

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان-  
Université ABOU BEKR BELKAID



Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique

MEMOIRE

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique  
Option : Eau, Sol et Aménagement (ESA)

Thème

**Etude de la relation charge solide-débit liquide Oued Sikkak**

Soutenu publiquement le : 03 /07/2017.

Présenté par :

**Melle : OULD KADDOUR Rawda**

Devant le jury :

**M<sup>r</sup> : DEBBAL MOHAMMED ZAKARIA**

**Président**

**M<sup>me</sup> : BOUCHELKIA FADILA**

**Examineur**

**M<sup>me</sup> : LALLAM FAIZA**

**Examineur**

**M<sup>r</sup> : MEGNOUNIF ABDESSELAM**

**Encadreur**

**M<sup>r</sup> : GHENIM ABDERRAHMANE**

**Encadreur**

**Promotion 2017/2018.**

# remerciement

Avant tout, je remercie ALLAH tout puissant, de m'avoir accordé la force, le courage et les moyens pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier **Mr. Magnounif Abdesselam** et **Mr. Ghenim Abderrahmane** d'avoir accepté de m'encadrer sur ce thème, de m'avoir conseillé judicieusement, orienté, encouragé et de apporté son attention tout au long de ce travail.

Je tiens également à remercier **Mr. Debbal Mohammed** d'avoir accepté de présider le jury.

Je remercie **Mme. Bouchelkia Fadila** et **Mme. Lallam Faiza** qui m'ont honoré pour examiner mon travail.

Je tiens aussi à remercier tout ceux qui m'ont aidé de loin ou de près à l'accomplissement de ce travail.

# dédicaces

*Avec l'aide et la protection d'ALLAH que j'ai pu réaliser ce modeste travail.*

*Je dédie ce travail à :*

*Ma très chère défunte mère qui m'a mis au monde et qui n'est plus de ce monde, paix à son âme*

*Mon très cher père qui m'a toujours apporté son amour et son affection ainsi que ma belle mère*

*Mes frères et sœurs qui m'ont toujours soutenu*

*Toute ma famille*

*Mes amis*

*Mes camarades de promotion d'hydraulique*

*Ould Kaddour Rawda*

## Résumé

Le transport solide constitue par son importance, un problème majeur en Algérie (dégradation des sols agricoles, alluvionnement des retenues).

L'étude du transport solide permet d'évaluer les quantités des sédiments transportés par les oueds et de préciser la dynamique érosive du bassin et de comprendre le fonctionnement des bassins versants dans la production des sédiments.

Dans ce présent travail on s'est intéressé au transport solide du bassin versant Sikkak, pour ce faire on a utilisé une série des précipitations (mensuelles et journalières maximales) du bassin versant Sikkak recueillies à la station pluviométrique de Lalla Setti (1956 à 2004), ainsi que des données sur les débits solides et liquides recueillies à la station hydrométrique de Ain Youssef (1972-1999) et on a cherché une courbe d'estimation en appliquant un modèle de puissance ( $Q_s = aQ^b$ ), ce dernier nous a montré que le paramètre  $b$  reste linéaire ce qui veut dire que la dynamique de l'érosion est constante par contre pour le paramètre  $a$  on remarque une variation ce qui se traduit par une variation de la morphologie et du couvert végétal du bassin, on a aussi trouvé que à l'échelle saisonnière ce modèle n'est pas représentatif pour le printemps par contre avec la méthode des doubles cumuls il est représentatif.

**Mots clés :** oued sikkak, transport solide, érosion, étude pluviométrie, modèle de puissance, courbes d'estimation.



### **Abstract**

The solid transport constitutes by its importance, a major problem in Algeria (agricultural soils degradation, alluvial deposits).

The solid transport study allows to evaluate the sediment quantities transported by wadis and to precise the erosive dynamic of the basin and to understand the watershed operation in the sediment production.

In this study we were interested about the solid transport of Sikkak's watershed, to do this we have used a serie of precipitation (monthly and maximum daily) of Sikkak's watershed collected at the Rainfall station of Lalla Setti (1956-2004), thus solid and liquid debit data collected at the gauging station of Ain Youssef (1972-1999), and we have searched for a estimation curve applying a power model ( $Q_s = aQ^b$ ), this latter has shown that the parameter b still linear which means that the erosion dynamic is constant, however for the parameter a we notice a variation which is explained by the variation of the morphology and the vegetal cover of the basin, we have also found that at the seasonal scale this model is not representative for the spring however with the double cumulative method it is representative.

**Key words :** oued sikkak, Solid transport, erosion, Rainfall study, rating curve, model power.

## المخلص

إن لنقل الصلب أهمية كبيرة إلا أن الجزائر تعاني من مشكلة كبيرة منها (تدهور الأراضي الزراعية، وترسب الطمي في الخزانات).

دراسة نقل الرواسب تستخدم لتقييم كميات من الرواسب التي تحملها الوديان وتوضح حركة التآكل في حوض وهذا من أجل فهم أداء مستجمعات المياه في إنتاج الرواسب.

في هذا العمل أركز على نقل الرواسب موجودة في واد سكاك ، للقيام بذلك هناك مجموعة من هطول الأمطار (الحد الأقصى الشهري واليومي) من سكاك فاصلا جمعت محطة الأمطار لالا سيتي (1956-2004) ، وكذلك بيانات عن المواد الصلبة والسائلة تدفق معدلات جمعها إلى محطة المقايسة عين يوسف (1972-1999) ومنحنى تقدير يسعى من خلال تطبيق نموذج الطاقة ( $Q_s = aQ^b$ )، وظهر هذا الأخير a المعلمة خطية b بقية مما يعني أن القوى المحركة للتآكل هو ثابت من سلبيات للمعلمة لاحظت تغييرا مما أدى إلى الاختلاف في التشكل والغطاء النباتي من الحوض، وجدنا أيضا أن حجم الموسمية هذا النموذج ليس تمثيلا لفصل الربيع من سلبيات مع المجاميع المزدوجة هو الأسلوب التمثيلي.

الكلمات المفتاحية : نقل الرواسب، تآكل، دراسة الأمطار، نموذج قوة، منحنيات تقدير.

## Sommaire

Introduction générale ..... [1]

### CHAPITRE 1 : L'érosion et le transport solide

1.1. L'érosion ..... [3]

1.1.1. Généralités ..... [3]

1.1.2. Définition ..... [3]

1.1.3. Types d'érosion ..... [4]

1.1.3.1. Erosion géologique ..... [4]

1.1.3.2. Erosion éolien ..... [4]

1.1.3.2.1. Origine et mécanisme de l'érosion éolienne ..... [5]

a) La déflation ..... [5]

b) La répartition ..... [5]

c) Saltation ..... [5]

d) La suspension ..... [5]

e) L'accumulation ..... [5]

1.1.3.3. Erosion hydrique ..... [6]

1.1.3.3.1. Définition d'érosion hydrique ..... [6]

1.1.3.3.2. Mécanisme de l'érosion ..... [6]

a) Le détachement ..... [6]

b) Le transport ..... [6]

c) Le dépôt ..... [6]

1.1.3.3.3. Formes de l'érosion hydrique ..... [7]

a) Erosion de rejaillissement ..... [7]

b) Erosion en nappe ..... [8]

c) L'érosion linéaire ..... [9]

d) Types d'érosion linéaire ..... [9]

1) Erosion en rigoles ..... [9]

2) Erosion en ravine ..... [9]

e) différents types de ravinement ..... [10]

f) Erosion dite « de talus » ..... [11]

g) Erosion mécanique sèche ..... [11]



1.1. 4. Facteur influençant l'érosion hydrique .....	[11]
1.1.4.1. La nature du sol .....	[11]
1.1.4.2. Le couvert végétal .....	[12]
1.1.4.3. Les facteurs climatiques .....	[12]
1.1.4.4. Les facteurs topographiques .....	[13]
1.1. 5. Méthodes d'évaluation de l'érosion hydrique .....	[14]
1.1. 6. Quantification de l'érosion .....	[14]
a- Formule de Henin 1950 .....	[14]
b- Formule de Wischmeier et Smith .....	[15]
c- Formule de Fournier (1960) .....	[15]
d- Formule de la SOGREAH .....	[15]
e- Formule de T'ixeront (1960) .....	[16]
1.1. 7. Conséquences de l'érosion .....	[16]
1.1. 8. Problème lies a l'érosion et le transport solide .....	[17]
1.2. Transport solide .....	[17]
1.2.1. Généralité .....	[17]
a) La compétence .....	[18]
b) La capacité .....	[18]
I.2.2. Définition du transport solide .....	[18]
I.2.2.1. Le transport solide par charriage .....	[19]
I.2.2.1.1. Définition .....	[19]
1.2.2.2. Transport en suspension .....	[20]
a) Définition .....	[20]
b) Description du phénomène .....	[21]
a) Formule de Bagnold (1966) .....	[21]
b) Formule de Bijker (1971) .....	[21]
1.2.2.3. La saltation .....	[22]
1.2.2.3.1. Définition .....	[22]
I.2.3. La mesure de transport solide .....	[23]
I.2.3. 1. La mesure du transport en suspension .....	[23]
1.2.3.2 La mesure du transport de fond .....	[23]

a) Mesure directe .....	[23]
b) Les mesures indirectes.....	[25]
1.2.4. Quelques travaux effectués sur le transport solide en Algérie.....	[28]
1.2.5. Conclusion.....	[29]

## **Chapitre 2 : présentations de la zone d'étude**

2.1. Situation géographique.....	[30]
2.2. Caractéristiques de forme.....	[31]
2.2.1. Indice de compacité.....	[31]
2.2.2. Rectangle équivalent.....	[31]
2.3. Etude du relief.....	[32]
2.3.1. Courbe hypsométrique.....	[32]
2.3.2 Hauteurs caractéristiques.....	[34]
2.4. L'indice de pente .....	[35]
a. Indice de pente globale $I_g$ .....	[35]
b. Indice de pente de Roche $I_P$ .....	[35]
c. Indice de pente moyenne du bassin versant $I_m$ .....	[36]
d. La dénivelée Spécifique « $D_s$ » .....	[37]
2.5. Réseau hydrographique.....	[37]
2.5. 1. Le chevelu hydrographique.....	[37]
2.5. 2. Densité de drainage.....	[38]
2.5. 3. Rapport de confluence.....	[38]
2.5. 4. Rapport de longueur .....	[38]
2.5. 5. Coefficient de torrentialité .....	[38]
2.5. 6. Temps de concentration .....	[39]
a) La formule de GIANDOTTI (1937) .....	[39]
b) La formule de VENTURA.....	[39]
c) La formule de BASSO.....	[39]
d) La formule de KIRPICH .....	[39]
e) Formule de SOKOLOVSKY .....	[40]
f) Formule de L'ANRH.....	[40]

2.6. Géologie du site.....	[40]
2.6.1. Introduction.....	[40]
2.6.2 Carte géologique.....	[41]
2.7. Sols et végétation.....	[41]
2.8. Conclusion .....	[44]

### **Chapitre 3 : Etude de la pluviométrie**

3.1 Introduction.....	[46]
3.2 Précipitations mensuelles.....	[47]
3.3 Précipitations annuelles.....	[49]
3.4 Les Précipitations saisonniers.....	[50]
3.5 Précipitations journalières maximales mensuelles.....	[51]
3.6 Précipitations journalières maximales annuelles.....	[53]
3.7 Etude des précipitations journalières maximales saisonnières.....	[54]
<b>3.8 Stationnarité de la pluviométrie.....</b>	<b>[55]</b>

### **Chapitre 4: Etude de la relation débit solide – débit liquide**

4.1. Introduction.....	[57]
4.2. Courbe estimation : Modèle en puissance.....	[57]
4.3. Données et méthodologie .....	[59]
4.3.1 Collecte et mise en forme des données.....	[59]
4.3.2. Apport solide et liquide annuelle.....	[60]
4.3.3. Analyse à l'échelle annuelle.....	[63]
4.3.4. Analyse saisonnière.....	[65]
4.4. Conclusion.....	[71]

Conclusion générale

---

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Valeurs de $\alpha$ pour différentes perméabilités.....	[16]
Tableau 1.2 : Quelques estimations de la dégradation spécifique en Algérie.....	[28]
Tableau 2.1 : Caractéristiques de forme des unités hydrologiques d’oued Sikkak.....	[32]
Tableau 2.2 : Répartition hypsométrique du bassin versant d’Oued Sikkak .....	[32]
Tableau 2.3 : Altitudes caractéristiques de bassin de Sikkak. ....	[35]
Tableau 2.4 : Indices de pentes pour Oued Sikkak. ....	[36]
Tableau 2.5 : Classification du relief selon Ig par l'ORSTOM. ....	[36]
Tableau 2. 6 : Classification du relief selon Ds. ....	[37]
Tableau 2.8 : Répartition des surfaces de différente culture. ....	[42]
Tableau 2.7 : Distribution du couvert végétal dans le bassin d’Oued Sikkak.....	[43]
Tableau 2.9: Principaux paramètres physique du bassin d’oued Sikkak.....	[44]
Tableau 3.1 : Paramètres statistiques des précipitations mensuelles : moyenne m (en mm), écart type s (en mm), coefficient de variation Cv, coefficient d’asymétrie Cs.....	[48]
Tableau 3.2 : Paramètres statistiques des précipitations annuellesPA : moyenne m (en mm), écart type s (en mm), coefficient de variation Cv, coefficient d’asymétrie Cs.....	[50]
Tableau 3.3 : Paramètres statistiques des précipitations journaliers maximales mensuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005).....	[51]
Tableau 3.4 : Paramètres statistiques des précipitations journaliers maximales annuelles... ..	[54]
Tableau 4.1 : Apports liquides, solides annuelle au niveau d’oued Sikkak.....	[61]
<b>Tableau 4.2:</b> paramètre de la dispersion.....	[61]
Tableau 4.3 : Paramètres de a,b et coefficient de détermination $R^2$ par modèle annuelle (1972/1999).....	[63]
Tableau 4.4: Paramètres de la relation débit solide – débit liquide.....	[64]
<b>Tableau 4.5:</b> Paramètres a, b et coefficient de détermination du modèle saisonnier (Qs-Q) appliqué au bassin Oued Sikkak (72/99).....	[65]
Tableau 4.6 : Evolution des paramètres a et b durant la saison d’automne à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005).....	[67]
Tableau 4.7: Paramètres de a et b pour la saison hiver.....	[68]
Tableau 4.8: Paramètres de a et b pour la saison du printemps.....	[69]
Tableau 4. 9 : Paramètres de a et b par la saison été.....	[70]

## Liste des Figures

Figure 1.1 : Erosion éolienne.....	[5]
Figure 1.2 : Mécanisme de l'érosion.....	[7]
Figure 1.3: Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau.....	[8]
Figure 1.4: Erosion en nappe.....	[8]
Figure 1.5 : le ravinet.....	[9]
Figure 1.6 : Rugosité d'un canal enherbé de longueur moyenne possédant une pente de 5% (adapté de Ree, 1949).....	[13]
Figure 1.7 : Diagramme de Hjulstrom.....	[18]
Figure 1.8: Modes de transport des particules dans un chenal.....	[19]
Figure 1.9 : Suspension d'une particule dans un courant.....	[20]
Figure 1.10 : Fosse artificielle .....	[23]
Figure 1.11 : Installation de mesure de charriage.....	[24]
Figure 1.12 : Echantillonneur du transport solide par charriage.....	[24]
Figure 1.13 : Echantillonneur du transport solide en charriage avec différence.....	[25]
Figure 1.14 : Traineau portatif des détecteurs .....	[26]
Figure 2.1 : Situation du bassin versant de l'Oued Sikkak.....	[30]
Figure 2.2: Courbes Hypsométriques et histogrammes de fréquences altimétriques des sous bassins de l'oued sikkak.....	[33]
Figure 2.3: Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Sikkak.....	[34]
Figure 2.4 : Occupation du sol d'oued de Sikkak.....	[43]
Figure 3.1: Présentation du bassin de l'oued Sikkak et localisation des stations pluviométriques et hydrométrique.....	[46]
Figure 3.2 : Répartition des précipitations moyennes mensuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005).....	[47]

Figure 3.3 : Variation mensuelle des paramètres statistiques de la série des précipitations à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005): a) écart type, b) coefficient de variation et c) coefficient d'asymétrie.....	[48]
Figure 3.4 : Evolution des précipitations annuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005).....	[50]
Figure 3.5 : Précipitations moyennes saisonnières à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005).....	[51]
Figure 3.6 : Moyenne mensuelle des précipitations journalières maximales mensuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005).....	[51]
Figure 3.7: Variation mensuelle des paramètres statistiques de la série des précipitations journalières maximales mensuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005): a) écart type, b) coefficient de variation et c) coefficient d'asymétrie.....	[52]
Figure 3.8 : Précipitations journalières maximales annuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005).....	[54]
Figure 3.9 : Précipitations journalières maximales saisonnières à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005).....	[54]
Figure 3.10 : Courbe des simples cumuls des précipitations annuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005).....	[55]
Figure. 3.11 : Courbe des simples cumuls appliquée aux précipitations journalières maximales annuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005).....	[56]
Figure. 3.12 : Courbe de doubles cumuls des Pjamx en fonction des PA à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005).....	[56]
Figure 4.1 : Evolution des apports annuels solides et liquides pour oued Sikkak (1972 / 2000).....	[62]
Figure 4.2 : les variations des concentrations annuelles.....	[62]
Figure 4.3 : Représentation des paramètres a et b du modèle en puissance $Q_S=aQ^b$ pour la station de Oued Sikkak (1972/2000).....	[64]

Figure 4.4 : Relations débits solides en fonction des débits liquides dans le bassin d'oued Sikkak.....	[65]
Figure 4.5 : Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides.....	[66]
Figure 4.6 : Courbe des simple cumuls des paramètres a et b par la saison d'automne.....	[68]
Figure 4.7: Courbe des simple cumuls des paramètres a et b par la saison d'hiver.....	[69]
Figure 4.8 : Courbe des simple cumuls des paramètres a et b par la saison de printemps	[70]
Figure 4.9: Courbe des simple cumuls des paramètres a et b par la saison d'été.....	[71]

## Liste des abréviations

A : pertes annuelles de sol (t/ha/an)

*a* et *b* sont des coefficients empiriques

A : paramètre de mobilité

AL : apport liquide

As : apport solide

Ass : apport solide spécifique (t/km<sup>2</sup> /an)

b : coefficient varie de 1 à 5

C : facteur agronomique.

C : coefficient de Chézy

C : connotation (g/l).

C' : coefficient des grains =  $18 \log (12h/d_{90})$

Cs : le coefficient d'asymétrie

Cv : Le coefficient de variation

D : Dénivelée entre H5% et H95% (m)

Dd : Densité de drainage (Km/Km<sup>2</sup>)

Ds : La dénivelée Spécifique

E : Ecoulement en mm

$e_b$  : facteur d'efficiences du débit solide en charriage compris entre 0,1 et 0,2

Es : La quantification de l'érosion spécifique

h : dénivelée moyenne (m)

H5% : correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 5% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique

H95% : correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 95% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique,

Hmax : altitude maximal (Km).

Hmin : altitude minimal (Km);

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

Ig : Indice de pente globale

Im : Indice de pente moyenne du bassin versant



IP : Indice de pente de Roche

K : Perméabilité

Kc : Indice de compacité

$K_s=Z_0$  : niveau de référence

l : largeur du rectangle équivalent en (Km) ;

L : longueur du rectangle équivalent en (Km)

$L(n+1)$  : la longueur moyen de thalweg d'ordre (n+1)

l'I.G.N : Institut Géographique National

$L_{cp}$  : longueur du chenal principal hydrographique en (Km)

$L_n$  : la longueur des thalwegs d'ordre n.

LS : facteur pente.

M : La moyenne : (m en mm)

$N_1$  : Nombre de cours d'eau d'ordre 1

$N_n$  est le nombre des cours d'eau d'ordre n.

P : facteur des aménagements antiérosifs.

P : périmètre du bassin versant (Km).

$P_{am}$  : précipitations annuelles (mm)

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

Q : débit liquide ( $m^3/s$ )

$Q_s$  : débit solide (kg/s)

$q_{sc}$  : Débit solide en charriage ( $m^3/s/m$ )

$q_{ss}$  : Débit solide en suspension ( $m^3/s/m$ )

R : facteur d'agressivité climatique.

$R_c$  : Rapport de confluence

$R_L$  : Rapport de longueur

S : surface du bassin versant en ( $Km^2$ ).

$S_i$  : Surface partielle en(%) comprise entre deux altitudes  $H_i$  et  $H_{i-1}$ .

$T_c$  : temps de concentration en Heures ;

$tg\beta$  : pente du fond ;

$\bar{U}$  : vitesse moyenne (m/s) ;

$V_e$  : Végétation.

$\beta$  : l'angle du fond avec l'horizontal.

## Introduction générale

Depuis les années 70, un intérêt particulier est donné à l'estimation du transport solide. Cet intérêt est motivé par l'importance des aspects quantitatifs et qualitatifs du transport solide et incluent le transport de contaminant, les tendances de qualité aquatique, la sédimentation de réservoir, l'envasement de canaux et de ports, l'érosion et la perte de sol, ainsi que les impacts écologiques (Bates et al. 2008).

Le transport des sédiments par les cours d'eau joue un rôle dans de nombreux domaines. Il affecte la morphologie des cours d'eau, des estuaires et du littoral. Il agit également par les matières en suspension sur tout l'écosystème aquatique en atténuant l'énergie lumineuse ce qui empêche ou diminue la photosynthèse. Il est responsable du comblement des retenues d'eau et son impact sur les ouvrages hydrauliques est de première importance (Bates et al. 2008)

En Algérie, le transport solide se limite au débit en suspension. La mesure du charriage est en effet un problème dont la solution n'est pas complante (Larfi B, Remini B.2006). Le processus du transport des matières solides en suspension dans les bassins versants est complexe. Il se fait principalement en période de crue et il est étroitement lié à l'intensité des précipitations, à la configuration du bassin versant et aux caractéristiques hydrauliques du cours d'eau.

Le bassin versant de l'oued Sikkak, de superficie 463 km<sup>2</sup>, est un sous bassin de la Tafna. Il prend naissance sur le plateau de Terny à la source de AÏN Rhanous, c'est un affluent rive gauche de l'oued Isser avec lequel il conflue au nord de AÏN Youcef. Le bassin versant d'Oued Sikkak occupe une surface de 463 km<sup>2</sup>.

Afin de déterminer les paramètres explicatifs du transport solide et de comprendre le fonctionnement des bassins versants dans la production des sédiments, de nombreux auteurs en Algérie comme dans d'autres pays méditerranées à travers plusieurs études basées sur l'analyse de l'évolution de la charge solide en suspension en fonction des débits liquides, ont tenté une approche quantitative à différentes échelles temporelles du phénomène de l'érosion et de la sédimentation dans les bassins fluviaux (Probst et al. ,1992 ; Megnounif et al. , 2003 ; Terfous et al, 1999, 2001, 2003; Ghenim , 2001; Benkaled et al. ,2003). L'objectif de ses travaux étant de fournir une description des processus qui influencent l'intensité des mécanismes d'érosion et de transport des sédiments.

L'objectif de cette étude est d'utiliser les paramètres "a" et "b" de la courbe d'estimation de la charge solide pour comprendre le fonctionnement du bassin versant de l'Oued Sikkak en termes de production de sédiments. De plus, l'étude s'intéresse à l'évolution temporelle de la contribution des principales sources de sédiments durant la période de septembre 1972 à août 1999.

Pour atteindre ces objectifs, le mémoire a été réparti comme ce qui suit :

Le premier chapitre est une présentation des généralités sur le phénomène d'érosion et le transport solide, leur facteur et leur conséquence dans le bassin versant. Le second chapitre est réservé à la présentation du bassin versant ; la situation géographique, la structure écologique, le sol et végétation. L'étude de la pluviométrie de la région d'étude a constitué le troisième chapitre. Le quatrième chapitre a été consacré à l'étude de la relation liant le débit solide au débit liquide. L'analyse de l'évolution temporelle des paramètres du modèle en puissance,  $Q_s = aQ^b$ , permet de clarifier le comportement des principales sources de sédiment et leur évolution dans le temps.

## **Chapitre 1 : L'érosion et le transport solide**

### **1.1. L'ÉROSION**

#### **1.1.1. Généralités**

Le sol constitue le support des cultures. C'est une entité dynamique qui s'approfondit sous l'action des processus de la pédogénèse et s'amincit sous l'action de l'érosion. L'érosion est responsable de la diminution de la fertilité des sols agricoles. Elle se produit naturellement sous l'action du vent (érosion éolienne) et l'eau (érosion hydrique) et peut être accélérée par divers facteurs tels que les travaux agricoles et les incendies. Ce phénomène a aussi des conséquences sur la qualité des eaux et la capacité de stockage des barrages.

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu en zone méditerranéenne, touchant particulièrement les pays du Maghreb dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol et constitue une contrainte majeure au développement de l'agriculture et à la promotion des activités rurales dans le pays (SOGREAH 1983).

L'Algérie est exposée à un climat d'influence méditerranéenne caractérisé par des pluies à fortes intensités particulièrement fréquentes en Automne lorsque le couvert végétal est absent et le sol ameubli par les labours. De plus, près de 85% des superficies cultivables en Algérie (soit environ 6 millions d'hectares) sont situées sur des versants menacés par l'érosion (Roose et al. 1999). Le taux d'érosion spécifique, en Algérie, se situe entre 2000 et 5000 t/km<sup>2</sup>/an et classe l'Algérie parmi les pays les plus roblés au monde (Probst et Amiotte-Suchet, 1992). Les concentrations supérieures à 200 g/L sont parfois dépassées lors de violentes crues orageuses d'été et d'Automne. Selon la F.A.O entre 1963 et 1983, l'érosion a provoqué en Algérie une perte en sol superficielle estimée entre 10 et 16 t/ha, soit 30 à 50 fois celle de l'Europe (Boualem A.2010).

#### **1.1.2. Définition :**

Selon la FAO (1990), l'érosion représente l'ensemble des phénomènes qui contribuent, sous l'action d'un agent d'érosion (notamment l'eau) à modifier les formes de relief que sont les sommets de plateau, les rebords de plateau, les talus, les corniches, les terrasses, les versants. Cette modification se fait par ablation de matières (sols et roches), mais aussi par accumulation de la matière arrachée.

L'érosion c'est le processus de destruction de roches préexistantes. On distingue deux types d'érosion :

- L'érosion physique ou mécanique : désagrégation des roches en petits morceaux par des processus physique ou mécanique.
- L'érosion chimique : dissolution des éléments chimiques par les eaux qui conduit à la décomposition des roches ou des minéraux.

Les agents de l'érosion sont : les eaux, le vent, le gel, la température et les actions humaines (comme les pratiques culturales).

L'érosion peut provoquer des dégâts aux installations et équipements hydrauliques mais affecte aussi la qualité de l'eau. A long terme, l'érosion a pour conséquence une perte de la fertilité des sols et un déclin de la biodiversité des sols. Elle varie dans le temps et dans l'espace, en fonction des conditions écologiques et des mauvaises conditions de gestion de la terre par l'homme (FAO 1990).

### 1.1 3. Types d'érosion

#### 1.1.3.1. Erosion géologique

Elle est apparente sur les fortes pentes de montagnes, naturellement dénudées. Les matériaux du sol et même de la roche mère sont visiblement démantelés par les torrents. Ce phénomène est parfois accompagné par des effondrements, des dérochements et des glissements en grandes masses. C'est un processus qui agit en deux temps: par altération de la surface puis transport des matériaux provenant de cette altération (Boualem A.2010).

#### 1.1.3.2. Erosion éolienne

L'érosion éolienne est le phénomène de dégradation du sol sous l'action du vent qui arrache, transporte et dépose des quantités importantes de terre. Elle s'installe quand :

- Il existe du vent violent et régulier durant de longues périodes dans la même direction (vents dominants);
- Il s'agit d'un sol à texture grossière, sableuse notamment;
- Il existe des reliefs atténués sur des grandes étendues plates;
- Le climat a une saison sèche entraînant la dessiccation des horizons superficiels du sol et la disparition du couvert végétale.



**Figure 1.1** : Erosion éolienne

### 1.1. 3.2. 1. Origine et mécanisme de l'érosion éolienne

L'arrachage, le transport et le dépôt des particules de sol sont fonction de la vitesse du vent, mais aussi de la taille et la densité de ces particules, de l'humidité du sol et du couvert végétale.

Du point de vue mécanique, le vent a cinq modes d'actions, qui sont les suivants :

- a) **La déflation** : enlèvement des particules légères et sables fins du sol,
- b) **La répartition** : suite de déplacement infime de quelques *mm* de gros grains de sables qui roulent sous le vent,
- c) **Saltation** : se fait par des sauts des grains de sables moyens ou fins que le vent soulève brutalement et jette à quelque *dm*, *m* ou *dcm*,
- d) **La suspension** : transport sous forme de poussière, même par vent léger sous des grandes distances (milliers de *Km*),
- e) **L'accumulation** : dépôt de poussière et sables transportés quand le vent perd de la vitesse ou quand il est trop chargé.

**1.1.3.3. Erosion hydrique**1.1.3.3.1. Définition d'érosion hydrique

L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement des particules du sol, c'est la perte du sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt [1].

1.1.3.3.2. Mécanisme de l'érosion [2]

Généralement, les processus à l'origine de l'érosion hydrique des sols sont classés en deux grandes catégories : le détachement et le transport des particules. Après le détachement, les particules sont véhiculées par un agent de transport vers un bassin de sédimentation. Les principales variables qui contrôlent le détachement et le transport de ces particules sont : la pente, la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement.

## a) Le détachement

Le détachement des particules se produit à la surface du sol lorsque, sous l'action des gouttes de pluie, des agrégats s'éclaboussent ou lorsque la force de cisaillement devient supérieure à la résistance au détachement du sol. L'impact des gouttes de pluie a pour effet de désagréger les éléments présents à la surface du sol pour donner lieu à des agrégats de plus petite taille et des particules élémentaires. La désagrégation rend la surface du sol plus compacte et tend à diminuer la rugosité au fur et à mesure de l'exposition à la pluie. Ces effets dépendent de l'énergie cinétique des gouttes de pluie et des propriétés de la surface du sol.

## b) Le transport

Les particules issues de la désagrégation du substrat rocheux et du sol sont déplacées vers l'aval par l'eau et la gravitation. Au niveau des chenaux fluviaux on peut rencontrer une charge sédimentaire contenant des éléments de différentes tailles. En fait, la compétence du courant fluvial est à l'origine de la taille des particules.

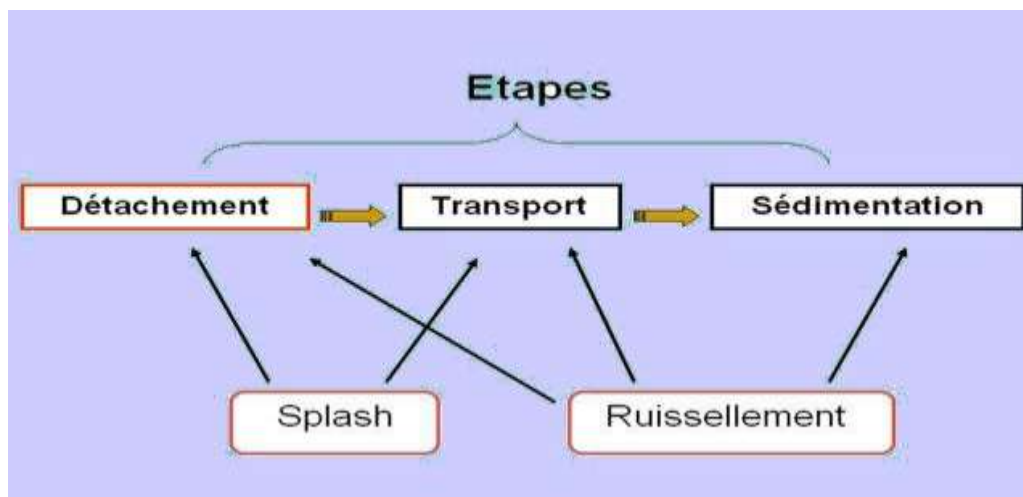
Les particules fines en suspension dans l'eau vont être transportées plus loin et déposées soit dans un bassin de sédimentation soit au moment où la compétence du courant devient très faible. Dans les chenaux torrentiels par exemple, on rencontre des éléments arrachés au substrat ayant des tailles métriques, en raison de la forte compétence du courant. Les grosses particules telles que les cailloux et les blocs peuvent également se déplacer sous l'effet de la pesanteur (gravité).

Par ailleurs, la fraction fine (silts et argiles) arrachée au substratum rocheux ou d'un dépôt préexistant peuvent être reprises en suspension et parcourir de longues distances.

## c) Le dépôt

Le dépôt des apports sédimentaires s'effectue lorsque l'énergie cinétique du courant, qui déplace les matériaux issus du détachement, diminue ou s'annule. Les particules arrachées sont déposées à différents endroits entre le lieu d'origine et le bassin de sédimentation (Douffissa2011). L'agent responsable de la sédimentation est l'eau de ruissellement. Les particules arrachées du sol se déposent entre le lieu d'origine et l'aval en fonction de la dimension des particules, de leur densité et de la capacité de transport du ruissellement ou du cours d'eau. Les particules se déposent dans l'ordre suivant :sable, sable fin puis les limons et matières organiques.

Les argiles et l'humus colloïdal sont généralement transportés jusqu'à l'embouchure du cours d'eau où il se dépose soit après évaporation de l'eau, soit après floculation (Ammari A. 2012).



**Figure 1.2 :** Mécanisme de l'érosion [2]

### 1.1.3.3.3. Formes de l'érosion hydrique

#### a) Erosion par rejaillissement

C'est l'érosion élémentaire causée par l'effet des gouttes des pluies. Les gouttes de pluie brisent les mottes, projettent la terre en tous sens et réduisent la perméabilité du sol, c'est l'effet du 'Splach' (Figur1.3).





**Figure 1.3 :** Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau [2].

### **b) Erosion en nappe**

Elle est causée par une lame d'eau qui ruisselle sans griffes ou rigoles visibles. Sous l'effet de l'impact des gouttes de pluie (effet Splash), les particules sont arrachées et transportées. Ce phénomène est observé sur les pentes faibles, où l'eau ne peut pas se concentrer.

Dans un premier temps, c'est l'impact des gouttes qui va arracher les particules.

La battance des gouttes de pluie va envoyer des gouttelettes dans toutes les directions. A partir de là, il y aura formation de flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre ce qui entraînera un ruissellement en nappe qui transportera les particules fines arrachées par le splash(Figure.1.4)



**Figure 1.4 :** Erosion en nappe

**c) Erosion linéaire**

L'érosion linéaire commence quand le ruissellement s'organise et prend de la vitesse. L'eau acquiert une énergie cinétique capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses, non seulement des argiles et des limons, mais des graviers ou des cailloux et des blocs lorsqu'il sera organisé en ravine.

**d) Types d'érosion linéaire**

L'érosion en griffe 'rill érosion'

Elle se manifeste par le ruissellement et la formation de stries, de griffe, les griffes ont une largeur de 10 cm et moins de 10cm en profondeur, généralement sont formées au niveau des jachères nues, dans les paysages se présentent comme des lignes parallèles le long des versants.

**1) Erosion en rigoles**

C'est une dépression suffisamment petite issue de l'évolution des griffes en longueur, ces griffes deviennent des sillons de dimension plus importante et de largeur variable liés à la longueur de la pente, la profondeur d'une rigole dépasse 10cm et moins de 50cm. les rigoles peuvent être effacés par des techniques culturales.

**2) Erosion en ravine**

La ravine est une rigole approfondie de profondeur qui dépasse 50cm, ces ravines ne sont pas effaçables par les techniques culturales, l'intensification de ruissellement transforme la ravine en grosses ravines(Figure.1.5).



**Figure 1.5** le ravinement

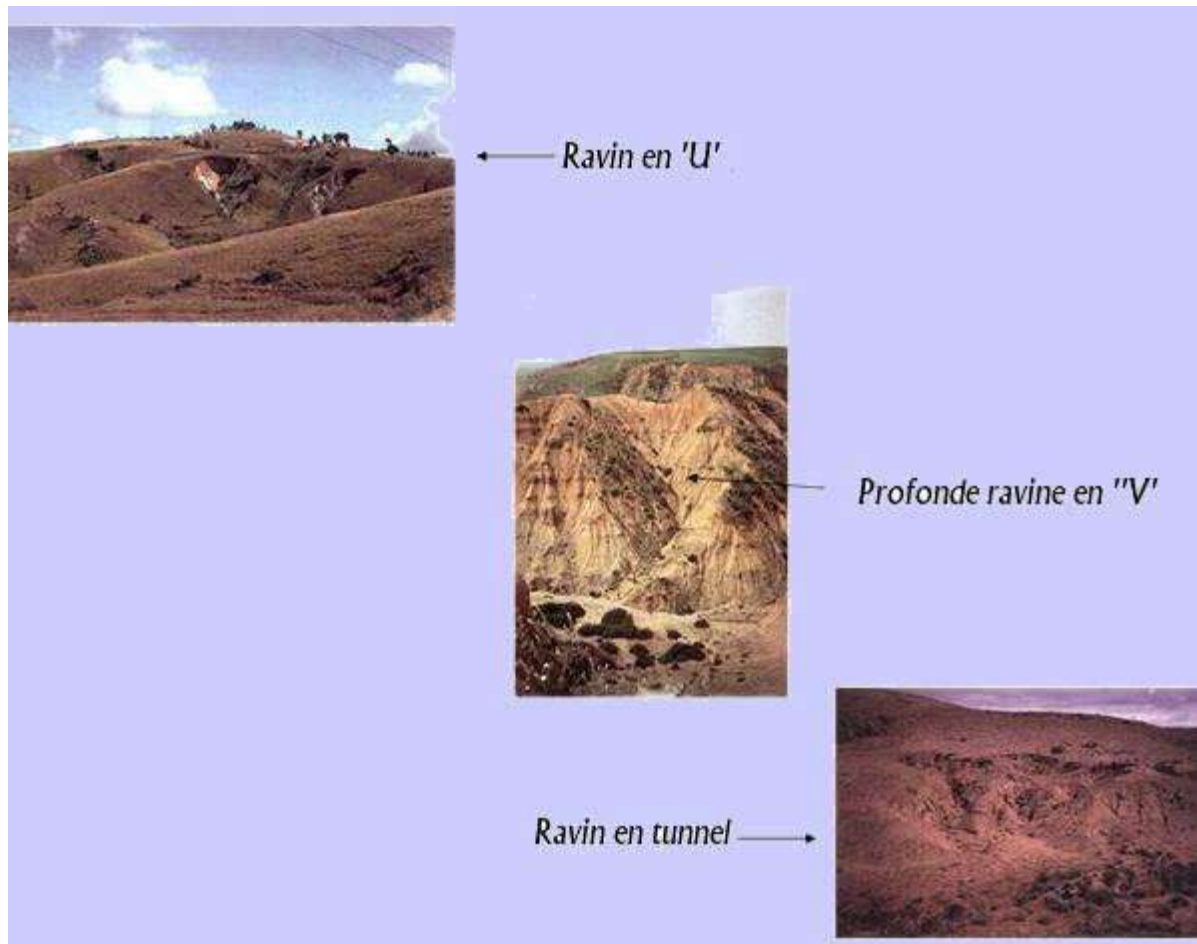
**e) Différents types de ravinement**

Dans la nature, on observe le plus souvent des ravines en forme de **V** qui s'impriment dans un matériau homogène, plus ou moins meuble, sablo-argileux; argileux, marneux ou schisteux. Les versants de ces ravines évoluent par altération de la roche: en saison froide par alternance de gelées et de soleil, en saison chaude, par alternance de périodes sèches et d'averses. On observe en milieu méditerranéen une altération des marnes et des schistes qui peut atteindre 4 à 10 mm par an.

L'enfoncement a lieu lors des averses exceptionnelles. Une à deux averses par an suffit pour dégager toutes les particules accumulées durant l'année au fond de la ravine et pour entailler le fond de la ravine par abrasion des matériaux que le ruissellement charrie.

Au cours des saisons intermédiaires, les matériaux fins accumulés sur les versants par altération des roches, glissent jusqu'au fond de la ravine, d'une part suite à l'impact des gouttes de pluies, et d'autre part par formation de petites rigoles secondaires ou le plus souvent par glissement en masse des particules saturées par l'eau. La pente d'équilibre des versants étant largement dépassée, aucune végétation ne peut s'y installer. La lutte antiérosive va donc s'attacher à stopper le surcreusement du fond de la ravine et à rétablir la pente d'équilibre sur les versants.

Un deuxième type de ravines en **U** s'observe fréquemment dans la nature sur des matériaux hétérogènes. Soit elles ont un fond constitué de matériaux très résistants: lors des crues exceptionnelles le canal va donc s'élargir latéralement par effondrement [2].



#### f) Erosion dite « de talus »

C'est un type d'érosion plus marginal, il est essentiellement lié aux mouvements de masse ; engendré par le franchissement d'un dénivelé important par un ruissellement concentré en amont.

#### g) Erosion mécanique sèche

Elle correspond à l'arrachement et au transport des particules du sol du fait de la gravité et de l'utilisation d'outils aratoires (manuels ou tractés). Ce processus où l'eau n'intervient pas est peu connu, peu étudié et rarement quantifié (Douffissa.2011).

### 1.1.4. Facteur influençant l'érosion hydrique

#### a) La nature du sol

Le facteur sol le plus important est la résistance (stabilité) des agrégats à l'impact des gouttes de pluie. Cette résistance ou cette stabilité est influencée positivement par la présence d'agents liants tels que les argiles, la matière organique et le calcium. Ainsi, les sols de texture limoneuse sont généralement plus sensibles que les sols argileux à cause de leur faible

stabilité structurale. Au niveau de la stabilité des agrégats, la matière organique est un des facteurs les plus importants. La grosseur des agrégats ou des particules de sol a aussi un rôle important. Plus ils sont gros, plus ils sont difficiles à briser et plus ils sont difficiles à transporter.

La porosité du sol influence indirectement le potentiel d'érosion des sols. Une plus grande porosité favorise une plus grande infiltration et un volume de ruissellement moindre, ce qui diminue les possibilités d'érosion. Lorsque le sol possède une plus grande capacité de stockage de la pluie, cela diminue le volume de ruissellement et l'érosion.

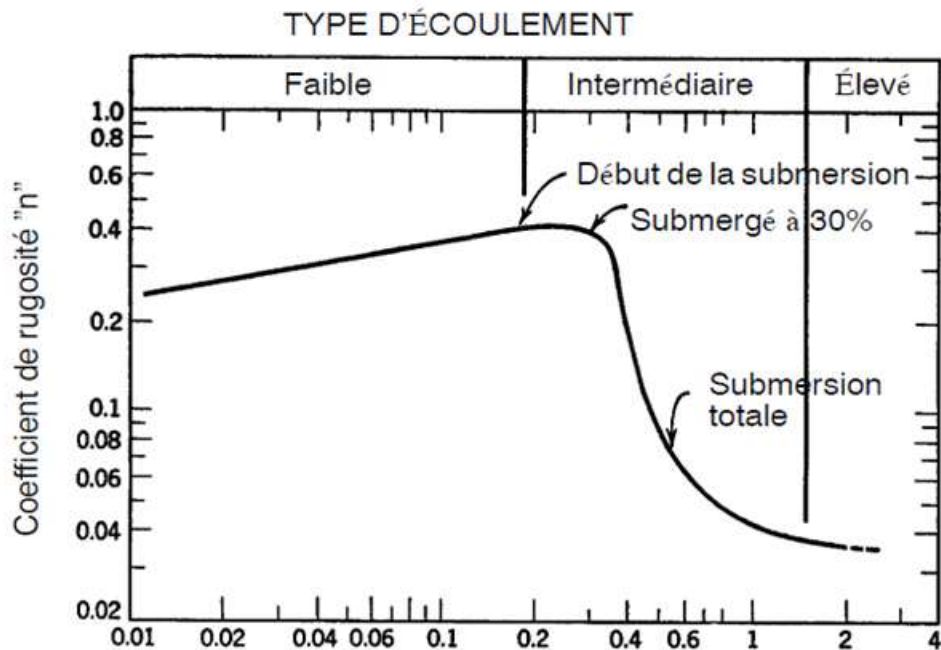
Cette capacité est favorisée par une plus grande épaisseur de la couche arable, une teneur en eau faible avant la précipitation et la capacité intrinsèque de stockage du sol.

### **b) Le couvert végétal**

Sur un sol nu, ce sont les particules de sol qui absorbent directement l'énergie des gouttes de pluie. Par contre, un couvert végétal peut absorber une partie importante de l'énergie de la pluie. Face à l'écoulement, la présence de végétation augmente considérablement le facteur de friction de Manning. Tant que la végétation n'est pas submergée, le facteur de friction peut facilement être augmenté de dix (10) fois par rapport au sol nu (Figure 1.6). Sous un autre aspect, le système racinaire enlace considérablement les agrégats et accroît considérablement leur résistance à l'arrachement. De plus, les racines sont un excellent apport de matière organique pour le sol, ce qui augmente la porosité du sol, augmente l'infiltration et diminue le ruissellement.

La végétation possède un taux d'évapotranspiration supérieur à celui d'un sol nu, ce qui contribue à diminuer les réserves en eau du sol et augmente sa capacité de stockage pour la pluie suivante. Le ruissellement potentiel et l'érosion seront alors moindres.

Face à l'érosion, la végétation joue plusieurs rôles : elle absorbe l'énergie de la pluie, protège le sol et influence positivement les propriétés physiques du sol.



**Figure 1.6 :** Rugosité d'un canal enherbé de longueur moyenne possédant une pente de 5% (adapté de Ree, 1949).

### c) Les facteurs climatiques

Nous avons présenté précédemment le rôle important que jouent l'intensité de la pluie et son énergie sur l'érosion. Le volume de précipitation joue un rôle similaire. En général, un plus grand volume de précipitation provoque un plus grand volume de ruissellement et nécessairement une plus grande érosion.

En climat sec ou chaud, où l'évapotranspiration est plus grande que les précipitations, le sol possède un plus grand déficit, ce qui augmente sa capacité d'absorber une précipitation et diminue le ruissellement et l'érosion. Pour deux précipitations identiques, les conditions météorologiques antérieures jouent un rôle important sur leur potentiel respectif d'érosion.

Une longue période sans pluie augmente les capacités de stockage du sol et d'absorption de la précipitation et diminue le ruissellement et l'érosion. Tous les facteurs qui influencent positivement l'évapotranspiration contribuent à diminuer le potentiel d'érosion. Une mauvaise répartition des précipitations provoque une concentration de celles-ci qui augmentent le volume de ruissellement et le potentiel d'érosion.

### d) Les facteurs topographiques

La pente est le facteur topographique le plus important. Elle augmente les vitesses d'écoulement. Sur des pentes plus grandes, l'infiltration est plus faible et le volume de

ruissellement augmente. La longueur de la pente joue un rôle similaire. Elle augmente le volume de ruissellement et ainsi l'érosion.

Les micros dépressions du terrain provoquent une concentration de l'écoulement qui augmente le potentiel érosif par rapport à un même volume de ruissellement coulant selon une lame uniforme. Par contre, les dépressions fermées limitent les effets de l'érosion en piégeant les sédiments en suspension [3].

### **1.1.5. Méthodes d'évaluation de l'érosion hydrique**

Il existe diverses méthodes pour évaluer le taux d'érosion à l'échelle du bassin versant. Les méthodes généralement utilisées sont les suivantes :

- Les mesures topographiques
- Les parcelles expérimentales
- La simulation de pluies
- La modélisation de la perte en terre par l'étude intégrée des facteurs de l'érosion (USLE, MUSLE, RUSLE).
- Les techniques radio-isotopiques :  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^7\text{Be}$  et  $^{210}\text{Pb}$  (DOUFFISSA.2011).

### **1.1. 6.Quantification de l'érosion**

La quantification de l'érosion hydrique peut se faire soit :

- Par la mesure directe du transport solide au niveau des stations de mesure.
- Par des formules expérimentales.

On citera dans ce qui suit quelques formules les plus utilisées.

a- Formule de Henin 1950 :

Cette formule symbolise la relation existante entre l'érosion des pluies et les facteurs susceptibles de favoriser ou la limiter cette érosion. La quantification de l'érosion spécifique "Es" est donnée par la formule 
$$Es = I_p \cdot I \cdot S / K \cdot V_e \quad [I-1]$$

Avec

$I_p$  : Intensité des précipitations;

$I$  : Pente du bassin versant; Les facteurs " $I_p$ " et " $I$ " favorisent l'érosion

$S$  : Susceptibilité des sols;

$K$  : Perméabilité;

$V_e$  : Végétation.

b- Formule de Wischmeier et Smith :

Il s'agit d'un modèle d'érosion, permettant d'évaluer les zones à haut risque et de quantifier les pertes de sol moyennes annuelles. Le modèle permet l'estimation des quantités de sédiments qui seront transportées par cours d'eau. La formule s'écrit :

$$A = R.K.LS.C.P$$

Avec :

A : pertes annuelles de sol (t/ha/an)

R : facteur d'agressivité climatique.

K : facteur sol.

LS : facteur pente.

C : facteur agronomique.

P : facteur des aménagements antiérosifs.

c- Formule de Fournier (1960) :

$$A_{SS} = \left(\frac{1}{36}\right) \left(\frac{P_m^2}{P_{am}}\right)^{2,65} \left(\frac{h^2}{S}\right)^{0,46} \quad [I-2]$$

Avec

Ass : apport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)

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

Pam : précipitations annuelles (mm)

h : dénivelée moyenne (m)

S : superficie du bassin versant (km<sup>2</sup>).

d- Formule de la SOGREA H :

Basée sur les données de 30 bassins algériens, de superficie comprise entre 100 et 300 km<sup>2</sup>, soumis à une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 1000 mm.

$$A_{SS} = \alpha . E^{0.15} \quad [I-3]$$

Avec :

Ass : apport solide spécifique (t/km<sup>2</sup>/an)

$\alpha$  : Coefficient dépendant de la perméabilité du sol, donné au Tableau ci-dessous



E : Ecoulement annuel (mm)

**Tableau 1.1** Valeurs de  $\alpha$  pour différentes perméabilités

Perméabilité	$\alpha$
Forte	8.5
Moyenne	75
Moyenne à faible	350
Perméabilité faible	1400
Imperméable	3200

e- Formule de Tixeront (1960) :

Basée sur les données recueillies dans 32 bassins algériens et 9 bassins tunisiens sur une durée comprise entre 2 et 22 ans.

$$A_{SS} = 354E^{0,15} \quad : \text{ Pour les bassins Tunisiens.}$$

$$A_{SS} = 92E^{0,21} \quad : \text{ Pour la région Est Algérien.}$$

$$A_{SS} = 200E \quad : \text{ Pour la région centre Algérien.}$$

Avec :

Ass : apport solide spécifique en t/km<sup>2</sup>/an

E : Ecoulement en mm (Ammari A. 2012).

### 1.1. 7.Conséquences de l'érosion

L'érosion des sols est à l'origine de deux familles de problèmes :

Les conséquences dans la zone de départ des sédiments (on-site effets). Elles sont relatives à la perte de la couche arable ainsi que des semences, ce qui réduit la fertilité du sol et la productivité des cultures. Sachant que la régénération d'un centimètre sol à partir d'un matériau d'origine peut prendre des milliers d'années, le processus peut être considéré comme *quasi* irréversible à l'échelle de générations humaines.

Les conséquences sur les lieux de dépôt (off-site effects) sont plus nombreuses.

Les engrais et pesticides épandus dans une parcelle agricole peuvent être transportés dans les eaux de ruissellement sous forme dissoute ou par adsorption sur les sédiments. Ce transport peut avoir des effets toxiques sur la qualité de l'eau (potable et d'irrigation) et peut provoquer une eutrophisation (prolifération des plantes aquatiques et perte d'oxygène dissout) des

milieux aquatiques. On peut aussi assister à la destruction des infrastructures et le recouvrement de fossés et routes.

Une autre conséquence importante est l'envasement des barrages et des retenues en aval ce qui affecte leur capacité à mobiliser les eaux de surface dans un but d'irrigation ou d'alimentation en eau potable par exemple. Les écosystèmes, les productions et la sécurité alimentaire sont alors sévèrement affectés (Benslimane 2013).

### **1.1.8. Problème liés à l'érosion et le transport solide**

Les problèmes liés à l'érosion dépendent du transport des matières érodées et se résument :

- a) Perte des terres arables
- b) Décontamination des ressources en eaux potables
- c) Augmentation des coûts pour lutter contre les inondations
- d) Envasement des barrages
- e) Endommagement des ouvrages hydrauliques etc.

## **1.2. Transport solide**

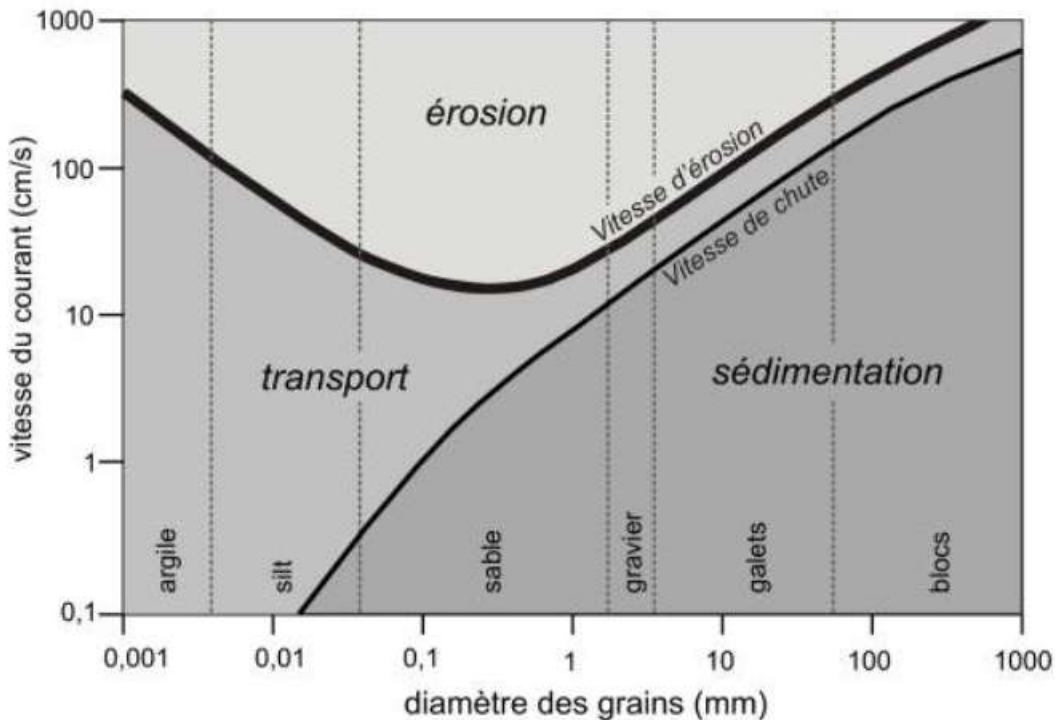
### **1.2.1. Généralité**

Le transport des matériaux solides par les cours d'eau concerne, les boues des particules fines jusqu'aux rochers les plus grossiers, que le courant peut entraîner. On distingue trois modes de transport solide : le transport de fond, transport solide en suspension et transport intrinsèque. Le transport solide du fond se subdivise en transport par charriage et le transport en suspension. Les dimensions des particules sont déterminantes dans le classement du mode de transport. Les grandes particules sont transportées par charriage tandis que les particules fines sont mobilisées dans le transport en suspension. La délimitation entre les différents modes de transport n'est pas encore bien clarifiée. Le rapport entre la vitesse de frottement et la vitesse de sédimentation sert souvent d'indicateur pour l'initiation de l'un ou l'autre mode de transport.

Le transport solide est un phénomène complexe. La chute des vitesses à l'entrée de la retenue d'eau et barrages entraîne une diminution de capacité de stockage par un dépôt immédiat des alluvions grossiers, par contre les éléments fins, plus légers poursuivent leurs chemins en suspension jusqu'à se déposer en eaux mortes où ils décantent lentement. La dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés par le réseau d'écoulement dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement et de la granulométrie (Graf et Altinakar 2000). Ce phénomène est limité par la quantité de matériaux susceptible d'être transportée selon la fourniture

sédimentaire (Megnounif et al. 2013). Ce phénomène est régi par deux propriétés du cours d'eau:

- a) **La compétence:** Elle est mesurée par le diamètre maximal des débris rocheux que peut transporter le cours d'eau. Cette caractéristique est fonction de la vitesse d'eau comme le montre le diagramme de Hjulstrom qui divise le transport solide en trois phases : la sédimentation, le transport avec une fonction croissante qui est toujours au-dessous de celle d'arrachement des particules (l'érosion) (fig. 1.7).



**Figure 1.7 :** Diagramme de Hjulstrom

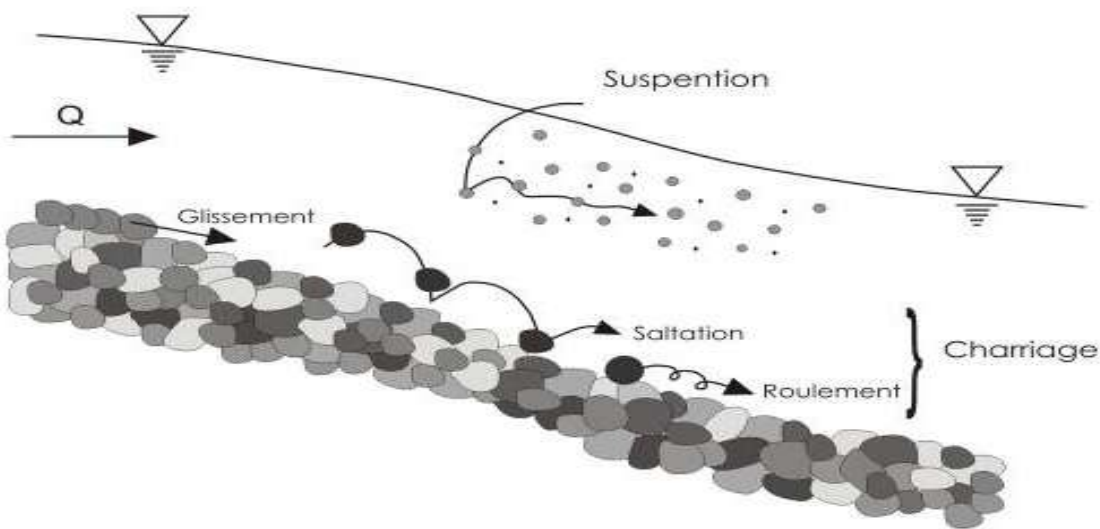
- b) **La capacité:** C'est la quantité maximale de matériaux solides que peut transporter en un point et à un instant donné le cours d'eau. Elle est fonction de la vitesse de l'eau, du débit et des caractéristiques de la section comme la forme, la rugosité, etc... (Graf et Altinakar 2000).

### 1.2.2. Définition du transport solide

Le transport solide est un ensemble de phénomènes physiques qui agissent sur l'entraînement des particules solides sous l'action de l'écoulement de fluide. Ce transport est essentiellement fonction des dimensions des particules. L'érosion est l'origine de tous les types de transport solide, qu'on peut diviser en trois modes (Chauchat.2007):

- Le transport par charriage
- Le transport par suspension

- Transport par saltation.



**Figure 1.8 :** Modes de transport des particules dans un chenal (Sirabahenda 2012).

### 1.2.2.1. Le transport solide par charriage

#### 1.2.2.1.1. Définition

Le transport solide par charriage, représente la progression de sédiments grossiers (sables, gravier, galets et blocs), de diamètre supérieur à 1 mm, qui se déplacent par roulement ou glissement, au voisinage immédiat du fond du cours d'eau, et parcourent des distances relativement petites et discontinues dans le temps et dans l'espace. Les mesures sur le terrain du transport solide par charriage sont très onéreuses et difficiles à mener. De ce fait, les évaluations de ce type de transport sont rares et difficiles. On se contente généralement d'études sur modèles réduits pour déterminer la proportion du charriage par rapport à la suspension ou au transport total. Pour quelques bassins versants le taux de charriage a été estimé à 12.5 % de la suspension (Bouanani.A.2004).

Sur le lit des matériaux sans cohésion, les grains isolés sont soumis aux forces de pesanteur et aux forces hydrauliques.

Les forces de pesanteur sont des forces stabilisatrices;

Les forces hydrauliques sont des forces déstabilisatrices dues à l'écoulement (traînée et portance).

Plusieurs formules ont été proposées pour prédire soit le charriage seul, soit le charriage et la suspension. La plupart d'entre-elles ont été établies pour estimer le transport solide moyen.

### 1.2.2.2. Transport en suspension

#### a) Définition

Le transport par suspension est le deuxième type de transport solide dans un cours d'eau. Il concerne les éléments fins qui progressent dans le sens du courant au sein même du liquide. Ces éléments fins sont maintenus en suspension par la turbulence et la quantité de ces matériaux dépend essentiellement des éléments fins, qui proviennent de l'érosion du bassin, suite au ruissellement des eaux de pluie (Megnounif 2007)

La charge en suspension (suspended load) est constituée de matériaux dont la taille et la densité leur permettent, dans des conditions d'écoulement déterminées, de se déplacer sans toucher le fond du lit. Le transport par suspension a lieu pour les petites particules minérales (sables, limons et argiles) et pour la matière organique, vivante ou morte, plus légère que la fraction minérale. L'ensemble limon fin + argile + Matière Organique forme la vase.

La suspension d'une particule plus lourde que l'eau dans un courant est la conséquence du gradient de vitesse: la vitesse instantanée de l'eau augmente du fond vers la surface. Plus ce gradient est forte, plus la particule est soulevée jusqu'à atteindre un équilibre entre son poids apparent et la force de soulèvement. Toute variation de la vitesse instantanée entraîne une modification de cet équilibre et donc de la position de la particule. Lorsque le courant diminue jusqu'à devenir nul, la force de soulèvement disparaît et la particule tombe sur le fond: c'est la sédimentation [4].

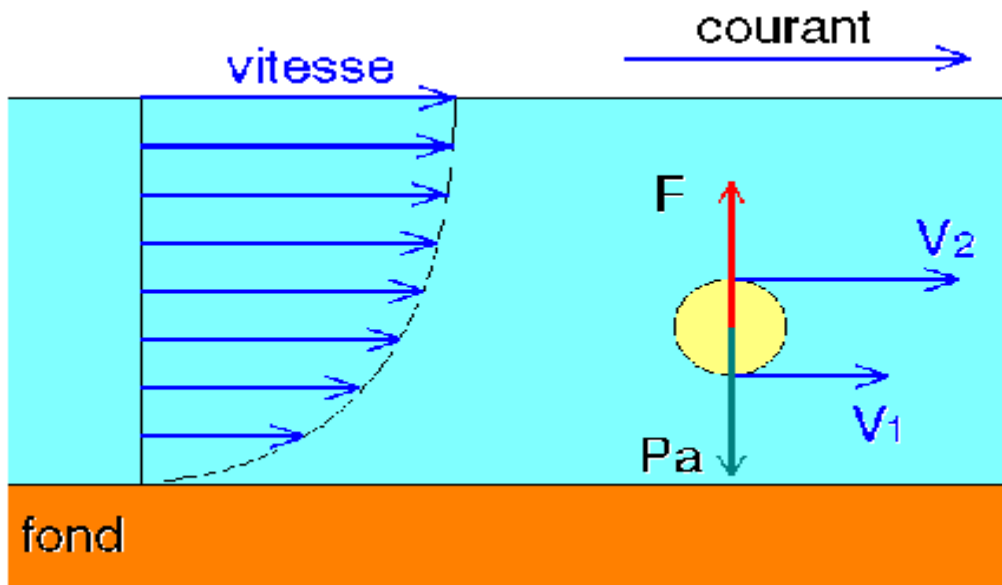


Figure 1.9 : Suspension d'une particule dans un courant

**b) Description du phénomène**

Au fur et à mesure que la vitesse du courant s'accroît dans le cours d'eau, l'intensité de la turbulence et l'épaisseur de la couche limite turbulente s'accroissent également, on arrive finalement à un stade où les particules atteignent une hauteur au-dessus du fond où les forces ascensionnelles fluctuantes dues à la turbulence dépassent le poids des particules. A partir de ce moment, les particules ne suivent plus une trajectoire définie, mais elles suivent des trajectoires aléatoires dans l'épaisseur de fluide (Graf et Altinakar 2000). Il existe plusieurs formules empiriques pour l'évaluation du transport solide en suspension.

On se limite de citer quelques unes de formule :

a) Formule de Bagnold (1966):

Elle est basée sur le concept de la balance d'énergie reliant la charge en suspension avec le travail fourni par le fluide. Le débit solide en suspension par m<sup>3</sup>/s/m est :

$$q_{ss} = \frac{e_b (1 - e_c) \bar{U}}{(\varphi_s - \varphi) g \cos \beta [(W_s / \bar{U}) - \text{tg} \beta]} \quad \text{[I-4]}$$

Avec :

$\bar{U}$  : vitesse moyenne (m/s) ;

$\text{tg} \beta$  : pente du fond ;

$e_b$  : facteur d'efficience du débit solide en charriage compris entre 0,1 et 0,2 ;

$e_c$  : facteur d'efficience du débit solide en suspension compris entre 0,01 et 0,02 ;

$\beta$  : l'angle du fond avec l'horizontal.

Kachel et Sterbery (1971) ont montré que les facteurs ( $e_b$ ,  $e_c$ ) ne sont pas constant mais fortement lié à la contrainte de frottement et au diamètre de particule, ce qui rend la validité de la formule de Bagnold redoutable .

b) Formule de Bijker (1971):

Cette formule est basée sur le concept d'Einstein. La formule est donnée par l'équation :

$$q_{ss} = 1.83 q_{sc} [I_2 + I_1 + \log(33h/k_s)]$$

Avec :

$q_{ss}$  : Débit solide en suspension (m<sup>3</sup>/s/m)

$q_{sc}$  : Débit solide en charriage (m<sup>3</sup>/s/m)

$I_1$  et  $I_2$  : intégrales de d'Einstein

$K_s = Z_0$  : niveau de référence

$$q_{ss} = bU \cdot d_{50} e^{-0.27/5B}$$

Avec :

U : vitesse de frottement

A : paramètre de mobilité

$B = \left(\frac{c}{c'}\right)^{1.5}$ : facteur de la forme du lit

$C'$  : coefficient des grains =  $18 \log(12h/d_{90})$

C : coefficient de Chézy

b : coefficient varie de 1 à 5

### 1.2.2.3. La saltation

#### 1.2.2.3.1. Définition

C'est le mode de transport des éléments plus fins que les galets, c'est-à-dire les graviers et les sables grossiers, Les graviers sautent, progressent par bonds au fond de la rivière et occupent donc, dans la section, une certaine hauteur dépendant de la vitesse et des caractéristiques des grains.

On explique la progression par saltation de la façon suivante: un grain glisse sur le fond du lit, puis rencontre un obstacle, il se bute alors sur cet obstacle. La différence de pression entre l'amont et l'aval du grain augmente, il bascule, puis est arraché, entraîné par le courant et, par gravité, retombe au fond où le processus recommence.

Il est évident que les composantes multiples de la vitesse, qui caractérisent la turbulence, jouent un rôle important dans la saltation [5]

Certains travaux ont proposé des formules pour une estimation directe du transport solide total (charriage et suspension). Comme la formule de Karim et Kennedy (1981) qui estime le débit volumique unitaire (par unité de poids) des sédiments ( $q_t$ ) en fonction des paramètres de l'écoulement et des caractéristiques des sédiments, elle s'écrit comme suit :

$$\log \left[ \frac{q_t}{\sqrt{g(s-1)d_{50}^3}} \right] = -2.279 + 2.972K_1 + 1.060K_1K_3 + 0.299K_2K_3$$

Avec

$$K_1 = \log \left[ \frac{U}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} \right], \quad K_2 = \log \left( \frac{h}{d_{50}} \right), \quad K_3 = \log \left[ \frac{U_* - U_{*cr}}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} \right]$$

### 1.2.3. La mesure de transport solide

#### 1.2.3. 1. La mesure du transport en suspension

Les matériaux fins sont facilement amènes en suspension par la turbulence de la rivière et ils circulent à une vitesse similaire à celle de l'eau. La concentration des matériaux fins dans l'eau dépend de la quantité des sédiments fournis par le bassin versant, cette quantité elle-même liée aux précipitations. Cette concentration ne dépend pas uniquement du débit ou de la capacité de transport du cours d'eau puisque la concentration en matériaux fins peut varier énormément avec temps pour des débits similaires (Megnounif et al. 2013). Cependant, l'évaluation du transport solide en suspension est sujette à de nombreuses erreurs commises dans l'échantillonnage, dues à un nombre de mesures insuffisant pour déterminer ces fortes variations. Ainsi, le prélèvement d'échantillons doit se faire avec des appareils à action très rapide. Il existe plusieurs appareils de prélèvements d'échantillons actuellement utilisé, à savoir:

Turbinions de NEYRPIC

Turbidison de DELFT

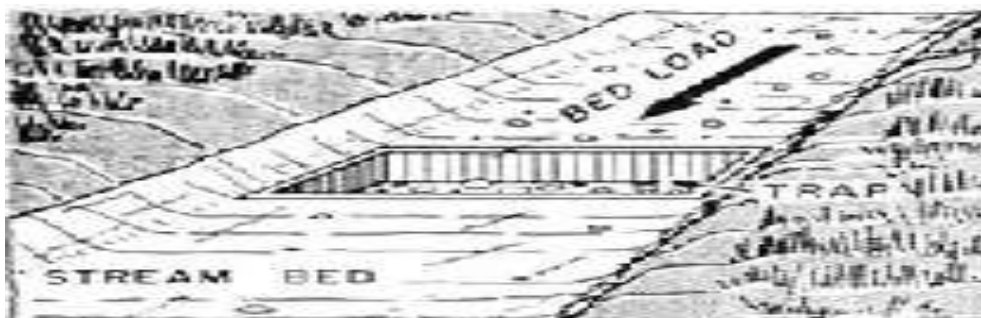
Prélèvement au moyen d'une pompe

Pour les faibles courants d'eau, les prélèvements peuvent être faits à l'aide de bouteilles que l'on envoie à la profondeur voulue grâce à un câble [6].

#### 1.2.3.2. La mesure du transport de fond

##### a) Mesure directe

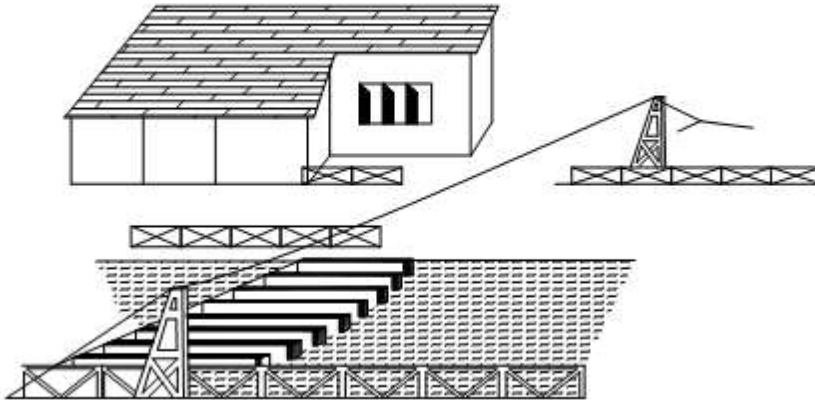
La mesure se fait dans une fosse artificielle. La procédure consiste à creuser un trou dans le lit du cours d'eau (Figure 1.10) cela permet de récupérer puis peser les sédiments qui y pénètrent. Cette méthode devient plus longue et laborieuse lorsque la charge en sédiments devient plus grande.



**Figure 1.10** : Fosse artificielle



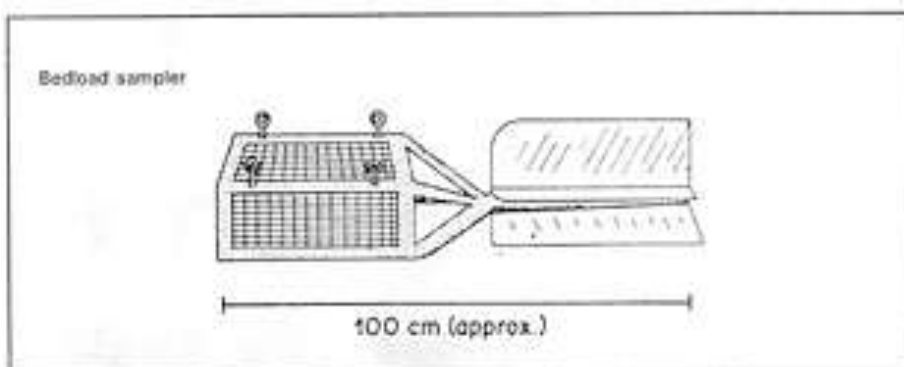
Méthode de la trappe transversale est utilisée aux Etats-Unis. Elle peut être fixe ou semi-portative pour des petites rivières. L'installation fixe est munie d'un radier construit sur la largeur totale du lit, et à sa partie aval la rivière est divisée au moyen des pilettes en béton dont le fond est muni d'une trappe ouverte ou fermée. Le débit solide qui tombe dans la trappe est périodiquement pompé vers une trémie située sur la berge (Baloul D. 2012).



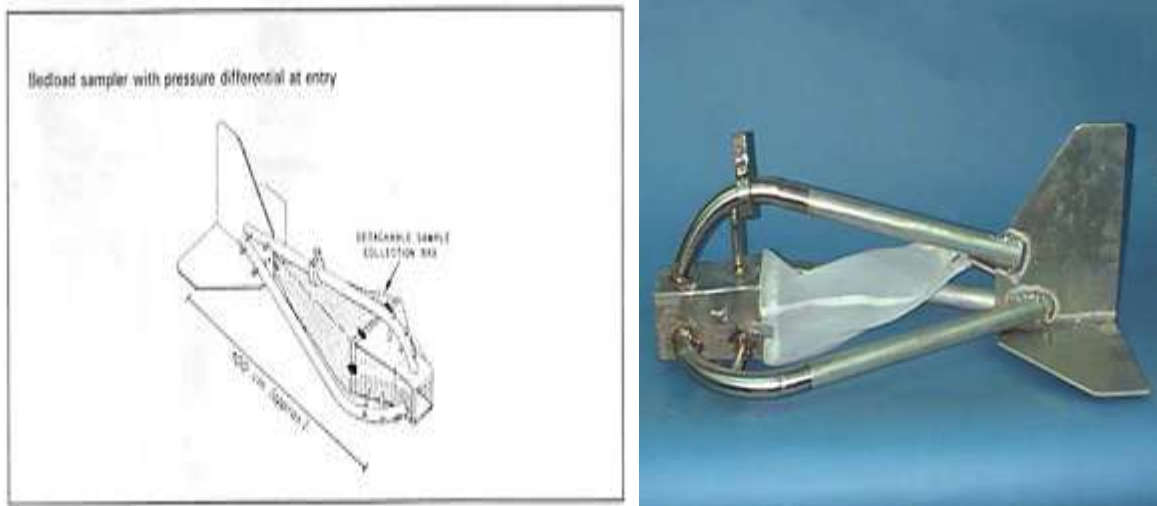
**Figure 1.11** Installation de mesure de charriage (Baloul D. 2012).

Échantillonneurs : le charriage peut être évalué à partir des échantillons attrapés dans un dispositif introduit dans le cours d'eau pour un temps donné puis retirés pour être pesé. Il existe divers instruments qui démontrent la difficulté de prendre un échantillon précis et représentatif. Ces échantillonneurs ont l'inconvénient de déranger l'écoulement et changer les conditions hydrauliques à leur entrée et peuvent être bloqués dans le fond

Ceux-ci s'appellent les échantillonneurs à différence de pression, un exemple est illustré sur la Figure 1.12



**Figure 1.12** : Echantillonneur du transport solide par charriage (Baloul D. 2012).



**Figure 1.13** : Echantillonneur du transport solide en charriage avec différence de pression à l'entrée (Baloul D. 2012).

a) Les mesures indirectes

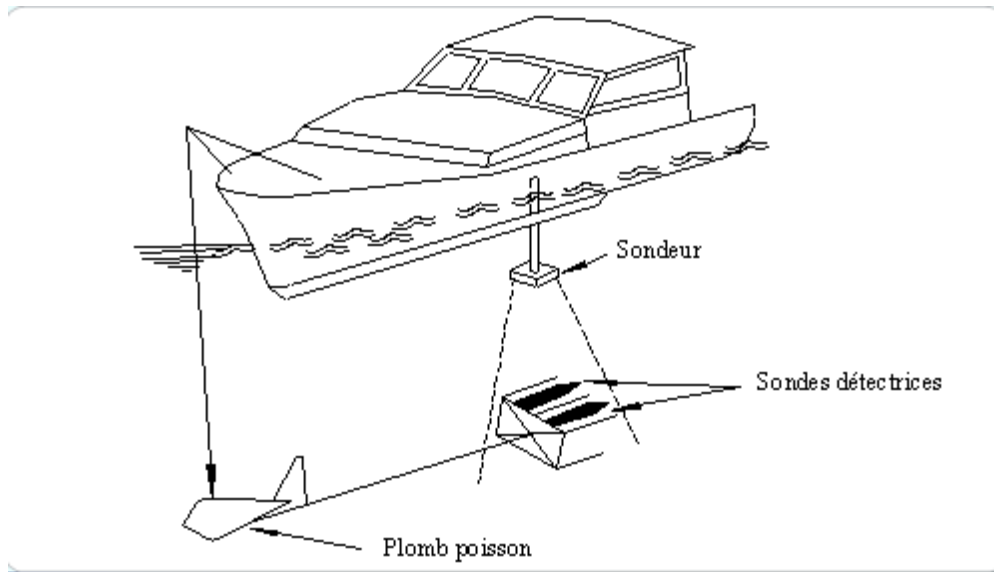
Basées sur l'utilisation des ultra-sons ou des traceurs radioactifs.

**Les sondeurs à ultrasons** : permettent de suivre le déplacement des dunes dans les fonds sableux à faibles pentes.

**Le détecteur hydrophonique** : Il permet de déterminer le début et l'arrêt d'entraînement des particules de sable grossier et gravier grâce aux chocs enregistrés suite au contact des particules mises au mouvement avec une plaque placée au fond du cours d'eau. On peut avoir au lieu d'une plaque un peigne enfoncé dans les matériaux du fond sableux attachée à une tige reliée à un lecteur phonographique. Cet appareil est appelé aréna phone.

**Méthode par l'outil des traceurs** : la technique consiste à insérer dans l'écoulement un traceur radioactif sous une forme semblable aux particules en charriage (avoir la même forme, taille et poids). Le mouvement en aval peut alors être surveillé en utilisant les détecteurs portatifs. Alternativement, le traceur peut être appliqué à la surface du sédiment naturel, ou il peut être incorporé aux matériaux artificiels qui peuvent être rendus radioactifs (Fao, 1993) La complexité de cette technique est liée à la lourdeur de ces expérimentations (fabrication, détection de nuit, obtention des autorisations et le prix des traceurs) et le traitement ultérieur des données.

Les mesures faites servent à tracer des courbes iso-actives à différentes dates déterminées. L'étude de ces cartes permet d'aboutir à des informations semi quantitatives telles que la direction générale, la vitesse moyenne et la zone intéressée par le transport, ou à des mesures quantitatives par intégration dans le temps ou intégration dans l'espace (Baloul D. 2012).



**Figure 1.14 :** Traineau portatif des détecteurs (Baloul D. 2012).

#### 1.2.4. 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 A, Terfous A, et Bouanani A (2003) :

Les auteurs se sont intéressés dans leur travail aux sédiments transportés en suspension par oued Tafna à Béni-Bahdel. Pour la période allant de 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. 2003).

Megnounif A, Terfous A, Ghenim A et Poulet JP (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 m<sup>3</sup>, 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 (Megnounif et al. 2004).

Achite M et Meddi M (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 journaliers 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 M et al. 2004).

Achite M et Meddi M (2005) :

Les données de cinq sous bassins de l'Oued Mina sur une période de 22 ans (1973 à 1995) ont été utilisées pour développer un outil statique 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 (Achite M et al. 2005).

Ghenim. A, Seddini A et Terfous A (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 sont étudiés, 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 (Ghenim A et al. 2004).

Hallouz F, Meddi M et MahéG (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 m<sup>3</sup>(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 se condensent au printemps, avec une plus faible ampleur. La charge spécifique moyenne de l'Oued Mina est de 211 t/km<sup>2</sup>/an (Hallouz F et al. 2012).

Bouchelkia H, Belarbi F et Remini B (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 .10<sup>4</sup> t (Bouchelkia H et al. 2011).

Les bassins versants du tell algérien dominés par le climat semi-aride sont caractérisés par une pluviométrie saisonnière et interannuelle irrégulières. Cette irrégularité a un impact direct sur l'action érosive et notamment sur le transport solide en suspension. Ce dernier dépend de plusieurs facteurs dont l'agressivité des averses, l'état du sol et la turbulence de l'écoulement (Fandi et al, 2009).

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

**Tableau 1.2** Quelques estimations de la dégradation spécifique en Algérie

Auteur	Bassin versant	Période	A <sup>SS</sup> t/km <sup>2</sup> /an
Hallouz, Meddi et Mahé (2012)	Oued mina	1971-2002	211
Hasbaia et al. (2010)	Oued Soubella	//	126
Fandi, Bouanani, Baba-Hamed et Bekkouche(2009).	Oued sikkak	1972- 1989	170
El amine cherif et al	Oued Mekerra	1950-2001	111,15

Megnounif (2007)	Oued Sebdou	1988-1993	1120
	Oued Mouillah	1977-1993	126
Achite et Meddi (2005)	Oued Haddad	1973-1993	212
	Oued Taht		191
	Oued el Abd à Ain el Hamara		117
	Oued el Abd à takhmaret		65
	Oued Mina		187

### **1.2.5. Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de mieux comprendre le phénomène de l'érosion et le transport solide ainsi que les problèmes et conséquences qu'ils engendrent, et de voir les différents types d'érosion ainsi que les facteurs mis en jeu et de quantifier le phénomène pour la mise au point de techniques d'aménagement antiérosives appropriées pour la sauvegarde et préservation du capital : eau –sol, permettent de combattre efficacement les effets de l'érosion ce qui permet d'allonger la durée de vie des ouvrages et de préserver la quantité de l'eau stockée.

## Chapitre 2 : présentations de la zone d'étude

L'érosion et le transport solide qui en découle sont le résultat de l'action combinée de nombreux facteurs parmi lesquels on peut citer les facteurs géométriques, les facteurs topographiques, les facteurs pédologiques et les facteurs pluviométriques.

### 2.1. Situation géographique

Le bassin versant de l'oued Sikkak est sous bassin de la Tafna situé au nord - ouest de l'Algérie. Il est le prolongement de l'oued N'chef qui alimente le barrage Mefrouche. L'Oued Sikkak, affluent rive gauche de l'Oued Isser qui à son tour est tributaire de la rive droite de la Tafna avec lequel il conflue au Nord d'Ain Youcef, prend naissance sur le plateau de Terny au Sud de Tlemcen à la source d'Aïn Rhan nous. Sur la (figure 2.1), cartes topographiques au 1/50000 de Tlemcen, publiées par l'I.G.N (Institut Géographique National 1959), l'oued Sikkak se situe entre les latitudes :  $34^{\circ} 45'$  à  $34^{\circ} 64'$  nord et longitude :  $1^{\circ} 07'$  à  $1^{\circ} 25'$  ouest.

Le bassin versant est limité comme suit :

- Au sud par les Djebels Nador et Bouladour.
- A l'est par les Djebels Er Ramlya, Ouakrif et Tabelaout.
- A l'ouest, par le Djebel Tiffatisset et le plateau de Zenata.
- Au nord par le Djebel Tout lait ( Bemoussat A. 2012).

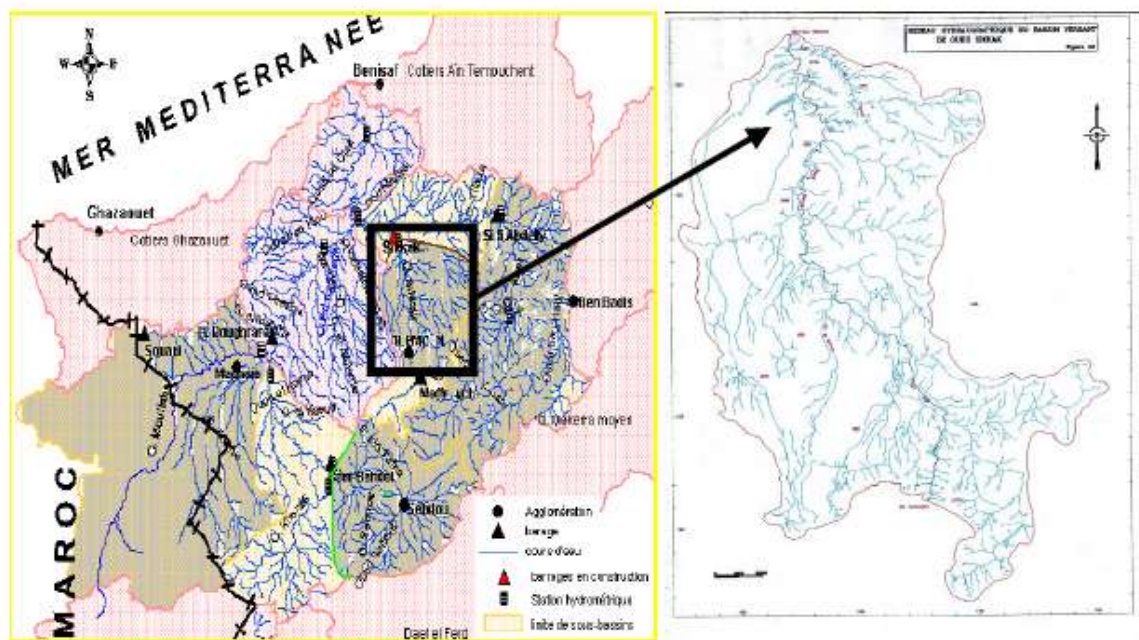


Figure 2.1 : Situation du bassin versant de l'Oued Sikkak (Fandi et al.2009).

## 2.2. Caractéristiques de forme

### 2.2.1. Indice de compacité

Le coefficient de compacité de Gravelius compare le bassin considéré au bassin ayant la forme d'un cercle de même superficie. Le cercle étant par définition l'élément le plus compact, son indice de compacité  $K_c$  sera égal à 1. Cette valeur croît au fur et à mesure que la compacité du système diminue.

Le coefficient de compacité s'exprime par :

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad [\text{II-1}]$$

P : périmètre du bassin versant (Km).

A : surface (Km<sup>2</sup>).

### 2.2.2. Rectangle équivalent

C'est une transformation purement géométrique en un rectangle de dimensions (L et l) ayant la même surface que le bassin versant. Il permet de comparer les bassins versants entre eux de points de vue de l'écoulement. Les courbes de niveau sont des droites parallèles aux petits côtés du rectangle et l'exutoire est l'un de ces petits cotés.

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

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

$$l = \frac{K_c \sqrt{S}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]. \quad [\text{II-2}]$$

Avec L : longueur du rectangle équivalent en (Km) ;

l : largeur du rectangle équivalent en (Km) ;

S : La superficie du bassin versant (Km<sup>2</sup>) ;

$K_c$  : Le coefficient de compacité ou de Gravelius (Iratni N. 2014).

Le bassin de Oued Sikkak a une superficie  $A=463 \text{ km}^2$  et un périmètre de 116 km, ce qui donne les paramètres de formes résumés dans le tableau 2.1.



Tableau 2.1 : Caractéristiques de forme du bassin versant d'oued Sikkak (Bouanani.A, 2004).

Bassins	Superficie (km <sup>2</sup> )	Périmètre (Km)	Kc	Rectangle équivalent	
				Longueur (Km)	Largeur (Km)
Oued Sikkak	463	116	1.50	48.49	9.55

On conclut que le bassin de Oued Sikkak est moyenne allongé.

### 2.3. Etude du relief

Le relief, un facteur essentiel pour étudier les écoulements, détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin. Partant de la répartition par tranches d'altitudes des bassins, nous avons établi les courbes hypsométriques et les diagrammes des fréquences altimétriques (Bouanani.A. 2004).

#### 2.3.1. Courbe hypsométrique

Les courbes hypsométriques sont tracées selon les résultats des mesures de la répartition du bassin versant par tranche d'altitude, et surfaces partielles (Roche 1963).

La courbe hypsométrique du bassin de l'oued Sikkak indique que le de plateau de Terny et les falaises d'El Ourit se situent vers les hautes altitudes et la plaine d'Hennaya vers les basses altitudes. En outre, la forme de cette courbe présente bien l'état d'équilibre du bassin, offrant un potentiel érosif moyen à faible (Tableau 2.2, Figure.2.2) (Bouanani.A. 2004).

**Tableau 2.2** : Répartition hypsométrique du bassin versant d'Oued Sikkak (Moyenne Tafna) (Bouanani.A. 2004).

Tranches d'altitudes	Ai(Km <sup>2</sup> )	Ai cumulée(Km <sup>2</sup> )	Ai (%)	Ai cumulées (%)	altitude cumulées (%)
<b>1500-1400</b>	7.675	7.675	1.66	1.66	100
<b>1400-1300</b>	11.750	19.425	2.54	4.2	92.62
<b>1300-1200</b>	20.95	40.375	4.52	8.72	85.24
<b>1200-1100</b>	63.25	103.625	13.66	22.38	77.86
<b>1100-1000</b>	10.75	114.375	2.32	24.7	70.48
<b>1000-900</b>	12.65	127.025	2.73	27.43	63.10
<b>900-800</b>	20.975	148	4.53	31.96	55.72

800-700	28	176	6.15	38.01	48.34
700-600	45.150	221.15	9.75	47.76	40.96
600-500	58.975	280.125	12.74	60.5	33.58
500-400	67.025	347.15	14.48	74.98	26.20
400-300	72.075	419.225	15.57	90.55	18.82
300-200	38.075	457.3	8.22	98.77	11.44
200-145	5.7	463	1.23	100	4.06

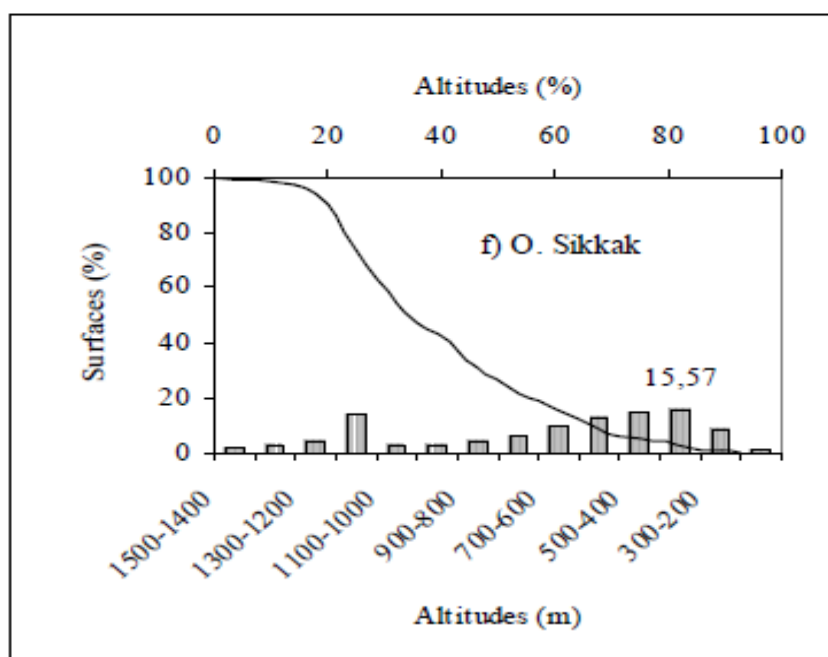
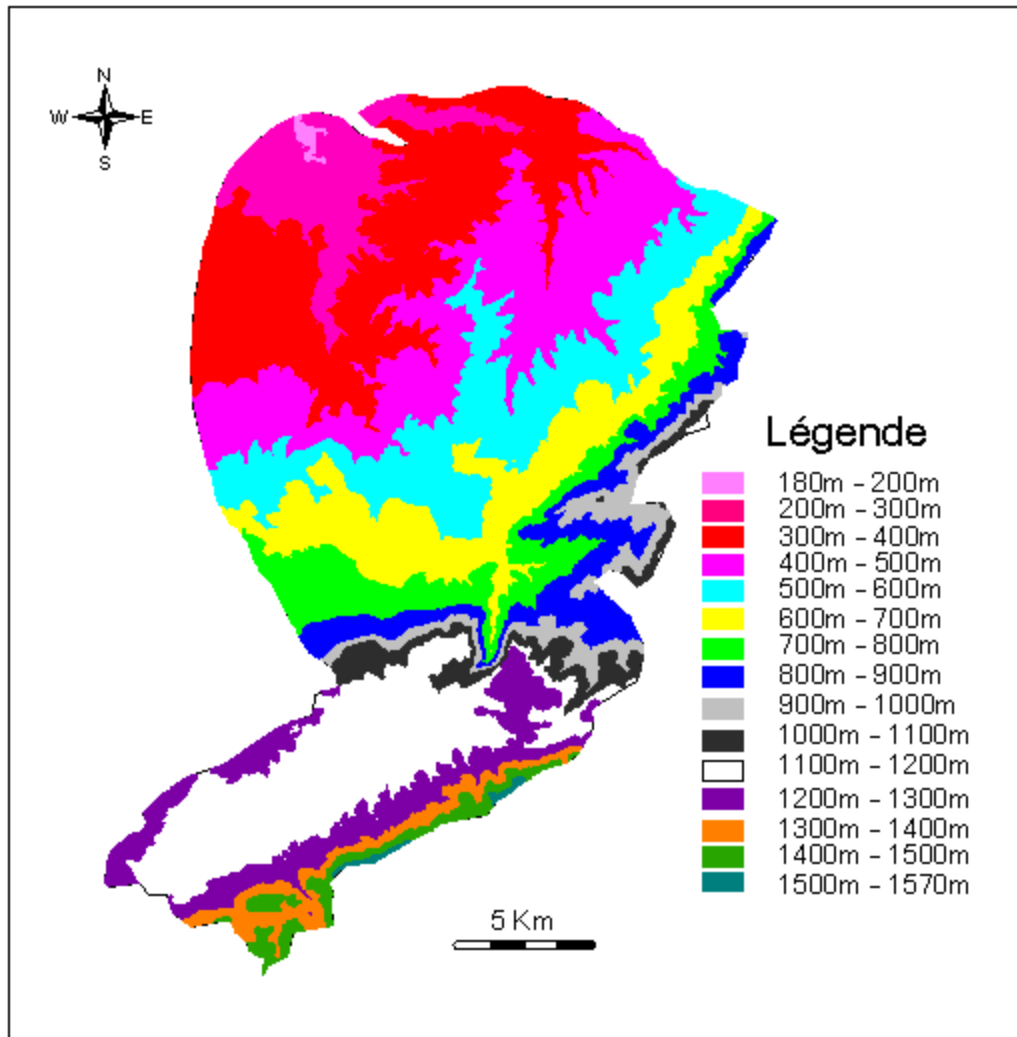


Figure 2.2 : Courbes Hypsométriques et histogrammes de fréquences altimétriques des sous bassins de l'oued Sikkak (Bouanani.A. 2004).



**Figure 2.3 :** Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Sikkak (Iratni N. 2014).

### 2.3.2 Hauteurs caractéristiques

Les hauteurs maximales et minimales 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. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

L'altitude moyenne du bassin est un indice important qui intègre et présente l'influence de la zonalité climatique verticale. Elle est déterminée par la somme du produit de la surface partielle par le centre de chaque tranche d'altitude.

$$H_{moy} = \sum 0.5(H_i + H_{i+1})S_i \quad [\text{II-3}]$$

Où  $S_i$  (%) est la surface relative comprise entre les courbes de niveau  $H_i$  et  $H_{i+1}$ .

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

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

Les différentes altitudes caractéristiques sont résumées dans le tableau (Tableau 2.3).

Tableau 2.3: Altitudes caractéristiques de bassin de Sikkak.

Hauteur	Valeur	Observation
Maximale	1500	-
Minimale	145	-
Moyenne	475	-
Médiane	570	-
[400-300[	Altitude la plus fréquent (m)	
Oued Sikkak	400-300	Vers vieillesse

## 2.4. L'indice de pente

Les indices de pente se déterminent à partir de la connaissance de la répartition hypsométrique sur le bassin.

### a. Indice de pente globale $I_g$

L'indice de pente globale se calcul par l'équation :

$$I_g = D/L \quad [II-4]$$

Où

D : Dénivelée entre  $H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$  (m) ;

$H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$  : sont les altitudes correspondantes à  $S_{5\%}$  et  $S_{95\%}$  (m) ;

L : Longueur du rectangle équivalent (km)

### b. Indice de pente de Roche $I_P$

$I_P$  est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces comprises entre deux courbes de niveau  $H_i$  et  $H_{i-1}$ .  $I_P$  est donné par la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n \sqrt{S_i} (H_i - H_{i-1}) \quad \text{[II-5]}$$

Où :  $I_p$  : Indice de pente de Roche

$L$  : Longueur de rectangle équivalent (m)

$S_i$  : Surface partielle en(%) comprise entre deux altitudes  $H_i$  et  $H_{i-1}$ .

### c. Indice de pente moyenne du bassin versant $I_m$

L'indice de pente moyenne est le rapport entre la dénivelée et la longueur de rectangle équivalent.

$$I_m = \frac{\Delta}{L} = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} \quad \text{[II-6]}$$

$H_{\max}$  et  $H_{\min}$ : sont les altitudes maximal et minimal (m) ;

Tableau 2.4 : Indices de pentes pour Oued Sikkak.

<i>bassins</i>	<i>I<sub>p</sub></i>	<i>I<sub>g</sub></i>
Oued Sikkak	1.52	0.021

D'après la classification de l'ORSTOM (Tableau 2.5), que les valeurs de  $I_g$  de l'oued sikkak égale 0.021 donc  $I_g$  entre (0.02 <  $I_g$  < 0.05) ce qui permet de le ranger est classe de relief assez fort.

**Tableau 2.5:** Classification du relief selon  $I_g$  par l'ORSTOM.

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	$.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$

---

Relief très fort      0.5 m/km <I<sub>g</sub>

---

#### d. La dénivelée Spécifique « D<sub>s</sub> »

Elle est calculée par la formule suivante :

$$D_s = I_g \cdot A^{1/2} \quad [\text{II-7}]$$

Avec:

I<sub>g</sub> : Indice de pente globale

A : Surface du bassin versant (km<sup>2</sup>).

La dénivelée spécifique permet de caractériser le relief suivant le tableau 2.6.

Tableau 2.6 : Classification du relief selon D<sub>s</sub>.

D <sub>s</sub> < 10 m	Relief très faible
10 m < D <sub>s</sub> < 25 m	Relief faible
25 m < D <sub>s</sub> < 50 m	Relief assez faible
50 m < D <sub>s</sub> < 100 m	Relief modéré
100 m < D <sub>s</sub> < 250 m	Relief assez fort
250 m < D <sub>s</sub> < 500 m	Relief fort
D <sub>s</sub> > 500 m	Relief très fort

Pour Oued Sikkak, D<sub>s</sub> = 451.9 m. Cette valeur traduit l'importance du volume montagneux et la forte incision du relief. Ce qui permet de ranger Oued Sikkak dans la classe des reliefs forts puisque on a D<sub>s</sub> compris entre 250 et 500 m.

## 2.5. Réseau hydrographique

### 2.5.1. Le chevelu hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Les paramètres importants qui régissent le régime hydrologique d'un cours d'eau sont : la densité de drainage (D<sub>d</sub>), le rapport de confluence (R<sub>c</sub>) et le rapport des longueurs (R<sub>l</sub>) (Bouanani2004).

### 2.5.2. Densité de drainage

La densité de drainage est définie comme le rapport de la longueur totale des cours l'eau L sur la surface du bassin versant.

$$Dd = \Sigma L / A \quad [\text{II-8}]$$

Où :

Dd : densité de drainage en (Km/Km<sup>2</sup>).

L : longueur totale de cours d'eau (Km).

A : surface du bassin versant en (Km<sup>2</sup>).

### 2.5.3. Rapport de confluence

Le rapport de confluence, Rc, est le quotient du nombre de thalweg d'ordre n par celui de thalweg d'ordre n+1. Il est défini par :

$$Rc = N_n / N_{(n+1)} \quad [\text{II-9}]$$

Où :

N<sub>n</sub> est le nombre des cours d'eau d'ordre n.

### 2.5.4. Rapport de longueur

Le rapport de longueur RL est le quotient de L<sub>(n+1)</sub> la longueur moyen de thalweg d'ordre (n+1) par L<sub>n</sub> la longueur des thalwegs d'ordre n. Il est défini par :

$$RL = L_{(n+1)} / L_n$$

### 2.2.5. Coefficient de torrentialité

Plus le coefficient est élevé, et plus la torrentialité augment traduisant ainsi une grande agressivité des averses.

$$Ct = Dd \frac{N_1}{A} \quad [\text{II-10}]$$

Ou ;

Dd : Densité de drainage (Km/Km<sup>2</sup>)

N<sub>1</sub> : Nombre de cours d'eau d'ordre 1

A : surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>)

Appliqué à oued Sikkak, le coefficient de torrentialité Ct=1.9.

### 2.5.6. Temps de concentration

Le temps de concentration, T<sub>C</sub>, est le temps que met une particule d'eau provenant du point le plus éloigné du bassin pour arriver à l'exutoire. Pour les grands bassins versants, il peut être calculé par les formules suivantes :

#### a) La formule de GIANDOTTI (1937)

Temps de concentration est défini comme le temps nécessaire que met une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique du point le plus éloigné du bassin à l'exutoire.

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L_p}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad [\text{II-11}]$$

Ou

$L_p$  : longueur du cours d'eau principale (km)

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

$H_{min}$  : Altitude minimum du bassin versant (m) (Bemoussat A. 2012).

#### b) La formule de VENTURA

$$T_c = 0,1275 \sqrt{\frac{S}{I}} \quad [\text{II-12}]$$

Avec :

$S$  : surface du bassin versant en (Km<sup>2</sup>);

$I$  : indice de pente en (m/km).

#### c) La formule de BASSO

$$T_c = 0,067 \times \frac{L_p^{1,115}}{(H_{max} - H_{min})^{0,385}} \quad [\text{II-13}]$$

Avec :

$T_c$  : temps de concentration en Heures ;

$L_p$  : longueur du bassin versant (Km) ;

$H_{min}$  : altitude minimal (Km);

$H_{max}$  : altitude maximal (Km).

#### d) La formule de KIRPICH

$$T_c = 0.6615 \times (L_{cp})^{0.77} \times (I_g)^{-0.385} \quad [\text{II-14}]$$

Avec :

$L_{cp}$  : longueur du chenal principal hydrographique en (Km);

$I_g$  : indice de la pente globale (%).

#### e) Formule de SOKOLOVSKY



$$T_c = 4 \left( \frac{(S \times L)^{0,333}}{\sqrt{I}} \right)^{0,75} \quad \text{[II-15]}$$

Avec :

L: longueur du talweg principale en (Km) ;

S : surface du bassin versant en (Km<sup>2</sup>);

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

#### f) Formule de L'ANRH

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 :

$$T_c = 3 \left[ \frac{S_{BV} \times L_{CP}}{(10I_{BV})^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{[II-16]}$$

Avec :

I<sub>BV</sub>: la pente du bassin versant en (%) ;

L<sub>CP</sub>: longueur du chenal principal hydrographique en (Km);

S<sub>BV</sub>: Surface du bassin versant en (Km<sup>2</sup>) (Bemoussat A. 2012).

Pour l'oued Sikkak, le temps de concentration est calculé par la formule de Giandotti est de 9h30mn.

## 2.6 Géologie du site

### 2.6.1. Introduction

La connaissance de la géologie d'un bassin versant est importante pour comprendre l'influence des caractéristiques physiographiques. La géologie du substratum influe sur l'écoulement de l'eau souterraine mais également sur le ruissellement de surface.

Les principaux caractères géologiques à considérer sont la lithologie (nature de la roche mère) et la structure tectonique du substratum. La lithologie influence le ruissellement et l'infiltration et donc, l'érosion et le transport solide. En effet la perméabilité du substratum d'un bassin versant intervient sur la vitesse de montée des crues, sur leur volume et sur le soutien apporté aux débits d'étiage par les nappes souterraines. Les divers types de roches et leurs structures donnent une indication précieuse sur la capacité d'infiltration des zones occupées par les roches et par les sols et en conséquence sur la quantité de terre susceptible

d'être érodée (FAO, 1994 ; DEMMAK, 1982). Les argiles, les marnes, les schistes, les basaltes et les gneiss sont très vulnérables au ravinement (Roose, 1994).

Dans ce chapitre, nous allons présenter brièvement quelques caractères généraux sur la géologie de Sikkak.

### 2.6.2 Carte géologique

La structure actuelle de l'Algérie du nord est liée au mouvement orogénique hercynien et alpin qui ont permis l'individualisation de plusieurs domaines, en Oranie. Du nord au sud (d'après Benest 1985), on trouve :

Le domaine Tlemcen

Les hautes Plines oranaises

Le domaine atlasique

Le domaine saharien

Le bassin d'étude se situe entre le Tell et les monts de Tlemcen, ces monts forment des reliefs importants dont les sommets dépassent les 1500m. Notons que le bassin versant de l'oued Sikkak, se trouve dans le bassin sédimentaire de la moyenne TAFNA qui est constitué par des dépôts au Miocène inférieur du domaine autochtone atlasique.

Dans la région d'Oued Sikkak, on trouve deux grands ensembles.

- au Nord une dépression où le principal élément ayant contribué au remplissage est représenté par le Miocène marneux et le quaternaires.
- au Sud, et à l'Est les massifs montagneux où affleurent principalement des terrains jurassiques (grés, calcaires, marno-calcaires et dolomies) faillés et bien karstifiés (Bouanani.A 2004).

## **2.7. Sols et végétation**

La végétation est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin. Donc la présence de végétation va jouer le rôle de « Régulateur » dans le régime d'écoulement.

Généralement, les massifs jurassiques rocheux, calcaires et dolomitiques admettent une maigre couverture forestière. Le *scistus daniferus* et *quercus suber* constituent les forêts des monts d'Hafir et Zarifet. Les marnes et alluvions du quaternaires sont occupées par les céréales et les prairies naturelles. Les broussailles occupent une petite surface dans notre bassin, concentrées dans la région de la commune de Ain Fezza et au djebel Ain El Hout. Une plantation d'oliviers couvre une partie de la plaine qui s'étend de Tlemcen à Hennaya, de

SafSaf à Mansourah. En gradins les jardins irrigués, à côté de l'oued Sikkak, produisent des légumes et des fruits (Figure.2.9).

La carte d'occupation du sol du bassin versant de l'oued Sikkak (Figure.2.9) présente les limites des différentes communes avec la diversité de cultures et d'occupations du sol, elle montre que les cultures extensives occupent plus de la moitié de l'espace du bassin versant, suivie par l'arboriculture qui occupe 12 % de la superficie totale (Tableau.2.7).

Dans le détail, les céréales occupent (58.16 %) de la surface du bassin versant ; les vignes (3.11 %), (10.47%) de culture maraîchère et le reste est occupé par les arboricultures (9.63 %), les broussailles (5.50 %) et les forêts (4.57 %) (Bouanani et al. 2013).

Dans le tableau 2.8 , sont présentées les surfaces de différente culture.

Tableau 2.8 : Répartition des surfaces de différente culture (Berrezoug T.2002).

Commune Type de culture	A youcrf	Amieur	Hennay a	Chetouan e	Tlence n	Mansoura h	Terni	Afezza	% surf e
Vignes	1	0.525	2	0.775	2	0.50	/	/	3.11
Arboriculture	0.5	1.56	3.5	4.5	9	0.75	/	1.2	9.63
Maraichage	2.5	4	2.55	11	2	/	/	0.775	10.47
Céréale	4	40	28	18	17	3	1.3	15.5	58.16
Forêt	/	/	/	/	1.5	0.2	0.26 5	8	4.57
Broussaille	0.062 5	/	0.0625	4	0.875	/	/	7	5.50
Totale	8.062 5	46.08 5	36.112	38.275	32.37 5	4.45	1.56 5	32.47 5	

Tableau 2.7 : Distribution du couvert végétal dans le bassin d'Oued Sikkak (Bouanani.A 2004).

Occupation des sols	Surfaces en km <sup>2</sup>	% des surfaces
Cultures extensives	149,625	68,63
Couvert forestier dégradé	12	5,5

Couvert forestier normale	9,965	4,57
Arboriculture	26,61	12,74
Prairies et terrains de pacage	19,8	8,56

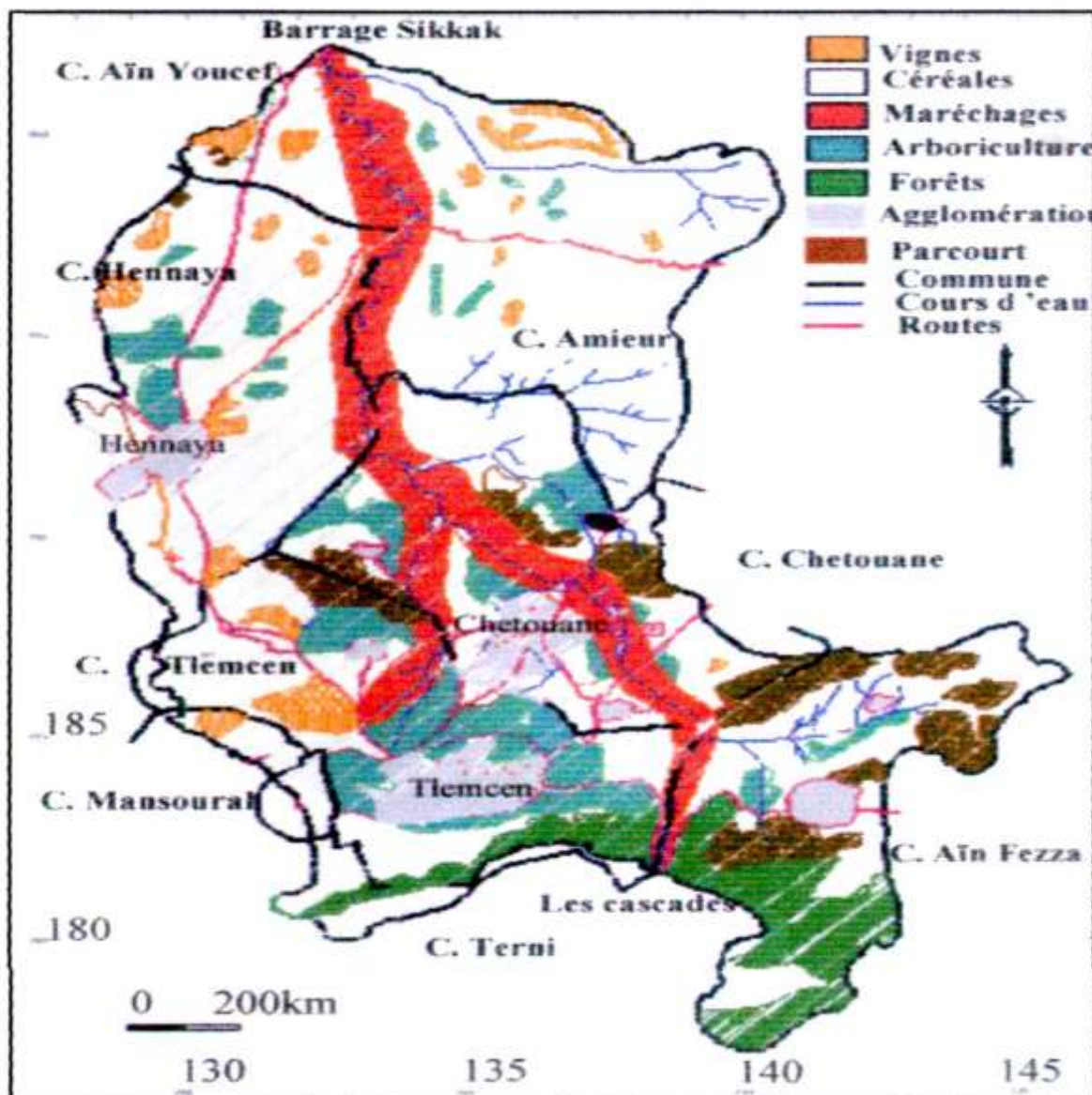


Figure 2.4 : Occupation du sol d'oued de Sikkak (Bouanani.A.2013)

Tableau 2.9: Principaux paramètres physique du bassin d'oued Sikkak.

Paramètres	Bassin versant d'oued Sikkak
Superficie (Km)	463
Périmètre (Km)	116

Indice de compacité Kc	1.50
Largeur du Re (L) (Km)	9.55
Longueur du Re (L) (Km)	48.49
Densité de drainage Dd (Km /km')	1.51
Rapport de confluence Rc	3.76
Rapport des longueurs Rl	2.63
Indice de pente Ip	1.52
Indice de pente global Ig	0.021
Coefficient de torrencialité CT	1.9

## 2.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de présenter les grands traits bassin versant de l'oued de Sikkak, et qui ont une influence sur l'écoulement d'une manière générale soit souterraine ou de surface. La valeur de l'indice de compacité permet d'affirmer que Sikkak présente dans l'ensemble une forme moyennement allongée, ce qui lui confère un temps de concentration des eaux de ruissellement court et il faut noter que l'influence du relief est encore plus déterminante. Les valeurs de  $I_g$  et  $I_p$  traduisent un relief modéré avec une tendance assez fort présente bien sur un volume montagneux.

La végétation qui a une influence certaine sur l'écoulement fluvial est de faible à très faible dans le bassin de Sikkak. Les cultures extensive occupent plus de la moitié de l'espace du bassin versant.

La région de Sikkak est dominée essentiellement par les alluvions, les calcaires, grés et les dolomies comme formation géologique.

## Chapitre 3 : Etude de la pluviométrie

### 3.1 Introduction

L'étude des caractéristiques climatiques d'un bassin versant est nécessaire pour la connaissance du comportement hydrologique des cours d'eau. En effet, l'abondance, la durée et les variations des quantités de pluies qui tombent pendant que les sols ne sont pas protégés par la végétation ont une incidence sur le milieu physique et peuvent provoquer une action érosive importante. Cependant, l'intensité, le volume, la fréquence et la répartition des pluies au cours de l'année conditionnent l'importance du couvert végétal qui réduit le ruissellement en absorbant l'eau.

L'eau ruisselle lorsque la vitesse d'arrivée de l'eau sur le sol est supérieure à la vitesse d'infiltration. Le volume d'eau en excès à la surface dépend de l'intensité (hauteur d'eau par rapport à une durée) de la pluie et du volume total précipité.

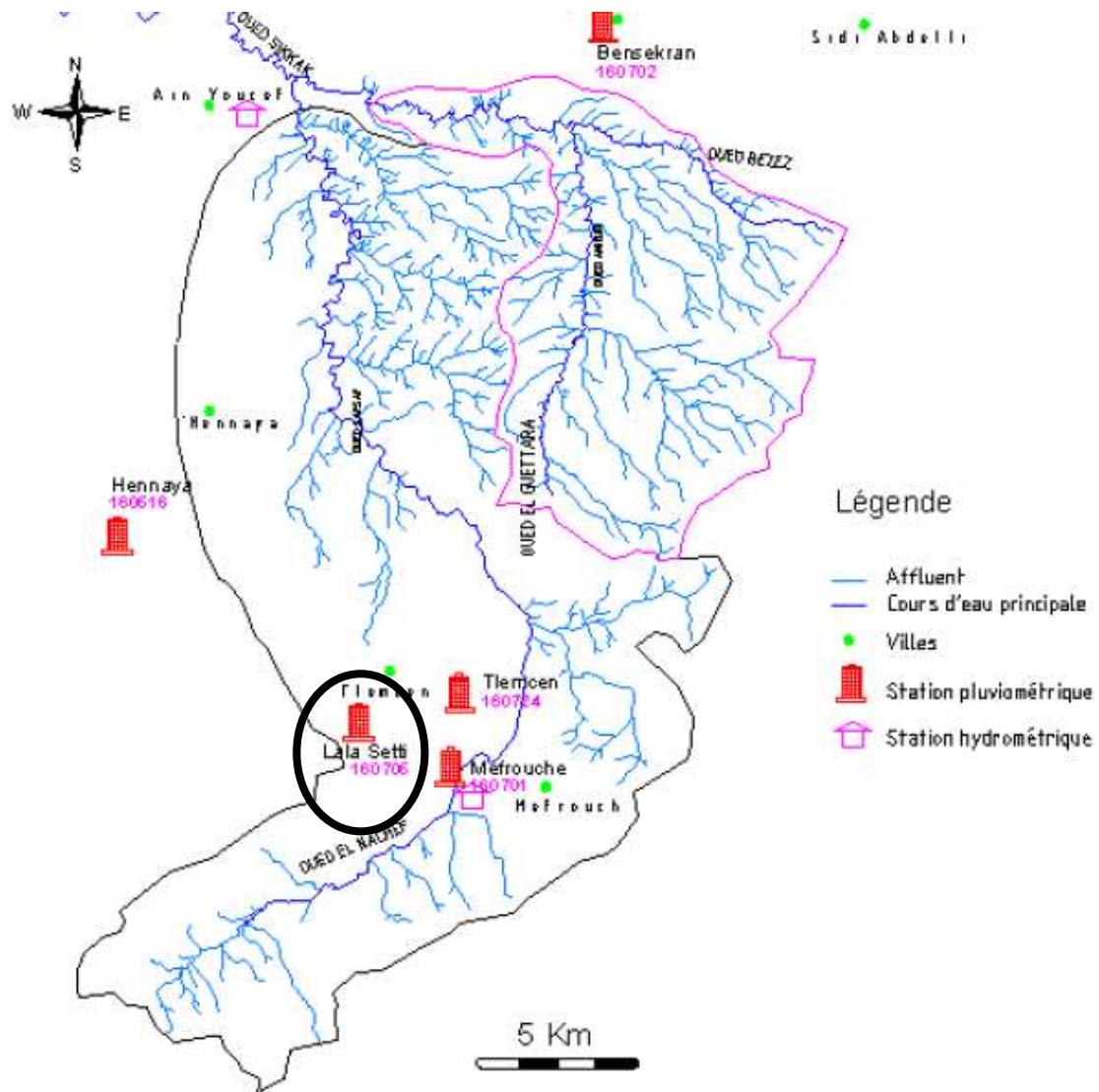
Les conditions climatiques d'un bassin versant s'expliquent par sa situation géographique, le caractère de circulation atmosphérique, et par le relief de son territoire. La caractérisation du climat est établie en fonction des observations fournies par le réseau de mesures pluviométriques, hydrométriques et climatologiques installé au sein du bassin.

Les précipitations sont la quantité d'eau qui s'appelle aussi la tranche ou la lame pluviométrique. Cette tranche diffère d'une région à une autre en fonction du relief. Généralement, les précipitations sont exprimées en millimètre. Les précipitations peuvent être classées en trois types : les précipitations convectives, orographiques et frontales. Elles correspondent à différents mécanismes d'ascendance (formation des nuages) et présentent des caractéristiques d'intensité et de durée diverses. La pluviométrie est le facteur qui permet de déterminer le type du climat. En effet, elle conditionne le maintien et la répartition du tapis végétal d'une part, et la dégradation du milieu naturel par le phénomène d'érosion d'autre part.

La Pluviométrie en Algérie a été étudiée par plusieurs auteurs, (P.Seltzer, 1913-1938, H.Gaussen, 1918-1947, G.Medinger, 1913-1953, M.Chaumont et C.Paquin, 1913-1963). Cependant, la plupart des stations du bassin ont été arrêtées pendant la guerre d'Algérie, d'autres ont subi des modifications après 1962. Ceci se traduit par des résultats entachés d'erreurs et le nombre élevé de lacunes à l'échelle mensuelle et annuelle (Bouanani.A ,2004).

Le bassin d'Oued Sikkak est contrôlé par cinq stations pluviométriques (Meffrouch, Tlemcen, Bensekrane, Hennaya et LallaSetti) (Figure 3.1), nous avons retenu la station de Lalla Setti (133.95 ; 181.85 ; 1020 m) pour la disponibilité de séries de données mensuelles et précipitation journalière maximale mensuelle sur une longue période de 48 ans (septembre 1956 à août 2004).

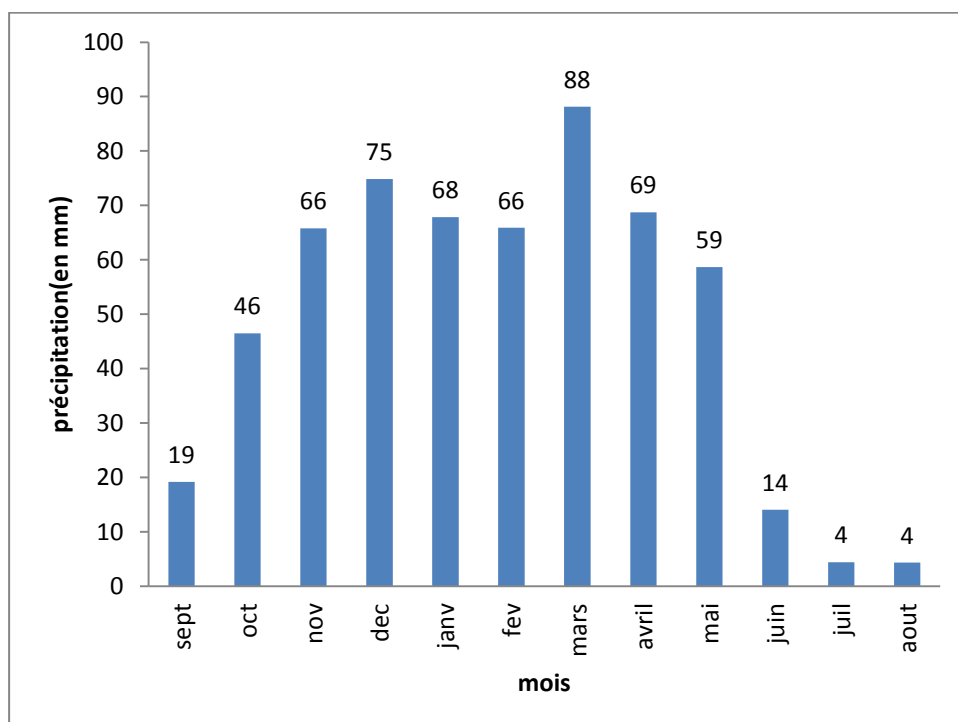
Ce chapitre est consacré à l'analyse des facteurs climatiques du bassin versant de Sikkak, et notamment les précipitations mensuelles et les précipitations journalières maximales mensuelles.



**Figure 3.1** : Présentation du bassin de l’oued Sikkak et localisation des stations pluviométriques et hydrométrique.

### 3.2 Précipitations mensuelles

La variation des moyennes mensuelles sur une période de 48 ans pour la station de Lalla Setti sont représentées sur l'histogramme (Figure 3.2). Il apparaît que le mois de mars est le plus pluvieux avec une hauteur moyenne de 88mm. Le mois de décembre constitue un maximum secondaire avec une hauteur moyenne de 75mm. La hauteur minimale, 4mm, est observée pendant les mois de juillet et août. La période humide s'étale du mois d'octobre au mois de mai.



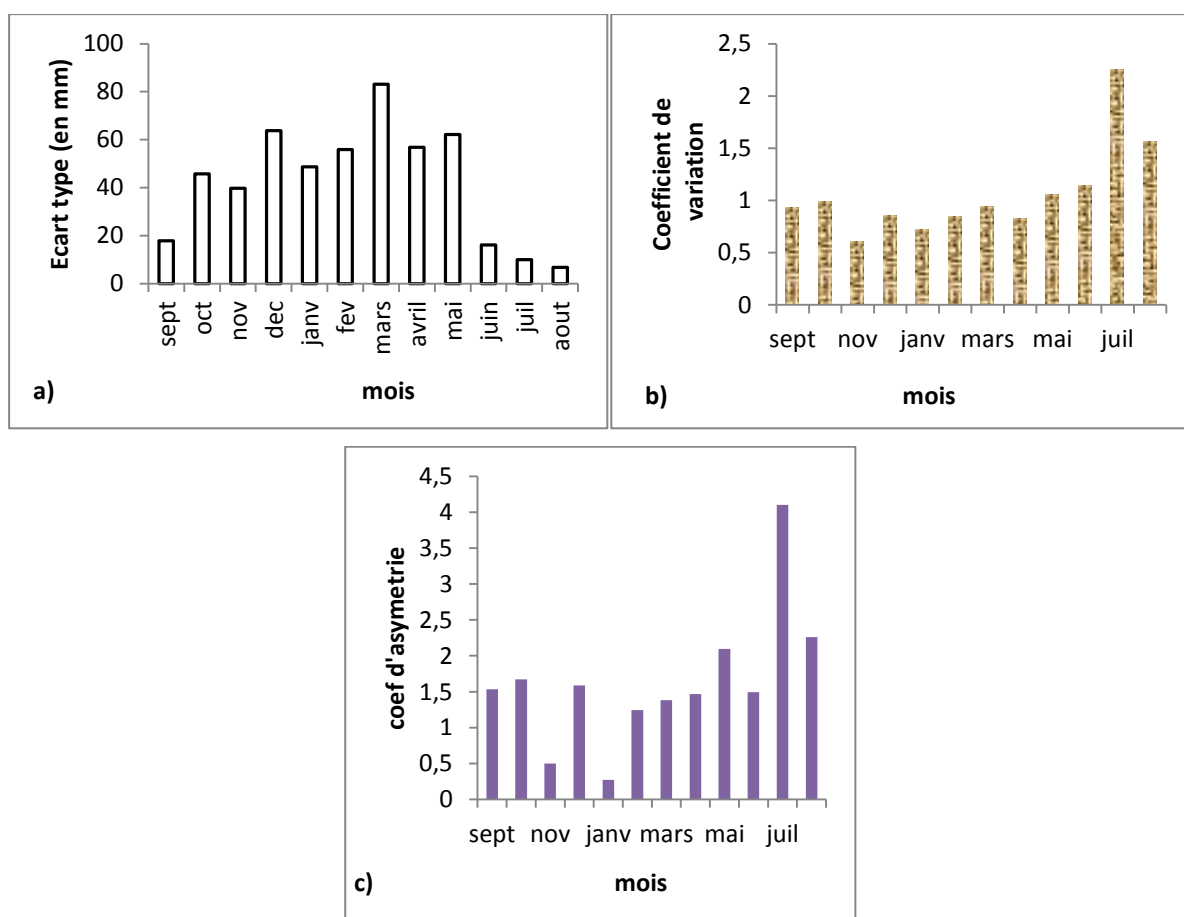
**Figure 3.2 :** Répartition des précipitations moyennes mensuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005).

Le comportement des précipitations au niveau de bassin de Sikkak est examiné à travers les principales statistiques qui caractérisent la répartition des précipitations mensuelles telles que : la moyenne ( $M$  en mm), l'écart type ( $s$  en mm) et les coefficients de variation ( $C_v$ ) et d'asymétrie ( $C_s$ ). Les observations couvrent la période allant de septembre 1956 à août 2004 (Tableau 3.1 et Figure 3.3). Les paramètres statistiques sont calculés par Microsoft Excel.



**Tableau 3.1 :** Paramètres statistiques des précipitations mensuelles : moyenne m (en mm), écart type s (en mm), coefficient de variation Cv, coefficient d'asymétrie Cs.

Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	août
<b>m</b>	19	46	66	75	68	66	88	69	59	14	4	4
<b>s</b>	18	46	40	64	49	56	83	57	62	16	10	7
<b>Cv</b>	0,93	0,99	0,61	0,85	0,72	0,85	0,94	0,83	1,06	1,15	2,25	1,56
<b>Cs</b>	1,53	1,67	0,50	1,59	0,27	1,25	1,38	1,47	2,10	1,50	4,10	2,26



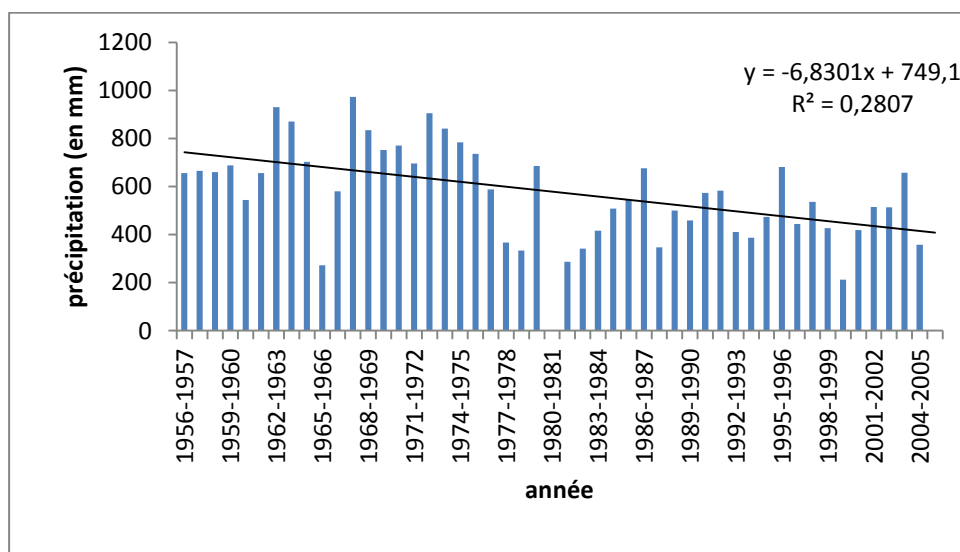
**Figure 3.3 :** Variation mensuelle des paramètres statistiques de la série des précipitations à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005):a) écart type, b) coefficient de variation et c) coefficient d'asymétrie.

La lecture des histogrammes (Figure3.3) montre que :

- Durant la période humide qui s'étale du mois d'octobre au mois de mai, la dispersion des précipitations mensuelles, exprimée par l'écart type, semble être corrélée avec les hauteurs mensuelles moyennes.
- La variation maximale des précipitations mensuelles est observée pour le mois de juillet, où le coefficient de variation atteint 2.25 La plus faible variation correspond au mois de novembre de 0.61.
- Le coefficient d'asymétrie des hauteurs mensuelles des précipitations montre un comportement similaire que celui du coefficient de variation. Les plus faibles Coefficients sont observés durant les mois de janvier puis novembre. Le coefficient le plus élevé est observé durant le mois de juillet.
- De plus, on remarque que la dispersion des précipitations mensuelles, exprimée par l'écart type semble être corrélée avec les hauteurs de pluies. De même, le coefficient d'asymétrie, semble être corrélée avec le coefficient de variation.

### 3.3 Précipitations annuelles

La variation des précipitations annuelles est représentée par la (Figure 3.4). L'année 1999-2000 se distingue par la plus faible hauteur pluviométrique 212 mm et l'année de 1967-1968 par la plus forte pluviométrie annuelle qui atteint 973mm. La pente de la courbe de tendance permet d'apprécier le taux d'accroissement annuel. Pour la série des précipitations annuelles représentant la station Lalla Setti on enregistre une baisse moyenne annuelle de 6.83 mm par an.



**Figure 3.4 :** Evolution des précipitations annuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005)

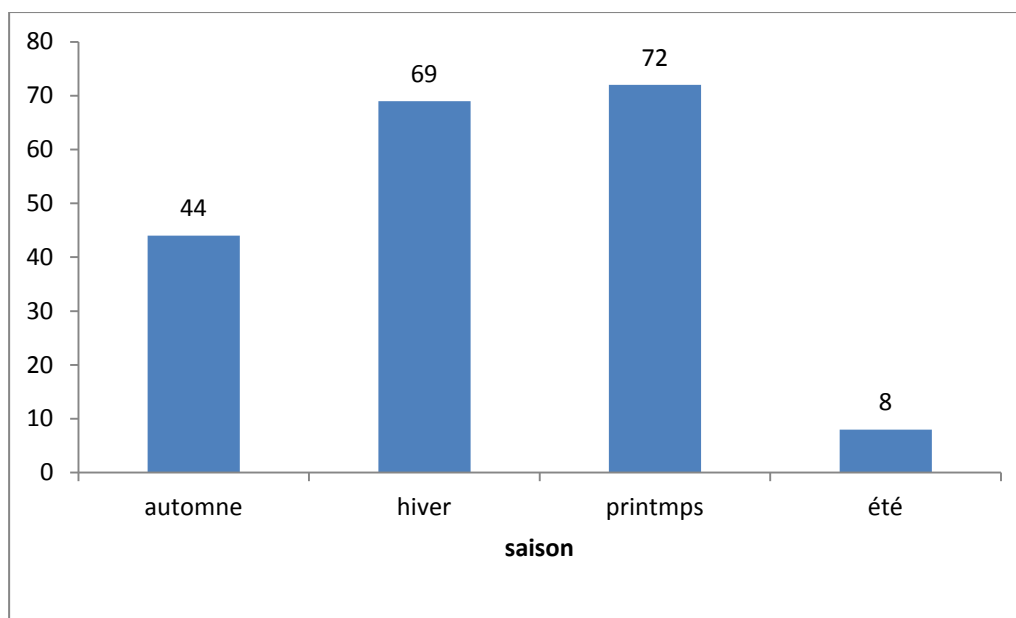
Durant la période d'étude, la hauteur interannuelle des précipitations varie de 212 à 973 mm. La moyenne est de 578mm et l'écart type de 186 mm. La hauteur interannuelle est très variable avec un coefficient de variation,  $C_v=0.32$ . Le coefficient d'asymétrie,  $C_s=0.15$ , est positif et relativement faible. Ce qui se traduit par une répartition équitable des années humides et années sèches autour de la moyenne. Autrement dit, il n'y a pas d'années exceptionnellement humides.

**Tableau. 3.2 :** Paramètres statistiques des précipitations annuelles, PA : moyenne m (en mm), écart type s (en mm), coefficient de variation  $C_v$ , coefficient d'asymétrie  $C_s$ .

	<b>m</b> <b>(en mm)</b>	<b>s</b> <b>(en mm)</b>	<b><math>C_v</math></b>	<b><math>C_s</math></b>
<b>P.A.</b>	578	186	0.32	0.15

### 3.4 Les Précipitations saisonnières

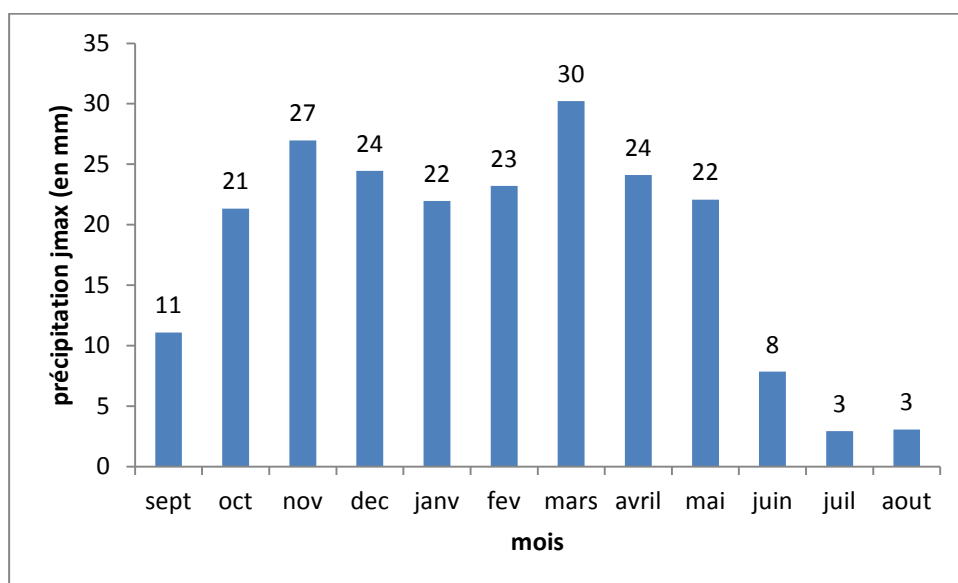
La variation des précipitations saisonnières de la station de Lalla Setti est illustrée par la (Figure 3.5). On remarque que les précipitations saisonnières sont importantes durant les saisons du printemps, hiver qui correspondent à la saison humide. Les précipitations de la saison d'été sont faibles une période de sécheresse, est pour l'automne correspondant une période semi-aride.



**Figure 3.5 :** Précipitations moyennes saisonnières à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005)

### 3.5 Précipitations journalières maximales mensuelles

La variation mensuelle des précipitations journalières maximales moyennes (Figure 3.6) montre que les plus fortes précipitations journalières maximales annuelles sont observées durant le mois de mars avec une moyenne journalière de 30 mm. Le mois de novembre peut constituer le deuxième mois en termes des pluies journalières les plus fortes avec une moyenne de 27 mm. La plus faible moyenne, 3 mm, des précipitations journalières maximales mensuelles, correspond au mois de juillet.

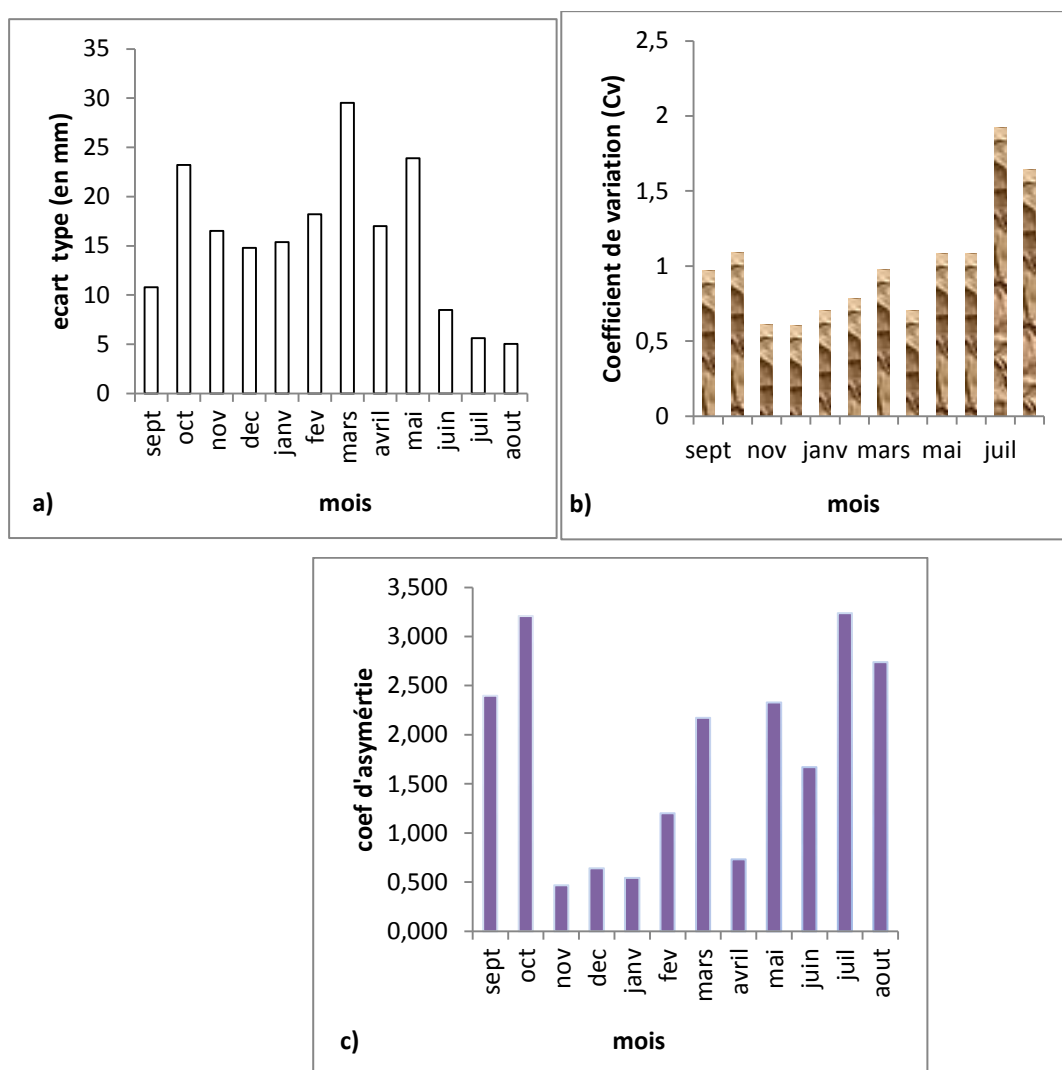


**Figure 3.6 :** Moyenne mensuelle des précipitations journalières maximales mensuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005)

La variation mensuelle des précipitations journalières maximales (tableau 3.3 et figure 3.7), résume les principales statistiques qui caractérisent la répartition des précipitations journalières maximales mensuelles telles que : la moyenne (m en mm), l'écart type (s en mm) et les coefficients de variation (Cv) et d'asymétrie (Cs)) l'observation allant de l'année hydrologie (1956-2004). Ces paramètres sont calculés par Microsoft Excel.

**Tableau 3.3:** Paramètres statistiques des précipitations journalières maximales mensuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005).

Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	août
<b>m</b>	11	21	27	24	22	23	30	24	22	8	3	3
<b>s</b>	11	23	16	15	15	18	29	17	24	8	6	5
<b>Cv</b>	0,97	1,09	0,61	0,61	0,7	0,78	0,98	0,70	1,08	1,08	1,92	1,64
<b>Cs</b>	2,40	3,21	0,47	0,64	0,54	1,20	2,17	0,73	2,33	1,67	3,24	2,74



**Figure 3.7:** Variation mensuelle des paramètres statistiques de la série des précipitations journalières maximales mensuelles de la station Lalla Setti (septembre 1956 à août 2005): a) écart type, b) coefficient de variation et c) coefficient d’asymétrie.

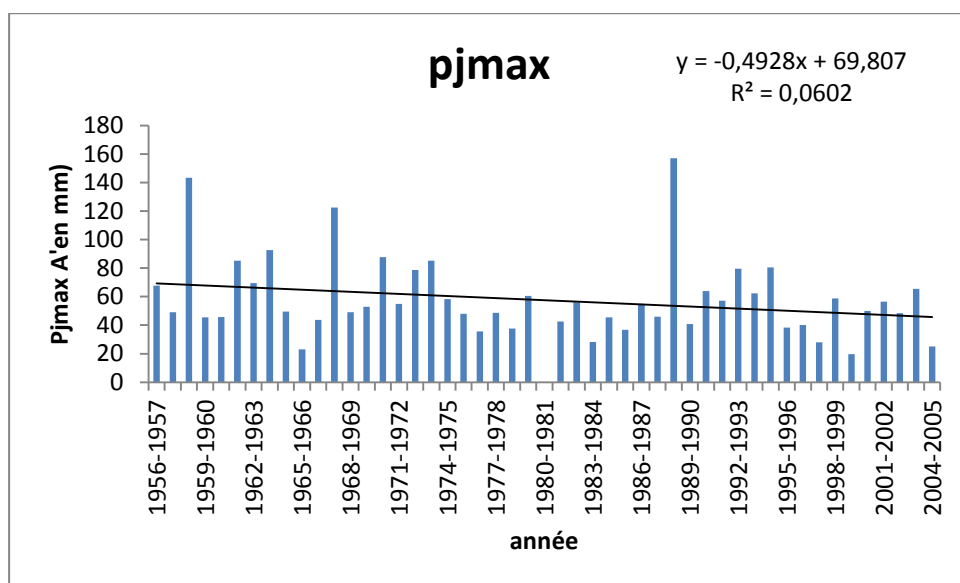
La lecture des histogrammes (Figure 3.7) montre que :

- Durant la période humide qui s’étale du mois d’octobre au mois de mai, la dispersion des précipitations journalières maximales mensuelles, exprimée par l’écart type, semble être corrélée avec les hauteurs des précipitations journalières maximales mensuelles moyennes.
- Le coefficient de variation maximale des précipitations journalières maximales mensuelles,  $Cv=1.92$  coïncide avec le mois de juillet. Le plus faible coefficient est observé au mois de décembre et novembre qui atteint 0.61.

- Le coefficient d’asymétrie représentant les précipitations journalières maximales mensuelles a pour valeurs minimales 0.47 et 0.54 observées respectivement durant les mois de novembre et janvier. Est montre un comportement similaire que celui du coefficient de variation. La plus forte variabilité est observée durant les mois de juillet suivi par le mois d’août avec des Cs respective de 3.24 et 2.74.
- Le coefficient d’asymétrie est relativement faible pour les mois humides et fort durant les mois de la saison sèche. Le Cs est supérieur à 3.2 durant les mois d’octobre et de juillet.

### 3.6 Précipitations journalières maximales annuelles

La variation des précipitations journalières maximales annuelles est représentée par la (Figure 3.8). La pente de la courbe de tendance permet d’apprécier le taux d’accroissement annuel. Pour la série des précipitations journalières maximales annuelles représentant la station Lalla Setti on enregistre une baisse moyenne annuelle de 0.49mm. L’année1999-2000 se distingue par la plus faible hauteur pluviométrique 20 mm et l’année de 1988-1989 par la plus forte pluviométrie journalière maximale annuelle qui atteint 157mm.



**Figure 3.8 :** Précipitations journalières maximales annuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005)

La hauteur moyenne maximale Les précipitations journalières maximales annuelles varient entre 19 mm atteinte en 1999-2000 et 157 observée en 1988-1989. La moyenne est de 57mm, l’écart type de 29mm. La série des précipitations journalières maximales annuelles est très

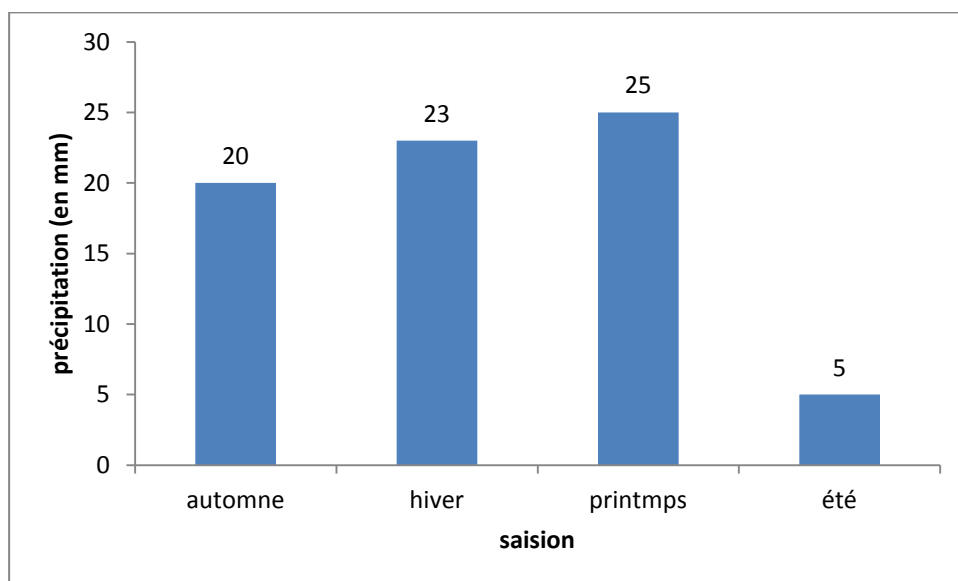
irrégulière avec un  $Cv=0.50$  et un coefficient d'asymétrie positif et élevé qui atteste de la présence de valeurs exceptionnellement forte (Tableau. 3.4).

**Tableau. 3.4:** Paramètres statistiques des précipitations journaliers maximales annuelles.

	<b>m</b> (en mm)	<b>S</b> (en mm)	<b>cv</b>	<b>cs</b>
<b>Pjmax A</b>	57	29	0.50	1.48

### 3.7 Etude des précipitations journalières maximales saisonnières

La variation des précipitations journalières maximales saisonnières de la station de Lalla Setti est illustrée par la (Figure 3.9). On remarque que la moyenne saisonnière des précipitations journalières maximales saisonnières est élevée durant les saisons du printemps, hiver et automne par ordre d'importance. La moyenne durant la saison d'été est faible une période sèche.



**Figure 3.9 :** Précipitations journalières maximales saisonnières à la station Lalla Setti (septembre 1956 à août 2005)

### 2.8 Stationnarité de la pluviométrie

Pour étudier la stationnarité (ou homogénéité) des séries pluviométriques, on a utilisé la méthode des simples et double cumuls (Dubreuil 1974).

La courbe des simples cumuls des précipitations annuelles (Figure. 3.10) montre un changement de comportement des précipitations annuelles avec une baisse considérable

observée vers la fin des années 1970. Le déficit en pluviométrie,  $\tau$ , est apprécié par les pentes des droites d'ajustement avant et après 1979. Le déficit est  $\tau = \frac{480.82 - 713.36}{713.36} = -32.6\%$ .

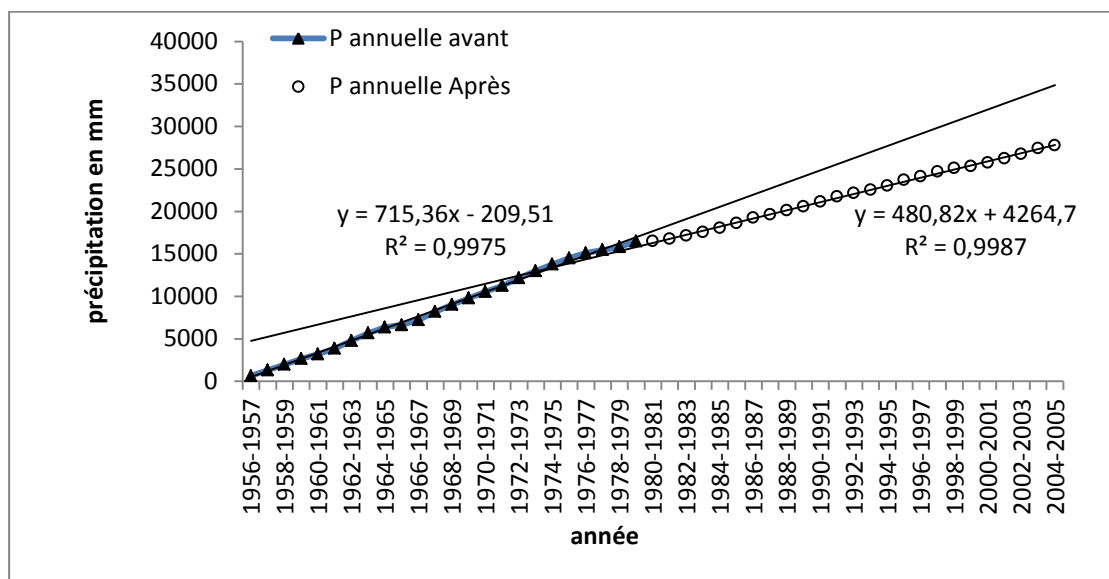


Figure. 3.10 : Courbe des simples cumuls des précipitations annuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005)

- ❖ Par contre, la méthode des simples cumuls montre une stationnarité au regard des variations des précipitations journalières maximales annuelles (figure 3.11). On fait remarqué que la pente de la droite 56.3 mm est très proche de la moyenne interannuelle 57 mm.

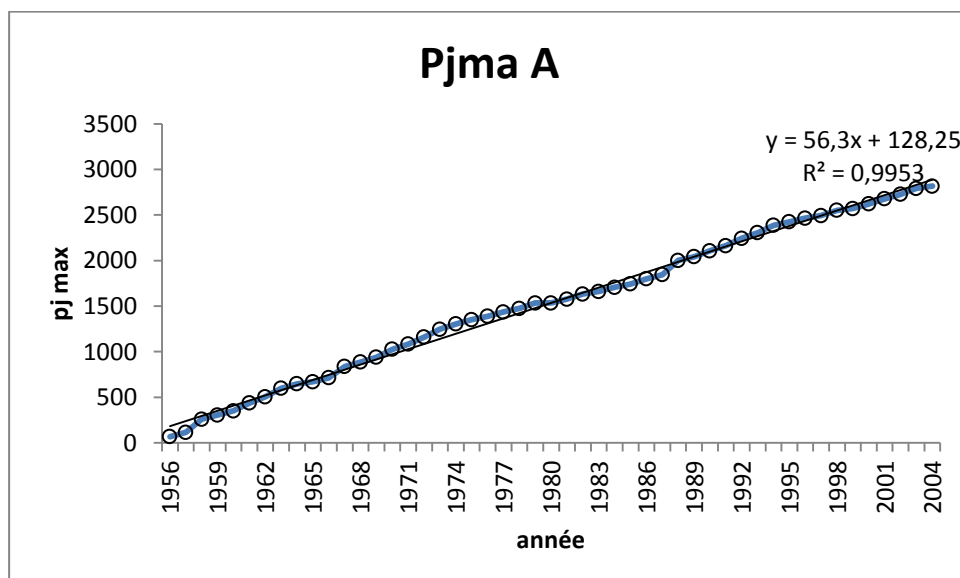


Figure 3.11 : Courbe des simples cumuls appliquée aux précipitations journalières maximales annuelles à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005)



Cependant, l'application de la méthode des doubles cumuls entre les précipitations maximales journalières annuelles en fonction des précipitations annuelles, montrent par contre un accroissement des Pjmax (précipitations maximales journalières annuelles) par rapport aux PA (précipitations annuelles) (Figure 3.12). Le changement de comportement s'est produit la fin des années 1980. L'accroissement est de l'ordre de  $\tau = \frac{0.1076 - 0.0906}{0.0906} = +19\%$

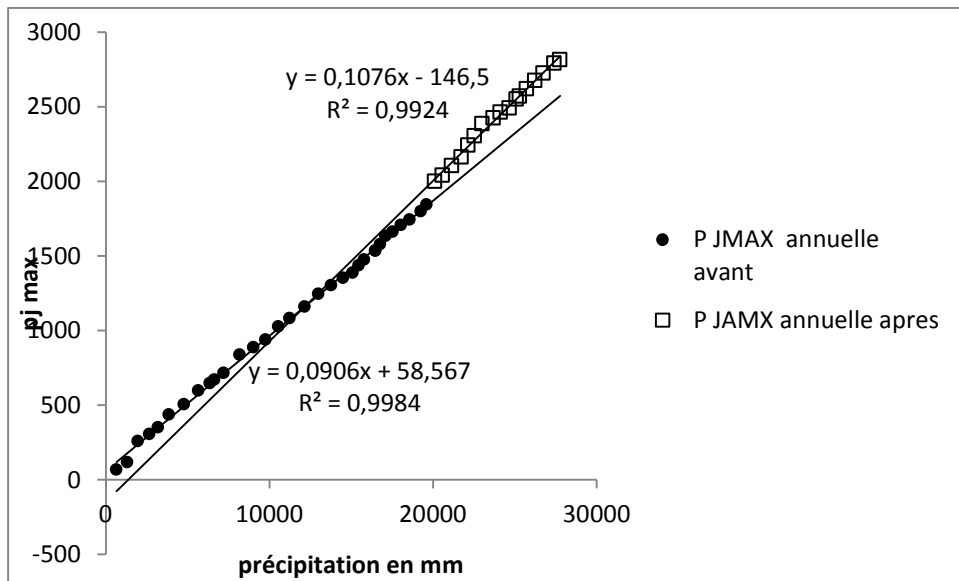


Figure. 3.12 : Courbe de doubles cumuls des Pjamx en fonction des PA à la station Lalla Seti (septembre 1956 à août 2005)

## Chapitre 4: Etude de la relation débit solide – débit liquide

### 4.1. Introduction

Les caractéristiques climatiques et morphologiques diffèrent d'une région à une autre et d'un bassin à un autre. De plus, les fluctuations climatiques sont des phénomènes quasi-cycliques (Kayzer et al. 1990 ; Tardy 1994). En effet, du siècle écoulé, le climat du monde a changé. La pluviosité sur les continents, le débit des cours d'eau, la température ont augmenté dans plusieurs régions du monde et diminué dans d'autres (Tardy, et al 1992 et 1995). Les caractéristiques morpho-métriques des bassins changent aussi au cours des années, on sait par exemple que le couvert végétal se développe et se conserve ou non en fonction de la pluviosité

La quantification des flux des sédiments en suspension est devenue une préoccupation majeure. Pour répondre à ce besoin d'une part et le manque de données continue de la concentration des sédiments en suspension d'autre part, beaucoup d'auteurs ont eu recours à des méthodes alternatives par l'outil de relations empiriques telles que les courbes de transport solide en suspension qui servent à prédire des valeurs de la concentration dans le cas d'absence de mesures. Il existe plusieurs méthodes pour développer ces courbes. La plus connue demeure la fonction en puissance qui relie la concentration en sédiment en suspension au débit liquide (Walling.1977).

La recherche de modèles reliant les paramètres hydrométrique secouements-transport de matériaux solides a fait l'objet de nombreuses études (Walling et al. 1981; Demmak 1982, Terfous et al. 2001; Benkaled et al. 2003 ; Bouanani2004 ; Megnounif et al. 2007 ; Probst et al.1992 ; Ghenim2008). L'objectif des auteurs est d'expliquer les phénomènes de l'écoulement et du transport solide et de mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions ou des bassins versants où les mesures sont rares ou inexistantes.

### 4.2. Courbe estimation : Modèle en puissance

La relation entre la concentration des sédiments en suspension  $C$  et le débit liquide  $Q$  constitue une relation fondamentale en matière de transport solide. La concentration des sédiments en suspension  $C$  et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance du type :  $C = aQ^b$  (Etchanchu et Probst, 1986).

En l'absence d'appareils automatiques pour une prise des échantillons d'eau à des pas de temps courts et fréquents, de nombreux auteurs utilisent la courbe de transport solide afin d'estimer la charge solide transportée en suspension à partir des séries d'écoulement. La courbe de transport solide est sous forme de graphe ou équation reliant le débit solide ( $Q_s$ ) ou la concentration ( $C$ ) et le débit liquide ( $Q$ ). Selon Einstein (1989), ce type de relation a été proposé dès 1895 par Kenedy. Cependant, l'étude menée par Campbell et Bauder (1940) sur la rivière rouge « Red River » du Texas est considérée comme le premier exemple de l'utilisation de la courbe d'estimation de la charge solide aux Etats Unis d'Amérique. Le rapport de Miller (1951) a décrit l'analyse des charges solides de la rivière San Juan et a donné une évaluation plus détaillée de la technique, en introduisant la nécessité d'utiliser les saisons pour élaborer la courbe de relation  $C - Q$ , qui servirait à estimer le débit solide sur une longue période d'écoulement.

Depuis 1970, un grand intérêt est apporté à l'estimation du transport solide en suspension en appliquant la relation de  $C - Q$ . Les raisons sont nombreuses et diverses parmi lesquelles nous citons, le cheminement des contaminants, par les eaux fluviales l'envasement des barrages, l'érosion et les pertes des sols (Walling, 1977 ; Ferguson, 1986 ; khanchoul. 2006).

La recherche de modèles reliant le flux des matières en suspension en transit à l'écoulement dans différents bassins mondiaux a fait l'objet de multiples études qui permettent de déterminer quelques principes de comportement de ces paramètres (Walling et Webb 1981 ; Owens et Walling 2002). Il s'agit des courbes de transport sédimentaire, «rating curves», utilisées pour estimer les concentrations et les flux de matière solide en suspension à partir des seules mesures de débit. Diverses méthodes sont développées pour définir ces courbes, mais les régressions de type puissance restent les plus courantes pour décrire les relations entre le débit liquide et la concentration ou le débit solide  $Q_s$  et le débit liquide  $Q$ , sous la forme :

$$Q_s = aQ^b$$

Où  $Q_s$  est le débit solide en suspension (kg/s);  $Q$  est le débit liquide ( $m^3/s$ ); et  $a$  et  $b$  sont des coefficients empiriques.

Depuis, plusieurs chercheurs ont essayé d'identifier surtout la valeur de l'exposant  $b$ . Leopold et al. (1953) proposent pour les rivières de l'ouest des Etats Unis d'Amérique des valeurs de  $b$  variant entre 2 et 3, d'autres auteurs tels que Parsons et al. ( 1963), Muller et Forstner (1968),

Bruschin et Trau (1977), Wood (1977), Finlatson (1978), Walling et Webb (1981,1982), Meybeck (1984) ainsi que Probst et Bazerabachi (1986) les limitent entre 1 et 2, en fonction des caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques des bassins versants, ou des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau (Bouanani.A 2004).

Les facteurs qui interviennent dans les processus d'érosion et de transport des sédiments sont à la fois nombreux et variables dans le temps et dans l'espace. Les matériaux solides provenant soit des versants soit du réseau de drainage et leur éventuel transport par les cours d'eau, sont difficiles à quantifier (Graf, 2000 ; Asselman, 2000 ; Rovira et Batalla, 2006) (Sidahmed B).

Dans ce contexte, de nombreux auteurs (Wood ,1977 ; Walling.et al. 1981 ; Etchanchu et al.1986) ont montré que les paramètres a et b dépendent des caractéristiques du bassin versant considéré (Parsons et Stone, 1963 ; Bruschin et Trau 1977 ; Terfouset *al.*2001 ; Achite et Ouillon 2007).

Selon Léopold et al. (1953), la valeur de b fluctue entre 1 et 2 et représente la puissance érosive du cours d'eau. Flemming (1969) montre que le paramètre a dépend de la taille des bassins versants et de la couverture végétale. D'après Probst (1986), la valeur de b varie très peu d'un cycle hydrologique à un autre et représente un indice de la sévérité de l'érosion sur les versants. Terfous et al. (2001) montrent que les paramètres a et b varient suivant les saisons. Benkhaled et Remini (2003) justifient les variations saisonnières des coefficients a et b aux changements de l'état hydrique du sol.

Cependant, l'utilisation de ce modèle a fait l'objet d'un certain nombre de critiques. En effet, la relation en puissance souvent utilisée pour caractériser la dynamique érosive des cours d'eau, produit une erreur ou « biais » dû à la transformation de l'échelle logarithmique à l'échelle arithmétique. Ce biais est responsable d'une sur- ou sous-estimation de l'apport solide en suspension et la courbe peut significativement surestimer ou sous-estimer le flux de la charge solide en suspension (Horowitz. 2003).

### **4.3. Données et méthodologie**

#### **4.3.1 Collecte et mise en forme des données**

L'étude est réalisée à partir des données collectées au droit de la station hydrométrique à Ain Yousef (151.70, 201.70, 200m). Les mesures sont effectuées pour déterminer les valeurs instantanées du débit liquides (Q en m<sup>3</sup>/s), concentrations des sédiments en suspension (C en

g/L) et débit solide ( $Q_s$  en kg/s). Les mesurent couvrent une période de 25 années hydrologiques allant de septembre 1972 à août 1999.

Les débits liquides ( $Q$  en  $m^3/s$ ) sont déduis suite à une transformation une lecture de la hauteur d'eau faites sur une échelle limnimétrique au moyen d'une courbes d'étalonnage établies par les services de l'Agence nationale des Ressources Hydrauliques. A chaque lecture de hauteur d'eau, un échantillon d'eau chargée est prélevé sur la rive de l'Oued au moyen d'un conteneur (1 ou  $\frac{1}{2}$  L). La boue recueillie sur un papier-filtre est pesée après séchage à l'étuve durant 24 heures à une température variant entre 105 et 110°C. Ce qui permet de déduire, la concentration de la charge solide en suspension  $C$  (g/L). Le débit solide,  $Q_s$  (kg/s) est estimé par le produit,  $Q_s = C \times Q$ .

La fréquence des prélèvements est adaptée au régime hydrologique du cours d'eau :

- Une mesure 1 jour sur deux est effectuée lorsque l'écoulement est caractérisée par des concentrations relativement faibles ou ne variant que très lentement.
- La prise des échantillons ses intensifiée en fonction de la vitesse de l'augmentation du débit liquide. En période de crues, les prélèvements sont effectués chaque demi-heures.

Remarques : Les transports solides en suspension ne tiennent compte ni du charriage de fond ni du transport en solution. Par ailleurs, il est connu que la teneur en suspension d'un point à un autre dans la section mouillée varie considérablement. Ce pendent, pendant les événements de crues la turbulence est suffisamment forte pour supposer que le flux est homogène sur toute la section mouillé (Alexandrov et al. 2007).

#### **4.3.2. Apport solide et liquide annuelle**

L'apport solide annuel est très irrégulier d'une année à une autre. Les moyennes interannuelles de l'apport solide est de 44.57 millions de tonnes et apport liquide de 31,85  $Hm^3$  (Tableau 4.1 et la Figure 4.1). L'année 1972/73 a été exceptionnelle avec un apport solide estimé à 0,25 millions de tonnes suivi par l'année 1985-1986. L'année 1972/73 est assez remarquable par son apport liquide. Après 1975, on remarque une baisse considérable dans les apports liquides. Toutefois, pour les deux paramètres apport liquide et apport solide, il y a une irrégulière importante et où les valeurs du coefficient de variation sont très proches a l'ordre de 1.4 (Tableau 4.2).

**Tableau 4.1 :** Apports liquides et solides annuelles au niveau d'oued Sikkak.

Année	AL (Hm)	AS ( $10^3$ tons)	c moyen (g/l)	Année	AL (Hm)	AS ( $10^3$ tons)	c moyen (g/l)
1972/73	222,98	254,35	1,14	1985/86	18,24	188,02	10,31
1973/74	106,84	121,66	1,14	1986/87	20,77	55,01	2,65
1974/75	64,72	0,084	0,001	1987/88	10,37	4,96	0,48
1975/76	41,56	11,636	0,28	1989/90	6,12	31,79	5,19
1976/77	18,376	3,947	0,21	1991/92	26,22	24,12	0,92
1977/78	34,59	1,954	0,06	1992/93	9,73	25,52	2,62
1978/79	17,42	8,039	0,46	1993/94	9,46	10,10	1,07
1979/80	20,65	66,918	3,24	1994/95	13,06	94,51	7,24
1980/81	24,44	30,630	1,25	1995/96	14,52	37,63	2,59
1981/82	10,55	2,50	0,24	1997/97	49,75	33,08	0,66
1982/83	7,79	1,89	0,24	1997/98	28,14	13,36	0,47
1983/84	5,05	2,44	0,48	1999/2000	9,30	3,77	0,40
1984/85	5,64	2,67	0,47				

**Tableau 4.2:** paramètre de la dispersion

Année	AL(Hm <sup>3</sup> )	AS ( $10^3$ tons)	C moyen (g/l)
moyen	31,85	44,57	1,81
Ecart type	45,78	62,88	2,46
Cv	1,44	1,41	1,36

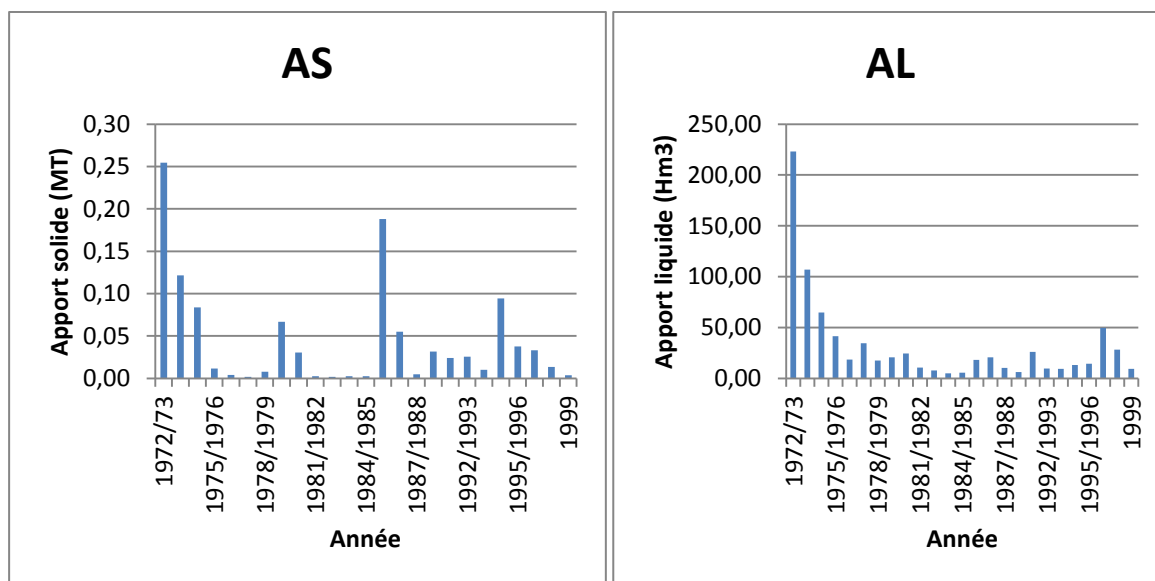


Figure 4.1: Evolution des apports annuels solides et liquides pour oued Sikkak (1972 / 2000)

A travers la Figure 4.2 on remarque une forte variation des concentrations annuelles pour la station Ain Yousef. , a partir de l'année 1972/73-1984/85 la variation de concentrations est très faible est a partir l'année 1985-1986 on a enregistré un pic de 10.31 g/l ce qui est important par rapport aux autre concentrations on a aussi deux concentrations qui sont remarquables, en 1989 on a une concentration de 5.19 g/l avec une augmentation qu'arrive en 7.23 g/l en 1995, à partir de l'année 1997 une chute est bien illustré qui peut atteindre une concentration proche de zéro en 2000, les pics enregistrés de concentrations sont dues aux fortes crues qui sont instantanées elles peuvent durer plusieurs heurs et des fois plusieurs jours.

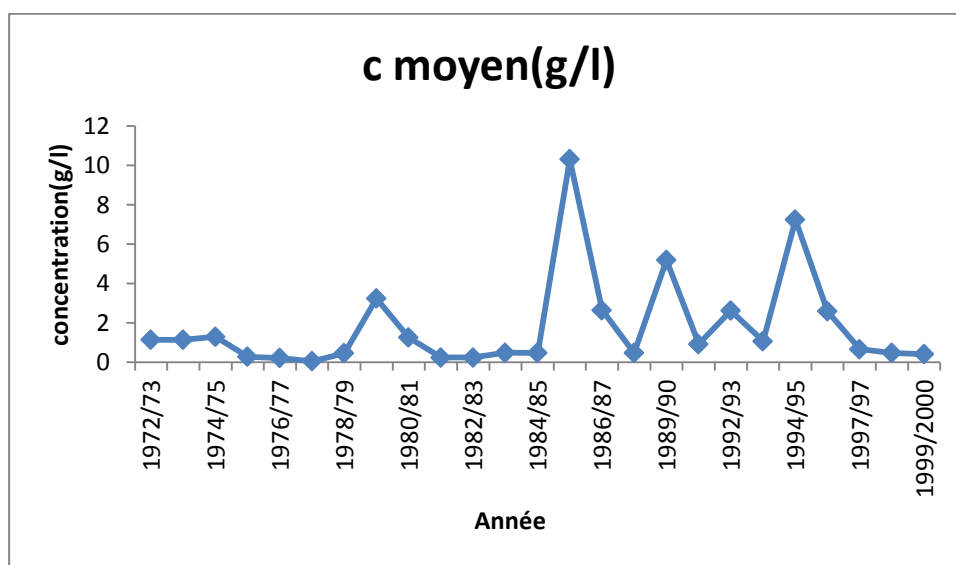


Figure 4.2 : les variations des concentrations annuelles.

**4.3.3. Analyse à l'échelle annuelle**

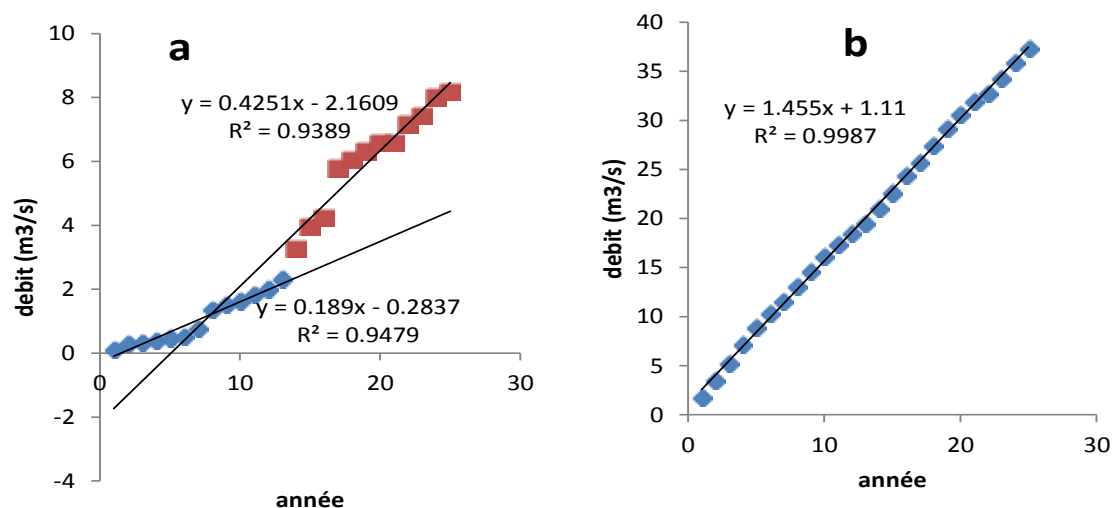
La courbe de transport solide est tracée pour les données débit liquide-débit solide recueillies au bassin d'oued Sikkak relatives à la période (1972-1999). Les données annuelles illustrent bien une relation de type en puissance (Figure 4.3). Les valeurs des paramètres a et b, le coefficient de détermination ( $R^2$ ) sont regroupés dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Paramètres de a, b et coefficient de détermination  $R^2$  par modèle annuelle (1972/1999).

Année	a	b	$R^2$	Année	a	b	$R^2$
1972/1973	0,12	1,733	0,958	1985/1986	0,966	1,63	0,783
1974/1974	0,161	1,715	0,916	1986/1987	0,667	1,795	0,818
1974/1975	0,055	2,022	0,802	1987/1988	0,294	1,354	0,826
1975/1976	0,046	1,685	0,767	1989/1990	1,55	1,695	0,846
1976/1977	0,084	1,436	0,369	1991/1992	0,246	1,746	0,722
1978/1978	0,06	1,202	0,68	1992/1993	0,283	1,41	0,835
1978/1979	0,237	1,505	0,804	1993/1994	0,252	1,307	0,856
1979/1980	0,582	1,614	0,785	1994/1995	0,005	0,824	0,025
1980/1981	0,177	1,518	0,779	1995/1996	0,584	1,533	0,689
1981/1982	0,105	1,158	0,627	1997/1997	0,277	1,661	0,506
1982/1983	0,203	1,101	0,891	1997/1998	0,567	1,392	0,528
1983/1984	0,171	1,126	0,653	1998/1999	0,18	1,475	0,775
1984/1985	0,312	1,428	0,76				

La variabilité des paramètres a et b du modèle en puissance est utilisée pour comprendre la fonction du bassin versant en terme de production de sédiments. La méthode de simples et doubles cumuls est utilisée pour examiner cette variabilité (Figure 4.3)





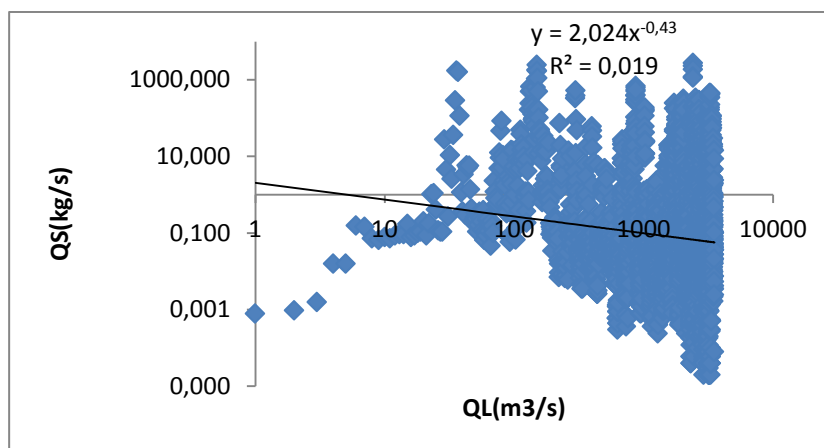
**Figure 4.3 :** Représentation des paramètres a et b du modèle en puissance  $Q_s = aQ^b$  pour la station de Oued Sikkak (1972/2000)

La Figure 4.3 illustre la courbe des simples cumuls appliquée aux paramètres a et b. On remarque que b fluctue peu et évolue suivant une droite linéaire de pente  $b = 1.455$ . On fait remarquer que cette valeur est très proche de la moyenne des paramètres  $b = 1.483$ , calculée à partir du Tableau 4.3. Contrairement à cela, le paramètre a change et de manière significative au milieu des années 1980. Avant 1985-1986, l'accroissement du paramètre a est plus ou moins stable le long d'une droite de pente  $a = 0.189$ . Après cette date, l'accroissement est très important et passe à 0.425, soit une augmentation relative de l'ordre de 125%.

On remarque à partir de Figure 4.3 la production des sédiments est change les bassins versants que la érosion est augment par l'ordre de 125% par conter les érotise les oueds reste constante pour des périodes longue.

Tableau 4.4: Paramètres de la relation débit solide – débit liquide.

Station	Période	A	b	$R^2$	Modèle obtenu
Ain Yousef	72/99	2.024	-0.43	0.019	$Q_s = 2,024Q^{-0,43}$



**Figure 4.4:** Relations débits solides en fonction des débits liquides dans le bassin d'oued Sikkak.

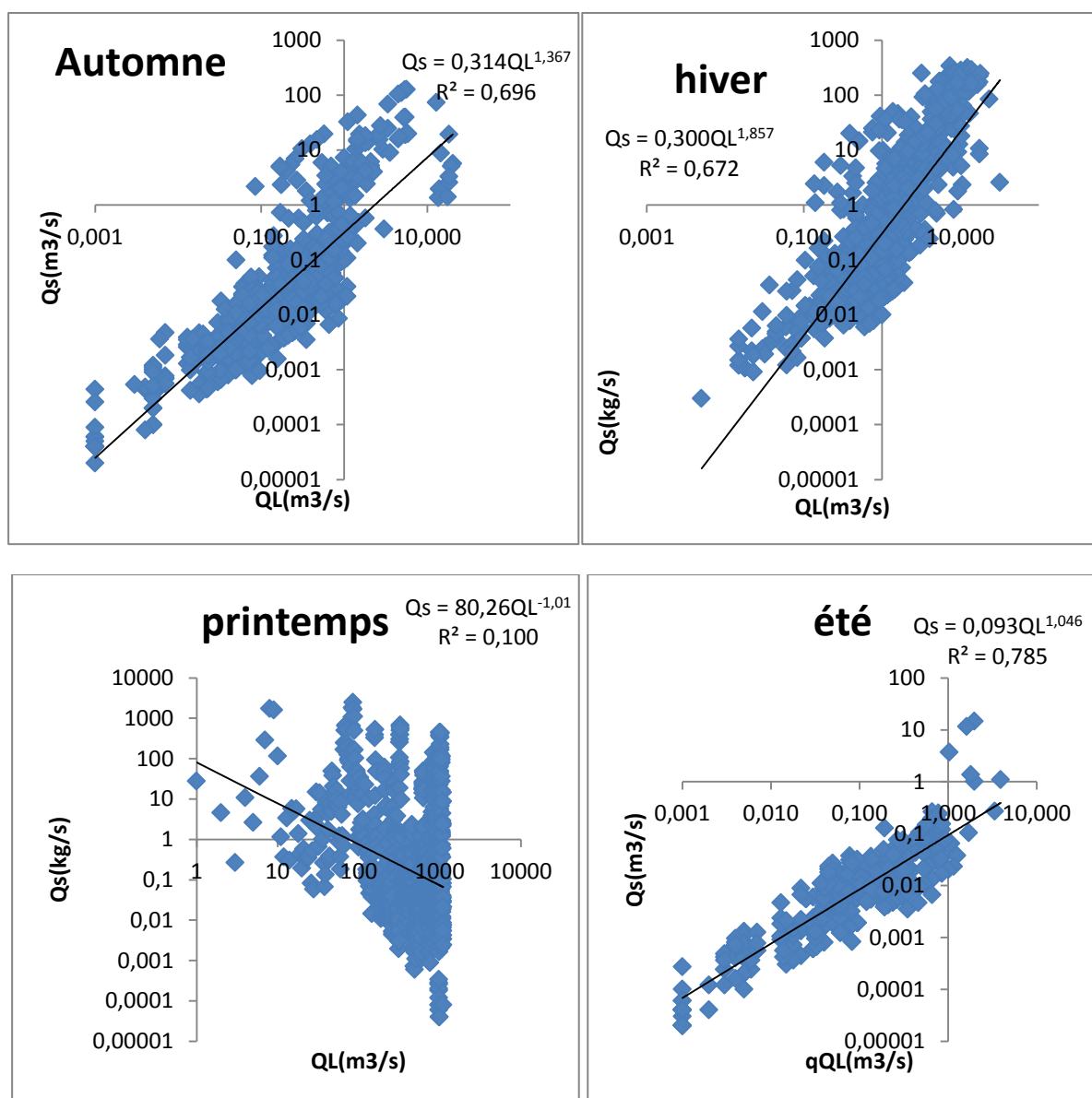
**Remarque :** Sur une longue période 1972 à 1999, la configuration du bassin versant a significativement changée en termes de production des sédiments. De ce fait, le modèle en puissance n'est pas habilité à décrire la relation entre le débit liquide-débit solide sur une longue période (Tableau 4.4 et Figure 4.4). En effet, sur cette période on trouve un paramètre  $b$  inférieur à 1 et donc ce modèle n'est pas représentatif de la relation débit liquide-débit solide avec un coefficient de corrélation très faible  $R < 0.019$ .

### 3.3.4. Analyse saisonnière

Pour examiner la variabilité intra-annuelle, nous avons jugé utile de regrouper suivant différentes saisons les valeurs instantanées des débits liquide et solide et d'analyser les paramètres du modèle en puissance. Le Tableau 4.5, résume les modèles trouvés.

**Tableau 4.5:** Paramètres  $a$ ,  $b$  et coefficient de détermination du modèle saisonnier ( $Q_s$ - $Q$ ) appliqué au bassin Oued Sikkak (72/99).

Saison	$a$	$b$	$R^2$	Modèle
<b>Automne</b>	<b>0.314</b>	<b>1.367</b>	<b>0.696</b>	$Q_s = 0,314Q^{1,367}$
<b>Hiver</b>	<b>0.3</b>	<b>1.857</b>	<b>0,672</b>	$Q_s = 0,300Q^{1,857}$
<b>Printemps</b>	<b>80.26</b>	<b>-1.01</b>	<b>0.1</b>	$Q_s = 80,26 Q^{-1,01}$
<b>Eté</b>	<b>0.093</b>	<b>1.046</b>	<b>0.785</b>	$Q_s = 0,093Q^{1,046}$



**Figure 4.5 :** Modèles saisonniers reliant les débits solides aux débits liquides.

D'après les résultats du tableau ci-dessus, nous constatons que :

- En automne, le bassin du Sikkak ne présente pas une activité érosive importante dans le réseau hydrographique, la valeur de  $b = 1,4$  est relativement faible. De même, la fourniture sédimentaire sur les versants n'est pas considérable puisque le coefficient  $a = 0.3$  est juste moyen.
- En hiver, l'activité érosive dans le réseau hydrographique est assez importante, avec un exposant  $b$  qui augmente pour atteindre 1.8 valeur de proche de 2.
- En été, aussi bien le coefficient  $a$  que l'exposant  $b$  sont faibles, en comparaison avec les autres saisons. Ce qui atteste d'une activité érosive faible sur les versants et dans le réseau hydrographique. Cela s'explique un état de sécheresse, durant cette saison. Le

nuage de points de la Figure 4.5, montre bien que les valeurs aussi bien des débits liquides que celles des débits solides sont majoritairement inférieurs à l'unité avec un coefficient de détermination le plus élevé par rapport aux autres saisons.

On a utilisé la méthode double cumule pour défirer saison

- Au printemps, le modèle en puissance n'est pas représentatif de l'évolution de la charge solide en fonction des débits liquides.

Tableau 4.6 : Evolution des paramètres a et b durant la saison d'automne à la station Ain Yousef (septembre 1956 à août 2005)

<b>Automne</b>						
Année	a	b		Année	a	b
1972-1973	0,142	1,851		1986	1,52	1,829
1974-1975	0,027	1,812		1987	0,466	1,518
1975-1976	0,124	1,705		1989	0,03	0,717
1976-1978	0,071	1,133		1991	0,284	1,631
1978-1979	0,938	1,493		1992	0,053	1,014
1979-1980	0,148	1,199		1993	0,298	1,523
1980-1981	0,038	1,087		1994	1,214	1,739
1982-1983	0,151	1,042		1995	0,228	1,27
1984-1985	2,035	1,572		1997	0,792	1,469

Pour examiner l'homogénéité de la contribution des versants et du réseau hydrographique dans la production des sédiments suivant les saisons on applique la méthode de la courbe des simples cumuls aux paramètres a et b.

On remarque que le paramètre b est stable et évolue suivant un modèle linéaire de pente 1.36 ce qui représente la valeur moyenne du paramètre b. Par contre le paramètre a n'est pas stable est subit des changements considérable avec des sauts parfois très importants qui correspondent à une production importante sur les versant comme pour l'année 1984/85 et l'année 1986/87.

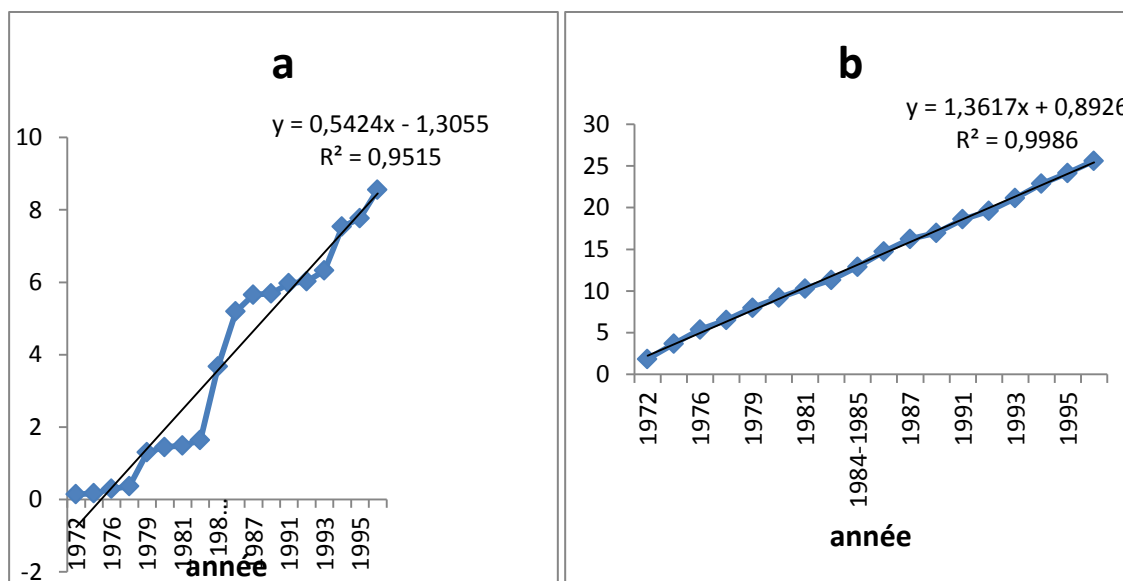


Figure 4.6 : Courbe des simple cumuls des paramètres a et b par la saison d’automne

Tableau 4.7: Paramètres de a et b pour la saison hiver

Hiver						
Année	a	b		Année	a	b
1972-1973	0,099	2,7		1984-1985	0,159	1,116
1974	0,189	1,574		1985-1986	0,613	2,331
1974-1975	0,075	4,537		1986-1987	0,392	2,387
1975-1976	0,048	2,932		1987-1988	0,332	1,788
1976-1977	0,068	1,694		1989-1990	2,216	1,932
1978	0,075	0,853		1991-1992	0,101	1,992
1978-1979	0,18	0,25		1992-1993	0,671	2,305
1979-1980	0,483	1,59		1993-1994	0,3	2,277
1980-1981	0,124	2,325		1994-1995	0,129	1,268
1981-1982	0,052	1,1		1996-1997	0,776	1,493
1982-1983	0,282	1,539		1997-1998	0,474	1,504
1983-1984	0,352	1,65		1999	0,218	1,472

En hiver, on remarque que b est fluctue peu et évolue suivant un modèle linéaire de pente  $b=1.76$  (Figure 4.7). Par contre le paramètre a change et de manières significatives au milieu des années 1980. Avant 1987-1988, l'accroissement du paramètre a est plus ou moins stable

le long d'une droite de pente  $a=0.221$ . Après cette date, l'accroissement est très important et passe à 0.406, soit une augmentation relative de l'ordre de 83.71%.

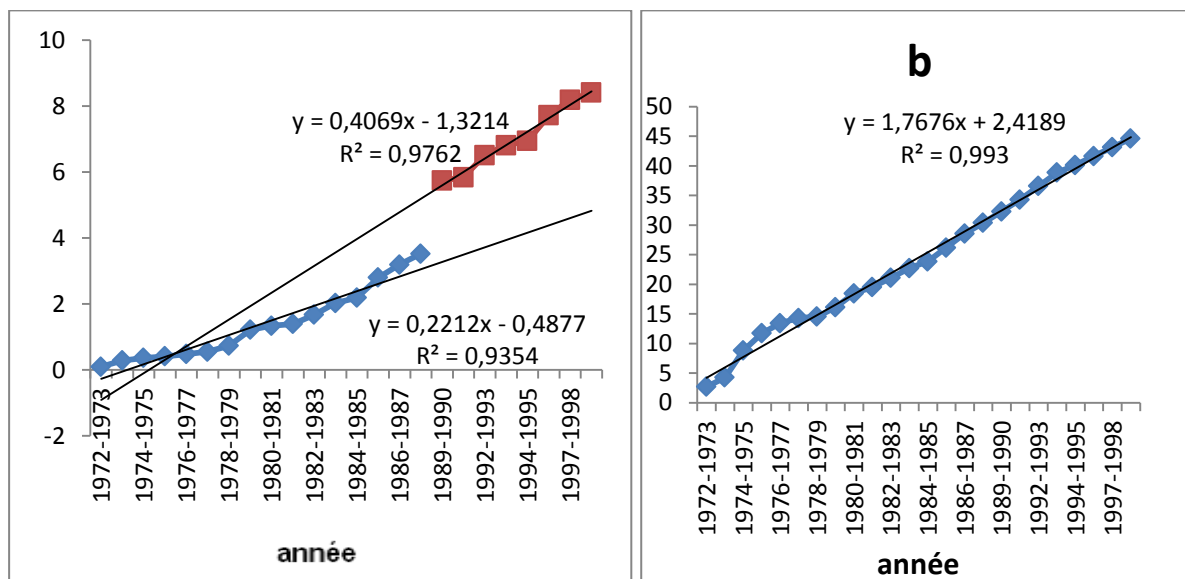


Figure 4.7: Courbe des simple cumuls des paramètres a et b pour la saison d'hiver.

Tableau 4.8: Paramètres de a et b pour la saison du printemps

Printemps						
Année	a	b		Année	a	b
1973-1974	0,105	1,85		1985	0,162	1,334
1975	0,072	2,339		1986	0,7	1,848
1976	0,021	2,048		1987	0,162	1,763
1978	0,054	1,561		1988	0,061	0,804
1979	0,348	1,904		1990	0,773	1,777
1980	0,273	2,27		1992	0,328	2,58
1981	0,083	0,534		1993	0,499	1,727
1982	0,285	1,219		1994	0,16	1,064
1983	0,138	1,033		1996-1997	0,511	1,73
1984	0,09	0,652		1999	0,118	1,452

Au printemps et comme pour l'automne et l'hiver, le paramètre b varie très peu et évolue suivant une droite linéaire de pente  $b=1.42$ . On fait remarquer que cette valeur est très proche de la moyenne des paramètres b, 1.57, issus du Tableau 4.8. Contrairement à cela, le paramètre a change et de manières significatives et laisse apparaître plusieurs phases. Néanmoins, on peut distinguer deux grandes phases avec un accroissement considérable du paramètre a à partir des années 1974-1985, 1986-1999.

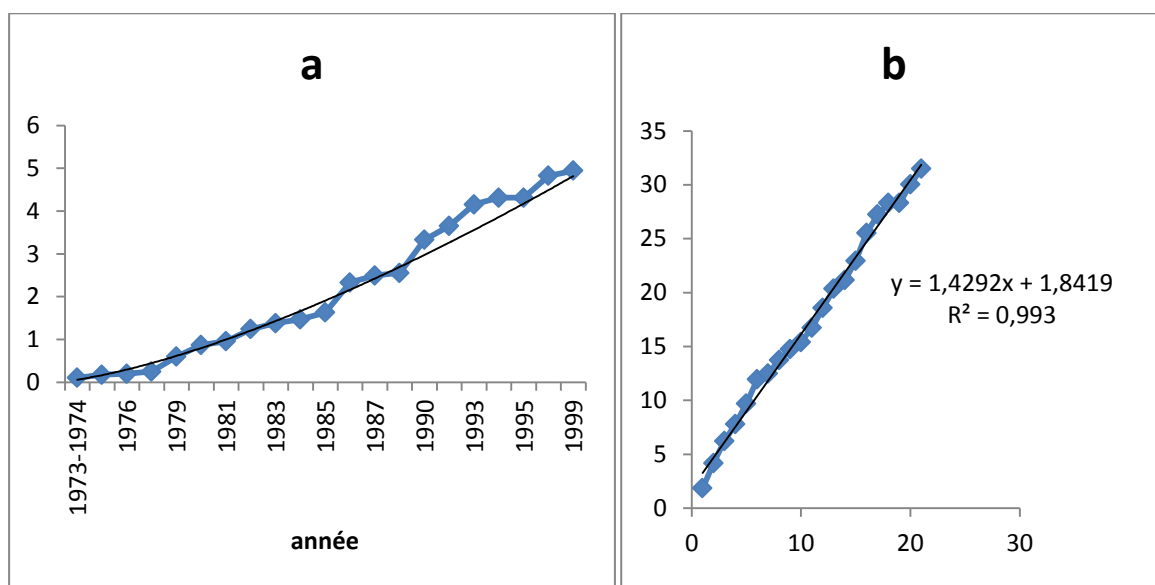


Figure 4.8 : Courbe des simple cumuls des paramètres a et b par la saison de printemps.

Tableau 4.9 : Paramètres de a et b par la saison été

été						
Année	a	b		Année	a	b
1974/1975	0,08	1,41		1985-1986	0,15	0,97
1975	0,02	0,54		1987	0,16	1,03
1978	0,03	1,01		1988	0,05	0,93
1979	0,09	1,01		1990	0,03	0,84
1980	0,578	1,55		1992	0,15	1,32
1981	0,091	1,23		1993-1994	0,09	1,17
1982	0,159	1,09		1995	0,133	1,14

En été, la Figure 4.9 on remarque que le paramètre de b est une droit linéaire de pente 1.07 est le coefficient de corrélation sont très élevée de 0.98 ce qui atteste d'une activité érosive linéaire dans le réseau hydrographique. Contrairement au paramètre b, le paramètre de a est irrégulier et montre un saut important durant l'année 1980, dû à une crue exceptionnelle avec une très forte production à partir des versants. Là aussi tu peux montrer deux modèle avant et après 1980 comme indiqué dans la figure.

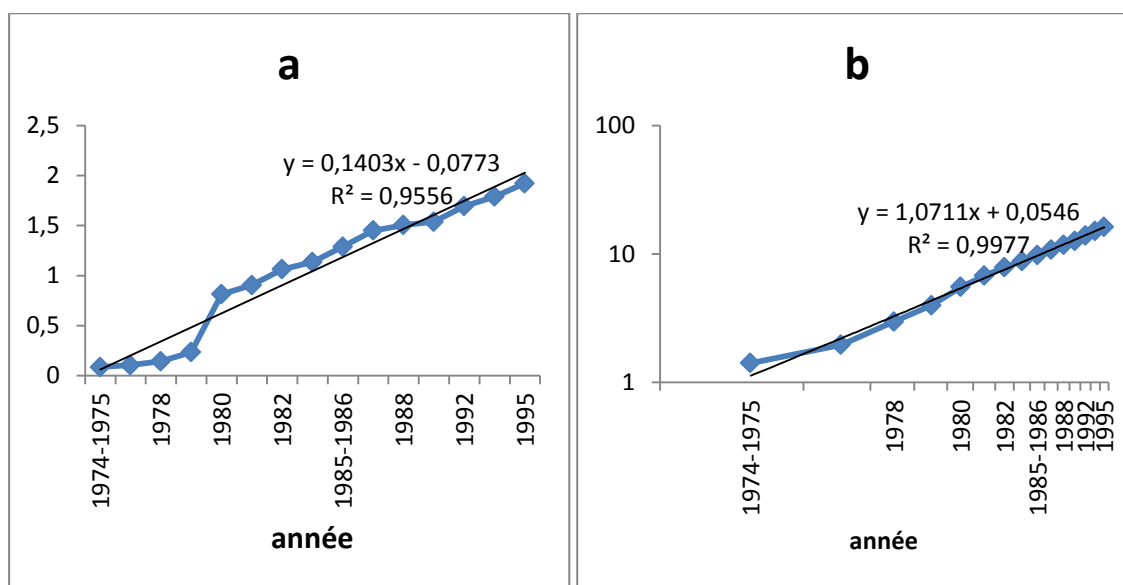


Figure 4.9: Courbe des simple cumuls des paramètres a et b par la saison d'été.

#### 4.4. Conclusion

L'aptitude du bassin versant de Oued Sikkak en termes de production des sédiments est examinée à travers les paramètres a et b du modèle en puissance,  $Q_s = aQ^b$ , généralement, utilisé pour estimer la charge solide transportée par les cours d'eau. On retient alors que les paramètres a et b changent en fonction des caractéristiques physique et dynamique d'érosion dans le cours d'eau et le bassin versant. De plus, on remarque que le paramètre b change peu d'une année à une autre est reste stable aussi bien pour les modèles annuels que saisonniers. E qui atteste d'une érosion linéaire stable mais variable d'une saison à une autre. Contrairement à cela, le paramètre 'a' n'est pas stationnaire et change aussi bien pour les modèles annuels que saisonniers. Ce qui montre que la configuration du bassin a changé durant les années 1980.



## Conclusion générale

Dans , ce travail nous a permis de mieux comprendre les phénomènes et les mécanismes entrants dans l'érosion et on a vu aussi quelques méthodes d'évaluation de l'érosion hydrique et ce qui nous a conduits à introduire le phénomène du transport solide où on a présenté quelques types (charriage, saltation, suspension) et quelques formules de calcul, et les processus mis en jeu dans le transport sédimentaire ainsi que des méthodes de défenses contre l'érosion et le transport solide, suite à cela, on a présenté le bassin de l'oued Sakkak, on a trouvé que ce dernier porte un indice de compacité 1.5 qui montre que notre bassin est moyennement allongé avec une superficie de 463 et un périmètre de 116, l'altitude la plus fréquente est de 400-300 m, on a aussi trouvé que ce bassin tends vers une vieillesse.

Les valeurs de  $I_g$  de l'oued sikkak est égale à 0.021 ce qui permet de le ranger dans la classe de relief assez fort et de même pour les valeurs du  $D_s$ .

La végétation qui a une influence certaine sur l'écoulement fluvial est de faible à très faible dans le bassin de Sikkak. Les cultures extensive occupent plus de la moitié de l'espace du bassin versant.

Le bassin d'oued Sakkak a un coefficient de torrencialité de 1.9 et un temps de concentration de 9h30 mn, il est dominée essentiellement par les alluvions, les calcaires, grés et les dolomies comme formation géologique.

La variation des moyennes mensuelles sur une période de 48 ans pour la station de Lalla Setti montre que le mois de mars est le plus pluvieux avec une hauteur moyenne de 88 mm et concernant la variation des précipitations annuelles, on a remarqué que pour l'année 1999-2000 se distingue par la plus faible hauteur pluviométrique 212 mm et l'année de 1967-1968 par la plus forte pluviométrie annuelle qui atteint 973 mm, on enregistre une baisse moyenne annuelle de 6.83 mm par an.

L'apport solide annuel est très irrégulier d'une année à une autre et les moyennes interannuelles de l'apport solide est de 44.57 millions de tonnes et l'apport liquide de 31,85  $Hm^3$ . Les données annuelles illustrent bien une relation de type en puissance.

La courbe des simples cumuls appliquée aux paramètres a et b on montré que b fluctue peu et évolue suivant une droite linéaire de pente  $b = 1.455$  et le paramètre a change et de manière significative au milieu des années 1980. On a remarqué aussi que la production des sédiments change et l'érosion augmente par l'ordre de 125%

On a trouvé que le modèle en puissance n'est pas habilité à décrire la relation entre le débit liquide-débit solide sur une longue période car la configuration du bassin versant a significativement changée en termes de production des sédiments.

Après une analyse saisonnière on a trouvé que le bassin du Sikkak ne présente pas une activité érosive importante dans le réseau hydrographique en été et automne par contre en hiver, l'activité érosive dans le réseau hydrographique est assez importante, concernant le printemps les paramètres de a et b ne sont pas représentatifs.

Pour examiner l'homogénéité de la contribution des versants et du réseau hydrographique dans la production des sédiments suivant les saisons on a appliqué la méthode de la courbe des simples cumuls aux paramètres a et b, les résultats on montrés que en hiver, au printemps et en été le paramètre b fluctue peu et évolue suivant un modèle linéaire par contre le paramètre a change et de manière significative.

Ce qu'on peut conclure de ce travail est que les transports solides en suspension dans le bassin versant de l'Oued Sikkak suivent un modèle de puissance  $Q_s = aQ^b$ . Pour le printemps le modèle ne sont pas représentatif, par contre lorsque on a utilisé la méthode des doubles cumuls pour la saison printemps on a remarqué que les paramètres a et b changent et que ce modèle représente bien le bassin ainsi que l'érosion des oueds et pour les autres saisons on a trouvé que l'hiver est une période humide et que l'été est une période sèche et ne présente pas une activité d'érosion.

## Référence bibliographique

**Achite, M. Meddi, 2005**, Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'oued Mina (Nord- Ouest Algérien), Revue des science de l'eau, Rev. Sci. Eau 18/spécial 37-56.

**Achite. M et Meddi. M , 2004**, Estimation Du Transport Solide Dans Le Bassin-Versant De L'oued Haddad (Nord-Ouest Algerien).

**Alexandrov et al. 2003**, Suspended sediment transport in flash floods of the semi-aride northern Negev, Israel. IAHS Publ., no 278,346-352.

**Ammari A. (2012)**, Vulnérabilité à l'Envasement des Barrages (cas du bassin Hydrographique des Côtiers Algérois) Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra

**Baloul D. (2012)**, Développement, 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, Mémoire de Magister, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen.

**Bates BC, Kundzewicz ZW, Wu S, Palutikof JP (2008)** Climate change and water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 p

**Bemoussat A. (2012)**, impacte de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines à travers le bassin de la Tafna, thèse de magister.

**Ben slimane A. (2013)**, Rôle de l'érosion ravinaire dans l'envasement des retenues collinaires dans la Dorsale tunisienne et le Cap Bon, Thèse de doctorat.

**Boualem A. (2012)**, Etude et Compréhension du mécanisme de l'érosion hydrique et leur impact au niveau des barrages de la wilaya de Mascara: Propositions de modèles d'aménagement Thèse de Doctorat, Université de Mascara Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

**Bouanani.A. (2004)**, Hydrologie, transport solide et modélisation Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie), thèse de doctorat, Univ de Tlemcen, Algérie.

**Bouchelkia H, Belarbi F et Remini B Décembre 2011**, Quantification du transport solide en suspension par Analyse statistique : cas du bassin versant de Muillah, Revue Scientifique et Technique, LJEE N 19.

**ChauchatJ. (2007)**. Contribution à la modélisation diphasique du transport sédimentaire en milieux côtiers et estuariens, thèse de doctorat.

**DEMMAK, 1982 A.**, Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse, Docteur-Ingénieur, Uni. Paris, France.

**Douffissa Z. 2011**, Estimation des taux d'érosion et de sédimentation à l'aide des techniques isotopiques (<sup>137</sup>CS): cas du bassin versant de Moulay Bouchta, rif occidental RIF, Université Cadi Ayad Faculté des Sciences et Techniques Marrakech

**Etchanchu et Probst, 1986**. Erosion et transport de matières en suspension dans un bassin versant en région agricole. Méthode de mesure du ruissellement superficiel, de sa charge et des deux composantes du transport solide dans un cours d'eau. C.R .A cad. Sci. Paris, 302, série II, n°17,1063-1067.

**Fandi. O, Bouanani.A, Baba-Hamed.K et Bekkouche.A.2009**, Modélisation du Transport des Particules du Sol en suspension dans L'oued Sikkak (Nord -Ouest Algérien).

**FAO, 1986**. Brise-vent et rideaux abris avec référence particulière aux zones sèches. Cahier conservation 15, Département des forêts, Rome, 32p

**FAO, 1990**. Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides. Bulletin pédologique, 57, 182p

**FAO, 1994**, Introduction à la gestion conservation de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), Bulletin pédologique de la FAO, n°70.

**Ferguson R.I., 1986**. River loads underestimated by rating curves, Water Resources Research, Vol. 22, no. 1,74-76.

**Ghenim. A, Seddini. A, Terfous. A, 2007**, Production et exportation des sédiments en suspension lors des événements de crue, cas du bassin versant de l'oued mouillah, Larhyss Journal, ISSN 1112- 3680, n° 06, Décembre 2007.

**Graf H., Altinakar M. S., 2000.** Hydraulique fluviale, Ecoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple, Presses polytechniques et universitaires Romandes, Vol 16, 628p

**Hallouz.F, Meddi. M, Mahé. G(2012),** Relation débit liquide-transport de matières en suspension dans le bassin de l'Oued Mina, en amont du barrage Sidi M'hamed Ben Aouda (Oued Cheliff),Nord-Ouest d'Algérie.

**Horowitz. 2003,** An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations, Hydrol.Process., no.17,3387-3409.

**Iratni N.2014,** Modélisation hydrologie de quelques sous bassins versant de la Tafna.Thèse de magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran

**J. Chauchat .2007,** Contribution à la modélisation diphasique du transport sédimentaire en milieux côtiers et estuariens, thèse de doctorat

**khanchoul K. 2006,** quantification de l'érosion et de transport solides dans certains bassins versant de l'extrême Nord-Est algérien, thèse doctorat, université Badji Mokhtari Annaba.

**Maghnonif A. (2007),** étude du transport du sédiment en suspension dans les écoulements de surface, la thèse de doctorat université Aboubekr Belkaid, Tlemcen.

**Megnounif A, Terfous A, Ouillon S (2013)** A graphical method to study suspended sediment dynamics during flood events in the WadiSebdou, NW Algeria (1973-2004).J Hydrol 497:24-36.

**Megnounif, A. Terfous, A.,J.B. Poulet, 7-9 septembre 2004,** Rôle des crues dans la production de sédiments transportés en suspension dans un cours d'eau des bassins versants méditerranéens, VIIIèmes Journées Nationales Génie Civil— Génie Côtier, Compiègne.

**Probst J.L., Amiotte Suchet P., 1992.** Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). Hydrol.Sci. J., 37, 621—637

**Roose E., Chibbani R., Bourrougaa L., 1999.** Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. Bull. ORSTOM, Rés. Eros., 19, 85—95.

**Rosse ,1994.** Introduction à la gestion conservation de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) Ed. ORSTOM-FAO,331p.

**Sidahmed B,** quantification et modélisation du transport solide dans un cours d'eau de l'Algérie septentrionale : cas du bassin versant de l'oued boumessaoud(Tlemcen), Magister en Hydraulique.

**Sirabahenda Z.2012,** modélisation numérique du transport des sédiments en suspension dans une rivière en aménagement : cas de la rivière-aux - sables au québec, université de Montréal.

**SOGREAH, 1983.** Erosion et transport solide au Maghreb. Analyse bibliographique. Rapport du projet RAB/80/011/PNUD

**Walling D E. 1977.** Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small bassin. Water resources research, 13, 3: 531-538.

**Zainvé na Douffissa.2011,** Estimation des taux d'érosion et de sédimentation al 'aide des techniques isotopiques (137CS) :cas du bassin versant de moulay bouchta, rif occidentalRIF, Université Cadi Ayad Faculté des Sciences et Techniques Marrakech.

## Webgraphie

[1] <http://www.bf.refer.org/toure/pageweb/erohydry.htm> (Consulté le 01/02/2017)

[2]. <http://www.alismiri.com/uploads/CoursCES1.pdf> (Consulté le 15/02/2017)

[3] [http://www.grr.ulaval.ca/gae\\_3005/Documents/Notes\\_A2011/CH\\_10\\_Erosion.pdf](http://www.grr.ulaval.ca/gae_3005/Documents/Notes_A2011/CH_10_Erosion.pdf)  
(Consulté le 20/02/2017)

[4] <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/littoral/GRENOBLE-3.html>

(Consulté le 29/02/2017)

[5] [http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers11-06/16855.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-06/16855.pdf)

(Consulté le 09/03/2017)

[6] [http://www.observatoire-eau-martinique.fr/les-outils/base-documentaire/caracterisation-du-transport-solide-en-ravine-et-cours-deau-permanent/at\\_download/file](http://www.observatoire-eau-martinique.fr/les-outils/base-documentaire/caracterisation-du-transport-solide-en-ravine-et-cours-deau-permanent/at_download/file)

(Consulté le 20/03/2017)