

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département d'hydraulique

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

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme

D'ingénieur d'Etat en Hydraulique

**Modélisation et quantification du transport solide dans le bassin  
versant de l'Oued Sebdou, (N-W Algérien)**

**Présenter par** : M.Ribouh Abdenour

**Présenté et soutenu publiquement le 15/10/2018 devant le jury composé de :**

Président **Mme. BENMAMAR Saâdia**, Prof                      Ecole Nationale Polytechnique, Alger

Promoteur **Mr. TACHI Salah Eddine**,      MCB                      Ecole Nationale Polytechnique, Alger

Co-Promoteur **Mr. BOUGUERRA Hamza**,      Doctorant                      Univ AbuBaker Belkaid, Tlemcen

Examineur **Mr. NAKIB Maamar**,                      MCB                      Ecole Nationale Polytechnique, Alger

**ENP 2018**



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département d'hydraulique

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

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme

D'ingénieur d'Etat en Hydraulique

**Modélisation et quantification du transport solide dans le bassin  
versant de l'Oued Sebdou, (N-W Algérien)**

**Présenter par** : M.Ribouh Abdenour

**Présenté et soutenu publiquement le 15/10/2018 devant le jury composé de :**

Président **Mme. BENMAMAR Saâdia**, Prof                      Ecole Nationale Polytechnique, Alger

Promoteur **Mr. TACHI Salah Eddine**,            MCB                      Ecole Nationale Polytechnique, Alger

Co-Promoteur **Mr. BOUGUERRA Hamza**,    Doctorant            Univ AbuBaker Belkaid, Tlemcen

Examineur **Mr. NAKIB Maamar**,                      MCB                      Ecole Nationale Polytechnique, Alger

**ENP 2018**

# Dédicace

**Je dédie ce modeste travail à**

**Mon très cher père "  " « Abdelkader »**

**Ma très chère mère « Aicha »**

**A mes frères « Mohammed, Abdelhamid »**

**A mes sœurs « Fatima Zahra, Naima, Khadîdja »**

**A tous mes amis chacun de son nom**

**A tous mes collègues de promotion 2017/2018**

**A tous les enseignants de ma période d'études**

**A tous ceux que j'aime et m'aiment**

# **Remerciements**

**Ce travail est le fruit de la collaboration de plusieurs personnes que je tiens à remercier:**

**Mes vifs remerciements s'adressent à mon encadreur Mr Tachi. Je le remercie pour sa disponibilité, sa rigueur, ses encouragements et ses critiques ainsi que pour ses conseils constructifs afin d'arriver à terme de ce travail.**

**Mes vifs remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation par ailleurs, je remercie les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail.**

**Je tiens également à remercier tous mes amis et collègues pour le soutien moral et matériel**

**Je leur dois un grand respect.**

## ملخص:

إن الانجراف المائي والرسوبيات المنقولة يسجلان أعلى القيم في البلدان المغاربية بشكل عام وفي الجزائر بشكل خاص، وتعتبر معرفة معدلاتهما خطوة مهمة في دراسات صيانة التربة وحفظ المياه. في هذه الدراسة، قمنا بنمذجة وتحديد معدل الرسوبيات المنقولة في حوض واد سبدو، وهو أحد الأحواض الرئيسية في حوض التافنة، خلال مدة الدراسة الممتدة بين 1972 إلى 2004، من خلال إنشاء نموذج رياضي بين تركيز الرسوبيات المنقولة ومعدل الجريان السطحي المسجلة عند مخرج الحوض. تشير نتائج التغير الموسمي للرسوبيات المنقولة أن فصلي الربيع والشتاء هما المصدران الرئيسيان للرسوبيات المنقولة، وقدّر معدل الرسوبيات المنقولة في حوض واد سبدو لمدة 32 سنة بـ 257 طن / كم<sup>2</sup> / سنة.

**الكلمات المفتاحية:** الانجراف المائي، الرسوبيات المنقولة، القياس الكمي، الجريان السطحي، تركيز الرسوبيات المنقولة، واد سبدو، حوض التافنة، الجزائر

## Abstract

It is known that water erosion and their suspended sediments transport generally in the Maghreb countries and particularly in Algeria record very high values; knowledge of these sediments is a very important step in erosion control studies. In this study, we modeled and quantified suspended sediment in the Sebdoou watershed that is one of the main sub-watershed in the Tafna basin. The study was carried out at different time scales, during a period of 30 years from 1972/73 to 2003/2004; by establishing regressions between the measured sediment concentration and the water discharge at the watershed outlet. The results obtained by the proposed method indicate that the seasonal variation of suspended sediments reveals that the values of autumn and winter are the main sources of sediment discharge in the Sebdoou watershed, with a specific average degradation transported to the downstream of the watershed of 257 t / km<sup>2</sup> / year in the period of 30 years.

**Key words:** water erosion, solid transport, quantification, liquid flow, suspended sediment concentration, wadi, Algeria.

## Résumé

Vu que l'érosion hydrique et ces transports solides enregistrent les valeurs les plus élevées dans les pays du Maghreb en général et dans l'Algérie en particulier ; la connaissance de ces sédiments constitue une étape très importante dans les études d'aménagement antiérosif. Dans cette étude, nous avons modélisé et quantifié le transport solide en suspension dans le bassin versant de l'oued Sebdoou, l'un des principaux bassins de la Tafna à différente échelle temporelle, durant la période d'observation allant de 1972/73 jusqu'à 2003/04 ; et ce par l'établissement des régressions entre les couples concentrations des sédiments et débits liquides enregistrés à l'exutoire du bassin versant. Les résultats obtenus par l'application de cette méthode indiquent que la variation saisonnière des transports solides en suspension révèle entre autres que les valeurs de l'automne et de l'hiver sont les principales sources des flux sédimentaires, avec une dégradation spécifique moyenne entraîne dans l'aval du bassin de l'oued Sebdoou pendant 32 ans de l'ordre de 257 t/km<sup>2</sup>/an.

**Mots clés :** érosion hydrique, transport solide, quantification, débit liquide, concentration des matières en suspensions, Oued Sebdoou, tafna, Algérie.

# Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

INTRODUCTION GENERALE.....	10
1. Erosion et transport solide.....	12
1.1 Erosion.....	12
1.1.1 Introduction.....	12
1.1.2 Type d'érosion.....	12
1.1.3 Facteurs de l'érosion hydrique.....	14
1.2 Transport solide.....	17
1.2.1 Introduction.....	17
1.2.2 Les méthodes de mesures in situ.....	18
2. Présentation de la zone d'étude.....	23
2.1 Introduction.....	23
2.2 Bassin versant de la Tafna.....	23
2.2.1 Présentation du bassin versant de la Tafna :.....	23
2.3 Sous bassin versant de l'Oued Sebdou.....	26
2.4 Caractéristiques physiques.....	26
2.4.1 Surface, périmètre et longueur du thalweg.....	27
2.4.2 Forme du bassin.....	27
2.4.3 Etude du relief.....	28
2.4.4 Etude du réseau hydrographique.....	33
2.4.5 Sols et végétation.....	35
2.4.6 La géologie du bassin versant.....	37
2.5 Caractéristique hydrologique.....	38
2.5.1 Débits moyens annuels.....	38
2.5.2 Débits moyens mensuels.....	45
2.6 Conclusion.....	46
3. Modélisation de transport solide dans le bassin versant SEBDOU.....	49
3.1 Introduction.....	49
3.2 Source des données.....	49
3.3 Les courbes d'étalonnage "concentration – débit".....	49
3.4 Analyse des résultats et discussion.....	53
3.4.1 Échelle annuelle.....	53
3.4.2 Échelle saisonnière.....	53
3.5 Conclusion.....	54
4. Quantification du transport solide.....	56

<b>4.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>56</b>
<b>4.2</b>	<b>Quantification par des méthodes empiriques .....</b>	<b>56</b>
	<b>Formule de la Sogréah .....</b>	<b>56</b>
	<b>Formule de Fournier .....</b>	<b>56</b>
<b>4.3</b>	<b>Quantification par la modélisation.....</b>	<b>57</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Variabilité interannuelle des apports solides .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Variabilité mensuelle des apports solides .....</b>	<b>63</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Variabilité saisonnière des apports solides.....</b>	<b>65</b>
<b>4.4</b>	<b>Corrélation entre l'érosion spécifique et l'apport liquide annuel .....</b>	<b>66</b>
<b>4.5</b>	<b>Estimation des apports solide probables.....</b>	<b>66</b>
<b>4.6</b>	<b>Estimation d'érosion spécifique probable.....</b>	<b>69</b>
<b>4.7</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>72</b>
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>73</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>74</b>

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 1:Facteurs affectant l'érosion hydrique (Blanco, 2008).....</b>	<b>15</b>
<b>Tableau 2: Caractéristiques de forme pour le bassin versant d'oued Sebdou .....</b>	<b>27</b>
<b>Tableau 3: Répartition hypsométrique du bassin versant d'oued Sebdou.....</b>	<b>28</b>
<b>Tableau 4: Les altitudes caractéristiques du bassin étudié.....</b>	<b>30</b>
<b>Tableau 5: Classification du relief selon Ds .....</b>	<b>32</b>
<b>Tableau 6: Indices de pentes et reliefs de bassin versant d'oued sebdou .....</b>	<b>32</b>
<b>Tableau 7: Distribution du couvert végétal dansle bassin d'oued Sebdou (BNEDER, 1993) .....</b>	<b>36</b>
<b>Tableau 8: Caractéristiques de station hydrométrique et période de séries de mesure.....</b>	<b>38</b>
<b>Tableau 9:Le Bilan annuel du débit, et le débit spécifique dans le bassin versant d'Oued Sebdou durant la période 1972/73 à 2003/04.....</b>	<b>38</b>
<b>Tableau 10: Hydraulicité d'oued Sebdou.....</b>	<b>40</b>
<b>Tableau 11: Coefficients de variation des débits moyens annuels de l'oued Sebdou. ....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau 12: Valeurs caractéristiques Débits moyens annuels de l'oued Sebdou. ....</b>	<b>42</b>
<b>Tableau 13: Le test de Kolmogorov-Smirnov .....</b>	<b>43</b>
<b>Tableau 14 : Ajustements des débits moyens annuels à une loi log-normale. ....</b>	<b>44</b>
<b>Tableau 15 : Valeurs des débits estimés pour des périodes de récurrences données. ....</b>	<b>45</b>
<b>Tableau 16: Répartition des débits mensuels de l'oued Sebdou. ....</b>	<b>45</b>
<b>Tableau 17: Récapitulatif des caractéristiques du sous bassin Sebdou .....</b>	<b>47</b>
<b>Tableau 18 : Valeurs de a et b des équations utilisées, et coefficient de corrélation <math>R^2</math> des différentes modèles de <math>C=f(Q)</math> par la méthode des classes des débits.....</b>	<b>51</b>
<b>Tableau 19 : Les erreurs d'estimation les apports solides au niveau de la station de Béni Bahdel .....</b>	<b>53</b>
<b>Tableau 20 : Valeurs de la dégradation spécifique .....</b>	<b>57</b>
<b>Tableau 21 : Le Bilan annuel de l'apport solide (As) dans le bassin versant de l'oued Sebdou durant la période 1972/73 à 2003/04.....</b>	<b>59</b>
<b>Tableau 22: Le Bilan annuel de la dégradation spécifique (Es) dans le bassin versant de l'oued Sebdou durant la période 1972/73 à 2003/04.....</b>	<b>60</b>
<b>Tableau 23 : Présente le Bilan annuel de la dégradation spécifique (Es), l'apport solide (As), la concentration de sédiment en suspension (C) et l'apport liquide (Al) dans le bassin versant de l'oued Sebdou durant la période 1972/73 à 2003/04.....</b>	<b>61</b>
<b>Tableau 24: Bilan mensuel des dégradations spécifiques (Es), les apports solides (As), les concentrations de sédiments en suspension (C) et les apports liquides (Al) dans le bassin versant d'Oued Sebdou durant la période 1972/73 a 2003/04 .....</b>	<b>63</b>
<b>Tableau 25 : Valeurs de a et b des équations utilisées, et coefficient de corrélation <math>R2</math> des différentes modèle de <math>Es=f(Al)</math>.....</b>	<b>66</b>
<b>Tableau 26 : Le test de Kolmogorov-Smirnov .....</b>	<b>67</b>
<b>Tableau 27: Ajustements des apports solide annuel à une loi normale .....</b>	<b>68</b>

<b>Tableau 28 : Valeurs des apports solides pour des périodes de récurrences données .....</b>	<b>69</b>
<b>Tableau 29 : Le test de Kolmogorov-Smirnov .....</b>	<b>70</b>
<b>Tableau 30 : Ajustements de la dégradation spécifique annuelle à une loi normale .....</b>	<b>71</b>
<b>Tableau 31: Valeurs des dégradations spécifiques estimées pour des périodes de récurrences données .....</b>	<b>72</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Erosion laminaire.....	13
Figure 2 : Mouvement de masse .....	14
Figure 3 : Modes de transport solide.....	17
Figure 4 : Débit et champ des vitesses à travers une section .....	19
Figure 5 : Le moulinet .....	20
Figure 6: Les bassins versant de l'Algérie (Bemoussat, 2012) .....	24
Figure 7: Délimitation du bassin versant de la Tafna (Bemoussat, 2012) .....	25
Figure 8: Situation du bassin-versant de l'oued Sebdou (Ghenim, 2017) .....	26
Figure 9: Courbe hypsométrique du bassin versant de sebdou.....	29
Figure 10: Carte d'altitude de sous bassin versant de l'oued Sebdou .....	30
Figure 11: Carte de pente du sous bassin versant de Sebdou .....	33
Figure 12: Réseau hydrographique du sous bassin versant de l'oued Sebdou.....	35
Figure 13: Carte d'occupation du sol de sous bassin d'oued Sebdou (Chikh, 2011) .....	36
Figure 14: Carte lithologique du bassin versant de l'oued Sebdou (Baloul, 2012) .....	37
Figure 15: Variation interannuelle des modules d'oued Sebdou .....	39
Figure 16: Représentation de la variation du coefficient d'hydraulicité.....	41
Figure 17: Représentation des valeurs du coefficient de variation.....	42
Figure 18 : Ajustement graphique de la série des débits moyens annuels de l'Oued Sebdou.....	44
Figure 19: Variations des débits moyens mensuels de l'Oued Sebdou.....	45
Figure 20 : Représentation de la variation du coefficient mensuel des débits.....	46
Figure 21: Evolution des débits instantanés d'oued Sebdou.....	50
Figure 22 : Les modèles entre les concentrations moyennes des MES et débits moyens pour des échelles annuelles et saisonniers.....	52
Figure 23 : Variation interannuelle des apports liquides et solides.....	62
Figure 24: Variation mensuelle des apports solides et liquides. ....	63
Figure 25: Variation saisonnière de l'apport solide (%) .....	65
Figure 26: Variation saisonnière de l'apport liquide (%).....	65
Figure 27: Le modèle entre l'érosion spécifique et l'apport liquide annuel.....	66
Figure 28: Ajustement graphique de la série de l'apport solide annuel de l'oued Sebdou .....	69
Figure 29: Ajustement graphique de la série de la dégradation spécifique annuel d'oued Sebdou .....	71

## INTRODUCTION GENERALE

L'érosion est l'un des principaux problèmes de l'écosystème, à savoir la perte de grandes quantités de sol, la faible capacité de production et la détérioration de la qualité des eaux de surface, en plus d'autres problèmes. De nombreux modèles mathématiques (empirique, conceptuel et physiques....) ont été développés pour estimer l'érosion des sols. Les modèles de régression sont les techniques dominantes utilisées par les chercheurs de la région méditerranéenne.

L'érosion hydrique est l'un des principaux problèmes dans de nombreuses régions de l'Algérie, mais ce sont les régions intérieures, en particulier les régions montagneuses, qui sont les plus vulnérables. Les fortes précipitations s'ajoutent aux tempêtes de pluie qui tombent après une période d'intense intensité. Et la nature sévère des roches mères formées à partir du sol, en particulier sur les roches calcaires, et les activités d'erreur humaine et les investissements lourds dans les sols agricoles ainsi que les violations et violations des forêts et autres pratiques humaines jouent un rôle important dans l'augmentation du taux de dégradation spécifique.

En général, les limites intermédiaires moyennes varient d'une région à l'autre, en Amérique, la limite est comprise entre 20 à 120 T/km<sup>2</sup>/an en fonction de la profondeur du sol, tandis qu'en Afrique, la limite maximale autorisée est de 125 T/km<sup>2</sup>/an et peut atteindre 200 T/km<sup>2</sup>/an (نحال, 1996).

Afin de développer des plans efficaces de contrôle de cette érosion et réduire la sédimentation, il est important de quantifier directement les sédiments en suspension dans les bassins versants en évitant les mesures quotidiennes. Pour cela, il est nécessaire de trouver une relation entre le rejet d'eau et la concentration de sédiments en suspension dans les bassins versants

L'objectif principal de ce projet de fin d'études est de modéliser et quantifier le transport solide et l'érosion spécifique dans le bassin versant de l'oued Sebdou, et d'ajuster une relation débit liquide – concentration des matières en suspension par différents modèles régressifs.

**Chapitre I :**  
**Erosion et Transport solide**

# 1. Erosion et transport solide

## 1.1 Erosion

### 1.1.1 Introduction

L'érosion hydrique est un phénomène naturel qui provoque des dégâts non seulement sur le sol et l'agriculture mais aussi sur la qualité de l'eau ; Elle est définie comme un détachement de fragments des particules de la surface du sol par l'agent érosif à savoir l'eau de la pluie au fil du temps. Son processus résume en trois étapes : détachement - transport - dépôt. L'érosion hydrique comporte plusieurs forme et cela dépend des facteurs qui le favorisent (la structure du sol, le relief, le climat de la région, couvert végétal). Une légère érosion est en fait bénéfique à la formation du sol mais une érosion sévère ou accélérée affecte négativement le sol et l'environnement (Tachi, 2017). Pour une meilleure évaluation et compréhension du mécanisme de l'érosion hydrique, il est très important de quantifier la perte de sol et de développer différents modèles et pratiques pour contrôler ce phénomène. L'objectif de ce chapitre est de décrire ce phénomène et les différents types, facteurs de l'érosion hydrique.

### 1.1.2 Typed'érosion

Il existe de nombreux types d'érosion hydrique :

#### 1.1.2.1 L'érosion en nappe (laminaire ou surface)

Après que le sol arrête d'absorber toute la quantité d'eau de pluie, L'excès d'eau ne peut pas s'infiltrer et ruisselle donc sur la surface du sol en déplaçant les particules arrachées de la surface par la battance de la pluie. Lors de leur écoulement sur les surfaces, la vitesse de l'eau de ruissellement conjointement avec les particules et exercent un effet mécanique capable d'entraîner le détachement d'autres particules.

D'une part l'érosion laminaire sur le terrain est difficile á détecté car les sols perdent une mince couche de façon plus ou moins uniforme. Et d'autre part, l'érosion laminaire est un processus ou une technique idéalisé et parfait qui est rarement existé dans les champs car en raison du microrelief du terrain, l'eau de ruissellement tend à se concentrer et à creuser les surfaces sous forme de rigoles (Lefkir,2009).



**Figure 1: Erosion laminaire**

(Source : <https://www.supagro.fr/resspepites/processusecologiques/co/RegContrôleErosion.html>)

### **1.1.2.2 L'érosion linéaire**

Ce type de l'érosion se manifeste dès que les courant d'eau (filets d'eau) diffus se concentrent sur la forme des lignes de plus forte pente, et exercent ainsi sur le sol une force de cisaillement permettant de creuser des formes de plus en plus profondes dans le sol en arrachant, et divise des particules de plus en plus grosse : graviers, cailloux voir des blocs (Megnounif, 2007), de petits canaux pouvant être diviser en trois types : griffes (quelques centimètres de profondeur), rigoles (la profondeur dépasse 10 cm), ravines (quelques mètres ) (Bouguerra, 2014).

### **1.1.2.3 Mouvements de masse**

Le mouvement de masse du sol est le mouvement instantané descendant de la gravité des masses finies de sol, de roche et de débris. Les glissements de terrain, les avalanches de débris, l'éboulement et les coulées de terre, le fluage et les torrents de débris sont des exemples de ce mouvement.

Les glissements de terrain sont souvent utilisés comme un terme générique pour inclure toutes les formes de mouvements de masse du sol qui présentent un mouvement perceptible (Satterlund et Adams, 1992). Cependant, de grandes quantités de mouvements imperceptibles de la masse du sol se produisent également (Peter et al. 2013).



**Figure2: Mouvement de masse**

(Source : <https://www.cantley.ca/urbanisme-environnement-et-developpement-economique/ma-maison/mouvement-de-masse/>)

#### **1.1.2.4 Le sapement des berges**

La force cinétique reliée à l'écoulement de l'eau peut exercer un stress sur les berges et y éroder les matériaux les plus fragiles. Le sapement des berges provoque l'écroulement de masses importantes de sols dans les cours d'eau dans lesquels ces masses se fragmentent et s'incorporent à la charge du cours d'eau. Rullan-Perchirin (1989) a noté que le sapement des berges contribue aux mouvements de masses surtout dans la zone aval des bassins versants, (Lefkir, 2009).

#### **1.1.3 Facteurs de l'érosion hydrique**

L'érosion hydrique est un phénomène difficile auquel font face les hydrologues et les hydrogéologues depuis de nombreuses décennies. De nombreux facteurs affectent et augmentent l'érosion hydrique dans les bassins versants en raison de différents facteurs. L'érosion hydrique est contrôlée principalement par quatre facteurs principaux : les facteurs climatiques, la couverture végétale, la topographie et les propriétés du sol et sont discutés dans le tableau (1-1) (Blanco, 2008).

**Tableau 1:Facteurs affectant l'érosion hydrique (Blanco, 2008)**

<b>Climat</b>	<b>Couvert végétale</b>	<b>Topographie</b>	<b>Propriété du sol</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tous les facteurs climatiques (p. Ex. Précipitations, humidité, température, évapotranspiration, rayonnement solaire et vitesse du vent) influent sur l'érosion hydrique.</li> <li>La précipitation est l'agent principal de l'érosion hydrique.</li> <li>- La quantité, l'intensité et la fréquence des précipitations déterminent l'ampleur de l'érosion.</li> <li>- L'intensité de la pluie est le facteur le plus critique.</li> <li>- Plus orage est intense, plus le ruissellement et la perte de sol sont importants.</li> <li>- Une température élevée peut réduire l'érosion hydrique en augmentant l'évapotranspiration et en réduisant la teneur en eau du sol.</li> <li>- Une forte humidité de l'air est associée à une teneur en eau du sol plus élevée.</li> <li>- Des vents plus forts augmentent l'épuisement de l'eau du sol et réduisent l'érosion hydrique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La couverture végétale réduit l'érosion en interceptant, adsorbant et réduisant l'énergie érosive des gouttes de pluie.</li> <li>- La morphologie de la plante comme la hauteur de la plante et la structure de la canopée l'efficacité de la couverture végétale.</li> <li>- La couverture de résidus de surface éponge les gouttes de pluie qui tombent et réduit le rebond des gouttes. Il augmente la rugosité du sol, ralentit la vitesse de ruissellement et filtre les particules de sol dans les eaux de ruissellement.</li> <li>- Le détachement du sol augmente avec la diminution de la couverture végétale.</li> <li>- La végétation dense et à croissance courte (par exemple, l'herbe) est plus efficace pour réduire l'érosion que la végétation clairsemée et haute.</li> <li>- Plus le couvert végétal est dense et plus la couverture de litière est épaisse, plus le contrôle de l'érosion par éclaboussure est important et plus l'érosion totale du sol est faible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'érosion du sol augmente avec l'augmentation de la pente du champ.</li> <li>- La topographie du sol détermine la vitesse à laquelle l'eau s'écoule du champ.</li> <li>- La capacité de transport des eaux de ruissellement augmente avec l'augmentation de la pente.</li> <li>- Les sols sur les champs convexes sont plus facilement érodés que dans les zones concaves en raison de l'interaction avec le fluage superficiel du sol par gravité.</li> <li>- Le degré, la longueur et la taille de la pente déterminent le taux d'écoulement de surface.</li> <li>- L'érosion des rigoles, des ravins et des canaux est typique des bassins versants en pente.</li> <li>- Les pentes plus abruptes sont sujettes à l'érosion des coulées de boue et aux glissements de terrain.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La texture, la teneur en matière organique, la macroporosité et l'infiltration d'eau influencent l'érosion du sol.</li> <li>- La teneur en eau antécédente est également un facteur important car elle définit l'espace poreux du sol disponible pour l'absorption de l'eau de pluie.</li> <li>- L'agrégation des sols affecte le taux de détachement et de transportabilité.</li> <li>- Les particules d'argile sont transportées plus facilement que les particules de sable, mais les particules d'argile forment des agrégats plus solides et plus stables.</li> <li>- Les matériaux organiques stabilisent la structure du sol et coagulent les colloïdes du sol.</li> <li>- Le compactage réduit la macroporosité du sol et l'infiltration de l'eau et augmente les taux de ruissellement.</li> <li>- Les agrégats grands et instables sont plus détachables.</li> <li>- Les processus interactifs parmi les propriétés du sol définissent l'érodabilité du sol.</li> </ul>

### **I.1.3.1 Facteurs anthropiques**

L'érosion est devenue essentiellement une conséquence directe de l'activité humaine qui représente maintenant le principal facteur de la dégradation des sols. L'homme peut être à l'origine du déclenchement et de l'accélération de l'érosion par ses actions de défrichage des forêts, incendies et surpâturages et pratiques culturales. De plus, les aménagements routiers et urbains, en augmentant les surfaces imperméables, exacerbent les inondations, favorisent le ruissellement et donc constituent un facteur d'entraînement du sol.

#### **I.1.3.1.1 Le pâturage**

L'espace pastoral s'amenuise suite au surpâturage. La disparition de la couverture végétale, laisse donc des surfaces importantes du sol non protégées et par la suite plus exposées aux effets érosifs de l'eau de la pluie et du ruissellement.

#### **I.1.3.1.2 L'urbanisation**

Les zones urbanisées ont souvent une érosion spécifique supérieure à celle des régions rurales. On a signalé des taux d'érosion de 20.000 à 40.000 fois supérieurs à ceux des régions naturelles non perturbées (Becker et Mulhern, 1975).

Les plus grandes quantités de sédiments sont produites durant les phases de construction, surtout quand la végétation et le sol de couverture sont provisoirement enlevés. Les travaux de construction peuvent accroître l'érodibilité et diminuer la stabilité des pentes de façon radicale. L'érosion et les sédiments produits dans les zones de développement urbain causent souvent plus de dommage aux régions situées à l'aval que dans les sites d'érosion eux-mêmes. Le réseau de drainage peut se remplir de sédiment et sa capacité d'écoulement décroît.

#### **I.1.3.1.3 L'incendie**

Puisque le feu endommage et ravage le couvert végétal, cela sous-entend un risque élevé d'érosion. En fait, les zones sans aucune couverture végétale courent toujours un plus grand risque de forte érosion que les autres.

## 1.2 Transport solide

### 1.2.1 Introduction

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion, il est par définition la quantité des sédiments transportée par un cours d'eau. On peut définir deux modes de transport des sédiments :

- **La suspension** : 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, elle est constituée d'éléments fins, généralement c'est la fraction du débit solide qui puisse être mesurée facilement (Musy et Higy, 2003), quantitativement elle représente la portion la plus importante du transport solide totale, elle représente près de 90% de la dénudation totale dans les environnements arides (Bravard et Pettit, 2000).
- **Le charriage** : Formé de matériaux trop gros pour être mis en suspension suite à leur densité et la vitesse du courant. Ces particules roulent sur le fond (charriage) ou se déplacent par saltation qui correspond à un déplacement par bonds successifs. (Musy et Higy, 2003) La charge de fond même si elle joue un rôle considérable dans les problèmes de profil d'équilibre et de stabilité des lits, n'entre que pour une part négligeable dans les volumes des sédiments transportés si ce n'est dans des conditions particulières (torrents de montagne ou rivières torrentielles de piémont) (Bravard et Pettit, 2000). La part du charriage est donc souvent négligée car mal connue. Elle est estimée entre 15% et 25% de la suspension. (Larfi et Remini, 2006)

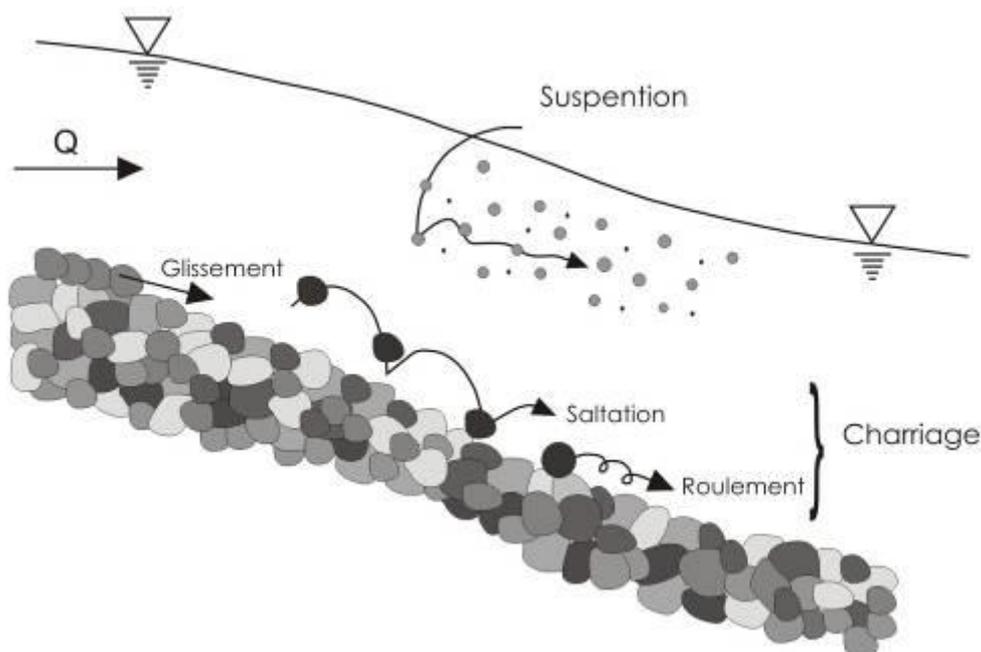


Figure 3: Modes de transport solide

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

#### **1.2.1.1 Le transport solide par charriage**

Le transport solide par charriage, représente la progression de sédiments grossiers (sables, gravier, galets et blocs), de diamètre supérieur à 1 mm, qui se déplacent par roulement ou glissement, au voisinage immédiat du fond du cours d'eau, et parcourent des distances relativement petites et discontinues dans le temps et dans l'espace. À cause des perturbations de l'écoulement, Les mesures sur le terrain du transport solide par charriage sont très coûteuses. De ce fait, les estimations de ce type de transport sont difficiles à tenir en l'insuffisance de bases de données (Bouanani, 2004).

#### **1.2.1.2 Le transport solide en suspension**

Le transport solide en suspension montre le transport de sédiments fins (argiles, limons, sables fins), de taille micronique, conservées en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau, sous l'action des fluctuations turbulentes de l'écoulement. Les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide croît de l'amont vers l'aval (Bouanani, 2004).

### **1.2.2 Les méthodes de mesures in situ**

La mesure directe du débit est une opération complexe qui ne peut être effectuée que ponctuellement. Sauf cas d'espèce très spécifique, le contrôle de débit direct et continu ne peut pas être mis en œuvre. C'est la hauteur d'eau constamment mesurée, puis le débit est recalculé à partir d'une relation qui lie le débit au la hauteur d'eau : la courbe de tarage. Cette relation est spécifique à chaque site de mesure et peut varier dans le temps, notamment après une crue si celle-ci a creusé ou déposé du sédiment dans le lit du cours d'eau. Il est donc nécessaire de mesurer le débit régulièrement pour déterminer la relation hauteur-débit et suivre son évolution. Une mesure ponctuelle de débit est appelé jaugeage. Dans la station hydrométrique de contrôle du bassin versant, ces mesures sont effectuées.

Les données employées dans cette étude nous ont été fournies par les services d'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).

#### **1.2.2.1 La mesure des débits liquides**

Pour mesurer le débit d'un écoulement naturel (cours d'eau, canal, dérivation...), il existe plusieurs méthodes, notamment :

### 1.2.2.1.1 La méthode "d'exploration du champ de vitesse"

Pour déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section mouillée. Ces techniques nécessitent des équipements spécifiques (moulinet, perche, saumon, courantomètre...) et du personnel qualifié à utiliser.

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

Le débit peut être défini à partir de la vitesse moyenne perpendiculaire à cette section par la relation :  $Q = V * S$

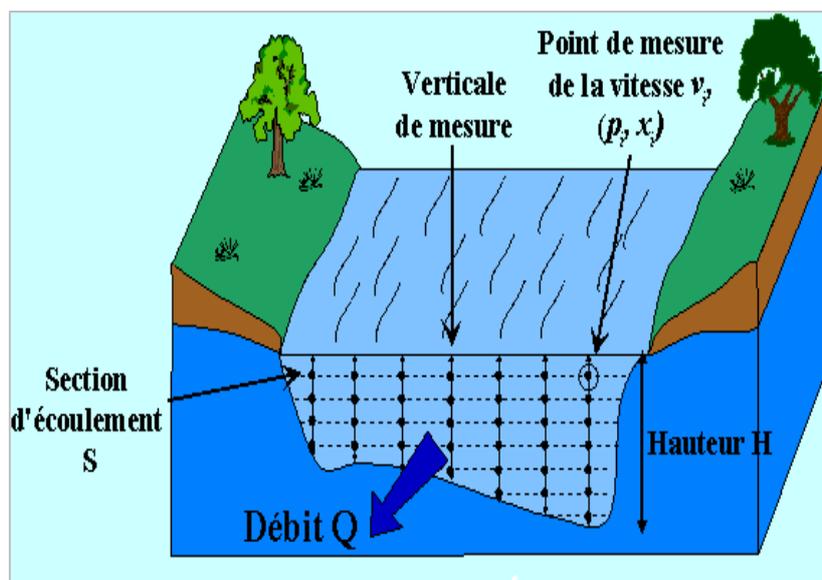


Figure 4: Débit et champ des vitesses à travers une section

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

Le moulinet hydrométrique est un appareil qui permet de mesurer la vitesse ponctuelle de l'écoulement. Il est composé d'une hélice qui détecte la vitesse du courant et transmet les indications à un compteur d'impulsions.

La vitesse d'écoulement est mesurée en chacun des points à partir de la vitesse de rotation de l'hélice située à l'avant du moulinet (nombre de tours  $n$  par unité de temps).



**Figure 5: Le moulinet**

Connaissant le nombre  $n$ , la vitesse du courant est de la forme  $v = a n + b$  ( $a$  et  $b$  sont des caractéristiques de l'hélice). Suivant le mode opératoire adopté pour le jaugeage, le moulinet peut être monté sur une perche rigide. Cette méthode est utilisable dans des sections de profondeur inférieure à 1 mètre et avec des vitesses d'écoulement inférieures à 1 m/s.

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

#### **1.2.2.1.2 Les jaugeages par dilution**

Cette méthode s'applique à des torrents ou des rivières en forte pente où l'écoulement est turbulent pour lesquels on ne trouve pas de section se prêtant à des jaugeages au moulinet.

Le principe général consiste à injecter dans la rivière une solution concentrée d'un traceur (sel, colorant,...) et à rechercher dans quelle proportion cette solution a été diluée par le cours d'eau, par prélèvements d'échantillons d'eau à l'aval du point d'injection.

#### **1.2.2.2 La mesure de concentration (prélèvement)**

La technique utilisée par ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) pour mesurer la matière en suspension débute par le prélèvement en un point unique soit sur le bord, soit au milieu au moyen d'un flacon de 1 litre en matière plastique.

L'échantillonnage s'effectue lors d'une crue suivant des intervalles de temps variables en fonction du régime de l'oued. Ainsi, en étiage ou lorsque le débit est constant au cours de la journée, il est possible d'effectuer un à deux prélèvements au cours de la journée. En période de crue, le nombre des prélèvements sera augmenté de deux façons :

- Un prélèvement est effectué durant la montée des eaux lorsque la montée est lente et tous les quarts d'heures et demies heures lorsque la montée est rapide,
- En décrue, on prélève un échantillon toutes les heures durant les six premières heures et toutes les deux heures ensuite (Demmak, 1982). L'espacement dans le temps des prélèvements des concentrations accroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du pic de la crue. Le traitement des matières en suspension prélevées se fait au laboratoire par décantation, filtrage avec un filtre de type Laurent ( $\emptyset = 32$  cm), séchage à l'étuve à  $110^{\circ}\text{C}$  durant 30 minutes et pesée.

### **1.2.2.3 La mesure des débits solides**

Pour mesurer le débit solide on applique la relation suivante :

$$Q_s = Q_l * C$$

Avec  $Q_s$  : Débit solide ;  $Q_l$  : Débit liquide et  $C$  : Concentration des sédiments.

### **1.2.2.4 Conclusion**

Après cette recherche bibliographique, plusieurs modèles ont été proposés, chacun avec son propre domaine d'application. Cependant, le modèle le plus fiable reste la quantification du transport solide au niveau des stations hydrométriques.

## **Chapitre 2 :**

# **Présentation de la zone d'étude**

## **2. Présentation de la zone d'étude**

### **2.1 Introduction**

Ce chapitre a pour but d'étudier les paramètres morphologiques et hydrologiques de sous bassin versant d'Oued Sebdou afin d'évaluer et de quantifier le transport solide dans ce dernier.

### **2.2 Bassin versant de la Tafna**

#### **2.2.1 Présentation du bassin versant de la Tafna :**

Le bassin versant de la Tafna est situé au Nord-Ouest du territoire national. Il appartient à l'unité hydrographique l'Oranie-Chott Chergui et porte le code 16 parmi les 17 bassins Algériens. Il est entre 1°00' et 1°45' longitude Ouest et entre 32°40' et 35° 20' latitude Nord. Il s'étend le long de la wilaya de Tlemcen et déborde sur le royaume du Maroc (Près de 73% de la surface ce bassin se trouve dans le territoire Algérien, divisée entre la wilaya de Tlemcen avec 69,3% et la wilaya d'Ain Témouchent avec 03,6%, le reste se trouve sur le territoire Marocain) pour une superficie totale de 7245 km<sup>2</sup> (Bouanani, 2004).

Son cours d'eau principal est Oued Tafna, avec une longueur de 170 Km, et sa source dans les monts de Tlemcen au niveau de la grotte de GharBoumaaza (Sebdou) a environ 1100 Km d'altitude, et se jette dans la mer Méditerranée en traversant la plage de Rachgoun. Ce bassin alimente cinq barrages de la willaya de Tlemcen : Béni Bahdel, Hammam Boughrara, Meffrouche, Sikkak et Sidi Abdelli.

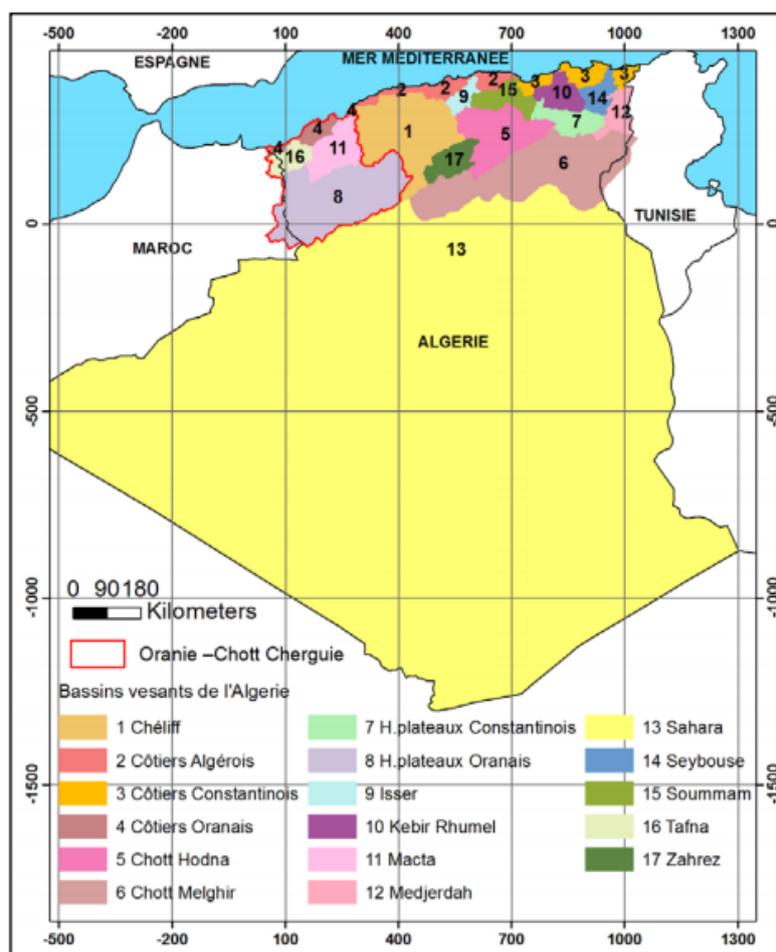


Figure 6: Les bassins versant de l'Algérie (Bemoussat, 2012)

### 2.2.1.1 La subdivision de l'oued Tafna

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

#### 2.2.1.1.1 Haute Tafna

D'un périmètre de 165 km et d'une superficie de 1016 Km<sup>2</sup>, ce bassin est régularisé par le barrage de Béni Bahdel, il s'étend depuis la résurgence de l'oued Tafna au niveau de GharBoumaaza au sud de Sebdu, il creuse son chemin en recevant des ramifications. Il traverse une vallée encaissée. Aux environs de Beni Bahdel, il reçoit l'Oued Sebdu et l'Oued Khemis. A l'aval du barrage, il se reforme grâce aux résurgences.

#### 2.2.1.1.2 Moyenne Tafna

A l'aval de Béni Bahdel, la rivière se dégage des longues gorges dans lesquelles son lit est encaissé, elle reçoit de nombreux affluents dont l'Oued Mouilah sur la rive gauche. La moyenne Tafna comprend la partie entre le barrage Hammam Boughrara et le confluent de l'Oued Isser. Elle comprend, en rive gauche une partie du versant sud des monts des Traras et en rive droite une partie

du versant Nord des monts de Tlemcen. L'Oued Isser coule d'abord vers le Nord-est, il se replie ensuite perpendiculairement au Nord pour couler dans la vallée des Ouled Mimoun, il se jette dans le barrage de Sidi Abdelli (El Izdihar) qui est d'une capacité globale de 110 millions de m<sup>3</sup> deuxième grand barrage de la wilaya après celui de Hammam Bouhrara, sa mise en service est en 1989. La partie du bassin versant formée par l'Oued Isser avant le barrage constitue le sous bassin versant d'Isser concerné par notre étude en parallèle avec celui de Sebdou.

### 2.2.1.1.3 Basse Tafna

Elle est comprise entre la région volcanique d'Ain Témouchent (Ouled Ben Adda) à l'Est et le massif des Traras (Béni Khelad) à l'ouest. L'oued Tafna reçoit l'oued Isser au niveau des plaines de Remchi dont il traverse, et perce la muraille des montagnes des Traras pour enfin rejoindre la mer Méditerranée. Elle est caractérisée par ses terrains Tertiaires.

### 2.2.1.2 Délimitation du bassin versant de Tafna

Selon Bouanani (2004), on peut délimiter le bassin versant de la Tafna comme suit :

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

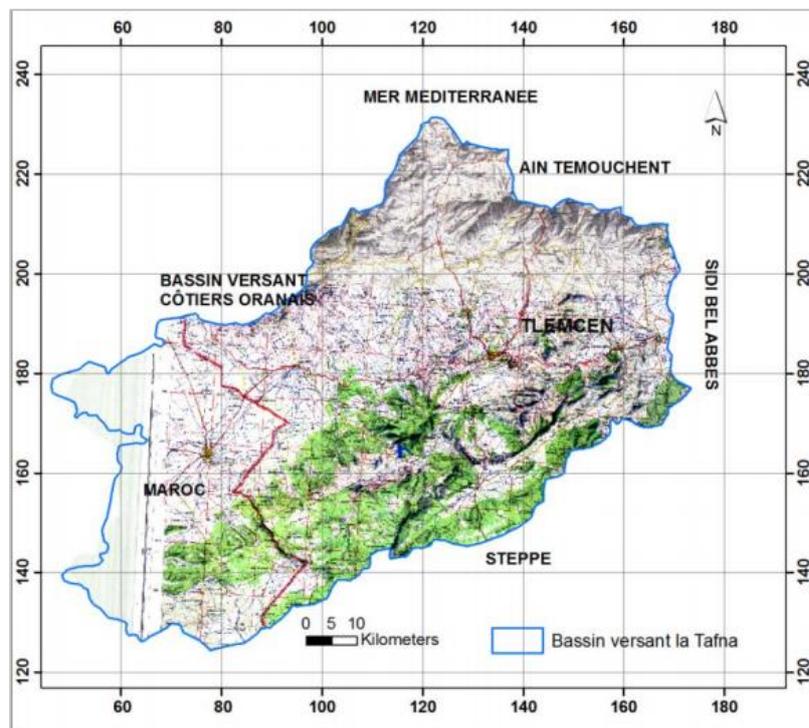


Figure 7: Délimitation du bassin versant de la Tafna (Bemoussat, 2012)

### 2.3 Sous bassin versant de l'Oued Sebdo

Le bassin versant de l'oued Sebdo est un sous bassin de la Tafna (la partie de la haute Tafna) au nord-ouest de l'Algérie, est confinée dans les massifs de l'Atlas tellien. Il également contribue à l'alimentation du barrage Béni Bahdel. Il est limité

- Au Nord, par le sous bassin versant de l'oued Boumessaoud.
- Au Sud, par les hautes plaines steppiques.
- A l'Est, par le sous bassin versant de l'oued Isser.
- A l'Ouest, par le sous bassin versant de l'oued Khemis.

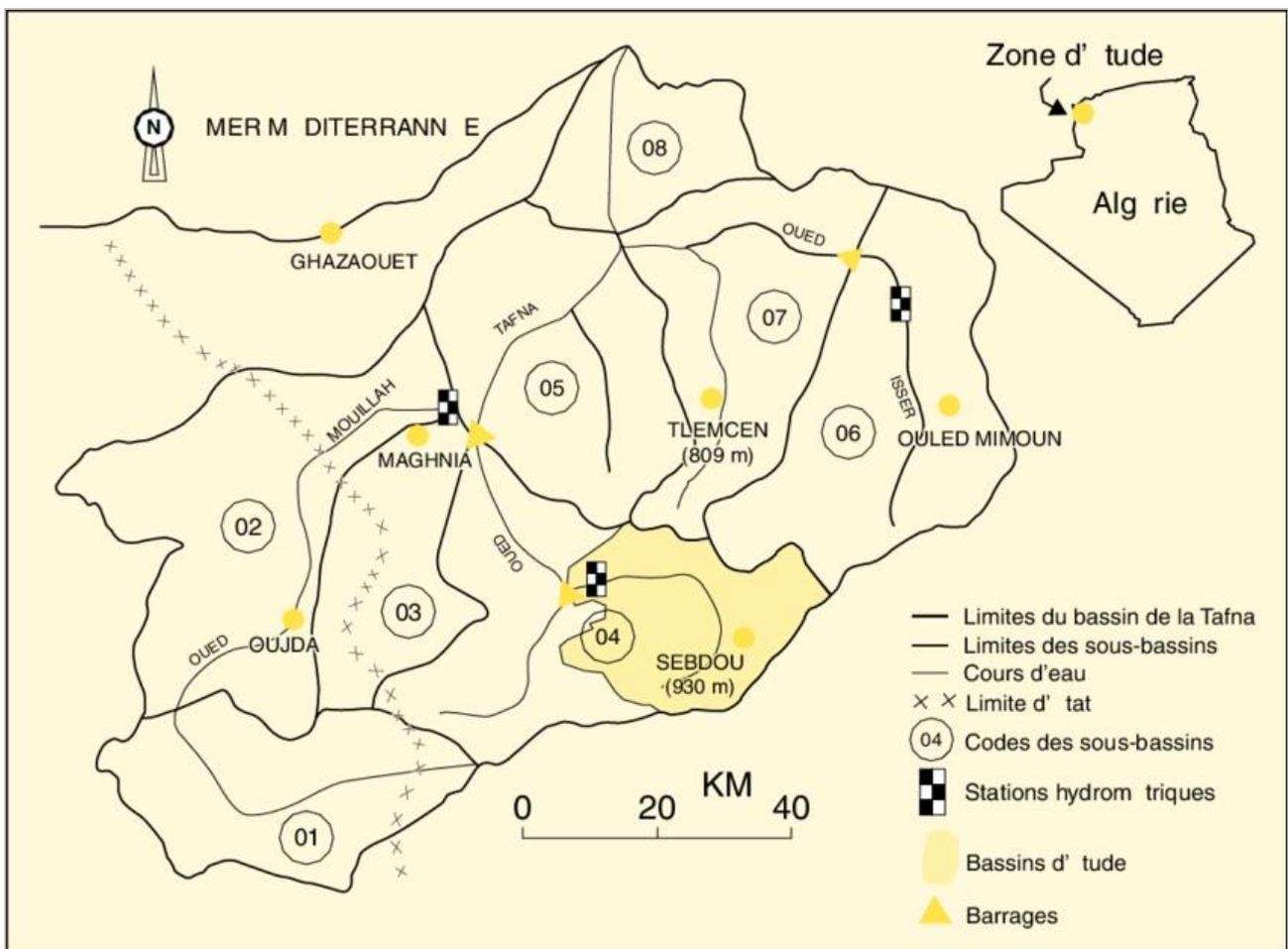


Figure 8: Situation du bassin-versant de l'oued Sebdo (Ghenim, 2017)

### 2.4 Caractéristiques physiques

Pendant la période de crue ou d'étiage, les caractéristiques physiographiques influent sur le régime des écoulements et la réponse hydrologique du bassin.

Premièrement, nous définissons la taille du bassin (sa surface) comme caractéristique morphologique puis nous pouvons ajouter sa forme, sa pente, son altitude et son orientation, ainsi que les propriétés du type de sol, de la végétation et du réseau hydrographique. Ces derniers, d'ordre purement géométrique ou physique, peuvent être estimés aisément à partir de cartes adéquates ou en utilisant des techniques digitales et des modèles numériques.

#### 2.4.1 Surface, périmètre et longueur du thalweg

La surface du bassin versant ainsi que son périmètre et la longueur du thalweg ont été déterminés par l'utilisation d'un Système d'Information Géographique, qui établit un Modèle Numérique du Terrain (M.N.T) de ce bassin. Cette technique vous permet d'estimer ces propriétés physiques avec une grande précision, comme le montre le tableau suivant (Tableau 2) :

**Tableau 2: Caractéristiques de forme pour le bassin versant d'oued Sebdou**

Bassin	Surface (km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	Longueur du thalweg (km)
Sebdou	255,5	78	29,7

#### 2.4.2 Forme du bassin

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

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

$$K_G = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec,

$P$ : Périmètre du bassin versant (km).

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

Le coefficient est proche de 1 pour un bassin versant de forme presque circulaire, et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée. Pour le cas de bassin étudié, la valeur du coefficient de compacité est de 1,37 ce qui le rend assez allongé.

### **Rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius**

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

$$L = \frac{K_G \sqrt{S}}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right]$$

$$l = \frac{K_G \sqrt{S}}{1,12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right]$$

### **2.4.3 Etude du relief**

Le relief est un facteur essentiel de l'érosion du sol car les paramètres hydrométéorologiques varient en fonction de l'altitude (précipitations, température, etc.) ainsi que de la morphologie du bassin, Le relief se détermine lui aussi par les caractéristiques suivants :

#### **2.4.3.1 La courbe hypsométrique**

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

**Tableau 3: Répartition hypsométrique du bassin versant d'oued Sebdu**

Tranches d'altitudes	A <sub>i</sub> (Km <sup>2</sup> )	A <sub>i</sub> cumulées (Km <sup>2</sup> )	A <sub>i</sub> %	% A <sub>i</sub> cumulés
1465-1400	1,40	1,4	0,55	0,55
1400-1300	13,98	15,4	5,47	6,02
1300-1200	31,73	47,1	12,42	18,43
1200-1100	52,50	99,6	20,55	38,98
1100-1000	70,50	170,1	27,59	66,58
1000-900	59,30	229,4	23,21	89,78
900-800	16,30	245,7	6,38	96,16
800-700	9,60	255,3	3,76	99,92
00-688	0,20	255,5	0,08	100

(Source Bouanani, 2004)

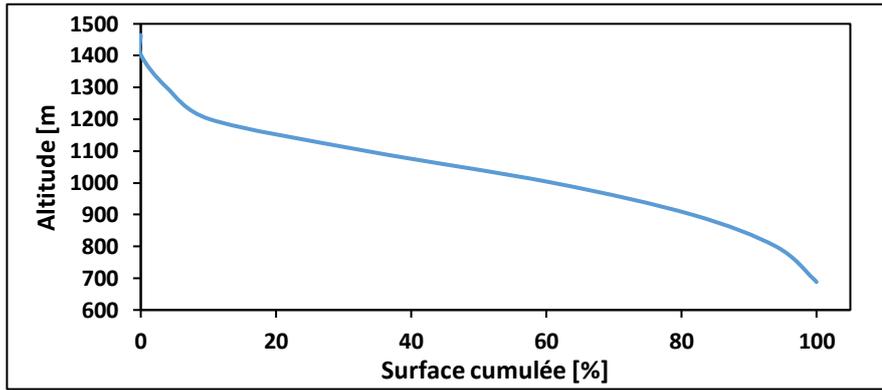


Figure 9: Courbe hypsométrique du bassin versant de sebdou

Le tableau et la figure montrant une concavité de la courbe hypsométrique vers le bas. Et indique que plus de 85% de la surface de notre bassin versant est comprise entre (1300 et 800 mètres)

La forme de la courbe hypsométrique présente un état de jeunesse allant vers l'équilibre, offrant un potentiel érosif plutôt important (Bouanani, 2004).

#### 2.4.3.2 Altitudes caractéristiques du bassin

- **L'altitude moyenne ( $H_{moy}$ )**

L'altitude moyenne est déterminée par la somme du produit de la surface partielle comprise entre les courbes de niveau, et des altitudes moyennes correspondantes, elle peut être définie comme suit :

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

Avec,  $A$ : Superficie totale du bassin versant en ( $\text{km}^2$ ),  $A_i$  : Aire comprise entre deux courbes de niveau ( $\text{km}^2$ ) et  $h_i$  : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m).

- **Les altitudes maximales et minimales**

Celles-ci sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. Alors que l'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin, l'altitude minimale considère le point le plus bas à la sortie. Ces deux données sont particulièrement importantes lors du développement de relations spécifiques impliquant des variables climatiques telles que la température et les précipitations.

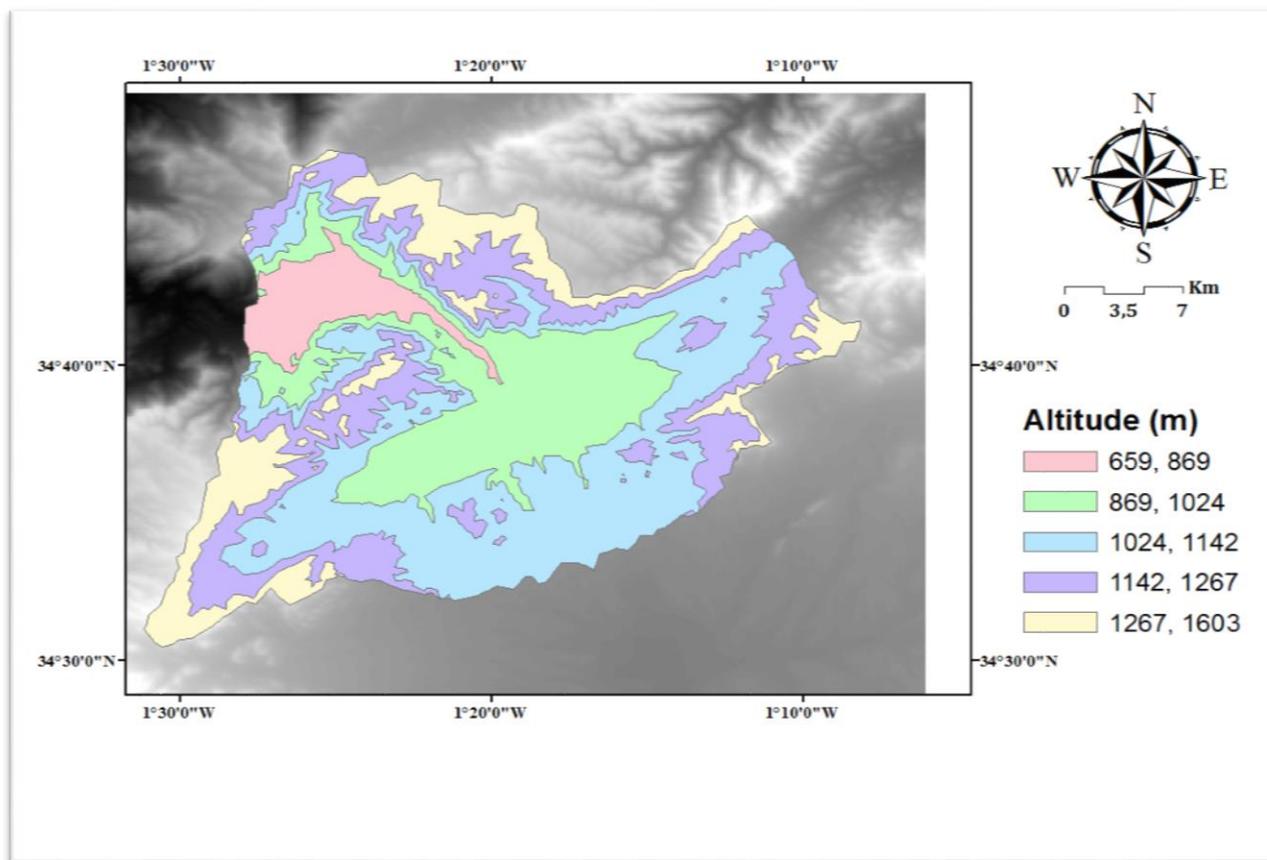
- **L'altitude médiane ( $H_{50\%}$ )** valeur médiane des altitudes du bassin versant.
- **L'altitude  $H_{95\%}$** : correspond à altitude dépassée sur 95 % de la superficie du bassin versant sur la courbe hypsométrique.

- **L'altitude  $H_{5\%}$**  : correspond à l'altitude dépassée sur 5% de la surface totale du bassin versant sur la courbe hypsométrique.

**Tableau 4: Les altitudes caractéristiques du bassin étudié**

Paramètres	Altitudes (m)
$H_{moy}$	1066
$H_{max}$	1405
$H_{min}$	688
$H_{50\%}$	1048
$H_{95\%}$	862
$H_{5\%}$	1334

La carte du réseau d'altitude de bassin d'oued Sebdu est donnée dans la figure 10.



**Figure 10: Carte d'altitude de sous bassin versant de l'oued Sebdu**

### 2.4.3.3 Indices de la pente du relief

Les indices de pente en relief ont pour but de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications.

#### - L'indice de pente globale ( $I_g$ )

Il est donné par la relation ci-dessous :

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L}$$

Avec, D : Dénivelée (m) et L : Longueur du rectangle équivalent (km).

$$I_g = 15,78 \text{ m/km.}$$

#### - L'indice de pente ( $I_p$ )

En particulier, l'indice de pente proposé par M. Roche, qui affecte le régime hydrologique du bassin, est la moyenne de la racine carrée des courbes mesurée au-dessus du rectangle équivalent et est pondéré par les surfaces, elle peut être définie comme suit:

$$I_p = \frac{1}{L} * \sum X_i \cdot \beta_i (a_i - a_{i-1})$$

Avec, L : Longueur du rectangle équivalent,  $X_i$  : Distance séparant deux courbes de niveau sur le rectangle équivalent et  $\beta_i$  : Fraction de la surface totale du bassin comprise entre les côtes  $a_i$  et  $a_{i-1}$ .

#### - Dénivelée spécifique ( $D_s$ )

Elle est donnée par la formule suivante :

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

Avec,  $I_g$  : L'indice de pente globale (m/km) et A : Aire du bassin (km<sup>2</sup>).

$$D_s = 252,23 \text{ m}$$

Dans ce cas, l'indice de pente global ne permet pas de donner une idée sur le relief d'après la classification de l'Orstom (car A > 25 km<sup>2</sup>) (Baloul, 2012).

La dénivelée spécifique est donc perçue comme une correction à l'indice de pente globale ( $I_g$ ) par application d'un coefficient qui dépend de la forme du bassin (tableau 5).

**Tableau 5: Classification du relief selon Ds**

Ds < 10 m	Relief très faible
10 m < Ds < 25 m	Relief faible
25 m < Ds < 50 m	Relief assez faible
50 m < Ds < 100 m	Relief modéré
100 m < Ds < 250 m	Relief assez fort
250 m < Ds < 500 m	Relief fort
Ds > 500 m	Relief très fort

(Soukatchoff, 2003)

Le tableau suivant contient dénivelé spécifique, les pentes ainsi que la classification de bassin versant d'Oued Sebdou selon ces paramètres.

**Tableau 6: Indices de pentes et reliefs de bassin versant d'oued sebdou**

Sous bassin	$I_p$	$I_g$	Relief selon " $I_g$ "	$D_s$	Relief selon " $D_s$ "
Oued Sebdou	1,46	15,78	/	252,23	Fort

Environ 49 % de la surface de ce sous bassin versant a une pente de plus de 25% (Megnounif et al, 2003) et est localisée principalement au Nord et au Sud du bassin correspondant à la zone montagneuse. Dans la zone du fossé de Sebdou (10,50% de la superficie du bassin), les pentes descendent et se situent entre 0% et 3%. Les 31,20% du bassin a une pente comprise entre 3% et 12%. Le reste du bassin peut avoir une pente de 12% à 25% (Bouanani, 2004).

### La pente moyenne ( $I_{moy}$ )

La pente moyenne est une caractéristique importante qui donne des informations sur la topographie du bassin et donne une bonne indication sur le temps du chemin de ruissellement direct et donc sur le temps de concentration et affecte donc directement le débit de pointe pendant la douche. Elle peut être donnée par la formule suivante :

$$I_{moy} = \frac{D_t}{L} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

$D_t$  : Dénivelée totale du rectangle équivalent (m) et  $L$  : Longueur du rectangle équivalent (km).

$$I_{moy} = 25,31 \text{ m/km}$$

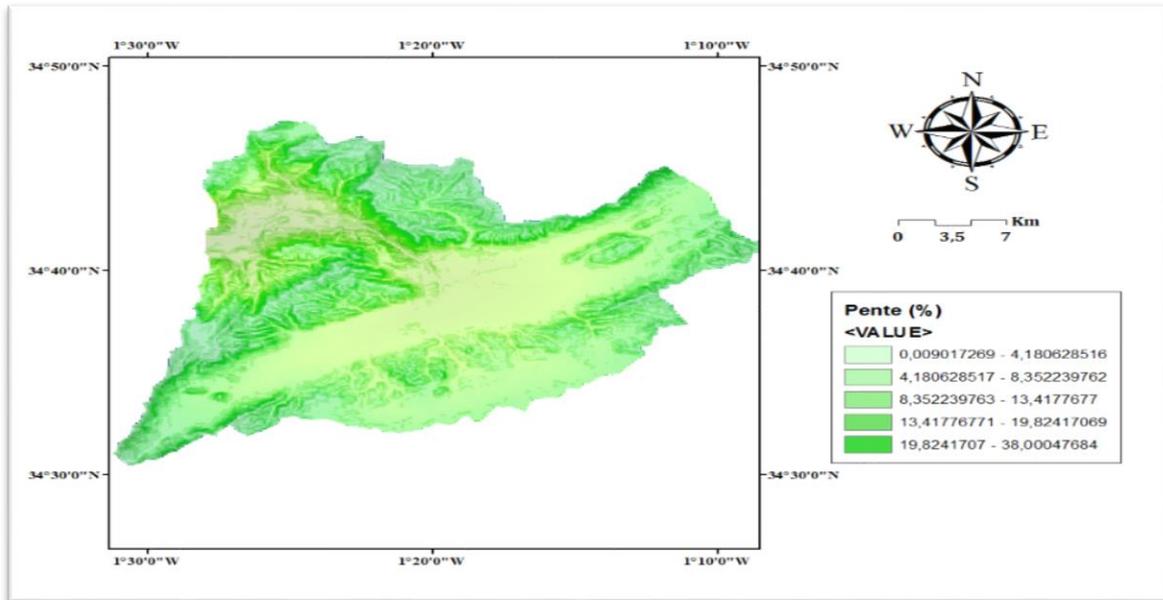


Figure 11: Carte de pente du sous bassin versant de Sebduu

#### 2.4.4 Etude du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est l'une des caractéristiques les plus importantes du bassin, il est défini comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels continus ou temporaires qui participent à l'écoulement. Sa forme varie d'un bassin à l'autre. Cela est dû à la structure géologique du bassin et à sa pente, climat qui prévaut dans la région et au facteur humain (le cours d'eau artificiels...etc.).

En utilisant un Système d'Information Géographique par les Modèles Numériques du Terrain, on a pu établir les cartes du réseau hydrographique de bassin de Sebduu comme la montre les figures ci-dessous.

##### – Temps de concentration ( $T_c$ )

$$\text{Par la formule de Giandotti : } T_c = \frac{4\sqrt{A+1,5L}}{0,8\sqrt{H_{moy}-H_{min}}}$$

Avec, A : Aire du bassin ( $\text{km}^2$ ), L : Longueur du thalweg principal (km),  $H_{moy}$  : altitude moyenne (m) et  $H_{min}$  : altitude minimale (m).

$$\text{Par la formule de VENTURA: } T_c = 0,1275 \sqrt{\frac{S}{I}}$$

Avec, S : Surface du bassin versant ( $\text{Km}^2$ ) et I: Indice de pente en (m/km).

$$\text{Par la formule de BASSO : } T_c = 0.067 \frac{L_p^{1,115}}{(H_{max}-H_{min})^{0,385}}$$

Avec,  $L_p$ : Longueur du bassin versant (Km),  $H_{max}$ : Altitude minimal (Km) et  $H_{min}$ : Altitude maximal (Km).

**Par la formule de SOKOLOVSKY :**  $T_c = 4. \left( \frac{(S.L)^{0,333}}{\sqrt{I}} \right)^{0,75}$

Avec,  $L$ : Longueur du talweg principale (Km),  $S$ : Surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>) et  $I$ : Indice de pente (m/km).

**Par la formule de L'ANRH :**  $T_c = 3. \left[ \frac{S.L_{CP}}{(10.I_{BV})^2} \right]^{\frac{1}{4}}$

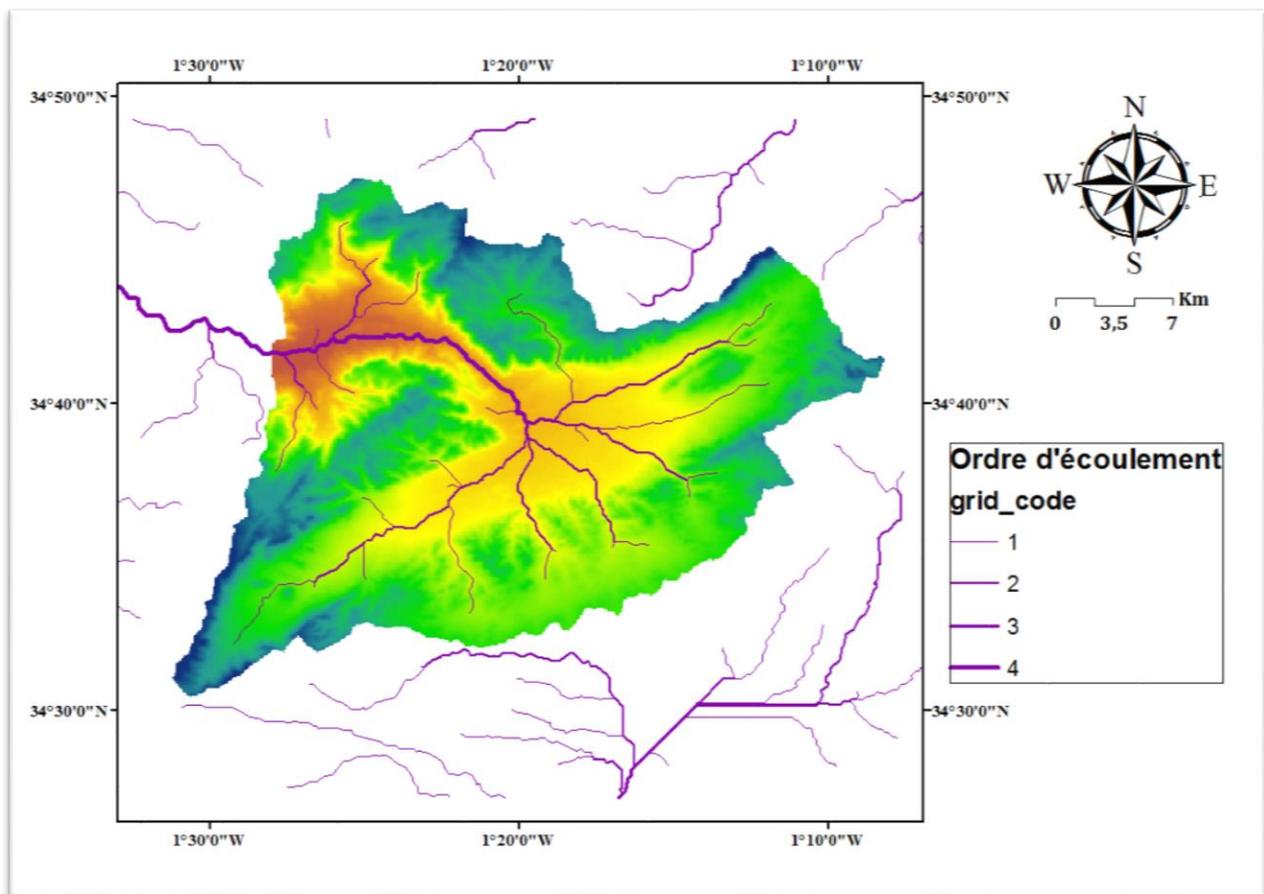
Avec,  $I_{BV}$ : Pente du bassin versant en (%),  $L_{CP}$ : Longueur du chenal principal hydrographique en (Km) et  $S$ : Surface du bassin versant en (Km<sup>2</sup>).

Par la formule de KIRPICH :  $T_c = 0,665. L_{CP}^{0,77} . I_g^{-0,385}$

Avec,  $L_{CP}$ : Longueur du chenal principal hydrographique en (Km) et  $I_g$ : Indice de la pente globale (%).

Mais dans notre travail nous avons opté pour la formule de l'ANRH car qu'elle est vérifiée et recommandée pour les petits bassins de l'Algérie.

La carte du réseau hydrographique de bassin d'oued Sebdou (Figure 12).



**Figure 12: Réseau hydrographique du sous bassin versant de l'oued Sebdu**

#### 2.4.5 Sols et végétation

Le couvert végétal a un impact important sur le processus d'érosion et joue un rôle important dans le maintien de la structure du sol. Plus la végétation est dense, plus la résistance à l'écoulement est grande, ce qui diminue le taux d'érosion du sol. Il est également un facteur déterminant du ruissellement et de la capacité du bassin ainsi que du taux d'évaporation.

Le couvert végétal du bassin d'oued Sebdu s'est considérablement détérioré et les montagnes ont été dégradées par les incendies et le surpâturage. Cela a augmenté le taux d'érosion du sol et la perte d'eau par évaporation.

Pour caractériser le couvert végétal, on utilise le pourcentage des zones occupées par chaque type de végétation (tableau 7).

**Tableau 7: Distribution du couvert végétal dans le bassin d'oued Sebdu (BNEDER, 1993)**

Occupation des sols	% des surfaces
Cultures extensives	16,14
Couvert forestier dégradé	33,84
Couvert forestier normal	21,78
Arboriculture	01,94
Couvert mort	09,62
Prairies et terrains de pacage	16,68



**Figure 13: Carte d'occupation du sol de sous bassin d'oued Sebdu (Chikh, 2011)**

## 2.4.6 La géologie du bassin versant

Le bassin de l'oued Sebdo est caractérisé par une géologie complexe. Ce bassin est caractérisé par deux ensembles distincts :

- Nord et Nord-Ouest par Horst.
- Au sud et à l'est par un graben rempli de sédiments plio-quaternaires correspondant au fossé Sebdo (Bouanani, 2004).

Selon la carte lithologique du bassin versant on peut observer que le sous bassin versant de Sebdo est composé d'une faible occupation de grès, et l'existence d'une zone occupée par marnes et argile. Et la plus grande partie du bassin est occupée par des Calcaires et dolomies et des alluvions (au niveau de la cuvette de Sebdo).

La répartition des différentes composantes lithologiques de ce bassin est donnée dans le tableau.

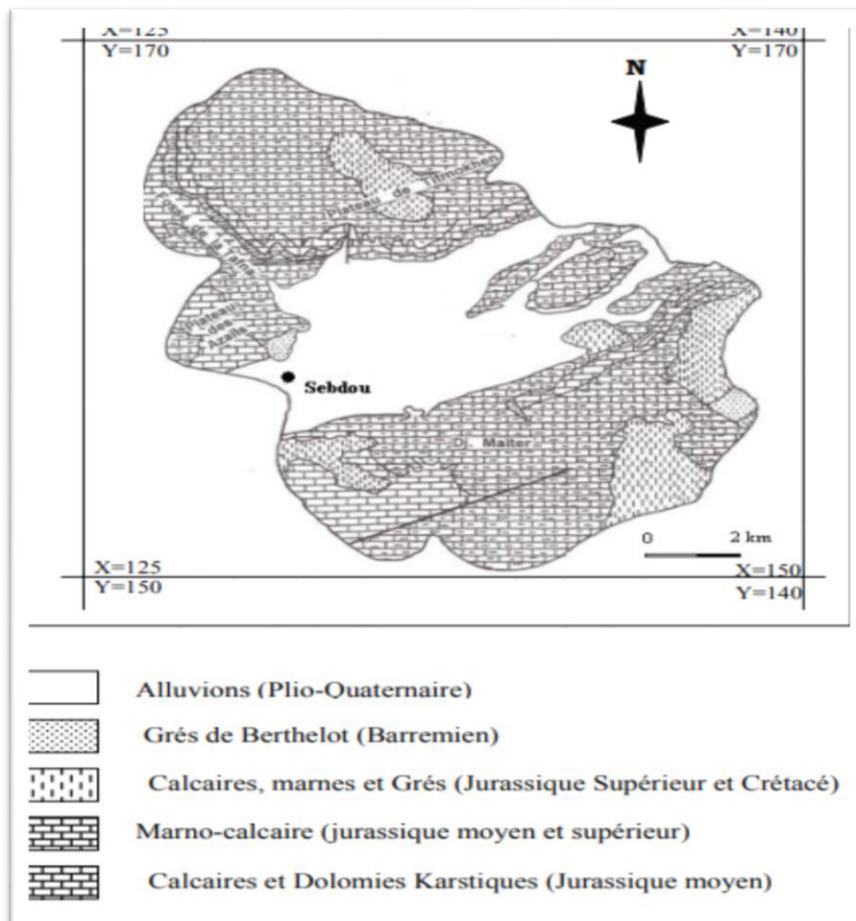


Figure 14: Carte lithologique du bassin versant de l'oued Sebdo (Baloul, 2012)

**Tableau 2-6 : Répartition des différentes composantes lithologiques en % du bassin versant de l'oued Sebdou**

Sous bassin de l'oued Sebdou	Terrains imperméables 25%	Terrains perméables 75%		
	Marnes et argiles (%)	Alluvions (%)	Calcaires et dolomies (%)	Grés (%)
	25	30	35	10

(Bouanani ,2004)

## 2.5 Caractéristique hydrologique

Afin d'obtenir une idée approximative de l'hydrologie du sous bassin de l'étude, l'exploitation des données de la station hydrométrique, considérée comme représentative du fait que la distribution spatiale est placée au milieu du sous bassin. Il s'agit de la station hydrométrique de Béni Bahdel, dont les caractéristiques sont données dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 8: Caractéristiques de station hydrométrique et période de séries de mesure.**

Bassin	Station	Code	X	Y	Z	Période
Sebdu	Beni Bahdel	160402	118,8	163,40	665	1972-73 à 2003-04

### 2.5.1 Débits moyens annuels

Le débit moyen annuel est un concept de base en hydrologie. C'est le volume d'eau qui coule en 365 jours en quittant d'un bassin. Nous avons une série de données hydrométriques représentant 32 années d'observations (tableau).

**Tableau 9: Le Bilan annuel du débit, et le débit spécifique dans le bassin versant d'Oued Sebdu durant la période 1972/73 à 2003/04**

Année	Q (m <sup>3</sup> /s)	q (l/s/km <sup>2</sup> )
72-73	2,347	9,186
73-74	2,753	10,775
74-75	2,562	10,027
75-76	1,402	5,487
76-77	0,842	3,295
77-78	0,921	3,605
78-79	0,918	3,593
79-80	1,259	4,928
80-81	1,482	5,800
81-82	0,604	2,364
82-83	0,704	2,755

83-84	0,403	1,577
84-85	0,441	1,726
85-86	0,946	3,703
86-87	1,268	4,963
87-88	0,470	1,840
88-89	0,630	2,466
89-90	0,341	1,335
90-91	1,205	4,716
91-92	0,867	3,393
92-93	0,467	1,828
93-94	0,331	1,295
94-95	0,732	2,865
95-96	1,114	4,360
96-97	0,324	1,268
97-98	0,439	1,718
98-99	0,341	1,335
99-00	0,356	1,393
00-01	0,896	3,507
01-02	0,614	2,403
02-03	0,725	2,838
03-04	0,401	1,569

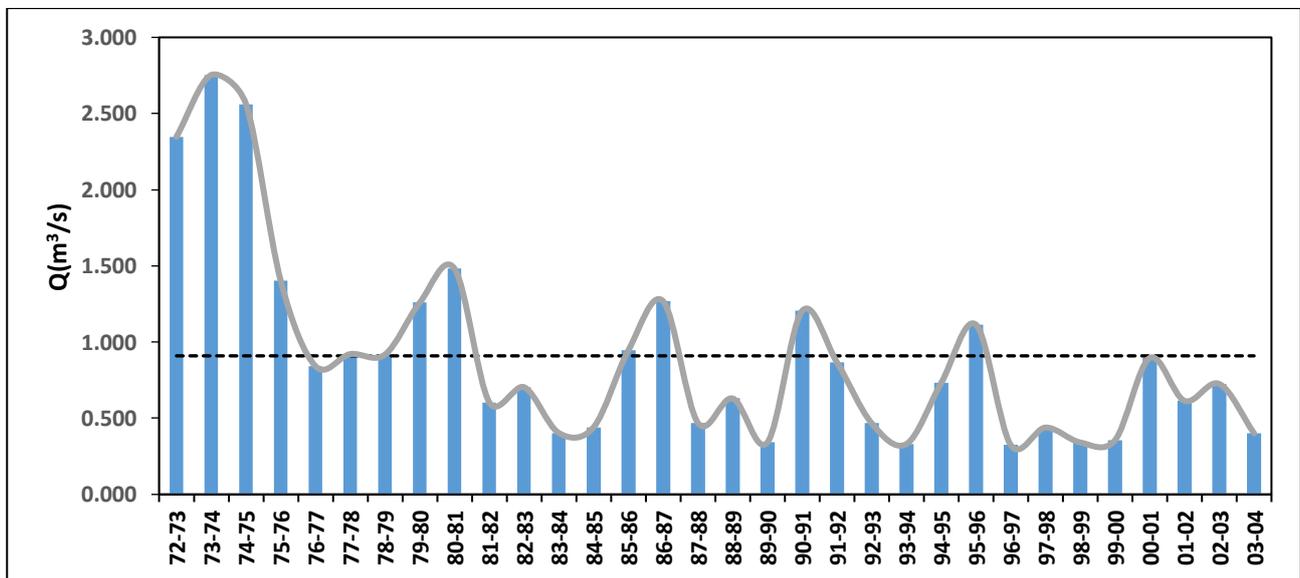


Figure 15: Variation interannuelle des modules d'oued Sebdoou

Le tableau 9 et la figure 15 montrent que le bassin versant de l'oued Sebdoou transite un débit de 0,91 m<sup>3</sup>/s équivalent à un débit spécifique de 3,56 l/s/km<sup>2</sup>. Et montrent une grande fluctuation des débits.

Les débits les plus élevés ont été observés en 1972/73 et 1974/75, tandis que les valeurs les plus faibles ont été enregistrées en 1993/94 et 1996/97.

L'irrégularité interannuelle du débit peut être mesurée par :

- Les variations de l'hydraulicité.

$$\text{Coefficient d'hydraulicité (Ch)} = \frac{\text{débit d'une année particulière}}{\text{débit moyen d'une longue série d'observation}}$$

Ce rapport identifie et classe les années humides et sèches et observe leur changement dans le temps.

- le coefficient de variation(Cv) :

$$C_v = \frac{\text{Ecart type}}{\text{Moyenne}}$$

- coefficient d'immodération (R) :

$$R = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}$$

**Tableau 10: Hydraulicité d'oued Sebdu.**

<b>Année</b>	<b>72-73</b>	<b>73-74</b>	<b>74-75</b>	<b>75-76</b>	<b>76-77</b>	<b>77-78</b>	<b>78-79</b>	<b>79-80</b>
<b>Qi/Qm</b>	2,580	3,027	2,817	1,541	0,926	1,013	1,009	1,384
<b>Année</b>	<b>80-81</b>	<b>81-82</b>	<b>82-83</b>	<b>83-84</b>	<b>84-85</b>	<b>85-86</b>	<b>86-87</b>	<b>87-88</b>
<b>Qi/Qm</b>	1,629	0,664	0,774	0,443	0,485	1,040	1,394	0,517
<b>Année</b>	<b>88-89</b>	<b>89-90</b>	<b>90-91</b>	<b>91-92</b>	<b>92-93</b>	<b>93-94</b>	<b>94-95</b>	<b>95-96</b>
<b>Qi/Qm</b>	0,693	0,375	1,325	0,953	0,513	0,364	0,805	1,225
<b>Année</b>	<b>96-97</b>	<b>97-98</b>	<b>98-99</b>	<b>99-2000</b>	<b>2000-01</b>	<b>2001-02</b>	<b>2002-03</b>	<b>2003-04</b>
<b>Qi/Qm</b>	0,356	0,483	0,375	0,391	0,985	0,675	0,797	0,441

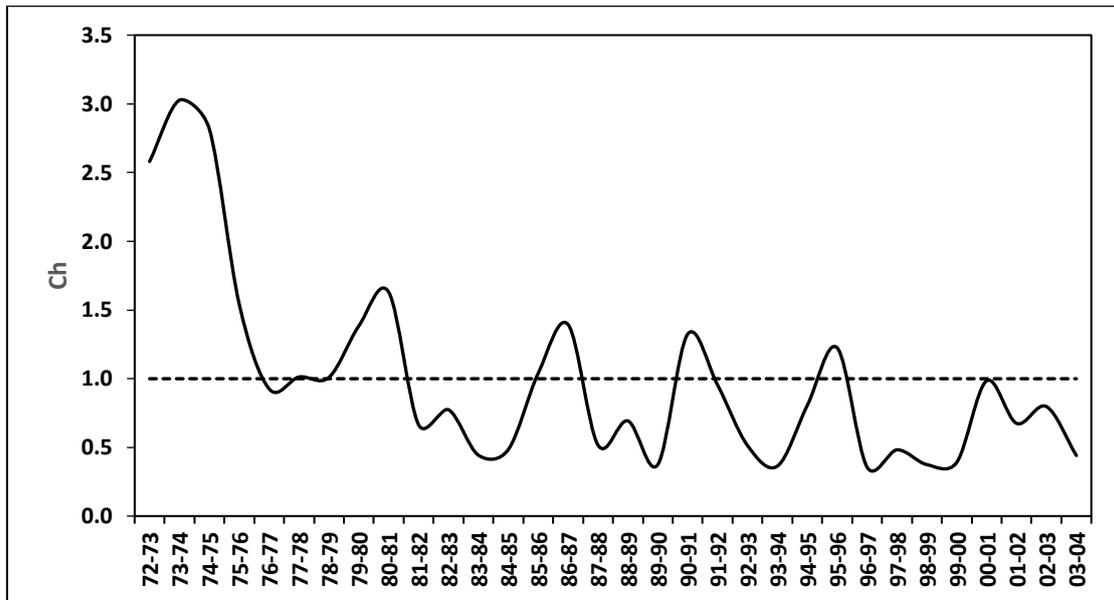


Figure 16: Représentation de la variation du coefficient d'hydraulicité

Tableau 11: Coefficients de variation des débits moyens annuels de l'oued Sebdou.

<b>Année</b>	<b>72-73</b>	<b>73-74</b>	<b>74-75</b>	<b>75-76</b>	<b>76-77</b>	<b>77-78</b>	<b>78-79</b>	<b>79-80</b>
<b><math>C_v</math></b>	1,22	1,14	0,92	0,55	0,63	0,61	0,88	1,04
<b>Année</b>	<b>80-81</b>	<b>81-82</b>	<b>82-83</b>	<b>83-84</b>	<b>84-85</b>	<b>85-86</b>	<b>86-87</b>	<b>87-88</b>
<b><math>C_v</math></b>	0,71	0,24	0,57	0,25	0,50	1,23	1,22	0,41
<b>Année</b>	<b>88-89</b>	<b>89-90</b>	<b>90-91</b>	<b>91-92</b>	<b>92-93</b>	<b>93-94</b>	<b>94-95</b>	<b>95-96</b>
<b><math>C_v</math></b>	1,27	0,69	1,51	1,02	0,83	0,73	1,77	0,91
<b>Année</b>	<b>96-97</b>	<b>97-98</b>	<b>98-99</b>	<b>99-2000</b>	<b>2000-01</b>	<b>2001-02</b>	<b>2002-03</b>	<b>2003-04</b>
<b><math>C_v</math></b>	0,56	1,35	0,99	0,88	1,24	0,88	0,68	0,41

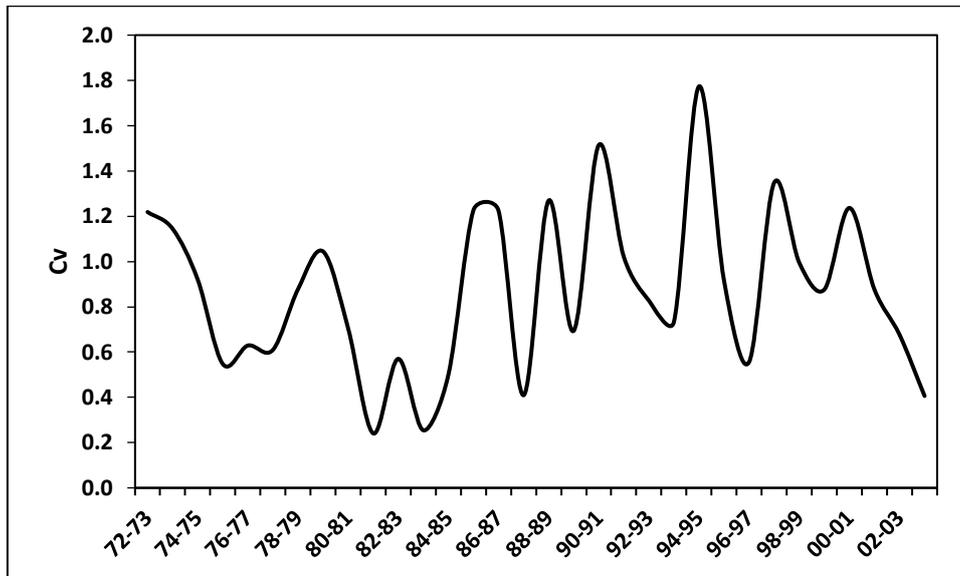


Figure 17: Représentation des valeurs du coefficient de variation.

Tableau 12: Valeurs caractéristiques Débits moyens annuels de l'oued Sebdu.

Moy(m3/s)	Max (m3/s)	Min (m3/s)	Nbre d'années > moyenne	Cv	$\sigma$	R
0,91	2,75	0,32	12sur 32	0,7	0,63	8,6

L'analyse du tableau 12 et la figure 17 montre que les années de faible hydraulité ( $Q_i / Q_{moy} < 1$ ) sont les plus dominantes. Plus de 60% des années hydrologiques sont déficitaires (le nombre d'années sèches est supérieur à celui des années humides). Les valeurs de l'hydraulité pour la période humide vont de 1,013 (1977/78) à 3,027 (1973/74) et pour la période sèche vont de 0,356 (1996/97) à 0,985 (2000/01).

Il convient de noter que les valeurs du coefficient de variation calculées pour les débits annuels varient entre 0,41 (2003/04) et 1,77 (1994/95) et pour l'ensemble de la série le coefficient de variation est de 0,7. Ainsi, la dispersion de la série est significative.

Le coefficient d'immodération est élevé (8,6). Ce qui indique l'irrégularité des débits interannuels.

### 2.5.1.1 Ajustement des débits moyens annuels à une loi de probabilité

L'analyse fréquentielle d'une série de débits permet d'étudier des événements passés afin de compléter la connaissance du phénomène (hydrologique...) et de définir les probabilités d'apparition future par d'estimation le temps de retour. Les débits moyens annuels suivent la distribution statistique de loi log-normale.

Nous allons effectuer le test de Kolmogorov-Smirnov au seuil de 5% pour décider si la distribution de l'échantillon est en adéquation avec la loi normale. Voici le détail des calculs :

<b>Interprétation du test :</b>
<b>H0 : L'échantillon suit une loi Normale</b>
<b>Ha : L'échantillon ne suit pas une loi Normale</b>

$F_N(x)$  : fonction de répartition empirique.

$F(x)$  : fonction de répartition théorique.

$$\text{Différence} = |F_N(x) - F(x)|$$

**Tableau 13: Le test de Kolmogorov-Smirnov**

<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Rang</b>	<b>F<sub>N</sub>(x)</b>	<b>F(x)</b>	<b>différence</b>
0,324	1	0,016	0,081	0,0656
0,331	2	0,047	0,087	0,0398
0,341	3	0,078	0,095	0,0166
0,341	4	0,109	0,095	0,0146
0,356	5	0,141	0,107	0,0332
0,401	6	0,172	0,149	0,0233
0,403	7	0,203	0,151	0,0526
0,439	8	0,234	0,186	0,0481
0,441	9	0,266	0,188	0,0774
0,467	10	0,297	0,215	0,0818
0,470	11	0,328	0,218	0,1099
0,604	12	0,359	0,359	0,0004
0,614	13	0,391	0,369	0,0214
0,630	14	0,422	0,385	0,0364
0,704	15	0,453	0,458	0,0045
0,725	16	0,484	0,477	0,0073
0,732	17	0,516	0,483	0,0322
0,842	18	0,547	0,576	0,0290
0,867	19	0,578	0,595	0,0167
0,896	20	0,609	0,616	0,0065
0,918	21	0,641	0,631	0,0094
0,921	22	0,672	0,633	0,0386
0,946	23	0,703	0,650	0,0532
1,114	24	0,734	0,744	0,0100
1,205	25	0,766	0,785	0,0189
1,259	26	0,797	0,805	0,0083
1,268	27	0,828	0,808	0,0197
1,402	28	0,859	0,851	0,0087
1,482	29	0,891	0,871	0,0195
2,347	30	0,922	0,971	0,0492
2,562	31	0,953	0,979	0,0263
2,753	32	0,984	0,985	0,0003

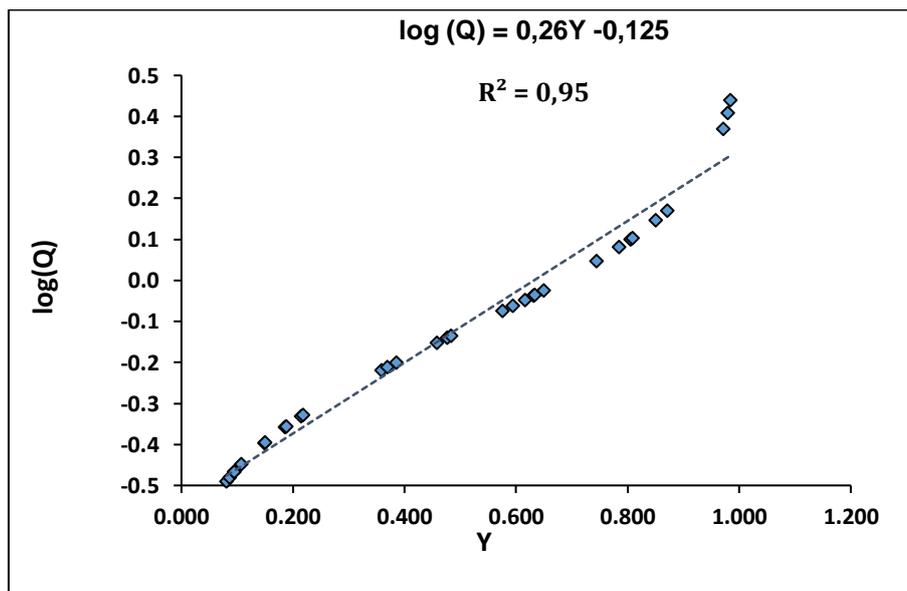
La distance de Kolmogorov-Smirnov est le plus grand des écarts en valeur absolue. On trouve ici  $D_N = 0,11$

La table de Kolmogorov-Smirnov pour  $n = 32$  au seuil  $\alpha = 0,05$  donne la valeur critique 0,235.

Puisque  $0,11 < 0,235$  on accepte l'hypothèse  $H_0$ .

**Tableau 14: Ajustements des débits moyens annuels à une loi log-normale.**

Q (m <sup>3</sup> /s)	Rang	F	Y	Q (m <sup>3</sup> /s)	rang	F	Y
0,324	1	0,016	0,081	0,732	17	0,516	0,483
0,331	2	0,047	0,087	0,842	18	0,547	0,576
0,341	3	0,078	0,095	0,867	19	0,578	0,595
0,341	4	0,109	0,095	0,896	20	0,609	0,616
0,356	5	0,141	0,107	0,918	21	0,641	0,631
0,401	6	0,172	0,149	0,921	22	0,672	0,633
0,403	7	0,203	0,151	0,946	23	0,703	0,650
0,439	8	0,234	0,186	1,114	24	0,734	0,744
0,441	9	0,266	0,188	1,205	25	0,766	0,785
0,467	10	0,297	0,215	1,259	26	0,797	0,805
0,470	11	0,328	0,218	1,268	27	0,828	0,808
0,604	12	0,359	0,359	1,402	28	0,859	0,851
0,614	13	0,391	0,369	1,482	29	0,891	0,871
0,630	14	0,422	0,385	2,347	30	0,922	0,971
0,704	15	0,453	0,458	2,562	31	0,953	0,979
0,725	16	0,484	0,477	2,753	32	0,984	0,985
Droite d'henry : $\log(Q) = 0,26*Y - 0,125$							



**Figure 18: Ajustement graphique de la série des débits moyens annuels de l'Oued Sebdu.**

**Tableau 15 : Valeurs des débits estimés pour des périodes de récurrences données.**

Période (ans)	2	10	20	100	1000
F	0,8	0,9	0,95	0,99	0,999
log Q (m <sup>3</sup> /s)	-0,125	0,210	0,305	0,483	0,682

### 2.5.2 Débits moyens mensuels

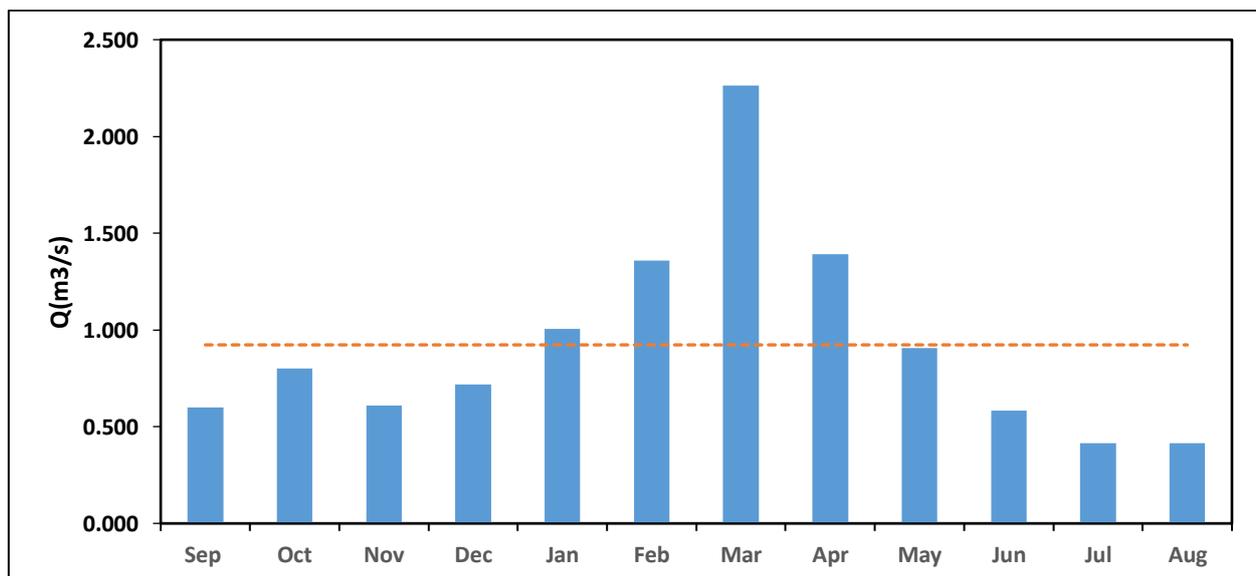
L'analyse des débits moyens mensuels est très intéressante car permet de montrer les régimes des cours d'eau et leurs fluctuations. Ces régimes peuvent être traduits par différents critères (numériques et graphiques) parmi lesquels le coefficient mensuel de débits (C.M.D).

$$CMD = \frac{\text{débit moyen mensuel}}{\text{la moyenne annuelle de la série}}$$

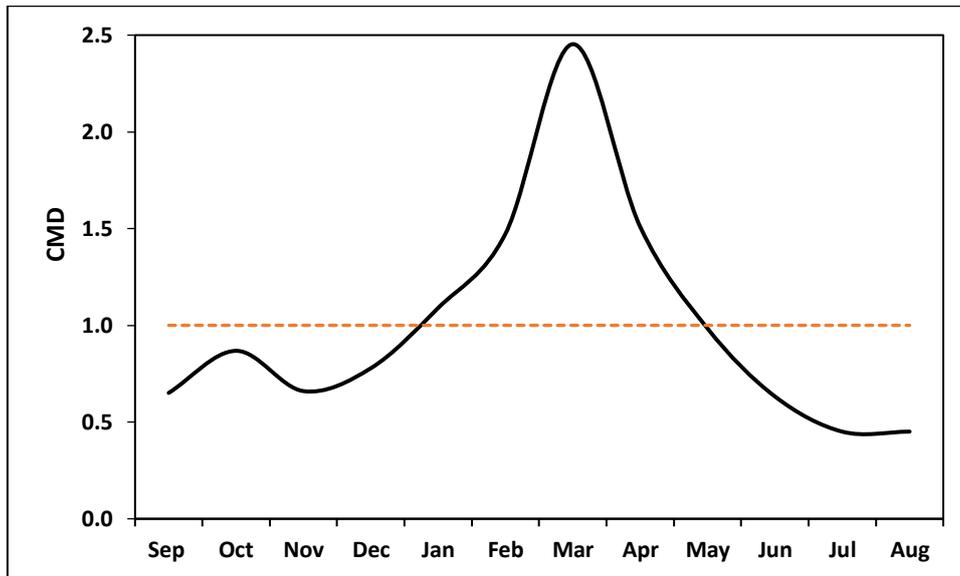
$$CMD_{An} = 1.$$

**Tableau 16: Répartition des débits mensuels de l'oued Sebdou.**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J'	A
moy	0,60	0,80	0,61	0,72	1,01	1,36	2,26	1,39	0,91	0,58	0,42	0,42
CMD	0,65	0,87	0,66	0,78	1,09	1,47	2,45	1,51	0,98	0,63	0,45	0,45



**Figure 19: Variations des débits moyens mensuels de l'Oued Sebdou**



**Figure 20: Représentation de la variation du coefficient mensuel des débits.**

L'analyse du tableau 19 et de la figure 20 montre que le maximum débit mensuel est observé en mars et le minimum débit mensuel est enregistré en juillet-août. On note que la période des hautes eaux ( $CMD > 1$ ) se situe entre les mois de janvier et avril, et nous remarquons également que la période des basses eaux ( $CMD < 1$ ) qui commence à partir du mois de mai et persiste jusqu'à la fin de décembre. La valeur de CMD la plus élevée est observée en mois de mars avec 2,45 et la plus faible valeur est enregistrée en mois de juillet et août avec 0,45.

### Estimation des volumes d'eau

L'apport annuel moyen au niveau du bassin versant d'oued Sebdu est estimé à 28,7 Hm<sup>3</sup>. Les volumes moyens mensuels compris entre 1,08 et 5,87Hm<sup>3</sup> et la valeur la plus élevée au mois de mars.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Al (Hm <sup>3</sup> )	1,56	2,08	1,58	1,86	2,61	3,52	5,87	3,61	2,35	1,51	1,08	1,08

## 2.6 Conclusion

Nous représentons sur le tableau les différentes valeurs des caractéristiques physiques du bassin, qui met en évidence le caractère allongé du bassin et un relief fort et le temps de concentration de 7 heures.

**Tableau 17: Récapitulatif des caractéristiques du sous bassin Sebdu**

Désignation		Symbole	Unité	Sebdu
Superficie		S	Km <sup>2</sup>	255,5
Périmètre		P	Km	78
Indice de compacité		K <sub>G</sub>	/	1,37
Rectangle équivalent	Longueur	L <sub>r</sub>	Km	30,70
	Largeur	l <sub>r</sub>	Km	8,32
Longueur du cours d'eau principal		L	Km	29,70
Altitude moyenne		H <sub>moy</sub>	m	1066
Altitude maximale		H <sub>max</sub>	m	1465
Altitude minimale		H <sub>min</sub>	m	688
L'altitude médiane		H <sub>50%</sub>	m	1048
Indice de pente globale		I <sub>g</sub>	m/Km	15,78
L'indice de pente		I <sub>p</sub>	m/Km	1,46
Indice de pente moyenne		I <sub>moy</sub>	m/Km	25,31
Temps de concentration		T <sub>c</sub>	h	07 h 00 mn

L'étude des écoulements est caractérisée par une moyenne annuelle de débit égale à 0,91 m<sup>3</sup>/s, et montre que le plus grand débit enregistré est observé durant l'année 73/74 avec un débit moyen de 2,753 m<sup>3</sup>/s et le plus faible débit enregistré en 93/94 avec 0,331 m<sup>3</sup>/s.

L'ajustement graphique d'une droite de distribution moyenne permet de faire des estimations correctes des débits probables pour différentes période de retour sur le bassin versant.

**Chapitre 3 :**  
**Modélisation de transport solide dans le**  
**bassin versant SEBDOU**

### **3. Modélisation de transport solide dans le bassin versant SEBDOU**

#### **3.1 Introduction**

Le but de cette étude est de rechercher des modèles de régression entre deux paramètres de mesure débit liquide et concentration des sédiments en suspension. A cet effet les données sont mises en graphe et leur allure oriente le choix du modèle régressif. L'approche consiste au traitement des valeurs des débits liquides instantanés pour différentes échelles temporelles (annuelle, saisonnière...).

#### **3.2 Source des données**

Nous exploitons les données des mesures instantanées au niveau de la station hydrométrique de Beni Bahdel. Ce sous bassin est caractérisé par la disponibilité de longues séries de mesure et l'importance de cours d'eau puisque l'oued Sebdo se jette dans la cuvette du barrage Beni Bahdel.

Les données de base disponibles sont constituées par les débits liquides instantanés ( $m^3/s$ ) et les concentrations des sédiments instantanées ( $g/l$ ). Cette banque de données couvre la période allant de 1972/1973 à 2003/2004, soit 32 années d'observation.

Les données nous ont été fournies par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). La série de données au niveau de la station de Béni Bahdel contient 5048 mesures couples de la concentration des sédiments en suspension (C) et le débit liquide (Q) avec une moyenne de 158 prises par année.

Les résultats des analyses des matériaux en suspension sont traités pour comprendre l'opération hydro-sédimentaire de cours d'eau et pour estimation et prédiction des quantités de matières solides. Et pour remédier au manque de données continues de la concentration de matériaux en suspension. Plus important, augmenter le nombre de données à utiliser lors de l'application des courbes de transport solide. Dans ce contexte, on cherche des relations continues et fiables qui relient la concentration des sédiments (C) au débit liquide (Q) (Fiandino, 2004 ; Demmak, 1982 ; Khanchoul, 2004).

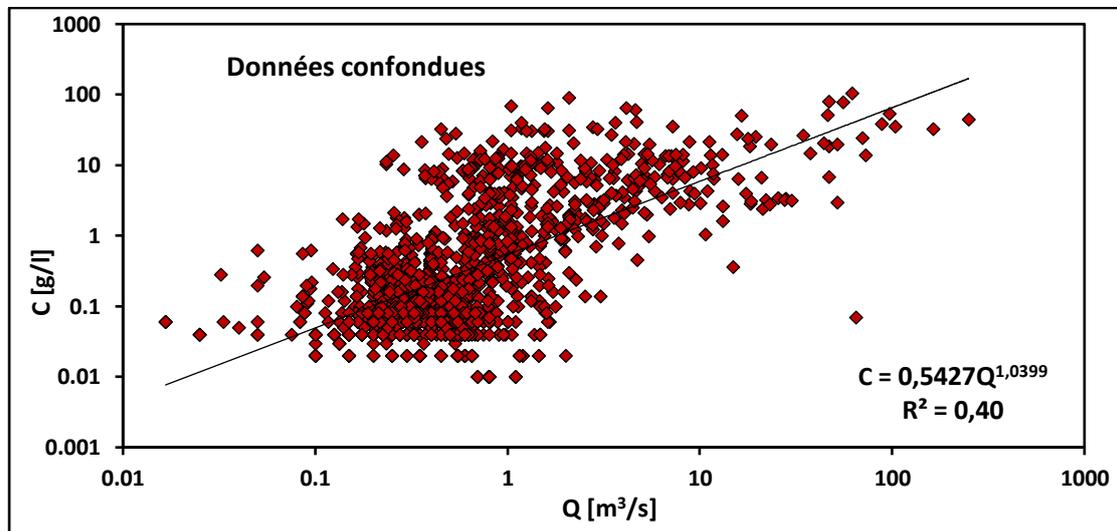
#### **3.3 Les courbes d'étalonnage "concentration – débit"**

En l'absence d'équipement pour des échantillonnages périodiques, nous avons été obligés d'utiliser la technique de la courbe de transport solide pour estimer la charge solide suspendue de la série de débit. La courbe de transport solide se présente sous la forme d'un graphique ou d'une équation

reliant le débit solide ( $Q_s$ ) ou la concentration des sédiments ( $C$ ) et le débit liquide ( $Q$ ) (Khanchoul et al. 2009).

La relation entre deux variables ( $C$ ,  $Q$ ) est une approche complètement statistique. Cela permet de caractériser le lien entre les deux variables. Il offre également la possibilité d'adopter différents modèles déterminés par des techniques de régression (BentHascholt et Madeyski, 1998 ; Moatar et al, 2007 ; Baloul, 2012).

La concentration des sédiments en suspension et le débit liquide évoluent généralement selon un modèle de puissance  $C = aC^b$  (Etchanchu et al, 1986 ; Benkhaled et al, 2003 ; Achite et Ouillon, 2007 ; Khanchoul et al, 2008 ; Ghenim, 2008).



**Figure 21: Evolution des débits instantanés d'oued Sebou**

Pour arriver à des courbes de transport solides plus fiables, la méthode utilisée dans ce travail pour modéliser le transport solide est celle des classes des débits décrite par Verhoff et al, 1980 ; Walling et Webb, 1981. Basée essentiellement sur le calcul des concentrations moyennes et des débits moyens, donne un ordre d'amplitude plus correct de la charge solide, Par la suite, la méthode a été développée par Jansson (1985, 1997), Khanchoul (2004), Khanchoul et al, (2007).

La procédure commence par la classification des individus mesurés et leur regroupement en classes distinctes de débit liquides (selon un tri croissant). La taille l'intervalle de classe dépend de la base de données, pour les faibles débits, l'intervalle de classe peut être étroit et augmenter progressivement. Puis les moyenne du débit de liquide et les concentrations en suspension de

chaque classe sont calculées et introduites dans un nouveau groupe. Ensuite, on calcul les paramètres de régression a et b et coefficient de corrélation  $R^2$  de nouveau groupe (Tourki, 2009).

Peuvent également être mises en œuvre pour produire des sous-modèles qui augmentent encore le degré de précision, telle que la division des données par saisonniers (Walling et Webb, 1981 ; Walling, 1977 a et b ; Asselman, 2000 ; Glysson, 1987 ; Sadeghi, 2007, Khanchoul et Jansson, 2008 ; Baloul, 2012).

A partir des résultats obtenus par la méthode des classes des débits, on procède à la conception du modèle de régression entre la concentration de sédiments en suspension C (g/l) et le débit de liquide Q ( $m^3/s$ ). Les résultats obtenus sont les suivants :

**Tableau 18: Valeurs de a et b des équations utilisées, et coefficient de corrélation  $R^2$  des différentes modèles de  $C=f(Q)$  par la méthode des classes des débits.**

	Échelle temporelle	a	b	$R^2$ calibration	$R^2$ validaion	Remarque	N
<b>Oued Sebdou</b>	Annuelle	0,9147	0,5957	0,85	0,82	/	5048
	Automne	2,0024	0,7513	0,83	0,98	/	1317
		4,5625	0,4141	0,66		Si $Q \geq 1,65$	
		2,837	1,2247	0,85		Si $Q < 1,65$	
	Hiver	0,3388	0,6927	0,75	0,45	/	1569
	Printemps	0,2933	0,6482	0,73	0,98	/	1376
	Eté	0,9309	0,8113	0,78	0,37	/	786

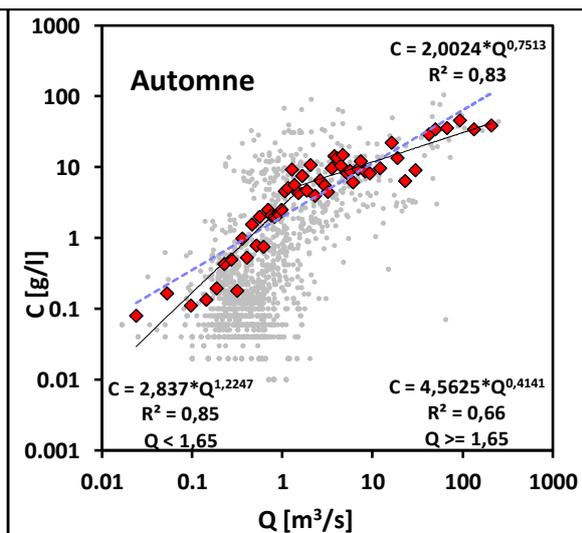
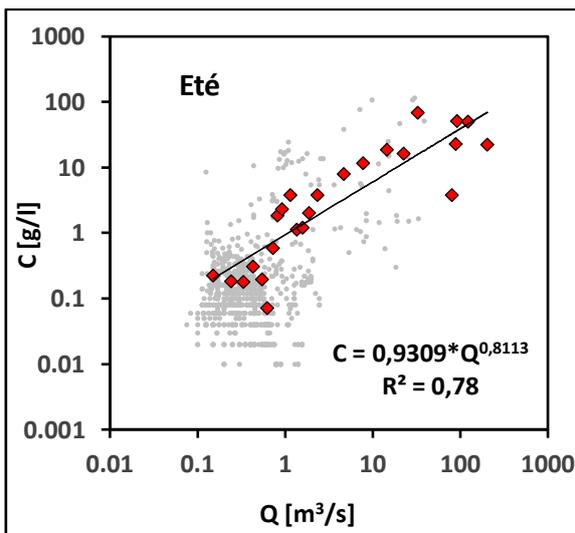
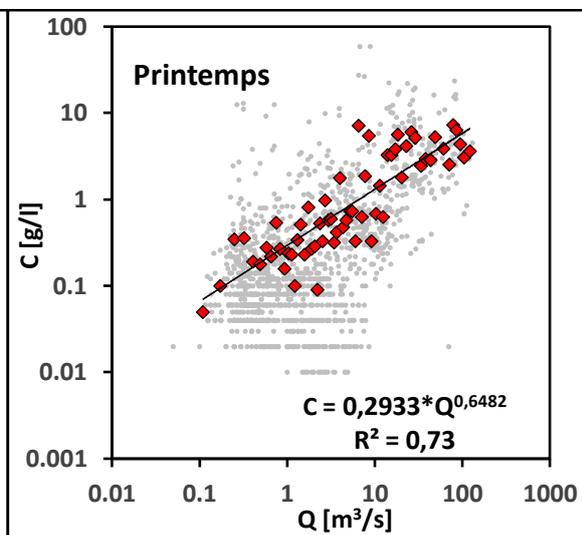
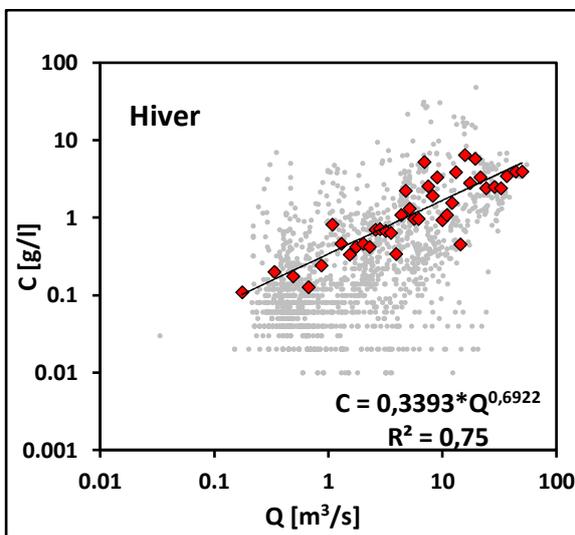
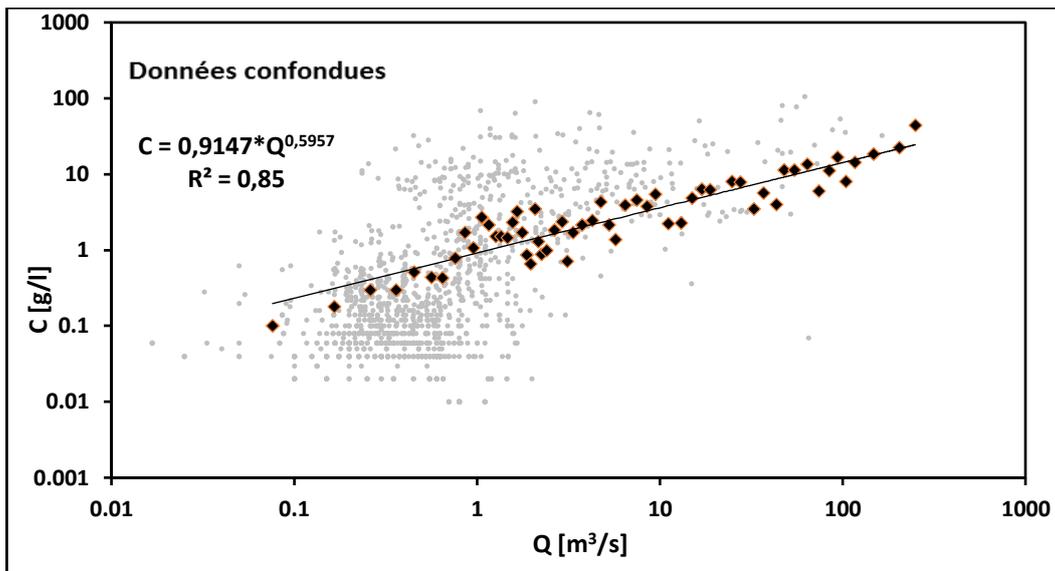


Figure 22: Les modèles entre les concentrations moyennes des MES et débits moyens pour des échelles annuelles et saisonniers.

### 3.4 Analyse des résultats et discussion

Pour mesurer la fiabilité d'estimation, les différences entre les valeurs mesurées et calculées en pourcentage d'erreur peuvent être exprimées sous la forme suivante :

$$Erreur(\%) = \left( \frac{As_{\text{estimé}}}{As_{\text{mesurées}}} - 1 \right) * 100$$

Avec :

$$As : \text{Apport solide}, \quad As(\text{tonnes}) = \sum \frac{Q (m^3/s) * C (g/l) * T (\text{secondes})}{1000}$$

Une valeur négative indique une sous-estimation, tandis que la valeur positive indique une surestimation par rapport à la valeur mesurée.

**Tableau 19: Les erreurs d'estimation les apports solides au niveau de la station de Béni Bahdel**

<b>Apport solides</b>	<b>Erreur(%)</b>
<b>Apport estimé (données confondues)</b>	3,45
<b>Apport des saisons</b>	- 5,76
<b>Automne</b>	-11,01
<b>Hiver</b>	-6,25
<b>Printemps</b>	-11,33
<b>Été</b>	9,37

#### 3.4.1 Échelle annuelle

Comme dans la plupart des cours d'eau, l'oued Sebdou a une bonne relation de puissance qui relie la concentration des matières solides en suspension au débit liquide (Figure 22). Le résultat de la modélisation des données annuelles est bonne qualité pour l'échantillon de calibration et pour l'échantillon de vérification (le R<sup>2</sup> Score entre la concentration des matières solides en suspension estimé à 0,85 (calibration) et 0,82 (validation)). Donc ce modèle donne des valeurs très proches à des valeurs mesurées.

#### 3.4.2 Échelle saisonnière

Afin d'étudier la réponse de bassin aux débits liquides et matières en suspension pendant l'année hydrologique, il était utile de regrouper les valeurs instantanées suivant les différentes saisons, et d'analyser la relation entre les débits liquides et la concentration des sédiments.

La représentation graphique des résultats (figure 22) permet les commentaires suivants :

À l'automne, Le résultat obtenu pour cette saison montre que le modèle de cette saison est bonne qualité pour la calibration et pour la vérification.

Les résultats obtenus pour des 3saisons (hiver, printemps, été) montrent que les modèles de ces saisons sont de qualité moyenne.

### **3.5 Conclusion**

Pour le bassin de l'oued Sebdou, le modèle en puissance par la méthode des classes des débits est représentatif pour la relation de La concentration des sédiments en suspension (C) en fonction débit liquide (Q) et plus proche de la réalité. Le coefficient de détermination le plus élevé est donné par le modèle automne et par le modèle à l'échelle annuelle, et l'utilisation du modèle à l'échelle annuelle est mieux adaptée.

**Chapitre 4 :**  
**Quantification du transport solide**

## 4. Quantification du transport solide

### 4.1 Introduction

Pour estimer le taux de sédimentation dans le bassin versant et l'évolution quantitative des processus du transport solide, nous utilisons des données obtenus dans le chapitre précédent.

### 4.2 Quantification par des méthodes empiriques

Il existe plusieurs formules permettant la quantification de l'érosion hydrique et qui permettant relient les facteurs qui causent l'érosion et ceux qui minimisent le phénomène. Parmi ces formules on cite :

#### Formule de la Sogréah

Basée sur les données de 30 bassins Algériens.

La formule est :  $ASS = \alpha * E^{0,15}$

Avec :

$E$  : Ecoulement annuel en (mm).

$ASS$  : Apport solide spécifique en ( $t/km^2/an$ ).

$\alpha$  : Coefficient dépendant de la perméabilité du sol, le bassin d'étude a une perméabilité moyenne.

Alors  $\alpha = 75$

$E = 112,32 \text{ mm}$ .

#### Formule de Fournier

$$ASS = \frac{1}{36} * \left(\frac{H^2}{S}\right)^{0,46} * \left(\frac{P_m^2}{P_{am}}\right)^{2,65}$$

Avec :

$ASS$  : Apport solide spécifique en ( $t/km^2/an$ ).

$H$  : Dénivelée moyenne (m),  $H = (H_{max} - H_{min}) \cdot 45\%$ .

$S$  : Surface du bassin versant ( $km^2$ ).

$P_m$  : Précipitation mensuelle du mois le plus arrosé (mm).

$P_{am}$ : Précipitation moyenne annuelle (mm).

On a:

$S = 255,5 \text{ km}$ .

$P_{am} = 423,31 \text{ mm}$  (Bahloul, 2012).

$P_m = 68 \text{ mm}$  (Bahloul, 2012).

$H = 349,65 \text{ m}$ .

Les résultats du calcul de la dégradation spécifique à l'aide des formules empiriques sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau 20: Valeurs de la dégradation spécifique**

Formule empirique	Sogréah	Fournier
$ASS \text{ (t/km}^2\text{/an)}$	150	268

### 4.3 Quantification par la modélisation

Pour estimer les apports solides en suspension, nous avons utilisé le modèle de la série complète

$$C \text{ (g/l)} = 0,905 * Q \text{ (m}^3\text{/s)}^{0,586}$$

Soit :

$$C_{mj} = a. Q_{mj}^b$$

$$\text{Et } Q_{smj} = C_{mj} \cdot Q_{mj}$$

$C_{mj}$  : Concentration moyen journalier (g/l),  $Q_{smj}$  : Débit solide moyen journalier (kg/s),  $Q_{mj}$  : Débit liquide moyen journalier (m<sup>3</sup>/s) et a et b : Coefficient d'ajustement du modèle.

$$As_{mj} = Q_{smj} * T$$

Avec,  $As_{mj}$ : Apport solide moyen journalier (Tonne),  $Q_{mj}$  : Débit solide moyen journalier (Kg/s) et  $T$  : temps (s).

L'apport solide mensuel est :

$$AS_{sm} = \sum_{i=1}^N AS_{mj}$$

: Apport solide mensuel (tonne),  $N$  : Nombre de jours dans le mois et  $As_{mj}$  : Apport solide  $As_{sm}$  journalier (tonne).

La quantité totale transportée annuellement est :

$$As_{sn} = \sum_{i=1}^{12} As_{sm}$$

Avec,  $As_{sn}$  : Apport solide annuel (tonne) et  $As_{sm}$  : Apport solide mensuel (tonne).

L'apport solide moyen interannuel est déterminé par la relation suivante :

$$As_{sinter} = \frac{\sum_{i=1}^N As_{sn}}{N}$$

Avec,  $As_{sinter}$  : Apport solide moyen interannuel (tonne),  $As_{sn}$  : Apport solide annuel (tonne) et  $N$  : Nombre d'années d'observations.

L'érosion spécifique moyenne ( $E_s$ ) d'un bassin versant est définie comme étant le rapport entre l'apport solide «  $A_s$  » et la surface «  $S$  » du bassin versant.

Soit :

$$E_s = \frac{A_s}{S}$$

#### 4.3.1 Variabilité interannuelle des apports solides

La quantification de l'apport solide interannuel et de l'érosion spécifique interannuelle donne une idée sur l'importance du transport solide et l'état de la dégradation du sol du bassin.

**Tableau 21 : Le Bilan annuel de l'apport solide (As) dans le bassin versant de l'oued Seb Dou durant la période 1972/73 à 2003/04**

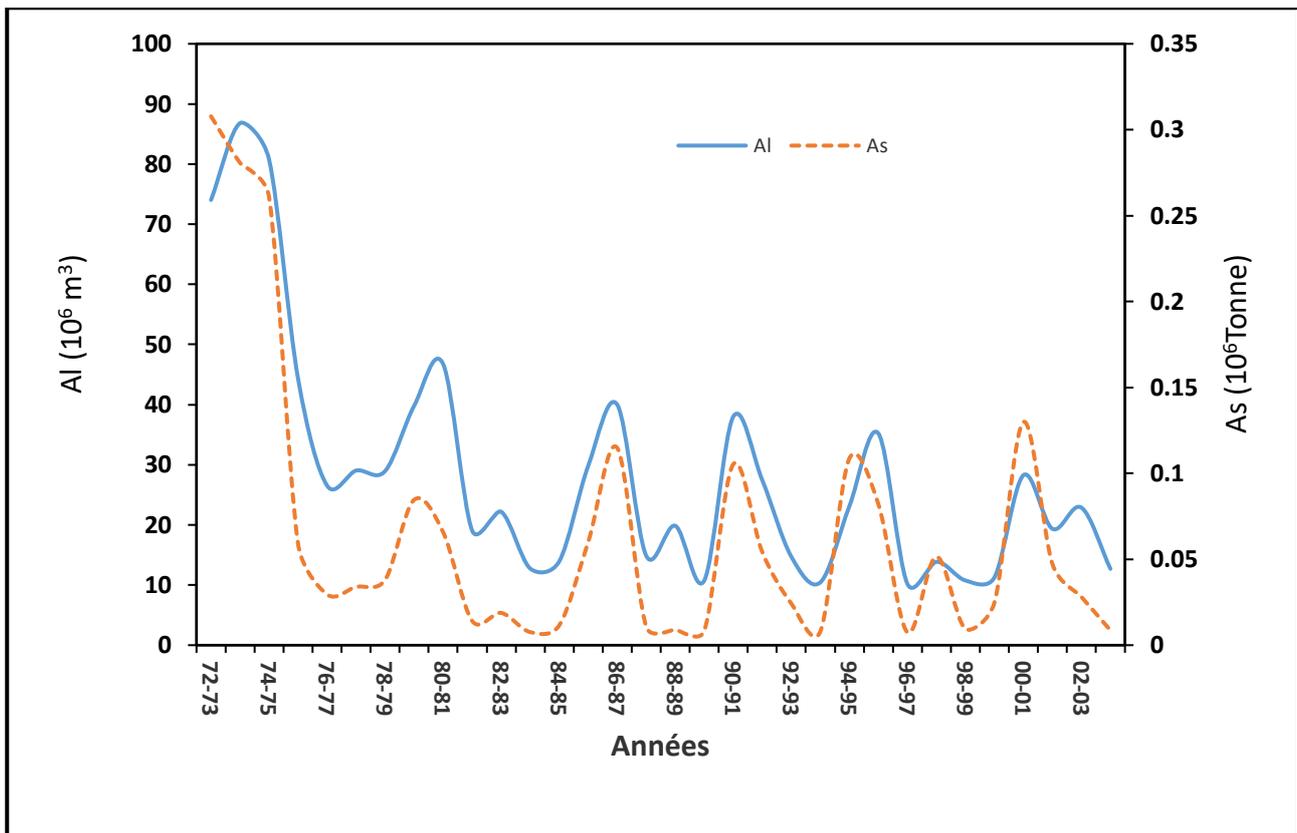
Année/Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Totale (T/an)
72-73	2046,41	2607,93	2860,92	2963,5	2898,3	16773,1	231630,0	34184	5506	2742	2044	1581	307837,16
73-74	1381,33	1525,4	1527,1	2503,54	2627,76	16209,55	159655,6	64679,61	13949,48	7356,39	5429,54	3856,96	280702,26
74-75	4085,45	4607,27	4368,47	3863,04	3749,39	16932,56	22473,55	166359,03	20163,81	6553,04	4134,39	3573,16	260863,16
75-76	2869,07	3290,41	2790,55	2776,14	2203,85	15533,61	8877,51	3997,71	11856,43	2242,61	1669,38	972,76	59080,03
76-77	838,83	904,77	1056,4	2740,94	12819,63	3788,23	1854,57	1181,22	1533,31	1366,04	749,04	670,17	29503,15
77-78	627,82	1001,35	1041,1	2187,3	12202,1	6325,2	2711,97	3250,75	1770,77	1176,18	722,48	929,24	33946,26
78-79	364,01	896,00	1287,07	1817,86	960,03	11707,48	14594,29	2708,14	1566,38	1118,37	535,77	417,28	37972,68
79-80	918,75	1145,72	4650,79	2735,64	3867,01	3838,11	58556,35	3168,01	2656,28	1388,8	925,93	751,3	84602,69
80-81	3409,03	959,9	1230,21	6542,13	23545,42	10611,18	6567,18	6425,93	2588,35	1569,22	1243,98	1092,72	65785,25
81-82	1043,04	1060,00	1100,77	1873,08	1313,2	1753,06	1775,47	1125,97	1133,92	1069,93	541,32	336,13	14125,89
82-83	414,57	999,22	2372,72	4068,16	4076,41	1874,92	1381,95	1140,89	1012,25	556,76	369,68	528,86	18796,39
83-84	556,03	735,41	573,38	1301,32	655,46	681,57	1003,62	556,47	640,88	474,68	228,11	211,73	7618,66
84-85	426,95	472,25	3950,25	1291,48	1929,08	848,44	655,53	469,61	806,34	292,42	222,66	161,02	11526,03
85-86	208,41	185,68	1059,16	1085,91	2478,1	39974,73	10259,23	2218,05	1019,22	738,12	495,83	382,57	60105,01
86-87	288,3	48136,83	1132,78	1396,55	1010,26	50305,98	6695,33	2007,53	1441,79	825,9	924,31	628,45	114794,01
87-88	1100,68	1171,21	1607,09	1686,96	1906,07	1077,77	514,1	421,53	403,23	339,19	250,7	227,03	10705,56
88-89	204,43	376,27	617,99	1398,87	731,38	554,11	623,82	1788,92	408,75	1565,29	570,63	189,54	9030,00
89-90	220,77	260,22	500,56	826,58	3839,15	611,24	2,93	591,75	1119,00	166,84	112,32	100,81	8352,17
90-91	9191,25	378,28	456,88	1370,61	835,52	2747,13	78000,4	8752,3	2110,75	785,74	423,35	241,9	105294,11
91-92	298,71	928,4	449,18	1154,3	648,19	542,56	3178,03	31913,11	11551,49	2011,61	764,77	751,76	54192,11
92-93	483,11	480,68	774,99	1228,61	866,76	595,62	719,53	477,61	18107,5	218,75	148,19	122,75	24224,1
93-94	145,92	170,23	312,53	841,02	1007,68	3468,84	608,36	299,04	208,71	123,11	434,26	340,82	7960,52
94-95	9836,46	2369,66	339,03	904,82	387,78	168,94	92730,34	621,02	942,67	143,91	61,72	100,83	108607,18
95-96	119,07	11047,73	352,09	708,12	11771,43	6713,04	21075,78	1713,96	2220,55	24777,98	1342,14	296,54	82138,43
96-97	388,22	530,2	460,17	1207,99	1227,06	654,06	296,6	548,37	84,81	23,44	16,5	2054,14	7491,56
97-98	46747,51	185,93	651,59	1518,13	348,72	774,34	175,37	144,41	315,61	244,44	88,14	310,13	51504,32
98-99	780,61	79,86	158,25	754,08	579,93	488,29	5349,11	514,8	233,8	157,57	114,22	169,09	9379,61
99-00	19402,31	1895,33	318,49	1142,68	740,13	184,13	201,77	230,78	177,86	131,35	151,76	147,37	24723,96
00-01	3094,88	89855,72	4166,62	1052,25	21415,9	5914,11	3704,95	260,5	278,66	101,63	38,11	28,58	129911,9
01-02	1866,92	32287,63	3396,91	796,44	274,23	312,26	534,23	43,55	653,96	309,45	297,01	6493,74	47266,33
02-03	365,79	3550,91	2539,46	1665,05	5294,95	5419,82	2735,54	842,52	589,58	209,67	66,58	4784,49	28064,36
03-04	698,31	751,54	1161,83	2142,72	640,25	770,17	421,21	239,72	968,24	402,86	234,05	216,42	8647,32
<b>Moyenne (Tonne/an)</b>	<b>3575,72</b>	<b>6714,00</b>	<b>1539,54</b>	<b>1860,81</b>	<b>4026,6</b>	<b>7129,82</b>	<b>23111,38</b>	<b>10714,9</b>	<b>3375,64</b>	<b>1911,98</b>	<b>792,21</b>	<b>1020,92</b>	<b>65773,51</b>

**Tableau 22: Le Bilan annuel de la dégradation spécifique (Es) dans le bassin versant de l'oued Sebdou durant la période 1972/73 à 2003/04**

Année/Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Totale (T/Km <sup>2</sup> /an)
72-73	8,01	10,21	11,2	11,6	11,34	65,65	906,58	133,79	21,55	10,73	8,00	6,19	1204,85
73-74	5,41	5,97	5,98	9,8	10,28	63,44	624,88	253,15	54,6	28,79	21,25	15,1	1098,65
74-75	15,99	18,03	17,1	15,12	14,67	66,27	87,96	651,11	78,92	25,65	16,18	13,98	1020,98
75-76	11,23	12,88	10,92	10,87	8,63	60,8	34,75	15,65	46,4	8,78	6,53	3,81	231,25
76-77	3,28	3,54	4,13	10,73	50,17	14,83	7,26	4,62	6,00	5,35	2,93	2,62	115,46
77-78	2,46	3,92	4,07	8,56	47,76	24,76	10,61	12,72	6,93	4,6	2,83	3,64	132,86
78-79	1,42	3,51	5,04	7,11	3,76	45,82	57,12	10,6	6,13	4,38	2,1	1,63	148,62
79-80	3,6	4,48	18,2	10,71	15,14	15,02	229,18	12,4	10,4	5,44	3,62	2,94	331,13
80-81	13,34	3,76	4,81	25,61	92,15	41,53	25,7	25,15	10,13	6,14	4,87	4,28	257,47
81-82	4,08	4,15	4,31	7,33	5,14	6,86	6,95	4,41	4,44	4,19	2,12	1,32	55,3
82-83	1,62	3,91	9,29	15,92	15,95	7,34	5,41	4,47	3,96	2,18	1,45	2,07	73,57
83-84	2,18	2,88	2,24	5,09	2,57	2,67	3,93	2,18	2,51	1,86	0,89	0,83	29,83
84-85	1,67	1,85	15,46	5,05	7,55	3,32	2,57	1,84	3,16	1,14	0,87	0,63	45,11
85-86	0,82	0,73	4,15	4,25	9,7	156,46	40,15	8,68	3,99	2,89	1,94	1,5	235,26
86-87	1,13	188,4	4,43	5,47	3,95	196,89	26,2	7,86	5,64	3,23	3,62	2,46	449,28
87-88	4,31	4,58	6,29	6,6	7,46	4,22	2,01	1,65	1,58	1,33	0,98	0,89	41,9
88-89	0,8	1,47	2,42	5,48	2,86	2,17	2,44	7,00	1,6	6,13	2,23	0,74	35,34
89-90	0,86	1,02	1,96	3,24	15,03	2,39	0,01	2,32	4,38	0,65	0,44	0,39	32,69
90-91	35,97	1,48	1,79	5,36	3,27	10,75	305,29	34,26	8,26	3,08	1,66	0,95	412,12
91-92	1,17	3,63	1,76	4,52	2,54	2,12	12,44	124,9	45,21	7,87	2,99	2,94	212,09
92-93	1,89	1,88	3,03	4,81	3,39	2,33	2,82	1,87	70,87	0,86	0,58	0,48	94,81
93-94	0,57	0,67	1,22	3,29	3,94	13,58	2,38	1,17	0,82	0,48	1,7	1,33	31,15
94-95	38,5	9,27	1,33	3,54	1,52	0,66	362,94	2,43	3,69	0,56	0,24	0,39	425,07
95-96	0,47	43,24	1,38	2,77	46,07	26,27	82,49	6,71	8,69	96,98	5,25	1,16	321,48
96-97	1,52	2,08	1,8	4,73	4,8	2,56	1,16	2,15	0,33	0,09	0,06	8,04	29,32
97-98	182,9	0,73	2,55	5,94	1,36	3,03	0,69	0,57	1,24	0,96	0,34	1,21	201,58
98-99	3,06	0,31	0,62	2,95	2,27	1,91	20,94	2,01	0,92	0,62	0,45	0,66	36,72
99-00	75,94	7,42	1,25	4,47	2,9	0,72	0,79	0,9	0,7	0,51	0,59	0,58	96,77
00-01	12,11	351,7	16,31	4,12	83,82	23,15	14,5	1,02	1,09	0,4	0,15	0,11	508,47
01-02	7,31	126,4	13,3	3,12	1,07	1,22	2,09	0,17	2,56	1,21	1,16	25,42	185,00
02-03	1,43	13,9	9,94	6,52	20,72	21,21	10,71	3,3	2,31	0,82	0,26	18,73	109,85
03-04	2,73	2,94	4,55	8,39	2,51	3,01	1,65	0,94	3,79	1,58	0,92	0,85	33,86
<b>Moyenne (T/Km<sup>2</sup>/an)</b>	<b>14,00</b>	<b>26,28</b>	<b>6,03</b>	<b>7,28</b>	<b>15,76</b>	<b>27,91</b>	<b>90,46</b>	<b>41,94</b>	<b>13,21</b>	<b>7,48</b>	<b>3,1</b>	<b>4,00</b>	<b>257,43</b>

**Tableau 23: Présente le Bilan annuel de la dégradation spécifique (Es), l'apport solide (As), la concentration de sédiment en suspension (C) et l'apport liquide (Al) dans le bassin versant de l'oued Sebdou durant la période 1972/73 à 2003/04**

<b>Année</b>	<b>Ass (T/Km<sup>2</sup>/an)</b>	<b>As (10<sup>6</sup>T)</b>	<b>C (g/l)</b>	<b>Al (10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>)</b>
72-73	1204,8	0,3078	4,16	74,03
73-74	1098,6	0,2807	3,23	86,81
74-75	1021,0	0,2609	3,23	80,79
75-76	231,2	0,0591	1,33	44,34
76-77	115,5	0,0295	1,11	26,54
77-78	132,9	0,0339	1,17	29,03
78-79	148,6	0,0380	1,31	28,95
79-80	331,1	0,0846	2,13	39,80
80-81	257,5	0,0658	1,41	46,75
81-82	55,3	0,0141	0,74	19,05
82-83	73,6	0,0188	0,85	22,19
83-84	29,8	0,0076	0,60	12,75
84-85	45,1	0,0115	0,83	13,92
85-86	235,2	0,0601	2,02	29,82
86-87	449,3	0,1148	2,87	40,00
87-88	41,9	0,0107	0,72	14,86
88-89	35,3	0,0090	0,45	19,86
89-90	32,7	0,0084	0,78	10,74
90-91	412,1	0,1053	2,77	38,01
91-92	212,1	0,0542	1,98	27,43
92-93	94,8	0,0242	1,65	14,72
93-94	31,2	0,0080	0,76	10,44
94-95	425,1	0,1086	4,71	23,08
95-96	321,5	0,0821	2,33	35,22
96-97	29,3	0,0075	0,73	10,21
97-98	201,6	0,0515	3,72	13,86
98-99	36,7	0,0094	0,87	10,76
99-00	96,8	0,0247	2,20	11,26
00-01	508,5	0,1299	4,60	28,26
01-02	185,0	0,0473	2,44	19,35
02-03	109,8	0,0281	1,23	22,87
03-04	33,8	0,0086	0,68	12,69



**Figure 23: Variation interannuelle des apports liquides et solides**

L'analyse graphique de la figure montre une certaine similarité entre l'apport solide et l'apport liquide, avec une grande fluctuation entre les contributions solides d'une année à l'autre (une grande irrégularité), en raison des différentes conditions géomorphologiques (les précipitations, les pentes et l'occupation du sol...etc.).

La valeur du coefficient de corrélation entre la concentration de sédiments (C) et le débit de liquide (Q) est égale à 0,85. Cette relation considérée comme assez forte avec une erreur d'estimation de 3,45%.

La dégradation spécifique annuelle moyenne est égale à 257,43 T/km<sup>2</sup>/an selon la méthode des données confondues. Cela correspond à un écoulement moyen de 0,91m<sup>3</sup>/s.

Nous notons que 21% des valeurs des apports solide (à l'échelle annuelle) dépassent la moyenne annuelle. La charge solide la plus élevée est observée pendant l'année 1972/73 avec 0,31.10<sup>6</sup> tonnes (1204,8T/km<sup>2</sup>/an) correspond à un apport liquide de 74,03 millions de m<sup>3</sup>. Nous remarquons que les années 1972/73, 1973/74 et 1974/75 ont été les principaux fournisseurs en l'apport solide, ont fourni 40% de l'apport solide total pour la période de 32 ans. Le plus faible apport solide est enregistré pendant l'année 1996/97 avec 0,75.10<sup>8</sup> tonnes (29,3T/km<sup>2</sup>/an) correspond à un apport liquide de 10,21 millions de m<sup>3</sup>.

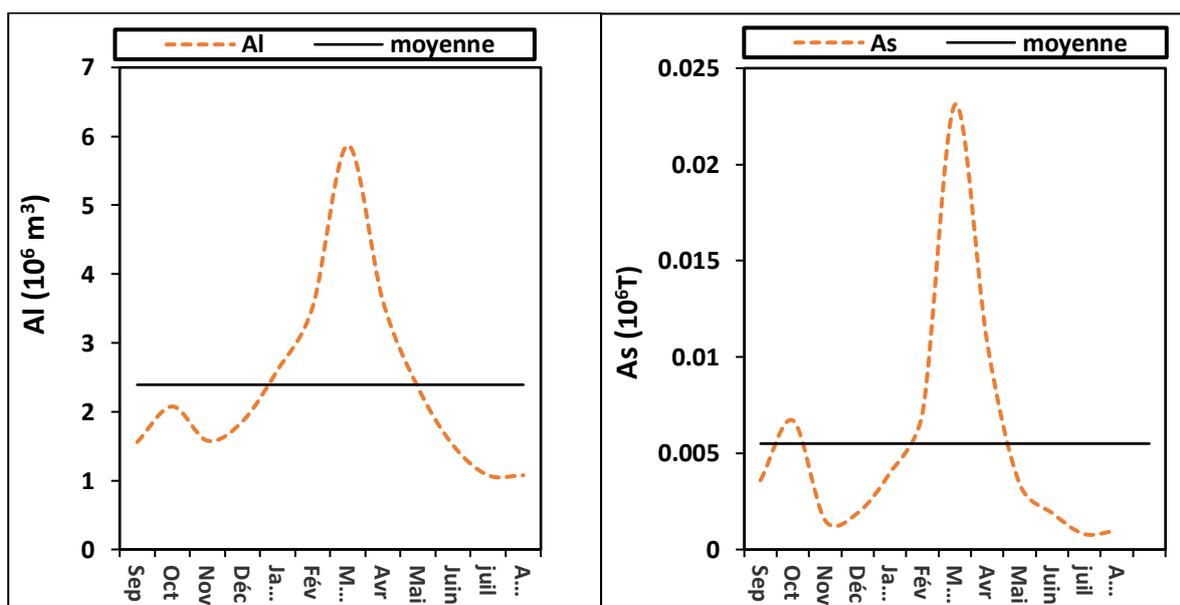
Si nous voulons comparer ce résultat avec les résultats des formules empiriques, nous constatons que la valeur de la dégradation spécifique calculée par la formule de Fournier est la plus proche de celle basée sur la relation C-Q, et la surestimation ou la sous-estimation de la dégradation spécifique à l'aide des autres formules empiriques (Sogréah, Fournier) n'est pas élevée. Cependant, l'utilisation de mesures de concentration est le moyen le plus précis d'évaluer l'érosion hydrique du bassin versant.

### 4.3.2 Variabilité mensuelle des apports solides

Tableau, présente le Bilan mensuel des dégradations spécifiques (Es), les apports solides (As), les concentrations de sédiments en suspension (C) et les apports liquides (Al) dans le bassin versant d'Oued Sebdou durant la période 1972/73 à 2003/04 :

**Tableau 24: Bilan mensuel des dégradations spécifiques (Es), les apports solides (As), les concentrations de sédiments en suspension (C) et les apports liquides (Al) dans le bassin versant d'Oued Sebdou durant la période 1972/73 à 2003/04**

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Es(T/Km <sup>2</sup> /mois)	13,99	26,28	6,03	7,28	15,76	27,91	90,38	41,93	13,21	7,48	3,10	4,00
As (10 <sup>6</sup> T)	0,0036	0,0067	0,0015	0,0019	0,0040	0,0071	0,0231	0,0107	0,0034	0,0019	0,0008	0,0010
C (g/l)	0,56	0,64	0,64	0,69	0,81	0,99	1,15	0,90	0,75	0,59	0,49	0,48
Al (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	1,56	2,08	1,58	1,86	2,61	3,52	5,87	3,61	2,35	1,51	1,08	1,08



**Figure 24: Variation mensuelle des apports solides et liquides.**

La dégradation spécifique mensuelle moyenne est égale à 21,5 T/km<sup>2</sup> (données confondues). La valeur de dégradation spécifique (à l'échelle mensuelle) la plus élevée est observée (début de printemps) en mois de mars avec 90,38 T/km<sup>2</sup>. Cela est dû à l'importance des crues de ce mois et la plus faible valeur est enregistrée en mois de juillet avec 3,1 T/km<sup>2</sup> se caractérise d'un faible apport liquide.

La variation mensuelle des apports solides et liquides permet de prendre en compte trois périodes :

- La période d'érosion minimale, caractérisée par de faibles apports de liquides et solides lorsque sont inférieurs à la moyenne mensuelle. Allant de juin à décembre sauf le mois d'octobre.
- La période d'érosion maximale, caractérisée par de forts apports liquides et solides. Elle se situe aux mois de février, mars et avril (représentant la fin de l'hiver et le début du printemps) et mois d'octobre (caractérisé par de faible apport liquide et fort apport solide). La majeure partie du transport solide est enregistrée pendant cette période
- La période intermédiaire caractérisée par de forts apports liquides et de faibles apports solides. Elle se situe aux mois de janvier et mai

### 4.3.3 Variabilité saisonnière des apports solides

L'analyse des Figures 25 et 26 montre que la saison de printemps contribue en moyenne de 43,36 % de liquide annuel et 56,62 % de l'apport solide annuel. La somme des apports solides mensuels de Décembre à Mai représente 76,41 % de l'apport solide annuel, Tandis que l'automne avec 17,96 %, quant à l'été par un apport solide de 5,63%.

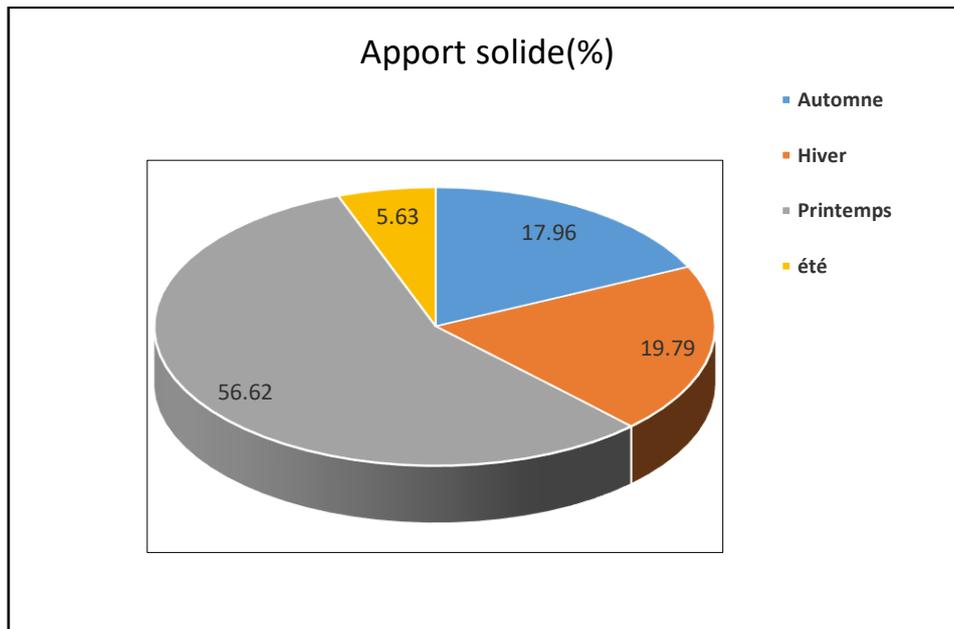


Figure 25: Variation saisonnière de l'apport solide (%)

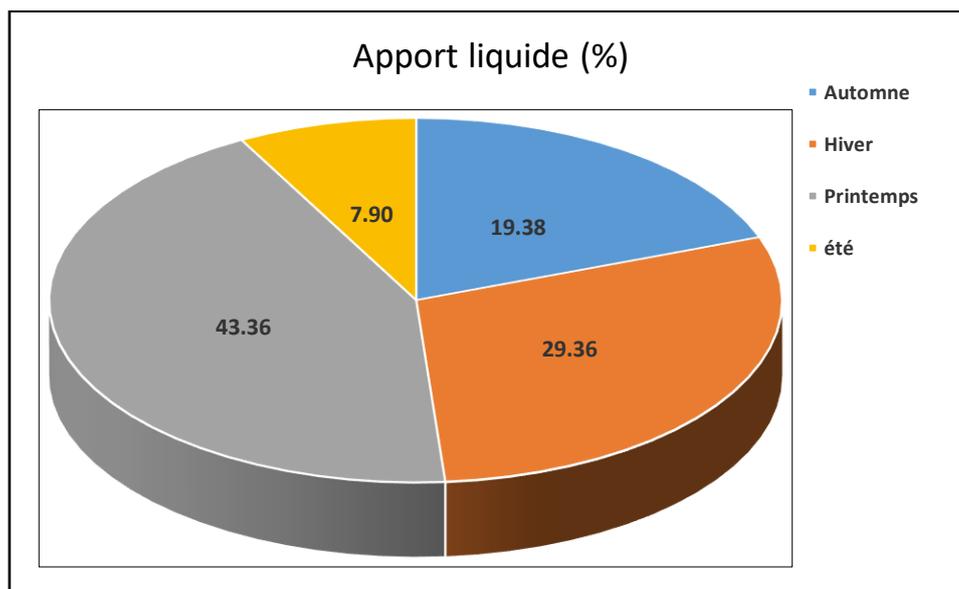


Figure 26: Variation saisonnière de l'apport liquide (%)

#### 4.4 Corrélation entre l'érosion spécifique et l'apport liquide annuel

On procède à la conception du modèle de régression entre l'apport liquide annuel  $Al$  ( $m^3$ ) et l'érosion spécifique annuelle  $Es$  ( $T/Km^2/an$ ).

La série de données a été décomposée en deux groupes, le premier contenant 66% est destiné à l'apprentissage du modèle, et 33% pour la validation des résultats du modèle. Les résultats obtenus sont les suivants :

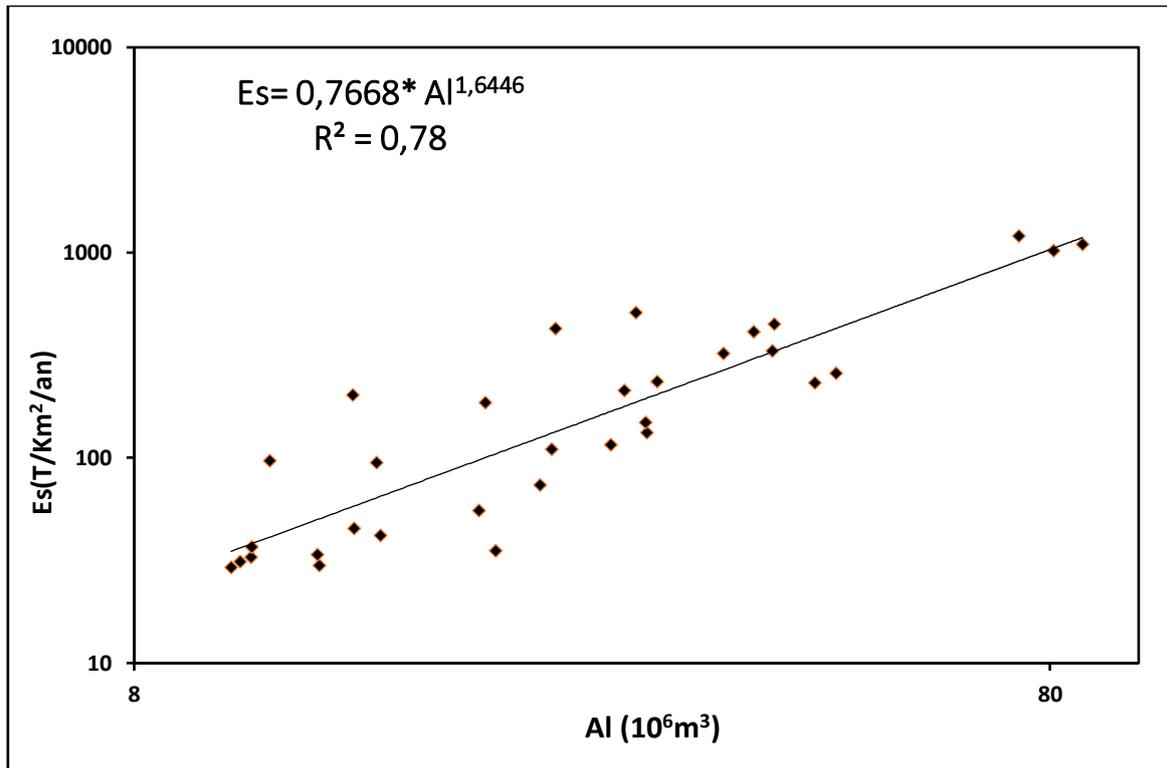


Figure 27: Le modèle entre l'érosion spécifique et l'apport liquide annuel

Tableau 25: Valeurs de a et b des équations utilisées, et coefficient de corrélation  $R^2$  des différents modèle de  $Es=f(Al)$

	a	b	$R^2_{\text{Calibration}}$	$R^2_{\text{Validation}}$
Equation du modèle :	0,7668	1,6446	0,78	0,87
	$Es(T/Km^2/an) = 0,7668 * Al (10^6 m^3)^{1,6446}$			

#### 4.5 Estimation des apports solide probables

Un ajustement des données du transport solide à une loi de distribution de fréquence théorique est réalisé. Les apports solides annuels suivent la distribution statistique de loi normale.

Nous allons effectuer le test de Kolmogorov-Smirnov au seuil de 5% pour décider si la distribution de l'échantillon est en adéquation avec la loi normale. Voici le détail des calculs :

<b>Interprétation du test :</b>
<b>H<sub>0</sub> : L'échantillon suit une loi Normale</b>
<b>H<sub>a</sub> : L'échantillon ne suit pas une loi Normale</b>

F<sub>n</sub>(x) : fonction de répartition empirique.

F(x) : fonction de répartition théorique.

*Différence* = |Fn(x) – F(x) |

**Tableau 26: le test de Kolmogorov-Smirnov**

As (tonne)	Rang	F <sub>N</sub> (x)	F(x)	Différence
7491,56	1	0,016	0,231793	0,216
7618,66	2	0,047	0,23228	0,185
7960,52	3	0,078	0,234	0,155
8352,17	4	0,109	0,235	0,126
8647,32	5	0,141	0,236	0,096
9030	6	0,172	0,238	0,066
9379,61	7	0,203	0,239	0,036
10705,56	8	0,234	0,244	0,010
11526,03	9	0,266	0,248	0,018
14125,89	10	0,297	0,258	0,039
18796,39	11	0,328	0,277	0,051
24224,1	12	0,359	0,301	0,059
24723,96	13	0,391	0,303	0,088
28064,36	14	0,422	0,318	0,104
29503,15	15	0,453	0,324	0,129
33946,26	16	0,484	0,344	0,140
37972,68	17	0,516	0,363	0,152
47266,33	18	0,547	0,408	0,139
51504,32	19	0,578	0,429	0,149
54192,11	20	0,609	0,442	0,167
59080,03	21	0,641	0,466	0,174
60105,01	22	0,672	0,472	0,200
65785,25	23	0,703	0,500	0,203
82138,43	24	0,734	0,582	0,153
84602,69	25	0,766	0,594	0,172
105294,11	26	0,797	0,690	0,106
108607,18	27	0,828	0,705	0,123
114794,01	28	0,859	0,731	0,128
129911,9	29	0,891	0,790	0,101

260863,16	30	0,922	0,993	0,071
280702,26	31	0,953	0,997	0,043
307837,16	32	0,984	0,999	0,014

La distance de Kolmogorov-Smirnov est le plus grand des écarts en valeur absolue. On trouve ici  $D_N = 0,216$

La table de Kolmogorov-Smirnov pour  $n = 32$  au seuil  $\alpha = 0,05$  donne la valeur critique  $0,235$ .

Puisque  $0,216 < 0,235$  on accepte l'hypothèse  $H_0$ .

**Tableau 27: Ajustements des apports solide annuel à une loi normale**

As (tonne)	Rang	F	Z	As (Tonne)	rang	F	Z
7491,56	1	0,016	-2,154	37972,68	17	0,516	0,039
7618,66	2	0,047	-1,676	47266,33	18	0,547	0,118
7960,52	3	0,078	-1,418	51504,32	19	0,578	0,197
8352,17	4	0,109	-1,230	54192,11	20	0,609	0,278
8647,32	5	0,141	-1,078	59080,03	21	0,641	0,360
9030	6	0,172	-0,947	60105,01	22	0,672	0,445
9379,61	7	0,203	-0,831	65785,25	23	0,703	0,533
10705,56	8	0,234	-0,725	82138,43	24	0,734	0,626
11526,03	9	0,266	-0,626	84602,69	25	0,766	0,725
14125,89	10	0,297	-0,533	105294,11	26	0,797	0,831
18796,39	11	0,328	-0,445	108607,18	27	0,828	0,947
24224,1	12	0,359	-0,360	114794,01	28	0,859	1,078
24723,96	13	0,391	-0,278	129911,9	29	0,891	1,230
28064,36	14	0,422	-0,197	260863,16	30	0,922	1,418
29503,15	15	0,453	-0,118	280702,26	31	0,953	1,676
33946,26	16	0,484	-0,039	307837,16	32	0,984	2,154
Droite d'Henry $As = 79516,33 * Y + 65773,5$							

$F = \frac{(r-0,5)}{N}$  Avec  $N$  : le nombre total d'individus dans l'échantillon.

$$Y = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$

Avec,

$F$  : Fréquence expérimentale.

$N$  : le nombre total d'individus dans l'échantillon.

$Y$  : Variable réduite.

$\bar{x}$  : La moyenne de l'échantillon.

s : L'écart-type de l'échantillon.

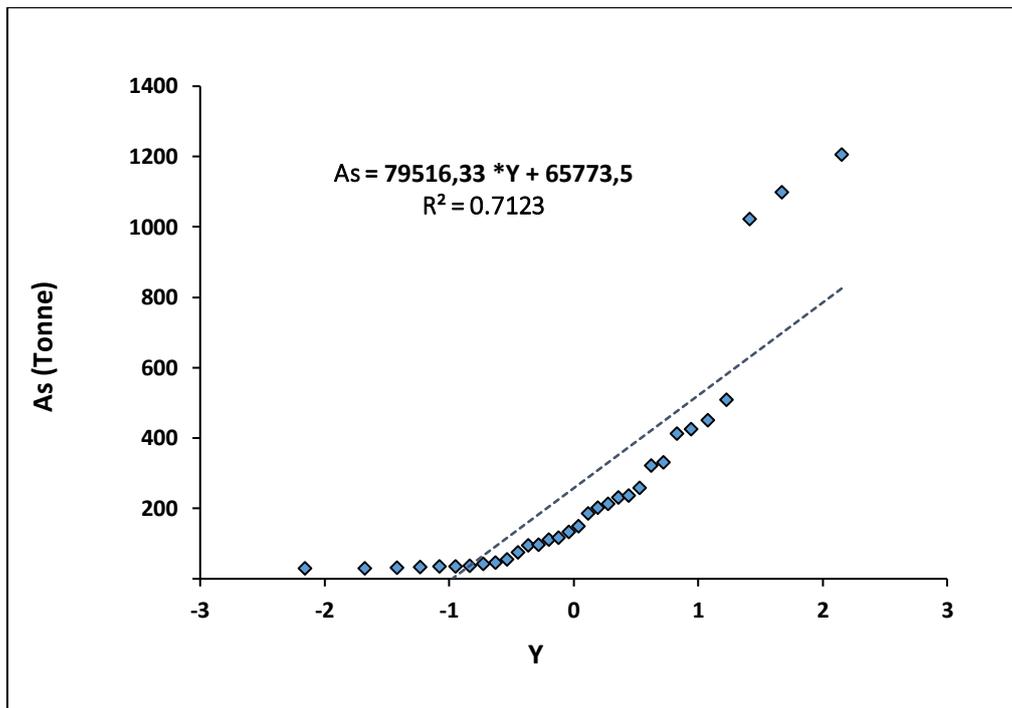


Figure 28: Ajustement graphique de la série de l'apport solide annuel de l'oued Sebdu

Tableau 28: Valeurs des apports solides pour des périodes de récurrences données

période (ans)	2	10	20	100	1000
F	0,5	0,9	0,95	0,99	0,999
As (Tonne)	65773,51	167677,78	196566,23	250756,15	311497,44

#### 4.6 Estimation d'érosion spécifique probable

Un ajustement des données d'érosions spécifiques à une loi de distribution de fréquence théorique est réalisé. Les érosions spécifiques annuelles suivent la distribution statistique de loi normale.

Nous allons effectuer le test de Kolmogorov-Smirnov au seuil de 5% pour décider si la distribution de l'échantillon est en adéquation avec la loi normale. Voici le détail des calculs :

Interprétation du test :
H0 : L'échantillon suit une loi Normale
Ha : L'échantillon ne suit pas une loi Normale

$F_N(x)$  : fonction de répartition empirique.

$F(x)$  : fonction de répartition théorique.

$Différence = |F_N(x) - F(x)|$ .

**Tableau 29: le test de Kolmogorov-Smirnov**

<b>Es (T/Km<sup>2</sup>/an)</b>	<b>Rang</b>	<b>F<sub>N</sub>(x)</b>	<b>F(x)</b>	<b>différence</b>
29,32	1	0,016	0,231790	0,216
29,83	2	0,047	0,23229	0,185
31,15	3	0,078	0,234	0,155
32,69	4	0,109	0,235	0,126
33,86	5	0,141	0,236	0,096
35,34	6	0,172	0,238	0,066
36,72	7	0,203	0,239	0,036
41,9	8	0,234	0,244	0,010
45,11	9	0,266	0,248	0,018
55,3	10	0,297	0,258	0,039
73,57	11	0,328	0,277	0,051
94,81	12	0,359	0,301	0,059
96,77	13	0,391	0,303	0,088
109,85	14	0,422	0,318	0,104
115,46	15	0,453	0,324	0,129
132,86	16	0,484	0,344	0,140
148,62	17	0,516	0,363	0,152
185	18	0,547	0,408	0,139
201,58	19	0,578	0,429	0,149
212,09	20	0,609	0,442	0,167
231,25	21	0,641	0,466	0,174
235,26	22	0,672	0,472	0,200
257,47	23	0,703	0,500	0,203
321,48	24	0,734	0,582	0,153
331,13	25	0,766	0,594	0,172
412,12	26	0,797	0,690	0,106
425,07	27	0,828	0,705	0,123
449,28	28	0,859	0,731	0,128
508,47	29	0,891	0,790	0,101
1020,98	30	0,922	0,993	0,071
1098,65	31	0,953	0,997	0,043
1204,85	32	0,984	0,999	0,014

La distance de Kolmogorov-Smirnov est le plus grand des écarts en valeur absolue. On trouve ici  $D_N = 0,216$

La table de Kolmogorov-Smirnov pour  $n = 32$  au seuil  $\alpha = 0,05$  donne la valeur critique 0,235.

Puisque  $0,216 < 0,235$  on accepte l'hypothèse  $H_0$ .

Tableau 30: Ajustements de la dégradation spécifique annuelle à une loi normale

Es(T/Km <sup>2</sup> /an)	Rang	F	Z	Es (T/Km <sup>2</sup> /an)	rang	F	Z
29,32	1	0,016	-2,154	148,62	17	0,516	0,039
29,83	2	0,047	-1,676	185	18	0,547	0,118
31,15	3	0,078	-1,418	201,58	19	0,578	0,197
32,69	4	0,109	-1,230	212,09	20	0,609	0,278
33,86	5	0,141	-1,078	231,25	21	0,641	0,360
35,34	6	0,172	-0,947	235,26	22	0,672	0,445
36,72	7	0,203	-0,831	257,47	23	0,703	0,533
41,9	8	0,234	-0,725	321,48	24	0,734	0,626
45,11	9	0,266	-0,626	331,13	25	0,766	0,725
55,3	10	0,297	-0,533	412,12	26	0,797	0,831
73,57	11	0,328	-0,445	425,07	27	0,828	0,947
94,81	12	0,359	-0,360	449,28	28	0,859	1,078
96,77	13	0,391	-0,278	508,47	29	0,891	1,230
109,85	14	0,422	-0,197	1020,98	30	0,922	1,418
115,46	15	0,453	-0,118	1098,65	31	0,953	1,676
132,86	16	0,484	-0,039	1204,85	32	0,984	2,154

**Droite d'henry :  $Es = 311,29*Y + 257,43$**

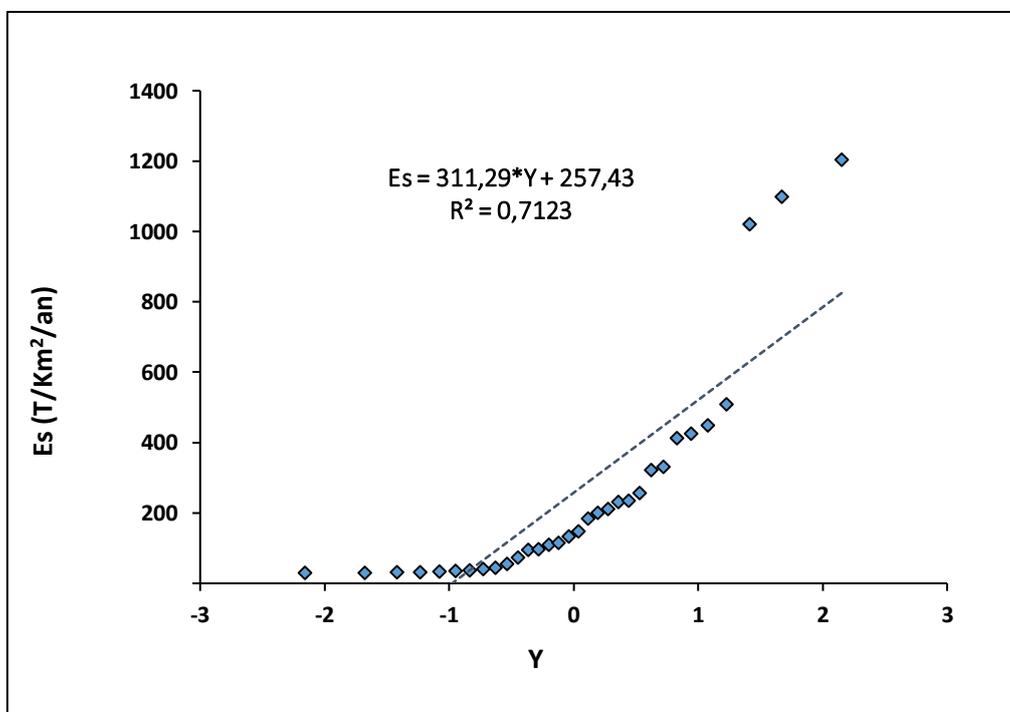


Figure 29: Ajustement graphique de la série de la dégradation spécifique annuel d'oued Sebdu

**Tableau 31: Valeurs des dégradations spécifiques estimées pour des périodes de récurrences données**

<b>période (ans)</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>100</b>	<b>1000</b>
<b>F</b>	0,500	0,900	0,950	0,990	0,999
<b>Es (T/Km<sup>2</sup>/an)</b>	257,43	656,28	769,34	981,43	1219,17

#### **4.7 Conclusion**

Sur la base des mesures de matières en suspension enregistrées pendant 32 ans (1972-2004) dans l'exutoire du bassin versant de l'oued Sebdou et la modélisation par la méthode des régressions, nous avons estimé la dégradation spécifique annuelle moyenne à environ 257T/km<sup>2</sup>/an.

L'évaluation des apports solides indique que les quantités de transports solides plus importantes sont évacuées pendant la saison de printemps, plus particulièrement à mars et avril.

L'ajustement de la distribution du transport solide en suspension permet de faire des estimations correctes des apports probables pour différentes période de retour sur le bassin versant.

## Conclusion générale

Dans cette étude, l'érosion a été estimée dans le bassin d'oued Sebdou dans le nord-ouest Algérienne. Le fonctionnement hydro sédimentaire de ce bassin a révélé que la dégradation spécifique estimée pour le bassin d'oued Sebdou ont été de 257,43 t/km<sup>2</sup>/an. A l'échelle saisonnière, les contributions enregistrées ont donné 19,79% pour l'hiver et 56,62 % pour le printemps. La série de données à notre disposition sont généralement lacunaires et la quantification du transport solide nous a mené à utiliser des corrélations de régression. La relation liant les débits liquides à la concentration des en suspension est de type puissance ( $C=aQ_L^b$ ) par la méthode du classe des débits. L'amélioration de ce modèle empirique, souvent utilisé dans l'estimation de la charge solide en suspension mais entaché d'erreurs nous a conduit à proposer un nouveau modèle qui s'adapte mieux aux variations des débits liquides et solides. Le modèle en classe de débits testé à différentes échelles temporelles dans le bassin d'étude a donné des valeurs satisfaisantes des critères d'évaluation  $R^2$  (coefficient de détermination) et E (erreur relative).

Elle est élevée et dépasse les limites autorisées, avec une limite globale de 25 à 120 T/km<sup>2</sup>/an, indiquant que ces chiffres sont élevés pour ce bassin. Comme la formation des sols est lente en plus des processus de végétation vandale.

Ce qui nécessite d'accélérer les plans de conservation des sols dans cette région, ce qui garantit la durabilité de l'agriculture et la protection des eaux de surface contre les effets négatifs de l'érosion. Les résultats ont montré une corrélation entre les modèles étudiés (empirique et par la méthode des classes des débits) pour estimer la dégradation spécifique.

Nécessite encore plus de recherches en hydrologie et son impact sur les processus d'érosion hydrique.

## Bibliographie

- Achite M et Ouillon S. 2007.** Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1995). *Journal of hydrology*, 343: 187-202.
- 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.
- Bouanani, A., 2004.** Hydrologie, Transport solide et Modélisation : Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie). Thèse de doctorat d'état en géologie appliquée, Université de Tlemcen, 250 p.
- Bouguerra, S., 2014.** Quantification et modélisation du transport solide dans un cours d'eau de l'Algérie septentrionale : cas du bassin versant de l'oued Boumessaoud (Tlemcen).
- Bravard, J. P., Pettit, F. 2000.** Les cours d'eau : dynamique du système fluvial. Paris Colin, 2e édition, 222 p.
- Demmak, A., 1984.** Recherche d'une relation empirique entre apports solides spécifiques et paramètres physico-climatiques des bassins : application au cas Algérien. *Challenges in African hydrology and water resources. IAHS pub*, 144: 403-414.
- Ghenim, A., 2008.** Etude des écoulements et des transports solides dans les régions semi-arides méditerranéennes. Thèse de Doctorat université de Tlemcen, 134 p.
- Jansson, M., 1985.** A Comparison of detransformed logarithmic regressions and power function regressions. *Geografiska Annaler .Series A, Physical Geography*, 67A (1-2): 61-70.
- Khanchoul, K., 2006.** Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains versants de l'extrême Nord-Est Algérien.
- Khanchoul, K., Jansson, M., 2008.** Sediment rating curves developed on stage and seasonal means in discharge classes for the Mellah Wadi, Algeria. *Swedish society for anthropology and geography*, 90 a (3): 227-236.
- Larfi, B., Remini, B., 2006.** Le transport solide dans le bassin versant de l'oued Isser impact sur l'envasement du barrage de Béni Amrane (Algérie). *Larhyss journal*, 5: 6373.
- Lefkir, A. 2009.** Modélisation du transport solide par les modèles neuroflous. Thèse de doctorat de l'ENP d'Alger, 164p.
- MEGNOUNIF A. 2007.** Étude du transport des sédiments en suspension dans les écoulements de surface. Thèse de Doctorat, Univ. Tlemcen, Algérie.
- Megnounif A., Terfous A. Et Bouanani A., 2003.** Production et transport des matières en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (Nord-Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau*, 16 (3): 369-380.
- Moatar, F., Coyne, A., Etcheber, H., Ludwig, W., Néméry, J. et Mano, V., 2007.** Evaluation des flux de MES à partir des suivies discrets : méthodes de calcul et incertitudes. SHF : transport solide et gestion des sédiments en milieux naturels et urbains. Lyon, 28-29 novembre 2007, 8 p.
- Musy, A., Higy, C., 2003.** Hydrologie : une science de la nature. Presse polytechniques et universitaires romandes, 314 p.

**OMM, 1994.** Organisation météorologique mondiale .Guide des Pratiques d'hydrologie, 829 p.

**Radjah, S. (2017).** Modélisation du Transport solide par le modèle S.W.A.T (Application sur le Bassin versant des Issers). Mémoire de PFE d'ingénieur d'état en Hydraulique, ENP d'Alger.

**Rullan-Perchirin, F. (1989).** Les mouvements de masse dans le bassin-versant du Rhumel constantinois : essai méthodologique. Travaux de l'Institut de Géographie de Rheims

**Terfous A, MEGNOUNIF A et BOUANANI A,2001.** Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). Revue des sciences de l'eau, 14 (2) : 173185.

**Tourki, M., (2009).** Etude de l'érosion et du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Kébir Est Nord-Est Algérien. Mémoire de Magister de l'Université Badji Mokhtar Annaba, 137pages.

**Van Rijn, L C. 1993.** Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal sea. Aqua publications. Netherlands, 386 p.

**Walling, D. E., Webb, B. E., 1988.** The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield: some further comments. Sediment budgets (Proceedings of the portoalegre symposium). IAHS publication, 174: 337-350.

**Walling, D. E., Webb, B. W. 1996.** Erosion and sediment yield: a global overview. IAHS publication, 236, 94 p.

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

نحال ابراهيم الغطاء النباتي وحفظ التربة، منشورات جامعة حلب، الجمهورية العربية السورية. 1996. 341 صفحة