



Mémoire de fin d'étude

En Vue de l'Obtention du Diplôme

De Master en Génie Civil

Option : Constructions Hydrauliques et Aménagements (C.H.A)

Thème :

Contribution à l'évaluation du transport solide et de la sédimentation au niveau de la retenue du barrage de Sidi Yacoub (Sous bassin versant de l'Oued Ardjem)

Dirigé par : Mme. BEN KACI Souhila

Réalisé par :

KANA Saliha

BOUAKAZ Meriem

Remerciements

Au terme de ce travail, Nous sommes reconnaissantes à notre encadreur madame « BENKACI Souhila » et nous lui offrons un grand respect, et nous tenons à la remercier pour son aide, sa disponibilité, pour ses orientations et ses précieux conseils qu'elle nous a prodigués tout au long de notre travail de recherche.

Nos remerciements anticipés vont également aux membres du jury :

Madame la présidente « BOUZELHA Karima » qui nous a fait l'honneur de présider notre jury.

Les messieurs « KHETTAOUI Mohammed et DEHMOUS Hocine » pour avoir accepté de juger notre travail.

Que tous ceux qui ont contribué à notre formation, particulièrement le corps enseignant du département de génie civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou, trouvent ici notre profonde reconnaissance.

Nos plus vifs remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail mais qui ne sont pas cités ici, nous les remercions tous chaleureusement.

Dédicaces

J'ai l'honneur de dédier ce travail :

A ceux qui m'ont indiqué la bonne voie.

A ceux qui ont été mon guide sur le chemin de la vie.

*A ceux qui ont attendu avec patience les fruits de ma
bonne éducation à vousseuls « mes très chères parents »,
tout mon respect, que Dieu les protège et les entoure de sa
bénédiction ;*

A mes chères sœurs « Lynda, Aziza, Farida »

A mes chers frères « Salah et Amar »

A mon fiancé et sa famille.

*A mes neveux « Abdou, Kaci, Fatima, Mahmoud,
Sami et le petit Omarouche »*

*A mes chères amies « Kahina, Zina, Meriem, Malika,
Dahbia, Hanane et Naima »*

A tous mes amis sans exception.

A la promotion de CHA 2016/2017.

A tous ceux qui me connaissent.

Saliha.

Dédicaces

*J'ai l'honneur de dédier ce travail:
A ceux qui m'ont indiqué la bonne voie.
A ceux qui ont été mon guide sur le chemin de
la vie.
A ceux qui ont attendu avec patience les fruits
de ma bonne éducation à vousseuls «mes très
chères parents», tout mon respect, que Dieu
les protège et les entoure de sa bénédiction ;
Mon cher frère(TAHAR), mes chères sœurs
(Sabrina et Farida), à toute ma grande
famille ;
A mes amies
(Sarah, Mlika, Davy, Saliha, Hanan, Naima,
Thiziri, Lamia, Horia, hafida)
A tous mes amis particulièrement Ahmed
A la promotion de CHA 2016/2017.
A tous ceux qui me connaissent*

MERJEM

Abréviations

USLE : Equation universelle des pertes en sol

ANRH : Agence nationale des ressources hydriques

O.R.S.T.O.M : Office de la recherche scientifique et technique Outre-mer

A.N.B.T : Agence Nationale des barrages et transfère

C.R.M : Comptes rendu mensuels

S.B.V : sous bassin versant

Kc : coefficient de compacité de gravélius

Ip : Indice de pente

Ig : Indice de pente globale

Imoy : Indice de pente moyenne

Ds : Dénivelée spécifique

Dd : densité de drainage

Ct : coefficient de torrentialité

Tc : temps de concentration

Hmax : Altitude maximum

Hmin : Altitude minimum

Hmoy : Altitude moyenne

Hméd : Altitude Médiane

A : Surface du bassin versant

P : périmètre du bassin versant

L : longueur du rectangle équivalent

I : largeur du rectangle équivalent

Km : kilomètre

m : mètre

Hm³ : Hecto mètre cube

M.N.T : Model Numérique de terrain

S. AEK.: Station de Ouled Ben Abdelkader

S.I.G : Système d'information géographique

P.H.E : plus haute eau

CRN : cote normale retenue

H.S.V : Hauteur-Surface –Volume

T : Taux d'envasement

RBF : Fonction de base radiale

Sommaire	
<i>Remerciements</i>	i
<i>Dédicaces</i>	ii
<i>Abréviations</i>	iv
<i>Liste des figures</i>	x
<i>Listes des tableaux</i>	xii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1. GENERALITES	3
1.1.INTRODUCTION	3
1.2. EROSION	3
1.2.1. Définition	3
1.2.2. Types d'érosion	4
1.2.2.1. Erosion en nappe	4
1.2.2.2. Erosion linière	4
1.2.3. Conséquences de l'érosion hydrique	6
1.2.4. Les principaux agents de l'érosion hydrique	6
1.2.4.1. Intensité et agressivité des précipitations	6
1.2.4.2. Ruissellement	6
1.2.5. Quantification de l'érosion hydrique	7
1.2.5.1. Equation universelle des pertes en sol (USLE)	7
1.2.5.2. Formule de Fournier (1960)	7
1.2.5.3. Formule de L'A.N.R.H (1970)	8
1.3. TRANSPORT SOLIDE	8
1.3.1. Définition	8
1.3.2. Transport solide par charriage	9
1.3.2.1. Définition	9
1.3.2.2. Description du phénomène	10
1.3.3. Le Transport solide en suspension	11
1.3.3.1. Définition	11
1.3.3.2. Description du phénomène	11
1.3.4. Mesure du débit solide	12
1.3.4.1. Débit solide charrié	12
1.3.4.2. Débit solide en suspension	13
1.4. ENVASEMENT DES BARRAGES	14
1.4.1 Définition	14
1.4.2. Les modèles d'estimation de l'envasement	15

1.4.2.1. Bathymétrie par nivellement.....	15
1.4.2.2. Bathymétries par sondeurs : « Echosondeur bathymétrique ».....	17
1.4.3. Problèmes posés par L'envasement.....	17
1.4.3.1. Réduction de la capacité de la retenue.....	17
1.4.3.2. Obturation des ouvrages de vidange.....	18
1.4.3.3. Sécurité de l'ouvrage	18
1.4.3.4. Envasement des canaux d'irrigation.....	19
1.4.3.5. Dégradation de la qualité d'eau.....	19
1.4.4. Moyens de lutte contre le phénomène d'envasement.....	19
1.4.4.1. Travaux d'aménagements.....	20
1.4.4.2. Réalisation des barrages de décantation.....	20
1.4.4.3. Surélévation des barrages.....	20
1.4.4.4. Chasse dites à l'espagnol	20
1.4.4.5. Soutirage par courants de densité	20
1.4.4.6. Dragage du barrage	21
1.5. CONCLUSION.....	22
CHAPITRE 2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	23
2.1. INTRODUCTION.....	23
2.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	23
2.3. LE RELIEF	24
2.4. CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN VERSANT	26
2.4.1. Caractéristiques géométriques.....	26
2.4.1.1. Surface et périmètre du sous bassin Sidi Yacoub.....	26
2.4.2. Caractéristiques de forme	26
2.4.2.1. Coefficient de gravélius K_c (1914).....	26
2.4.2.2. Courbe hypsométrique.....	27
2.4.2.3. Rectangle équivalent.....	29
2.4.3. Les indices des pentes.....	31
2.4.3.1. Indice de pente de roche.....	30
2.4.3.2. Indice de pente globale.....	30
2.4.3.3. Indice de pente moyenne.....	31
2.4.3.4. Dénivelée spécifique.....	31
2.5. CARACTERISTIQUES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE	33
2.5.1. Densité de drainage	34

2.5.2. Coefficient de torrentialité	34
2.5.3. Le Temps de concentration	35
2.6. GEOLOGIE DU SITE	35
2.7. CLIMAT DE LA REGION D'ETUDE.....	36
2.7.1. Pluviométrie de la zone d'étude	36
2.7.2. Température	36
2.8. CONCLUSION.....	38
CHAPITRE 3. TRANSPORT SOLIDE ET ENVASEMENT DU BARRAGE DE SIDI YACOUB.....	39
3.1. INTRODUCTION.....	39
3.2. PRESENTATION DU BARRAGE	39
3.3. APPORTS LIQUIDES ET APPORTS SOLIDES	41
3.3.1. Variation annuelle des apports liquides	41
3.3.2. Débits solides en suspension	42
3.3.3. Calcul des apports solides totaux.....	43
3.4. Etablissement des régressions entre débits solides et débits liquides	43
3.4.1. Analyse des débits instantanés	43
3.4.2. Analyse saisonnière	44
3.5. ETAT D'ENVASEMENT DE LA RETENUE DU BARRAGE SIDI YACOUB ...	48
3.5.1. Levées bathymétriques	48
3.5.2. Capacité de stockage d'eau	48
3.5.3. Courbes HSV	49
3.5.4. Estimation de la perte de capacité de stockage d'eau dans la retenue du barrage Sidi Yacoub	51
3.5.4.1. Calcul du taux d'envasement.....	52
3.6. Conclusion	54
CHAPITRE 4. IDENTIFICATION ET EVALUATION DES ZONES D'EROSION ET DES DEPOTS AU NIVEAU DE LA RETENUE DU BARRAGE DE SIDI YACOUB ..	55
4.1.INTRODUCTION.....	55
4.2. METHODOLOGIE DE TRAVAIL	56
4.2.1. Définition du logiciel ArcGis.....	56
4.2.2. Organigramme méthodologique	56
4.2.3. Fonctions de base utilisées sur ArcGis	56
4.2.3.1. Fonction de base radiale (RBF).....	56
4.2.3.2. Fonction de l'outil Remblais/déblais (CutFill).....	58
4.4. RESULTATS ET DISCUSSION	59

4.4.1. Cartes élaborées	59
4.4.2. Volume d'érosion et de dépôt.....	60
4.4.3. Discussion et conclusion des résultats	62
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	63
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</i>	65
<i>ANNEXES</i>	66

Liste des figures

Figure 1.1 : Erosion En Nappe	4
Figure 1.2 : Erosion En Griffes Et En Rigoles : (A)- Erosion En Griffes, (B)- Erosion En Rigoles	5
Figure 1.3 : Erosion Par Ravinement	5
Figure 1.4 : Différents Modes Du Transport Solide.....	9
Figure 1.5 : Transport Par Charriage.....	11
Figure 1.6 : Transport En Suspension	12
Figure 1.7 : Section De Mesure.....	14
Figure 1.8 : Epure Des Débits Solides Elementaires.....	14
Figure 1.9 : Depot De Vase	15
Figure 1.10 : Bathymétrie Par Nivellement	16
Figure 1.11 : Estimation De L'envasement Par La Méthode De Nivellement	16
Figure 1.12 : Estimation De L'envasement Par Echosondeur	17
Figure 1.13 : Blocage De La Vanne De Fond	18
Figure 1.14 : Couleur Verte De L'eau.....	19
Figure 2.1 : Situation Du Sous Bassin Sidi Yacoub.....	23
Figure 2.2 : Image Satellitaire Du Sous Bassin De L'oued Ardjem	24
Figure 2.3 : Carte Altimétrique Du Sous Bassin De L'oued Ardjem	25
Figure 2.4 : Model Numérique De Terrain En 3d Du Sbv De L'oued Ardjem.....	25
Figure 2.5 : Courbe Hypsométrique	28
Figure 2.6 : Rectangle Equivalent Du Sous Bassin De L'oued Sly	30
Figure 2.7 : Réseau Hydrographique Du Sous Bassin De L'oued Ardjem.....	34
Figure 2.8 : Variations Mensuelles Des Températures	37
Figure 3.1 : Image Du Barrage De Sidi Yacoub	39
Figure 3.2 : Image Satellitaire Du Barrage Sidi Yacoub.....	40
Figure 3.3 : Variation Temporelle Du Débit Liquide.....	42
Figure 3.4 : Variation Temporelle Du Débit Solide.....	42
Figure 3.5 : Corrélation Annuelle Débit Liquide-Débit Solide.....	44
Figure 3.6 : Corrélation Apport Solide –Apport Liquide En 2004	44
Figure 3.7 : Corrélation Débit Solide –Débit Liquide En 2010	45
Figure 3.8 : Corrélation Débit Liquide-Débit Solide En 2012	46
Figure 3.9 : Evolution De La Capacité De La Retenue Durant La Période 2008-2017.....	48
Figure 3.10 : Courbes Hsv (Source : Anbt).....	49
Figure 3.11 : Variation Du Plan D'eau Dans La Retenue En Fonction Des Profondeurs Mesurées	50
Figure 3.12 : Variation De La Capacité De La Retenue Durant La Période (2005-2017).....	50
Figure 3.13 : Variation De Capacité De Stockage D'eau Dans La Retenue Du Barrage	51
Figure 3.14 : Evolution Du Taux D'envasement Par Rapport A L'année 2004	53
Figure 4.1 : Image Satellitaire De La Retenue Du Barrage Sidi Yacoub : (A) Forme De La Surface De La Retenue Pour La Date : 31/12/2004 (B) Forme De La Surface Pour La Date : 08/05/2017.....	55
Figure 4.2 : Organigramme Methodologique.....	56
Figure 4.3 : Fenêtre D'utilisation De L'outil « RBF » Sur Arcgis... 57ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.	

Figure 4.4 : Evolution Du Fond Du Lit De La Retenue Durant Les Annees 2004-2017.....	57
Figure 4.5 : Fenetre D'utilisation D'outil « Cutfill » Sur Arcgis.....	578
Figure 4.6 : Identifications Des Zones D'erosion Dans La Retenue Du Barrage De Sidi Yacoub : (A) Periode 2004-2010, (B) Periode 2010- 2017.....	579
Figure 4.7 : Depots Des Sediments Dans La Retenue Du Barrage De Sidi Yacoub : (A) Periode 2004-2017, (B) Periode 2010-2017.....	59
Figure 4.8 : Identification Des Zones D'erosion Et De Depots Dans La Retenue Du Barrage De Sidi Yacoub : (A) Periode 2004-2017, (B) Periode 2010-2017	60
Figure 4.9 :Comparaison Des Volumes Des Sediments Erodes Et Deposés Au Niveau De La Retenue Du Barrage Du Sidi Yacoub Durant Les Annees 2004-2017	62
Figure 4.10:Coparaison Des Volume Des Sediments Erodes Et Deposés Au Niveau De La Retenue Du Barrage Du Sidi Yacoub Durant Les Annees 2010-2017	62

Listes des tableaux

Tableau 2. 1 : La surface et le périmètre de sous bassin de Sidi Yacoub.....	26
Tableau 2.2 : Répartition altimétrique du sous bassin de l'Oued Adjrem.....	27
Tableau 2.3 : Pourcentage des surfaces et écartements entre les courbes de niveau.....	29
Tableau 2.4 : Variation de l'indice de pente globale selon O.R.S.T.O.M.....	31
Tableau 2.5 : variation de la dénivelée spécifique selon l'O.R.S.T.O.M.....	32
Tableau 2.6 : Caractéristiques morphométriques du sous bassin de l'Oued Adjrem.....	32
Tableau 2.7 :Les données pluviométriques moyennes interannuelles de l'ANRH	36
Tableau 2.8 : Températures moyennes mensuelles (en C°) de l'année 2012.....	36
Tableau 3.1 : Caractéristiques du barrage Sidi Yacoub.....	40
Tableau 3.2 : Variation inter annuelle du débit liquide (2004-2012).....	41
Tableau 3.3 : Apports solides annuels de la station Ouled ben AEK. 2.....	43
Tableau 3.4 : Valeurs des coefficients de corrélation R² et des relations Qs et Ql.....	47
Tableau 3.5 : Taux d'envasement pour les années 1986-2004-2010.....	52
Tableau3.6 : Taux d'envasement pour les années 2004 à 2017.....	52
Tableau 4.1 : surface-volume d'érosion et dépôt pour la période 2004-2017.....	61
Tableau 4. 2: volume d'érosion et de dépôt pour les périodes 2004-2017 et 2010-2017..	61

INTRODUCTION GENERALE

La sédimentation des barrages dans les pays de l'Afrique du nord est très élevée et même spectaculaire. Elle est due directement aux forts taux d'érosion des bassins versants, dont les particules solides sont drainées directement par les cours d'eau en provoquant à l'entrée des retenues, des courants de densité, ce qui accélère le phénomène d'envasement. Ce processus est devenu actuellement une réelle menace pour l'infrastructure hydraulique, tant au niveau de la réduction rapide de la capacité utile du barrage qu'à celui de la sécurité de l'ouvrage lui-même. En Algérie la durée de vie d'un barrage est calculée en fonction du taux d'envasement. La plupart des barrages en Algérie ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'année à cause de ce phénomène. Ils sont dans une situation critique et leur exploitation reste en dessous de leur capacité réelle.

L'analyse d'état d'envasement est obligatoirement demandée pour définir le degré de gravité au niveau des barrages. Les présentes approches de quantification visent à fournir aux exploitants et aux projeteurs la situation présente et future de nos retenues. Eventuellement toute analyse d'état s'appuie sur l'analyse des levés bathymétriques, ou sur les prélèvements d'échantillons d'apports solides. C'est dans ce sens que s'inscrit notre étude, où le bassin versant de l'oued Ardjem a été choisi pour application. Ce bassin fait partie de bassin de haut et moyen cheliff, il est confronté à un grave problème de dégradation des sols en raison des pentes raides et de couverture végétale très faible. Ceci a augmenté considérablement, le taux d'envasement au niveau du barrage de Sidi Yacoub, et a provoqué une réduction importante de sa capacité de stockage, durant les années 2004-2010.

La présente étude vise essentiellement, à analyser l'état d'envasement actuel, du barrage de Sidi- Yacoub et de mettre en évidence des cartes thématiques identifiant les zones d'érosion et de dépôts. Ces cartes peuvent être exploitées par les ingénieurs hydrauliciens ou hydrotechniciens.

La méthodologie suivie dans le cadre de ce travail repose sur quatre chapitres essentiels :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les phénomènes d'érosion, de transport solide et d'envasement, ceci surtout pour la compréhension de ces processus, leurs mécanismes et leurs conséquences sur le milieu naturel.

Par la suite, au deuxième chapitre notre zone d'étude est présentée de sorte que toutes les caractéristiques physiographiques, morphométriques et hydrographiques ont été étudiées.

Le troisième chapitre, sera consacré en premier lieu, à la quantification des apports solides et liquides en se basant sur les données des stations hydrométriques en service, réparties sur l'ensemble du bassin. Par la suite, des corrélations ont été établies dans l'objectif de déterminer une relation entre le débit solide et le débit liquide. En second lieu, nous avons analysé l'état d'envasement de notre barrage, en estimant le taux des pertes de la capacité de stockage d'eau dans la retenue, en se basant sur les dernières levées bathymétriques (année 2004) obtenus au sein de l'agence nationale des barrages et de transfert (ANBT) et également sur les comptes rendu mensuels obtenus au niveau de la direction du barrage de Sidi Yacoub. Ces données nous ont permis également de tracer les courbes (Hauteur, Surface, Volume) et d'évaluer la variation de la profondeur du plan d'eau dans la retenue.

Pour finaliser, nous avons présenté au dernier chapitre, le quatrième de ce présent mémoire, les étapes essentielles suivies pour la modélisation de l'érosion et du dépôt par utilisation du logiciel ArcGis. Des cartes thématiques identifiant les zones d'érosion et de dépôt ont été élaborées en considérant les années 2004-2010 et 2017, Ces cartes nous ont permis de calculer essentiellement les volumes déposés ou érodés au niveau de la retenue du barrage de Sidi Yacoub.

CHAPITRE 1. GENERALITES

1.1.INTRODUCTION

L'érosion, le transport et le dépôt sont des phénomènes naturels permanents dans les cours d'eau. Ils constituent une problématique très complexe qui reste difficile à quantifier et qui pose des difficultés aux hydrauliciens et à l'hydrotechnicien. Plusieurs chercheurs ont essayé de les maîtriser en se basant sur des expériences aux laboratoires. Si à l'échelle de la parcelle, ces phénomènes sont maîtrisables ils ne l'ont pas moins à l'échelle du bassin versant [1].

Dans ce chapitre il nous a semblé intéressant de faire un point bibliographique sur ces phénomènes, en mettant l'accent sur leurs quantifications ainsi que leurs conséquences directes sur le milieu naturel.

1.2. EROSION

1.2.1. Définition

L'érosion est définie comme étant le détachement des fragments ou des particules de sol ou de roche, de leurs positions initiales par l'eau et par d'autres agents géologiques, tels que, le vent la glace, etc.

Dans un bassin versant, cet arrachement des particules sédimentaires de leurs emplacements d'origine, leur déplacement et leur dépôt, dépendent de nombreuses caractéristiques. Ces dernières peuvent être soit physiques, soit hydrologiques et sont fortement interpellant :

- Les caractéristiques physiques sont définies essentiellement par : Le relief, la nature géologique du sol, la végétation, l'occupation des terres et la morphologie du réseau de drainage.
- Les caractéristiques hydrologiques sont liées aux facteurs climatiques, tels que, la précipitation et la température. Le volume et l'intensité des précipitations jouent un rôle important dans le processus érosif, par suite de leurs effets dans la dynamique de détachement des particules par l'écoulement. [2]

Le phénomène d'érosion est très répandu dans la zone méditerranéenne, il touche particulièrement les pays du Maghreb, dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol.

1.2.2. Types d'érosion

1.2.2.1. Erosion en nappe

L'érosion en nappe (Figure 1.1) s'effectue selon le détachement des particules de terre causée par le choc des gouttes de pluies (érosion par l'eau) et par le ruissellement superficiel lorsque l'intensité de la pluie devienne supérieure à la vitesse d'infiltration. Elle dépend des caractéristiques des pluies, mais aussi des caractéristiques du sol (granulométrie, humidité, la teneur en matières organiques) et des caractéristiques de la surface (inclinaison, longueur et la forme de la pente, la rugosité et couverture végétale).

Ce type d'érosion entraîne des conséquences morphologiques et pédologiques fâcheuses suites à un décapage de l'horizon superficiel diminuant insidieusement sa réserve en élément fertilisant [2].



Figure 1.1: Erosion en nappe

1.2.2.2. Erosion linière

Elle se produit lorsque la concentration des eaux conduit à la formation des chenaux de dimensions croissantes : griffes (quelques centimètres de profondeur), rigoles (incision dans la couche labourée), ravines (incision dépassant la couche labourée). L'écoulement liquide est concentré dans le lit des talwegs et persiste même après l'arrêt de la pluie. Du point de vue quantitatif, ce type d'érosion reste dans les mêmes proportions que l'érosion en nappe [2].

A. Erosion en griffes et rigoles

Elle se produit lorsque l'écoulement d'eau se concentre et choisit son passage, dès qu'une griffe s'établit, l'eau de ruissellement tend à se réunir, et plus elle se creuse plus il y a appel d'eau dans la rigole, ainsi le phénomène de creusement s'accélère de lui-même (Figure 1.2).



(a)

(b)

Figure 1.2 : Erosion en griffes et en rigoles : (a)- érosion en griffes, (b)- érosion en rigoles

B. Erosion par ravinement

Les ravines suivent la ligne de plus grande pente des versants puisque le ruissellement provenant des versants peut atteindre 50 à 80 % (dans les zones méditerranées) durant les averses exceptionnelles tombant sur les terres battus ou comparées, l'essentiel du transport solide provient des ravines et oueds; Lorsque le sol est peu perméable, saturé et couvert, le ruissellement est abondant. Ce dernier creuse des ravines et augmente les pointes de crues des oueds, ce qui favorise le sapement des berges et les glissements de terrain, et par conséquent l'envasement des barrages, la destruction des infrastructures et la dégradation des terres (Figure 1.3). En Algérie, l'érosion ravinant déplace 90 à 300t/ha/an ce qui correspond à une vitesse d'altération des versants de 7 à 17 mm/an [3].



Figure 1.3 : Erosion par ravinement

1.2.3. Conséquences de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est un phénomène largement répandu, Parmi ses conséquences on cite :

- La diminution de la capacité du sol de retenir l'eau ;
- La diminution du drainage profond induisant une moindre réalimentation des nappes ;
- L'appauvrissement du sol (la teneur en humus et en élément nutritifs du sol décroît ce qui influence la stabilité structurale du sol) ;
- La dégradation des terres agricoles et une désertification du milieu naturel ;
- L'envasement accéléré des barrages, des canaux d'irrigation et des réservoirs ;
- La réduction de la capacité des lits de rivières et un risque d'inondation des terres voisines ;
- Le transfert et la répartition spatiale des polluants (pesticides, métaux lourds et nutriments en excès) dans l'environnement.

1.2.4. Les principaux agents de l'érosion hydrique

1.2.4.1. Intensité et agressivité des précipitations

La dégradation de la structure et le détachement des particules sous l'impact des gouttes de pluie résulte du « travail » exercé par les gouttes à la surface du sol, il est donc lié à l'énergie cinétique des gouttes. Cette énergie cinétique reste un bon critère d'évaluation de l'agressivité des pluies, il existe d'ailleurs une relation empirique reliant l'intensité d'une pluie et son énergie cinétique [4] :

$$E_c = 11,9 + 8,75 \log I_p \quad (1.1)$$

Avec :

E_c : énergie cinétique ($\text{j/m}^2/\text{mm}$),

I_p : intensité de pluie (mm/h)

1.2.4.2. Ruissellement

Le ruissellement apparaît dès que l'intensité d'une pluie devienne supérieure à la vitesse d'infiltration du sol. Il est nettement plus élevé sur un sol nu que sur un sol sous cultures. Les plus faibles ruissellements proviennent des pluies tombantes après une période sèche, par contre les ruissellements et les pertes en terres les plus élevées, ont eu lieu à une époque où le sol est déjà très humide et dans le cas des pluies exceptionnelles, des orages d'automne et de printemps. En effet, le ruissellement ne débute qu'après un cumul pluviométrique journalier de 18 à 20 mm sur le sol sec même si les pluies sont intenses ou après un cumul de 4 mm sur

sol humide et compact [4]. D'une manière générale, il est admis que la vitesse de ruissellement est le paramètre prépondérant de l'action érosive du ruissellement superficiel.

1.2.5. Quantification de l'érosion hydrique

Il existe plusieurs formules empiriques permettant la quantification de l'érosion hydrique, nous citerons :

1.2.5.1. Equation universelle des pertes en sol (USLE)

Cette formule a été développée aux Etats-Unis par Weishemeier et Smith (1960) à partir d'un grand nombre de données recueillies sur des parcelles de dimensions réduites.

Elle est destinée à évaluer l'érosion en nappe et l'érosion en rigoles générées dans les grandes plaines américaines après leur mise en culture intensive, son champ d'application est tant limité à des pentes inférieures à 18 %. Elle permet d'estimer la perte moyenne annuelle des sols (notée A) et s'écrit :

$$A = R * K * L_s * P * C \quad (1.2)$$

avec :

R : facteur d'érosivité (ou d'agressivité) des pluies

K : facteur d'érodabilité du sol

L_s : facteur pente, fonction de sa longueur et de son inclinaison

P : facteur anti-érosif des pratiques culturales

C : facteur de couverture végétale

L'USLE fait intervenir un grand nombre de paramètres difficilement mesurable et dont les ordres de grandeur, proposés par les auteurs, ne sont pas forcément applicables en dehors des sites où ils ont été calés [5].

Cette équation a été appliquée dans l'Est de l'Algérie et a montré la gravité du problème de l'érosion et a déterminé les périodes où l'érosion est intense. Les dégâts graves et intenses causés par l'érosion hydrique au fil des siècles ont poussé l'homme par le biais de différentes formules empiriques à quantifier les pertes en sols, ces formules restent toujours à utiliser avec précaution du fait de leurs limites d'application [6].

1.2.5.2. Formule de Fournier (1960)

Elle est donnée par :

$$A_{SS} = (1/36) (P_m/P_{am})^2 (2.65) (h/S)^2 (0.46) \quad (1.3)$$

avec :

A_{SS} : apport solide spécifique ($t/km^2/an$)

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

P_{am} : précipitation annuelles (mm)

H : dénivelé moyenne (m)

S : superficie (km^2)

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

Elle est donnée par :

$$T_{ss} = 26.62I_e + 5.071I_p + 9.77C_t - 593.5 \quad (1.4)$$

où :

T_{ss} : transport solide spécifique moyen annuel ($T/Km^2/an$)

I_e : indice lithologique (%).

I_p : indice des précipitations (%).

C_t : Coefficient de torrentialité du bassin versant (km^2).

1.3. TRANSPORT SOLIDE

1.3.1. Définition

C'est le phénomène qui permet le déplacement d'une masse solide composée d'éléments granulaires sous l'action de l'écoulement de l'eau. Il peut être décomposé en deux étapes successives : l'arrachement et l'entraînement, qui sont liées à la taille des grains considérés.

Pour des particules relativement grosses, les forces nécessaires à l'arrachement et à l'entraînement sont du même ordre de grandeur. Par contre, la force d'arrachement peut être très supérieure à celle d'entraînement pour les grains dont le diamètre est très petit. Cette tendance est, de plus, accentuée si les particules deviennent cohésives.

L'eau met en jeu deux types de mécanisme : le charriage et la suspension qui sont les principaux types de 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 à la turbulence de l'écoulement

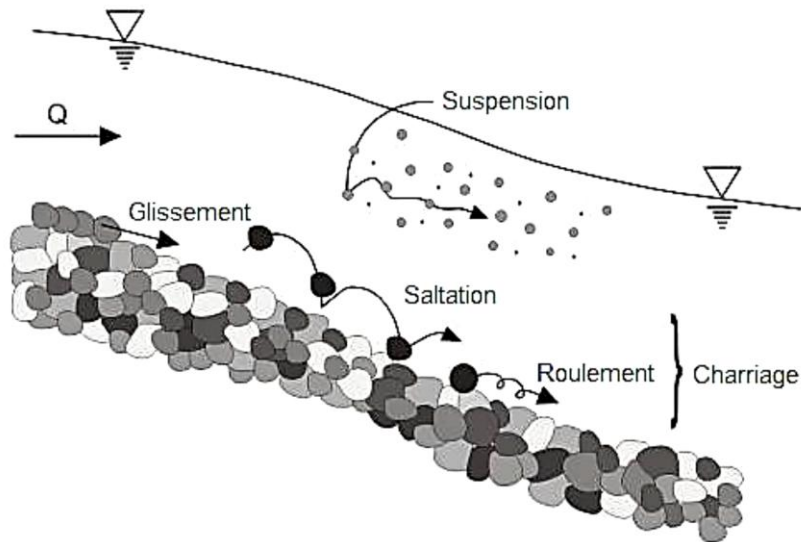


Figure 1.4 : Différents modes du transport solide

1.3.2. Transport solide par charriage

1.3.2.1 Définition

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 sont transportés sur le fond par roulement, glissement ou saltation. Il 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 Bois (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 ... Ils ont basé leurs travaux sur l'équilibre d'une particule au sein d'un liquide en mouvement en régime fluvial, pour un canal de forme régulière. Mais ces études ne peuvent pas s'appliquer directement à des transports de particules non homogènes pour des formes de lits d'oueds non régulières. Einstein a dressé une liste de caractéristiques qui y sont généralement associées [7] :

- Il y'a échange de particules, permanent et intense entre la charge du fond en mouvement et le lit.
- La charge du fond se déplace lentement vers l'aval et le mouvement de chaque particule, individuellement, se fait à coups rapides séparés par des intervalles de repos relativement longs.

- Le saut moyen d'une particule est à peu près indépendant des conditions d'écoulement, de l'intensité du transport solide et de la composition des sédiments.
- Les vitesses de déplacement des différentes particules varient selon qu'elles se déplacent plus ou moins souvent.

1.3.2.2. Description du phénomène

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

- Les forces de pesanteur sont des forces stabilisatrices ;
- Les forces hydrauliques sont des forces déstabilisatrices dues à l'écoulement (traînée et portance).

La grandeur physique explicative de ce mode de transport (charriage) est la contrainte hydrodynamique critique " τ_c ".

Donc les grains constituant l'interface solide- liquide, ayant un poids et un coefficient de frottement fini, ne peuvent être mis en mouvement par l'action du fluide que si la contrainte sur le fond " t " dépasse la valeur de la contrainte critique " τ_c ".

Ce mouvement de granulats se traduira par un transport de fond dans le sens de l'écoulement.

La contrainte sur le fond de la rivière est exprimée par :

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot J \quad (1.5)$$

J : gradient hydraulique ;

R_h : rayon hydraulique.

Pour cela, on dit que le charriage est un phénomène à seuil et l'analyse très simplifiée pour le début de mouvement, revient à comparer directement la force déstabilisation due à l'écoulement et à la capacité de résistance au mouvement des matériaux, qui tapissent le fond [7].



Figure 1.5 : Transport par charriage

1.3.3. Le Transport solide en suspension

1.3.3.1. Définition

Le transport par suspension est le deuxième type de transport solide dans un cours d'eau. Il concerne les éléments fins qui progressent dans le sens du courant au sein même du liquide. Ces éléments fins sont maintenus en suspension par la turbulence et la quantité de ces matériaux dépend essentiellement des éléments fins, qui proviennent de l'érosion du bassin, suite au ruissellement des eaux de pluie [7].

1.3.3.2. Description du phénomène

Au fur et à mesure que la vitesse du courant s'accroît dans le cours d'eau, l'intensité de la turbulence s'accroît également jusqu'au stade où les particules en saltation atteignent une hauteur au-dessus du fond où les forces extensionnelles fluctuantes dues à la turbulence dépassent le poids des particules.

A partir de ce moment, les particules ne suivent plus une trajectoire définie, mais elles suivent des trajectoires aléatoires dans l'épaisseur du fluide.

Le critère d'apparition des phénomènes de suspension consiste à définir la vitesse "U" d'écoulement du liquide, par laquelle la poussée de ce dernier sur les grains de diamètre "D" permet la mise en suspension des grains quartzeux de 0,2 à 0,85 millimètres de diamètre dans des écoulements naturels de rivières. Il est défini par la formule de W.Kresser :

$$U^2 = 360. gD \quad (1.6)$$

Avec

$$U = C\sqrt{hj} \text{ et } \tau = \gamma h \text{ d'où } \tau = 360 \left(\frac{\gamma g}{c^2} \right) D$$

τ : Tension tangentielle de l'écoulement ;
 γ : Poids volumique du liquide ;
 C : Coefficient de Chezy ;
 h : Hauteur du liquide ;
 j : gradient de perte de charge régulière.

Selon Roose (1987), la présence d'élément solide en suspension dans un cours d'eau est due à la turbulence de l'écoulement. Les particules solides subissent l'action des composantes transversales des vitesses de turbulence qui s'opposent à la pesanteur pour maintenir les particules en suspension [7].

La concentration d'élément en suspension des Oueds Algériens dépasse souvent 100g/l pendant les premières pluies d'automne [2].



Figure 1.6 : Transport en suspension

1.3.4. Mesure du débit solide

1.3.4.1. Débit solide charrié

Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer le débit solide par charriage. La plus directe d'entre elles est de disposer d'une trappe sur la largeur du lit de l'oued (transversalement), qui va piéger des sédiments et à l'aide d'un pompage, on connaîtra le volume charrié.

➤ Détecteur hydrophonique

C'est un dispositif composé d'une boîte, équipée d'une plaque vibrante sur la face amont qui est orientée normalement à la courante grâce un gouvernail. A l'intérieur de cette boîte se trouve un microphone qui transmet les percussions reçues par la plaque vibrante à l'aide d'un câble. [7]

➤ **Traceur radio actif**

En mesurant la vitesse des traceurs radio actifs, on peut estimer la vitesse de déplacement des particules.

➤ **Procédés Topographiques**

Par des mesures topographiques, la différence entre deux levés nous donnera la quantité des sédiments déposés au niveau de la retenue. Toutefois par le moyen de cette méthode, on mesure aussi le transport en suspension [7].

1.3.4.2. Débit solide en suspension

A. Méthode rapprochée

Elle consiste à effectuer des prélèvements en bordure d'un cours d'eau. Ainsi, dans un laboratoire, la concentration «C » de l'échantillon prélevé est mesurée par filtration, le passage à l'étuve et enfin la pesée. La relation du débit solide (Q_s) est exprimée par la formule :

$$Q_s = C * Q_l \quad (1.7)$$

Avec:

Q_s :débit solide en (kg/s)

Q_l : débit liquide en (m³/s)

Remarque :

La répartition de la charge en suspension, dans la section transversale d'une rivière dépend de la dimension du matériau. Les particules dont le diamètre est inférieur à 60 micron montrent en général une répartition homogène selon la profondeur et la largeur (suspension uniforme). Il n'est pas de même pour les éléments grossiers qui se présentent selon un gradient de concentration en fonction de la profondeur (suspension graduée).

B. Méthode par exploration de champs de vitesse

La méthode consiste à explorer à travers une section droite d'un cours d'eau, le champ de concentration de matières en suspension et de déterminer le débit solide par intégration. Les échantillons sont relevés aux différents points de la section transversale de l'oued à des différentes profondeurs, par la suite le champ de concentration et le champ de vitesse peuvent être ainsi déterminés.

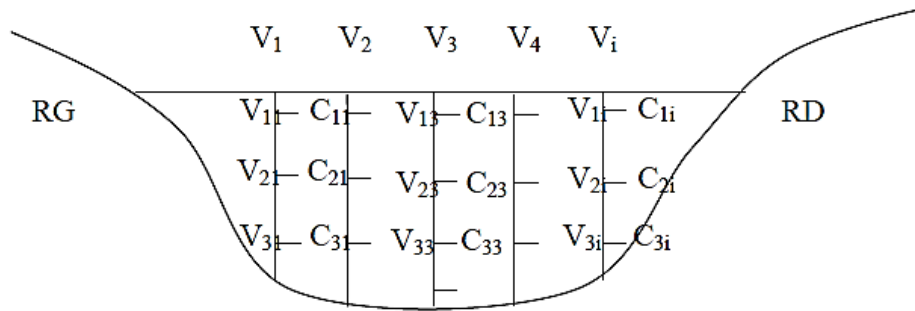


Figure 1. 7 : Section de mesure

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

Pour une verticale i nous reporterons $C \cdot V$ en fonction de la profondeur h_i . Nous traçons les épures de vitesse de chaque verticale [7].

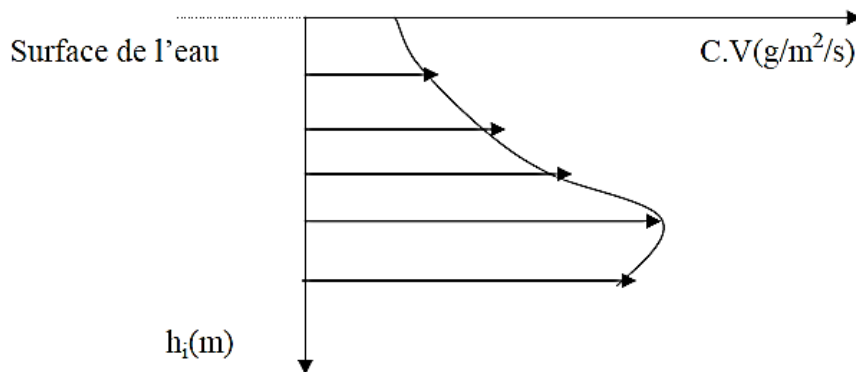


Figure 1.8: Epure des débits solides élémentaires

1.4. ENVASEMENT DES BARRAGES

1.4.1 Définition

L'envasement représente les dépôts successifs des sédiments, dans les retenues et les barrages, réduisant ainsi leurs capacités de stockage. Ce phénomène d'envasement est due essentiellement aux forts taux d'érosion des bassins versants, dont les particules solides sont drainées directement par les cours d'eaux jusqu'au fond de la retenue. L'envasement des barrages est l'une des conséquences la plus dramatique de l'érosion hydrique ; environ 180 millions de tonnes sont arrachés annuellement des bassins versants par le ruissellement dans le nord d'Algérie [8].

L'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, qui exige souvent que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les pays aride et semi-aride.

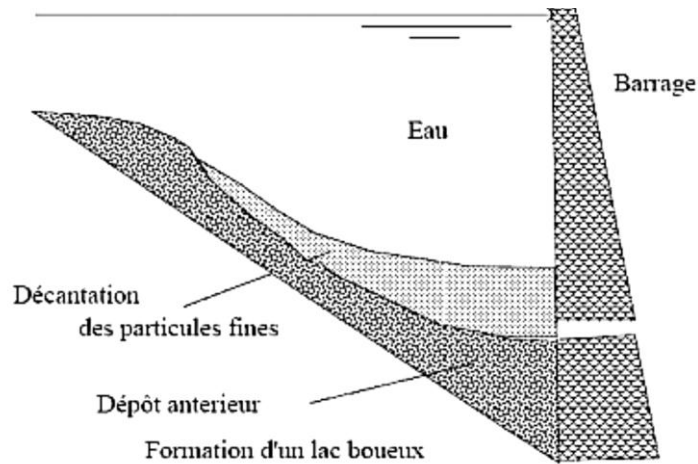


Figure 1.9:Dépôt de vase

1.4.2. Les modèles d'estimation de l'envasement

L'accumulation des sédiments véhiculés par les eaux pluviales et venantes se déposer dans la cuvette des barrages, constitue une préoccupation essentielle pour les méthodes d'évaluation du volume des vases .On distingue deux méthodes de mesures :

1.4.2.1. Bathymétrie par nivellement

Cette méthode présente l'avantage de tenir compte de toute la hauteur des sédiments. Elle est intéressante à mettre en œuvre dans les projets où le toit du substrat n'est pas connu. Il y a plusieurs méthodes utilisées pour les levés bathymétriques par nivellement, les plus utilisées sont définies comme suit :

- a. La première méthode est réalisée à l'aide d'un instrument de mesure gradué, à partir du bord et préférentiellement à partir d'une embarcation si les conditions le permettent. Elle permet soit de mesurer simplement la hauteur totale de vase par enfoncement, soit de mesurer la hauteur d'eau avant et après les travaux. Une résistance plus soutenue permet d'apprécier le haut du substrat. Les mesures sont composées des profils en travers qui doivent être judicieusement localisés et dénombrés afin d'être plus représentatif. La définition du volume extrait ou à retirer est établie par exploitation entre deux profils à partir du produit entre la section envasée et la distance [9].

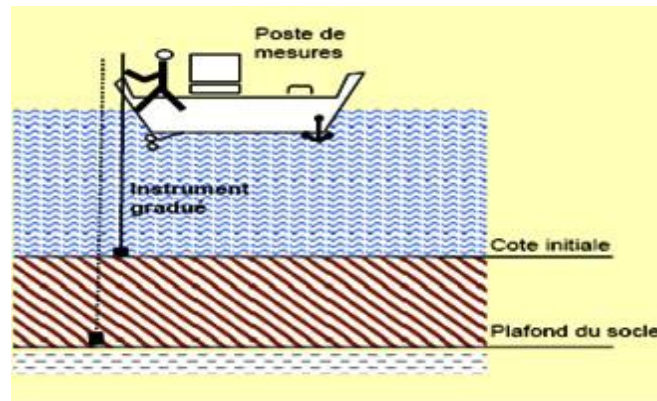


Figure 1.10 : Bathymétrie par nivellement

b. la deuxième méthode de nivellement est à l'aide d'une mire sur une embarcation et d'une lunette de visée ou d'un tachéomètre (lunette de visée laser), la hauteur d'eau, le niveau supérieur de la couche de vase et le fond dur sont obtenus.

Le relèvement s'effectue point par point selon un profil transversal au cours d'eau. Le nombre de points sera forcément fonction de la largeur du cours d'eau. La carte globale se fait alors par extrapolation des profils transversaux. Il est nécessaire de prendre en compte la cote de l'eau, d'avoir un positionnement précis des profils pour tenir compte des particularités du terrain. Le nivellement n'est généralement pas précis et admet une erreur de 20 %. Le volume des sédiments se fait ensuite par extrapolation entre deux profils [9].

$$V = S * L \quad (1.8)$$

où :

V : volume de sédiments en mètres cubes.

S : section envasée en mètres carrés.

L : distance entre deux points de mesure en mètre.



Figure 1.11 : Estimation de l'envasement par la méthode de nivellement

1.4.2.2. Bathymétries par sondeurs : « Echosondeur bathymétrique »

Le dernier appareil consiste à mesurer la profondeur par échosondeur, une véritable révolution dans la mesure de l'eau profonde. Ces mesures bathymétriques permettent de suivre l'évolution du volume des sédiments accumulés.

Le volume des sédiments est calculé par informatique (figure 1.12) avec, comme hypothèse de départ, la cote du projet à atteindre (un point de sonde = couple (distance, angle)) pratiquement mesure (t, θ) et exploitation (y, z) . Deux approches sont utilisées pour estimer (t, θ) : une mesure de l'instant d'arrivée à angle fixe et une mesure de l'angle en fonction du temps d'arrivée. À l'aide des nouvelles technologies de sondeurs, cette technique peut-être utilisable dans une hauteur d'eau restreinte. Cette technique s'applique à partir de Sondeurs mono ou multi-faisceau. [9]

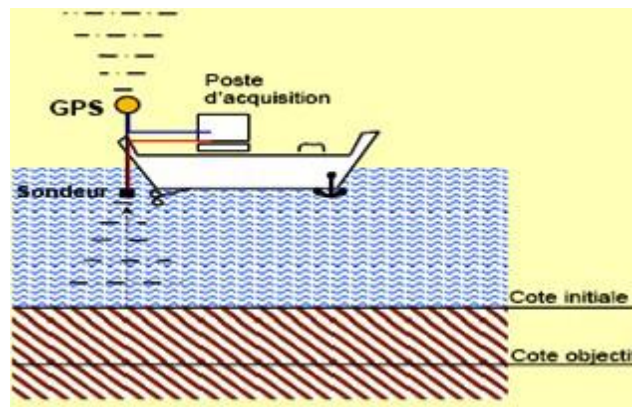


Figure 1.11 : Estimation de l'envasement par Echosondeur

1.4.3. Problèmes posés par L'envasement

Parmi les problèmes posés par l'envasement des retenues de barrage, on peut retenir quatre inconvénients majeurs qui sont : la réduction de la capacité de la retenue, l'obturation des organes de vidange, la sécurité de l'ouvrage, l'envasement des canaux d'irrigation, et la dégradation de la qualité d'eau.

1.4.3.1. Réduction de la capacité de la retenue

La réduction de la capacité de stockage de l'eau est sans aucun doute la conséquence la plus dramatique de l'envasement, chaque année le fond vaseux s'écoule et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue.

1.4.3.2. Obturation des ouvrages de vidange

Un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement des organes de vidange de fond. 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. Dans les régions arides, la gestion des vannes d'un barrage est complexe. L'ouverture des vannes en période de crues devient indispensable pour prolonger la durée de vie de l'ouvrage et éviter le disfonctionnement (figure 1.13). Le gestionnaire du barrage est forcé par les pouvoirs publics de maintenir les vannes fermées pour éviter les inondations des villages situées à l'aval.

En Algérie, les barrages les plus concernés par ce type de problème sont essentiellement :

- Le barrage de OUED EL FODDA (Cheliff) ; la vanne de fond a été bloquée depuis 1949 et se trouve maintenant sous plus de 40 m de vase.
- Le barrage FOUM EL GHERZA (Biskra), la vanne de fond a été bloquée de 1982 à 1989.



Figure 1.12: Blocage de la vanne de fond

1.4.3.3. Sécurité de l'ouvrage

La sédimentation des retenues a un impact sur la sécurité des barrages, par la mise en danger de la stabilité de l'ouvrage du fait de l'augmentation de la force hydrostatique produite par le remplacement accéléré du volume d'eau par la vase. Ceci se traduit par l'accroissement de la masse spécifique qui peut atteindre 1,8 t/m³. Ce cas a été signalé aux barrages des Zardézas, et K'sob. Nous pouvons dire que si le taux de comblement d'une retenue dépasse

50% de la capacité initiale et la vase est en contact de l'ouvrage, dans ce cas, il faut prendre au sérieux la stabilité du barrage. C'est le cas des barrages d'Oued El Fodda, et de Fom El Gherza. [11]

1.4.3.4. Envasement des canaux d'irrigation

Le dépôt des sédiments dans une retenue de barrage destinée à l'irrigation, pose le problème de comblement du réseau des canaux d'irrigation se trouvant à l'aval du barrage particulièrement, dans les pays arides et semi- aride ; c'est ainsi que ces particules fixés vont se déposer dans les canaux réduisant leurs sections mouillées et bien sur le débit d'eau véhiculé ; le curage et le nettoyage des canaux deviennent une opération quotidienne.

1.4.3.5. Dégradation de la qualité d'eau

Les sédiments véhiculent des produits chimiques (nitrates, sulfates..) provenant en particulier des apports en éléments fertilisants pour les cultures, et se déposent dans les réservoirs, en entraînant ainsi la dégradation de la qualité de l'eau, en favorisant l'eutrophisation de ces réservoirs.



Figure 1.13 : Couleur verte de l'eau

1.4.4. Moyens de lutte contre le phénomène d'envasement

1.4.4.1. Travaux d'aménagements

Ces travaux concernent essentiellement les aménagements effectués au niveau du bassin versant et également aux niveaux des oueds tels que : le reboisement, la restauration des sols, la formation des banquettes et plantation de la végétation à longues tiges dans les oueds... etc.

Il est à noter que les tamaris qui ont poussé à l'amont des barrages Bouhanifia, du Fergoug, de Cheurfas constituent de véritables pièges à sédiments. [10]

1.4.4.2. Réalisation des barrages de décantation

La meilleure façon d'éviter l'envasement, c'est d'empêcher la vase d'arriver jusqu'au barrage. Cela peut se faire par la création de retenues pour la décantation des apports solides, ce qui revient à construire un autre barrage en amont du barrage principal. En Algérie par exemple, nous citons le cas du barrage de Boughezoul qui est a été exploité partiellement comme un bassin de décantation du barrage Ghrib. Ce barrage a permis de retenir depuis sa création environ 35 millions de m³ de vase. Il réduit l'envasement de Ghrib de 24%.

1.4.4.3. Surélévation des barrages

La surélévation des barrages permet d'augmenter la capacité de la retenue et donc de compenser la valeur envasée. Cette technique a été réalisée sur 5 barrages : Fergoug, Meferouche, Bakheda, K'soub et Zardézas. [10]

1.4.4.4. Chasse dites à l'espagnol

C'est une méthode qui est utilisée pendant les premières crues pour les barrages de moindre importance (tel que le barrage de Hamiz, Beni amrane, et K'sob). Elle consiste à vider complètement le barrage au début de l'automne et le laisser toutes les vannes ouvertes, jusqu'aux premières pluies. La première crue enlèvera sans difficulté les vases de l'année, non encore consolidée.

1.4.4.5. Soutirage par courants de densité

C'est une méthode pratique qui consiste à évacuer les sédiments drainés par les courants de densité sur le fond de la retenue en utilisant des pertuis de vidange (vannettes de dévasement ou vanne de fond) du barrage. En Algérie, cette technique peut être un moyen efficace de lutte contre l'envasement des barrages tenant compte du faible coût [12].

Par exemple pour le barrage d'Ighil Emda, près de 50% de vase ont été soutirés grâce à ce système, à savoir sur 88773564 m³ d'apports solide jusqu' à l'année 1984. Seulement 45657458 m³ ont réussi à se décanter et se consolider, alors que 43116106 m³ ont été soutirés. Cependant, environ 12 millions de m³ de vase ont été évacué au niveau du barrage de Oued Fodda (de 1961 jusqu'à 1993) [10].

1.4.4.6. Dragage du barrage

Le dragage est une technique de dévasement sûre, mais selon certains auteurs, la récupération d'une capacité de stockage par dragage est une opération très coûteuse qui n'est pas économique pour les grandes retenues. Dans certains pays, cette opération s'impose,

surtout lorsqu'il existe peu de sites favorables à la réalisation de nouveaux barrages, comme en Algérie par exemple. Lorsque la stabilité de l'ouvrage est menacée, ou tout simplement lorsque le barrage présente un intérêt économique, le dévasement devient obligatoire.

On effectue le dragage dans une retenue dans des situations différentes. En voici quelques exemples :

1. Le dragage permet de récupérer la capacité des petites retenues, des bassins de rétention de graviers ; ou alors de récupérer partiellement la capacité des retenues moyennes.
2. Le dragage est également employé soit pour extraire les sédiments des retenues d'une chaîne d'usines hydro-électriques, soit pour abaisser la cote de la crue de la rivière, soit pour maintenir la profondeur nécessaire à la navigation sur la longueur du remous du barrage [10].

L'Algérie a procédé à un dragage sur 4 barrages : le barrage de Cheurfas (10 millions de m³), le barrage de Sig (2 millions de m³), le barrage de Fergoug (7 millions de m³) et le barrage Hamiz (8 millions de m³) [9] [13].

1.5. CONCLUSION

L'envasement des retenues est la conséquence la plus dramatique des phénomènes de l'érosion. La recherche d'une solution nécessite la prise en compte du problème dans son ensemble c'est-à-dire l'étude des causes du comblement et du comportement des sédiments à l'extérieur de la retenue ainsi que dans la cuvette.

CHAPITRE 2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1. INTRODUCTION

Notre zone d'étude fait partie du bassin hydrographique haut et moyen Cheliff .Elle est drainée principalement par l'oued Ardjem.

Dans ce chapitre, nous présentons les caractéristiques principales du bassin, à savoir : les caractéristiques physiographiques (géométriques, de forme) les caractéristiques du réseau hydrographique ainsi que les caractéristiques du climat de la région.

2.2. SITAUTION GEOGRAPHIQUE

Le bassin du Cheliff qui s'étend sur 43750 km², est le plus vaste bassin hydrographique du nord du pays, il est compartimenté naturellement en trois bassins versants :

- le bassin du Cheliff-amont du barrage de Boughzoul ;
- **le bassin du haut et du moyen Cheliff**
- le bassin du bas Cheliff et de la Mina.

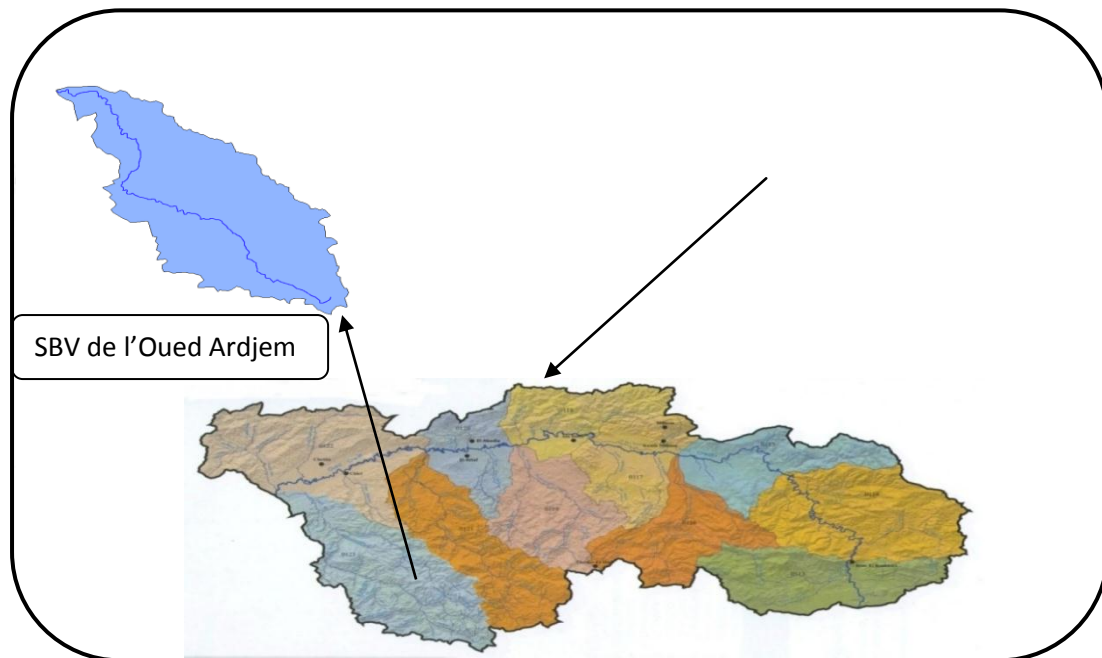


Figure 2.1 : Situation du sous bassin Sidi Yacoub

Le sous bassin versant de l'Oued Ardjem fait partie du bassin versant du haut et moyen Cheliff qui est située dans le Nord-Ouest d'Algérie. Il a une superficie de 1391 km² et un périmètre de 213.49 km et s'étend d'Ouest en Est entre les longitudes °15'et 1°18' et du Nord au Sud entre les latitudes 35°58' et 35°36'.

Notre bassin est drainé par l'oued Arjem qui a une longueur de 92.213 km. Son altitude varie entre 67,6 et 1640,9 mètres. Il est considéré parmi les plus grands affluents du cheliff. Il est alimenté à son tour par une série d'affluents dont les plus importants sont : Oued-Arjem, Oued-Melah, Oued -Lag, et oued-Djouza. Sur le plan administratif le sous bassin de Sidi Yacoub s'étend sur 17 communes appartenant à quatre wilayas : Tissemsilt, Relizane, Cheliff et Tiaret.

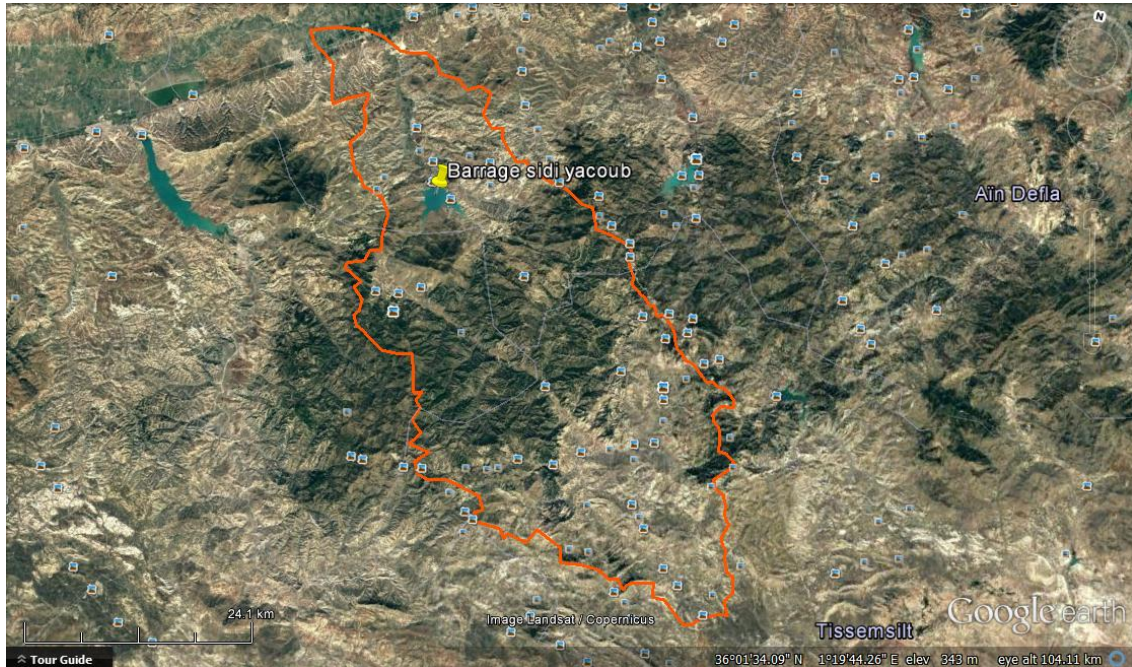


Figure 2.2 : Image satellitaire du sous bassin de L'Oued Ardjem

2.3. LE RELIEF

Le sous bassin de Sidi Yacoub est caractérisé généralement, par un relief accidenté. Il comporte deux grandes unités de paysages, soit une région montagneuse au sud et une région relativement plane au nord. On retrouve des montagnes qui dépassent les 1000 m et elles peuvent atteindre jusqu'à 1640.9 m d'altitude avec des fortes pentes qui accélère le processus érosif. Du nord jusqu'au centre du bassin versant c'est des vallées.

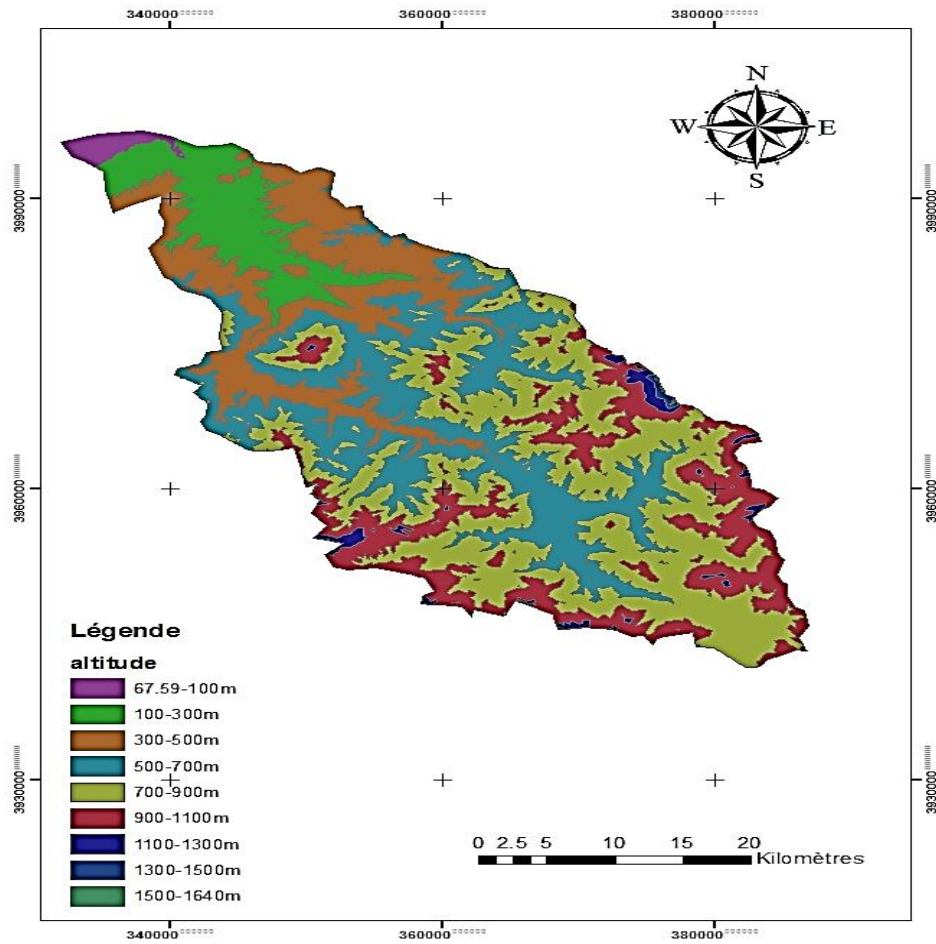


Figure 2.3 : Carte altimétrique du sous bassin de l'Oued Ardjem

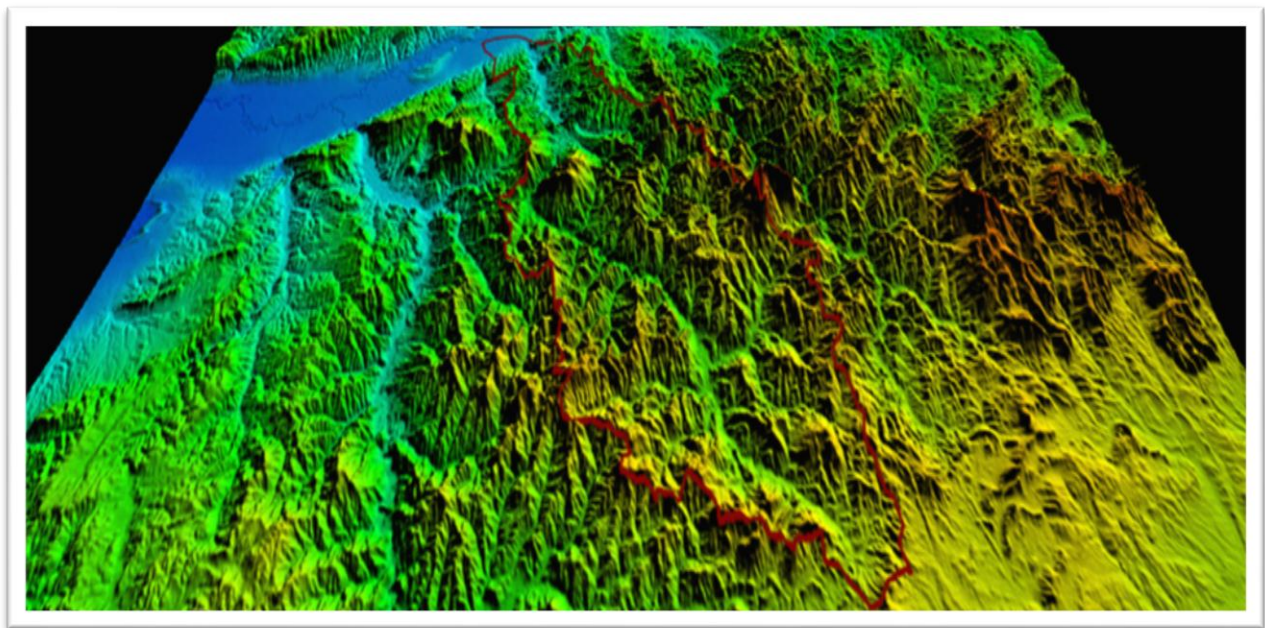


Figure 2.4 : Model numérique de terrain en 3D du SBV de l'oued Ardjem

2.4. CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN VERSANT

Les caractéristiques morphométriques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Il est donc intéressant de quantifier ces paramètres par des termes simples qui permettront la schématisation du bassin versant.

2.4.1. Caractéristiques géométriques

2.4.1.1. Surface et périmètre du sous bassin Sidi Yacoub

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations, il est donc tout à fait logique que ce paramètre soit le premier à rechercher. Il permet de contrôler l'intensité de plusieurs phénomènes hydrologiques (apport, volume de précipitations ou infiltration). Il est déterminé par planimétrie sur carte topographiques. Il s'exprime généralement en Km². Le périmètre représente la longueur du pourtour fermé du bassin, il est mesuré à l'aide d'un curvimètre. Son intérêt essentiel est de pouvoir déterminer l'indice de Gravélius (Kc) et le rectangle équivalent.

Les caractéristiques géométriques du sous bassin de Sidi Yacoub ont été calculées avec le logiciel « ArcGis ». Les résultats sont rapportés sur le tableau 2.1

Sous bassin	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)
Sidi Yacoub	1391	213.49

Tableau 2.1 : Répartition altimétrique du sous bassin de l'Oued l'Ardjem

2.4.2. Caractéristiques de forme

Il existe plusieurs caractéristiques de forme, les plus utilisés sont:

- le coefficient de compacité de Gravélius ;
- la courbe hypsométrique (topographie) ;
- le rectangle équivalent ;

2.4.2.1. Coefficient de Gravélius K_c (1914)

La réponse d'un bassin versant à une averse dépend de sa forme. Gravélius a défini alors l'indice de compacité (qui porte d'ailleurs son nom) comme étant le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant même surface. Cet indice permet de comparer les bassins entre eux. Il est donné par la formule suivante :

$$K_c = \frac{P}{2 \cdot P \cdot \pi} = \frac{P}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\frac{S}{\pi}}} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{P}{\sqrt{S}} = 0.282 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (2.1)$$

avec :

K_c : indice de compacité de Gravélius ;

A : surface de bassin versant [Km^2] ;

P : périmètre de bassin versant [Km].

p : rayon du cercle ayant même surface [km].

Le coefficient K_c est supérieure à 1 et d'autant plus voisin que cette valeur que le bassin est compact.

Si : $K_c > 1.12$ alors le BV est allongé

Si : $K_c < 1.12$ alors le BV est de forme carrée

Si : $K_c = 1.12$ alors le BV est de forme compacte

Pour notre bassin, l'indice de compacité $K_c = 1.612 > 1.12$ d'où le bassin a une forme allongée favorisant alors un écoulement lent des eaux de ruissellement.

2.4.2.2. Courbe hypsométrique

La plupart des phénomènes hydrologiques et climatologiques sont directement liés à l'altitude. Il est donc important de connaître la répartition des altitudes dans le bassin. On utilise pour cela la représentation de la courbe hypsométrique. Cette courbe exprime le pourcentage de superficie du bassin en fonction de son altitude. Le tableau (2.2) ci-dessous, représente la répartition altimétrique du sous bassin de l'Oued Ardjem. Ces valeurs ont été obtenues à partir du model numérique du terrain du SBV. En utilisant le logiciel Arc-Gis. Après génération des courbes de niveau, nous avons extrait les surfaces entre ces dernières. La courbe hypsométrique a été réalisée avec le logiciel Excel après avoir calculé les surfaces cumulées.

Tableau 2.2 : Répartition altimétrique du sous bassin de l'Oued Ardjem

Altitudes (m)	Surfaces (km ²)	Surfaces (%)	Surfaces cumulées (km ²)	Surfaces cumulées (%)	Altitudes (m)	A _i *H _i
67,59-100	15,18	1,09	1391.13	100.01	67,59	1026.0162
100-300	127,20	9,14	1375.95	98.92	100	12720
300-500	220,39	15,84	1248.75	89.77	300	66117
500-700	328,97	23,65	1028.36	73.93	500	164485
700-900	459,24	33,02	699.39	50.28	700	321468
900-1100	219,26	15,76	240.15	17.26	900	197334
1100-1300	18,52	1,33	20.89	1.5	1100	20372
1300-1500	2,04	0,15	2.37	0.17	1300	2652
1500-1640	0,33	0,02	0,33	0,02	1500	495
Somme	1391.13	100	/	/	/	786669.016

La courbe hypsométrique est la représentation graphique des couples (superficie cumulée en %, altitude), elle est représentée sur la figure ci-après:

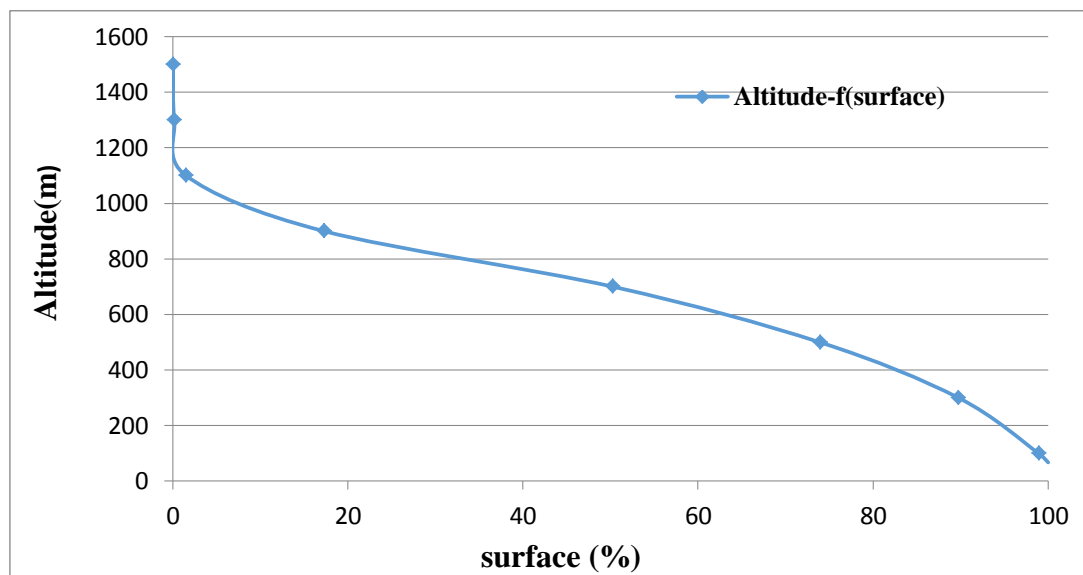


Figure 2.5 : Courbe hypsométrique

A. Les Altitudes caractéristiques

Certaines altitudes sont calculées pour caractériser un bassin versant. Elles donnent des indications supplémentaires sur le potentiel érosif du bassin. Ces altitudes sont :

- **Altitude Maximale, Altitude Minimale**

L'altitude maximale, H_{\max} , représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale, H_{\min} , considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Pour notre bassin nous avons : $H_{\max} = 1640.9$ m

$$H_{\min} = 67.6 \text{ m}$$

- **Altitude moyenne**

L'altitude moyenne est l'altitude qui correspond à la moyenne de la courbe hypsométrique.

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{A_i \cdot H_i}{A} \quad (2.2)$$

où:

H_{moy} : moyenne du sous bassin [m] ;

A_i : surface comprise entre deux courbes de niveau [Km^2] ;

H_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

A : superficie totale du sous bassin versant [Km^2]

Pour notre sous bassin, l'altitude moyenne calculée est de : $H_{\text{moy}} = 565.54$ m

- **Altitude Médiane**

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du sous bassin sur la courbe hypsométrique : $H_{\text{méd}} = 698$ m

2.4.2.3. Rectangle équivalent

Un autre paramètre permet de comparer les bassins versant entre eux, c'est le rectangle équivalent. C'est une transformation purement géométrique où la forme du bassin est rendue comme étant celle d'un rectangle ayant le même périmètre et la même superficie que le bassin versant (ou le même coefficient de compacité). De cette façon, les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle (longueur et largeur).

Les caractéristiques (Longueur L et largeur l) du rectangle équivalent sont évaluées à l'aide de l'équation suivante:

$$L, l = \frac{K_c \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (2.3)$$

Avec:

A : surface de bassin versant [Km^2] ou $A = L * l$

K_c : indice de compacité ;

L : La longueur du rectangle équivalent [Km] et l : la largeur du rectangle [Km]

En appliquant l'équation (2.3) ci-dessus, on obtient :

$$L = 92,291 \text{ km} \quad ; \quad l = 15,073 \text{ km}$$

L'écartement entre deux courbes de niveau consécutives se calcule selon l'expression :

$$d_i = \frac{L \cdot A_i}{100} \quad (2.3)$$

Pour tracer le rectangle équivalent de notre région d'étude, nous avons utilisé les pourcentages des différentes surfaces calculés précédemment, correspondantes aux écartements entre les courbes de niveau. Les valeurs obtenues sont illustrés dans le tableau (2.3) ci-dessous :

Tableau 2.3 : Pourcentage des surfaces et écartements entre les courbes de niveau

A_i (%)	d_i (Km)
1,09	1,005
9,15	8,444
15,84	14,618
23,65	21,826
33,02	30,474
15,76	14,545
1,33	1,227
0,15	0,138
0,02	0,018

En utilisant les résultats présentés sur le tableau ci-dessus, on trace sur Excel le rectangle équivalent suivant :

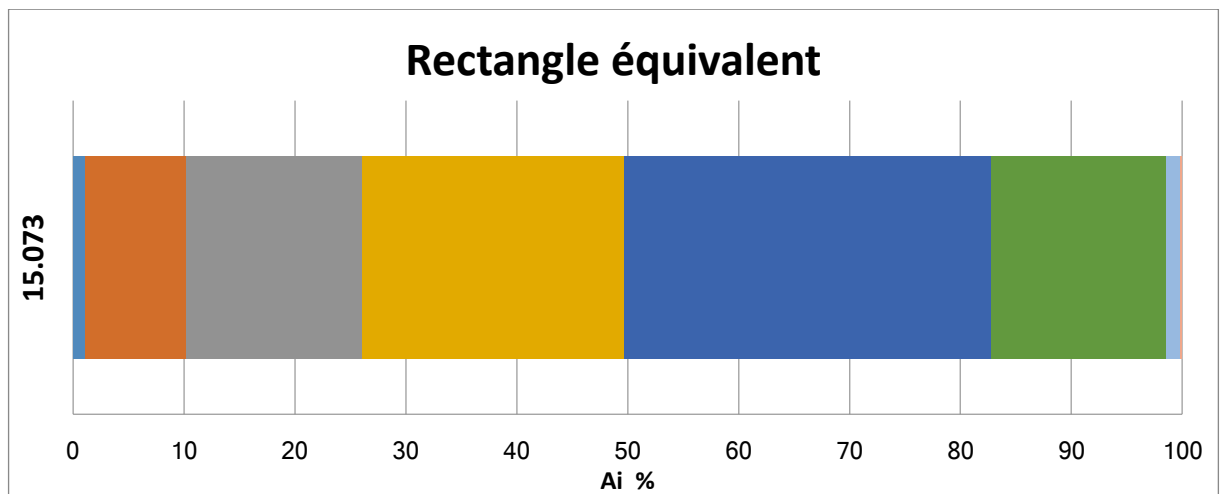


Figure 2.6 : Rectangle équivalent du sous bassin de l'Oued Ardjem

2.4.3. Les indices des pentes

Le relief d'un bassin est caractérisé par des indices qui ont été définis pour rendre compte de l'influence de la pente sur le régime hydrologique. Les principaux indices utilisés sont :

2.4.3.1. Indice de pente de roche

Il est donné par M. Roche (1963) .Il s'exprime par la relation suivante :

$$I_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{A_i * D_i}}{L^{1/2}} \quad (2.4)$$

où :

L : longueur de rectangle équivalent ;

D_i : représente la fraction en pourcentage % de la surface A comprise entre deux courbe de niveau voisines distantes de « d_i » ;

Pour notre bassin : $I_p = 10,0007$ %.

2.4.3.2. Indice de pente globale

Sert à caractériser la pente d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications. Il est déterminé à partir de la connaissance de la répartition hypsométrique du bassin. Il s'exprime par la relation suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H(5\%) - H(95\%)}{L} \quad (2.5)$$

avec :

D : la dénivelée $h(5\%) - H(95\%)$, définie sure la courbe hypsométrique ;

L : la longueur de rectangle équivalent.

Cet indice, nous permet de déduire la nature du relief, Il sert de base à une classification de l'O.R.S.T.O.M (l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer)

Tableau 2.4 : Variation de l'indice de pente globale selon O.R.S.T.O.M

R1	Relief trèsfaible	$I_g < 0.002$
R2	Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
R3	Relief assezfaible	$0.005 < I_g < 0.01$
R4	Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
R5	Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
R6	Relief fort	$0.05 < I_g < 0.1$
R7	Relief très fort	$I_g > 0.1$

Pour notre bassin : $I_g = 9.209$ %. D'après la classification d'O.R.S.T.O.M. on peut déduire que notre relief est fort.

2.4.3.3. Indice de pente moyenne

La pente moyenne d'un bassin est le rapport entre la différence d'élévation maximale, mesurée entre le point le plus haut de la limite du bassin et l'exutoire de la rivière principale, et la moitié du périmètre du bassin. Elle est donnée par la formule suivante :

$$I_{\text{moy}} = \frac{2 \cdot (H_{\text{max}} - H_{\text{min}})}{p} \quad (2.6)$$

Avec:

I : indice de pente moyenne (m/Km ou en%) ;

H_{max} : l'élévation de l'altitude le plus haut du bassin (m) ;

H_{min} : l'élévation de l'altitude à l'exutoire du bassin (m) ;

P : périmètre du bassin (Km)

Pour notre bassin $I_{\text{moy}} = 14,74 \%$

2.4.3.4. Dénivelée spécifique

Le dénivelé spécifique sert à classer les bassins en fonction de leurs reliefs. Cette dénivelée est donnée par la relation suivante :

$$D_s = I_g * \sqrt{A} = \frac{D}{L} \sqrt{L * l} = D \sqrt{\frac{l}{L}} \quad (2.7)$$

où :

D_s : dénivelée spécifique (m),

I : pente globale ;

A : superficie du bassin versant (Km) ;

D : dénivelée h (5%)-h (95%) ;

L : longueur du rectangle équivalent (Km) ;

l : largeur du rectangle équivalent (Km).

Cette dénivelée donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M., indépendante des surfaces des bassins (Tableau 2.5) :

Tableau 2.5 : variation de la dénivelée spécifique selon l'O.R.S.T.O.M.

R1	Relief trèsfaible	$D_s > 10m$
R2	Relief faible	$10m < D_s < 25$
R3	Relief assezfaible	$25m < D_s < 50m$
R4	Relief modéré	$50m < D_s < 100m$
R5	Relief assez fort	$100m < D_s < 250m$
R6	Relief fort	$250m < D_s < 500m$
R7	Relief très fort	$500m < D_s$

La dénivelée calculée pour notre sous bassin est de 343.46 m qui correspond à un relief fort selon la classification d'ORSTOM

Pour conclure, nous avons résumé sur le tableau (2.6) les caractéristiques morphométriques de notre sous bassin:

Tableau 2.6 : Caractéristiques morphométriques du sous bassin de l'Oued Ardjem

Superficie A (Km²)	1391
Périmètre P (Km)	213.49
Indice de compacité Kc	1,612
Altitude Maximale H_{max} (m)	1640,9
Altitude minimale H_{min} (m)	67,59
Altitude moyenne H_{moy} (m)	565,54
Altitude médiane H_{méd} (m)	698
Longueur de rectangle équivalent L (Km)	92,291
Largeur de rectangle équivalent l (Km)	15,073
Pente de roche I_p (%)	10 ,007
Pente globale I_g (%)	9.209
Pente moyenne I_{moy} (%)	14,74
Dénivelée spécifique D_s (%)	343.46

2.5. CARACTERISTIQUES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

La forme ainsi que la densité du réseau hydrographique permettent de tirer des conclusions importantes quant au ruissellement et à l'infiltration des eaux. Toutes les eaux issues des principaux affluents sont collectées en direction du centre de la plaine du Cheliff vers l'oued principal ; ce dernier draine toutes les eaux du bassin versant du Cheliff vers l'exutoire. L'étude du chevelu hydrographique serve surtout à comparer des bassins entre eux. Il suffit, dans la plupart des cas, de se fixer une définition du thalweg élémentaire et de l'appliquer pour l'étude de tous les bassins.

Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. La figure (2.6) ci-après, représente le réseau hydrographique de notre zone d'étude. L'oued principal est caractérisé par une longueur de 92.213 Km.

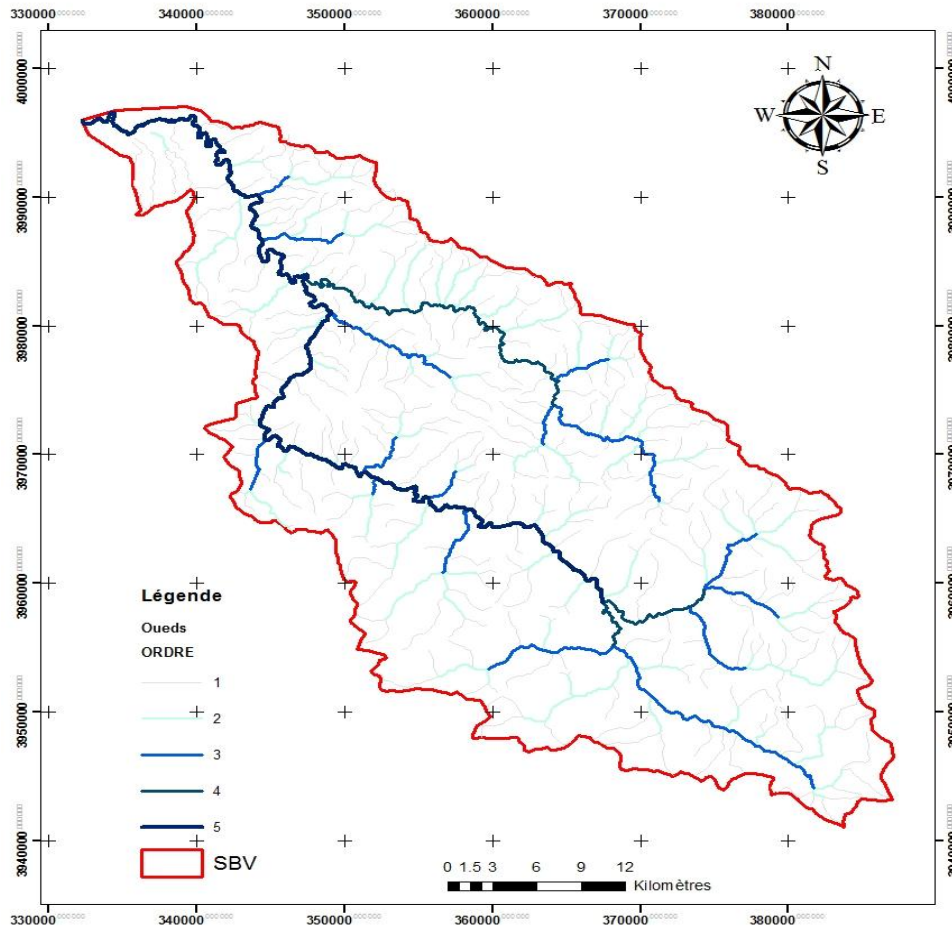


Figure 2.7 : Réseau hydrographique du sous bassin de l'Oued Ardjem

2.5.1. Densité de drainage

La densité de drainage D_d , qui s'exprime en km/km^2 , est définie pour un bassin donnée de superficie A , comme la longueur totale des cours d'eau de tous ordre sur la surface drainée ; elle est donnée par la relation suivante :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A} \quad (2.8)$$

avec:

D_d : densité de drainage (Km/Km^2);

L_i : somme des longueurs de tous les thalwegs y compris le thalweg principal ;

A : superficie du bassin versant.

Pour notre bassin: $D_d = 0.891 \text{ Km}/\text{Km}^2$.

2.5.2. Coefficient de torrentialité

C'est un coefficient qui tient compte à la fois du nombre de thalweg élémentaires d'ordre 1 et la densité de drainage, il donné par :

$$C_t = D_d * F_1 \quad (2.9)$$

Avec :

C_t : coefficient de torrentialité

D_d : densité de drainage

F_1 : densité des talwegs élémentaires donnée par :

$$F_1 = \frac{N1}{A} \quad (2.10)$$

où:

N_1 : le nombre de cours d'eau d'ordre << 1 >>

A : la superficie du bassin versant (Km^2)

Dans notre cas, le nombre de cours d'ordre 1 (N_1) est de 317. On obtient alors : $C_t=0,20$

2.5.3. Le Temps de concentration

Le temps de concentration des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier. Il est donné par la formule de GIANDOTTI :

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}} \quad (2.11)$$

où :

A : la superficie de bassin versant ;

L : longueur de talweg principal=92.213 Km

H : $H_{moy} - H_{min}$;

Le temps de concentration obtenu est : $T_c=16,10$ h.

2.6. GEOLOGIE DU SITE

Le bassin versant du barrage de Sidi Yacoub est situé au nord-ouest de l'Algérie dans le domaine de l'atlas tellien. L'ensemble du bassin présente un relief en générale accidenté. L'oued Ardjem constitue le cours d'eau principale du bassin versant dont la partie supérieure est formée par les reliefs montagneux de l'Ouarsenis et se déverse dans l'oued Chélif qui est le plus long cours d'eau. Il bénéficie d'un régime hydrologique favorable.

Les roches présentes dans le bassin versant sont d'origines sédimentaires, d'âge compris entre le Trias et le Miocène. Les dépôts quaternaires sont localisés le long des oueds ou dans les plaines alluviales. Les dépôts sont généralement caillouteux. Les alluvions récentes sont décrites comme limoneuses [14].

Les formations répertoriées sont les calcaires marneux (44%) formation marno-calcaire (17%), Les marnes (16%), Les grés calcaire ou marneux (9%), le flysch et molasse (8%), Les formations marno-gréseuses (3%), les évaporites (2%) les calcaires (-1%) ainsi que les dépôts meubles à texture moyenne [14].

2.7. CLIMAT DE LA REGION D'ETUDE

Les conditions climatiques du bassin s'expliquent par sa situation géographique, le caractère de circulation atmosphérique, et par le relief de son territoire. La caractérisation du climat est établie en fonction des observations fournies par le réseau des mesures pluviométriques, hydrométriques et climatologiques installé au sein du bassin. Le bassin versant d'oued Ardjem situé dans la zone de l'Atlas Tellien est caractérisé par un climat méditerranéen en général avec une saison froide et pluvieuse en hiver et une saison chaude et sèche et ensoleillée en été.

2.7.1. Pluviométrie de la zone d'étude

L'exploitation des données climatiques enregistrées dans les stations de mesures permettront de caractériser les conditions climatiques de la zone d'étude. Des relevés climatiques sur différentes périodes d'observations sont enregistrés au niveau des stations du tableau (2.7). Il s'agit des données de l'Agence nationale des ressources hydriques (ANRH) pour l'année 2011.

Tableau 2.7 : Les données pluviométriques moyennes interannuelles de l'ANRH 2011

Code de station	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Moyenne interannuelle (mm)
012308	0,4	26,7	89	23	26	88	27,4	150	10,4	0	1	0	442,2
012309	0	24,8	94,7	12,6	19	99	45,2	78	5	0	0	0	377,1
012318	8	27,8	115	14,5	21	87	31,5	135	11	0	0	0	450,3

Le bassin est distingué par une saison pluvieuse qui s'étale du mois d'octobre jusqu'au mois de Mai et par une saison sèche qui s'étend du mois de juin au mois de septembre et se caractérise par des précipitations plus au moins faibles. Le maximum de précipitation est observé durant le mois d'avril, le minimum est observé au mois de juillet.

2.7.2. Température

Pour étudier la température de notre zone d'étude nous avons obtenus des données des températures moyennes, maximales et minimales (Tableau 2.8) arrangées selon l'année hydrologique. Il s'agit des données de l'ANRH pour l'année 2012.

Tableau 2.8 : Températures moyennes mensuelles (en C°) de l'année 2012

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	mai	Jui	Juil	Aout	sept	Oct	Nouv	Déc
T_{moy} (°C)	9,6	7,5	11,8	17,6	15,9	30	28	34,2	25	21,7	18,2	9,5
T_{max} (°C)	17,2	16,9	22	23,5	25,3	41	33,3	46,7	31	30,9	22,1	12,7
T_{min} (°C)	4,4	1,3	4,7	13,3	8,3	23	24,2	25,8	20	15,4	14,3	8

Le graphe suivant présente la variation mensuelle des températures : moyennes, maximales et minimales :

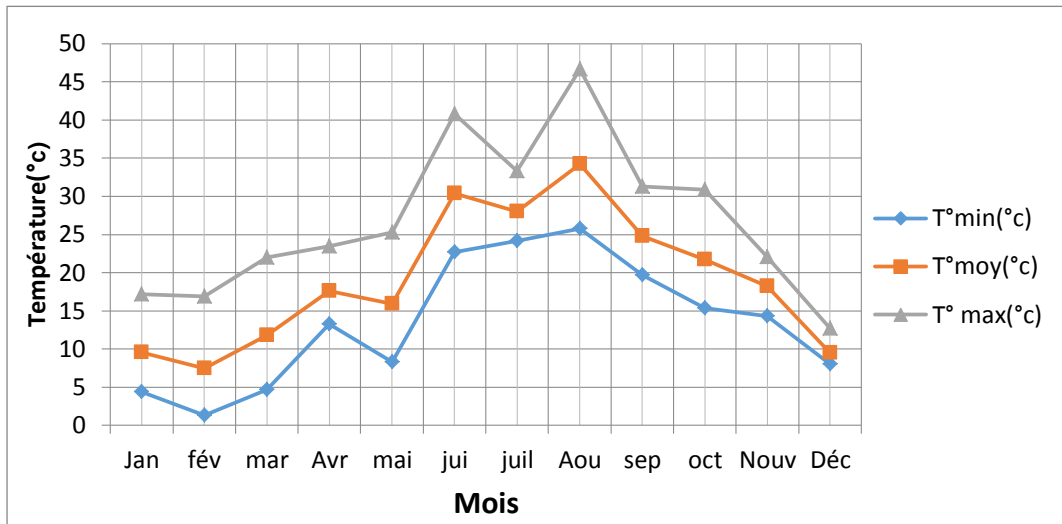


Figure 2.8 : Variations mensuelles des températures

L'analyse des résultats obtenus d'après le tableau 2.8 et la figure 2.8, montre que la température au sein du bassin commence à baisser à partir du mois de septembre pour atteindre la température la plus faible en février puis remonte pour atteindre la température la plus élevée au mois d'Aout.

Le régime thermique de la région est caractérisé alors, par des températures élevées en été et relativement basses en hiver. Les températures les plus élevées sont enregistrées durant les mois de juillet et août, alors que les plus basses se manifestent au mois de janvier et février.

A partir du tableau 2.8, nous constatons que la température moyenne maximale atteinte est de 34.2 °C. Ces pics sont mesurés pendant le mois d'Août, alors que la température moyenne minimale atteinte pendant le mois de février est de 7.5°C.

2.8. CONCLUSION

Le sous bassin d'oued Ardjem est caractérisé par une superficie de **1391 Km²**, avec une forme allongée et un indice de compacité égale à **1.612**, favorisant ainsi un écoulement lent des eaux des ruissellements. Du point de vue altimétrie, le bassin est caractérisé par des altitudes variant de **67.6 m à 1640.9 m** et des pentes favorables à l'écoulement par endroit.

Le régime thermique de la région est caractérisé alors, par des températures élevées en été et relativement basses en hiver. Les températures les plus élevées sont enregistrées durant les mois de juillet et août, alors que les plus basses se manifestent au mois de janvier et février.

Le régime hydrologique de L'oued Ardjem est caractérisé par deux saisons bien distinctes : la période pluvieuse qui s'étend d'Octobre à Mai par une saison sèche qui s'étend du mois de juin au mois de septembre.

CHAPITRE 3. TRANSPORT SOLIDE ET ENVASEMENT DU BARRAGE DE SIDI YACOUB

3.1. INTRODUCTION

En Algérie, le taux du transport solide dans les cours d'eau est très élevé. Cependant, il est mal quantifié dans certains oueds en raison du manque de données et de l'absence des mesures au niveau des stations hydrométriques.

L'objectif de ce chapitre consiste en premier lieu, à déterminer d'abord, la quantité des apports liquides et des apports solides transportés vers la retenue du barrage de Sidi Yacoub et déduire par la suite, une relation représentative du débit solide en fonction du débit liquide. En second lieu, une étude de l'état d'envasement du barrage a été mise en évidence en se basant sur les données des dernières levées bathymétriques, obtenues au niveau de l'agence nationale des barrages et de transfert (ANBT).

3.2. PRESENTATION DU BARRAGE

Le barrage de Sidi Yacoub est situé dans la wilaya de Chleff, à 28 km environ au sud de la ville. Il est implanté dans les gorges de l'oued Ardjem qui est l'un des principaux affluents de la rive gauche de l'oued Cheliff. Il est mis en service en 1986 avec une capacité initiale de 280 Hm³. Sa capacité totale est actuellement de 226.225 hm³.

Ce barrage est destiné principalement :

- au stockage de l'eau d'irrigation pour le bas et moyen Cheliff,
- à l'alimentation en eau potable de la wilaya du Chleff.



Figure 3.1 : Image de la retenue du barrage de Sidi Yacoub

Les caractéristiques du barrage sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Caractéristiques du barrage Sidi Yacoub

Date de mise en service	1986
Superficie du bassin versant	1391Km ²
Apport moyen interannuel du bassin versant	113 Hm ³
Capacité initial du barrage	280 Hm ³
La capacité du dernier levé (2004)	252.15 Hm ³
Volume régularisé	98.00 Hm ³ /an
Apport réel du barrage	47,43 Hm ³ (période 1990 – 2001)
Taux d'envasement (2004)	11.28%
PHE	267.5 m
Niveau normal de la retenue	264 m

Le barrage de Sidi Yacoub est soumis à un envasement qui fait diminuer sa capacité initiale. Cet envasement rapide de la retenue provient essentiellement, de la nature des caractéristiques de son bassin versant formé des roches tendres, des pentes raides avec un couvert végétal mince et dégradé.



Figure 3.2 : Image satellitaire du barrage Sidi Yacoub.

L'image ci-dessus montre la forme allongée de la retenue dont les sillons sont dirigés vers la cuvette, ce qui explique l'augmentation de la quantité des sédiments transportés.

3.3. APPORTS LIQUIDES ET APPORTS SOLIDES

Toutes les recherches qui sont faites sur le transport solide mettent en cause la difficulté de mesure du débit solide charrié, bien qu'il constitue une part considérable du transport total. Les mesures de débits solides qui sont faites par l'ANBT ne présentent que des mesures en suspensions.

3.3.1. Variation annuelle des apports liquides

Pour les besoins de cette étude, nous avons procédé au dépouillement des données des séries chronologiques des débits solides et liquides des deux stations hydrométriques Ouled ben AEK. 1 et 2, contrôlant le sous bassin versant de l'oued Ardjem. Ces données concernent essentiellement :

- 589 enregistrements instantanés des débits liquides moyens journaliers et de 2975 enregistrements des débits solides et des concentrations des sédiments en suspension, couvrant une période de 19 ans (1985-2004) pour la station Ouled ben AEK 1.
- 248 enregistrements instantanés des débits liquides moyens journaliers durant une période de 8 ans (2004 -2012) et de 1135 enregistrements des débits solides et des concentrations des sédiments en suspension, couvrant une période de 6 ans (2006-2012) pour la station Ouled ben AEK 2.

Ces données sont obtenues au niveau de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH). Elles ont été fournies grâce à des jaugeages plus ou moins réguliers pendant les crues, à la lecture des échelles et au dépouillement des limnigraphes. Elles sont classées dans un fichier Excel contenant le numéro d'observation, La date, l'heure, la hauteur d'eau, la concentration, le débit liquide et le débit solide en suspension, qui représente le produit de la concentration par le débit liquide.

Le tableau (3.2) et la figure (3.3) montrent respectivement, la variation inter annuelle du débit liquide et son évolution irrégulière au niveau de la station Ouled ben AEK. 2:

Tableau 3.2 : Variation inter annuelle des débits liquides (2004-2012).

Années	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012
Débits liquides moyennes annuels m ³ /s	14.69	143.90	39.81	102.72	148.78	282.16	138.32	261.35

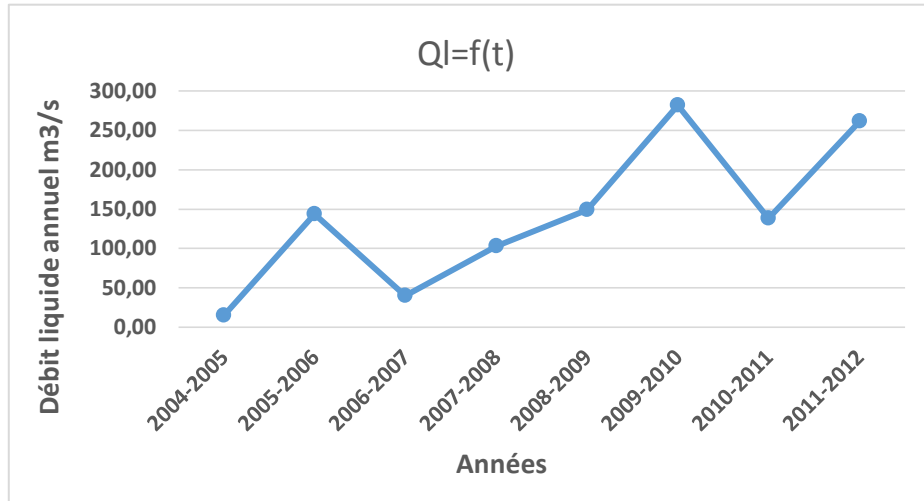


Figure 3.3 : Variation temporelle du débit liquide.

De la figure (3.3) ci-dessus, nous constatons une variation irrégulière des apports liquides annuels le débit maximal est observé durant l'année 2009-2010, il atteint $282.16 \text{ m}^3/\text{s}$, cette valeur peut être justifiée par le régime irrégulier des précipitations et également par d'autres facteurs qui favorisent l'écoulement superficiel (couverture végétale dégradée, formation lithologique peu perméable,..). L'année la plus sèche est observée durant la période 2004/2005 avec un débit de $14.69 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.3.2. Débits solides en suspension

La figure ci-dessous est établie en exploitant les séries des débits solides mesurées durant la période 2002 -2012 au niveau de la station hydrométrique Ouled ben AEK. 2 et obtenues au sein de l'Agence Nationale des ressources hydriques (ANRH).

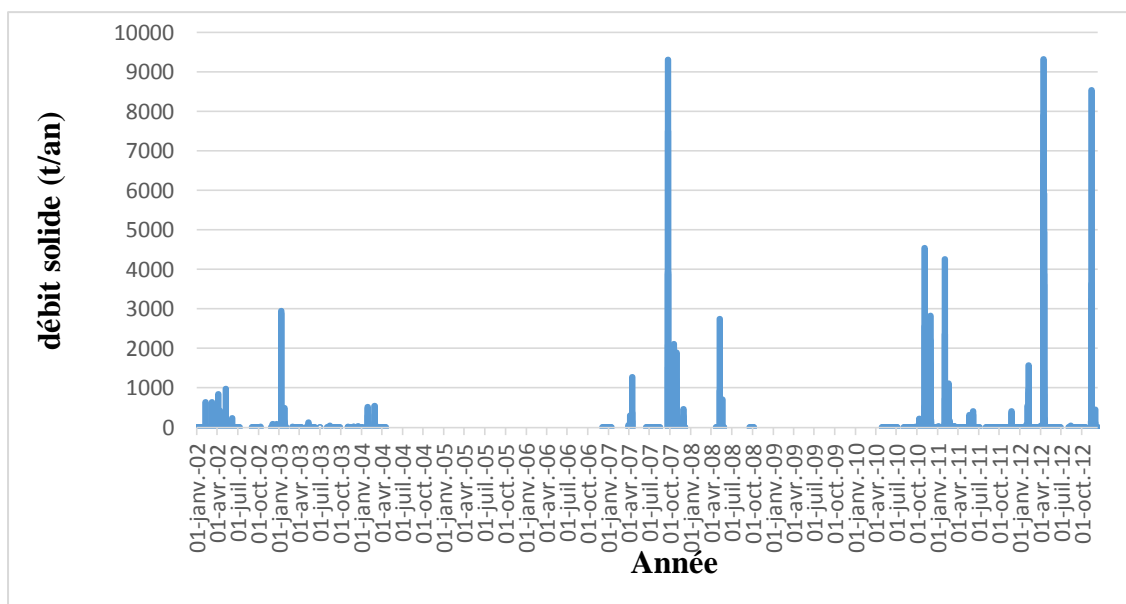


Figure 3.4 : Variation temporelle du débit solide

De la figure ci-dessus, on voit clairement la quantité importante des sédiments transportés vers la retenue du barrage Sidi Yacoub durant les années 2007 et 2012 où la valeur maximale atteinte est de 9323 tonnes observé pour Avril 2012.

L'irrégularité de la variation du débit solide peut être également constatée. Ceci peut être expliqué par l'absence des mesures pour quelques années telles que l'année 2005 et 2009.

3.3.3. Calcul des apports solides totaux

Le Tableau 3.3 ci-dessous, présente les apports liquides et solides obtenus au niveau de la station hydrométrique AEK.2 observés durant les années (2002-2012). Les valeurs des concentrations des matières en suspension sont utilisées pour calculer le débit solide en suspension. Le calcul du débit solide charrié est effectué comme suite :

$$\text{Apport solide en suspension} = \text{Concentration} * \text{débit liquide}$$

$$\text{Apport solide par charriage} = 20\% \text{ de l'apport solide en suspension}$$

$$\text{Apport solide total} = \text{apport solide en suspension} + \text{apport solide par charriage}$$

Tableau 3.3 : Apports solides annuels de la station Ouled ben AEK. 2

Année	$C_{\text{moy}}(\text{kg}/\text{m}^3)$	débit liquide $Q_l (\text{m}^3/\text{s})$	$Q_{\text{s moy}}$ suspension (t/an)	$Q_{\text{s moy}}$ charriage (t/an)	$Q_{\text{s total}}$ (t/an)
2002	7.054745098	1.536507529	19.86737647	3.97347529	23.84085176
2003	9.24508547	0.79801736	36.13829487	7.22765897	43.36595385
2004	10.00166667	0.408962861	33.14068269	6.62813654	39.76881923
2006	2.426666667	0.972022027	0.839962963	0.16799259	1.007955556
2007	18.42098039	0.713140917	262.923085	52.584617	315.507702
2008	15.82122807	0.259719621	76.08305	15.21661	91.29966
2010	5.584473684	1.891022474	78.61259649	15.7225193	94.33511579
2011	3.174131105	1.7933757	45.46211905	9.09242381	54.55454286
2012	5.255665094	3.355109955	250.5594715	50.1118943	300.6713658

3.4. Etablissement des régressions entre débits solides et débits liquides

3.4.1. Analyse des débits instantanés

Dans le but de l'homogénéisation des données, nous avons recherché des modèles régressifs entre deux paramètres de mesure le débit liquide et le débit solide. A cet effet les données sont mises en graphe et leur allure oriente le choix du modèle régressif.

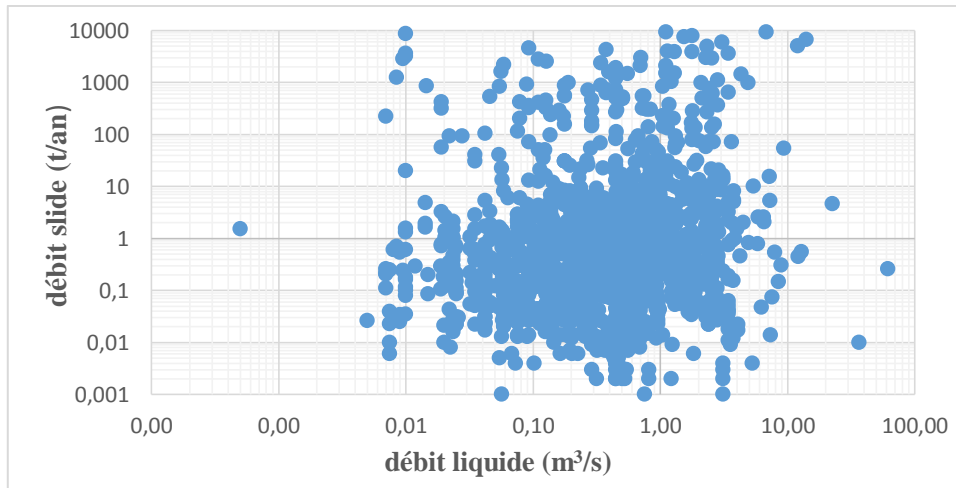


Figure 3.5 : Corrélation annuelle débit liquide-débit solide

La figure ci-dessus montre un nuage de point dense avec une variation importante de débit solide et liquide ce qui se traduit une meilleure corrélation débit liquide-débit solide.

3.4.2. Analyse saisonnière

Pour étudier les réponses des bassins aux débits liquides et matières en suspension au cours de l'année hydrologique, nous avons jugé utile de regrouper, suivant différentes saisons, les valeurs instantanées, prélevées sur les années (2004-2010 -2012) et d'analyser la relation saisonnière des flux de sédiments en suspension dans notre bassin. Cette approche permet de mettre en exergue l'effet de l'irrégularité du climat sur le transport solide.

Pour les données de la station étudiée, les regroupements ont été effectués suivant quatre saisons: automne (Septembre–Novembre), hiver (Décembre–Février), printemps (Mars–Mai) et été (Juin–Août).

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures 3.7 ci-après :

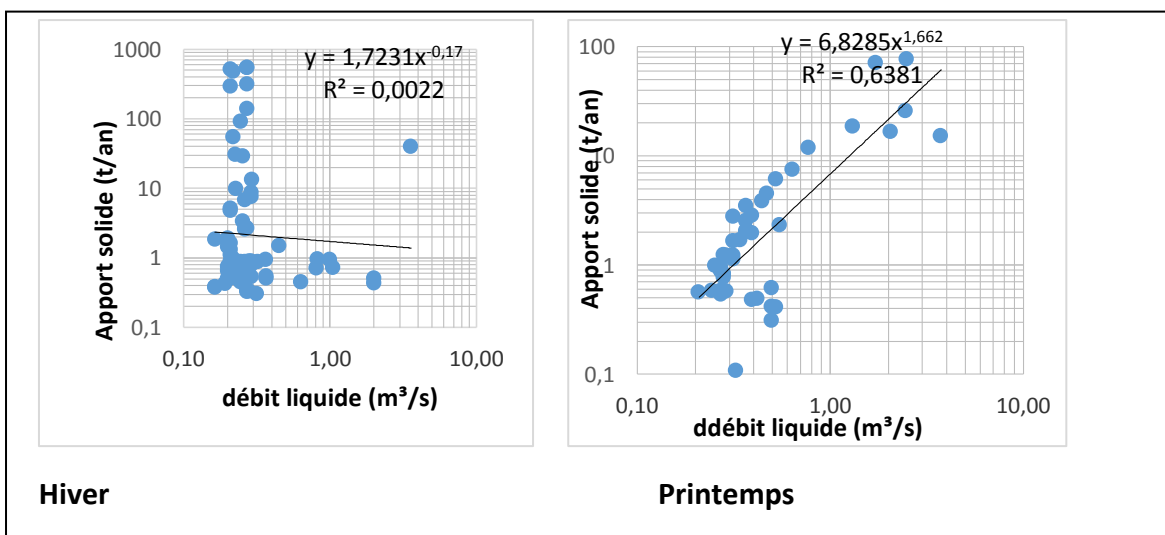


Figure 3.6 : Corrélation Apport solide –Apport liquide en 2004

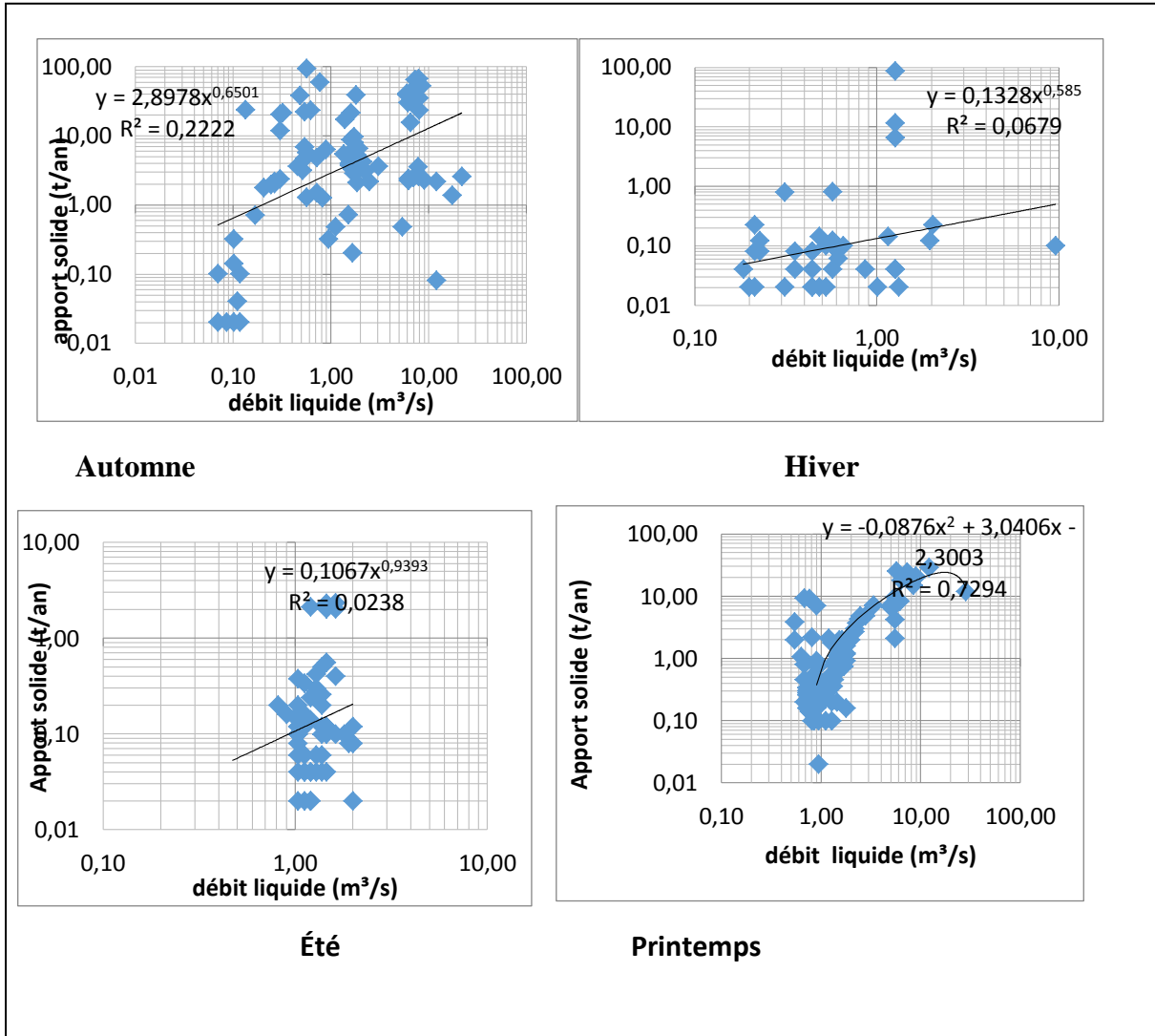


Figure 3.7 : Corrélation débit solide –débit liquide en 2010

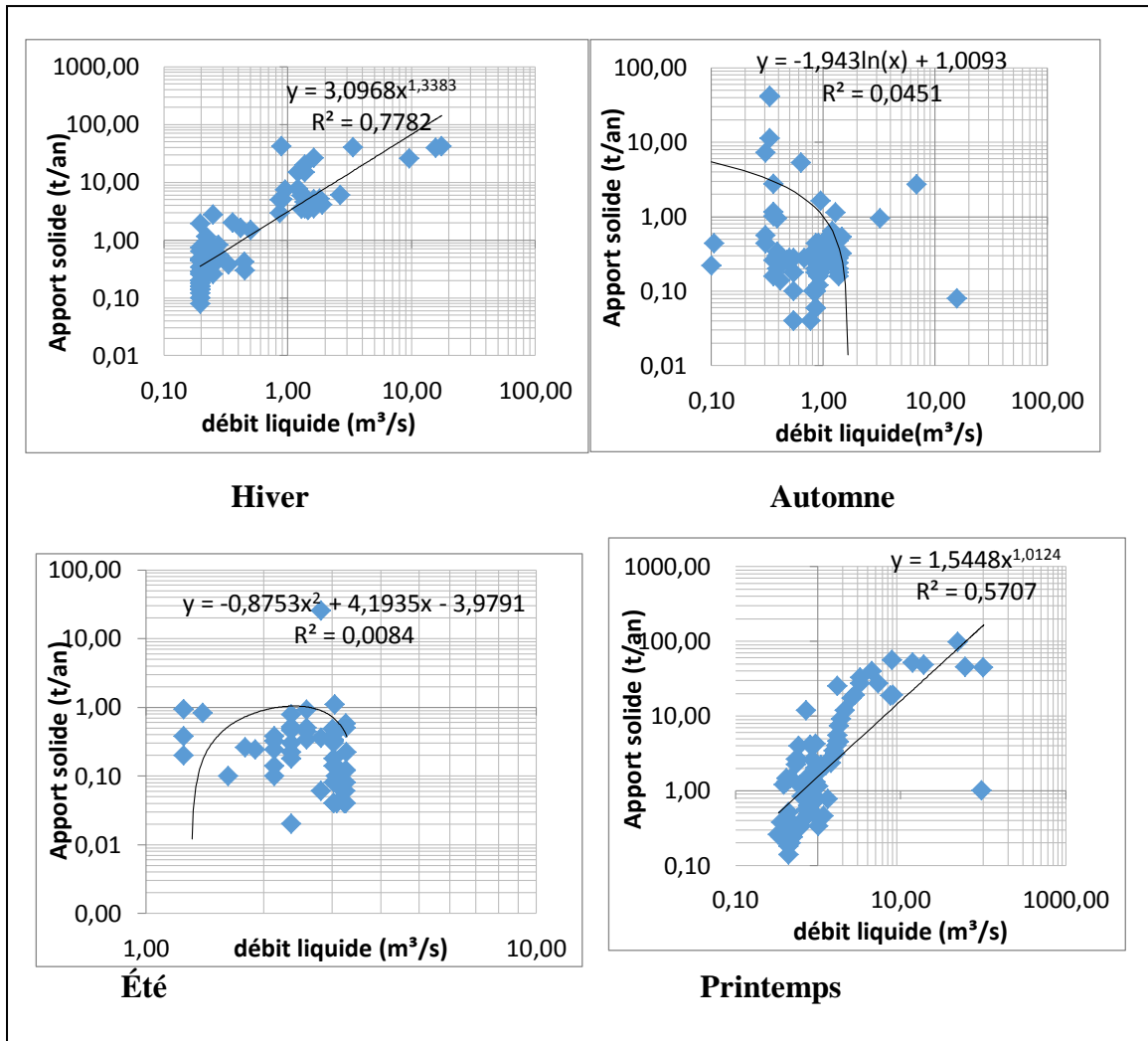


Figure 3.8 : Corrélation débit liquide-débit solide en 2012

D'après les résultats des figures ci-dessus, nous constatons que :

Les nuages des points pour le printemps et l'hiver et l'automne sont assez épais, ceci peut être expliqué par une variation importante du débit solide pour une faible variation de débit solide, et donc, l'existence d'un nombre important de prélèvements lors des tarissements.

En hiver, On enregistre de forts débits solides associés à des faibles débits liquides. Le sol ayant été saturé après les fortes pluies d'automne ne résiste plus à l'érosion malgré des précipitations relativement importantes.

L'automne se distingue par un flux important de matières solides en suspension. Les orages violents qui surviennent en octobre, novembre et décembre arrachent de grandes quantités de matières solides qui vont être transportés par le cours d'eau. La relation entre le débit liquide et solide semble être plus étroite pour les valeurs élevées.

Au printemps, La présence de la végétation et l'humidification des sols réduisent considérablement la migration des particules par l'érosion hydrique durant cette saison.

En été, Le transport solide en suspension s'affaiblit considérablement, où on observe par fois une absence totale de transport solide due simplement à l'absence d'écoulement.

Les tableaux ci-dessous résumant respectivement, les différents coefficients de corrélation obtenus pour chaque modèle statistique et les relations débit solide-débit liquide pour chaque saison pour l'année 2012 :

Tableau 3.4 : Valeurs des coefficients de corrélation R² et des relations Qs et Ql

Saison	Types de model	Valeurs de R ²	Relations
Printemps	Exponentielle	0.133	$Q_s = 1,556e^{0,036Q_l}$
	Logarithmique	0.605	$Q_s = 10,33 \ln Q_l + 5,856$
	Puissance	0.570	$Q_s = 1,544Q_l^{1,012}$
	Polynomial	0.698	$Q_s = 0,029Q_l^2 + 3,095Q_l + 1$
	Linéaire	0.252	$Q_s = 0,490Q_l + 5,330$
Hiver	Exponentielle	0.321	$Q_s = 0,686e^{0,352Q_l}$
	Logarithmique	0.559	$Q_s = 6,524 \ln Q_l + 9,849$
	Puissance	0.778	$Q_s = 3,096Q_l^{1,338}$
	Polynomial	0.612	$Q_s = 0,217Q_l^2 + 6,032Q_l - 0,27$
	Linéaire	0.548	$Q_s = 2,64Q_l + 1,54$
Eté	Exponentielle	/	/
	Logarithmique	0.000	$Q_s = 0,147 \ln Q_l + 0,548$
	Puissance	/	/
	Polynomial	0.008	$Q_s = 0,0875Q_l^2 + 4,193Q_l - 3,979$
	Linéaire	4E-0.6	$Q_s = 0,011Q_l + 0,658$
Automne	Exponentielle	/	/
	Logarithmique	0.045	$Q_s = -1,94 \ln Q_l + 1,009$
	Puissance	/	/
	Polynomial	0.022	$Q_s = 0,113Q_l^2 - 1,879Q_l + 3,06$
	Linéaire	0.004	$Q_s = 0,239Q_l + 1,801$

Les valeurs du facteur de corrélation R² sont proche de 1 pour les régressions puissance et polynomiale, donc les modèles Puissances et polynomiales sont les plus représentatifs. Ainsi, la saison Hiver semble donner une meilleure corrélation entre le débit solide et le débit liquide puisque le coefficient de corrélation est de 0.778 et la loi Puissance retenue est de la forme : $Q_s = 3.096 Q_l^{1.338}$. Le modèle puissance offre une bonne corrélation pour le regroupement des données par saison.

3.5. ETAT D'ENVASEMENT DE LA RETENUE DU BARRAGE SIDI YACOUB

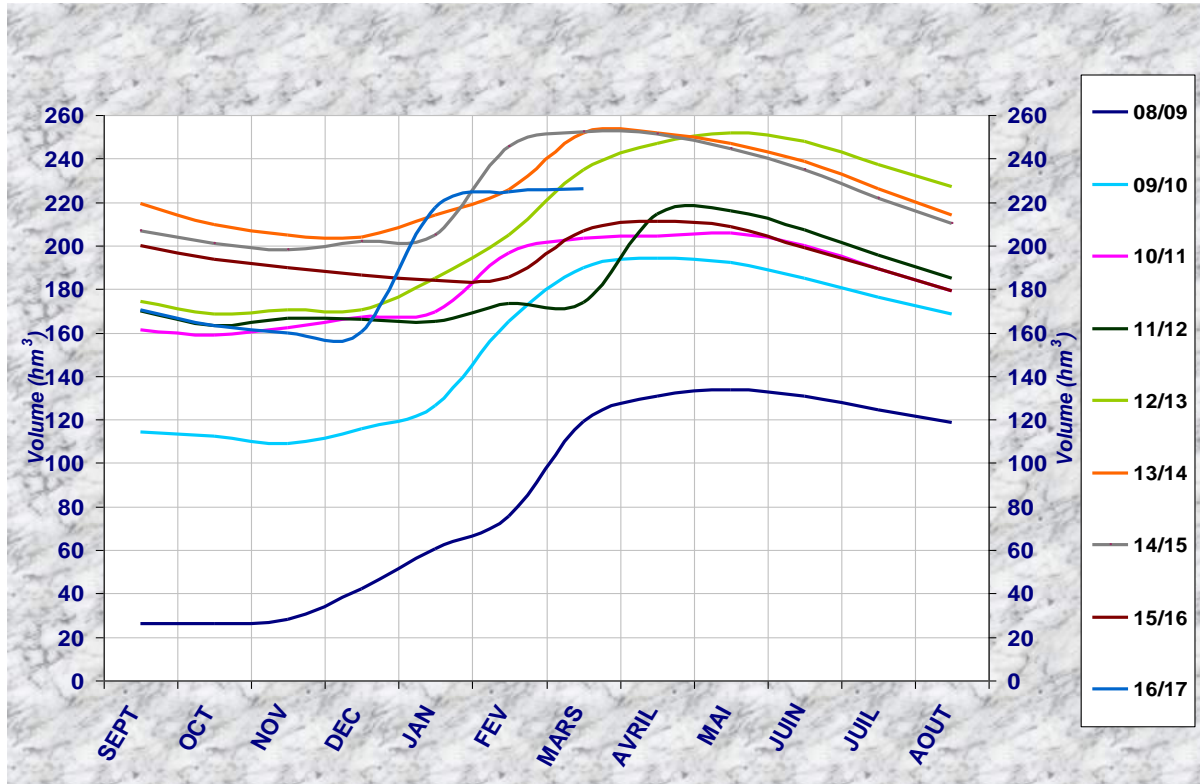
3.5.1. Levées bathymétriques

Un levé bathymétrique constitue un moyen très efficace de mesure du volume des sédiments piégés dans un réservoir, principalement à long terme, car il prend en considération non seulement le débit solide en suspension, mais également le débit charrié [15].

Les dernières levées bathymétriques ont été effectuées au niveau de la retenue du barrage de Sidi Yacoub durant l'année 2004. Nous avons reçu Le rapport final au sein de l'Agence National des Barrages et de Transfert (ANBT). Ce dernier nous a permis de choisir des points de références correspondant respectivement à : la cote (H), Surface d'eau (S) et Volume ou capacité de la retenue (V), et de tracer les courbes HSV en se basant également, sur les comptes rendu mensuels (CRM) obtenus au niveau de la direction du barrage de Sidi Yacoub.

3.5.2. Capacité de stockage d'eau

Pour évaluer l'état de la capacité de la retenue, nous avons exploité les courbes d'évolution de la capacité de la retenue (Figure 3.9) obtenues au sein de la direction du barrage de Sidi-Yacoub.



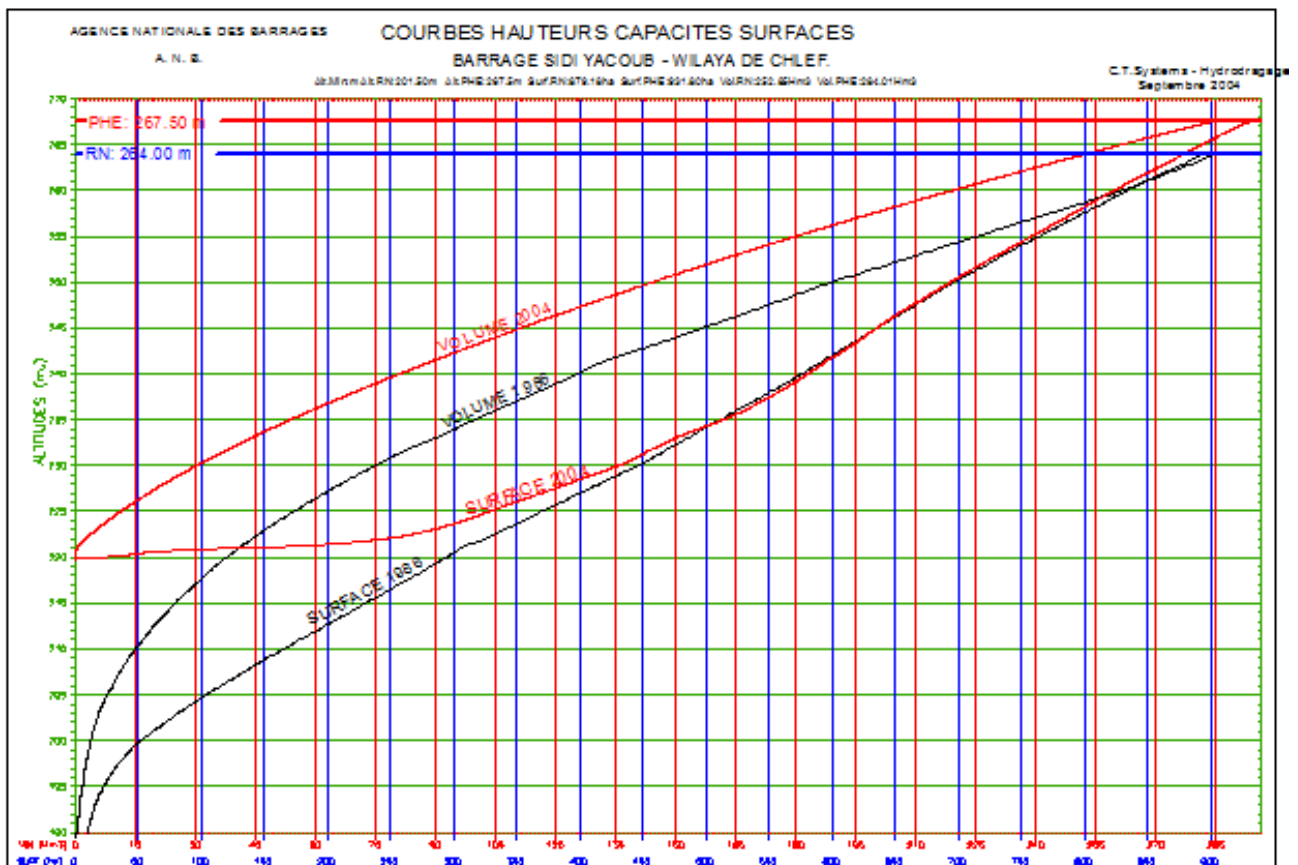
(Source : Direction générale du barrage de Sidi Yacoub)

Figure 3.9 : Evolution de la capacité de la retenue durant la période 2008-2017

De la figure ci-dessus nous remarquons que le taux de remplissage du barrage de Sidi Yacoub, a atteint son niveau le plus élevé durant la période 2012-2013, ou le volume s'élève à 252, 4 hm³, soit l'équivalent de sa capacité théorique. A partir de cette année, une diminution successive a été constatée, ceci peut être expliqué par une diminution des volumes des apports liquides enregistrés. Pour l'année actuelle, la capacité de la retenue est estimée à 226.225 hm³.

3.5.3. Courbes HSV

Les courbes HSV (hauteur-surface volume) ont été tracées en se basant sur les résultats des dernières levées bathymétriques (2004).



(Source : ANBT)

Figure 3.10 : Courbes HSV.

La surface du plan d'eau évoluée depuis 1986 jusqu'à 2004, où la cote initiale a été observé à 220m. Le profil se stabilise et conserve la même allure à partir d'une altitude 235 m. La capacité a également évoluée durant la même période avec des profondeurs beaucoup plus importantes. Ces courbes ont été exploitée afin de déterminer une relation représentative entre les différents paramètres surface- hauteur ; volume hauteur et volume –surface. Les figures 3.11 et 3.12 ci-après, représentent respectivement les courbes Surface- Hauteur et Volume-

Hauteur en se basant sur les points de référence choisis, en considérant les périodes 2005-2010 et 2017.

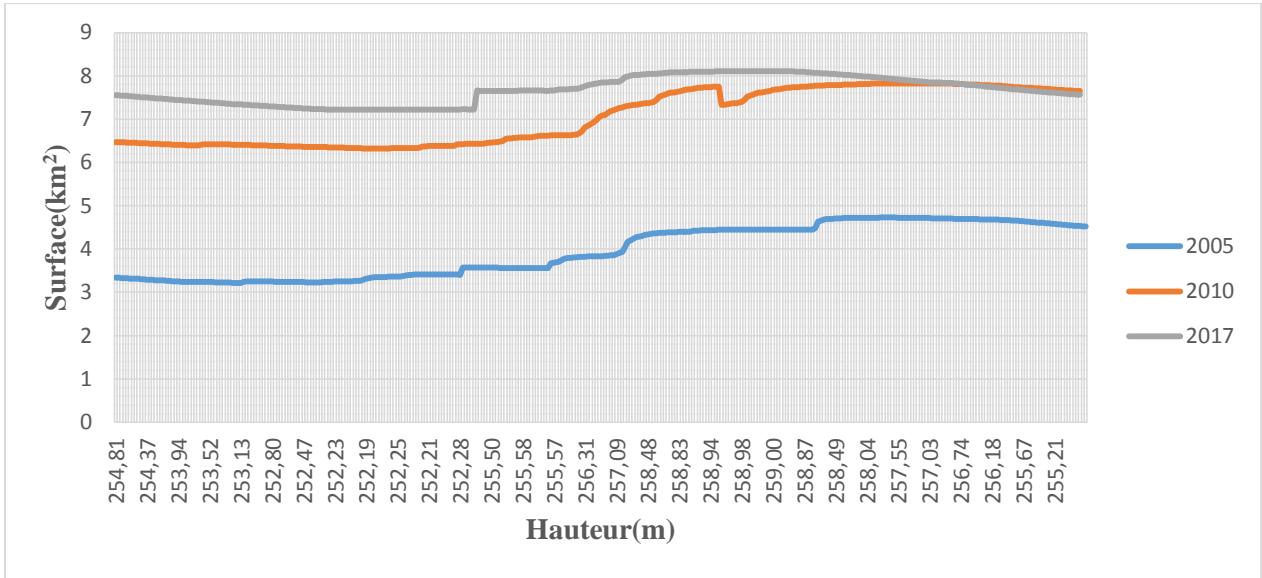


Figure 3.11 : Variation de la surface du plan d'eau dans la retenue en fonction des profondeurs mesurées

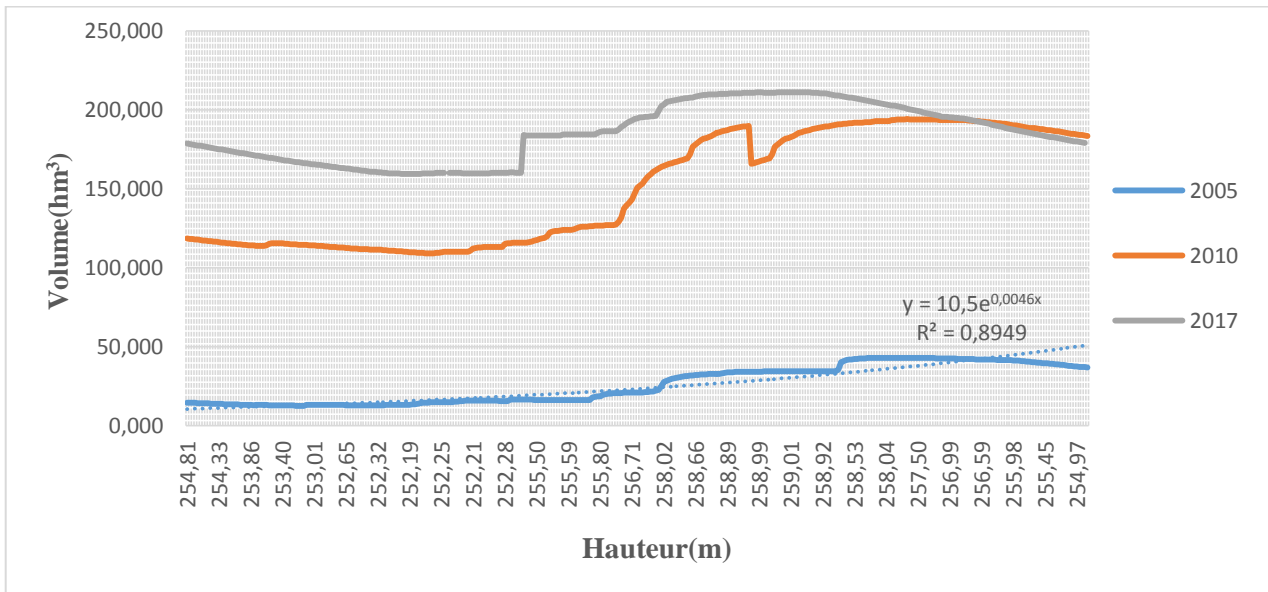


Figure 3.12 : Variation de la capacité de la retenue durant la période (2005-2017)

En se référant aux figures (3.11) et (3.12) ci-dessus, nous constatons une augmentation importante de la surface du plan d'eau et également du volume retenu, durant la période 2005 à 2010 (5ans), ceci peut être interprété par l'apport liquide important enregistré durant cette période. Cependant nous remarquons une légère augmentation durant les années 2010 à 2017 avec un déficit marqué à partir d'une profondeur 256.59 m. Cela revient d'une part à la forte

exploitation de l'eau stockée et essentiellement, aux lâchers importants enregistrés durant cette période afin de réguler le plan d'eau de cet ouvrage.

Les courbes ci-dessus nous ont permis de déterminer la relation entre la capacité de la retenue et les altitudes mesurées. Sur Excel, nous avons ajouté une courbe de tendance ayant comme équation représentative sous la forme exponentielle donnée par :

$$V = 10.5 e^{0.0046H} \quad (3.1)$$

Cette équation nous servira de base pour le calcul des profondeurs d'eau et leurs volumes correspondants.

3.5.4. Estimation de la perte de capacité de stockage d'eau dans la retenue du barrage de Sidi Yacoub

Pour estimer le taux des pertes de la capacité de stockage d'eau dans la retenue durant les périodes 2005-2010 et 2017, nous avons calculé les profondeurs d'eau en se référant aux cotes normales retenues. Cette profondeur s'obtient par la relation :

$$\text{Profondeur d'eau} = \text{cote normale de la retenue} - \text{cote mesurée}$$

Nous avons calculée la profondeur d'eau (H) en tenant compte d'un nombre de 20 points de références. Tenant compte des valeurs calculées nous avons tracé l'histogramme présenté sur la figure 3.13 suivante :

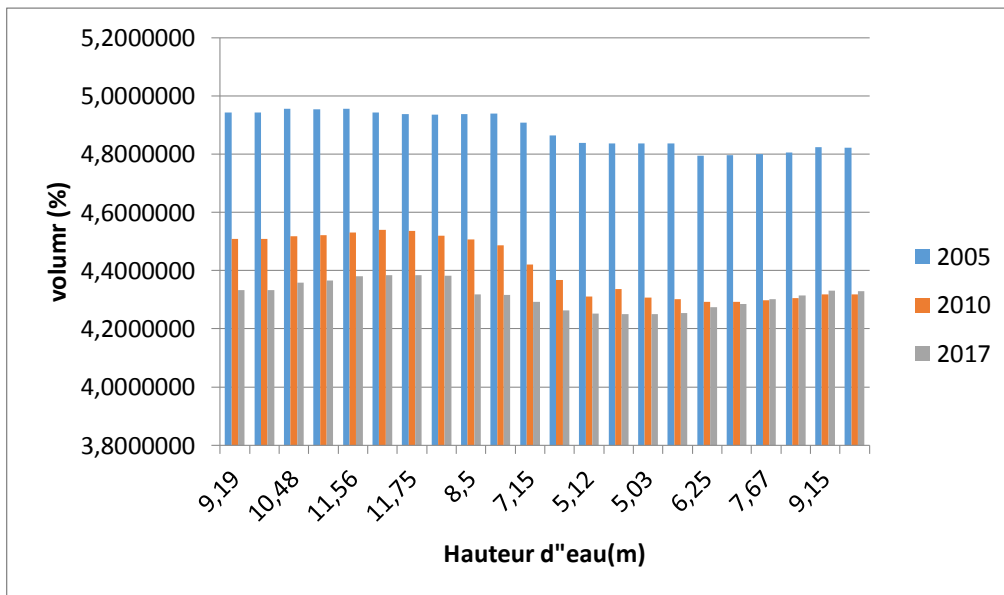


Figure 3.13 : Variation de capacité de stockage d'eau dans la retenue du barrage.

La figure ci-dessus montre une diminution importante du volume d'eau stocké depuis l'année 2005 jusqu'à 2010. Ceci explique le taux d'envasement important marqué durant cette période. A partir de cette année (2010) nous constatons une faible diminution de la capacité et

donc un faible taux d'envasement. Ceci peut être interprété par les volumes importants des lâchers effectué durant la même période.

3.5.4.1. Calcul du taux d'envasement

Connaissant les capacités de stockage d'eau dans la retenue, le taux d'envasement « T » se calcul de la manière suivante :

$$\text{Taux d'envasement} = \text{Perte de capacité} / \text{la capacité initiale}$$

où : la perte de capacité = capacité initiale – capacité finale

La perte annuelle se calculé en divisant la perte de capacité sur le nombre d'année.

En premier lieu, nous avons calculé le taux d'envasement des années 1986 – 2004 et 2010.

Les résultats obtenus sont représenté comme suit :

Tableau 3.5 : Taux d'envasement pour les années 1986-2004-2010

Année	1986	2004	2010
Capacité (hm ³)	285	252.15	161.441
Perte de capacité Hm ³	-	32.15	90.707
Nombred'année	-	18	6
Perte de capacité annuelle (Hm ³ /An)	-	1.79	15.11
Taux d'envasement		11.28 %	35.97 %

Du tableau ci-dessus, nous constatons une augmentation considérable du taux d'envasement depuis l'année des derniers levées (2004) jusqu'à l'année 2010. Cette augmentation est due principalement à l'énorme quantité de dépôts au niveau de la retenue et donc aux quantités importantes des sédiments transportés vers la retenue, qui est à l'origine de l'accélération du phénomène d'envasement.

Nous avons par la suite, calculé le taux d'envasement en se référant à l'année 2004 dans l'objectif d'identifier son évolution depuis cette période jusqu'à l'année actuelle (Tableau 3.5).

Tableau 3.6 : Taux d'envasement pour les années 2004 à 2017

Année	2004	2010	2013	2014	2015	2016	2017
Capacité (hm3)	252.15	161.441	174.476	219.189	206.746	199.971	170.28
Perte de capacité Hm ³	32.15	90.707	77.74	32.96	45.404	52.179	81.87
Nombred'année	18	6	9	10	11	12	13
Perte de capacité annuelle (Hm3/An)	1.79	15.11	8.63	3.29	4.127	4.348	0.324
taux d'envasement	11.28	35.97 %	30.8	13.071	18.006	20.69	23.468

La figure 3.14 ci-dessous représente l'évolution du taux d'envasement en se référant à l'année des dernières levées (2004) :

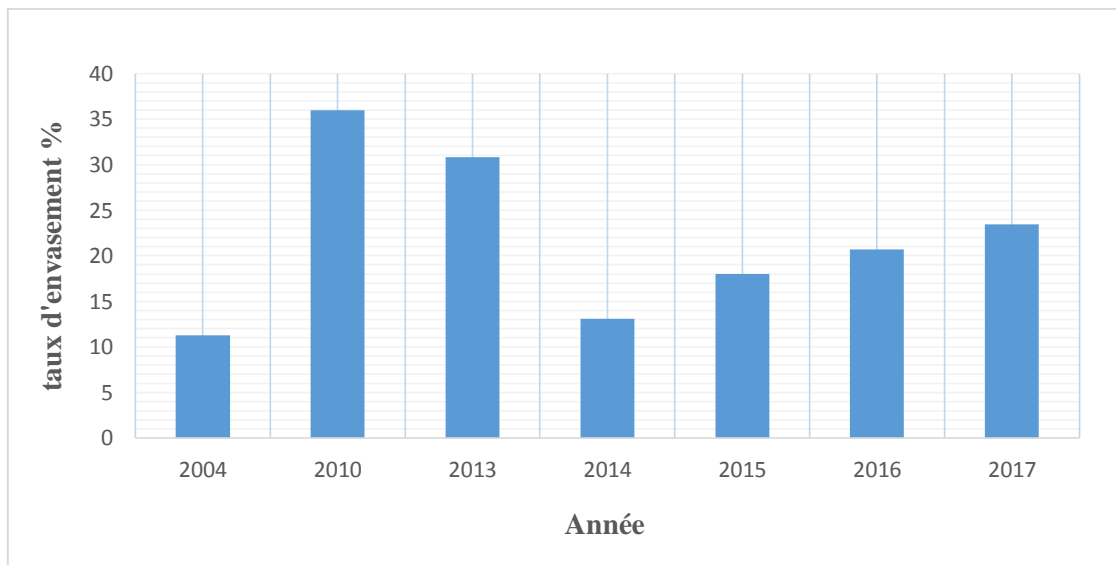


Figure 3.14 : Evolution du taux d'envasement par rapport à l'année 2004

La figure ci-dessus explique le cas de la figure 3.13, une augmentation importante du taux d'envasement est constatée durant la période 2004 - 2010. A partir de cette dernière, il diminue jusqu'à la fin de l'année 2014 où nous remarquons encore une fois, un accroissement du taux d'envasement jusqu'à l'année actuelle. Ceci peut être interprété d'une part, par l'importance des apports liquides durant l'année 2013 et d'autres par les volumes des lâchers toujours observées durant la période 2014-2017.

3.6. CONCLUSION

On doit retenir dans cette étude, que les transports solides en suspension dans le bassin versant de l'Oued Arjem se font essentiellement pendant les crues. La saison Hiver semble donner une meilleure corrélation entre le débit solide et le débit liquide puisque le coefficient de corrélation est de 0.778 et la loi Puissance retenue est de la forme : $Qs = 3.096Ql^{1.338}$. Ce qui explique la quantité importante des sédiments.

La courbe (volume-hauteur) nous a permis de déterminer une relation entre la capacité de la retenue et les altitudes mesurées par une équation représentative de forme :

$$V = 10.5e^{0.0046H}$$

Une augmentation considérable du taux d'envasement est constatée durant la période 2004 - 2010. Il atteint une valeur de 35.97%. Cette augmentation est due essentiellement à l'importance de la quantité des sédiments transportés et également au processus érosif qui règne dans la région. Suite aux lâchers observés quotidiennement, le taux d'envasement a diminué et atteint en 2017 une valeur de 23%.

CHAPITRE 4. IDENTIFICATION ET EVALUATION DES VOLUMES D'ÉROSION ET DES DÉPÔTS AU NIVEAU DE LA RETENUE DU BARRAGE DE SIDI YACOUB

4.1. INTRODUCTION

Actuellement, l'étude des processus d'érosion et du transport solide devient de plus en plus importante, du fait qu'ils sont considérés comme étant, la cause principale de la dégradation des sols agricoles, de l'accélération du phénomène d'envasement des barrages et également, de l'ensemble des dommages portés aux infrastructures dont les coûts sont considérables. En effet, le fond de la retenue du barrage de Sidi Yacoub a connu une évolution importante depuis les années 2004 jusqu'à l'année 2017, en raison des volumes importants des sédiments déposés. Ceci a influencé considérablement la forme de la retenue qui apparaît en surface (Figure 4.1).

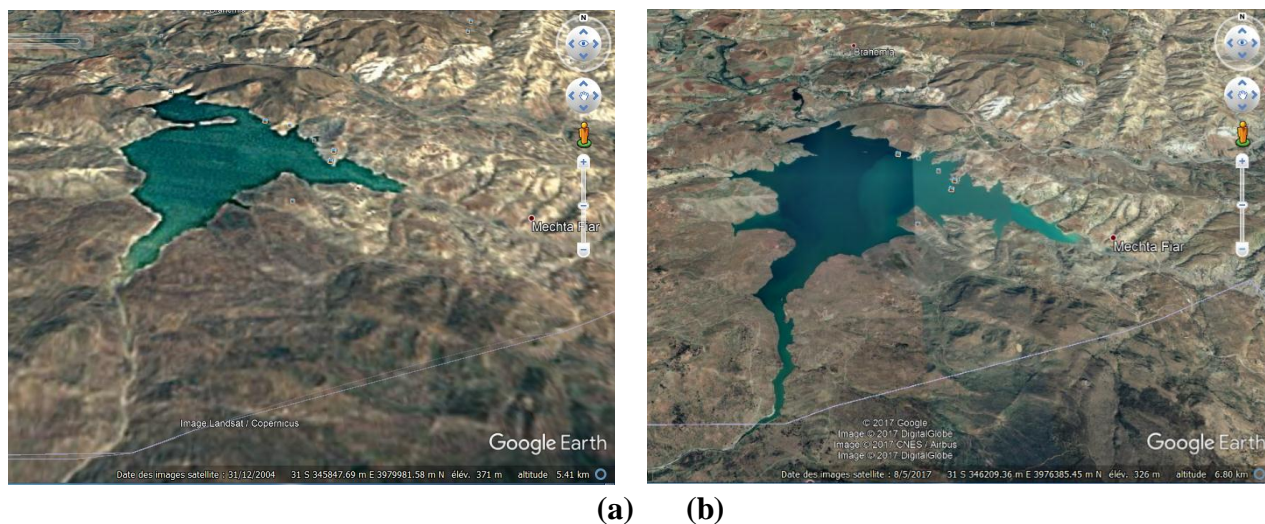


Figure 4.1: Image satellitaire de la retenue du barrage Sidi Yacoub : (a) forme de la surface de la retenue pour la date : 31/12/2004 (b) forme de la surface pour la date : 08/05/2017

Ce présent chapitre sera consacré alors, à développer une méthodologie pour la modélisation des phénomènes d'érosion et de sédimentation dans la retenue du barrage de Sidi Yacoub, en identifiant essentiellement, les zones d'érosion et de dépôt durant les périodes 2004-2010 et 2017, de calculer leur surfaces et leurs volumes respectivement, et élaborer vers la fin des cartes «Erosion-dépôt», qui pourront être exploités par les ingénieurs hydrauliciens ou hydrotechniciens.

4.2. METHODOLOGIE DE TRAVAIL

4.2.1. Définition du logiciel ArcGis

C'est un système d'information géographique très puissant qui permet de visualiser, interroger, analyser et mettre en page des différents types de données. C'est l'application essentielle pour la création et l'utilisation des données spatiales. Il permet également, de créer des cartes de qualité en utilisant un panel d'outils ...etc.

4.2.2. Organigramme méthodologique

Pour réaliser notre travail, nous avons suivi l'organigramme méthodologique ci-dessous :

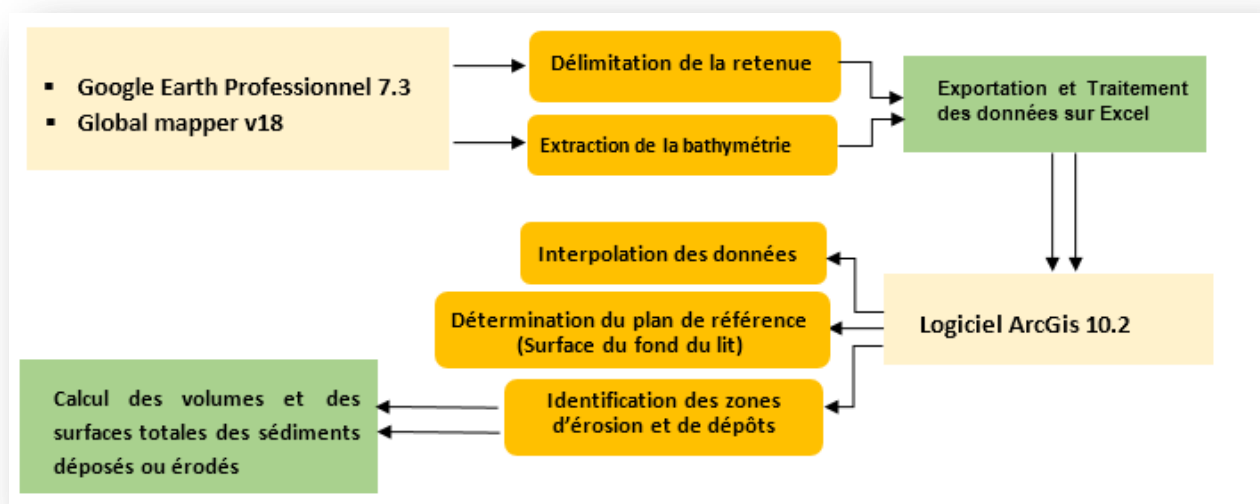


Figure 4.2 : Organigramme méthodologique

4.2.3. Fonctions de base utilisées sur ArcGis

4.2.3.1. Fonction de base radiale (RBF)

La fonction de base radiale (RBF) est une série de techniques d'interpolation exacte qui implique le passage de la surface par chaque valeur d'échantillon mesuré. Elle permet de produire des surfaces lisses à partir d'un grand nombre de points de données et produit des résultats satisfaisants pour des surfaces aux variations subtiles, telle que l'altitude. Toutefois, cette technique n'est pas adaptée lorsque des valeurs de surface présentent des variations considérables sur des distances réduites et/ou lorsque que les échantillons de données sont sujets à des erreurs de mesure ou incertains.

L'utilisation de cette fonction sur ArcGis (Figure 4.3) nous a permis d'interpoler les élévations extraites et de construire les couches d'évolution de la surface du fond du lit de la

retenue du barrage Sidi Yacoub (considérée comme un plan de référence) durant les années 2004-2017 (Figure 4.4).

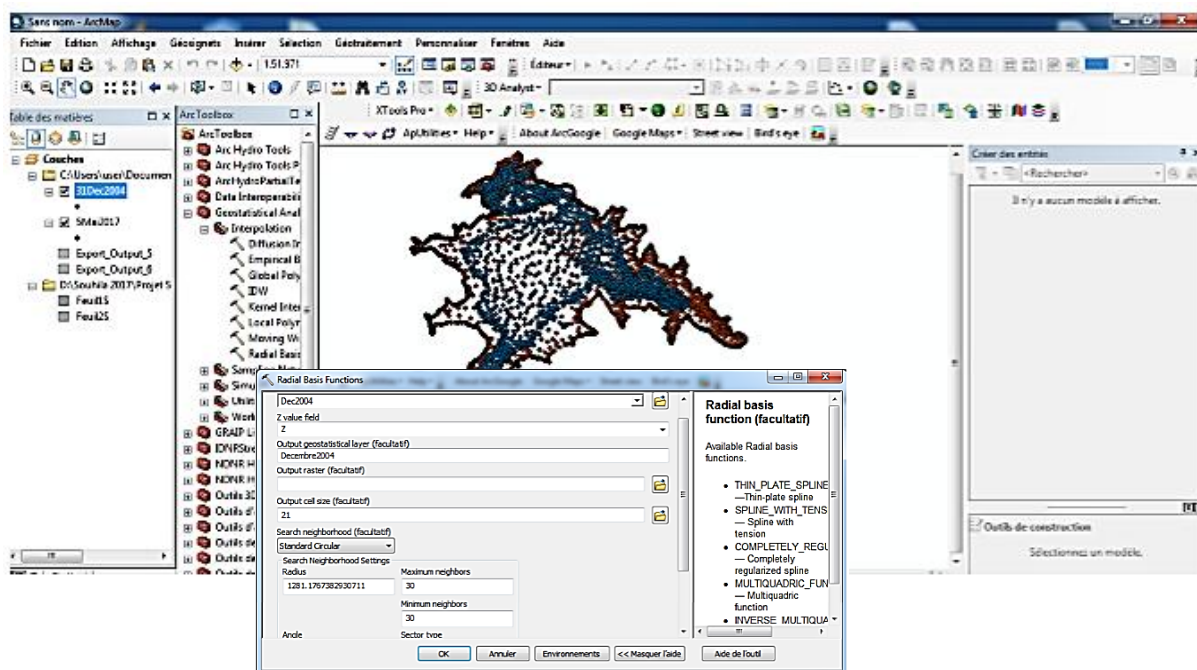


Figure 4.3 : Fenêtre d'utilisation de l'outil « RBF » sur ArcGis

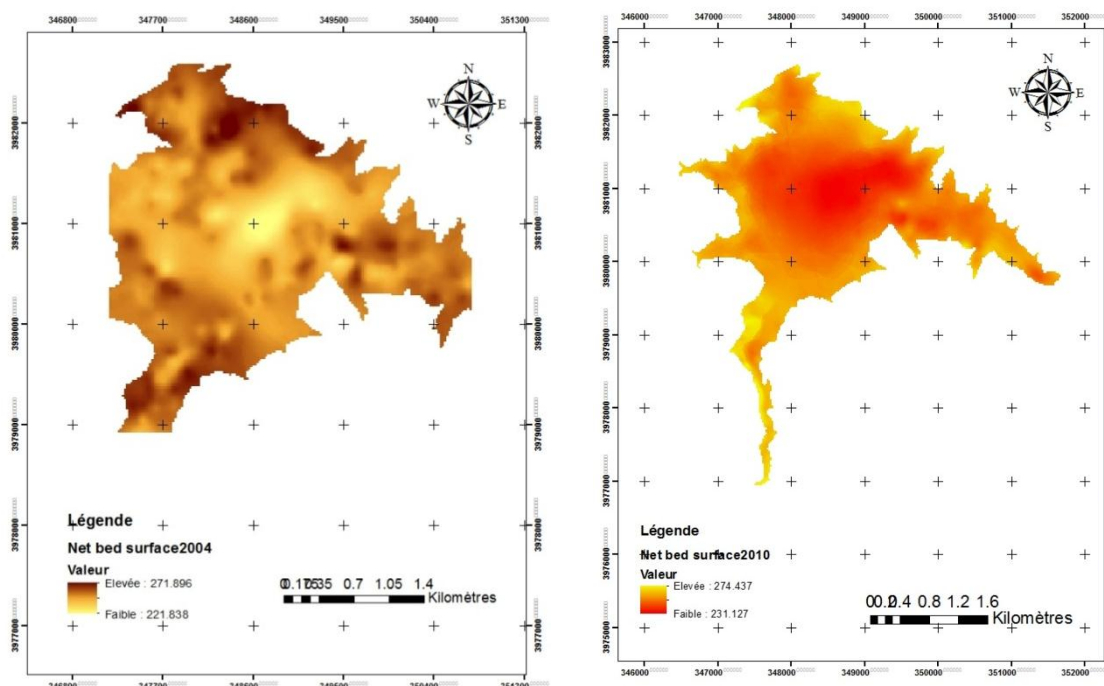


Figure 4.4 : Evolution du fond du lit de la retenue durant les années 2004- 2017.

4.2.3.2. Fonction de l'outil Remblais/déblais (CutFill)

L'outil Remblais/déblais récapitule les superficies et les volumes modifiés à partir d'une opération de remblais et de déblais. En prenant des surfaces d'un emplacement donné à deux périodes différentes, il identifie les régions de suppression et d'ajout de matériau de surface, mais aussi les zones où la surface n'a pas été modifiée.

➤ Applications

Les opérations essentielles qui peuvent être effectuées en utilisant l'outil « CutFill » sont :

1. identifier les régions d'érosion et de dépôt sédimentaire d'une vallée fluviale,...
2. calculer les volumes et superficies de matériau surfacique à éliminer et les aires à combler pour niveler un site de construction.
3. identifier, dans le cadre d'une étude, les zones fréquemment inondées avec le matériau surfacique au cours d'un glissement de terrain, afin de localiser les surfaces terrestres sûres et stables pour la construction.

L'utilisation de cette fonction sur ArcGIS nous a permis d'identifier les zones d'érosion et de dépôt au niveau de la retenue (Figure 4.5).

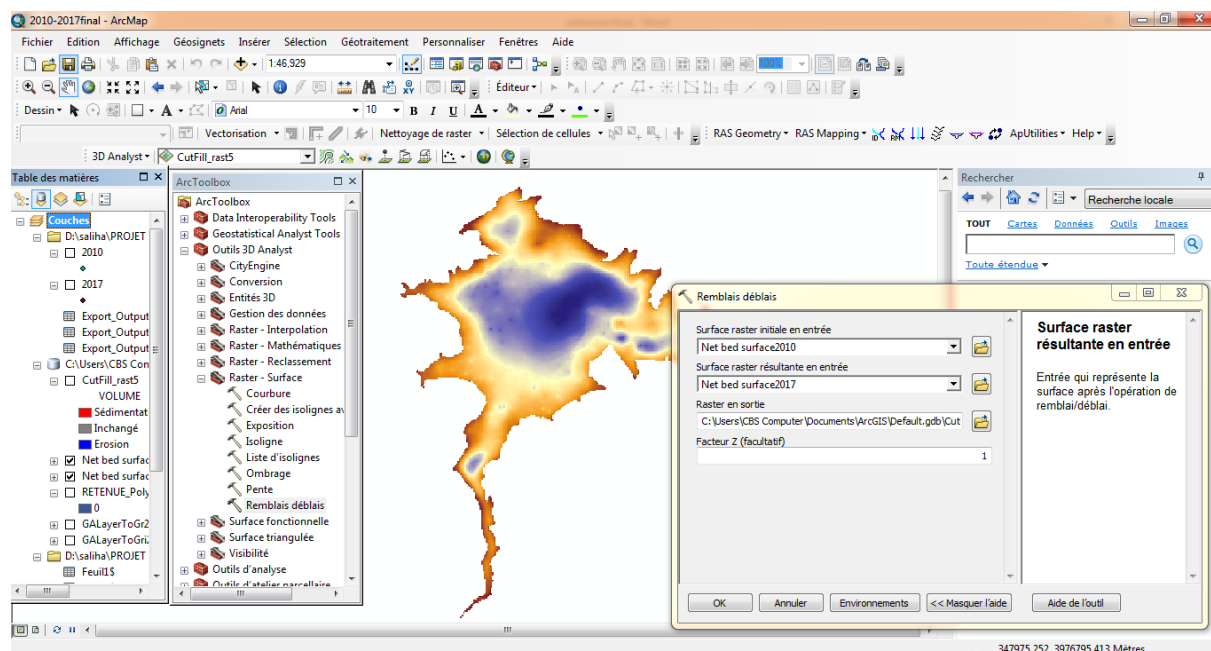


Figure 4.5 : Fenêtre d'utilisation d'outil « CutFill » sur Arc-GIS

4.4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.4.1. Cartes élaborées

Les figures 4.6, 4.7 et 4.8 ci-dessous présentent respectivement, les cartes identifiant les zones d'érosion et de sédimentation, et la carte finale produite « Erosion – Dépôts » dans la retenue du barrage de Sidi-Yacoub, durant les années 2004-2010 et 2010-2017.

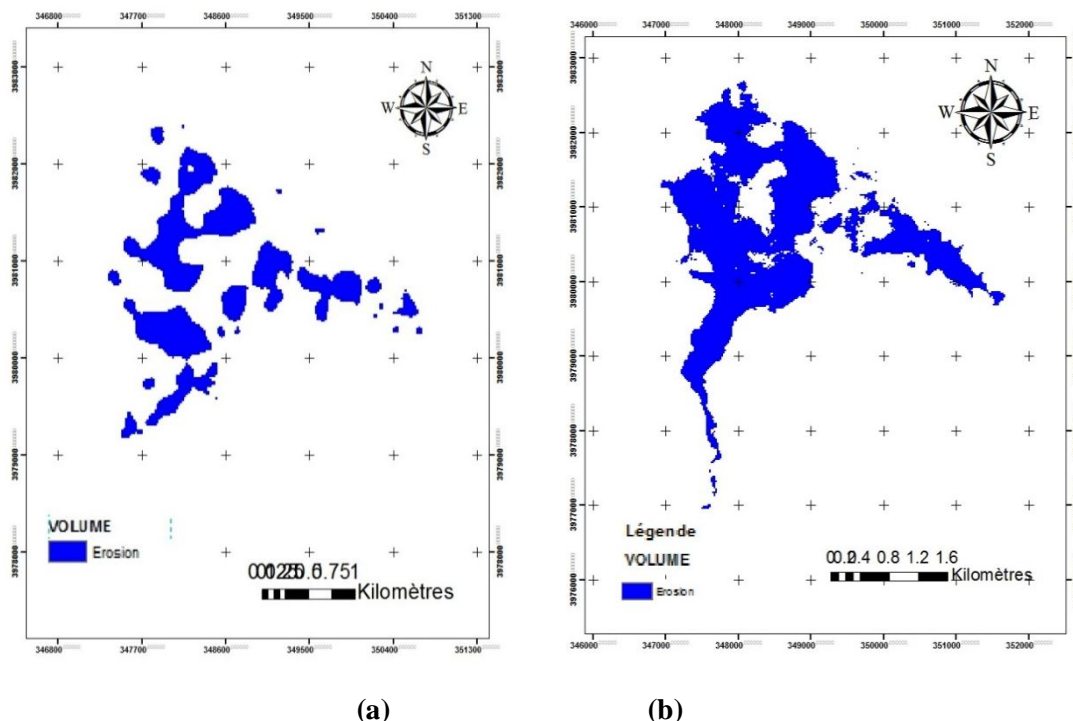


Figure 4.6 : Identifications des zones d'érosion dans la retenue du barrage de Sidi Yacoub : (a) période 2004-2010, (b) période 2010-2017

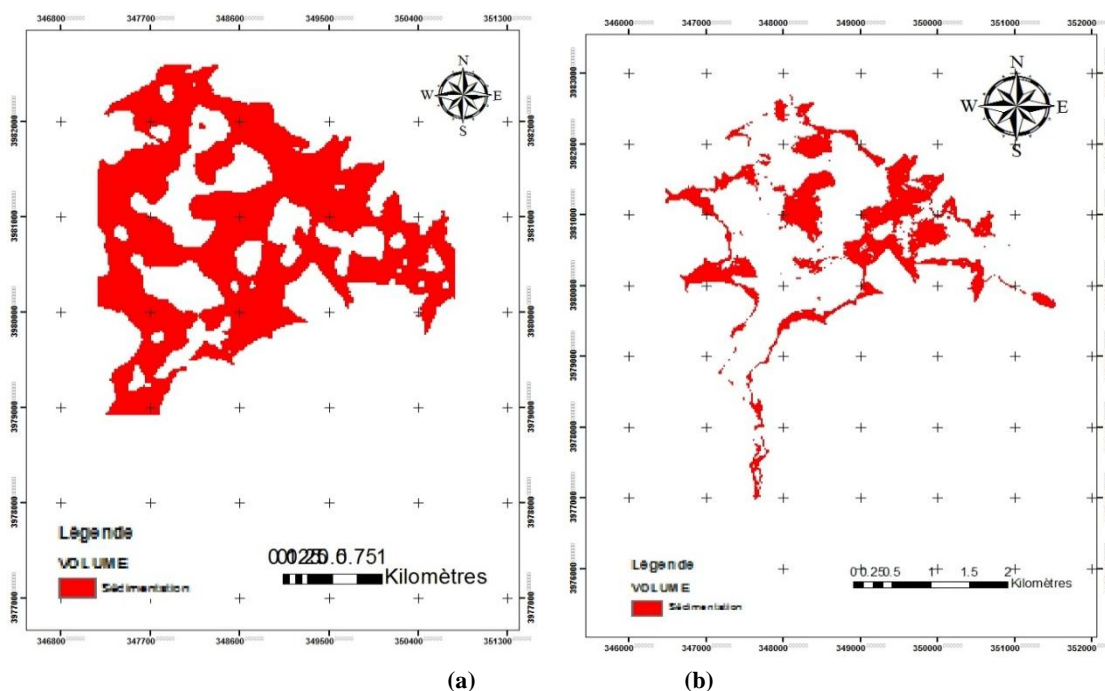


Figure 4.7: Dépôts des sédiments dans la retenue du barrage de Sidi Yacoub : (a) période 2004-2017, (b) période 2010-2017

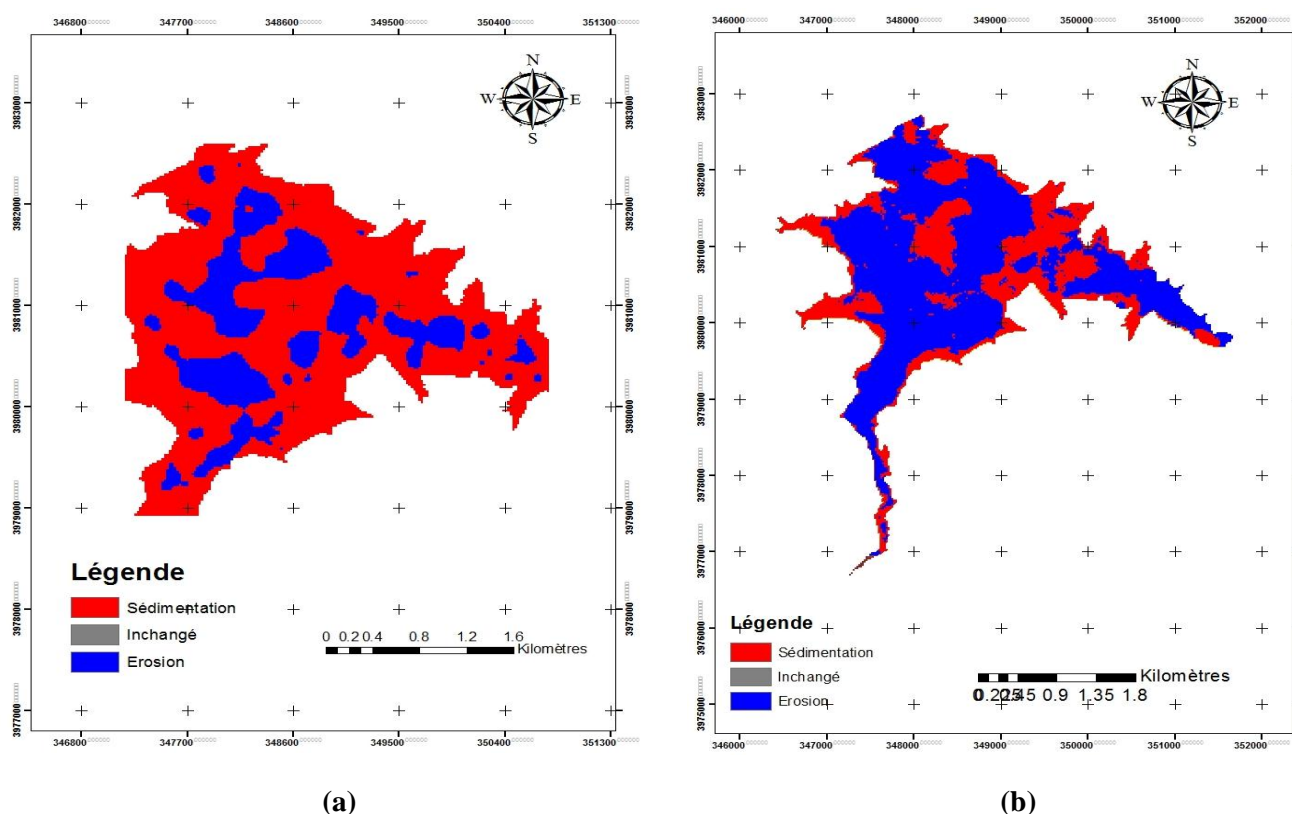


Figure 4.8 : Identification des zones d'érosion et de dépôts dans la retenue du barrage de Sidi Yacoub : (a) période 2004-2017, (b) période 2010-2017

4.4.2. Volumes d'érosion et de dépôts

L'élaboration des cartes ci-dessus nous a permis d'avoir un certain nombre de tables attributaires dont chacune correspond à une période bien définie. Les volumes et les surfaces sont calculées pour toutes les zones identifiées. Le tableau (4.1) ci-dessous représente les résultats obtenus pour la période 2004-2017. Concernant la période 2010-2017 les résultats sont représentés en Annexe.

Tableau 4.1 : Surface et volume d'érosion et dépôts pour la période 2004-2017

zone	Volume (m3)	Surface (km2)
11911	-21788890.58	5252751
2	61.47729492	882
47	34431.28899	20727
1584	1793301.548	698544
8	-4236.435654	3528
58	14114.42921	25578
5	604.4168243	2205
11	2094.891312	4851
398	339471.923	175518
38	22060.25519	16758
430	398905.6631	189630
46	16545.54803	20286
182	281253.9543	80262
1	9.535171509	441
79	27685.8718	34839
6	249.0449524	2646
708	726903.7736	312228
4	158.5718536	1764
17	5311.817276	7497
7	892.1609802	3087
8	1690.390091	3528
10	2130.138474	4410
348	259192.6359	153468
27	18192.82462	11907
1	129.5222168	441
71	33724.60963	31311

La table ci-dessus présente essentiellement, la taille de la zone occupée, la surface et le volume d'érosion et de dépôts au niveau de la cuvette. Les valeurs positives correspondent aux pertes qui représentent l'érosion et les valeurs négatives correspondent aux dépôts ou sédimentations. Ces tables sont exportées vers le logiciel Excel. Après filtrage et classification des différentes valeurs obtenues, nous avons calculé le volume total des sédiments érodés ou déposés au niveau de la retenue du barrage de Sidi-Yacoub durant les périodes 2004-2017 et 2010-2017. Les résultats obtenus sont mentionnés sur le tableau suivant :

Tableau 4.2 : Volume des sédiments érodés et déposés pour les périodes 2004-2017 et 2010-2017

Période	Volume des sédiments érodés (m ³)	Volume des sédiments déposés(m ³)
2004-2017 (13 ans)	3979116.29	21793127.010
2010-2017 (7 ans)	13095818.20	3329051.378

4.4.3. Discussion et conclusion des résultats

En se référant aux résultats ci-dessus (tableau 4.2), nous remarquons que pour la période allant de 2004 jusqu'à 2017, les volumes des dépôts (21.79 hm^3) sont beaucoup plus importants par rapport au volume érodés (3.98 hm^3). Ceci peut être interprété par l'énorme quantité des sédiments transportés vers la retenue du barrage et également, l'accélération du phénomène d'envasement durant la même période (Figure 4.9).

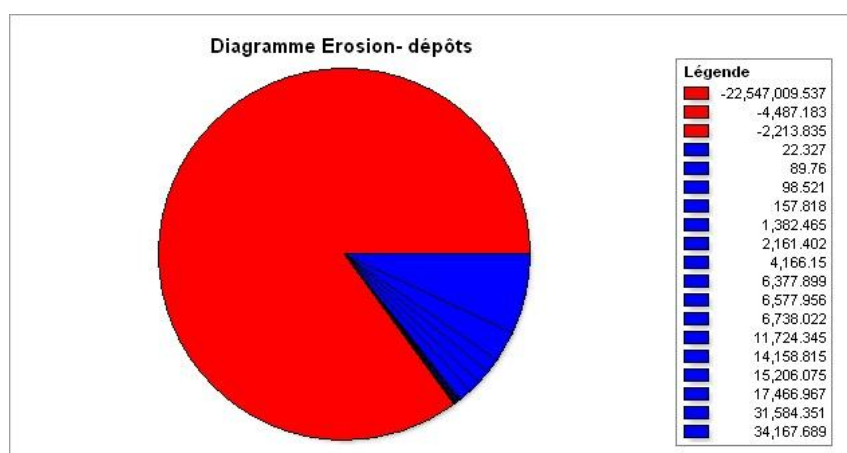


Figure 4.9 : Comparaison des volumes des sédiments érodés et déposés au niveau de la retenue du barrage de Sidi Yacoub durant les années 2004-2017

Cependant, le volume des sédiments érodés (13.09 hm^3) durant les années (2010-2017) est plus important que le volume des sédiments déposés (3.30 hm^3). Ceci peut être expliqué par les volumes importants des lâchers effectués durant la même période, au niveau de la retenue de Sidi Yacoub (Figure 4.10).

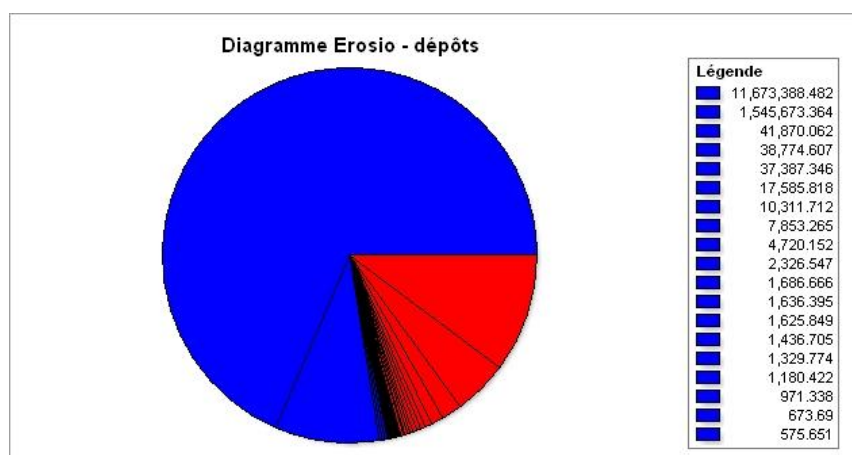


Figure 4.10 : Comparaison des volumes des sédiments érodés et déposés au niveau de la retenue du barrage de Sidi Yacoub durant les années 2010-2017

CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette étude, nous avons essayé d'apporter une modeste contribution à l'étude du transport solide et de sédimentation dans la retenue du barrage de Sidi Yacoub. Ce barrage est situé au niveau du sous bassin versant de l'oued Ardjem. Ce dernier est caractérisé par un relief accidenté et fort. Il a une forme allongée favorisant alors un écoulement accéléré des eaux de ruissellement.

Le régime hydrologique de l'oued Ardjem est caractérisé par deux saisons bien distinctes : la période pluvieuse qui s'étend d'Octobre à Mai et une saison sèche qui s'étend du mois de juin au mois de septembre. Le régime thermique de la région est caractérisé alors, par des températures élevées en été et relativement basses en hiver. Les températures les plus élevées sont enregistrées durant les mois de juillet et août, alors que les plus basses se manifestent au mois de janvier et février.

La difficulté principale dans le calcul et l'estimation du transport solide, est dû à l'insuffisance et la qualité des données disponibles. Il faut dire que les conditions climatiques sont très aléatoires et cela incombe à l'application stricte des consignes des données aux observateurs.

L'évolution de transport solide est importante depuis l'année des dernières levées 2004 jusqu'à l'année 2017. L'analyse saisonnière de la relation débit solide-débit liquide nous a montré que, l'automne et l'hiver se distinguent par un flux important de matières solides en suspension. Cependant, elle diminue en printemps à cause de la végétation existante dans cette saison. En été, une absence totale du transport solide est remarquée, ceci est dû essentiellement, aux faibles débits liquides ou à l'absence d'écoulement.

L'étude de l'état d'envasement du barrage de Sidi Yacoub, a montré que l'évolution du profil des dépôts des sédiments dans la cuvette suit une forme puissance. L'envasement du barrage a provoqué une réduction importante de la capacité de stockage des eaux, depuis 2004 jusqu'à 2010 ou le taux d'envasement estimé a atteint une valeur de 35.97%.

En raison de l'énorme quantité de dépôt, le fond de la retenue du barrage a connu une évolution importante durant les années 2004-2017. L'extraction des levées, et l'application des méthodes d'interpolation sur ArcGis, nous a permis d'évaluer et d'identifier et les volumes d'érosion et de dépôts dans la cuvette. Nous avons constaté que, le volumes des dépôts (21.79 hm³) sont beaucoup plus importants par rapport au volume érodés (3.98 hm³). Ceci peut être interprété par l'énorme quantité des débits solides transportés vers la retenue et également, par l'accélération du phénomène d'envasement suite au processus érosif. Cependant, le volume

des sédiments érodés (13.09 hm^3) calculé durant les années (2010-2017) est plus important que le volume des sédiments déposés (3.30 hm^3). Ceci peut être expliqué par les quantités importantes des lâchers observés quotidiennement, durant la même période.

En perspective, il serait pertinent de développer cette approche méthodologique en utilisant d'autres logiciels tel que HecRas 2D ou Telemac 2D, afin de caractériser l'évolution du fond de la retenue du barrage de Sidi Yacoub, au niveau de chacune des sections (de l'oued ou de la cuvette) et d'estimer par la suite la profondeur d'érosion. Il serait aussi intéressant de généraliser cette étude pour l'ensemble des barrages situés sur le bassin versant du haut et du moyen cheliff, en introduisant plus de techniques informatiques, afin de mettre en œuvre une méthodologie consistante et validée et même de développer un logiciel qui automatise l'enchaînement de l'ensemble des étapes suivies.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Touaibia Benina, 10 & 11 Décembre 2009**-« Erosion et transport solide en Algérie septentrionale ». Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique, Blida, Algérie : 4p.
- [2] **Mehdi Houaria, 2014-2015**- « Etude des propriétés physico-chimiques des sédiments du barrage de Sidi M'hamed Benaouda (w. Relizane) en vue de leur valorisation ». Université des Sciences et de la Technologie, Oran, Algérie : 5-6p
- [3] **Chibani, R, 1999**- « Ravinement en Algérie : typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation » 122p
- [4] **Abderrazek Bouanani, 2004**- « Hydrologie, transport solide et modélisation : Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW, Algérie) ». Université ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen, Algérie : 125-126p
- [5] **Philippe Ramez, 1995**- « Gestion des milieux aquatiques, Erosion et transport solide en rivière, (Tome 1 : Guide pour la compréhension des phénomènes) » France : 27p
- [6] **Benaicha Amar Cherif, 2010-2011**-« Etude des processus des transports solide et leur impact sur l'alluvionnement des barrages ». Université HADJ LAKHEDAR, Batna, Algérie : 17p
- [7] **Mokhtari Elhadj, 2008-2009**- « Contribution à l'étude du transport solide en suspension : Bassin de l'oued Cheliff-Ghrib ». Mémoire de Magister, Université BADJI MOKHTAR, Annaba, Algérie : 37-43p
- [8] **Remini B & Bensafia. D** « Envasement des barrages dans les régions arides : exemples Algériens. Université Blida, Algérie : 65p
- [9] **Benahmed Halima, 2015**-« Valorisation des sédiments d'envasement du barrage de Kramis dans le domaine de génie civil ». Mémoire de Magister, Université d'Oran, Algérie : 17-20p
- [10] **Remini Boualem**, « L'envasement des barrages : Quelques exemples algériens ». Université de Blida, Algérie : 167-170p

[11] **Remini.W et Remini.B, 2003-** « La sédimentation dans les barrages de l’Afrique du Nord ». Université de Blida, Algérie : 52p

[12] **Serbah Boumediene, 2001-**« Etude et valorisation des sédiments du barrage Bakhada ».Mémoire de Magister, université ABOU BAKR BELKAID, Tlemcen, Algérie : 30p

[13] **DiabDjeffal Imane, 2013-**« L’envasement dans les barrages de l’Algérie ».Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie : 415p

[14] **Houari Abdelkader, 2009-**« Diversité saisonnière des assemblages phytoplanctoniques dans la retenue de barrage de Sidi-Yacoub (Chlef). Impact des facteurs biotiques et abiotiques sur l’évolution de la qualité de l’eau. ». Mémoire de Magister, université HASSIBA BEN BOUALI, Chlef, Algérie : 21p

[15] **Tebbi Fatima Zohra, 2014-**« Modélisation de la régularisation des barrages dans la région des AURÈS ». Université Hadj Lakhdar BATNA, Algérie : 88p

ANNEXES

OID	OBJECTID	Value	Count	VOLUME	AREA
0	1	1	32	11005.9633	14112

1	2	2	1	-533.9023132	441
2	3	3	3	-1518.238861	1323
3	4	4	90	-17780.5849	39690
4	5	5	9683	11313126.67	4270203
5	6	6	2	-255.2626648	882
6	7	7	489	-305559.7053	215649
7	8	8	4	-871.6640625	1764
8	9	9	1	277.118866	441
9	10	10	2	-1191.055298	882
10	11	11	1	-54.39825439	441
11	12	12	1	-406.0354614	441
12	13	13	49	-19902.74263	21609
13	14	14	1	-26.92996216	441
14	15	15	3	372.2956238	1323
15	16	16	1	-23.37025452	441
16	17	17	3	-1180.066635	1323
17	18	18	1	230.5802307	441
18	19	19	4	-2263.812561	1764
19	20	20	1	-34.58770752	441
20	21	21	3	189.2701263	1323
21	22	22	78	-67790.99831	34398
22	23	23	15	-2921.349106	6615
23	24	24	2699	-1385062.043	1190259
24	25	25	1	51.08752441	441
25	26	26	1	-130.7200012	441
26	27	27	15	-3851.247025	6615
27	28	28	1	-93.81747437	441
28	29	29	1	-36.40457153	441
29	30	30	204	-159554.1445	89964
30	31	31	1	311.7604065	441
31	32	32	787	-220131.8361	347067
32	33	33	1	-148.5185394	441
33	34	34	1	78.95283508	441
34	35	35	2	-333.1119232	882
35	36	36	37	6348.950546	16317
36	37	37	1	117.0531464	441
37	38	38	2	148.4579773	882
38	39	39	2	-123.4054413	882
39	40	40	271	-278125.9066	119511
40	41	41	1	-17.9263916	441
41	42	42	27	-3629.744385	11907
42	43	43	6	654.077774	2646
43	44	44	3	-484.2750092	1323
44	45	45	1	60.02380371	441
45	46	46	1	295.1865692	441
46	47	47	122	-72990.15656	53802
47	48	48	2	-109.9202728	882
48	49	49	2	32.11138916	882
49	50	50	1	228.0366211	441
50	51	51	421	127763.6203	185661
51	52	52	1	-107.8005981	441
52	53	53	5	439.0283661	2205
53	54	54	1	-52.89093018	441

54	55	55	3	-1180.207947	1323
55	56	56	1	4.811325073	441
56	57	57	2	-828.7726135	882
57	58	58	1	362.9959717	441
58	59	59	136	-53285.68762	59976
59	60	60	1514	1582232.735	667674
60	61	61	1	-129.3876343	441
61	62	62	4	-780.8612366	1764
62	63	63	1	-54.17619324	441
63	64	64	1	-75.74304199	441
64	65	65	4	-1151.016998	1764
65	66	66	1	2.429214478	441
66	67	67	1	-102.3634644	441
67	68	68	1	13.18235779	441
68	69	69	632	-475480.6068	278712
69	70	70	2	-40.81887817	882
70	71	71	5	-756.6161957	2205
71	72	72	1	-251.7433319	441
72	73	73	1	38.87416077	441
73	74	74	1	99.34881592	441
74	75	75	2	-187.8973846	882
75	76	76	1	8.148971558	441
76	77	77	1	-11.41259766	441
77	78	78	1	36.47859192	441
78	79	79	1	-91.75163269	441
79	80	80	1	-19.72306824	441
80	81	81	5	201.9208832	2205
81	82	82	1	-25.78601074	441
82	83	83	2	124.7647247	882
83	84	84	1	5.248718262	441
84	85	85	7	265.8677673	3087
85	86	86	1	-16.74206543	441
86	87	87	1	-25.22076416	441
87	88	88	1	-4.320098877	441
88	89	89	1	41.95610046	441
89	90	90	1	-14.09751892	441
90	91	91	4	213.4411469	1764
91	92	92	1	-51.89501953	441
92	93	93	3	-81.8598175	1323
93	94	94	1	188.6712341	441
94	95	95	6	679.8435974	2646
95	96	96	1	140.7127533	441
96	97	97	1	19.62886047	441
97	98	98	1	-9.568817139	441
98	99	99	6	-435.8791351	2646
99	100	100	1	-152.394516	441
100	101	101	1	-3.586624146	441
101	102	102	105	-10345.25734	46305
102	103	103	2	-133.3847351	882
103	104	104	1	-39.54707336	441
104	105	105	1	88.8782959	441
105	106	106	1	56.68615723	441
106	107	107	1	42.25218201	441

107	108	108	2	104.4764099	882
108	109	109	1	-5.867797852	441
109	110	110	2	423.3764191	882
110	111	111	1	-14.2724762	441
111	112	112	1	16.95739746	441
112	113	113	1	41.82151794	441
113	114	114	18	4158.976685	7938
114	115	115	1	-0.336456299	441
115	116	116	1	23.59231567	441
116	117	117	1	103.0431061	441
117	118	118	1	-64.2698822	441
118	119	119	1	-115.4179688	441
119	120	120	1	-125.8884888	441
120	121	121	1	-136.6416321	441
121	122	122	2	-154.2181091	882
122	123	123	3	-521.6754913	1323
123	124	124	1	33.3899231	441
124	125	125	1	-276.7689514	441
125	126	126	1	-152.7377014	441
126	127	127	3	-355.2978516	1323
127	128	128	1	-96.52258301	441
128	129	129	2	-119.5765686	882
129	130	130	5	-697.2047424	2205
130	131	131	1	52.82363892	441
131	132	132	2	73.17251587	882
132	133	133	1	-82.06842041	441
133	134	134	1	-23.37698364	441
134	135	135	1	-1500.15097	441
135	136	136	4	-389.3135834	1764
136	137	137	97	-56954.83777	42777
137	138	138	59	36109.47917	26019
138	139	139	3	-432.5011139	1323
139	140	140	1	-215.9309235	441
140	141	141	5	-1773.972565	2205
141	142	142	2	-564.8966675	882
142	143	143	1	-92.02752686	441
143	144	144	1	-112.1476135	441
144	145	145	1	-140.3695679	441
145	146	146	34	-21883.60217	14994
146	147	147	15	-4418.222992	6615
147	148	148	3	-877.7606506	1323
148	149	149	1	-130.2758789	441
149	150	150	2	-451.5378113	882
150	151	151	14	-6586.582901	6174
151	152	152	1	-83.80453491	441
152	153	153	1	-194.8418427	441
153	154	154	1	-92.3236084	441
154	155	155	1	-249.2535553	441
155	156	156	1	-244.5027924	441
156	157	157	1	-150.7862549	441
157	158	158	5	-1616.013062	2205
158	159	159	1	-368.9579773	441
159	160	160	16	-11853.23428	7056

160	161	161	1	-906.8439331	441
161	162	162	4	-2164.329163	1764
162	163	163	6	-1605.428146	2646
163	164	164	1	-104.7321167	441
164	165	165	2	-1189.332642	882
165	166	166	77	-66061.80808	33957
166	167	167	1	273.8888855	441
167	168	168	2	-358.9046631	882
168	169	169	1	-158.322876	441
169	170	170	5	-955.6031799	2205
170	171	171	19	-9186.279785	8379
171	172	172	1	-5.356384277	441
172	173	173	5	-5606.721222	2205
173	174	174	101	-30467.50406	44541
174	175	175	2	138.2566223	882
175	176	176	19	3919.823547	8379
176	177	177	6	-1821.991608	2646
177	178	178	7	750.5397949	3087
178	179	179	1	-637.2347717	441
179	180	180	2	-434.0959167	882
180	181	181	12	2995.470428	5292