

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –



كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie



قسم الري

Département de L'Hydraulique

*Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master*

*En Hydraulique*

*Spécialité : hydro-informatique.*

**Thème**

Estimation de l'envasement du barrage

Béni-Bahdel par le modèle PISA

Présenté Par : **SALAH Fatima Zohra** ET **BENSAFI Asma**

Soutenu le : /06 / 2017, devant le jury composé de :

**Mr CHERIF Z**

Maitre assistant A

Président

**Mr MEGNOUNIF A.**

Professeur

Examineur

**Mlle FANDI W**

Maitre assistant A

Examinatrice

**Mr BOUANANI A.**

Professeur

Encadreur

**Mme BABA HAMED K.**

Maitre de conférences A

Co-encadreur

2016/2017

# REMERCIEMENT

Mon binôme et moi-même nous louons Dieu le tout puissant qui nous a ouvert la voie de la vérité et du savoir.

Nous avons une pensée pieuse et révérencieuse envers nos parents qui ne nous ont jamais ménagé leur disponibilité, leur aide et leur amour.

Nous remercions très vivement Mr et Mme BOUANANI qui ont bien voulu nous encadrer et nous dispenser leur science et leurs conseils.

-Mlle BENJEMAA Lina grâce à laquelle nous avons percé les secrets du logiciel informatique ARCGIS.

-Mlle GHRISSI Radia qui nous a fourni les cartes MNT.

-Mr BELKASSEM Boubaker chef d'exploitation du barrage du Béni-Bahdel qui nous a guidé dans nos recherches des données « levé bathymétrique ».

-la direction des forêts pour nous avoir permis de consulter utilement la carte d'occupation du sol.

Enfin tous nos remerciements également à Mr le président et les membres de jury d'avoir bien voulu nous consacrer de leur temps ô combien précieux

## RÉSUMÉ

Le présent travail a pour objet d'estimer l'envasement du barrage Béni-Bahdel atteint durant la période (1945-2011), à travers l'application du modèle PISA.

Le modèle PISA est basé sur des paramètres climatiques, physiques et morphologiques, ces paramètres ont été élaborés par le truchement des outils de modélisation hydrologiques proposés dans la boîte à outils de l'extension Arcgis, ces outils nous ont également servis à délimiter le bassin versant du barrage Béni-Bahdel, à le diviser en deux sous bassins Sebdou et Khemis et à extraire leur réseaux hydrographiques.

Le bassin versant de Béni-Bahdel a produit  $71.75Hm^3$  de vase calculée par le modèle PISA durant la période (1945-2011). La validation du modèle est réalisée tout en comparant les résultats de ce dernier par rapport au levé bathymétrique, au modèle de Sogreah et à l'apport solide de l'oued Sebdou.

**Mots clés : barrage béni Bahdel-I 'envasement-modele PISA**

## ABSTRACT

The purpose of this work is to estimate sedimentation of dam Béni-Bahdel arched during the period (1945-2011) through the application of the PISA model.

The PISA model is based on physical, morphological and climatic parameters.

The morphological and physical parameters were developed by means of hydrological modeling tools proposed in the toolbox of the ArcGIS extension. These tools have also helped us to delimit the watershed of Béni-Bahdel dam, to divide it into two sub-basins Sebdou and Khemis River and to extract their hydrographic networks.

The Béni-Bahdel basin produced  $71.75Hm^3$  of silt estimated by the PISA model during the period (1945-2011).

The validation of PISA model is carried out while comparing its results with the bathymetric survey, the SOGREAH model and with the sediment field of Sebdou River.

**Key words:** Béni Bahdel dam - Sedimentation - P.I.S.A Model

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو تقدير توحد سد بني بحدل خلال الفترة (1945-2011) باستعمال نموذج PISA يستند نموذج PISA على عوامل مناخية شكلية مورفولوجية وقد اعدت هذه العوامل من خلال ادوات النمذجة الهيدرولوجية المتاحة في صندوق الادوات لنظام Arcgis.

بالإضافة الى ذلك قد اتاحت لنا تلك الادوات الى تحديد حوض الصب "بني بحدل" وتقسيمه الى حوضي "واد سيدو" و "واد خميس" وهيكله شبكة الصرف السطحية لكلاهما.

أنتج حوض "بني بحدل" كمية وحل مقدرة ب 1.75 <sup>3</sup> هم واثبتت مدى صلاحيته من خلال مقارنة نتائج نموذج ب PISA بالنسبة لنتائج: تقنية مسح الاعماق نموذج SOGREAH وحجم المياه الموحلة لواد سيدو

كلمات مفتاحية: سد بني بحدل- التوحد- نموذج PISA :

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Les mécanismes de transport solide	14
<b>Figure I.2</b> : bouteille de prélèvement fixé sur une perche avec système d'ajustage	18
<b>Figure I.3</b> : La turbidisonde	19
<b>Figure I.4</b> : schéma d'une jauge	20
<b>Figure I.5</b> : exemples d'échantillonneurs Helley-Smith	20
<b>Figure I.6</b> : Echantillonneurs de charge de fond (piège)	21
<b>Figure I.7</b> : Comportement des sédiments grossiers	23
<b>Figure I.8</b> : comportement des sédiments fins	24
<b>Figure I.9</b> : estimation du taux d'envasement en l'an 2010	25
<b>Figure I.10</b> : Schéma du soutirage d'un courant de densité par les pertuis de vidange d'un Barrage	30
<b>Figure I.11</b> : Schéma synoptique d'une opération de dragage dans un barrage	30
<b>Figure I.12</b> : Schéma synoptique d'une surélévation d'un barrage	31
<b>Figure II.1</b> : Bassins versants Algériens	33
<b>Figure II.2</b> : Le bassin versant de la Tafna dans l'ensemble Oranie Chott Chergui	33
<b>Figure II.3</b> : Réseau hydrographique de la Tafna.	34
<b>Figure II.4</b> Succession lithostratigraphique du bassin de la Haute Tafna	39
<b>Figure II.5</b> : coupe schématique au niveau du barrage de béni Bahdel	40
<b>Figure II.6</b> : carte d'occupation du sol du bassin Sebdou	42
<b>Figure II.7</b> : carte d'occupation du sol du bassin d'oued khemis	43
<b>Figure III.1</b> : Variation interannuelle des précipitations à la station de Béni Bahdel (1945-2011)	47

<b>Figure III.2</b> : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles à la station de Béni Bahdel (1977-2011)	48
<b>Figure III.3</b> : Histogramme des précipitations moyennes saisonnières à la station de Béni Bahdel (1977-2011)	49
<b>Figure III.4</b> : courbe d'ajustement des précipitations a la loi normale	50
<b>Figure III.5</b> : variation des débits annuels de la station de béni Bahdel (1980-2011)	53
<b>Figure III.6</b> : variation des débits moyens mensuels à la station de béni Bahdel (1980-2011)	54
<b>Figure III.7</b> : courbe d'ajustement des débits à la loi de Gumbel (oued sebdou)	55
<b>Figure IV.1</b> répartition graphique du rectangle équivalent du de l'oued Sebdou	58
<b>Figure IV.2</b> : répartition graphique du rectangle équivalent du bassin de l'oued Khemis	58
<b>Figure IV.3</b> : réseau hydrographique (bassin de Sebdou)	59
<b>Figure IV.4</b> : Réseau hydrographique (bassin de khemis)	60
<b>Figure IV.5</b> : rapport de confluence (oued Khemis)	62
<b>Figure IV.6</b> : rapport de longueur moyenne (oued Khemis)	62
<b>Figure IV.7</b> : rapport de confluence (oued Sebdou)	62
<b>Figure IV.8</b> : rapport de longueur moyenne(oued Sebdou)	62
<b>Figure IV.9</b> : carte en courbes de niveau (oued Sebdou)	63
<b>Figure IV.10</b> : courbe hypsométrique du bassin d'oued sebdou	64
<b>Figure IV.11</b> : Courbe hypsométrique du bassin versant de Sebdou	65
<b>Figure IV.12</b> : répartition des fréquences altimétriques du bassin d'oued Sebdou	65
<b>Figure IV.13</b> : carte hypsométrique du bassin d'oued khemis	66
<b>Figure IV.14</b> : courbe hypsométrique d'oued Khemis	67
<b>Figure IV.15</b> : courbe hypsométrique du bassin versant de Khemis	67
<b>Figure IV.16</b> : répartition fréquentielle des altitudes dans le bassin d'oued khemis	68
<b>FigureV.1</b> : l'évolution de l'envasement au niveau du barrage Béni-Bahdel (1945-2010)	76
<b>Figure V.2</b> : table d'extraction des paramètres physiques du bassin de Sebdou	79
<b>Figure V.3</b> : table d'extraction des paramètres physiques du bassin de Khemis	79
<b>FigureV.4</b> : carte des pentes du bassin d'oued Sebdou	80

<b>Figure V.5</b> : table de classification des pentes du bassin de	80
<b>Figure V.6</b> : carte des pentes du bassin d'oued khemis	81
<b>Figure V.7</b> : table de classification des pentes du bassin de khemis	81
<b>Figure V.8</b> : l'envasement estimé par le modèle PISA (bassin de Sebdou)	83
<b>Figure V.9</b> : l'envasement estimé par le modèle PISA (bassin de khemis)	83
<b>Figure V.10</b> : l'apport total de sédiments estimé par le modèle PISA	84
<b>Figure V.11</b> : comparaison de l'envasement mesuré dans l'oued de Sebdou et estimé par le modèle PISA (1945-2003)	85
<b>Figure V.12</b> : relation modèle PISA –levé bathymétrique	86
<b>Figure V.13</b> : histogramme de comparaison des apports de sédiment pour la période (1985-1998) entre modèle PISA et Apport solide en suspension	87
<b>Figure V.14</b> : comparaison des apports solides spécifiques mesurés et calculés (Sogreah) dans Le bassin de Sebdou (1985-1998)	90
<b>Figure V.15</b> : histogramme de comparaison de vase estimée par les modèles PISA et Sogreah pour la période 1985-1998	91



## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Valeurs de $\alpha$ pour différentes perméabilités.....	11.
<b>Tableau I.2</b> : les barrages les plus envasés en Algérie ANBT (Mourad.2005).....	26.
<b>Tableau II.1</b> : Distribution du couvert végétal dans le bassin de Sebdou.....	42.
<b>Tableau II.2</b> : Distribution du couvert végétal dans le bassin de khemis.....	43.
<b>Tableau III.1</b> : caractéristique de la station de mesure.....	45.
<b>Tableau III.2</b> : répartition annuelle des précipitations (1945-2011)- (station de béni-Bahdel)...	46.
<b>Tableau III.3</b> : précipitations moyennes mensuelles à la station de Béni Bahdel (1977-2011)...	47
<b>Tableau III.4</b> : précipitations saisonnières à la station de Béni Bahdel (1977-2011).....	48
<b>Tableau III.5</b> : Paramètres de position des précipitations à la station de béni-Bahdel.....	50
<b>Tableau III.6</b> : Calcul du $X^2$ .....	51
<b>Tableau III.7</b> : calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée.....	51
<b>Tableau III.8</b> : Débits annuels à la station de béni-Bahdel (1980-2011).....	52
<b>Tableau III.9</b> : débits moyens mensuels à la station de béni Bahdel (1980-2011).....	54
<b>Tableau III.10</b> : paramètres caractéristique des débits à la station de béni-Bahdel.....	54
<b>Tableau III.11</b> : calcul des débits pour des périodes de récurrence donnée.....	55
<b>Tableau IV.1</b> : paramètres de forme.....	57
<b>Tableau IV.2</b> : classification par ordre de réseau hydrographique d'oued Sebdou.....	59
<b>Tableau IV.3</b> : classification par ordre de réseau hydrographique d'oued Khemis.....	60
<b>Tableau IV.4</b> : Paramètres morphométriques des principales unités hydrologiques de la haute Tafna.....	61
<b>Tableau IV.5</b> : répartition altimétrique dans le bassin d'oued Sebdou.....	64
<b>Tableau IV.6</b> : répartition altimétrique dans le bassin d'oued khemis.....	66
<b>Tableau IV.7</b> : la dénivelée d'altitude des sous bassin (sebdou et khemis).....	69
<b>Tableau IV.8</b> : Indices de pentes et reliefs des sous bassins.....	69
<b>Tableau IV.9</b> : Classification du relief selon $I_g$ par l'ORSTOM.....	70
<b>Tableau V.1</b> : Mesures des levés bathymétriques entre (1945 et 2003) au niveau du barrage Beni Bahdel.....	76

<b>Tableau V.2.</b> : Les paramètres du modèle PISA .....	78
<b>Tableau V.3</b> : l'envasement annuel calculé par le modèle PISA pour les bassins des oued Sebdou et Khemis.....	82
<b>Tableau V.4</b> : comparaison du taux d'envasement (modèle-levé).....	85
<b>Tableau V.5</b> : comparaison du taux d'envasement (modèle-As).....	86
<b>Tableau V.6</b> : écoulement annuel du bassin de Sebdou (1985-1998).....	88
<b>Tableau V.7</b> : comparaison entre l'apport solide spécifique mesuré et estimé.....	89
<b>Tableau V.8</b> : comparaison du taux d'envasement (modèle Sogreah-modele PISA) .....	90

### **Liste des photos**

<b>Photo I.1</b> : Erosion des berges .....	5
<b>Photo I.2</b> : Erosion en rigoles et en griffes.....	5
<b>Photo I.3</b> : Erosion en ravines.....	5
<b>Photo I.4</b> : Erosion en nappe.....	6
<b>Photo I.5</b> : Une série de seuils réalisée sur une ravine du bassin versant de Beni Chougarne..	29
<b>Photo I.6</b> : Banquettes réalisées au niveau du bassin versant d'oued Mina.....	29
<b>Photo. V.1</b> : oued Khemis .....	74
<b>Photo. V.2</b> : oued Sebdou.....	74
<b>Photo. V.3</b> : lac du barrage Beni Bahdel.....	74

# Table des matières

Remeciment

Résumé

Abstract

**ملخص**

Tables des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Erosion, Transport Solide Et Envasement .....	3
<b>EROSION ET TRANSPORT SOLIDE .....</b>	<b>4</b>
<b>I.1 Erosion .....</b>	<b>4</b>
I.1.1 Les types d'érosion.....	4
I.1.1.1 L'érosion hydrique.....	4
I.1.2 Origine et mécanisme de l'érosion hydrique en Algérie.....	6
I.1.3 Les facteurs induisant l'érosion.....	7
La lithologie (nature du sol).....	7
Climat .....	7
<b>Précipitations</b> .....	<b>7</b>
Irrégularité pluviométrique.....	7
Le couvert végétal .....	7
Facteur socioéconomique .....	7
I.1.4 Ampleur de l'érosion en Algérie.....	8
I.1.5. QUANTIFICATION DE L'EROSION.....	8
I.1.5.1 Mesures directes .....	8
I.1.5.2 Modèles empiriques.....	9
a) Formule de Wischmeier et Smith (1978) .....	10
<b>Erreur ! Signet non défini.</b> 10	
c) Modèle de Tixeront (1960).....	11
d) Formule de L'A.N.R.H (1970).....	11
e) Formule de Grailovic (1960) .....	12
g) Formule de Fournier (1960) .....	13
I.1.6 Conséquences du phénomène d'érosion.....	13
<b>I.2 Le transport solide.....</b>	<b>14</b>
I.2.1 Définition.....	
I.2.2 Les mécanismes du transport solide : .....	14
I.2.2.1 Par charriage.....	15
I.2.2.2 Par suspension (suspended load).....	15

I.2.3 Les différents facteurs intervenants dans le transport solide.....	15
I.2.4 mesure du transport solide dans les cours d'eau .....	16
<b>I.2.4.1 La mesure du transport en suspension.....</b>	<b>16</b>
<b>I.1.4.2 La mesure des transports de fond .....</b>	<b>20</b>
I.3 Méthodes de défenses contre l'érosion et le transport solide.....	22
I.3.1 dans les interfluves.....	22
I.3.2 dans les cours d'eau .....	22
I.4 Envasement .....	23
I.4.1 Généralité : .....	23
I.4.2 Mécanisme de l'envasement : .....	23
I.4.4 L'envasement en Algérie .....	25
<b>I.4.4. Les problèmes posés par l'envasement : .....</b>	<b>27</b>
<b>I.4.4.1 Réduction de la capacité .....</b>	<b>27</b>
<b>I.4.4.2 Impact de l'envasement sur la qualité de l'eau du barrage.....</b>	<b>27</b>
<b>I.4.4.3 Blocage des vannes.....</b>	<b>27</b>
<b>I.4.4.4 Envasement des canaux d'irrigation.....</b>	<b>27</b>
I.4.5 Méthodes de détermination de taux d'envasement .....	28
I.4.6 Moyens techniques de lutte contre l'envasement .....	29
<b>Chapitre II : Présentation du bassin Versant de la Haute Tafna (Sebdou-Khemis)...</b>	<b>32</b>
II.1.- SITUATION GEOGRAPHIQUE .....	33
II.1.1 situation du secteur d'étude (partie supérieur de l'oued Tafna).....	34
II.2- GEOLOGIE.....	35
II.2.1-Cadre géologique général : .....	35
II.2.2-Analyse lithostratigraphique : .....	35
II.2.2.1- les séries anciennes :.....	36
II.2.2.2 Les séries récentes :.....	38
II.3. Sols et végétations .....	41
<b>Chapitre III; Hydro-pluviométrie</b>	<b>44</b>
Introduction .....	45
III.1.-Etude des précipitations .....	45
III.1.4 Etude statistique des précipitations :.....	49
III.1.4.1 Adéquation des données de précipitation annuelle à une loi statistique : .....	49
III.1.4.2 Ajustement par la loi normale.....	50
<b>III.1.4.3-Calcul des Précipitations pour une période de récurrence donnée : .....</b>	<b>5</b>
III.2 .1 Débits annuels .....	52
III.2.2. Débit mensuel .....	53

III.2.3. Etude statistique des débits moyens mensuels .....	54
III.2.3.1 Ajustement par la loi de Gumbel.....	55
III.2.2.2 Calcul des débits pour une période de récurrence donnée : .....	55
Chapitre IV : Morphométrie.....	56
IV. Morphométrie des bassins versants des oueds Sebdou et Khemis.....	57
IV.1 Paramètres de forme.....	57
IV.1.1 Indice de compacité .....	57
IV.1.2 rectangle équivalent .....	57
IV.2 ETUDE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE.....	59
IV.2.1 Etude de chevelu hydrographique : .....	61
IV.2.1.1 Densité de drainage .....	61
IV.2.1.2 Rapport de confluence (Rc).....	61
IV.2.1.3 Rapport des longueurs (RI).....	61
IV.3 Paramètres de relief :.....	63
IV.3.1 Répartition altimétrique : .....	63
<b>IV.3.2 Indices de pente et relief : .....</b>	<b>68</b>
Chapitre V : Estimation de l'envasement du barrage de Béni-Bahdel par le modèle PISA.....	72
INTRODUCTION.....	73
V.1 PRESENTATION DU BARRAGE .....	74
V.1.1 Historique et Caractéristique : .....	75
V.1.2 L'envasement du barrage béni Bahdel .....	75
V.2 l' Estimation de l'envasement par le modèle PISA :.....	77
V.2.1 Application du modèle .....	78
V.2.4 Validation du modèle PISA.....	84
V.2.4.1. par rapport au levé bathymétrique (tableau V.4) :.....	85
V.2.4.2 par rapport à l'apport solide au niveau du bassin de Sebdou .....	86
<b>V.3 Estimation de l'apport solide spécifique par le modèle de Sogreah .....</b>	<b>88</b>
V.3.1 comparaison des résultats du modèle sogreah avec le modèle PISA.....	90
Conclusion générale .....	92
Références bibliographiques .....	93

### Introduction générale

Les ressources en eau en Algérie constituent l'une des principales richesses sur lesquelles reposent la prospérité et le développement du pays. Malheureusement ces ressources sont menacées par la perte de capacité de stockage des barrages due au phénomène d'envasement.

L'envasement ou l'alluvionnement est la conséquence naturelle de la dégradation des bassins versants. Il constitue actuellement une préoccupation des projeteurs et des exploitants de la ressource en eau d'un pays caractérisé par un taux d'accroissement démographique élevé et une demande croissante en eau. Il est donc nécessaire de se pencher sérieusement et scientifiquement sur le problème de l'érosion et de l'envasement afin de mettre en œuvre tout les moyens pour conserver les réserves d'eaux existantes.

D'après (Remini B. 2008), chaque année 45 millions de  $m^3$  de vase se déposent au fond de nos barrages, ce qui représente une perte annuelle de 0,7 % de leur capacité totale. Cette estimation reflète une situation non alarmante. Par ailleurs, une Dizaine de ces barrages sont fortement menacés par ce phénomène, puisqu'ils sont envasés à plus de 50 %. En effet, le barrage Fergoug dans la willaya de Mascara connaît un taux d'envasement de 97,77%, celui de Bouhnifia est à 47,79%. En ce qui concerne la willaya de Tlemcen, le barrage Béni Bahdel et celui de Sidi Abdeli sont respectivement envasés à un taux de 13,28% et 3,08% (El Watan, 2010).

En outre il n'existe pas actuellement une méthode d'estimation préalable du phénomène de l'envasement qui fait l'unanimité des chercheurs vu sa complexité et le nombre importants de facteurs qui sont mis en jeu. En Algérie, plusieurs formules et modèles ont été essayés pour le calcul soit de l'érosion ou du transport solide tels que le modèle de Wischmeir (USLE), ou celui de Tixeront et Sogreah.

Dans ce cadre, la présente étude vise à estimer l'envasement du barrage de béni Bahdel de capacité initiale de  $63.00 \text{ Hm}^3$ , en utilisant pour la première fois au niveau du bassin de la Tafna le modèle italien PISA (Previsioni Interimento Serbatoi Artificiali). Ce modèle utilise des paramètres climatiques, morphologiques et Physiques d'un bassin versant, qui sont extrait sous environnement ArcGis et peut fournir une prévision du taux moyen annuel de sédimentation dans les réservoirs artificiels exprimées en ( $m^3/km^2$ ).

Les levées bathymétriques du barrage de Béni-Bahdel, les apports solides calculés à partir des concentrations mesurées au niveau d'oued sebdou ainsi que les estimations par le

Modèle Sogreah, serviront par la suite pour la comparaison des résultats et la validation du modèle PISA

Pour ce faire, notre document est organisé en quatre (04) chapitres :

- Le premier chapitre de cette étude présente des généralités sur l'érosion, le transport solide, l'envasement et les méthodes de quantification ainsi les moyens de lutte contre ces phénomènes.
- Le deuxième comprend la présentation du bassin d'étude, la situation géographique, l'occupation du sol et la géologie.
- Le troisième chapitre s'intéresse à l'hydrologie (pluviométrie et écoulements) dans le bassin du barrage de Béni Bahdel.
- Le Quatrième chapitre est consacré à l'étude de la morphométrie des sous bassins du barrage Beni Bahdel (sebdou et khemis)
- Enfin le cinquième chapitre porte sur la quantification de l'envasement du barrage Béni-Bahdel par le modèle PISA et sa validation par comparaison avec les résultats d'autres méthodes d'estimation.

Ce travail est entamé par une introduction générale et se termine par une conclusion générale

**Chapitre I**  
**Erosion, Transport Solide**  
**Et Envaselement**



## **Erosion et transport solide**

Le taux de sédimentation des grains (sable, limon....) a évolué ces dernières années, du fait de la forte érosion des bassins versants. Au début des années quatre-vingt, environ 120 millions de tonnes de sédiments sont arrachés annuellement au niveau des bassins versant du nord algérien. Une partie de cette masse se dépose dans les 57 grands barrages que détient l'Algérie. On évalue le dépôt sédimentaire annuellement dans ces barrages à 45 millions de m<sup>3</sup> (Remini B 1997). L'érosion des bassins versants est très répandue dans la région du Maghreb, puisque toutes les conditions sont réunies pour déclencher et développer un tel processus : les irrégularités climatiques, la faible densité du couvert végétale, la nature des sols qui est peu résistante à l'écoulement et la violence des crues.

### **I.1Erosion**

Définition : le terme érosion s'applique à l'enlèvement d'un matériau de l'écorce terrestre, c'est-à-dire à sa séparation avec son support ou encore à l'état qui en résulte (érosion en rigoles ou griffes d'érosion ...etc.). « Sa définition ne doit inclure ni l'altération météorique ni la sédimentation »

#### **I.1.1 Les types d'érosion**

L'érosion peut se résumer en trois types hydrique, éolienne et aratoire. Nous citons dans ce qui suit particulièrement l'érosion hydrique objet de notre travail.

##### **I.1.1.1 L'érosion hydrique**

L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement des particules de sol, c'est la perte du sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt. Ce type d'érosion peut se manifester sous plusieurs formes :

### I.1.1.1.1 Erosion des berges (photo I.1)

Ce type de dégradation des sols est particulièrement présent dans la partie moyenne et aval des bassins. L'érosion par sapement des berges se manifeste principalement lors des crues de grande ampleur, où le cours d'eau est balayé de long en large.



**Photo I.1 : Erosion des berges [1]**

### I.1.1.1.2 Erosion linéaire

Elle se manifeste lorsque la concentration des eaux conduit à la formation des chenaux de dimension croissante. (Roose E.J, 1985).

#### a) Erosion en rigoles et en griffes : (photo I.2)



**Photo I.2 : Erosion en rigoles et en griffes [1]**

#### b) Erosion en ravines :(photo I.3)



**Photo I.3 : Erosion en ravines [1]**

### I.1.1.1.3 Erosion en nappe :( photoI.4)

Une *érosion en nappe* se détermine par enlèvement graduel et uniforme du sol superficiel par l'eau de ruissellement, sans formation de rigoles ou ravines.



**Photo I.4 :** Erosion en nappe [1]

### I.1.2 Origine et mécanisme de l'érosion hydrique en Algérie

L'érosion hydrique peut être considérée comme une détérioration généralisée de l'écosystème et constitue à ce titre un facteur primordial de désertification.

En Algérie du Nord, l'érosion du sol par l'eau est la forme la plus répandue et la plus dangereuse du phénomène, déclenché par un climat agressif et des régimes hydrologiques violents, le processus de l'érosion est favorisé par les facteurs précédents et par une pression démographique sans cesse croissante, qui se traduit par une surexploitation des ressources naturelles, une mauvaise utilisation des terres et une dégradation du système forestier.

Les dangers de l'érosion et de la sédimentation des cours d'eau se manifestent par :

- La dégradation des terres agricoles ;
- La destruction des ouvrages d'art ;
- La transfiguration des sites naturels et l'environnement ;
- Un très grand envasement des barrages et des canaux d'irrigation.

(Association E.N.H.Y.D.- Energoprojekt., 1994)

### **I.1.3 Les facteurs de l'érosion**

#### **\*La lithologie (nature du sol)**

La lithologie Joue un grand rôle dans la naissance et l'accroissement de l'érosion. En Algérie, 75% de la zone tellienne est constituée de formations marneuses essentiellement Miocène ainsi que d'alluvions récentes qui sont généralement constitués de dépôts limoneux et sableux et qui, en général offrent une structure fragile et une faible résistance aux forces érosives.

#### **\*Climat**

Le climat algérien est caractérisé par une nette opposition entre saison sèche et humide, une courte période de précipitation intense et abondante, et une longue période de sécheresse, c'est-à-dire qu'une période prépare le sol et l'autre l'attaque et le dégrade.

#### **\*Précipitations**

Les effets des eaux des pluies sur le sol sont en rapport direct avec l'intensité et la durée des averses. Les pluies à caractère torrentiels qui favorisent et accélèrent l'érosion sont de l'ordre de 30mm en 24h ou 20mm en deux heures. En Algérie, l'intensité des pluies est, dans la plus part des bassins versants, supérieure de 30mm par 24 heures, elle est très fréquente constituant une grande force de destruction érosive du sol.

#### **\*Irrégularité pluviométrique**

Elle est considérée comme étant l'un des facteurs qui joue un rôle dans le déclenchement de l'érosion. L'intense réchauffement du sol succédant aux basses températures nocturnes, et les écarts de température en été, entraîne une intense évapotranspiration potentielle et contribue à désagréger le sol et à le préparer au décapage et à l'érosion.

#### **\* Le couvert végétal**

Est pratiquement inexistant sur les zones marneuses et argileuses qui caractérisent la totalité des bassins versants algérien, et généralement peu dense sur le relief, ce qui rend leurs sols très vulnérables et sans protection contre les actions érosives de la pluie

#### **\* Facteur socioéconomique**

Ce sont les facteurs lié à la vie de l'homme, et contribuent largement à l'accélération de la dégradation du sol, 85% des superficies cultivables en Algérie (environ 6Mha) (Tecsult, 2002) ; Sont situé sur des versants menacés par l'érosion.

Durant la deuxième moitié de l'IXX siècle, plus de 3Mha de forêt ont été brûlés par les colons. Les conséquences de ce déboisement intense sont :

- L'augmentation de la surface cultivable et de ce fait l'absence périodique de protection des sols associée aux pratiques culturales non adéquates induisant une accélération du phénomène de l'érosion et du transport solide.

-l'importance considérable de l'érosion et des transports solides.

#### **I.1.4 Ampleur de l'érosion en Algérie**

L'érosion se manifeste principalement sur les sols en pente et constitue une des principales causes de dégradation des sols dans les massifs montagneux en zones semi arides. Elle s'est accélérée suite aux défrichements des forêts et maquis qui protégeaient les sols sensibles. L'intensité de l'érosion hydrique varie d'une zone à l'autre. La partie Ouest du pays est la plus érodée, où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres ; suivie du Centre (27%) et de l'Est (26%). (Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire, 2000)

L'érosion spécifique varie de 2000 à 4000 t/km<sup>2</sup>.an (Demmak A, 1982) et le taux d'envasement est supérieur à 15 %. L'Algérie est, de ce fait l'un des pays les plus menacés dans le monde par l'érosion.

#### **I.1.5. QUANTIFICATION DE L'EROSION.**

L'importance de l'érosion hydrique et ces préjudices pour l'activité humaine d'un côté (pertes en sol), ont poussé l'homme à chercher et à proposer les méthodes pour y remédier à ce phénomène crucial. Pour ce faire, il a été procédé à la quantification de cette érosion par des méthodes empiriques.

### I.1.5.1 Mesures directes

Elles sont basées sur les valeurs instantanées des débits liquides  $Q_L$  ( $m^3/s$ ) et celles des concentrations des sédiments en suspension  $C$  ( $g/l$ ) correspondantes. La fourniture de ses données est du ressort de l'A.N.R.H. Ces mesures sont effectuées au niveau de la station hydrométrique de contrôle du bassin versant. Le débit liquide est calculé après lecture de la hauteur d'eau sur une échelle limnométrique posée sur la rive de l'Oued et à l'aide de la

Courbe de tarage adéquate (régulièrement contrôlée et actualisée). La charge de la matière en suspension obtenue à partir d'échantillons d'eau prélevés dans la section mouillée de l'Oued au moyen d'un conteneur de (50 cl). La boue recueillie sur un papier filtre est pesée après séchage à l'étuve à  $105^{\circ}C$  pendant 30 minutes. On détermine ensuite la charge correspondante à un litre d'eau prélevé. Ce qui établit la concentration donnée en ( $g/l$ ).

La fréquence des prélèvements effectuée dépend de la variation de la hauteur d'eau. Cette fréquence s'effectue chaque heure en période de crue. Dans le cas où la crue est importante c.-à-d., la variation de la hauteur d'eau est rapide, la fréquence de prélèvement augmente jusqu'à trente (30) minutes. En effet La règle adoptée est de procéder à un ou deux prélèvements par 24 heures en période normale et avec une fréquence plus grande (observation toutes les 15 ou 30 minutes par exemple) lors des crues (Fournier, 1960 ; Touat, 1989). Le calcul du débit solide en suspension est donné par la formule suivante :

$$Q_{SS} = C. Q_L \quad (I.1)$$

Avec

$Q_{SS}$  : Débit solide en suspension ( $kg/s$ ) ;  $Q_L$  : Débit liquide ( $m^3/s$ ) ;  $C$  : Concentration ou turbidité ( $g/l$ )

Toutefois, il est à noter le caractère approché de cette méthode dans le calcul de l'apport solide en suspension car la fiabilité des prélèvements d'échantillons à travers la section du cours d'eau est mise en cause. En effet, la concentration en sédiments varie le long d'une section de mesure, du fond du cours d'eau vers la surface et d'un instant à l'autre

(Molinier M ,1979 ; Olivry, 1989)

### I.1.5.2 Modèles empiriques.

L'aspect quantitatif de la désagrégation des sols, du fait de sa complexité, peut être effectué selon deux approches. La première consiste à quantifier l'érosion par le biais de modèles impliquant des paramètres morphologiques, climatiques et hydrologiques. La seconde consiste à estimer les quantités de matières en suspension évacuées par les cours d'eau d'écoulement à l'exutoire du système étudié. La plupart des mesures de quantification de

L'érosion est faite sur des parcelles de taille standard Wischmeier et al (1971). L'étude des transports en suspension à l'échelle du bassin versant s'avère être un outil efficace pour comprendre et quantifier les processus d'érosion des sols. Selon, Albergel et al (2003), il existe plusieurs modèles empiriques permettant de quantifier l'érosion hydrique. On citera quelques modèles basés sur des paramètres physiques représentatifs. Ces modèles ont été appliqués dans différentes régions maghrébines (Touibia et al, 2001 ; Bouanani A, 2004).

#### a) Formule de Wischmeier et Smith (1978)

La formule s'écrit :  $Ps = Ep.Es.Flp.Fp.Fam.Fv$  (I.2)

Avec :

$Ps$  : pertes annuelles de sol (t/ha/an)

$Ep$  : érosivité des précipitations (N/h).

$Es$  : érodabilité du sol ou susceptibilité du sol à l'érosion (t.h/N.ha)

$Flp$  : facteur de longueur de pente (sans dimension)

$Fp$  : facteur de pente (sans dimension)

$Fam$  : facteur d'aménagement (sans dimension)

$Fv$  : facteur de conservation des sols pratiqué (sans dimension)

**b) Modèle de la Sogreah.**

Ce modèle est basé sur les données de 30 bassins algériens, de superficie comprise entre 100 et 300 Km<sup>2</sup>, soumis à une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 1000mm.

$$Ass = \alpha \cdot E^{0,15} \quad (I.3)$$

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

$\alpha$  : coefficient dépendant de la perméabilité du sol

E : écoulement (mm).

Les valeurs, de  $\alpha$  sont données dans le (tableau I.1)

**Tableau I.1 : Valeurs de  $\alpha$  pour différentes perméabilités**

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

**c) Modèle de Tixeront (1960).**

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

$$Ass = 354 \cdot E^{0,15} \quad \text{pour les bassins tunisiens.} \quad (I.4)$$

$$Ass = 92 \cdot E^{0,21} \quad \text{pour la région est algérien} \quad (I.5)$$

$$Ass = 200 \cdot E \quad \text{pour la région centre algérien.} \quad (I.6)$$

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

E : Ecoulement annuel en mm



**c) Formule de L'A.N.R.H (1970)**

$$T_{ss}=26.62 I_e+5.071 I_p+9.77 C_t-593.59 \quad (I.7)$$

T<sub>ss</sub> : transport solide spécifique moyen annuel (T/Km<sup>2</sup>.an)

I<sub>e</sub> : indice lithologique (%).

I<sub>P</sub> : indice des précipitations (%).

C<sub>t</sub> : coefficient de torrentialité. C<sub>t</sub> = Dd.F1

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

F1 = nombre de talweg d'ordre 1/ surface (fréquence des talwegs élémentaires)

**e) Formule de Grivilovic (1960)**

Grivilovic a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnelle à la température, à la pluie et à un coefficient d'érosion, l'équation est donnée par l'expression I.9

$$E_s = 3,14 . T . P_o \sqrt{Z^3} \quad (I.9)$$

Où

E<sub>s</sub> : érosion spécifique dans le bassin versant (T/km<sup>2</sup>.an)

T : coefficient de température

(I.10)

$$T = \sqrt{\frac{t_o}{10}} + 0.1$$

Avec : t<sub>0</sub> : température moyenne annuelle en °C.

P<sub>o</sub> : pluie annuelle en (mm).

Z : coefficient d'érosion.

Avec

$$Z = y [x.a] (\delta + \sqrt{I_{moy}}) \quad (I.11)$$

Où

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

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

$\delta$  : équivalent numérique des processus visibles et nettement prononcés dans le bassin versant.

$I_{moy}$  : indice de pente moyenne du bassin versant.

### g) Formule de Fournier (1960)

$$Ass = \frac{1}{36} \cdot \left[ \frac{P}{P_a} \right]^{2.65} \cdot \left[ \frac{H_{moy}}{S} \right]^{0.46} \quad (I.12)$$

$Ass$  : l'apport solide spécifique (T/Km<sup>2</sup>.an).

$P$  : la pluviométrie du mois le plus arrosé (mm).

$H_{moy}$  : l'altitude moyenne (m).

$P_a$  : la pluviométrie moyenne interannuelle (mm).

$S$  : la superficie du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

### I.1.6 Conséquences du phénomène d'érosion

Les conséquences du phénomène d'érosion sont multiples.

\* Défertilisation des terres de culture par arrachement de la couche végétale contenant les matières organiques et les particules fines

\* changement des traces des cours d'eau par création des méandres et des tresses.

\* envasement des retenues de barrages, des ouvrages de prise d'eau et des canaux d'irrigation, ce qui entraîne la diminution des potentialités hydraulique.

## I.2 Le transport solide

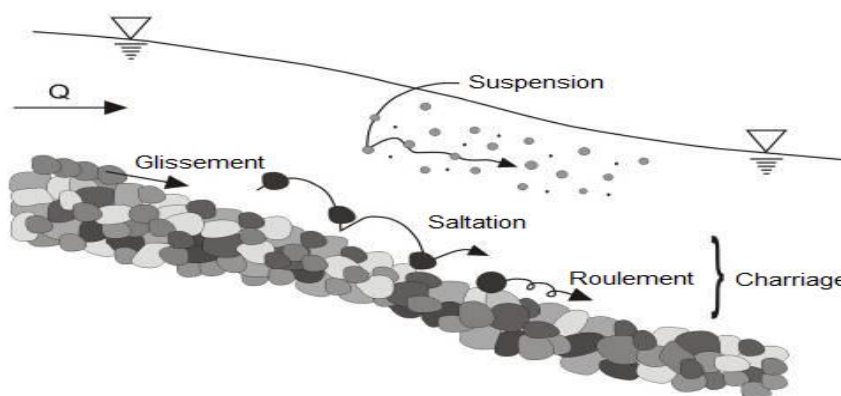
### I.2.1 Définition

Le transport solide représente la quantité de matériaux granulaires transportée par un cours d'eau, les sédiments ainsi emportés proviennent soit du bassin versant soit des berges ou du fond du lit mineur. Dans le premier cas l'érosion qui se manifeste est dite aréolaire appelée aussi érosion en nappe ou en rigole, les particules entraînées en surface sont fines et souvent cohésives. Dans le deuxième cas on parle d'érosion linéaire, elle persiste même quand la pluie cesse de tomber, elle mobilise des forces hydrodynamiques inopérantes qui finissent par transporter des matériaux très grossiers (in Bouguerra S, 2014)

### I.2.2 Les mécanismes du transport solide :

Le champ de vitesse varie tout au long du profil de l'oued d'amont en aval, l'eau met en jeu deux types de mécanismes (Figure I.1) : le charriage et la suspension qui sont les principaux types du transport solide

La répartition entre le charriage et la suspension dépend essentiellement de la dimension des matériaux rapportés à la vitesse de l'eau et la turbulence de l'écoulement. En tout point d'une rivière, l'alimentation en débit solide est définie par les caractéristiques hydrologiques de son bassin versant (Bouvard M, 1984)



**Figure I.1** : Les mécanismes de transport solide

### **I.2.2.1 Par charriage**

Le transport par charriage est l'un des principaux types de transport solide dans un cours d'eau, il concerne les plus gros matériaux qui contribuent à la formation et l'équilibre du lit, principalement la pente. Ces éléments sont transportés par le fond par roulement, glissement ou saltation. La direction du mouvement est en gros parallèle au fond et les accélérations verticales sont faibles. Le charriage dit transport de fond, constitue un sérieux problème en régularisation des débits de cours d'eau et dans la construction des ouvrages hydrotechniques. Plusieurs recherches ont été entamées et axées sur le transport des sédiments en régime fluvial, aussi bien par voie théorique que par voie expérimentale, mais il n'existe pas encore une théorie générale du mécanisme et il est difficile de donner une définition universelle acceptable de la charge du fond. Du Boys (1879) a été l'un des pionniers de cette recherche sur le charriage. Ce n'est que vers 1930 que cette recherche s'intensifie avec Meyer- Peter, Einstein.

### **I.2.2.2 Par suspension (suspended load)**

Le transport par suspension est le deuxième type de transport solide dans un cours d'eau. Il concerne les éléments fins qui progressent dans le sens du courant au sein même du liquide. Ces éléments fins sont maintenus en suspension par la turbulence et la quantité de ces matériaux dépend essentiellement des éléments fins, qui proviennent de l'érosion du bassin, suite au ruissellement des eaux de pluie. (Olivry J.C, Bricquet J.P, Thiebeaux J.P, 1989)

### **I.2.3 Les différents facteurs intervenants dans le transport solide**

Les différents facteurs intervenants sont les suivants :

- conditions d'écoulement définies par le débit, la vitesse d'écoulement et la charge hydraulique. Les cours d'eau algériens sont caractérisés par un régime d'écoulement torrentiel favorisant le phénomène du transport solide.
- Seuil de débit de transport solide variant en fonction des propriétés géométriques et rhéologique des particules.
- La granulométrie des particules solides.

Les sédiments pénétrant dans une retenue proviennent du bassin versant amont et sont transportés jusqu'à la retenue par lits mineurs des réseaux hydrographiques.

Les principaux facteurs influençant les apports solides d'un bassin versant sont les suivant :

- a) Volume et intensité des précipitations.
- b) Géologie et type du sol.
- c) Couverture du sol (végétation).
- d) L'utilisation du sol (méthode de culture, élevage, exploitation forestière, chantiers de construction).
- e) Géomorphologie du bassin versant.
- f) Historique de l'érosion (nature du réseau de drainage, densité, pente, forme, dimension de canaux).
- g) Ruissellement.
- h) Caractéristiques des sédiments (granulométrie, minéralogie).
- i) Hydraulique du lit.

Les spécialistes peuvent tenir compte d'autres facteurs ou faire des combinaisons de ces Neufs facteurs précités qui sont étroitement liés. (In HADIDI A, 2008)

#### **I.2.4 mesure du transport solide dans les cours d'eau**

La quantité de sédiments transportée par un cours d'eau à une section donnée pendant un temps est composée de la charge en suspension (*Suspended Load*) et du transport de fond glissement ou roulement sur le fond et saltation.

Les différentes méthodes de mesure possibles sont :

\* Collectes d'échantillons à hauteur d'une section de mesure pour suivre dans le temps les variations du transport solide, puis mesurer par filtration au laboratoire des concentrations en matière en suspension .

\* Levés topographiques et bathymétriques du Lac ou de retenue artificielle pour évaluer l'apport global de sédiments pendant une période déterminée (entre deux instants connus).

\*L'utilisation de traceurs de sédiment où l'élément radioactif dont les signatures permettent d'étudier surtout les taux de sédimentation (comme Pb218, Cs137).

### I.2.4.1 La mesure du transport en suspension

En pratique, on mesure une concentration en matière en suspension (MES) qui correspond à la quantité de matériaux en suspension recueillie à travers une membrane poreuse (la taille moyenne des pores 0.2  $\mu\text{m}$ ). Elle s'exprime en (mg/l) de l'eau brute.

Aujourd'hui, il est possible de mesurer la quantité de sédiments en suspension transportée par un cours d'eau, la méthode la plus rigoureuse pour obtenir une estimation de la charge

Solide consiste à procéder, comme pour la mesure de débit liquide, à une intégration de différentes concentration et des vitesses sur plusieurs verticales. Cette technique nécessite un matériel de prélèvement adapté aux caractéristiques de la section de mesure.

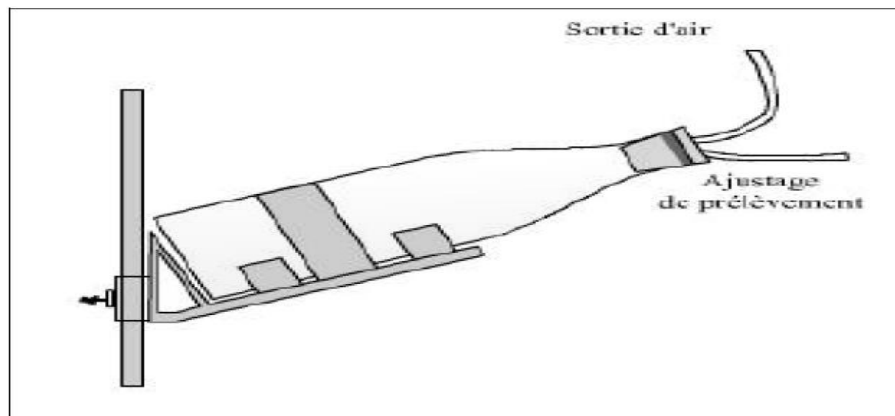
Le contrôle de la charge solide est possible grâce aux programmes d'échantillonnage intensifs avec des pompes automatique ou de manière indirecte avec l'installation de turbidimètre.

**a)Matériel de prélèvement** : Il existe du matériel de prélèvement qui peut être classé en trois catégories principales :

- **Les prélèvements instantanés** : ils sont constitués d'un récipient largement ouvert qui peut se refermer, de façon quasi-instantanée, au moyen d'une commande appropriée.

-**Les prélèvements à pompe** : un embout formé d'un tube métallique faiblement coudé, fixé sur un lest ou une perche permet d'effectuer, à l'aide d'un tuyau flexible et d'une pompe, des prélèvements en divers points de la section mesurée. [1] ;[2];(MALAVOI Jr, 2005) (PNEUE, 1998)

- **Les prélèvements par intégration** : on prélève des échantillons durant un intervalle de temps suffisamment long pour atténuer les fluctuations des concentrations à l'aide d'une bouteille perchée avec ajustage (Figure I.2). (ANDRE M et HICY C, 2004).



**Figure I.2** : bouteille de prélèvement fixé sur une perche avec système d'ajustage [2]

### b) Calcul du débit solide en suspension

On considérera la section S d'un cours d'eau de largeur L, chaque vertical V peut être défini par son abscisse l (distance à l'une des deux rives), et sa profondeur total P. si en un point d'une vertical V1 situé à la profondeur P, sont mesurées à la fois, la vitesse du courant V et la concentration C de matériaux en suspension, le débit solide sur la surface de la section s'écrit :

$$q_s = C \cdot V \cdot ds \quad (\text{II.6})$$

$q_s$  : débit solide sur l'ensemble de la section S par intégration s'obtient :

$$Q_s = \iint_S q_s = \iint_S C \cdot V \cdot ds = \int_S C \cdot V \cdot dl \cdot dp \quad (\text{II.7})$$

Avec

$Q_s$  : débit solide du cours d'eau [kg/s]

La concentration moyenne dans la section est définie par le rapport :

$$C_m = Q_s / Q_l$$

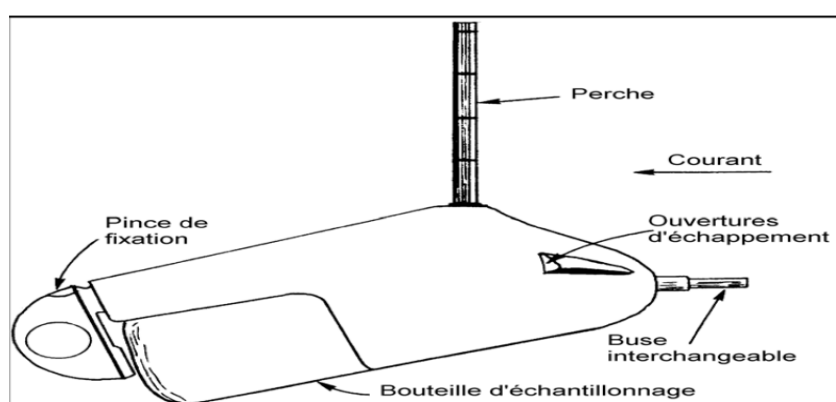
$$Q_l : \text{le débit liquide total sur la section S} : Q_l = \iint_S V \cdot ds \quad (\text{II.8})$$

Cette méthode pour mesurer la quantité de sédiments transportés par un cours d'eau est évidemment très coûteuse. Les mesures sont simplifiées, sont surtout utiles pour valider les protocoles d'échantillonnage des réseaux de surveillance du transport en suspension. [2]

#### d) **Mesure en continu**

L'échantillonnage en continu est en fait basé sur deux types de mesures :

- Une mesure des matières en suspension à l'aide de préleveur d'échantillon automatique réglé pour un certain pas de temps.
- Une mesure de la turbidité à l'aide de turbidimètres ou de La turbidisonde (Figure I.3).



**Figure I.3** : La turbidisonde (PNEUE, 1998)

- **Jauges optique, à ultrasons (Figure I.4)** ou nucléaires constitue une méthode de détermination sur place de la concentration de sédiments en suspension. (PNEUE, 1998)



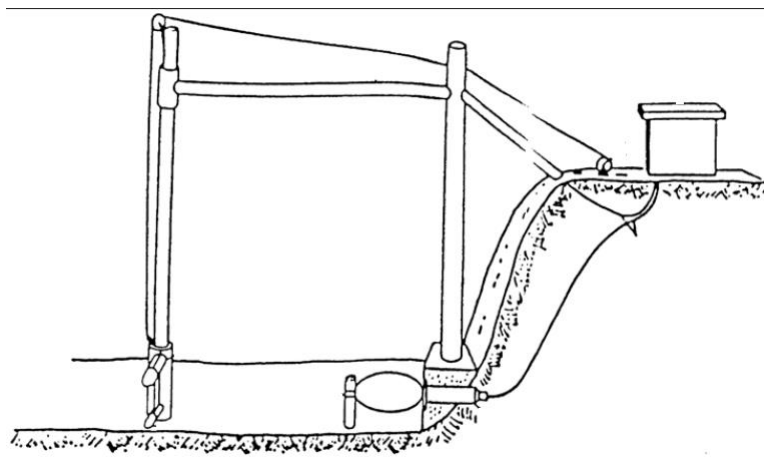


Figure I. 4 : schéma d'une jauge (PNEUE, 1998)

#### II.1.4.2 La mesure des transports de fond

Parmi les équipements de mesure actuellement disponibles, on peut décrire très sommairement.

- **Les nasses** : constituées d'une poche de grillage montée sur un cadre métallique qui laisse passer les matières en suspension, mais retiennent les matériaux grossiers. Le plus connu et le plus utilisé dans le monde est le préleveur Helley-Smith (Figure I.5) (Malavoi 2005)

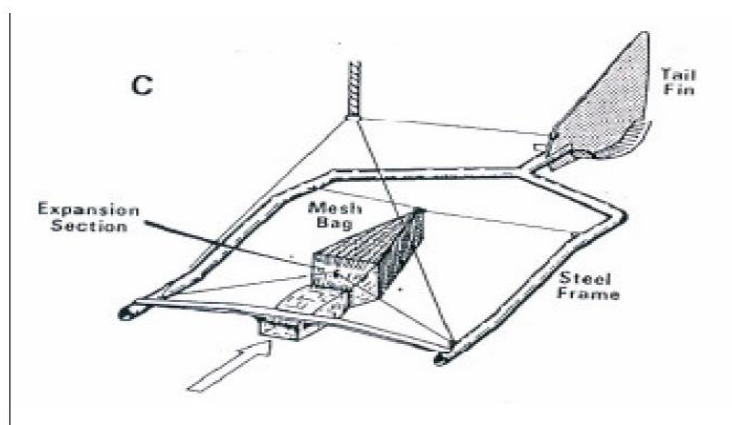
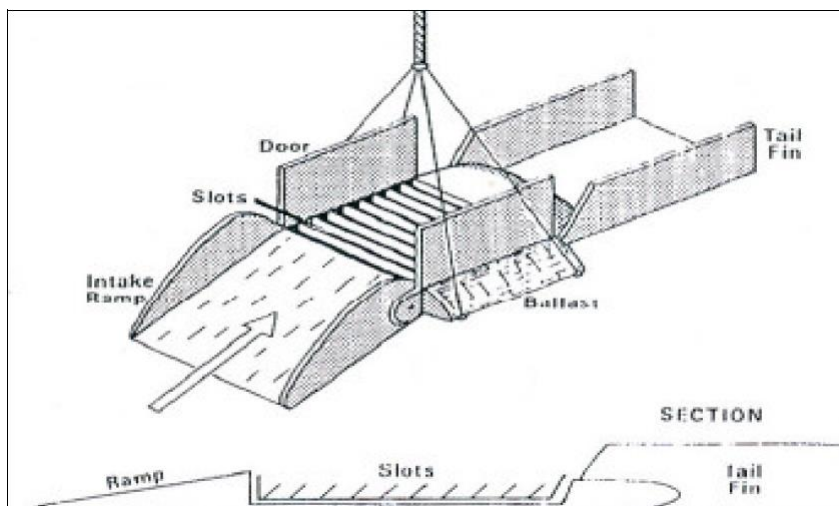


Figure I.5 : exemples d'échantillonneurs Helley-Smith (Malavoi Jr, 2005)

- **Les pièges** : constitués de récipients très aplatis de section longitudinale triangulaire dont le bord correspondant au sommet du triangle sont dirigés vers l'amont. A l'opposé dans la partie supérieure avale du récipient, une série de petites cloisons inclinées vers l'aval constitue le piège (figure I.6) où viennent se prendre les matériaux (sable essentiellement). (Malavoi Jr, 2005)



**Figure I.6** : Echantillonneurs de charge de fond (piège) (Malavoi Jr, 2005)

- **Les sondeurs à ultrasons** : permettent de suivre le déplacement des dunes dans les fonds sableux à faible pente. Hors des parcelles et de petit bassin versants dont les exutoires peuvent être équipés de piège ou de fosse à sédiments, la mesure de transport de fond reste imprécise. Les dispositifs communément utilisés perturbent en effet de manière non négligeable de régime de transport de fond.

### I.3 Méthodes de défenses contre l'érosion et le transport solide

Les moyens de lutte contre l'érosion dans les interfluves et les cours d'eau sont :

#### 1) dans les interfluves

##### a) procédés agro-techniques

Les méthodes agro-technique spécialisées dans la protection contre l'érosion, consiste surtout en procédés de cultures appropriées pour retenir l'eau.

##### b) Restauration des forêts

Lorsque reforestation est possible, c'est un moyen efficace de conservation des sols.

**c) procédés hydrotechniques**

Les procédés hydrotechniques de protection comportent certains types de structures et ne sont utilisés que si cela se justifie économiquement, ou si d'autres procédés se sont révélés inefficaces. (Les fosses d'infiltration, les barrages pour la rétention des sédiments ; des terrasses le long des courbes de niveau, des ouvrages de retenues de déversions au sommet des ravines, etc.).

**2) dans les cours d'eau****a) Revêtement des berges**

Par la mise en place d'un revêtement de protection fait d'un matériau résistant à l'érosion (les enrochements, le béton ...) et déposés directement sur le talus de la berge.

**b) Freinage de l'écoulement**

En mettant en place des structures perméables parallèlement à la base des berges. La diminution de la vitesse réduit les risques d'érosions et facilite le dépôt des sédiments et la croissance de la végétation le long des berges.

**b) Guidage de l'écoulement**

Par l'emploi de jetée, ou chicane pour écarter les courants et les vagues des zones sensibles. On peut utiliser des structures perméables ou imperméables.

**d) Aménagement hydraulique**

Par la mise en place des dispositifs efficaces pour empêcher des affouillements indésirables du lit à l'aval de l'ouvrage, on utilise souvent : bassin de tranquillisation ; sauts de ski, correction torrentielle. (UNESCO, 1986)

## I.4 L'Envasement

### I.4.1 Généralité :

Un réservoir s'engrave d'autant plus rapidement que sa capacité devient de plus en plus faible par rapport au débit solide transporté par le cours d'eau qui l'alimente.

Le mécanisme d'envasement est généré en général par l'apport solide transporté par les cours d'eau qui viennent alimenter les réservoirs. (MEZIANE S.M, 1992)

### I.4.2 Mécanisme de l'envasement :

#### ❖ Comportement des sédiments grossiers

Les eaux de la rivière arrivant dans les eaux claires de la retenue sont freinées dans la zone de remous, qu'on peut en général caractériser par la présence d'objets flottants. Elles perdent leurs matériaux grossiers, qui vont former un delta en queue de retenue (Figure I.7). Il s'étend en amont, et avance vers le barrage avec le temps au futur et à mesure des apports.

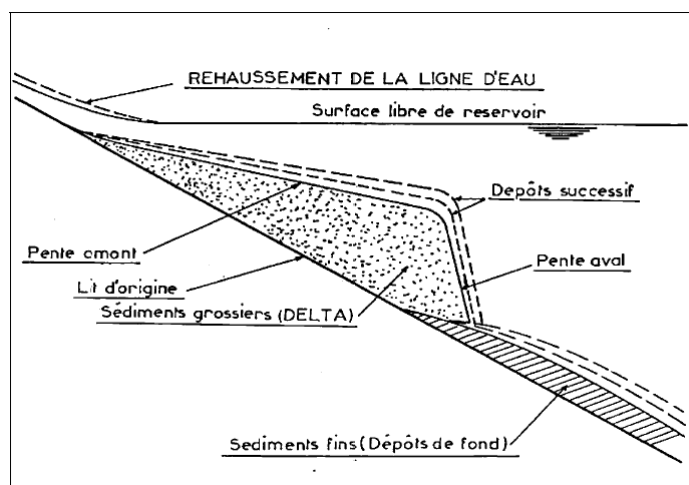


Figure I.7 : Comportement des sédiments grossiers (Bouchelkia H, 2009)

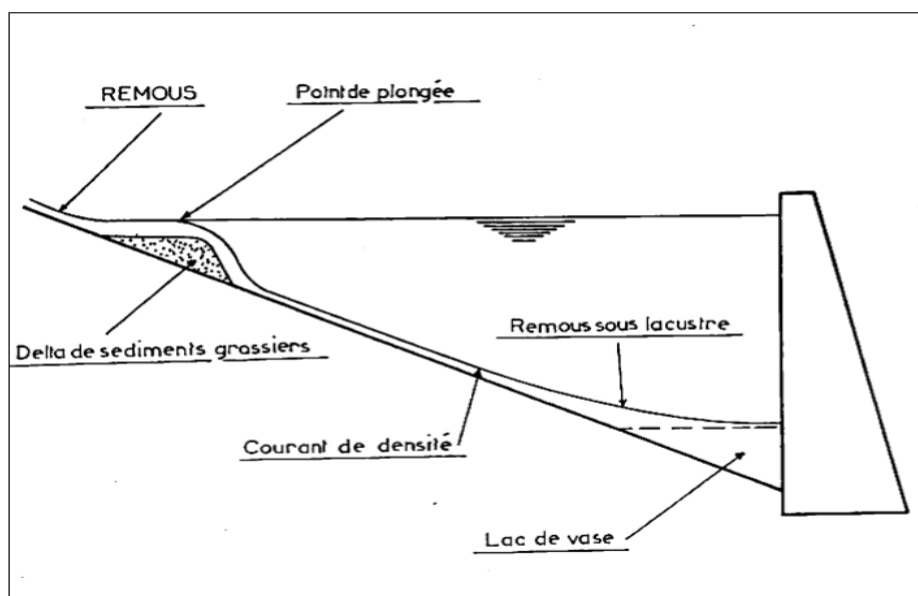
❖ **Comportement des sédiments fins** (Figure I.8)

Dans la zone de remous, les eaux turbides entrant dans la retenue forment avec les eaux claires de celles – ci un front plus ou moins net et plus ou moins vertical. Les sédiments fins peuvent se comporter de deux façons :

- si un courant de densité s'est formé, il peut sous certaines conditions hydrauliques, s'écouler au fond de la retenue (dans l'ancien lit de la rivière) et transporter les vases jusqu'au pied du barrage. Elles s'accumulent en l'absence de soutirage de fond, en formant un lac de vase d'un volume qui peut être très important.
- Si le courant de densité ne s'est pas formé, les sédiments fins sont tributaires de la gravité, de la turbulence et des écoulements dans la retenue. Une fois déposées au fond, les vases sont susceptibles de former des coulées boueuses vers les particules les plus basses de la retenue.

Lorsqu'elles sont stabilisées, et en l'absence de mouvements importants dans la retenue, les dépôts vont se consolider, en se débarrassant de leur eau interstitielle.

(BESSENASSE M, 2010)



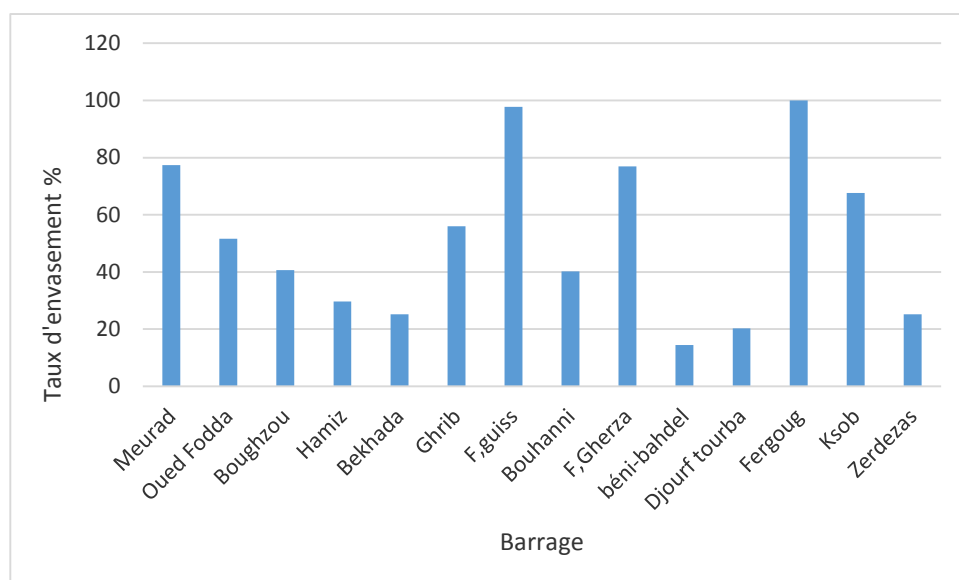
**Figure I.8** :comportement des sediments fins (Bouchelkia H, 2009)

### I.4. 3. L'envasement en Algérie

Les 72 grands barrages en exploitation totalisent une capacité initiale de stockage de plus de 7 milliard de m<sup>3</sup> garantissant dans des conditions pluviométriques normales un volume annuel de 2.2 Milliard de m<sup>3</sup>.

L'état actuel de nos barrages se dégrade de jour en jour par l'alluvionnement accéléré des retenues. Il s'agit d'un problème qui n'est pas spécifique à l'Algérie, mais se pose là où l'homme doit domestiquer des eaux sauvages pour pourvoir à ses besoins.

La situation des barrages les plus affectés par ce phénomène et dont l'envasement a atteint des taux très élevés et pour lesquels les équipements hydromécaniques sont hors usage se présente dans la (Figure .I.9 et le tableau I.2)



**Figure I.9** : estimation du taux d'envasement en l'an 2010 (in HADIDI A, 2008)

On remarque par exemple que le barrage de Fergoug est complètement envasé, celui de Foug Elgherza est envasé à 76.9%, Foug Gueiss à 97.8% et Meurad à 77.4%.

**Tableau I.2 : les barrages les plus envasés en Algérie en 2010**

N°	Barrage	année Mise en eau	Capacité Initiale Hm <sup>3</sup>	Capacité Levé Hm3)1986	capacité Estimée 1989	Capacité Estimée 2000	Volume Totale Vase Hm3	Nombre d'année	Envasement moyen annuel calculé	capacité Estimée 2010	Volume Vase 2010	Taux d'envasement %
1	Meurad	1860	0,9	0,3	0.3	0.25	0.65	140	0.005	0.2	0.7	77.4
2	Oued Fodda	1932	228	132,7	130.9	125.5	102.5	68	1.507	110.4	117.6	51.6
3	Boughzou	1934	55	35,6	3403	35.6	19.4	66	0.294	32.7	22.3	40.6
4	Hamiz	1935	21	16,4	16.2	15.6	5.4	65	0.083	14.8	6.2	29.7
5	Bekhada	1936	56	45,1	44.7	43.8	12.2	64	0.191	41.9	14.1	25.2
6	Ghrib	1939	280	165,6	160.9	145.2	134.8	61	2.210	132.1	156.9	56
7	F,guiss	1939	3	1,6	1.4	0.48	2.52	61	0.041	0.1	2.9	97.8
8	Bouhanni	1948	73	51,6	50.8	48.4	24.6	52	0.473	43.7	29.3	40.2
9	F,Gherza	1950	47	26,5	24	16.9	30.1	50	0.602	10.9	36.1	76.9
10	béni- bahdel	1952	63	56,5	56.3	55.5	7.5	48	0.156	53.9	9.1	14.4
11	Djourf tourba	1960	350	7	309	296.4	53.6	31	1.729	279.1	70.9	20.3
12	Fergoug	1970	18	26.4	3.5	3.93	14.07	30	0.469	0.0	18	100.0
13	Ksob	1977	29,5	20.2	25.9	15.6	13.9	23	0.604	9.6	19.9	67.6
14	Zerdezas	1973	31	20.2	19.4	25.3	5.7	27	0.211	23.2	7.8	25.2

#### **I.4.4. Les problèmes posés par l'envasement :**

L'envasement pose dans les barrages d'énormes problèmes que nous résumons comme suit :

##### **I.4.4.1 Réduction de la capacité des retenues.**

##### **I.4.4.2 Impact de l'envasement sur la qualité de l'eau du barrage**

Il n'y a pas une relation directe entre la vase et l'eau, mais la présence d'une quantité importante de vase dans un barrage accélère l'eutrophisation des eaux du lac du barrage

##### **I.4.4.3 Blocage des vannes**

Les dépôts vaseux durant les premières années, pertuis de vidange sont épargnés par l'envasement. Mais dès que le volume « mort » est atteint, les vannes seront menacées par les dépôts de vase. Avec les manœuvres de vannes, un cône de vase sera dégagé près des ouvertures. Avec le temps les vannes finiront par se colmater et devient difficile toute manœuvres des vannes.

##### **I.4.4.4 Envasement des canaux d'irrigation**

L'irrigation des terres agricoles par les eaux chargées en provenance des barrages envasés pose d'énormes problèmes pour les agriculteurs. Plusieurs kilomètres de canaux, les bassins et les siphons se trouvent envasés après chaque opération d'irrigation. Ceci oblige les agriculteurs à effectuer périodiquement des opérations de curage par des moyens mécaniques



#### **I.4.5 Méthodes de détermination de taux d'envasement**

Le contrôle de l'envasement des retenus permet la surveillance des ouvrages et la détermination des mesures de protection à prendre, parmi les méthodes les plus utilisées pour déterminer le taux d'envasement des retenues, on trouve :

##### **a. Mesure a l'échosondeur**

Le principe de cette méthode est de relever le niveau des fonds de la retenue, le long de profil en travers choisi au préalable par un échosondeur à ultra-son. Connaissant les profils en travers d'origine, et en utilisant les nouveaux profils envasés on peut déduire le volume de la vase déposée au fond de la retenue, cette méthode est utilisée dans les grandes profondeurs car la précision est de l'ordre de 20 cm.

##### **b. Méthode de turbidimétrie**

C'est plutôt une méthode qui donne un aperçu sur l'envasement future, le débit massique instantané au niveau d'une station est obtenu en multipliant la turbidité instantanée par le débit liquide instantanée, on trace le turbidigramme fournissant la masse solide instantanée véhiculée en fonction de la durée de la crue

##### **c. Méthode de stéréogrammétrie**

L'un des procédés actuels le plus précis pour établir les données de base est la stéréogrammétrie ancienne complétée au sol par un travail topographique, l'erreur commise par ce procédé dans l'évaluation des coordonnées des points particuliers, et de l'ordre de 0.1 m, une telle précision permet l'utilisation de cette technique pour déterminer le volume d'envasement des retenues par répétition de figure graphique semblables à des intervalles de temps suffisants de l'ordre de 5 ans ou même de 2 ans.

##### **d. Méthode bathymétrique**

Le principe de cette technique consiste à un levé des fonds le long de profil, préalablement repérés. Le choix des profils dépend en particulier de la longueur de la retenue.

Pour une meilleure estimation des sédiments piégés, les profils doivent être parallèles et matérialisés sur le terrain par des repères visibles (canevas) depuis la barque (appareil topographique) quelle que soit la cote du plan d'eau.

Dans le cas d'une retenue méandrique, les profils doivent être assez rapprochés pour quantifier le volume entre 2 sections.

#### **I.4.6 Moyens techniques de lutte contre l'envasement**

##### **\*Aménagement des bassins versants**

Le meilleur moyen technique de lutte contre l'envasement est situé au niveau de la source de production des particules, c'est-à-dire au niveau du bassin versant. Diverses méthodes sont appliquées comme le reboisement, la réalisation des banquettes et l'aménagement des ravines par la correction torrentielle (photo I.5 et I.6).



**Photo I.5 :** Une série de seuils réalisée sur une ravine du bassin versant de Beni Chougarne

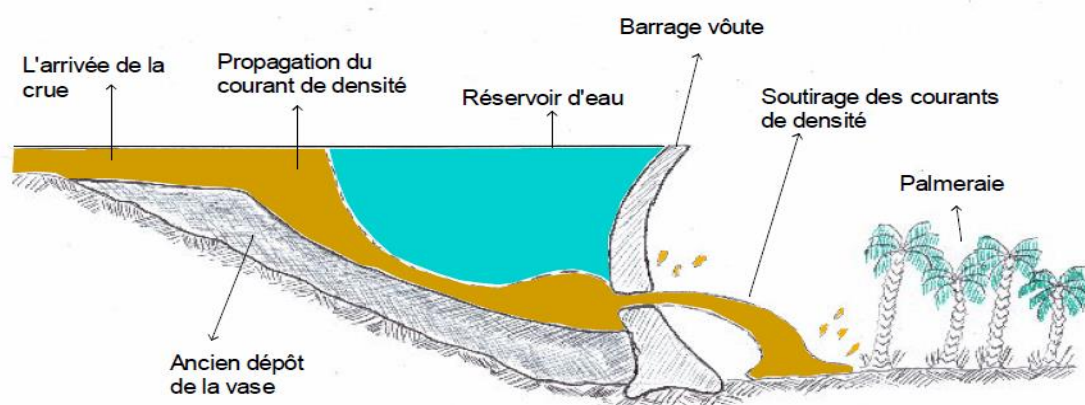
**Photo I.6 :** Banquettes réalisées au niveau du bassin versant d'oued Mina

##### **\*Dévasement des barrages**

Deux modes de désenvasement peuvent être opérés au niveau d'un barrage. Il s'agit d'un dévasement périodique et d'un dévasement occasionnel.

##### **\*Dévasement périodique : Soutirage des courants de densité**

A l'arrivée des crues, l'ouverture des pertuis de vidange permet de soutirer les Courants de densité qui se rapprochent du mur du barrage (figure I.10). Grace à la forte concentration en particules fines, le courant de densité arrive au pied du barrage après avoir parcouru plusieurs kilomètres. (Remini et al, 2009 ; Remini B, 2000).



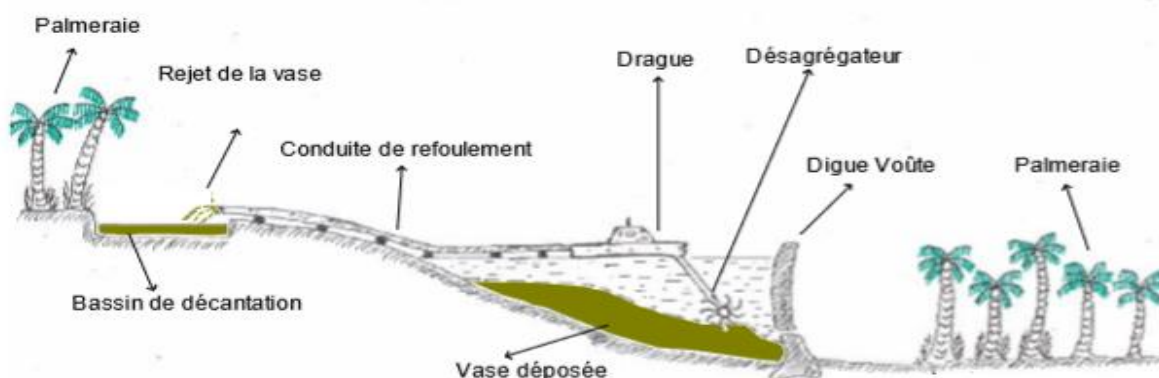
**Figure I.10** : Schéma du soutirage d'un courant de densité par les pertuis de vidange d'un barrage (schéma Remini B, 2016)

**\*Dévasement périodique : Evacuation de la vase par la vanne de fond**

Pour éviter le blocage des vannes de fond. L'ouverture périodique des pertuis de vidange permet d'extraire les dépôts vaseux situés. Dans ce cas, uniquement la vase située dans la zone basse qui peut être perturbée par les manœuvres des vannes. De telles manœuvres sont extrêmement nécessaires pour alléger l'ouverture des pertuis. Un retard dans l'ouverture pourra avoir des dégâts (Remini B, 1997)

**\*Dévasement occasionnel : Dragage d'un barrage** (Figure I .11)

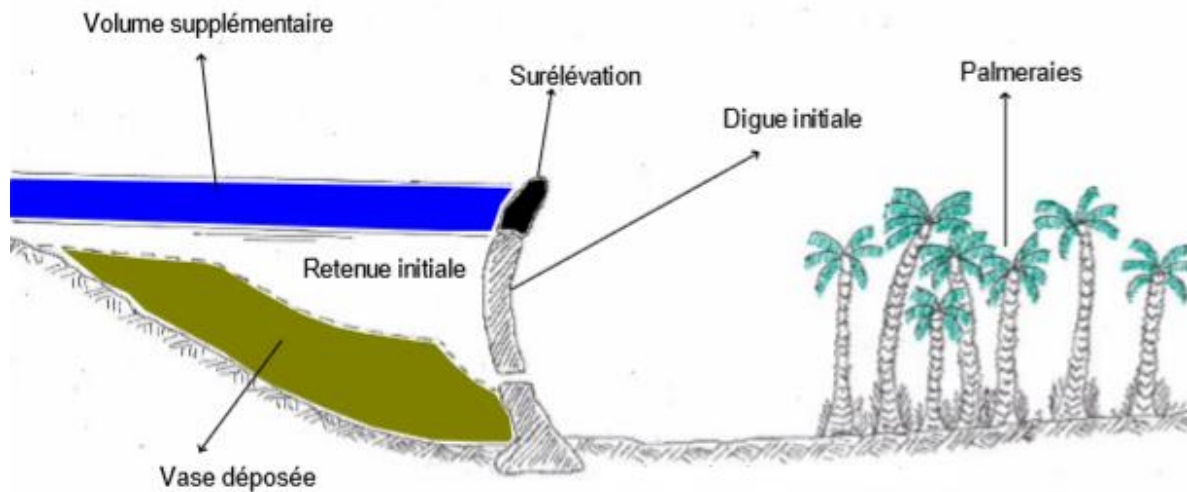
Dans le cas où l'envasement atteint un niveau très élevé dépassant un taux de 50%, le dragage peut s'avérer comme ultime solution pour sauver le barrage et prolonger sa durée de vie (Remini et Hallouche, 2004 ; Remini et al, 2009).



**Figure I.11**: Schéma synoptique d'une opération de dragage dans un barrage (schéma Remini B, 2016)

**\*Surélévation du barrage**

Dans le cas d'un envasement très avancé, la surélévation d'un barrage surtout s'il s'agit d'un grand barrage peut s'avérer une solution efficace. Au lieu d'enlever la vase de la cuvette, on surélève la digue de quelques mètres pour gagner un volume supplémentaire (figure I.12).



**Figure I.12:** Schéma synoptique d'une surélévation d'un barrage (schéma Remini B, 2016)

## II.1- situation géographique

Le bassin versant de la Tafna, situé au Nord-Ouest du territoire algérien (figure. II.1), s'étend sur la totalité de la wilaya de Tlemcen sur une superficie de 7245 km<sup>2</sup>. Selon la nouvelle structuration des unités Hydrologiques en Algérie, le bassin versant de la Tafna appartient à l'ensemble de l'Oranie –Chott Cherguie (figure. II.2)

Globalement, le bassin versant peut être subdivisé en trois grandes parties (figure. II.3) :

- partie orientale avec comme principaux affluents l'oued Isser et l'oued Sekkak),
- partie occidentale comprenant la Haute Tafna (oued Sebdoou et oued Khemis) et l'oued Mouilah
- partie septentrionale : qui débute pratiquement du village Tafna et s'étend jusqu'à la plage de Rechgoun, embouchure de la Tafna sur la mer. Les oueds Boukiou, Boumessaoud et Zitoun sont les principaux affluents de cette partie.

Les plaines du bassin de la Tafna s'étendent aux pieds des monts de Tlemcen en avant des massifs de Traras et du Tessala, elles sont entourées de massifs aux reliefs élevés dessinant un édifice régulier formé essentiellement de terrains mésozoïques et cénozoïques.

Les monts des Traras au Nord-Ouest dressent une barrière entre le bassin et la mer, ils correspondent à une série de crêtes de direction NE – SW culminant à 1136 m au djebel Fillaoucène.

L'oued Tafna est un cours d'eau de 170 Km de long, il prend sa source dans les Monts de Tlemcen. Le cours de cet oued peut se subdiviser en trois parties : la haute Tafna, la moyenne Tafna et la basse Tafna.

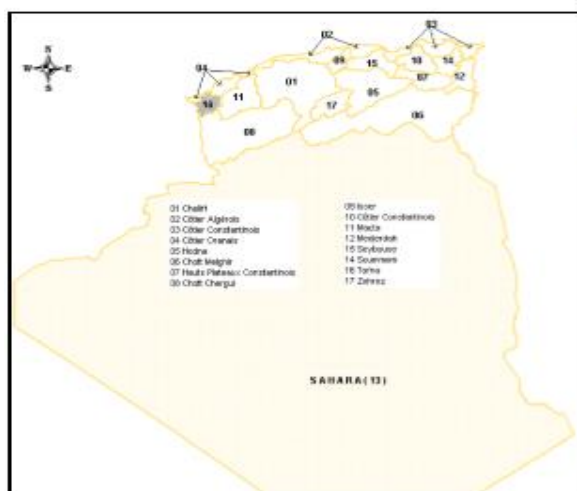


Figure II.1 : Bassins versants Algériens  
(Bouanani A, 2004)

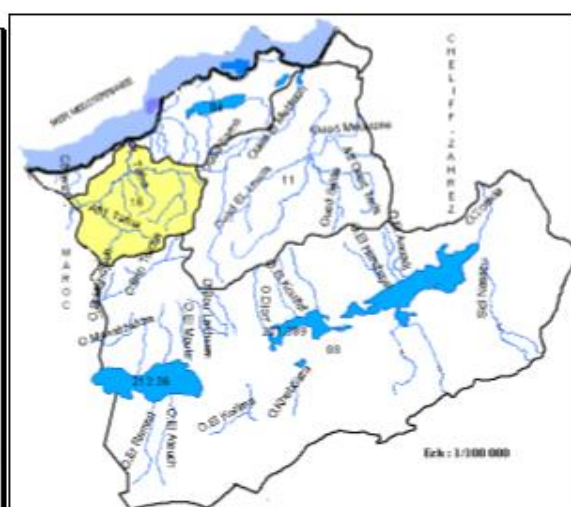


Figure II.2 : Le bassin versant de la Tafna dans l'ensemble Oranie Chott Chergui (Bouanani A, 2004)



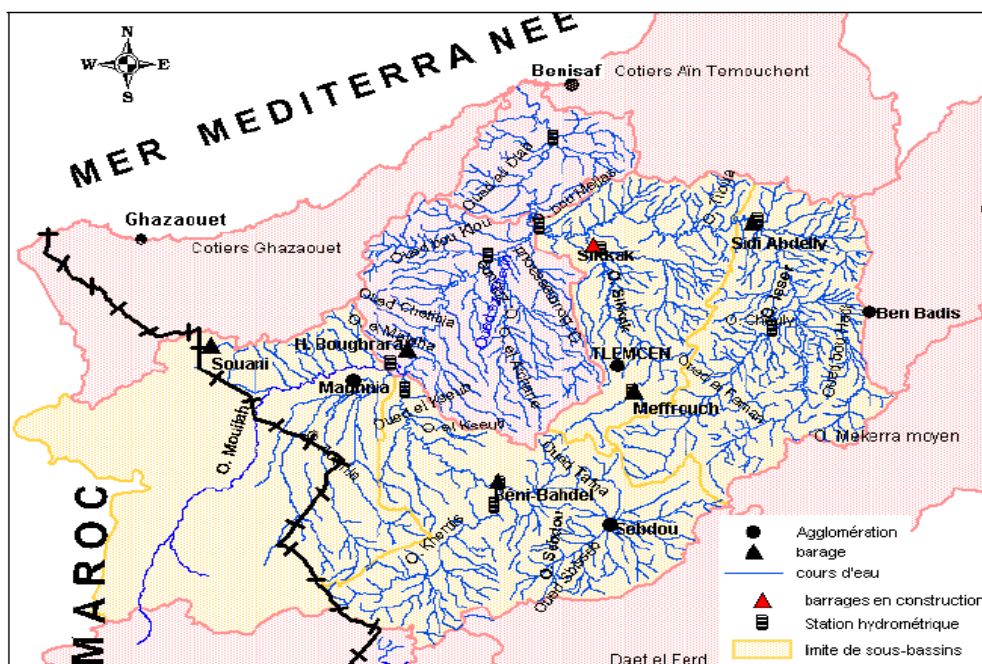


Figure II.3 : Réseau hydrographique de la Tafna (Bouanani A, 2004)

### II.1.1 situation du secteur d'étude (partie amont de l'oued Tafna)

- **la haute Tafna** : l'oued prend naissance dans les Ouled Ouriach et s'affirme après la jonction d'un grand nombre de ramifications creusées dans les terrains jurassiques et descend de crêtes atteignant 1500m. Ces ramifications se réunissent aux environs de Sebdo à une altitude d'environ 900m. A partir de cet endroit et jusqu'à Sidi Medjahed, l'oued suit un cours dans une vallée encaissée creusée dans les terrains jurassiques. Dans cette région montagneuse, l'oued Tafna reçoit l'oued Khemis (rive droite) et l'oued Sebdo (rive gauche).

(Bouanani A, 2004)

## **II.2- Géologie du bassin de la Haute Tafna**

Cette partie est un essai de synthèse tiré du travail de Thèse de Bouanani 2004.

### **II.2.1-Cadre géologique général :**

Le secteur d'étude fait partie des monts de Tlemcen qui se trouvent entre :

- le domaine des nappes du Tell au Nord,
- le domaine stable des hautes plaines oranaises au Sud.

Les assises sédimentaires attribuées au Jurassique supérieur et Crétacé inférieur sont principalement formées de carbonates

Cet ensemble constitue la bordure méridionale des monts de Tlemcen, situé dans le couloir délimité à l'ouest par l'accident de la Tafna et à l'est par celui d'oued Chouly

### **II.2.2-Analyse lithostratigraphique :**

La dépression de Sebdou se trouve entourée par des terrains appartenant essentiellement au Jurassique supérieur

L'évolution verticale des terrains rencontrés va du Jurassique inférieur au Plio-quaternaire

(Figure II. 4) montre deux grandes séries lithostratigraphiques distinctes, qui sont décrites de bas en haut :

- les séries anciennes
- les séries récentes (Plio-Quaternaire)

### **II.2.2.1- les séries anciennes :**

#### **a) les grès de Boumediene (Figure II.5)**

D'âge Oxfordien supérieur-Kimméridgien inférieur, il s'agit d'un ensemble à dominance gréseuse, avec des passées argileuses masquées le plus souvent, par des éboulis ou la végétation.

Ces grès, à ciment calcaires, se présentent en bancs assez durs dont les épaisseurs varient de quelques mètres. Ces grès sont particulièrement développés au NW de notre secteur dans la région de Béni-Hassoune au niveau de Teltemda, où ils sont riches en figures sédimentaires

#### **b) Les calcaires de Zarifet**

Il s'agit de bancs calcaires séparés par de minces intercalations de calcaires marneux écailleux, parfois quelque peu fossilifères, marquant presque partout la base très nette du Kimméridgien et reposent directement en concordance sur les grès de Boumediene formant les falaises des environs de Tlemcen. L'épaisseur de cette formation peut atteindre 25 m au col de Zarifet.

#### **c) Dolomies de Tlemcen**

D'âge Kimméridgien moyen-Kimméridgien supérieur, il s'agit de dolomies cristallines grises, avec de nombreuses cavités remplies de calcite. Elles affleurent autour d'Ain Fezza, dans la forêt de Zarifet, au Nord de Tlemcen, dans les djebels Teffatisset, Ain El Hout et sur le plateau de Terny. Elles peuvent être surmontées par les calcaires de Stah épargnés par la dolomitisation. Cette formation peut atteindre 200 m aux environs de Tlemcen à El Ourit et on la rencontre dans tous les sous-bassins étudiés.

#### **d) Marno-calcaires de Raourai**

Ce sont des marnes grises, blanchâtres en surface, intercalées de nombreux lits et bancs de calcaires marneux durs ; cette formation est limitée à sa base par les lits calcaires de Stah et au sommet par les calcaires de Lato, ou les premières assises des dolomies de Terny. Elle affleure particulièrement sur le plateau de Terny, dans le djebel Lato et à l'Est de Ain Fezza.



**e) Dolomies de Terny**

Elles correspondent à des dolomies parfois vacuolaires avec de nombreuses stratifications obliques et un aspect très massif, qui permet de bien les distinguer des dolomies de Tlemcen. Elles sont développées au niveau du plateau des Azaïls, de Terny et près du barrage Meffrouche, leur épaisseur est de l'ordre de 100 m dans le plateau de Terny. Elles sont bien représentées au niveau des bassins de l'oued Sebdu.

Ces trois formations précédentes sont attribuées au Tithonique inférieur.

**f) Marno-calcaires de Hariga**

D'âge Tithonique moyen, il s'agit d'une alternance de marnes et de Calcaires. Elles sont bien exposées au djebel Hariga avec une épaisseur de 165 m dans le bassin de Sebdu.

**g) Marno-calcaires d'Ouled Mimoun "Tithonique supérieur ",**

Cette formation renferme les couches de passage du Jurassique au Crétacé, elle est limitée à sa base par les "grès de Merchiche", dans le secteur de Merchiche, sur le rebord sud du plateau de Terny. Elle affleure nettement dans le secteur d'Ouled Mimoun, ainsi qu'au niveau de la bordure nord du fossé de Sebdu.

**h) Les argiles de Lamoricière (Berriasien-Valanginien) :**

C'est une formation argilo-gréseuse, nettement calcaire au sommet. Elle affleure au niveau de Hassi Zerga dans le bassin de Sebdu.

**i) grès de Berthelot (Hauterivien) :**

Caractérisés par une récurrence de la smectite et surtout par l'application du chlorite (10 à 15 m). La base est riche en stratifications obliques, marquée par des bancs de dolomies pulvérulentes.

### **II.2.2.2 Les séries récentes :**

Elles comportent de bas vers le haut d'après la synthèse tirée du travail de (Baba –Hamed et Kerzabi 1991)

#### **a. Formation de Sebdou :**

Attribuée au Plio-Quaternaire, elle occupe tout le fossé de Sebdou et correspond à une série à éléments hétérométriques et hétérogène, formant des couches redressées. Ce sont des dépôts conglomératiques, des calcaires blancs qui recouvrent la plupart des terrains anciens, ces dépôts ne sont pas consolidés.

#### **b. Formation quaternaire :**

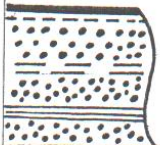
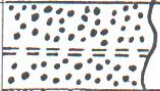


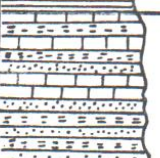
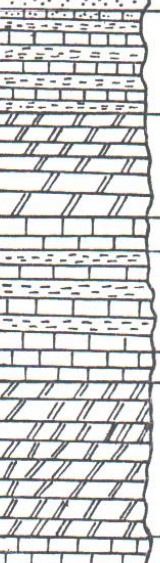

On considère ici les alluvions anciennes formées le long des oueds que les terrasses, les formations de pentes et les croutes calcaires du Quaternaire ancien.

#### **c. Travertin :**

Anciens et récents, constituant de puissants dépôts disposés en masse. Ce sont des dépôts de source, formés en un laps de temps relativement court à l'échelle géologique.

#### **d. Les alluvions récentes :**

Constituées par des dépôts récents indifférenciés, essentiellement dans les vallées et sur les pentes des reliefs, ce sont des limons qui occupent les fonds des oueds.

âge	Colonne lithologique	Formation rencontrée	description
quaternaire		Formation conglomératique	Alluvions croûte calcaires et dépôts continentaux avec au sommet des couches limoneuses
Plio quaternaire		Formation de Sebdu	Dépôt de conglomérat redressé calcaire lacustres vacuolaires
Barremien		Grès de Berthelot	Grès avec la chlorite
Berriasein supérieur		Argile de Lamoricière	Argiles avec des passées gréseuses
Berriasein inférieur		Marno calcaire de O. Mimoun	Grès, calcaire et marnes souvent biodétritique
		Grès Merchiche	
Kimmeridgien		Marno calcaire de Hariga	Alternance de marnes et calcaire
		Dolomie de Terni	Dolomies vacuolaires à patine rousse avec des stratifications oblique
		Calcaire de Lato	
		Marno calcaire de Raourai	Micrite et pelmécrite, alternance de marnes grises verdâtres et de calcaire
		Calcaire de Stah	
		Dolomie de tlemcen	Dolomies cristallines grises à patine rousse, dans les dolomies on observe des lentilles stromatolitiques
Oxfordien supérieur		Calcaire de ZArifet	Calcaire bleu
		Grès de Boumediène	Grès bruns en gros bancs séparés par des interlits argileux Au sommet, on trouve quelques passées marneux et calcaires.

**Figure II.4 :** Succession lithostratigraphique du bassin de la Haute Tafna (Baba – Hamed et Kerzabi 1991)

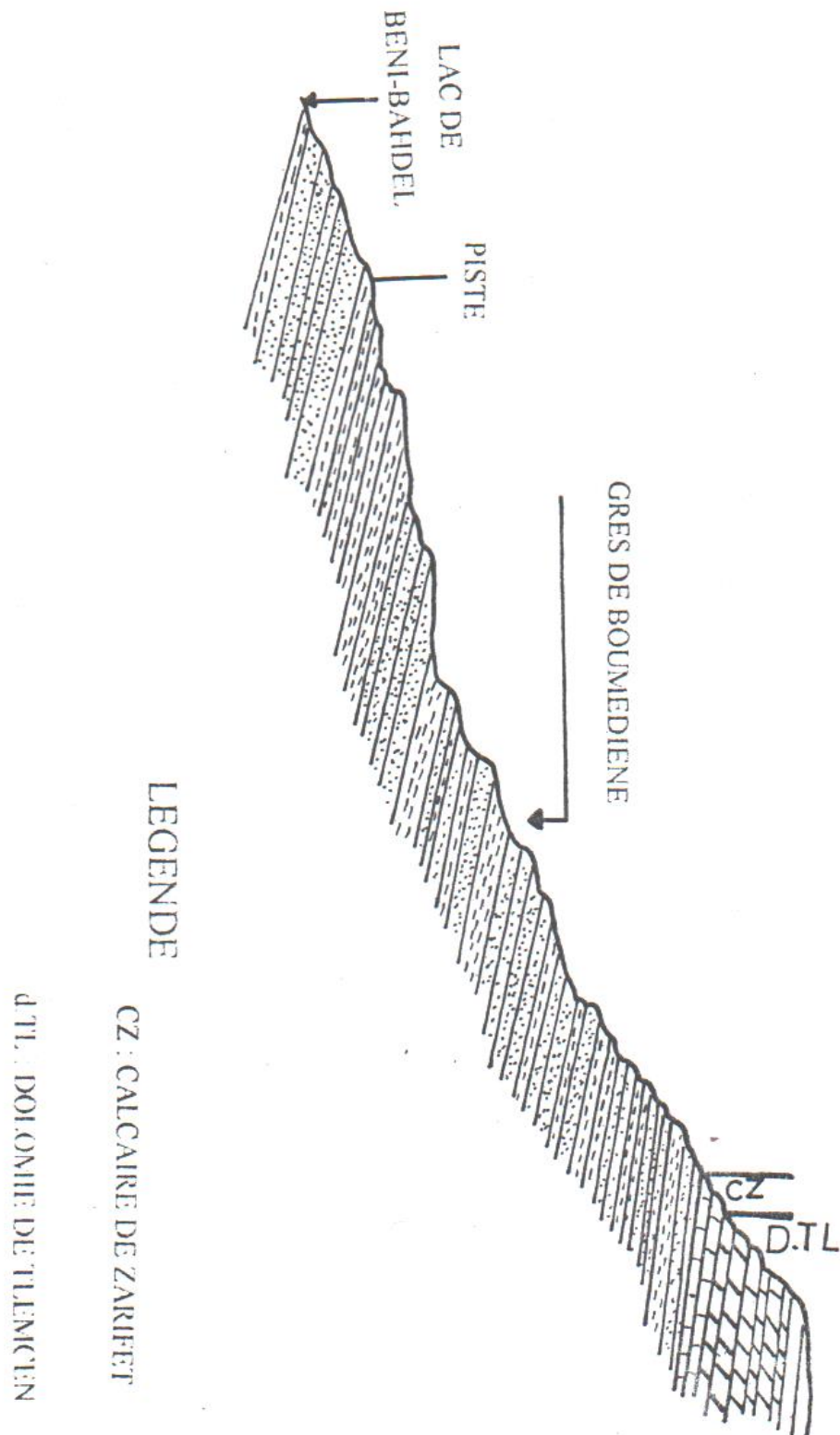


Figure II.5 : coupe schématique au niveau du barrage de béni Bahdel (B.N.E.D.E.R, 1993)

### II.3. Sols et végétations

Les sols des monts de Tlemcen constituent une véritable succession de divers types de sol variant de façon continue. Les sols sous couvert forestier sont assez étendus.

\*Versant sud de mont de Tlemcen : On observe la dominance des lithosols, avec les sols bruns, les sols fercialitiques sont très peu représentés.

\*vallée de Sebdu et Beniane : Ce sont essentiellement des sols rouges méditerranéens et les sols alluviaux.

\*Vallées de Tad jemout –Tizi : On y trouve les sols bruns les plus dominants avec les sols alluviaux.

\*zone de sidi Medjahed : Les plus dominants dans cette zone se sont les sols fercialitiques et les sols alluviaux.

\*vallée d'oued Khemis : Les plus dominants se sont les sols alluviaux caractérisant la vallée des oueds en association avec les sols fercialitiques.

La végétation est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin. La présence de végétation va donc jouer le rôle de « Régulateur » dans le régime d'écoulement. L'occupation végétale a une influence directe sur l'écoulement fluvial aussi bien comme facteurs orographiques que climatiques. La résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense. Cette influence de la forêt sur le régime des eaux en domaine méditerranéen a un rôle considérable. Le paysage végétal du bassin de la Tafna a été largement dégradé et défriché en montagne par les incendies et par une petite agriculture extensive et un surpâturage endémique. Ce qui a entraîné une perte d'eau par évaporation et une accélération de l'érosion. (Bouanani A, 2004)

Nous présentons dans le tableau( II.1 et II.2) Et les figures (II.6 et II.7), l'occupation du sol au niveau du bassin de la Haute Tafna.

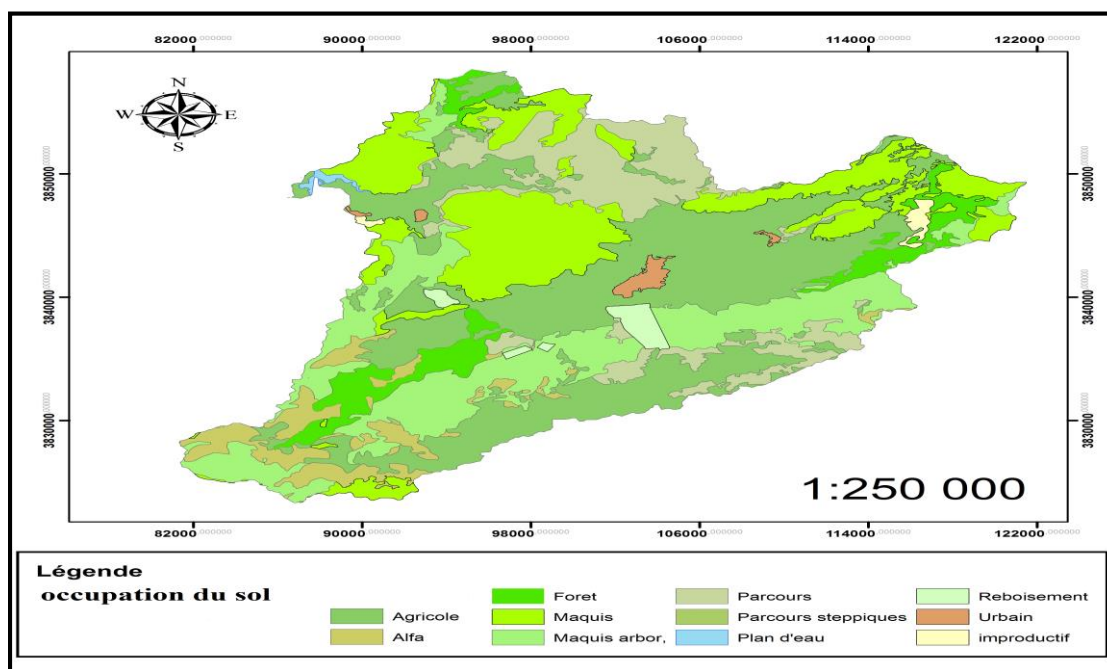


Figure II.6 : carte d'occupation du sol du bassin Sebdu sous Arcgis

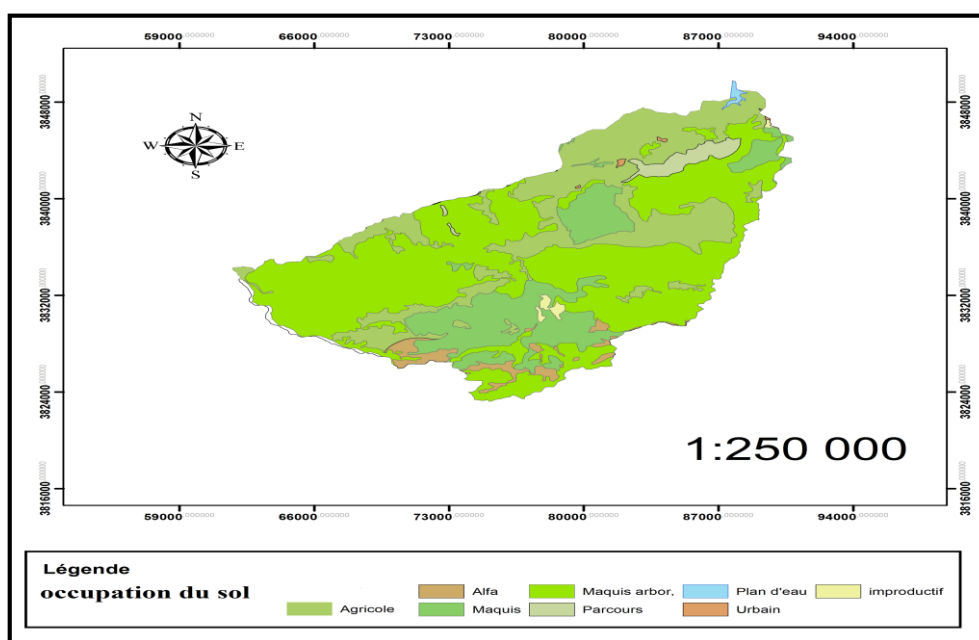
Tableau II.1 : Distribution du couvert végétal dans le bassin de Sebdu (D.F.N)

Sebdu		
type d'occupation	surface (km <sup>2</sup> )	surface%
Agricole	235,53	33,90
Alfa	38	5,47
Foret	44	6,33
Improductif	3,67	0,53
Maquis	144,74	20,83
maquis Arbor	130,23	18,74
parcours	85,32	12,28
parcours steppiques	0,17	0,02
plan d'eau	1,63	0,23
Reboisement	8,47	1,22
Urbain	5,44	0,78

La figure II.6 et le tableau II.1 précédent montrent que le bassin de Sebdou accuse une forte action anthropique dominée par les activités agricole (34% de la surface totale du bassin).d'où l'aggravation l'action érosive.

La figure II.7 et le tableau II. 2 ci-dessous montre que le bassin de Khemis est recouvert d'une importante végétation (maquis+maquis Arbor = 68% de la surface totale du bassin) dont la densité retient les eaux de pluie et participe à leur évaporation.

Cette caractéristique fait que le bassin de Khemis est moins exposé à l'érosion que celui de Sebdou.



**Figure II.7 :** carte d'occupation du sol du bassin d'oued khemis sous Arcgis

**Tableau II.2 :** Distribution du couvert végétal dans le bassin d'oued khemis (D.F.N)

Khemis		
type d'occupation	surface (km <sup>2</sup> )	surface%
Agricole	95,47	25,64
Alfa	9,51	2,55
Improductif	1,72	0,46
Maquis	59,7	16,04
maquis Arbor	196,97	52,91
parcours	7,5	2,01
plan d'eau	8	2,15
Urbain	0,42	0,11





# Chapitre III

# Hydro- pluviométrie

## Introduction

Plus encore que les facteurs morphologiques, lithologiques et biogéographiques, les conditions climatiques du bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau (Roche 1963, Cosande, 2001...). Ce sont les précipitations, surtout liquides, qui constituent le facteur essentiel intervenant par :

- leur hauteur totale annuelle qui détermine l'abondance fluviale,
- leur répartition mensuelle et saisonnière qui influence directement les régimes hydrologiques.

Les données de précipitation et des débits ont été Mesurées aux stations de Béni-Bahdel (tableau III.1)

**Tableau III.1** : caractéristique des stations pluviométrique et hydrométrique

station	code	Coordonnées		
		X (km)	Y (km)	Altitude (m)
Beni Bahdel pluviométrique	16-04-07	115.0	164.6	666
hydrométrique	16-04-02	118.8	163.4	645

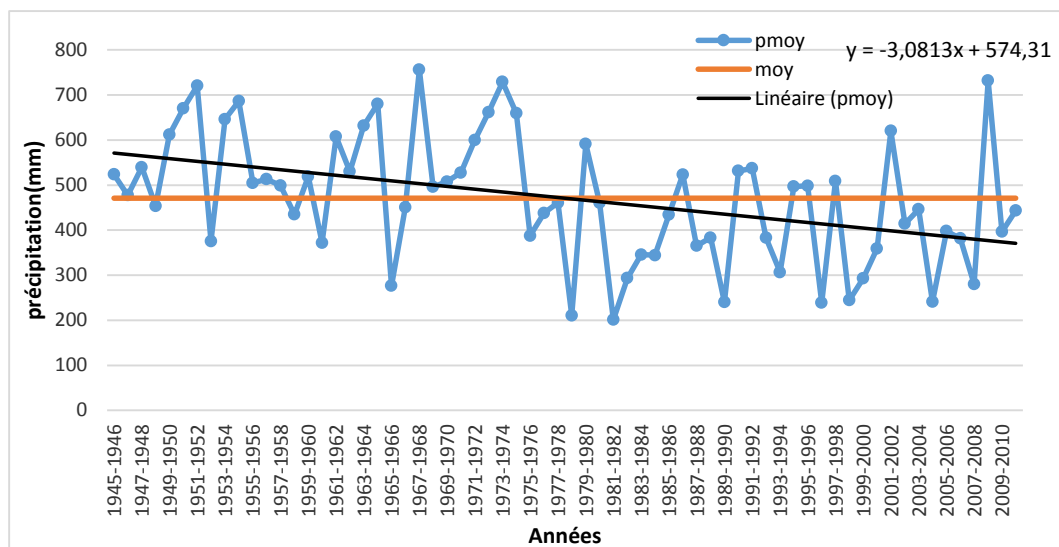
## III.1 -Etude des précipitations

### III.1.1. précipitations annuelles :

La variation des précipitations interannuelles est représenté dans le tableau III.2 et la figure III.1

**Tableau III.2 : répartition annuelle des précipitations (1945-2011)- (station de béni-Bahdel)**

Année	1945-1946	1946-1947	1947-1948	1948-1949	1949-1950	1950-1951	1951-1952	1952-1953	1953-1954
P (mm)	523.5	477.5	539.6	453.5	611.7	670.3	720.6	375.5	646.3
Année	1954-1955	1955-1956	1956-1957	1957-1958	1958-1959	1959-1960	1960-1961	1961-1962	1962-1963
P (mm)	686.2	504.8	513	499	435	519	372.1	607.5	529.9
Année	1963-1964	1964-1965	1965-1966	1966-1967	1967-1968	1968-1969	1969-1970	1970-1971	1971-1972
P (mm)	631.6	680.3	276.4	450.4	756.1	495.9	507.8	527.5	599.8
Année	1972-1973	1973-1974	1974-1975	1975-1976	1976-1977	1977-1978	1978-1979	1979-1980	1980-1981
P (mm)	661.4	729.1	659.2	387.7	438	460.8	210.6	591	460.8
Année	1981-1982	1982-1983	1983-1984	1984-1985	1985-1986	1986-1987	1987-1988	1988-1989	1989-1990
P (mm)	201	293.6	345.6	344.3	434.6	523.4	365.2	383.2	240.2
année	1990-1991	1991-1992	1992-1993	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997	1997-1998	1998-1999
P (mm)	531.3	537.3	382.9	306.7	496.8	498.4	238.8	509.1	244.6
année	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008
P (mm)	293	359.2	620.2	414.3	446.2	240.9	397.9	381.4	280.4
année	2008-2009	2009-2010	2010-2011						
P (mm)	731.8	396.4	443.3						



**Figure III.1 :** Variation interannuelle des précipitations à la station de Béni Bahdel (1945-2011)

La variabilité interannuelle des précipitations est bien marquée d’une année à une autre. Pendant la période considérée la pluie annuelle varie de 201 mm à 756,1 mm pour une moyenne de 471,08 mm

Par rapport à la valeur moyenne de la série, La fig. (III.1) présente deux périodes bien distinctes. D’après la courbe de tendance on peut déceler facilement la baisse des précipitations à partir de 1975/76. Cette baisse pourrait être expliquée par l’effet d’un réchauffement climatique

### III.1.2. Précipitations mensuelles

Le tableau III.3 porte les valeurs moyennes mensuelles des précipitations à la station de Béni Bahdel

**Tableau III.3 :** précipitations moyennes mensuelles à la station de Béni Bahdel (1977-2011)

Mois	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
précipitation (mm)	23,9	32,8	52,1	53,9	48,7	44,1	54	38	35	9	3,3	5,3
Module annuel	400,3											

La valeur maximale des précipitations moyenne mensuelle relatives à la période (1977-2011) tableau(III.3) est observée au mois de mars avec 54mm, et la valeur minimale de 3.3mm au mois de juillet.

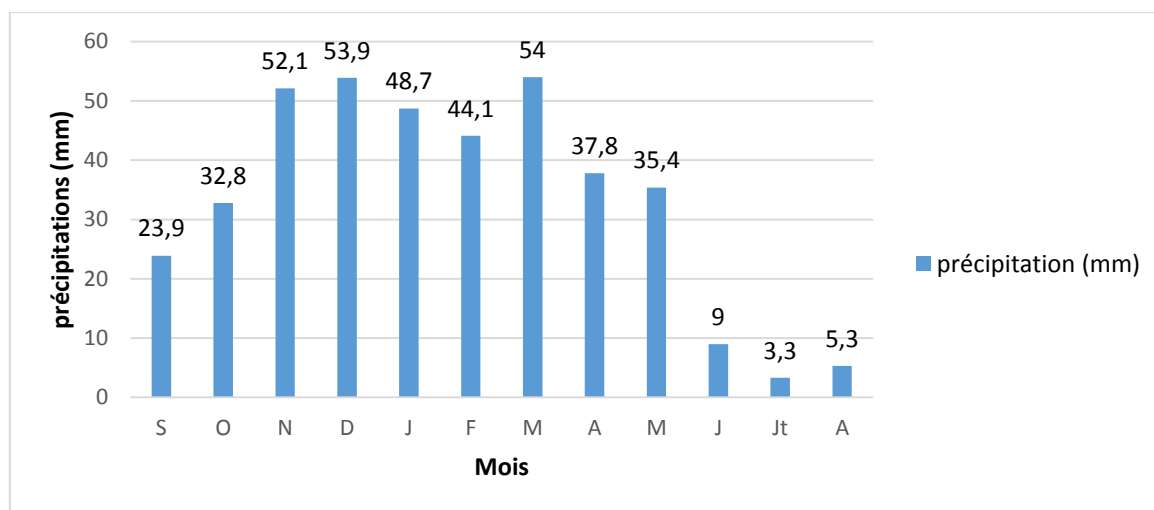


Figure III.2 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles à la station de Béni Bahdel (1977-2011)

D'après l'histogramme (figure III.2) on peut dire que la pluviosité moyenne mensuelle est nettement variable d'un mois à un autre, toutefois on peut distinguer une période pluvieuse qui s'étend de septembre à Mai, le reste des mois la pluviométrie passe sous les 10mm.

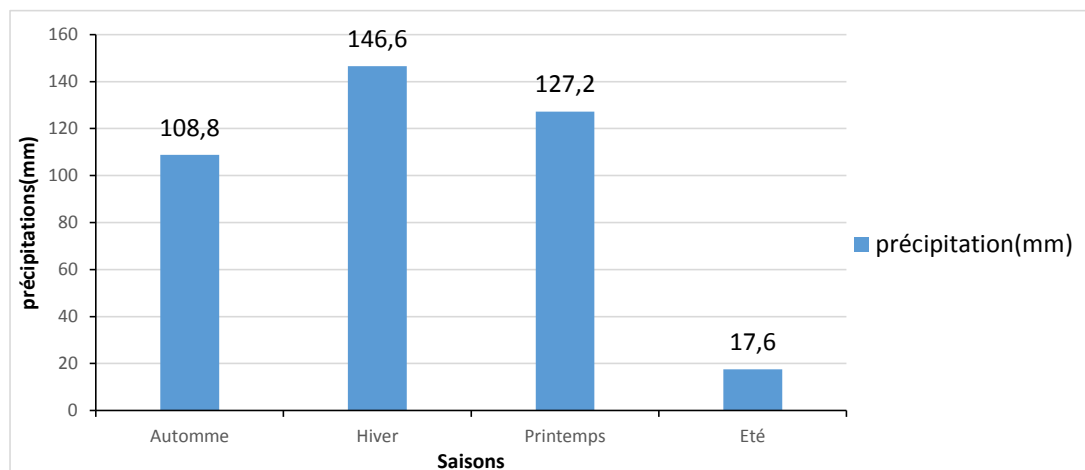
### III.1.3. précipitations saisonnières :

Le tableau(III.4) et la figure (III.3) représentent la distribution de la lame d'eau précipitée durant les 34 années selon quarte saisons.

Tableau III.4 précipitations saisonnières à la station de Béni Bahdel (1977-2011)

saison	précipitation(mm)
Automme	108,8
Hiver	146,6
Printemps	127,2
Eté	17,6

Les données présentées dans le tableau (III.4) montrent que la saison la plus humide est l'hiver et la saison la plus sèche est l'été. En fait, nous avons une saison pluvieuse représentée par l'automne, l'hiver et le printemps et une saison sèche pendant l'été.



**Figure III.3 :** Histogramme des précipitations moyennes saisonnières à la station de Béni Bahdel (1977-2011)

Au vue de l’histogramme des précipitations moyenne saisonnière (figure III.3) on peut remarquer que la pluie de l’été est faible et la pluie de l’automne est importante « caractère orageux » ; ce contraste saisonnier contribue à accroître le pouvoir érosif des précipitations.

### III.1.4 Etude statistique des précipitations :

L’ajustement statistique consiste à vérifier des hypothèses d’homogénéité entre une variable aléatoire et un modèle calculé, si ce modèle est bien superposé à l’échantillon étudié, on peut dire qu’il bien ajusté. L’objet de la méthode statistique est la réduction de la masse de données, qui si importante, devrait être remplacée par un nombre réduit de paramètres statistique pouvant représenter correctement cette masse.

**Pour cette étude nous avons utilisé le code de calcul HYFRAN.**

#### III.1.4.1 Adéquation des données de précipitation annuelle à une loi statistique :

L’analyse statistique des précipitations tout en permettant de préciser les conditions du régime pluviométrique de notre de zone d’étude, nous conduira également à estimer les quantiles relatifs à des périodes de retours définies.

Elle nous permettra de déterminer la loi d’ajustement des précipitations de la station concernée.

Le calcul des fréquences de chaque valeur sera donné par la relation suivante

$$F_i = \frac{i-0.5}{N} \quad (III.1)$$

i : rang

N : période d'observation (nombre d'années)

A partir de la série des précipitations annuelles mesurées à la station de Béni-Bahdel entre 1945 et 2011, nous avons déterminé les paramètres statistiques et l'avons ajusté à une loi de probabilité. Les paramètres de position des précipitations de la station sont consignés dans tableau (III.5)

Tableau III.5 : Paramètres de position des précipitations à la station de béni-Bahdel

Paramètres	Valeurs
Moyenne (mm)	471,08
Variance (mm <sup>2</sup> )	20078,53
Ecart-type (mm)	141,7
Coefficient de variation	0.3

Le CV = 0.3 nous oriente à ajuster notre série de données à une loi normale.

### III.1.4.2 Ajustement par la loi normale

a) Test graphique :

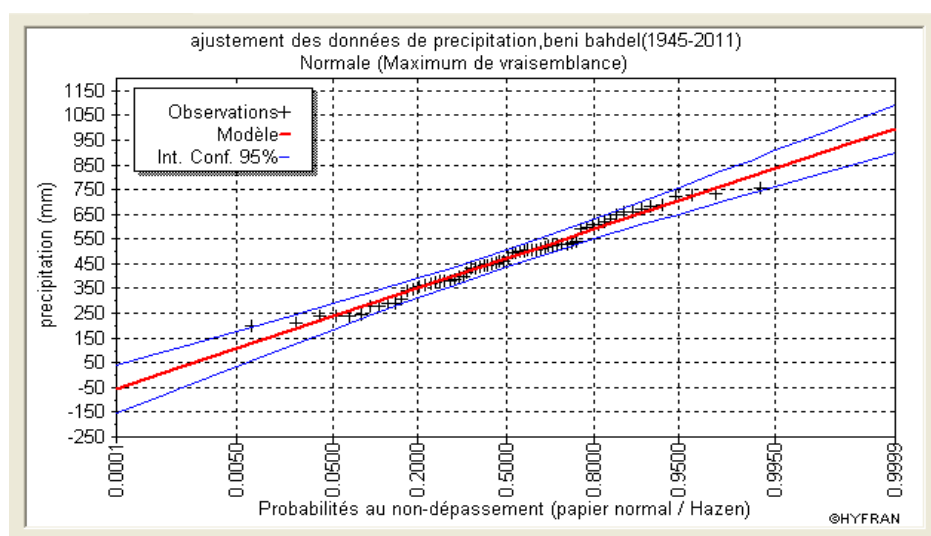


Figure III.4 : courbe d'ajustement des précipitations à la loi normale

On obtient une distribution représenté par une droite (la droite d'henry) d'équation :

$$X = \alpha.u + \beta \quad (III.2)$$

Avec :  $\beta$  = moyenne des précipitations = 471.08mm ;  $\alpha$  = l'écart type =141.7mm

u ; variable réduite de Gauss, pour :

$$F_i=0.5 \quad \longrightarrow \quad U=0 \quad \longrightarrow \quad P= 471.08\text{mm}$$

$$F_i=0.9 \quad \longrightarrow \quad U=1.28 \quad \longrightarrow \quad P= 639.33\text{mm}$$

### b) Test de Khi<sup>2</sup>

Afin de déterminer la valeur du Khi<sup>2</sup>, nous avons repris les séries des modules observés et nous avons reparti ces valeurs en classes, les résultats obtenus sont donnés au tableau (III.6)

**Tableau III.6** : Calcul du X<sup>2</sup>.

Paramètres	Valeurs
Khi <sup>2</sup> (X <sup>2</sup> )	13.09
Degré de liberté (dll)	7
Nombre de classe (K)	10

Khi<sup>2</sup> tabulé est de 14.07, le Khi<sup>2</sup> calculé < Khi<sup>2</sup> tabulé ; le test est positif

### III.1.4.3-Calcul des Précipitations pour une période de récurrence donnée :

L'équation de la loi représentative correspondante aux précipitations annuelles à la station de Béni-Bahdel est Donnée par :

$$P = 471.08 + 141.7u \quad (III.3)$$

A partir de cette équation (III.3) on peut calculer des précipitations correspondantes au période de retour T donnée (tableau III.7)

**Tableau III.7** : calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée :

Période de retour T (ans)	U	Précipitations (mm)
10	1.28	652.7
100	2.32	800.79
1000	3.29	909.01



La valeur décennale égale ou supérieure à 652.7mm a été rencontrée 8 fois durant la période de 65ans allant de 1945 à 2011, alors que celle centennale ou millénaire n'a pas été atteinte.

### III.2. Etude des débits

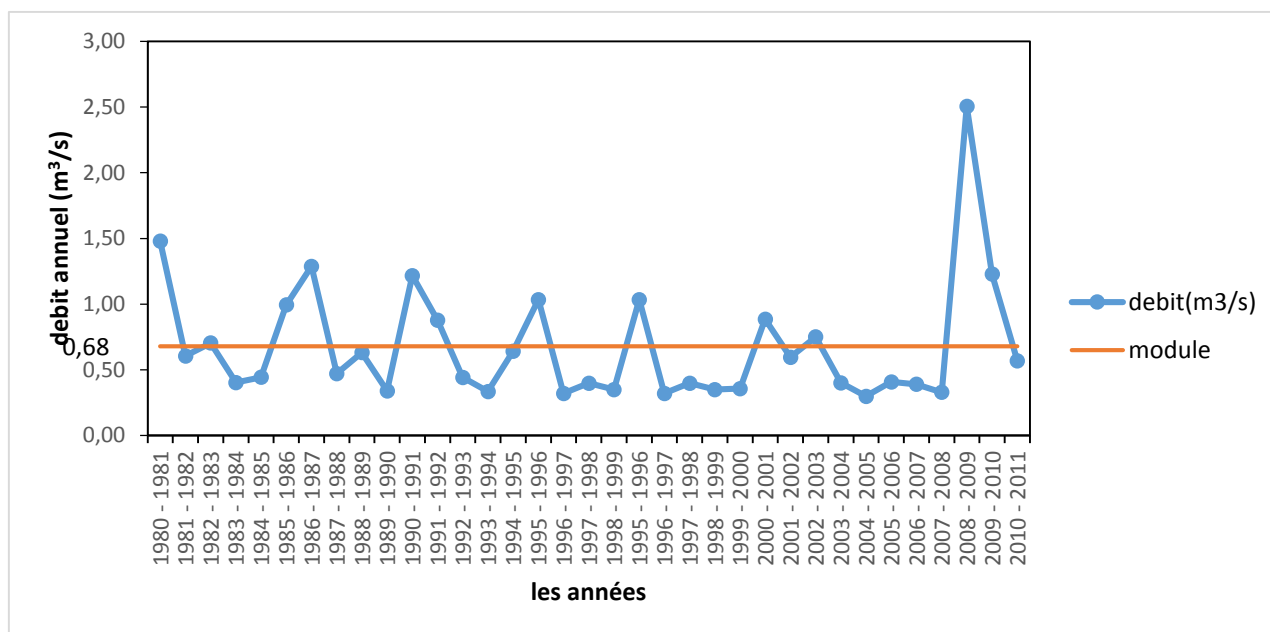
Suite à une pluie tombée sur le bassin versant, tout un mécanisme complexe d'interaction de phénomènes hydrologiques et climatologiques se met en œuvre. Il se traduit par une circulation direct ou indirect, à travers le sol ou le sous-sol en passant par les cours d'eau secondaires puis principaux, et finissant par l'exutoire du bassin versant.

#### III.2 .1 Débits annuels

Pour cette étude, nous avons pris en considération les valeurs annuelles (tableau III.8) et mensuelles des débits à la station de béni-Bahdel

**Tableau III.8 : Débits annuels à la station de béni-Bahdel (1980-2011)**

Année	débit (m <sup>3</sup> /s)	Année	débit (m <sup>3</sup> /s)
1980 -1981	1.48	1997 - 1998	0.39
1981 - 1982	0.60	1998 -1999	0.34
1982 - 1983	0.70	1995 - 1996	1.03
1983 - 1984	0.40	1996 - 1997	0.32
1984 - 1985	0.44	1997 - 1998	0.39
1985 - 1986	0.99	1998 - 1999	0.34
1986 - 1987	1.28	1999 - 2000	0.35
1987 - 1988	0.47	2000 - 2001	0.88
1988 - 1989	0.63	2001 - 2002	0.59
1989 - 1990	0.34	2002 - 2003	0.74
1990 - 1991	1.21	2003 - 2004	0.40
1991 - 1992	0.87	2004 - 2005	0.29
1992 - 1993	0.44	2005 - 2006	0.40
1993 - 1994	0.33	2006 - 2007	0.38
1994 - 1995	0.64	2007 - 2008	0.32
1995 - 1996	1.03	2008 - 2009	2.50
1996 - 1997	0.32	2009 - 2010	1.22
		2010 - 2011	0.56



**Figure III.5 :** variation des débits annuels de la station de béni Bahdel (1980-2011)

Comme pour les précipitations, la variation des débits moyens annuels est caractérisée par une irrégularité prononcée. La série étudiée et présentée dans la figure (III.5) correspond à la période considérée comme sèche par la majorité des auteurs ayant travaillé sur la Tafna (Bouanani A, 2004, Megnounif A, 2007, Ghenim A, 2001, Meddi M, 1992). Le module interannuel est de  $0,68 \text{ m}^3/\text{s}$  avec un maximum de  $2,51 \text{ m}^3/\text{s}$  enregistré en (2008-2009) où le barrage a connu un remplissage à 100% et des lâchées pendant plusieurs jours et un minimum de  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$  en (2004-2005)

### III.2.2. Débits mensuels

Les débits moyens mensuels de la haute Tafna à Béni Bahdel et relatifs à la série 1980/20011 (tableau III.9) ne suivent pas exactement la même évolution que celle des précipitations moyennes mensuelles. En effet, les pluies les plus importantes sont enregistrées en décembre, novembre puis janvier et février avec un maximum en Mars alors que les écoulements sont plus abondants en janvier, février et un maximum en Mars. Le décalage entre les précipitations et les écoulements est sans doute dû à l'état du sol sec après les mois d'été qui ne se sature qu'après les premières pluies d'automne pour permettre des écoulements significatifs en hivers et printemps. Toutefois c'est les premières pluies d'automne qui produisent généralement des transports sédimentaires importants. (Terfous et al, 2001)

Tableau III.9 : débits moyens mensuels à la station de béni Bahdel (1980-2011)

MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Débits (m <sup>3</sup> /s)	0,54	0,72	0,52	0,75	1,01	1,19	1,37	0,73	0,60	0,40	0,27	0,30

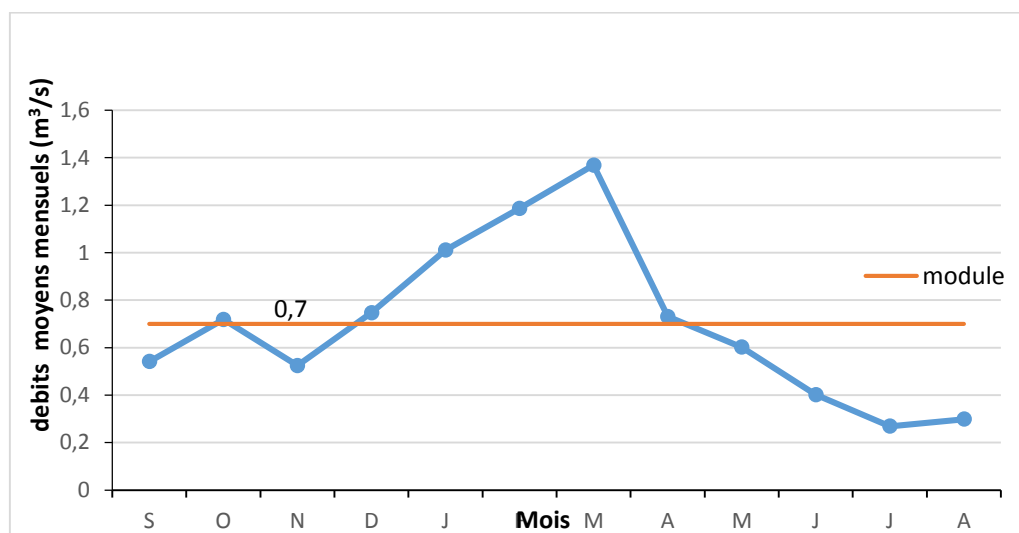


Figure III.6 : variation des débits moyens mensuels à la station de béni Bahdel (1980-2011)

La moyenne mensuelle des débits s'élève à 1.36m<sup>3</sup>/s au mois de mars, au cours du mois de juillet le débit diminue brutalement jusqu'à 0.26 m<sup>3</sup>/s.

### III.2.3. Etude statistique des débits moyens mensuels maximum.

N'ayant pas pu avoir les données des crues, nous avons pensé à faire une analyse statistique des débits moyens mensuels maximum relatives à la période (1980-2011).

L'analyse statistique des données hydrométriques vise à définir les régimes à travers certaines valeurs caractéristiques. Cette étude est réalisée par le code de calcul HYFRAN

Tableau III.10 : paramètres caractéristique des débits moyens maximum à la station de béni-Bahdel

Paramètres	Valeurs
Moyenne	2.4 (m <sup>3</sup> /s)
Ecart-type	2 (m <sup>3</sup> /s)
Coefficient de variation	0.83

Cv > 0.5 ce qui nous oriente à ajuster notre série de débits à une loi de Gumbel

### III.2.3.1 Ajustement par la loi de Gumbel

a) Test graphique :

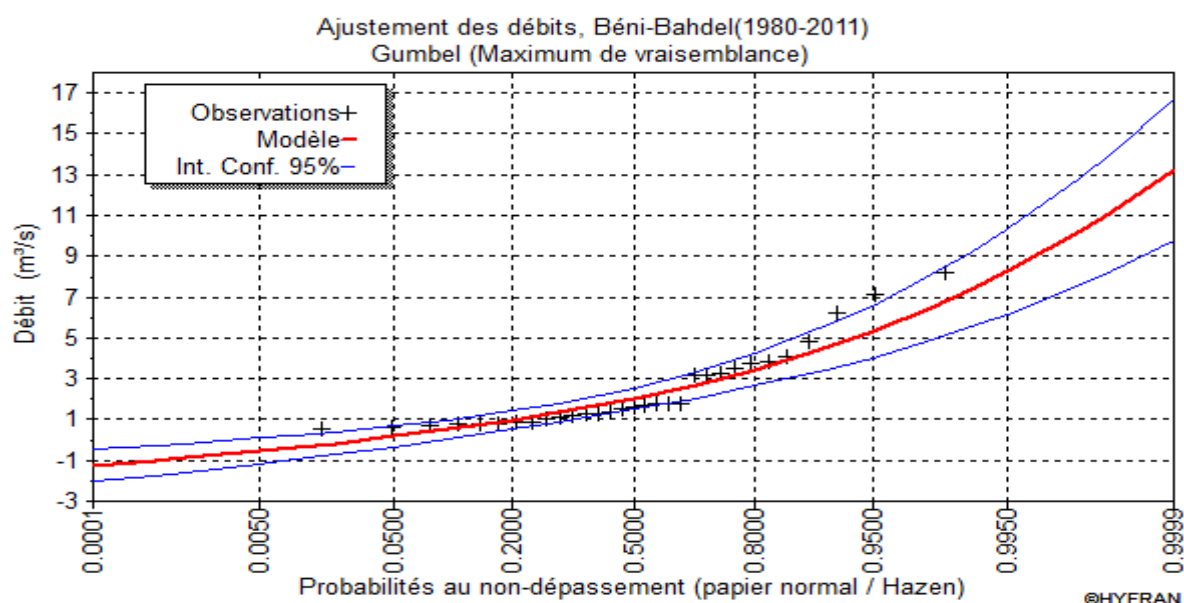


Figure III.7 : courbe d’ajustement des débits maximum mensuels à la loi de Gumbel (oued sebdou)

La représentation graphique des débits en fonction de U est une droite :

$$X = S.U + X_0 \tag{III.4}$$

U : la variable réduite de Gumbel  $U = \frac{x - x_0}{s}$  (III.5)

Où ;  $S = 0.78 \alpha$  (III.6) et  $X_0 = \bar{X} - 0.577S$  (III.7)

Avec :  $\bar{X}$  = moyenne des débits ;  $\alpha$  = l’écart type

$$\bar{X} = 2.4 \qquad \alpha = 2 \qquad \text{Donc : } S = 1.56 \qquad X_0 = 1.5$$

### III.2.3.2 Calcul des débits pour une période de récurrence donnée :

L’équation de la loi représentative correspondante a la station de Béni-Bahdel est égal à :

$$Q = 1.5 + 1.56u \tag{III.8}$$

A partir de cette équation on peut calculer des débits correspondants à des périodes de retour T données (tableau III.11)

**Tableau III.11** : calcul des débits pour des périodes de récurrence donnée :

Période de retour (T)	Débit (m <sup>3</sup> /s)
10	4.4
100	7.37
1000	10.28



# Chapitre IV

# Morphométrie

## IV. Morphométrie des bassins versants des oueds Sebdou et Khemis

### IV.1 Paramètres de forme

#### IV.1.1 Indice de compacité

Cet indice permet de caractériser la forme du bassin versant. Il est donné par la relation suivante :

$$Kc = \frac{0.28.P}{\sqrt{S}} \quad (IV.1)$$

Avec  $Kc$  : indice de compacité de gravelius

$P$  : périmètre du bassin étudié en km

$S$  : superficie du bassin km<sup>2</sup>

#### IV.1.2 rectangle équivalent

C'est un modèle mis au point par « M.F. Roche » pour l'étude de la forme du bassin.

Ce rectangle nous permet de comparer l'influence de la forme sur l'écoulement dans les différents bassins versants.

Les dimensions du rectangle équivalent sont données par les relations suivantes :

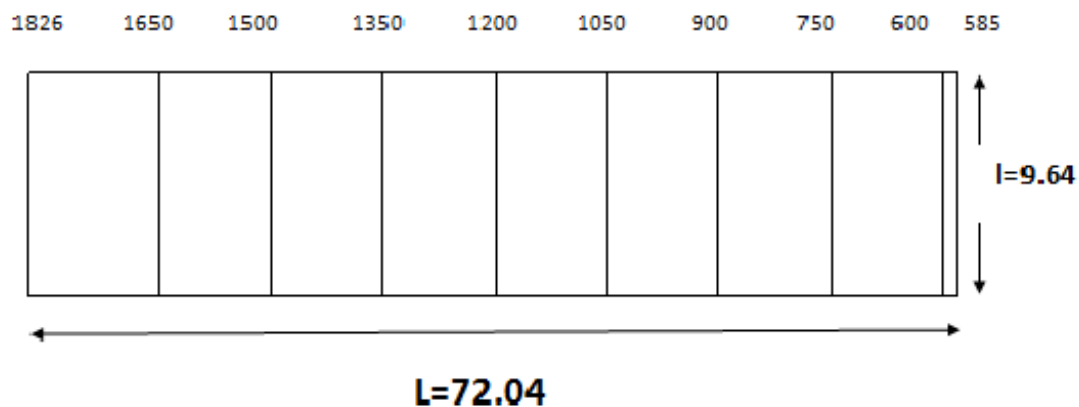
$$\text{Longueur} \quad L = \frac{kc \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{kc} \right)^2} \right] \quad (IV.2)$$

$$\text{Largeur} \quad l = \frac{kc \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{kc} \right)^2} \right] \quad (IV.3)$$

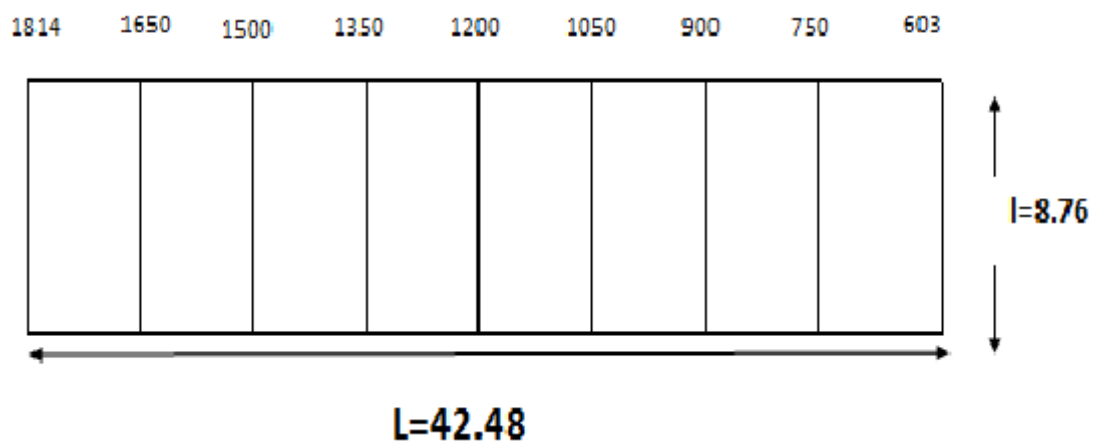
**Tableau IV.1** : paramètres de forme

bassins	superficie (km <sup>2</sup> )	Périmètre (Km)	Kc	Longueur (Km)	Largeur (Km)
<b>Khemis</b>	<b>372,3</b>	<b>102,49</b>	<b>1,48</b>	<b>42,48</b>	<b>8,76</b>
<b>Sebdou</b>	<b>694,75</b>	<b>163,37</b>	<b>1,73</b>	<b>72,04</b>	<b>9,64</b>

La valeur du  $K_c$  des 2 sous bassins (tableau IV.1.) Est supérieure à 1. La forme des bassins est donc allongée ; ce qui laisse supposer que le temps de concentration des eaux est relativement long. L'érosion est linéaire et régressive.



**Figure IV.1** répartition graphique du rectangle équivalent du de l'oued Sebdou



**Figure IV.2** : répartition graphique du rectangle équivalent du bassin de l'oued Khemis

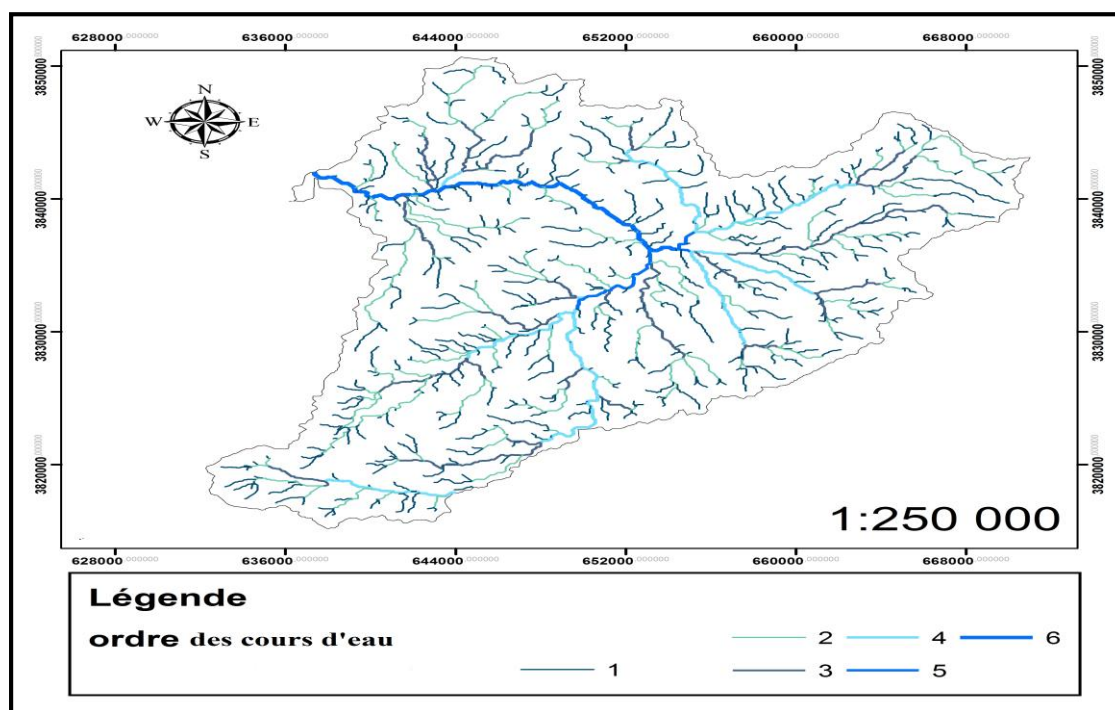


## IV.2 Etude du réseau hydrographique

L'extraction sous Arcgis des cartes du réseau hydrographique des bassins de Sebdu (figure IV.3) et Khemis (figure IV.4) nous a permis de procéder à la classification des réseaux par ordre selon la méthode de Shum-Strahler (tableau IV.2) et (tableau IV.3). Cette opération confère les ordres de 6 pour le bassin de Sebdu et de 5 pour le bassin de Khemis. Ceci dénote que les deux bassins présentent une densité des talwegs d'ordre inférieur assez fournie.

**Tableau IV.2** : classification par ordre de réseau hydrographique d'oued Sebdu

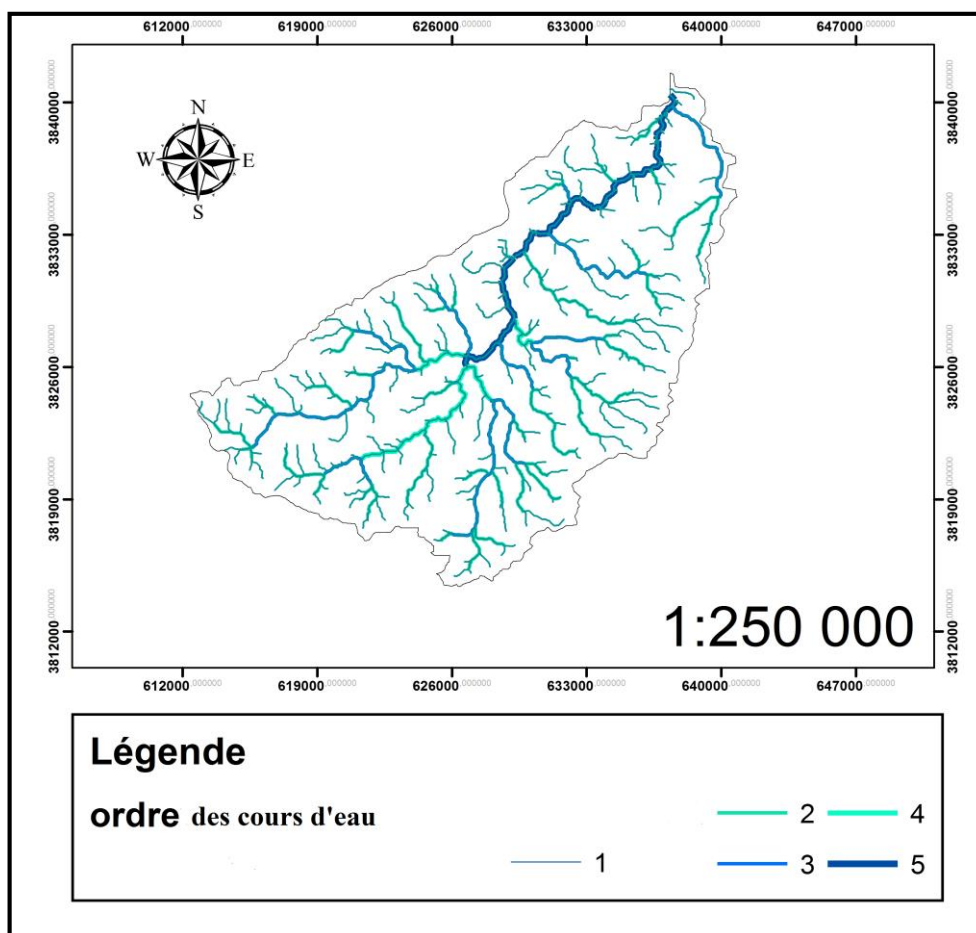
Ordre	Nombre	Longueur (km)	Longueur moyenne (Km)	RC	RL
1	427	402.4	0,94	3,92	
2	109	217.89	2,00	4,19	2,12
3	26	105.41	4,05	2,89	2,03
4	9	65.83	7,31	3,00	1,80
5	3	9.87	3,29	3,00	0,45
6	1	23.38	23,38		7,11
Total	575	824,81			



**Figure IV.3** : réseau hydrographique (bassin de Sebdu)

**Tableau IV.3 :** classification par ordre de réseau hydrographique d'oued Khemis

Ordre	Nombre	Longueur	Longueur moyenne (Km)	RC	RL
1	216	192,33	0,89	4,00	
2	54	95,66	1,77	4,15	1,99
3	13	65,54	5,04	3,25	2,85
4	4	17,21	4,30	4,00	0,85
5	1	23,80	23,80		5,53
total	288	394,54			



**Figure IV.4 :** Réseau hydrographique (bassin de khemis)

## IV.2.1 Etude de chevelu hydrographique :

### IV.2.1.1 Densité de drainage

C'est un paramètre qui permet de caractériser l'organisation du chevelu hydrographique et le degré de drainage du bassin versant Donnée par la relation

$$Dd = \frac{\sum L}{A} \quad (IV.4)$$

Avec

Dd : densité de drainage en km/km<sup>2</sup>

L : longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en km.

A : aire du bassin en km<sup>2</sup>

### IV.2.1.2 Rapport de confluence (Rc)

C'est le quotient du nombre de thalwegs d'ordre « n » par celui de thalwegs d'ordre supérieur (n+1) donnée par la relation

$$Rc = N_n / N_{n+1} \quad (IV.5)$$

Avec

N : nombre de thalwegs, lorsque le réseau est bien organisé, les nombres de cours d'eau d'ordre successif croissant forment une série géométrique inverse.

On estime la valeur moyenne du rapport de confluence par la représentation graphique sur papier semi-long, on porte en ordonnées le nombre des thalwegs et en abscisses l'ordre des thalwegs

### IV.2.2.3 Rapport des longueurs (RI)

C'est le quotient de la longueur moyenne des thalwegs d'ordre (N+1) par celles des thalwegs d'ordre (N) sous forme

$$RI = L_{n+1} / L_n \quad (IV.6)$$

**Tableau IV.4** : Paramètres morphométriques des principales unités hydrologiques de la haute Tafna

Bassins	Dd
Oued Khemis	1.05
Oued Sebdou	1.19

Malgré la différence des superficies assez importante entre l'oued Sebdou et Khemis, les densités de drainage de ces deux bassins sont assez voisines (tableau IV) avec une plus faible valeur pour le bassin du Khémis, cela dénote d'une plus grande densification du réseau au niveau du bassin de Sebdou. La présence de formations marneuses dans ce dernier facilite le creusement des talwegs.

Les valeurs des densités de drainage indiquent que les deux bassins sont mal hiérarchisés et assez mal drainés. En effet, la prédominance de formations carbonatées karstiques favorise plutôt un développement de réseaux souterrain et donc plutôt un drainage souterrain que superficiel.

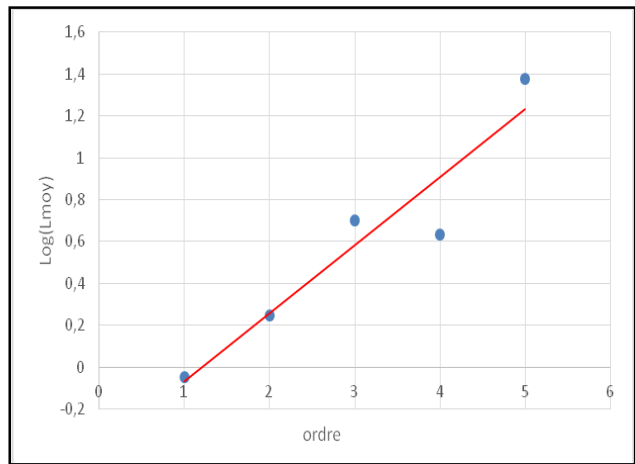
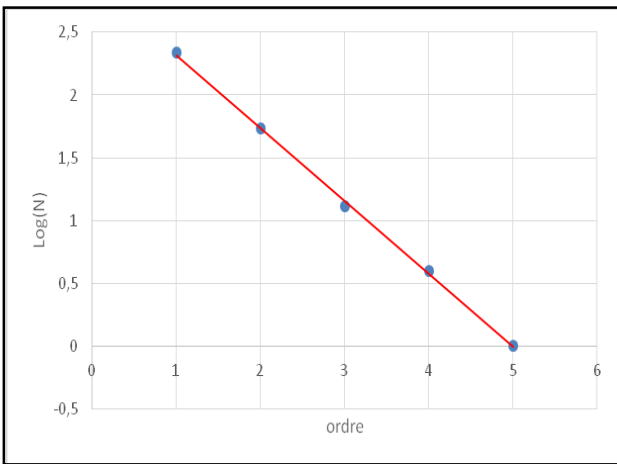


Figure IV.5 : rapport de confluence (oued Khemis)

Figure IV.6 : rapport de longueur moyenne (oued Khemis)

$$R_c = \log^{-1}(tg\alpha) = \log^{-1}(0.5825) = 3.82$$

$$R_l = \log^{-1}(tg\alpha) = R_l = \log^{-1}(0.355) = 2.26$$

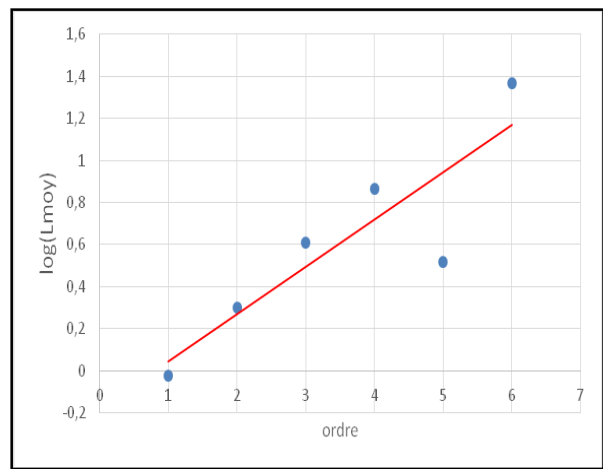
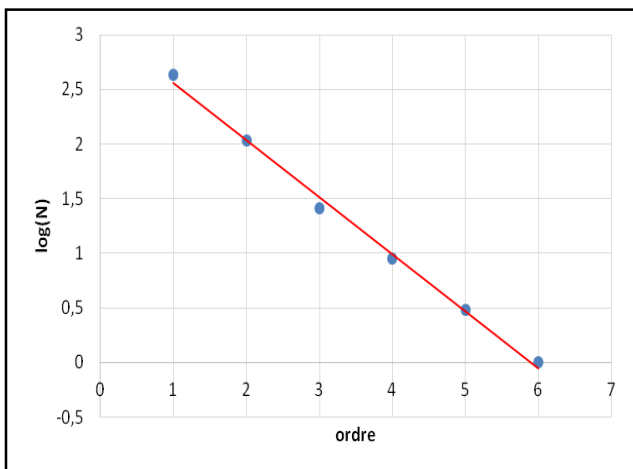


Figure IV.7 : rapport de confluence (oued Sebdou)

Figure IV.8 : rapport de longueur moyenne (oued Sebdou)

$$R_c = \log^{-1}(tg\alpha) = R_c = \log^{-1}(0.526) = 3.35$$

$$R_l = \log^{-1}(tg\alpha) = R_l = \log^{-1}(0.277) = 1.89$$

### IV.3 Paramètres du relief :

#### IV.3.1 Répartition altimétrique :

Les tableaux (IV.5 ; IV.6) présentent les répartitions altimétriques des sous bassins versant Sebdou et khemis établies à partir des données des cartes hypsométriques (figures IV.9 et IV.13) extraites sous environnement Arcgis des cartes en MNT.

#### -La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique est un facteur essentiel pour déterminer l'état du bassin vis-vis de son potentiel Erosif. Elle est obtenue en portant en abscisses la surface cumulées (%) et en ordonnées les altitudes correspondantes

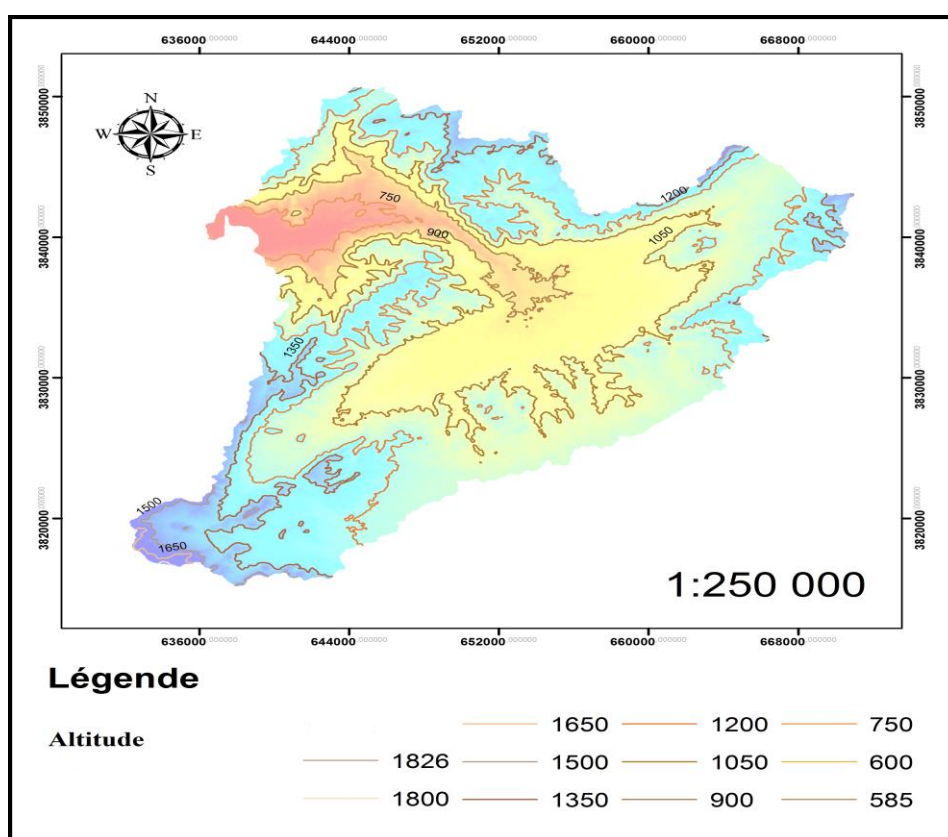
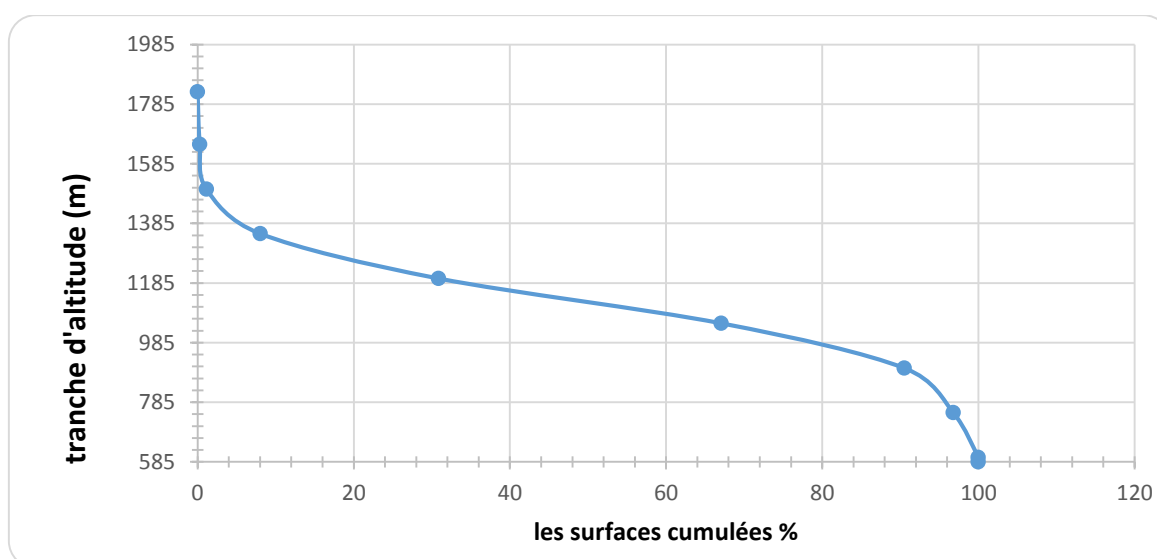


Figure IV.9 : carte en courbes de niveau (oued)

**Tableau IV.5** : répartition altimétrique dans le bassin d'oued Seb dou

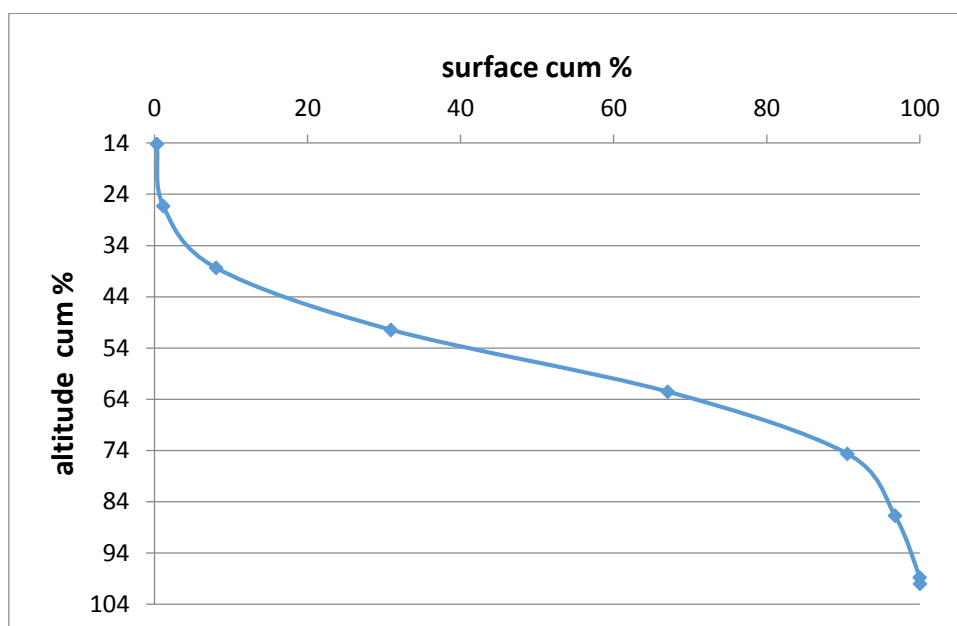
tranche d'altitude	altitude cumulée %	surface partielles (km2)	surface partielles (%)	surface partielles cumulées (km2)	surface partielles cumulées (%)
1650-1826	14,18	1,85	0,27	1,85	0,27
1500-1650	26,27	5,93	0,85	7,78	1,12
1350-1500	38,36	47,98	6,91	55,76	8,03
1200-1350	50,44	158,73	22,85	214,49	30,87
1050-1200	62,53	251,44	36,19	465,93	67,06
900-1050	74,62	162,92	23,45	628,84	90,51
750-900	86,7	43,41	6,25	672,26	96,76
600-750	98,79	22,42	3,23	694,68	99,99
585-600	100	0,01	0	694,7	100



**Figure IV.10** : courbe hypsométrique du bassin d'oued seb dou

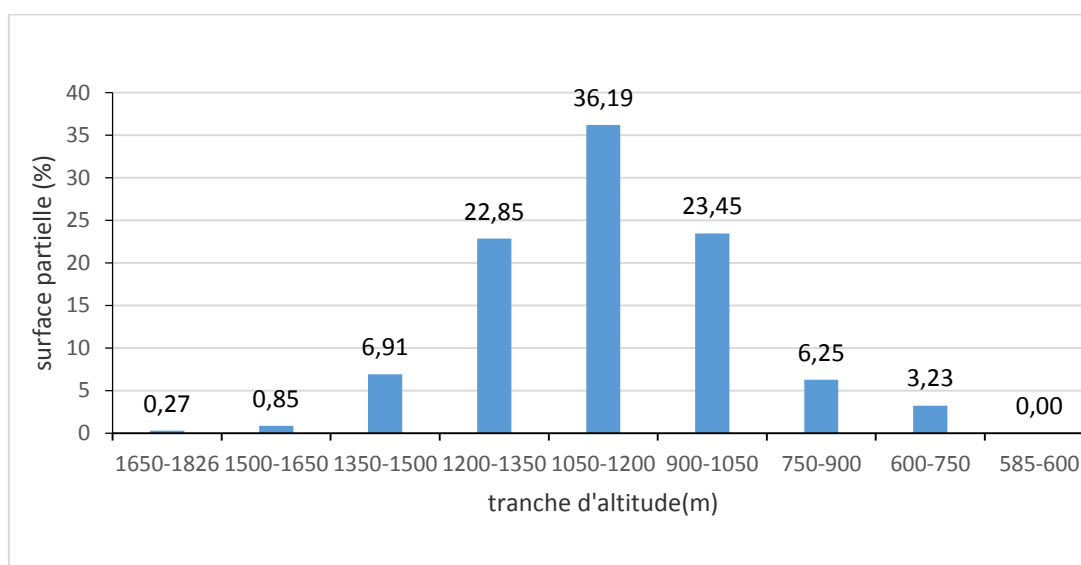
La Courbe hypsométrique (figure IV.10) nous permet de tirer les altitudes caractéristiques suivantes :

$$H5=1639,35m \quad ; \quad H95=842,02m \quad \text{et} \quad H50\% =1292.935m$$



**Figure IV.11 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Sebdu**

La concavité de la courbe hypsométrique montre que la forme du bassin d'oued Sebdu présente un état de maturité (équilibre) où le potentiel érosif est moyen



**Figure IV.12 : répartition des fréquences altimétriques du bassin d'oued Sebdu**

L'histogramme ci-dessous (Figure IV.12) traduit la répartition des altitudes à l'intérieur du bassin et permet en outre de déterminer l'altitude la plus fréquente ([1020-1200] qui recouvre 36.19% de la surface totale). Les tranches d'altitudes [13050-1500] ; [1050-1200] et [900-1050] occupent des surfaces de 22.8% ; 36.19% et 23.45%, ce qui montre le caractère montagneux du bassin

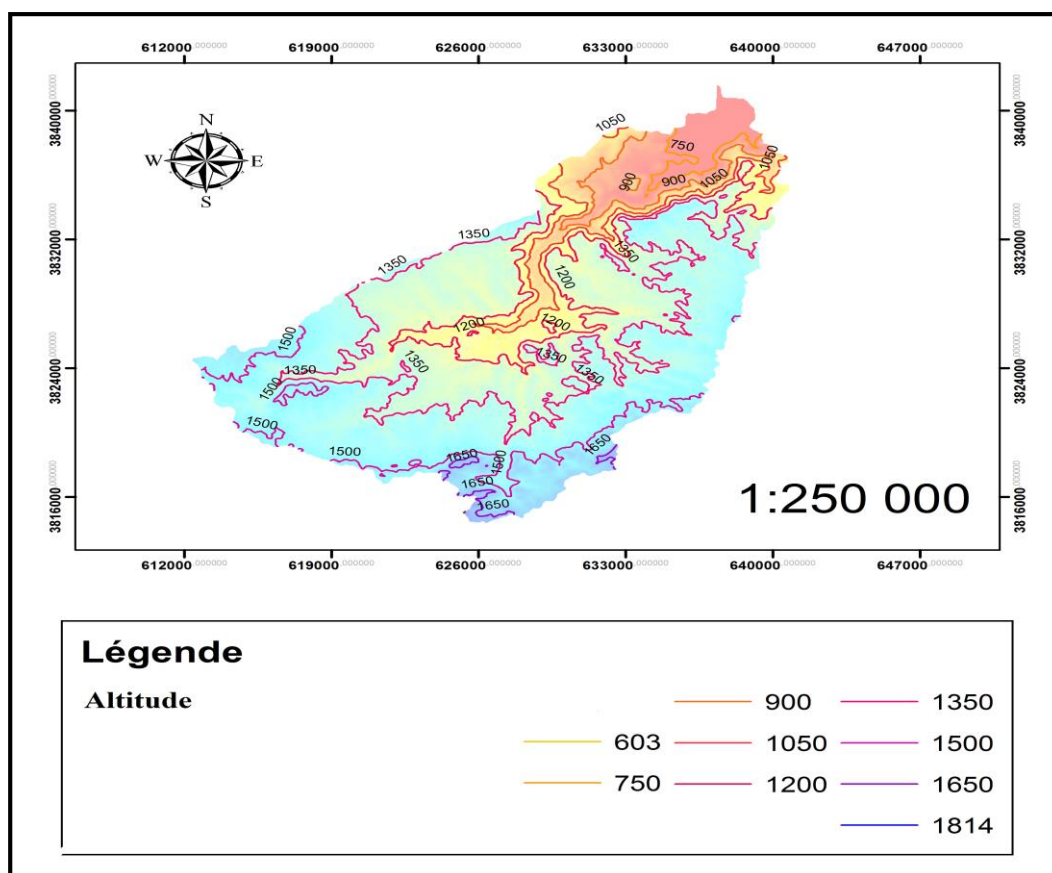
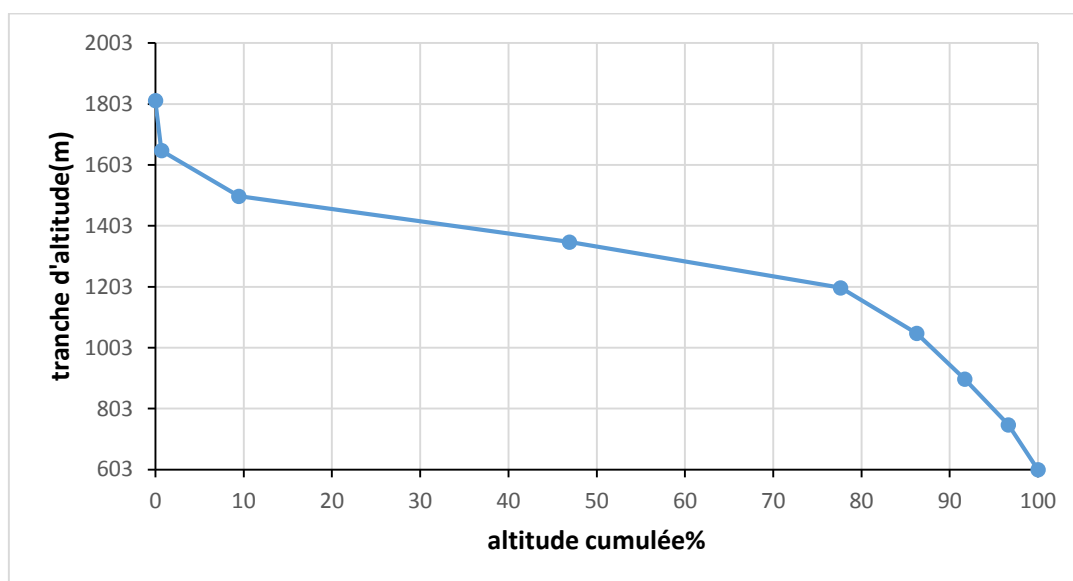


Figure IV.13 : carte hypsométrique du bassin d’oued khemis

Tableau IV.6 : répartition altimétrique dans le bassin d’oued khemis

tranches d'altitude (m)	altitudes cumulées (%)	Surfaces partielles (km <sup>2</sup> )	surfaces partielles (%)	surfaces partielles cumulées (km <sup>2</sup> )	surfaces partielles cumulées (%)
1650-1814	13,54	2,51	0,67	2,51	0,67
1500-1650	25,93	32,66	8,77	35,17	9,45
1350-1500	38,32	139,41	37,45	174,58	46,89
1200-1350	50,70	114,45	30,74	289,04	77,64
1050-1200	63,09	32,10	8,62	321,14	86,26
900-1050	75,47	20,25	5,44	341,38	91,70
750-900	87,86	18,37	4,93	359,75	96,63
603-750	100,00	12,53	3,37	372,28	100

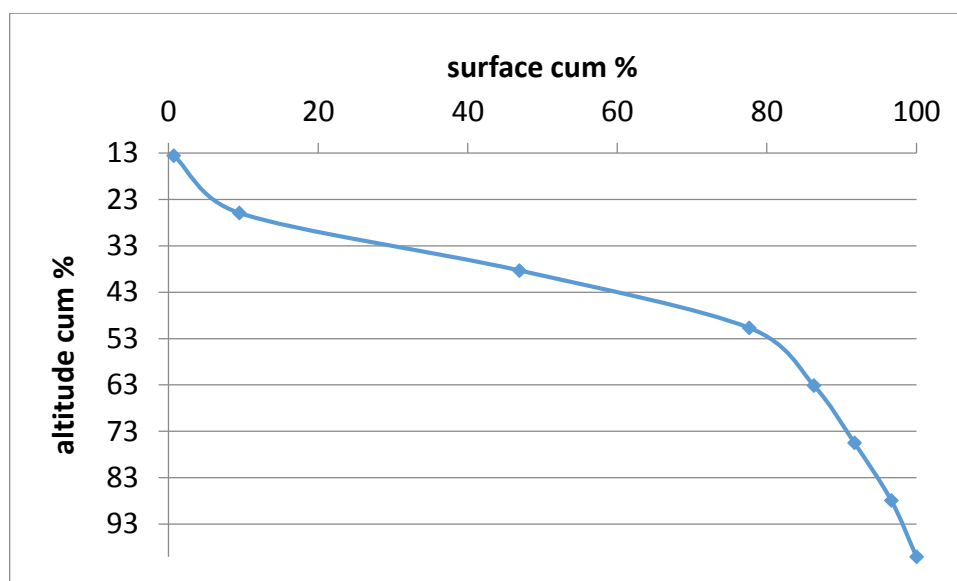




**Figure IV.14** : courbe hypsométrique d'oued Khemis

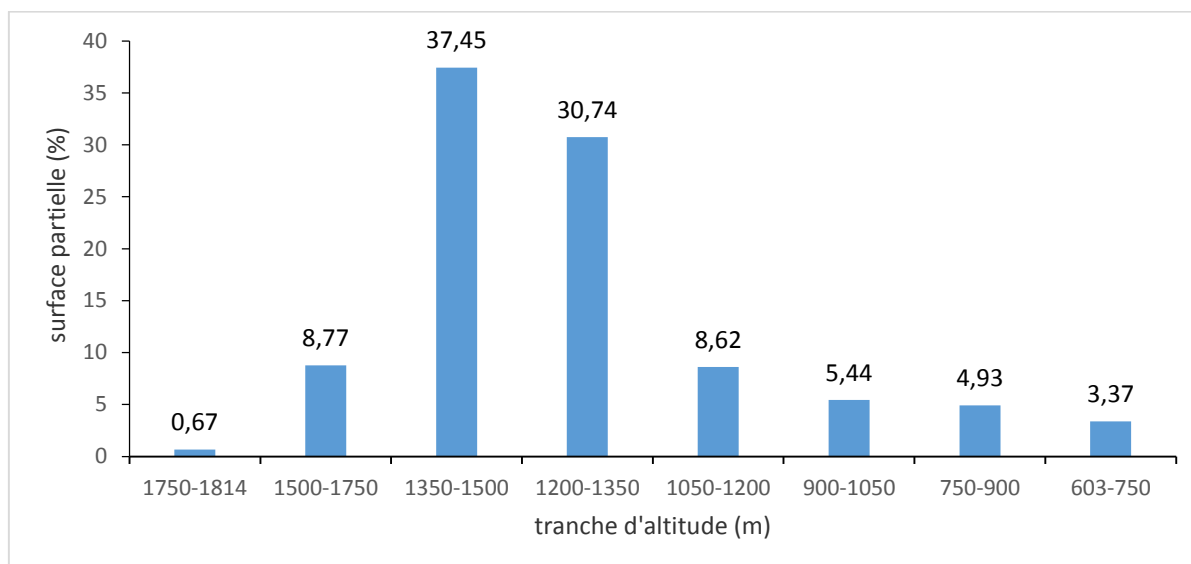
La courbe (figure IV.14) nous permet de tirer les altitudes suivantes :

$$H_5=1731,34m \quad ; \quad H_{95}=956,76 \text{ m} \quad H_{50}=1569.03m$$



**Figure IV.15** : courbe hypsométrique du bassin versant de Khemis

L'allure de la courbe hypsométrique figure (IV.15), montre que le bassin de Khemis est un bassin jeune, d'où un potentiel érosif important



**Figure IV.16** : répartition fréquentielle des altitudes dans le bassin d'oued khemis

La figure IV.16 permet de déterminer l'altitude la plus fréquente représentée par la tranche [1350-1500] et qui occupe 37.45 % de la surface totale du bassin de Khemis. Les ranches d'altitudes [1350-1500] et [1200-1350] occupent 68% de la surface totale du bassin de Khemis, ce qui montre le caractère montagneux du bassin.

### IV.3.2 Indices de pente et relief :

#### a)- Indices de pente globale

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement et à l'érosion des terrains. Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente global  $I_g$  donné par la relation :

$$I_g = D / L \quad (IV.7)$$

Où,  $I_g$  : indice globale de Roche

$D$  : dénivelée (m). Sur la courbe hypsométrique déjà tracée, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la surface totale.

$H_5$  et  $H_{95}$  sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin. La dénivelée  $D$  est donc égale à  $H_{5\%} - H_{95\%}$

**a) Indice de pente de Roche Ip**

L'indice de pente Ip également défini par Roche à partir du rectangle équivalent est égal à :

$$I_p = \frac{1}{L} \sum \left( x_i \sqrt{\frac{d}{x_i}} \right) \quad (IV.8)$$

**xi** : distance séparant deux courbes de niveau sur le rectangle équivalent.

**L** : longueur du rectangle équivalent.

**d** : la largeur du rectangle équivalent[m].

**c) Pente moyenne**

$$I_m = \frac{D.L}{A} \quad (IV.9)$$

**Ou :**

**L** : la longueur total des courbes de niveau (km)

**D** : équidistance entre deux courbes de niveau (m)

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

**Tableau IV.7** : la dénivelée d'altitude des sous bassin (sebdou et khemis)

sous bassin	H5 (m)	H95(m)	D (m)
Sebdou	1639,35	842,02	797,33
Khemis	1731,34	956,76	774,58

Les valeurs de Ig et Ip sont portées au tableau IV.8 :

**Tableau IV.8** : Indices de pentes et reliefs des sous bassins

Sous bassins	Ip	Im	Ig	Observation
Oued khemis	6.85	0,11	0.018	Relief modéré
Oued sebdou	4.43	0,16	0.011	Relief modéré

D'après la classification de l'Orstom (Tableau IV.9), Les résultats du tableau IV.8, montrent pour les sous bassins de la haute Tafna que Ig est compris entre (0.01 < Ig < 0.02). Ce qui permet de les ranger dans la classe de relief modéré.

**Tableau IV.9** : Classification du relief selon  $I_g$  par l'ORSTOM.

Relief très faible	$I_g < 0.002 \text{ m/km}$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$
Relief très fort	$0.5 \text{ m/km} < I_g$

**b)- Coefficient de torrentialité**

C'est un coefficient qui tient compte à la fois de la densité des thalwegs élémentaires par la densité de drainage :

$$CT = Dd. \quad (IV.9)$$

**Avec : Dd** : densité de drainage

**F1** : fréquence des thalwegs élémentaires  $F1 = N1 / A$  avec  $N1$  : nombre de cours d'eau d'ordre 1

**c- Temps de concentration**

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire, pour son calcul, nous faisons appel à la formule de Giandotti

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (IV.10)$$

Où,

**Tc** : temps de concentration (heures)

**A** : superficie du bassin (km<sup>2</sup>)

**L** : longueur du thalweg principal (km)

**Hmoy** : altitude moyenne (m)

**Hmin** : altitude minimale (m)

**Tableau IV. 10** : Valeurs des coefficients de torrentialité et des temps de concentration des sous bassins de la Haute Tafna

<b>Bassins</b>	<b>Coefficient de torrentialité CT</b>	<b>Temps de concentration TC</b>
<b>Oued Khemis</b>	0.61	4,1 heures
<b>Oued Sebdou</b>	0,72	5,4 heures

Les valeurs de coefficient de torrentialité données dans le tableau (IV. 10) traduisent que les bassins ne présentent pas des caractéristiques morphométriques adaptées à l'écoulement torrentiel. En effet la prédominance de formations perméables (calcaires, dolomies karstiques et grés) font que l'infiltration est très importante. Aussi, Baba-Hamed et Kerzabi (1991), ont mis en évidence des pertes souterraines par failles assez conséquentes au niveau d'oued Sebdou. Les larges temps de concentration confirment les faibles valeurs du coefficient de torrentialité.

# **Chapitre V**

## **Estimation de l'envasement du barrage de Béni-Bahdel par le modèle PISA**

## Introduction

L'envasement des barrages en Algérie réduit rapidement et considérablement leur volume utile. En effet, le taux d'envasement moyen annuel est très élevé, il peut atteindre pour certaines retenues des valeurs de l'ordre de 5%.

La capacité des barrages en Algérie est estimée à 6 milliards 200 millions de m<sup>3</sup>, le volume envasé dans ces retenues est évalué à 700 millions de m<sup>3</sup>, soit environ de 12% qui peut s'accroître dans le futur et constitue un vrai problème.

La prédiction de ce phénomène est alors primordiale afin de cerner son intensité, et définir les actions nécessaires à sa minimisation. A cet effet, l'utilisation de modèles mathématiques prédictifs constitue un outil intéressant, en particulier pour le choix de l'implantation des nouveaux projets de construction de retenues.

Sur la base de ces différents modèles existants, dans le contexte algérien, seules quelques retenues ont et pourront être soumises à des observations suffisantes.

Les résultats récoltés à travers une simulation nous permettent d'avoir des informations simultanées sur la sédimentation des retenues existantes, en voie de réalisation ou bien encore prévisionnelles. Pour ce dernier cas, il est possible de simuler des situations de sédimentation à différents emplacements de futures retenues, au vue de la meilleure variante, ce qui contribue fortement dans le développement durable sur le plan hydrique, qui représente un paramètre important dans la définition d'une stratégie pour la préservation des ressources en eau. Un volet bénéfique de la simulation numérique est le volet économique, car le choix de l'emplacement d'un barrage nécessite une étude de plusieurs variantes, sachant que le barrage le moins cher peut coûter six milliards de dinars.

En définitif, les modèles numériques constituent un vecteur très important dans la gestion et la préservation des ressources en eau et représentent une base de données importante pour la conception et la réalisation de barrages à l'échelle du Maghreb Arabe (Bessenasse M, 2010).

Parmi ces modèles nous nous proposons de mettre en pratique le modèle PISA au barrage Béni-Bahdel. Tout en comparant les résultats trouvés avec d'autres modèles déjà utilisés en Algérie et les données de mesures bathymétriques.

### V.1 Présentation du barrage

Le barrage de Beni-Bahdel (nom de la commune sur laquelle se trouve le barrage) est situé à 28 Km au Sud-ouest de Tlemcen à vol d'oiseau, et à 45 Km par la route. Il est alimenté par deux oueds : l'oued Sebdou et l'oued Khemis.



**Photo. V.1** : oued Khemis



**Photo. V.2** : oued Sebdou



**Photo. V.3** : lac du barrage Beni Bahdel



### V.1.1 Historique et caractéristique :

Le barrage draine un bassin versant d'une surface de 1076 Km<sup>2</sup>, composé essentiellement de roches et de forêt. Il a été construit de 1934 à 1944, pour être mis en eau en 1945.

Son volume initial est de 63 millions de m<sup>3</sup>, et il est utilisé pour :

- l'alimentation de la ville d'Oran en eau potable (33 millions de m<sup>3</sup>/an),
- l'irrigation de Maghnia (25 millions de m<sup>3</sup>/an),
- la production électrique (3 millions de KW/an).

IL est destiné actuellement à l'irrigation du périmètre de Maghnia et à l'alimentation en eau potable en cas de panne de la station de dessalement d' Honaine

La cote de la retenue normale est fixée à 653.40m et celle de la retenue maximale à 654.00m (niveau des plus hautes eaux exceptionnelles).

### V.1.2 L'envasement du barrage béni Bahdel par mesure bathymétrique

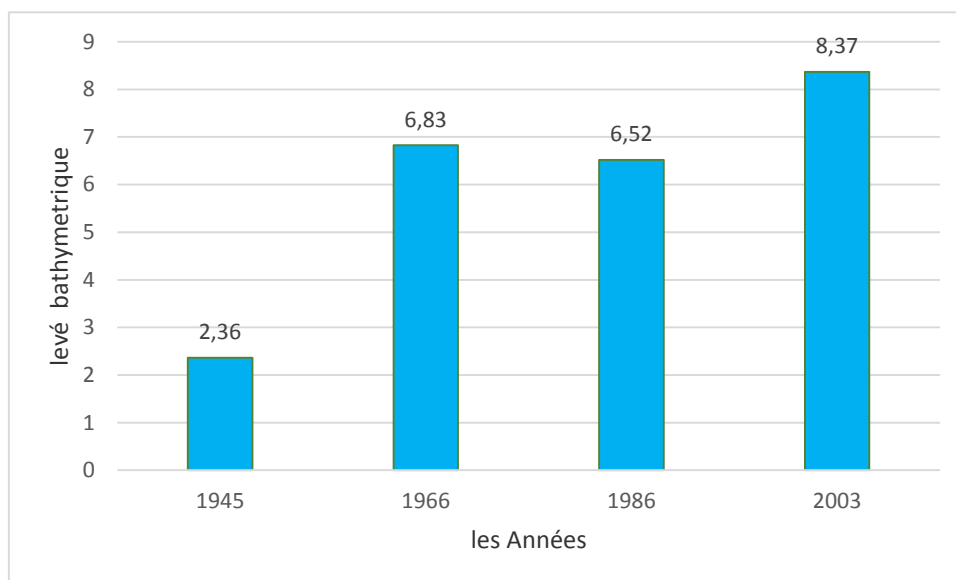
Le tableau (V.1.) présente **les résultats de la** campagne effectuée sur le barrage de béni-Bahdel entre 1945 et 2003, sur une superficie globale 420 ha. Selon la courbe du levé bathymétrique la capacité évaluée l'année 2003 du barrage à la retenue normale (RN=653.4 m) est de 54.63 Hm<sup>3</sup>, et de 56.8 Hm<sup>3</sup> au niveau maximum (PHE=654.00). La perte en capacité du barrage évaluée depuis l'année de mise en service (63 Hm<sup>3</sup>) est évaluée 8.37 Hm<sup>3</sup> pendant 57 ans de service, équivalente à 13.29% de sa capacité initiale .ce qui correspond à un envasement moyen annuel de 0.147 Hm<sup>3</sup>/an.

Vu la nature du bassin versant de ce barrage (région montagneuse) et vu la durée d'exploitation 57 ans, par rapport au taux d'envasement, le barrage n'est pas menacé par le problème d'envasement. Dans ce barrage la durée de vie, dépend essentiellement de la résistance des matériaux de constructions.

Le seul moyen de dévasement qui a été pratiqué durant l'exploitation du barrage est la technique de vidange de fond au cours du passage de la crue pour dégager la vase au voisinage des organes annexes (prise d'eau, vanne de vidange ). Cette méthode dans ce barrage paraît efficace vu le faible taux d'envasement (Lebboukh M, 2008).

**Tableau V.1 :** Mesures des levés bathymétriques entre (1945 et 2003) au niveau du barrage Beni Bahdel

Les années	barrage	Capacité initiale Hm3	Capacité levé 2003 Hm3	Perte de capacité		Technique de Dévasement
				Hm3	En%	
2003	Béni-Bahdel	63.00	54.63	8.37	13.29	VDF
1986	Béni-Bahdel	63.00	56.474	6.52	10.34	VDF
1966	Béni-Bahdel	63.00	56.167	6.83	10.84	VDF
1945	Béni-Bahdel	63.00	60.64	2.36	3.74	VDF



**Figure V.1 :** l'évolution de l'envasement au niveau du barrage Béni-Bahdel (1945-2010)

A la lecture du graphique (.Fig.V.1) ; on remarque qu'en 1945-1966 le barrage de Béni-Bahdel a accusé un envasement important ( $4.41Hm^3$ ), en revanche pour la période de 1966 à 1986 son envasement a été de faible importance ( $0.31Hm^3$ ). Cette diminution est peut être due aux effets du barrage vert construit durant cette période.

## V.2 l' Estimation de l'envasement par le modèle PISA :

P.I.S.A est un modèle de prédiction de l'envasement dans les réservoirs artificiels. Il a été utilisé dans 42 ouvrages de mobilisation des eaux (barrages-retenués collinaires) italiens par Bazzofi et al. (1996, 1997, 1998, 2000, 2003), Ouechtati et Baldassare, (2011) en Tunisie et Benkhadja et al, (2012) en Algérie.

Le modèle de prévision de l'envasement dans les réservoirs artificiels (P.I.S.A) est un modèle paramétrique statistique de régression linéaire multiple, conçu pour l'évaluation de la sédimentation dans les réservoirs. Il a été formulé pour être facilement et rapidement applicable, sans avoir besoin de données recueillies directement sur terrain, mais à partir des variables d'entrée obtenues à partir de la cartographie traditionnelle et l'analyse des séries chronologiques des variables hydrologiques.

Le modèle P.I.S.A se base sur des paramètres climatiques, morphologiques et physiques d'un bassin versant, qui peut fournir une prévision du taux moyen annuel de sédimentation dans les réservoirs artificiels exprimées en  $m^3.Km^{-2}$  de sédiments. Il permet alors une estimation indirecte de l'érosion des sols en amont du barrage (Benkhadja et al, 2012).

Le modèle est donné par la relation suivante :

$$Y = 4259334 - 1.3898A + 102.9576 (S_{ER})^{0.5} - 9.84435 PEN - 0.31\bar{P} + 116.718D \quad (V.1)$$

Avec :

Y : Indice de sédimentation exprimé par le volume annuel de sédiments humides versés dans le barrage par unité de surface du bassin versant. ( $m^3.km^{-2}$ ) ;

A : Superficie du bassin versant ( $km^2$ ) ;

SER : La surface érodable correspondant à la surface cultivable ajoutée à 1/16 de la surface non cultivées agroforestière ( $km^2$ ) ;

PEN : Pente moyenne du bassin versant (grades) ;

P : Précipitation moyenne annuelle (mm) ;

D : Densité de drainage ( $km.km^{-2}$ ).

L'avantage de ce modèle réside dans la formulation pour une application en phase de projet de construction d'un barrage dans des zones aux données hydrologiques insuffisantes voire

absentes. Le second avantage réside dans son applicabilité à des bassins versants de différentes tailles, contrairement au modèle universel de perte en sol USLE (Universal Soil Loss Equation, Wischmeier et Smith, 1978) par exemple qui n'est applicable qu'au niveau d'une parcelle expérimentale. Toutefois, le modèle peut être utilisé pendant la phase de fonctionnement du réservoir, pour :

- Assurer la gestion et les actions y afférentes ;
- Réduire les arrivées de sédiments au niveau du barrage et les impacts négatifs qui en découlent sur l'environnement (Bazzoffi et Baldassarre, 2000) ;
- Rétablir la capacité d'origine de la retenue du barrage (Ouechtati et Baldassarre, 2011).

### V.2.1 Application du modèle

Pour ce faire nous avons subdivisé notre bassin en deux sous bassins, l'oued Sebdou et l'oued Khemis. Le travail cartographique a nécessité l'utilisation de la carte en MNT établie par le CNTS (centre National des Techniques spatiales) et l'ASAL (l'Agence Spatiale Algérie) (Arzew) des deux sous bassins et l'outil Arc GIS.

La mise en pratique du modèle nécessite d'extraire la surface, la pente moyenne, la densité de drainage et la surface érodable des versants Sebdou et Khemis en utilisant le logiciel Arc GIS. Le tableau (V.2) résume ces paramètres.

**Tableau V.2.** : Les paramètres du modèle PISA

Sous bassins	Surface (km <sup>2</sup> )	Pente moyenne (grade)	La densité de drainage (km/km <sup>2</sup> )	Surface érodable (km <sup>2</sup> )
Bassin de khemis	372.3	10.67	1.05	112.68
+Bassin de Sebdou	694.75	9.75	1.18	263.61

Selon le modèle PISA la surface érodable peut être calculée comme suit

Pour Sebdou :  $S_{er} = \text{agricole} + \text{défrichement} + 1/16 (\text{Alfa} + \text{foret} + \text{improductif} + \text{maquis} + \text{maquis Arbor} + \text{maquis steppique} + \text{parcours} + \text{reboisement})$

Pour khemis :  $S_{er} = \text{agricole} + 1/16 (\text{alfa} + \text{improductif} + \text{maquis} + \text{maquis Arbor} + \text{parcours})$

OBJECTID *	Shape *	ID	GRIDCODE	surface	surface2	surface4	perimetre	longue
1	Polygone	1	0	0,00081	0,00081	0,00081	0,113811	<Nul>
2	Polygone	2	0	0,000554	0,000554	0,000554	0,10735	<Nul>
3	Polygone	3	0	0,000554	0,000554	0,000554	0,10735	<Nul>
4	Polygone	4	0	694,758968	1067,060673	694,758968	163,37335	<Nul>

**Figure V.2** : table d'extraction des paramètres physiques du bassin de Sebdu

FID	Shape *	ID	GRIDCODE	surface	perimetre
0	Polygone	1	0	372,302906	102,4917

**Figure V.3** : table d'extraction des paramètres physiques du bassin de Khemis

Les figures V.2 et V.3 présentent les tables d'extraction de surface et de périmètre des bassins de Sebdu et Khemis, dont nous nous sommes servis pour appliquer le modèle PISA, et calculer le coefficient de compacité indiqué dans la morphométrie des bassins, « chapitre IV ».

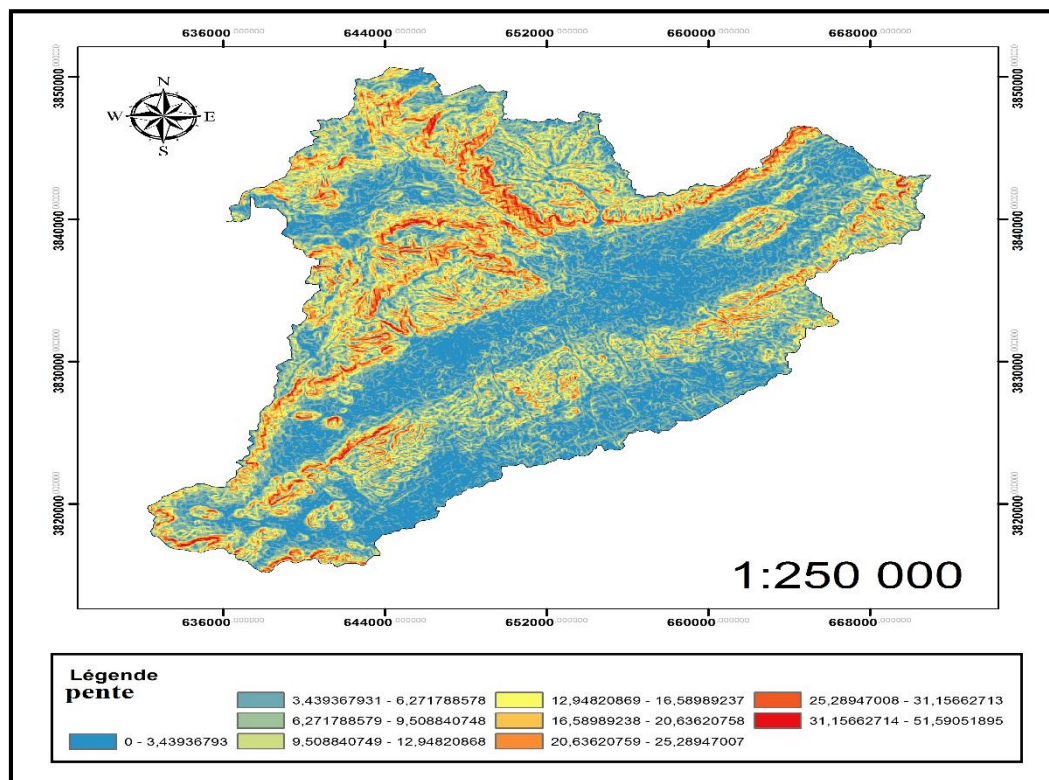


Figure V.4 : carte des pentes du bassin d'oued Sebdou

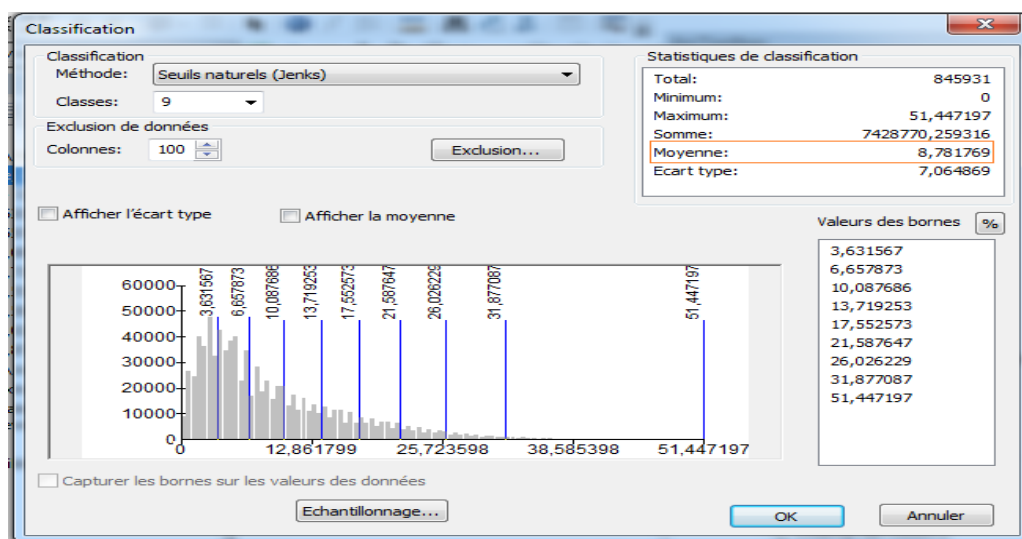


Figure V.5 : table de classification des pentes du bassin de Sebdou

La figure .V.4, montre la répartition des pentes dans le bassin d'oued Sebdou en %, cette dernière indique que le bassin d'oued Sebdou est caractérisé par des pentes très fortes (30-50%) localisée au nord du bassin et dans certains endroits plus au sud.

La figure. V.5, représente l'extraction de la pente moyenne en degré du bassin d'oued Sebdou

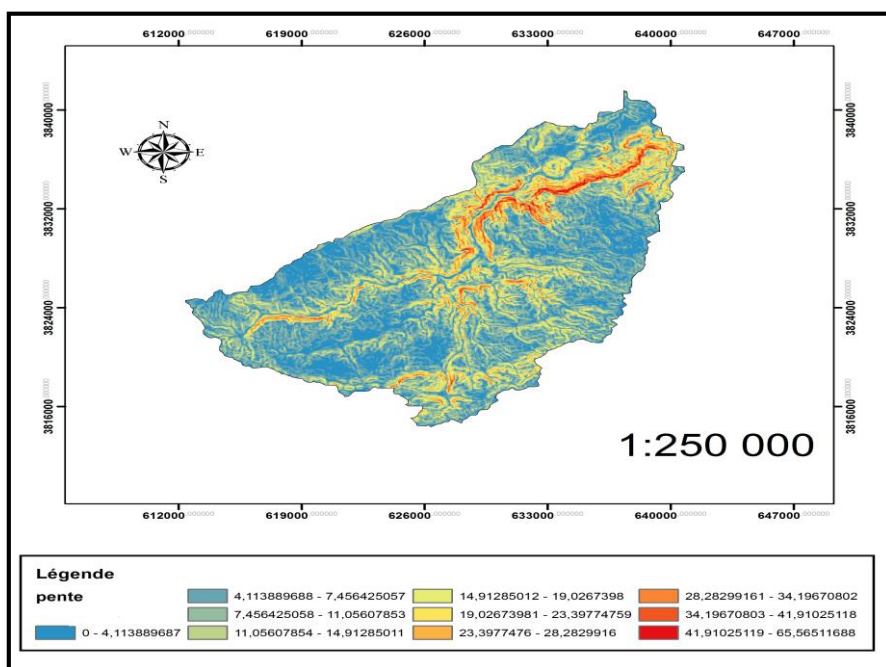


Figure V.6 : carte des pentes du bassin d'oued Khemis en %

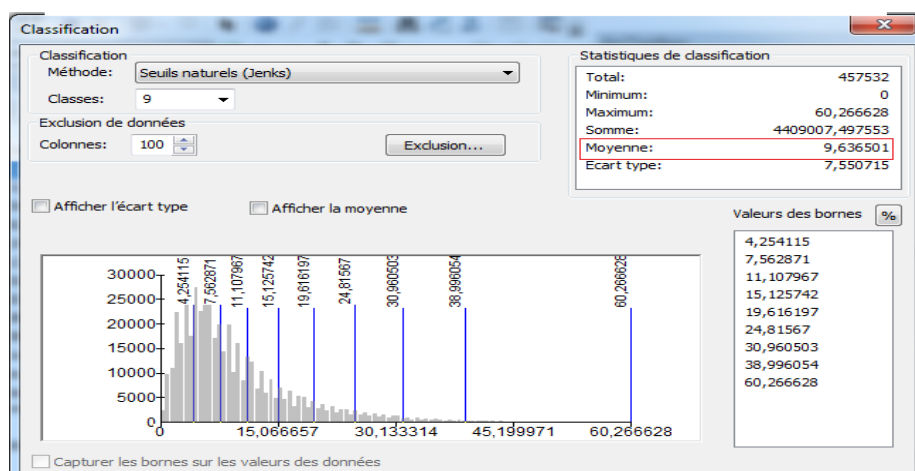


Figure V.7 : table de classification de pentes du bassin de Khemis

Le bassin d'oued Khemis est caractérisé par des pentes (figure V.6) assez abruptes dépassant 25% aux abords de l'oued. A l'Est et l'Ouest du bassin les pentes sont fortes à moyennes (de 3% à 25%).

La figure. V.7, représente l'extraction de la pente moyenne en degré du bassin d'oued Khemis

### V.2.2 Résultats et discussion :

Les résultats de l'envasement calculé par le modèle PISA au niveau des sous bassins (Sebdou et Khemis) sont donnés au (tableau V.3)

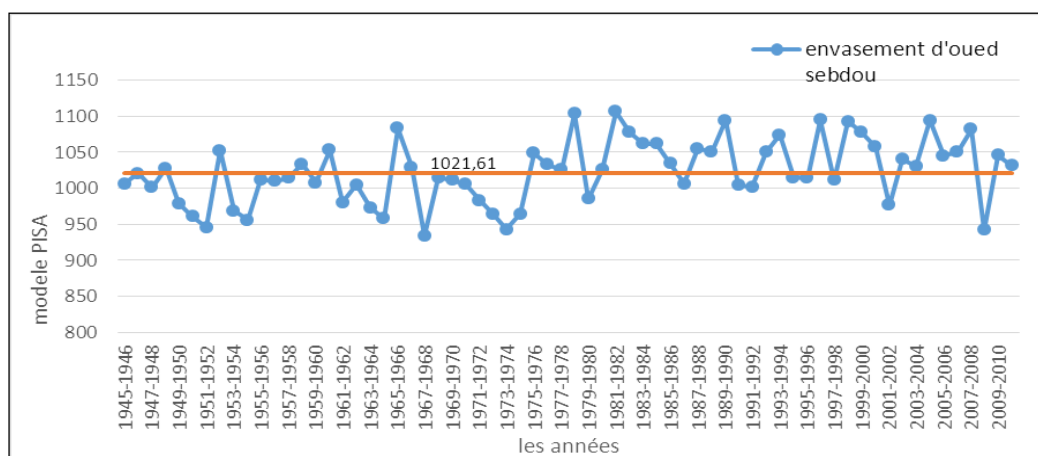
**Tableau V.3** : l'envasement annuel calculé par le modèle PISA pour les bassins des oued Sebdou et Khemis

<b>années</b>	<b>1945-1946</b>	<b>1946-1947</b>	<b>1947-1948</b>	<b>1948-1949</b>	<b>1949-1950</b>	<b>1950-1951</b>	<b>1951-1952</b>	<b>1952-1953</b>	<b>1953-1954</b>	<b>1954-1955</b>	<b>1955-1956</b>
p (mm)	523,5	477,5	539,6	453,5	611,7	670,3	720,6	375,5	646,3	686,2	504,8
Y(sebdou) (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /an)	1006,6	1020,8	1001,6	1028,3	979,2	961,1	945,5	1052,4	968,5	956,1	1012,4
Y(khemis) (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /an)	995,6	1009,9	990,6	1017,3	968,3	950,1	934,5	1041,5	957,6	945,2	1001,4
<b>années</b>	<b>1956-1957</b>	<b>1957-1958</b>	<b>1958-1959</b>	<b>1959-1960</b>	<b>1960-1961</b>	<b>1961-1962</b>	<b>1962-1963</b>	<b>1963-1964</b>	<b>1964-1965</b>	<b>1965-1966</b>	<b>1966-1967</b>
p (mm)	513,0	499,0	435,0	519,0	372,1	607,5	529,9	631,6	680,3	276,4	450,6
Y(Sebdou)	1009,8	1014,2	1034,0	1008,0	1053,5	980,5	1004,6	973,1	958,0	1083,2	1029,2
Y(khemis)	998,9	1003,2	1023,1	997,0	1042,6	969,6	993,6	962,1	947,0	1072,2	1018,2
<b>années</b>	<b>1967-1968</b>	<b>1968-1969</b>	<b>1969-1970</b>	<b>1970-1971</b>	<b>1971-1972</b>	<b>1972-1973</b>	<b>1973-1974</b>	<b>1974-1975</b>	<b>1975-1976</b>	<b>1976-1977</b>	<b>1977-1978</b>
p (mm)	756,1	495,9	507,8	527,5	599,8	661,4	729,1	659,2	387,7	438,0	460,8
Y(Sebdou)	934,5	1015,1	1011,4	1005,3	982,9	963,8	942,8	964,5	1048,7	1033,1	1026,0
Y(khemis)	923,5	1004,2	1000,5	994,4	972,0	952,9	931,9	953,6	1037,7	1022,1	1015,1
<b>années</b>	<b>1978-1979</b>	<b>1979-1980</b>	<b>1980-1981</b>	<b>1981-1982</b>	<b>1982-1983</b>	<b>1983-1984</b>	<b>1984-1985</b>	<b>1985-1986</b>	<b>1986-1987</b>	<b>1987-1988</b>	<b>1988-1989</b>
p (mm)	210,6	591,0	460,8	201,0	293,6	345,6	344,3	434,6	523,4	365,2	383,2
Y(Sebdou)	1103,6	985,6	1026,0	1106,5	1077,8	1061,7	1062,1	1034,1	1006,6	1055,6	1050,1
Y(khemis)	1092,6	974,7	1015,1	1095,6	1066,9	1050,8	1051,2	1023,2	995,7	1044,7	1039,1
<b>années</b>	<b>1989-1990</b>	<b>1990-1991</b>	<b>1991-1992</b>	<b>1992-1993</b>	<b>1993-1994</b>	<b>1994-1995</b>	<b>1995-1996</b>	<b>1996-1997</b>	<b>1997-1998</b>	<b>1998-1999</b>	<b>1999-2000</b>
p (mm)	240,2	531,3	537,3	382,9	306,7	496,8	498,4	238,8	509,1	244,6	293,0
Y(Sebdou)	1094,4	1004,1	1002,3	1050,2	1073,8	1014,8	1014,3	1094,8	1011,0	1093,0	1078,0
Y(khemis)	1083,4	993,2	991,3	1039,2	1062,8	1003,9	1003,4	1083,9	1000,1	1082,1	1067,1
<b>Années</b>	<b>2000-2001</b>	<b>2001-2002</b>	<b>2002-2003</b>	<b>2003-2004</b>	<b>2004-2005</b>	<b>2005-2006</b>	<b>2006-2007</b>	<b>2007-2008</b>	<b>2008-2009</b>	<b>2009-2010</b>	<b>2010-2011</b>
p (mm)	359,2	620,2	414,3	446,2	240,9	397,9	381,4	280,4	731,8	396,4	443,3
Y(Sebdou)	1057,5	976,6	1040,4	1030,5	1094,2	1045,5	1050,6	1081,9	942,0	1046,0	1031,4
Y(khemis)	1046,6	965,6	1029,5	1019,6	1083,2	1034,6	1039,7	1071,0	931,1	1035,0	1020,5

Y : l'envasement calculé par le modèle PISA.

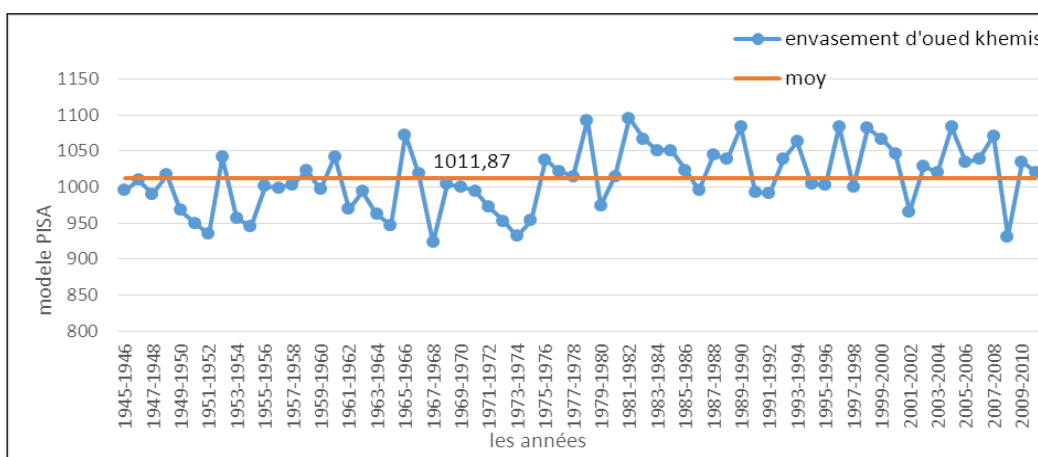


La vase moyenne annuelle correspondant au bassin d'oued Sebdu est de l'ordre  $1021,60\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ . Le graphe de la figure V.8 de l'envasement évalué par le modèle PISA montre que la quantité de vase apportée par le bassin de Sebdu varie dans l'intervalle de petite étendu  $[934,46-1106,54]$ .



**Figure V.8 :** l'envasement estimé par le modèle PISA (bassin de Sebdu)

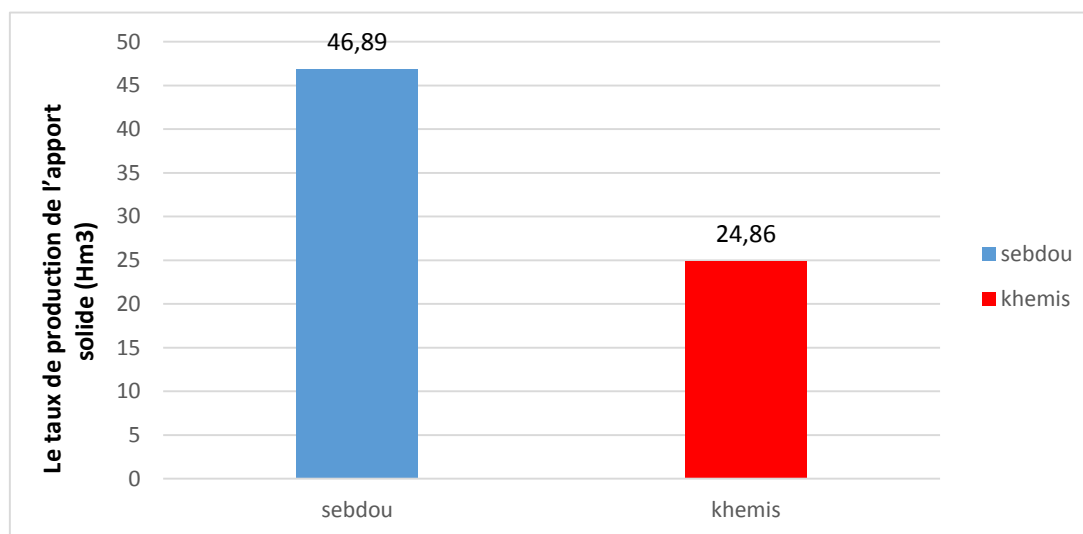
La vase moyenne annuelle correspondant au bassin de khemis est de l'ordre de  $1011,87\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ . Le graphe de la figure V.9 de l'envasement calculé par le modèle PISA montre que la variation annuelle de quantité de vase apportée par le bassin de Khemis est faible comprise entre  $[923,51-1095,59]$ .



**Figure V.9 :** l'envasement estimé par le modèle PISA (bassin de khemis)

Les deux courbes de l'envasement annuel calculé pour les bassins de Sebdou et khemis semblent de même forme que celle des précipitations annuelles : la pluie étant le seul facteur de l'équation qui varie.

### V.2.3 Le taux de production de l'apport solide des sous bassins Sebdou et khemis :



**Figure V.10** : l'apport total de sédiments estimé par le modèle PISA

Durant les années (1945-2011) le bassin de Sebdou a produit une quantité de vase de 46.89 Hm<sup>3</sup>, le bassin de Khemis n'a produit que 24.86 Hm<sup>3</sup>. Le bassin de Sebdou dont la superficie est de presque le double de celle du bassin de Khemis, les autres paramètres du modèle étant presque similaires, a produit le double de vase que le bassin de Khemis.

### V.2.4 Validation du modèle PISA

La validation des résultats du modèle PISA a été réalisée à partir de la Comparaison avec les estimations par d'autres méthodes de calcul de l'envasement ou de l'apport solide par les deux oueds au barrage de Beni Bahdel

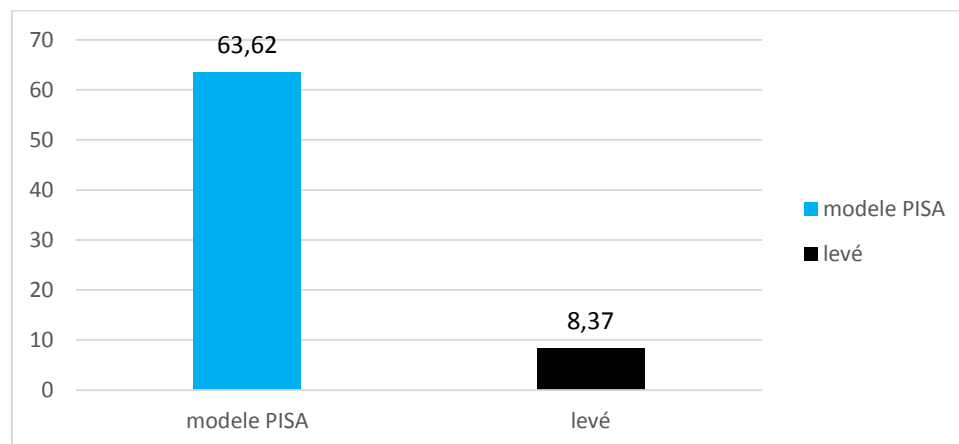
### V.2.4.1. par rapport au levé bathymétrique :

Le tableau V.4 nous donne les valeurs de l'envasement cumulé estimé par le modèle PISA et l'envasement cumulé mesuré au barrage Béni-Bahdel de 1945 jusqu'à 2003.

**Tableau V.4** : comparaison du taux d'envasement (modèle-levé)

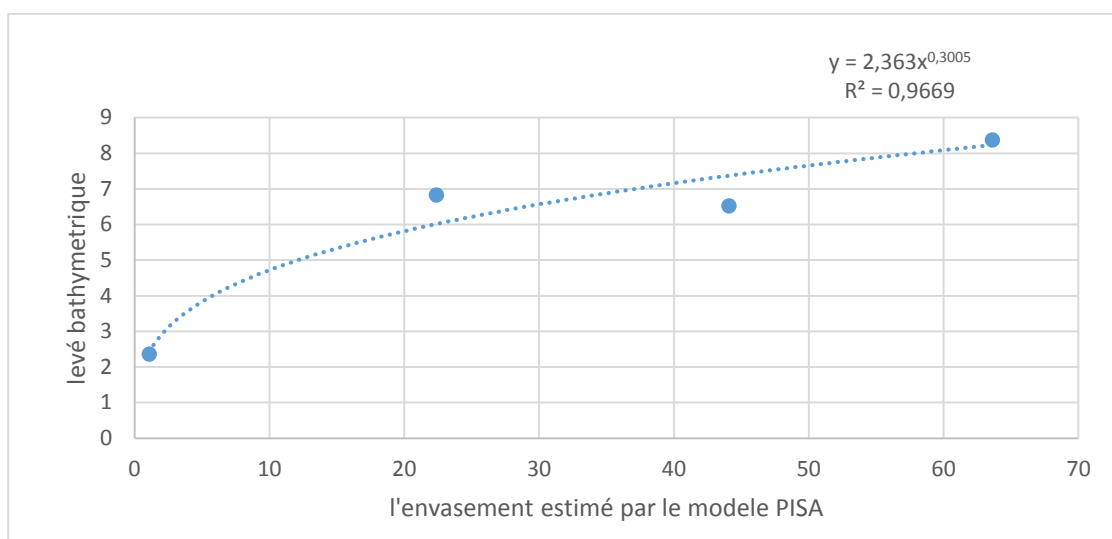
Années	modèle PISA (Hm <sup>3</sup> )	Levé(Hm <sup>3</sup> )
1945	1,07	2,36
1966	22,37	6,83
1986	44,07	6,52
2003	63,62	8,37

Si l'on regarde les valeurs de l'envasement données par le modèle PISA du tableau V.4, Nous pouvons dire que le barrage de Beni Bahdel est déjà envasé à 100% depuis 2003 ce qui est invraisemblable sachant que les levées bathymétriques n'ont donné qu'une perte de 13% de la capacité totale du barrage.



**Figure V.11** : comparaison de l'envasement mesuré dans le barrage et estimé par le modèle PISA (1945-2003)

Selon l'histogramme de la figure V.11 on peut conclure que le modèle PISA surestime l'envasement 7 fois plus que le levé bathymétrique.



**Figure V.12** : relation modèle PISA –levé bathymétrique

L'évolution du levé bathymétrique (figure. V.12) en fonction de l'envasement estimé par le modèle PISA est décrite par une loi de puissance de la forme :  $y = 2,363x^{0,3005}$  avec un très bon coefficient de corrélation ( $R^2 = 0,9669$ )

#### V.2.4.2. par rapport aux apports solides mesurés à oued Sebdou :

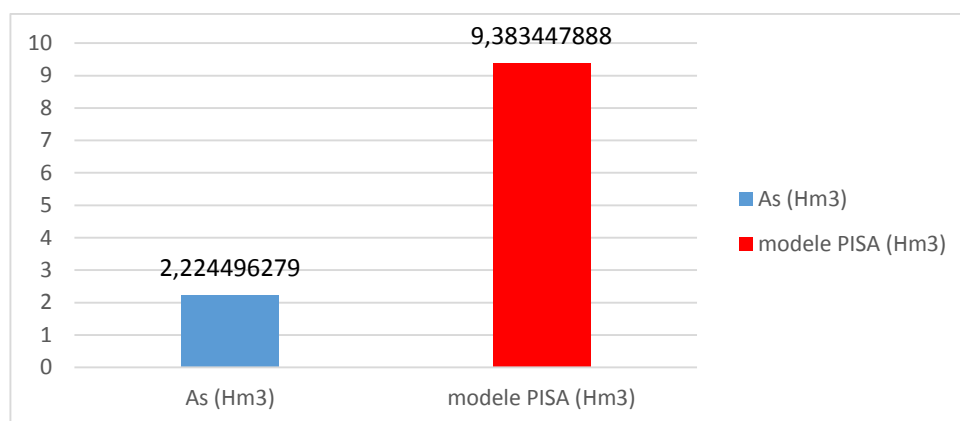
Pour cette deuxième validation nous avons utilisé les valeurs des apports solides calculés à partir des concentrations des matières en suspension mesurées au niveau de l'oued Sebdou et relatives à la période 1985-1998 (Bouanani A, 2004) que nous comparons (tableau V.5) avec celles obtenues par le modèle PISA pour la même période.

**Tableau V.5** : comparaison du taux d'envasement (modèle-As)

années	As (Hm <sup>3</sup> )	modèle PISA (Hm <sup>3</sup> )
1985-86	0,03005767	0,718458783
1986-87	0,03796391	0,699333705
1987-88	0,02549374	0,733405635
1988-89	0,22492611	0,72952893
1989-90	0,02247856	0,760327197
1990-91	0,66752381	0,697632262
1991-92	0,05248306	0,696340027
1992-93	0,01959453	0,729593541
1993-94	0,13671942	0,746004926
1994-95	0,12375232	0,705062614
1995-96	0,58788263	0,704718018
1996-97	0,04537364	0,760628719
1997-98	0,25024686	0,702413532
somme	2,22449628	9,383447888

L'apport solide annuel en suspension arrivant de l'oued Sebdou au barrage Béni-Bahdel (tableau V.5) varie entre  $0,019 \text{ Hm}^3$  et  $0,66 \text{ Hm}^3$ , avec une moyenne de  $0,31 \text{ Hm}^3$ , en revanche la vase précipitée calculé par le modèle PISA au barrage varie de  $0,69 \text{ Hm}^3$  à  $0,76 \text{ Hm}^3$  avec une moyenne de  $0,72 \text{ Hm}^3$ .

Pour la période considérée le modèle PISA surestime l'envasement environ 4.22 fois plus que les apports des sédiments en suspension (figure V.13)



**Figure V.13** : histogramme de comparaison des apports de sédiment pour la période 1985-1998 entre modèle PISA et Apport solide en suspension.

### V.3 Estimation de l'apport solide spécifique par le modèle de Sogreah

L'apport solide spécifique est donné par la relation :

$$Ass = \alpha \cdot E^{0.15} \quad (V.2)$$

Avec :

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

E : écoulement annuel (mm).

$\alpha$  : coefficient dépendant de la perméabilité du sol,

On a pris  $\alpha=133$ . ;  $\alpha$  appartient à un intervalle de perméabilité moyenne à faible.

**Tableau V.6** : écoulement annuel du bassin de Sebdou (1985-1998)

année	écoulement annuel (mm)
1985 - 1986	0,9940751
1986 - 1987	1,287578
1987 - 1988	0,4717165
1988 - 1989	0,6311101
1989 - 1990	0,3400491
1990 - 1991	1,217468
1991 - 1992	0,8773758
1992 - 1993	0,44197
1993 - 1994	0,3345172
1994 - 1995	0,6424945
1995 - 1996	1,033645
1996 - 1997	0,3205009
1997 - 1998	0,3984435

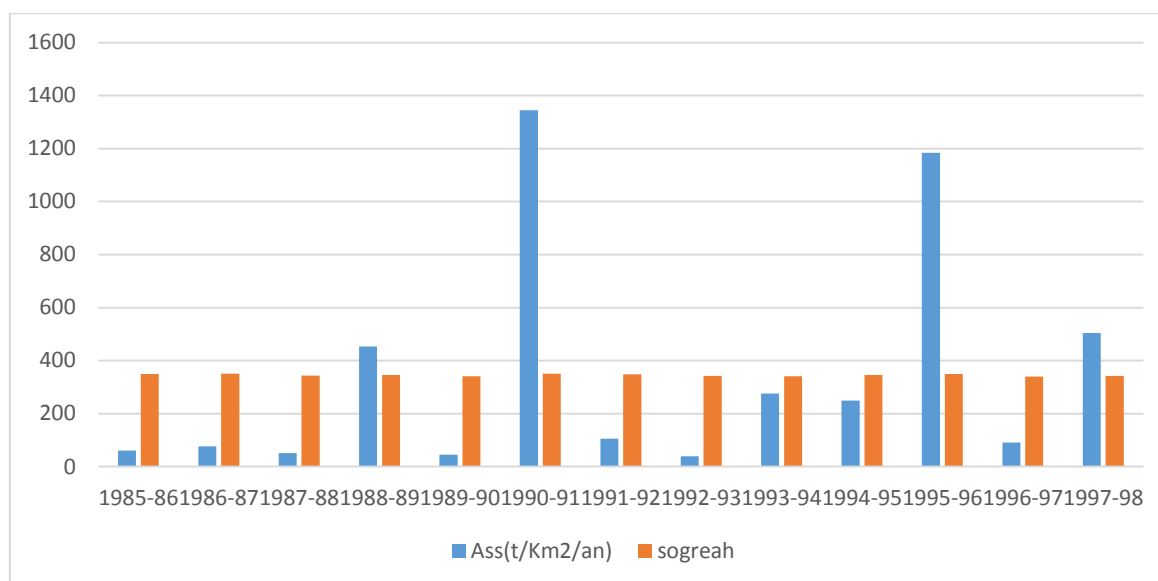
Les dégradations spécifiques calculées par le modèle de SOGREAH et celles obtenues à partir des apports solides en suspension mesurées sont données dans le tableau V.7.

**Tableau V.7** : comparaison entre l'apport solide spécifique mesuré et estimé par le modèle Sogreah

année	Ass(t/Km2/an)	Ass Sogreah (t/Km2/an)
1985-86	60,56961474	348,887802
1986-87	76,5015882	350,9245556
1987-88	51,37277467	343,0849582
1988-89	453,2516019	345,3394708
1989-90	45,29685556	340,5677659
1990-91	1345,136137	350,4827508
1991-92	105,7593206	347,9088937
1992-93	39,48520417	342,5825136
1993-94	275,5051319	340,4421064
1994-95	249,3749614	345,4784127
1995-96	1184,650142	349,1943518
1996-97	91,4330254	340,1143939
1997-98	504,2757919	341,784297
moyenne	344,8163192	345,1378671
Somme	4482,61215	4486,792273

Les dégradations spécifiques calculées par le modèle de SOGREAH (tableau V.7) ; varient de 340,11 t/Km<sup>2</sup>/an à 350,92 t/Km<sup>2</sup>/an, on notera aussi, qu'en valeur moyenne, la dégradation de Sebdou est comparable à celle obtenue à partir des mesures des apports solides en suspension. Toutefois La figure V.14 ; montre que les dégradations annuelles obtenues par les deux méthodes sont nettement distinctes.

« Cette différence est surtout due au fait que, généralement, plusieurs modèles empiriques, ne prennent pas en compte, plusieurs paramètres influant dans le phénomène d'érosion tels que les événements pluviométriques, la surface du bassin versant et la couverture végétale. On notera que c'est les crues d'automne et de printemps qui sont responsables du maximum de transport solide, dans le cas des bassins versants algériens » (Terfous et al, 2001).



**Figure V.14** : comparaison des apports solides spécifiques mesurés et calculés (Sogreah) dans le bassin de Sebdou (1985-1998).

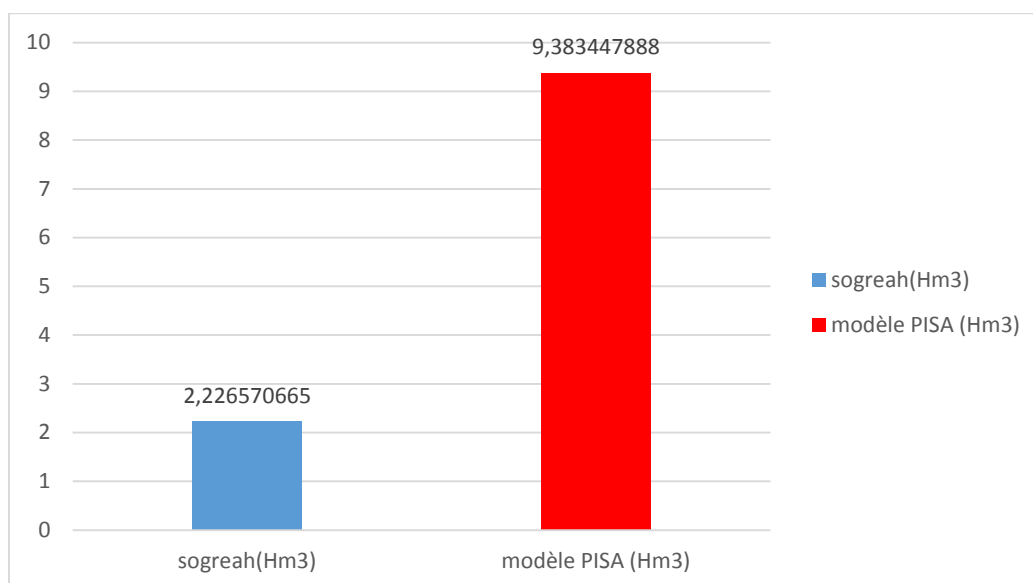
### V.3.1 comparaison des résultats du modèle sogreah avec le modèle PISA

Le tableau V.8 présente les résultats estimés par les deux modèles sogreah et PISA pour le bassin de l'oued Sebdou

**Tableau V.8** : comparaison du taux d'envasement (modèle Sogreah-modèle PISA)

année	sogreah(Hm3)	modèle PISA (Hm3)
1985-86	0,173135572	0,718458783
1986-87	0,174146311	0,699333705
1987-88	0,170255911	0,733405635
1988-89	0,171374712	0,72952893
1989-90	0,169006754	0,760327197
1990-91	0,173927065	0,697632262
1991-92	0,172649789	0,696340027
1992-93	0,170006572	0,729593541
1993-94	0,168944395	0,746004926
1994-95	0,171443662	0,705062614
1995-96	0,173287697	0,704718018
1996-97	0,168781768	0,760628719
1997-98	0,169610457	0,702413532
moyenne	0,171274667	0,721803684
somme	2,226570665	9,383447888





**Figure V.15:** histogramme de comparaison de vase estimée par les modèles PISA et Sogreah pour la période 1985-1998

L'apport solide annuel en suspension arrivant de l'oued Sebdou au barrage Béni-Bahdel (évalué par le modèle Sogreah) (tableau V.8) varie entre  $0,168Hm^3$  et  $0,174Hm^3$ , avec une moyenne de  $0,171Hm^3$ , en revanche le volume de vase à partir de l'oued Sebdou au barrage et calculé par le modèle PISA varie de  $0,69Hm^3$  à  $0,76Hm^3$  avec une moyenne de  $0,72Hm^3$ . Pour la période considérée le modèle PISA surestime 4 fois plus l'envasement que le modèle de Sogreah

**CONCLUSION GENERALE :**

Au terme de cette étude, il est temps de faire le bilan des différentes démarches que nous avons abordé :

- Durant la période (1945-2011), le bassin de Béni-Bahdel a connu une variation interannuelle remarquable de la pluviométrie. A partir de l'année (1975-1976) la pluviométrie a connu une baisse importante. La moyenne interannuelle est de l'ordre de 471.08mm.
- De 1977 à 2011, la variabilité mensuelle des précipitations, fait ressortir deux périodes distinctes : une humide qui s'étale de septembre à mai et une autre sèche de juin à août. Le maximum saisonnier se situe en hiver (146.6mm), suivi par un maximum secondaire (127.2mm) au printemps. En outre l'automne est lui aussi relativement pluvieux avec 108.8 mm en moyenne.

La série pluviométrique annuelle s'ajuste à la loi normale de GAUSS par l'équation

$$P=471.08+141.7u.$$

Pour la période (1980-2011), la variation des débits annuels s'étend de 0.3 m<sup>3</sup>/s à 2.51 m<sup>3</sup>/s, et la variation des débits mensuels s'étend de 0.26 m<sup>3</sup>/s à 1.36m<sup>3</sup>/s.

La série des débits moyens mensuels s'ajuste à la loi de Gumbel par l'équation :

$$Q = 1.5+1.56.u$$

- Le bassin de Sebdou est de forme allongée (Kc=1.73).

La courbe hypsométrique montre le caractère montagneux et l'état d'équilibre du bassin d'où un potentiel érosif moyen.

La densité de drainage est de l'ordre de 1.19. Elle indique que le bassin d'oued Sebdou est mal hiérarchisé et mal drainé.

- Le large temps de concentration confirme les pertes souterraines par failles au niveau d'oued Sebdou
- le bassin de Sebdou accuse une forte action anthropique dominée par les activités agricoles d'où l'aggravation de l'action érosive.
- Le bassin de Khemis est de forme allongée (Kc=1.48).

La courbe hypsométrique montre le caractère montagneux et l'état jeune du bassin d'où un potentiel érosif important.

La densité de drainage est de l'ordre de 1.05. Elle indique que le bassin d'oued Sebdou est mal hiérarchisé et mal drainé.

Le large temps de concentration confirme la forte perméabilité des structures lithologiques du bassin d'oued Khemis.

L'application du modèle P.I.S.A au barrage de Béni Bahdel durant la période (1945-2011) a amené un taux de sédimentation de  $71.75 \text{Hm}^3$ , provenant essentiellement de Sebdou et Khemis, le premier avec une valeur de  $46.89 \text{Hm}^3$  et produisant le double du second avec  $24.86 \text{Hm}^3$ .

Pour la validation, la comparaison des estimations du modèle PISA avec les résultats d'autres méthodes à donner :

- L'envasement estimé par le modèle PISA a fait apparaître une surestimation de 7.59 fois celle trouvée à partir des levés bathymétrique correspondant à la période (1945-2003)
- La vase produite par le bassin de Sebdou durant la période (1985-1998) calculée par le modèle PISA est 4.22 fois supérieure à celle donnée par l'apport solide de l'oued Sebdou.
- La dégradation spécifique produite par l'oued Sebdou durant la période (1985-1998) calculée par le modèle SOGREAH est en valeur moyenne presque égale à celle déduite à partir des apports solides en suspension mesurés. Néanmoins annuellement les valeurs sont différentes.
- L'envasement produit par l'oued Sebdou durant la période (1985-1998) calculé par le modèle PISA est 4.22 fois supérieur de celui calculé par le modèle SOGREAH.

Si l'on regarde les valeurs de l'envasement données par le modèle PISA, nous pouvons dire que le barrage de Beni Bahdel est déjà envasé à 100% depuis 2003 ce qui est invraisemblable sachant que les levées bathymétriques n'ont donné qu'une perte de 13% de la capacité totale du barrage et qu'actuellement il est loin d'être envasé ou même menacé.

Aussi et à la lumière des différents résultats de la validation, nous nous n'encourageons pas l'emploi du modèle PISA pour l'estimation de l'envasement dans le cadre de projets

d'étude de barrage ou autres aménagements dans les cours d'eau algériens. Toutefois, il serait judicieux pour plus d'équité scientifique de reprendre ce genre d'investigation sur des bassins plus petits ou avec un découpage plus fin et plus précis dans la connaissance des paramètres de calcul du modèle.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A.N.R.H, 1970** : Etude de transport solide dans le Nord Algérie. Rapport de l'Agence Nationale des ressources hydrique. Alger.
- Andre M, et Higy C, 2004** ; Hydrologie, une science de la nature, Collection gérer l'environnement, Edition Presses Polytechnique et Universitaire Romandes, SUISSE
- Association E. N.H.Y.D.-Energoprojekt., 1994.** Etude générale de la petite et moyenne hydraulique agricole de l'Algérie du nord, détermination des potentialités globales par zone homogène.
- Bazzoffi, P. Baldassarre, G. Vacca, S. (1996)** .Validation of PISA 2 Model for automatic assessment of reservoir sedimentation. In: Albertson M (Ed) Proceedings of the international conference on reservoir sedimentation. Colorado State University, Fort Collins, pp 519–528.
- Bazzoffi, P. Baldassarre, G. Pellegrini, S. Bassignana, A. (1997)** Models prediction of water storage decrease in Italian reservoirs. Collection Environnement de l'Université de Montréal, Hors-série 9:249–252.
- Bazzoffi P. Baldassarre G. Pellegrini S. Radina B,(1998).** Neural model for assessing basin sediment yield and reservoir sedimentation. 8th Int IAEG Congress, Vol 4. Balkema, Rotterdam, pp 2717–2724.
- Bazzoffi, P. Baldassarre, G. (2000)** Effet of agricultural land use changes on sediment yield and reservoir sedimentation : application of an indicator of off-farm sediment flow. In : Water Conf and Arab J Geosci Exp “Guarding the Global Resource”. Auckland, New Zealand, pp 110–121.
- Bazzoffi, P. Van Rompaey, A. (2003)** PISA model to assess off-farm sediment flow indicator at watershed scale in Italy. OECD expert meeting “Soil Erosion and Soil Biodiversity Indicators” 25–28 March, 2003, Rome, Italy.
- Baba –Hamed K et Kerzabi R, 1991.** Contribution à l'étude hydrogéologique de la Haute Tafna En amont du barrage Béni-Bahdel (Monts de Tlemcen). Mem, Ing, Sci, Terre. Univ, Oran.
- Benkhadja R., Hattab A., Mahdaoui N, Zehar C, 2012.** Assessment of soil losses and siltation of the K'sob hydrological system (semiarid area-East Algeria). Arabian Journal of Geoscience 10 p.
- BESSENASSE M, 2010.** Modélisation du cycle d'envasement des retenues de barrages, Office des publications universitaires, Université Saad Dahlab – Blida, 275P.
- B.N.E.D.E.R, 1993.** Projet de mise en valeur en montagnes la Wilaya de Tlemcen. Rap. Inédit, 184 p. 54 fig. 7 pl.

- 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), Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen
- Bouanani A, 2004.** Hydrologie, Transport Solide et Modélisation « Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie) »-thèse de doctorat d'Etat-Géologie appliquée : Option hydrogéologie, Université de Tlemcen. 240p
- Bouvard M ,1984.** Barrages mobiles et ouvrages de dérivation .Edition EYROLLES, Paris, France.
- Centre d'activité régionale pour le programme d'action prioritaires « PAP/CAR »du plan d'action pour la méditerranée –PNEUE, 1998).** Directives, pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes, programme d'action prioritaires, Centre d'activités régionales, Split, Croatie
- Camponon B, 1950.**Commission internationale des grands barrages et de la conférence mondiale de l'énergie-comité algérien des grands barrages-le barrage de Béni-Bahdel.
- Demmak A, 1982.** Etude sur l'érosion et le transport solide. Thèse de docteur –ingénieur, université de paris, France, 323p.
- D.F.N,** direction des forêts
- El Watan, 2010.** Agence des barrages hydro-canal Chott Chergui : le barrage du Fergoug envasé à 97.77%. Journal quotidien. Article écrit par H Sahraoui.
- Fournier F, 1960.** Climat et érosion : La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques.PUF, Paris-France.
- Ghenim A.2001.**Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna Cas de Oued Isser, Oued Mouilah et la haute Tafna. *Mémoire de Magister*, Université de Tlemcen
- Gravilovic S, 1972.** Ingénierie des cours d'eau torrentiels et de l'érosion. Yougoslavie.
- Hadidi A, 2008.** Une nouvelle approche de la détermination de taux d'envasement des barrages, Mémoire de Magister université Abou Bekr Belkaid –Tlemcen
- Lebboukh A, 2008.**études des différents de dévasement des barrages « quelques exemples de l'ouest Algériens », mémoire de magistère, université Abou Bekr Belkaid, Algérie, 103p.
- Lefort P, 1995.** Transport solide dans le lit des cours d'eau-Dynamique fluviale. Institut national polytechnique de Grenoble.
- Malavoi J R, 2005.** Le transport solide par charriage, Etat de connaissances, ENGREF-France
- Meddi M, 1992,** hydro-pluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina (l'ouest de l'Algérie).thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 358p.

- Megnounif A, 2007**, Etude du transport solide des sédiments en suspension dans les écoulements de surface, thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 168p.
- Meziane S.M, 1992**. Contribution à l'étude transport solide « envasement du barrage IZDIHAR (Sidi-Abdelli)-Diplôme ingénieur d'état-institut d'Hydraulique –Tlemcen.
- Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire, 2000**.Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement, P95.
- Molinier 1979** ; Note sur les débits et la qualité des eaux du Congo à Brazzaville. *Cah. ORSTOM. Se. Hydrol.* Vol. 16, n°1, 55–66
- Malavoi J R, 2005**. Le transport solide par charriage, Etat de connaissances, ENGREF-France
- Olivry J.C, Bricquet J.P, Thiebeaux J.P, 1989**. Bilan annuel et variation saisonnières des flux particuliers du Congo Brazzaville et de l'Oubangui à Bangui. *La Houille Blanche* N3/4, pp 311-314.
- Ouechtati S, Baldassare G, 2011**. Evaluation du transport solide et de l'envasement dans le bassin versant de Siliana (Tunisie) : cas des barrages Siliana et Lakhmess. *Bull Eng Geol Environ* 70(4) :709-722.
- Remini B., Kettab A., Hihat H., 1995**. Envasement du barrage d'IGHIL EMDA (Algérie). *Revue Internationale de l'eau : La Houille Blanche* n° 2/3, pp.23-28
- Remini B., Avenard J-M., Kettab A., 1996**. Le barrage d'IGHIL EMDA (Algérie) I- Les courants de densité dans la retenue. *Les Annales Maghrébines de l'Ingénieur*, Tunis, avril, Vol. 10 ., 9 fig., 7 photos, pp.53-67.
- Remini B., Avenard J-M., Kettab A., 1997**. Evolution dans le temps de l'envasement dans une retenue de barrage dans laquelle est pratiquée la technique du soutirage, *Revue Internationale de l'eau : La Houille Blanche* n° 6, pp. 4-8.
- Remini B, 1997**. Envasement des retenues des barrages en Algérie. Mécanisme et moyen de lutte par la technique du soutirage. Doctorat d'état, E.N.P
- Remini B, Avenard J.M, 1999**. La pratique de la technique du soutirage dans les barrages. *Revue La Houille Blanche* n° 2, pp. 5-6.
- Remini B, 2000**. La technique du soutirage en Algérie. *Bulletin du réseau Erosion (France)* n°20, vol. 2, pp. 172- 177.
- Remini B et Hallouche W, 2004**. Le dragage des barrages. Quelques exemples algériens. *Revue Internationale la Houille Blanche* n°3, octobre.
- Remini B., Hallouche W., et Achour B., 2009**. Chapitre 08 L'Algérie : plus d'un siècle de dévasement des barrages. Ouvrage intitulé : Etat des ressources en eau au Maghreb en 2009, édité par UNESCO Office in Rabat, pp. 123-142.

- Remini B, 2008.** La surélévation des barrages : une technique de lutte contre L'envasement-exemples algériens. Revue La Houille Blanche, N°5 pp. 103-108
- Remini B, 2016.** Envasement des barrages dans les régions arides exemples algériens, polycopie, Département des Sciences de l'Eau et Environnement, Faculté de Technologie, Université Blida1, Blida 9000, Algérie.
- Roche M, 1963.** Hydrologie de surface. Paris, Gauthier - Villars. 430 p. 204 fig.
- Roose E.J, 1985.** Terrasses de diversion ou micro-barrages perméables ? Analyse de leur efficacité en milieu paysan ouest-africain pour la conservation de l'eau et des sols dans la zone soudano-sahélienne. IVe Conférence Internationale de Conservation des Sols. ISCO. Maracay (Venezuela) 3-9 novembre 1985, 15 p.
- SOGREAH, 1969.** Etude de synthèse sur les apports solides en Algérie. Rapport inédit.
- Terfous A, Megnounif A, Bouanani A, 2001.** Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). Rev. Sci. Eau, 14, 175-185.
- Tecsult, 2002** .Proposition d'étude du traitement de l'érosion du bassin versant de Kef-Eddir. 32 P.
- Tixeront J, 1960.** Taux d'abrasion et teneur en suspension des cours d'eau d'Algérie et de Tunisie .Secrétariat d'état à l'agriculture Tunis.
- Touibia B, Aidaoui A, Gomer Dieter & Achite M, 2001.**Quantification et variabilité de l'écoulement solide en zone semi-aride de l'Algérie du Nord. Revues des sciences hydrologiques, 46(1), pp : 41-53.
- Touat S, 1989.** Contrôle de la représentativité de l'échantillon des transports solides en suspension. Pages 48-54 of : Rev. Eau et Sols de l'Algérie, vol. n° 2. Bir Mourad Raïs, Alger : ANRH.
- UNESCO, 1986.** Méthodes de calcul de la sédimentation dans les lacs et les réservoirs, Contribution au programme hydrologique Internationale PHI-II Projet A.2.6.1 Panel Stevan Bruk, Rapporteur Janvier 1986.
- Yles F, 2014.** Hydrologie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Saida, thèse de doctorat -Université Abou Bekr Belkaid –Algérie-177p



**Références webographie :**

[1] : (www.ma.auf.org)

[2] : **Modélisation du transport solide,**

<http://www.enseiht.fr/hmf/travaux/CD9598/travaux/optsee/bei/norme34/n34p00.htm>.

Consulté : (le 20/01/2017)

[3] : **Musy A,** 1991. Chapitre 7-la mesure hydrologique,

<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html> (consulté le 17/4/2017)