H_{95\%}$ correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 95% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.

*** L'altitude $H_{5\%}$:**

L'altitude $H_{5\%}$ correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 5% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.

Le tableau qui suit illustre les attitudes caractéristiques des deux bassins étudiés. (Tableau 3.4.).

Tableau 3. 4 Altitude caractéristique des bassins BOUMESSAOUD et ISSER.

Hauteur caractéristique	Valeurs (m)	
	<i>Isser</i>	<i>BOUMESSAOUD</i>
H méd	1047,56	953,39
H ₅	1506,62	1241,52
H ₉₅	563,82	634,48
l'altitude max	1604,81	1251,46
l'altitude min	385,45	407,08
l'altitude moy	950,77	867,82

c. Indices de pente du relief

Le but des indices de pente du relief est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications.

L'Indice de pente globale (I_g), se calcule comme suit :

$$I_g = D / L \dots\dots\dots 55$$

Avec :

I_g : Indice globale de Roche.

D : Dénivelée en m.

L : Longueur du rectangle équivalent en km.

La dénivelée (D) est égale à $H_5 - H_{95}$; où (H_5) et (H_{95}) sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin sur la courbe hypsométrique.

L'Indice de pente (I_p) proposé par Mr Roche, et qui influence particulièrement le régime hydrologique du bassin, est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces.

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum \sqrt{\beta_i \cdot [a_i - a_{i-1}]} \dots\dots\dots 56$$

Avec

($a_i - a_{i-1}$) : Dénivelée entre deux courbes de niveau voisines en m

β_i : Pourcentage de la surface totale du bassin se trouvant entre deux côtes successives (ai) et (ai - 1) en %.

L : Longueur du rectangle équivalent en m.

Le tableau ci-dessous montre les différents types du relief selon l'indice de pente globale (Tableau 3.5).

Tableau 3. 5 Classification du relief selon I_g par l'ORSTOM

Type du relief	Indice de pente globale
Relief très faible	$I_g < 0.002$ m/km
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$
Relief très fort	0.5 m/km $< I_g$

En ce qui concerne les deux bassins BOUMESSAOUD et ISSER, le type du relief est illustré sur le Tableau 3.6.

Tableau 3. 6 Indices de pentes et nature du relief.

Bassin	I_p en (%)	I_g en (m/km)	Relief selon (I_g)
<i>Oued Boumessaoud</i>	2,20	0,04	Relief Assez Fort
<i>Oued Isser</i>	1,27	0,014	Relief Modéré

d. Dénivelée spécifique (D_s)

Il était difficile de comparer des bassins de tailles différentes car l'indice I_g décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente comme l'indiquait sa formule tandis que la dénivelée spécifique D_s ne présente pas cet inconvénient : elle dérive de la pente globale I_g en la corrigeant de l'effet de surface admis étant inversement proportionnel à A :

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{A} \dots \dots \dots 57$$

Si $I_g = D / L$ et $A = L \cdot l$

Alors la dénivelée devient $D_s = D \cdot \sqrt{l/L}$

La dénivelée spécifique (D_s) ne dépend donc que de l'hypsométrie ($D = H_{5\%} - H_{95\%}$) et de la forme du bassin (l/L).

Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M., indépendante des surfaces des bassins (Tableau 3.7.):

Tableau 3. 7 Classification du relief selon D_s de l'O.R.S.T.O.M.

Type de relief	Dénivelée spécifique
Relief très faible	$D_s < 10$ m
Relief faible	$10 \text{ m} < D_s < 25$ m
Relief assez faible	$25 \text{ m} < D_s < 50$ m
Relief modéré	$50 \text{ m} < D_s < 100$ m
Relief assez fort	$100 \text{ m} < D_s < 250$ m
Relief fort	$250 \text{ m} < D_s < 500$ m
Relief très fort	$D_s > 500$ m

Les valeurs calculées de (D_s) dans le cas de nos deux bassins sont données selon le tableau ci-dessous (Tableau 3.8.) :

Tableau 3. 8 La dénivelée et la dénivelée spécifique et leur classe.

Bassin versant	Dénivelée (m)	Dénivelée Spécifique (m)	Classe
<i>Isser</i>	942,7977254	405,5396361	Relief Fort
<i>Boumessaoud</i>	607,0402246	277,1527621	Relief Fort

e. La pente moyenne du bassin versant

La pente moyenne est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct et donc sur le temps de concentration t_c et par conséquent influence directement le débit de pointe lors d'une averse. Elle peut être donnée par la formule suivante :

$$I_{moy} = D_t / L \dots\dots\dots 58$$

Avec :

I_{moy} : Pente moyenne en %.

D_t : Dénivelée totale du rectangle équivalent en m, $D_t = H_{max} - H_{min}$.

L : Longueur du rectangle équivalent en km.

Par application de la formule on trouve : 56,75 ‰ pour le sous-bassin Boumessaoud et 17.7‰ pour d'Isser.

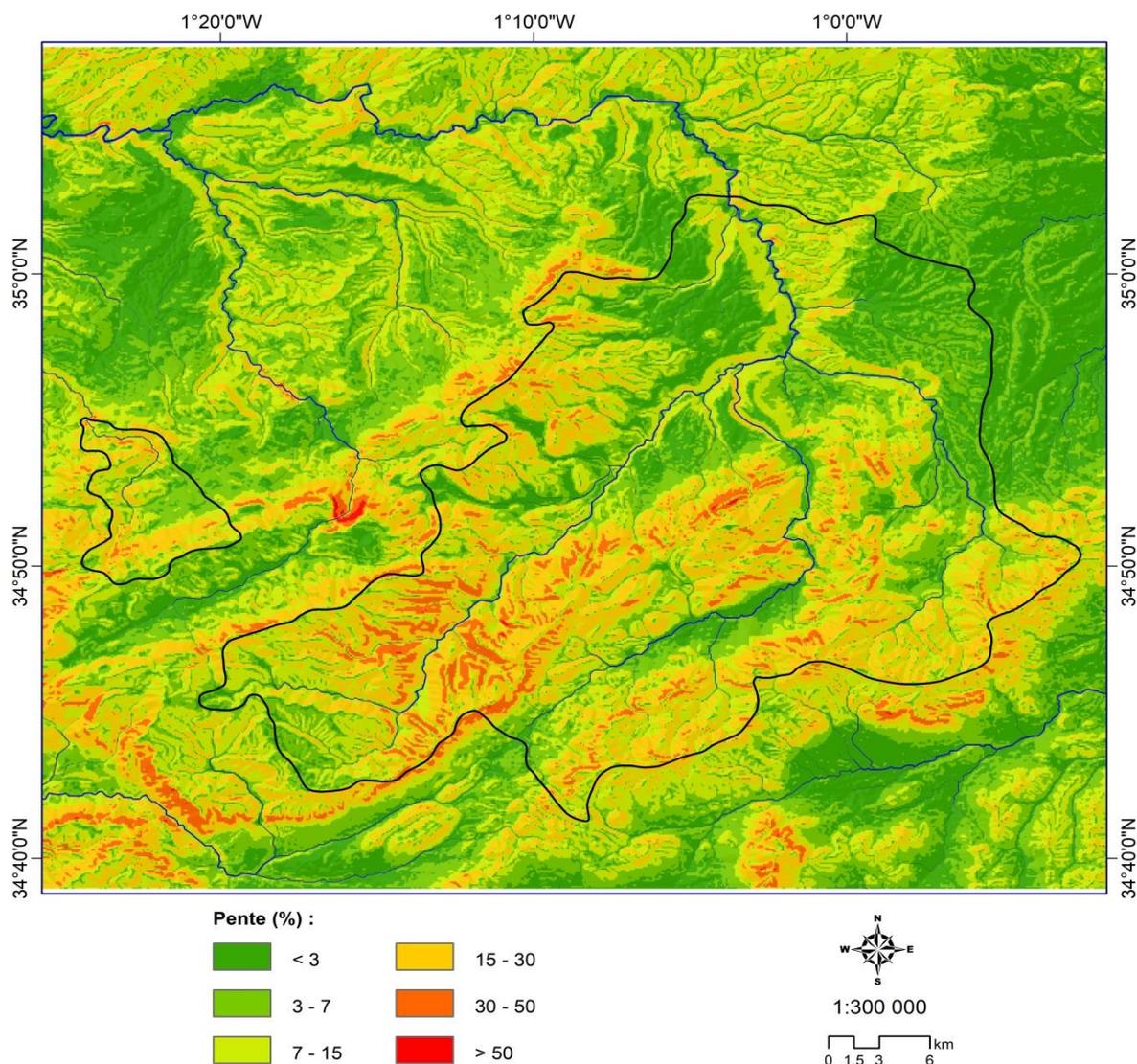


Figure 3. 5 Carte de pente des deux bassins versants BOUMESSAOU D et ISSER.

3.2.2.4 Etude du réseau hydrographique :

3.2.2.4.1 Le chevelu hydrographique :

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

En utilisant un Système d'Information Géographique par les Modèles Numériques du Terrain on a pu établir les cartes du réseau hydrographique de nos deux bassins (Isser et Boumessaoud) comme le montre les figures ci-dessous.

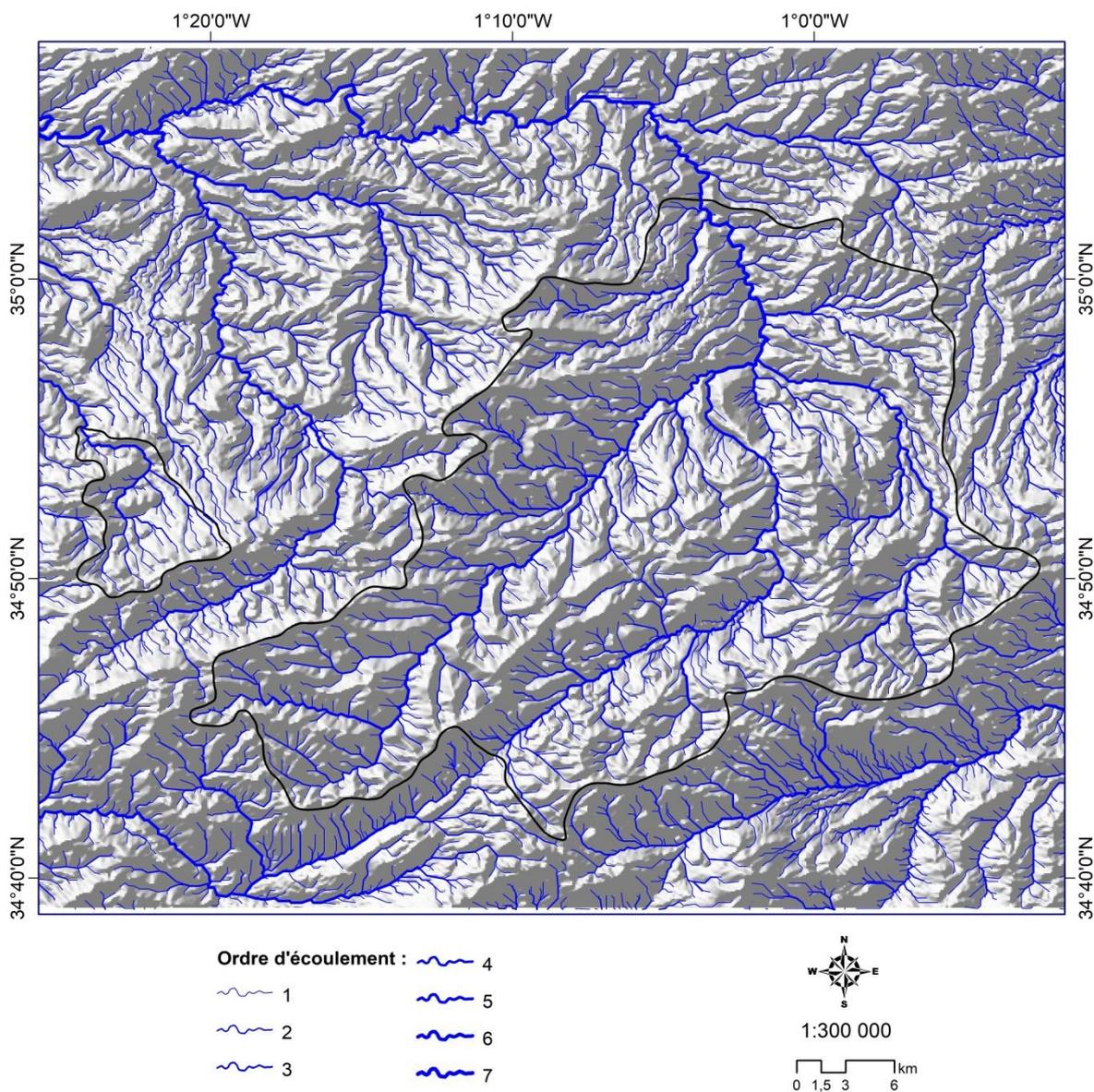


Figure 3. 6 Réseau hydrographique des bassins versants BOUMESSAOUD et ISSER

Pour définir le réseau hydrographique, divers paramètres descriptifs sont utilisés :

a. Densité de drainage D_d :

C'est le rapport entre la longueur total de tous les cours d'eau « L_i »du bassin versant, à la surface « A »Elle reflète la dynamique du bassin, la stabilité du chevelu hydrographique et le type de ruissellement de surface .Elle est exprimée en km/km^2 .

$$D_d = \sum L_i / A \dots\dots\dots 59$$

Avec :

D_d : Densité de drainage (km/km^2).

$\sum L_i$: Longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en km.

A : Aire du bassin (km²).

b. La fréquence des cours d'eau d'ordre 1 :

C'est le rapport du nombre total de cours d'eau d'ordre 1 à la surface du bassin versant

$$F1 = N1/A \dots\dots\dots 60$$

Avec :

N1 : Nombre de cours d'eau d'ordre 1.

A : Superficie du bassin versant.

c. Coefficient de torrentialité C_t :

Il est défini comme étant :

$$C_t = D_d \cdot F1 \dots\dots\dots 61$$

d. Temps de concentration T_c

C'est le Temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée "hydrologiquement" de l'exutoire pour parvenir à celui-ci. Il existe plusieurs formules empiriques pour calculer ce dernier :

La formule de GIANDOTTI (1937) :

$$T_c = \frac{a\sqrt{S} + bL_{cp}}{c\sqrt{hm}} \dots\dots\dots 62$$

Avec :

a = 4 ; b = 1.5 ; c = 0.8 (pour les grands et moyens bassins d'Afrique du Nord) ;

S : Surface du bassin versant en (km²).

L_{cp} : Longueur du chenal principal hydrographique en (km) ;

T_c : Temps de concentrations exprimé en heure ;

hm: Altitude moyenne relative du bassin en (km) (différence entre l'altitude moyenne pondérée et l'altitude de l'exutoire H_{moy} - H_{min}).

La formule de VENTURA :

$$T_c = 0.1275 \sqrt{\frac{S}{I}} \dots\dots\dots 63$$

Avec :

S : Surface du bassin versant en (km²).

I : Indice de pente en (m/km).

La formule de BASSO :

$$T_c = 0.067 \times \frac{L_p^{1.115}}{(H_{max} - H_{min})^{0.385}} \dots\dots\dots 64$$

Avec :

T_c : Temps de concentration en Heures (h).

L_p : Longueur du bassin versant (km).

H_{min} : Altitude minimal (km).

H_{max} : Altitude maximal (km).

La formule de KIRPICH

$$T_c = 0.6615 \times (L_{cp})^{0.77} \times (I_g)^{-0.385} \dots\dots\dots 65$$

Avec :

L_{cp} : Longueur du chenal principal hydrographique en (km) ;

I_g : Indice de la pente globale (%).

Formule de SOKOLOVSKY :

$$T_c = 4 \left(\frac{(S \times L)^{0.333}}{\sqrt{I}} \right)^{0.75} \dots\dots\dots 66$$

Avec :

L : Longueur du talweg principale en (km).

S : Surface du bassin versant en (km²).

I : Indice de pente en (m/km).

Formule de L'ANRH : (SOGREAH 1986/1989)

Cette formule a été développée par Sogreah sur demande de l'ANRH, elle est vérifiée et recommandée pour les petits bassins versants de l'Algérie ; elle s'écrit sous la forme :

$$T_c = 3 \left[\frac{S_{BV} \times L_{CP}}{(10 I_{BV})^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots 67$$

Avec :

I_{BV} : Pente du bassin versant en (%) ;

L_{CP} : Longueur du chenal principal hydrographique en (km) ;

S_{BV} : Surface du bassin versant en (km²).

Mais dans notre travail on a opté pour la formule de GIANDOTTI pour le bassin d'Isser car elle a été éprouvée en Afrique du Nord et paraît fournir une bonne valeur pour les grands et les moyens bassins 400 à 1000 km² (Chaumont M.) et concernant le bassin de Boumessaoud on a opté pour la formule de l'ANRH parce qu'elle est vérifiée et recommandée pour les petits bassins de l'Algérie.

Tableau 3. 9 Récapitulatif de l'étude du chevelu hydrographique.

Bassin	Dd	F1	Ct	Tc
<i>Oued Boumessaoud</i>	1.25	0.76	0.95	1.42
<i>Oued Isser</i>	0.60	0.19	0.11	6.53

3.2.2.4.2 Profil en long du cours d'eau

Ces profils sont tracés à partir d'un système d'information géographique, Ils sont illustrés dans les figures 3.6. et 3.7.

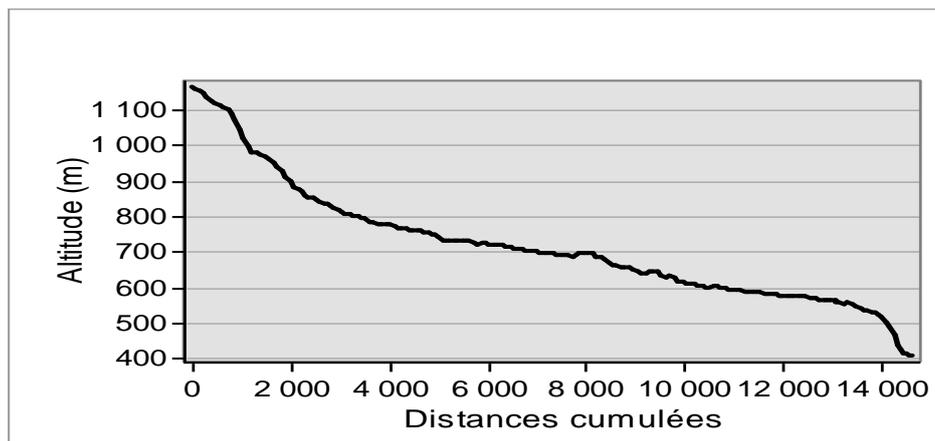


Figure 3. 7 Profil en long d'oued BOUMESSAOU

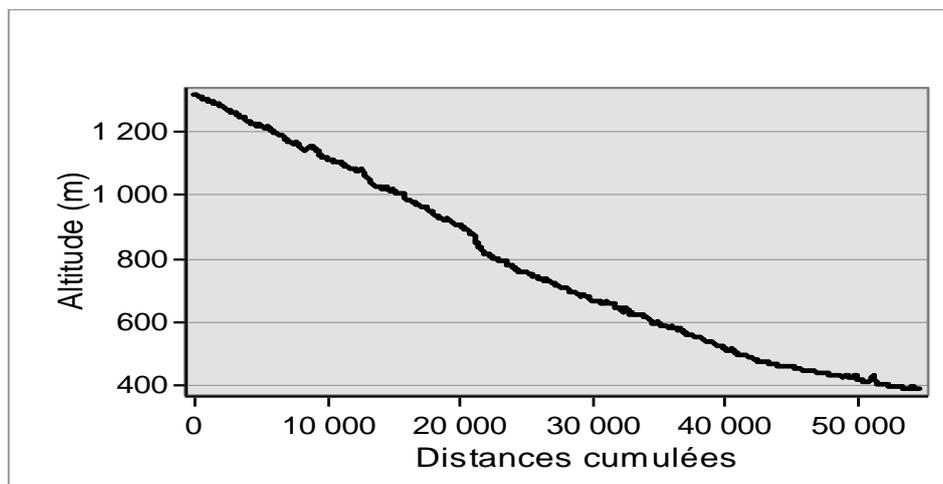


Figure 3. 8 Profil en long d'oued ISSER

3.2.3 Aperçu climatique

Le climat des deux bassins étudiés est de type semi-aride méditerranéen, caractérisé par son irrégularité dans le temps et dans l'espace et son agressivité avec un hiver pluvieux et un été sec. La hauteur et l'orientation des barrières de montagne créent de nombreuses variétés locales de ce climat (Bouanani, 2004).

La saison des pluies est d'octobre à mars, et la saison sèche dure d'avril à août /Septembre.

Dans les zones semi-arides, les facteurs climatiques ont une influence considérable sur les pertes en sol, Le climat de la région d'étude est de type méditerranéen.

Le tableau suivant récapitule toutes les caractéristiques des deux sous bassins étudiés.

Tableau 3. 10 Récapitulatif des caractéristiques des deux sous bassins Boumessaoud et Isser.

Désignation		Symbole	Unités	BOUMESSAOUD	ISSER
Superficie		S	Km ²	46,14	877,44
Périmètre		P	Km	35,69	162,00
Longueur du cours d'eau principal		L	Km	14,70	57,75
Indice de compacité		Kc	/	1,48	1,54
Rectangle équivalent	Longueur	Lr	Km	14,88	68,86
	Largeur	Ir	Km	3,10	12,74
Altitudes maximale		Hmax	m	1251,46	1604,81
Altitude moyenne		Hmoy	m	867,82	950,77
Altitude minimale		Hmin	m	407,08	385,45
Indice de pente de Roche		Ip	m/Km	2,20	1,27
Indice de pente globale		Ig	m/Km	0,04	0,01
Indice de pente moyenne		Im	m/Km	56,75	17,71
Densité de drainage		Dd	Km/Km ²	1,25	0,60
Fréquence du cours d'eau d'ordre 1		F1	Km ⁻²	0,76	0,19
Coefficient de torrentialité		Ct	km ⁻³	0,95	0,11
Temps de concentration		Tc	h	1,42	6,53
Vitesse de ruissellement		Vr	Km/h	10,35	8,85

Conclusion

Les paramètres morphométriques montrent que les sous bassins versants BOUMESSAOUD et ISSER présentent une forme assez allongée dans l'ensemble ainsi pour le relief, le sous bassin BOUMESSAOUD présente un relief modéré tandis que ce dernier pour le sous bassin d'ISSER est assez fort.

Les temps de concentration varient ainsi de 1.42 pour le sous bassin de BOUMESSAOUD à 6.53 pour le sous bassin d'ISSER.

CHAPITRE 04

MODELISATION ET

QUANTIFICATION

4.1 Modélisation et transport solide dans les bassins versants ISSER et BOUMESSAOUD

Introduction

De nombreuses études ont été réalisées par différents auteurs afin de créer des modèles reliant les paramètres hydro climatiques (les précipitations, écoulements et/ou transport de matériaux solides).

Ces études avaient pour objectif d'expliquer les différents phénomènes de l'écoulement et du transport solide et ainsi mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions ou des bassins versants où les mesures sont rares, inachevées ou même inexistantes.

La multitude des paramètres fait qu'il existe plusieurs modèles et qui sont différents d'un auteur à l'autre car ils caractérisent les régions ou les bassins étudiés donc chaque modèle est représentatif d'une région ou bassin. Ces modèles ont été testés dans différentes régions du globe et ont donné des résultats assez satisfaisants les rendant presque universels dont quelques exemples sont illustrés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4. 1 Quelques modèles utilisés en Algérie (Ferguson , 1986)

Bassin ou région	Modèle	Equation	Auteur
Massif central (France)	Puissance	$Q_1 = 16 P^2$	Coutagne
Bassins algériens	Puissance	$Q_1 = 11.8 P^{2.82}$	A.N.R.H
Bassins algériens	Linéaire	$Q_1 = 0.736 (P - 404)$	Samie
Oued M'righa (Algérie)	Polynôme	$Q_1 = 50.6 P^2 - 3.54 P$	Roeder
Oued Ouergha (Maroc)	Puissance	$A_1 = 690 A_s^{0.58}$	Lahlou

4.1.1 Relations entre le débit liquide, la concentration et le débit solide

Le transport des matériaux solides par les cours d'eau et leur mobilisation sur les versants sont deux phénomènes distincts, mais liés entre eux. Le débit solide moyen des sédiments en suspension Q_s qui transitent une section d'écoulement moyen est calculé par le produit de la concentration moyenne des sédiments en suspension C_s et du débit liquide moyen Q durant une période de temps donné:

$$Q_s = Q C_s \dots\dots\dots 68$$

Plusieurs auteurs ont essayé d'estimer les débits solides à partir des débits liquides et de déterminer une relation de corrélation entre ces derniers.

La concentration des sédiments en suspension C_s et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance $Y = aX^b$.

$$C_s = a Q^{b-1} \dots\dots\dots 69$$

Une relation expérimentale, communément appelée courbe du transport solide lie le débit solide au débit liquide :

$$Q_s = a Q^b \dots\dots\dots 70$$

Les paramètres a et b sont généralement estimés par régression linéaire des variables transformées en log selon:

$$\text{Log } Q_s = \text{Log } a + b \text{ log } Q \dots\dots\dots 71$$

L'exposant b représente la pente de la courbe sur échelle log-log. Bogardi suggère que l'exposant b et la constante a reflètent les caractéristiques du bassin versant, alors que Vanoni considère que la constante a représente un indice d'érodabilité du sol.

Lorsque l'équation $C_s = a Q^{b-1}$ est employée, l'exposant b peut raisonnablement prendre la valeur de 2 ou 3 pour les rivières à lit de sable. Si l'exposant b est égal à l'unité, cette équation conduit à admettre que C_s est constante et indépendante du débit liquide. Fleming utilise les données de 250 bassins à travers le monde et aboutit à la première relation. L'exposant b selon Fleming varie de 0,72 à 1,02, tandis que a varie de 4 000 à 446 000 pour différents couverts végétaux.

4.1.2 Données et Méthodologies

Notre étude est réalisée à partir des données collectées au niveau des deux bassins étudiés (Boumessaoud, (1980-2001) et Isser (1991-2002)) constituées des débits instantanés et des concentrations des sédiments en suspension. L'analyse de ces données montre une variation

d'année en année et de saison en saison mais aussi de mois en mois en volume et en quantité de sédiments charriés.

L'échantillonnage uni ponctuel est la méthode d'échantillonnage systématique du transport solide sur la plupart des cours d'eau algériens. Un échantillon est prélevée par l'observateur en un point de la section mouillée au niveau de la station hydrométrique puis l'analyse de laboratoire des échantillons prélevés est effectuée selon les procédés classiques à savoir filtrage, séchage à l'étuve et pesée. L'évaluation du transport solide durant une crue est effectuée de la même façon que pour les débits liquides, sur la base d'un dépouillement des enregistrements.

En ce qui concerne les débits liquides, on y parvient on transformant la hauteur d'eau enregistrée et lues grâce aux courbes d'étalonnage établies par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

Afin d'avoir une relation puissance débit solide – débit liquide fiable et précise, il faut que le nombre des prélèvements et leur échelonnement soient correct dans le temps.

Pour déterminer la relation débit solide – débit liquide, une approche à différentes échelles temporelles, basée sur les modèles de régression, est adoptée, en tenant compte de la donnée hydro pluviométrique des différents bassins.

4.1.3 Analyse des débits instantanés

Cette étude concerne la station de Hennaya (Oued Boumessaoud 1980-2001) et celle de Sidi Aissa (Oued Isser 1991-2002) et porte sur les valeurs instantanées des débits liquides en m³/s et des débits solides en kg/s. (Tableau 4.2.).

Tableau 4. 2 Paramètres de la relation débit solide – débit liquide pour les bassins BOUMESSAOUD et ISSER.

L'Oued	Période	Taille de l'échantillon	a	b	R²
<i>Oued Boumessaoud</i>	1980 à 2001	2037	1,2874	1,5251	0.81
<i>Oued Isser</i>	1991 à 2002	955	0,3589	1,9852	0.80

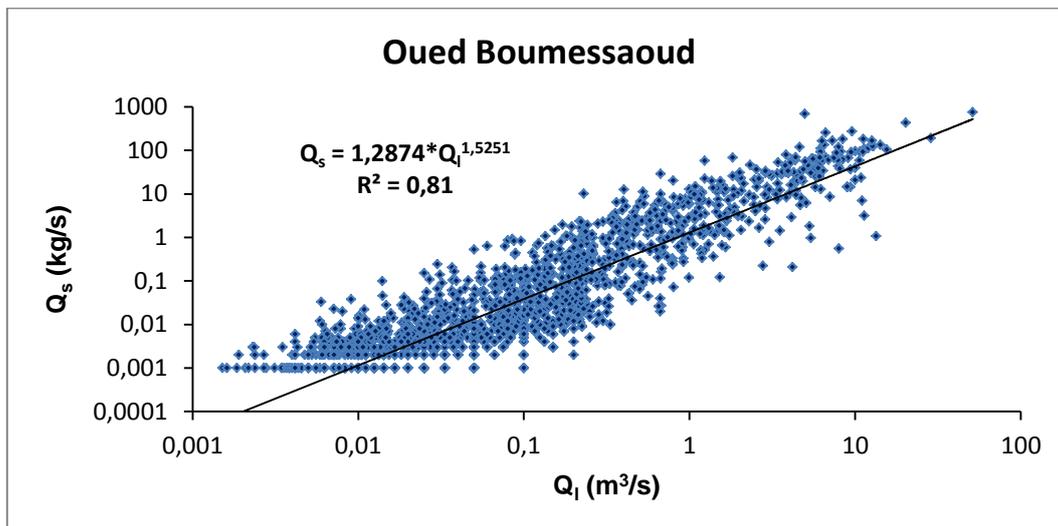


Figure 4. 1 Evolution des débits instantanés d’oued BOUMESSAOU.

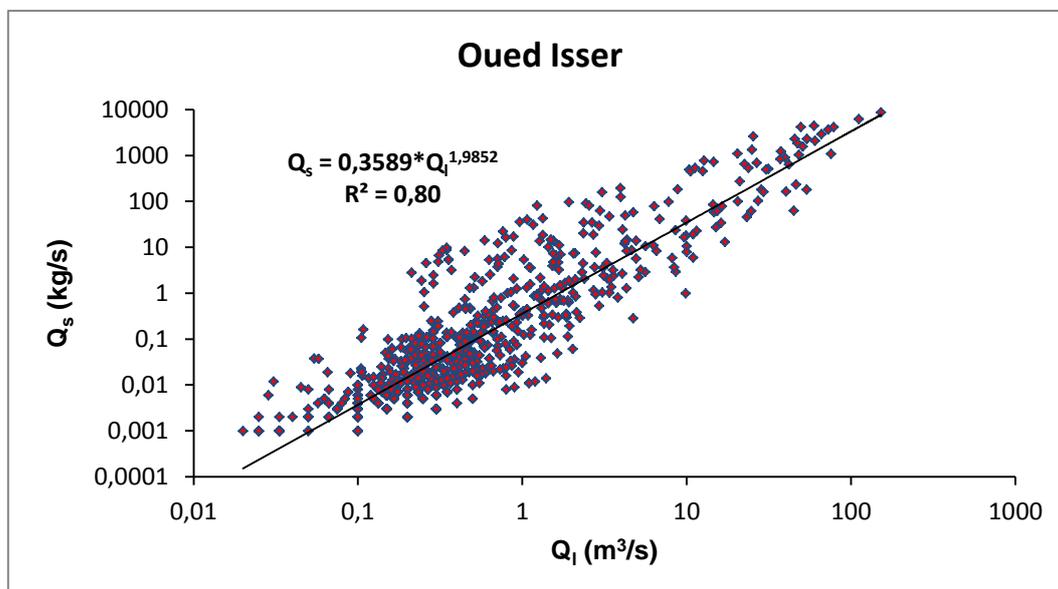


Figure 4. 2 Evolution des débits instantanés d’oued ISSER.

Comme pour la plupart des cours d’eau, on trouve pour les deux oueds une bonne relation en puissance liant le débit des matières solides en suspension en kg/s au débit liquide en m³/s. Une première analyse, graphique montre qu’à de faibles débits liquides généralement estivaux (moins de 0,5 m³/s) peuvent être associés de forts débits solides (près de 10 kg/s) déclenchés sûrement à la suite d’orages violents. De même, de fortes valeurs des débits liquides n’ont engendré qu’un faible transport solide dû à la vidange des nappes survenue à la suite d’une crue importante. En outre un coefficient de corrélation (R^2) assez élevé, signifie que, dans les deux bassins de l’Oued Boumessaoud et Oued Isser, le modèle en puissance est représentatif

pour la relation du débit solide (Q_s) en fonction débit liquide (Q_l) (Probst et Bazerbachi, 1986).

Les valeurs des paramètres a et b de la relation $Q_s = a Q_l^b$, (tableau.) varient entre les deux bassins. Pour le paramètre a, il prend la valeur de 0.35 pour Isser et 1.29 pour Boumessaoud. L'exposant b est compris entre 1,5 et 1.99, sa valeur pour Boumessaoud est 1.53 et égale à 1.99 pour Isser.

4.1.4 Analyse saisonnière

Dans le but d'étudier les réponses des deux bassins aux débits liquides et matières en suspension au cours de l'année hydrologique, on a jugé utile de regrouper, suivant les différentes saisons, les valeurs instantanées, et d'analyser la relation liant les débits liquides aux débits solides en suspension, mais pendant notre travail, nous avons remarqué que les résultats trouvés pour la saison d'été n'étaient pas fiables car la taille de l'échantillon était vraiment rétrécie et donc ne nous permettaient pas de faire une analyse correcte, par conséquent, nous avons regroupé les deux saisons été-automne en nous référant de la thèse doctorale de Monsieur KHANCHOUL .Le tableau résume les modèles trouvés pour chaque saison.

Tableau 4. 3 Paramètres des modèles saisonniers pour les bassins de BOUMESSAOUD et ISSER.

Les bassins	Saison	Taille de l'échantillon	a	b	R ²
<i>Oued Boumessaoud</i>	Hiver	797	1,3694	1,5992	0,82
	Printemps	661	0,9729	1,4838	0,83
	Été-Automne	579	2,1687	1,5717	0,77
<i>Oued Isser</i>	Hiver	343	0,3094	2,0866	0,77
	Printemps	319	0,2320	1,7810	0,80
	Été-Automne	293	0,7707	2,1197	0,86

D'après les résultats du tableau ci-dessus (Tableau 4.3.), nous constatons que :

L'effet saisonnier est très net à cette échelle , on observe un affaiblissement considérable du transport solide pendant le printemps due simplement à la faiblesse de l'écoulement .Le paramètre (a) semble être le plus élevé en Été-Automne, ceci peut expliquer l'importance de la dynamique érosive en cette saison. En effet à la saison sèche d'été où le sol se fissure et perd sa cohésion, succède l'automne avec des averses plus ou moins violentes sur un sol

fragilisé. Il se produit alors pour de faibles écoulements des apports solides importants (Bouanani,2004).

L'exposant (b) s'élève en Hiver par rapport aux autres saisons, cela est dû certainement aux écoulements générés par l'accroissement considérable des précipitations dans cette saison.

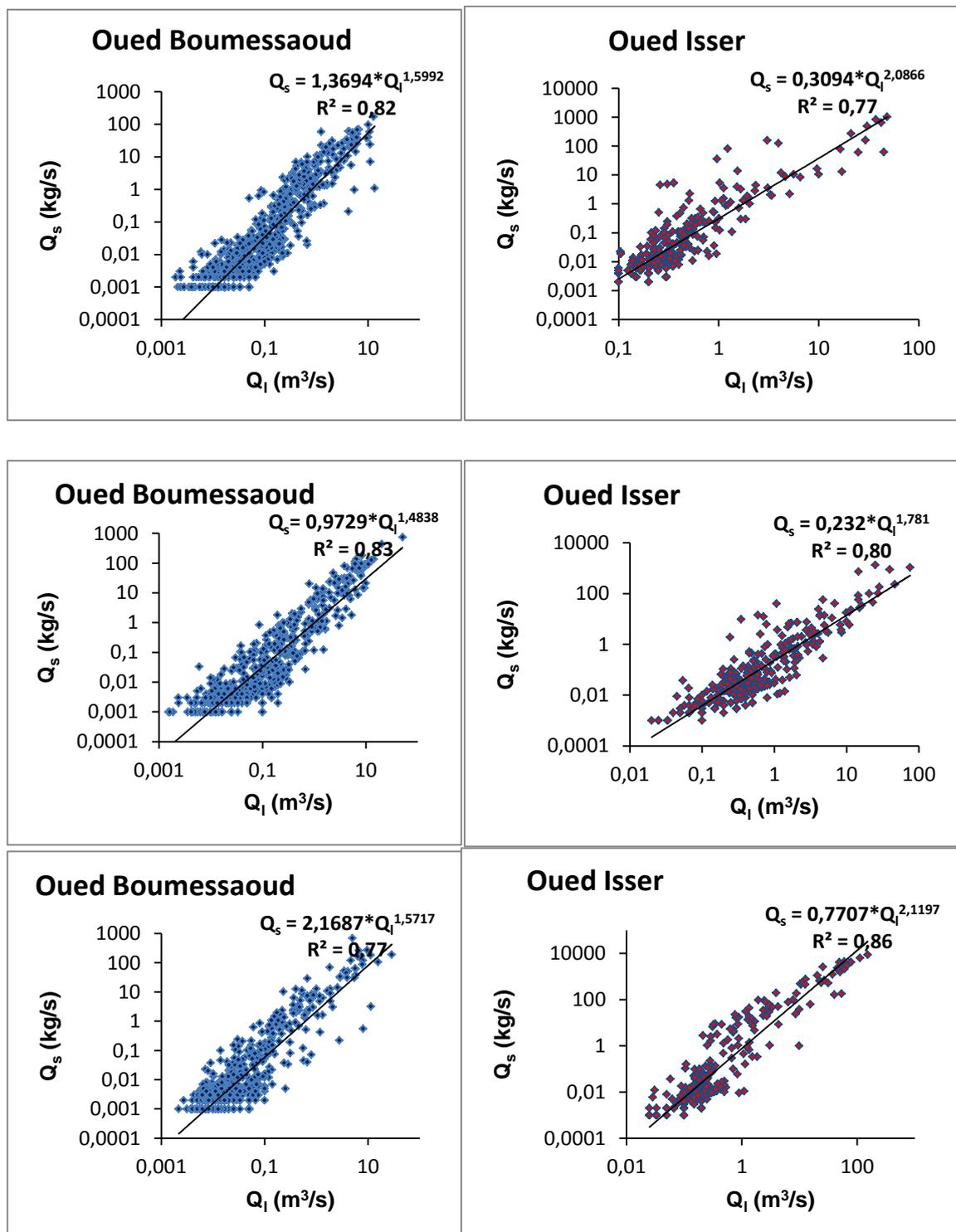


Figure 4. 3 Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides pour les bassins versants de BOUMESSAOUD et ISSER

- **En été et automne :** l'exposant b est plus élevé pour le bassin d'Isser, avec une valeur qui dépasse le 2 alors qu'il prend la valeur de 1.57 pour Boumessaoud. Ceci peut expliquer l'importance de la dynamique érosive en cette saison. En effet à la saison sèche d'été où le sol se fissure et perd sa cohésion, succède l'automne avec des averses plus ou moins violentes sur un sol fragilisé. Il se produit alors pour de faibles écoulements des apports solides importants.

- **En hiver :** le modèle de l'oued Isser dont l'activité érosive est assez important, voit son exposant b augmenter pour atteindre la valeur de 2.09. Pour l'autre bassin malgré la faiblesse des apports solides l'exposant b reste élevé, cela dénote qu'à de forts débits liquides sont associés de faibles débits solides. En effet dans ces bassins l'écoulement en hiver est plutôt assuré par la vidange des nappes que par la pluviométrie. De même que l'état du sol doit se trouver avec une certaine saturation qui limite les effets de la pluie.

- **Au printemps :** le facteur a et l'exposant b présentent des valeurs moyennes entre celles de l'automne et celles de l'été et sont proches de ceux du modèle global pour chaque bassin. Ceci exprime bien que le modèle du printemps est plutôt un modèle représentatif moyen. Aussi les meilleurs coefficients de corrélation sont donnés au printemps. La figure 4.3, montre que les nuages de points sont alignés harmonieusement autour de la droite de régression. Au printemps, l'état du sol et la couverture végétale font que l'action érosive se trouve diminuée par rapport aux écoulements abondants.

4.1.5 Analyse en période sèche et période humide

Dans cette partie on a changé l'échelle temporelle, on a étudié deux périodes : période sèche et période humide. En se basant sur les données des températures moyennes et des pluies mensuelles (Bouanani, A., 2004), on a présenté le diagramme ombrothermique (la figure 4.4) et on a trouvé que la période humide s'étend d'octobre à avril et la période sèche s'étend de mai à septembre.

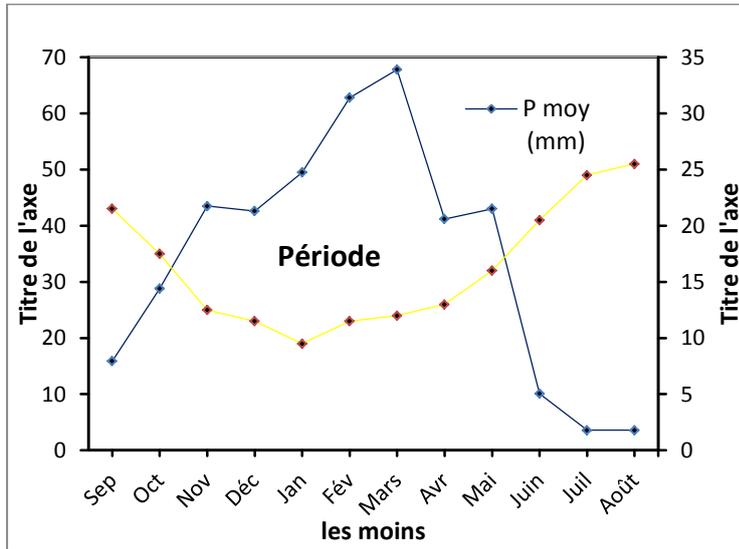
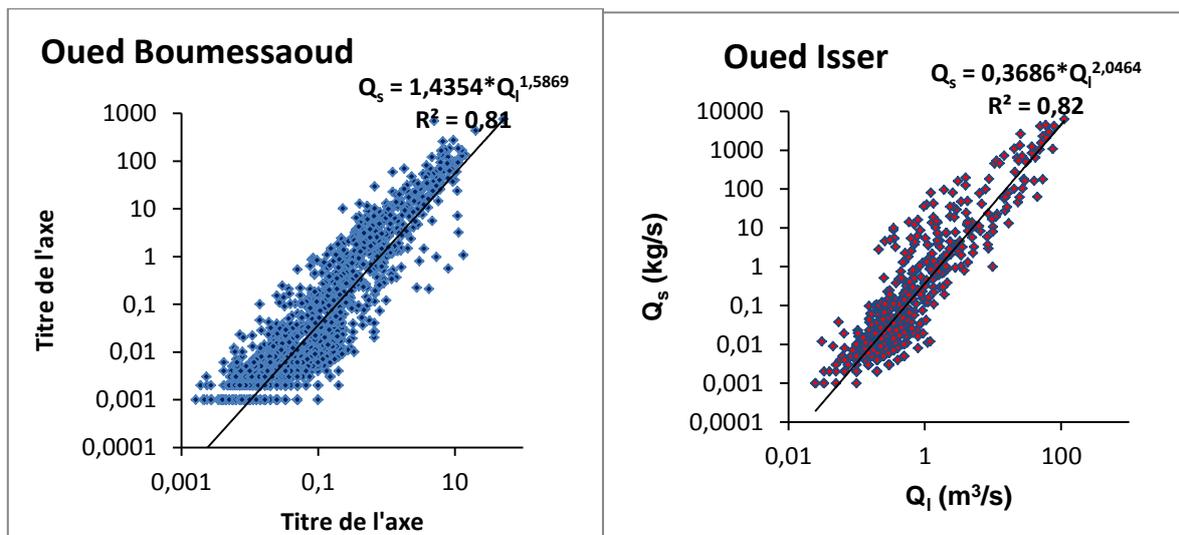


Figure 4. 4 Diagramme ombrothermique.

Les résultats du modèle sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 4. 4 Paramètres des modèles périodiques pour les bassins de BOUMESSAOUD et ISSER

Les bassins	Période	Taille de l'échantillon	a	b	R ²
<i>Oued Boumessaoud</i>	Humide	1653	1,4354	1,5869	0,81
	Sèche	384	0,8527	1,3233	0,82
<i>Oued Isser</i>	Humide	774	0,3686	2,0464	0,82
	Sèche	181	0,3226	1,7917	0,73



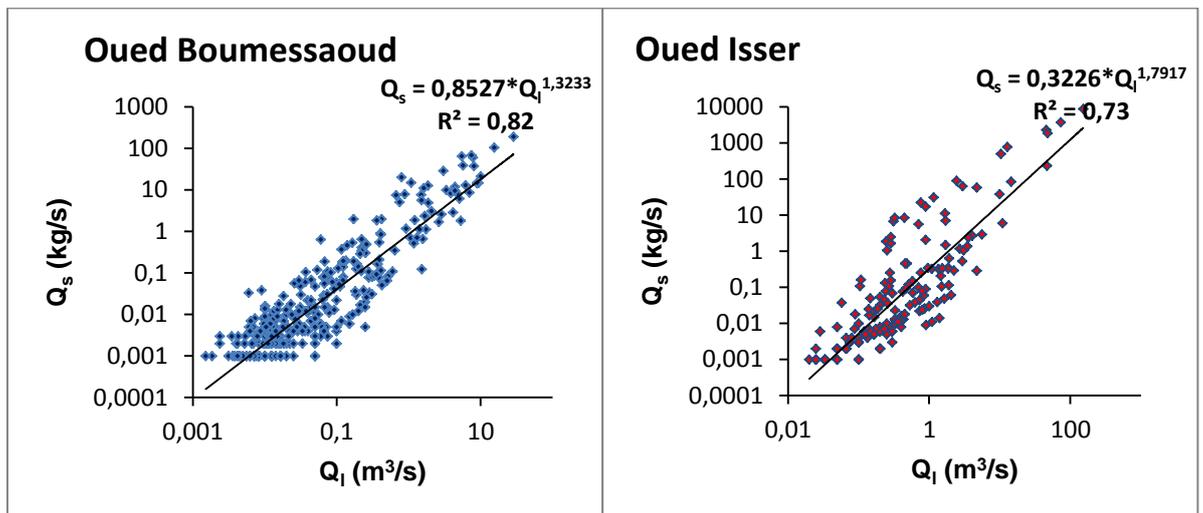


Figure 4. 5 Modèles périodiques reliant les débits solides aux débits liquides pour les bassins versants de BOUMESSAOUD et ISSER

Le coefficient de détermination R^2 est de 0.81 pour la période sèche et 0.82 pour la période humide au niveau du bassin versant de BOUMESSAOUD, concernant le Bassin versant d'ISSER, ce coefficient est de 0.73 pour la période sèche et 0.82 pour la période humide, Tandis que les paramètres a et b varient entre 1.44 et 1.59 pour la période humide et entre 0.85 et 1.32 pour la période sèche pour le bassin de BOUMESSAOUD et varient entre 0.37 et 2.05 pour la période humide et entre 0.32 et 1.79 pour la période sèche pour le bassin d'ISSER.

Conclusion

La meilleure relation de modélisation trouvée liant les débits liquides aux débits solides en suspension pour nos deux bassins étudiés est celle de type puissance de forme générale : $Q_s = a Q_l^b$ car il en a résulté les valeurs des coefficients de détermination les plus élevés.

Pour oued BOUMESSAOUD, le coefficient de détermination le plus élevé est donné par le modèle saisonnier (été + automne) et est égale à 0.86 ainsi pour oued ISSER, le meilleur coefficient de détermination est donné par le modèle saisonnier (printemps) et est égale à 0.83.

4.2 Quantification du transport solide

Introduction

Le suivi de l'évolution quantitative des processus du transport solide et la quantification de l'érosion spécifique se présente comme très utile dans l'aboutissement au succès des

interventions d'aménagement dans le bassin versant, pour ce fait nous avons adopté la méthode des modèles de régressions.

4.2.1 Calcul des apports

4.2.1.1 Apports liquides

L'apport liquide (Al) engendrant le flux des apports solides (As), est calculé par la formule :

$$Al = \sum_1^N (t_{j+1} - t_j) Q_j \dots \dots \dots 72$$

Avec :

Q_j : Débit liquide à l'instant t_j .

N : Nombre de prélèvement effectués sur l'année considérée.

$t_{j+1} - t_j$: Pas de temps séparant deux prélèvements consécutifs.

Ces apports liquides sont les mêmes pour les différents modèles. Ils sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 4. 5 Apports liquides annuels d'oued Isser.

Année \ Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Al annuel [hm ³ /an]
91 - 92	0,00	0,38	0,53	0,84	0,75	0,63	1,25	4,29	3,55	0,68	0,08	0,00	12,98
92 - 93	0,00	0,00	0,43	0,65	0,55	0,49	0,74	0,60	2,36	0,09	0,00	0,00	5,91
93 - 94	0,00	0,00	0,17	0,43	1,13	1,94	0,88	0,40	0,19	0,01	0,00	0,00	5,14
94 - 95	1,71	1,80	1,55	0,57	0,72	0,49	9,47	1,10	0,35	0,00	0,00	0,00	17,76
95 - 96	0,04	1,03	0,24	0,93	2,25	3,20	16,19	2,28	2,29	0,85	0,23	0,03	29,55
96 - 97	0,23	0,35	0,41	0,74	1,19	0,72	0,26	0,57	0,19	0,01	0,00	1,04	5,72
97 - 98	4,74	0,47	0,55	0,75	0,65	0,82	0,43	0,26	0,34	0,00	0,00	0,00	9,02
98 - 99	0,00	0,00	0,00	0,13	0,59	0,46	3,63	0,52	0,03	0,00	0,00	0,00	5,35
99 - 00	1,38	0,00	0,29	0,81	0,83	0,35	0,22	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	3,94
00 - 01	0,00	0,19	1,93	0,48	5,82	3,82	3,89	0,31	0,32	0,02	0,00	0,00	16,79
01 - 02	0,03	1,73	5,30	0,86	0,61	0,31	0,32	0,63	0,31	0,04	0,00	0,00	10,15
Al mensuel [hm ³ /an]	0,74	0,54	1,04	0,65	1,37	1,20	3,39	1,00	0,91	0,15	0,03	0,10	
												Al [hm ³ /an]	11,12

Tableau 4. 6 Apports liquides annuels d'oued Boumessaoud

Année \ Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Al annuel [hm ³ /an]
80 - 81	0,032	0,039	0,042	1,689	0,497	0,484	0,437	0,400	0,251	0,080	0,092	0,088	4,13
81 - 82	0,101	0,056	0,053	0,066	0,090	0,146	0,131	0,255	0,190	0,047	0,023	0,021	1,18
82 - 83	0,027	0,020	0,129	0,161	0,073	0,036	0,044	0,034	0,031	0,007	0,000	0,000	0,56
83 - 84	0,000	0,000	0,001	0,039	0,054	0,027	0,024	0,016	0,057	0,032	0,004	0,000	0,25
84 - 85	0,000	0,000	0,114	0,024	0,032	0,019	0,007	0,002	0,020	0,000	0,000	0,000	0,22
85 - 86	0,000	0,000	0,032	0,029	0,080	0,414	0,271	0,049	0,022	0,008	0,000	0,000	0,90
86 - 87	0,012	0,046	0,072	0,035	0,043	0,976	0,225	0,059	0,055	0,035	0,039	0,010	1,61
87 - 88	0,000	0,046	0,035	0,057	0,047	0,048	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,25
88 - 89	0,007	0,067	0,239	0,137	0,129	0,129	0,870	0,017	0,012	0,008	0,000	0,003	1,62
89 - 90	0,000	0,000	0,000	0,006	0,583	0,143	0,121	0,198	0,308	0,155	0,020		1,53
90 - 91	0,047	0,000	0,133	0,309	0,251	0,295	1,861	0,186	0,037	0,009	0,000	0,000	3,13
91 - 92	0,102	0,075	0,082	0,124	0,093	0,089	0,145	0,413	0,456	0,072	0,035	0,027	1,71
92 - 93	0,023	0,028	0,058	0,053	0,053	0,109	0,074	0,054	0,514	0,011	0,000	0,000	0,98
93 - 94	0,014	0,014	0,015	0,014	0,319	0,248	0,061	0,014	0,030	0,014	0,014	0,014	0,77
94 - 95	0,131	0,551	0,349	0,059	0,093	0,132	1,789	0,196	0,000	0,000	0,000	0,000	3,30
95 - 96	0,000	0,580	0,000	0,329	0,707	0,516	1,206	0,087	0,148	0,192	0,027	0,005	3,80
96 - 97	0,149	0,021	0,016	0,011	0,437	0,020	0,023	0,472	0,093	0,054	0,023	0,000	1,32
97 - 98	0,416	0,038	0,191	0,398	0,114	0,168	0,157	0,031	0,145	0,007	0,000	0,000	1,66
98 - 99	0,000	0,000	0,003	0,001	0,510	0,055	1,185	0,059	0,010	0,000	0,000	0,000	1,82
99 - 00	0,000	0,000	0,128	0,268	0,031	0,012	0,000	0,000	0,049	0,000	0,000	0,000	0,49
00 - 01	0,000	0,344	0,182	0,079	0,238	0,279	0,055	0,005	0,003	0,000	0,000	0,000	1,19
Al mensuel [hm³/an]	0,051	0,092	0,089	0,185	0,213	0,207	0,414	0,121	0,116	0,035	0,013	0,008	4,13
												Al [hm³/an]	11,12

Pour l'oued ISSER, l'apport liquide maximal est enregistré durant l'année (95/96) et égale à 29.55 hm³ alors que le minimal est constaté en (99/00) avec une valeur 3.94 hm³. Concernant

la variation mensuelle, la moyenne du mois de mars donne la plus grande valeur 3.39 hm³.alors que le mois de juillet prend la plus faible 0.028 hm³ tandis que pour l'oued BOUMESSAOUD, l'apport liquide maximal est égale à 4.13 hm³et est enregistré durant l'année (80/81) alors que le minimal avec une valeur 0.22 hm³ est constaté en (99/00). Par rapport à la variation mensuelle, la moyenne du mois de mars donne la plus grande valeur 0.414 hm³. Alors que le mois d'aout prend la plus faible 0.008 hm³.

4.2.1.2 Apports solides

Les apports solides en tonnes ou en millions de tonnes, As (10⁶ t ou Mt) et les apports spécifiques en tonnes par kilomètre carré par an, Ass (t/km²/an) sont donnés par :

$$As = Qs \cdot N \cdot 10^9 \dots\dots\dots 73$$

$$Ass = (As \cdot 10^6) / S \dots\dots\dots 74$$

Avec :

As : Apport solide annuel, mensuel ou saisonnier (Mt)

Qs : Débit solide annuel, mensuel ou saisonnier (kg/s)

N : Temps en secondes. (s)

Ass : Apport solide spécifique (t/km²/an)

S : Superficie du bassin versant (km²)

a. Les apports issus des modèles instantanés

Les flux totaux des matières solides en suspension exportés par les deux oueds étudiés sont calculés à partir des modèles des débits instantanés et sont présentés dans les tableaux suivants

Tableau 4. 7 Apports solides annuels (modèle instantané) d'oued ISSER

Année \ Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	As annuel [t/an]
91 - 92	0,00	24,88	44,33	102,70	79,24	60,90	340,57	7430,3	5448,2	71,83	1,88	0,00	13604,86
92 - 93	0,00	0,00	29,42	62,34	43,91	48,67	79,96	66,98	3116,9	2,30	0,00	0,00	3450,51
93 - 94	0,00	0,00	11,21	25,83	231,04	728,50	120,76	29,11	6,96	0,08	0,00	0,00	1153,49
94 - 95	6057,31	3423,32	1668,84	64,32	71,13	52,41	64177,1	200,64	20,90	0,06	0,00	0,00	75736,00
95 - 96	3,37	817,36	8,23	390,68	3189,53	2476,06	67957,2	818,08	849,35	196,41	9,35	0,43	76716,03
96 - 97	9,40	22,04	24,52	75,60	267,99	82,04	10,49	59,08	7,42	0,09	0,00	3952,0	4510,67

97 - 98	29761,8	71,26	57,68	85,46	61,63	109,74	31,09	13,61	22,43	0,00	0,00	0,00	30214,67
98 - 99	0,00	0,00	0,00	4,17	90,69	32,40	4847,99	53,80	0,72	0,00	0,00	0,00	5029,77
99 - 00	7195,41	0,00	53,22	121,15	108,73	18,52	8,58	1,21	0,46	0,00	0,00	0,00	7507,28
00 - 01	0,00	23,61	4750,53	39,14	49473,8	16344	7499,39	13,94	14,85	0,41	0,00	0,00	78159,66
01 - 02	2,40	9402,96	38735,4	102,29	52,09	15,25	18,87	86,39	35,19	0,95	0,00	0,00	48451,76
As mensuel [t/an]	3911,79	1253,22	4125,76	97,61	4879,07	1815,32	13190,8	797,56	865,76	24,74	1,02	359,31	
												As [t/an]	31321,34
												Ass [t/an/km2]	35,67

Tableau 4. 8 Apports solides annuels (modèle instantané) d'oued BOUMESSAOUD

Année/ Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	As annuel [t/an]
80 - 81	4,40	5,98	6,74	5476,3	297,48	310,67	223,96	195,53	98,82	20,70	20,65	19,18	6680,43
81 - 82	30,97	9,72	8,97	12,52	19,96	45,31	36,18	128,31	82,27	8,28	2,42	2,40	387,31
82 - 83	3,59	1,96	42,67	54,07	14,72	5,30	7,59	4,47	3,95	0,75	0,00	0,00	139,07
83 - 84	0,00	0,00	0,08	8,65	11,73	3,37	2,62	1,38	10,94	4,11	0,41	0,00	43,29
84 - 85	0,00	0,00	101,45	2,82	4,16	2,18	0,58	0,14	4,15	0,00	0,00	0,00	115,48
85 - 86	0,00	0,00	9,10	3,89	41,66	600,30	202,12	8,08	2,33	0,73	0,00	0,00	868,21
86 - 87	3,51	13,83	43,96	4,73	6,97	1474,3	82,70	10,51	9,56	4,70	5,72	0,94	1661,48
87 - 88	0,00	8,57	5,12	10,66	9,24	10,39	2,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	46,19
88 - 89	2,24	23,42	115,82	37,09	34,03	35,79	2279,3	1,73	1,04	0,65	0,00	0,31	2531,49
89 - 90	0,00	0,00	0,00	1,96	622,54	42,30	30,95	86,35	139,86	46,40	4,95	0,00	975,31
90 - 91	15,53	0,00	45,06	141,56	99,54	144,53	3877,9	91,07	10,26	0,80	0,00	0,00	4426,26
91 - 92	28,97	15,32	17,53	32,45	21,01	20,29	88,15	424,74	683,59	14,62	4,74	3,10	1354,51
92 - 93	2,55	3,36	11,83	8,75	8,65	62,57	17,56	11,79	1236,6	1,03	0,00	0,00	1364,73
93 - 94	1,14	1,18	1,30	1,18	663,13	164,15	18,67	1,14	8,29	1,14	1,18	1,18	863,68
94 - 95	104,38	338,76	207,41	11,96	22,32	110,18	4942,1	107,99	0,00	0,00	0,00	0,00	5845,11

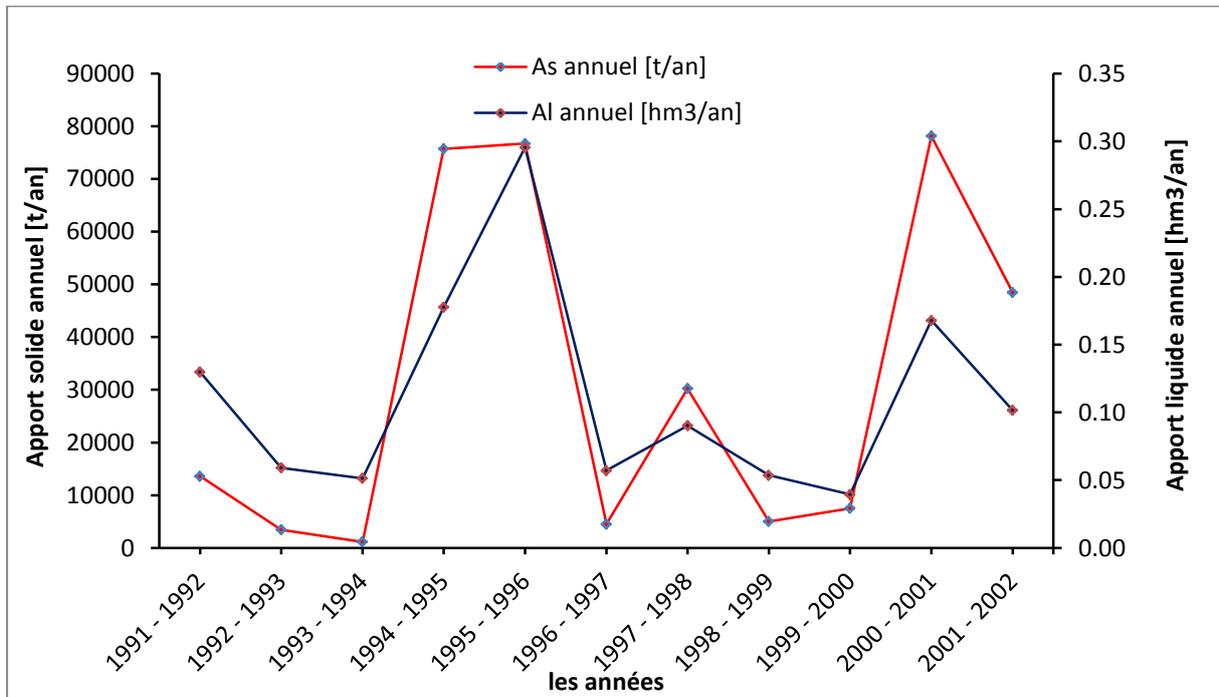


Figure 4. 6 Apports solides et liquides annuels (modèle instantané) d'oued ISSER

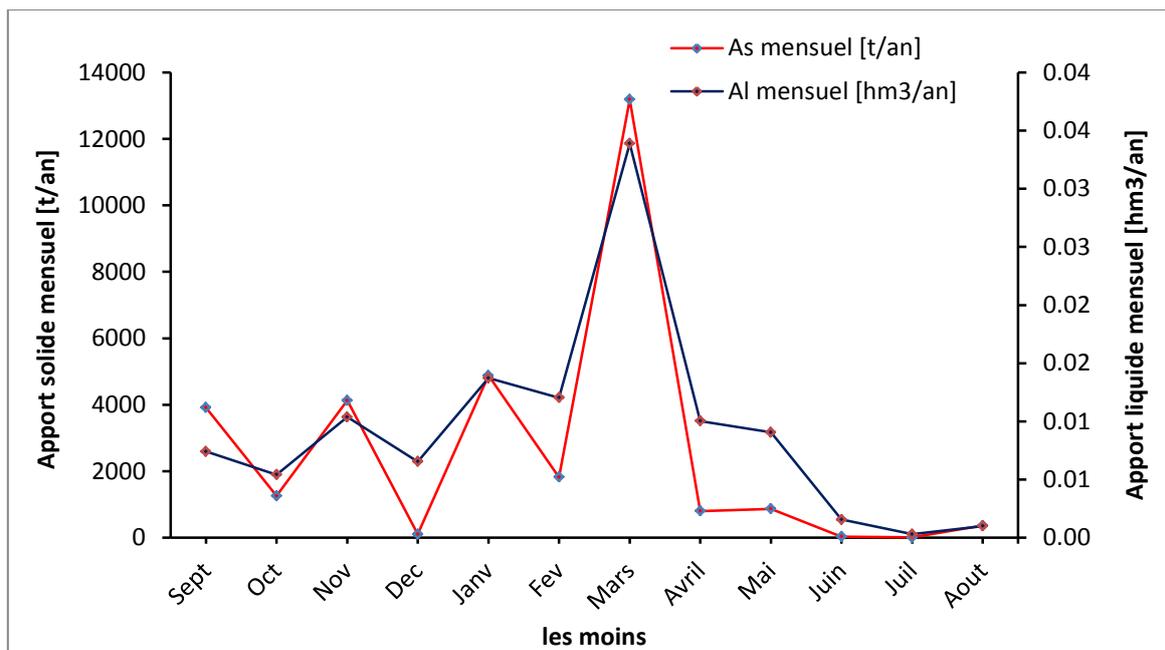


Figure 4. 7 Apports solides et liquides mensuels (modèle instantané) d'oued ISSER.

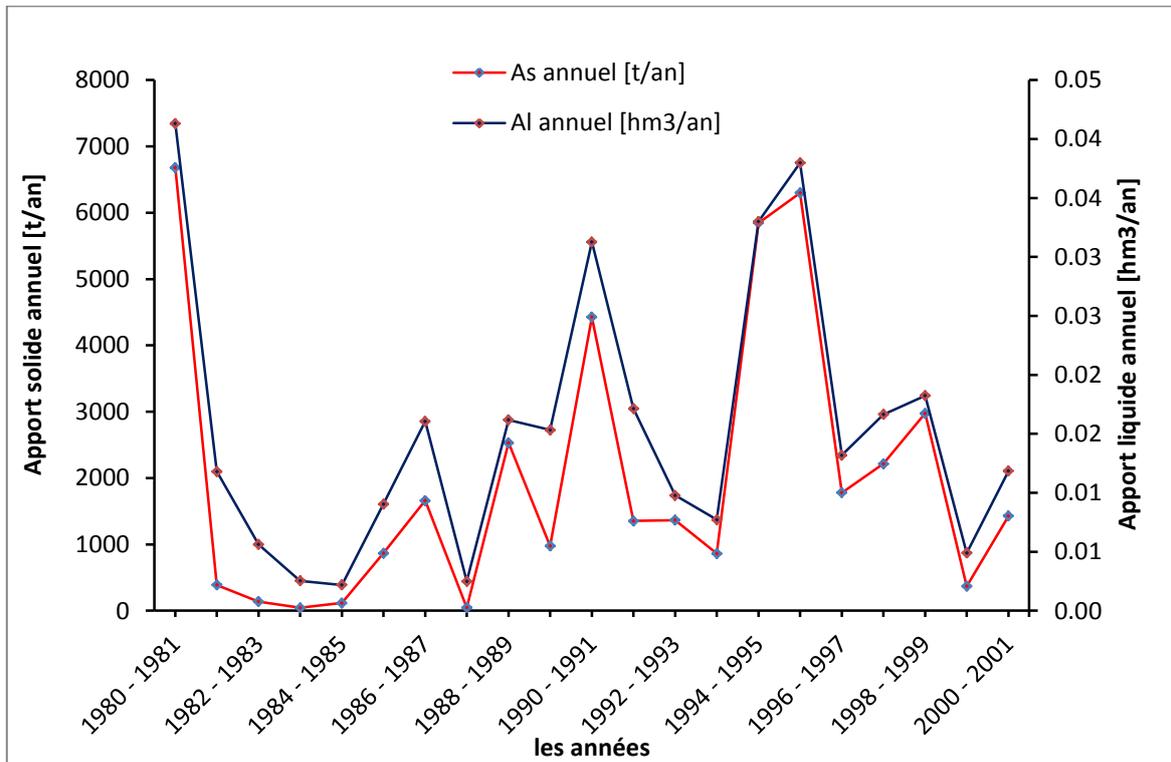


Figure 4. 8 Apports solides et liquides annuels (modèle instantané) d'oued BOUMESSAOUD.

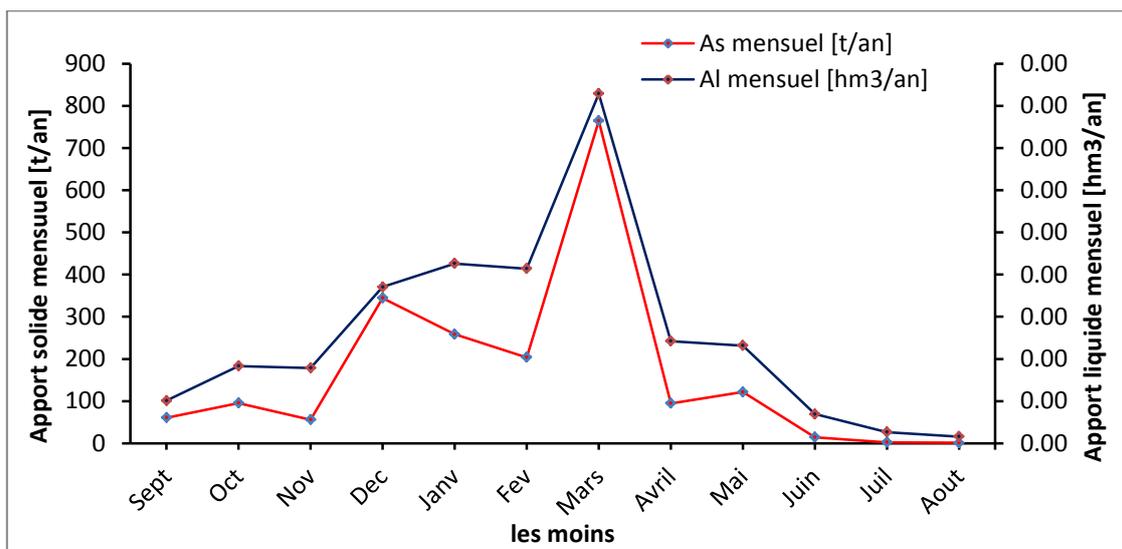


Figure 4. 9 Apports solides et liquides mensuels (modèle instantané) d'oued BOUMESSAOUD.

b. Apports saisonniers

Cette fois-ci les flux totaux des matières solides en suspension exportées par les deux oueds étudiés sont calculés à partir des modèles saisonniers et sont illustrés dans les tableaux suivants :

Tableau 4. 8 Apports solides saisonniers d'oued ISSER

Année \ Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Jui	Juil	Aout	As annuel [t/an]	
91 - 92	0,00	42,7	78,68	79,4	60,33	46,01	224,11	3250	2418	131	2,8	0,00	6334,09	
92 - 93	0,00	0,00	50,59	47,0	32,59	37,72	65,80	54,4	1445	3,5	0,0	0,00	1736,99	
93 - 94	0,00	0,00	19,23	18,5	191,13	639,7	94,30	25,76	7,02	0,1	0,0	0,00	995,86	
94 - 95	17872	9597	4381,3	50	53,78	41,11	21103	146,5	19,4	0,1	0,0	0,00	53264,49	
95 - 96	6,09	2079	12,88	366	3358	2373	25278	524,5	538,	419	15	0,59	34970,87	
96 - 97	15,20	37,91	41,30	57,35	225,42	63,03	10,60	48,9	7,45	0,1	0,0	11777	12284,68	
97 - 98	97123	142	107,21	65,8	46,42	85,79	27,65	12,8	20,2	0	0,0	0,00	97631,28	
98 - 99	0,00	0,00	0,00	2,82	74,22	23,65	2244,3	44,1	0,79	0,0	0,0	0,00	2389,90	
99 - 00	22343	0,00	108,72	96,8	85,25	13,15	8,78	1,33	0,52	0,0	0,0	0,00	22657,89	
00 - 01	0,00	44,6	13878	29,4	60424	19090	3216	13,8	14,7	0,6	0,0	0,00	96711,26	
01 - 02	4,18	2970	129582	78,7	38,83	10,75	17,48	65,5	27,4	1,4	0,0	0,00	159527,54	
As mensuel [t/an]	12487	3785	13478	81,1	5871,8	2038	4753	380,7	409,0	50	1,6	1071		
												As [t/an]	44409,53	
													Ass [t/an/km2]	50,58

Tableau 4. 9 Apports solides saisonniers d'oued Boumessaoud

Année/ Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	As annuel [t/an]	
80 - 81	6,09	8,36	9,47	6686,9	286,59	301,79	181,83	159,39	81,86	30,51	29,80	27,59	7810,17	
81 - 82	46,49	13,72	12,62	10,17	16,58	39,52	30,81	103,69	67,19	11,73	3,27	3,27	359,06	
82 - 83	4,97	2,63	64,07	47,96	12,08	4,15	6,68	4,03	3,59	1,02	0,00	0,00	151,18	
83 - 84	0,00	0,00	0,10	7,35	9,90	2,58	2,40	1,29	9,58	5,66	0,55	0,00	39,41	
84 - 85	0,00	0,00	167,7	2,14	3,21	1,67	0,54	0,13	3,58	0,00	0,00	0,00	178,97	
85 - 86	0,00	0,00	13,54	3,04	40,25	669,14	157,77	7,16	2,14	0,97	0,00	0,00	894,01	
86 - 87	5,20	20,96	70,59	3,67	5,58	1641,7	68,91	9,27	8,45	6,48	7,96	1,26	1850,10	
87 - 88	0,00	12,18	7,13	8,66	7,66	8,78	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	46,41	
88 - 89	3,33	35,17	181,09	31,68	28,95	30,67	1616,8	1,59	0,96	0,85	0,00	0,43	1931,58	
89 - 90	0,00	0,00	0,00	1,72	661,43	36,56	26,54	70,54	114,40	68,74	7,24	0,00	987,17	
90 - 91	23,30	0,00	67,46	131,01	90,21	135,52	2797,4	73,61	8,60	1,07	0,00	0,00	3328,24	
91 - 92	42,89	21,97	25,18	27,57	17,48	16,92	69,63	322,17	503,56	20,94	6,53	4,22	1079,06	
92 - 93	3,45	4,58	17,01	6,97	6,88	61,08	15,04	10,14	882,90	1,38	0,00	0,00	1009,43	
93 - 94	1,50	1,55	1,73	0,85	764,76	161,15	15,56	1,07	6,93	1,50	1,55	1,55	959,70	
94 - 95	169,57	535,91	327,87	9,85	18,85	114,22	3481,1	87,04	0,00	0,00	0,00	0,00	4744,46	
95 - 96	0,00	1718,3	0,00	716,56	2032,5	730,68	1479,2	19,97	46,57	314,53	4,38	0,67	7063,43	
96 - 97	234,86	3,83	1,89	0,73	803,10	1,85	4,43	631,39	18,07	13,76	5,40	0,00	1719,31	
97 - 98	1656,1	11,65	391,46	596,01	39,42	162,83	113,97	4,15	107,81	0,73	0,00	0,00	3084,13	
98 - 99	0,00	0,00	0,75	0,06	993,87	23,39	1496,9	13,72	0,92	0,00	0,00	0,00	2529,61	
99 - 00	0,00	0,00	180,59	217,88	3,05	0,92	0,00	0,00	29,81	0,00	0,00	0,00	432,25	
00 - 01	0,00	999,46	371,29	32,35	183,85	436,37	13,86	0,31	0,21	0,00	0,00	0,00	2037,70	
As mensuel [t/an]	104,65	161,44	91,03	406,82	286,96	218,17	551,50	72,41	90,34	22,85	3,18	1,86		
													As [t/an]	2017,43
													Ass [t/an/km ²]	43,86

En analysant ces données, on déduit que l'oued ISSER apporte en moyenne, annuellement 44409,53 tonnes de sédiments, avec un maximum de 159527 tonnes (01/02) un minimum de 995.86 tonnes (93/94), avec une moyenne de la variation mensuelle maximale enregistrée en mois de Novembre (13478 t/an) et minimale en mois de Juillet (1.63 t/an). (Figures 4.10. et 4.11.). Pour l'oued Boumessaoud, il apporte 2011,21 tonnes de sédiments, avec un maximum de 7810 tonnes (80/81) un minimum de 39.4 tonnes (83/84), et une moyenne de variation mensuelle maximale enregistrée en mois de Mars (551.5 t/an) et minimale en mois d'Aout(1.86 t/an). (Figures 4.12. et 4.13.)

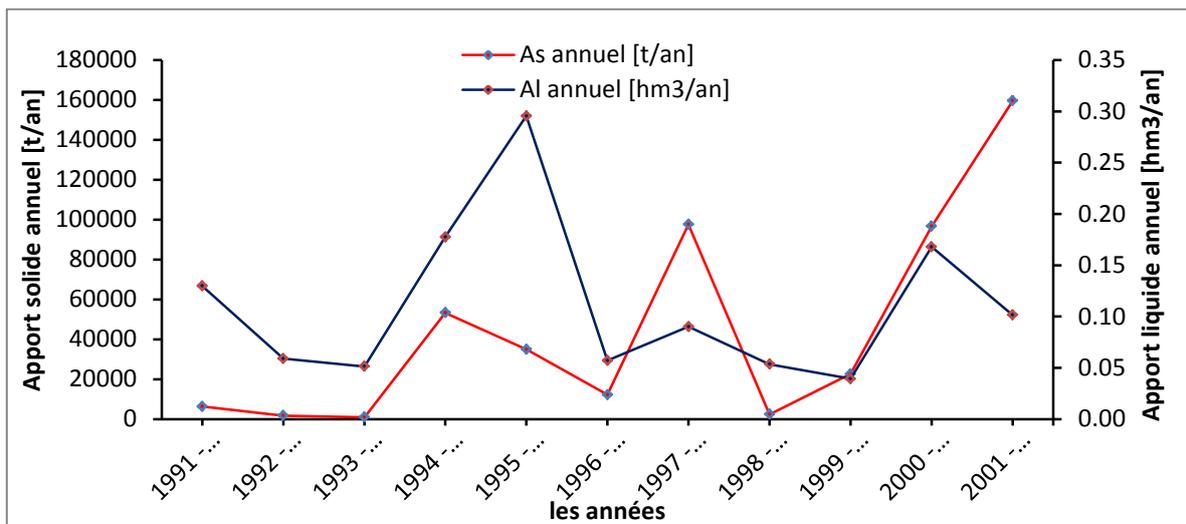


Figure 4. 10 Apports solides et liquides annuels (modèle saisonnier) d'oued ISSER.

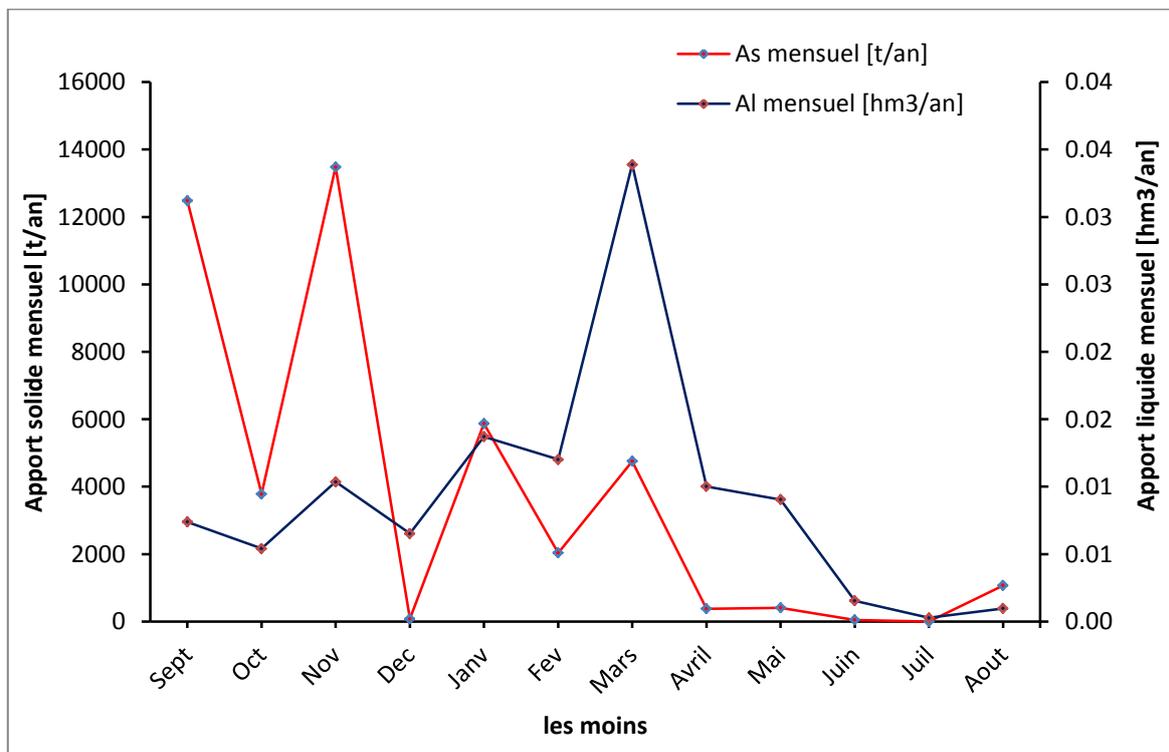


Figure 4. 11 Apports solides et liquides mensuels (modèle saisonnier) d'oued ISSER.

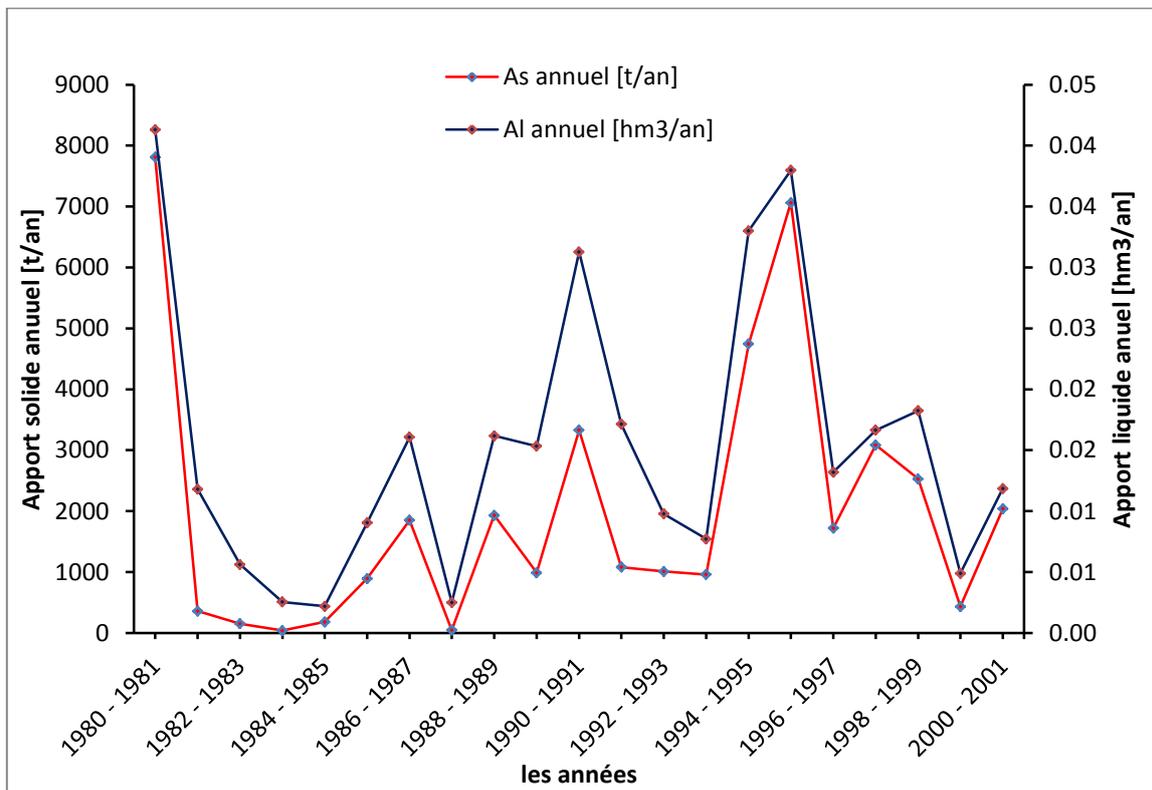


Figure 4. 12 Apports solides et liquides annuels (modèle saisonnier) d'oued BOUMESSAOUD.

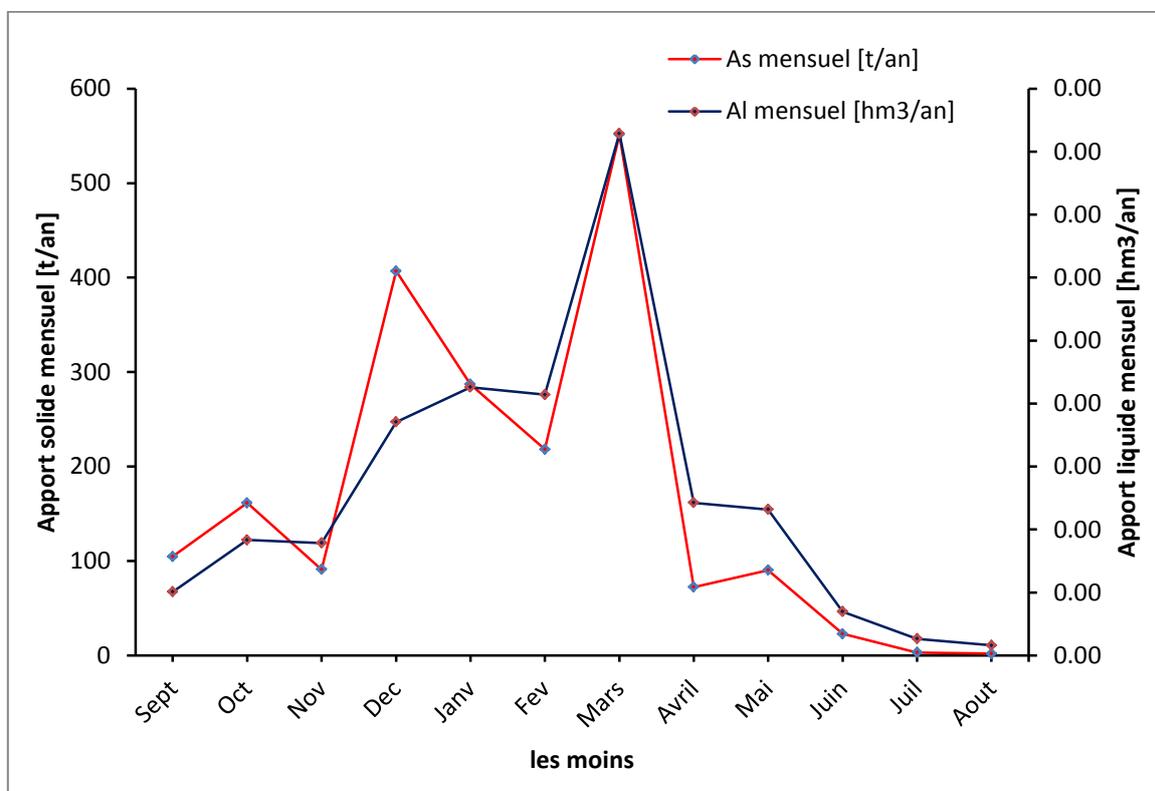


Figure 4. 13 Apports solides et liquides mensuels (modèle saisonnier) d'oued BOUMESSAOUD.

c. Apports périodiques

Pour mieux appréhender le phénomène de l'érosion et du transport solide, nous avons vu qu'il serait judicieux d'analyser la répartition périodique des flux et des apports solides en suspension dans nos deux bassins. Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants

Tableau 4. 10 Apports solides périodiques d'oued ISSER

Année \ Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	As annuel [t/an]
91 - 92	0,00	23,08	41,74	98,81	75,50	57,76	349,24	8615,71	3427,04	81,39	2,82	0,00	12773,09
92 - 93	0,00	0,00	27,30	59,06	41,19	46,85	76,43	64,28	2043,89	3,34	0,00	0,00	2362,34
93 - 94	0,00	0,00	10,39	23,76	231,36	756,37	117,29	27,25	9,53	0,15	0,00	0,00	1176,10
94 - 95	3452,76	3967,41	1876,81	62,57	67,49	50,81	80976,2	199,05	26,45	0,10	0,00	0,00	90679,66
95 - 96	3,91	905,75	7,32	421,48	3693,49	2709,26	82635,8	842,91	748,82	181,8	12,7	0,74	92164,02
96 - 97	12,79	20,45	22,55	71,88	271,05	78,59	9,43	56,40	10,12	0,17	0,00	2218,41	2771,84
97 - 98	14769,9	70,68	55,44	82,01	58,34	106,24	29,04	12,50	27,66	0,00	0,00	0,00	15211,80
98 - 99	0,00	0,00	0,00	3,70	90,20	30,10	5527,03	51,54	1,07	0,00	0,00	0,00	5703,64
99 - 00	3805,50	0,00	53,38	118,86	105,43	16,92	7,68	1,06	0,70	0,00	0,00	0,00	4109,53
00 - 01	0,00	22,87	5609,51	36,96	62686,6	20154,6	8740,90	12,60	19,95	0,64	0,00	0,00	97284,66
01 - 02	2,93	11510,0	48658,7	98,07	49,00	13,87	17,42	84,93	37,68	1,44	0,00	0,00	60474,16
As mensuel [t/an]	2004,34	1501,85	5123,93	97,92	6124,52	2183,76	16226,0	906,20	577,54	24,46	1,41	201,74	
												As [t/an]	34973,71
												Ass [t/an/km ²]	39,83

Tableau 4. 11 Apports solides périodiques d'oued BOUMESSAOUD

Année/Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	As annuel [t/an]
80 - 81	6,85	5,21	5,91	6850,1	305,33	321,10	224,37	194,66	102,73	24,85	26,76	25,17	8092,99
81 - 82	34,61	8,57	7,88	11,15	18,10	42,81	33,76	129,66	80,67	11,70	4,18	4,02	387,11
82 - 83	5,60	1,62	40,8	51,80	13,22	4,58	6,76	3,82	6,40	1,29	0,00	0,00	135,94
83 - 84	0,00	0,00	0,06	7,99	10,78	2,86	2,19	1,12	14,97	6,57	0,74	0,00	47,28
84 - 85	0,00	0,00	110	2,37	3,55	1,85	0,47	0,11	5,33	0,00	0,00	0,00	124,03
85 - 86	0,00	0,00	8,61	3,35	42,85	695,75	215,22	7,09	4,03	1,33	0,00	0,00	978,23
86 - 87	4,08	13,41	46,0	4,05	6,13	1707,3	79,70	9,30	13,61	7,41	8,68	1,66	1901,38
87 - 88	0,00	7,63	4,43	9,49	8,37	9,56	1,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	41,36
88 - 89	2,56	22,42	117	34,44	31,49	33,32	2797,0	1,43	1,89	1,24	0,00	0,51	3043,34
89 - 90	0,00	0,00	0,00	1,86	693,22	39,67	28,55	85,86	136,99	53,70	6,12	0,00	1045,97
90 - 91	17,14	0,00	42,9	140,52	97,10	145,03	4644,4	92,05	11,56	1,47	0,00	0,00	5192,30
91 - 92	33,89	13,80	15,8	30,00	19,09	18,47	92,32	472,48	406,15	19,65	7,47	5,17	1134,31
92 - 93	4,35	2,83	10,6	7,67	7,57	64,92	16,27	10,86	625,55	1,88	0,00	0,00	752,59
93 - 94	2,17	0,95	1,06	0,95	790,87	171,15	18,05	0,92	9,24	2,17	2,24	2,24	1002,01
94 - 95	81,46	347,5	212	10,77	20,53	120,20	6135,2	109,42	0,00	0,00	0,00	0,00	7037,72
95 - 96	0,00	1147	0,00	742,69	2092,9	761,65	2365,8	21,90	58,40	134,32	5,28	0,85	7331,23
96 - 97	100,1	2,38	1,16	0,81	834,72	2,04	4,84	1038,6	27,05	13,63	5,51	0,00	2030,81
97 - 98	494,8	7,36	259	622,14	42,37	171,14	164,76	4,10	99,27	1,06	0,00	0,00	1866,47
98 - 99	0,00	0,00	0,47	0,07	1031,7	24,97	2414,0	15,29	1,77	0,00	0,00	0,00	3488,31
99 - 00	0,00	0,00	118	230,40	3,37	1,03	0,00	0,00	30,16	0,00	0,00	0,00	383,38
00 - 01	0,00	667	246	34,62	194,62	454,52	16,09	0,26	0,44	0,00	0,00	0,00	1614,25
As mensuel [t/an]	37,51	107	59,5	418,91	298,47	228,28	917,23	104,71	77,91	13,44	3,19	1,89	
	As [t/an]												2017,43
	Ass [t/an/km²]												43,86

Après avoir analysé les données, on a trouvé que l'oued Isser apporte en moyenne, annuellement 34973,71 tonnes de sédiments, avec un maximum de 97284.7 tonnes en (00/01)

et un minimum de 1176 tonnes en (93/94), la moyenne de variation mensuelle maximale pour cet oued est enregistrée en mois de Mars (16226 t/an) et minimale en mois de Juillet (1.41 t/an). (Figures 4.14. et 4.15.) Et pour oued Boumessaoud, la maximale est enregistrée en mois de Mars (917.2 t/an) et la minimale en mois d'Aout (1.89 t/an), Cet oued apporte 2268,14 tonnes de sédiments, avec un maximum de 8093 tonnes en (80/81) un minimum de 41.36 tonnes en (87/88). (Figures 4.16. et 4.17.).

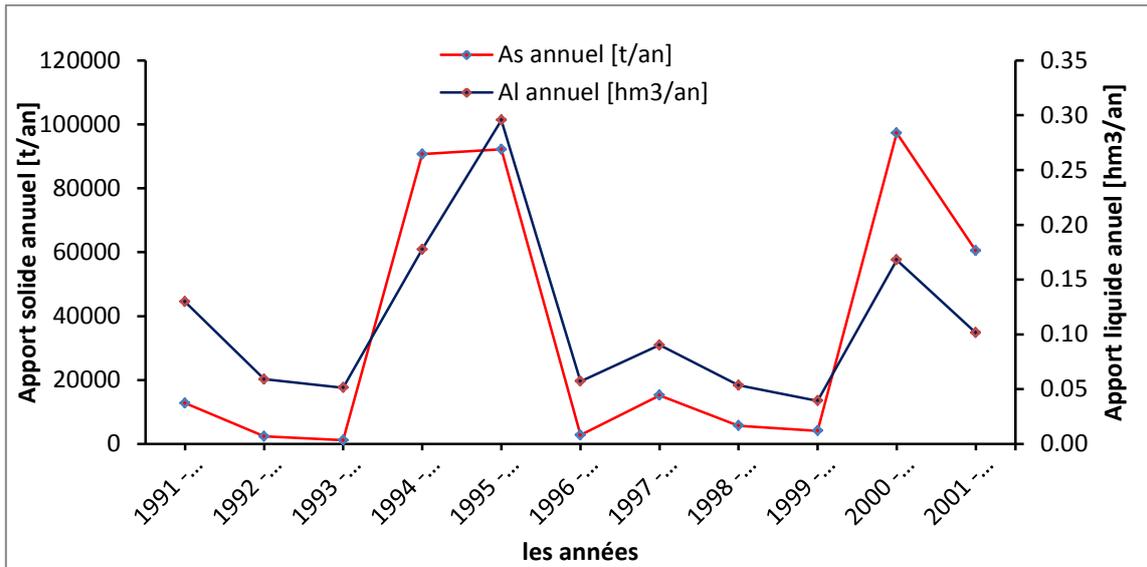


Figure 4. 14 Apports solides et liquides annuels (modèle périodique) d'oued ISSER.

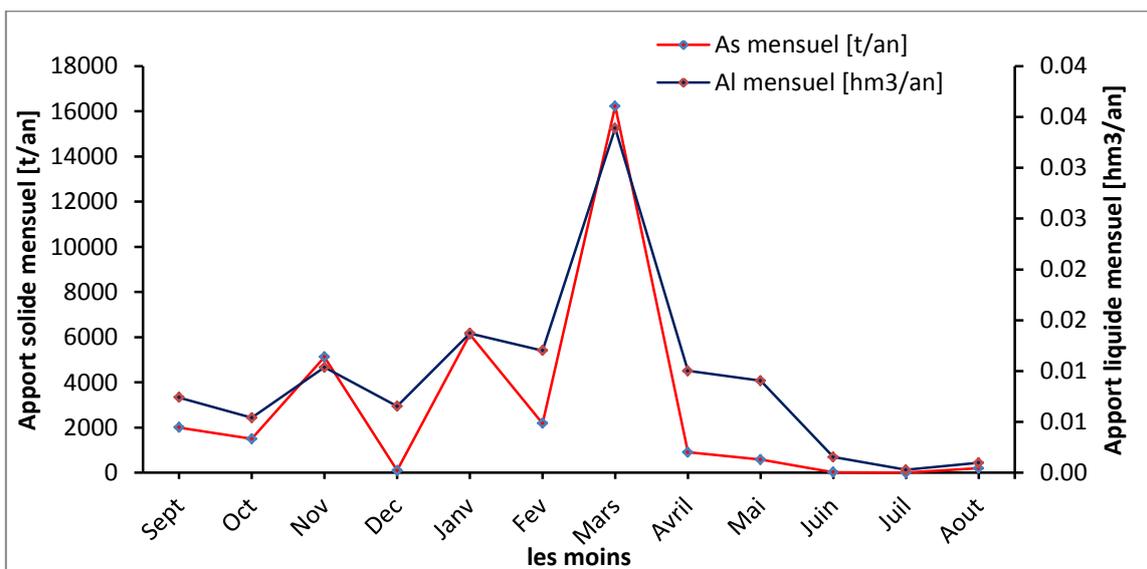


Figure 4. 15 Apports solides et liquides mensuels (modèle périodique) d'oued ISSER.

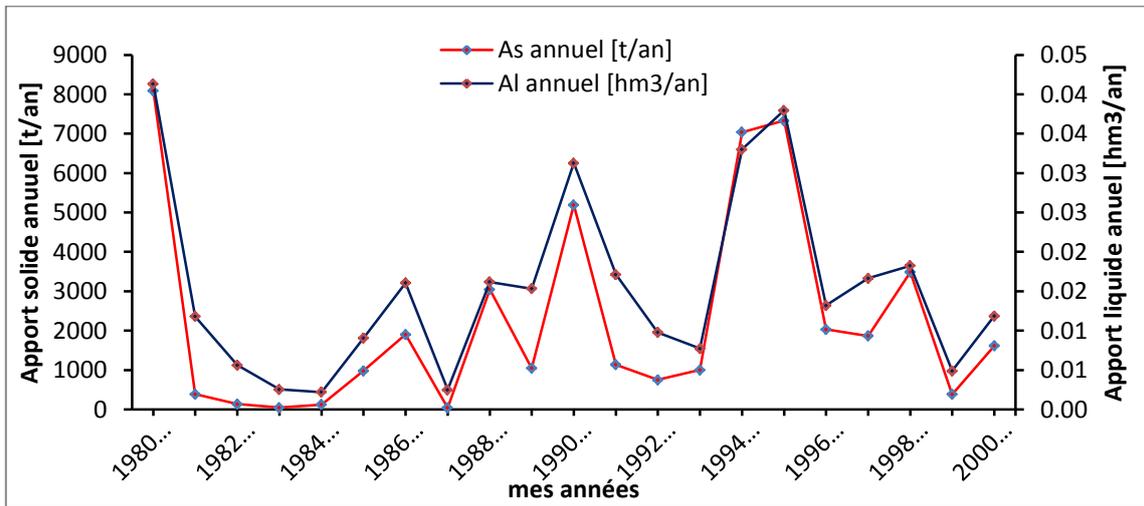


Figure 4. 16 Apports solides et liquides annuels (modèle périodique) d'oued BOUMESSAOUD.

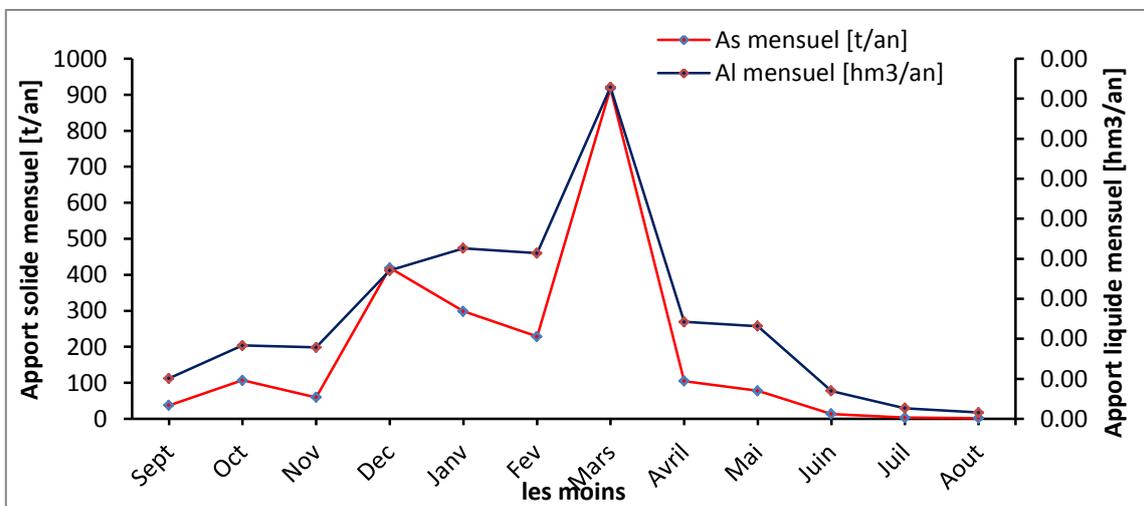


Figure 4. 17 Apports solides et liquides mensuels (modèle périodique) d'oued BOUMESSAOUD.

Conclusion

Après avoir quantifié les apports solide pour les deux bassins Isser et Boumessaoud, on peut dire que l'action érosive est différente d'un bassin à l'autre. On a constaté aussi que c'est au mois de Mars que les apports aussi bien liquides que solides sont les plus importants.

Concernant Isser 70% du transport des matières en suspension s'effectue pendant l'été et l'automne, 18% pendant l'hiver et 12% en printemps. Alors que pour Boumessaoud 19% du transport des matières en suspension s'effectue pendant l'été et l'automne, 45% pendant l'hiver et 36% en printemps.

Il est clair que le transport des matières en suspension se concentre en période humide avec 92% du transport total pour Isser et 94% pour Boumessaoud.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le transport solide est un phénomène très complexe par la variabilité aléatoire des différents paramètres climatiques et hydrologiques comme la rareté et l'irrégularité de la pluie, l'agressivité des averses et la violence des vents qui caractérisent les pays du Maghreb et qui ont une influence directe sur le déclenchement du processus de l'érosion.

L'Algérie essaye de lutter contre ce phénomène et s'appuie sur la construction des barrages, l'une des méthodes d'accroissement des ressources hydriques mais ces barrages souffrent du problème suscité étant le transport solide et leurs envasements ainsi le sapement des berges au niveau des cours d'eaux.

L'évaluation des risques d'érosion des sols se fait par la prédiction du ruissellement et de la perte de sol ainsi on peut déterminer les utilisations appropriées des terres et les mesures de conservation des sols pour un bassin versant, cela peut aider à tirer la meilleure partie de l'utilisation de la terre tout en minimisant les impacts négatifs de la dégradation des sols et d'autres problèmes environnementaux.

Cette étude avait deux objectifs, le premier était la modélisation du transport solide en suspension et l'élaboration d'une méthodologie pouvant servir à modéliser la relation entre le débit liquide et le débit solide, et le deuxième objectif était la quantification du transport solide dans les sous bassins versants de l'oued BOUMESSAOUD et de l'oued ISSER (Nord-ouest d'Algérie) par les modèles régressifs développés.

Le modèle de régression obtenu suite à cette étude a donné de bons résultats dans cette région, et a montré que cette technique est robuste et efficace pour la prévision des fluxes sédimentaires. Nous avons également montré que la relation entre le débit liquide et le débit solide est très forte avec une grande précision par rapport à la littérature.

Cependant les apports liquides et solides obtenus dans cette étude sont moyens et insatisfaisants dû à la mauvaise qualité des données des débits liquides dans les deux bassins versant étudiés. C'est d'ailleurs le problème général dans cette modélisation et dans toute modélisation des bassins hydrographiques.

L'absence d'une longue série de données de sédiments avec un pas de temps journalier et une résolution spatiale élevée des cartes de sols et d'occupation de sol ont limité la capacité de cette étude à évaluer les simulations.

L'application de ce modèle est bien fiable pour des données de qualité, et pouvant être utilisée pour bien gérer les ressources en eau dans les bassins versants et prévenir l'érosion et la charge sédimentaire qui affecte négativement les ressources en eau.

Bibliographie

Asselman, N, Fitting and interpretation of sediment rating curves . Journal of hydrology, 02, 2000, 234, 228, 248.

Bouanani, A, Transport solide et Modélisation, Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie), 250 p, Thèse de doctorat : Hydraulique : Tlemcen, Université de Tlemcen : 2004

Bouguerra, S, Quantification et modélisation du transport solide dans un cours d'eau de l'Algérie septentrionale, cas du bassin versant de l'oued Boumessaoud, 141p , Mémoire de Magister : hydraulique : Tlemcen, Université de Tlemcen : 2014

Baloul, D, interprétation et évaluation de la précision de la relation entre la concentration des sédiments en suspension et le débit liquide. Etude de cas: sous bassin versant de l'Oued Tafna et d'Oued Isser, 125p, Mémoire de Magister : hydraulique : Tlemcen, Université de Tlemcen : 2012

Lefkir, A, Modélisation du transport solide par les modèles neuroflous, 164p, Thèse de doctorat : Hydraulique : Alger, Ecole Nationale Polytechnique : 2009

Radjah ,S ,Modélisation du Transport solide par le modèle S.W.A.T (Application sur le Bassin versant des Issers), 82p, mémoire d'ingénieur : Hydraulique : Alger, Ecole Nationale Polytechnique : 2017