



Mémoire de fin d'étude

En Vue de l'Obtention du Diplôme

De Master en Génie Civil

Option : Construction Hydraulique et Aménagement (C.H.A)

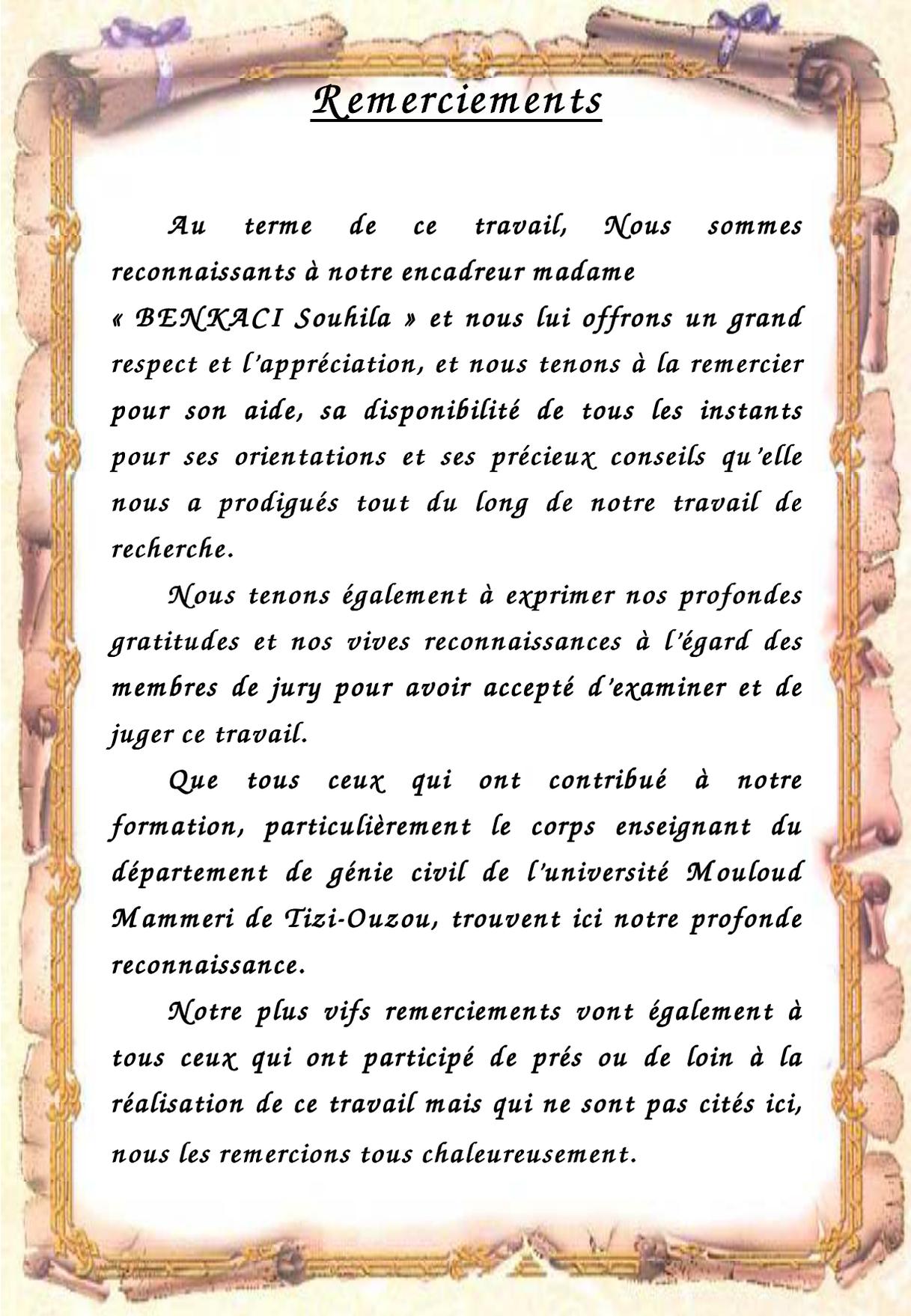
Thème :

Simulation unidimensionnelle du transport solide avec HEC-RAS 4.1.0 : Application au sous bassin de l'Oued Cheliff-Ghrib

Dirigé par : M^{lle}. BENKACI Souhila

**Réalisé par : CHERIDI Lounis
DJEBOURI Tassadit**

Promotion 2015/2016



Remerciements

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

Nous tenons également à exprimer nos profondes gratitudes et nos vives reconnaissances à l'égard des membres de jury pour avoir accepté d'examiner et de juger ce 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.

Notre 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 vous seuls «mes très chères
parents (Rabah et Malika)» tout mon
respect, que Dieu les protège et les
entoure de sa bénédiction ;*

*A ma grand mère, mes frères (Ghilass
et Mouloud), mes sœurs (Taous et
Mariem), mes amies (Dina, Samo et
Lynda) et à toute ma grande famille;*

A tous mes amis sans exception.

A la promotion de CHA 2015/2016.

A tous ceux qui me connaissent.

Tassadit.

Dédicaces

J'ai l'honneur de dédier ce travail :

À Mon Père : Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait votre âme dans sa sainte miséricorde.

A ma mère : Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez Depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagnera toujours.

A mes frères et sœur : Mehdi, Ali, David et Zehwa ainsi que mes deux belle sœur Mezhoura et Nabila en témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous remercie beaucoup.

A tous mes proches (Hacen, Mohand, Youcef, ouramdhan, Bouzid, Leila, flora, Youhan, Rayan, Neil, Zahra) mes amis sans exception.

A tous mes amis sans exception.

A la promotion de CHA 2015/2016.

A tous ceux qui me connaissent.

Lounis

Abréviations

A : surface du bassin versant [km]

AEP : alimentation en eau potable

ANRH : Agence national des ressources hydrauliques

ETH: Eidgenössische Technische Hochschule (laboratoire à Zürich en Suisse)

Ct : Coefficient de torrentialité

Dd : Densité de drainage

DEM : digital élévation model (model d'élévation digital)

Ds : Dénivelée spécifique

ESRI: Environmental Systems Research Institute

HEC RAS: Hydrologic Engineering Centers River Analysis System

Hm³ : hecto mètre cube

Hmax : altitude maximale

Hmin : altitude minimale

Hmed : altitude médiane

Hmoy: altitude moyenne du bassin

Ig : Indice de pente global

Imoy : Indice de pente moyenne

Ip : Indice de pente de roche

IRR : irrigation

GPS : Global Positioning System (système de géo-localisation)

GIS: Geographical Information System (=SIG)

Kc : indice de compacité de Gravélius

Km: Kilomètre

KMZ: Keyhole Markup Language Zipped

L: Longueur du rectangle équivalent.

l : Largeur du rectangle équivalent

LOB : Left Over banks (partie gauche de la plaine)

m : mètre

MNT: Modèle numérique de terrain

Moy : moyenne

M.P.M: Meyer-Peter-Müller

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index (indice de végétation de la différence normalisée)

O.N.M : Office National de la Météorologie

O.R.S.T.O.M : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer

P : périmètre du bassin [km]

ROB : Right Over banks (partie droite de la plaine)

SBV : sous bassin versant

SIG : systèmes d'information géographique

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

Tc: Temps de concentration

TIN: Réseau Triangulaires Irréguliers (Triangular Irregular Network)

U.S.L.E : Universal Soil Loss Equation (Equation universelle de perte de sol)

Liste des figures

FIGURE 1.1 : STRUCTURES LINEAIRES ET SURFACIQUES	5
FIGURE 1.2 : DIFFERENTS TYPES DE TRANSPORT SOLIDE EN RIVIERE.....	7
FIGURE 1.3 : EQUILIBRE D'UN GRAIN POSE SUR LE FOND D'UN CANAL.....	9
FIGURE 1.4 : PARTICULES TRANSPORTEES PAR L'OUED CHELIFF - GHRIB	10
FIGURE 1.5 : TRANSPORT SOLIDE AVEC DEFORMATION DU FOND.....	11
FIGURE 1.6 : SUBSTRAT DES RIVIERES A GRAVIER	12
FIGURE 1.7 : DIAGRAMME DE SHIELDS.....	13
FIGURE 1.8 : DEBIT ET CHAMP DES VITESSES A TRAVERS UNE SECTION.....	15
FIGURE 1.9 : EPURE DES DEBITS SOLIDES ELEMENTAIRES	16
FIGURE 1.10 : BLOCAGE DU TRANSPORT SOLIDE APRES ENVASEMENT PAR UNE DIGUE DE BARRAGE.....	18
FIGURE 2.1 : SITUATION DU BASSIN HYDROGRAPHIQUE CHELIFF-GHRIB	21
FIGURE 2.2 : IMAGE SATELLITAIRE DU SOUS BASSIN CHELIFF-GHRIB.	22
FIGURE 2.3 : IMAGE SATELLITAIRE DU BARRAGE GHRIB	23
FIGURE 2.4 : ETAT MENSUEL DES RESERVES DU BARRAGE	23
FIGURE 2.5 : CARTE ALTIMETRIQUE DE SOUS BASSIN CHELIFF-GHRIB	24
FIGURE 2.6 : MODEL NUMERIQUE DE TERRAIN EN 3D DU SBV. CHELIFF-GHRIB.	24
FIGURE 2.7 : COURBES HYPOMETRIQUE D'APRES STRAHLER	27
FIGURE 2.8 : LA COURBE HYPOMETRIQUE	27
FIGURE 2.9 : RECTANGLE EQUIVALENT CORRESPONDANT AU SOUS BASSIN CHELIFF- GHRIB.....	29
FIGURE 2.10 : RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE SOUS BASSIN CHELIFF-GHRIB	33
FIGURE 2.11 : CARTE DES ISOHYETES DE SOUS BASSIN CHELIFF-GHRIB.....	33
FIGURE 2.12 : VARIATION D'EVAPOTRANSPIRATION DE SOUS BASSIN CHELIFF-GHRI.	37
FIGURE 2.13 : VARIATION MENSUELLES DES TEMPERATURES.....	38
FIGURE 3.1 : DIAGRAMME METHODOLOGIQUE DU TRAVAIL.....	40
FIGURE 3.2 : EXTENSION HEC-GEORAS SUR L'INTERFACE ARCMAP.....	42
FIGURE 3.3 : INTERFACE DU LOGICIEL HEC-RAS 4.1.0	43
FIGURE 3.4 : MNT DE LA REGION D'ETUDE.....	44
FIGURE 3.5 : TIN DE LA REGION D'ETUDE.....	45
FIGURE 4.1 : TOPOLOGIE SIMPLIFIEE DU MODELE HEC-RAS	47
FIGURE 4.2 : MODELE D'EVOLUTION DU LIT SEDIMENTAIRE	55
FIGURE 4.3 : DIAGRAMME METHODOLOGIQUE DE LA SIMULATION SUR HEC-RAS.....	56
FIGURE 4.4 : IMPORTATION DE LA GEOMETRIE DU TRONCON MODELISEE SUR HEC- RAS	57
FIGURE 4.5 : FENETRE D'UNE SECTION TRANSVERSALE AU NIVEAU DE LA STATION 35000.....	58
FIGURE 4.6 : PROFIL EN LONG DES DIFFERENTES STATIONS.	58
FIGURE 4.7 : ENTREE DES DONNEES DE LA SERIE DES DEBIT LIQUIDE SUR HEC-RAS. .	61
FIGURE 4.8 : HYDROGRAMME DE LA SERIE DES DEBITS LIQUIDES DONNEE SOUS HEC- RAS	61
FIGURE 4.9 : FENETRE DES PROPRIETES DES SEDIMENTS SUR HEC-RAS	62
FIGURE 4.10 : GRADATION DU LIT.....	64
FIGURE 4.11 : FENÊTRE DES DONNEES DES SEDIMENTS.....	65
FIGURE 4.12 : CONDITIONS AUS LIMITES	66

FIGURE 4.13 : INTRODUCTION DES DONNEES DE LA SERIE DES DEBIT SOLIDES EN HEC-RAS	67
FIGURE 4.14 : VARIATION DU TRANSPORT DES SEDIMENTS DURANT L'ANNEE 1992....	67
FIGURE 4.15 : ANALYSE DU TRANSPORT DES SEDIMENTS ET EXECUTION	68
FIGURE 4.16 : FENÊTRE DE LA PROGRESSION DE LA SIMULATION.....	69
FIGURE 5.1 : COMPARAISON DU NOMBRE DE FROUDE OBTENU POUR LE DEBIT DE CRUE ET LE DEBIT D'ETIAGE	72
FIGURE 5.2 : COMPARAISON DE LA VITESSE ENTRE LE DEBIT DE CRUE ET LE DEBIT D'ETIAGE EN HEC RAS	73
FIGURE 5.3 : COMPARAISON DE LA SURFACE D'EAU ENTRE LE DEBIT DE CRUE ET LE DEBIT D'ETIAGE.....	73
FIGURE 5.4 : COMPARAISON DE LA SURFACE D'EAU ENTRE LE DEBIT DE CRUE ET LE DEBIT D'ETIAGE AU NIVEAU DE LA STATION 35000	74
FIGURE 5.5 : FENETRE DU PLAN DE PROFIL DES ALTITUDES DES HAUTEURS EN HEC RAS.	75
FIGURE 5.6 : VUE EN 3D DES RESULTATS DE LA SIMULATION.....	75
FIGURE 5.7 : AFFICHAGE ET VISUALISATION DES RESULTATS DE LA SIMULATION DU TRANSPORT DES SEDIMENTS.....	76
FIGURE 5.8 : LA MASSE TOTALE DES SEDIMENTS DANS LES DIFFERENTES STATIONS EN FENCTION DU TEMPS	77
FIGURE 5.9 : CHANGEMENT DU FOND DU LIT AU NIVEAU DES DEUX STATIONS SITUEES JUSTE AVANT L'ENTREE DE LA RETENUE	80
FIGURE 5.10 : CHANGEMENT DU FOND DU LIT AU NIVEAU DES DEUX STATIONS SITUEES DANS LA RETENUE DU BARRAGE GHRIB	81
FIGURE 5.11 : CHANGEMENT DU FOND DU LIT AU NIVEAU DE LA STATION AVAL.	83
FIGURE 5.12 : PRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA PROFONDEUR D'EROSION ET DU DEPÔT AU NIVEAU DE CHAQUE STATION	83
FIGURE 5.13 : CHANGEMENT DU FOND DU LIT SUR UNE PERIODE DE 5 ANS.....	85

Liste des tableaux

<i>TABLEAU 2.1 : CARACTERISTIQUES DU BARRAGE GHRIB.....</i>	<i>22</i>
<i>TABLEAU 2.2: LA SUPERFICIE ET LE PERIMETRE DE SOUS BASSIN CHELIFF-GHRIB</i>	<i>25</i>
<i>TABLEAU 2.3 : REPARTITION ALTIMETRIQUE DU SOUS BASSIN CHELIFF-GHRIB.....</i>	<i>26</i>
<i>TABLEAU 2.4 : POURCENTAGES DES SURFACES ET ECARTEMENTS ENTRE LES COURBES DE NIVEAU</i>	<i>29</i>
<i>TABLEAU 2.5: VARIATIONS DE L'INDICE DE PENTE GLOBAL SELON L'O.R.S.T.O.M.....</i>	<i>30</i>
<i>TABLEAU 2.6 : VARIATIONS DE LA DENIVELEE SPECIFIQUE SELON L'O.R.S.T.O.M.....</i>	<i>32</i>
<i>TABLEAU 2.7 : TABLEAU RECAPITULATIF D'ETUDE PHYSIOGRAPHIQUE.....</i>	<i>35</i>
<i>TABLEAU 2.8 : DONNEES PLUVIOMETRIQUES MOYENNE INTERANNUELLE DE L'ANRH.....</i>	<i>35</i>
<i>TABLEAU 2.9 : EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLES MOYENNES MENSUELLES</i>	<i>36</i>
<i>TABLEAU 2.10 : TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES (C°) DE L'ANNEE 2009</i>	<i>37</i>
<i>TABLEAU 4.1 : DOMAINE DE VALIDITE DES FORMULES DE TRANSPORT</i>	<i>47</i>
<i>TABLEAU 4.2 : DOMAINE DE VALIDITE DES FORMULES DE LA VITESSE</i>	<i>53</i>
<i>TABLEAU 4.3 : VALEURS ESTIMEES POUR LE COEFFICIENT DE MANNING EN FONCTION DE LA NATURE DES PAROIS</i>	<i>60</i>
<i>TABLEAU 4.4: LES CLASSES DES GRAINS UTILISES PAR DEFAUT SUR HEC RAS.</i>	<i>63</i>
<i>TABLEAU 4.5 : RESULTATS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE.</i>	<i>64</i>
<i>TABLEAU 5.1 : PRINCIPAUX PARAMETRES HYDRAULIQUES POUR L'ENSEMBLE DES SECTION.....</i>	<i>71</i>
<i>TABLEAU 5.2 : LA MASSE TOTALE DES SEDIMENTS DANS LES STATIONS EN FONCTION DU TEMPS.....</i>	<i>79</i>
<i>TABLEAU 5.3 : DEPOT ET EROSION AU NIVEAU DES DIFFENTES STATIONS</i>	<i>84</i>

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1. GENERALITES	3
1.1. INTRODUCTION.....	3
1.2. L'EROSION.....	3
1.2.1. Définition.....	3
1.2.2. Types d'érosion	3
1.2.3. Evaluation de l'érosion et modélisation du transfert des sédiments	5
1.3. TRANSPORT SOLIDE	7
1.3.1. Définition.....	7
1.3.2. Différents types de transport solide	7
1.3.3. Mécanisme au niveau de substrat	10
1.3.4. Les facteurs de transport solide	12
1.3.5. Quantification du transport solide	13
1.3.6. Conséquences du transport solide.....	17
1.4. L'ENVAISEMENT	18
1.4.1. Calcul du volume de la vase (Formule de Taylor).....	19
1.5. CONCLUSION	20
CHAPITRE 2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	21
2.1. INTRODUCTION.....	21
2.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE	21
2.3. LE RELIEF.....	23
2.4. CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES	24
2.4.1. Caractéristiques géométriques.....	25
2.4.2. Caractéristiques de forme	25
2.5. CARACTERISTIQUES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE	33
2.5.1. Densité de drainage.....	33
2.5.2. Coefficient de torrentialité.....	34
2.5.3. Temps de concentration.....	34
2.6. GEOLOGIE DU SITE.....	34
2.7. CLIMAT DE LA REGION D'ETUDE.....	35
2.7.1. La pluviométrie.....	35
2.7.2. La carte des isohyètes	35
2.7.3. L'évapotranspiration.....	36
2.7.4. La température	37

2.8. CONCLUSION	38
CHAPITRE 3. MATERIELS ET METHODES.....	39
3.1. INTRODUCTION.....	39
3.2. METHODOLOGIE DE TRAVAIL	39
3.3. MATERIELS.....	40
3.3.1. Logiciels utilisés	40
3.3.2. Données cartographiques.....	43
3.3.3. Données Topographiques	44
3.4. CONCLUSION	45
CHAPITRE 4. MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE.....	46
SOUS HEC-RAS.....	46
4.1. INTRODUCTION.....	46
4.2. HEC RAS	46
4.2.1. Présentation du logiciel.....	46
4.2.2. Fonctions du transport sédimentaire	47
4.2.3. Vitesse de sédimentation	52
4.2.4. Fonctions d'évolution du lit sédimentaire	54
4.3. ETAPES DE MODELISATION	55
4.3.1. Organigramme de travail	55
4.3.2. Les paramètres d'entrée.....	56
4.4. SIMULATION DU TRANSPORT DES SEDIMENTS	68
4.5. CONCLUSION	69
CHAPITRE 5. RESULTATS ET DISCUSSIONS	70
5.1. INTRODUCTION.....	70
5.2. VISUALISATION ET DISCUSSION DES RESULTATS DE LA SIMULATION	70
5.2.1. Sur le plan hydraulique.....	70
5.2.2. Sur le plan du transport sédimentaire	76
5.3. CONCLUSION	86
CONCLUSION GENERALE	87
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	90
ANNEXES	93
Annexe 1 : Les vitesses de chute de Toffaleti	93
Annexe 2 : Données géométriques et formes des sections transversales	93
Annexe 3 : Données fournis par l'ANRH pour l'année d'observation 1992-1993 (série de débit liquide)	94

INTRODUCTION GENERALE

Plusieurs recherches ont été entamées et axées sur le transport des sédiments en régime fluvial, aussi bien par voie théorique que par voie expérimentale, mais il n'existe pas encore une théorie générale du mécanisme et il est difficile de donner une définition universelle acceptable de la charge du fond.

Du Boys 1879 a été l'un des pionniers de cette recherche sur le charriage. Ce n'est que vers 1930 que cette recherche s'intensifie avec Meyer- Peter, Einstein ; 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 lit d'oued non régulières.

Actuellement, il y a un cumul de dépôt de vase de plus de 650 106 m³ dans plus de 110 barrages algériens. Plusieurs techniques de lutte contre ce phénomène ont été expérimentées dans de nombreux sites, mais sans avoir de bons résultats. Cet échec est dû surtout à la non-maîtrise du mécanisme de l'envasement et à la quantité de matériaux solides transportée dans les cours d'eau et plus particulièrement la fraction solide entrante dans les retenues.

Devant l'importance de ce problème et le manque de données, la quantification du transport solide s'avère indispensable. C'est dans ce sens que s'inscrit notre étude, où le bassin versant du Chélif a été choisi pour application. Ce bassin est considéré comme le plus grand et l'un des plus érodé en Algérie. Il est confronté à un grave problème de dégradation du sol et du transport solide qui provoque l'envasement de la plupart des barrages, en particulier le barrage Ghrib où le taux d'envasement atteint 48%.

Au début, l'objectif tracé était l'évaluation du transport solide sur ce bassin, par la suite, il s'est avéré plus intéressant d'avoir recours à la modélisation mathématique qui est de plus en plus adopté pour simuler et comprendre les phénomènes hydrologiques et hydrauliques. Donc, on s'est orienté vers l'objectif d'une simulation unidimensionnel du transport des sédiments avec le logiciel HEC-RAS, afin d'étudier et d'évaluer ce phénomène d'une manière plus détaillée.

La méthodologie suivie dans le cadre de ce travail repose sur cinq 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, morpho-métriques et hydrographiques ont été étudiées.

Dans le troisième chapitre, nous avons exposé notre démarche suivie pour l'élaboration du projet, en définissant l'ensemble des outils, logiciels et documents cartographiques utilisés.

Les étapes essentielles du début jusqu'à la fin de la simulation, ont été développées et détaillées au quatrième chapitre, avec l'explication des différents paramètres d'entrée et des conditions limites, qui sont indispensables pour l'application des différentes fonctions gérées par le logiciel HEC RAS.

Vers la fin, nous avons réussi la simulation, les résultats obtenus sont affichés en tant que fichiers graphiques ou sous forme des tables. Ces résultats sont discutés et interprétés au dernier chapitre, le cinquième de ce présent mémoire.

CHAPITRE 1. GENERALITES

1.1. INTRODUCTION

L'étude de l'érosion et du transport solide de sédiments, à l'échelle du bassin versant, fait intervenir un grand nombre de disciplines et de compétences dans des domaines qui regroupent à la fois les hydrologues, les géomorphologues, les agronomes, et les hydrauliciens. C'est des phénomènes très complexes dont la conséquence directe est l'envasement des barrages.

L'estimation du taux de sédimentation des retenues et des transports solides au niveau des bassins versants nécessite une bonne connaissance des apports solides. Ces derniers dépendent aussi bien des contraintes topographiques et granulométriques imposées au fond des vallées que de la nature et du volume des apports liquides et solides fournis au réseau d'écoulement.

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

1.2. L'EROSION

1.2.1. Définition

L'érosion se définit comme étant le mécanisme par lequel une particule de sol est détachée et déplacée de son point d'origine. C'est un phénomène tout à fait naturel causé par tout agent externe. Ce phénomène complexe, est très répandu dans la zone méditerranéenne, il touche particulièrement les pays du Maghreb arabe dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol.

1.2.2. Types d'érosion

Les processus d'arrachement et de transit de particules solides sont différents. Ceci nous amène à distinguer deux types d'érosion : l'érosion aréolaire et l'érosion linéaire.

1.2.2.1. L'érosion aréolaire (érosion de surface)

C'est l'érosion qui s'exerce sur l'ensemble des surfaces larges, et qui donne, par aplanissement des surfaces d'érosion, les interfluves (par opposition à l'érosion linéaire). Elle représente la réponse des mécanismes complexes ou les facteurs de production et de transfert sont intimement liés. Elle dépend des caractéristiques des pluies, mais aussi des

caractéristiques du sol (granulométrie, humidité, teneur en matières organiques) et des caractéristiques de la surface (inclinaison, longueur et forme de la pente, rugosité et couverture végétale) ; elle est donc difficile à mesurer globalement.

Le produit de l'érosion aréolaire est transféré directement dans le réseau hydrographique représente un certain débit solide relié aux variables agronomiques, pédologiques et climatiques du bassin versant, constitué de particules très fines, cohésives et éventuellement porteuses de polluants chimiques ou organiques, et dont la valeur est limitée par un coefficient de restitution dépendant des conditions locales et de l'intensité des événements.

1.2.2.2. L'érosion linéaire

Elle apparaît dans les dépressions naturelles, c'est-à-dire à travers le réseau hydrographique. Cette érosion contrôle l'évolution de tous les chenaux qu'elle rencontre et assure la continuité du transfert des sédiments produits dans tout le bassin versant jusqu'à la mer. L'écoulement liquide est concentré dans le lit des talwegs et persiste même après l'arrêt de la pluie.

Les paramètres hydrauliques (vitesse et tirant d'eau) de cet écoulement sont définis grâce aux lois de frottements, à partir de la valeur du débit liquide (obtenue par transformation des pluies en débits), de sa concentration en éléments fins, des caractéristiques géométriques du lit et des caractéristiques granulométriques des matériaux en place. La connaissance de ces paramètres permet de déterminer la force tractrice qui agit sur les grains de substrat et qui représente l'ensemble des forces érosives. Ces forces, considérablement supérieures à celles qui contrôlent l'érosion aréolaire, permettent de mobiliser des gains de diamètre élevé.

La capacité des chenaux à gérer les sédiments de leur substrat, qui dépend du volume et des caractéristiques des apports liquides et solides provenant de l'amont, est limitée par les lois de la dynamique fluviale.

On distingue les structures linéaires, des structures surfaciques, ainsi que les modes de passage d'une structure à une autre dans la figure ci-après :

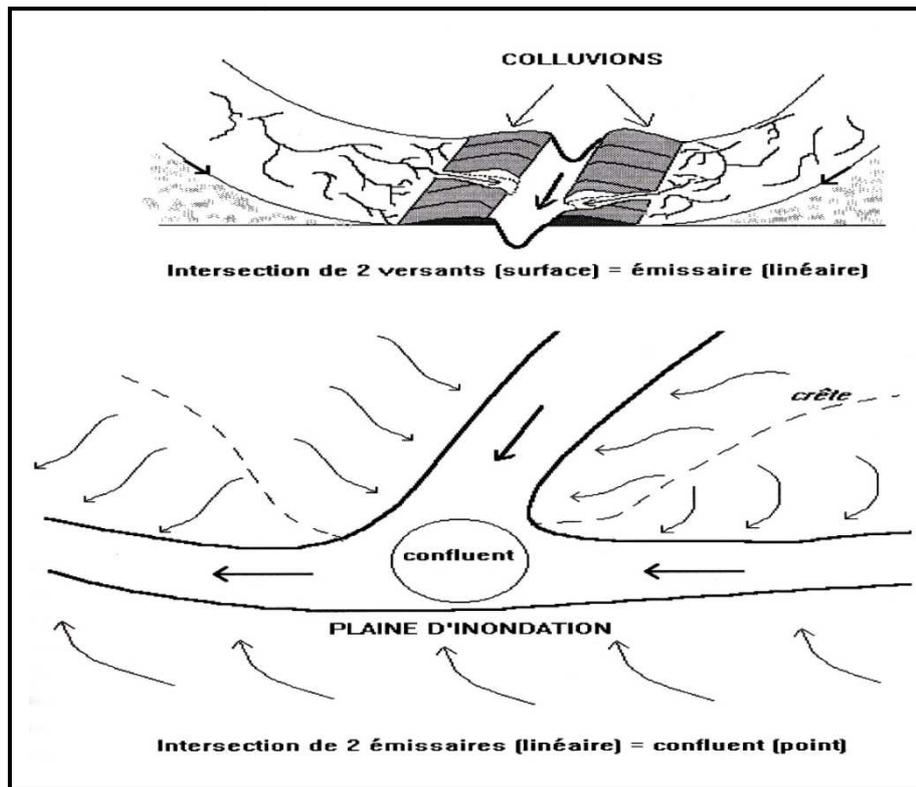


Figure 1.1: Structures linéaires et surfaciques

1.2.3. Evaluation de l'érosion et modélisation du transfert des sédiments

L'analyse des phénomènes d'érosion, à l'échelle du bassin versant, nous a permis de distinguer les fines, arrachées à la parcelle sous l'action directe des gouttes des pluies puis véhiculées par les écoulement en nappe et les écoulements diffus jusqu'au premier talweg du réseau hydrographique, des gains plus grossier, mobilisés uniquement dans les chenaux ou l'écoulement est suffisamment concentré. Au niveau de chaque émissaire, nous avons également distingué deux modes de transport solide :

- d'une part le débit en matériaux du lit, dont la valeur est limitée par les lois d'évolution des lits et qui dépend des caractéristiques géométriques, granulométriques et hydrauliques des chenaux.
- d'autre part le débit des fines maintenues en suspension, en partie lié aux variables climatiques, agronomiques et pédologiques du bassin versant, dont la valeur n'est à priori pas limitée par ces lois d'évolution, mais qui peut les modifier pendant les événements de crue.

Les mécanismes de production et de transfert de tous les sédiments du bassin versant interagissent dans des proportions qui dépendent de l'échelle spatiale et de l'intensité des événements considérés. En particulier, l'application d'une modélisation purement mécaniste à

toutes les ramifications du réseau, conduirait inévitablement à un traitement de toutes les discontinuités et deviendrait vite d'une complexité insurmontable.

Ceci dit, il n'existe pas de formule universelle permettant d'estimer les débits solides provenant directement de l'érosion aréolaire et véhiculés dans les émissaires, tout au moins à notre connaissances. Et même si il est possible d'établir une relation entre la pluie et le volume de terre qui transite en un point grâce à des mesures in-situ, les résultats obtenus ne seront représentatifs que du site choisi [1].

Par contre, si nous admettons que la production et le transfert de fines sont essentiellement contrôlés par les variables climatiques, agronomiques et pédologiques du bassin versant, nous pouvons utiliser l'équation universelle de perte de sol (USLE), basée sur une analyse statistique de ces variables.

1.2.3.1. Equation universelle de perte de sol (USLE)

Cette formule a été développée à l'Etats-Unis par Wishmeier et Smith (1960) à partir d'un grand nombre de données recueillies sur des parcelles de dimensions réduites. Elle était destinée à évaluer l'érosion en nappe et l'érosion en rigoles générées dans les grandes plaines américaines après mise en culture intensive, son champ d'application étant limité à des pentes inférieures à 18%. Elle permet d'estimer la perte moyenne annuelle des sols (notée A) et s'écrit :

$$A = r \cdot k \cdot l_s \cdot p \cdot c \quad (1.1)$$

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 mesurables et dont les ordres de grandeur, proposés par les auteurs, ne sont pas forcément applicables en dehors des sites où ils ont été calés [1].

1.3. TRANSPORT SOLIDE

1.3.1. Définition

Le transport solide est défini comme étant le transport de matériaux granulaires (matériaux alluvionnaires ou autres matériaux granulaires apportés à la rivière). Mais les cours d'eau transportent aussi d'autres matériaux solides et tout particulièrement les arbres arrachés aux berges ou au lit majeur et la glace [2].

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion. 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.

L'initiation de ce phénomène, qui peut être décomposé en deux étapes successives, l'arrachement et l'entraînement des grains, est liée 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 (forces viscosité dans le fluide environnant s'il correspond à la sous-couche laminaire). Cette tendance est, de plus, accentuée si les particules deviennent cohésives [1].

1.3.2. Différents types de transport solide

On distingue généralement, deux types de transport :

- transport solide par charriage
- transport solide en suspension

La figure suivante schématise les deux types de transport solide, rencontrés dans le bassin versant :



Figure 1.2 : Différents types de transport solide en rivière

1.3.2.1. Le transport solide par charriage

Le transport par charriage est l'un des principaux types de transport solide dans un cours d'eau, il s'alimente surtout par érosion du lit et des berges du cours d'eau. Il contribue pour une large part à la formation et à l'équilibre du lit, modelant ainsi le profil en long du cours d'eau. Les grains charriés se déplacent par à-coups à une vitesse moyenne très nettement inférieure à celle de l'eau (moins d'un mètre par heure). Lorsque la turbulence de l'écoulement est importante, les grains sont susceptibles d'être emportés par suspension malgré leur poids. Ils peuvent alors se déplacer sur de longues distances sans rejoindre le fond, avec une vitesse égale à celle de l'eau.

Le transport par charriage est très discontinu à la fois dans le temps et dans l'espace. C'est un phénomène très localisé puisqu'il est conditionné entre autres, par la pente et la constitution du lit, qui peuvent varier d'un tronçon de cours d'eau à l'autre. Par contre, pour une même section de cours d'eau, il peut être lié au débit liquide, donc, dans certaines conditions il se prête mieux à l'étude théorique et à l'élaboration de formules.

➤ 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, ils ne peuvent être mis en mouvement par l'action du fluide que si la contrainte sur le fond " τ " dépasse la valeur de la contrainte critique « τ_c »

Ce mouvement de granulats se traduira par un transport sur le fond dans le sens de l'écoulement [3].

Le schéma suivant représente les forces agissant sur un grain posé sur le fond d'un canal pour l'équilibrer :

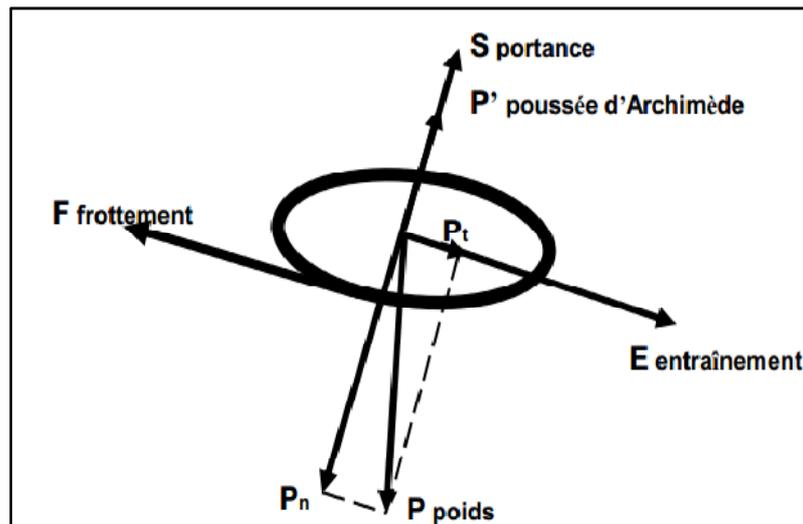


Figure 1.3: Equilibre d'un grain posé sur le fond d'un canal

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

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot J \quad (1.2)$$

Avec :

τ : La contrainte tangentielle de l'écoulement. (N/m²)

τ_{cr} : contrainte critique du début d'entraînement. (N/m²)

J : Perte de charge régulière de l'écoulement.

ρ : Poids spécifique de l'eau.

R_h : Rayon hydraulique (m)

g : Accélération de la pesanteur (m²/s)

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 de déstabilisation due à l'écoulement à la capacité de résistance au mouvement des matériaux, qui tapissent le fond.

1.3.2.2. Le transport solide en suspension

Le transport par suspension est le deuxième type de transport solide dans un cours d'eau. Il concerne principalement les matériaux produits par l'abrasion des sols. Aussi, sa détermination est très utile en agronomie, car ce sont les éléments les plus fertilisants qui sont ainsi transportés : particules fines, éléments chimiques et matières organiques. C'est un phénomène assez continu dans l'espace. Les sédiments sont transportés sur de longues distances, à la vitesse du courant mais il est très discontinu dans le temps puisqu'il est conditionné par le phénomène d'abrasion [3].

a. La saltation

C'est la partie principale de la phase de transport en suspension. C'est le mode de transport des éléments plus fins que les galets, c'est-à-dire les graviers et les sables grossiers, Les graviers sautent, progressent par bonds au fond de la rivière et occupent donc, dans la section, une certaine hauteur dépendant de la vitesse et des caractéristiques des grains. On explique l'arrêt par saltation de la façon suivante : un grain glisse sur le fond du lit, puis rencontre un obstacle, il se bute alors sur cet obstacle. La différence de pression entre l'amont et l'aval du grain augmente, il bascule, puis est arraché, entraîné par le courant et, par gravité, retombe au fond où le processus recommence.



Figure 1.4 : Particules transportées par l'Oued Cheliff - Ghrib

1.3.3. Mécanisme au niveau de substrat

Le comportement de substrat pendant le transport solide est les modifications induites dans la géométrie du lit à l'équilibre dépendent essentiellement des caractéristiques granulométrique des sédiments en mouvement. Nous pouvons ainsi distinguer deux types de cours d'eau : - les rivières à sable,

- les rivières à gravier

Les rivières à sable sont constituées de grains dont le diamètre est relativement petit et toujours inférieur à 2 mm, leur étendue granulométrique étant générale faible alors que les diamètres des grains constituant le substrat des rivières à gravier est beaucoup plus grand, il peut atteindre plusieurs décimètres, leur étendue granulométrique est toujours élevé.

Cette différence dans la constitution de substrat est le seul critère de distinction entre ces deux typologies de cour d'eau et les autres différences observables dans la géométrie où dans les mécanismes de transport solide n'en sont que des conséquences [1].

1.3.3.1. Différences des caractéristiques géométriques globales

La pente du profil en long est beaucoup plus faible pour les rivières à sable et le tracé en plan est plus rectiligne pour les rivières à gravier.

1.3.3.2. Différence du mécanisme de déformation du lit

Dans le cas des rivières à sable (figure 1.5), le transport solide est accompagné d'une déformation régulière du profil en long (ondulation du fond) et du tracé en plan (évolution des méandres, formation d'îles), ces phénomènes ayant tendance à disparaître pour les très forts transports solides (suspension intense). Dans le cas des rivières à gravier les variations de formes sont surtout liées à des discontinuités ou points durs [1].

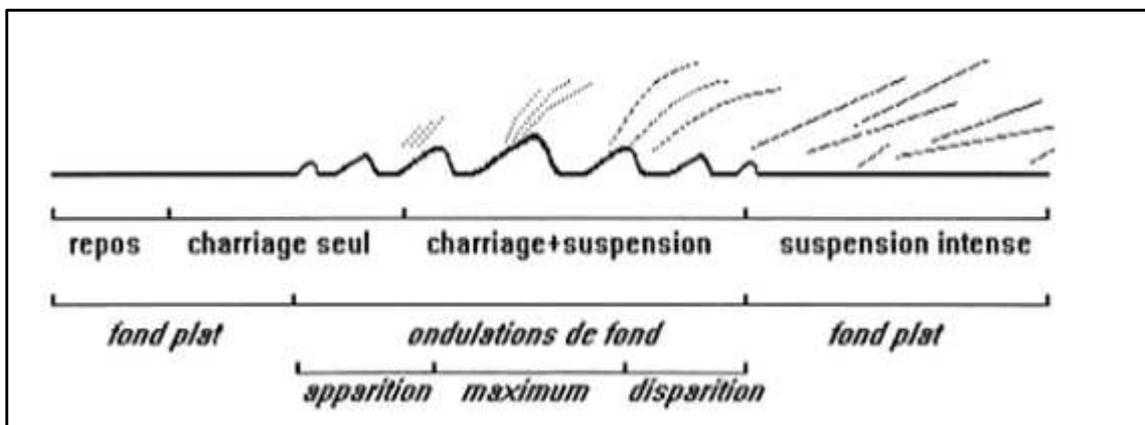


Figure 1.5: transport solide avec déformation du fond (rivières à sable)

1.3.3.3. Différence de comportement du substrat

La déstructuration du substrat des rivières à sable génère une augmentation brutale du débit solide, correspondant au passage « charriage seul puis charriage + suspension ». Ce phénomène n'apparaît pas dans le cas des rivières à gravier en raison de grosses particules, qui ont tendance à s'imbriquer dans la couche de surface (pavage). La dynamique de transport solide se fait alors par tri granulométrique : les gros grains de l'armure (couche supérieure) se déplacent par charriage, permettant ainsi à quelque grain fin de couches sous-jacentes d'être libérés et d'alimenter alors le débit solide par charriage et suspension. Donc le substrat dans son ensemble, peut être déstructuré, mais pour des fortes valeurs de la contrainte de cisaillement au fond [1].

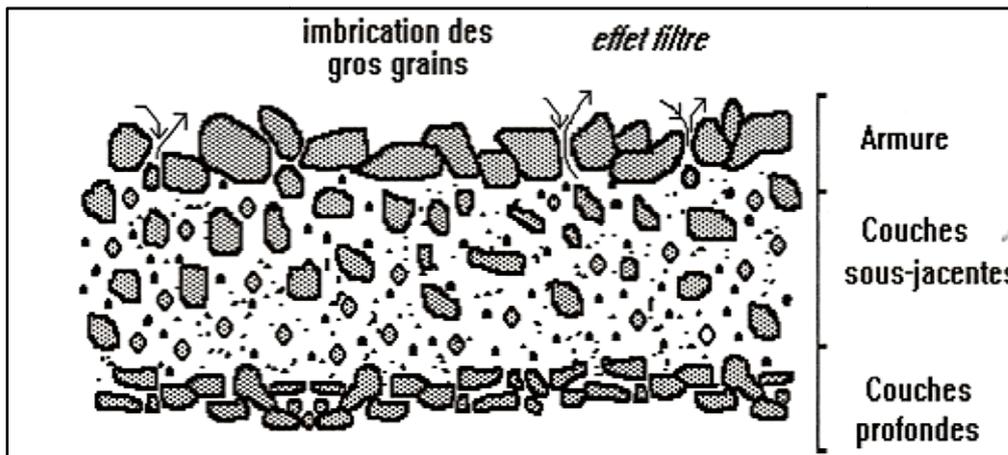


Figure 1.6: Substrat des rivières à gravier

1.3.4. Les facteurs de transport solide

1.3.4.1. Influence des caractéristiques des particules

Le mode de transport est également lié à la dimension et la taille des particules. Une partie particule, si elle est arrachée, peut rester en suspension et être transportée dans la masse de l'écoulement sur d'assez longues distances, dans la mesure où la fluctuation des vitesses verticales turbulentes (action motrice exercée par l'écoulement) générée des impulsions pouvant plus au moins compenser la vitesse de chute de grain (fonction de diamètre et de la densité de la particule). A partir d'une certaine taille de particule, et pour un écoulement donné, la mise en suspension est impossible, le cheminement des grains transportés sur le fond se fait alors par charriage, les particules roulant, glissant où sautant les uns par-dessus (saltation)

Dans le cas des sédiments cohésifs, les critères de mise en mouvement et les processus de transport solide dépendent surtout de la nature minéralogique et organique des composantes du substrat, ainsi que de la composition physico-chimique de l'eau.

1.3.4.2. Influence des conditions hydrodynamiques

Lorsque les conditions hydrodynamiques deviennent suffisantes pour générer un transport, il se fera d'abord sous la forme du charriage. Certaines particules constituant le fond se mettent alors en mouvement : elles glissent, roulent, parfois s'arrêtent, se remettent à rouler, font des petits sauts (saltation) avant de retoucher le fond, *etc.*

Lorsqu'elles deviennent plus importantes, les particules sont transportées sur la totalité de la colonne d'eau. Elles parcourent alors de grandes distances sans contact avec le fond : on parle de suspension [4].

1.3.5. Quantification du transport solide

1.3.5.1. Contrainte de Shields (1936) et seuil de mise en mouvement

La contrainte de Shields appliqué au grain de diamètre D_i et de masse volumique ρ_s , Il caractérise la contrainte de cisaillement moyenne adimensionnelle en fonction des caractéristiques des particules. Peut s'écrire sous la forme adimensionnelle suivante :

$$\tau_*(D_i) = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)D_i} = \frac{\rho g J R}{g(\rho_s - \rho)D_i} \quad (1.3)$$

Avec : τ : la contrainte de cisaillement,

τ_* : la contrainte de Shields,

ρ : la masse volumique du fluide,

ρ_s : la masse volumique des particules,

J : la pente de la ligne d'énergie égale au pente du fond au régime uniforme,

R : le rayon hydraulique,

g : l'accélération de pesanteur.

D_i : Le diamètre de grain.

Dans la suite de ce paragraphe, la contrainte critique, correspondant au seuil de mise en mouvement d'un grain de diamètre D_i sera notée : $\tau_{cr*}(D_i)$. Ce seuil de mise en mouvement peut être représenté par le diagramme de Shields (figure 1.8), dans lequel $Re_*(D_i)$ est le nombre de Reynolds du grain qui est exprimé en fonction du diamètre D_i , de la viscosité cinématique de l'eau ν et de la vitesse de frottement $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho_w} = \sqrt{gJR}$. Il s'écrit sous

$$\text{la forme : } Re_*(D_i) = u_* \frac{D_i}{\nu} \quad (1.5)$$

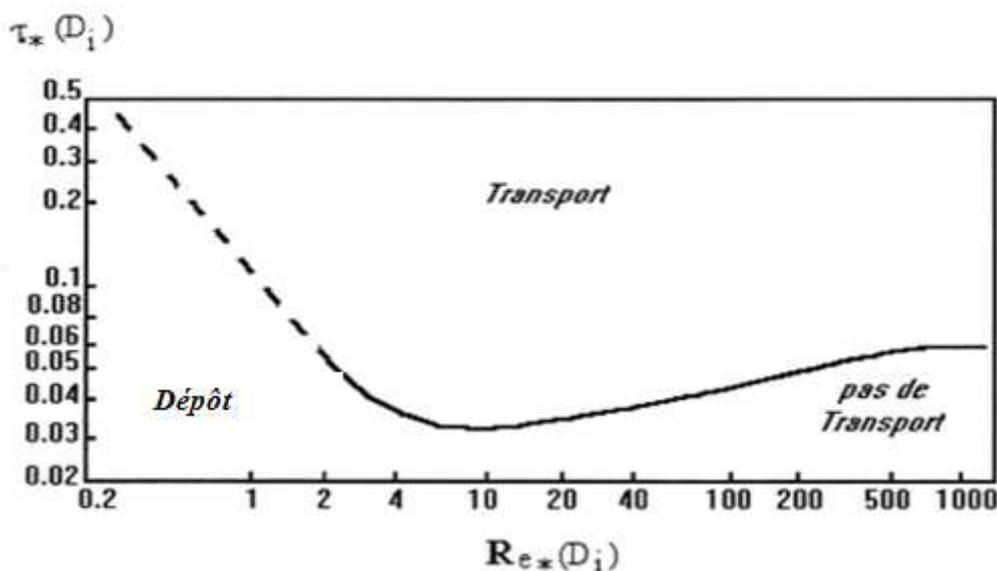


Figure 1.7: Diagramme de Shields

Ce diagramme a été construit à partir de valeurs obtenues lors d'expériences en laboratoire, pour des écoulements turbulents totalement développés sur un substrat plat constitué de matériaux non cohésifs et de granulométrie uniforme.

La forme de cette courbe a été acceptée par de nombreux chercheurs, mais la valeur de la constante $\tau_{cr*}(D_i)$, qui apparaît selon Shields lorsque $Re_*(D_i) > 500$, a été discutée par les nombreux chercheurs [1].

1.3.5.2. Estimation de la phase charriée du débit en matériaux du lit

Si les matériaux nécessaires au lit pour atteindre sa capacité de transport sont disponibles et si l'écoulement liquide est tel que le régime uniforme peut effectivement s'établir, alors nous dirons que le débit solide transite à saturation. Nous noterons q_s ce débit solide à saturation par unité de largeur (exprimé en $m^3/s/m$) et nous distinguerons les deux cas : rivière à sable, rivière à gravier [1].

Les éléments solides de la phase charriée seront supposés tels que $\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) \approx 1,6$.

A. Rivière à sable

La formule de Meyer-Peter-Müller (1948) s'écrit sous la forme :

$$q_s = 45. D_{50}^{3/2} \cdot [\alpha. \tau_{cr*}(D_i) - 0,047]^{3/2} \quad (1.6)$$

Avec : $\alpha = (K_f/K_{\text{grain}})^{3/2}$

$$K_{\text{grain}} = 21 \text{ à } 28 / D_c^{1/6} \quad (\text{où : } D_c \text{ diamètre variant entre } D_{50} \text{ et } D_{90})$$

Où : K_f est la rugosité individuelle des grains

Dans ce cas α est un paramètre adimensionnel compris entre 0,35 et 1 car la rugosité des grains est supérieur à la taille de grain individuelle, qui dépend de la part, au sein du coefficient de Strickler, de la rugosité des grains et de la rugosité du fond et la contrainte de Shields efficace rapportée au gain de diamètre médian D_{50} est égale à $\alpha. \tau_*(D_{50})$.

B. Rivières à gravier : on distingue deux cas :

Premier cas : le débit solide est exprimé par :

$$q_s = 0,01. (D_{50})^{3/2} \cdot \tau_*. (D_{50})^{3/2} \cdot e^A \quad (1.7)$$

$$\text{Avec : } A = 14,2 \left(\frac{\tau_*(D_{50})^{3/2}}{0,0876} - 1 \right) - 9,28 \left(\frac{\tau_*(D_{50})}{0,0876} - 1 \right)^2 \quad (1.8)$$

Deuxième cas : on écrit :

$$q_s = 54. D_{50}^{3/2} \cdot (\tau_*. (D_{50}) - 0,0745)^{3/2} \cdot \left(1 - \frac{0,0745}{\tau_*(D_{50})}\right)^3 \quad (1.9)$$

Dans le deuxième cas, l'armure étant détruite, nous pouvons aussi proposer une adaptation de la formule de Meyer-Peter-Müller aux rivières à gravier. En admettant $K_f=K_{\text{grain}}$ et donc $\alpha=1$, la contrainte de Shields efficace reste égale à τ_* , mais nous la rapporterons au diamètre D_{90} de l'ensemble du substrat, nous obtenons ainsi :

$$q_s = 45 \cdot D_{90}^{3/2} \cdot \left[\tau_*(D_{90}) - \frac{0,138}{\delta} \right]^{3/2} \quad (1.10)$$

1.3.5.3. Calcul du débit solide en suspension (Méthode par exploration des champs de vitesse)

La méthode consiste à considérer la section S d'un cours d'eau de largeur L , chaque verticale V peut être définie par son abscisse ℓ (distance à l'un des deux rives), et sa profondeur totale P .

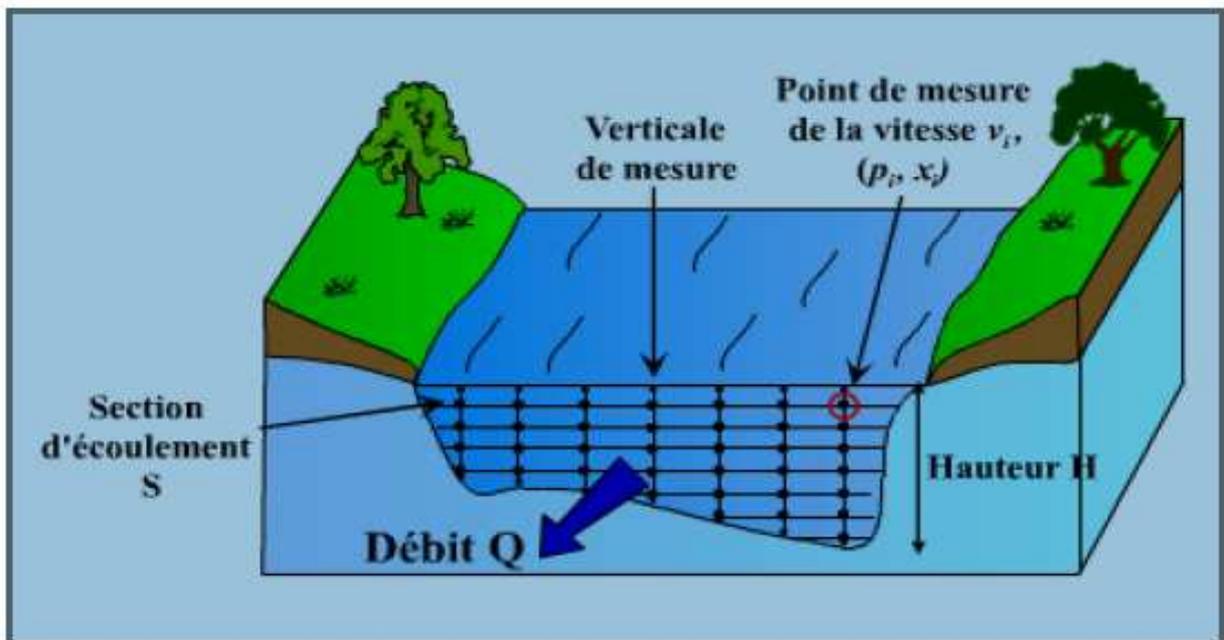


Figure 1.8 : Débit et champ des vitesses à travers une section

Si en un point d'une verticale V , situé à la profondeur p , sont mesurés à la fois la vitesse du courant v et la concentration c de matériaux en suspension ; nous traçons les épures de vitesse de chaque verticale [5] :

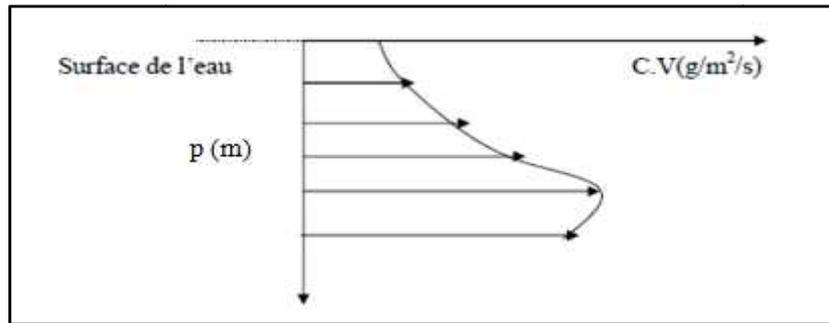


Figure 1.9 : Epure des débits solides élémentaires

Le débit solide sur la surface dS de la section S s'écrit : $q_s = c.v.ds$ Le débit solide total sur l'ensemble de la section S s'obtient par intégration :

$$Q_s = \int_0^l q_s dl = \iint_S C.V. ds = \iint_{00}^{hl} C.V. dl.dh \quad (1.11)$$

Où, Q_s représente le débit solide du cours d'eau [Kg/s] et C la concentration moyenne dans la section est définie par le rapport : $C_m = Q_s/Q_l$. dont, Q_l , étant le débit liquide total sur la section S ($Q_l = \iint_S v. ds$)

Cette méthode pour mesurer la quantité de sédiment transporté par un cours d'eau est évidemment très coûteuse. Les mesures sont donc généralement simplifiées. Elles sont surtout utiles pour valider les protocoles d'échantillonnages des réseaux de surveillances de transport en suspension [5].

1.3.5.4. Détermination de la concentration des matériaux en suspension

A. Formule d'Abalianz (1958)

La concentration des matériaux est exprimée par :

$$C = 26. \frac{U}{h^{3/4}.W} \quad (1.12)$$

Avec : C : Valeur moyenne du taux de concentration des matériaux (g/l).

U : vitesse moyenne de l'écoulement (m/s).

W : vitesse de décantation des grains dans l'eau (m/s).

H : hauteur du liquide(m).

B. Formule d'obrien (1933)

Cette formule s'appuie sur le fait que le taux de concentration dépend directement de la côte Z des points prélèvement.

$$\frac{C}{C_0} = \left[\frac{h-Z}{Z} \cdot \frac{Z_0}{h-Z_0} \right]^{W/ku^0} \quad (1.13)$$

Avec : C : taux de concentration volumique à la côte Z (g/l).

C₀ : taux de concentration volumique à la côte Z₀ (g/l).

h : hauteur du liquide (m).

K : constante universelle de Karman.

U* : vitesse moyenne de l'écoulement (m/s), exprimée par :

$$U^* = (g \cdot R_h \cdot J_f)^{1/2} \quad (1.14)$$

W : vitesse de décantation des grains (m/s), donnée par :

$$W = \frac{(\rho_s - \rho)}{18\mu} g \cdot D_{50}^2 \quad (1.15)$$

où : J : perte de charge régulière de l'écoulement ;

R_h : rayon hydraulique (m) ;

g : accélération de pesanteur (m²/s) ;

ρ : poids spécifique de l'eau ;

ρ_s : poids spécifique du solide ;

D₅₀ : diamètre moyen des grains (mm) ;

u : Vitesse au niveau d'un point de mesure en (m/s).

Cependant la formule (1.14) présente des limites d'application, elle est appliquée pour des écoulements rigoureusement uniformes et ne comptant aucune sorte de fluctuation plus au moins aléatoire de la vitesse.

1.3.6. Conséquences du transport solide

Au cours de son histoire, un cours d'eau érode, transporte et dépose des sédiments. Les morphologies anciennes et actuelles témoignent d'une suite de cycles : érosion, transport et dépôts.

1.3.6.1. Etablissement d'un grano-classement d'amont en aval d'un cours d'eau

Les diamètres des grains décroissent d'amont en aval du profil en long. Les petits diamètres sont entraînés le plus loin possible en aval et les gros diamètres sont abandonnés parfois sur le lieu même de l'érosion.

A. Dépôt selon des séquences à polarité normale

En un point donné du profil en long, si l'on effectue une coupe transversale au lit du cours du cours d'eau, on observe une séquence sédimentaire détritique (succession de dépôts alluvionnaires) à polarité normale, c'est-à-dire les plus gros diamètres retrouvent à la base de la séquence et les plus fins au sommet de la séquence conformément à la théorie de la sédimentation.

B. Disposition des dépôts

Au cours d'un cycle hydrologique, un cours d'eau affouille son lit, transporte et dépose les éléments arrachés. La succession des phases : érosion, transport et dépôt, engendre en une section transversale de ce dernier des séquences sédimentaires emboîtées (entrecroisées) et/ou étagées : Ce sont les terrasses alluviales anciennes et actuelles que l'on observe dans les vallées de ces cours d'eau [1].

1.4. L'ENVASEMENT

Tous les effets décrits précédemment sont intimement liés et leur accumulation entraîne un fonctionnement artificiel du bassin versant, dont les conséquences doivent être analysées sur le long terme, ou à la suite d'événement naturels exceptionnels. L'exemple du barrage (figure 1.11) est le plus significatif.

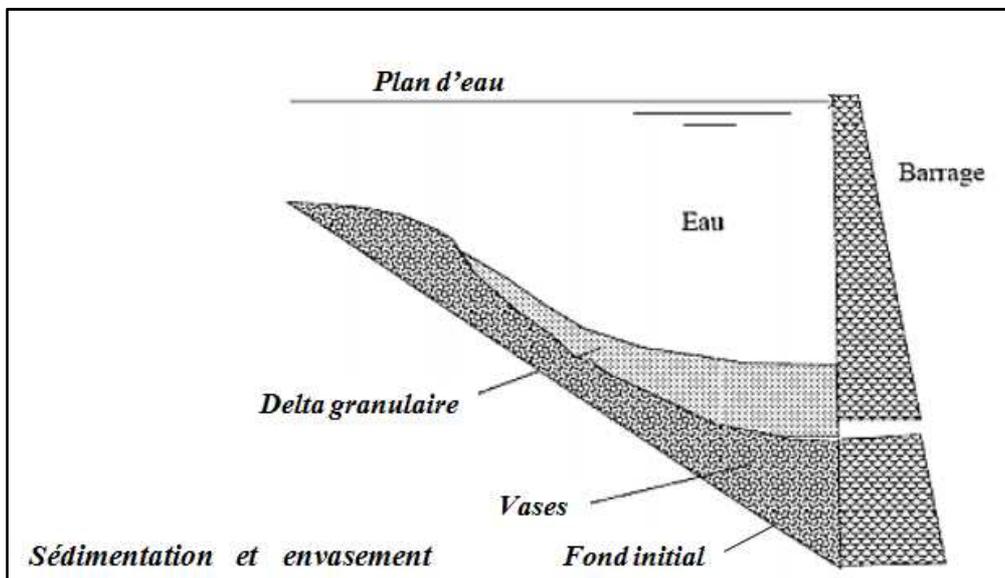


Figure 1.10 : Blocage du transport solide après sédimentation et envasement par une digue de barrage

L'envasement des barrages est la conséquence la plus dramatique de l'érosion des bassins versants et du transport solide. Il est défini comme étant le dépôt de sédiments dans les retenues et les barrages, réduisant ainsi leurs capacités de stockage.

A l'amont, il provoque un blocage des sédiments transités sur le lit, y compris une partie du débit des fines maintenues en suspension. Le développement des algues génère à son tour, une surproduction de matériaux fins et cohésifs, qui ont tendance à former des courants de densité qui apportent les vases jusqu'au barrage. Le tassement de ces vases est relativement rapide et il peut être très difficile de les remettre en suspension après quelque jour. Les modifications du comportement rhéologique sont donc considérables derrière la digue.

A l'aval, le déficit en matériaux grossiers (débit en matériaux du lit) déclenche une érosion progressive dans le lit mineur, éventuellement accompagnée des phénomènes de pavage. La restitution d'une partie de débit des fines maintenue en suspension se concentre dans cette même ligne, puis les débits liquides relâchés sont laminés. Il en résulte une augmentation de temps de MES dans le lit mineur et des difficultés de gestion de ces matériaux fins pas le lit de débordement, ou les échanges de quantité de mouvement sont fortement réduits. D'autre part, la modification du régime des écoulements agit directement sur la valeur du débit dominant et peut entraîner des fluctuations de la ligne d'eau, qui accélèrent le processus de végétalisation des bancs de dépôt et en augmente la stabilité [1].

1.4.1. Calcul du volume de la vase (Formule de Taylor)

Taylor présente le processus d'envasement des barrages selon :

- En linéarisant les grandeurs volumétriques, Taylor a représenté la capacité initiale du barrage sous forme d'une hauteur de colonne d'eau (h) ayant une base égale à 1.0 mètre carré. Taylor a obtenu par exemple la fin de la première année d'exploitation une hauteur de colonne d'eau égale à $h(1-x)$, pour la fin de la deuxième année $h(1-x)^2$ et enfin pour la fin de T années [5].

$$d = h(1 - x)^T \quad (1.16)$$

x : l'épaisseur de la couche de sédiment pour une hauteur d'une colonne d'eau unitaire,
 d : hauteur de la colonne d'eau résiduelle après l'envasement à la fin de T année.

- Connaissant la valeur de x et la hauteur initiale des charges d'eau du barrage h , on peut déterminer la hauteur d'envasement pour n'importe quelle période de temps T .

1.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence la théorie de l'érosion, le transport solide et l'envasement, qui sont des phénomènes liés et résultent l'un de l'autre. Beaucoup d'auteurs ont essayé de décrire et quantifier le transport solide suivant des principes hydrodynamiques, mais ils se sont heurtés à la complexité du phénomène.

L'érosion des sols à son tour, a pour impacts négatifs, l'envasement des barrages, elle devient une menace directe pour les réserves en eau mobilisées au niveau des barrages.

CHAPITRE 2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1. INTRODUCTION

Avant de commencer notre travail de recherche, nous avons jugé l'étude du site comme étant un élément qu'on ne peut pas omettre, afin de se rendre compte des caractéristiques du lieu et les facteurs qui peuvent bien influencer sur notre projet. En effet, le sous bassin versant Cheliff-Ghrib a été choisi comme bassin d'application suite à la disponibilité et à la diversité des données, qui permettent de donner une vision assez complète du bassin versant.

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. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le bassin versant du Chélif représente l'essentiel des ressources en eau dans la région ouest algérienne. Il consiste un enjeu majeur pour le développement agricole. Cette région hydrographique est découpée en trois grands sous bassin versant (Haut et Moyen Cheliff, Cheliff Zahrez et côtier Cheliff).

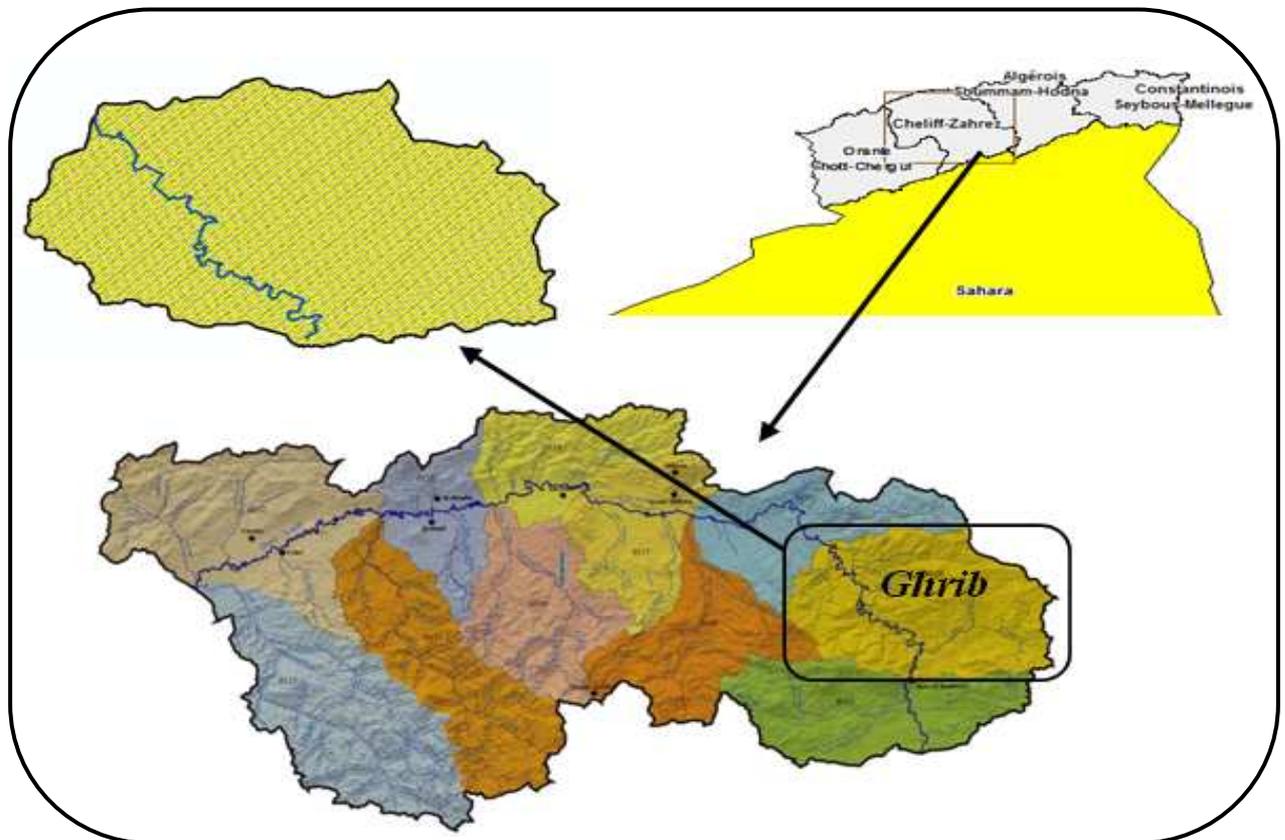


Figure 2.1 : Situation du sous bassin Cheliff-Ghrib

Le bassin versant de l'oued Cheliff Ghrif fait partie du bassin de l'oued Cheliff. Il est situé à 100 km au Sud-ouest d'Alger, entre 2°25' et 3°45' de longitude Est et entre 35°45' et 36°00' de l'altitude Nord. Il draine une superficie de 1405 Km² et un périmètre de 177.9 km². L'oued Cheliff Ghrif parcourt une distance de 69.95 km suivant une orientation Sud-est à l'Ouest du bassin versant, le relief atteint une altitude de 1284 mètres, tandis que le point le plus bas est à l'exutoire avec une altitude de 351 mètres. Sur le plan administratif le sous bassin Ghrif fait partie à deux wilayas Médéa et Aïn-Defla.

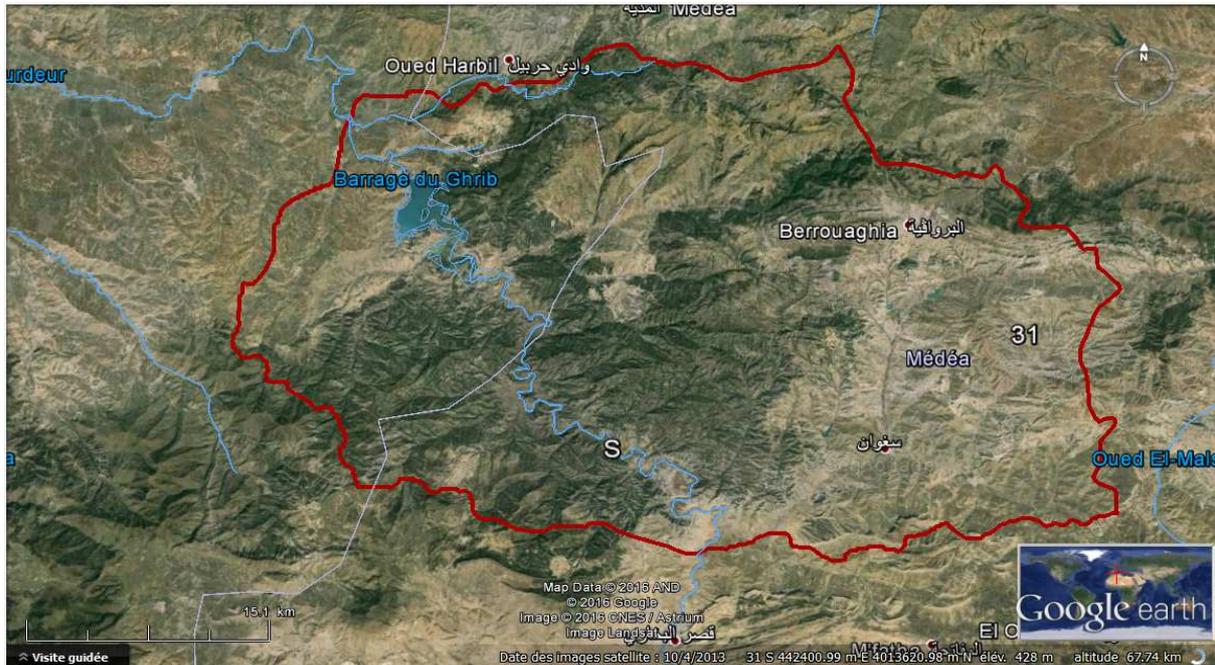


Figure 2.2 : Image satellitaire du sous bassin Cheliff-Ghrif

Le barrage Ghrif est situé dans la Wilaya de Aïn-Defla (commune d'Oued Chorfa), dans la vallée du cheliff (Figure 2.3) à 7 Km en amont du centre d'oued chorfa, à 20 Km au Sud-ouest de la ville d'Ain-Defla, à 45 Km au sud-ouest de Médéa et à 150 Km l'ouest d'Alger. Il a été mis en service en 1939 avec une capacité initiale de 280 hm³. Il est conçu pour des usages différents (AEP, irrigation). Sa capacité totale est actuellement de 116.32 Hm³.

Tableau 2.1 : Caractéristiques du barrage Ghrif

Date de mise en service	1939
Superficie du bassin versant	1 405 Km ²
Apport moyen interannuel du bassin versant	148,50 Hm ³
La capacité initiale du barrage	280 Hm ³
La capacité du dernier levé (2004)	115,30 hm ³
Volume régularisé	105,00 Hm ³ /an
Apport réel du barrage	88,56 Hm ³ (période 1990 - 2001)
Taux d'envasement	48 %



Figure 2.3 : Image satellitaire du barrage Ghib

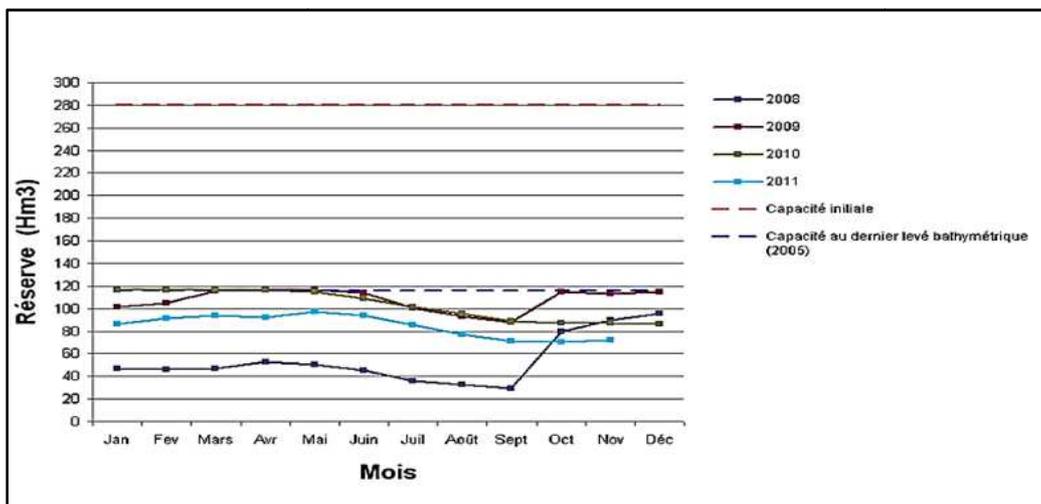


Figure 2.4 : Etat mensuel des réserves du barrage

2.3. LE RELIEF

Le sous bassin Ghib est caractérisé par un relief diversifié. Au Sud et à l'Est on retrouve des montagnes qui dépassent les 1000 m, elles peuvent atteindre jusqu'à 1284 m d'altitude. Au centre du bassin versant c'est des vallées, il est caractérisé par la plus faible altitude du bassin de 350.7 m, avec de très faibles pentes jusqu'à l'ouest, à l'endroit du barrage Ghib.

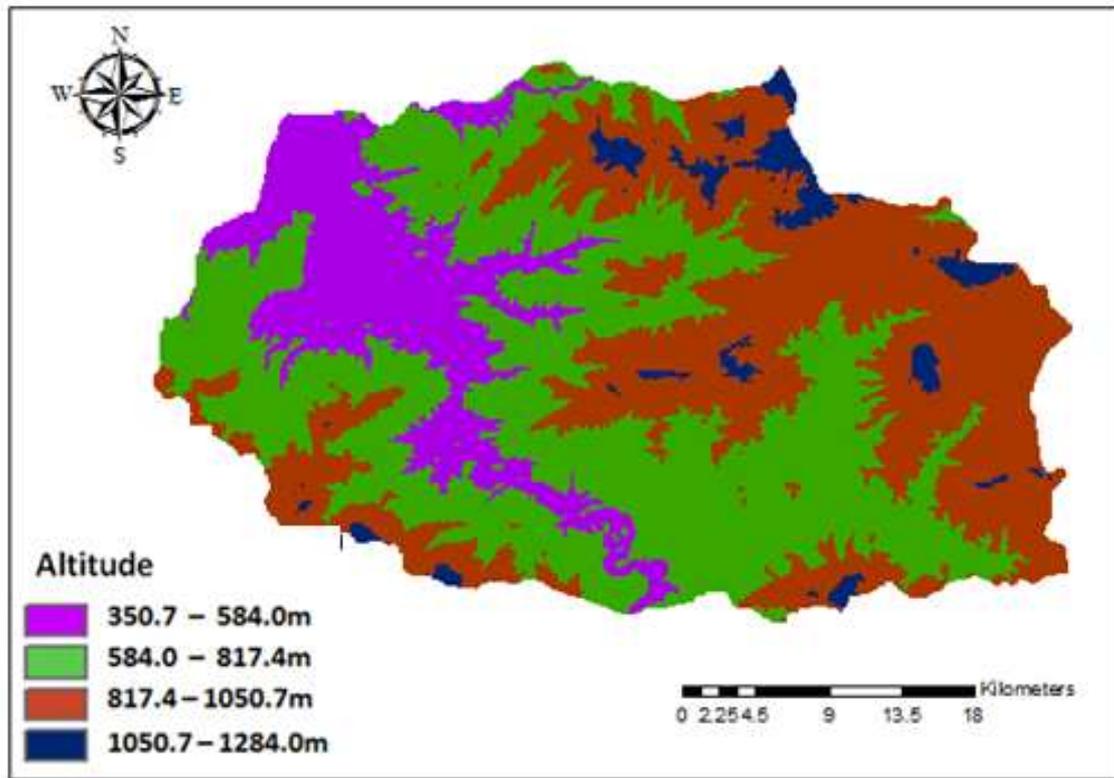


Figure 2.5 : carte altimétrique de sous bassin Cheliff-Ghrib

➤ La plaine du Cheliff

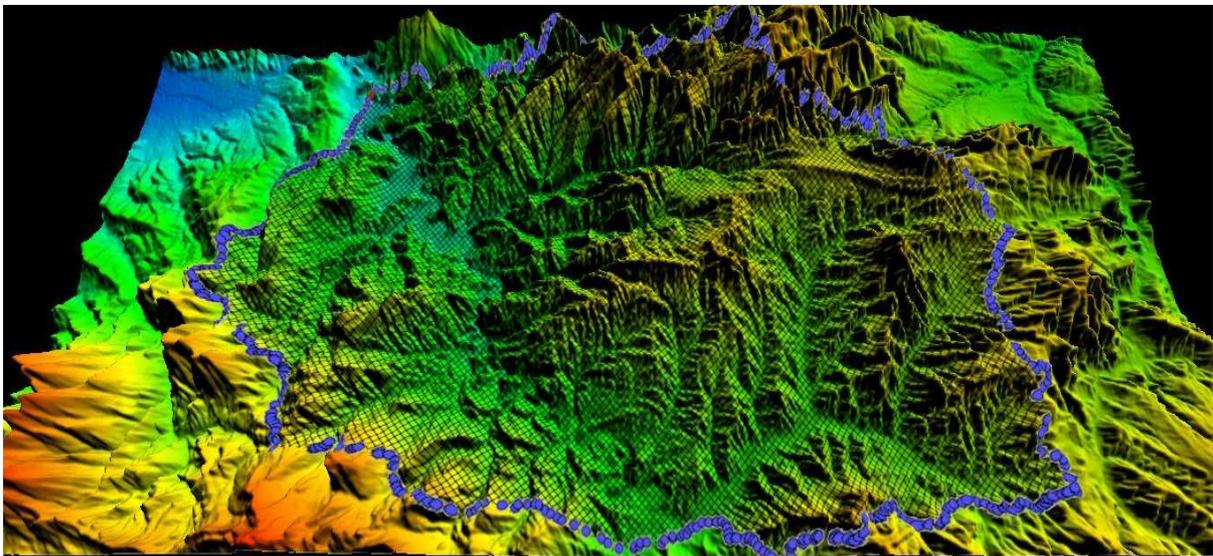


Figure 2.6 : Model numérique de terrain en 3D du SBV Cheliff-Ghrib

2.4. CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES

Le bassin versant est un objet complexe dont l'ensemble des caractéristiques (géométriques, géologique, physiographiques, humaines etc.) joueront un rôle non seulement dans la réponse hydrologique du bassin, où à une sollicitation des précipitations

(régime des écoulements) mais aussi, en amont et pour certains d'entre elles (altitude, exposition...), directement dans le processus de formation de la pluie.

2.4.1. Caractéristiques géométriques

2.4.1.1. Surface et périmètre du sous bassin Ghrib

La surface du bassin versant et le périmètre sont les premières et les plus importantes des caractéristiques. La surface s'obtient par planimétrie sur une carte topographique après que l'on y ait tracé les limites topographiques et éventuellement hydrogéologiques. Elle s'exprime généralement en km². Le périmètre représente la longueur du pourtour fermé du bassin, Il s'exprime généralement en Km. L'intérêt essentiel est de pouvoir déterminer l'indice de Gravélius (Kc) et le rectangle équivalent [6].

Les caractéristiques géométriques du sous bassin Ghrib ont été calculées avec le logiciel Mapinfo, les résultats sont mentionnés sur le tableau suivant :

Tableau 2.2: La superficie et le périmètre de sous bassin Cheliff-Ghrib

Sous bassin	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)
Ghrib	1405,00	177,9

2.4.2. Caractéristiques de forme

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

- le coefficient de compacité de Gravélius,
- la courbe hypsométrique (topographie),
- le rectangle équivalent,
- et les indices de pente.

2.4.2.1. Coefficient de Gravélius Kc (1914)

Il est défini comme étant le rapport de la surface du bassin versant au périmètre du cercle ayant même surface :

$$K_c = \frac{P}{2 * \pi * R} = \frac{P}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\frac{S}{\pi}}} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{P}{\sqrt{S}} = 0,282 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (2.1)$$

Avec :

Kc : indice de compacité de Gravélius ;

A : surface du bassin versant [km²] ; P : périmètre du bassin [km].

Ce coefficient est égal à 1 lorsque le bassin est complètement circulaire. Il est égal à 1,128 dans le cas d'un bassin carré, il peut atteindre la valeur 3 pour le bassin très allongée [6].

Pour notre bassin haut et moyen Cheliff, l'indice de compacité : $K_c = 1.338 > 1.128$ d'où le bassin à une forme allongée favorisant alors un écoulement lent des eaux de ruissellement.

2.4.2.2. Courbe hypsométrique

Le portrait le plus précis de l'élévation d'un bassin est donné par sa courbe hypsométrique. Cette courbe exprime le pourcentage de superficie du bassin en fonction de son altitude. Le tableau 2.3 ci-dessous, représente la répartition altimétrique du sous bassin Ghrib qui a été obtenue à partir du SRTM du SBV. Ghrib, à l'aide de logiciel de Global Mapper, 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 2.3 : répartition altimétrique du sous bassin Cheliff-Ghrib

Altitudes (m)	Surfaces (Km)	Surfaces %	Surfaces cumulées (Km)	Surfaces cumulées (%)	Altitudes	$A_i * H_i$
351 - 400	11.106	0.554367	2003.364	100	351	3898.206
400 - 500	100.71	5.027044	1992.258	99.44563245	400	40284
500 - 600	228.82	11.42178	1891.548	94.41858794	500	114410
600 - 700	343.38	17.140170	1662.728	82.99679938	600	206028
700 - 800	427.97	21.362568	1319.348	65.85662915	700	299579
800 - 900	425.65	21.246762	891.378	44.49406099	800	340520
900 - 1000	310.91	15.519396	465.728	23.24729804	900	279819
1000 - 1100	127.13	6.345826	154.818	7.727901669	1000	127130
1100 - 1200	25.774	1.286536	27.688	1.382075349	1100	28351.4
1200 - 1284	1.914	0.095539	1.914	0.095539303	1200	2296.8
Somme	2003.3	100	/	/	/	1442316.4

D'après Strahler, la courbe hypsométrique est un reflet de l'état d'équilibre dynamique potentiel du bassin, et il existe trois courbes (Figure 2.7) correspondant à trois bassins ayant des potentiels évolutifs différents. La courbe supérieure (A) indique un bassin avec un grand potentiel érosif (phase de non équilibre – jeunesse), la courbe intermédiaire (B) est caractéristique d'un bassin en équilibre (maturité) et la courbe inférieure (C) est typique d'un bassin sédimentaire (phase de monadnock – vieillesse) [7].

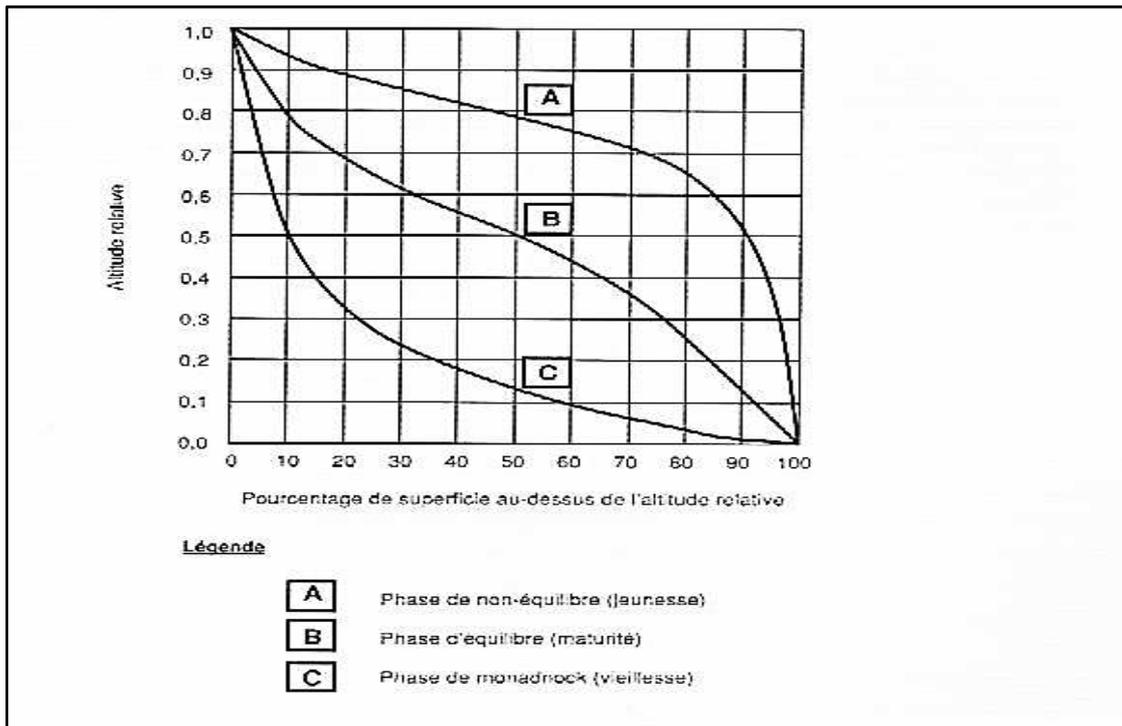


Figure 2.7 : Courbes hypsométriques d'après Strahler

La figure ci-dessous schématise notre courbe hypsométrique, elle représente les altitudes (en m) en fonction des surfaces cumulées (en %).

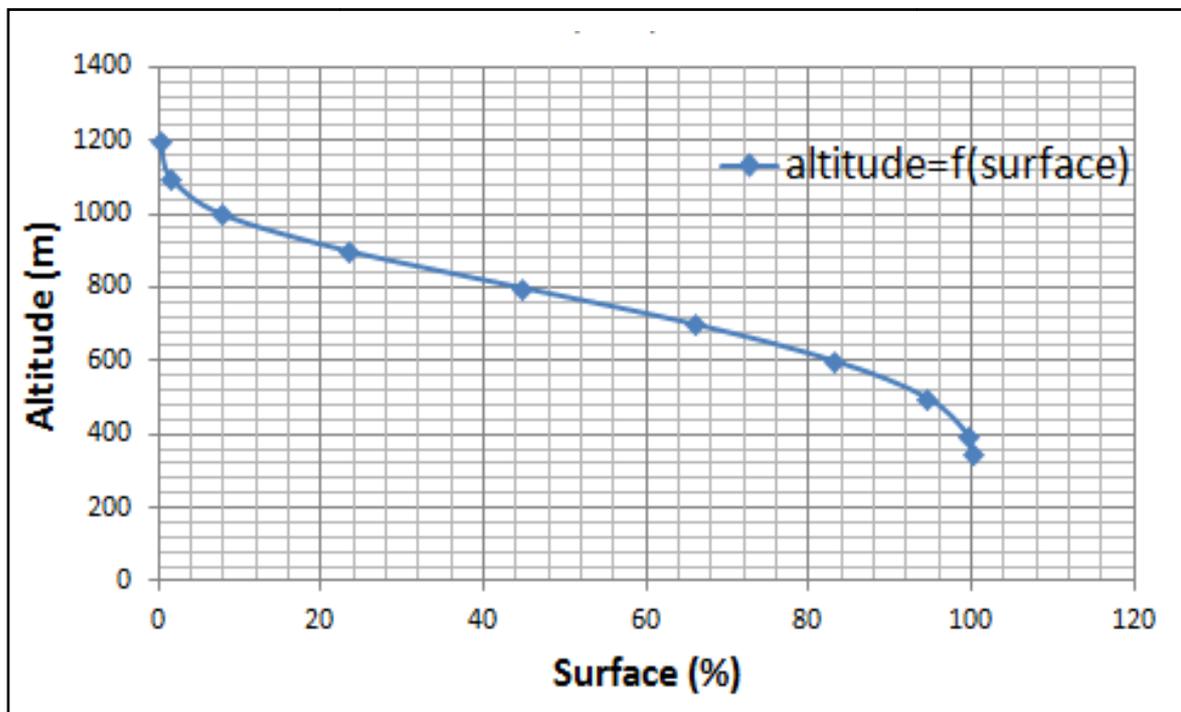


Figure 2.8 : la courbe hypsométrique

D'après Strahler, on remarque que notre courbe est classée au milieu, donc, elle correspond à la courbe intermédiaire (B), c'est-à-dire notre bassin est en état d'équilibre dynamique (maturité).

A. Les altitudes caractéristiques

➤ **Altitude Maximale, Altitude Minimale**

L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire : $H_{\max} = 1284\text{m}$

$$H_{\min} = 351 \text{ m}$$

➤ **Altitude Moyenne**

Elle est donnée par l'équation suivante :

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

Avec :

H_{moy} : altitude 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 : $H_{\text{moy}} = 719,947 \text{ m}$.

• **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 : $H_{\text{méd}} = 696\text{m}$

2.4.2.3. Rectangle équivalent

Il s'agit d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité). De cette façon, les courbes de niveaux deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle, et l'exutoire est l'un de ces petits côtés. Soit « L » et « l » les côtés du rectangle (Longueur et largeur), P est le périmètre du bassin et S représente la superficie [7]. On écrit alors :

$$P = 2 * (L + l) \quad (2.3)$$

La solution de ce système est :

$$L, l = \frac{Kc * \sqrt{A}}{1.12} \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right] \quad (2.4)$$

Pour que cette représentation soit possible, la condition nécessaire est :

$$Kc \geq 1.12$$

Avec :

A : surfaces du bassin versant [Km²] où : $A = L * l$

P : périmètres du bassin [Km] ;

Kc : Indice de compacité ;

L : La longueur du rectangle équivalent [Km],

l : La largeur du rectangle équivalent [Km]

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

$$d_i = \frac{L * A_i}{100} \quad (2.5)$$

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

Tableau 2.4 : pourcentages des surfaces et écartements entre les courbes de niveau

A _i (%)	D _i (Km)
0.554367	0.38263487
5.027044	3.46976026
11.42178	7.88353234
17.140170	11.8304665
21.362568	14.7448446
21.246762	14.6649137
15.519396	10.711778
6.345826	4.38000816
1.286536	0.88799127
0.095539	0.06594302

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

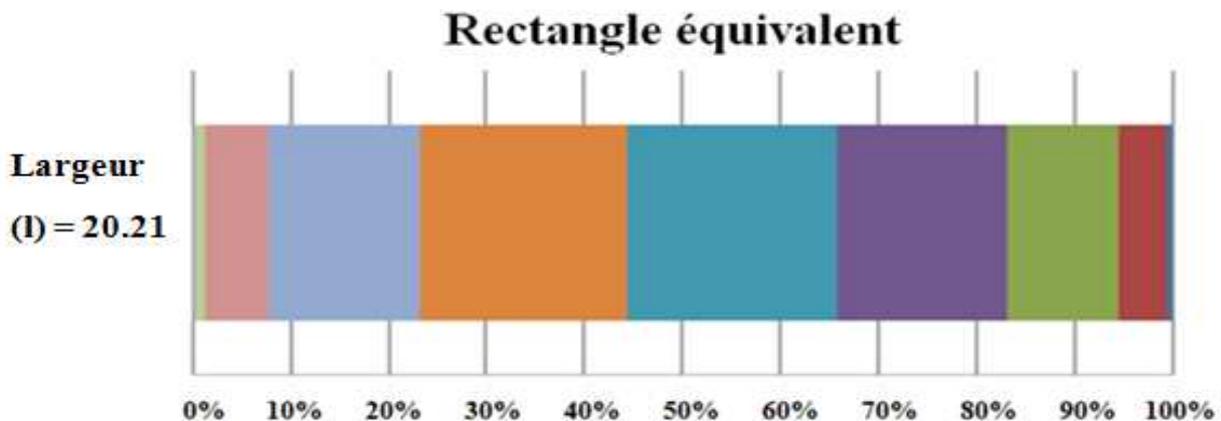


Figure 2.9 : rectangle équivalent correspondant au sous bassin Cheliff-Ghrib

2.4.2.4. Les indices de pente

Ces indices sont des caractéristiques importantes qui renseignent sur la topographie du bassin, ils donnent une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct ; donc sur le temps de concentration et influence directement le débit. Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer ces pentes [8] :

A. Indice de pente de roche

Il est proposé par M. Roche (1963), et se calcule à partir du rectangle équivalent. Il s'exprime par la relation suivante :

$$I_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{A_i * D_i}}{L^{1/2}} \quad (2.6)$$

L : Longueur du rectangle équivalent,

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

Pour notre bassin : $I_p = 100\%$, ce qui correspond à un relief accidenté.

B. Indice de pente global

L'indice de Roche étant cependant trop long à évaluer pour des études rapides, on a proposé un indice encore plus simple ; la pente globale, qui s'exprime par la relation suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H(5\%) - (95\%)}{L} \quad (2.7)$$

Avec :

D : la dénivelée h (5%)-h (95%), définie sur la courbe hypsométrique ;

L : la longueur du rectangle équivalent.

Cet indice, nous permet de déduire la nature du relief, il est facile à calculer. Il sert de base à une des classifications O.R.S.T.O.M (l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer), pour des bassins versants dont la surface est de l'ordre de Km^2 .

Tableau 2.5: Variations de l'indice de pente global selon l'O.R.S.T.O.M.

R1	Relief très faible	$I_g < 0.002$
R2	Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
R3	Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
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	$I_g > 0.1$

$I_g = 7.35 \%$. D'après la classification d'O.R.S.T.O.M. on déduit que notre relief correspond à R6 ($0.05 < I_g < 0.1$), donc est un relief fort.

C. 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 [8].

Elle est donnée par la formule suivante :

$$I_{moy} = \frac{2 * (H_{max} - H_{min})}{P} \quad (2.8)$$

Avec :

I_{moy} : 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).

$$I_{moy} = 10.48\%$$

D. Dénivelée spécifique

La dénivelée spécifique « D_s » nous permet de définir les différents types de relief des bassins vers. Il est défini dans la relation suivante :

$$D_s = I_g * \sqrt{A} = \frac{D}{L} \sqrt{L * l} = D \sqrt{\frac{l}{L}} \quad (2.9)$$

Avec :

D_s : dénivelée spécifique (m) ;

I_g : pente global ;

A : superficie du bassin versant (Km) ;

D : la dénivelée h (5%)-h (95%), définie sur la courbe hypsométrie (m) ;

L : la longueur du rectangle équivalent (Km) ;

l : la largeur du rectangle équivalent (Km).

La dénivelée spécifique ne dépend donc que de l'hypsométrie ($D = H_{5\%} - H_{95\%}$) et de la forme du bassin (l/L). Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M. (l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer), indépendante des surfaces des bassins [8] :

Tableau 2.6 : Variations de la dénivelée spécifique selon l'O.R.S.T.O.M.

R1	Relief très faible	Ds < 10 m
R2	Relief faible	10 m < Ds < 25 m
R3	Relief assez faible	25 m < Ds < 50 m
R4	Relief modéré	50 m < Ds < 100 m
R5	Relief assez fort	100 m < Ds < 250 m
R6	Relief fort	250 m < Ds < 500 m
R7	Relief très fort	500 m < Ds

Le résultat obtenu : $Ds = 274.52 \text{ m}$ correspond à R6 (250 m < Ds < 500 m), donc notre relief est fort.

Le tableau 2.7 ci-après représente les résultats récapitulatifs de l'étude physiographique de notre sous bassin Ghrib :

Tableau 2.7 : Tableau récapitulatif d'étude physiographique.

Superficie A (Km²)	1405
Périmètre P (Km)	177.9
Indice de compacité Kc	1.338
Altitude maximale H max (m)	1284
Altitude minimale H min (m)	351
Altitude moyenne H moy (m)	719.94
Altitude médiane H méd (m)	696
Longueur du rectangle équivalent L (Km)	69.315
Largeur du rectangle équivalent l (Km)	20.269
Pente de roche Ip (%)	100
Pente global Ig (%)	7.35
Pente moyenne I moy (%)	10.48
Dénivelée spécifique Ds (%)	274.52

2.5. CARACTERISTIQUES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Le réseau hydrographique est constitué de l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant ; L'étude du chevelu hydrographique sert 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 [9].

La figure (2.9) suivante représente le réseau hydrographique du sous bassin Cheliff-Ghrib, l'Oued principal est caractérisé par une longueur de 69.95Km

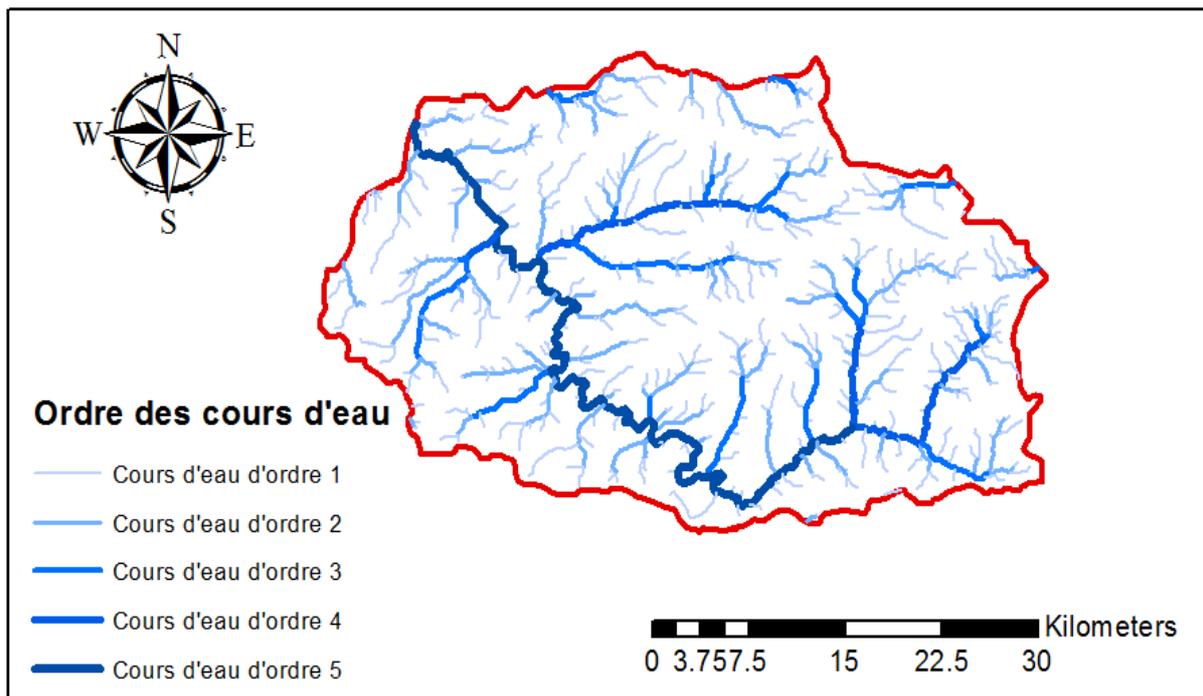


Figure 2.10 : réseau hydrographique du sous bassin Cheliff-Ghrib

2.5.1. Densité de drainage

Elle est déterminée comme étant le rapport entre la longueur totale des cours d'eau de tout ordre L_x sur la surface du bassin versant S . Elle est donnée par :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A} \quad (2.10)$$

Avec :

D_d : densité de drainage en (km/km²),

L_i : Somme des longueurs de tous les thalwegs y compris le thalweg principal,

A : superficie du bassin versant.

Pour notre bassin : $D_d = 0.59$ km/km²

2.5.2. Coefficient de torrentialité

C'est le produit de la densité de drainage par la fréquence de thalwegs élémentaires.

$$C_t = D_d * \frac{N1}{A} \quad (2.11)$$

Avec :

C_t : coefficient de torrentialité.

D_d : densité de drainage.

$N1$: nombre de thalwegs d'ordre « 1 » $N1=254$.

A : surface du bassin versant.

On obtient alors : $C_t = 0.19$

2.5.3. Temps de concentration

C'est le temps que mettra la première goutte d'eau tombée au point hydrologiquement le plus éloigné du bassin versant pour arriver à l'exutoire.

2.5.3.1. Calcul du temps de concentration par la formule de GIANDOTTI

$$T_C = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L}{0.8\sqrt{H}} \quad (2.12)$$

Avec :

A : Superficie du bassin versant.

L : Longueur du talweg principal = 69.95 km.

$H = H \text{ moy} - H \text{ min}$

Le temps de concentration obtenu est : $T_C = 16.58 h$

2.6. GEOLOGIE DU SITE

Le barrage du Ghrib situé dans une région de terrains d'âge par Helvétien, constitués par une alternance de grès et de marnes. Le pendage général, qui est celui des plages de la mer miocène, est dirigé du Sud au Nord, il est donc défavorable pour l'établissement d'une butée aux poussées de l'eau. L'épaisseur des divers bancs est très variable. C'est ainsi que certains horizons gréseux, tel le gré appelé supérieur suivant une dénomination de chantier, a une puissance suffisante pour recevoir les ouvrages des barrages sur presque toute leur hauteur. Par contre, certains niveaux marneux d'une grande continuité n'ont que quelques centimètres d'épaisseur, ce qui est néanmoins suffisant pour créer un niveau aquifère autonome.

L'étanchéité du réservoir aux abords du barrage est assurée par la marne supérieure, le gré moyen qui a été cimenté sur une grande surface et la marne dite inférieure dont l'épaisseur

est assez importante .quant à la cuvette elle-même, elle appartient en grande partie au créacé et comporte une prédominance de marnes et de schistes, donc de roches imperméables.

2.7. CLIMAT DE LA REGION D'ETUDE

2.7.1. La pluviométrie

Le sous bassin Cheliff Ghrib compte 5 postes pluviométriques, dont : 3 postes pluviométriques appartiennent au réseau de l'ANRH et 2 postes pluviométriques appartiennent au réseau de l'ONM [10].

La pluviométrie moyenne interannuelle dans le sous bassin atteint la valeur minimale de 451 mm dans la station qui situé au centre de sous bassin, et une valeur maximale de 501 mm dans la station qui situe à l'Est de sous bassin.

Tableau 2.8 : Données pluviométriques moyennes interannuelles de l'ANRH.

Codes de station	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Moyenne interannuelle (mm)
011404	66	17	18.5	42.5	/	16	32.5	27.1	0.0	/	0.0	49	501
011405	33.1	2.3	40.2	42.2	30.9	15.6	25.1	28.7	13.6	0.0	1.2	13.1	452
011407	33	4.3	66.1	48.4	34.4	27.9	45.8	28.9	8.2	0.0	0.0	28.3	451

2.7.2. La carte des isohyètes

Une courbe isohyète est l'ensemble des points sur lesquels est tombée la même hauteur de pluie pendant une période déterminée.

La carte des isohyètes a été réalisée à partir des données pluviométriques fournies par l'ANRH à l'aide des logiciels : Mapinfo et Arc gis. Où nous avons tenu compte des stations situées dans les sous bassins voisins.

La carte obtenue est représentée sur la figure (2.10) ci-après :

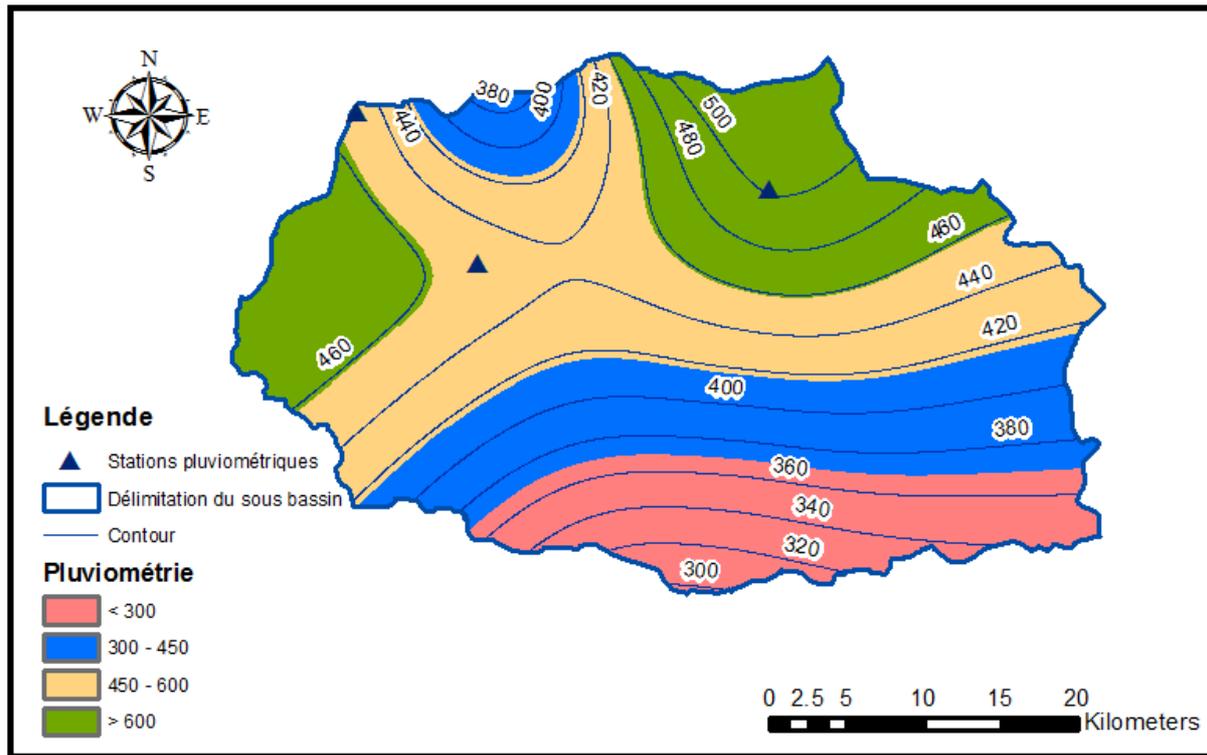


Figure 2.11 : Carte des isohyètes de sous bassin Cheliff-Ghrib

Les observations montrent que la répartition des précipitations moyennes annuelles sont irrégulières, et sont minimales au sud du sous bassin au niveau de la wilaya de Médéa et varient de 300 à 380 mm/an, elles sont maximales au niveau de l'Est du sous bassin et varie entre 480 à 500 mm/an, elles varient entre 400 et 450 mm/an au centre de sous bassin

Par son intensité et sa durée, la pluie joue un rôle très important dans le transport solide, plus que la vitesse des pluies est élevée plus les matériaux transportés sont importants.

2.7.3. L'évapotranspiration

Les données de l'évapotranspiration sont relevées à partir des cartes de l'évapotranspiration mensuelle et annuelle éditées par les services de l'ANRH. Le tableau ci-dessous présent les valeurs de sous bassin Cheliff-Ghrib.

Tableau 2.9 : Evapotranspiration potentielles moyennes mensuelles (mm) année.

SB.	station	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Moy. annuelle
0115	Médéa	34	42	80	114	146	184	218	195	136	84	46	28	1307
0115	Ghrib barge	40	54	96	122	164	199	230	214	142	94	52	35	1442
0118	Ain Defla	41	54	95	138	181	221	257	229	160	103	54	37	1570

Le graphe suivant présente la variation d'évapotranspiration des stations gérées par l'ANRH :

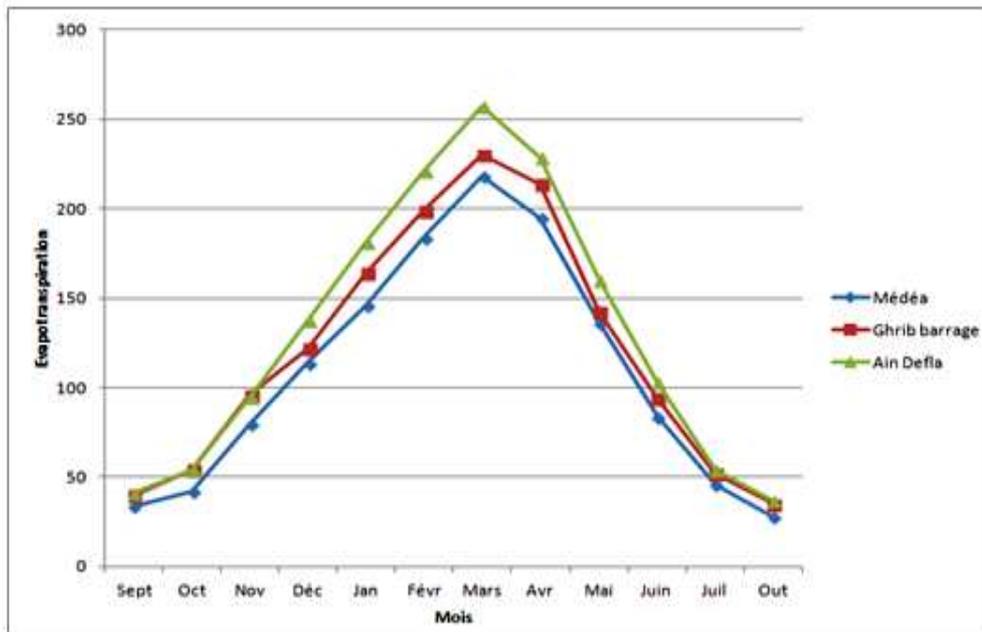


Figure 2.12 : Variation d'évapotranspiration de sous bassin Cheliff-Ghrib

D'après la lecture des données du tableau et l'observation du graphe, on remarque que l'évapotranspiration atteint une valeur maximale de 257 mm dans la station d'Ain Defla, au mois de Mars et d'une valeur minimale de 28 mm dans la station de Médéa, au mois d'Aout.

2.7.4. La température

A partir d'une série des données de l'année 2009 récupéré au niveau de l'archive d'administration de barrage Ghrib, a été analysé pour définir les températures de la région. Le tableau 2.10 représente les températures mensuelles : moyenne, maximum et minimum :

Tableau 2.10 : Températures moyennes mensuelles (C°) de l'année 2009

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
T° moy (°C)	5,95	6,18	10,08	11,85	19,18	21,77	25,48	25,68	19,91	16,55	10,88	7,76
T° Max (°C)	12,85	13,36	19,42	20,62	29,34	32,49	34,84	33,71	31,62	27,37	18,56	17,81
T° Min (°C)	1,90	2,09	3,69	6,03	10,96	12,27	15,84	14,76	13,41	10,21	5,03	2,26

L'examen des températures moyenne montre que les maximums s'observent pendant la période de l'été (juillet-Out), qui variées entre 25.48 C° et 25.68 C°, et des minimums pendant la période d'hiver (Janvier-Février), qui variée de 5.95 C° et 6.18 C°. Avec des températures moyennes au printemps et automne.

Le graphe suivant présente la variation mensuelle des températures : moyennes, maximum et minimum :

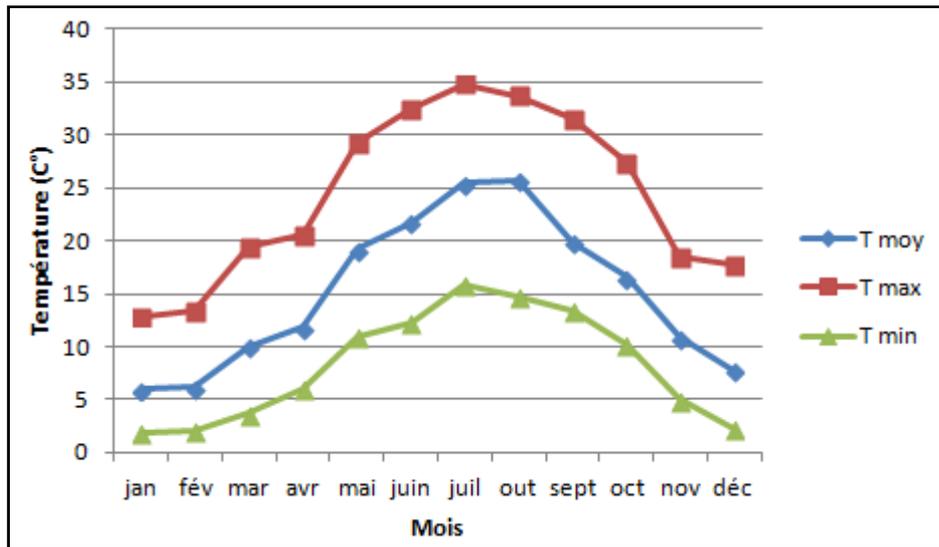


Figure 2.13 : Variation mensuelles des températures.

Après l'analyse des résultats obtenus dans le tableau 2.10 et la figure 2.12 nous montrons que la température diminue du mois de Septembre à Février, et il augmente régulièrement, à partir du mois de Mars jusqu'au mois d'Août., les valeurs les plus basses sont enregistrées durant les mois Janvier et février (1.9°C et 2.09°C).

Au cours du même graphe précédent on note que il y a un accroissement des valeurs maximal de l'hiver vers l'été, À partir du mois de Mai jusqu'au le mois d'Août. Le maximum moyen le plus élevé est observé au mois de juillet (34.84°C).

2.8. CONCLUSION

D'après les études physiographiques (géométriques, topographiques) et hydrographiques, et d'après les calculs de : dénivelée spécifique, les indices de pente, densité de drainage, le temps de concentration ...etc. et d'après les données pluviométriques et de l'évapotranspiration, On est arrivée au résultat suivant :

- Le sous bassin Cheliff Ghrib est caractérisé par une superficie de 1395 Km² avec une forme allongée, un relief accidentée et fort avec une altitude maximale de 1279 et une altitude minimale de 351.

- Le sous bassin Ghrib à un climat semi-aride caractérisé par des étés chauds et secs avec des températures importantes et des hivers froid et humide, ce qui caractérise le climat méditerranéen.

CHAPITRE 3. MATERIELS ET METHODES

3.1. INTRODUCTION

Ce chapitre sera consacré à détailler le dispositif informatique utilisé : logiciels, outils, documents numériques, cartographiques,... et à décrire la méthodologie du travail, ainsi que les différentes étapes suivies avant de lancer la simulation.

3.2. METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Pour atteindre les objectifs assignés dans cette étude, nous avons suivi les étapes suivantes :

1. Création des différentes couches à exporter, sous Arcmap avec l'option Ras **Geometry** dans la barre d'outils de l'extension HEC-GeoRas :
 - la couche de l'écoulement centrale **River**
 - la couche des lignes berges **Banks lines**
 - la couche de la ligne centrale du chemin d'écoulement **Flowpaths**
 - la couche des sections transversales (**XSCutLines**). Ces sections doivent être perpendiculaires à la direction de l'écoulement, elles doivent être plus larges (à savoir plus larges que les flowpaths), toujours digitalisées de la gauche vers la droite (en regardant vers l'aval) et à un intervalle le plus régulier possible.
2. Création des couches 3D d'écoulement centrale et des sections transversales : **River3D** et **XSCutLines3D**.
3. Exportation des données dans un format compréhensible par HEC-RAS. Là encore, le module HEC-GeoRAS contient tous les outils nécessaires par l'option Ras Layer pour enregistrer toutes les couches puis l'exportation par l'option **Export Ras Data**.
4. Importation des données SIG sur HEC Ras et création des fichiers de données géométriques (Geometry Data files) ainsi que les fichiers de données d'écoulement (Flow Data files), qui correspondent effectivement aux deux étapes primordiales de préparation de la simulation par Hec-Ras, et qui seront détaillés ultérieurement.

L'essentiel du travail a été réalisé suivant l'organigramme méthodologique ci-dessous :

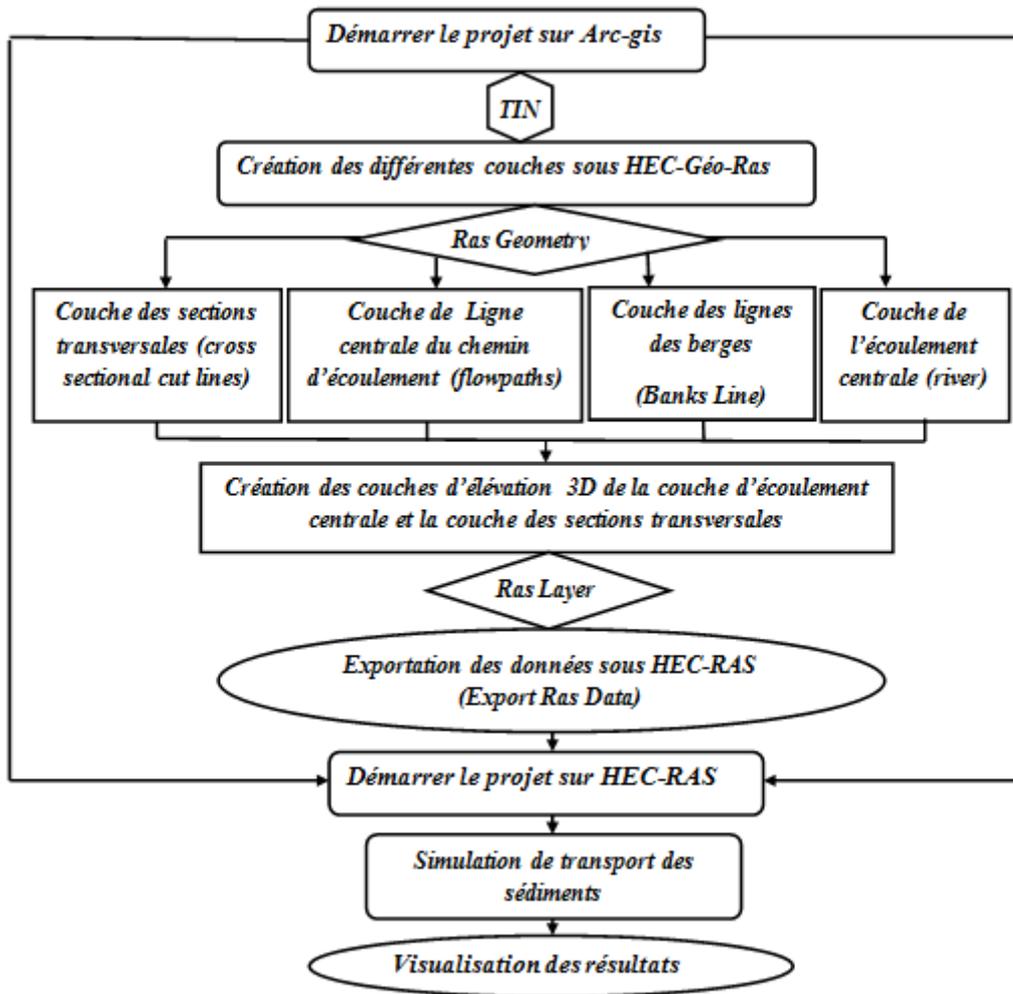


Figure 3.1 : Diagramme méthodologique

3.3. MATERIELS

3.3.1. Logiciels utilisés

Les SIG sont considérés comme une des technologies de l'information les plus performantes car ils visent à intégrer des connaissances provenant des sources multiples et créent un environnement pluri-secteurs idéal pour la collaboration.

De plus, le SIG séduit les nouveaux utilisateurs par son côté intuitif et cognitif. Il réunit un environnement de visualisation performant et une puissante infrastructure d'analyse et de modélisation spécialement adaptée à la géographie [11].

Pour atteindre notre objectif, nous avons utilisés un certain nombre de logiciels d'information géographique, à savoir :

3.3.1.1. Mapinfo professionnel 10.5

Mapinfo est un logiciel convivial doté d'une interface graphique conviviale de type « pointer-cliquer ». Il fournit un ensemble d'outils pour visualiser, explorer, interroger, modifier et analyser des informations géographiques et présenter les résultats sur des documents cartographiques de qualité. C'est une application intégrant un ensemble de données prêts à l'emploi ; Il permet de charger facilement des données localisées et tabulaires (littérales) et de les afficher sous forme de cartes, de tables ou de diagrammes.

Mapinfo est bien plus qu'un logiciel de cartographie. Il offre des outils performants d'analyse spatiale, de géocodage par adresse, de visualisation des résultats, de création et d'édition de données géographiques et tabulaires, de cartographie thématique et de mise en page. Les menus déroulants, les boutons et les outils d'interface utilisateur de Mapinfo permettent de travailler rapidement et efficacement [12].

Ce logiciel nous a bien servi surtout pour la délimitation de notre zone d'étude et la réalisation de certaines cartes thématiques, nécessaires pour compléter l'étude de l'ensemble des caractéristiques du sous bassin Cheliff- Ghrib.

3.3.1.2. Google Earth

Google Earth est une mappemonde virtuelle qui nous a permis de visualiser les images, enregistrées par satellite, de la plupart des endroits de la Planète. Que le lieu visité soit aperçu depuis l'espace ou à quelques mètres du sol, la précision des photos est surprenante. Au programme : images satellite, plans, cartes, images en relief et représentations 3D des bâtiments. Des informations supplémentaires peuvent être superposées à l'image satellite, comme les hôtels, les restaurants, les routes, etc. Ce logiciel nous a permis de convertir les données SIG au format KMZ et les exporter vers d'autres logiciels.

3.3.1.3. Global mapper v15.2

C'est un logiciel professionnel de cartographie. Il permet un accès direct à nombre de ressources satellites (Digital Globe, GlobeXplorer, AirPhotoUSA, Terra Server...). Il se lie avec un GPS pour une plus grande précision ou pour créer des cartes personnalisées.

Ce logiciel nous a permis en premier lieu, la lecture des fichiers KMZ pour obtenir le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de notre région d'étude. Par la suite, il a permis également l'exportation de l'ensemble des fichiers créés, sous plusieurs formes : élévation, vecteur ou raster (DEM, Shape file...) [13].

3.3.1.4. Arc-Gis 10.2.1

Arc-GIS 10.2.1 est un logiciel qui nous permet d'effectuer toutes sortes de tâches SIG, y compris la cartographie, l'analyse géographique, l'édition de données (création, mise à jour,...), la gestion des données, la visualisation et le géo-traitement [14].

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.

3.3.1.4. HEC-géo Ras 4.1.0

HEC-géo Ras est une extension qui s'intègre après installation avec Arc-Gis, c'est un ensemble de procédures et d'utilitaires pour le traitement des données géo-spatiales dans Arc-Gis. . Il permet d'une part, la préparation des données géométriques à exporter vers HEC-RAS, et la récupération des résultats de simulation effectuée par HEC-RAS [15].

L'élaboration du fichier de la géométrie à exporter, est basée sur un modèle numérique de terrain qui doit être de préférence sous forme de TIN.

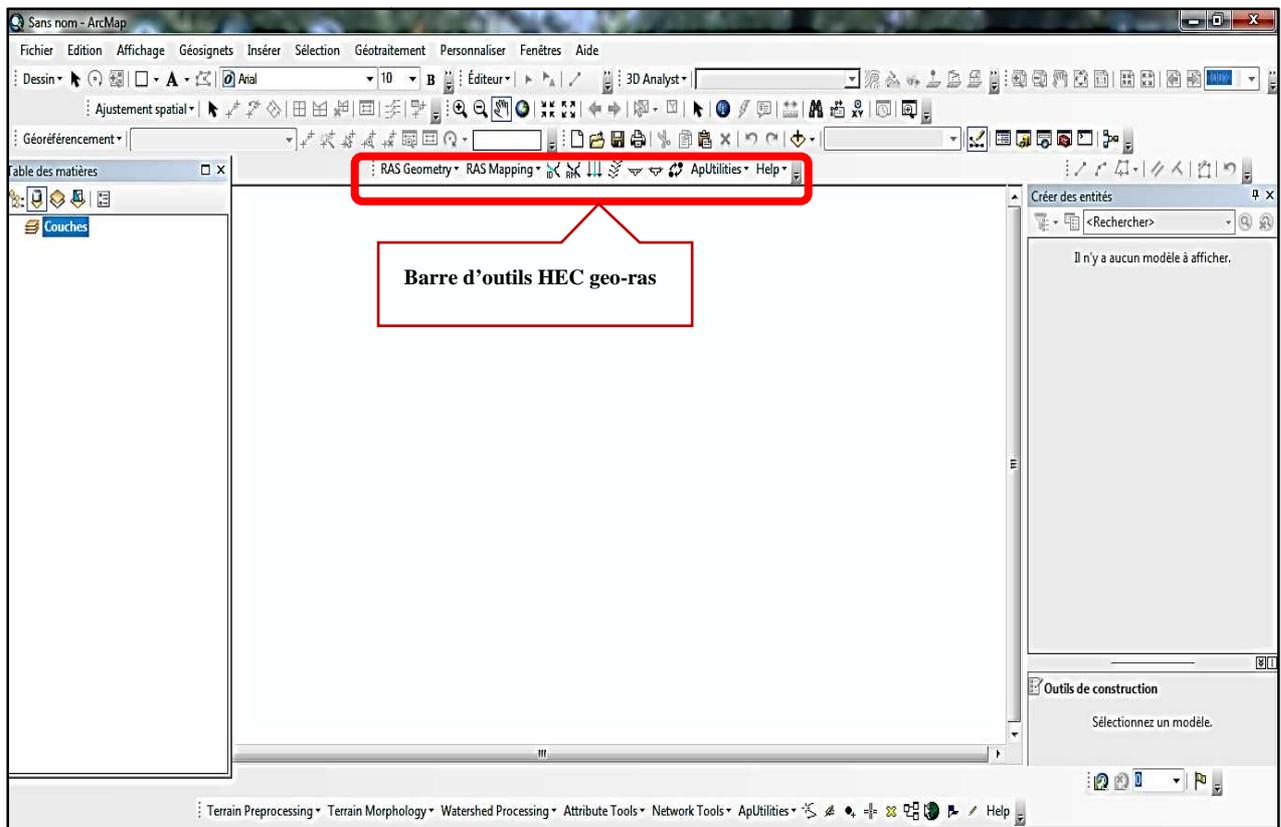


Figure 3.2 : Extension Hec-GeoRas sur l'interface Arcmap

3.3.1.5. HEC-RAS 4.1.0

HEC-RAS, (*Hydrologic Engineering Centers River Analysis System* (Système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique)), est un logiciel de modélisation hydraulique destinée à simuler l'écoulement dans les cours d'eau et les canaux, ce système permet aux ingénieurs en hydraulique d'analyser les débits dans le lit des rivières et de déterminer les zones inondables, les transports des sédiments.. . Il intègre de nombreux moyens de saisie de données, de composants d'analyse hydraulique, de stockage de données, d'édition de rapports sous forme de tables et de graphiques.

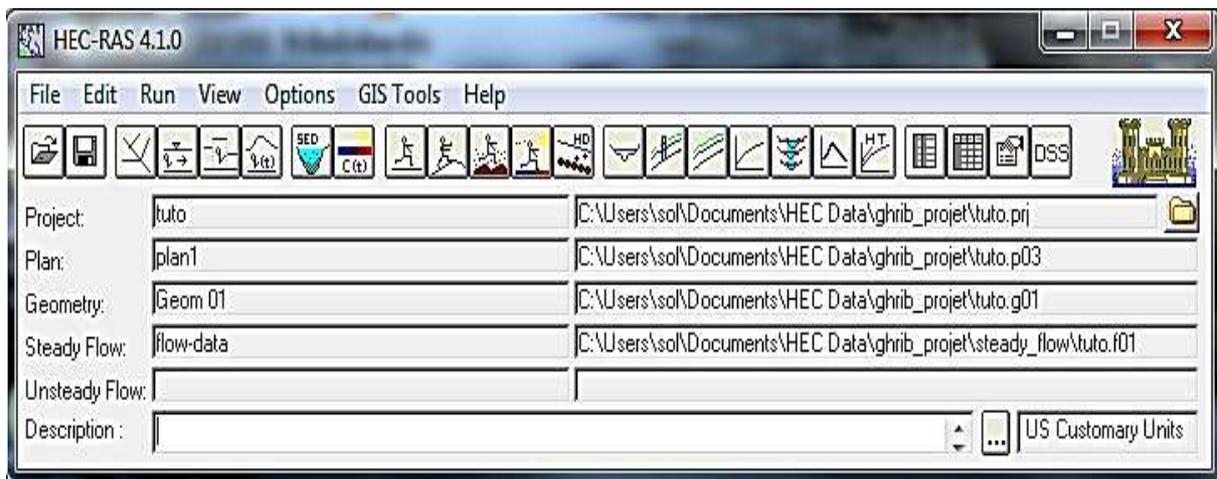


Figure 3.3 : Interface du logiciel HEC-RAS 4.1.0

HEC ARS est un système de modélisation mathématique hydraulique unidimensionnel ayant quatre fonctions principales :

- la modélisation de l'écoulement en régime permanent,
- la modélisation de l'écoulement en régime transitoire,
- le calcul du transport des sédiments,
- l'analyse des processus de pollution et de la qualité de l'eau.

Dans notre projet, nous nous sommes intéressés à la troisième fonction. Les étapes de modélisation avec ce logiciel seront développées dans le chapitre 4.

3.3.2. Données cartographiques

Elles concernent essentiellement, la carte du réseau hydro-climatologique et de la surveillance de la qualité des eaux du nord de l'Algérie, échelle 1/500000, qui était utilisée particulièrement pour la délimitation du bassin versant Cheliff-Ghrib, le tracé de l'Oued Cheliff, et la présentation des stations pluviométriques.

3.3.3. Données Topographiques

3.3.3.1. Modèle numérique de terrain (MNT)

Un Modèle numérique de terrain (MNT) correspond à une représentation sous forme numérique du relief d'une zone géographique adaptée à une utilisation informatisée. C'est une représentation 3D de la surface d'un terrain ou d'une région, créée à partir des données d'altitude du terrain [13].

Le MNT de notre région d'étude a été établi avec le logiciel « Global mapper ». Il a été utilisé principalement, pour extraire un modèle d'élévation numérique (DEM) qui nous a permis par la suite, d'obtenir toutes les composantes hydrologiques à savoir :

- Le réseau hydrographique,
- Le réseau de drainage,
- Le sens d'écoulement etc.

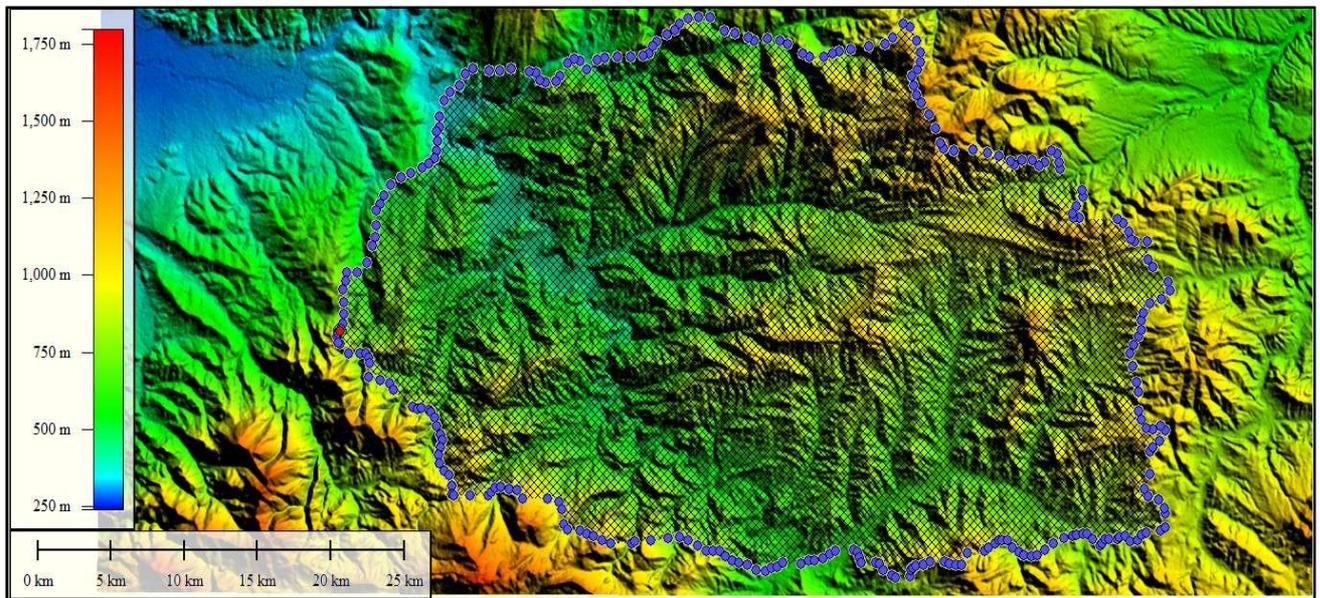


Figure 3.4 : MNT de la zone d'étude

3.3.3.2. Réseaux triangulaires irréguliers (Triangular Irregular Network TIN)

Les réseaux triangulés irréguliers (TIN) ont été utilisés par la communauté SIG pendant de nombreuses années et permettent de représenter numériquement la morphologie de surface. Les TIN constituent une forme de données géographiques numériques vectorielles et sont construits en triangulant un ensemble de sommets (points). Les sommets sont reliés à une série de segments pour former un réseau de triangles. Il existe différentes méthodes d'interpolation pour former ces triangles, telles que la triangulation de Delaunay ou le

classement des distances. Arc-GIS prend en charge la méthode de triangulation de Delaunay [14].

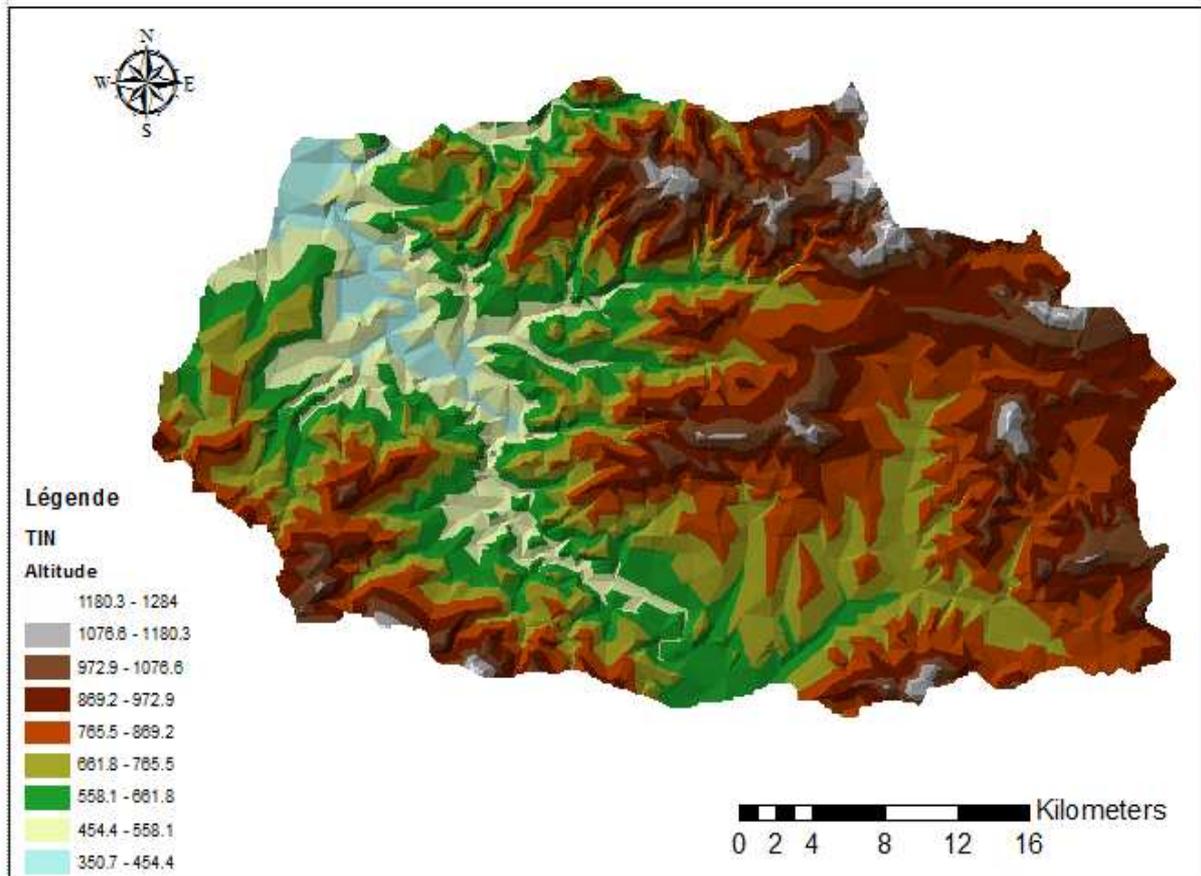


Figure 3.5 : TIN de la zone d'étude

3.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons exposé les logiciels et les documents indispensables, utilisés dans le cadre de notre étude. La démarche a été également expliquée sous forme de diagramme méthodologique, pour comprendre facilement toutes les étapes essentielles pour la réalisation de notre projet, du début jusqu'à la fin de la simulation. Celles-ci seront développées et expliquées en détail au chapitre quatre.

CHAPITRE 4. MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE **SOUS HEC-RAS**

4.1. INTRODUCTION

Ce chapitre sera consacré à définir les étapes essentielles pour la modélisation du transport solide. La simulation est basée sur les paramètres d'entrée ainsi que sur un ensemble de fonctions essentielles et de méthodes gérés par le modèle HEC Ras.

4.2. HEC RAS

4.2.1. Présentation du logiciel

HEC RAS ((Hydrologic Engineering Center, River Analysis System ou système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique) est un code informatique unidimensionnel qui a prouvé son efficacité dans le calcul hydrologique et hydraulique. Ce programme a été élaboré par le ministère américain de la Défense (corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis) dans le but de gérer les rivières, les ports et autres travaux publics relevant de leur compétence, il a été largement diffusé par le monde depuis sa publication en 1995.

HEC-RAS est un logiciel de modélisation hydraulique. Le calcul se fait sur des sections de chenal successives. Les données sources essentielles sont : une série de sections topographiques transversales successives le long du chenal ; un profil de l'axe de la rivière en 3D ; un apport d'eau (débit liquide, débit solide et hauteurs d'eau). Ses vastes possibilités, sa flexibilité, et sa rapidité d'exécution en font un outil très populaire en génie civil [16].

Pour les écoulements en régime permanent, HEC-RAS se base sur les équations de perte d'énergie (Théorème de Bernoulli) et de la conservation de la quantité de mouvement le long du profil de la rivière. Les différentes parties des sections des rivières (chenal, berges, lit majeur etc.) peuvent se voir attribuer des propriétés hydrauliques différentes. En outre le modèle permet de prendre en compte aussi bien les écoulements critiques, sous critiques, et mixtes au voisinage des obstacles et des ruptures de pente. Notons enfin que la modélisation en régime non permanent est possible, et le plus intéressant est la modélisation de transport des sédiments

HEC-RAS se limite au cas unidimensionnel (1D), Il s'agit d'un modèle d'écoulement à une dimension, c'est-à-dire qu'il ne permet pas un déplacement du fluide dans une autre direction que l'axe du chenal. L'écoulement non-permanent et non-uniforme est toujours décrit par les équations de Saint-Venant. Cependant, la côte du fond n'est plus connue, mais

représente une variable supplémentaire à déterminer à partir de l'équation de conservation de masse des sédiments. Cette équation exprime qu'un déséquilibre entre les flux de sédiments entrant et sortant d'un tronçon de rivière provoque un changement de la côte du fond.

Les équations de Saint-Venant-Exner expriment trois principes fondamentaux [17] :

- la conservation de la masse du fluide ;
- la conservation de l'énergie ;
- la conservation de la masse de sédiments.

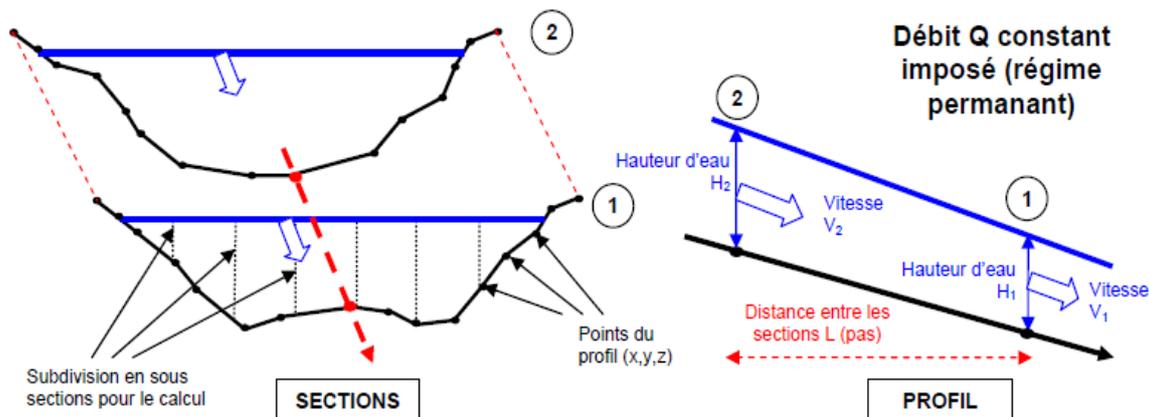


Figure 4.1 : Topologie simplifiée du modèle HEC-RAS

Les informations complémentaires ainsi que les bases théoriques sont disponibles dans les brochures d'aide détaillées du module HEC RAS, ainsi que sur les différents manuels mis à disposition avec le logiciel.

4.2.2. Fonctions du transport sédimentaire

Différentes formules de transport sont utilisées par le logiciel HEC-RAS, Les tableaux 4.1 ci-dessous résume le domaine de validité de chacune des fonctions.

Tableau 4.1 : Domaine de validité des formules de transport

Formules	Types de sédiments	Remarques
Ackers & White	Sable et fin graviers	-
Engelund & Hansen	Argile et sable	Suspension prédominante
Toffaletti	Sable	Grande rivière
Laursen	Sable et vase	-
Meyer-Peter Müller	Gravier uniforme	Uniquement pour charriage
Yang	Sable et graviers	Très sensible à la vitesse du fluide

A. Formule d'Ackers-White (Novembre 1973)

Ackers-blanc est une fonction de la charge totale de transport des sédiments développée pour les sols non cohésifs des grains de taille de 0,04 mm à 7 mm. Cette fonction de transport a été développée en supposant que le transport des sédiments fins sont plus liés à turbulent variations dans l'eau avec des vitesses moyennes [19].

Ackers & White ont cherché à établir une formule de débit solide sous la forme adimensionnelle suivante : $G_{gr} = f(F_{gr}, d_{gr})$

Dans cette équation : - G_{gr} : s'agit d'une fonction de transport adimensionnelle ;

- d_{gr} : est le diamètre adimensionnel ;

- F_{gr} : est le paramètre adimensionnel de mobilité.

Le diamètre adimensionnel se calcule comme suit :

$$d_{gr} = d \left[\frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{1/3} \quad (4.1)$$

Le paramètre adimensionnel de mobilité se calcule comme suite :

$$F_{gr} = \frac{u_*^n}{[g \cdot d \cdot (s-1)]^{1/2}} \left[\frac{V}{\sqrt{32} \cdot \log\left(\frac{10 \cdot D}{d}\right)} \right]^{1-n} \quad (4.2)$$

La fonction de transport adimensionnelle se calcule alors de la façon suivante :

$$G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad (4.3)$$

Elle est établie pour des tailles de particules supérieures à 0,04 mm et des écoulements correspondant à des nombres de Froude inférieurs à 0,8, cette formule permet de déterminer le débit solide de la façon suivante :

$$q_s = q \cdot G_{gr} \cdot \frac{d}{h} \cdot \left(\frac{u_*}{U} \right)^n \quad (4.4)$$

Dans cette équation, q est le débit liquide ; d , la taille des particules ; h , la hauteur d'eau ; u_* , la vitesse de frottement et U , la vitesse moyenne de l'écoulement [4].

Avec :

$$A : \text{paramètre initial du mouvement} = \begin{cases} (0.23 * d_{gr}^{\frac{1}{2}} + 0.14) & \text{si: } d_{gr} \leq 60 \\ 0.17 & \text{si: } d_{gr} > 60 \end{cases}$$

$$(u_*) : \text{la vitesse de frottement} = \sqrt{g \cdot D \cdot i} \quad (i : \text{la pente de l'écoulement})$$

n : exposant apparent du changement des tailles des sédiments

$$n = \begin{cases} 1 & \text{Si : } d_{gr} \leq 1 \\ (1 - 0.56 * \log d_{gr}) & \text{Si : } 1 < d_{gr} \leq 60 \\ 0 & \text{Si } d_{gr} > 60 \end{cases}$$

C : Coefficient de la fonction de transport des sédiments

$$C = \begin{cases} \log C = 2.86 \log d_{gr} - (\log d_{gr})^2 - 3.53 & \text{Si: } d_{gr} \leq 60 \\ 0.025 & \text{Si: } d_{gr} > 60 \end{cases}$$

m : exposant de la fonction de transport des sédiments.

$$m = \begin{cases} \frac{9.66}{d_{gr}} + 1.34 & \text{Si: } d_{gr} \leq 60 \\ 1.50 & \text{Si: } d_{gr} > 60 \end{cases}$$

B. Formule d'Engelund Hansen (1967)

La formule empirique d'Engelund et Hansen permet le calcul de la charge total des rivières de sable pour des sédiments non cohésifs (charriage + suspension), elle est donnée sous la forme adimensionnelle suivante [19] :

$$\frac{\bar{q}_s}{\sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w - 1}\right) g \cdot d^3}} = 0.08 \left(\frac{K^2 \cdot y^3}{g} \right) \tau^{*\frac{5}{2}} \quad (4.5)$$

Où :

K : coefficient de Strickler global des parois incluant la rugosité des berges, celles des grains constituant le fond,

y : la hauteur y de l'écoulement ; cette hauteur se calcule en négligeant l'interaction entre les deux phases liquides et solides.

Cette formule a été établie pour $0,15\text{mm} < d < 5\text{mm}$ et $\tau^* > 0.25$ en remplaçant g par sa valeur, en supposant $\gamma_s/\gamma_w = 2.6$, et en tenant compte de la largeur du lit L .

La formule du débit solide apparent total (exprimé en m^2/s , vides compris) est donnée par :

$$\begin{aligned} \bar{Q}_s &= 0.010 \cdot K^2 \cdot L \cdot y^{17/6} \cdot i^{5/2} \cdot d^{-1} & \text{Pour } \gamma_s/\gamma_w = 2.6 ; \\ \bar{Q}_s &= 0.0088 \cdot K^2 \cdot L \cdot y^{17/6} \cdot i^{5/2} \cdot d^{-1} & \text{Pour } \gamma_s/\gamma_w = 2.7 ; \end{aligned} \quad (4.6)$$

C. La formule de Laursen-Copeland (1968)

C'est la fonction de la charge totale des transports des sédiments. Il est développée d'utiliser les caractères hydrauliques de canal moyenne, la profondeur de l'écoulement, la vitesse de chute des grains....etc. Les tailles des grains sont limitées par 0.011 mm à 29 mm [19].

Le rayon hydraulique est exprimé par la relation suivante :

$$R' = \frac{0.0472 V^{3/2} (3.5 d)^{1/4}}{(g \cdot S)^{3/4}} \quad (4.7)$$

Les sédiments transportés sont calculées par la formule suivante (tons/jour) :

$$G_s = 0.432 * \gamma_w * Q * \left(\frac{d}{R'}\right)^{1.16667} \cdot TFP \cdot \psi \quad (4.8)$$

Avec : G_s : débit solide ;

V : la vitesse moyenne ;

Q : Débit liquide ;

d : Le diamètre médian des particules;

g : L'accélération de la pesanteur ;

S : La pente d'écoulement ;

γ_w : La masse volumique de l'eau ;

u'_* : La vitesse de chute s'exprime par : $u'_* = \sqrt{g \cdot R' \cdot S}$;

$$\psi = \begin{cases} \left[7.04 * 10^{15} * \left(\frac{u'_*}{\omega}\right)^{22.99} \right]; & \text{Si } \frac{u'_*}{\omega} \leq 0.225 \\ \left(40.0 * \frac{u'_*}{\omega} \right); & \text{Si } 0.225 < \frac{u'_*}{\omega} \leq 1.0 : \text{ est un paramètre du rapport de} \\ \left(40 * \frac{u'_*}{\omega} \right)^{1.843}; & \text{Si } \frac{u'_*}{\omega} > 1.0 \end{cases}$$

la vitesse des particules ;

TFP : Le paramètre de la contrainte du cisaillement.

D. Formule de Meyer-Peter Müller (1948)

Publiée en 1948, la relation empirique de Meyer-Peter & Müller s'est imposée comme la formule permettant de calculer le débit solide transporté par charriage. Elle est ainsi très couramment utilisée dans le domaine de l'ingénierie. Pour l'établir, Meyer-Peter & Müller ont utilisé des données collectées au laboratoire de la *Eidgenössische Technische Hochschule* (ETH) à Zürich en Suisse ainsi les données publiées antérieurement par Gilbert (1914). La banque de données utilisée consiste ainsi en 251 expériences variant la pente entre 0,4‰ et 2% (Van Rijn 1993), le rapport des masses volumiques $\frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ varie entre 0,25 et 3,22 et le diamètre moyen entre 0,4 mm et 29 mm [4].

La forme complète de l'équation est donnée par [19] :

$$q_b^* = 8(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2}, \quad \tau_c^* = 0.047 \quad (4.9)$$

$$q_b^* = 3.97(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad , \tau_c^* = 0.0495$$

Avec :

q_b^* : La charge du fond ;

τ_c^* : paramètre critique de Shields, sans dimension ;

τ^* : paramètre de Shields, sans dimension exprimé par :

$$\tau^* = \frac{R \cdot i}{d \cdot \gamma_s / (\gamma_w - 1)} \quad (4.10)$$

où :

i : pente de l'écoulement ;

R : le rayon hydraulique ;

d : diamètre moyen des sédiments en mètre (souvent aussi noté d_{50} : diamètre du matériau auquel correspondent 50 % en poids de taille inférieure ;

γ_w et γ_s poids volumiques de l'eau et du matériau solide

E. La formule de Toffaleti (1968)

L'équation générale du transport Toffaleti est donnée comme suite [20] :

- Zone inférieur :

$$g_{ssL} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-0.756z} - (2 \cdot d_m)^{1+n_v-0.756z}}{1 + n_v - 0.756z} \quad (4.11)$$

- Zone intermédiaire :

$$g_{ssM} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} - \left[\left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-z} - \left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-z}\right]}{1 + n_v - z} \quad (4.12)$$

- Zone supérieure :

$$g_{ssU} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} * \left(\frac{R}{2.5}\right)^{0.5z} - \left[R^{+n_v-1.5z} - \left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-1.5z}\right]}{1 + n_v - 1.5z} \quad (4.13)$$

- Zone du fond :

$$g_{sb} = M(2d_m)^{1+n_v-0.756z} \quad (4.14)$$

La charge totale des sédiments se calcul par :

$$g_s = g_{ssL} + g_{ssM} + g_{ssU} + g_{sb} \quad (4.15)$$

Avec :

g_{ssL} : le transport des sédiments en suspension en zone inférieur (tons/jour/m) ;

g_{ssM} : le transport des sédiments en zone intermédiaire (tons/jour/m) ;

g_{ssU} : le transport des sédiments en zone supérieure (tons/jour/m) ;

g_{sb} : transport des sédiments par charriage (tons/jour/m) ;

- g_s : le transport total des sédiments (tons/jour/m) ;
- C_L : la concentration des sédiments en zone inférieure ;
- R : le rayon hydraulique ;
- d_m : le diamètre moyen des particules ;
- z : exposant décrivant la relation entre les sédiments et les caractéristiques hydraulique ;
- n_v : exposant de la température
- M : paramètre de la concentration des sédiments donné par :

$$M = 43.2 * C_L(1 + n_v)V.R^{0.756z-n_v} \quad (4.16)$$

F. La formule de Yang (1973-1984)

L'équation générale du transport pour le sable et le gravier est représentée comme suit :

- Pour le Sable, $d_m < 2$ mm :

$$\log C_t = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.457 \log \frac{u_*}{\omega} + \left[1.799 - 0.409 * \log \frac{\omega * d_m}{\nu} - 0.314 \log \frac{u_*}{\omega} \right] \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right) \quad (4.17)$$

- Pour le Gravier, $d_m \geq 2$ mm :

$$\log C_t = 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 4.816 \log \frac{u_*}{\omega} + \left[2.784 - 0.305 * \log \frac{\omega * d_m}{\nu} - 0.282 \log \frac{u_*}{\omega} \right] \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right) \quad (4.18)$$

Où :

- C_t : concentration total des sédiments ;
- W : vitesse des particules du fond ;
- dm : diamètre moyen des particules ;
- ν : viscosité cinématique ;
- u_* : La vitesse du frottement ;
- V : La vitesse moyenne de l'écoulement ;
- S : gradient.de l'énergie

4.2.3. Vitesse de sédimentation

Plusieurs méthodes sont disponibles pour calculer la vitesse de sédimentation. Le logiciel HEC-RAS définit trois méthodes :

- Ruby (méthode par default dans HEC-RAS)
- Toffaleti

- Van Rijn

Le domaine de validité de ces formules est présenté sur le tableau 4.3 suivant :

Tableau 4.2 : domaine de validité des formules de la vitesse

Formule	Types de sédiments
Rubey	Argile et sable
Van Rijn	Sable et graviers
Toffaleti	Argile et sable

A. Ruby (Par Rubey, 1933)

Rubey a développé une relation analytique entre le fluide, les propriétés des sédiments et de la vitesse de chute sur la base de la combinaison de la loi de Stokes (pour les fines particules soumises seulement à la résistance visqueuse) et d'une formule d'impact (pour les grosses particules en dehors de la région de Stokes). Cette équation s'est avérée appropriée pour le limon, le sable, et le grain de gravier. Rubey a suggéré que les particules de la forme de grains de quartz broyé, avec une densité d'environ 2,65 s'appliquent mieux à l'équation.

$$\omega = F_1 \sqrt{(s - 1) \cdot g \cdot d_s} \tag{4.19}$$

Avec :

d_s : diamètre des particules ;

s : gravité spécifique des particules ;

g : accélération de la pesanteur ;

F_1 : coefficient donné par :

$$F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36 \cdot \nu^2}{g \cdot d^3 (s - 1)}} - \sqrt{\frac{36 \cdot \nu^2}{g \cdot d^3 (s - 1)}} \tag{4.20}$$

où :

ω : la vitesse des particules ;

ν : La viscosité cinématique.

B. Méthode de Toffaleti (1968)

Toffaleti présente un tableau des vitesses de sédimentation avec un facteur de forme de 0,9 et la gravité spécifique de 2,65. Différentes vitesses de chute sont données pour une gamme de températures et de tailles de grains, divisé classes de taille de grain standard de

sable très fin (VFS) à Gravel Medium (MG). Les vitesses de chute de Toffaleti sont présentées en Annexe 1.

C. Van Rijn (Par Van Rijn, 1993)

La méthode de Van Rijn est basée sur trois formules en fonction de la taille de grain [20] :

$$\omega = \begin{cases} \frac{(s-1)g \cdot d}{18 \cdot \nu}; & \text{Si } 0.001 < d \leq 0.1 \text{ mm} \\ \frac{10 \cdot \nu}{d} \left[\left(1 + \frac{0.01(s-1)g \cdot d^3}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right]; & \text{Si } 0.1 < d < 1 \text{ mm} \\ 1.1[(s-1)g \cdot d]^{0.5}; & \text{Si } d \geq 1 \text{ mm} \end{cases} \quad (4.21)$$

Avec

- ω : vitesse des particules (m/s) ;
- ν : viscosité cinématique (kg/m.s) ;
- s : gravité spécifique des particules ;
- d : diamètre des particules (m).

4.2.4. Fonctions d'évolution du lit sédimentaire

Cette fonction détermine la hauteur du lit sédimentaire grâce à un bilan de masse s'appliquant sur les sédiments. Deux modèles sont proposés par le logiciel HEC RAS :

- Le modèle d'Exner : La méthode considère un modèle de lit actif à trois couches qui comprend la capacité de former une couche grossière de surface qui va limiter l'érosion des matériaux plus profond simulant ainsi un lit blindant (méthode par défaut).
- Le modèle dit « Active Layer » (couche active) : cette méthode est une simplification approchée de deux couches actives du lit. L'hypothèse est seulement appropriée pour des lits de gravier [19].

Les deux fonctions reposent sur le principe simple que le niveau du lit augmente proportionnellement à la quantité de particules mobilisées. Cependant les deux modèles diffèrent par le nombre de couches considérées dans le lit sédimentaire [21].

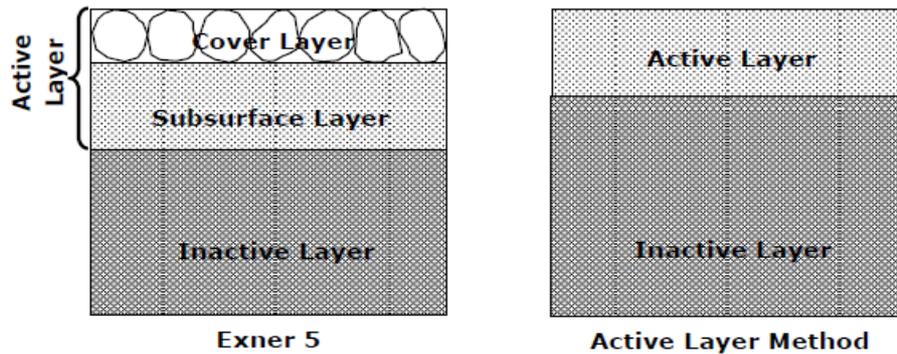


Figure 4.2 : modèles d'évolution du lit sédimentaire

Comme présenté sur la figure ci-dessus, le modèle d'Exner considère trois couches tandis que celui de l'Active Layer n'en considère que deux. La division du lit sédimentaire en différentes couches correspond à la prise en compte du degré de facilité de mise en mouvement des grains selon leur profondeur dans le lit. Plus la couche sera profonde, plus la proportion de mobilisation des grains sera faible, on parlera alors de couche inactive [21].

4.3. ETAPES DE MODELISATION

4.3.1. Organigramme de travail

Les étapes essentielles pour la modélisation sous HEC RAS sont définies comme suit :

1. Importation du projet sur HEC RAS et définition du système d'unités
2. Définition des différents paramètres d'entrées : ces paramètres concernent essentiellement trois fichiers de données :
 - Données géométriques : dans ce cas il faut choisir un coefficient de rugosité (coeff. de Manning Strickler) adéquat, ce coefficient permet de définir le caractère plus ou moins rugueux du lit de l'oued, il contribue à avoir une modélisation la plus proche de la réalité en prenant en compte la vitesse d'écoulement de l'eau sur le fond de la rivière et sur les berges. Il faut signaler en outre, que HEC-RAS permet à l'aide d'une fonctionnalité très avancée, de prendre en considération l'atténuation de la rugosité à mesure que la profondeur de l'eau augmente, ce qui rend le modèle encore plus réaliste ;
 - Données d'écoulement : concerne essentiellement l'entrée des données de la série des débits liquides ;
 - Données des sédiments : à ce niveau la courbe granulométrique est indispensable ou il faut l'entrée des données des caractéristiques des grains.

3. Simulation du transport des sédiments et choix de la méthode de simulation : dans cette étape on doit spécifier les méthodes de la simulation tout en respectant les conditions aux limites et les domaines de validité de chacune des fonctions utilisées.
4. Finalement, la visualisation des résultats.

On peut résumer les étapes ci-dessus sur le diagramme méthodologique présenté ci-après :

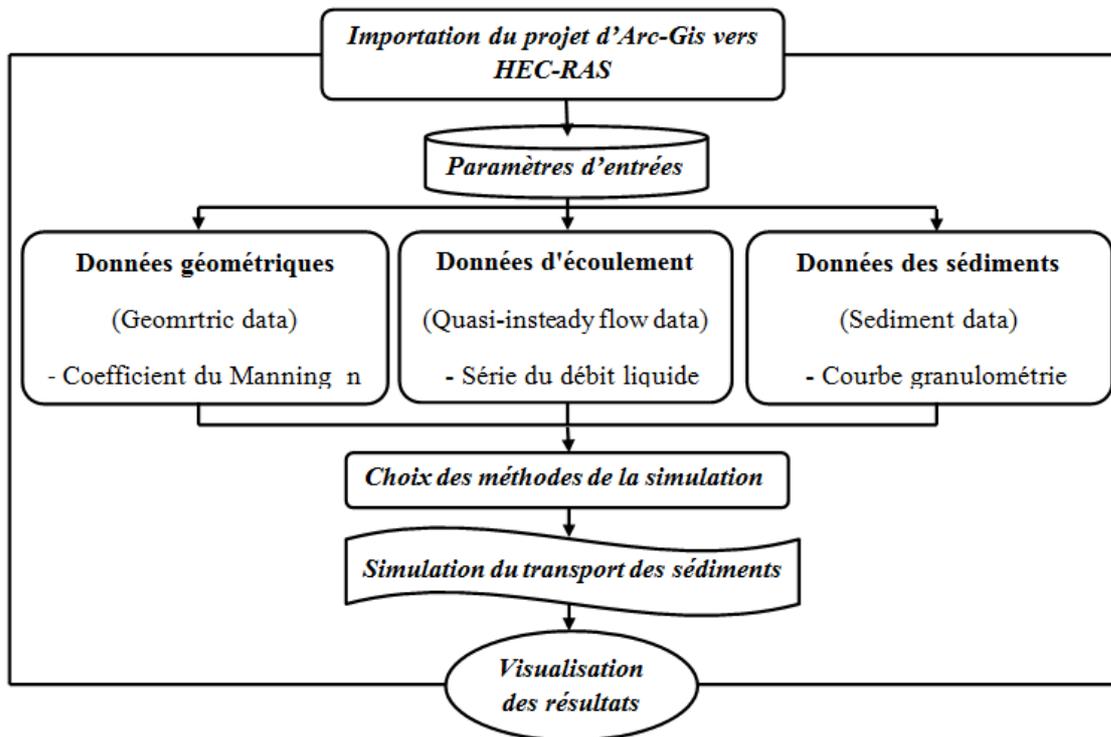


Figure 4.3 : Diagramme méthodologique de la simulation sur HEC-RAS

4.3.2. Les paramètres d'entrée

Afin de calculer le transport des sédiments par l'écoulement dans le tronçon de l'oued, trois fichiers de données d'entrée sont nécessaires :

- données géométriques,
- données d'écoulement,
- données des sédiments.

4.3.2.1. Fichier de données géométriques « Geometric data »

Ce fichier contient toutes les informations géométriques sur le cours d'eau analysé, soit les sections transversales, la distance entre chaque section, et les coefficients de Manning. Ces données sont extraites automatiquement à partir des fichiers importés à partir d'Arc-Gis suivant une distance et une direction donnée. Selon la longueur et la largeur du tronçon de

l'oued Cheliff modélisé dans notre projet, nous avons choisi une distance d'intervalle de 2500 m et une longueur des sections de 2000 m. Les données géométriques des sections transversales de l'oued sont représentées sur la figure (4.4) ci-après :

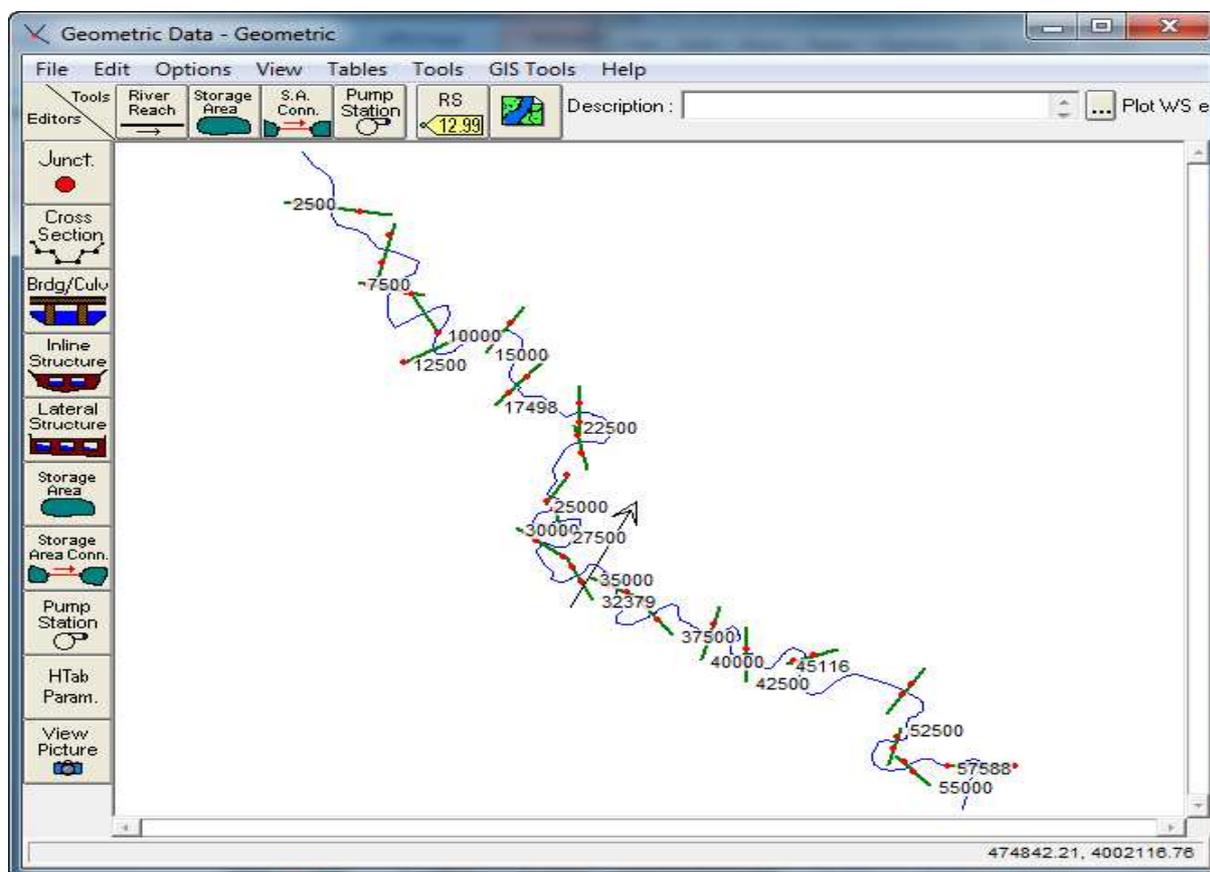


Figure 4.4. Importation de la géométrie du tronçon modélisée sur Hec Ras

Les données géométriques dans HEC-RAS consistent à relier les sections sur tout le tronçon de la rivière et créer le schéma du système fluvial. La partie modélisée consistait en une longueur de 59295.38 m qui a été divisée en 22 stations de la rivière (voir annexe 2). La station N° 55000 est la section transversale la plus en amont et la station N° 2500 représente la station la plus en aval, située juste avant la digue du barrage Ghrib.

La distance moyenne entre les stations de la rivière est d'environ 2500 m. Les données comprennent principalement les stations et les élévations pour chaque section. En outre, certaines autres données sont nécessaires telles que les longueurs en aval de portée pour gauche sur la banque (LOB), canal principal, et à droite sur la banque (ROB). Aussi les valeurs de Manning pour LOB, canal et ROB, ainsi que la contraction et d'extraction coefficients sont des données d'entrée nécessaires pour créer le fichier de données géométriques. La figure (4.5) ci-après représente les différentes caractéristiques de la section 35000. Les données d'entrée pour les autres stations de l'oued sont données en Annexe 2.

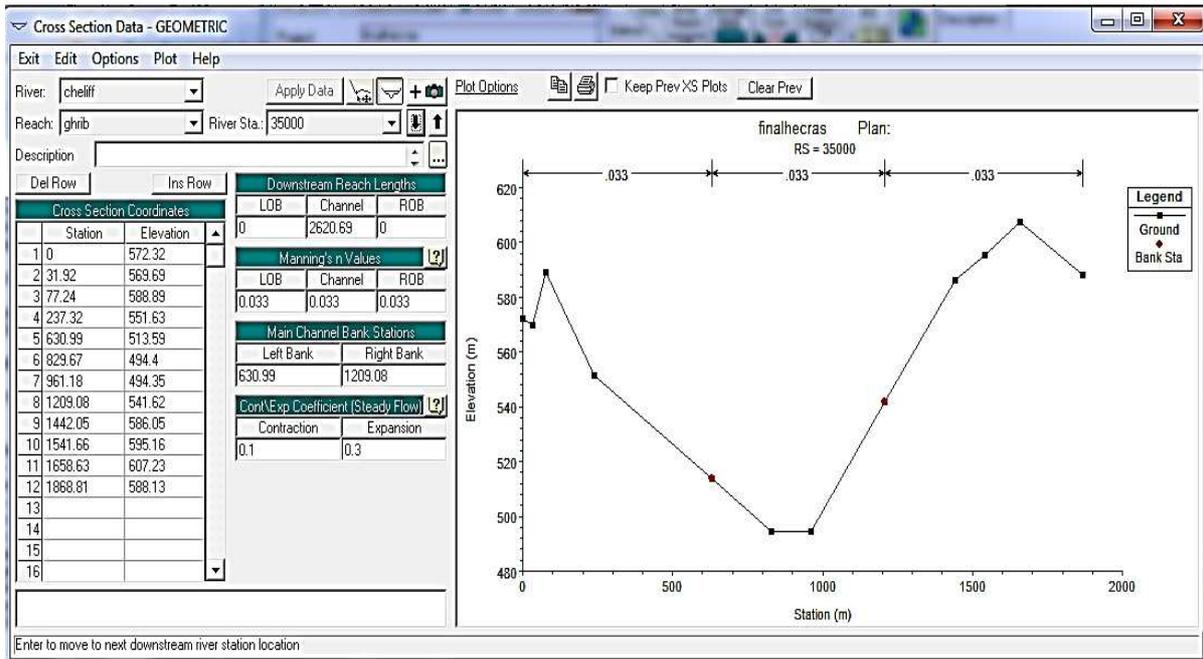


Figure 4.5 : Fenêtre d'une section transversale au niveau de la station 35000

Les stations des sections transversales sont représentées au moyen des points représentant des coordonnées X-Y, où X est la distance par rapport à un point de référence arbitraire placé sur la rive et Y est l'élévation du fond de la rivière.

La figure (4.6) suivante représente le profil des différentes stations :

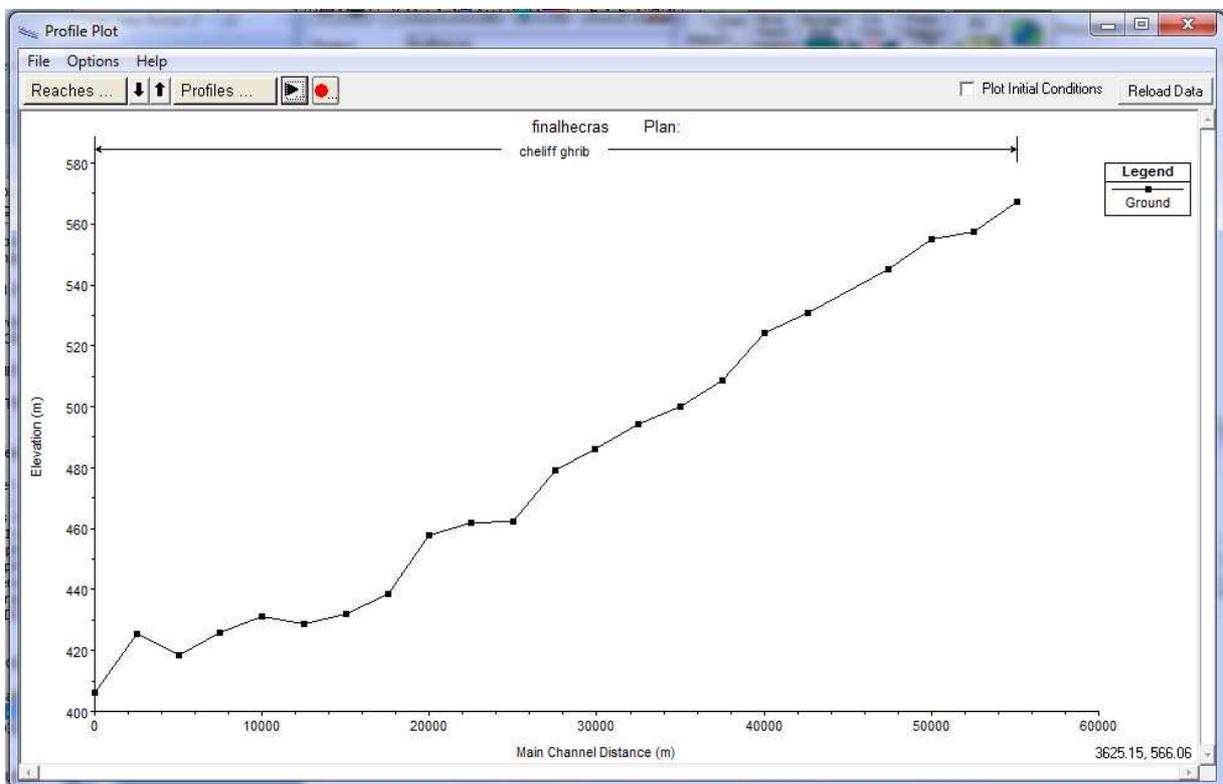


Figure 4.6 : profil en long des différentes stations

➤ **Choix du coefficient de Manning Strickler**

Ce paramètre permet de définir le caractère plus ou moins rugueux du lit de l'oued il contribue à avoir une modélisation plus proche de la réalité en prenant en compte la vitesse d'écoulement de l'eau sur le fond de la rivière et sur les berges. Il varie d'un secteur à l'autre du lit en fonction de la nature physique du matériau et de sa granulométrie (HEC-RAS divise la section mouillée en trois sous sections majeur gauche, mineur centrale et majeur droite).

La formule de pertes de charges linéaires utilisée dans le programme HEC-RAS et par la plus part des hydrauliciens est actuellement celle de la formule de Manning-Strickler. Elle s'exprime sous la forme :

$$\Lambda = \frac{Re^{1/3}}{8 g n^2} \quad (4.21)$$

Avec :

Λ : est le coefficient adimensionnel de perte de charge ;

Re : est le coefficient de Reynolds : $Re = \frac{\rho U D_H}{\mu}$ (4.22)

(où ρ et μ représente respectivement la masse volumique et la viscosité du fluide et D_H est le diamètre hydraulique dans ce cas et U est la vitesse moyenne.)

n : est le coefficient de Manning,

La formule de Strickler correspond à : $n = 1/ K$ où K est le coefficient de Strickler. On représente dans le tableau (4.4) quelques valeurs estimées pour le coefficient de Manning en fonction de la nature des parois.

Dans le cas d'une rivière à lit de gravier et à berges non végétalisées, ce coefficient est donné par :

$$K = 21 * d_{50}^{1/6} \quad (4.23)$$

où : d_{50} désigne le diamètre (en mètre) des grains du lit tel que 50% en poids aient un diamètre inférieur [17].

Tableau 4.3 : Valeurs estimées pour le coefficient de Manning en fonction de la nature des parois

Nature des parois	N (Manning) (s/m ^{1/2})	K (Strickler) (m ^{1/3} /s)
Béton lisse	0.011 à 0.013	77 à 91
Béton brut	0.013 à 0.016	62 à 77
Canal en terre, non enherbé	0.017	60
Canal en terre, enherbé	0.02	50
Rivière de plaine, sans végétation arbustive	0.025 à 0.029	35 à 40
Rivière de plaine, large, végétation peu dense	0.033	30
Rivière à berges étroites très végétalisées	0.067 à 0.1	10 à 15
Lit majeur en prairie	0.033 à 0.05	20 à 30
Lit majeur en vigne ou taillis	0.067 à 0.1	10 à 15
Lit majeur urbanisé	0.067 à 0.1	10 à 15
Lit majeur en forêt	>0.1	<10

Dans la mesure ou notre étude porte sur un tronçon de l’oued- cheliff ou la végétation est peu dense, nous avons opté pour un coefficient de Manning : n=0.033

4.3.2.2. Fichier de données de l’écoulement

Pour chaque régime, HEC-Ras permet de créer un fichier d’écoulement approprié ; dans le cas d’un régime permanent, il faut introduire un débit que le programme considère constant sur tout le tronçon étudié, par contre si le régime transitoire est choisi, le programme exige une série de débits en fonction du temps (hydrogramme), dans ce cas, le débit changera d’un point l’autre du tronçon.

Les simulations de transport des sédiments dépendent des données hydrauliques quasi - instable. Dans cette étude, l’évaluation des sédiments transportés jusqu’à la retenue du barrage Ghrib dépend des données en entrées de la série du débit liquide et du transport solide fournies par l’Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), issus de la station hydrométrique, Ghrib amont qui est située à l’amont de barrage Ghrib.

Les données d’observations des débits liquides sont composées de 365 enregistrements instantanées de la période de 1992-1993 (Annexe 3).

La figure 4.7 représente l’entrée des données des débits liquides sur HEC-RAS :

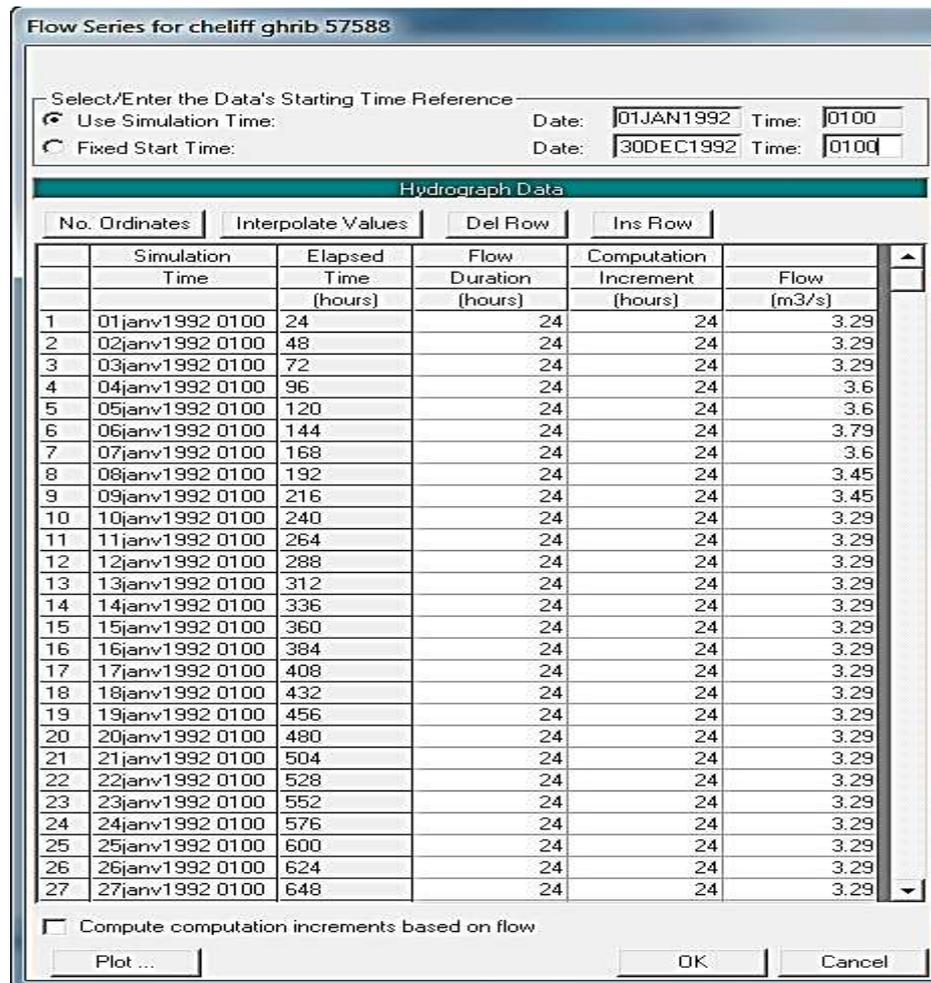


Figure 4.7 : Entrée des données de la série des débits liquides sur HEC-RAS

L'hydrogramme peut être déduit directement après l'introduction des données. Ce dernier peut être présenté sur La figure 4.8 ci-après :

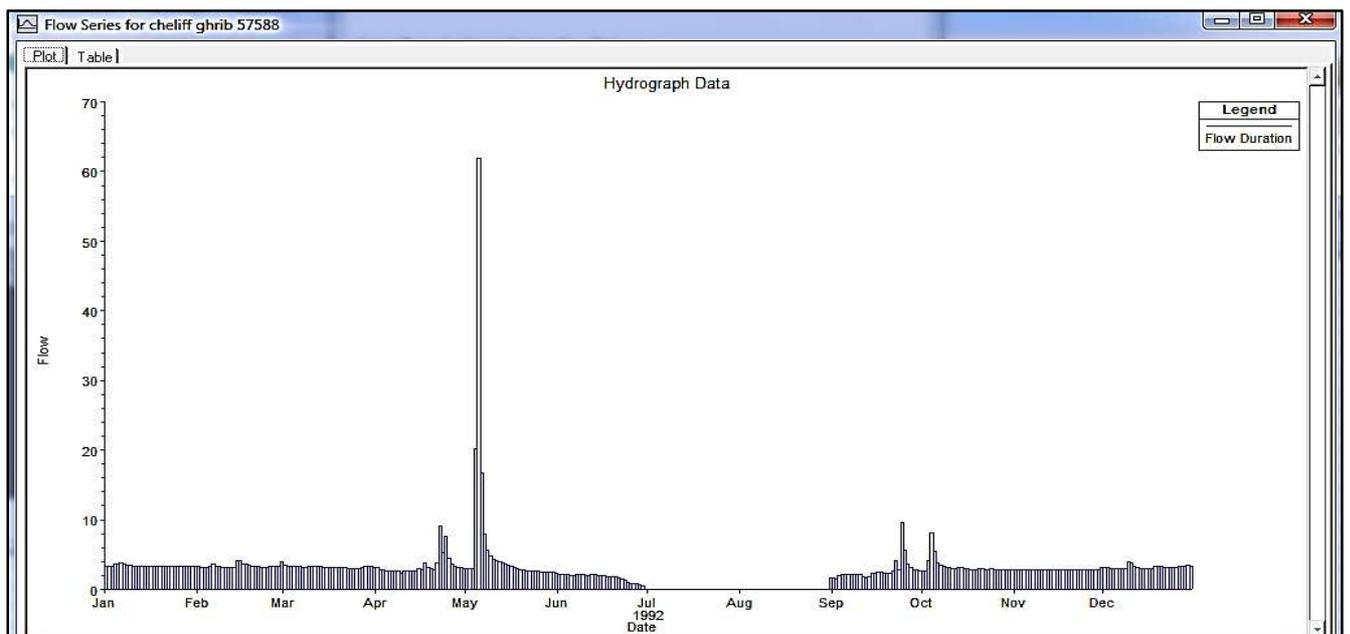


Figure 4.8 : Hydrogramme de la série des débits liquides donné sous HEC-RAS

De la figure ci-dessus, nous remarquons clairement que le débit liquide varie sensiblement entre 2.33 m³/s (débit minimum) et 9.18 m³/s durant la période allant du 01 Janvier jusqu'au 03 Mai. Cette valeur augmente progressivement jusqu'à une valeur maximale de crue 61.82 m³/s, observée durant la journée du 5 mai. Le débit d'écoulement diminue par la suite, jusqu'à atteindre sa valeur minimale.

Du mois de Juillet jusqu'au début de septembre, on remarque des débits d'écoulement nuls cela peut être expliquée soit par un débit d'étiage très faible et négligeable ou bien par l'absence des mesures durant cette période. Dans les quatre mois qui suivent le débit d'écoulement se stabilise successivement jusqu'à la fin de l'année sur une valeur de 2.99 m³/s.

La simulation du transport solide ne peut être effectuée que si les valeurs des hauteurs d'eau et des températures sont introduites. Ces valeurs constituent une série composées de 365 enregistrements instantanés durant la période 1992-1993.

4.3.2.3. Fichier de données des sédiments

Le fichier de données des sédiments est basé sur trois grandeurs d'entrée principales :

- les propriétés des sédiments générales telles que le facteur de forme, la densité, etc.
- la gradation du lit à chaque station ;
- les conditions aux limites des sédiments

A. Propriétés des sédiments

Les propriétés des sédiments en HEC-RAS sont créées par défaut, et sont représentés dans la figure 4.9 ci-dessous :

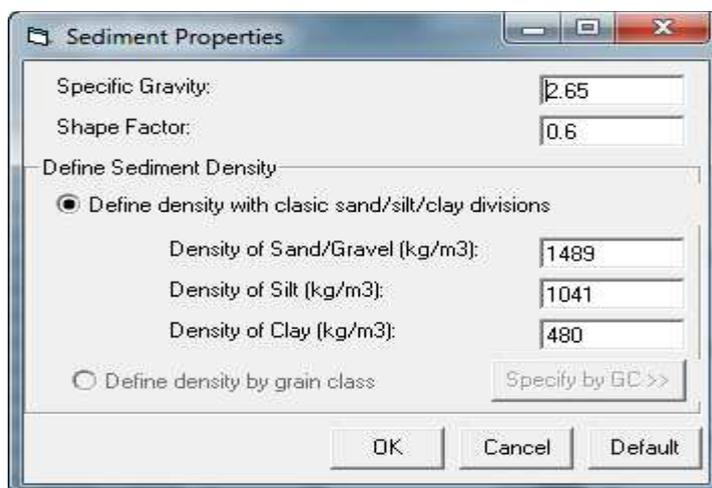


Figure 4.9 : fenêtre des propriétés des sédiments sur HEC-RAS

La gravité spécifique $s = 2.65$;

Le factor de forme = 0.6 ;

La densité du sable / gravies (kg/m³) = 1489

La densité de Limon (kg/m³) = 1041

La densité de l'argile (kg/m³) = 480

B. Gradation du lit à chaque station

Avant d'étudier la gradation du lit, il faut deux étapes principales :

- Entrées des données de l'analyse granulométrique,
- Choix de la fonction de transport utilisé et de la fonction de calcul de la vitesse de sédimentation.

➤ **Granulométrie des sédiments**

Par défaut HEC RAS utilise 20 classes de grains. Les classes des grains par défaut sont détaillées dans le tableau 4.4ci-après :

Tableau 4.4 : Les classes des grains utilisées par défaut sur HEC-RAS

Nature des sédiments	Intervalle des diamètres des grains (mm)	Diamètre moyenne (mm)
Argile	0.002-0.004	0.003
Limon très fin	0.004-0.008	0.006
limon fin	0.008-0.016	0.011
Limon moyen	0.016-0.032	0.023
limon grossier	0.032-0.0625	0.045
Sable très fin	0.0625-0.125	0.088
Sable fin	0.125-0.250	0.177
Sable moyen	0.250-0.50	0.354
Sable grossier)	0.50-1.00	0.707
Sable très grossier	1-2	1.41
Gravier très fin	2-4	2.83
Gravier fin	4-8	5.66
Gravier moyen	8-16	11.3
Gravier grossier	16-32	22.6
Gravier très grossier	32-64	45.3
Petits cailloux	64-128	90.5
Gros galets	128-256	181
Petits blocs	256-512	362
rochers moyens	512-1024	724
Grands rochers	1024-2048	1448

L'absence de l'analyse granulométrique du tronçon de l'oued, nous a obligé de limiter l'étude uniquement au tronçon du lit de la retenue du barrage Ghrib, qui inclue 8 stations. Les

résultats de l'analyse granulométrique effectuée sur la vase de la retenue sont illustrés sur le tableau 4.5 suivant [22].

Tableau 4.5 : résultat de l'analyse granulométrique

Vase	Grains (mm)		
	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)
Ghrib	15	65	20

En utilisant les résultats ci-dessus nous avons déduit la gamme des diamètres correspondant, et par la suite nous avons obtenu la courbe de gradation présentée sur la figure 4.10 suivante :

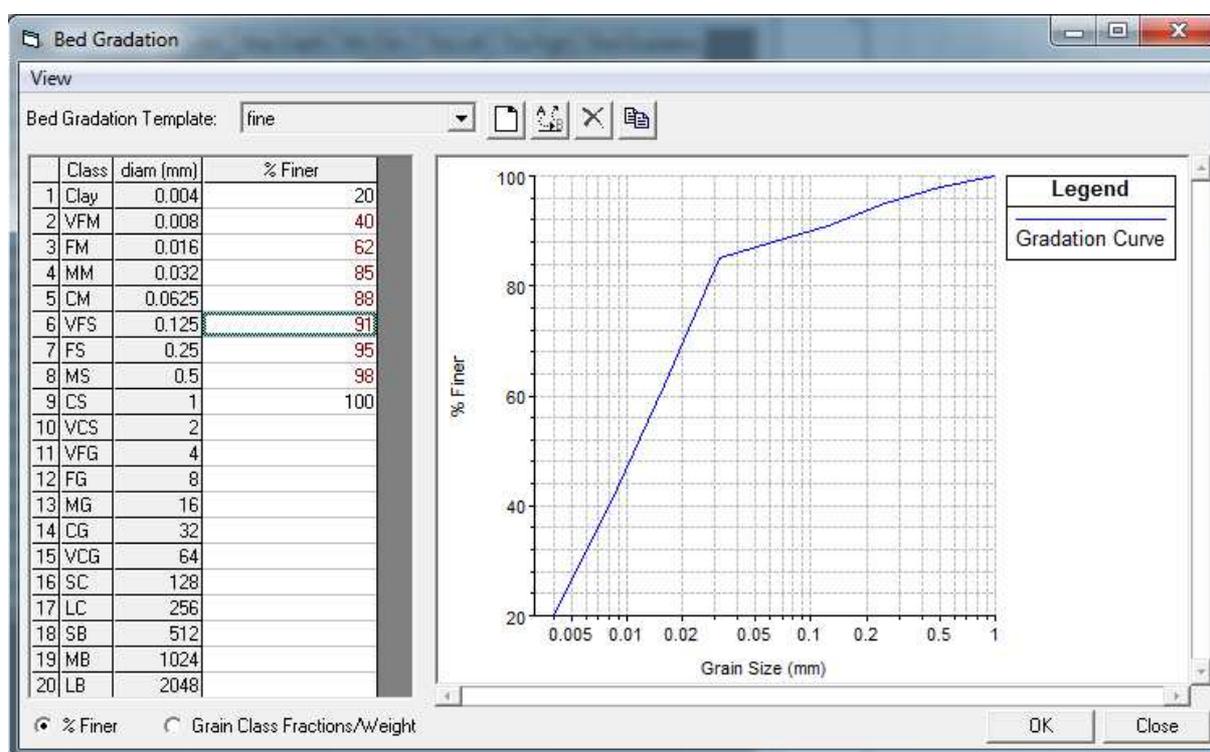


Figure 4.10 : Gradation du lit

➤ **Choix des fonctions gérés par HEC RAS**

Par suite des résultats précédant, notre choix était validé en respectant le domaine de validité de chacune des fonctions :

- Fonction de transport : la plus part des formules sont adaptés à des granulométries assez grossières, seule la formule d'Engelund-Hansen est particulièrement utilisée pour le calcul du transport total des sédiments pour des matériaux fins ;
- Vitesse de sédimentation : notre choix s'est porté sur la formule de Ruby, c'est la méthode utilisée par default sur HEC-RAS ;
- Fonctions d'évolution du lit sédimentaire : nous avons adopté le modèle d'Exner.

En introduisant les résultats de l'analyse granulométrique et en validant le choix des fonctions définis ci-dessus on obtient la courbe décrivant le potentiel érosif le long du lit au niveau de chacune des stations (figure 4.11).

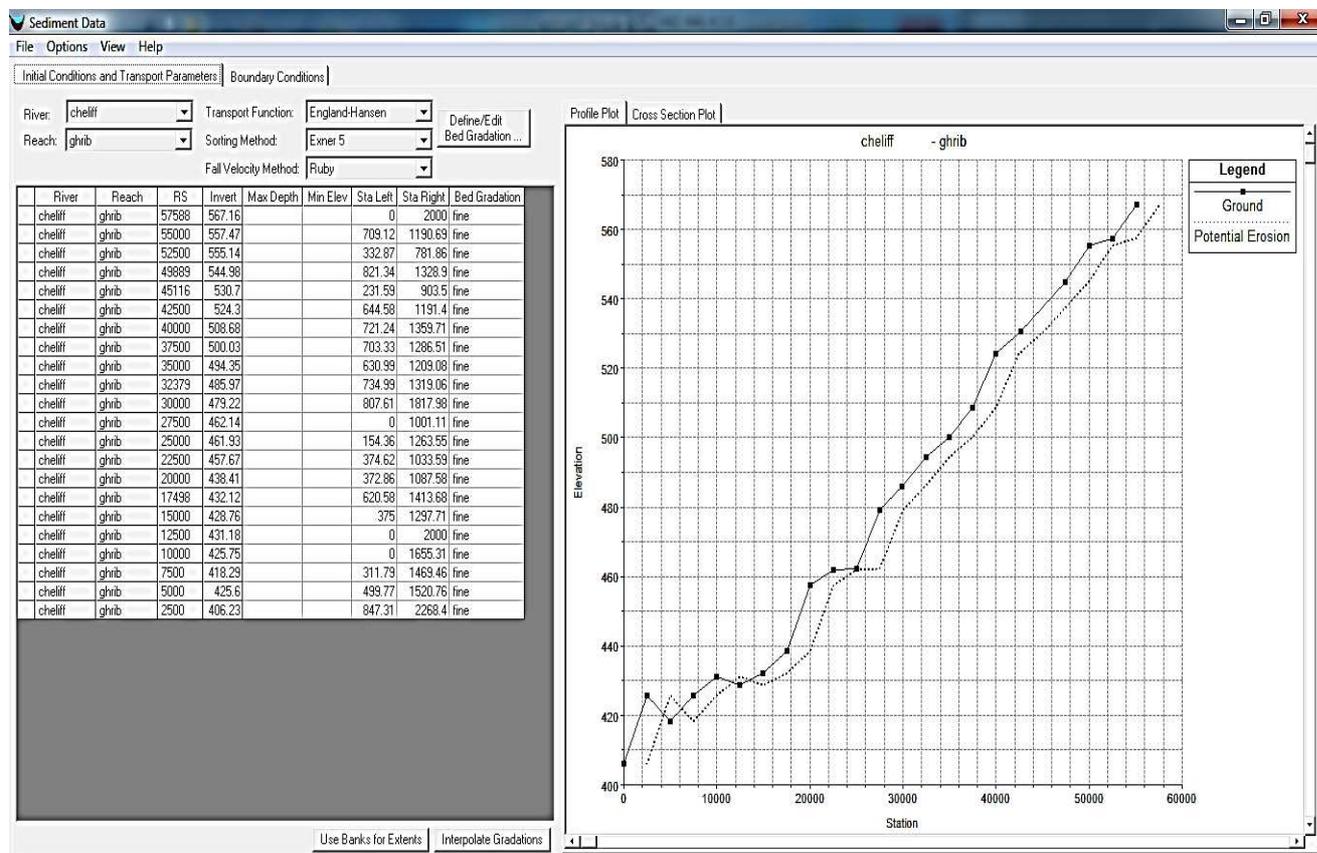


Figure 4.11 : Fenêtre de données des sédiments

C. Conditions aux limites des sédiments

Le logiciel HEC-RAS propose trois conditions limites distinctes :

- " Equilibrium Load " qui correspond à une altitude du lit sédimentaire constante au cours du temps. Ceci implique qu'aucun dépôt ni aucune érosion ne peut se produire à cet endroit à tout instant.
- "Rating Curve" qui permet de fixer une quantité de sédiments qui traverse la section limite par jour.
- La dernière condition qui était validée par notre projet : "Sediment load series", ou nous avons introduit la série des mesures du débit solide, fournis par l'ANRH (de la station Ghrib amont) qui est composée de 186 enregistrements instantanés durant la période de 1992-1993.

La figure 4.12 ci-après représente l'introduction des données sur HEC RAS :

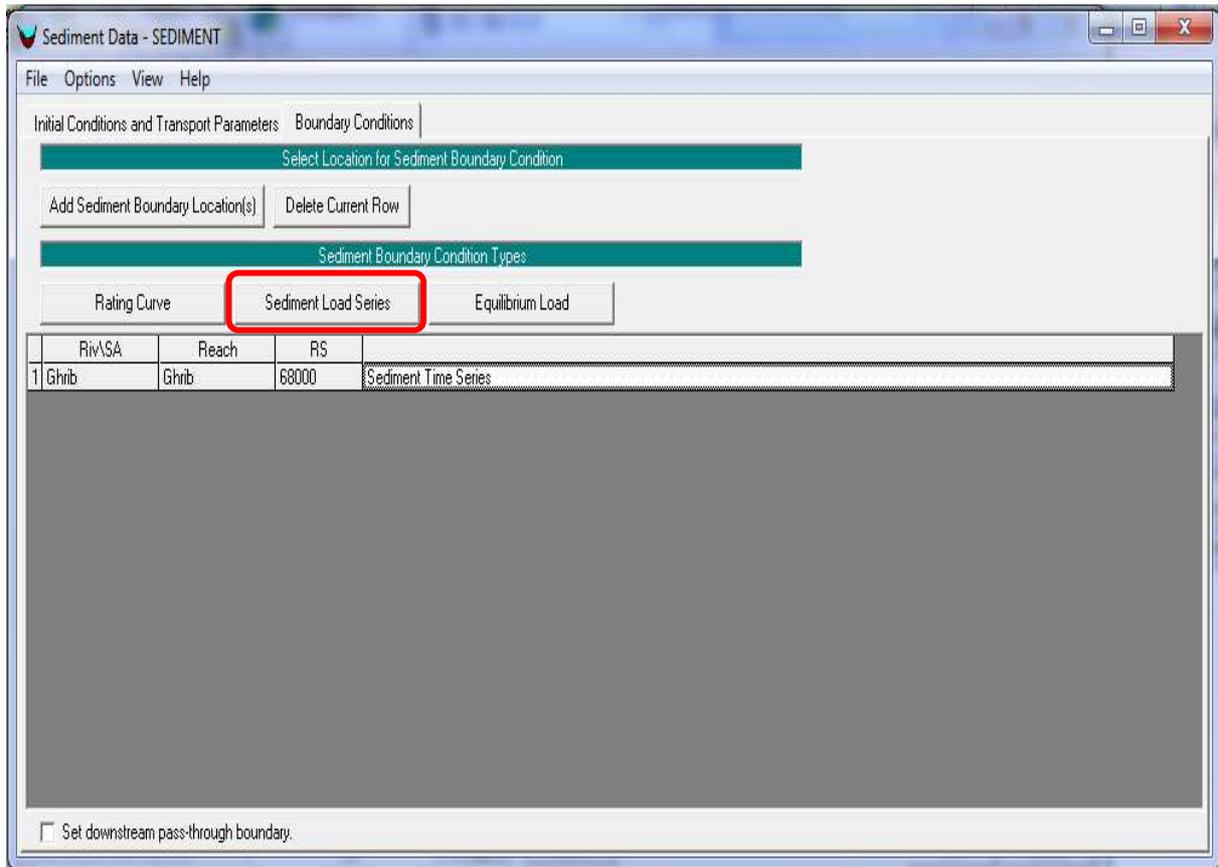


Figure 4.12 : Conditions aux limites

La figure 4.13 ci-après, représente la fenêtre obtenue pour l'introduction des données de la série du débit solide :

Sediment Load Series

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 01JAN1992 Time: 0100

Fixed Start Time: Date: 30DEC1992 Time: 0100

Sediment Series

No. Ordinates Interpolate Values Import Dur Del Row Ins Row

No. Ordinates	Simulation Time	Elapsed Time (hours)	Duration (hours)	Sediment Load (tonnes)
1	01janv1992 01	336	336	0
2	15janv1992 01	552	216	0
3	24janv1992 01	576	24	16.716
4	25janv1992 01	744	168	0
5	01févr1992 01	768	24	65.6
6	02févr1992 01	792	24	59.04
7	03févr1992 01	816	24	44.66
8	04févr1992 01	835	19	39.99
9	04févr1992 20	840	5	27.156
10	05févr1992 01	864	24	27.156
11	06févr1992 01	883	19	24.38
12	06févr1992 20	888	5	33.966
13	07févr1992 01	912	24	29.14
14	08févr1992 01	936	24	32.55
15	09févr1992 01	960	24	15.208
16	10févr1992 01	1080	120	0
17	15févr1992 01	1416	336	0
18	29févr1992 01	1440	24	0
19	01mars1992 0	1776	336	0
20	15mars1992 0	2040	264	0
21	26mars1992 0	2059	19	0
22	26mars1992 20	2064	5	111.92
23	27mars1992 0	2088	24	125.488
24	28mars1992 0	2112	24	57.96
25	29mars1992 0	2136	24	110.854
26	30mars1992 0	2160	24	6.61
27	31mars1992 0	2184	24	0
28	01avr1992 010	2352	168	0
29	08avr1992 010	2448	96	39.121
30	12avr1992 010	2472	24	92.754
31	13avr1992 010	2496	24	23.8
32	14avr1992 010	2520	24	5.95

Figure 4.13 : Introduction des données de la série des débits solides en HEC-RAS

La variation du transport des sédiments peut être obtenue automatiquement, elle est représentée sous forme d'un hydrogramme sur la figure 4.14 suivante :

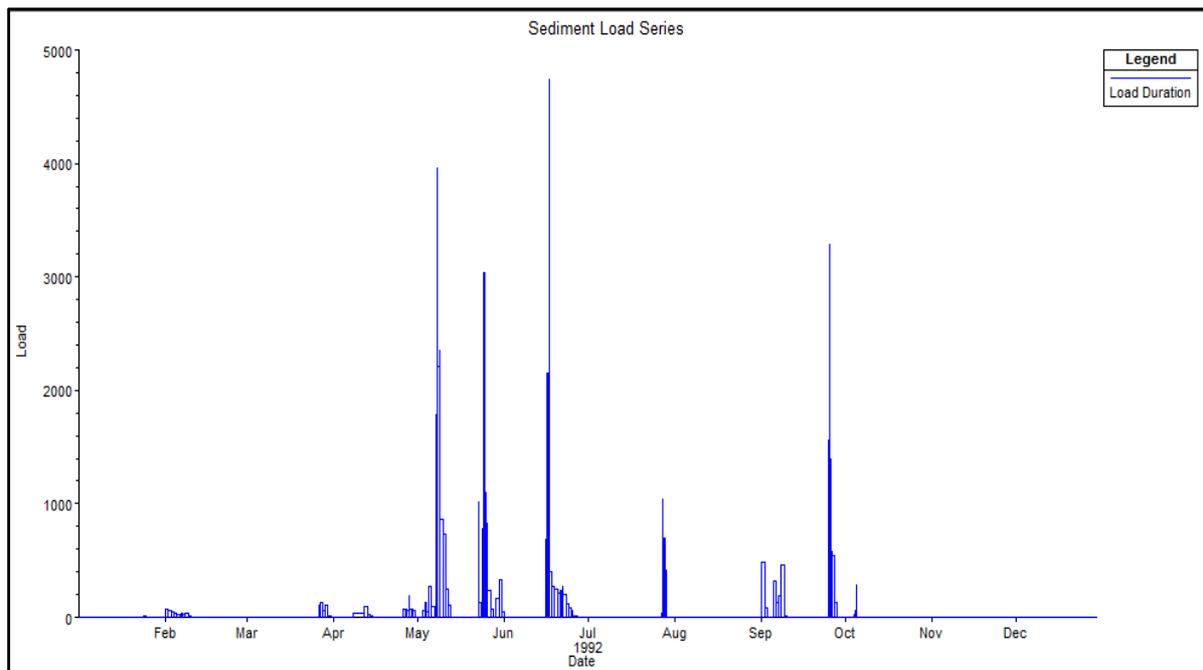


Figure 4.14 : Variation du transport des sédiments durant l'année 1992

De la figure ci-dessus, on peut voir clairement la quantité importante des sédiments transportés vers la retenue du barrage Ghrib durant les mois de : Mai, juin, juillet et octobre. La valeur maximale atteinte est de 4735 tonnes observée pour la journée du 17 Juin.

L'irrégularité de la variation du débit solide est remarquée également. Ceci peut être expliqué, d'une part, par l'absence des mesures sur quelques mois de l'année tels que, les mois de Mars, novembre et décembre, d'autre part, il faut toujours garder en esprit que le transport solide n'est jamais constant, mais il fluctue toujours en permanence dans le temps et parfois de plusieurs ordres de grandeurs.

4.4. SIMULATION DU TRANSPORT DES SEDIMENTS

Après introduction des paramètres d'entrées tout en respectant les conditions aux limites nécessaires, la dernière étape consiste à l'exécution du programme et la validation de la simulation.

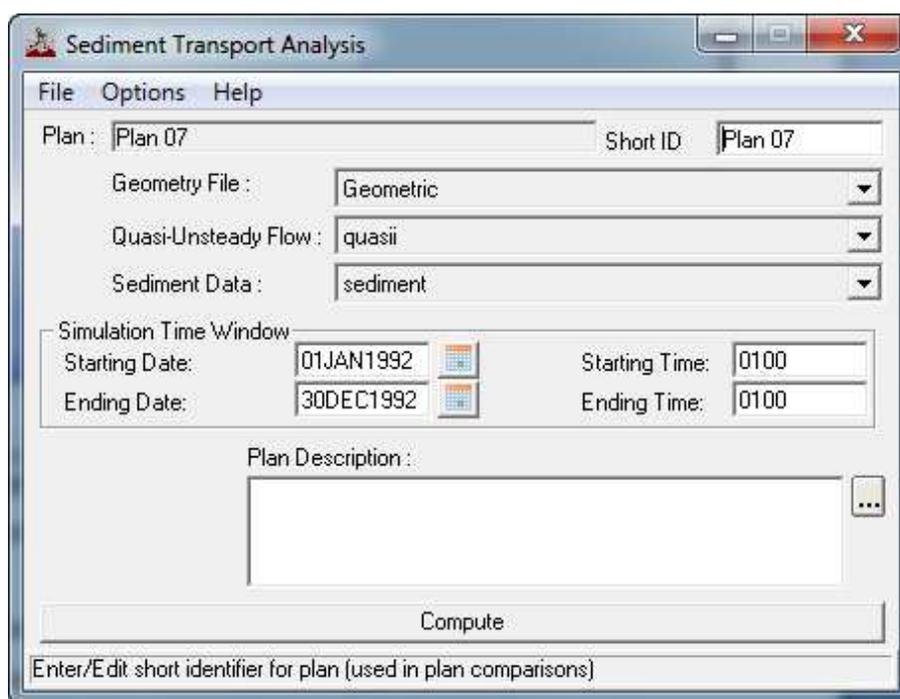


Figure 4.15 : Analyse du transport des sédiments et exécution

Une fenêtre montrant la progression de la simulation s'ouvrira et les calculs s'effectueront. Celle-ci est présentée sur la figure 4.16 ci-après :

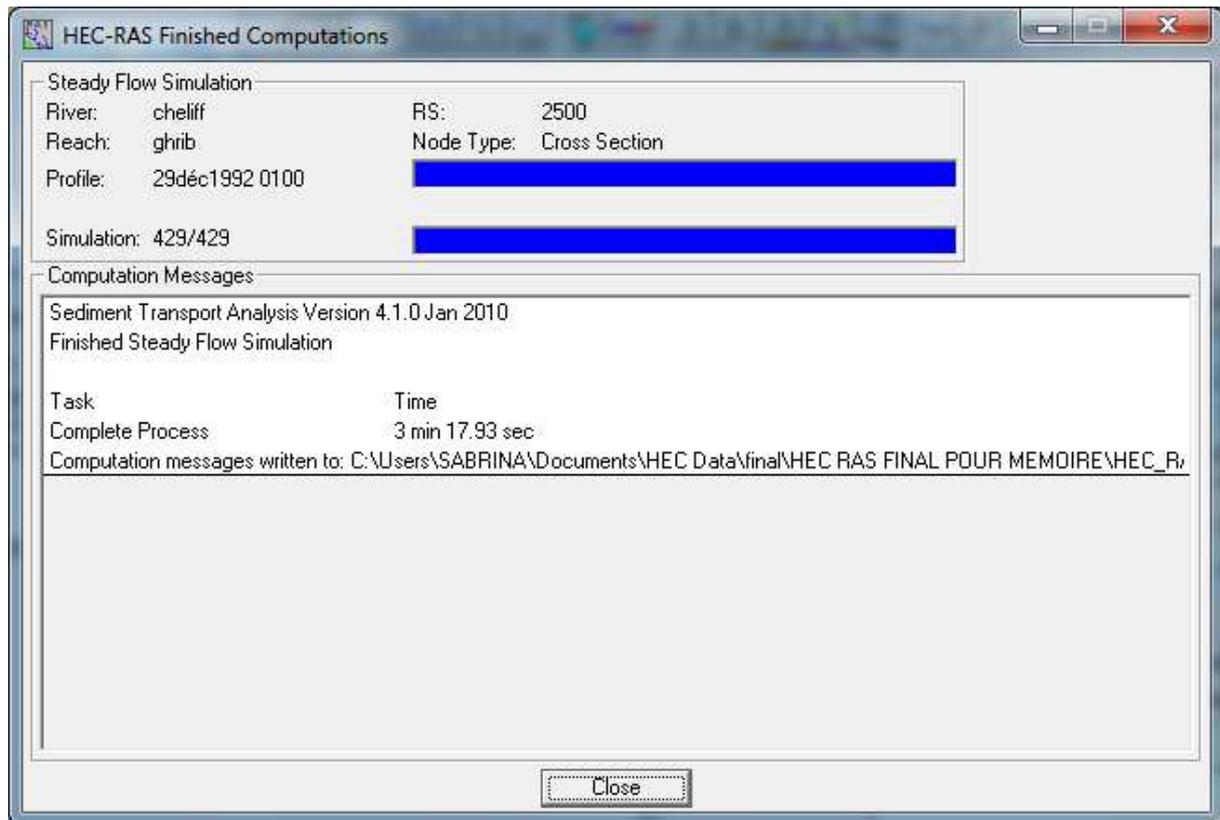


Figure 4.16 : Progression de la simulation

4.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons définis les étapes essentielles pour la simulation du transport des sédiments à savoir l'ensemble des différents paramètres d'entrées et les conditions aux limites. La simulation a été effectuée, et les résultats obtenus seront développés et interprétés au dernier chapitre

CHAPITRE 5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1. INTRODUCTION

Une fois que tous les paramètres d'entrée ont été définis, les conditions aux limites ont été respectées, nous avons lancé en premier lieu, la simulation de l'écoulement le long du tronçon étudié de l'oued Cheliff en fonction des données mis à notre disposition. Les résultats obtenus peuvent être visualisés en tant que fichiers graphiques ou sous forme des tableaux.

La simulation du transport des sédiments a été exécutée par la suite. Les fichiers de sorties ont caractérisées principalement les stations situées le long du lit du barrage Ghrib.

Dans le présent chapitre, nous avons essayé d'interpréter l'ensemble des résultats obtenus d'abord sur le plan hydraulique et par la suite sur le plan transport sédimentaire.

5.2. VISUALISATION ET DISCUSSION DES RESULTATS DE LA SIMULATION

5.2.1. Sur le plan hydraulique

Le logiciel HEC RAS permet de créer des tableaux récapitulatifs de l'ensemble des paramètres hydrauliques pour le tronçon de l'oued étudié, les résultats sont obtenus pour chaque station (profil en travers), ou pour l'ensemble des stations à la fois.

Le tableau 5.1 ci-dessous représente les paramètres hydrauliques essentiels de l'écoulement le long du tronçon de l'oued Cheliff pour un débit maximal de 61.82 m³/s (crue observée le 05 mai 1992) et également pour un débit d'étiage de 0.56 m³/s.

Tableau 5.1. Principaux paramètres hydrauliques pour un ensemble de sections

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Top Width (m)	Froude # Chl
ghrib	20000	05mai1992 0100	61.82	2.94	21.05	437.98	439.73	440.17	24.02	1.00
ghrib	20000	29juin1992 0100	0.56	1.18	0.48	434.14	434.41	434.49	3.48	1.01
ghrib	17498	05mai1992 0100	61.82	0.87	70.97	428.80	432.78	432.82	35.66	0.20
ghrib	17498	29juin1992 0100	0.56	0.01	67.57	428.50	432.44	432.44	34.27	0.00
ghrib	15000	05mai1992 0100	61.82	0.01	4464.73	428.78	432.80	432.80	1395.93	0.00
ghrib	15000	29juin1992 0100	0.56	0.00	3925.42	428.82	432.44	432.44	1354.20	0.00
ghrib	12500	05mai1992 0100	61.82	0.10	640.19	431.23	432.80	432.80	561.10	0.03
ghrib	12500	29juin1992 0100	0.56	0.00	437.25	431.24	432.44	432.44	532.94	0.00
ghrib	10000	05mai1992 0100	61.82	0.05	1136.46	425.75	432.80	432.80	255.93	0.01
ghrib	10000	29juin1992 0100	0.56	0.00	1045.74	425.75	432.44	432.44	247.22	0.00
ghrib	7500	05mai1992 0100	61.82	0.01	7066.41	418.29	432.80	432.80	902.54	0.00
ghrib	7500	29juin1992 0100	0.56	0.00	6742.15	418.29	432.44	432.44	895.77	0.00
ghrib	5000	05mai1992 0100	61.82	0.13	493.66	425.60	432.80	432.80	137.13	0.02
ghrib	5000	29juin1992 0100	0.56	0.00	445.56	425.60	432.44	432.44	130.28	0.00
ghrib	2500	05mai1992 0100	61.82	0.00	20279.98	406.23	432.80	432.80	1452.69	0.00
ghrib	2500	29juin1992 0100	0.56	0.00	19759.90	406.23	432.44	432.44	1434.47	0.00

Avec :

- E.G. Elev : l'élévation d'énergie graduelle ;
- Flow Area : la surface total active d'eau dans la section transversale ;
- Froude # Ch : le nombre du Froude ;
- Min Ch El: l'élévation minimale de la section considérée ;
- Q Total : le débit total entrant dans la section considérée ;
- Top width : largeur d'eau dans la section considérée ;
- Vel chnl : la vitesse moyenne dans la section considérée ;
- W.S. Elev: l'élévation de la surface d'eau calculée par l'équation d'énergie.

5.2.1.1. Le nombre de Froude

Le nombre de Froude exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces de

pesanteur, et s'écrit :
$$F = \left[\frac{Q^2 \left(\frac{\partial A}{\partial h} \right)}{g \cdot A^3} \right]^{1/2} \quad (5.1)$$

Avec : A : la surface de l'eau ; H : la hauteur de l'eau ;

g: l'accélération de pesanteur ;

Q : le débit dans la section.

La figure suivante montre une comparaison du nombre de Froude obtenu des résultats de la simulation, dans les différentes stations considérées.

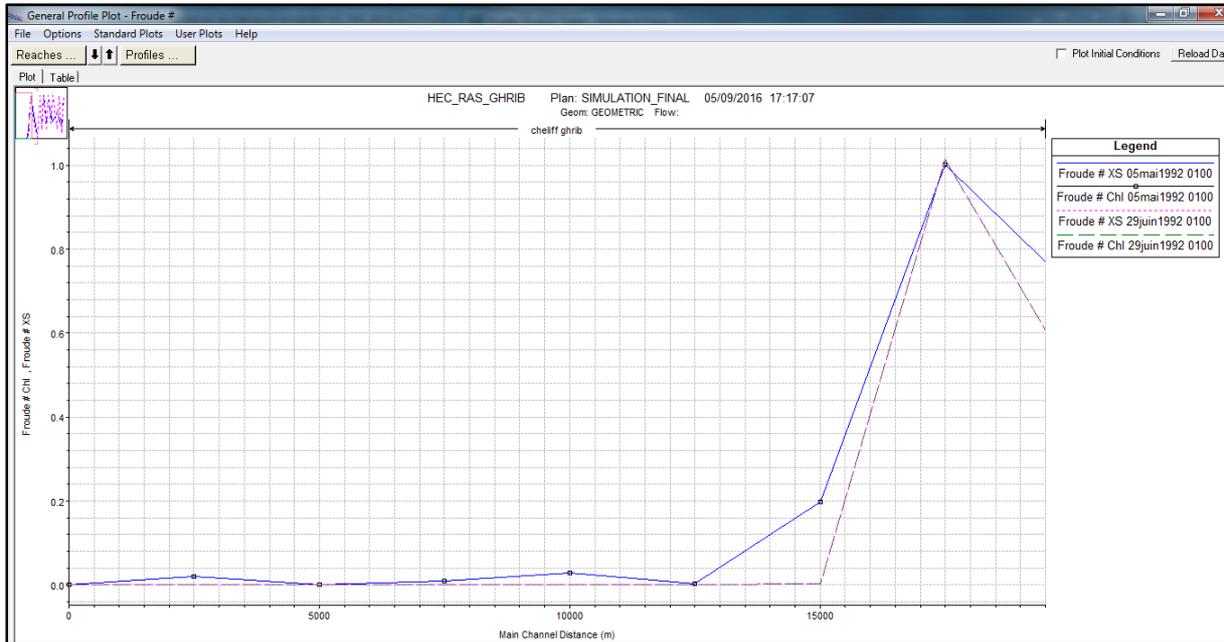


Figure 5.1 : Comparaison du nombre de Froude obtenu pour le débit de crue et le débit d'étiage

D'après les valeurs du nombre de Froude on peut distinguer trois cas possible [23] :

- Si $Fr > 1$ le régime est dit torrentiel (critique ou supercritique avec des grandes vitesses) ;
- Si $Fr < 1$ on parle d'écoulement fluvial (sous critique avec des faibles vitesses) ;
- Si $Fr = 1$ c'est le cas du régime critique.

Le diagramme de la variation montre que les valeurs du nombre de Froude varié entre 0 et 1.01, ce qui correspond au régime critique ou au régime fluvial, ceci est dû à la faible pente, à la rugosité du lit et donc à la tension de frottement sur le fond.

5.2.1.2. La vitesse

La figure 5.2 ci-après, montre une comparaison des vitesses des résultats de la simulation dans les différentes stations considérées.

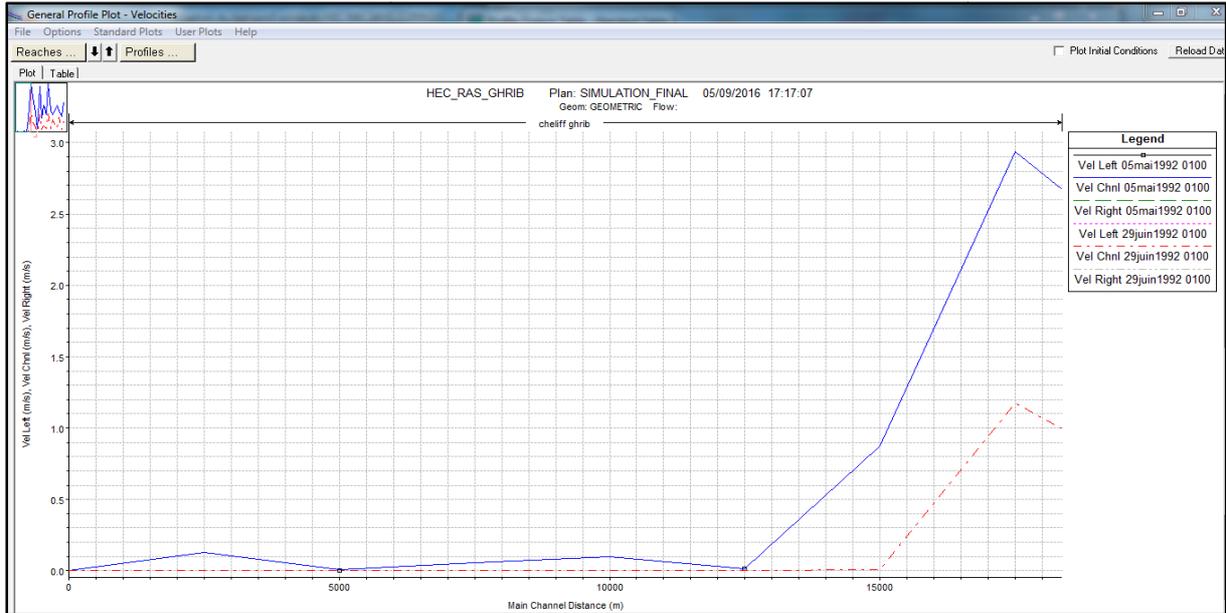


Figure 5.2 : Variation de la vitesse en fonction de la distance (comparaison entre le débit de crue et le débit d'étiage)

Nous remarquons clairement que la vitesse est plus importante lorsque le débit est important, ainsi elle devient plus faible en allant de plus en plus vers l'aval, où l'écoulement devient fluvial ce qui favorise la décantation des particules en suspension.

5.2.1.3. La surface d'eau

La figure suivante présente une comparaison des surfaces d'eau dans les différentes stations.

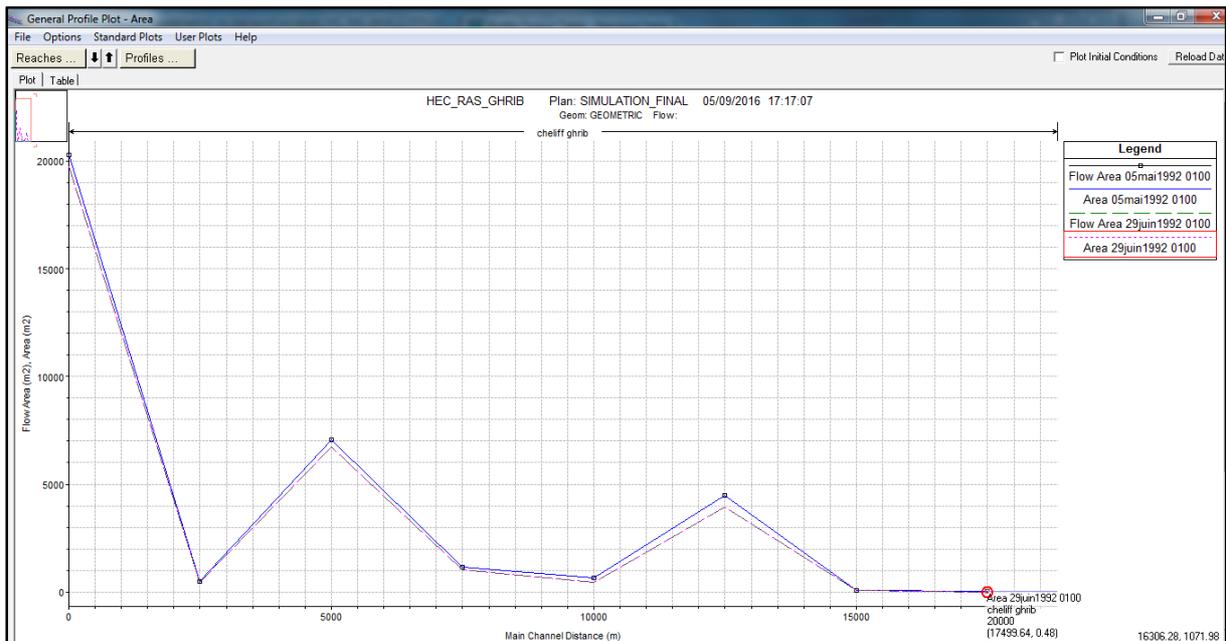


Figure 5.3 : Comparaison de la surface entre le débit de crue et le débit d'étiage

Dans la figure ci-dessus, le débit liquide augmente tout en allant vers l'aval, la surface d'eau augmente, elle devient de plus en plus importante, ce qui est logique car c'est le niveau de la stagnation d'eau.

La figure 5.4 ci-dessous présente une comparaison des surfaces d'eau au niveau de la station de la rivière 35000.

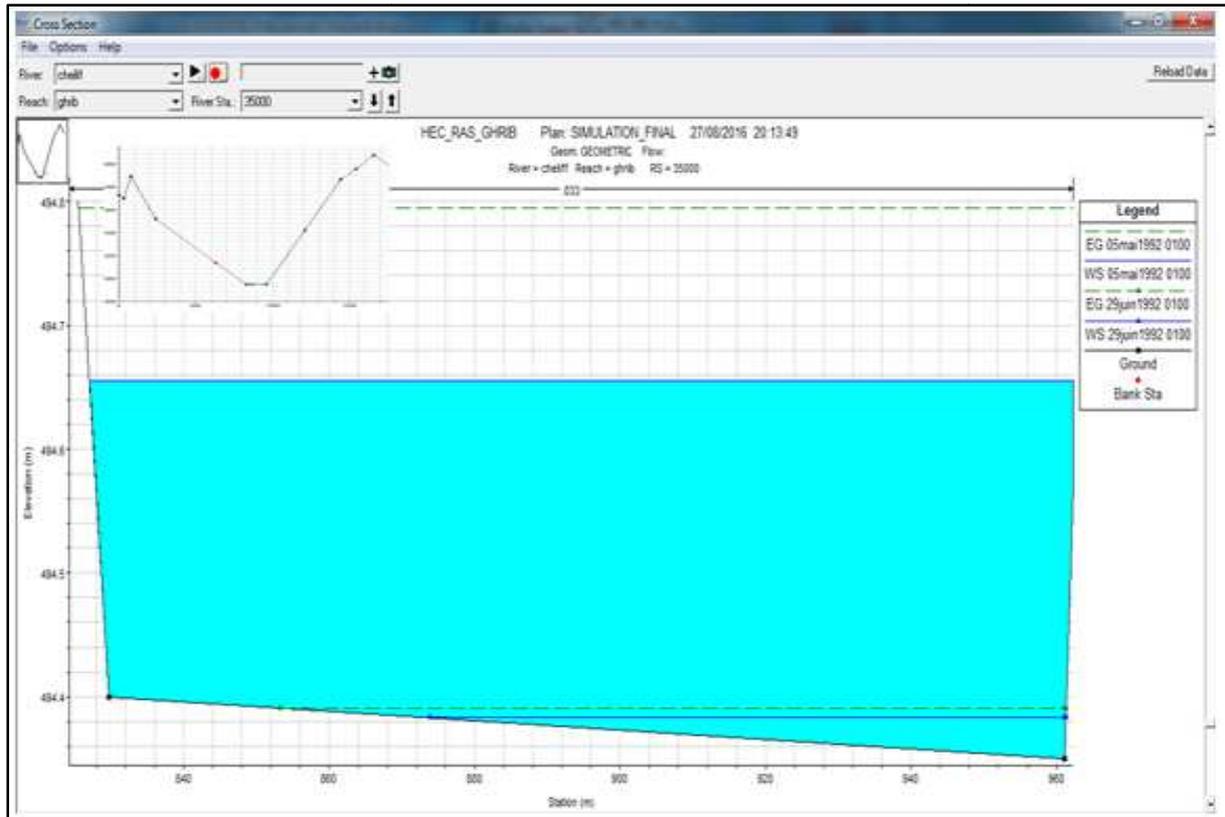


Figure 5.4 : Comparaison de la surface d'eau entre le débit de crue et le débit d'étiage au niveau de la station 35000

5.2.1.4. Le plan du profile des hauteur d'eau

Un des résultats très intéressant est le plan du profile en long, ou les hauteurs d'eau sont déterminées au niveau de chacune des stations (figure 5.5 ci-après).

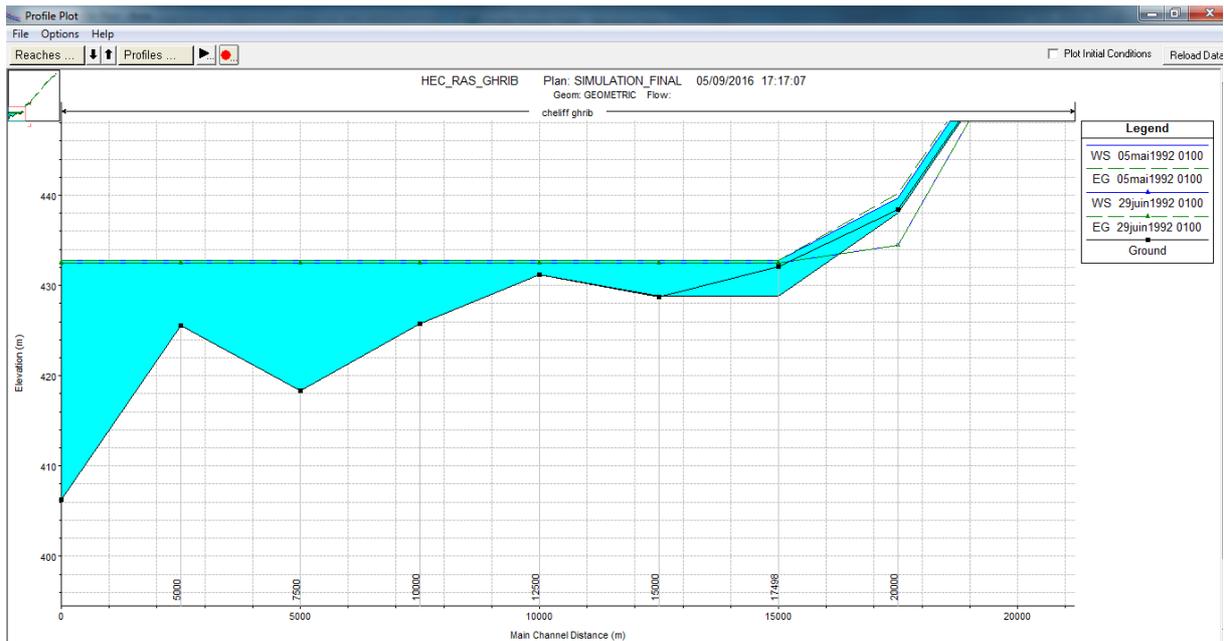


Figure 5.5 : Fenêtre du plan de profile des altitudes des hauteurs en HEC-RAS

On remarque que la hauteur d'eau augmente régulièrement d'amont en aval (stagnation d'eau dans la retenue du barrage Ghrib).

Une vue 3D de ces résultats de simulation est représentée dans la figure 5.6 suivante :

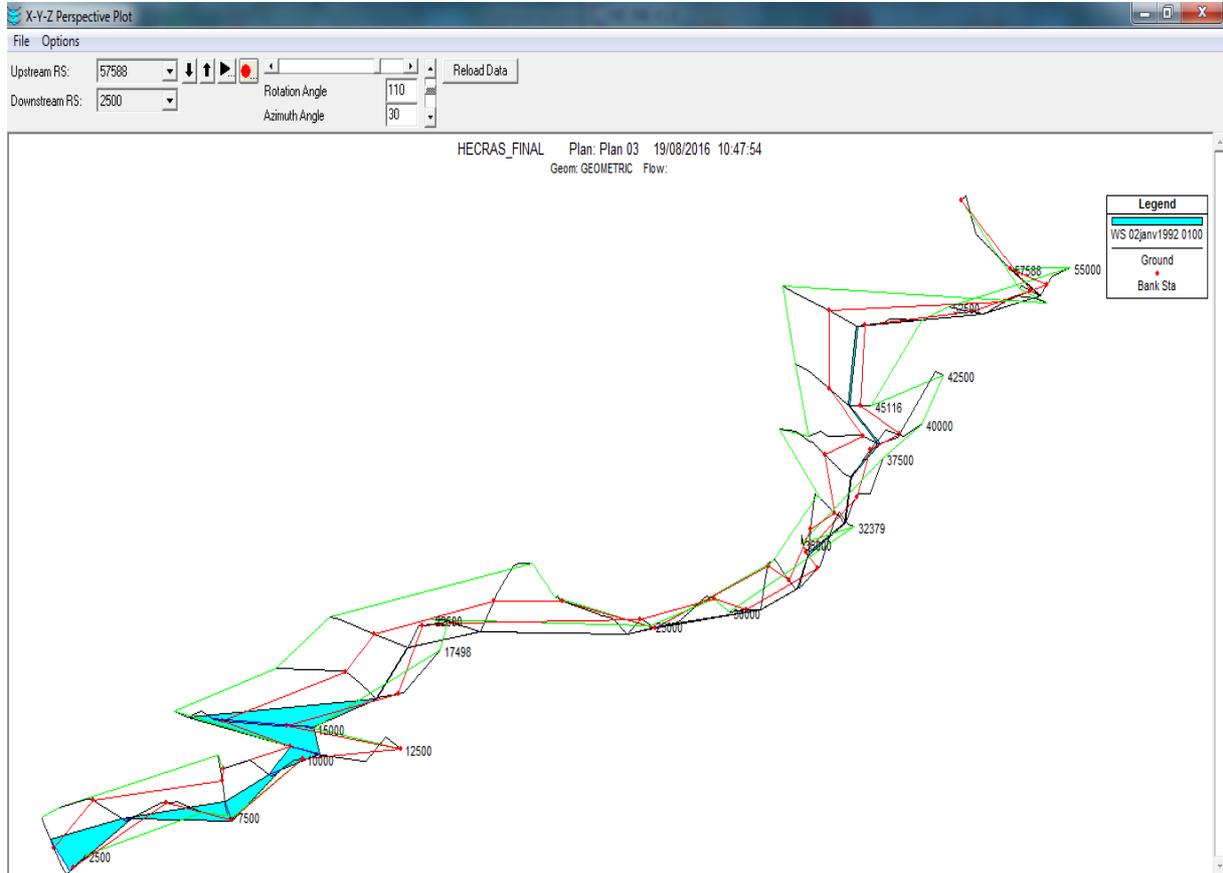


Figure 5.6 : Vue en 3D des résultats de simulation

5.2.2. Sur le plan du transport sédimentaire

5.2.2.1. Visualisation des résultats

La simulation du transport des sédiments a réussi, les résultats obtenus peuvent être visualisés en tant que fichiers graphiques ou sous forme des tableaux. Ces résultats se présentent sous trois formes :

- Profil spatiale des sédiments (Sediment Spatial Plot)
- Séries chronologique des sédiments (Sediment Time Series Plot)
- Profil du changement du lit des sections transversales (Sediment-XS Change Plot)

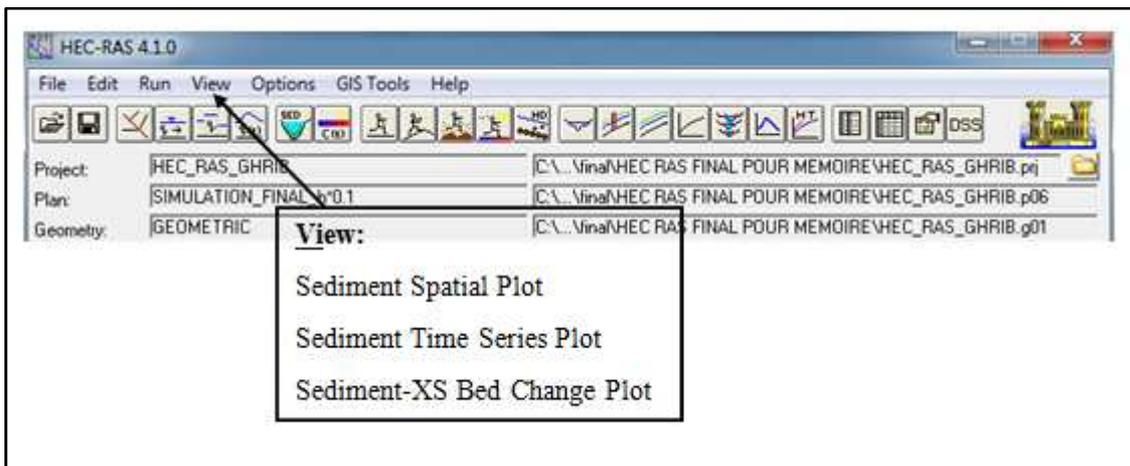


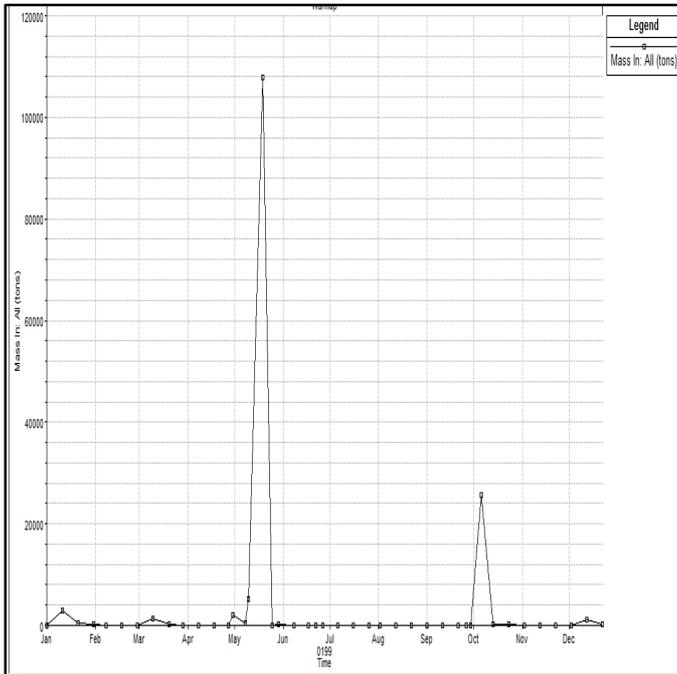
Figure 5.7 : Affichage et visualisation des résultats de la simulation du transport des sédiments

- **Profil spatiale des sédiments (Sediment Spatial Plot)** : il représente la variation du profil avec plusieurs paramètres des sédiments en fonction de la distance (le changement d'altitude, le changement d'élévation de la surface d'eau, les masses entrantes et sortantes, le débit, la vitesse, le changement de la masse du lit, la contrainte du cisaillement) ;
- **Séries chronologique des sédiments (Sediment Time Series Plot)** : ce profil représente la variation des différentes paramètres présentées précédemment dans les sections transversale du canal en fonction du temps ;
- **Changement du lit des sections transversales (Sediment-XS Change Plot)** : Il représente le changement du lit des sections transversales pendant l'année d'observation.

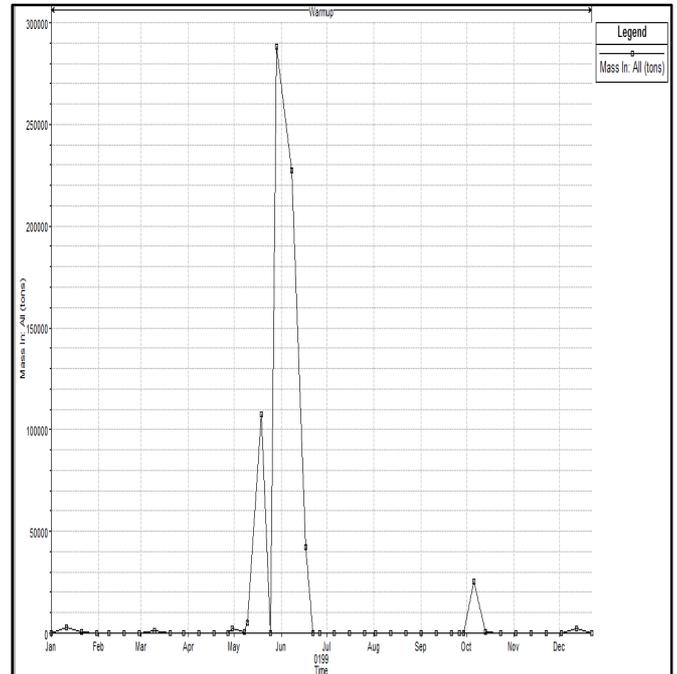
5.2.2.2. La masse totale des sédiments

Le lit des cours d'eau naturels est formé et constamment déformé par les sédiments en mouvement. Il est variable dans le temps et dans l'espace, et s'adapte aux changements de l'écoulement [17].

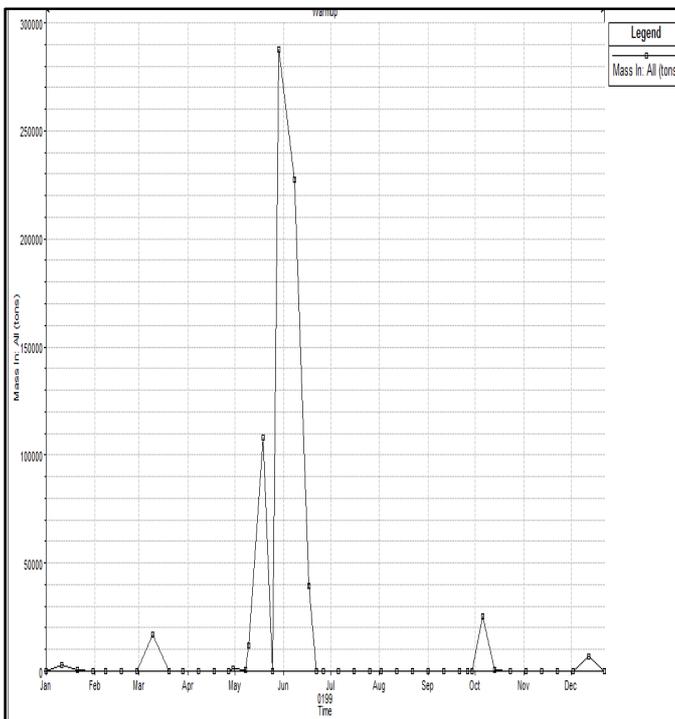
En effet, HEC RAS peut calculer la masse totale des sédiments déposés pour toutes les classes des grains (pour des grosseurs différentes), entrant dans le volume de contrôle des sédiments par intervalle de temps.



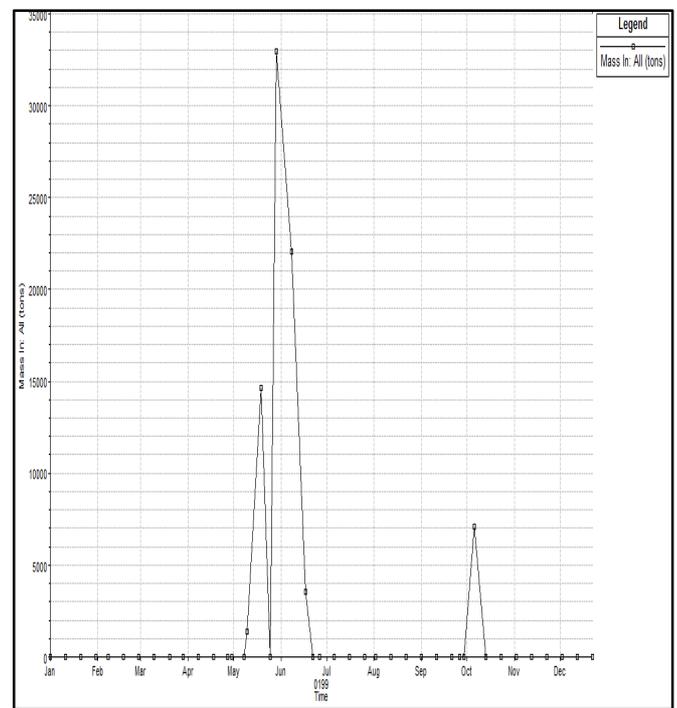
Station 20000



Station 17498

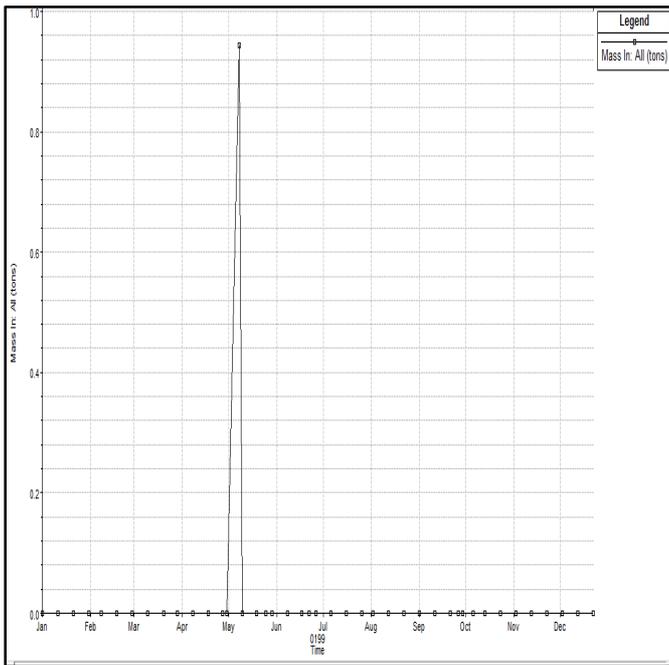


Station 15000

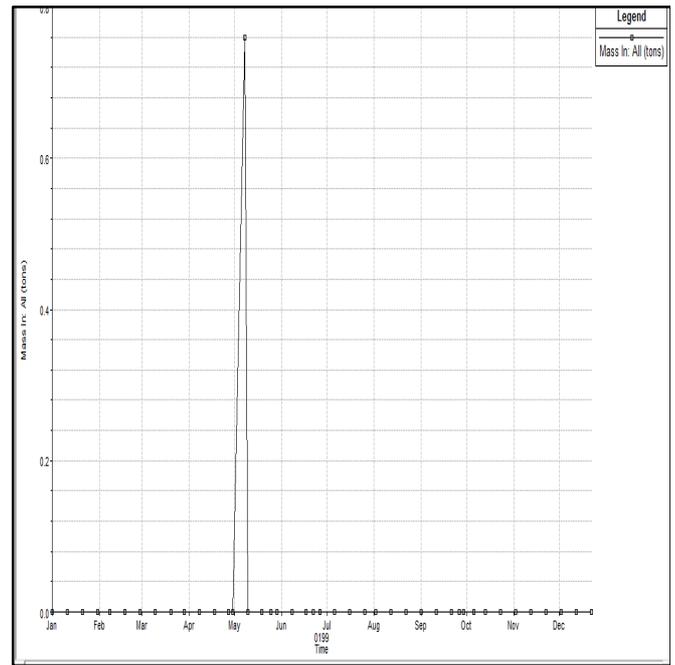


Station 12500

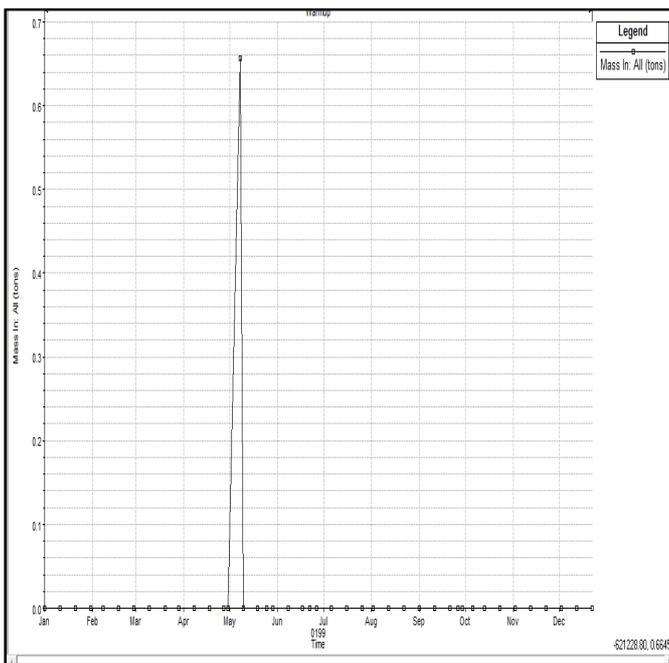
Figure 5.8 : La masse totale des sédiments dans les différentes stations en fonction du temps



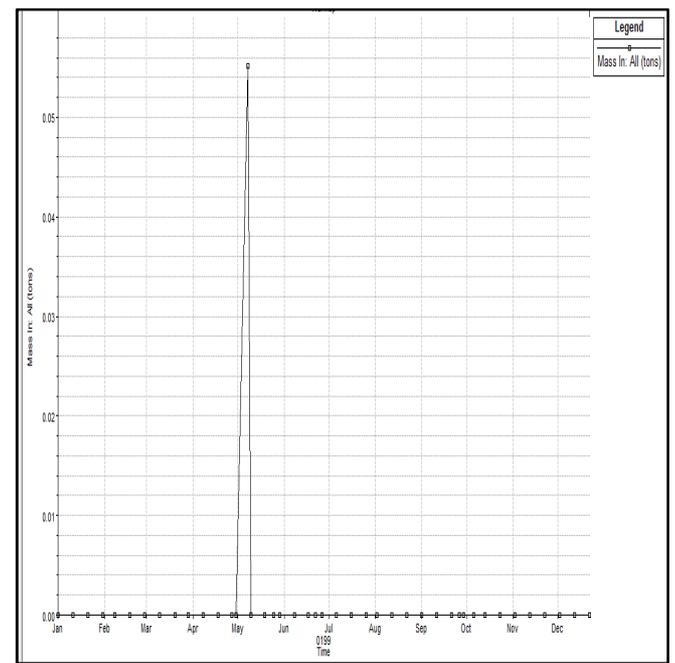
Station 10000



Station 7500



Station 5000



Station 2500

Figure 5.8 : La variation de la masse totale des sédiments dans les différentes stations en fonction du temps (suite)

Le tableau suivant représente la table associée à la masse totale de sédiment dans les stations considérées en fonction du temps :

Tableau 5.2. La masse totale des sédiments dans les stations en fonction du temps

Stations Date	20000	17498	15000	12500	10000	7500	5000	2500
01-janv-92	0	0	0	0	0	0	0	0
11-janv-92	2832.8	2830.8	2670.4	01.67.10 ⁻²	1.01.10 ⁻⁴	9.53.10 ⁻⁶	3.43.10 ⁻⁶	1.6.10 ⁻⁸
21-janv-92	349.32	353.61	376.6918	1.66E-02	1.01E-04	9.53E-06	3.43E-06	1.6.10 ⁻⁸
31-janv-92	137.46	138.34	144.723	1.60E-02	9.32E-05	8.56E-06	3.07E-06	7.6.10 ⁻⁸
08-févr-92	76.468	75.600	83.82348	1.91E-03	1.68E-06	7.91E-12	1.97E-12	2.3. 10 ⁻⁸
18-févr-92	46.363	46.415	49.05133	1.55E-02	5.01E-05	4.60E-06	1.85E-06	9.5. 10 ⁻⁸
28-févr-92	23.738	23.763	24.37527	9.90E-03	3.19E-05	1.79E-06	6.18E-07	5.7. 10 ⁻⁸
10-mars-92	1350.9	1369.5	16789.97	8.26E-03	3.83E-05	2.13E-06	6.78E-07	5.3. 10 ⁻⁸
20-mars-92	216.36	217.34	221.2245	7.95E-03	3.58E-05	1.89E-06	5.99E-07	5.3. 10 ⁻⁸
29-mars-92	111.85	109.12	116.0807	3.06E-03	4.80E-06	3.12E-11	5.99E-07	2.9. 10 ⁻⁸
08-avr-92	52.43	52.586	54.64577	2.81E-03	1.17E-05	7.01E-11	5.99E-07	1.8. 10 ⁻⁸
18-avr-92	40.365	40.460	41.6476	3.17E-03	8.74E-06	5.61E-11	5.99E-07	1.6.10 ⁻⁸
27-avr-92	5.5866	6.7158	6.301278	2.16E-03	4.01E-06	5.80E-07	2.89E-07	1.6.10 ⁻⁸
30-avr-92	1971.7	2058.8	1197.423	3.51E-04	3.79E-07	4.60E-12	2.89E-07	1.6.10 ⁻⁸
08-mai-92	430.88	444.91	439.394	18.85857	0.942860	0.759584	0.656030	0.055
10-mai-92	5231.8	5222.5	12063.17	1378.472	2.71E-06	1.28E-06	6.12E-07	9.4.10 ⁻⁵
19-mai-92	107831	107356	108319.9	14624.56	3.91E-05	1.13E-05	1.99E-06	1.7.10 ⁻⁵
25-mai-92	56.712	58.986	61.32026	2.34E-04	1.07E-06	1.45E-06	4.32E-08	1.2.10 ⁻⁶
29-mai-92	143.19	287957	287723	32942.58	8.33E-06	2.00E-06	1.83E-07	4.7.10 ⁻⁶
08-juin-92	55.579	227261	227272.7	22058.49	6.44E-06	1.45E-06	1.99E-06	1.9.10 ⁻⁶
17-juin-92	1.9423	42187	39438.21	3524.04	6.44E-06	1.44E-09	1.99E-06	1.6.10 ⁻⁸
22-juin-92	23.683	23.766	24.38706	3.87E-05	6.44E-06	1.61E-08	1.99E-06	3.1.10 ⁻⁷
27-juin-92	1.4716	1.3886	1.839334	6.44E-06	6.44E-06	1.45E-06	1.99E-06	2.4.10 ⁻⁹
06-juil-92	2.9.10 ⁻¹²	2.89.10 ⁻⁶	2.90E-08	6.44E-06	6.44E-06	1.45E-06	1.99E-06	1.6.10 ⁻⁸
16-juil-92	2.9.10 ⁻¹²	2.89.10 ⁻⁶	2.90E-08	6.44E-06	6.44E-06	1.45E-06	1.99E-06	1.6.10 ⁻⁸
26-juil-92	2.9.10 ⁻¹²	2.73.10 ⁻⁶	2.78E-08	6.44E-06	6.44E-06	1.45E-06	1.99E-06	1.6.10 ⁻⁸
02-août-92	2.9.10 ⁻¹²	3.00.10 ⁻⁶	2.99E-08	6.44E-06	6.44E-06	1.45E-06	1.99E-06	1.6.10 ⁻⁸
12-août-92	2.9.10 ⁻¹²	2.97E-06	2.97E-08	6.44E-06	6.44E-06	1.45E-06	1.99E-06	1.6.10 ⁻⁸
22-août-92	2.9.10 ⁻¹²	2.97.10 ⁻⁶	2.97E-08	6.44E-06	6.44E-06	1.45E-06	1.99E-06	1.6.10 ⁻⁸
01-sept-92	2.9.10 ⁻¹²	2.97.10 ⁻⁶	2.97E-08	6.44E-06	6.44E-06	1.45E-06	1.99E-06	1.6.10 ⁻⁸
11-sept-92	26.890	26.972	26.50531	7.61E-04	6.44E-06	2.56E-06	1.99E-06	2.7.10 ⁻⁶
21-sept-92	20.284	20.333	20.38695	2.15E-03	8.08E-05	1.65E-05	7.74E-07	6.0.10 ⁻⁶
26-sept-92	2.2273	2.7883	79.5328	7.74E-03	1.94E-05	1.20E-05	7.48E-06	4.8.10 ⁻⁵
29-sept-92	19.037	17.567	53.07878	6.04E-03	1.03E-04	3.23E-05	6.21E-06	2.1.10 ⁻⁵
06-oct-92	25573	25449	25377.61	7106.335	6.26E-05	3.73E-05	2.10E-05	3.6.10 ⁻⁵
13-oct-92	301.13	304.60	310.6576	1.16E-04	6.44E-06	1.45E-06	3.84E-08	1.5.10 ⁻⁵
23-oct-92	143.08	143.47	144.6618	1.25E-03	7.35E-06	1.79E-06	3.39E-07	9.0.10 ⁻⁶
02-nov-92	80.848	81.040	81.60722	1.59E-03	1.85E-05	4.18E-06	5.31E-07	9.5.10 ⁻⁶
12-nov-92	53.491	53.639	54.56249	1.67E-03	2.12E-05	4.75E-06	5.86E-07	9.9.10 ⁻⁶
22-nov-92	36.607	36.715	37.45309	2.21E-03	4.31E-05	1.05E-05	1.34E-06	1.2.10 ⁻⁶
02-déc-92	29.620	29.442	28.52793	4.05E-03	9.13E-05	2.80E-05	5.37E-06	2.1.10 ⁻⁵
12-déc-92	1114.3	2461.8	6961.11	6.96E-03	2.65E-04	1.05E-04	3.15E-05	5.3.10 ⁻⁵
22-déc-92	178.49	179.63	183.2869	3.43E-03	1.30E-04	4.34E-05	9.69E-06	2.6.10 ⁻⁵

En se référant à la figure 5.8 ci-dessus, ainsi qu'aux résultats illustrés sur le tableau 5.2, on remarque que la masse des sédiments, entrantes dans chaque sections transversales est très importantes pendant la période de crue, allant du 05 Mai jusqu'au 19 Mai. Les pics importants peuvent atteindre une valeur maximale de 10000 tonnes, ceci peut causer un changement important du fond du lit dans les stations considérées.

5.2.2.3. Changement de la forme du lit du barrage Ghrib

Le changement de la forme du lit en coupe peut être animé ou tracé simultanément à divers moments de la période d'étude. Il est important de regarder au moins les formes en coupe finales pour s'assurer que l'érosion ou le dépôt ont été créés.

La figure 5.9 ci-dessous représente les changements du fond de lit des stations situées à l'entrée du barrage en fonction de la période d'étude :

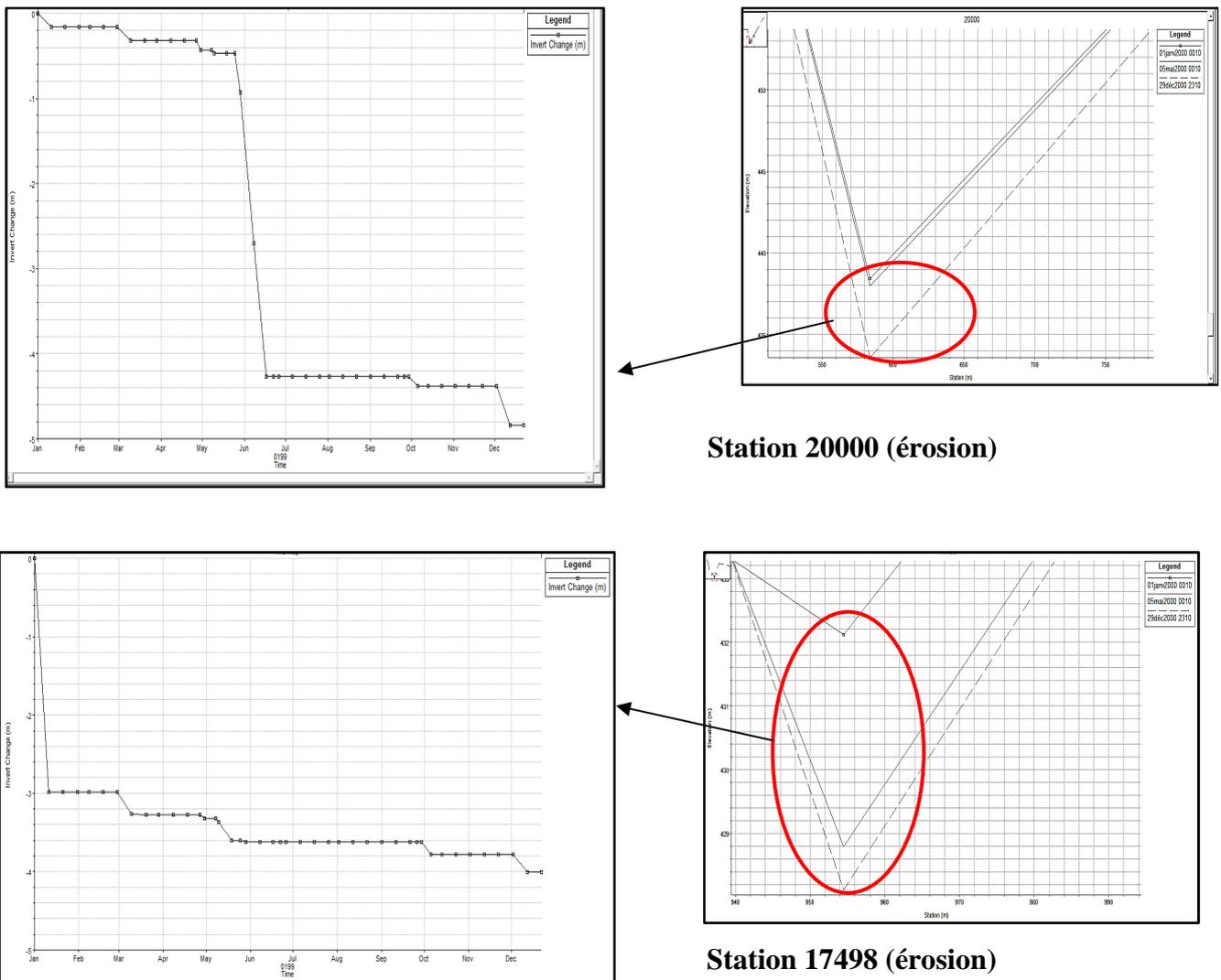
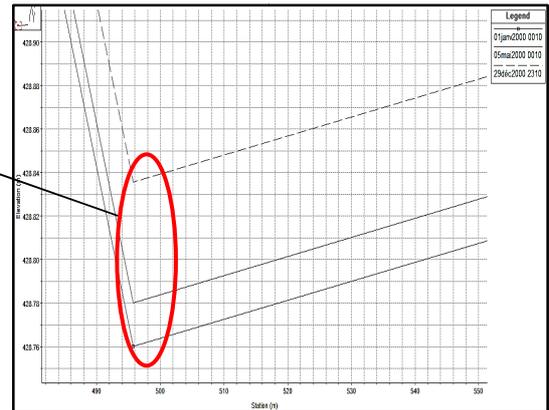
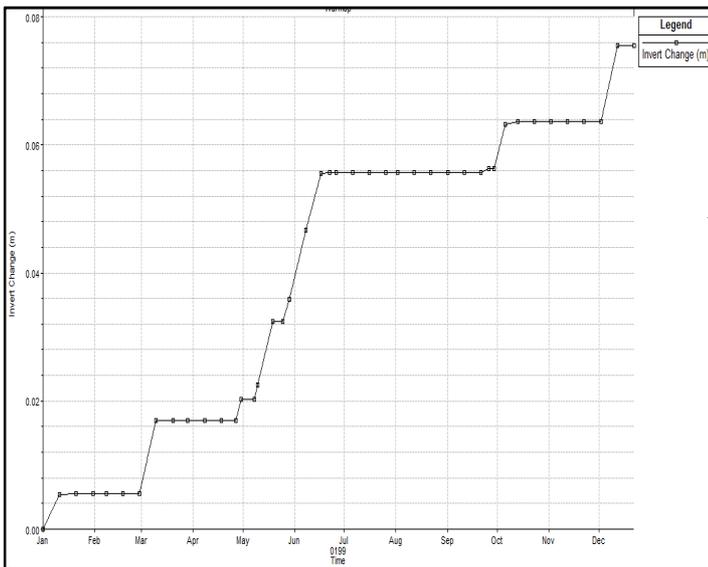


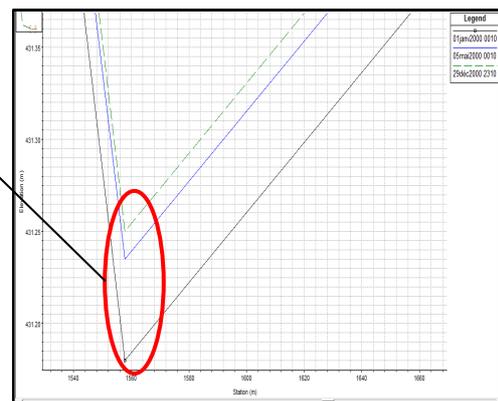
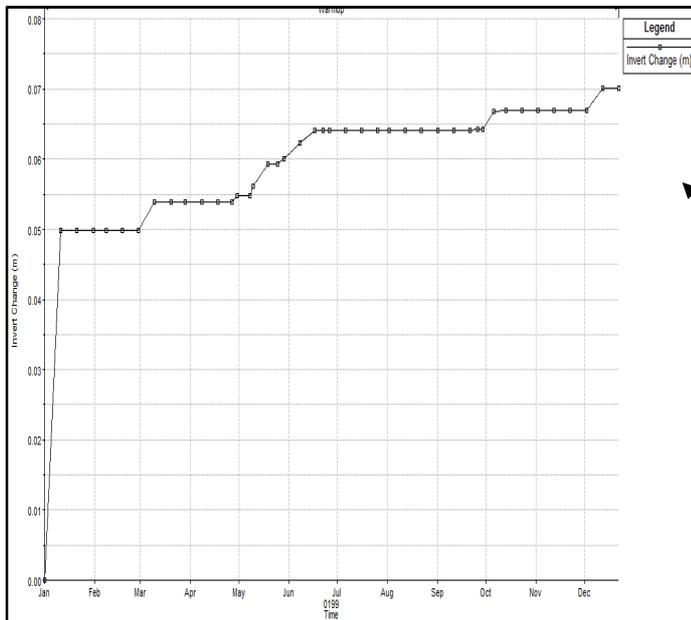
Figure 5.9 : Changement du fond du lit au niveau des deux stations situées juste à l'entrée de la retenue

De la figure ci-dessus, on remarque une diminution importante de l'altitude du fond du lit pendant une période de cinq mois (du mois de Janvier jusqu'au mois de Mai), ceci peut être interprété par l'existence d'un phénomène érosif qui s'est produit à l'entrée de la retenue suite à l'augmentation considérable de la vitesse d'écoulement.

On peut présenter également le changement du fond du lit pour les stations situées à l'intérieur du barrage (figure 5.10 ci-après)

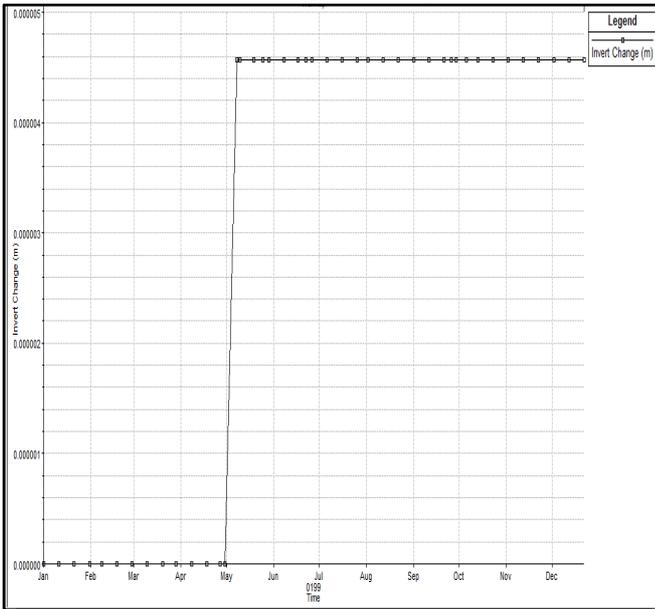


Station 15000 (dépôt)

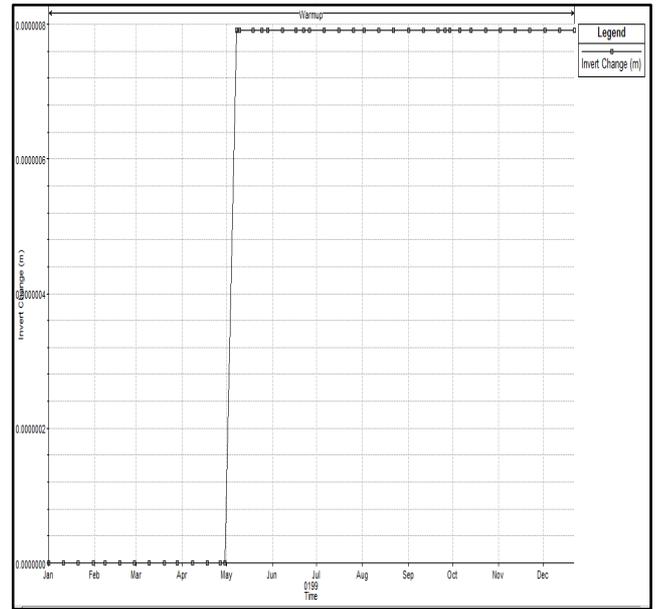


Station 12500 (dépôt)

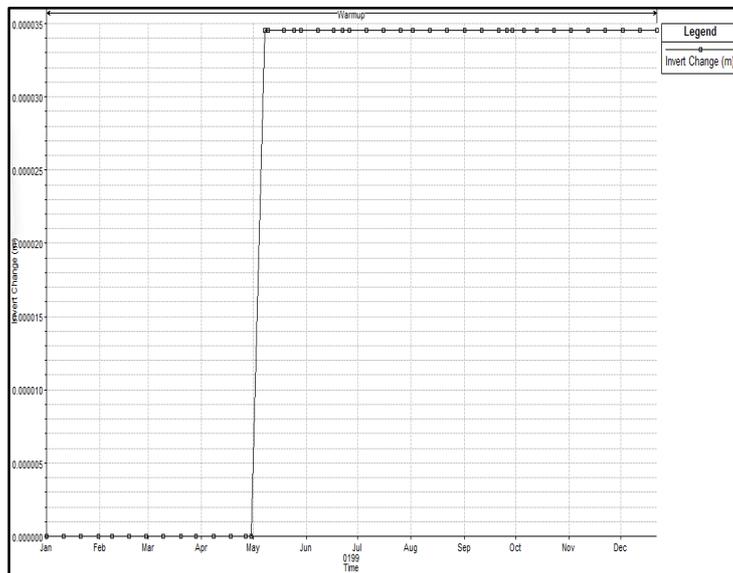
Figure 5.10 : Changement du fond du lit au niveau des stations situées dans la retenue du barrage Ghrib



Station 10000 (dépôt)



Station 7500 (dépôt)

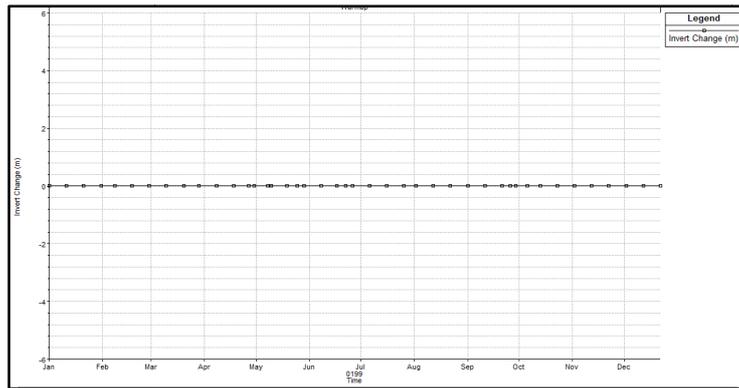


Station 5000 (érosion)

Figure 5.10 : Changement du fond du lit au niveau des stations situées dans la retenue du barrage Ghrib (suite)

Pour l'ensemble des stations (15000, 12500, 10000, 7500 et 5000) à l'inverse des deux précédentes, nous remarquons une augmentation progressive des altitudes du fond du lit, qui se traduit par des dépôts successifs suite à une diminution remarquable de la vitesse tout en allant vers l'aval.

La figure 5.11 ci-dessous présente la station située à 'extrémité aval juste avant la digue



Station 2500

Figure 5.11 : Changement du fond du lit au niveau de la station aval

Cette station est située à l'extrémité aval juste avant la digue, nous remarquons qu'il n'y a pas de changement, ni dépôt ni érosion puisque la vitesse est constante dans cette zone, ceci favorise surtout la consolidation à long terme, des particules en suspension décantées et formation de la vase.

Les profils schématisés sur les trois figures ci-dessus peuvent être également animés pour avoir une meilleure visualisation du changement du fond au fil du temps. En plus, un résultat schématique est disponible où les variables peuvent être regardées dans la vue en plan avec un modèle de couleurs évalué. Le modèle de couleurs de la différence d'altitude peut être présenté sur la figure 5.12 suivante :

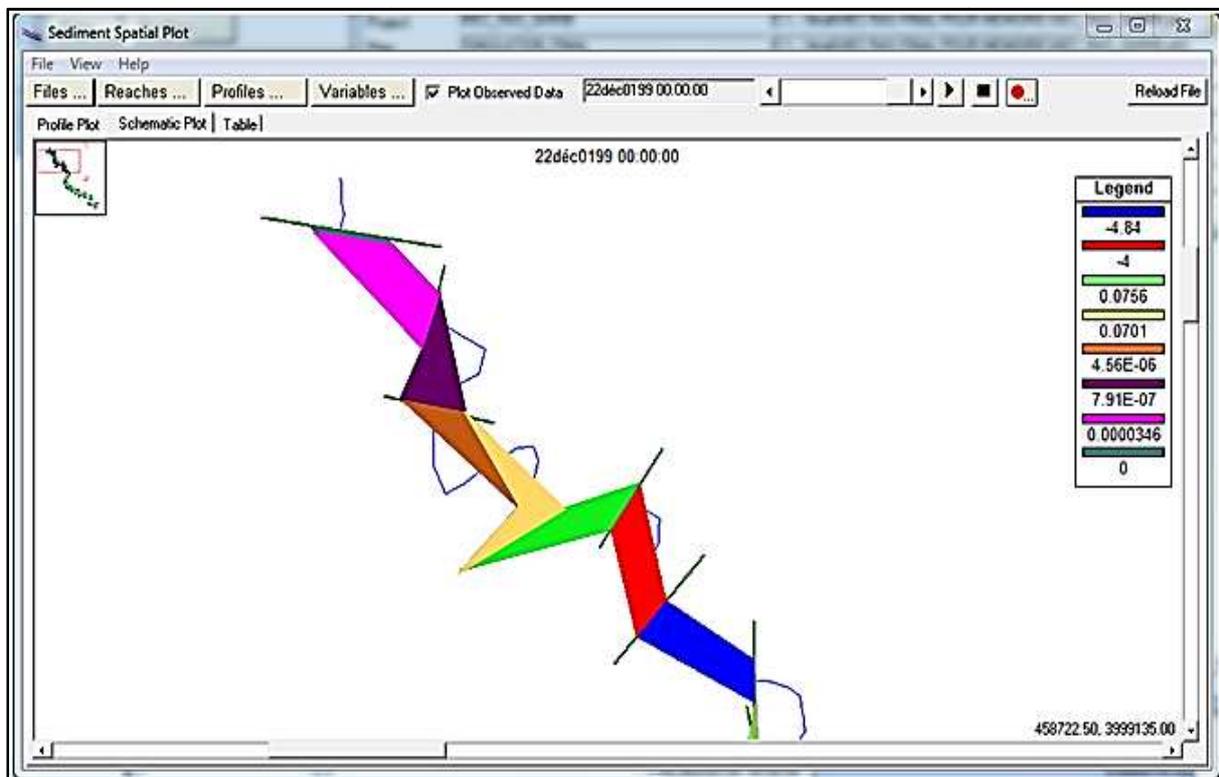


Figure 5.12 : Présentation schématique de la profondeur d'érosion et du dépôt au niveau de chaque station

En effet, pendant une période de cinq mois (du Janvier jusqu'au mois de Mai), nous avons remarqué des changements considérables de l'altitude du fond du lit, parfois c'est des dépôts ou une érosion, pour l'ensemble des stations. Ce changement a été marqué surtout pour la journée du 5 Mai ou le débit de crue est important.

Le tableau 5.3 ci-après, représente les valeurs obtenues du changement du fond du lit pendant l'année d'observation (1992) au niveau des différentes stations considérées :

Tableau 5.3 : Dépôt et érosion au niveau des différentes stations

Date	Stations	20000	17498	15000	12500	10000	7500	5000	2500
01-janv-92		0	0	0	0	0	0	0	0
11-janv-92		-0.161	-2.98	$5.46.10^{-3}$	$4.98.10^{-2}$	0	0	0	0
21-janv-92		-0.161	-2.98	$5.50.10^{-3}$	$4.98.10^{-2}$	0	0	0	0
31-janv-92		-0.161	-2.98	$5.51.10^{-3}$	$4.98.10^{-2}$	0	0	0	0
08-févr-92		-0.161	-2.98	$5.51.10^{-3}$	$4.98.10^{-2}$	0	0	0	0
18-févr-92		-0.161	-2.98	$5.52.10^{-3}$	$4.98.10^{-2}$	0	0	0	0
28-févr-92		-0.161	-2.98	$5.52.10^{-3}$	$4.98.10^{-2}$	0	0	0	0
10-mars-92		-0.316	-3.27	$1.69.10^{-2}$	$5.38.10^{-2}$	0	0	0	0
20-mars-92		-0.316	-3.27	$1.70.10^{-2}$	$5.38.10^{-2}$	0	0	0	0
29-mars-92		-0.316	-3.27	$1.70.10^{-2}$	$5.38.10^{-2}$	0	0	0	0
08-avr-92		-0.316	-3.27	$1.70.10^{-2}$	$5.38.10^{-2}$	0	0	0	0
18-avr-92		-0.316	-3.27	$1.70.10^{-2}$	$5.38.10^{-2}$	0	0	0	0
27-avr-92		-0.316	-3.27	$1.70.10^{-2}$	$5.38.10^{-2}$	0	0	0	0
30-avr-92		-0.428	-3.32	$2.03.10^{-2}$	$5.48.10^{-2}$	0	0	0	0
08-mai-92		-0.428	-3.32	$2.03.10^{-2}$	$5.48.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
10-mai-92		-0.468	-3.36	$2.03.10^{-2}$	$5.61.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
19-mai-92		-0.467	-3.61	$3.24.10^{-2}$	$5.92.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
25-mai-92		-0.467	-3.61	$3.24.10^{-2}$	$5.92.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
29-mai-92		-0.924	-3.62	$3.59.10^{-2}$	$6.00.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
08-juin-92		-2.70	-3.62	$4.66.10^{-2}$	$6.23.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
17-juin-92		-4.27	-3.62	$5.56.10^{-2}$	$6.41.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
22-juin-92		-4.27	-3.62	$5.57.10^{-2}$	$6.41.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
27-juin-92		-4.27	-3.62	$5.57.10^{-2}$	$6.41.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
06-juil-92		-4.27	-3.62	$5.57.10^{-2}$	$6.41.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
16-juil-92		-4.27	-3.62	$5.57.10^{-2}$	$6.41.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
26-juil-92		-4.27	-3.62	$5.57.10^{-2}$	$6.41.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
02-août-92		-4.27	-3.62	$5.57.10^{-2}$	$6.41.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
12-août-92		-4.27	-3.62	$5.57.10^{-2}$	$6.41.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
22-août-92		-4.27	-3.62	$5.57.10^{-2}$	$6.41.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
01-sept-92		-4.27	-3.62	$5.57.10^{-2}$	$6.41.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
11-sept-92		-4.27	-3.62	$5.57.10^{-2}$	$6.41.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
21-sept-92		-4.27	-3.62	$5.57.10^{-2}$	$6.41.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
26-sept-92		-4.27	-3.62	$5.62.10^{-2}$	$6.41.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
29-sept-92		-4.27	-3.62	$5.62.10^{-2}$	$6.42.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
06-oct-92		-4.38	-3.78	$6.32.10^{-2}$	$6.69.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
13-oct-92		-4.38	-3.78	$6.37.10^{-2}$	$6.69.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
23-oct-92		-4.38	-3.78	$6.37.10^{-2}$	$6.69.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
02-nov-92		-4.38	-3.78	$6.37.10^{-2}$	$6.69.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
12-nov-92		-4.38	-3.78	$6.37.10^{-2}$	$6.69.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
22-nov-92		-4.38	-3.78	$6.37.10^{-2}$	$6.69.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
02-déc-92		-4.38	-3.78	$6.37.10^{-2}$	$6.69.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
12-déc-92		-4.84	-4.00	$7.55.10^{-2}$	$7.01.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0
22-déc-92		-4.84	-4.00	$7.56.10^{-2}$	$7.01.10^{-2}$	$4.6.10^{-6}$	$7.9.10^{-7}$	$3.5.10^{-5}$	0

La différence d'altitude calculée peut se diviser en deux étapes :

- une différence négative qui se traduit par une érosion : les valeurs maximales de l'érosion sont calculées au niveau des stations situées en amont du barrage, elles varient de 4 m dans la station (17498) et 4.84 m au niveau de la station (20000) ;
- une différence positive qui correspond au dépôt des sédiments : les valeurs maximales du dépôt varient de 0.08 – 0.000035 m, sont calculées au niveau des stations situées dans le barrage (15000, 12500, 10000, 7500 et 5000) ;

➤ **Comparaison des résultats aux années précédentes**

La figure suivante représente une comparaison du profil en long du lit durant les années 1989, 1990, 1991, 1992 et 1993 pour les sections considérées :

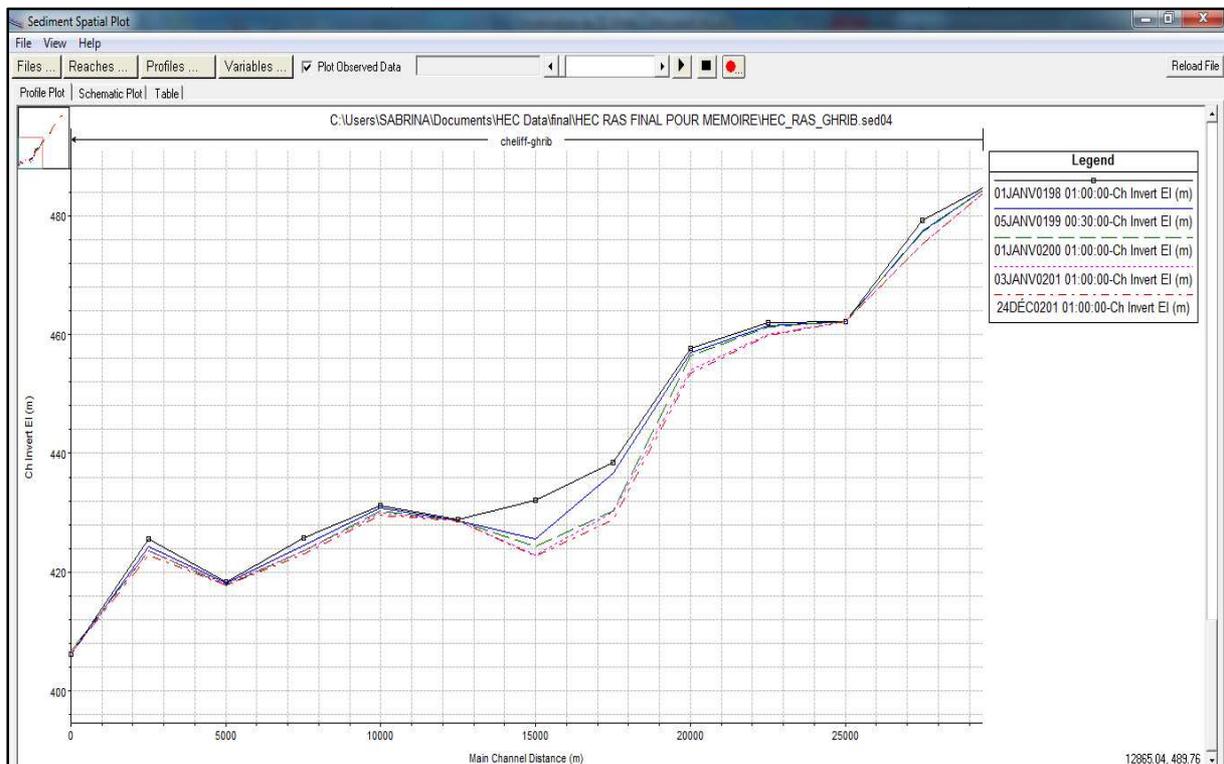


Figure 5.13 : Changement du fond du lit sur une période de 5 ans

De la figure ci-dessus, nous remarquons une variation importante de l'altitude du fond du lit, dans les stations 20000 et 17498 qui peut atteindre une valeur maximale de 9 m pendant une période de 5ans (de 1989 jusqu'à 1993), ceci se traduit par une érosion progressive à l'entrée de la retenue suite à l'augmentation du débit liquide. Cependant, la profondeur de dépôt atteint une valeur maximale de 1.5 m marquée surtout sur la station 25000 située à l'extrémité aval de la retenue du barrage.

5.3. CONCLUSION

Dans ce chapitre, les résultats de la simulation ont été exposés en tant que fichiers graphiques ou sous forme de tables.

Sur le plan hydraulique, nous avons déduit ce qui suit :

- le régime d'écoulement est fluvial (pour les stations situées juste à l'entrée, et à l'intérieure de la retenue du barrage Ghrib), vu que le nombre de Froude obtenu varie entre 0 et 1.01. Ceci peut être dû à la faible pente, ainsi qu'aux faibles valeurs de débits et de vitesse favorisant ainsi la décantation des particules en suspension et formation de la vase.
- les hauteurs d'eau sont déterminées au niveau de chacune des stations et sont présentées sous forme d'un profil en long.

Sur le plan du transport des sédiments, l'analyse des résultats de la simulation des sédiments, nous a montré que :

- la masse des sédiments, entrante dans chaque sections transversales est très importantes pendant la période de crue, allant du 05 Mai jusqu'au 19 Mai. Elle atteint une valeur maximale de 10000 tonnes. Ces valeurs sont observées au niveau des stations situées juste à l'entrée de la retenue. Celles-ci influent fortement sur la forme du lit où un changement remarquable du fond a été observé.
- une érosion très active a été remarquée, elle atteint approximativement 4.84 m, tandis que la quantité des dépôts des sédiments est beaucoup plus faible, elle varié de 0.08 jusqu'à 0.000035 m, pour les différentes stations considérées.

CONCLUSION GENERALE

Le sous bassin Cheliff Ghrib est caractérisé par une superficie de 1395 Km², avec une forme allongée et un indice de compacité égale à 1.338, favorisant ainsi un écoulement lent des eaux des ruissellements. Son relief est accidenté et fort, le modèle numérique du terrain (MNT) a donné une altitude maximale de 1285 m et une altitude minimale de 351 m. L'analyse hypsométrique nous a donné une vue dialectique du relief du sous bassin Ghrib qui est semi-aride. Dans ces zones, la faiblesse de la couverture végétale rend les processus érosifs très actifs, de même que le caractère épisodique et souvent catastrophique des précipitations.

Le régime thermique est caractérisé par des températures moyennes annuelles comprises entre 25.48 C° et 25.68 C° en période de sécheresse, et de 5.95 C° et 6.18 C° en période de crue, avec des amplitudes annuelles assez fortes équivalentes aux températures annuelles. Ceci permet d'accentuer le phénomène de l'évapotranspiration, le tarissement des cours d'eau, l'assèchement rapide des sols, la dégradation du couvert végétal et ainsi le développement d'érosion intense et la production des sédiments.

La modélisation du transport des sédiments est extrêmement complexe, même pour le cas le plus simple (unidimensionnel). De nombreuses formules ont été proposées ; elles sont limitées aux conditions utilisées pour leur établissement et sont caractérisées par une faible précision.

L'aboutissement logique d'une analyse de données est la simulation. Pour ce faire, nous avons orienté cette étude en fonction de la disponibilité des données de débits et de mesures issus de la station hydrométrique située en amont du barrage Ghrib.

Il est important de comprendre qualitativement l'influence des facteurs complexes comme la granulométrie, le type d'écoulement, la rugosité Etc. Il est essentiel de comprendre également, l'interaction dynamique entre l'écoulement et le transport de sédiments, qui se manifeste à travers des changements de la rugosité dus aux formes du lit et comprendre aussi, le principe des solutions numériques et analytiques des équations de Saint-Venant-Exner.

Le modèle HEC-RAS comprend tous ces paramètres, il a été employé pour la simulation unidimensionnelle du transport des sédiments. En général le modèle fonctionne bien, une fois tous les paramètres ont été définis au sein de leurs gammes efficaces. La difficulté principale que nous avons rencontrée dans le calcul et l'estimation du transport

solide, est due à l'insuffisance et la qualité des données disponibles. Plusieurs données d'entrée ont été soit supposées ou indirectement extraite.

Dans un premier temps, les principales données disponibles étaient la série des débits liquides et des hauteurs d'eau correspondantes, la série des débits solide, la série des températures et le pourcentage du type des grains de la vase du barrage Ghrib, la courbe granulométrique était indirectement extraite.

Le lit de la retenue du barrage Ghrib est constitué de sable, de limon et d'argile, dans le domaine d'application de la fonction de transport d'Englund-Hansen, et cette formule a donné les meilleurs résultats par rapport aux autres fonctions de transport disponibles dans HEC-RAS.

Il est important de dire que les sédiments de différentes tailles n'ont pas la même mobilité. Tous les sédiments du lit seront en mouvement seulement dans le cas de débits très élevé. Pour des débits plus faibles, seulement les sédiments fins seront transportés par l'écoulement, tandis que les sédiments grossiers resteront immobiles. Ceci implique que les granulométries du lit et des sédiments en mouvement sont différentes, les petites particules sont emportées plus facilement que les grandes.

L'analyse des résultats de la simulation des sédiments, nous a montré que les valeurs maximales des masses des sédiments transportés (10000 tonnes) sont observées au mois de Mai au niveau des stations situées à l'entrée de la retenue du barrage, ceci s'explique par l'importance du débit liquide entrant (débit maximal de crue) qui marque des résultats de changements très importants du fond du lit. Ainsi, une érosion très active a été remarquée, elle atteint approximativement 4.84 m, tandis que la quantité des dépôts des sédiments est beaucoup plus faible, elle augmente légèrement en aval juste avant la digue.

Ces valeurs minimales de dépôts ne correspondent pas à la réalité, ceci peut être expliqué soit par le manque de données tels que l'analyse granulométrique des sédiments du tronçon de l'oued Cheliff modélisé, soit par le choix validé de la formule de transport dont le domaine de validité doit correspondre à la gamme de diamètre choisi.

Bien que nous ayons appris à manipuler ce logiciel, cette étude reste encore inachevée. Il serait donc intéressant d'identifier certaines options prospectives pour améliorer les résultats obtenus au futur, il faudra :

- Réaliser une analyse granulométrique récente de l'oued Cheliff et également de la vase de la retenue du barrage Ghrib et étudier le même cas avec deux ou trois autres logiciels et comparer leurs résultats avec les données observées.
- Améliorer l'étude en utilisant un logiciel qui permet la modélisation du transport des sédiments en 2D ou 3D.
- Etudier deux ou plusieurs cas avec le modèle actuel et voir dans quelles circonstances le modèle fonctionne bien.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Philippe Ramez, février 1995** -« Gestion des milieux aquatiques, Erosion et transport solide en rivière, (Tome 1 : Guide pour la compréhension des phénomènes) » France : 130p
- [2] **Martine Sylvestre, 2007** - « Transport solide en hydraulique fluviale » Paris : 34 - 54p
- [3] **Asnoui Fatiha, 2013/2014** -« Etude du transport solide en suspension dans le Bassin Versant d'oued AL ABD » Mémoire de Master, université ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen, Algérie : 75p
- [4] **Matthieu Dufresne, 17 février 2012**- « Transport solide », Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement, Strasbourg : 73p
- [5] **Benaïcha. A, 2010** - « Etude des processus des transports solide et leur impact sur l'alluvionnement des barrages » Mémoire de magistère en hydraulique, université de Batna, Alger : 146p
- [6] **H. Bouchelkia, B. Remini, 22 Mar 2010** -« Quantification du transport solide dans le bassin versant algérien du Chellif » Ingénieries - E A T, 2003 : 45 - 56p.
- [7] **André Musy, Christophe Higy, 2004** -« Hydrologie, Une science de la nature » Presses polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne-Suisse : 214 p
- [8] **José Llamas, 1993** – « Hydrologie générale, principes et applications ». Gaëtan morin éditeur Ltée, Bibliothèque nationale du Québec, Canada. 527p.
- [9] **J.P.Laborde, 2000** -«Elément d'hydrologie de surface» Centre national de la recherche scientifique, Nice, Sophia Antipolis: 204p
- [10] **Agence du bassin hydrographique Cheliff Zahrez, 2004** – « cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Cheliff- Aval du barrage de Boughzoul ». 62p.

[11] **Antonie Denis, 2012** -«Travaux Pratique sur les systèmes d'Informations Géographiques (SIG), Initiation à ARC-GIS» Université de Liège (ULG), Belgique : 94p

[12] **Hammoum, H. et Bouzida, R. Septembre 2014** – « Initiation aux S.I.G (Systèmes d'Information Géographiques) ».Copyright Eurl Pages Bleues Internationales, 192p.

[13] **Abir.D. Oumellal.A, 2014** - « Cartographie des risques d'érosion et évaluation du transport solide du bassin versant haut et moyen Cheliff », Mémoire de master en construction hydraulique et aménagement, université de Tizi-Ouzou, Alger : 102p

[14] **Guide et Aide ARC GIS 10.2.1** au site : www.vantage-software-tech.com

[15] **Cameron T. Ackerman,P.E. May 2012** « HEC-GeoRAS, GIS Tools for support of HEC-RAS using ArcGis, User's manual », 242p

[16] **Matthieu Dubille, 13-Fév-2008** - « Transport solide et abrasion dans les rivières à fond rocheux. De la mesure au modèle sur un exemple himalayen.» Université Joseph-Fourier, France : 393p

[17] **Debiane Khalid, 2010** - « Hydraulique fluviale et torrentielle.» 162p

[18] **Hoffman.K, Juin-2013** - « Concepts de base de la modélisation hydrologique et hydraulique.» Maroc 27p

[19] **Gary Brunner, Janvier-2010** «HEC-RAS Hydraulic Reference Manual» 417p

[20] **Alain RECKING,** «Evaluation des formules de transport solide en rivière avec prise en compte de l'échelle temporelle» 41p

[21] **Modélisation des écoulements environnement** au site :

<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/mode/content/le6logiciel-hec-ras>

[22] **B. REMINI, Juin 2006** - « Valorisation de la vase des barrages quelques exemples algériens» Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 05. p.75-89

[23] **Degoutte.G,** « Transport solide en hydraulique fluviale» 55-78p

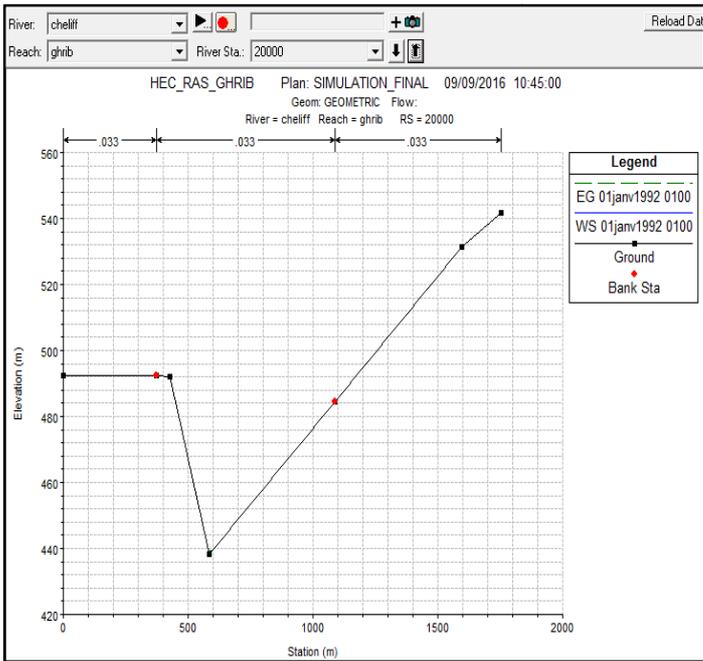
ANNEXES

Annexe 1 : Les vitesses de chute de Toffaleti

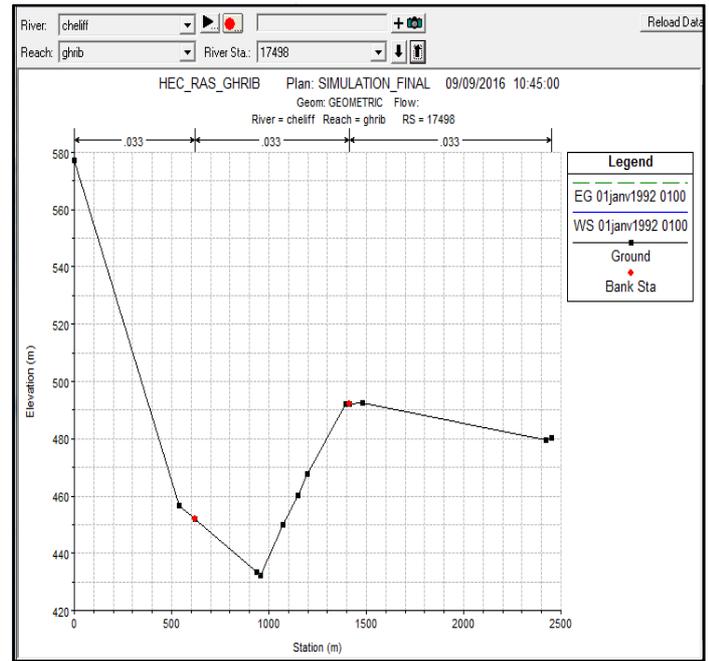
Sand Grain Settling Velocity Versus Temperature, SP.G. 2.65, Shape Factor 0.9																	
TEMP Cp	SETTLING VELOCITY IN FT./SEC								TEMP Cp	SETTLING VELOCITY IN FT./SEC							
	VFS	FS	MS	CS	VCS	VFG	FG	MG		VFS	FS	MS	CS	VCS	VFG	FG	MG
35	.013	.045	.130	.305	.590	1.00	1.41	1.95	65	.021	.065	.165	.354	.640	1.00	1.41	1.95
36	.013	.045	.131	.307	.592	1.00	1.41	1.95	66	.021	.066	.166	.356	.641	1.00	1.41	1.95
37	.013	.046	.132	.310	.594	1.00	1.41	1.95	67	.021	.067	.167	.357	.643	1.00	1.41	1.95
38	.014	.047	.133	.312	.596	1.00	1.41	1.95	68	.022	.067	.168	.359	.644	1.00	1.41	1.95
39	.014	.047	.135	.314	.598	1.00	1.41	1.95	69	.022	.068	.170	.360	.646	1.00	1.41	1.95
40	.014	.048	.135	.316	.600	1.00	1.41	1.95	70	.022	.069	.171	.361	.647	1.00	1.41	1.95
41	.015	.049	.137	.318	.602	1.00	1.41	1.95	71	.022	.070	.172	.362	.649	1.00	1.41	1.95
42	.015	.050	.138	.320	.604	1.00	1.41	1.95	72	.023	.071	.173	.363	.650	1.00	1.41	1.95
43	.015	.051	.140	.321	.606	1.00	1.41	1.95	73	.023	.071	.175	.364	.652	1.00	1.41	1.95
44	.016	.051	.141	.322	.608	1.00	1.41	1.95	74	.023	.072	.176	.365	.653	1.00	1.41	1.95
45	.016	.052	.142	.323	.609	1.00	1.41	1.95	75	.024	.072	.177	.366	.655	1.00	1.41	1.95
46	.016	.053	.143	.325	.610	1.00	1.41	1.95	76	.024	.073	.178	.367	.656	1.00	1.41	1.95
47	.016	.053	.144	.326	.612	1.00	1.41	1.95	77	.024	.073	.180	.368	.657	1.00	1.41	1.95
48	.017	.054	.145	.328	.614	1.00	1.41	1.95	78	.024	.074	.181	.370	.658	1.00	1.41	1.95
49	.017	.055	.146	.329	.616	1.00	1.41	1.95	79	.025	.074	.182	.371	.659	1.00	1.41	1.95
50	.017	.055	.147	.331	.618	1.00	1.41	1.95	80	.025	.075	.183	.373	.660	1.00	1.41	1.95
51	.018	.056	.148	.333	.620	1.00	1.41	1.95	81	.025	.075	.184	.375	.661	1.00	1.41	1.95
52	.018	.057	.150	.334	.621	1.00	1.41	1.95	82	.025	.076	.185	.376	.662	1.00	1.41	1.95
53	.018	.057	.151	.336	.623	1.00	1.41	1.95	83	.025	.077	.186	.378	.663	1.00	1.41	1.95
54	.018	.058	.152	.338	.624	1.00	1.41	1.95	84	.026	.077	.187	.380	.664	1.00	1.41	1.95
55	.018	.059	.153	.340	.626	1.00	1.41	1.95	85	.026	.078	.188	.381	.665	1.00	1.41	1.95
56	.019	.059	.154	.341	.627	1.00	1.41	1.95	86	.026	.078	.190	.383	.666	1.00	1.41	1.95
57	.019	.060	.155	.343	.629	1.00	1.41	1.95	87	.026	.079	.192	.385	.667	1.00	1.41	1.95
58	.019	.061	.156	.344	.630	1.00	1.41	1.95	88	.027	.079	.194	.386	.668	1.00	1.41	1.95
59	.019	.061	.157	.346	.632	1.00	1.41	1.95	89	.027	.080	.195	.388	.669	1.00	1.41	1.95
60	.020	.062	.158	.347	.633	1.00	1.41	1.95	90	.027	.080	.196	.390	.670	1.00	1.41	1.95
61	.020	.063	.160	.349	.635	1.00	1.41	1.95	91	.028	.081	.197	.391	.671	1.00	1.41	1.95
62	.020	.063	.161	.350	.636	1.00	1.41	1.95	92	.028	.081	.198	.392	.672	1.00	1.41	1.95
63	.020	.064	.162	.351	.638	1.00	1.41	1.95	93	.028	.082	.199	.393	.673	1.00	1.41	1.95
64	.021	.065	.163	.353	.639	1.00	1.41	1.95	94	.028	.082	.200	.394	.674	1.00	1.41	1.95

Annexe 2 : Données géométriques et formes des sections transversales

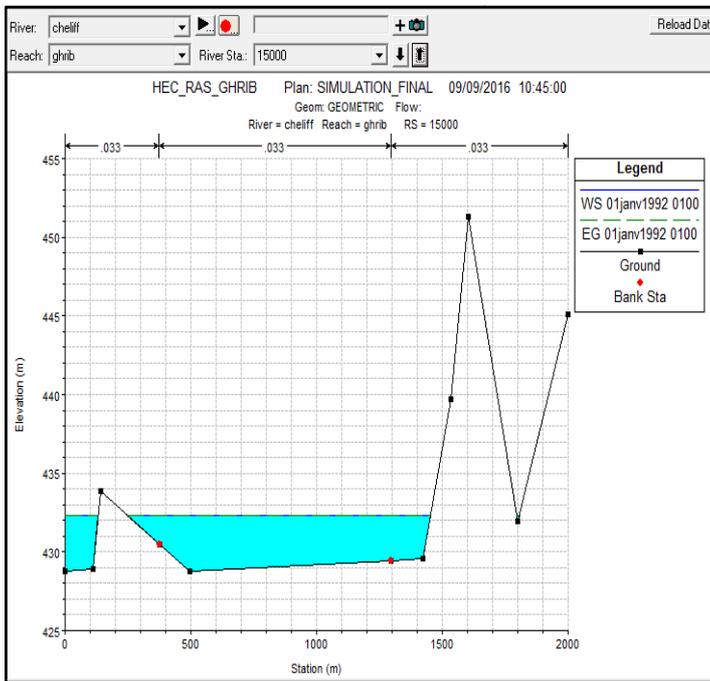
N°	X-coord.	Elév	LoB	Channel	RoB	N°	X-coord.	Elév	LoB	Channel	RoB
2500	0	536.32	1398.9	2500.3	3992.0	12500	0	500.09	7905.3	2500	7000
	847.31	455.31					282.19	520.73			
	1386.18	406.23					1557.73	431.18			
	2268.4	425.76					1815.67	431.67			
	3220.99	449.82					2000	431.65			
5000	0	440.57	2000	2499.6	2000	15000	0	428.78	7000	2500	7460.2
	499.77	470.45					375	430.5			
	1061.09	425.6					495.71	428.76			
	1520.76	482.47					1297.71	429.46			
	2000	464.91					2000	445.08			
7500	0	459.39	2500	2500	2500	17498	0	577.37	3873.1	2498.4	2131.8
	311.79	429.98					620.58	451.93			
	986	418.29					954.51	432.12			
	1469.46	466.09					1413.68	492.15			
	2000	503.18					2449.53	480.19			
10000	0	441.5	2500	2500	2500	20000	0	492.54	1000	2501.5	1844.6
	171.52	444.67					372.86	492.25			
	577.99	425.75					583.76	438.41			
	1092.63	485.81					1087.58	484.55			
	1655.31	486.88					1752.44	541.56			



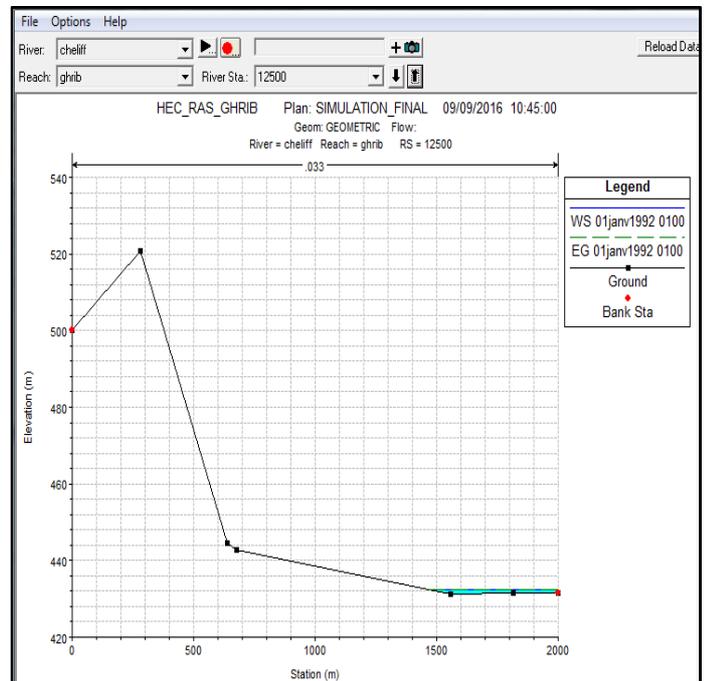
Station 2000



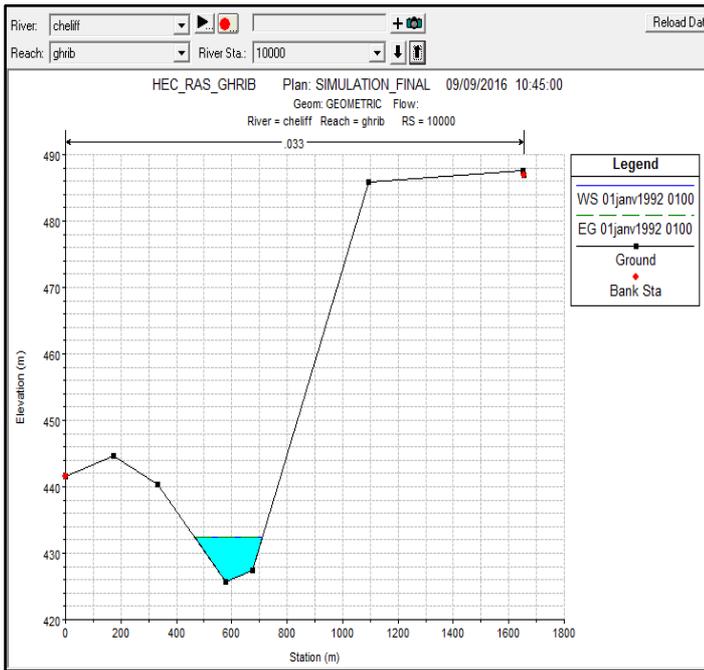
Station 17498



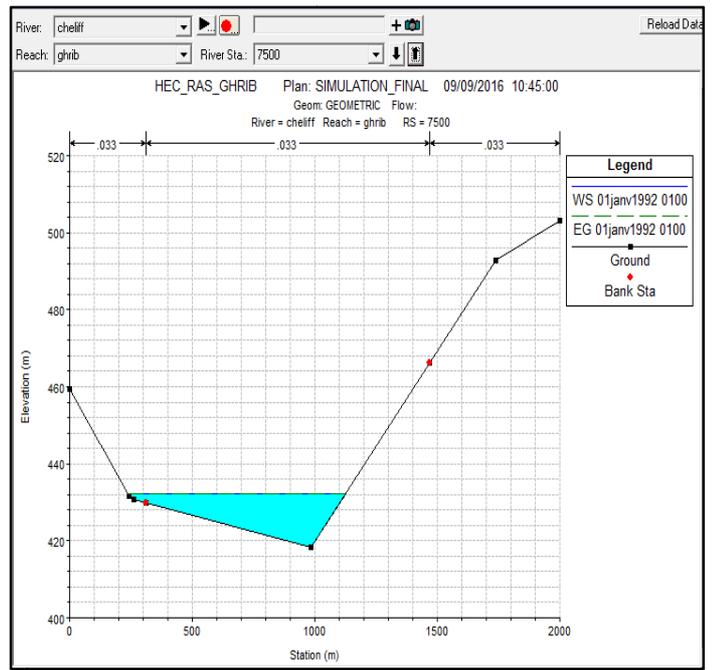
Station 15000



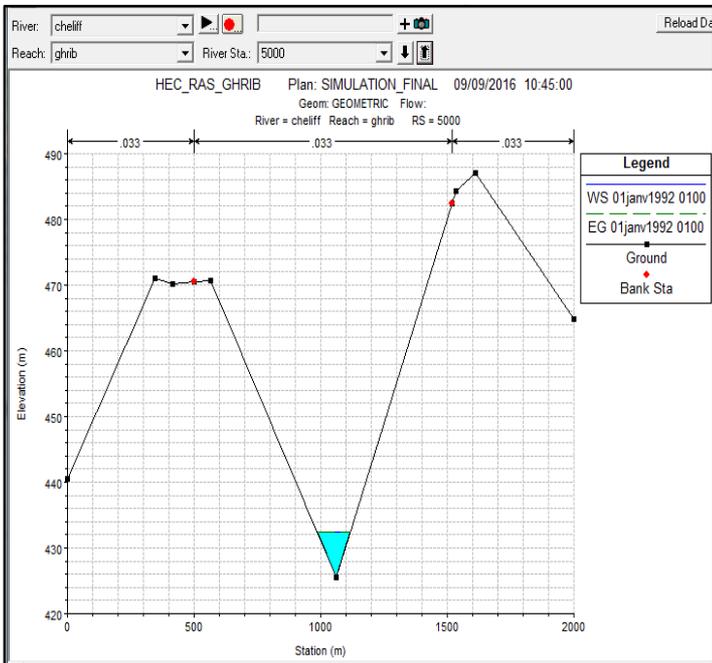
Station 12500



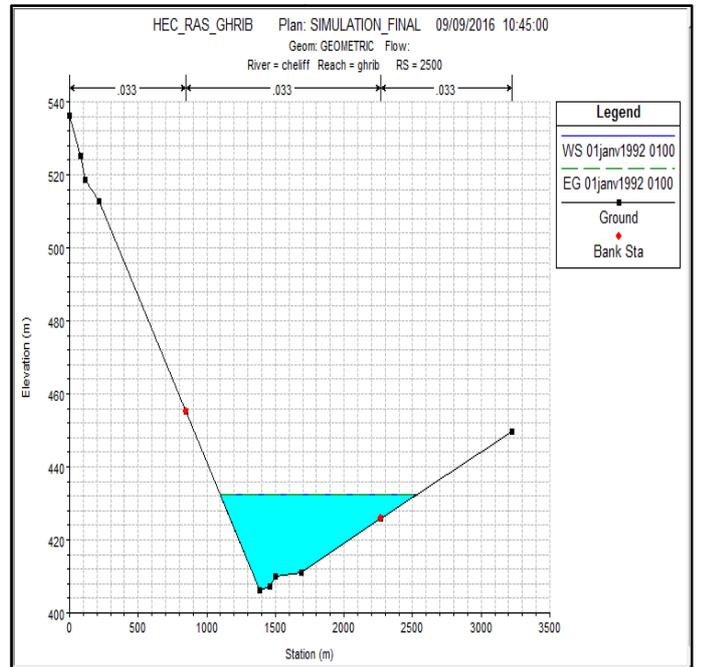
Station 10000



Station 7500



Station 5000



Station 2500

Annexe 3 : Données fournis par l'ANRH pour l'année d'observation 1992-1993 (série de débit liquide)

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Out	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
01	3.29	3.29	3.45	3.14	2.98	2.21	0.00	0.00	1.57	2.71	2.83	3.14
02	3.29	3.14	3.29	2.83	2.98	2.21	0.00	0.00	1.67	2.71	2.83	3.14
03	3.29	3.14	3.29	2.83	2.98	2.21	0.00	0.00	1.99	4.12	2.83	3.98
04	3.60	3.14	3.29	2.71	20.20	2.10	0.00	0.00	2.10	8.04	2.83	2.98
05	3.60	3.29	3.29	2.71	61.82	1.99	0.00	0.00	2.10	5.46	2.83	2.98
06	3.79	3.60	3.29	2.58	16.67	1.99	0.00	0.00	2.10	3.79	2.83	2.98
07	3.60	3.29	3.14	2.71	7.90	2.10	0.00	0.00	2.10	3.45	2.83	2.98
08	3.45	3.29	3.14	2.71	5.70	2.10	0.00	0.00	2.10	3.29	2.83	2.98
09	3.45	3.14	3.29	2.33	4.78	2.10	0.00	0.00	2.10	3.14	2.83	2.98
10	3.29	3.14	3.29	2.71	4.36	1.99	0.00	0.00	2.10	3.14	2.83	3.29
11	3.29	3.14	3.29	2.58	4.17	1.99	0.00	0.00	1.78	2.98	2.83	3.79
12	3.29	3.14	3.29	2.71	3.98	2.10	0.00	0.00	1.67	2.98	2.83	3.14
13	3.29	3.14	3.29	2.71	3.79	2.10	0.00	0.00	1.89	2.98	2.83	2.98
14	3.29	4.08	3.14	2.71	3.60	1.99	0.00	0.00	2.33	3.14	2.83	2.98
15	3.29	4.09	3.14	2.98	3.45	1.99	0.00	0.00	2.33	3.14	2.83	2.98
16	3.29	3.60	3.14	2.83	3.29	1.99	0.00	0.00	2.46	2.98	2.83	2.98
17	3.29	3.60	3.14	3.79	3.14	1.89	0.00	0.00	2.46	2.83	2.83	2.98
18	3.29	3.45	3.14	3.14	2.98	1.89	0.00	0.00	2.33	2.83	2.83	3.29
19	3.29	3.29	3.14	2.98	2.83	1.78	0.00	0.00	2.33	2.83	2.83	3.29
20	3.29	3.29	3.14	2.83	2.83	1.78	0.00	0.00	2.33	2.98	2.83	3.29
21	3.29	3.29	3.14	3.86	2.71	1.67	0.00	0.00	2.71	2.98	2.83	3.14
22	3.29	3.14	2.98	9.18	2.71	1.48	0.00	0.00	4.17	2.83	2.83	3.14
23	3.29	3.14	2.98	5.35	2.71	1.29	0.00	0.00	2.83	2.83	2.83	3.14
24	3.29	3.14	2.98	7.64	2.58	1.04	0.00	0.00	9.60	2.98	2.83	3.14
25	3.29	3.29	2.98	4.44	2.58	0.88	0.00	0.00	5.67		2.83	3.14
26	3.29	3.29	2.98	3.60	2.46	0.88	0.00	0.00	3.60	2.83	2.83	3.29
27	3.29	3.29	3.14	3.29	2.46	0.81	0.00	0.00	3.14	2.83	2.83	3.29
28	3.29	3.29	3.29	3.14	2.46	0.74	0.00	0.00	2.83	2.83	2.83	3.29
29	3.29	3.98	3.29	3.14	2.46	0.56	0.00	0.00	2.83	2.83	2.83	3.45
30	3.29		3.14	2.98	2.46	0.00	0.00	0.00	2.71	2.83	3.14	3.29
31	3.29		3.29		2.33		0.00	1.67		2.83		

Les températures moyennes annuelles (1992-1993)

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Out	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
01	10.7	10.9	15.7	15.7	16.1	22.8	26.1	33.9	28.6	24.4	13.3	11.2
02	10.2	12.6	16.4	14.3	17.3	21.9	27.3	34.9	29.9	24.8	14.1	11.0
03	11.1	13.5	15.9	12.6	17.0	21.7	29.4	31.5	27.3	23.1	14.8	12.5
04	9.8	13.1	17.6	12.2	16.4	23.8	30.5	31.6	27.6	20.5	15.2	13.1
05	9.7	13.8	15.4	10.7	16.2	26.4	30.1	32.6	28.2	21.9	15.2	11.5
06	9.7	11.9	13.9	13.4	16.4	25.2	31.6	28.7	26.7	21.3	15.9	10.7
07	9.2	12.0	15.5	15.5	17.5	25.6	30.8	27.9	27.3	21.8	15.1	12.8
08	10.1	12.2	13.1	14.8	19.6	26.9	29.4	27.7	27.0	22.5	13.6	14.7
09	10.8	15.5	12.5	18.3	21.9	28.1	30.3	28.9	27.4	22.9	14.5	14.6
10	11.9	14.5	10.6	16.5	23.5	23.8	28.5	28.5	28.3	21.4	15.6	13.8
11	11.4	15.6	10.7	16.5	22.9	25.3	28.2	29.8	29.4	21.5	13.9	9.3
12	8.6	15.3	10.4	14.8	23.7	25.5	30.4	30.7	26.7	19.4	13.5	8.8
13	10.4	15.6	12.1	13.8	25.4	25.2	33.2	30.0	26.6	19.7	13.6	9.9
14	12.1	15.6	15.2	15.4	21.8	26.1	33.7	29.2	25.7	21.3	13.0	8.7
15	11.4	15.3	17.1	14.9	20.1	25.5	33.3	29.6	27.1	21.6	13.8	7.2
16	10.5	17.9	16.4	15.7	21.0	27.0	33.2	28.3	30.9	22.3	10.8	6.1
17	10.4	12.8	14.0	16.9	21.5	27.6	32.0	29.7	28.3	21.6	8.4	6.4
18	10.2	11.8	13.5	18.2	24.3	26.3	31.8	30.2	27.0	21.2	8.7	8.2
19	11.0	11.1	14.7	16.8	28.1	26.7	31.7	29.0	27.6	20.6	13.1	10.9
20	13.2	10.8	12.0	18.1	28.0	26.8	30.7	28.1	28.9	18.7	15.0	13.0
21	12.6	11.4	9.6	20.4	24.3	26.2	29.8	27.2	26.9	16.3	16.7	13.0
22	11.0	12.2	6.7	20.8	24.7	26.7	29.8	26.2	19.7	18.0	16.1	12.4
23	11.9	13.8	9.1	20.8	23.9	28.1	30.7	26.5	21.1	18.7	13.1	13.2
24	8.5	14.4	12.5	18.5	24.1	28.3	30.6	29.4	20.8	19.0	11.1	11.3
25	7.1	13.2	12.7	17.1	22.1	29.6	32.0	35.1	22.8	18.0	12.5	11.9
26	8.8	14.9	13.6	19.6	21.0	27.4	31.6	34.0	22.6	16.2	11.4	9.2
27	8.7	14.3	11.9	16.2	20.0	26.1	31.5	33.9	22.1	16.7	11.5	11.1
28	12.3	14.3	10.8	16.8	19.6	27.0	31.3	33.8	23.5	18.7	11.6	7.8
29	12.9		9.7	17.1	20.9	27.0	33.8	33.7	23.9	15.7	11.6	8.9
30	12.8		13.2	17.3	23.7	27.9	32.2	30.6	24.3	16.8	11.8	9.1
31	11.6		13.4		24.3		31.0	28.2		13.7		10.1