

UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté de Technologie

Département de Science de l'Eau et Environnement

THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie Rural

Option : Sciences de l'Eau

IMPACT DU TRANSPORT SOLIDE SUR L'ÉVOLUTION DES DÉPÔTS VASEUX DANS LES BARRAGES

Par

Souhila BENKACI

Devant le jury composé de :

M. Mohamed BESSNASSE	Professeur	Univ. BLIDA 1	Président
M. Toufik BOUZIANE	Professeur	Univ. BISKRA	Examineur
M. Mohamed HABI	Professeur	Univ. TLEMCEM	Examineur
M. Ali BERRESKI	M.C.A.	Univ. BEJAIA	Examineur
M. Boualem REMINI	Professeur	Univ. Blida1	Rapporteur

Blida, 06/02/2020

RÉSUMÉ

Ce travail s'articule autour de trois parties principales : la première consiste à l'élaboration d'une carte synthétique de répartition des degrés de vulnérabilité à l'érosion, au niveau du bassin haut et moyen Cheliff, en faisant appel au modèle de superposition des cartes « model builder » sur ArcGis™. Ce bassin est exposé à un risque de dégradation très intensif. En effet, quatre classes de vulnérabilité à l'érosion ont été distinguées (faible, moyenne, forte et très forte) où les zones fortement vulnérables couvrent la majeure partie du bassin. Une érosion par ravinement, a été identifiée à l'amont des sous bassins de oued cheliff Ghrib et oued Fodda. La seconde partie présente une analyse bathymétrique de la retenue du barrage Oued Fodda, par intégration des systèmes d'informations géographiques (SIG.) et des méthodes d'analyses géostatistiques. Ce barrage, fait partie du bassin versant haut et moyen Cheliff. Sa capacité de stockage, qui était initialement estimée à 228 hm³ a diminué d'environ la moitié (50%) en 1994. En effet, un taux d'envasement de, 45.43% a été estimé pour la fin de l'année 2015 et un volume de stockage, évalué à 105.41 hm³ pour l'année 2017. Une carte bathymétrique, sur laquelle la profondeur d'eau est estimée en tout point de la surface de la retenue, a été élaborée. La troisième et la dernière partie de cette étude consiste initialement à la simulation du transport solide à l'amont et au niveau du barrage oued Fodda par utilisation du logiciel HEC RAS. Le calage du modèle a été effectué sur la base de l'observation du profil du lit du tronçon étudié et sa validation a été justifiée par une estimation quantitative avec un coefficient de détermination, R², qui est égal à 0,92. Ce dernier indique un bon accord entre les résultats du modèle et les données observées. Par la suite, et dans l'objectif d'étudier l'évolution des dépôts vaseux dans la retenue pour l'année 2017, une approche par intégration des systèmes d'information géographique a été effectuée. Les zones d'érosion et de dépôts ont été identifiées. Le volume total des sédiments déposés est évalué à environ : 9.43 hm³. Cependant, le volume érodé est estimé à 0.21 hm³. Les deux cartes élaborées dans cette étude, constituent un outil de base pour les gestionnaires des barrages pour permettre d'optimiser l'utilisation des sédiments et de gérer leur évacuation d'une manière optimale.

Mots clés: Érosion, dépôts, Transport solide, Cheliff, SIG., Modèle géostatistique, HEC RAS.

ملخص

ينقسم هذا العمل إلى ثلاثة أجزاء رئيسية: الأول هو وضع خريطة اصطناعية لتوزيع درجة التعرض للتعرية على مستوى حوض العالي والمتوسط شلف باستخدام نموذج التراكم في برنامج الأرك جيس (ArcGis). يتعرض هذا الحوض لخطر التدهور الشديد. وبالفعل، تم تمييز أربع فئات من التعرض للتآكل (منخفضة ومتوسطة وعالية ومرتفعة للغاية) حيث تغطي المناطق شديدة التأثير معظم الحوض. وقد تم التعرف على تآكل أخدود المنبع في الأحواض الفرعية لوادي شليف غريب (Ghrib) ووادي فضة (Oued Fodda).

أما الجزء الثاني فيعرض تحلي الأباتيمتريا لخزان سد وادي فوده، من خلال دمج أنظمة المعلومات الجغرافية وطرق التحليل الإحصائي الجيولوجي. هذا السد، هو جزء من حوض العالي والمتوسط شلف. سعته التخزينية الأولية، والتي كانت تقدر في البداية ب 228 هكتو متر مكعب، انخفضت بنحو النصف (50%) في عام 1994 وفي الواقع، تم تقدير معدل تغرية (ترسب) قدره 45.43% في نهاية عام 2015 وحجم التخزين مقدر عند 105.41 هكتو متر مكعب لعام 2017. تم تطوير خريطة الأعماق التي يقدر فيها عمق المياه في أي نقطة على سطح الخزان. سمحت لنا هذه الخريطة بدراسة تطور عمق المياه بالنسبة للسطح خلال عام 2017. وقد تم تطوير خريطة قياس الأعماق، والتي يقدر عمق المياه في أي نقطة على سطح الخزان.

الجزء الثالث والأخير من هذه الدراسة يتكون في البداية من محاكاة النقل الصلب في المنبع وفي سد oued Fodda باستخدام برنامج HEC RAS. وقد تم إجراء معايرة النموذج على أساس ملاحظة المظهر الجانبي لسرير القسم المدروس وتم تبرير التحقق من صحتها بتقدير كمي مع معامل تحديد، R^2 والذي يساوي 0,92. هذا الأخير يشير إلى اتفاق جيد بين نتائج النموذج والبيانات المرصودة. بعد ذلك، ومن أجل دراسة تطور رواسب الطمي في الخزان لعام 2017 تم تنفيذ نهج تكامل لنظم المعلومات الجغرافية. وقد تم تحديد مناطق التآكل والترسب. ويبلغ الحجم الإجمالي للرواسب المودعة حوالي 9.43 hm^3 في حين يتم تقييم حجم تآكل ب 0.21 hm^3 . الخريطتان المطورتان هما أداة أساسية لمديري السدود، لتحسين استخدام الرواسب وتحسين إدارة إجلائهم بطريقة مثلى.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الرواسب، النقل الصلب، الشلف، نظم المعلومات الجغرافية، النموذج الإحصائي الجغرافي، HEC RAS

Abstract

This work is articulated into three main parts: the first consists with the development of a synthetic distribution map of sensitivity degrees to erosion on the level of the high and middle Cheliff basin, by using the superposition model of cards “model builder” on ArcMapTM. The latter is exposed to a serious problem of soil degradation. Indeed, four classes of vulnerability to erosion have been distinguished (low, medium, high and very high) where highly vulnerable areas cover most of the basin. Gully erosion, has been identified at the upstream of the sub basins of Oued Cheliff Ghrib and Oued Fodda. The second part presents a bathymetric analysis of the reservoir of the Oued Fodda dam, by integrating of the geographical information systems (GIS) and geostatistical analysis methods. This dam is part of the upper and middle Cheliff watershed. Its storage capacity, which was initially estimated at 228 hm³, decreased by about half (50%) in 1994. In fact, a siltation rate of 45.43% was estimated for the end of 2015 and a storage volume, estimated at 105.41 hm³ for the year 2017. A bathymetric map on which the depth of water is estimated at any point on the surface of the reservoir, was developed. This map allowed us to study the evolution of the water depth according to the surface during the year 2017. The third and last part of this study initially consisted of the simulation of solid transport at the upstream and the oued Fodda dam using the HEC RAS software. The calibration of the model was carried out and based on the observation of the profile of the bed of the studied section and its validation was justified by a quantitative estimate with a coefficient of determination, R², which is equal to 0.92. The latter indicates a good agreement between the results of the model and the observed data. Subsequently, and in order to study the evolution of silt deposits in the reservoir for the year 2017, an integration approach of geographic information systems was carried out. The zones of erosion and deposits were identified. The total volume of sediments deposited is approximately: 9.43 hm³. However, the eroded volume is estimated at 0.21 hm³. The two maps developed in this study are a basic tool for dam managers, to optimize the use of sediments and better manage their evacuation in an optimal way.

Key words: Erosion, deposits, Solid transport, Cheliff, GIS., Geostatistical model, HEC RAS.

Avec ma profonde gratitude et grand amour, je dédie ce travail en signe de reconnaissance et de respect :

À la mémoire de mon très cher père, avec lequel je n'aurais pas le plaisir de partager cet événement, mais qui est et qui demeurera dans mon cœur et à jamais. J'espère que je saurai à la hauteur des valeurs qu'il a semées en nous. Que Dieu le tout-puissant lui accorde sa miséricorde.

À ma très chère mère, qui a consacré toute sa vie pour bâtir la mienne. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices qu'elle est endurés pour faire de moi ce que je suis aujourd'hui, Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

À Mes frères et sœurs pour leur soutien moral, leur affection, leur patience et leurs encouragements permanents.

À ma deuxième famille, pour leur soutien, leur amour et leurs encouragements tout au long de mon parcours à Tizi Ouzou. Particulièrement, mon binôme préféré, qui m'a accompagné dans toutes les sorties liés à mon travail de recherche.

À tous ceux que je ne nomme pas, mais qui se reconnaîtront.

À tous ceux qui me sont chers.

REMERCIEMENTS

Il me sera très difficile de remercier tout le monde car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme.

Il m'est infiniment agréable d'adresser d'abord, mes sincères remerciements à Mr. Boualem REMINI, Professeur au département des sciences de l'eau et de l'environnement, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa confiance, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués.

Mes remerciements très sincères, vont également à Mr. BESSENASSE, Professeur au département des sciences de l'eau et de l'environnement à l'université de Blida, de pour m'avoir fait l'honneur et l'immense plaisir d'accepter de présider le jury. Les examinateurs de mon travail, Mr. BOUZIANE, professeur à l'université de Biskra, Mr. HABI, professeur à l'université de Tlemcen et Mr. BERRESKI, Maître de conférences à l'université de Bejaia, pour avoir porté une lecture attentive de ce document, et d'avoir témoigné également, leur intérêt et fait part de leurs remarques instructives. Un grand merci à eux.

J'adresse toute ma gratitude, à mes enseignants de la graduation et post graduation chacun par son nom, pour toutes les connaissances qu'ils m'ont prodigués durant toute ma formation. Je prends aussi un réel plaisir à remercier chaleureusement Mr. D. BENSALIA, chef de département des sciences de l'eau et Environnement, et Mr. A. TAIBI, directeur d'études au même département, pour leur gentillesse, leur disponibilité permanente, leurs soutiens et leurs encouragements, je les remercie grandement.

Je tiens aussi à formuler mes plus profondes gratitudes à ceux sans qui cette thèse ne serait pas ce qu'elle est : aussi bien par les discussions que j'ai eu la chance d'avoir avec eux, leurs suggestions ou contributions. Je pense ici en particulier à : Mr. et Mme HAMMOUM, et Mr. KHATTAOUI, Professeurs du département de génie civil de l'UMMTO, qui m'ont permis de retrouver ma confiance, ils ont su m'orienter et me soutenir lorsque la situation devenait critique, pour m'offrir par la suite des ouvertures que je n'aurai pu imaginer. Merci pour votre écoute et vos

conseils très précieux, vos encouragements, tout a été fait avec une gentillesse et une compétence irréprochable et certainement encore plus, de m'avoir montré l'exemple dans la préparation et la rédaction de mes papiers et travaux. Je vous remercie chaleureusement.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont facilité le long travail nécessité par cette étude et qui ont mis à ma disposition toutes les données nécessaires pour la réalisation de ce modeste travail à savoir, Mrs. les directeurs de : l'ABH. Chellif zahrez, l'ANRH d'Alger, l'ANRH de Blida et l'ANBT d'Alger. Sans oublier particulièrement, Mme Abda, chef de service de l'ANRH d'Alger, Mr. IMESSEOUDENE, de l'ANRH de Blida, Meme Ferhati de L'ANBT d'Alger.

Je souhaite également, adresser un immense merci aux chefs d'exploitations et tous les membres du personnel des barrages : Sidi Yacoub, Ghrib, Oued Fodda, Deurdeur, SMBT. et Harraza, qui m'ont facilité l'accès aux barrages et qui ont mis à ma disposition toutes les données techniques et d'exploitation nécessaires, et qui m'ont accompagné particulièrement, pour la récupération des échantillons de vase au niveau de chaque barrage et au niveau des oueds situés en amont. Malheureusement, et faute de temps, notre travail de recherche tracé initialement, n'a pas été achevé. Ces données précieuses récupérées vont faire l'objet d'une recherche très particulière, sur le bassin haut et le moyen cheliff ainsi que sur l'ensemble des barrages cités.

Ma dernière pensée va vers toutes les personnes formidables que j'ai rencontrées au département de génie civil de l'UMMTO, tous mes collègues enseignants et enseignantes. Merci pour votre support et vos encouragements.

Bien entendu, cette liste n'est pas exhaustive, et je remercie ceux qui ont veillé sur moi depuis toujours, ceux qui m'ont fait confiance, qui m'ont soutenu sans faille dans tous mes projets et qui ont accepté mes choix sans pour autant toujours forcément les comprendre. Merci à toute ma famille.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	2
REMERCIEMENTS	6
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS	
INTRODUCTION GENERALE	15
CHAPITRE 1	19
GENERALITES SUR LES PHENOMENES "EROSION, TRANSPORT SEDIMENTATION"	19
1.1. Introduction	19
1.2. Érosion.....	19
1.2.1. Processus de l'érosion hydrique	19
1.2.2.1. L'érosion en nappe	20
1.2.2.2. Érosion linéaire.....	20
1.2.2.3. Érosion en masse.....	21
1.2.3. Facteurs de l'érosion hydrique.....	21
1.2.3.1. Végétation	21
1.2.3.2. La pluie.....	21
1.2.3.3. La topographie	22
1.2.3.4. Le sol.....	22
1.2.4. Conséquences de l'érosion	22
1.2.5. Quantification de l'érosion.....	22
1.2.5.1. Modèle USLE	22
1.2.5.2. La télédétection et le système d'information géographique SIG.....	24
1.3. Transport solide	25
1.3.1. Transport par «charriage»	26
1.3.2. Transport en «suspension»	27
1.3.3. Transport par saltation.....	27
1.4. Envasement et sédimentation des barrages	27
1.4.1. Problèmes posés par La sédimentation.....	28
1.4.2.1. Dérivation des sédiments par "bypass"	30
1.4.2.2. Gestion en crue : sluicing	31
1.4.2.3. Les chasses de barrages (drawdown flushing)	31

1.4.2.4. Soutirage par courants de densité.....	32
1.4.2.5. Dragage du barrage	33
1.5. Conclusion	34
CHAPITRE 2.....	35
PRÉSENTATION DU CADRE D'ÉTUDE : BASSIN VERSANT DU HAUT ET DU MOYEN CHELIFF	35
2.1. Introduction	35
2.2. Situation géographique et organisation administrative.....	35
2.3.1. Caractéristiques géométriques	38
2.3.2. Caractéristiques du relief	38
2.3.2.1. Courbe hypsométrique	38
2.3.3. Caractéristiques de forme.....	40
2.3.3.1. Indice de compacité de Gravelius	41
2.3.3.2. Rectangle équivalent.....	41
2.3.3.3. Indice de forme de Horton	42
2.3.3.4. Les Indices de pente	42
2.4. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE	45
2.5. CADRE GEOLOGIQUE	45
2.6. CLIMAT DE LA REGION D'ETUDE.....	47
2.7. EVAPOTRANSPIRATION	49
2.8. Mobilisation des eaux superficielles.....	50
2.8.1. Principaux barrages étudiés	50
2.8.1.1. Barrage de Sid Yacoub	50
2.8.1.2. Barrage Oued Fodda.....	51
2.8.1.3. Barrage Harraza.....	52
2.8.1.4. Barrage Deurdeur.....	53
2.8.1.5. Barrage Ghrib	54
2.8.1.6. Barrage de Sidi m'Hamed Ben Taïba (SMBT).....	55
2.8.2. Analyse de l'état d'envasement des barrages étudiés.....	56
2.8.3. Répartition en fonction de la superficie du bassin versant.....	58
2.9. Conclusion	60
CHAPITRE 3.....	61
Evaluation du phénomène érosif et identification de la source de production des sédiments par intégration des SIG	61
3.1. Introduction	61

3.2. Les données exploitées pour la mise en place du SIG	61
3.2.1. Données cartographiques.....	61
3.2.2. Images satellitaires	62
3.3. TRAITEMENT ET GENERATION DES CARTES THEMATIQUES	63
3.3.1. Facteur climatique	64
3.3.2. Facteur topographique.....	65
3.3.3. Facteur d'exposition au vent.....	66
3.3.4. Facteur lithologique	68
3.3.5. Facteur occupation du sol.....	69
3.4.Élaboration de la Carte de sensibilité à l'érosion	71
3.4.1. Méthode.....	71
3.4.2. Superposition des cartes par l'application Model builder	72
3.5. Edition de la carte	72
3.6. Conclusion	74
CHAPITRE 4	76
APPORT DES MODÈLES GÉOSTATISTIQUES DANS L'ÉLABORATION DE LA CARTE BATHYMÉTRIQUE DE LA RETENUE DU BARRAGE OUED FODDA	76
4.1. Introduction	76
4.2. Zone d'étude	76
4.3. CARACTÉRISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES	78
4.3.1. Courbe hypsométrique	78
4.4. Analyse bathymétrique du barrage oued Fodda	80
4.4.1. Levés bathymétriques.....	80
4.4.2. Évolution de la capacité de la retenue durant la période 2004-2017	82
4.4.3. Variation de la capacité moyenne annuelle durant la période 2004-2017	83
4.4.4. Envasement de la retenue du barrage oued Fodda	84
4.5. Les courbes Hauteurs / Capacités – Surfaces (année 2004).....	84
4.6. ÉLABORATION DE LA CARTE BATHYMÉTRIQUE (Avril 2017).....	85
4.6.1. Méthodologie	85
4.6.2. Méthodes d'analyse géostatistique et choix d'une méthode d'interpolation	87
4.6.2.1. Notion de champ et variable régionalisé	88
4.6.2.2. Enquête sur la distribution des données et recherche des valeurs aberrantes	88

4.6.2.3. Visualisation de la corrélation spatiale dans (et entre) les ensembles de données (Semi-variogramme)	91
4.7. Comparaison et validation	98
4.8. Edition de la carte bathymétrique.....	98
CHAPITRE 5	100
EVOLUTION DES DEPOTS DES SEDIMENTS DANS LA RETENUE DU BARRAGE OUED FODDA	100
5.1. Introduction	100
PARTIE 1 SIMULATION DU TRANSPORT SOLIDE AU NIVEAU DU BARRAGE OUED FODDA PAR LE LOGICIEL HEC-RAS	101
5.2. Présentation du logiciel HEC-Ras	101
5.3. Analyse du transport des sédiments sous HEC RAS.....	102
5.3.1. Principe de calcul.....	102
5.3.2. Paramètres d'entrée du modèle	103
5.3.1.1. Données géométriques « Geometric data »	103
5.3.1.2. Données de l'écoulement et conditions aux limites	108
5.3.1.3. Données des sédiments	110
5.3.3. Validation du choix des paramètres d'entrée	121
5.4. Calage du model et validation.....	122
5.5. Résultats et discussions	124
5.5.1. Courbe de tarage.....	124
5.5.2. Variation de la vitesse d'écoulement et de la masse cumulée des sédiments	124
5.5.3. Concentration des sédiments	128
PARTIE 2	131
CARTOGRAPHIE DES PHÉNOMÈNES ÉROSION ET DÉPÔTS DANS LA RETENUE DU BARRAGE OUED FODDA	131
5.6. Méthodologie	131
5.7. Identification des zones d'érosion et de dépôts	134
5.8. Calcul des volumes des sédiments déposés ou érodés (2004-2017)	135
5.8.1. Volumes des dépôts	135
5.8.2. Volume des sédiments érodés	136
5.9. Conclusion	137
CONCLUSION GÉNÉRALE	138
ANNEXES	141

Annexe 1 : Vitesses de chute de Toffaleti.....	141
Annexe 2 : Classes des grains utilisées par défaut sur HEC-RAS	142
Annexe 3 : Fichier de sortie des paramètres hydrauliques obtenus suite à la simulation du transport des sédiments (exemple de la station 9945).	143
Annexe 4 : Masses des sédiments cumulées (en tonnes).....	146
Annexe 5 : Concentration des sédiments observée aux niveaux des sections transversales amont : 9883, 8971 et 6824.....	150
Annexe 6 : Concentration des sédiments pour les deux crues du 23 Janvier et 02 Février.....	153
Annexe 7 : Table attributaire des surfaces et des volumes des dépôts durant la période 2004-2017.....	155
Annexe 8 : Table attributaire des surfaces et des volumes des dépôts durant la période 2004-2017.....	156
RÉFÉRENCES	157

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1. 1: Processus de l'érosion hydrique.....	20
Figure 1.2 : Différents modes de transport.....	26
Figure 1.3: Charriage au fond de l'oued El Malleh amont du Barrage Deurdeur.....	26
Figure 1.4 : Types de dépôts observés dans une retenue	28
Figure 1. 5 : Profil longitudinal d'un réservoir avec formation de delta	28
Figure 1.6 : Problèmes posés par la sédimentation	29
Figure 1.7 : Classification des stratégies de gestion des sédiments pour le maintien de la capacité des retenues.....	30
Figure 1.8 : Représentation schématique de l'opération de dérivation des sédiments par bypass.....	30
Figure 1. 9: Représentation schématique de gestion des sédiments par sluicing.....	31
Figure 1. 10: Représentation schématique de gestion des sédiments par sluicing et drawdown flushing.....	32
Figure 1.11 : Schéma synoptique d'un soutirage parfait du courant de densité	33
Figure 1.12: Schéma synoptique d'une opération de dragage dans un barrage	34
Figure 1. 13: Rejet de la vase lors de l'opération de dragage de 2005-2006.....	34
Figure 2. 1 : Situation géographique du bassin haut et moyen Cheliff.....	36
Figure 2. 2 : Découpage administratif	36
Figure 2. 3 : Carte altimétrique de la zone d'étude.....	37
Figure 2. 4 : Carte des sous bassins du haut et du moyen Cheliff.....	38
Figure 2. 5 : Courbe hypsométrique de la zone d'étude.....	39
Figure 2. 6 : Carte hypsométrique du haut et du moyen Cheliff.....	39
Figure 2. 7 : Rectangle équivalent du bassin versant haut et moyen Cheliff.....	42
Figure 2. 8 : Classification du réseau hydrographique selon Strahler.....	45
Figure 2. 9 : Cadre géographique et géologique de la plaine du Chélif	46
Figure 2. 10 : Carte des postes pluviométriques.....	47
Figure 2. 11 : Carte des précipitations du haut et moyen Cheliff [8].....	48
Figure 2.12 : Carte de l'évapotranspiration du haut et moyen Cheliff	49
Figure 2. 13 : Répartition des principaux barrages étudiés.....	50
Figure 2.14 : Retenue du barrage de Sidi Yacoub.....	51
Figure 2.15 : Dépôt de vase à l'embouchure de la retenue du barrage de Sidi Yacoub ..	51
Figure 2.16 : Retenue du barrage oued Fodda	52
Figure 2.17: Dépôt de vase à l'embouchure du barrage d'oued Fodda	52
Figure 2.18 : Retenue du barrage Harraza	53
Figure 2. 19: Retenue du barrage DeurDeur	54
Figure 2.20 : Barrage Ghrib	55
Figure 2.21: Retenue du barrage Sidi M'hamed Ben Taiba	56
Figure 2. 22 : Répartition des barrages en fonction du taux d'envasement.....	57
Figure 2. 23: Répartition des barrages étudiés en fonction du taux de comblement par surface du bassin versant.....	59

Figure 3. 1: Modèle Numérique d'Altitude du bassin haut et moyen Cheliff.	62
Figure 3. 2 : Combinaison des Bandes spectrales des deux régions Médéa.....	63
Figure 3. 3 : Carte des isohyètes du bassin haut et moyen cheliff.....	64
Figure 3. 4 : Modèle numérique de terrain du bassin haut et moyen Cheliff.	65
Figure 3. 5 : Carte des pentes de la zone d'étude	66
Figure 3. 6 : Carte d'exposition des versants au vent.	67
Figure 3. 7 : Carte des formations lithologiques de la zone d'étude.	68
Figure 3. 8 : Carte d'occupation du sol au niveau du bassin haut et moyen cheliff.....	70
Figure 3. 9 : Diagramme méthodologique pour la réalisation de la carte de sensibilité à l'érosion.....	71
Figure 3. 10 : Schéma de superposition des cartes par l'application model builder sur ArcMap.....	72
Figure 3. 11 : Carte de sensibilité à l'érosion des sols du bassin haut et moyen Cheliff...	73
Figure 4.1 : Sous bassin versant de l'Oued Fodda.....	76
Figure 4. 2 : Modèle numérique du terrain du sous bassin d'Oued Fodda.	77
Figure 4. 3 : Formation d'une ravine au niveau du bassin versant d'Oued Fodda	77
Figure 4. 4 : Réseau hydrographique du Sous bassin versant de l'Oued Fodda.	78
Figure 4. 5 : Carte hypsométrique du Sous bassin d'Oued Fodda.	79
Figure 4. 6 : Courbe hypsométrique de la zone d'étude.	79
Figure 4. 7 : Variation de la capacité de la retenue en fonction du temps.	81
Figure 4. 8 : Variation de la perte annuelle du volume de la retenue jusqu'au dernier levé 2004.....	82
Figure 4.9 : Évolution du volume de la retenue du barrage Oued Fodda.	82
Figure 4. 10 : Variation de la capacité moyenne annuelle (2004-2017).....	83
Figure 4.11 : Courbes Hauteurs / Capacités – Surfaces (1986-2004).....	85
Figure 4. 12 : Fenêtre d'extraction de la bathymétrie sur Global mapper.	86
Figure 4. 13 : Organigramme méthodologique pour l'élaboration de la carte bathymétrique de la retenue du barrage oued Fodda.	87
Figure 4. 14: Représentation schématique des notions champs et variables régionalisées.	88
Figure 4. 155 : Histogramme de la distribution des valeurs des altitudes.	89
Figure 4. 166 : Diagramme QQ-Plot.....	90
Figure 4. 17 : Identification et correction des points aberrants.	91
Figure 4. 18 : Nué variographique.	92
Figure 4. 19: Paramètres du variogramme.....	93
Figure 4. 20 : Modèles mathématiques d'un variogramme.	94
Figure 4. 21 : Semi variogramme : Modèle sphérique.	95
Figure 4. 22: Semi variogramme : Modèle Exponentiel.	96
Figure 4. 23 : Semi variogramme : Modèle Gaussien.	97
Figure 4.24 : Carte bathymétrique de la retenue du barrage Oued Fodda.	99
Figure 5.1: Volume de contrôle utilisé dans les calculs de sédiments.....	102
Figure 5.2: Réseau triangulé irrégulier (Tin) du bassin versant d'oued Fodda.	104
Figure 5.3 : Fenêtre des données géométriques visualisées à travers	104
Figure 5.4 : Profil en long du tronçon étudié.	105
Figure 5.5 : Caractéristiques de la section transversales (69) à l'amont immédiat	106

Figure 5.6: Profil en travers de la 1ère section transversale de l’oued Fodda visualisé sur RAS mapper à travers une image Google Earth.....	107
Figure 5.7: Fenêtre HEC-RAS pour la définition des conditions aux limites de l’écoulement quasi instable.....	109
Figure 5.8: Hydrogramme de crue.....	109
Figure 5.9 : Modèles d’évolution du lit sédimentaire.....	115
Figure 5.10: Courbe granulométrique de l’échantillon prélevé le long du tronçon d’oued Fodda à l’amont immédiat du barrage.....	117
Figure 5.11: Gradation du lit du tronçon oued Fodda amont.....	118
Figure 5.12: Fenêtre des conditions aux limites des sédiments.....	119
Figure 5.13: Situation de la station hydrométrique Pontéba- defluent.....	120
Figure 5.14: Corrélation Débit liquide-Débit solide.....	121
Figure 5.15: Courbe de la charge spécifique sédimentaire.....	121
Figure 5.16 : Comparaison du profil du lit observé et modélisé.....	123
Figure 5.17: Courbe de tarage au niveau de la section située à l’extrémité aval.....	124
Figure 5.18: Accumulation de la masse des sédiments en fonction du temps au niveau de la section 69 (extrémité aval).....	125
Figure 5.19 : Profil de l’accumulation spatiale des sédiments pour la crue de la journée du 12 Mars 2016.....	126
Figure 5.20 : Variation de la vitesse d’écoulement en fonction du temps au niveau de l’extrémité aval.....	127
Figure 5. 21: Variation spatiale de la vitesse d’écoulement.....	128
Figure 5.224: Variation temporelle de la concentration au niveau de la retenue.....	129
Figure 5.233: Variation temporelle de la concentration au niveau des sections amont d’oued Fodda.....	129
Figure 5.24: Variation spatiale de de la concentration des sédiments.....	130
Figure 5. 25: Diagramme méthodologique pour l’étude de l’évolution du fond de la retenue du barrage Oued Fodda.....	131
Figure 5. 26: Distribution spatiale des points introduits à travers une surface Tin.....	132
Figure 5.27: Estimation de la capacité de stockage de la retenue du barrage oued Fodda pour l’année 2004 sur ArcMap.....	132
Figure 5.28: Évolution du fond du lit de la retenue Oued Fodda :.....	133
Figure 5.29 : Identification des zones de sédimentation et d’érosion.....	134
Figure 5.30: Fenêtre des statistiques des volumes des dépôts au fond de la retenue durant les années 2004-2017.....	135
Figure 5.31: Diagramme Érosion- Dépôts (2004-2017).....	136
Figure 5.32: Fenêtre des statistiques des volumes érodés durant l’année 2017.....	136
Tableau 2. 1 : Classement ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global.....	43
Tableau 2. 2 : Classement ORSTOM du relief à partir de la dénivelée spécifique.....	44
Tableau 2. 3 : Caractéristiques physiographiques de la zone d’étude.....	44
Tableau 2. 4 : Taux d’envasement des barrages étudiés.....	57
Tableau 2. 5 : Taux de comblement des barrages étudiés en fonction de la surface du bassin versant.....	58

Tableau 3. 1 : Classes de pluviosité et leurs indices de poids.....	64
Tableau 3. 2 : Classes des pentes avec leur surface et leur degré de sensibilité à l'érosion	66
Tableau 3. 3 : Classes d'exposition au vent et leur degré de sensibilité à l'érosion.....	67
Tableau 3. 4 : Types de roches et leurs sensibilités à l'érosion.....	69
Tableau 3. 5 : Sensibilité à l'érosion en fonction de l'occupation du sol.....	70
Tableau 3. 6 : Classes de sensibilité à l'érosion et les surfaces exposées	73
Tableau 4. 1 : Caractéristiques de forme pour le SBV. d' Oued Fodda.	80
Tableau 4. 2 : Comparaison de la capacité de la retenue (cote normale RN).....	81
Tableau 4. 3 : Comparaison de la capacité de la retenue à la cote normale.....	84
Tableau 4. 4 : Paramètres statistiques de la distribution des valeurs de la profondeur.....	89
Tableau 5. 1 : Résultats de l'analyse granulométrique.....	117

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

A: Superficie totale du bassin versant
AEP : Alimentation en eau potable
Ai : Aire comprise entre deux courbes de niveau;
ANBT : Agence Nationale des Barrages et Transferts
ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
BV : Bassin versant
C : Coefficient de la fonction de transport des sédiments
CL : Concentration des sédiments dans la zone inférieure
Co: Effet de pépite
CM : Limon grossier (Coarse silt)
CRM : Comptes rendus mensuels
CS : Sable grossier (course sand)
d : Diamètre moyen des particules
D : Dénivelée
d_{gr} : Diamètre adimensionnel
Di : Équidistance des courbes de niveau,
Ds: Dénivelée spécifique
E : Espérance quadratique de la variable aléatoire
ENE: Est nord Est
ETP : Évapotranspiration
FS : Sable fin (fine sand)
Fgr : Paramètre adimensionnel de mobilité
Ggr : Fonction de transport adimensionnelle
g_{sb} : Transport des sédiments par charriage
g_{ssL}: Transport des sédiments en suspension dans la zone inférieure
g_{ssM} : Transport des sédiments dans la zone intermédiaire
g_{ssU} : Transport des sédiments dans la zone supérieure
g_s : Transport total des sédiments
HEC RAS: Hydrologic Engineering Center, River Analysis System

h : Hauteur d'eau
 h_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau
hm : hectomètre
 H_{moy} : Altitude moyenne du bassin
 i_{moy} : pente moyenne
 I_g : Indice de pente global
 I_p : Indice de pente de Roche
 K_G : Indice de compacité de Gravelius
 K_H : indice d' Horton sans dimension.
Km : kilomètre
L : longueur du rectangle équivalent [Km] ;
l : largeur du rectangle équivalent
M : paramètre de la concentration des sédiments
 Mm_3 : million de mètre cube
MNA: model numérique d'altitude
MS : Sable moyen (medium sand)
MUSLE: Modified Universal Soil Loss Equation
NDVI : Normalized Difference Vegetation Index
ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer
P : Périmètre du bassin
PIR : bande spectrale correspondante au proche infrarouge
PHE : cote des plus hautes eaux exceptionnelles
Q-Q plot : diagramme Quantile-Quantile
 Q_s : charge sédimentaire transportée
 q : débit liquide
R : bande spectrale correspondante au rouge.
RN : cote de la retenue normale
S : pente d'écoulement
SIG : système d'information géographique
SBV : sous bassin versant
SMBT : Sidi m'Hamed Ben Taïba
SRTM : Shuttle Radar Topography Mission
T : taux d'envasement
 T_c : taux de comblement

t : temps en heure

TFP : paramètre de la contrainte de cisaillement.

Tin : Triangular Irregular Networks

U : Vitesse moyenne de l'écoulement

USGS : U.S. Geological Survey

USLE: Universal Soil Loss Equation

Var : Variance de la variable aléatoire

VCS : Sable très grossier (very coarse sand)

VFG : Gravier très fin (Very fine gravel)

VFS : Sable très fin (very fine sand) :

V_i : Capacité initiale de la retenue

V_f : Capacité finale de la retenue

ω : Vitesse des particules

w : Vitesse de chute

WSW : Ouest Sud-Ouest

WSEI : Water surface elevation

x : Distance en mètre

Z : profondeur

INTRODUCTION GENERALE

L'érosion hydrique est la source majeure de la dégradation des sols dans les régions semi arides et surtout en zone méditerranéenne. Au Maroc par exemple, ce phénomène est intense avec des dégradations spécifiques dépassant 2 000 t/km² par an dans les versants du Rif au Nord et entre 500 et 1 000 t/km²/an dans les Moyen et Haut Atlas [1]. En Tunisie, l'érosion hydrique dégrade des terres cultivables. Au total, 1,2 millions d'hectares sont gravement affectées par l'érosion dans le nord et le centre, soit 25% de la superficie totale des terres [2]. L'Algérie n'est pas en reste, elle est classée parmi les pays aux sols les plus érodables [3]. Les conséquences ne cessent de s'amplifier et se traduisent par l'épuisement des ressources en eau et en sol [4]. La partie Ouest du pays est la plus érodée, où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres, suivie par le centre (27%) et l'Est (26%) [5]. L'érosion spécifique varie de 2000 et 4000 t/km²/an et le taux d'envasement, dépasse 15 % [5]. Au niveau du Nord-ouest, l'érosion et son évolution sur les versants ainsi que sur les facteurs causaux sont mal connus. Sur ces espaces où l'érosion prend naissance et les pointes de crue se forment, beaucoup d'efforts restent à accomplir pour comprendre et appréhender ce phénomène [4]. Ce dernier, dépend d'une multiplicité de facteurs interagissant entre eux, et sont de ce fait complexes à modéliser, ce qui nécessite beaucoup d'études et de mesures de terrain [1], L'intégration des systèmes d'informations géographiques, permet d'une manière rapide et efficace de démêler la complexité et l'interdépendance de ces facteurs dans l'analyse des risques d'érosion [6].

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude, dont l'objectif consiste à identifier la source de production des sédiments sur un bassin versant et leurs évolutions dans une retenue de barrage. Ce travail de thèse s'appuie sur le cas du bassin versant du haut et du moyen Cheliff. Ce dernier fait partie du bassin versant du Cheliff, qui est considéré comme étant, le plus grand du point de vue superficie, en Algérie. La nature lithologique de ses terrains, son relief fort, son couvert végétal moins dense, l'irrégularité et l'agressivité de ses précipitations, augmentent le risque des pertes en sols au niveau de la zone d'étude.

Les derniers levés bathymétriques ont été effectués en 2004, par le groupement d'Entreprises HYDRODRAGAGE-C.T.SYSTEMS (France) et traités par contrat avec l'Agence Nationale des Barrages et de Transfert (ANBT). Depuis, la situation des barrages implantés sur l'ensemble du bassin est devenue très critique, particulièrement ceux d'oued Fodda et Ghrib dont le taux d'envasement représente environ le tiers de l'envasement total des barrages algériens, d'après l'Agence nationale des barrages et de transferts (ANBT) d'Alger.

À cet égard, nous avons structuré ce document en cinq chapitres principaux, accompagnés d'une introduction qui présente essentiellement, les motivations et le contexte de cette étude, et d'une conclusion, dans laquelle, nous avons analysé et synthétisé les différents résultats obtenus dans le cadre de notre travail de recherche.

Le premier chapitre est un état de l'art sur les différents phénomènes: érosion, transport et sédimentation. Il décrit, d'une part, les différentes formes, facteurs et conséquences de l'érosion...etc. et d'autre part, il présente un volet très important concernant les deux processus transport solide et sédimentation.

La connaissance du contexte hydrologique de la zone d'étude, permet de comprendre les problématiques liées aux phénomènes cités ci-dessus. En effet une étude hydrologique détaillée du site a fait l'objet du deuxième chapitre. Également, une analyse de l'état d'envasement des barrages implantés sur l'ensemble du bassin haut et moyen cheliff est représentée.

Le troisième chapitre est élaboré dans l'objectif, de la mise en évidence du caractère spatial de l'érosion au niveau du bassin haut et moyen Cheliff. Ce dernier est exposé à un processus érosif très intense. Ce qui est à l'origine du phénomène d'envasement. Le principe consiste alors, à appréhender l'érosion d'une manière qualitative, en considérant à la fois, les caractéristiques physiques et hydrologiques, liées aux facteurs climatiques. Une carte de vulnérabilité à l'érosion a été élaborée. Cette dernière, nous a permis de disposer d'une vue d'ensemble des zones menacées et d'identifier particulièrement les zones de production des sédiments. En effet, une érosion par ravinement a été identifiée particulièrement, au niveau des sous bassins versants : Oued Ebda, Oued Fodda et Oued Cheliff Ghrib [7]. Cette situation, se traduit par une production importante des sédiments, en amont de

chacun des sous bassins et par conséquent, un envasement très accéléré au niveau de la région a été distingué. La carte produite fournit un excellent outil d'aide à la prise de décision pour les gestionnaires, afin d'intervenir au bon moment et au bon endroit, et protéger ainsi le sol et l'environnement.

Par la suite, notre travail s'est orienté vers l'objectif principal tracé initialement: "Évolution des sédiments dans une retenue". Le choix du barrage à étudier était certainement, facilité par les résultats obtenus, suite à l'étude des chapitres précédents. En effet, le premier barrage identifié, était celui de Oued Cheliff Ghrib dont le taux d'envasement évalué en 2004, est le plus important (58.81 %), Ce pourcentage a été bien dépassé en 2017. Il a été estimé à environ 60% ou plus, d'après les gestionnaires du barrage Ghrib. Pour ce dernier, les données étaient disponibles et les études publiées (dans le domaine Érosion, transport et sédimentation) étaient non négligeables. Cependant, pour le barrage Oued Fodda, les recherches effectuées étaient très rares, en raison de l'indisponibilité des données et des mesures. Ce barrage, de forme allongée, est considéré comme étant l'un des premiers grands barrages construits en Algérie. Il est destiné à l'irrigation du périmètre du Moyen Cheliff [8]. Il capte annuellement un volume de vase de 3,2 millions de m³ [9]. Sa capacité de stockage a diminué considérablement, depuis l'année de sa mise en eau (1932) jusqu'à l'année du dernier levé (2004). Le taux d'envasement estimé est de 54.29 %. Malgré les opérations de dévasement effectuées, l'état de la bathymétrie de cette retenue est devenu très inquiétant.

L'intégration des systèmes d'informations géographiques (SIG) et les méthodes géostatistiques, nous a facilité le travail fastidieux liés aux systèmes de modélisations physiques ou numériques. Notre choix s'est porté sur la retenue du barrage oued Fodda. La démarche propose une réflexion en deux temps : dans le premier, il s'agit d'effectuer une analyse bathymétrique de la retenue, et compléter dans le second par l'étude du transport des sédiments et l'évolution des dépôts vaseux dans la retenue durant la période 2004-2017.

L'analyse bathymétrique de la retenue du barrage Oued Fodda, tenant compte, des données mis à notre disposition, révèle un taux d'envasement de 45.43% vers la fin de l'année 2015. Par intégration des SIG et des méthodes d'analyses

géostatistiques, nous avons estimé la capacité de stockage de la retenue pour l'année 2017 et également, élaboré une carte bathymétrique sur laquelle, la profondeur d'eau est estimée en tout point de la surface de la retenue. Cette carte, nous a permis d'étudier l'évolution de la profondeur d'eau en fonction de la surface.

Le cinquième et dernier chapitre, de cette présente étude, se divise en deux parties. Dans la première (1), une approche de modélisation a été choisie pour étudier le comportement du transport des sédiments à l'amont et au niveau du barrage oued Fodda par utilisation du logiciel HEC-RAS. La seconde partie (2) s'attache à décrire l'évolution du fond de la retenue d'oued Fodda, et sa dégradation durant la période 2004 -2017. Cette partie nous a permis d'identifier les zones d'érosion et de sédimentation et d'évaluer les volumes des sédiments déposés et érodés sur le lit de la retenue du barrage pour la même période.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES PHENOMENES "EROSION, TRANSPORT SEDIMENTATION"

1.1. Introduction

Ce chapitre présentera, en premier lieu, une étude théorique sur le phénomène d'érosion, son processus, ses différentes formes et facteurs, ses conséquences et également, un bref aperçu sur les techniques d'informations spatiales et leur apports pour dans la quantification de l'érosion. Par la suite, une partie sera consacrée pour l'étude des processus, transport et sédimentation des barrages. Un volet très important sera réservé pour l'étude des techniques de gestion de la sédimentation.

1.2. Érosion

L'érosion du sol à l'échelle mondiale, est un processus majeur de dégradation des sols [10]. Elle est définie comme le détachement et la translocation des particules de sol par l'eau ou le vent. C'est un phénomène qui est communément reconnue par des incisions ou des sédimentations qui se forment à la surface de la terre [11].

1.2.1. Processus de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique constitue l'un des principaux facteurs de la dégradation des terres [12]. C'est un processus qui résulte de la conjugaison de trois mécanismes: le détachement des particules du sol, leur transport et leur sédimentation (Figure 1.1) [13]. Elle est causée par l'action, en général combinée, de la pluie et du ruissellement, et dont l'expression varie en fonction de la résistance du milieu et de la topographie. L'érosion hydrique démarre lorsque le sol ne peut absorber les eaux de pluie. Cela se produit soit lorsque l'intensité de la pluie est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement dit hortonien), soit lorsque la pluie tombe sur un sol saturé (ruissellement par saturation). Ces deux types de ruissellements caractéristiques de milieux différents peuvent parfois se combiner en un même lieu [14].

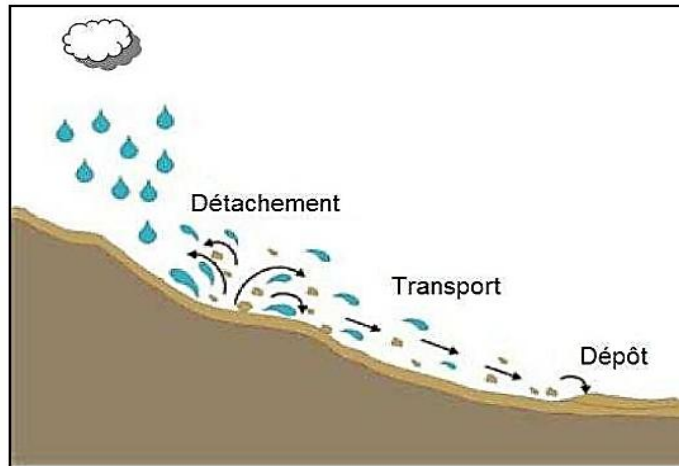


Figure 1. 1: Processus de l'érosion hydrique [1].

1.2.2. Différentes formes d'érosion

Il est important de bien distinguer les formes que peu: prendre l'érosion parce qu'à chacune d'elles correspondent des processus et des sources d'énergie différentes dont il faudra tenir compte pour organiser une lutte antiérosive [15].

1.2.2.1. L'érosion en nappe

On parle d'érosion en nappe dans le cas où l'énergie des gouttes de pluie s'applique à toute la surface du sol et le transport des matériaux détachés s'effectue par le ruissellement en nappe. Elle est causée par l'énergie de la battance des pluies sur les sols dénudés [16] et se traduit par un appauvrissement de l'horizon humifère (blanchissement du sol). Cette forme d'érosion a un effet érosif maximal au sommet des versants ou à l'aval d'un obstacle. Au bas des versants, au contraire, il s'agit d'accumulation.

1.2.2.2. Érosion linéaire

Sur un bassin versant ou une parcelle, l'érosion en rigole succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les creux. A ce stade, les rigoles ne convergent pas mais forment des ruisselets parallèles [17]. L'érosion linéaire est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses : non seulement des argiles et des limons comme l'érosion en nappe sélective, mais des graviers ou des cailloux et des blocs lorsqu'il sera organisé en ravines.

1.2.2.3. Érosion en masse

On attribue à l'érosion en masse tout déplacement de terre selon des formes non définies, comme les mouvements de masse, les coulées de boue et les glissements de terrain... Dans ce cas, seul l'État dispose des moyens techniques, financiers et légaux, pour maîtriser les problèmes de glissement de terrain, souvent catastrophiques, et pour imposer des restrictions d'usage aux terres soumises à des risques majeurs de mouvement de masse [18].

1.2.3. Facteurs de l'érosion hydrique

Les facteurs de l'érosion qui influencent les phénomènes érosifs font maintenant l'objet d'un consensus et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat [19], [20]. Ces facteurs influencent l'intensité des processus de détachement, de transport et de dépôt. Ils agissent donc, sur les processus qui eux, conduisent à des formes d'érosion spécifiques.

1.2.3.1. Végétation

C'est le facteur le plus important. Il protège la surface du sol de l'impact des gouttes de pluie, et donc du détachement par le splash ; les tiges et troncs forment des obstacles qui ralentissent la vitesse du ruissellement, ce qui réduit le détachement par le ruissellement ainsi que sa capacité de transport. Les racines forment un réseau près de la surface qui tient le sol en place, augmentant ainsi sa résistance au détachement. Les feuilles mortes et débris végétaux protègent la surface de l'impact des gouttes, ralentissent le ruissellement, et ajoutent de la matière organique au sol, ce qui le rend plus résistant à l'érosion [21].

1.2.3.2. La pluie

C'est souvent le deuxième facteur d'importance après la végétation. Il n'y a ruissellement que quand la vitesse avec laquelle la pluie arrive au sol est plus importante que la vitesse avec laquelle l'eau entre dans le sol [21]. En effet, plus l'intensité et la durée d'un épisode de pluie sont grandes, plus le risque d'érosion est important. L'impact des gouttes de pluie sur la surface du sol peut briser les agrégats et disperser les particules de sol. Les particules les plus légères, sont facilement emportées par les éclaboussures d'eau de pluie et les eaux de ruissellement. Il faut davantage d'énergie transmise par les gouttes de pluie et un écoulement plus important pour emporter les particules plus grossières de sable et de gravier [22].

1.2.3.3. La topographie

Trois aspects de la topographie sont à prendre en compte: l'inclinaison de la pente, la longueur de pente, et la présence de concavités (et talweg) et convexités. Ces facteurs ne sont pas entièrement indépendants.

1.2.3.4. Le sol

L'érodibilité du sol est une mesure de la facilité avec laquelle le sol est érodé. Certains sols résistent bien à l'érosion, d'autres beaucoup moins. L'érodibilité du sol dépend surtout de sa « stabilité structurale ». La stabilité structurale est une propriété qui se mesure par un tamisage dans l'eau et est un indice de la résistance à la désagrégation d'un sol. C'est une mesure de la cohésion des agrégats et de leur capacité à ne pas se désagréger sous l'effet de la pluie [21]. En général, les sols qui affichent une plus grande résistance à l'érosion sont ceux dans lesquels l'eau s'infiltre plus rapidement, ceux qui sont riches en matière organique et ceux dont la structure est améliorée. Les sables, les loams sableux et les sols loameux ont tendance à être moins vulnérables à l'érosion que les limons, les sables très fins et certains sols argileux [22].

1.2.4. Conséquences de l'érosion

Les conséquences de l'érosion hydrique en Algérie du Nord sont dramatiques [5], nous pouvons citer par exemple :

- une réduction de la production agricole (pertes en sol agricole) ;
- dégradation spécifique dépassant les 5000 t/km²/an ;
- rehaussement des lits des oueds provoquant par la suite des inondations, une menace pour les voies de communication et les ouvrages d'arts,...
- L'envasement précoce des barrages en exploitation.

1.2.5. Quantification de l'érosion

1.2.5.1. Modèle USLE

Le modèle le plus utilisé pour la quantification des pertes en sols est le modèle USLE avec sa version révisée RUSLE, grâce à la facilité de son application et à sa compatibilité avec les systèmes d'informations géographiques [23], [24], [25], [26].

Ce modèle de prévision de l'érosion a été conçu pour mesurer l'influence du système cultural et du système de gestion sur l'érosion. Il peut servir à comparer les pertes en terre provenant d'un champ donné, soumis à des taux de « pertes en terre

tolérables » afin de déterminer, la pertinence des mesures de conservation du sol dans la planification des activités agricoles [27].

Le modèle USLE prévoit le taux annuel moyen d'érosion à long terme sur la pente d'un champ, en fonction de la configuration des pluies, du type de sol, de la topographie et des pratiques de gestion. Il est exprimé par l'équation suivante :

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1.1)$$

A : taux de perte en terre annuelles moyennes possibles à long terme en tonnes/hectare,

R : facteur de pluie et de ruissellement par secteur géographique,

K : facteur d'érodibilité du sol (perte en terre moyenne en tonnes/hectare),

LS: facteur topographique (L est le facteur de longueur de pente en m, S est l'indice de pente, en %),

C: facteur lié au couvert végétal et à son taux de recouvrement (compris entre 0 et 1,

P : facteur lié aux pratiques antiérosives (compris entre 0 et 1).

Le modèle empirique RUSLE est basé sur l'équation universelle des pertes de sols de Wischmeier et représente une amélioration de l'ancienne. L'équation de Wischmeier révisée était combinée avec les techniques de SIG pour analyser le taux de perte de sol brute et pour évaluer la distribution spatiale des taux de perte de sol sur les différentes occupations des sols [28]. Il permet de prédire le taux annuel moyen d'érosion du sol d'un site d'intérêt pour des scénarios impliquant des systèmes de culture, les techniques de gestion et les pratiques de contrôle de l'érosion [29].

❖ **Les limites intrinsèques du modèle "USLE"**

- L'USLE prévoit uniquement l'importance des pertes en terre qui résultent des érosions en nappe ou en rigoles sur une pente simple, sans toutefois tenir compte des pertes en terre supplémentaires qui peuvent être attribuables aux autres formes d'érosion associées au ravinement, au vent ou au travail du sol [27].
- Le type de paysage: ce modèle a été testé et vérifié dans des paysages de pénéplaines et de collines sur des pentes de 1 à 20 % à l'exclusion des montagnes jeunes, en particulier des pentes supérieures à 40 % où le

ruissellement est une source d'énergie plus grande que les pluies et où les mouvements de masse sont importants [30].

- Les types de pluies : les relations entre l'énergie cinétique et l'intensité des pluies utilisées généralement dans ce modèle ne sont valables que dans la plaine américaine. Elles ne sont pas valables en montagne mais on peut développer des sous-modèles différents pour l'indice d'érosivité des pluies, [30]
- Ce modèle peut seulement s'appliquer à des valeurs moyennes sur 20 ans. Il n'est en aucun cas valable à l'échelle de l'averse. Il faut donc pouvoir disposer de données concrètes sur une longue durée, ce qui n'est pas évident. Pour estimer les transports solides à chaque averse, un modèle de sédimentation, MUSLE, a été mis en place. L'élément qui est pris en compte est le volume ruisselé [30], [31].
- Enfin une limite importante de ce modèle, c'est qu'il néglige certaines interactions entre les facteurs pour pouvoir distinguer plus facilement l'effet de chacun des facteurs. Par exemple, il n'est pas tenu compte de l'effet de la pente combiné au couvert végétal sur l'érosion, ni de l'effet du type de sol sur l'effet de la pente [30].

1.2.5.2. La télédétection et le système d'information géographique SIG

De nos jours, les techniques de cartographie numérique, depuis les traitements d'images satellitaires jusqu'aux systèmes d'information géographique (SIG) en se fondant sur l'équation universelle de pertes en sols de Wischmeier, sont de plus en plus utilisées. Elles permettent d'une part, de quantifier les pertes annuelles en sols et d'autre part, d'identifier et de cartographier les surfaces des sols nécessitant la plus grande priorité d'intervention pour la protection du patrimoine sol afin de réduire les apports solides au niveau des retenues du barrage [18].

- **Télédétection et imagerie satellitaire**

Au cours des 30 dernières années, de nombreuses études ont été publiées appliquant l'imagerie satellitaire pour l'évaluation de l'érosion des sols avec de nombreuses façons différentes [32]. L'acquisition de données satellitaires (Landsat TM ou SPOT), une technique et un outil couramment utilisés aujourd'hui, peut servir à la cartographie des risques érosifs. Si cette approche ne peut en aucun cas remplacer les études de terrain pour établir une compréhension du phénomène, de par son

caractère spatial et temporel, elle reste la méthode de régionalisation et de mise à jour la plus rapide et la moins coûteuse.

La télédétection est utilisée pour détecter l'érosion et l'évaluation des facteurs qui la contrôlent. Son application pour les études de l'érosion suit deux axes de recherche: d'une part, le contrôle des signaux qui décrivent des variations spatio-temporelle des caractéristiques de surface du sol, et d'autre part, des améliorations majeures dans les méthodes utilisées pour relier ces signaux surveillés avec les variables hydrologiques et géomorphologiques des modèles utilisés pour étudier les processus d'érosion [32].

▪ **Système d'information géographique (SIG)**

Le Système d'Information Géographique (SIG) est un ensemble des matériels et de logiciels donnant la possibilité d'intégrer et d'analyser spatialement des données multisources [32]. Il est considéré, de ce fait, comme un excellent outil de prise de décision.

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 [33].

La lutte contre l'érosion hydrique en particulier et la complexité de ce phénomène imposent aujourd'hui l'utilisation des méthodes et des moyens performants pour la gestion de l'information géographique. C'est ainsi que la cartographie de l'ampleur spatiale du phénomène de l'érosion est fournie en utilisant le SIG. Dans ce dernier, on peut intégrer des paramètres des modèles d'érosion comme l'USLE permettant ainsi de faire une modélisation spatialisée de l'érosion des sols et de la production des sédiments [18].

1.3. Transport solide

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. On distingue trois types de transport solide (Figure 1.2):

- Transport par charriage,
- Transport en suspension,
- Transport par saltation.

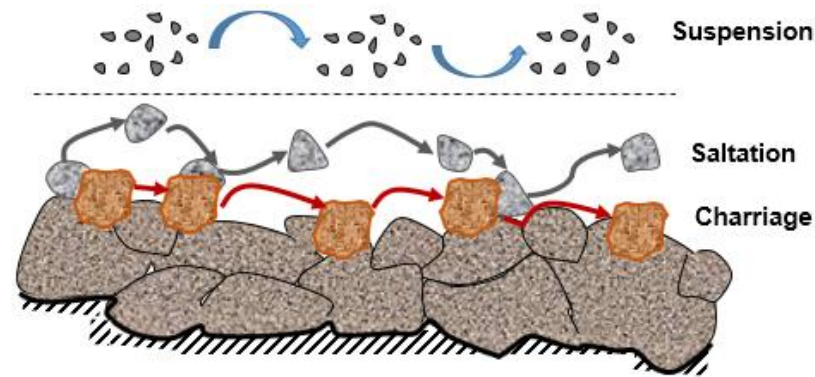


Figure 1.2 : Différents modes de transport.

1.3.1. Transport par «charriage»

Le charriage correspond aux éléments grossiers du lit (blocs, galets, graviers, sables grossiers) qui sont mis en mouvement par glissement ou roulement sur le fond, principalement lors des crues importantes du fleuve (Figure 1.3). Les interactions avec le lit sont alors prépondérantes et ce type de transport est directement lié à la morphologie du lit. Le transit par charriage est très lent, de l'ordre de plusieurs décennies pour faire progresser les matériaux grossiers sur une centaine de kilomètres [34]. Généralement, on se contente d'études sur modèles réduits pour déterminer la proportion du charriage par rapport à la suspension ou au transport total [35]. Dans les retenues Algérienne, le débit charrié est estimé entre 10 à 15 % du débit en suspension [36].



Figure 1.3: Charriage au fond de l'oued El Malleh amont du Barrage Deurdeur
Photos : S. Benkaci, Aout2017).

1.3.2. Transport en «suspension»

Le transport solide par suspension correspond au déplacement des matériaux fins du lit (sables fins) et les matériaux très fins issus du lessivage des versants (limons et argiles) au sein de l'écoulement. Ces particules sont entraînées par le courant sans jamais se déposer sur le fond [37]. Ce sont eux qui expliquent la couleur de l'eau lors des débits élevés. Ils n'ont pas d'influence majeure sur le comportement de l'écoulement et la morphologie du lit mineur. Par contre, ils peuvent jouer un rôle prépondérant pour le développement des terrasses élevées ou l'envasement des retenues. [34], [38].

1.3.3. Transport par saltation

Ce type de transport correspond à un déplacement par bonds successifs, en alternant le charriage et la suspension [39],[40]. Ce phénomène ne possède pas de théorie particulière. Il est considéré avec le charriage [41].

1.4. Envasement et sédimentation des barrages

Les barrages et leurs retenues modifient les écoulements et forment des obstacles au transit des sédiments, aboutissant au comblement de la retenue. Ce phénomène correspond à une accumulation graduelle de la charge sédimentaire de la rivière [42] En piégeant les sédiments dans les réservoirs, les barrages interrompent la continuité du transport des matériaux dans les rivières, entraînant une perte de stockage dans les réservoirs et une durée de vie utile réduite [43]. Le taux de piégeage de la retenue dépend de plusieurs paramètres [44] :

- Les caractéristiques du bassin versant (production de sédiments). En effet, environ 180 millions de tonnes sont arrachés annuellement des bassins versants par le ruissellement dans le nord d'Algérie [45].
- Les apports liquides et solides dans la retenue, et les caractéristiques des sédiments entrants.
- Les caractéristiques de la retenue (dimension, forme, mode d'exploitation) et du barrage (position et taille des vannes).

Trois processus principaux à l'origine de ce phénomène (Figure 1.4) [46]:

- le dépôt d'un delta de sédiments grossiers au niveau de la retenue amont,
- le dépôt de sédiments fins à partir d'un écoulement non stratifié au niveau de la retenue aval,
- le dépôt de sédiments fins par un courant de densité.

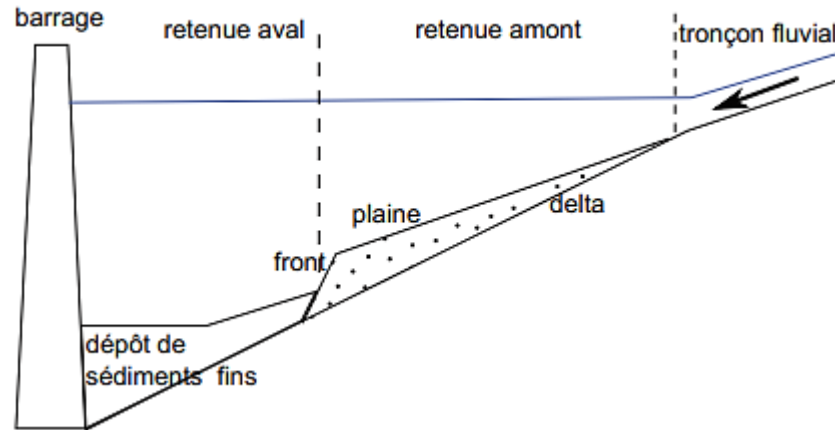


Figure 1.4 : Types de dépôts observés dans une retenue [47].

Lorsque des particules pénètrent dans la zone de faible vitesse du réservoir, ils se déposent et forment un delta (Figure 1.5) [48]. Ce delta est composé de deux entités principales (Figure 1.4) : la plaine du delta, à l'amont, correspond aux sédiments plus grossiers. Sa limite aval correspond à la limite du transport par charriage dans la retenue. Le front est la partie du delta qui se propage dans la retenue, sa pente est généralement plus élevée et il est composé de sédiments plus fins [49].

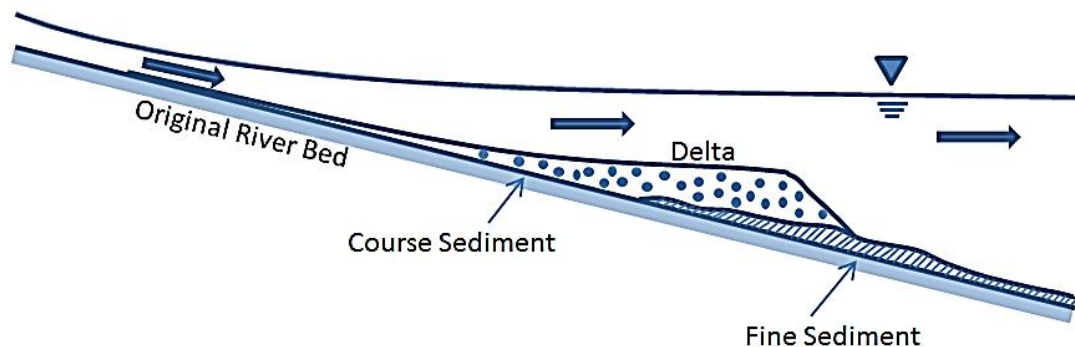


Figure 1.5 : Profil longitudinal d'un réservoir avec formation de delta [48].

Les sédiments s'accumulent dans la retenue au fil du temps jusqu'à ce qu'elle ait atteint un nouvel état d'équilibre. De fait, les barrages sont conçus avec des durées de vie finies, et le comblement des retenues à plus ou moins long terme est inévitable [47].

1.4.1. Problèmes posés par La sédimentation

L'accumulation de sédiments dans un réservoir est un problème grave qui menace la durabilité de réservoir et a de graves conséquences sur la productivité du réservoir pendant sa durée de fonctionnement [42]. Ce phénomène pose d'énormes problèmes (figure 1.6) au niveau du réservoir lui-même, mais aussi en amont et en aval du réservoir [50].

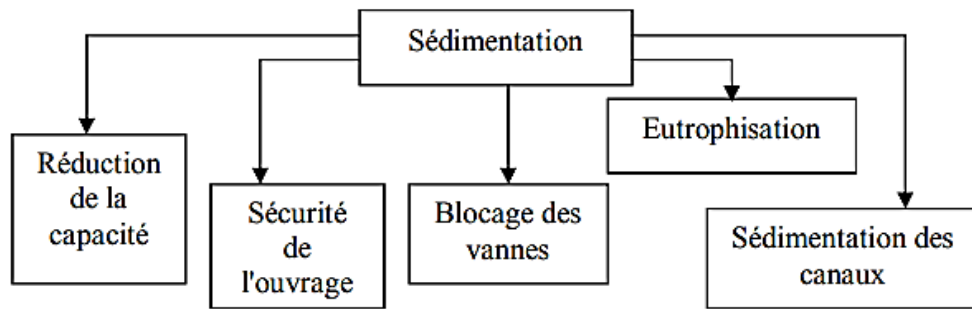


Figure 1.6 : Problèmes posés par la sédimentation [50].

La réduction de la capacité de la retenue due aux dépôts de sédiments entraîne d'une part, une diminution du volume de stockage, préjudiciable lorsque l'eau est utilisée pour des usages agricoles [51]. Et d'autre part, elle entraîne des pertes de production, dans le cadre de l'exploitation hydroélectrique du barrage [52].

La sédimentation peut avoir également, un impact sur la sécurité des barrages, [50]. L'accumulation de dépôts de sédiments au pied du barrage, présentant une densité supérieure à celle de l'eau, entraîne une augmentation de la pression exercée sur le barrage et peut provoquer des problèmes de stabilité [53].

L'obturation des organes de vidange est un autre problème aussi à considérer. En effet, l'ouverture tardive des vannes de fond, par rapport à l'arrivée des courants de densité, favorise la consolidation des vases près des pertuis de vidange et rend plus difficile leurs manœuvres. C'est le cas par exemple du barrage d'oued El Fodda dont la vanne de fond a été bloquée depuis 1948 suite à la consolidation rapide de la vase [50].

La sédimentation peut aussi accélérer l'eutrophisation du lac en raison du tassement et de la consolidation des particules solides ce qui affecte considérablement, la qualité de l'eau. Finalement, un problème délicat peut être aussi posé à l'aval du barrage, c'est la sédimentation dans les canaux d'irrigation, suite au l'irrigation par l'eau chargée. Ce problème impose leur entretien, et leur dévasement d'une manière périodique [50].

1.4.2. Techniques de gestion de la sédimentation

Plusieurs techniques sont utilisées par les gestionnaires, afin de limiter les risques associés à la sédimentation des retenues. Elles peuvent être résumées sur la figure 1.7 ci-après.

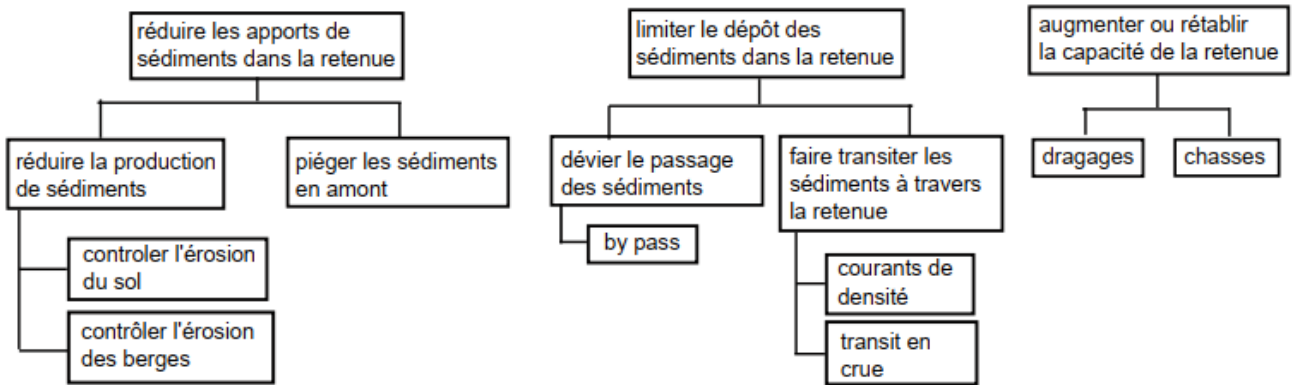


Figure 1.7 : Classification des stratégies de gestion des sédiments pour le maintien de la capacité des retenues [43].

1.4.2.1. Dérivation des sédiments par "bypass"

Les eaux à forte teneur en sédiments sont détournées à un déversoir à l'amont du réservoir, en utilisant des canaux, des conduites sous pression ou des tunnels d'une capacité de déviation élevée. Ces eaux sont transportées en aval du barrage, où elles rejoignent la rivière sans qu'elles n'aient à parcourir la retenue (Figure 1.8). Une fois que les concentrations en sédiment tombent, l'eau est permise dans le réservoir [43], [48.] Cette méthode de gestion est très onéreuse et dépend de la topographie locale.

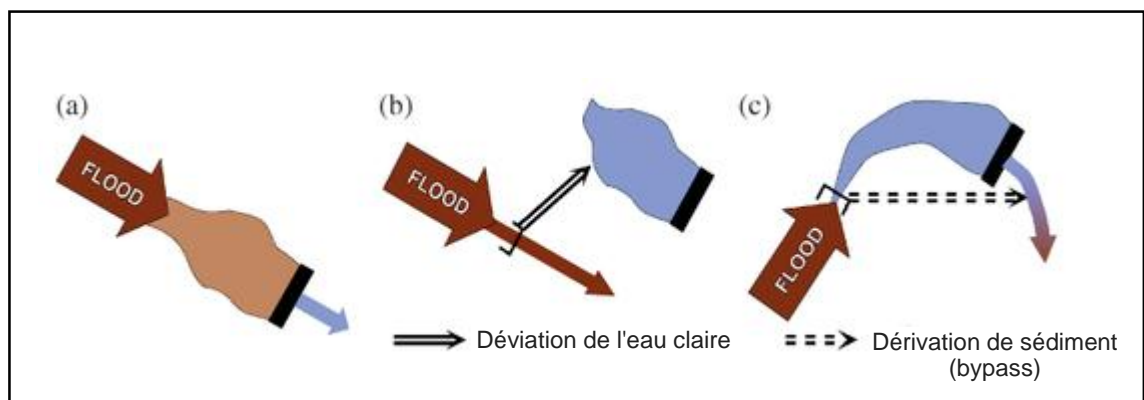


Figure 1.8 : Représentation schématique de l'opération de dérivation des sédiments par bypass [43].

a) Réservoir conventionnel, qui emprisonne les sédiments entrants, en contraste avec les configurations alternatives de contournement des écoulements chargés de sédiments autour de la zone de stockage: (b) contourner le stockage hors rivière, où un barrage de dérivation dans la rivière réservoir pendant les périodes de débits clairs mais ne se détourne pas lorsque les concentrations de sédiments en suspension sont élevées c) un canal ou tunnel de dérivation des sédiments qui, pendant les périodes de fortes concentrations en eau et en sédiments, dérive en amont du réservoir autour du réservoir et dans le canal aval [43].

1.4.2.2. Gestion en crue : sluicing

La vidange des sédiments, également appelé «sluicing», est une autre façon de réduire les dépôts des sédiments dans les réservoirs [48]. Cette méthode est réalisée dès lors que les volumes de sédiments sont importants. Elle consiste à décharger les débits élevés à travers le barrage pendant les périodes de crue importantes, dans le but de permettre le transport des sédiments à travers le réservoir aussi rapidement que possible tout en minimisant la sédimentation. [43].

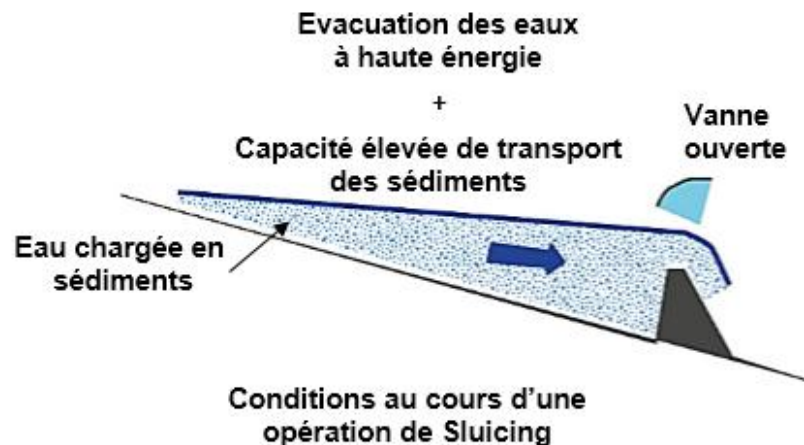


Figure 1. 9: Représentation schématique de gestion des sédiments par sluicing [43], [54].

Un avantage de cette approche est que les dépôts dans le réservoir sont minimisés et que les sédiments continuent à être transportés en aval pendant la saison des inondations, lorsque les sédiments sont naturellement déversés par la rivière. La coulée s'effectue en abaissant le niveau du réservoir avant les inondations chargées de sédiments (Figure 1.9) [43].

Cette technique de vidange (sluicing) est la plus efficace lorsque [55] :

- 1) la profondeur de l'eau est faible et la décharge élevée;
- 2) les vannes sont larges et situées près du fond du barrage;
- 3) le lit du ruisseau d'origine est raide et le réservoir a un fond court et droit;
- 4) et le réservoir est à un stade avancé de la sédimentation et les dépôts sont constitués de matériaux à grains fins et récemment déposés.

1.4.2.3. Les chasses de barrages (*drawdown flushing*)

Les chasses reposent sur l'ouverture des vannes du barrage pour évacuer les sédiments à l'aval [56]. Il s'agit d'abaisser totalement le niveau d'eau dans le réservoir, opération qui s'effectue en périodes de basses eaux souvent juste avant la saison des crues. Il s'agit d'affouiller et de remettre en suspension les sédiments

déposés au sein du barrage pour les transporter vers l'aval. Lors de ce genre d'opération, seuls les sédiments fins au centre du chenal du réservoir (chenal d'origine de la rivière) vont être érodés et transportés, les sédiments latéraux n'étant généralement pas ou peu évacués. L'efficacité de la chasse dépend en grande partie du niveau d'eau au moment de l'opération. Elle convient pour des configurations de vallées étroites et de petits réservoirs ainsi que pour des cours d'eau à débits saisonniers très contrastés [57], [58], [54].

D'un point de vue général, l'efficacité des chasses est améliorée lorsque [49] :

- la cote de la retenue est basse,
- le débit de chasse est fort,
- les dimensions des vannes sont importantes,
- les vannes sont situées près du fond,
- la retenue est rectiligne et étroite,
- les dépôts sont proches du barrage,
- les particules sont fines et non consolidées,
- la durée de la chasse est longue.

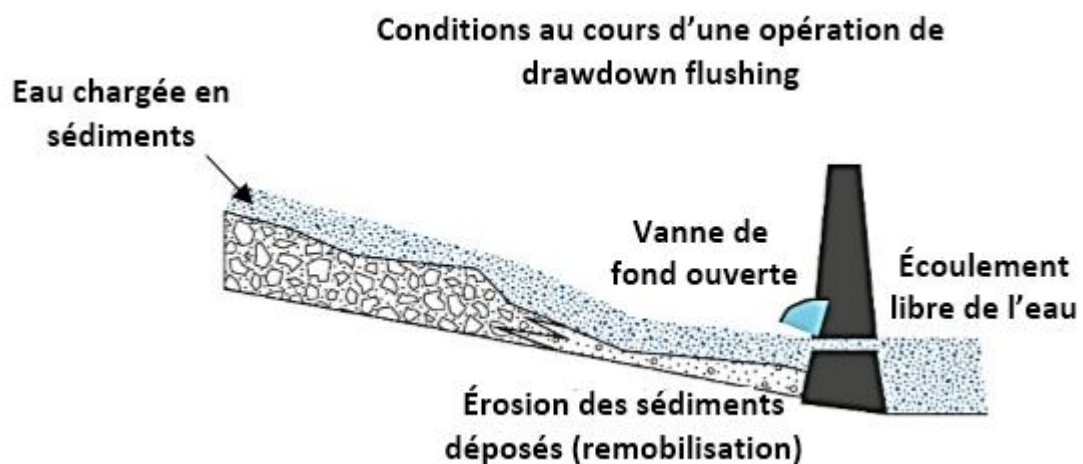


Figure 1. 10: Représentation schématique de gestion des sédiments par sluicing et drawdown flushing [43], [54].

1.4.2.4. Soutirage par courants de densité

C'est une méthode pratique qui consiste à évacuer les sédiments drainés par les courants de densité sur le fond de la retenue en utilisant des pertuis de vidange (vannettes de dévasement ou vanne de fond) du barrage [59].

Les courants de turbidité se forment lors de l'infiltration d'eau à forte concentration de sédiments, formant un courant de densité supérieure qui circule le long du fond

du réservoir vers le barrage sans se mélanger avec les eaux sus-jacentes à faible densité [43]. La gestion de ces courants peut réduire considérablement l'accumulation de sédiments à la base d'un barrage. Cependant, les courants de densité ne se forment que dans certaines conditions et peuvent être difficiles à détecter [48].

Leur présence dans un barrage peut être un avantage comme il peut être un inconvénient pour la durée de vie de l'ouvrage. Tout dépend de la maîtrise des soutirages des courants de densité. Pour avoir un bon soutirage (Figure 1.11) il faut régler les ouvertures et les fermetures de vannes de fond au moment de l'approche du courant de densité du pied du barrage pour obtenir un écoulement permanent du courant de densité à travers les vannettes de dévasement [60].

En Algérie, cette technique peut être un moyen efficace de lutte contre l'envasement des barrages tenant compte du faible coût. Par exemple pour le barrage d'Ighil Emda, près de 55 % des apports solides totaux ont pu être évacués durant la période 1984 - 1992 [59].

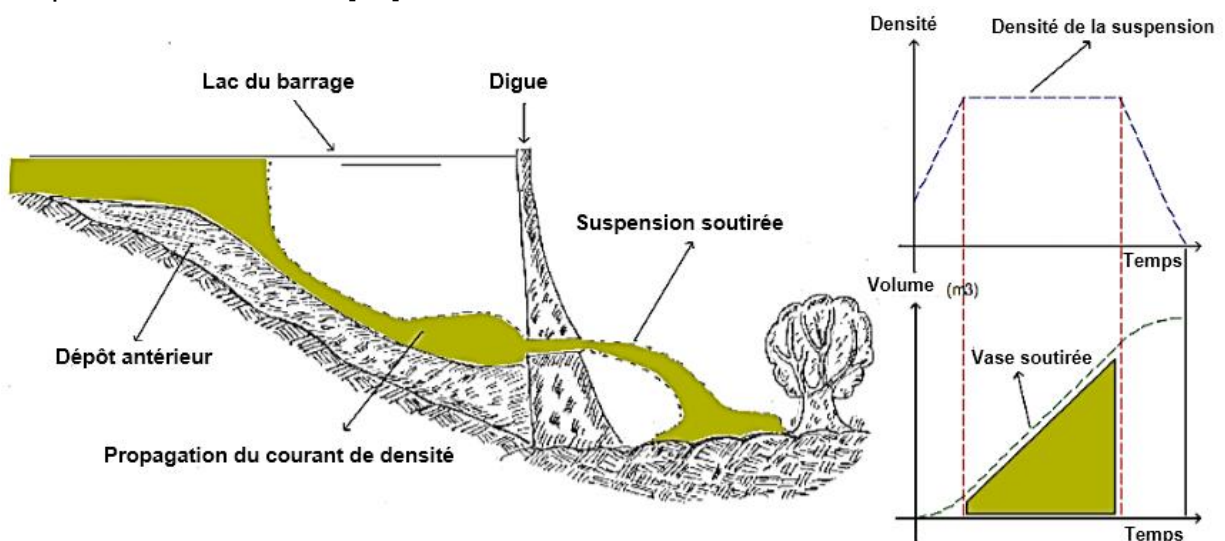


Figure 1.11 : Schéma synoptique d'un soutirage parfait du courant de densité (Schéma Remini, 2017) [60].

1.4.2.5. Dragage du barrage

Le dragage est peut-être la technique de gestion des sédiments la plus utilisée. C'est une solution coûteuse mais efficace à la perte de stockage extrême dans les réservoirs [48]. Il consiste en une extraction mécanique des sédiments des retenues (Figure 1.12). Dans le cas où l'envasement atteint un niveau très élevé dépassant un taux de 50%, le dragage peut s'avérer comme ultime solution pour sauver le barrage et prolonger sa durée de vie [45].

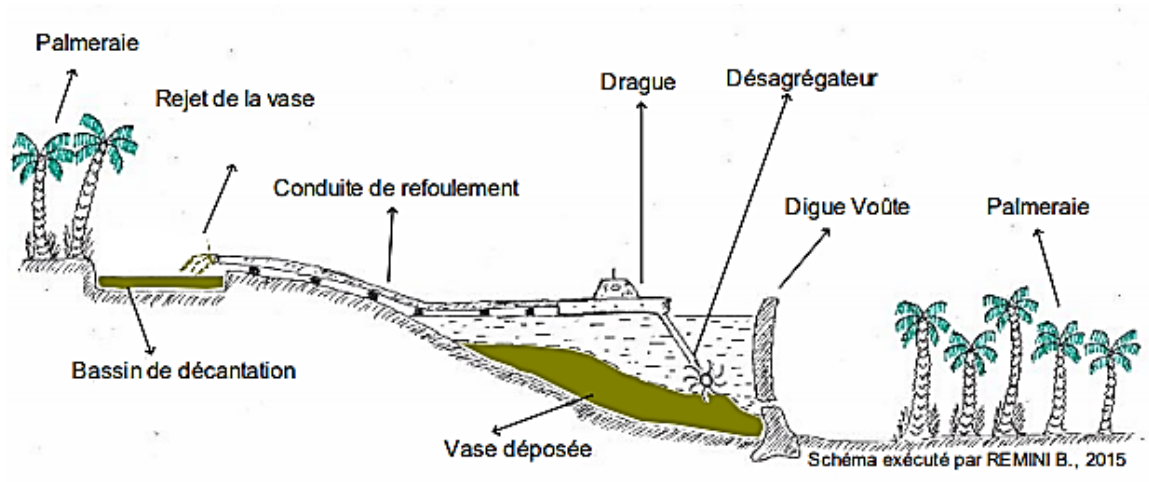


Figure 1.12: Schéma synoptique d'une opération de dragage dans un barrage (Schéma Remini, 2015) [60].

Le dragage des retenues de barrages a été pratiqué environ sur huit barrages algériens s'agit des barrages de Sig, Cheurfas I, Hamiz, Ksob, Zardezas, Merdja Sidi Abed, Fergoug. Un exemple d'une opération de dragage réussie, était enregistré au niveau du barrage de Foug El Gherza, en 2005, dans une durée de 24 mois pour évacuer 4 millions de m³ (Figure 1.13) [45].



Figure 1. 13: Rejet de la vase lors de l'opération de dragage de 2005-2006

1.5. Conclusion

Au terme de ce chapitre nous pouvons conclure que la connaissance des processus érosion et transport solide est primordiale pour la gestion de la sédimentation dans les retenus de barrage. Par ailleurs, les systèmes d'informations géographiques sont bien adaptés pour la modélisation de ces phénomènes.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DU CADRE D'ÉTUDE : BASSIN VERSANT DU HAUT ET DU MOYEN CHELIFF

2.1. Introduction

Ce chapitre sera consacré à la présentation de la zone d'étude, qui s'articule autour des saillants suivants :

- situation et découpage administratif décrivant l'ensemble des sous bassins, faisant partie de notre région,
- étude hydrologique détaillée du bassin,
- réseau hydrographique, évapotranspiration. géologie, et climat.

Aussi, une partie concernant la mobilisation des eaux superficielles sur l'ensemble du bassin sera présentée. Dans cette dernière, nous analyserons, particulièrement l'état d'envasement des six barrages étudiés.

2.2. Situation géographique et organisation administrative

Le bassin versant du Chélif (code 01 au répertoire de l'agence nationale des ressources hydriques « ANRH ») est situé à 120Km à l'Ouest d'Alger. Il apparaît sous forme d'une dépression intra-montagneuse de 500 Km de long et de 30 à 80 Km de large avec une superficie de 43750 Km². Il représente plus de 77 % de la superficie totale du bassin Cheliff-Zahrez. Ce dernier représente plus de 22% de la superficie de l'Algérie du Nord. Cette région hydrographique est découpée en trois grands sous bassins versants, le Cheliff, le Zahrez et le côtier Dahra [8].

Le bassin du Cheliff est compartimenté également, en trois sous bassins versants, comme illustré sur la Figure 2.1 : le bassin du Cheliff à l'amont du barrage de Boughzoul, le bassin du bas Cheliff et de la Mina, et enfin le bassin du haut et du moyen Cheliff qui correspond à notre zone d'étude. Géographiquement, il est localisée entre les longitudes, 1° et 3°90' à l'Est et les latitudes, 35° et 36°50' au Nord, sa superficie est d'environ 10701 Km² [7].

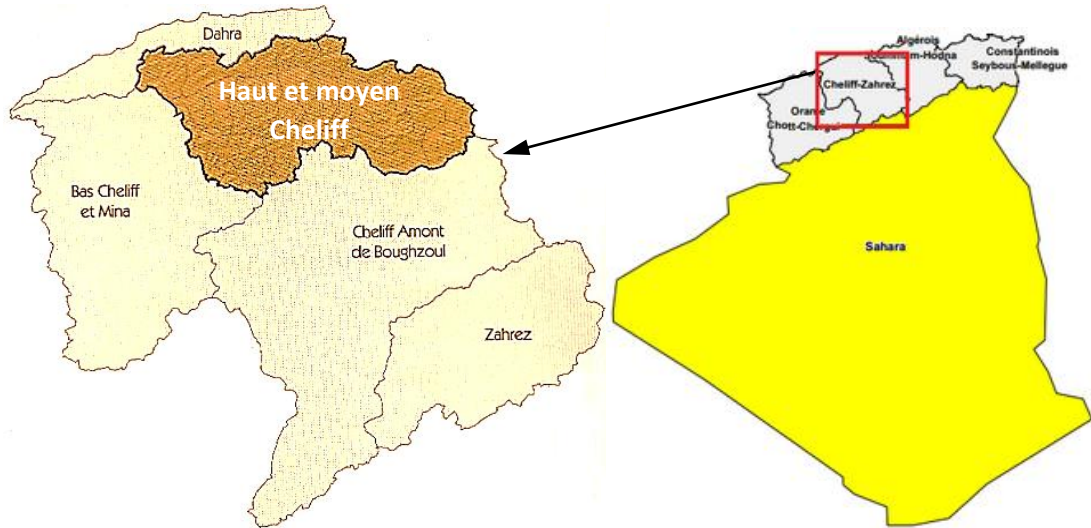


Figure 2. 1 : Situation géographique du bassin haut et moyen Cheliff.

Sur le plan administratif (Figure 2.2), Le bassin versant du haut et du moyen Cheliff couvre 93 communes de 5 wilayas : 22 communes de la wilaya de Médéa, 31 communes de la wilaya d’Ain Defla, 22 communes de la wilaya de Chlef, 16 communes de la wilaya de Tissemsilt et 02 communes de la wilaya de Relizane [8].

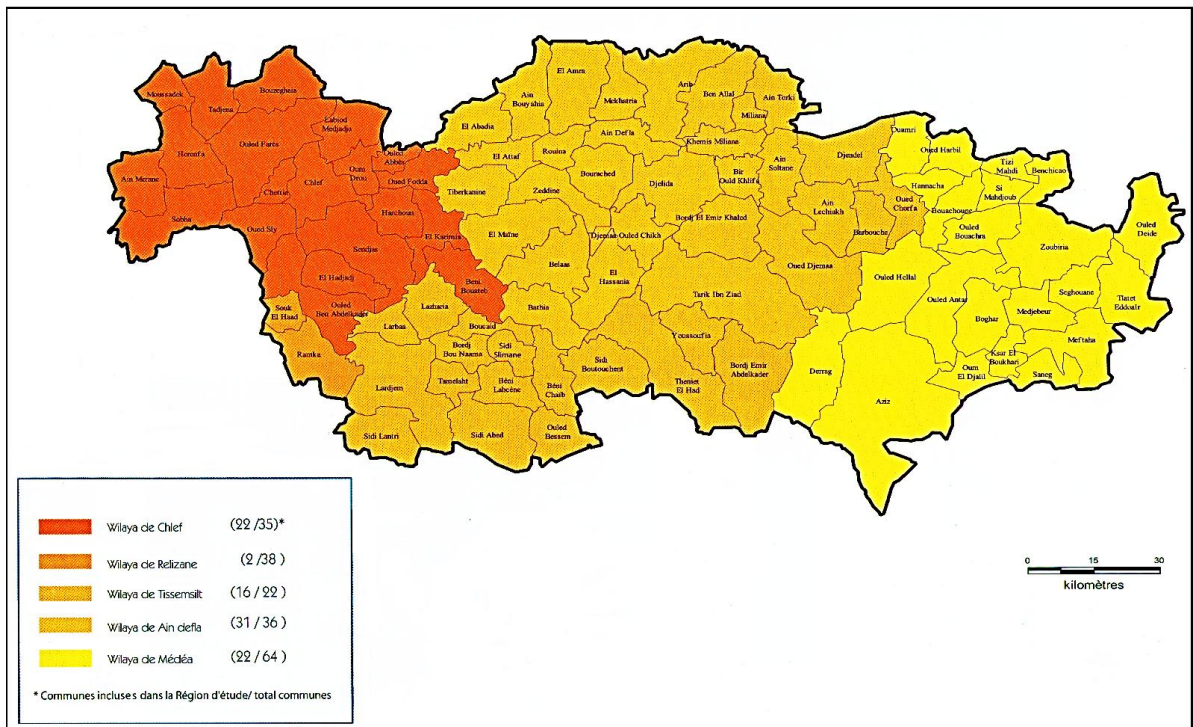


Figure 2. 2 : Découpage administratif [8]

Notre région d'étude regroupe en tout onze sous bassins versants. Chaque sous bassin peut être décrit par un code bien spécifié (Figure 2.3). Il est caractérisé par un relief très diversifié (Figure 2.4). Au Sud et à l'Est, sont identifiées des montagnes marquées par de grandes altitudes qui peuvent atteindre 1946.9 m, avec des pentes à forte dénivellation. Du nord-Est jusqu'au centre du bassin versant c'est des vallées, caractérisées par des faibles altitudes et des pentes douces.

De l'Est à Ouest de notre zone d'étude, trois plaines formant les principales parties de la vallée du Chélif sont distinguées [8] :

- La plaine de'El Khemis ; située dans le haut Chélif.
- La plaine d'El Abadia ; située dans le moyen Chelif oriental.
- La plaine de Chlef- Boukadir ; située dans le moyen Chelif occidental.

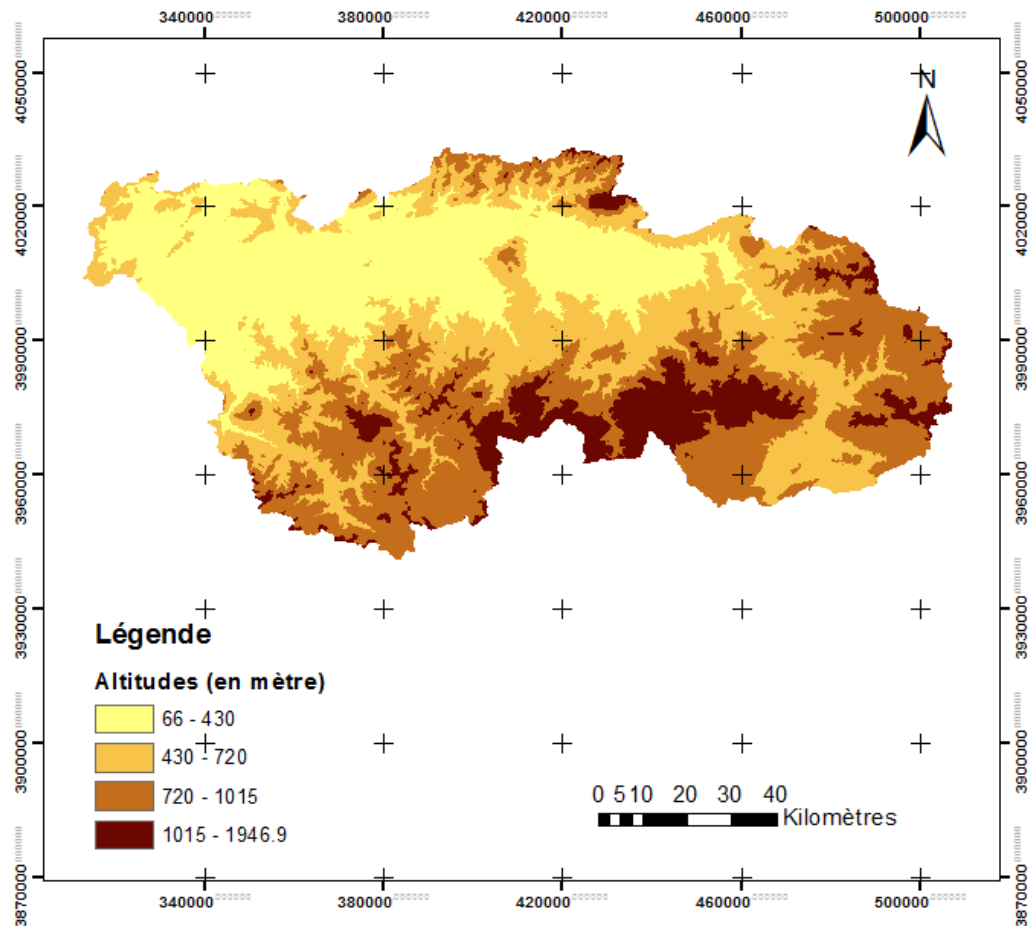


Figure 2. 3 : Carte altimétrique de la zone d'étude.

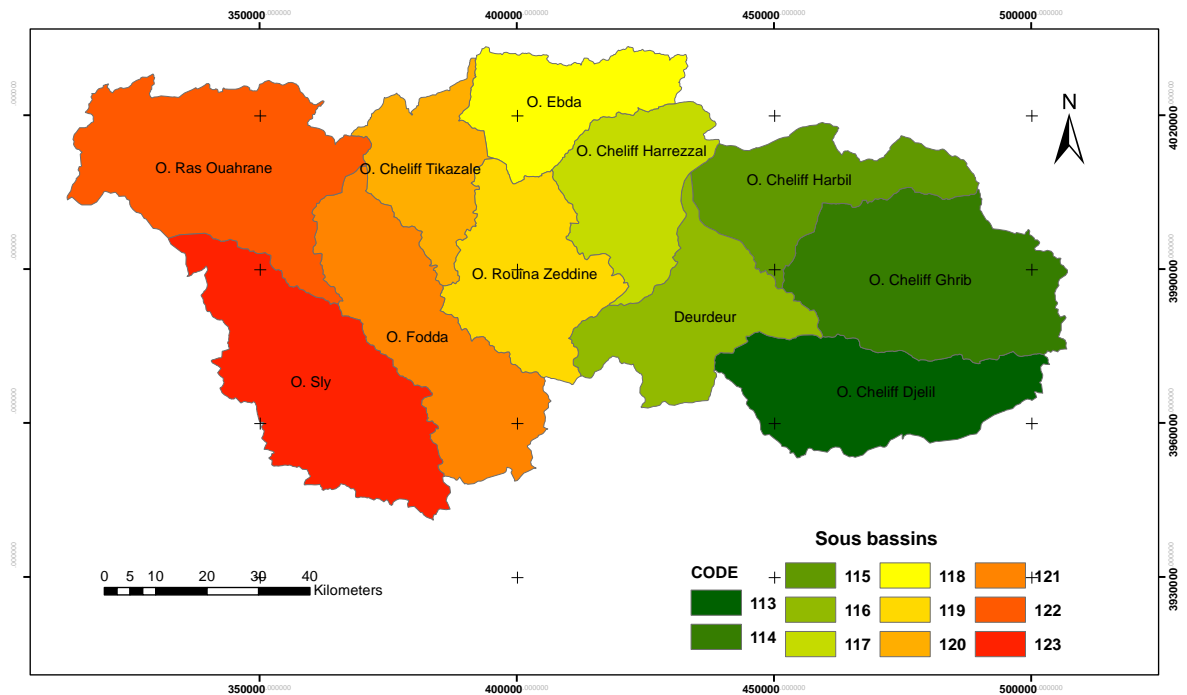


Figure 2. 4 : Carte des sous bassins du haut et du moyen Cheliff.

2.3. Caractéristiques physiographiques

Les hydrologues ont proposé une gamme d'indices et de paramètres simples qui permettent de comparer les caractéristiques morphométriques des bassins versants. Ces paramètres sont étudiés dans les paragraphes suivants :

2.3.1. Caractéristiques géométriques

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface [61]. Il est donc tout à fait logique que ce paramètre soit le premier à rechercher. Le périmètre est la longueur, généralement exprimée en km, de la ligne de contour du bassin. Ces deux facteurs sont estimés en utilisant les logiciels ArcGis™ [62] et Global mapper [63] après délimitation du bassin sur Google Earth. Notre zone d'étude délimitée couvre une superficie de 10701 km² pour un périmètre de 658.7 km.

2.3.2. Caractéristiques du relief

2.3.2.1. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique (Figure 2.5) permet de caractériser la nature du relief et fournit une vue synthétique de la pente du bassin. Elle représente la répartition des différentes altitudes en fonction des pourcentages des surfaces partielles du bassin. Ces deux paramètres (altitudes et surfaces) sont déterminés suite à l'élaboration de la carte hypsométrique (Figure 2.6) sur Arcgis™.

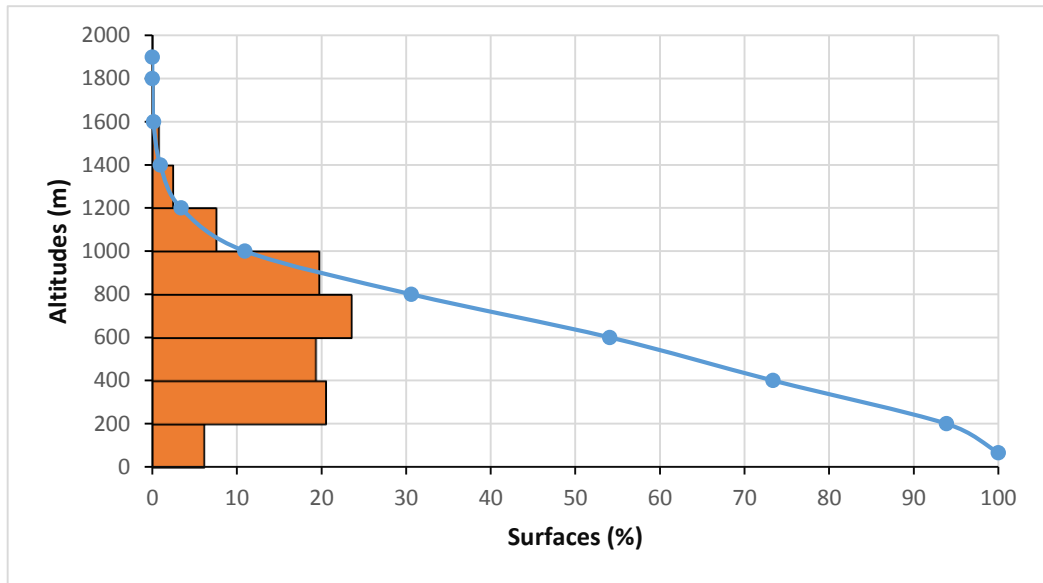


Figure 2.5 : Courbe hypsométrique de la zone d'étude.

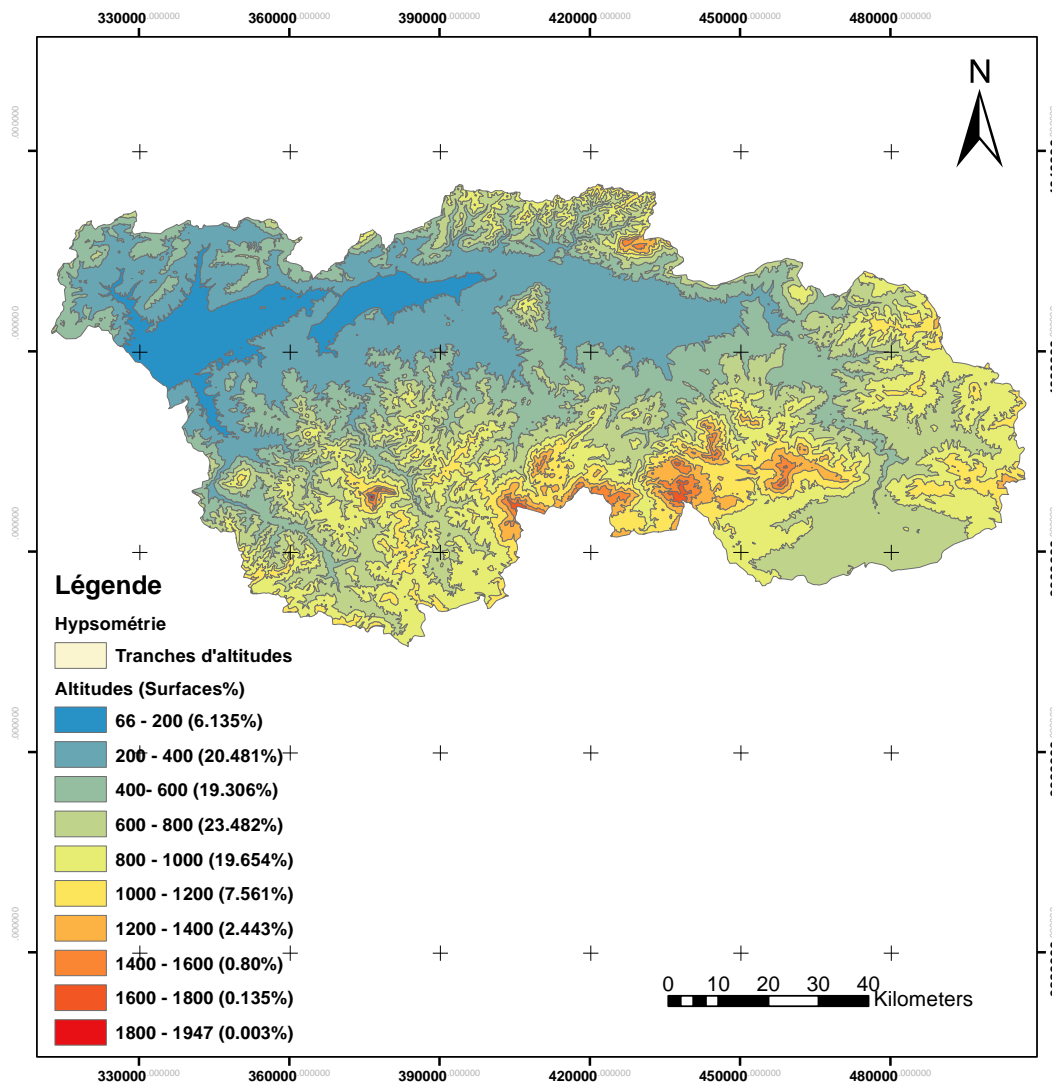


Figure 2.6 : Carte hypsométrique du haut et du moyen Chelif.

❖ Interprétation de la courbe hypsométrique

La courbes hypsométriques traduisent la répartition des altitudes à l'intérieur du bassin versant et permettent, en outre, de déterminer les altitudes caractéristiques suivantes :

A. Altitudes maximales et minimales

L'altitude maximale représente le point culminant du bassin, elle est estimée à environ 1947m. Cependant, l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire, elle est égale à 66m. Ces deux données déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

B. Altitude moyenne

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique. Elle s'obtient également par la relation suivante :

$$H_{moy} = \sum \frac{a_i * h_i}{A} \quad (2.1)$$

Avec :

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

a_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²] ;

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

A : superficie totale du bassin versant [km²].

L'équation (2) peut s'écrire sous la forme :

$$H_{moy} = \frac{1}{A} \sum a_i \frac{(h_i + h_{i+1})}{2} \quad (2.2)$$

L'altitude moyenne calculée pour notre bassin est estimée à : $H_{moy} = 628,9$ m.

C. Altitude médiane

Elle correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50 % de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Pour notre cas elle est estimée à 650 m.

2.3.3. Caractéristiques de forme

La dimension et la forme d'un bassin versant n'ont pas une influence essentielle sur la moyenne à long terme des écoulements mais elles sont très importantes pour les crues et la répartition des débits au cours de l'année. Ces caractéristiques sont définies essentiellement par quatre indices :

- Indice de compacité (coefficient de Gravelius)
- Rectangle équivalent

- Indice de forme de Horton
- Les indices de pente

2.3.3.1. Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité de GRAVELIUS représente le rapport entre le périmètre stylisé du bassin à celui d'un cercle de même surface. Il nous renseigne sur la forme du bassin et sur la vitesse de concentration des eaux à l'exutoire. Il est donné par la formule suivante :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2.3)$$

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

Si: 1.5 < K_G < 1.8 ⇒ le bassin est de forme allongée.

1.0 < K_G < 1.15 ⇒ le bassin est de forme ramassée.

L'indice de compacité de Gravelius a ainsi été évalué à K_G = 1,783 > 1.5. Notre bassin versant est donc plutôt, de forme allongée favorisant un écoulement lent des eaux de ruissellement.

2.3.3.2. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent est une représentation géométrique du contour du bassin versant transformé en rectangle de même surface, de même indice de compacité, de même courbe de fréquence altimétrique et de mêmes conditions d'écoulements. Les dimensions (Longueur L et largeur l) du rectangle équivalent sont évaluées à l'aide des équations suivantes :

$$L = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] \quad (2.4)$$

$$l = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] \quad (2.5)$$

avec :

L : La longueur du rectangle équivalent [Km] ;

l : La largeur du rectangle équivalent [Km].

A : surfaces du bassin versant [Km²] ;

K_G : Indice de compacité.

Le rectangle équivalent (Figure 2.7) de notre zone d'étude est tracé sur Excel en utilisant les pourcentages des différentes surfaces correspondantes aux écartements entre les courbes de niveau.

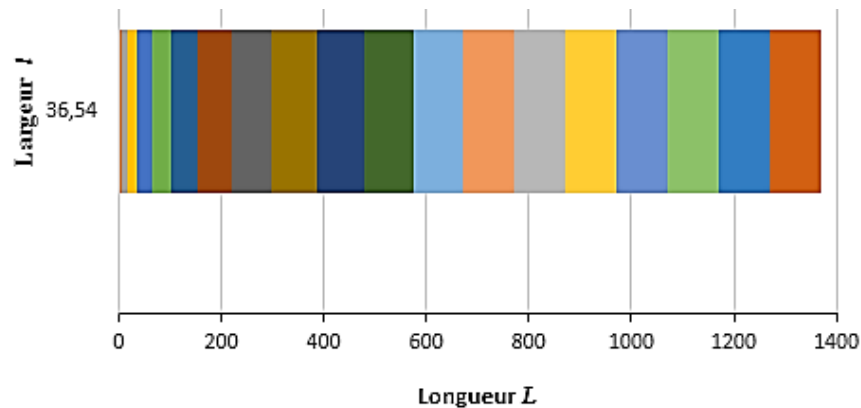


Figure 2. 7 : Rectangle équivalent du bassin versant haut et moyen Cheliff.

2.3.3.3. Indice de forme de Horton

Il exprime le rapport de la surface du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal. Il est défini par la relation suivante :

$$K_H = \frac{A}{L^2} \quad (2.6)$$

où :

A : surface du bassin versant (Km²),

L : longueur du cours d'eau principal (km),

K_H : indice d' Horton sans dimension.

Si : $K_H < 1 \Rightarrow$ bassin de forme allongée

$K_H > 1 \Rightarrow$ bassin de forme ramassée.

Notre zone d'étude est drainée par l'oued cheliff, sur une longueur de: 946.9 km. L'indice d'Horton est évalué alors, à 0.012. Ce qui traduit la forme allongée du bassin haut et moyen cheliff.

2.3.3.4. Les Indices de pente

A. Indice de pente moyenne

Le calcul de la pente moyenne ne tient pas compte de la forme de la courbe hypsométrique. C'est le facteur moteur qui détermine la vitesse avec laquelle l'eau va s'écouler jusqu'à l'exutoire. Il est donné par la relation suivante :

$$i_{moy} = \frac{D * \sum l}{A} \quad (2.7)$$

i_{moy} : pente moyenne, [m/km ou %]

$\sum l$: longueur totale des courbes de niveau [km].

D : équidistance des courbes de niveau, [m]

A : superficie du bassin, [km²]

La valeur obtenue pour notre bassin est de : $i_m = 15,46 \%$

B. Indice de pente de Roche

M. Roche a proposé un indice de pente plus facile à calculer que le précédent. Il caractérise la pente globale du bassin versant et se calcul comme suit :

$$I_p = L^{-\frac{1}{2}} \sum_n^1 \sqrt{a_i \cdot d_i} \quad (2.8)$$

où :

L: longueur du rectangle équivalent,

a_i : représente la fraction en % de la surface A comprise entre deux courbes de niveau voisines distantes de d_i

C. Indice de pente global

Cet indice permet de déduire la nature du relief en se référant à la classification de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer (O.R.S.T.O.M.) illustrée sur le tableau 2.1 suivant :

Tableau 2. 1 : Classement ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global

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	$I_g > 0.1$

Il est définie par :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (2.9)$$

D : la dénivelée : $D = h_{5\%} - h_{95\%}$ définie sur la courbe hypsométrique

L : la longueur du rectangle équivalent.

Ce qui donne : $I_g = 3,039\%$. En se référant à la classification donnée sur le tableau ci-dessus, on déduit que cet indice correspond à un relief assez fort.

D/. Dénivelée spécifique

Elle est définie comme suit :

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{A} \quad (2.10)$$

$$\Rightarrow D_s = \frac{D}{L} \sqrt{L * l} = D \sqrt{\frac{l}{L}} \quad (2.11)$$

Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M., indépendante des surfaces des bassins, comme illustrée sur le Tableau 2.2 ci-après.

Tableau 2. 2 : Classement ORSTOM du relief à partir de la dénivelée spécifique

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

La valeur calculée est de : $Ds = 304,13$ m, ce qui traduit un relief fort.

Les caractéristiques morphométriques du bassin haut et moyen cheliff sont résumées sur le tableau 2.3 ci-après :

Tableau 2. 3 : Caractéristiques physiographiques de la zone d'étude.

Superficie (km ²)	10701	-
Périmètre (km)	658,7	-
Indice de compacité KG	1,783	le bassin est de forme allongée favorisant un écoulement lent des eaux de ruissellement.
Altitude maximale (m)	1946.9	Point culminant du bassin.
Altitude moyenne (m)	628,9	Déterminée après génération des courbes de niveau sur Global Mapper et extraction des différentes surfaces correspondantes.
Altitude minimale (m)	66	Exutoire du bassin versant.
Longueur du rectangle équivalent (km)	292,82	-
Largeur du rectangle équivalent (km)	36,54	-
Pente moyenne en %	15,46	-
Dénivelée spécifique (m)	15,46	Relief fort

2.4. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Le réseau hydrographique est une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Il se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement [64].

Notre zone d'étude est caractérisée par un chevelu hydrographique très dense (Figure 2.8), avec un réseau de l'ordre de 2200 Km d'oueds permanents et de 5600 Km d'oueds temporaires. Le cours d'eau principal traversant la région, est le Cheliff [8]. La densité de drainage varie entre 0.57 et 1.54 km/km². Les faibles valeurs caractérisent les terrains à faibles pentes, qui sont surtout localisées au niveau des hautes plaines. Ce qui se traduit par de faibles précipitations et une perméabilité non négligeable des structures lithologiques.

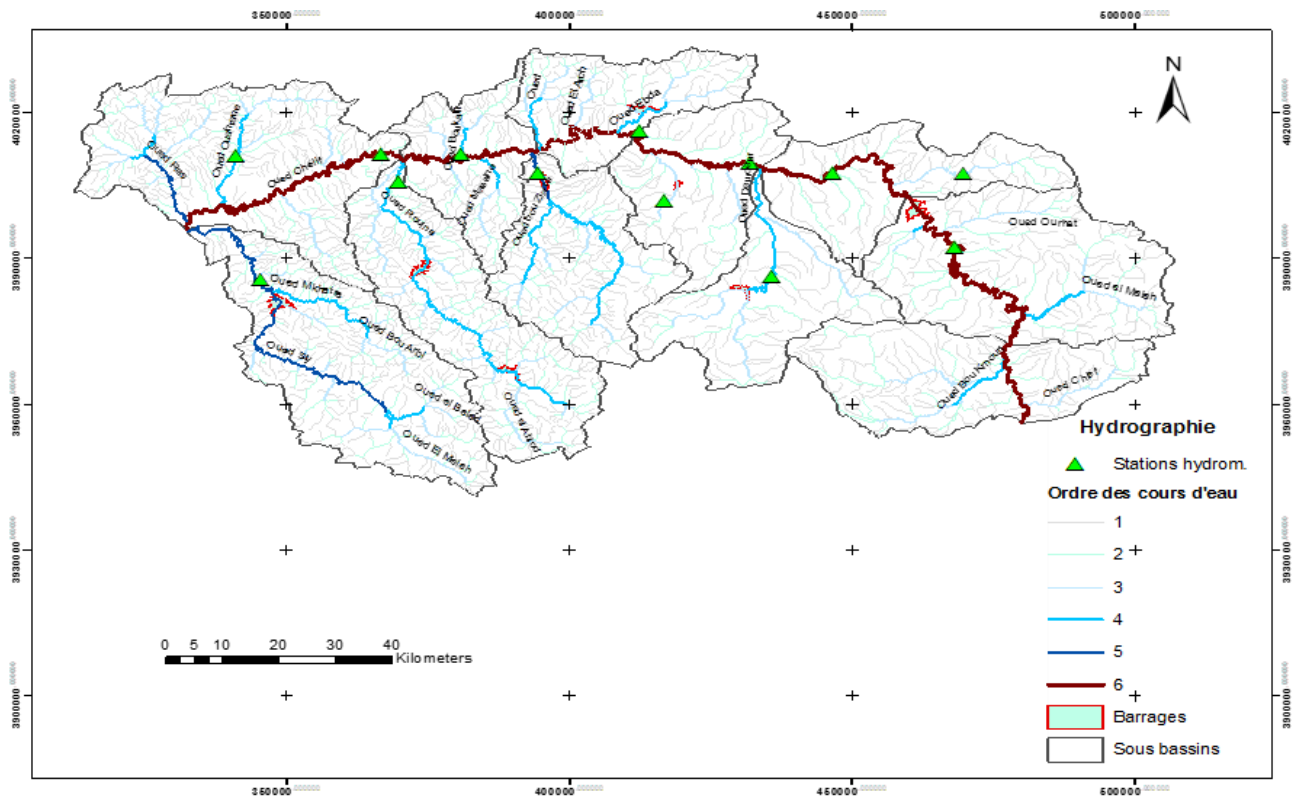


Figure 2. 8 : Classification du réseau hydrographique selon Strahler.

2.5. CADRE GEOLOGIQUE

Les bassins sublittoraux de l'Algérie centro-occidentale s'alignent parallèlement à la côte méditerranéenne, formant des zones peu élevées par rapport aux chaînes secondaires plissées qui les encadrent. Ce sont des bassins néogènes dont l'histoire est étroitement liée aux phases ultimes est paroxysmales de l'orogénèse

alpine [65]. Ce sont des bassins néogènes dont l'histoire est étroitement liée aux phases ultimes et paroxysmales de l'orogénèse alpine. Du point de vue structural ces bassins forment des sillons complexes plus ou moins continus s'allongeant suivant une direction générale WSW-ENE, entre les massifs secondaires plissés qui peuvent être assimilés en première approximation à des aires anticlinales majeures [66]. Le bassin du Chélif qui évolue dans ce milieu est un bassin subsident de type intra-montagneux fonctionnant en graben le long de grandes flexures bordières [65]. Il est caractérisé par une géologie complexe. Les plaines de la vallée de ce bassin (plaine d'El Khemis au haut Chélif, plaine d'oued Fodda et oued Rhiou au moyen Chélif) qui sont traversées par l'oued Chélif sont constituées par une importante sédimentation Néogène et quaternaire de forte épaisseur, due à l'érosion des reliefs et des transgressions successives. Les ensembles lithologiques rencontrés dans la plaine sont les terrains néogènes et quaternaires (Figure. 2.9); le substratum, essentiellement secondaire sur les bordures du par: les monts de l'Ouarsenis au sud, du Dahra au nord et par les massifs épimétamorphiques à schistosités du Doui et du Temoulga à l'est [66]. Dans la zone centrale du bassin, affleurent en boutonnière des terrains d'âge Siluro-dévonien et liasique [67] : il s'agit des Massif de Doui, Rouina et Temoulga. Le Doui sépare le bassin du bas Cheliff à l'Ouest, du Moyen Chélif à l'Est.

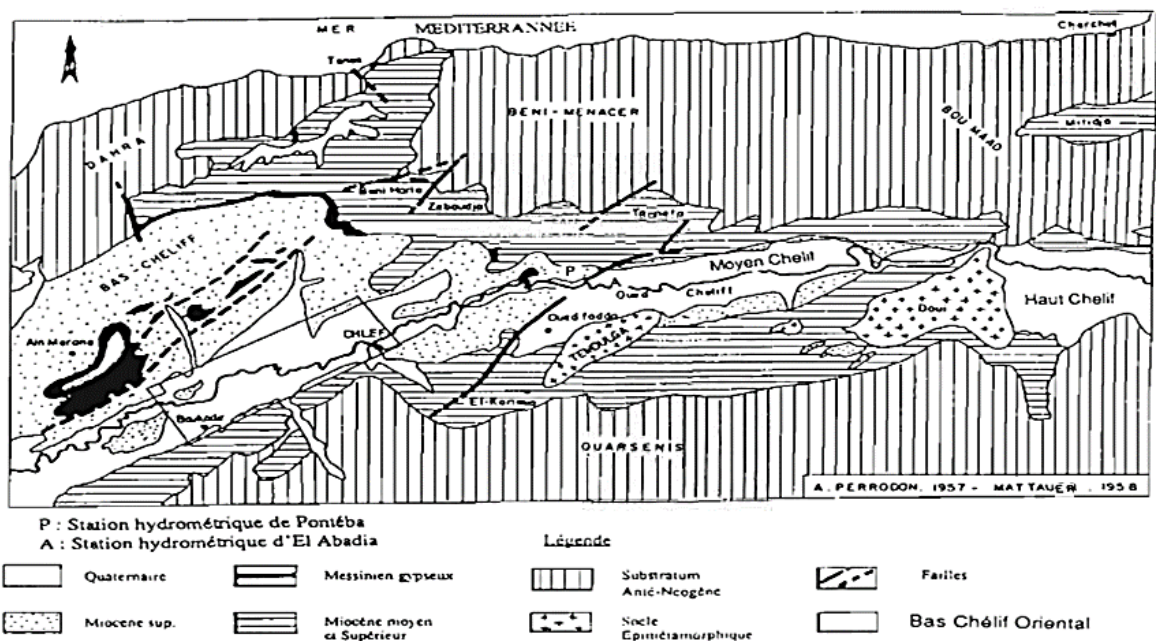


Figure 2. 9 : Cadre géographique et géologique de la plaine du Chélif [66].

Dans la série stratigraphique de la plaine alluviale du haut et moyen Cheliff, ce sont les formations Plio-Quaternaire qui forment le remplissage le plus important de la vallée du Cheliff et constituent l'aquifère le plus sollicité. La variation lithologique et le jeu des fractures font de ces formations un aquifère multicouches avec des intercalations argileuses plus ou moins épaisses. Le substratum est formé par les marnes bleues du Miocène supérieur et du Pliocène qui affleurent sur les bordures Nord et Sud de la plaine [68].

2.6. CLIMAT DE LA REGION D'ETUDE

Le Haut et Moyen Chélif est caractérisé par des étés très chaudes et des hivers tièdes et ce malgré la proximité de la mer (climat semi-aride de type méditerranés). Les précipitations se caractérisent par une irrégularité interannuelle [8].

Ce bassin est équipé de 67 postes pluviométriques (Figure 2.10) soit une densité d'un poste pour 208 km². 61 postes sont en service et 6 sont actuellement à l'arrêt [8]. En plus de l'hétérogénéité des séries d'observation, le réseau pluviométrique est inégalement réparti et donc, la densité de couverture en informations pluviométriques est très inégale [69].

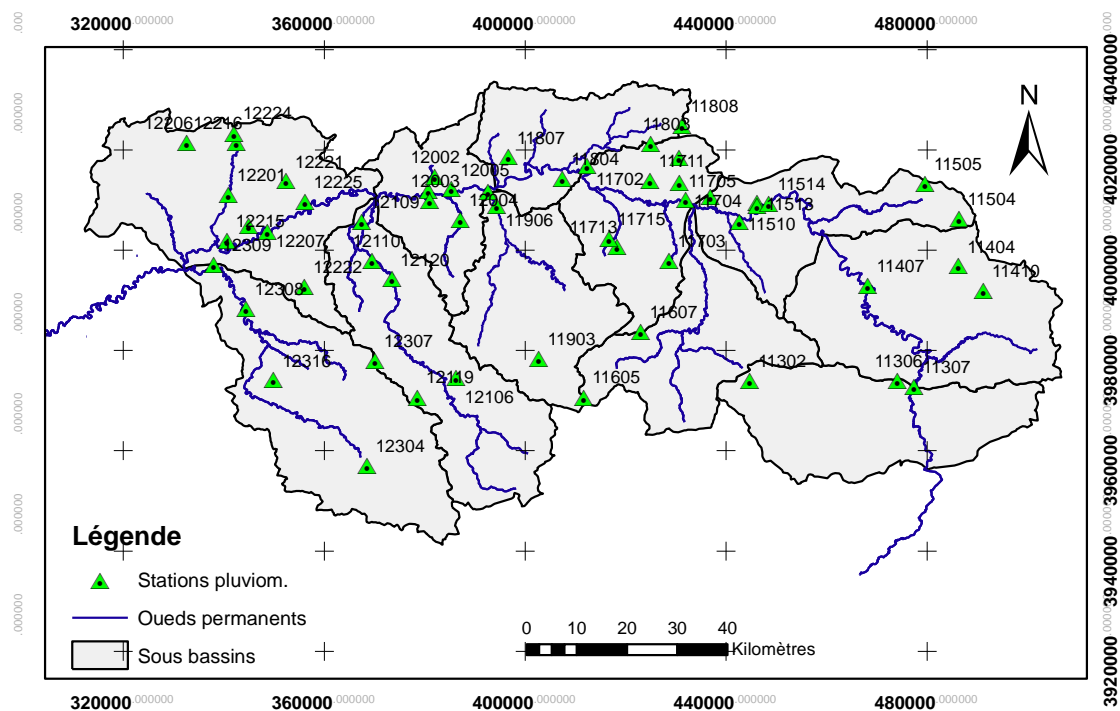


Figure 2. 10 : Carte des postes pluviométriques.

La pluviométrie moyenne interannuelle dans le bassin varie de 227 à 700mm (Figure 2.11), elle est concentrée sur les versants sud des monts de Dahra et du Zaccar, avec une moyenne interannuelle maximale de 700mm, dans la station de SIDI MIDJA commune de ben Allal (wilaya de AIN DEFLA). et plus de 600 mm enregistrées dans les deux stations, EL ANEB commune EL AMRA (wilaya de AIN DEFLA) et Médéa au sud de l' ATAF BLIDEEN. Dans la station de vallée du Cheliff, les précipitations diminuent et varient entre 300 et 400mm. Une moyenne interannuelle minimale de 227mm est enregistrée dans la station de Sidi Slimane, de la wilaya de TISSEMSILT [8].

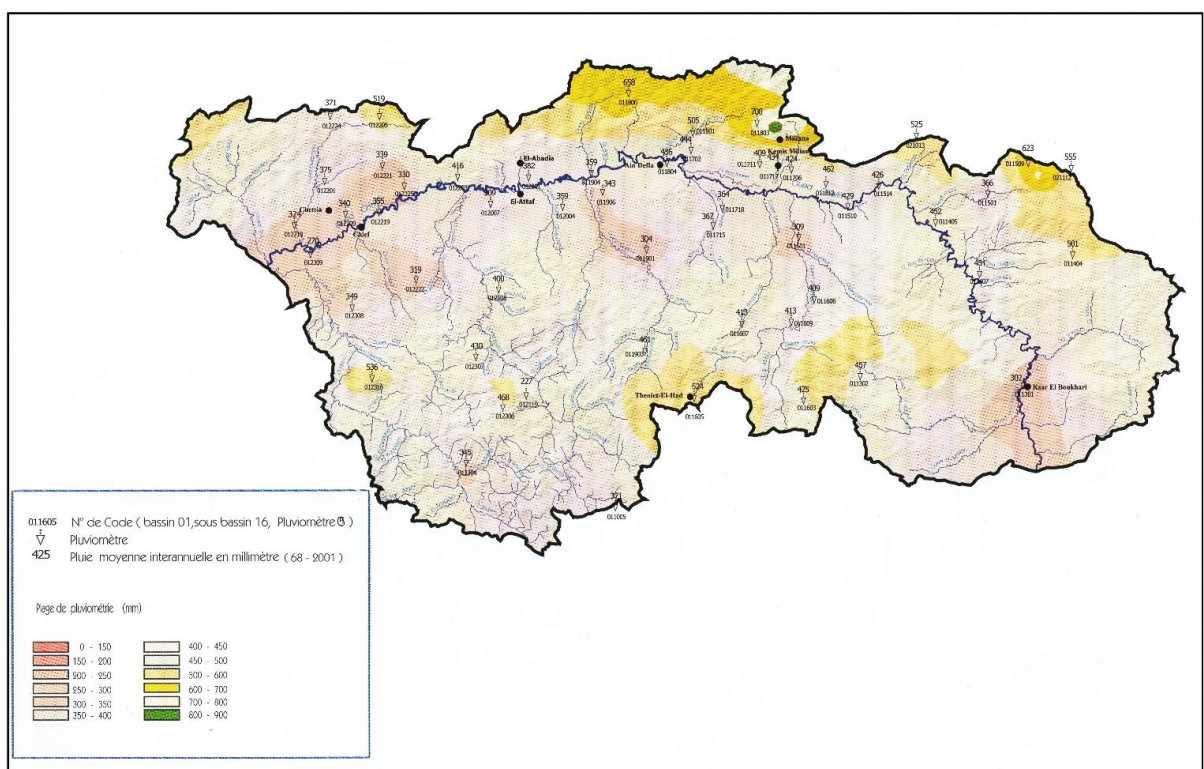


Figure 2. 11 : Carte des précipitations du haut et moyen Cheliff [8].

2.7. EVAPOTRANSPIRATION

De fortes valeurs d'évapotranspiration sont observées dans les vallées du haut et moyen Cheliff. La valeur maximale enregistrée dans la station d'Ain Defla est de 1570 mm. Cependant, les faibles valeurs sont observées dans les stations de Teniet el Had et Miliana, situées dans les piémonts du haut et moyen Cheliff. Le potentiel total annuel de l'évapotranspiration varie de 1200 à 1600 mm, soit plus du double du total de la pluviométrie. En saison froide l'ETP mensuelle décroît progressivement jusqu'à atteindre des valeurs inférieures à celles des précipitations. Par ailleurs, elles sont fortement supérieures durant la saison chaude [8].

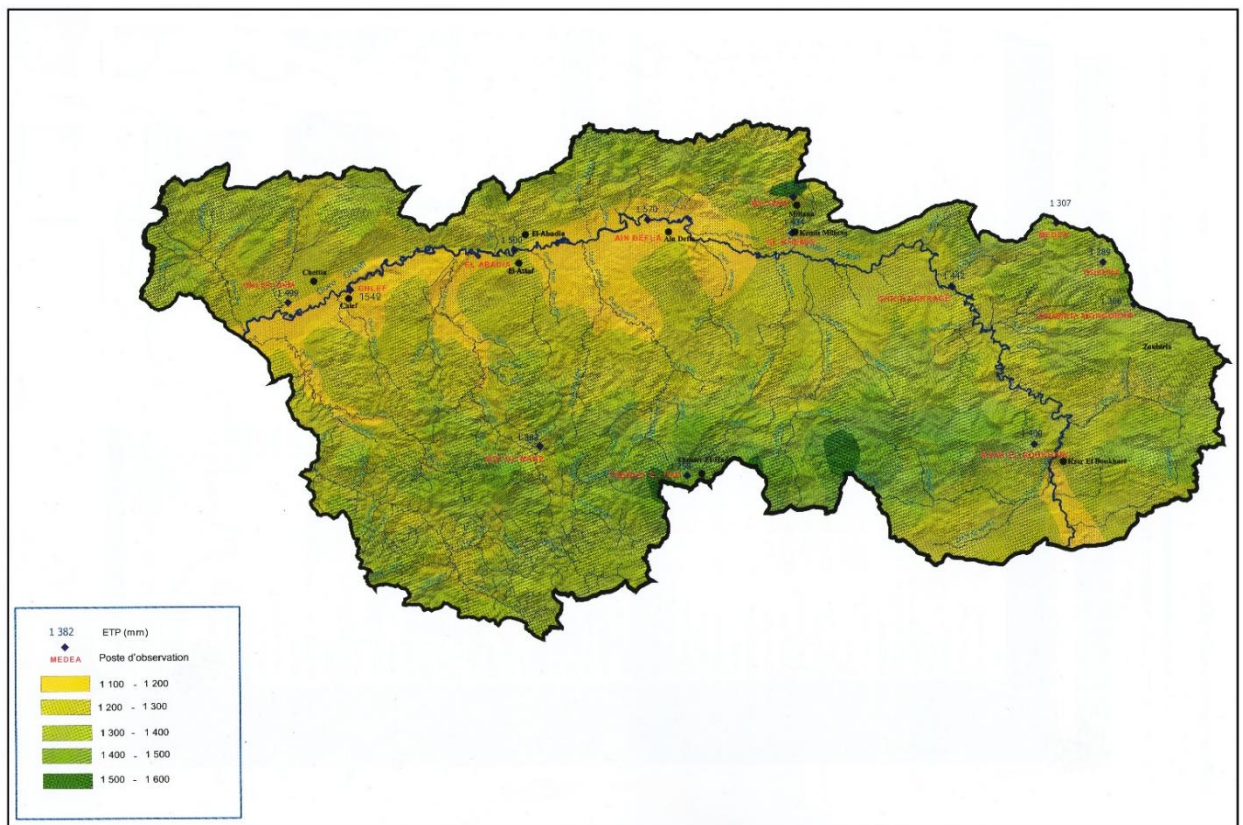


Figure 2.12 : Carte de l'évapotranspiration du haut et moyen Cheliff [8].

2.8. Mobilisation des eaux superficielles

2.8.1. Principaux barrages étudiés

Le haut et le moyen chelif compte actuellement, 09 barrages et 21 stations hydrométriques dont 12 sont hors service. Les principaux barrages étudiés, sont au nombre de six (Figure 2.13) :

- Barrage Sid Yacoub
- Barrage Oued Fodda
- Barrage Harraza
- Barrage Deurdeur
- Barrage Ghrib
- Barrage de Sidi m'Hamed Ben Taïba (SMBT)

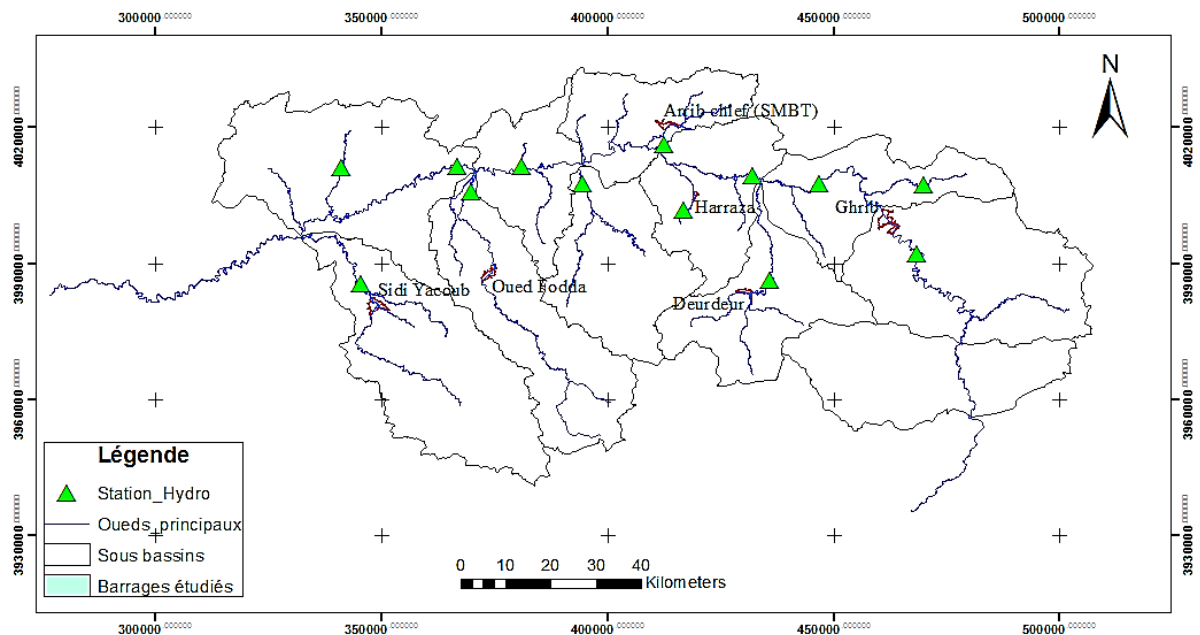


Figure 2. 13 : Répartition des principaux barrages étudiés.

2.8.1.1. Barrage de Sid Yacoub

Le barrage de Sidi Yacoub est situé sur l'Oued Ardjem à 20 kilomètres au Sud de la ville d'Oued Fodda dans la Wilaya de Chlef. Il est implanté dans les gorges de l'oued Ardjem qui est l'un des principaux affluents de la rive gauche de l'oued Cheliff. Il est mis en service 1985 avec une capacité initiale de 280 hm³.

Ce barrage est destiné principalement [70] :

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



Figure 2.14 : Retenue du barrage de Sidi Yacoub (Photo : S. Benkaci, Aout 2017).

Le barrage de Sidi Yacoub est soumis à un envasement (Figure 2.15) qui fait diminuer sa capacité initiale. Cet envasement rapide de la retenue provient essentiellement, de la nature des caractéristiques de son bassin versant. En effet, la perte de capacité moyenne annuelle évaluée durant les 18 dernières années (1986-2004) est de $1.79 \text{ Hm}^3/\text{an}$. Ce qui est équivalent à un taux d'envasement d'environ 11.28% [70].



Figure 2.15 : Dépôt de vase à l'embouchure de la retenue du barrage de Sidi Yacoub (Photo: S. Benkaci, Aout 2017).

2.8.1.2. Barrage Oued Fodda

Le barrage de l'Oued Fodda (Figure 2.16) est considéré comme étant l'un des premiers grands barrages construits en Algérie. Il est destiné à l'irrigation du périmètre du Moyen Cheliff [8]. Ce barrage capte annuellement un volume de vase de 3,2 millions de m^3 (Figure 2.17) [9].



Figure 2.16 : Retenue du barrage oued Fodda (Photo : S. Benkaci, Aout2017)



Figure 2.17: Dépôt de vase à l'embouchure du barrage d'oued Fodda (Photo : S. Benkaci, Aout 2017).

Les derniers levés bathymétriques ont été effectués en 2004 par l'Entreprise HYDRODRAGAGE-C.T.SYSTEMS, dans l'objectif, d'actualiser la capacité de stockage des retenues et la surveillance de leurs envasements ainsi que leurs délimitation à la cote des plus hautes eaux exceptionnelles (PHE) [71]. Cette dernière a été estimée à une altitude de 374 m et la cote de la retenue normale (RN) est fixée à 370.5 m [71].

2.8.1.3. Barrage Harraza

Ce barrage est implanté sur l'oued Harreza dans la commune de Djélida, à environ 14 Km de la ville de Ain Defla. C'est un réservoir de régulation et de compensation des eaux de l'oued Cheliff lors des épisodes pluvieux et des lâchées du barrage

Ghrib. Il permet de stocker, en plus de ses apports propres, les débits dérivés de la rive gauche de l'oued Cheliff, et d'autre part, il est destiné à renforcer l'irrigation du périmètre du Haut Cheliff avec un volume affecté annuellement de l'ordre de 23 hm³, dont il est rempli en majeure partie par pompage hivernal des eaux du Cheliff à partir de la station de pompage Khemis II [72].



Figure 2.18 : Retenue du barrage Harraza [73].

Le barrage de Harreza est considéré comme étant le barrage le moins envasé au niveau du bassin haut et moyen. Le taux d'érosion spécifique du barrage estimé à 470 t/km².an pour une surface du bassin versant de 142 km² a permis de déduire que le volume de vase dans la retenue est de l'ordre de 0,85 millions de m³ en 2007 [74].

2.8.1.4. Barrage Deurdeur

Le barrage de Deurdeur (Figure 2.19) est situé à 30 kms au sud de la ville d'El-Khémis (Wilaya d'Aïn Defla). Il a été mis en eau en septembre 1984. Il est destiné pour l'alimentation en Eau Potable de Tissemsilt et pour l'irrigation du périmètre Haut Cheliff avec une capacité de 115 millions de m³. Il permet essentiellement, de stocker les eaux de l'Oued Zemmour affluent de l'oued Cheliff [75].



Figure 2. 19: Retenue du barrage DeurDeur [75] .

Théoriquement, en 2028, et sur la base d'un apport annuel de 2.69 Mm^3 observé en 2001 avec un délai de service calculé pour une durée d'exploitation de moins de 30 ans, la vase devrait avoir atteint le niveau normal de la retenue du barrage Deurdeur, qui sera donc complètement envasée, si une protection n'est pas mise en place [76].

2.8.1.5. Barrage Ghrib

Le barrage Ghrib (Figure 2.20) est situé dans la commune de oued-Chorfa et implanté sur l'oued Chélif à 20 kilomètres au Sud-Ouest de la ville de Ain-Defla. Il a été mis en service en 1939 avec une capacité initiale de 280 hm^3 . Il retient les eaux de l'oued Cheliff [77], et permet de fournir de l'eau indifféremment à chacun des trois périmètres : haut Chélif, moyen Chélif, bas Chélif.

C'est une importante réserve d'eau destiné à l'irrigation, l'AEP et le transfert vers le barrage de Bouroumi et à l'alimentation en eau potable de la ville de Médéa, de Berrouaghia et de la commune d'oued Chorfa [72].



Figure 2.20 : Barrage Ghrib (Photo : S. Benkaci, Aout 2017).

En se référant au rapport des derniers levés bathymétriques, la Perte de capacité moyenne annuelle des 18 dernières années est de 2.79 Hm³/An et le taux d'envasement du barrage est évalué à 58.81% [77].

2.8.1.6. Barrage de Sidi m'Hamed Ben Taïba (SMBT)

Le barrage de SMBT (Figure 2.21) est implanté sur l'oued Ebda, à 150km d'Alger dans la commune d'Arib (wilaya d'Ain Defla). Il a été mis en eau en 2005 avec une capacité de 75 hm³ et un volume annuel régularisable de 56 Mm³, pour assurer un double objectif [78].

- satisfaire les besoins agricoles des périmètres d'El Amra et d'El Abadia d'une superficie nette de 8 500 ha (42 Mm³),
- assurer un complément d'eau potable de l'agglomération d'Ain Defla et des villes d'Arib, Khemis Miliana et Mekhatria (14 Mm³).

En considérant l'année de la mise en service du barrage, la capacité initiale a été réduite de 4.78 hm³, ce qui correspond à un pourcentage de perte de 6.37% [79].



Figure 2.21: Retenue du barrage Sidi M'hamed Ben Taiba [79].

2.8.2. Analyse de l'état d'envasement des barrages étudiés

2.8.2.1. Taux de sédimentation et perte de la capacité

La mesure de l'envasement des barrages présente un intérêt certain pour la quantification des sédiments et l'exploitation des ouvrages [80]. Son intérêt majeur réside dans le fait qu'il permet l'évaluation globale des processus érosion et transport solide. Ce taux d'envasement peut être influencé par plusieurs facteurs. La représentation des données sous forme graphique permet une comparaison plus simple et d'entrevoir si des éléments peuvent jouer un rôle majeur dans la compréhension des rythmes de sédimentation [81].

La base de données a été élaborée par le groupement d'Entreprises HYDRODRAGAGE-C.T.SYSTEMS (France) et traitées par contrat avec l'Agence Nationale des Barrages et de transfert (ANBT) en juillet 2004, dans l'objectif, d'actualiser la capacité de stockage des retenues et la surveillance de leurs envasements ainsi que la délimitation de la retenue à la cote des plus hautes eaux exceptionnelles (PHE). En premier lieu, nous avons classifié les six barrages étudiés en fonction du taux d'envasement afin d'entrevoir les barrages les plus menacés (Tableau 2.4) Le taux d'envasement est calculé alors, comme suit :

$$T = \frac{V_i - V_f}{V_i} * 100 \quad (2.12)$$

T : taux d'envasement (%),

V_i : capacité initiale de la retenue (hm³)

V_f : capacité finale de la retenue (hm³).

Tableau 2. 4 : Taux d'envasement des barrages étudiés.

Barrages	Volume initial (hm ³)	Volume final Hm ³	Période	Nombre d'année (Années)	Perte de capacité (hm ³ /an)	Taux d'envasement (%)
DEURDEUR	114.95	105.122	1985-2005	20	0.491	8.55
GHRIB	165.57	115.32	1986-2004	18	2.79	58.81
HARREZA	75.86	76.651	1984-2005	21	??	??
O.FODDA	132.80	102.85	1986-2004	18	1.66	54.29
S. YACOUB	285	252.85	1986-2004	18	1.79	11.28
SMBT	75	70.22	2005 -2014	8.5	0.56	6.37

Source : ANBT

La représentation graphique de la répartition des différents barrages étudiés, est illustrée sur la figure 2.22.

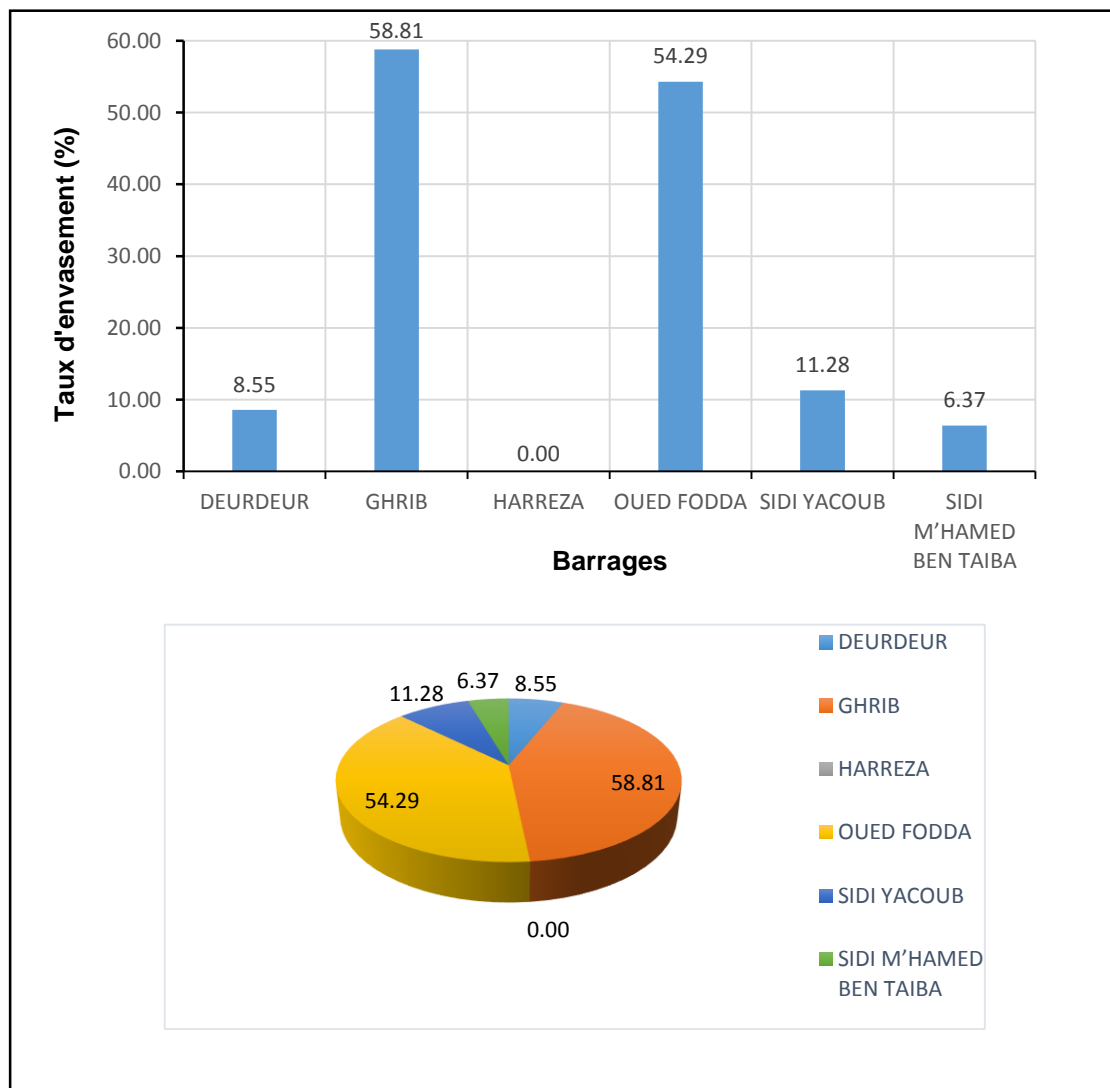


Figure 2. 22 : Répartition des barrages en fonction du taux d'envasement.

De la figure ci-dessus, il apparaît que les barrages Oued Fodda et Ghrib sont les plus envasés. Cependant, la perte de capacité et le taux d'envasement du barrage Harreza n'ont pas été calculés car les données initiales sont peu fiables [73].

Toutefois, on note que le barrage Ghrib présente une perte plus rapide que les barrages oued Fodda et Sidi Yacoub, et ce pour la même période d'observation.

2.8.3. Répartition en fonction de la superficie du bassin versant

Pour mettre en évidence les barrages où peut être constaté une vitesse de sédimentation élevée, les taux d'envasement sont ramenés à la taille du bassin versant, en tenant compte de la durée du suivi de chacun des barrages. Le taux de comblement est alors représenté en $m^3/km^2/an$ (Tableau 2.5).

Tableau 2. 5 : Taux de comblement des barrages étudiés en fonction de la surface du bassin versant.

Barrages	Superficie du B.V. (km ²)	Période	Perte de capacité (hm ³ /an)	Taux d'envasement (%)	Comblement (m ³ /km ² /an)
DEURDEUR	851	1985-2005	0.491	8.55	576.97
GHRIB	1378.6	1986-2004	2.79	58.81	2023.79
HARREZA	756.7	1984-2005	0	0	0.00
O.FODDA	1153.5	1986-2004	1.66	54.29	1439.10
S. YACOUB	1404.1	1986-2004	1.79	11.28	1274.84
SMBT	661.5	2005 -2014	0.53	0.06	801.21

Le taux de comblement est calculé comme suit :

$$T_c = \frac{\Delta V}{S} * 10^6 \quad (2.13)$$

où :

T_c : taux de comblement ($m^3/km^2/an$),

S : surface du bassin versant (km^2).

ΔV : perte de la capacité de stockage de la retenue (hm^3/an), exprimé par :

$$\Delta V = \frac{V_i - V_f}{\Delta t} \quad (2.14)$$

avec :

V_i : capacité initiale de la retenue (hm^3)

V_f : capacité finale de la retenue (hm^3).

Δt : période d'observation (années).

La Figure (2.23) suivante représente le taux de comblement des différents barrages, tenant compte de la surface du bassin versant.

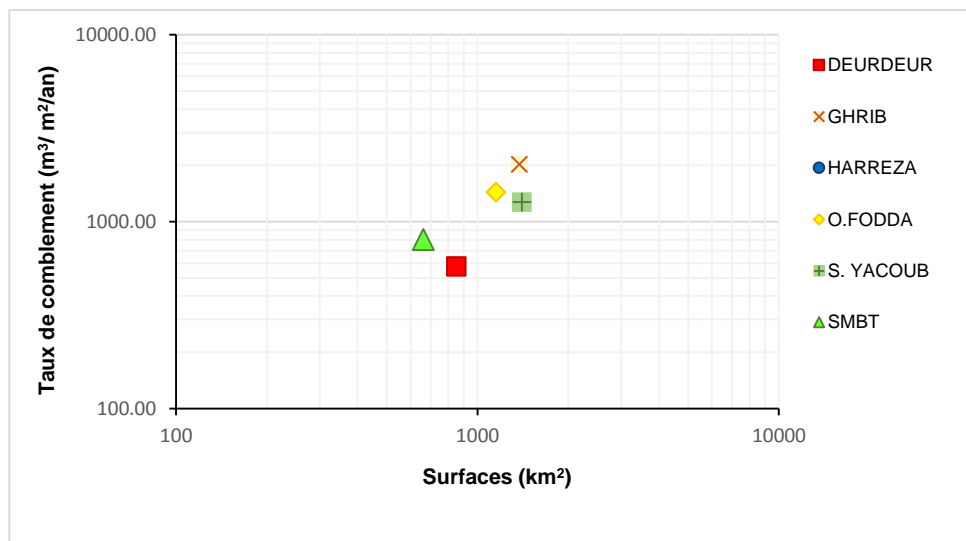


Figure 2. 23: Répartition des barrages étudiés en fonction du taux de comblement par surface du bassin versant.

De la figure ci-dessus, il apparait clairement l'existence de deux classes bien distinctes :

Classe 1 : Superficie > 1000 km², le taux de sédimentation est très important, il s'agit des barrages O. Fodda, Ghrib et Sidi Yacoub. Ces derniers ont une même durée d'observation. Nous remarquons également, que le taux de sédimentation pour le barrage Ghrib, est plus important par rapport au à celui du barrage Sidi Yacoub dont la superficie du BV. est la plus importante. Ce qui veut dire, que plus la taille du bassin versant est minimale plus le taux de comblement de la retenue est important.

Classe 2 : Superficie < 1000 km², le taux de comblement est assez faible. A noter encore, que le barrage le plus envasé est celui dont la superficie du bassin versant est moins importante.

2.9. Conclusion

L'importance de l'étude hydrologique apparait dans ce chapitre. La forme du bassin, la nature du relief, le climat influencent fortement l'accélération du phénomène de sédimentation dans les retenues de barrages. L'étude nous a montré que le bassin haut et moyen Cheliff, présente un relief fort, un réseau hydrographique dense, et des précipitations interannuelles irrégulières. L'état d'envasement des barrages visités, a été analysé vers la fin du chapitre. Toutefois, il serait plus judicieux d'impliquer d'autres paramètres, tels que l'apport liquide, débit solide, précipitation, densité de drainage...etc.

CHAPITRE 3

Evaluation du phénomène érosif et identification de la source de production des sédiments par intégration des SIG

3.1. Introduction

Ce chapitre consiste à appréhender d'une manière qualitative le phénomène érosif en considérant à la fois, les caractéristiques physiques (le relief, la nature géologique du sol, et le couvert végétal) et les caractéristiques hydrologiques liées aux facteurs climatiques (les précipitations et le vent). C'est une étude qui a fait l'objet d'une recherche intitulée : Modélisation de l'érosion du bassin haut et moyen Cheliff par l'application Model builder sur ArcGis [8]. Différentes données sont collectées et intégrées dans un système d'information géographique pour constituer ou compléter la base de données. Une carte de sensibilité à l'érosion, a été élaborée en utilisant l'application « model builder » sur Arcgis™. Cette carte produite fournit un excellent outil d'aide à la prise de décision pour les gestionnaires, afin de mieux cibler leurs stratégies d'interventions préventives.

3.2. Les données exploitées pour la mise en place du SIG

3.2.1. 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, effectué à l'institut National de Cartographie et de Télédétection à Alger en 2004. Cette carte a été numérisée et géo-positionnée en fonction de la projection conique conforme de Lambert de la zone nord de l'Algérie, et a été exploitée particulièrement pour la délimitation de la zone d'étude.
- La carte géologique de l'Afrique, échelle 1/1 500 000 (téléchargée depuis le serveur des ressources en eau d'Institut d'études géologiques des États-Unis, USGS) utilisée particulièrement pour extraire les formations lithologiques du bassin.
- Et la carte topographique du haut et moyen Cheliff, (téléchargée depuis la base de données Terra Server d'imagerie satellitaire de l'USGS).

3.2.2. Images satellitaires

Les images satellitaires sont de deux types :

- L'image Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) obtenue avec le logiciel Global Mapper. Son traitement sur ArcMap™, a permis d'établir le modèle numérique d'altitude (MNA.) (Figure 3.1), à partir duquel nous avons élaboré les deux cartes thématiques, la carte des pentes et la carte d'exposition au vent.

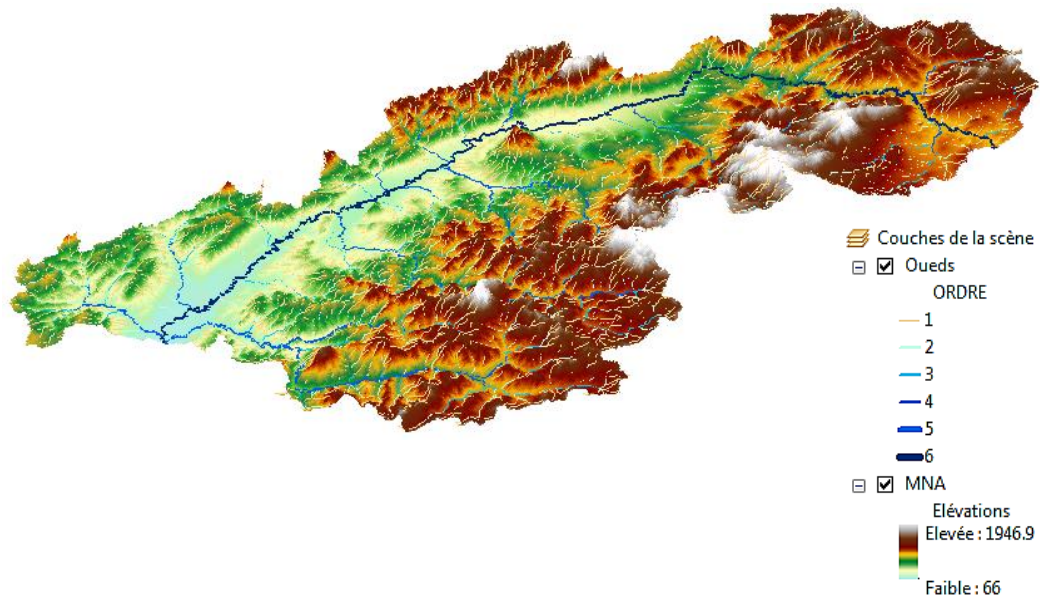


Figure 3. 1: Modèle Numérique d'Altitude du bassin haut et moyen Cheliff.

- Deux Images satellites du type landsat 8 sous formes de bandes spectrales (rouge et infrarouge proche) avec une résolution de 30m, des deux régions Médéa et Cheliff. Ces deux images ont été combinées (Figure 3.2) afin de couvrir toute la zone d'étude. Leur traitement nous a permis de calculer l'indice de végétation normalisé, NDVI, à partir duquel nous avons pu extraire la couverture végétale de notre bassin et réaliser ainsi la carte d'occupation du sol.

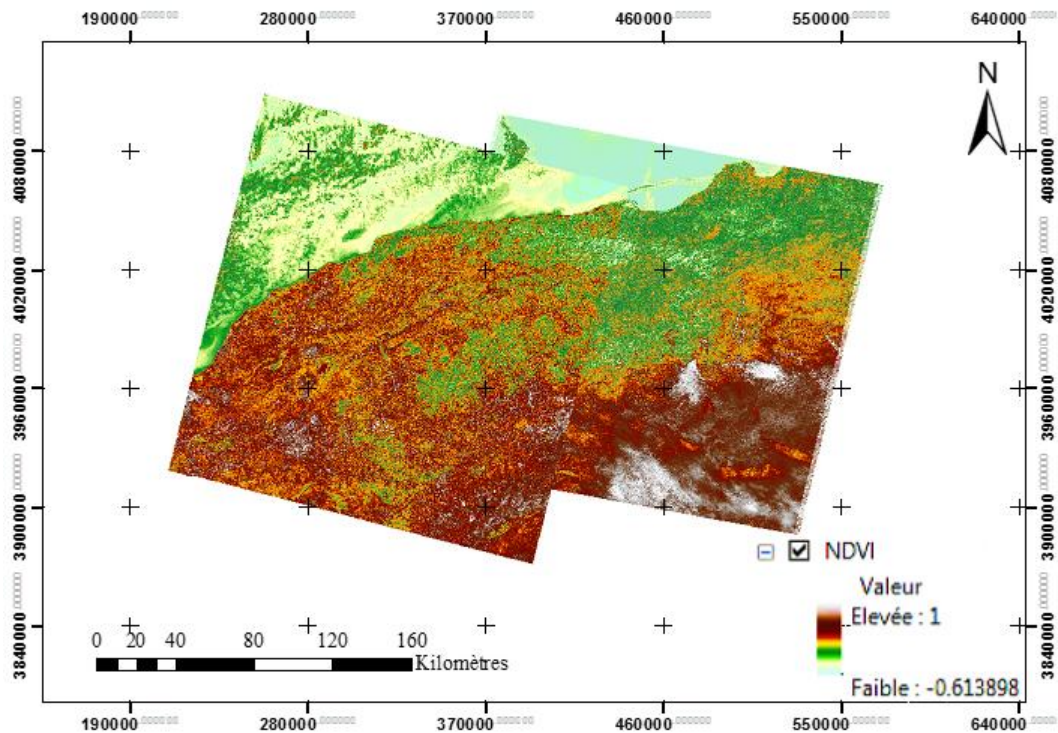



Figure 3. 2 : Combinaison des Bandes spectrales des deux régions Médéa et Cheliff.

▪ 3.2.3. Autres données

Elles concernent particulièrement, les données pluviométriques inter annuelles obtenues par l'agence nationale des ressources hydriques. Une fois traités et complétés, ces données ont permis l'élaboration de la carte des isohyètes de la région d'étude en utilisant le logiciel ArcGis™.

3.3. TRAITEMENT ET GENERATION DES CARTES THEMATIQUES

Une autre force des SIG est sa capacité à créer de nouvelles cartes synthétisant des données de différentes couches d'informations. Les cartes thématiques réalisées ont été reclassifiées en fonction de la susceptibilité de chacun des facteurs à l'érosion (pentes, isohyètes, lithologie, occupation du sol, vent). Un indice de poids, allant de 1 (degré de plus faible sensibilité) à 4 (degré le plus élevé) a été attribué à chacune des classes obtenues, de la manière suivante :

Classes	Indices (degré d'érosion)	Risque
Classe 1	1	faible  très fort
Classe 2	2	
Classe 3	3	
Classe 4	4	

3.3.1. Facteur climatique

La pluie est considérée comme l'élément moteur de l'érosion. Elle a une grande influence puisqu'elle fournit son énergie érosive à l'eau. Son impact apparaît directement sur la surface du sol par l'effet de battance où les agrégats sont brisés, les particules sont détachées et transportées par la suite à la faveur des eaux de ruissellements. La carte des isohyètes (Figure 3.3) a été réalisée par interpolation des différentes données météorologiques en utilisant le logiciel ArcGIS™.

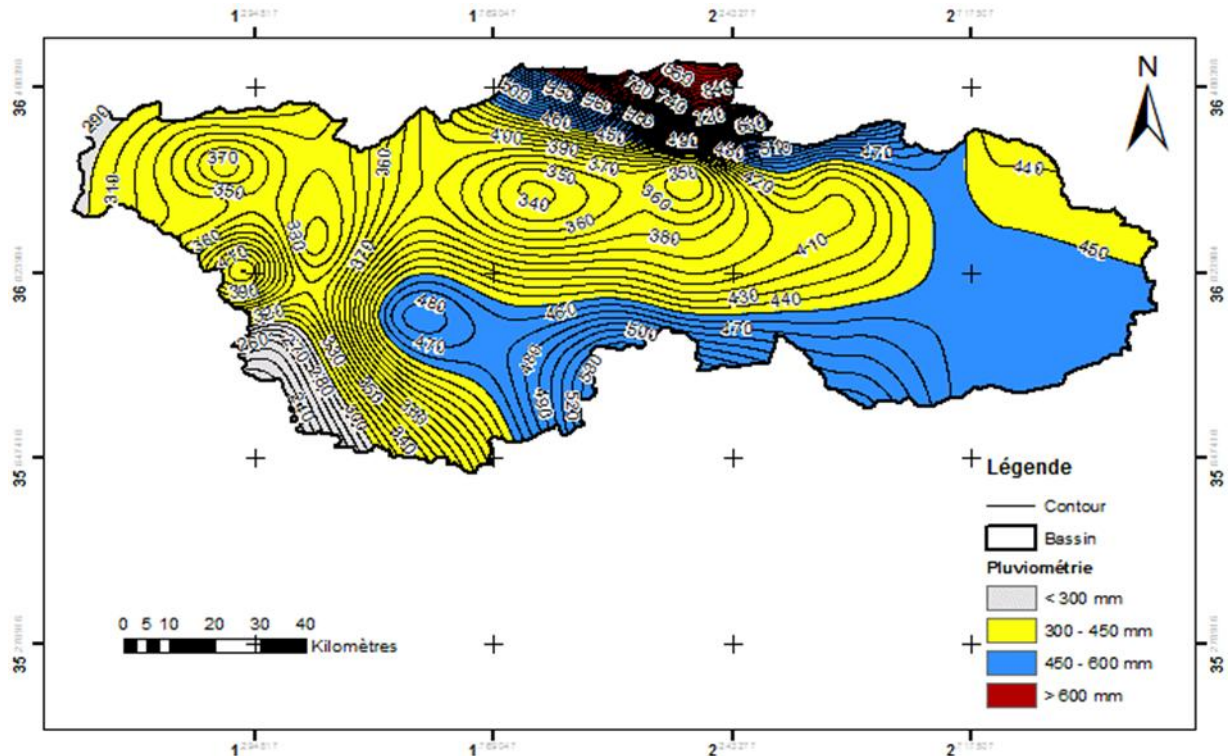


Figure 3. 3 : Carte des isohyètes du bassin haut et moyen chelif.

Une fois réalisée, nous avons obtenus quatre classes de pluviométrie. Sur la majeure partie du bassin, les précipitations observées varient entre moyenne et forte (300 à 600 mm). Il est clair que plus l'intensité est grande, plus l'effet de battage du sol est prononcé, alors pour chacune des classes, nous avons affecté un indice de poids relatif au degré de sensibilité à l'érosion (Tableau 3.1).

Tableau 3. 1 : Classes de pluviosité et leurs indices de poids

Pluviométrie annuelle en (mm)	Sensibilité à l'érosion	Indice de poids
< 300	Faible	1
300 à 450	Moyenne	2
450 à 600	Forte	3
> 600	Très forte	4

3.3.2. Facteur topographique

La pente joue un rôle très important vis-à-vis du phénomène érosif. Son inclinaison influe considérablement la vitesse de ruissellement, qui accélère à son tour le processus du transport sédimentaire. Ce dernier accentue la force d'arrachement des particules et augmente ainsi l'effet de dégradation du sol [82]. L'image Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), téléchargée avec le logiciel Global mapper de la zone d'étude (Figure 3.4), nous a permis de définir quatre classes de pentes (Tableau 3.3). Les pentes fortes à très fortes sont identifiées surtout, dans la partie amont du bassin-versant. Celles-ci sont caractérisées par un relief accidenté où le risque érosif peut être très fort. Les pentes moyennes sont réparties beaucoup plus en aval bassin. Cependant, les pentes faibles sont concentrées au niveau de la plaine et occupent ainsi une surface plus faible.

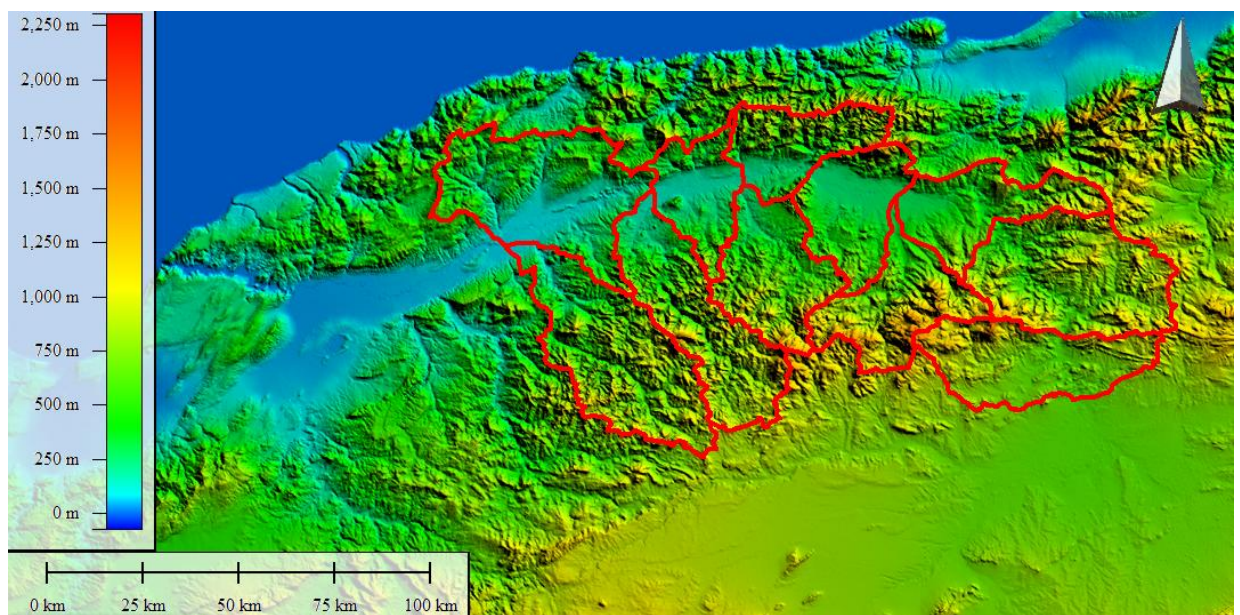


Figure 3. 4 : Modèle numérique de terrain du bassin haut et moyen Cheliff.

La carte des pentes de la zone d'étude (Figure 3.5) a été élaborée par la suite, en utilisant le logiciel ArcGis™. Notons que, plus la pente du terrain est importante plus les sols seront vulnérables à l'érosion. C'est ainsi que sont réparties les quatre classes, leurs surfaces occupées et leurs indices de poids en fonction de la vulnérabilité à l'érosion (Tableau 3.2).

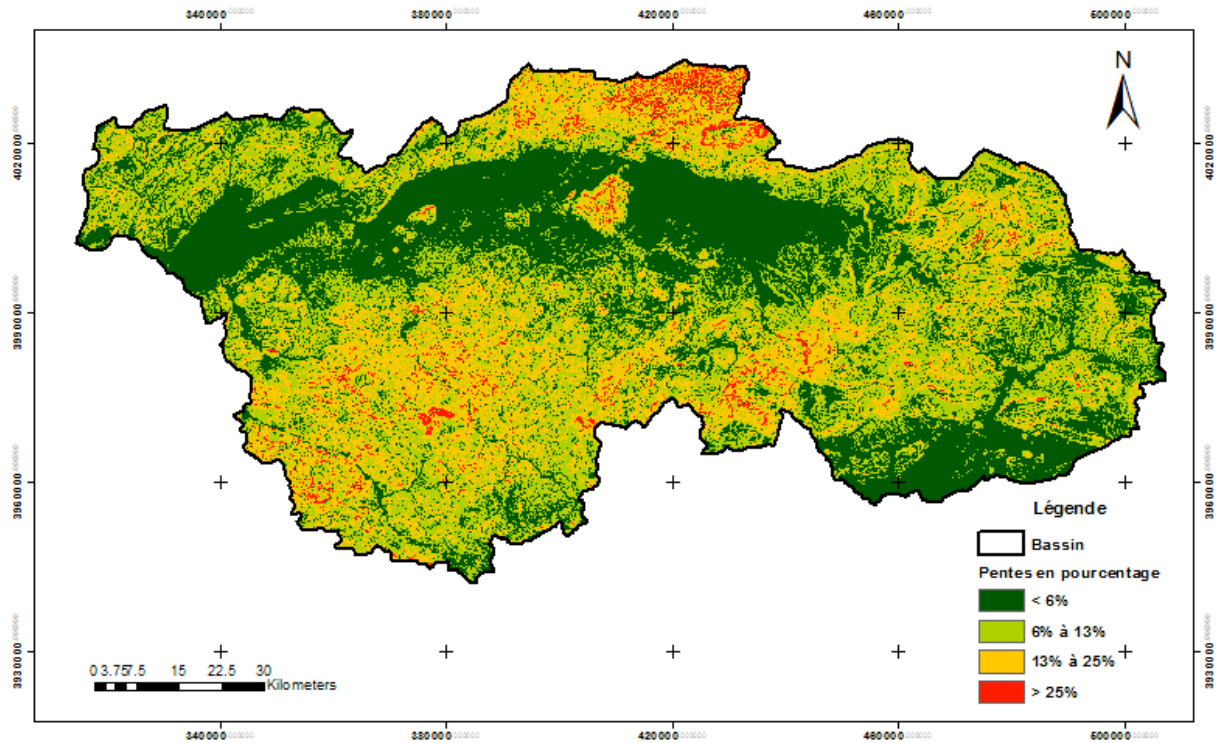


Figure 3. 5 : Carte des pentes de la zone d'étude

Tableau 3. 2 : Classes des pentes avec leur surface et leur degré de sensibilité à l'érosion

Classe des pentes (%)	Surface occupée (Km ²)	Sensibilité	Indice de poids
< 6%	2249	Faible	1
6% à 13%	2722	Moyenne	2
13% à 25%	3764	Forte	3
> 25%	2044	Très forte	4

En se référant à la carte de la Figure 3.5 et au Tableau 3.2 ci-dessus, nous remarquons que les faibles à moyennes pentes occupent environ 46 % de la surface totale du bassin. Cette zone favorise l'apparition des rigoles. Cependant, plus de la moitié de la surface considérée (54%) est caractérisée par des fortes à très fortes pentes. Sur cette partie du terrain, les rigoles se creusent et deviennent de plus en plus profondes, les ravinements apparaissent et l'érosion devient plus importante

3.3.3. Facteur d'exposition au vent

La carte d'exposition au vent (Figure 3.6) permet de localiser les versants qui présentent le plus de risque à l'érosion, qui attaque les roches en arrachant des

particules ou en polissant la surface. Ce processus conduit à une dégradation environnementale sévère par l'appauvrissement des sols et le déplacement de volumes élevés de particules par le vent.

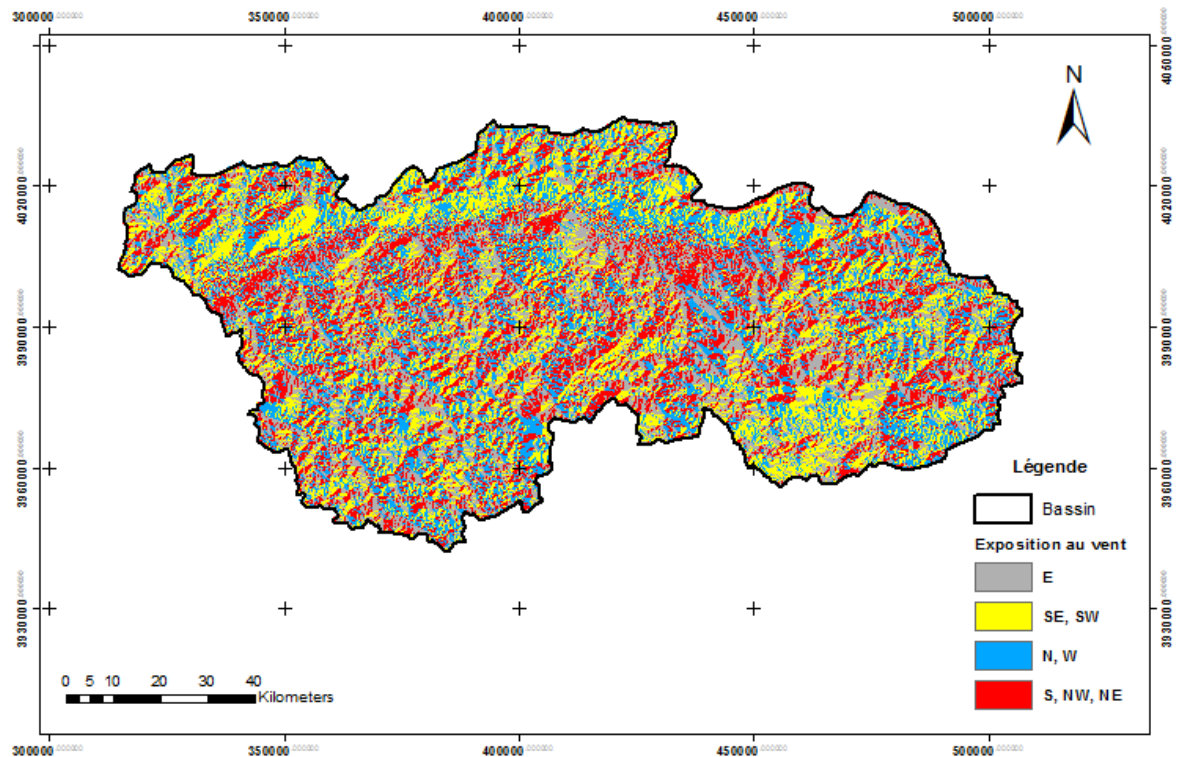


Figure 3. 6 : Carte d'exposition des versants au vent.

La carte ci-dessus a été réalisée sous ArcMap™ puis reclassifiée. Les différentes classes retenues sont pondérées et réparties comme suit (Tableau 3.3) :

Tableau 3. 3 : Classes d'exposition au vent et leur degré de sensibilité à l'érosion

Exposition au vent	Sensibilité	Indice de poids
E	Faible	1
SE, SW	Moyenne	2
N, W	Forte	3
S, NW, NE	Très forte	4

3.3.4. Facteur lithologique

La carte des formations lithologiques de notre zone d'étude (Figure 3.7) est élaborée en utilisant le logiciel ArcGis™, par extrapolation à partir de la carte géologique de l'Afrique. Chaque type de roches est relatif à une période géologique bien définie.

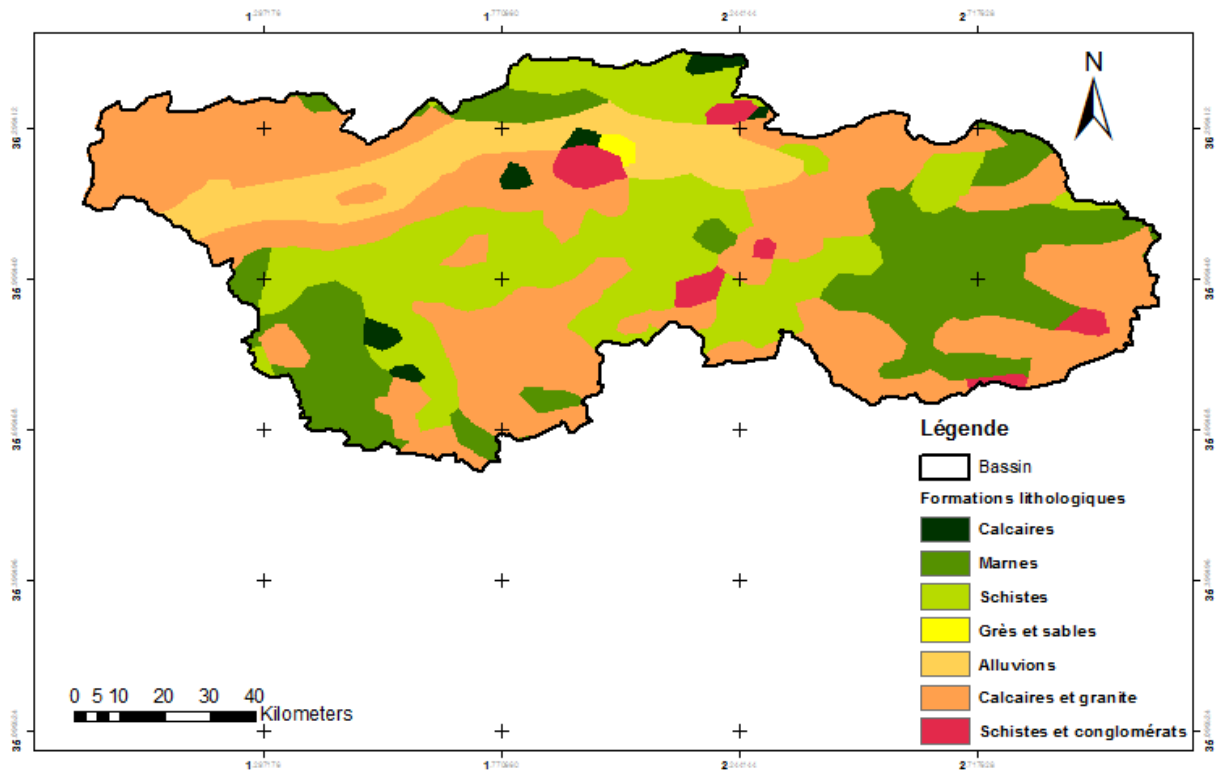


Figure 3. 7 : Carte des formations lithologiques de la zone d'étude.

Sur la carte ci-dessus, nous constatons une diversité géologique sur l'ensemble du bassin. Différents types de roches ont été caractérisées, dont chacune présente une résistance différente vis-à-vis de l'érosion. Leur classification (Tableau 3.4) a été validée en se basant sur l'examen des deux cartes géologiques respectivement, la carte bassin CHELIF-HABRA à une échelle 1 / 200.000 ème [83] et la carte de OUED FODDA à une échelle 1/50.000ème [84].

Tableau 3. 4 : Types de roches et leurs sensibilités à l'érosion

Périodes	Types des roches	Sensibilité	Indice de poids
Crétacé	marne	très forte	4
Crétacé inférieur	schiste	moyenne	2
Jurassique	calcaire	faible	1
Quaternaire	alluvion	moyenne	2
Trias	schiste	moyenne	2
Paléozoïque	grès et sable	forte	3
Tertiaire	calcaire et granite	faible	1
Crétacé	marne	très forte	4

3.3.5. Facteur occupation du sol

L'occupation du sol est l'élément essentiel qui renseigne sur le degré de protection contre l'érosion. En effet, le couvert végétal permet de protéger le sol de l'impact des gouttes de pluie et de l'éclaboussement, et tend à ralentir la vitesse des eaux de ruissellement en favorisant ainsi l'infiltration. Donc, une faible couverture végétale augmente le risque d'érosion. La carte d'occupation du sol de la zone d'étude (Figure 3.8) a été élaborée en se basant sur le calcul de l'indice de végétation par différence normalisé, NDVI. Son principe repose sur le fait qu'un couvert végétal absorbe l'énergie dans la bande rouge et réfléchit au maximum dans le proche infrarouge [85].

Il est donné par :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R} \quad (3.1)$$

où, PIR, représente la bande spectrale correspondante au proche infrarouge et R, celle correspondante au rouge.

Les valeurs théoriques du NDVI varient entre (-1, 0) et (0, +1) où, les valeurs les plus élevées concernent la végétation verte active ; les faibles valeurs pour d'autres matériaux de surface communs. Les masses d'eau et les zones humides sont représentées avec un NDVI négatif et les sols nus par les valeurs NDVI les plus proches de zéro [86]. Les bandes spectrales 4 et 5 des deux images satellitaires (type Landsat 8) des régions Médéa et cheliff ont été combinées et utilisées pour le calcul du NDVI

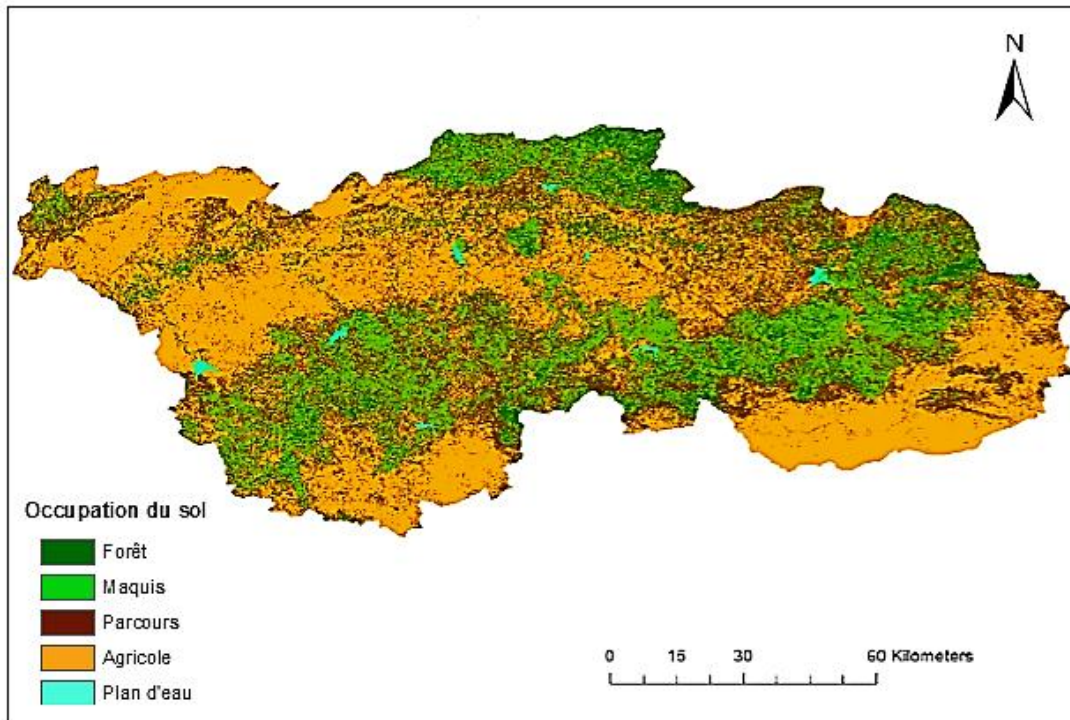


Figure 3. 8 : Carte d'occupation du sol au niveau du bassin haut et moyen cheliff.

Après traitement sur Arcgis™, nous avons affecté pour chacune des classes obtenues, un indice de poids selon sa sensibilité à l'érosion (Tableau 3.5). La classification a été validée en se basant d'une part, sur l'analyse visuelle de l'indice calculé, NDVI, et d'autre part, en utilisant les échantillons des sols décrits dans les notices des cartes des sols de l'Algérie (Plaines du CHELIF) à une échelle 1/50.000^{ème} [87].

Tableau 3. 5 : Sensibilité à l'érosion en fonction de l'occupation du sol

Occupation	Sensibilité	Indice de poids
Forêt	Faible	1
Maquis	Moyenne	2
Humide et parcours	Forte	3
Agricole	Très forte	4

3.4.Élaboration de la Carte de sensibilité à l'érosion

3.4.1. Méthode

Pour obtenir la carte final de vulnérabilité des sols à l'érosion pour notre bassin, nous avons utilisé une méthode de superposition pondérée par l'application « model builder» sur ArcMap™. Le degré de la vulnérabilité à l'érosion serait alors exprimé par :

Degré de sensibilité à l'érosion = Indice de pente + indice lithologique + indice d'occupation des sols + indice des précipitations + indice d'exposition au vent.

L'affectation des indices de pondérations pour chacun des facteurs, était l'un des plus grands problèmes rencontrés. En se basant sur la connaissance de notre terrain et également, sur toutes les études et recherches effectuées pour chaque sous bassin de notre zone d'étude, nous avons adopté les indices suivants : un indice faible (10%) est affecté au facteur lithologique et un indice moyen (20 %) est affecté respectivement, aux facteurs isohyètes et exposition des versants au vent. Cependant, le rôle unanimement reconnu de l'occupation du sol et de la pente contre l'érosion hydrique, nous a conduits à retenir un indice plus ou moins important (25%) pour les deux facteurs : couvert végétal et pente du relief.

L'essentiel du travail a été réalisé suivant l'organigramme méthodologique présenté sur la Figure 3.9 :

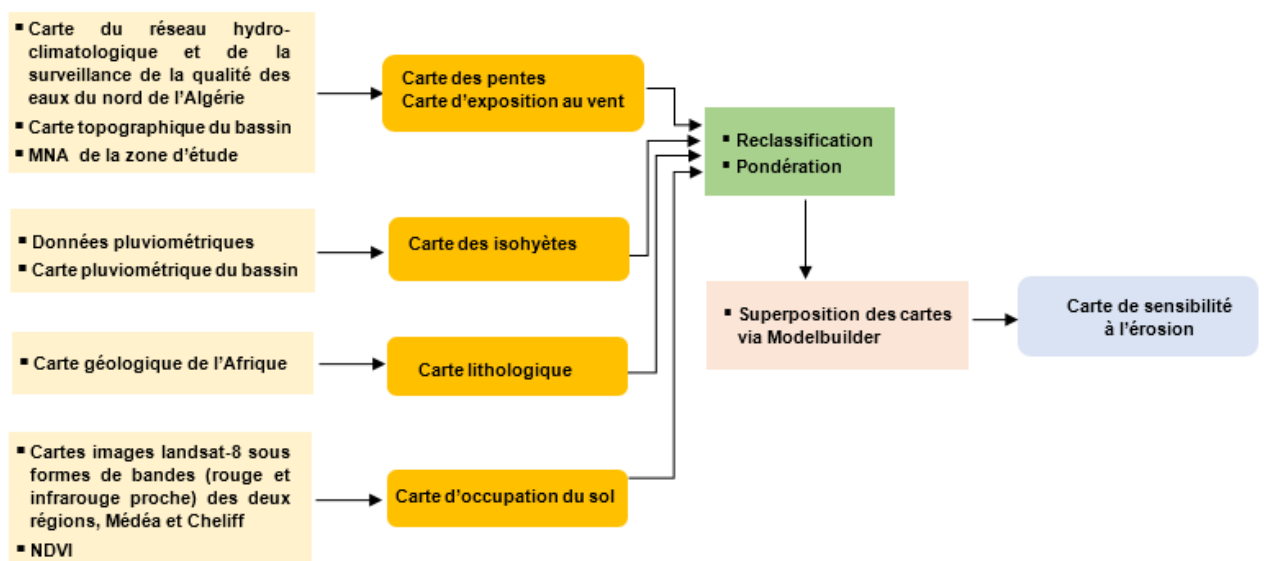


Figure 3. 9 : Diagramme méthodologique pour la réalisation de la carte de sensibilité à l'érosion.

3.4.2. Superposition des cartes par l'application Model builder

Cette méthode consiste à superposer plusieurs rasters en utilisant une échelle de mesure commune et une pondération en fonction de leurs importances. Les cinq rasters en entrée ont été reclassés selon une échelle de mesure commune de 1 à 4. Chaque raster est affecté par un pourcentage d'influence (pondération), puis les résultats sont cumulés pour créer le raster en sortie (Figure 3.10).

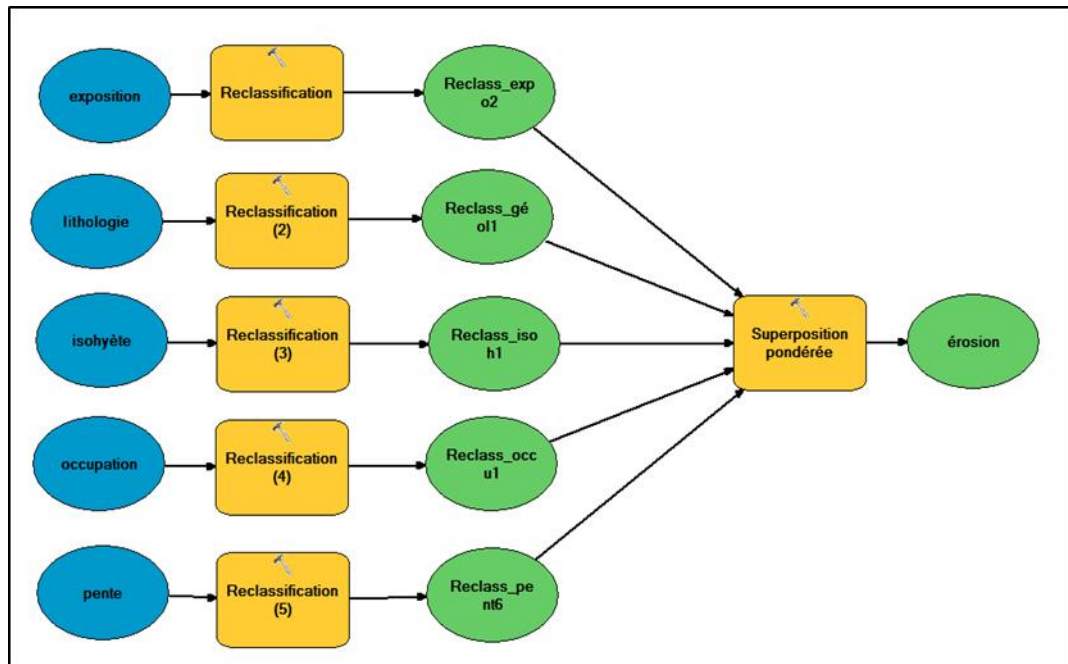


Figure 3. 10 : Schéma de superposition des cartes par l'application model builder sur ArcMap.

3.5. Edition de la carte

La carte de sensibilité à l'érosion (Figure 3.11) est obtenue par le croisement des différentes cartes thématiques via « model builder » sur ArcMap™, en tenant compte des valeurs des cinq facteurs étudiés : topographique, climatique, lithologique, exposition au vent et occupation des sols. L'analyse de cette carte nous a permis de localiser et de cerner quatre classes de sensibilité différentes (Tableau 3.6).

Tableau 3. 6 : Classes de sensibilité à l'érosion et les surfaces exposées

Classes	Sensibilité à l'érosion	Surfaces exposées au risque érosif (Km ²)	Pourcentage par rapport à la surface totale (%)
01	Faible	18	0.168
02	Moyenne	3314	30.970
03	Forte	7279	68.021
04	Très forte	90	0,841

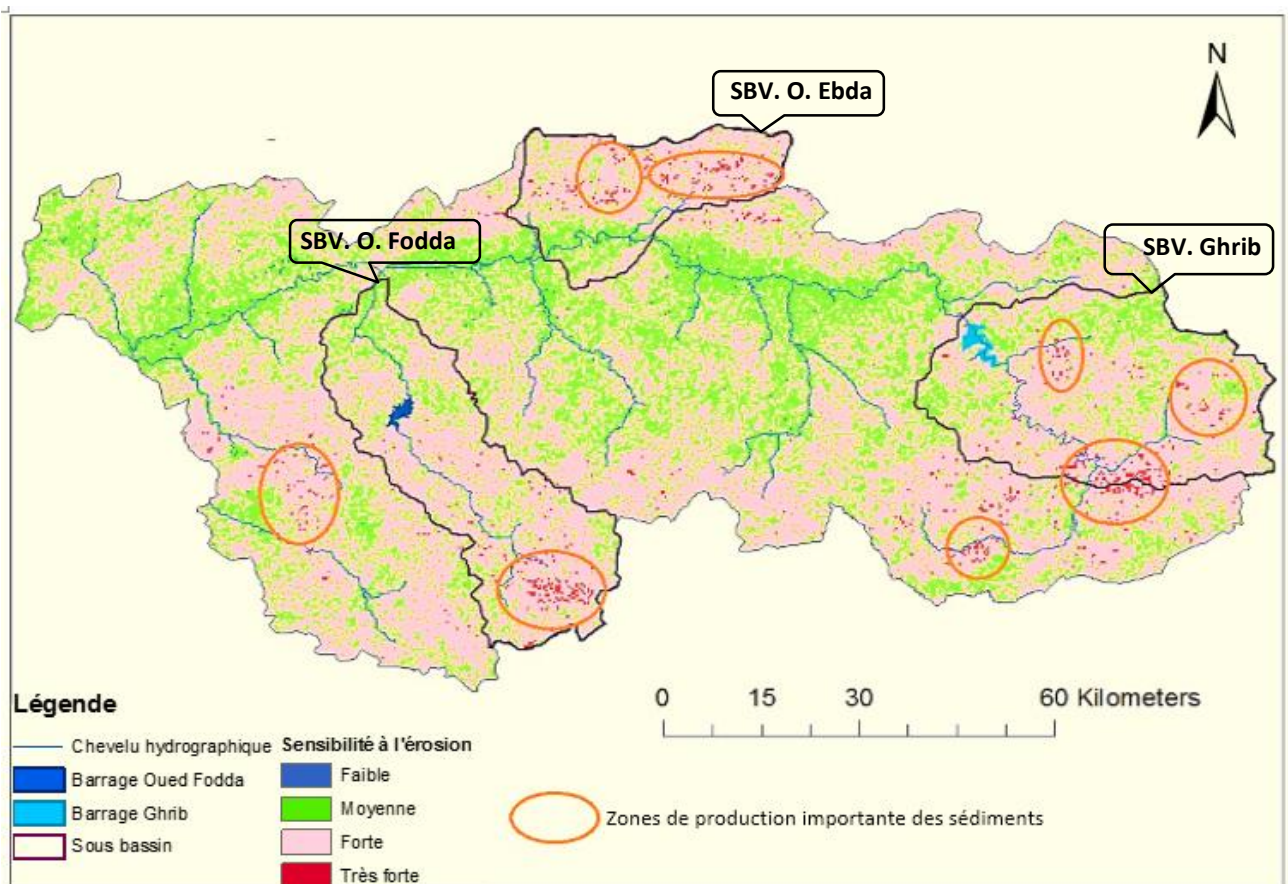


Figure 3. 11 : Carte de sensibilité à l'érosion des sols du bassin haut et moyen Cheliff.

Sur la carte ci-dessus, nous remarquons que les zones où l'érosion est très peu répandue sont réparties sur une très faible surface, soit environ 0.168% de la superficie totale du bassin. Elles sont caractérisées par une certaine stabilité qui peut être expliquée par la présence des roches plus résistantes, d'une végétation dense et des pentes faibles. Cependant, les zones fortement vulnérables occupent la majeure partie du bassin soit environ 68,021%. Ce sont les parties les plus accidentées et les plus dégradées. Elles sont caractérisées par des fortes pentes

et d'une végétation très faible. Ces zones favorisent l'apparition des ravinements. La conception d'une installation de lutte contre ces ravinements s'avère utile, où il faut assurer un aménagement adéquat tel que la correction torrentielle. Des petits seuils en pierres sèches peuvent également créer par leur atterrissement, un milieu favorable à l'installation des plants avant la mise en place des seuils biologiques par la végétation [88]. Ils permettent aussi une correction de la pente de l'oued en diminuant d'une part, la vitesse d'écoulement en période de pluies, et d'autre part, la quantité des sédiments qui peuvent être transportés jusqu'aux barrages implantés dans la région. Les zones les plus vulnérables couvrent une surface de 90 km² soit environ 0,841% de la superficie totale de la zone d'étude. Cette vulnérabilité est provoquée essentiellement par une intensité très forte des précipitations, des très fortes pentes également, et des faciès tendres. Ces zones sont identifiées essentiellement sur trois sous bassin versant (Fig. 3.11) : Oued Ebda, Oued Fodda et Oued Cheliff Ghrib. Ces zones sont responsables d'une production importante des sédiments. Au niveau de ces deux derniers sous bassins, se sont localisés respectivement, le barrage d'Oued-Fodda et celui de Ghrib, qui représentent à eux seuls environ le tiers de l'envasement total des barrages algériens d'après l'Agence nationale des barrages et de transferts (ANBT) d'Alger. En effet, le barrage de Boughzoul a été réalisé en amont du barrage Cheliff Ghrib dans l'objectif d'écarter les crues et diminuer ainsi la quantité des sédiments transportés.

3.6. Conclusion

L'intégration des systèmes d'informations géographiques par l'application « model builder » sur ArcGisTM dans l'étude du phénomène d'érosion, nous a permis d'élaborer une carte de sensibilité des sols à l'érosion dans le bassin versant haut et moyen cheliff. De cette carte, il apparaît qu'une grande partie des terrains présente une forte vulnérabilité à l'érosion. Celle-ci résulte de la conjonction de plusieurs facteurs : l'agressivité des pluies, la raideur du relief et la faiblesse du couvert végétal. Une érosion par ravinement a été identifiée particulièrement, au niveau des sous bassins versants : Oued Fodda, Oued Cheliff Ghrib et Oued Ebda. Ceci se traduit en amont par un transport solide très important. Les techniques biologiques, tels que le reboisement forestier et l'arboriculture sont des moyens très efficaces à considérer pour lutter contre ce phénomène érosif. La correction des

ravins et un sapement latéral des berges des oueds est une solution qui pourrait être envisagée surtout au niveau des zones les plus vulnérables. Pour les terrains à sensibilité moyenne, l'utilisation des banquettes semble une bonne solution.

La carte élaborée a permis ainsi de disposer d'une vue d'ensemble des zones menacées. La méthode utilisée a servi essentiellement à la création d'un ensemble des cartes thématiques qui pourraient être utilisées comme un support visuel et explicatif, en se référant à la base de données. Elle pourra également apporter une aide importante aux décideurs et aux aménageurs afin de mieux cibler leurs stratégies d'interventions préventives.

Cette approche, bien qu'elle paraisse raisonnable, du fait d'intégrer à la fois les caractéristiques physiques et hydrologiques, elle présente encore des limites et gagnerait à être améliorée. Une validation précise et rigoureuse des résultats obtenus, nécessite la mise en correspondance sur le terrain. Une approche descriptive permettant d'identifier les différentes formes d'érosion sur l'ensemble du bassin, semble une bonne piste à suivre pour affiner ces résultats.

Pour montrer les tendances globales de l'évolution superficielle des sols de notre bassin, il serait intéressant de compléter cette étude par une approche quantitative, qui serait basée sur l'utilisation du modèle MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) de Williams et Berndt [89]. Ce modèle permettrait de quantifier la dégradation spécifique en considérant les sédiments associés aux autres formes de l'érosion.

CHAPITRE 4

APPORT DES MODÈLES GÉOSTATISTIQUES DANS L'ÉLABORATION DE LA CARTE BATHYMÉTRIQUE DE LA RETENUE DU BARRAGE OUED FODDA

4.1. Introduction

L'objectif de cette partie consiste à l'étude de la bathymétrie de la retenue du barrage oued Fodda, en faisant appel aux méthodes d'interpolations spatiales par implémentation des systèmes d'informations géographiques. Une fois la carte bathymétrique est élaborée, l'évolution de la profondeur d'eau en tout point de la surface sera étudiée.

4.2. Zone d'étude

Le bassin d'Oued Fodda fait partie du bassin versant haut et moyen Cheliff (Figure 4.1). Ce dernier appartient au bassin du Cheliff qui représente plus de 77 % de la superficie totale du bassin Cheliff-Zahrez [8]. Sa superficie est environ 1153.5 km². Il a une forme allongé et est caractérisé par un relief fort (Figure 4.2) avec une densité spécifique estimée à 343.46m.

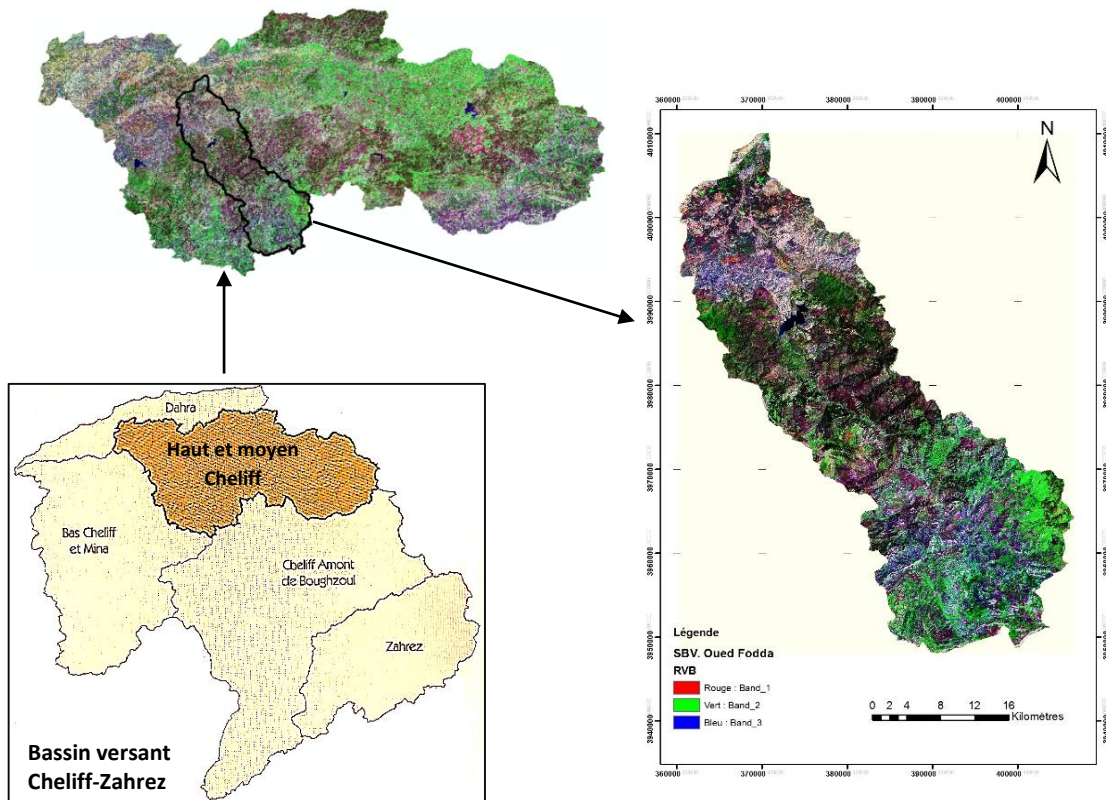


Figure 4.1 : Sous bassin versant de l'Oued Fodda.

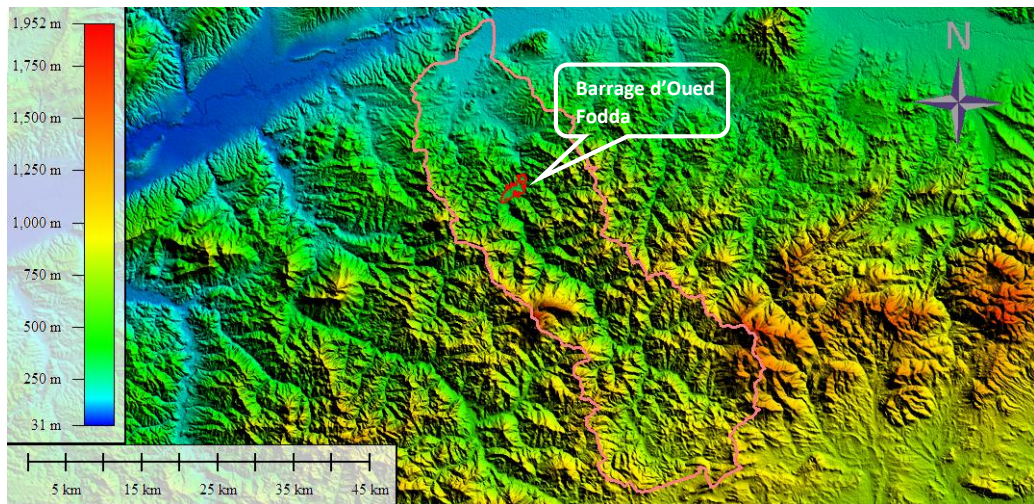


Figure 4. 2 : Modèle numérique du terrain du sous bassin d'Oued Fodda.

Notre zone d'étude est exposée à un grave problème de dégradation du sol. Une érosion par ravinement a été identifiée vers la partie amont du bassin [7] (Figure 4.3). Ce dernier présente un chevelu hydrographique dense, avec un réseau de 81 oueds permanents de l'ordre de 1053.45 Km et de 282 d'oueds temporaires de 897.16 Km. Il est drainé principalement, par l'Oued Rouina (d'ordre 4) sur une longueur de 92.14km (Figure 4.4).



Figure 4. 3 : Formation d'une ravine au niveau du bassin versant d'Oued Fodda (Remini, 2008).

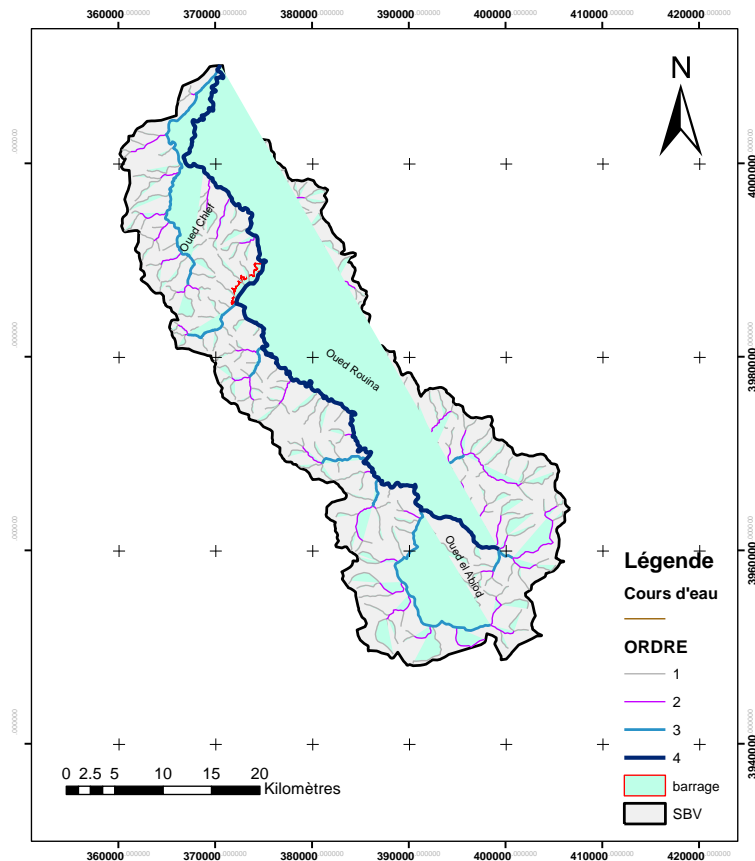


Figure 4. 4 : Réseau hydrographique du Sous bassin versant de l'Oued Fodda.

4.3. CARACTÉRISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES

Cette partie a été réalisée en se basant sur l'étude hydrologique du bassin haut et moyen cheliff, développée dans le chapitre 2. Les caractéristiques morphométriques sont résumées dans les paragraphes suivants.

4.3.1. Courbe hypsométrique

En utilisant le logiciel ArcGis™, nous avons élaboré la carte hypsométrique (Figure 4.5), à partir de laquelle nous avons tracé la courbe hypsométrique (Figure 4.6) sur Excel.

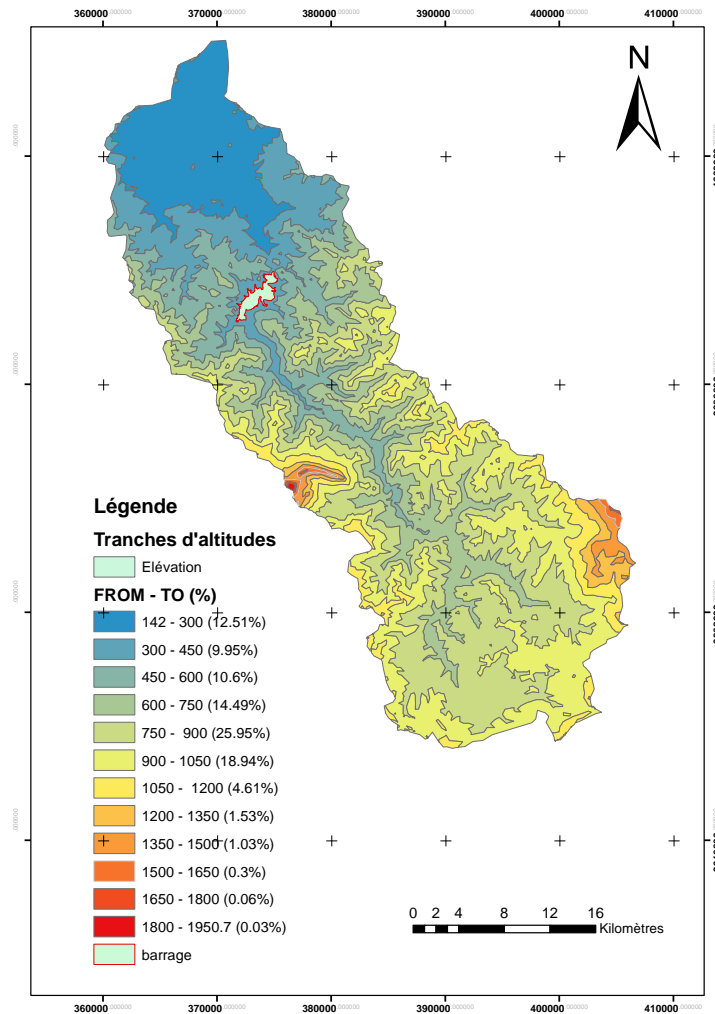


Figure 4. 5 : Carte hypsométrique du Sous bassin d'Oued Fodda.

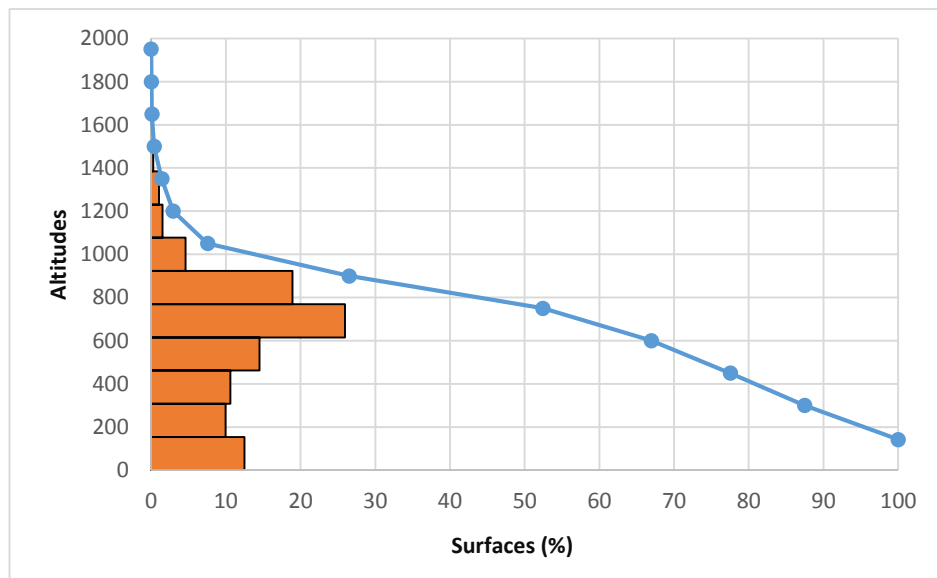


Figure 4. 6 : Courbe hypsométrique de la zone d'étude.

De la courbe ci-dessus nous avons déduit les altitudes suivantes :

Altitude maximale = 1950.7 m,

Altitude minimale = 142 m,

Altitude médiane = 750 m,

Altitude moyenne = 709.40 m.

4.3.2. Caractéristiques de forme

Six facteurs caractéristiques sont calculés respectivement, par les relations ((2.3), (2.4), (2.5), (2.7), (2.8), (2.9), (2.11)) et illustrés sur le tableau 4.1 suivant :

Tableau 4. 1 : Caractéristiques de forme pour le SBV. d' Oued Fodda.

Coefficient de Gravelius K_G	1.74
Longueur L (km)	93.144
Largeur l (km)	12.384
Indice de pente moyen I_{moy} (%)	1.72
Indice de pente de Roche I_p (%)	10
Indice de pente global I_g	0.1
Densité de drainage D_s (m)	328.16

En se référant au tableau 4.1 ci-dessus, et en se basant sur classification de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer (O.R.S.T.O.M.) on déduit que le relief du sous bassin d'oued Fodda est fort, il est donc exposé à une forte dégradation du sol et donc à une accélération importante du phénomène d'envasement.

4.4. Analyse bathymétrique du barrage oued Fodda

Le barrage de l'Oued Fodda (Figure 4.6) est considéré comme étant l'un des premiers grands barrages construits en Algérie. Il est destiné à l'irrigation du périmètre du Moyen Cheliff [8]. Ce barrage capte annuellement un volume de vase de 3,2 millions de m³ [9]. Sa capacité de stockage qui était initialement estimée à 228 hm³ a diminué d'environ la moitié (50%) en 1994.

4.4.1. Levés bathymétriques

Les derniers levés bathymétriques ont été effectués en 2004 (Tableau 4.2) par l'Entreprise HYDRODRAGAGE-C.T.SYSTEMS, dans l'objectif, d'actualiser la capacité de stockage des retenues et la surveillance de leurs envasements ainsi que leurs délimitation à la cote des plus hautes eaux exceptionnelles (PHE) [71].

Cette dernière a été estimée à une altitude de 374 m et la cote de la retenue normale (RN) est fixée à 370.5 m [71].

Tableau 4. 2 : Comparaison de la capacité de la retenue (cote normale RN)

Année du levé	1932	1974	1986	2004
Capacité du réservoir (Hm ³)	225	143,88	132.8	102.85
Perte de capacité (Hm ³)	0	81.12	11.08	29.95
Nombre d'année	0	42	12	18
Perte de capacité annuelle (Hm ³)	0	1.93	0.92	1.66

Source : ANBT

La variation du volume de la retenue du barrage de l'Oued Fodda, durant les années des levés, est représentée sur la Figure 4.7.

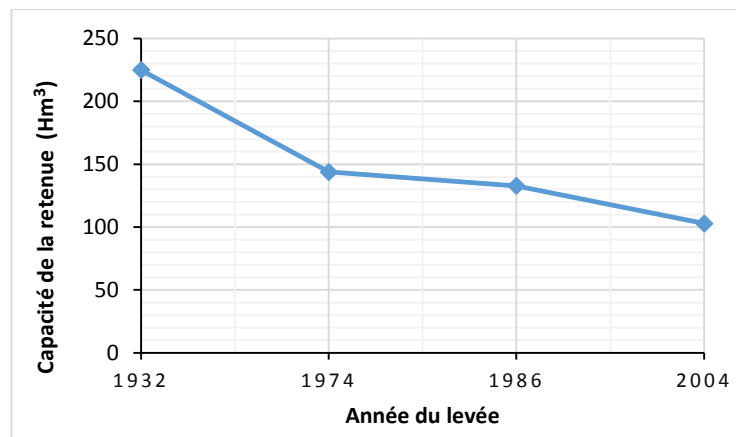


Figure 4. 7 : Variation de la capacité de la retenue en fonction du temps.

En se référant respectivement au tableau 4.1 et à la figure 4.7 ci-dessus, nous pouvons dire le volume du réservoir a diminué considérablement, depuis l'année de sa mise en eau (1932) jusqu'à l'année du dernier levé (2004). Ceci peut être expliqué par l'énorme quantité de dépôts au fond de la retenue du barrage de l'Oued Fodda. En effet, la perte de la capacité moyenne annuelle des 18 dernières années est de 1.66 Hm³/an (Figure 4.8), le taux d'envasement de la retenue est estimé alors, à 54.29 % [71].

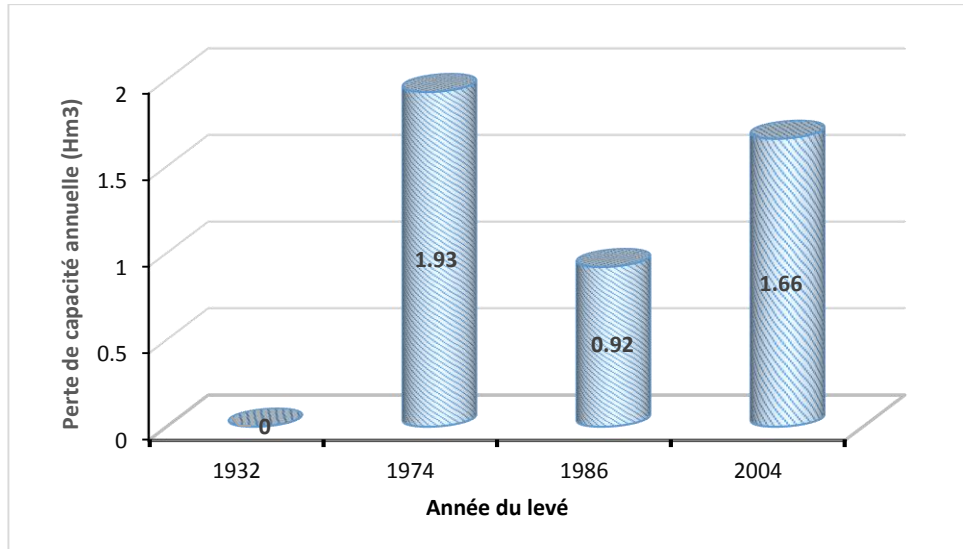


Figure 4. 8 : Variation de la perte annuelle du volume de la retenue jusqu’au dernier levé 2004.

4.4.2. Évolution de la capacité de la retenue durant la période 2004-2017

En se basant sur les données des comptes rendus mensuels (CRM.) obtenus auprès de la direction du barrage d’oued Fodda, nous avons tracé sur la figure 4.9 ci-dessous la variation du volume de stockage dans la retenue du barrage oued Fodda.

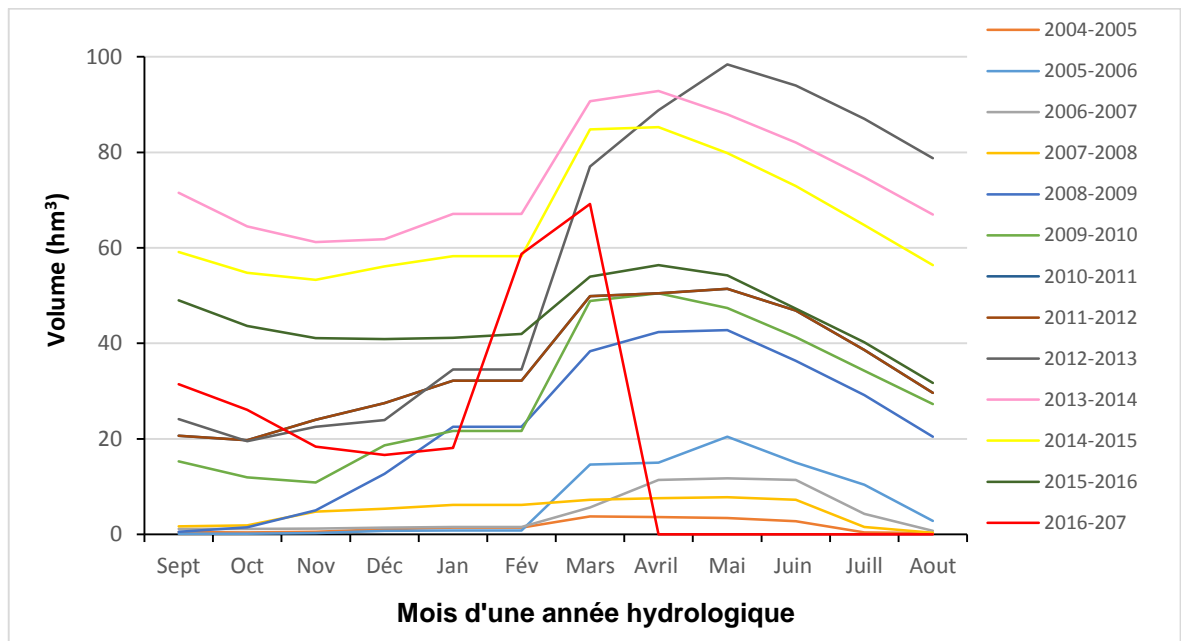


Figure 4.9 : Évolution du volume de la retenue du barrage Oued Fodda.

De la figure 4.9 ci-dessus, on peut tirer les conclusions suivantes :

Durant la période 2004-2012 nous remarquons une augmentation progressive pendant les cinq premiers mois de l'année hydrologique (Septembre-Janvier) avec une irrégularité de la variation de la capacité d'une année à une autre. Pour l'année 2013, et selon la direction locale des ressources en eau, le barrage d'oued Fodda atteint son niveau le plus élevé, en enregistrant un taux de remplissage d'environ 88% soit un volume de 98.4 hm³. Cependant et durant la période 2013-2017, une irrégularité de l'évolution de la capacité de stockage est remarquée, avec une diminution progressive d'une année à une autre, jusqu'à l'année 2017 où le volume est évalué à 69.2 hm³ en mois de Mars, avec une valeur minimale de 16.6 hm³ enregistrée durant la même année. Une augmentation marquée également, pendant le mois de Février de la période (2015-2017) suite aux opérations de dévasement effectuées dans la retenue du barrage d'oued Fodda.

4.4.3. Variation de la capacité moyenne annuelle durant la période 2004-2017

La variation du volume de stockage pendant les dernières 13 années est représentée sur la figure (4.10) ci-dessous.

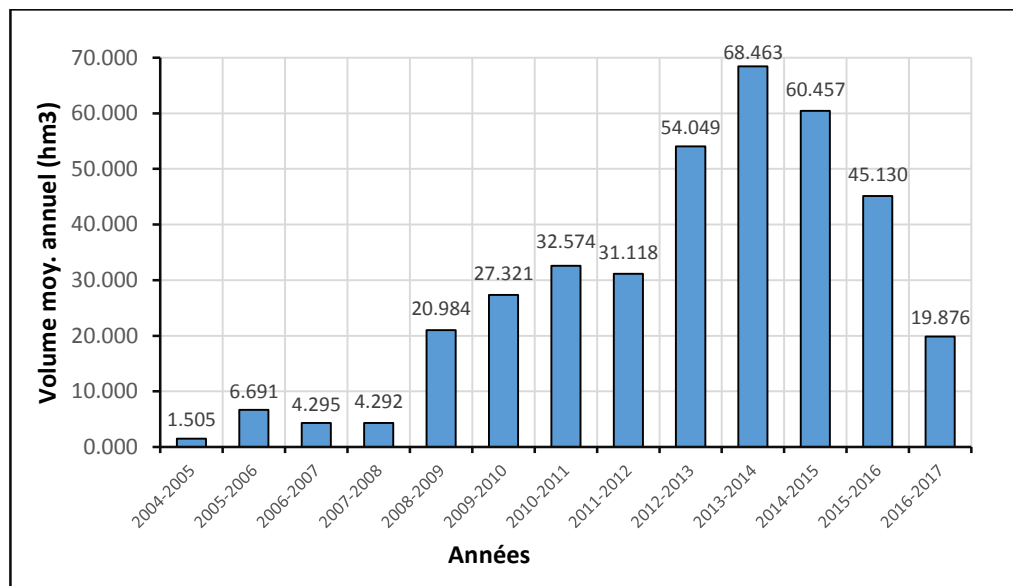


Figure 4. 10 : Variation de la capacité moyenne annuelle (2004-2017).

En se référant à la figure 4.10 ci-dessus, nous remarquons une augmentation plus ou moins progressive jusqu'à l'année (2013-2014) où le volume moyen observé atteint 68.463 hm³. A partir de cette dernière, la capacité de la retenue diminue progressivement et atteint un volume moyen annuel minimal de 45.13 hm³ durant la

période (2015 - 2016). La capacité de stockage minimale enregistrée pour l'année 2017 n'est pas retenue, et ne reflète pas la réalité, vue que les valeurs des capacités retenues sont observées jusqu'au mois de Mars seulement.

4.4.4. Envasement de la retenue du barrage oued Fodda

En tenant compte des volumes de stockages enregistrés le 31/Aout des deux années 2014 et 2015 respectivement, nous avons calculé la perte de la capacité moyenne annuelle par rapport à l'année du dernier levé (2004) et nous avons estimé le taux d'envasement du barrage. Les résultats obtenus sont illustrés sur le tableau 4.3 ci-dessous :

Tableau 4. 3 : Comparaison de la capacité de la retenue à la cote normale

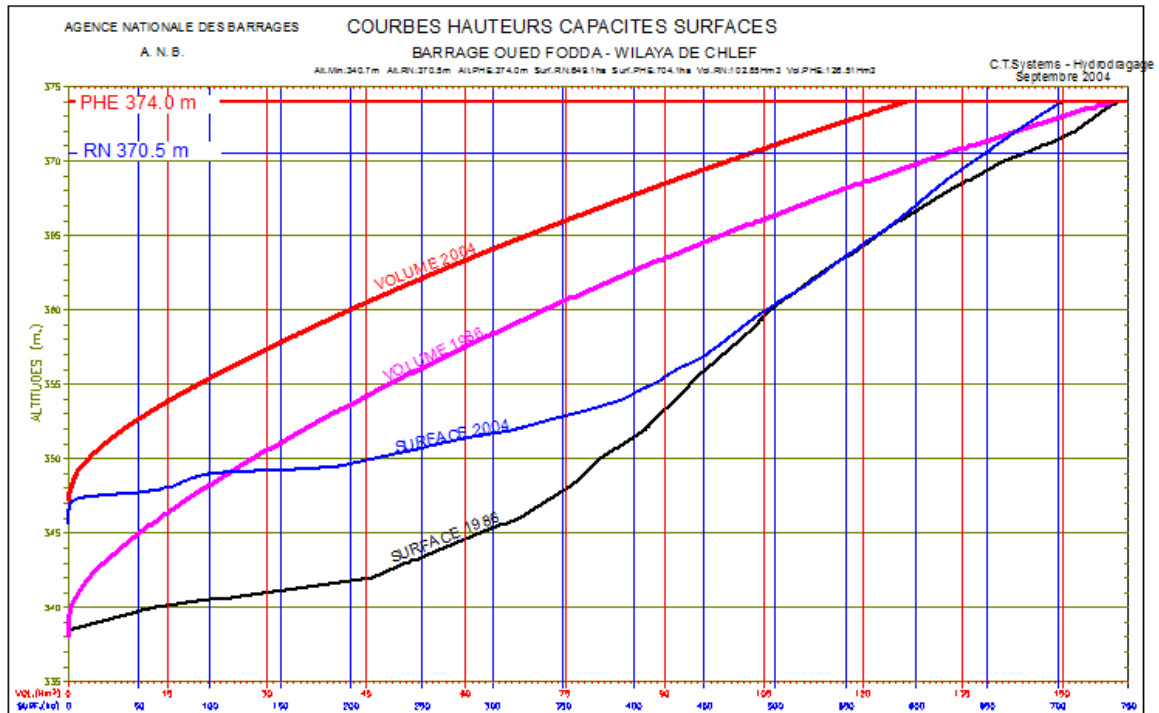
Année du levé	1986	2004	2014	2015
Capacité du réservoir (Hm ³)	132.8	102.85	66.764	56.121
Perte de capacité (Hm ³)	11.08	29.95	36.086	46.729
Nombre d'année	12	18	10	11
Perte de capacité annuelle (Hm ³)	0.92	1.66	3.6086	4.248
Taux d'envasement (%)			35%	45.43%

Du tableau 4.3 ci-dessus, nous constatons une augmentation d'une perte de capacité de 1.66 jusqu'à 3.61 Hm³/an durant la période 2004-2014, soit un taux d'envasement de 35%.

En considérant la période 2004-2015, la perte annuelle augmente de 1.66 jusqu'à 4.248 hm³, soit un taux d'envasement de 45.43%. Ce taux de comblement enregistré est très important vis-à-vis des opérations de dévasement qui ont été effectuées durant le mois de février de la même année.

4.5. Les courbes Hauteurs / Capacités – Surfaces (année 2004)

Ces courbes Hauteurs/Capacités-Surfaces, représentées sur la figure 4.11 sont tracées, suite au dernier levé bathymétrique effectué au sein de la retenue du barrage oued Fodda [71].



Source ANBT

Figure 4.11 : Courbes Hauteurs / Capacités – Surfaces (1986-2004).

Les courbes tracées ci-dessus montrent d'une part, une augmentation régulière de la capacité en fonction des altitudes jusqu'à une hauteur de 374 correspondant à la cote des Plus hautes Eaux (PHE), où le volume enregistré atteint 126.514 hm^3 . Et d'autre part, nous constatons un accroissement plus ou moins régulier concernant la surface durant l'année 2004.

4.6. ÉLABORATION DE LA CARTE BATHYMÉTRIQUE (Avril 2017)

4.6.1. Méthodologie

La méthode consiste initialement, à délimiter la retenue et tracer sur Google Earth des transects plus ou moins parallèles sur l'ensemble du réservoir, afin d'assurer une plus grande quantité possible des données. Le plan d'échantillonnage étant tracé, les points sont par la suite, exportés afin d'extraire la bathymétrie (Figure 4.12). Au total 1476 points correspondant aux coordonnées géographiques et à une profondeur prélevée, ont été positionnés sur toute la surface de la retenue du barrage Oued Fodda. Le traitement initial est effectué sur Excel, puis importés dans un environnement SIG à travers le logiciel ArcGis™.

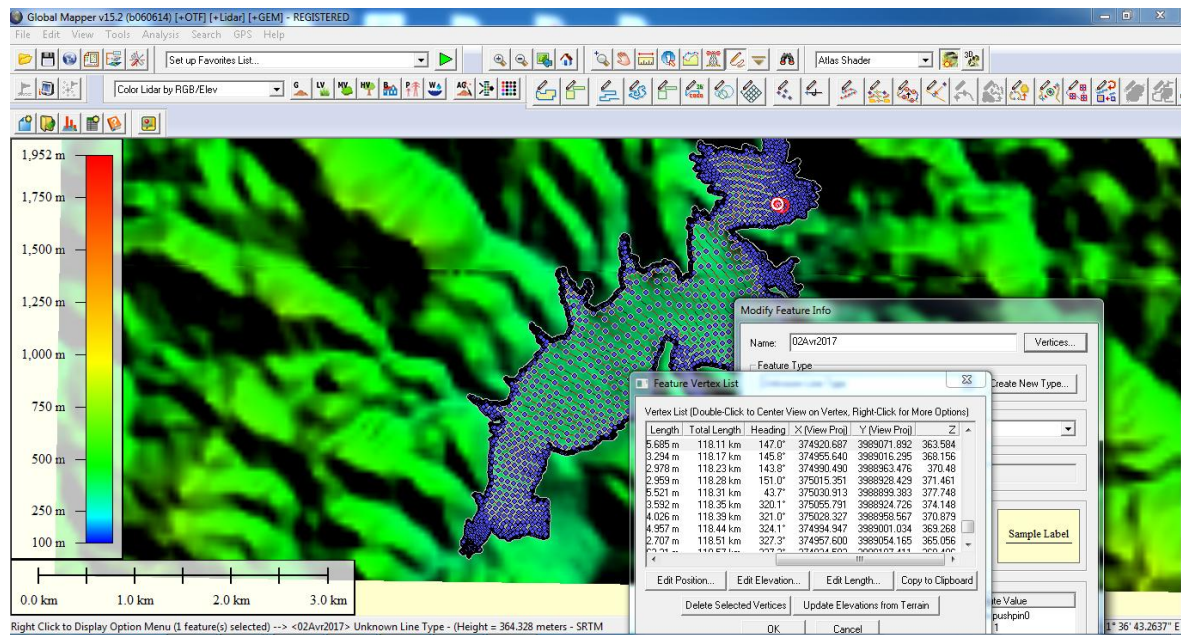


Figure 4. 12 : Fenêtre d'extraction de la bathymétrie sur Global mapper.

L'élaboration de la carte bathymétrique de la retenue d'oued Fodda, nécessitait des données de type tridimensionnel (x, y, z), en l'occurrence : longitude, latitude et profondeur. Les derniers levés bathymétriques ont été effectués en 2004. L'objectif consiste alors, en une prévision pour la détermination des profondeurs d'eau dans la retenue du barrage, pour l'année 2017. Cependant, par défaut du manque de données (particulièrement, les coordonnées géographiques correspondantes à chacune des valeurs observées de la profondeur) pour l'année considérée, nous avons utilisé une application géostatistique de krigeage intégré dans un environnement SIG. Ceci pour deux objectifs principaux : d'une part, vérifier la fiabilité des bathymétries extraites, et d'autre part, faciliter le choix de la méthode d'interpolation à utiliser. L'essentiel du travail est basé sur les étapes décrites sur l'organigramme méthodologique illustré sur la Figure 4.13 ci-après :

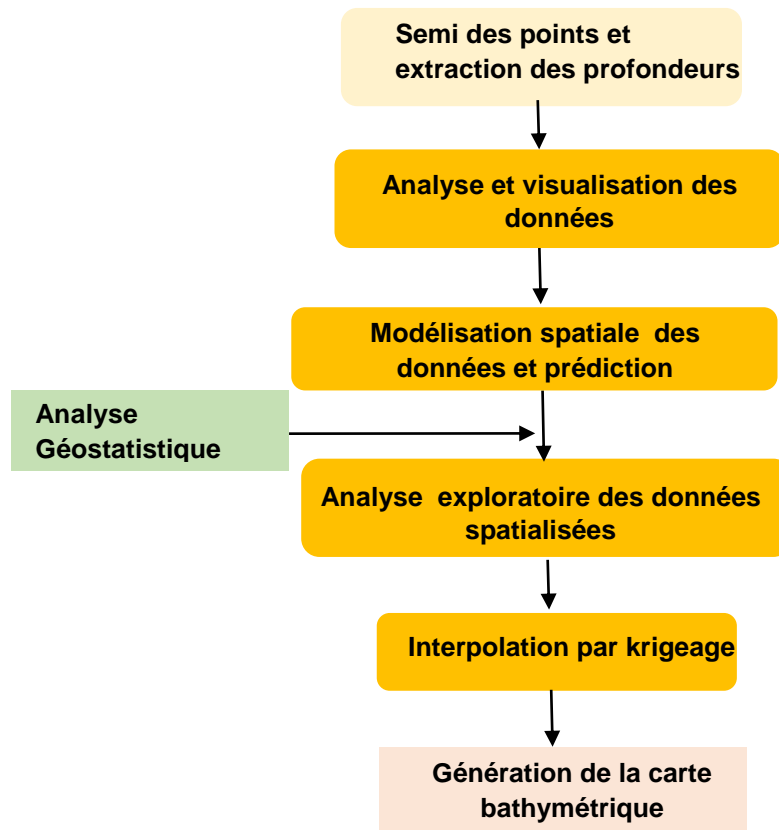


Figure 4. 13 : Organigramme méthodologique pour l'élaboration de la carte bathymétrique de la retenue du barrage oued Fodda.

4.6.2. Méthodes d'analyse géostatistique et choix d'une méthode d'interpolation

Les méthodes géostatistiques reposent sur des modèles statistiques qui ont la capacité de produire des surfaces de prévision, en permettent également d'obtenir une mesure de précision de ces prévisions. D'une manière générale, la géostatistique s'intéresse principalement, aux problèmes [90] :

- d'estimation de la valeur de la variable d'intérêt en des points dépourvus de mesure,
- d'évaluation de la valeur moyenne sur une surface du domaine d'étude à partir des mesures ponctuelles disponibles et de la connaissance de la structure spatiale du phénomène.

Parmi les méthodes d'interpolation gérées par le logiciel ArcGis, le krigeage constitue l'une des plus communément utilisé. C'est une procédure géostatistique avancée, qui génère une surface estimée à partir d'un ensemble dispersé de points avec des valeurs z . Cette méthode fonctionne mieux si les données sont

approximativement distribuées normalement. Il s'agit alors, initialement, de vérifier la normalité des points introduits.

4.6.2.1. Notion de champ et variable régionalisé

Une variable régionalisé est définie comme une fonction numérique prenant ses valeurs dans une région limitée, appelée champ (Figure 4.14) [90].

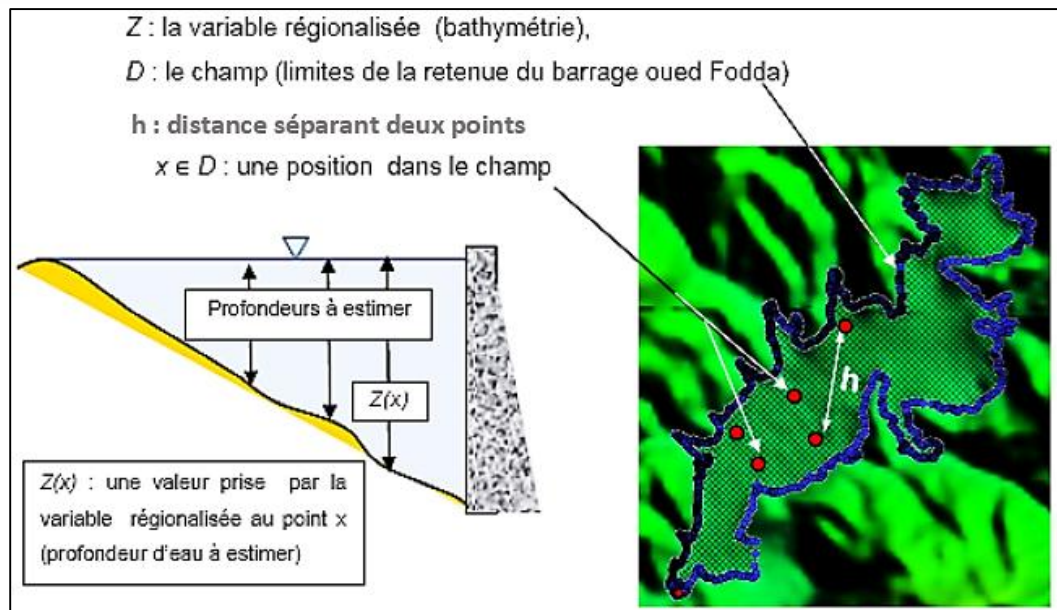


Figure 4. 14: Représentation schématique des notions champs et variables régionalisées.

On admet alors, les deux hypothèses suivantes :

- Si x_i est un emplacement géographique quelconque, tous les x_i ont une profondeur d'eau, $Z(x_i)$, à estimer.
- Si chaque profondeur d'eau (par rapport au fond de la retenue) est une variable aléatoire, $Z(x)$ sera une fonction aléatoire de x tel que $x \in D$ (à noter que x est un vecteur avec 3 composantes dans l'espace : latitude, longitude et profondeur).

4.6.2.2. Enquête sur la distribution des données et recherche des valeurs aberrantes

A. Histogramme

En admettant que notre variable Z (profondeur) constitue une variable aléatoire, et donc la distribution des différentes valeurs obéit à un phénomène aléatoire, l'histogramme (Figure 4.15) ci-après montre que notre série de données est

répartie en 10 classes autour d'une moyenne estimée à 11.05 m de profondeur. La proportion relative de données qui tombe dans chaque classe est représentée par la hauteur de chaque barre (fréquence).

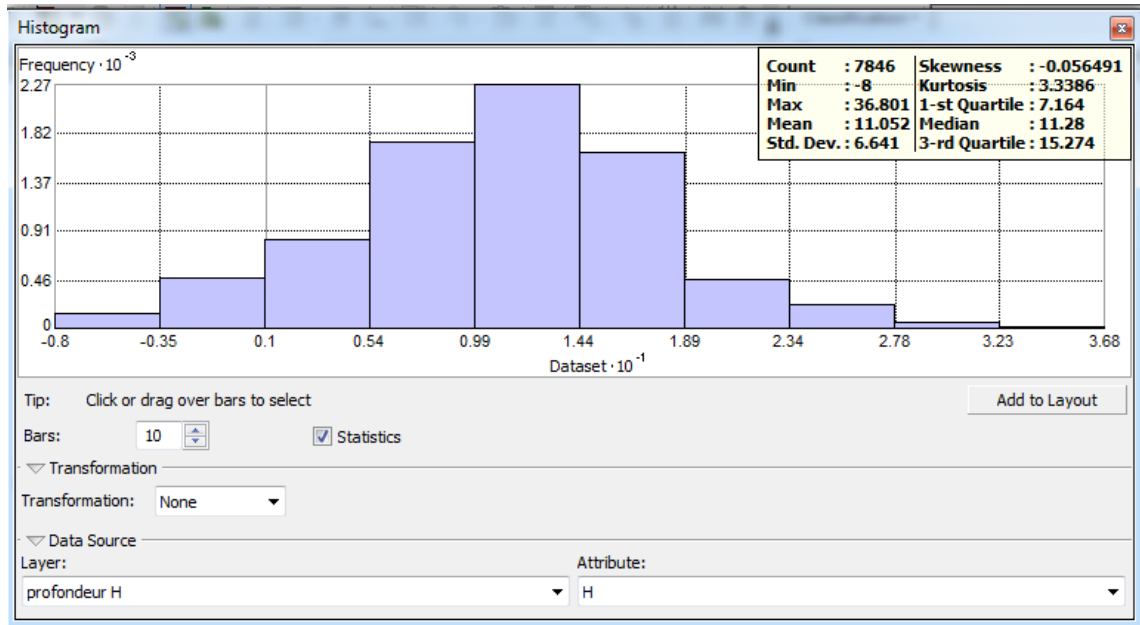


Figure 4. 155 : Histogramme de la distribution des valeurs des altitudes.

Les paramètres statistiques de notre distribution sont illustrés sur le tableau 4.4 suivant :

Tableau 4. 4 : Paramètres statistiques de la distribution des valeurs de la profondeur

Nombre de valeurs observées	7846
Profondeur minimale	< 8 m
Profondeur maximale	36.0801 m
Moyenne	11.052 m
Médiane	11.28 m
Coefficient de dissymétrie (Skewness)	-0.056491
Coefficient d'aplatissement (kurtosis)	3.3386
1 ^{er} quartile	7.164 m
3 ^{ème} quartile	15.274m

En se référant au tableau 4.4 ci-dessus, il apparaît que les variables (profondeurs) utilisées sont réparties d'une manière plus ou moins symétrique et uniforme autour de la moyenne avec un aplatissement assez faible par rapport à la courbe normale. 25% des valeurs sont inférieurs à 7.16 m alors que 25% sont supérieures à 15.27m, et donc 50% des valeurs sont concentrés autour d'une moyenne de 11.052m.

Cette dernière, représente la profondeur d'eau stockée dans la retenue du barrage oued Fodda pour le 02/Avril 2017.

B. QQ-Plot normal

Le diagramme QQ-Plot (Figure 4.16) est obtenu sur ArcGis, suite à l'exploration des données dans l'analyse statistique :

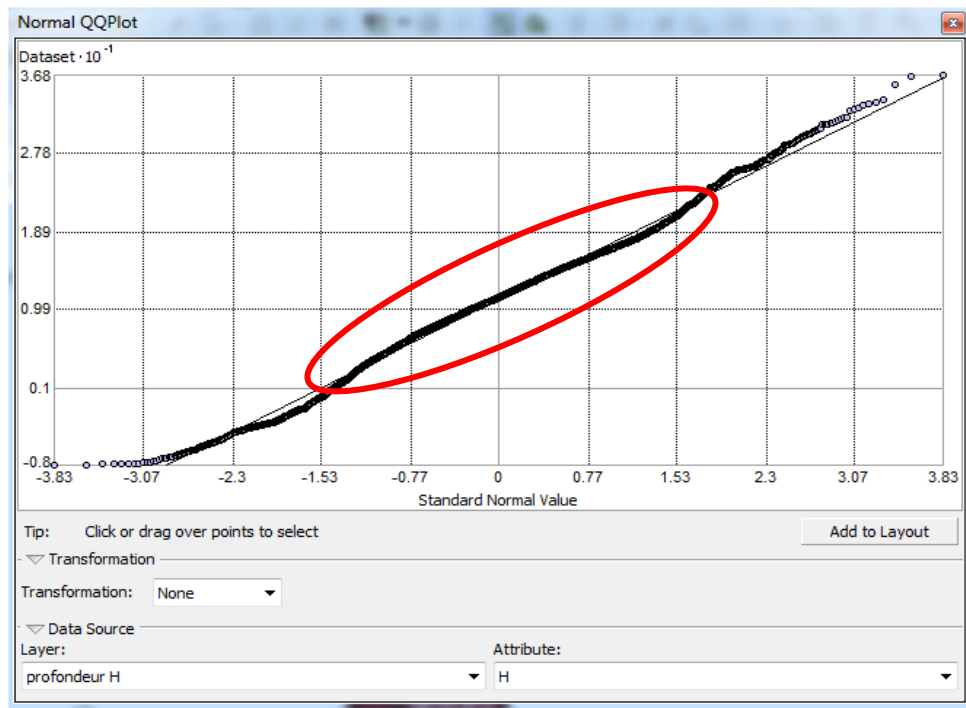


Figure 4. 166 : Diagramme QQ-Plot.

Sur le diagramme ci-dessus, les différents points distribués sont sur (ou très proches) de la droite théorique. Ce qui indique que notre distribution est non biaisée (normale). L'avantage du diagramme QQ-Plot, réside dans le fait qu'il est possible d'identifier et de corriger les points éloignés de la droite. (Figure 4.17).

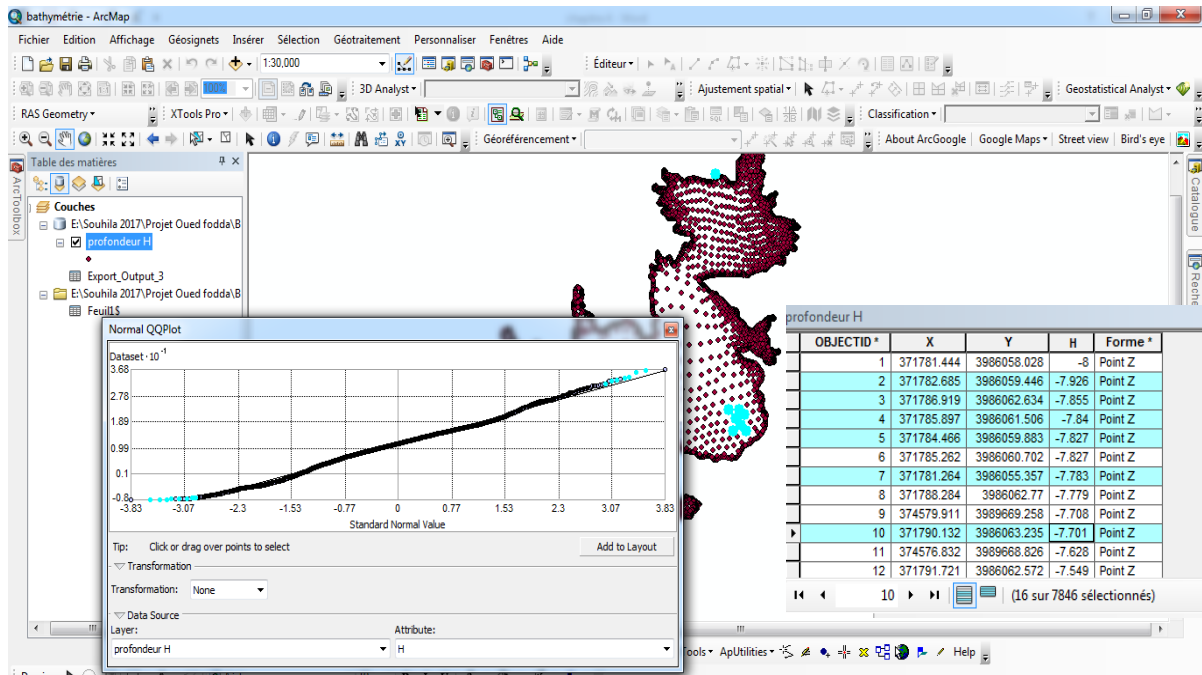


Figure 4. 17 : Identification et correction des points aberrants.

4.6.2.3. Visualisation de la corrélation spatiale dans (et entre) les ensembles de données (Semi-variogramme)

A. Variogramme et nuage variographique

Le variogramme est un outil de base de la géostatistique, indispensable à la mise en œuvre et au choix du modèle d'interpolation par krigeage [91]. Il reflète la structuration des valeurs en fonction de la distance les séparant. Il donne une description synthétique de la structure du phénomène étudié et permet en outre la liaison entre cette structure et la précision avec laquelle pourront être résolus les différents problèmes d'interpolation et d'estimation [92].

Théoriquement, le variogramme théorique est défini par un estimateur γ donné par [93]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var} [Z(x) - Z(x + h)] = \frac{1}{2} E [(Z(x) - Z(x + h))^2] \quad (4.1)$$

γ est la valeur du semi-variogramme des points qui ont une certaine distance (h) l'un vers l'autre.

$Z(x)$ est la valeur du point x ,

$Z(x + h)$: correspond à la valeur d'un point à la distance h du point x ,

(Les valeurs de la fonction Z , dans notre cas sont les profondeurs d'eau).

$\text{Var} [Z(x + h) - Z(x)]$: est la variance de la variable aléatoire $[Z(x + h) - Z(x)]$,

$E[(Z(x + h) - Z(x))^2]$: représente l'espérance quadratique de la variable aléatoire

Le nuage variographique, qui est un outil d'exploration et de description de la variabilité spatiale, permet de représenter, pour chaque point du nuage, la différence au carré entre les mesures obtenues à deux endroits différents. Les valeurs élevées du nuage variographique à petite distance mettent souvent en évidence des échantillons anormaux [94]. La surface variographique est une autre représentation du variogramme expérimental qui renseigne sur la valeur moyenne de ce dernier pour une direction et une distance donnée ; ce mode de représentation se justifie pour identifier les anisotropies [95].

Après visualisation des points des points sur ArcGis, nous avons utilisé l'application « Geostatistical Analyst ». Un nuage de points (4.18) est obtenu. Ce dernier montre initialement les points qui présentant une variabilité élevée à une petite distance.

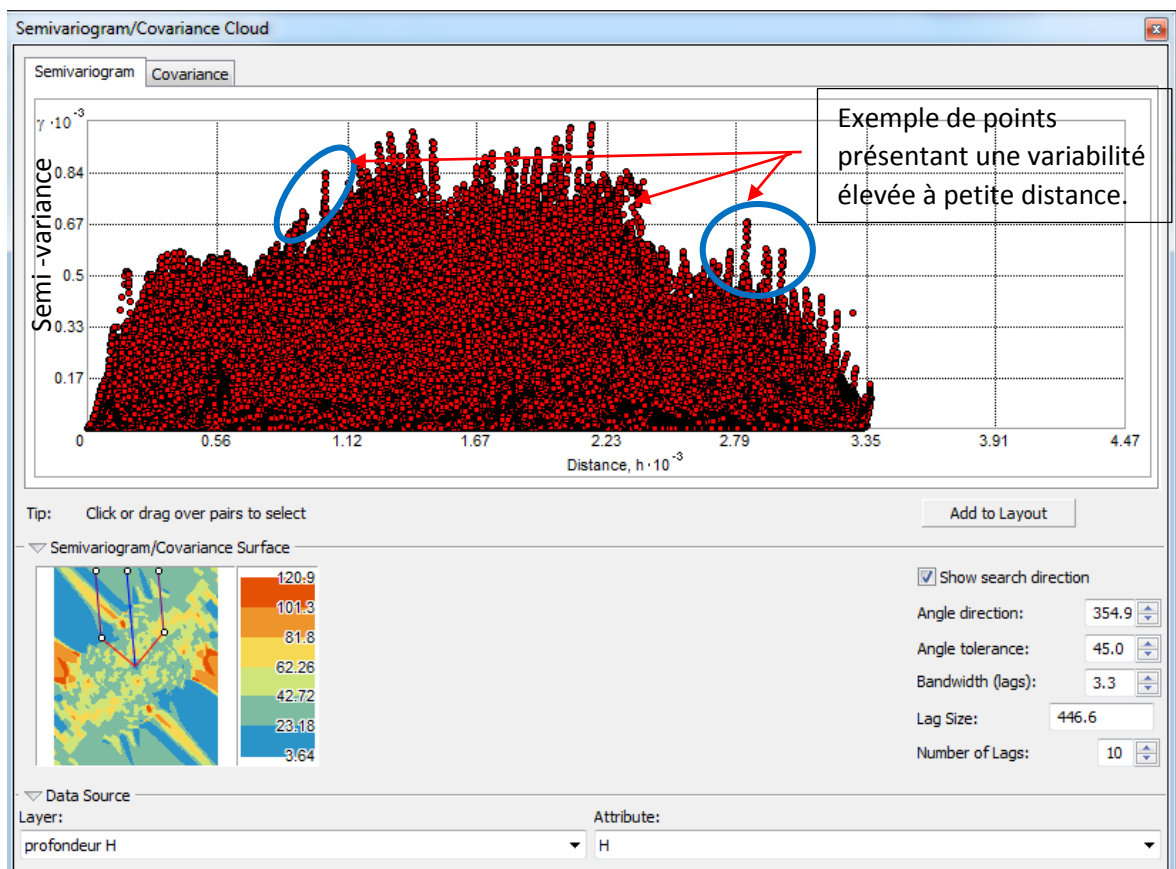


Figure 4. 18 : Nué variographique.

B. Adaptation du modèle et ajustement

La variation spatiale de la couverture « bathymétrie » est quantifiée par l'étude du semi-variogramme. Ce dernier peut être décrit par trois paramètres : la pépité, le pallier et la portée (Figure 4.19).

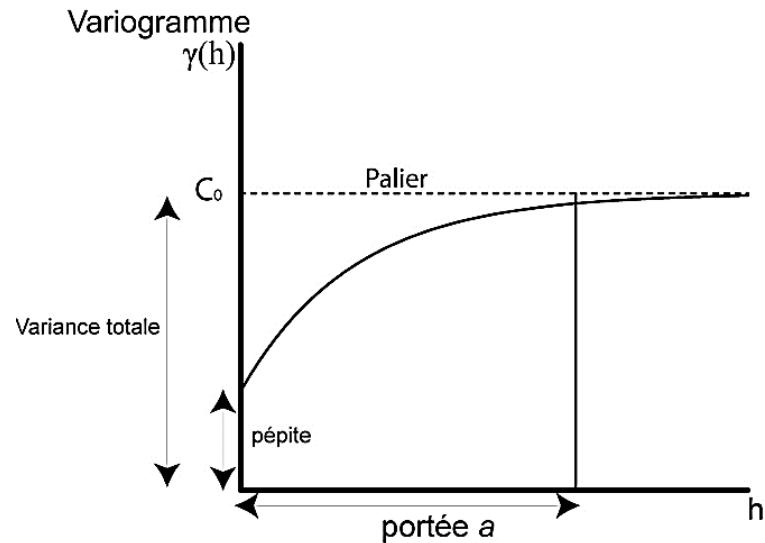


Figure 4. 19: Paramètres du variogramme [96].

Pépite C_0 : est la variation à très courte échelle, elle est généralement due à des erreurs de localisation, des erreurs d'analyse et précision analytique [93]

Portée a : est la distance à partir de laquelle le variogramme atteint son palier. À cette distance, la valeur du variogramme correspond à la variance de la variable aléatoire [93].

Palier $\sigma^2 = C_0 + C$: est l'écart le plus grand, en moyenne entre deux variables aléatoires. Il correspond au plateau atteint par le variogramme [93].

Le semi variogramme peut être de plusieurs types. Parmi les plus couramment utilisés : sphérique, exponentiel, gaussien et linéaire. Le modèle sélectionné (choisi) influence la prévision des valeurs inconnues. Chacun est conçu de façon à s'adapter plus précisément, à différents types de phénomènes. Ces modèles sont données par les expressions mathématiques ci-dessous, et sont représentées graphiquement sous forme de courbes (Figure 4.20) :

$$\text{- Modèle linéaire : } \gamma(h) = C_0 + bh \quad h > a \quad (4.2)$$

$$\text{- Modèle Exponentiel : } \gamma(h) = C_0 + C \cdot \left[1 - e^{-\frac{h}{a}} \right] \quad h > 0 \quad (4.3)$$

$$\text{- Modèle sphérique : } \gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \cdot \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & h \leq a \\ C_0 + C & \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\text{- Modèle Gaussien : } \gamma(h) = C_0 + C \cdot \left(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right) \quad h > 0 \quad (4.5)$$

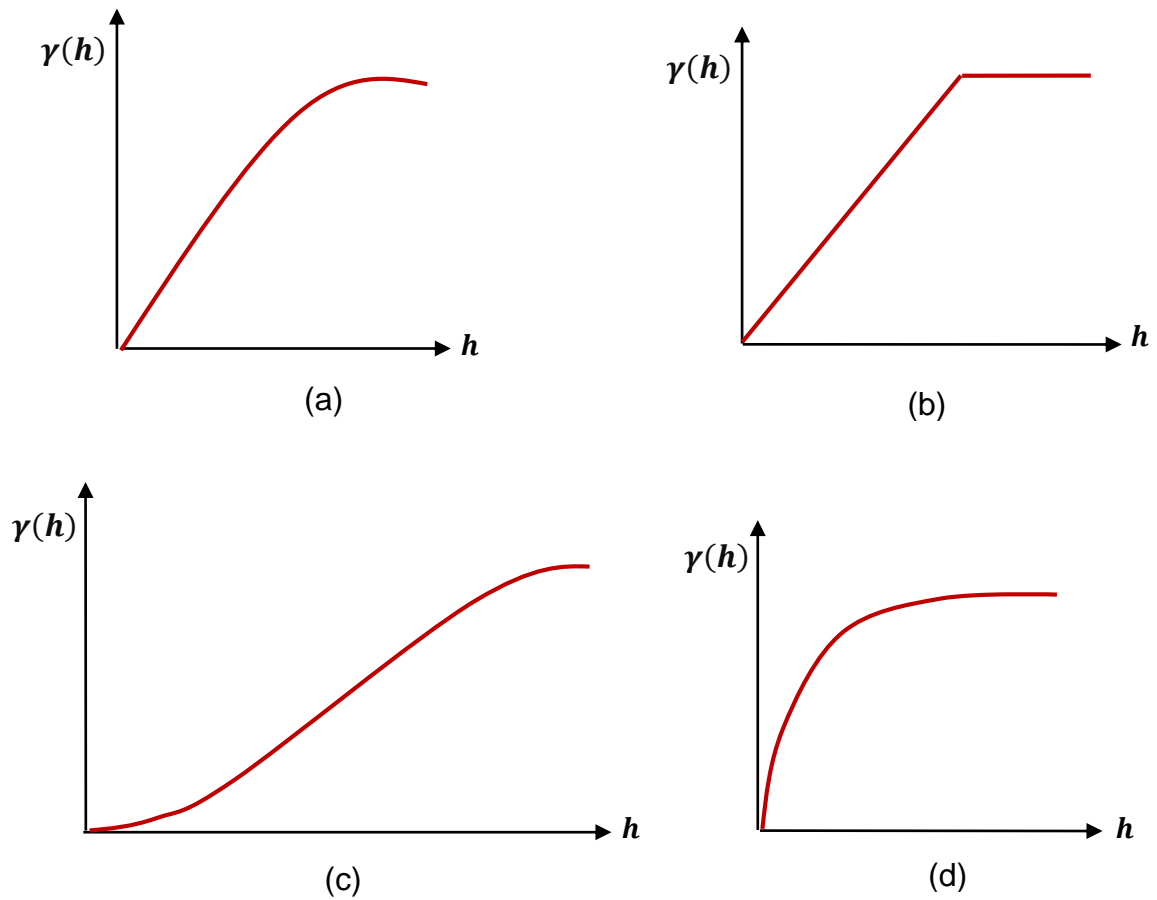


Figure 4. 20 : Modèles mathématiques d'un variogramme.

(a) Sphérique, (b) Exponentiel, (c) Gaussien, (d) linéaire

Trois modèles ont été testés sur ArcGis : sphérique, exponentiel et Gaussien. Les résultats obtenus sont représentés sur les Figures 4.21, 4.22 et 4.23 respectivement.

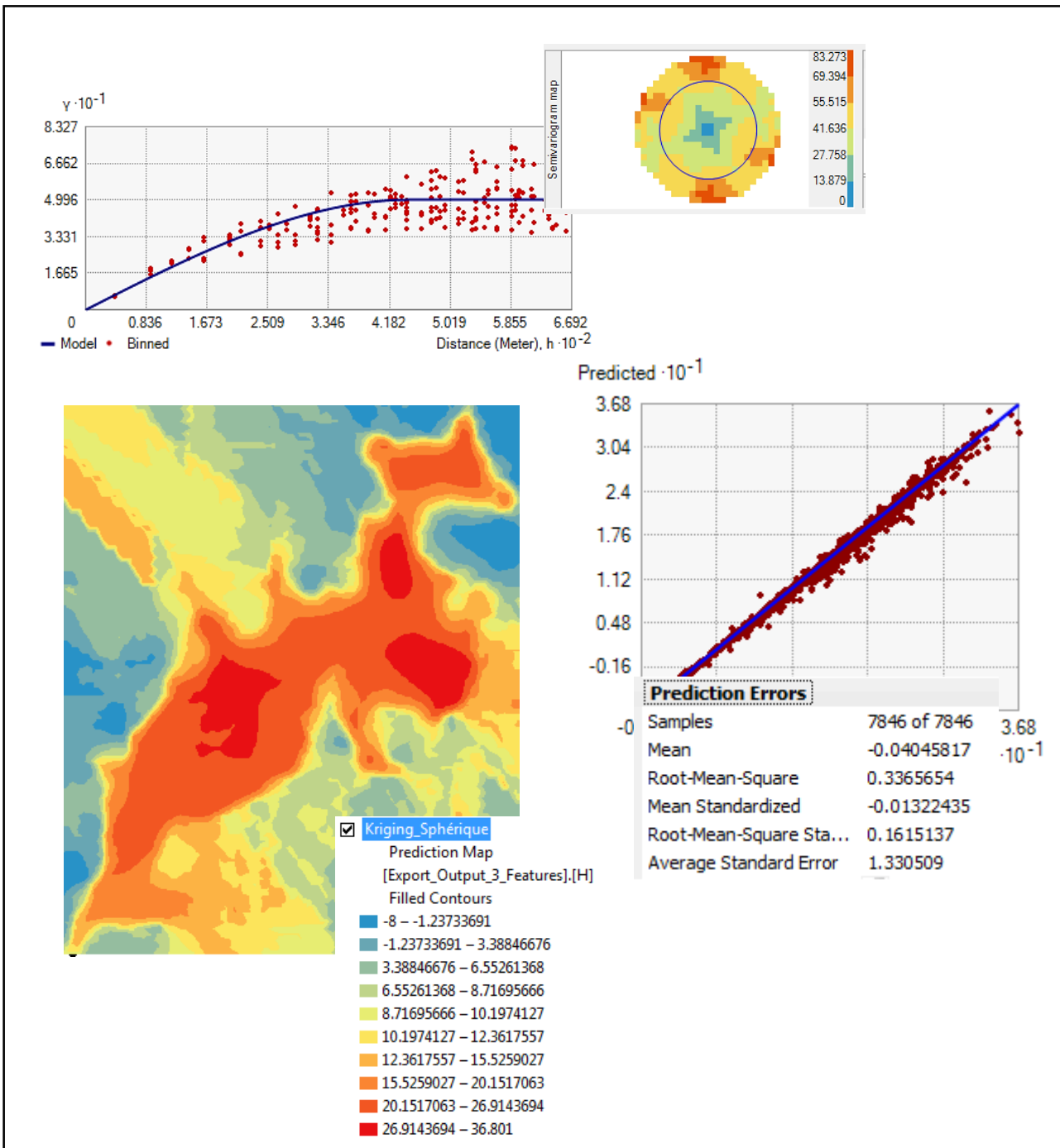


Figure 4. 21 : Semi variogramme : Modèle sphérique.

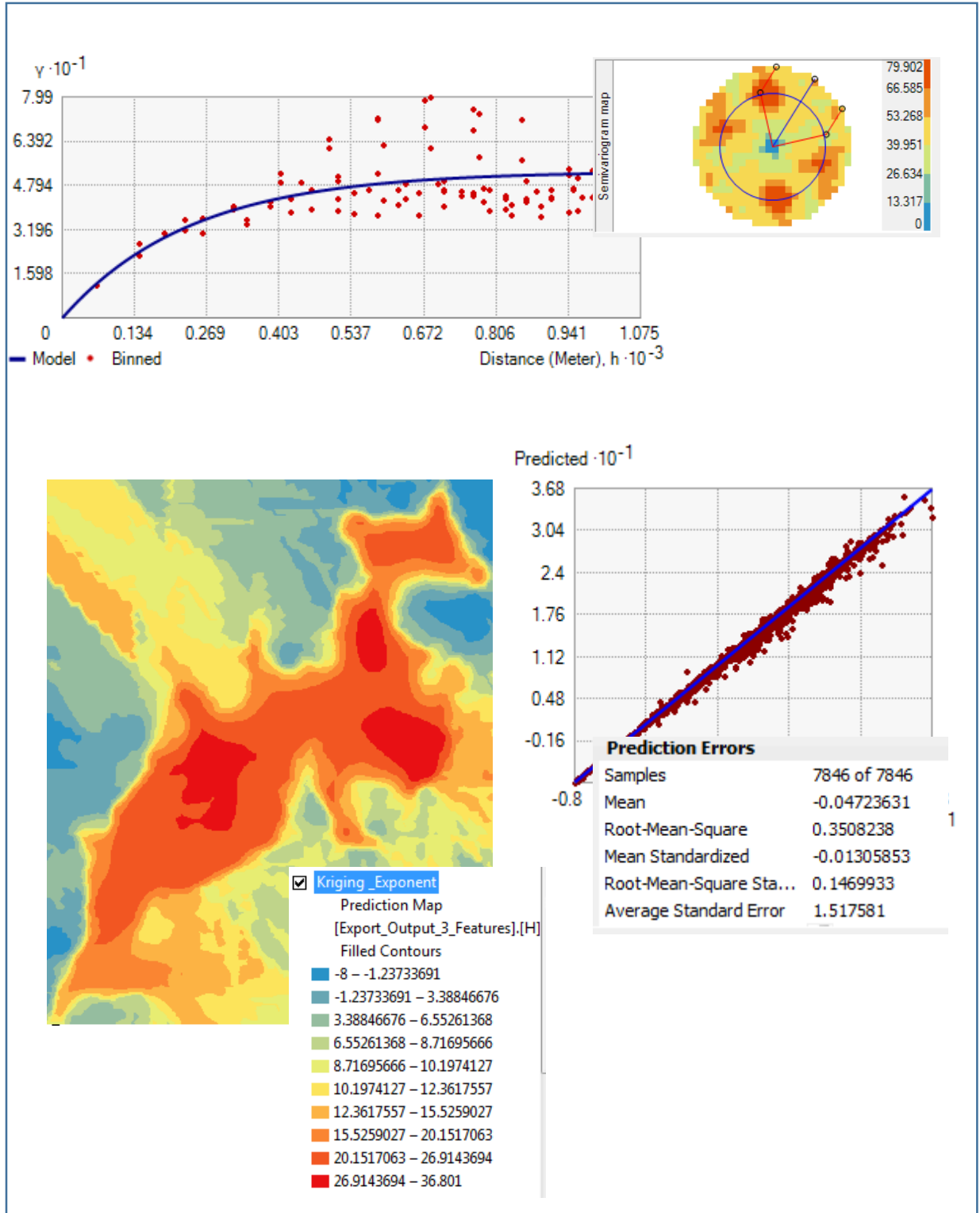


Figure 4. 22: Semi variogramme : Modèle Exponentiel.

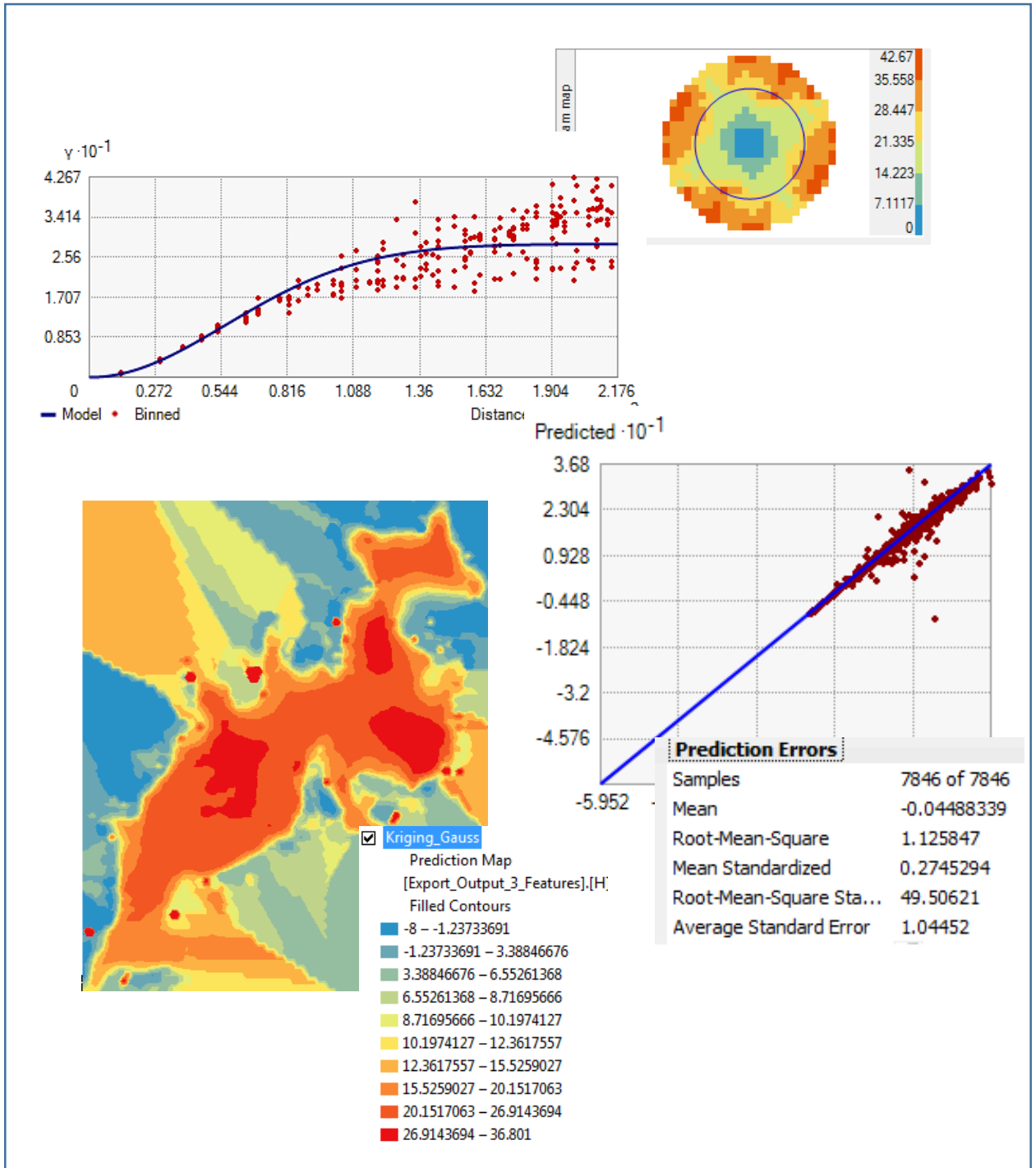


Figure 4. 23 : Semi variogramme : Modèle Gaussien.

4.7. Comparaison et validation

L'effet de pépite représente une discontinuité du variogramme à l'origine et traduit une forte irrégularité du processus des variations locales. Pour les trois modèles testés, le semi variogramme passe par l'origine, par conséquent, l'ajustement est bon et les erreurs liés à des sources de variations spatiales sont éliminés ou sont nettement très faible. Le meilleur résultat a été obtenu par le modèle sphérique. Ce dernier serait donc retenu pour lancer l'opération d'interpolation.

4.8. Edition de la carte bathymétrique

L'interpolation a été réalisée à l'aide de l'outil Krigeage ordinaire sur ArcGis, en tenant compte du modèle d'ajustement sphérique du semi-variogramme. Le résultat final obtenu après différents traitements, est une carte de surface pour laquelle, une légende de 4 classes, est associée par défaut. Cette carte a été reclassifiée en nombre de six, et complétées par des lignes isobathes à travers lesquelles, les profondeurs d'eau sont identifiées. La classe minimale correspond aux zones dont la profondeur d'eau est inférieure à 7m. Cette valeur peut être encore détaillée en augmentant le nombre de classes. Dans ce cas, les profondeurs obtenues, peuvent être négatives ou égale à 0. Ces zones correspondent soit à des valeurs non identifiées, ou à des zones masque (des terres) dépourvu d'eau. La carte bathymétrique finale est représentée sur la Figure 4.24.

4.9. Conclusion

Dans ce chapitre une analyse bathymétrique de la retenue du barrage oued Fodda a été effectuée. Ce dernier est exposé à un phénomène d'envasement très accéléré. En effet, la perte de la capacité moyenne annuelle des 18 dernières années (1986-2004) a été évaluée à environ 1.66 hm³/an et le taux d'envasement de la retenue est estimé alors à 54.29 %. Une approche géostatistique a été utilisée dont l'objectif est l'élaboration de la carte bathymétrique. Trois modèles statistiques ont été testés sur ArcGis : Gaussien, exponentiel et sphérique. Ce dernier a été retenu pour lancer l'opération d'interpolation à l'aide de l'outil Krigeage ordinaire sur ArcGis suite à l'observation du semi variogramme. La carte finale élaborée comprend 6 classes dont la profondeur d'eau minimale est inférieure à 7m et la profondeur maximale a été évaluée à environ 37 m. La valeur finale de la profondeur d'eau moyenne stockée dans la retenue du barrage oued Fodda pour le 02/Avril 2017 a été estimée à environ 11.052 m.

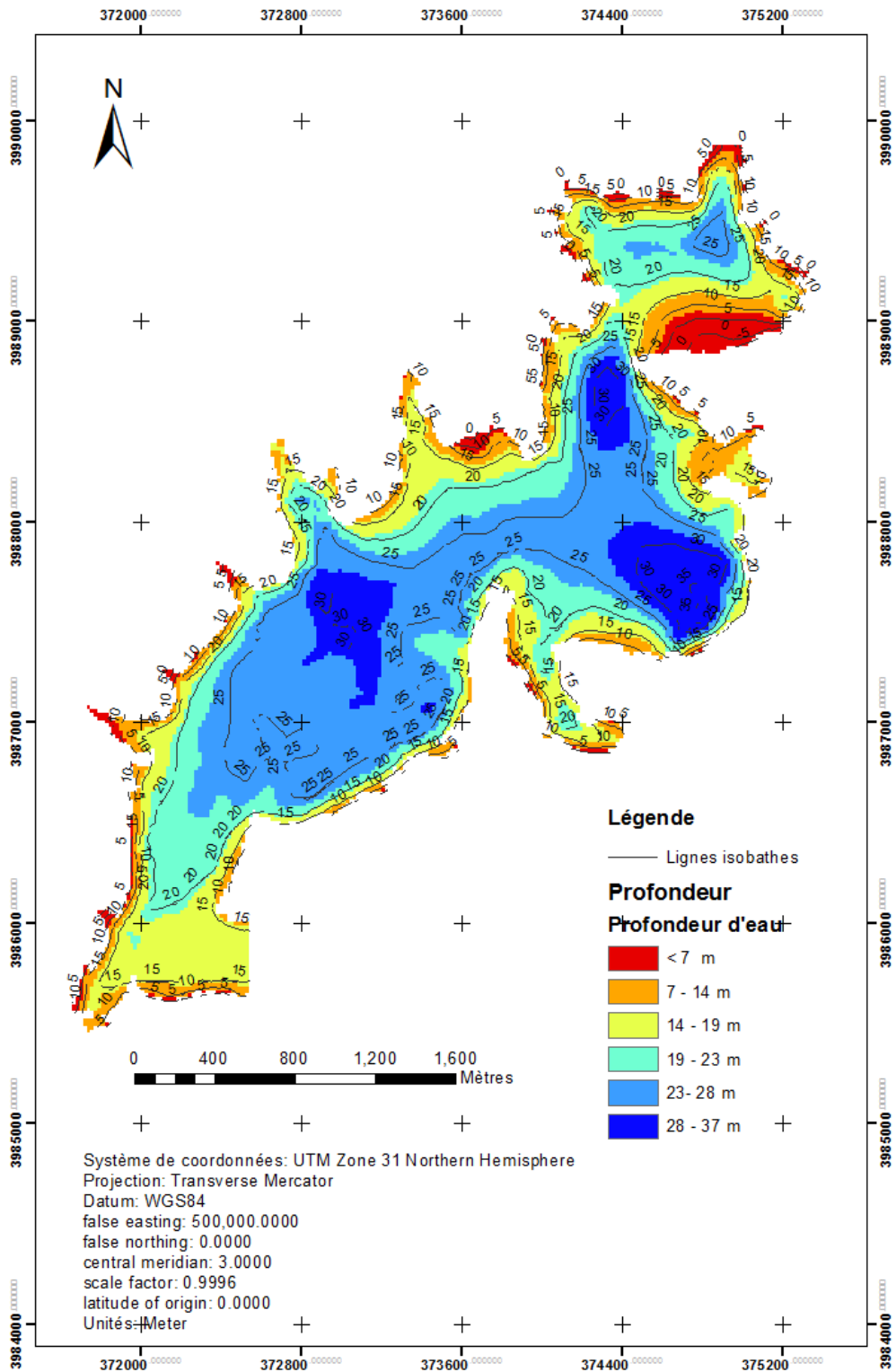


Figure 4.24 : Carte bathymétrique de la retenue du barrage Oued Fodda.

CHAPITRE 5

EVOLUTION DES DEPOTS DES SEDIMENTS DANS LA RETENUE DU BARRAGE OUED FODDA

5.1. Introduction

Le fond de la retenue du barrage Oued Fodda a connu une évolution importante ces dernières années, en raison de l'énorme quantité de sédiments déposés. Le processus érosif est à l'origine où, une forte production des sédiments a été identifiée au niveau du bassin versant, en amont du barrage [7]. Le phénomène d'envasement s'accélère chaque année et la forme de la retenue se modifie constamment, d'une année à une autre. Ce présent chapitre se divise en deux parties. Dans la première (A), une approche de modélisation a été choisie pour étudier le comportement du transport des sédiments à l'amont et au niveau du barrage oued Fodda par utilisation du logiciel HEC-RAS [97]. La masse totale des sédiments et également la concentration seront particulièrement calculées sur la base des données des apports liquides journaliers, obtenues au sein la direction du barrage oued Fodda pour l'année 2016. La seconde partie (B) portera sur l'étude de l'évolution des dépôts depuis l'année des derniers levés 2004 jusqu'à 2017 par intégration des systèmes d'information géographique (SIG). Dans cette partie les zones d'érosion et de sédimentation dans la retenue seront identifiées, par conséquent, les volumes et les surfaces correspondantes seront calculés.

PARTIE 1

SIMULATION DU TRANSPORT SOLIDE AU NIVEAU DU BARRAGE OUED FODDA PAR LE LOGICIEL HEC-RAS

5.2. Présentation du logiciel HEC-Ras

HEC-RAS est un logiciel intégré pour l'analyse et la simulation hydraulique des écoulements à surface libre. Élaboré par le corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis, ce code a été utilisé dans plusieurs formes d'ingénieries et d'organismes gouvernementaux [98]. Ce système de modélisation mathématique et hydraulique est basé sur quatre fonctions principales :

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

Pour les écoulements permanents, la procédure de calcul du logiciel HEC-RAS est basée sur la solution de l'équation de conservation de l'énergie à une dimension. Les pertes d'énergie sont évaluées par les frottements et les effets de contraction / expansion. L'équation de la quantité de mouvement est également utilisée dans les situations d'écoulement rapidement varié, par exemple au niveau de ressauts hydrauliques, de ponts et de confluences. Pour les écoulements non permanents, le logiciel résout l'ensemble dynamique des équations de Saint-Venant par la méthode des différences finies. 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 (Figure 5.1).

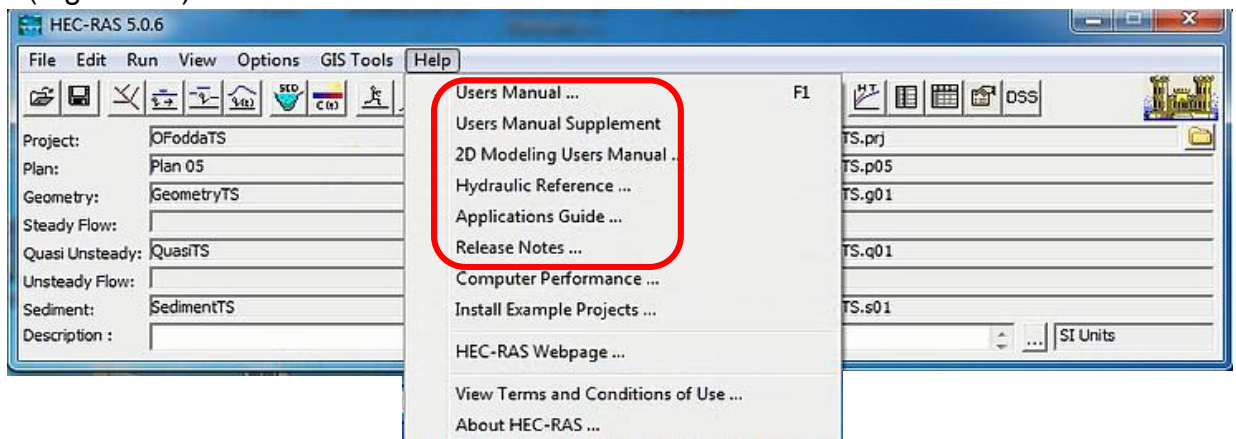


Figure 5.1 : Fenêtre principale du Logiciel HEC RAS.

5.3. Analyse du transport des sédiments sous HEC RAS

5.3.1. Principe de calcul

HEC-RAS permet de calculer la capacité du transport sédimentaire associée à chaque section transversale en tant que volume de contrôle et pour toutes les tailles de grains (Figure 5.2).

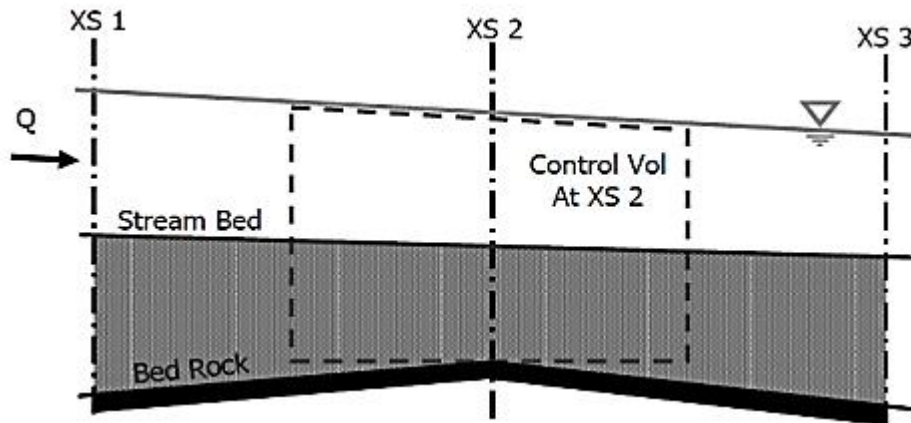


Figure 5.1: Volume de contrôle utilisé dans les calculs de sédiments dans HEC-RAS [99].

Le principe est basé sur le concept de conservation de la masse et de l'équation de continuité des sédiments, également connue sous le nom d'équation d'Exner donnée sous la forme [100] :

$$(1 - \lambda_p)B \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x} \quad (5.1)$$

où :

λ_p : porosité de la couche active

B : largeur du canal [m].

η : altitude du canal [m].

Q_s : charge sédimentaire transportée [m³/s].

x : distance [m].

t : temps [s].

L'équation ci-dessus indique que la variation du volume des sédiments dans un volume de contrôle est égale à la différence entre les charges entrantes et sortantes. L'équation de continuité des sédiments est résolue en calculant la capacité de transport des sédiments au moyen du volume de contrôle associé à chaque section transversale [99].

5.3.2. Paramètres d'entrée du modèle

Pour calculer le transport des sédiments à l'amont et au niveau du barrage oued Fodda, trois fichiers de données d'entrées sont nécessaires :

- données géométriques relatives à chaque section,
- données d'écoulement et conditions aux limites,
- données des sédiments.

5.3.1.1. Données géométriques « Geometric data »

Les données géométriques dans HEC-RAS consistent à relier les sections sur tout le tronçon de l'oued et créer le schéma du système fluvial. Ce fichier de données contient toutes les informations géométriques du tronçon modélisé, soit les sections transversales, leurs élévations et leurs distances, et les coefficients de Manning. La géométrie du tronçon étudié a été créée initialement sous ArcGis en utilisant une forme de données géographiques numériques vectorielles « TIN » (Figure 5.3) extraite à partir de l'image Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) du bassin versant Oued Fodda. Ces données sont par la suite exportées par l'intermédiaire du logiciel HEC-Georas, un module d'ArcGis permettant l'interopérabilité avec HEC-RAS. Elles peuvent être également exportées vers Google Earth afin de vérifier les élévations de chacune des sections transversales et les distances considérées par rapport à la digue du barrage oued Fodda (Figure 5.4). Une fois importées sur HEC-RAS le profil en long (Figure 5.5) peut être facilement affiché et également le profil en travers de chacune des sections transversales.

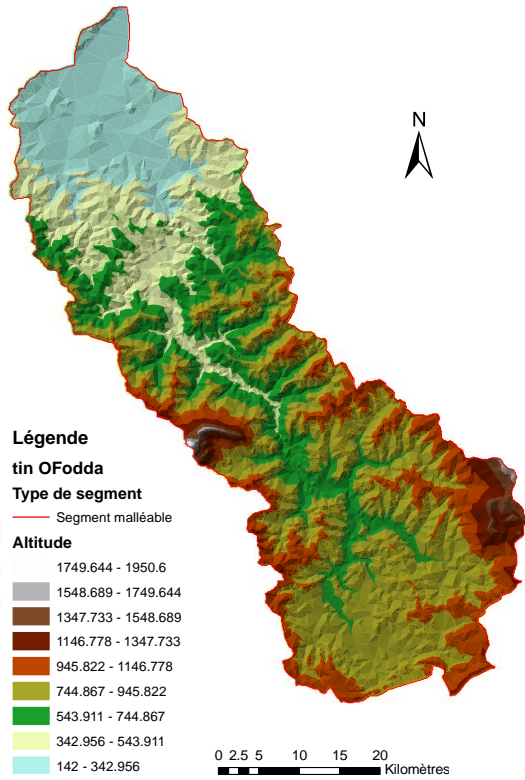


Figure 5.2: Réseau triangulé irrégulier (Tin) du bassin versant d’oued Fodda.

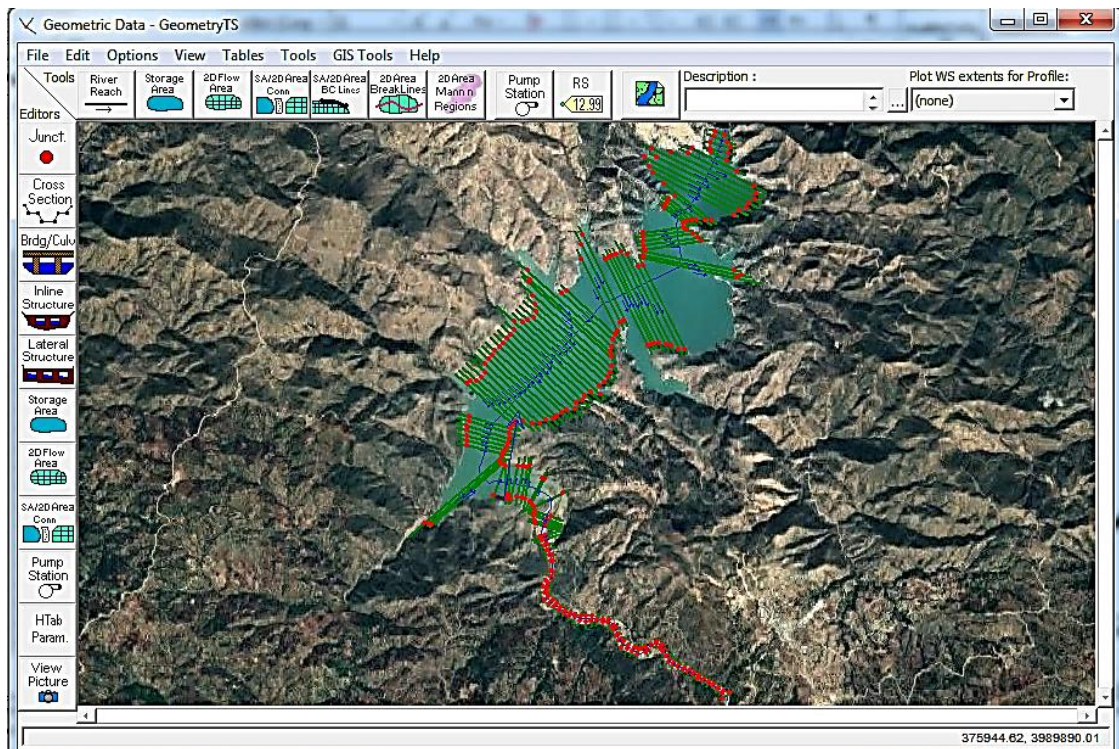


Figure 5.3 : Fenêtre des données géométriques visualisées à travers une image Google Earth.

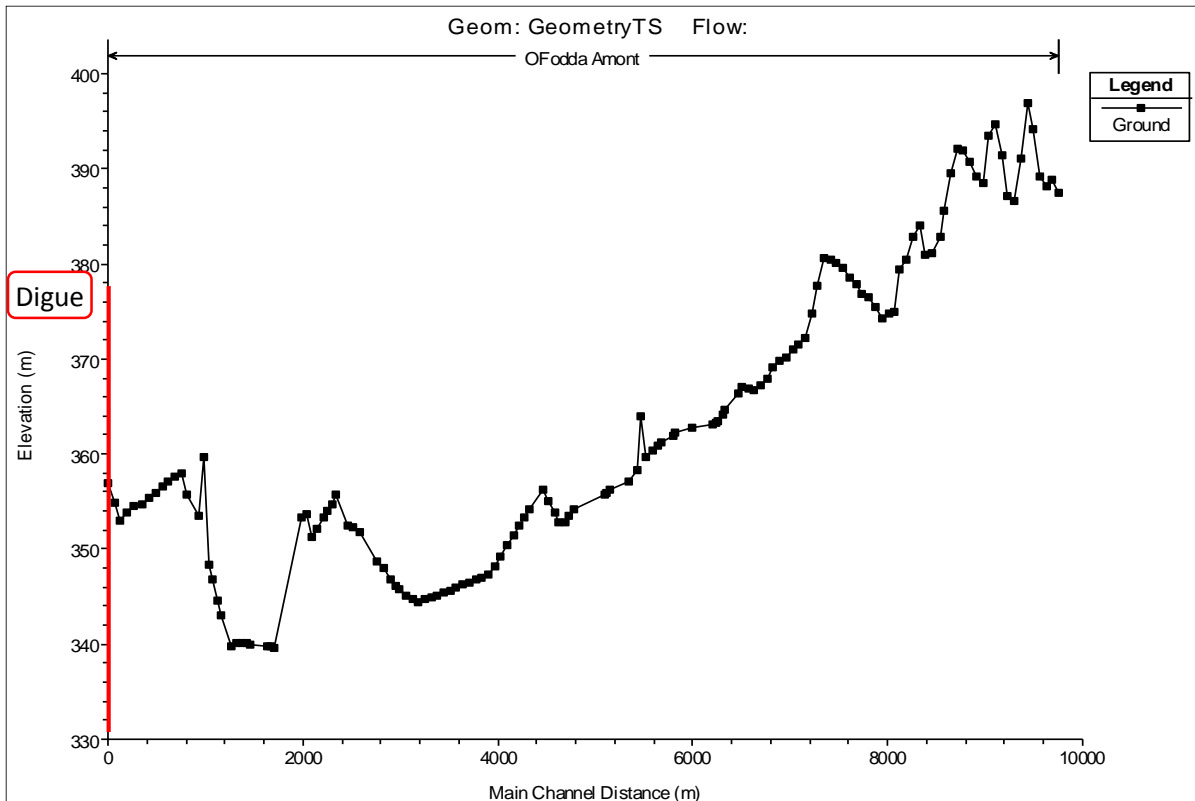


Figure 5.4 : Profil en long du tronçon étudié.

Le tronçon modélisé consistait en une longueur d'environ 9999 m subdivisée en 141 stations fluviales distantes d'environ 70 m. La section transversale 69 est située à l'extrémité aval, à l'amont immédiat de la digue du barrage oued Fodda à une distance d'environ 50 m (Figure 5.6). Cependant la section 9945 est située à l'extrémité amont. Elle est considérée comme étant la 1^{ère} section du tronçon de l'oued Fodda amont (Figure 5.7).

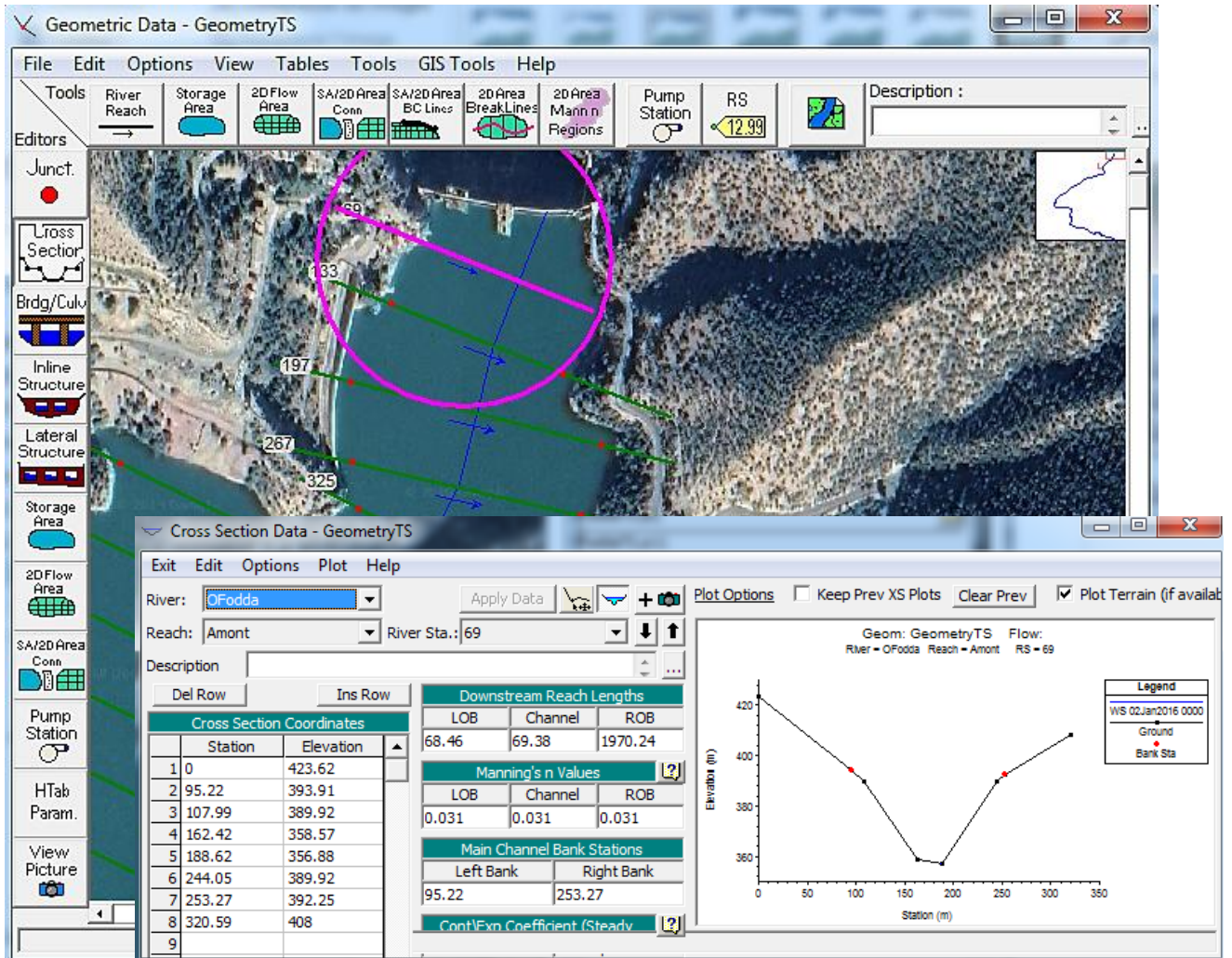


Figure 5.5 : Caractéristiques de la section transversales (69) à l'amont immédiat de la digue du barrage oued Fodda.

La fenêtre RAS Mapper sur HEC-RAS peut également visualiser chacune des sections transversales en choisissant une image arrière-plan (Google Earth, SRTM...) en précisant les caractéristiques de chacune (Figure 5.7).

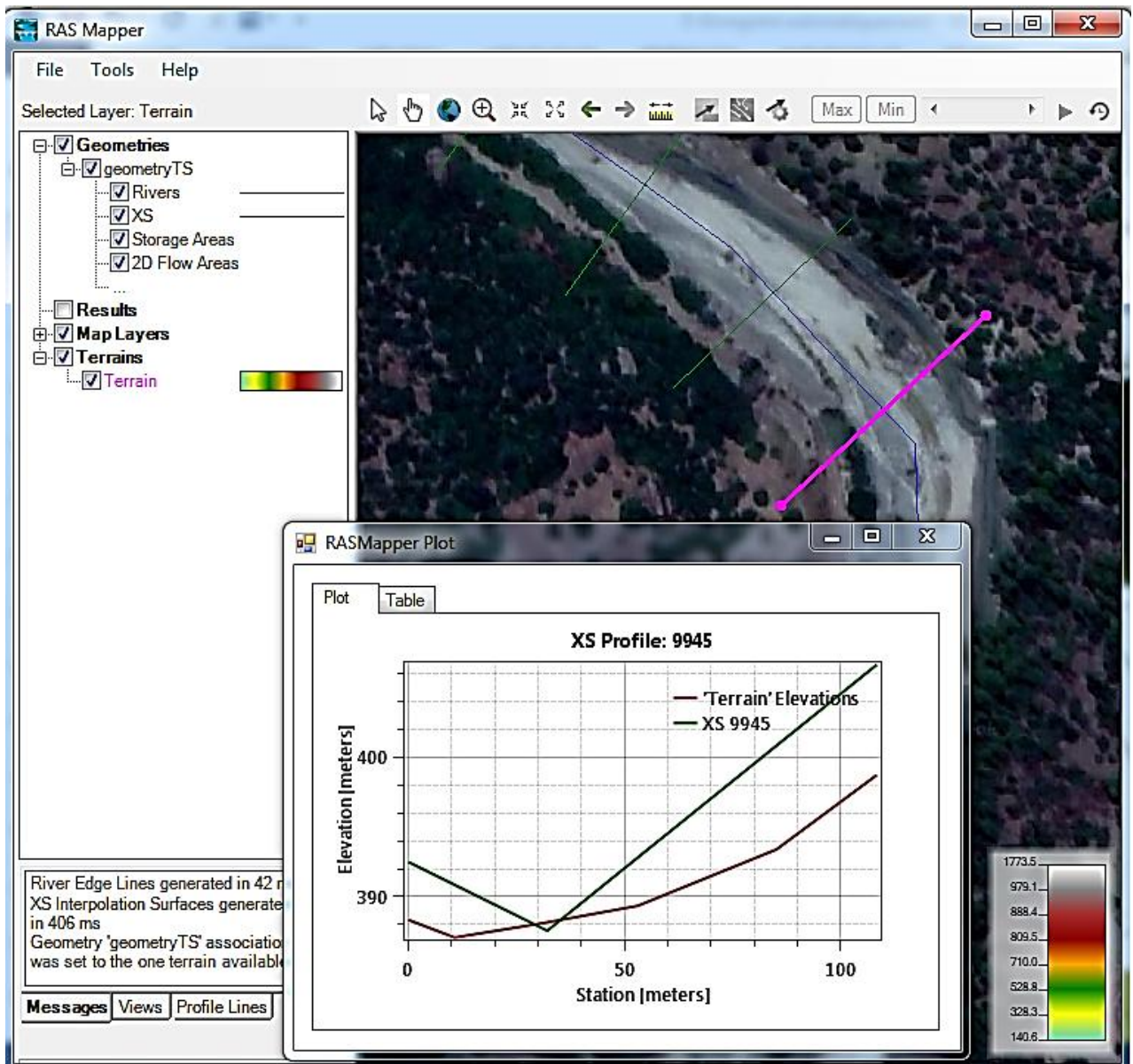


Figure 5.6: Profil en travers de la 1ère section transversale de l’oued Fodda visualisé sur RAS mapper à travers une image Google Earth.

- **Ajustement du coefficient de Manning**

Le coefficient de Manning est le paramètre le plus important à ajuster dans l’étalonnage du modèle HEC-RAS. Il permet de définir le caractère plus ou moins rugueux du lit et diminue avec l’augmentation du débit et de la profondeur. En effet, l’utilisation d’un seul coefficient de Manning pourrait ne pas être suffisante et adéquate pour représenter la rugosité réelle d’une rivière dans différentes conditions d’écoulement [101]. Un examen de la littérature a montré que la détermination de l’érosion et des dépôts dans la section transversale d’une rivière est basée sur le choix de la formule de transport des sédiments et le coefficient de rugosité de Manning [102].

Aucun modèle ne produira un accord à 100% avec les résultats réels en raison d'hypothèses dans les données ou limitations du modèle. Cependant, pour aller plus loin, une correspondance raisonnable entre les valeurs observées et les résultats du modèle doivent être atteinte [100]. Pour notre modèle, l'ajustement du coefficient de Manning est effectué suite à la simulation hydraulique de l'écoulement instable sur une période allant du 01 Janvier 2016 jusqu'au 30 Avril 2016. Le processus d'étalonnage est basé sur la comparaison des élévations de la surface de l'eau (WSEI) liées aux débits mesurés et aux débits de sorties calculés par le logiciel HEC RAS. Les valeurs des débits liquides observées (mesurés) sont basées sur les apports liquides journaliers obtenus au sein de la direction du barrage oued Fodda durant la période considérée. Plusieurs valeurs de rugosité ont été testées : 0.030, 0.031, 0.032, 0.033, 0.034 et 0.035 et la valeur de Manning retenue (pour laquelle l'erreur est minimale) est égale à 0.031.

5.3.1.2. Données de l'écoulement et conditions aux limites

La simulation du transport des sédiments commence par la création d'un fichier d'écoulement quasi instable. L'approche quasi-instable se rapproche d'un hydrogramme d'écoulement par une série de débits constants associés à des durées d'écoulements correspondantes. Deux conditions aux limites sont considérées (figure 5.8) :

- a) la première est choisie au niveau de la 1^{ère} section transversale de l'oued Fodda (section 9945). Pour cette condition les données des apports liquides journaliers observés à l'amont du barrage ont été introduites avec un pas de temps fixé à 12 jours en considérant la durée de la simulation qui s'étale du 01 Janvier 2016 jusqu'au au 30 Avril 2016.
- b) la 2^{ème} condition limite est choisie à l'extrémité aval juste à l'amont de la digue du barrage oued Fodda. Elle correspond tout simplement à la valeur de la pente moyenne (0.0242) au niveau de la section transversale considérée (section 69).

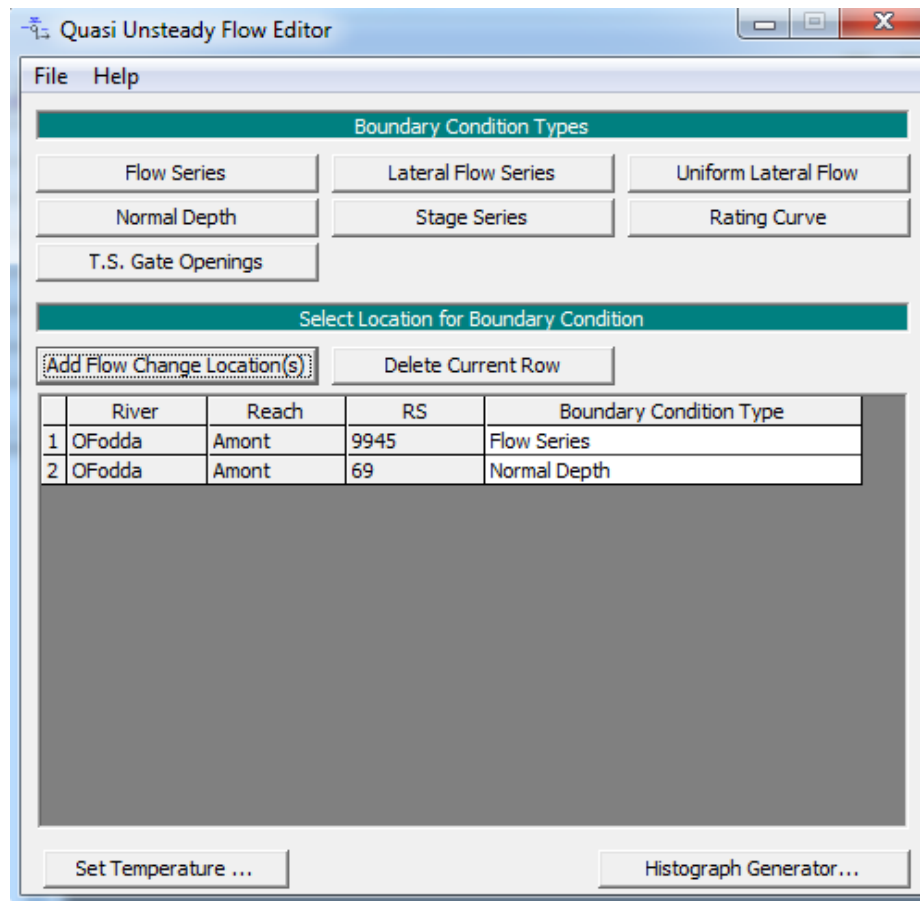


Figure 5.7: Fenêtre HEC-RAS pour la définition des conditions aux limites de l'écoulement quasi instable.

Une fois les données d'écoulement quasi-instable sont introduites, l'hydrogramme de crue peut être affiché (Figure 5.9). Il apparaît clairement l'existence de deux crues importantes durant le mois de Mars 2016. La première est celle observée le 12 Mars, correspondante à un débit d'environ $27 \text{ m}^3/\text{s}$, et la 2^{ème} est observée le 20 Mars avec un débit estimé à $20.66 \text{ m}^3/\text{s}$.

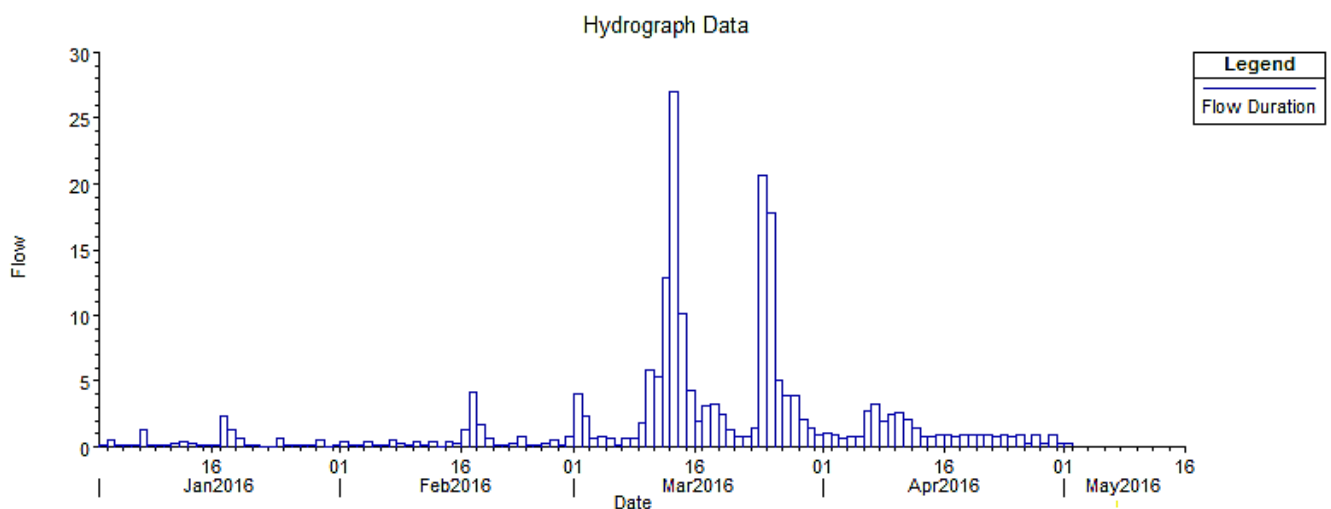


Figure 5.8: Hydrogramme de crue.

5.3.1.3. Données des sédiments

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

- A. conditions initiales et paramètres de transport,
- B. gradation du lit,
- C. conditions aux limites des sédiments.

A. Conditions initiales et paramètres de transport

Dans cette partie trois autres éléments d'entrée sont à définir :

- A.1. Fonctions du transport,
- A.2. Fonctions d'évolution du lit sédimentaire,
- A.3. Vitesse de sédimentation.

A.1. Fonctions du transport

Différentes formules de transport sont utilisées par le logiciel HEC-RAS :

- **Ackers & White**

Ackers & White ont établi une formule qui exprime la charge totale des sédiments. Elle est développée pour les sols non cohésifs dont la taille des grains varie de 0,04 mm à 7 mm et pour des écoulements correspondant à des nombres de Froude inférieurs à 0,8. Elle s'écrit sous la forme [103] :

$$q_s = q \cdot G_{gr} \cdot \frac{d}{h} \cdot \left(\frac{u_*}{U}\right)^n \quad (5.2)$$

q : débit liquide, h : hauteur d'eau, U : vitesse moyenne de l'écoulement u_* : vitesse de frottement, n : exposant apparent du changement de la taille des sédiments.

G_{gr} : fonction de transport adimensionnelle donnée par :

$$G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1\right)^m \quad (5.3)$$

F_{gr} : paramètre adimensionnel de mobilité

$$F_{gr} = \frac{u_*^n}{[g \cdot d \cdot (s - 1)]^{1/2}} \left[\frac{V}{\sqrt{32} \cdot \log\left(\frac{10 \cdot D}{d}\right)} \right]^{1-n} \quad (5.4)$$

i : pente de l'écoulement et d : diamètre des particules

$$u_* = \sqrt{g \cdot D \cdot i} \quad (5.5)$$

$$n = \begin{cases} 1 & \text{Si : } d_{gr} \leq 1 \\ (1 - 0.56 * \log d_{gr}) & \text{Si : } 1 < d_{gr} \leq 60 \\ 0 & \text{Si } d_{gr} > 60 \end{cases} \quad (5.6)$$

$$d_{gr} : \text{diamètre adimensionnel} : d_{gr} = d \left[\frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{1/3} \quad (5.7)$$

C : coefficient de la fonction de transport des sédiments

$$C = \begin{cases} \log C = 2.86 \log d_{gr} - (\log d_{gr})^2 - 3.53 & \text{Si: } d_{gr} \leq 60 \\ 0.025 & \text{Si: } d_{gr} > 60 \end{cases} \quad (5.8)$$

m : exposant de la fonction de transport des sédiments.

$$m = \begin{cases} \frac{9.66}{d_{gr}} + 1.34 & \text{Si: } d_{gr} \leq 60 \\ 1.50 & \text{Si: } d_{gr} > 60 \end{cases} \quad (5.9)$$

A : paramètre initial du mouvement

$$A = \begin{cases} (0.23 * d_{gr}^{1/2} + 0.14) & \text{si: } d_{gr} \leq 60 \\ 0.17 & \text{si: } d_{gr} > 60 \end{cases} \quad (5.10)$$

▪ Engelund Hansen (1967)

La formule empirique d'Engelund et Hansen permet le calcul de la charge totale dans les rivières sablonneuses pour des sédiments non cohésifs et une gamme de diamètres : $0,15\text{mm} < d < 5\text{mm}$. Elle est donnée sous la forme adimensionnelle suivante [104] :

$$\frac{\bar{q}_s}{\sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{(\gamma_w - 1)}\right) g \cdot d^3}} = 0.08 \left(\frac{K^2 \cdot y^3}{g} \right) \tau^{*5/2} \quad (5.11)$$

où :

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

y : hauteur d'écoulement (elle se calcule en négligeant l'interaction entre les deux phases liquides et solides).

▪ Laursen-Copeland (1968)

C'est la fonction de la charge totale des sédiments, développée pour une taille des grains limitée de 0.011 mm à 29 mm. Les sédiments transportés en tonnes/jour sont calculés par la formule suivante [104] :

$$G_s = 0.432 * \gamma_w * Q \cdot \left(\frac{d}{R'}\right)^{1.16667} \cdot TFP \cdot \psi \quad (5.12)$$

avec :

G_s : débit solide ;

γ_w : masse volumique de l'eau ;

Q : débit liquide ;

d : diamètre moyen des particules;

$$u'_* : \text{vitesse de chute exprimée par : } u'_* = \sqrt{g \cdot R' \cdot S} \quad (5.13)$$

g : accélération de la pesanteur ;

S : pente d'écoulement ;

R' : rayon hydraulique donné par :

$$R' = \frac{0.0472 V^{3/2} (3.5 d)^{1/4}}{(g \cdot S)^{3/4}} \quad (5.14)$$

V : vitesse moyenne ;

ψ : paramètre du rapport de la vitesse des particules exprimé par :

$$\psi = \begin{cases} \left[7.04 * 10^{15} * \left(\frac{u'_*}{\omega} \right)^{22.99} \right]; & \text{Si } \frac{u'_*}{\omega} \leq 0.225 \\ \left(40.0 * \frac{u'_*}{\omega} \right); & \text{Si } 0.225 < \frac{u'_*}{\omega} \leq 1.0 \\ \left(40 * \frac{u'_*}{\omega} \right)^{1.843}; & \text{Si } \frac{u'_*}{\omega} > 1.0 \end{cases} \quad (5.15)$$

TFP : paramètre de la contrainte de cisaillement.

▪ 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.

La forme complète de l'équation est donnée par [104] :

$$\begin{aligned} q_b^* &= 8(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} & , \tau_c^* &= 0.047 \\ q_b^* &= 3.97(\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} & , \tau_c^* &= 0.0495 \end{aligned} \quad (5.16)$$

avec :

q_b^* : charge du fond ;

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

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

$$\tau^* = \frac{R \cdot i}{d \cdot \gamma_s / (\gamma_w - 1)} \quad (5.17)$$

où :

i : pente de l'écoulement ;

R : le rayon hydraulique ;

d : diamètre moyen des sédiments en mètre (souvent aussi noté d_{50}).

▪ **Toffaletti (1968)**

Toffaletti considère qu'un cours d'eau transporte une charge de sédiments dans quatre zones verticales différentes, zone supérieure, zone centrale, zone inférieure et la zone du lit. Il calcule ensuite la charge des sédiments dans chaque zone et les ajoute pour obtenir la charge totale [100]. Bien que la méthode ait été développée en utilisant les données de canaux pour les sédiments avec un diamètre de 0,3 à 0,93 mm, elle a été appliquée avec succès sur des particules de sédiments de taille 0,095 mm [99].

- Zone inférieure :

$$g_{ssL} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-0.756z} - (2 \cdot d_m)^{1+n_v-0.756z}}{1 + n_v - 0.756z} \quad (5.18)$$

- Zone intermédiaire :

$$g_{ssM} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} - \left[\left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-z} - \left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-z}\right]}{1 + n_v - z} \quad (5.19)$$

- Zone supérieure :

$$g_{ssU} = M \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} * \left(\frac{R}{2.5}\right)^{0.5z} - \left[R^{1+n_v-1.5z} - \left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-1.5z}\right]}{1 + n_v - 1.5z} \quad (5.20)$$

- Zone du fond :

$$g_{sb} = M(2d_m)^{1+n_v-0.756z} \quad (5.21)$$

La charge totale des sédiments se calcul par :

$$g_s = g_{ssL} + g_{ssM} + g_{ssU} + g_{sb} \quad (5.22)$$

g_{ssL} : transport des sédiments en suspension dans la zone inférieure (t/jour/m) ;

g_{ssM} : transport des sédiments dans la zone intermédiaire (t/jour/m) ;

g_{ssU} : transport des sédiments dans la zone supérieure (t/jour/m) ;

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

g_s : transport total des sédiments (t/jour/m) ;

M : paramètre de la concentration des sédiments donné par :

$$M = 43.2 * C_L(1 + n_v)V \cdot R^{0.756z-n_v} \quad (5.23)$$

C_L : concentration des sédiments en zone inférieure ;

R : rayon hydraulique ; d_m : diamètre moyen des particules,

z : exposant décrivant la relation entre les sédiments et les caractéristiques hydrauliques et n_v : exposant de la température.

▪ **Yang (1984)**

La formule de Yang est développée pour le calcul de la charge sédimentaire (sable et gravier) en considérant une taille de grain limitée de 0,062 à 7 mm [99].

La concentration totale des sédiments (en g/m³)

$$\log C_t = 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 4.816 \log \frac{u_*}{\omega} + \left[2.784 - 0.305 * \log \frac{\omega * d_{50}}{\nu} - 0.282 \log \frac{u_*}{\omega} \right] \log \left(\frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr}S}{\omega} \right) \quad (5.24)$$

où, w représente la vitesse de chute et u^* la vitesse de frottement :

$$W = \sqrt{g(s-1)D_{50}} \quad (5.25)$$

$$u_* = \frac{\tau}{\rho} = \sqrt{gRS} \quad (5.26)$$

A.2. 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.
- 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 [104].

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 (Figure 5.10).

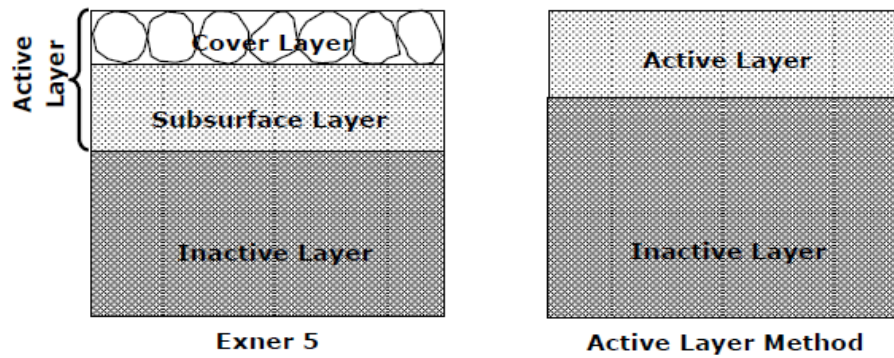


Figure 5.9 : Modèles d'évolution du lit sédimentaire [105].

A.3. Vitesse de sédimentation

Plusieurs méthodes sont disponibles pour calculer la vitesse de sédimentation. On définit principalement trois méthodes utilisées par le logiciel HEC-RAS :

- Ruby
- Toffaletti
- Van Rijn

▪ Ruby (1933)

Rubey a développé une relation analytique entre le fluide, les propriétés des sédiments et la vitesse de sédimentation 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. L'expression de la vitesse est donnée sous la forme suivante [106].

$$\omega = F_1 \sqrt{(s - 1) \cdot g \cdot d_s} \quad (5.27)$$

Avec :

- d_s : diamètre des particules ;
- s : gravité spécifique des particules ;
- g : accélération de pesanteur ;
- F_1 : coefficient donné par :

$$F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36 \cdot \nu^2}{g \cdot d^3 (s - 1)}} - \sqrt{\frac{36 \cdot \nu^2}{g \cdot d^3 (s - 1)}} \quad (5.28)$$

où :

- ω : vitesse des particules ;
- ν : viscosité cinématique.

▪ **Méthode de Toffaletti (1968)**

Toffaletti 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 gravier moyen (MG). Les vitesses de chute de Toffaletti sont présentées en Annexe 1.

▪ **Van Rijn (Par Van Rijn, 1993)**

La méthode est basée sur trois formules en fonction de la taille de grain [100] :

$$\omega = \frac{(s - 1)g \cdot d}{18 \cdot \nu}; \quad \text{Si } 0.001 < d \leq 0.1 \text{ mm} \quad (5.29)$$

$$\omega = \frac{10 \cdot \nu}{d} \left[\left(\frac{1 + 0.01 (s - 1)^{0.5}}{\nu^2} \right) - 1 \right] \quad \text{Si } 0.1 < d < 1 \text{ mm} \quad (5.30)$$

$$\omega = 1.1[(s - 1)g \cdot d]^{0.5} \quad \text{Si } d \geq 1 \text{ mm} \quad (5.31)$$

avec :

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

En plus des trois méthodes citées ci-dessus, la version HEC RAS 5.03 défini deux autres méthodes : Report 12, Dietriche.

B. Gradation du lit

Chaque section transversale doit avoir une gradation du lit associée. La construction du fichier de données « gradation du lit » est basée sur les résultats de l'analyse granulométrique (Tableau 5.1). Un échantillonnage a été effectué sur plusieurs sections le long de l'oued Fodda en amont immédiat du barrage jusqu'à l'embouchure. L'analyse granulométrique de l'échantillon prélevé a été effectuée au niveau du Laboratoire national de l'habitat et de la construction (LNHC) d'Oued Samar. La courbe est représentée sur la figure 5.11 suivante :



Figure 5.10: Courbe granulométrique de l'échantillon prélevé le long du tronçon d'oued Fodda à l'amont immédiat du barrage.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont résumés sur le tableau 5.1 suivant :

Tableau 5.1: Résultats de l'analyse granulométrique.

Échantillon oued Fodda amont			
Grains (mm)	Sable grossier	Gravier	Sable fin
Pourcentage (%)	73.98 %	22.63 %	3.39 %

Par défaut HEC RAS utilise 20 classes de grains (Annexe 2). La fraction de chaque classe est spécifiée en pourcentage ou converties en millimètre. La figure 5.12 montre la courbe de gradation du lit du tronçon oued Fodda amont.

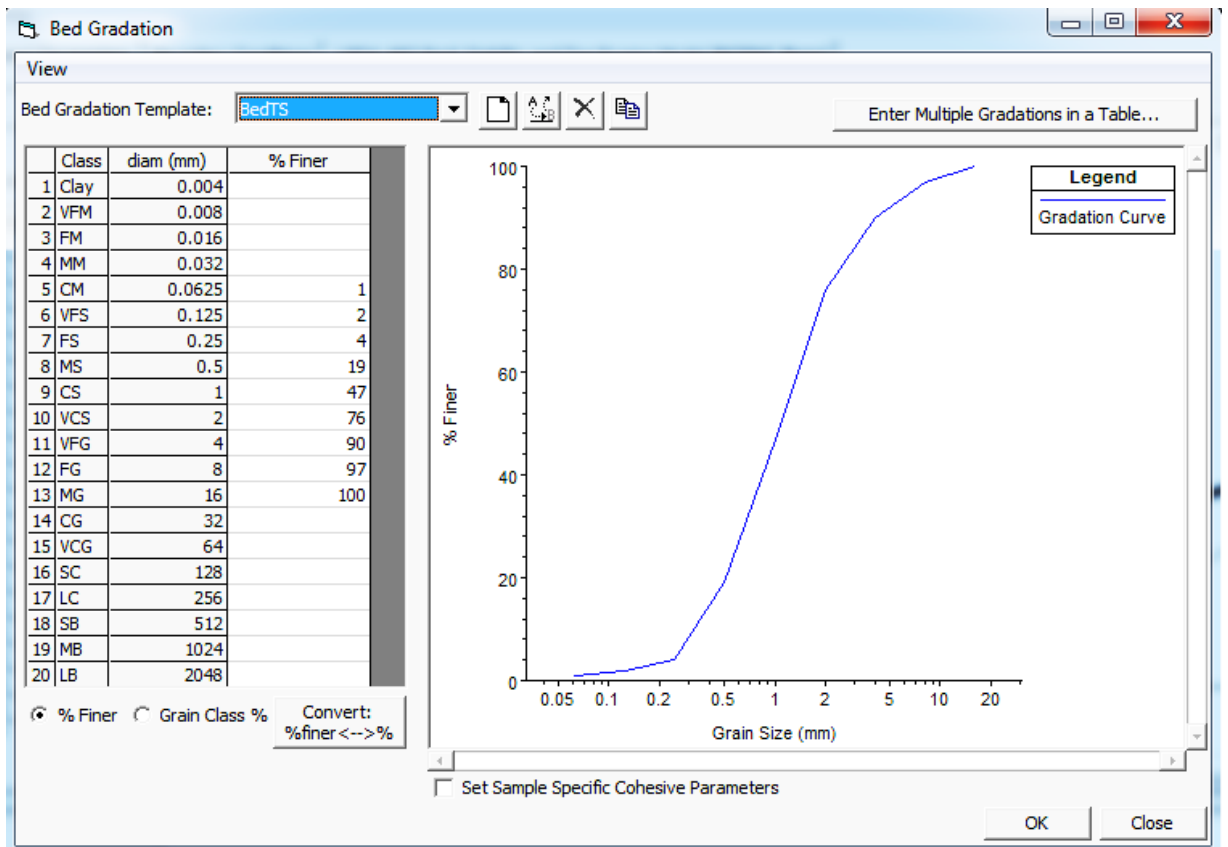


Figure 5.11: Gradation du lit du tronçon oued Fodda amont.

C. Conditions aux limites des sédiments

Dans la fenêtre des conditions aux limites, les charges des sédiments peuvent être spécifiées dans une variété d'emplacements et de formats. La condition limite pour la station fluviale amont (9945) est une "courbe de tarage" (Figure 5.13). Cette dernière détermine un apport de sédiment basé sur l'apport ou l'arrivée de l'eau. Donc elle indique la charge des sédiments sortante de la station la plus en amont tout au long de la simulation. Par conséquent, le modèle utilise cette condition et calcule le changement de la forme du lit en fonction des propriétés des sédiments, de la fonction de transport choisie, et d'autres paramètres hydrauliques.

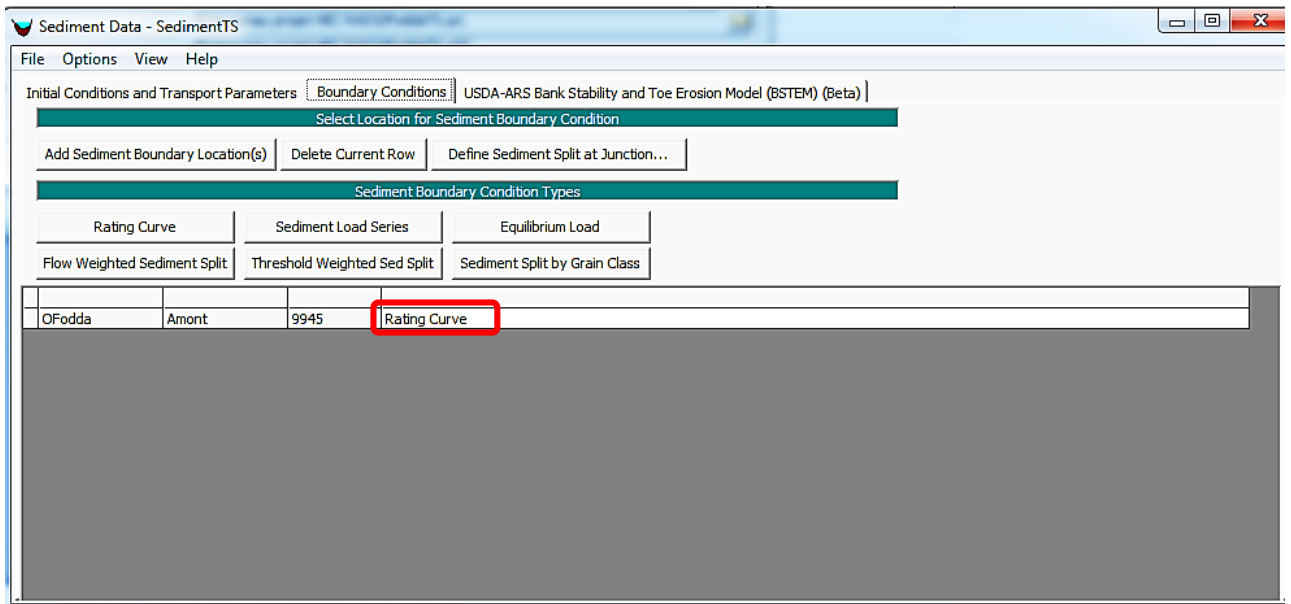


Figure 5.12: Fenêtre des conditions aux limites des sédiments.

C.1. Débit solide à l'amont du barrage oued Fodda

Dans cette étude, l'évaluation des sédiments transportés jusqu'à la retenue du barrage oued Fodda dépend principalement des données en entrée de la série du débit solide. Le fichier d'observations disponible est celui provenant de la station hydrométrique Pontéba défluent (Code station : 012203) obtenu au niveau de L'ANRH. Il correspond à une série de données du transport solide, qui s'étalent sur une période de 29 années hydrologiques (1983 - 2011). Cette station est située sur le tronçon d'oued Fodda en aval du barrage. Cependant aucune station hydrométrique n'est disponible à l'amont (Figure 5.14).

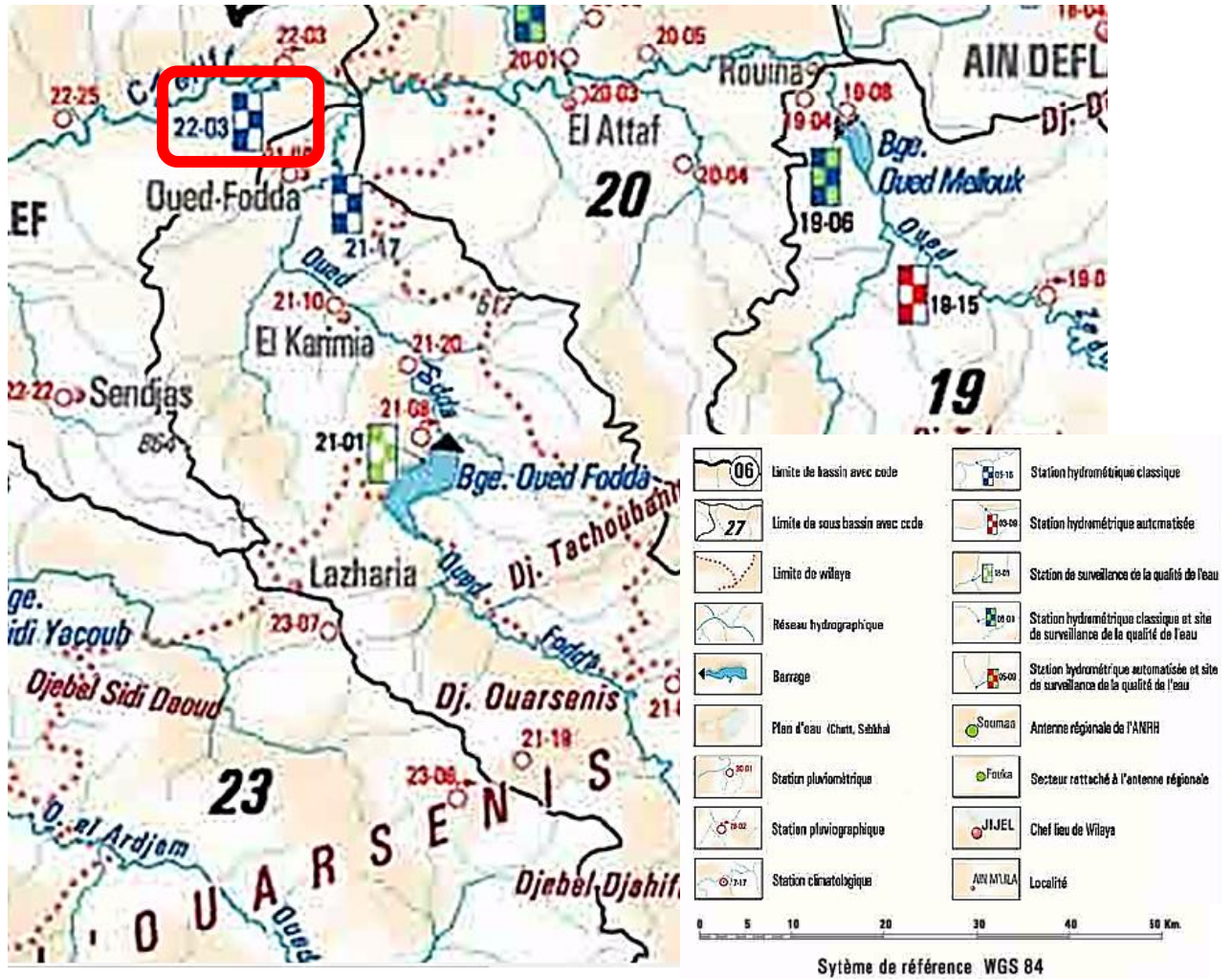


Figure 5.13: Situation de la station hydrométrique Pontéba- defluent.

Pour déterminer les données du transport sédimentaire dans les sections amont du barrage nous avons procédé comme suit :

- effectuer une corrélation débit liquide-débit solide en se basant sur les données issues de la station aval Pontéba-Défluent. Les résultats sont représentés sur la Figure 5.15.
- utiliser la relation obtenue pour le calcul des débits solides à l'amont en se basant sur le fichier des apports liquides journaliers obtenus au sein de la direction du barrage oued Fodda. La relation s'obtient sous la forme :

$$Q_s = 4.0995 Q_l^{1.2546} \quad (5.32)$$

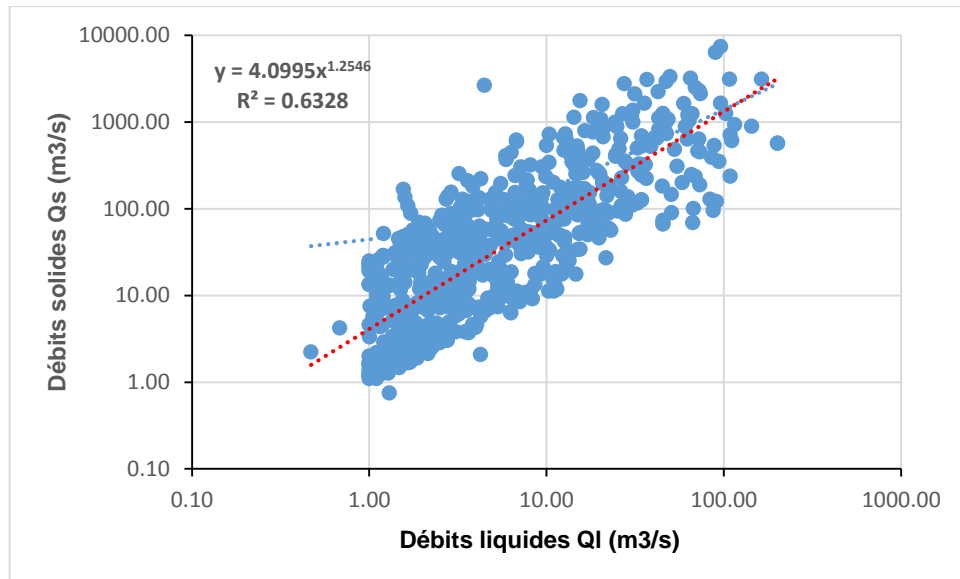


Figure 5.14: Corrélation Débit liquide-Débit solide.

La courbe de tarage des sédiments, choisie comme une condition aux limites, a été élaborée à partir des données calculées sur la base de l'équation (5.32) ci-dessus. Une fois introduite, la courbe de la charge spécifique des sédiments en fonction du débit liquide peut être affichée (Figure 5.16).

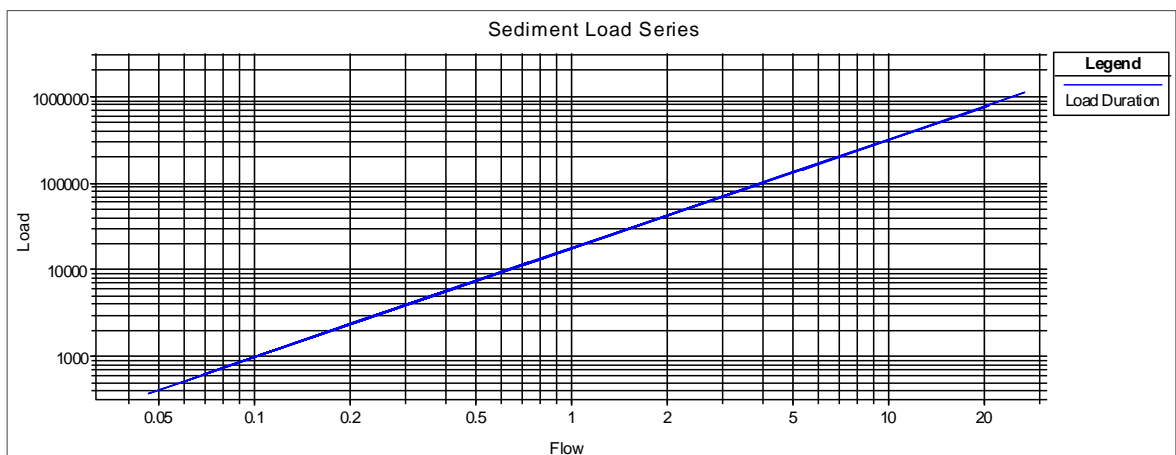


Figure 5.15: Courbe de la charge spécifique sédimentaire.

La courbe tracée sur la figure ci-dessus montre clairement l'augmentation proportionnelle de la charge des sédiments en fonction du débit liquide.

5.3.3. Validation du choix des paramètres d'entrée

Plusieurs combinaisons ont été effectuées sur la base des huit fonctions de transports, des cinq équations de la vitesse de sédimentation et des deux modèles d'évolution du lit sédimentaire « Active layer et Exner 5 ».

Les paramètres d'entrée sont définis et justifiés comme suit :

- La formule empirique d'Engelund Hansen qui permet le calcul de la charge totale des rivières sablonneuses pour une gamme de diamètre limitée de $0,15\text{mm} < d < 5\text{mm}$ est la fonction adaptée pour l'évaluation du transport sédimentaire à l'amont du barrage oued Fodda. Ce choix est validé sur la base des résultats issus de l'analyse granulométrique de notre échantillon. Ces résultats ont montré que le lit du tronçon, oued Fodda amont, est constitué d'environ 77.37 % par du sable dont la taille des grains varie de 0.177 mm - 0.707 mm de diamètre et d'environ 22.63% par du gravier dont la taille varie de 2mm à 16mm. Donc plus de 90% de notre échantillon est situé dans la plage de la validité granulométrique d'Enguland Hansen.
- La simulation n'a pas fonctionné pour le modèle « Active Layer ». Cependant La méthode de Thomas (Exner 5) a été validée pour l'ensemble des fonctions de transports.
- Van Rijn a utilisé un facteur de forme de 0,7 pour calculer la vitesse de sédimentation des particules et le sable naturel a également un facteur de forme de 0,7. Par conséquent, cette méthode est la plus conforme pour notre modèle [100], [107].

5.4. Calage du model et validation

La simulation a été exécutée pour la période allant du 01 Janvier 2016 jusqu'au 30 Avril 2016. Un fichier de sortie de l'ensemble des paramètres hydrauliques est obtenu pour toute la durée de la simulation (Annexe 3). Les résultats de la simulation du transport des sédiments sont également affichés dans un fichier de sortie « Sediment Output ». Ces résultats étaient très sensibles à la gradation du lit introduite. Par conséquent, l'observation du profil du lit (changement de l'élévation minimale) a été sélectionnée comme critère de comparaison des résultats du modèle avec les valeurs réelles observées (Figure 5.17). La validation a été retenue particulièrement pour la crue du 12 Mars 2016 avec un débit liquide d'environ $27 \text{ m}^3/\text{s}$.

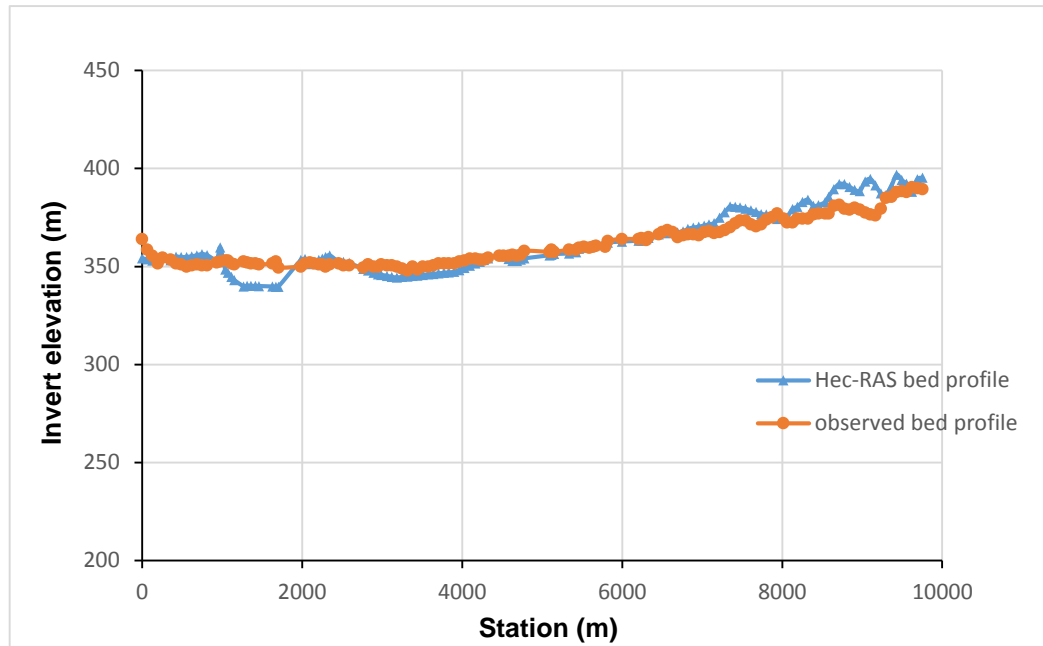


Figure 5.16 : Comparaison du profil du lit observé et modélisé par HEC-RAS.

Sur la figure ci-dessus, nous remarquons qu'au début de la simulation, le lit modélisé est en dessus du profil observé avec une formation progressive des deltas des sédiments, provoquant une surestimation du comportement dans cette région. A l'embouchure du barrage (5000 - 6500m) la pente du lit modélisé est presque conforme à celle du lit observé. Cependant et près de la digue, le lit modélisé est en dessous du profil observé marquant une érosion importante.

En général, la sous-estimation ou la surestimation de l'évolution du lit dans le modèle peut être attribuée principalement au manque de données réelles, vu qu'il n'existe aucune station hydrométrique à l'amont du barrage et les débits solides utilisés sont obtenus suite à une corrélation avec un coefficient qui est égale à 0.63. Donc la représentation des crues observées durant l'année 2016 n'était pas vraiment satisfaisante et particulièrement celle du 12 Mars.

La validation du modèle a été justifiée par une estimation quantitative avec un coefficient de détermination, R^2 , qui est égal à 0,92. Ce dernier indique un bon accord entre les résultats du modèle et les données observées.

5.5. Résultats et discussions

Plusieurs paramètres sont affichés suite à la simulation finale du transport des sédiments à l'amont et au niveau du barrage oued Fodda. Les principaux sont les suivants :

5.5.1. Courbe de tarage

La courbe de tarage (Figure 5.18) représente la variation de la hauteur d'eau en fonction du débit au niveau de la dernière section aval, à l'amont immédiat de la digue du barrage. Une augmentation progressive est observée à mesure de l'augmentation du débit. La hauteur d'eau maximale atteint une valeur de 358 m correspondante à un débit de 27 m³/s. Ce dernier représente la crue de la journée du 12 Mars 2016.

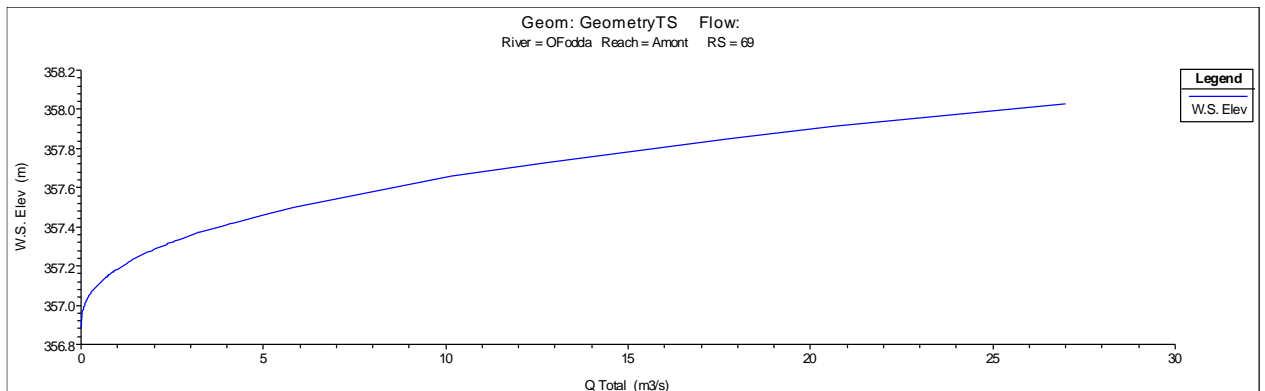


Figure 5.17: Courbe de tarage au niveau de la section située à l'extrémité aval du barrage oued Fodda.

5.5.2. Variation de la vitesse d'écoulement et de la masse cumulée des sédiments

La masse cumulée des sédiments du lit du tronçon étudié (en tonnes) peut être calculée dans l'espace et dans le temps pour chacune des sections transversales. Un exemple de la section 69 (extrémité aval) est représenté sur la Figure 5.19.

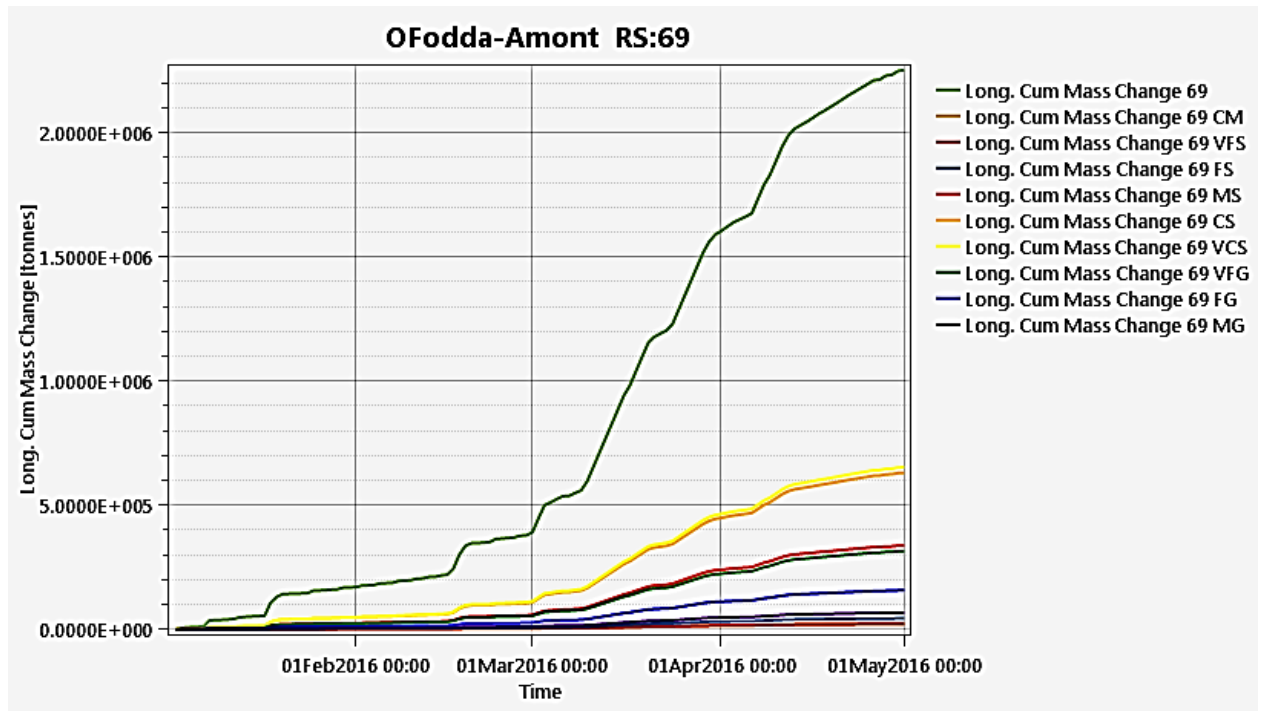


Figure 5.18: Accumulation de la masse des sédiments en fonction du temps au niveau de la section 69 (extrémité aval).

Sur la figure ci-dessus, nous remarquons une augmentation progressive de la masse en fonction du temps (durée de la simulation). La courbe verte indique la masse totale cumulée et les autres courbes sont correspondantes à chacun des matériaux granulométriques suivants :

- Limon grossier (Coarse silt) : CM
- Sable très fin (very fine sand) : VFS
- Sable fin (fine sand) : FS
- Sable moyen (medium sand) : MS
- Sable grossier (course sand) : CS
- Sable très grossier (very course sand) : VCS
- Gravier très fin (Very fine gravel) : VFG

La masse maximale des sédiments (cumulée) est celle formée par du sable très grossier (VCS). Elle atteint une valeur d'environ 653581.375 tonnes. Cependant le sable très fin (VFS) est le matériau dont la masse est la plus faible. Elle est estimée à 22537.283 tonnes.

Les sédiments de différentes tailles n'ont pas la même mobilité. Tous les sédiments du lit seront en mouvement seulement dans le cas des débits très élevés. Pour des débits plus faibles, seulement les sédiments fins qui seront transportés par l'écoulement tandis que les sédiments grossiers resteront immobiles. Le profil de l'accumulation spatiale de la masse des sédiments peut être représenté pour chaque journée de la durée de la simulation. Un exemple de la crue du 12 Mars 2016 est illustré sur la figure 5.20 suivante :

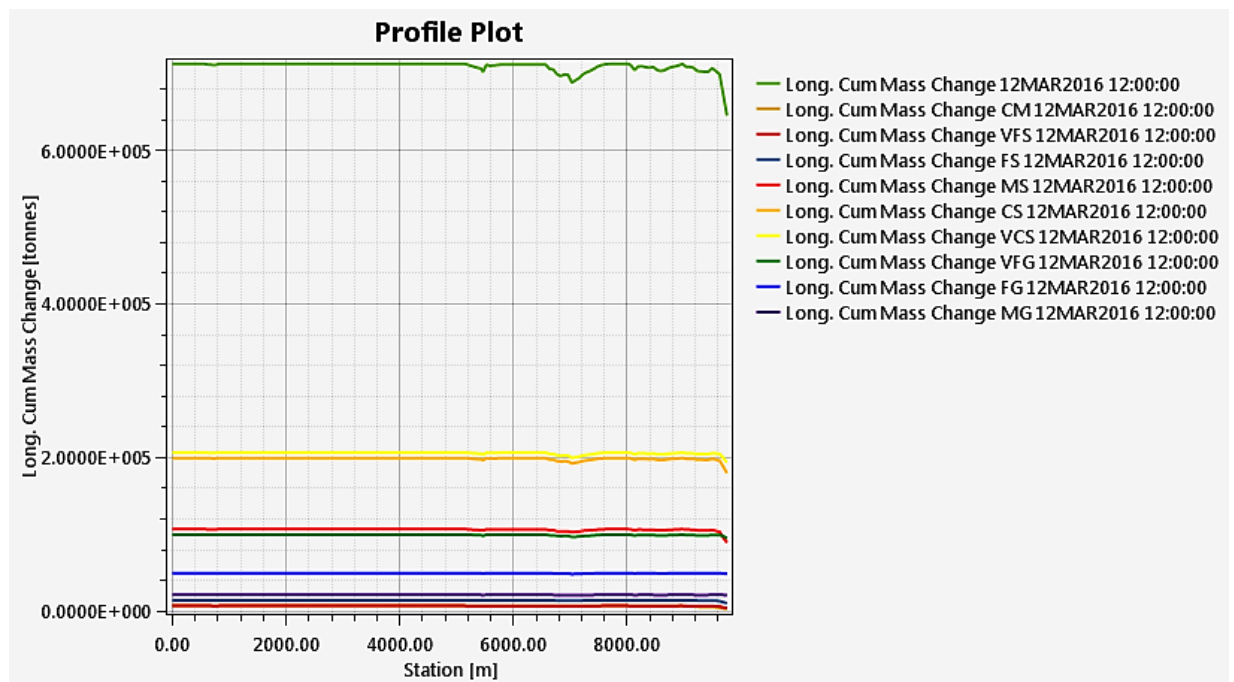


Figure 5.19 : Profil de l'accumulation spatiale des sédiments pour la crue de la journée du 12 Mars 2016.

Sur la figure ci-dessus nous remarquons également une augmentation de la masse des sédiments (cumulée) de l'extrémité amont (station 9945) vers l'aval jusqu'à l'embouchure du barrage (5000 – 6500m) à partir duquel la masse se stabilise progressivement pour atteindre une valeur de 712699.25 tonnes à l'amont immédiat de la digue du barrage (voir le fichier de sortie représenté en Annexe 4). Cette faible variation observée dans la retenue du barrage oued Fodda est justifiée par les faibles débits ou par les faibles vitesses. La figure 5.21 ci-après représente la variation temporelle de la vitesse d'écoulement au niveau de la section fluviale 69.

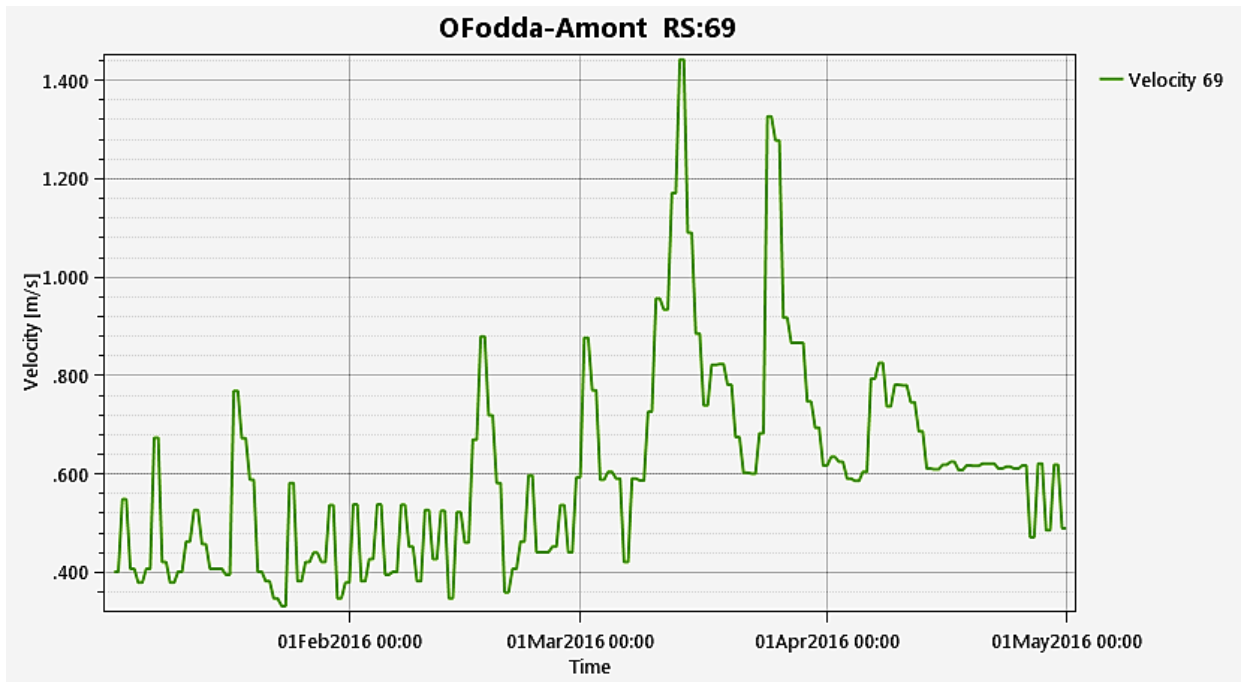


Figure 5.20 : Variation de la vitesse d'écoulement en fonction du temps au niveau de l'extrémité aval.

Il est clair que la vitesse d'écoulement augmente pour les débits les plus forts. Ces derniers peuvent engendrer un transport des sédiments très importants. Sur la figure ci-dessus la vitesse est maximale pour les crues observées le 12, 13, 14 du mois de Mars 2016 avec une valeur de 1.443 m/s. Cependant, la valeur minimale atteinte est estimée à environ 0.332 m/s pour la journée du 23 Janvier 2016. A l'extrémité amont la vitesse maximale estimée à 1.743 m/s.

Le profil de la variation de la vitesse sur le long du tronçon étudié peut être également représenté pour chaque journée. Un exemple de la crue du 12 Mars est illustré sur la figure 5.22 ci-après.

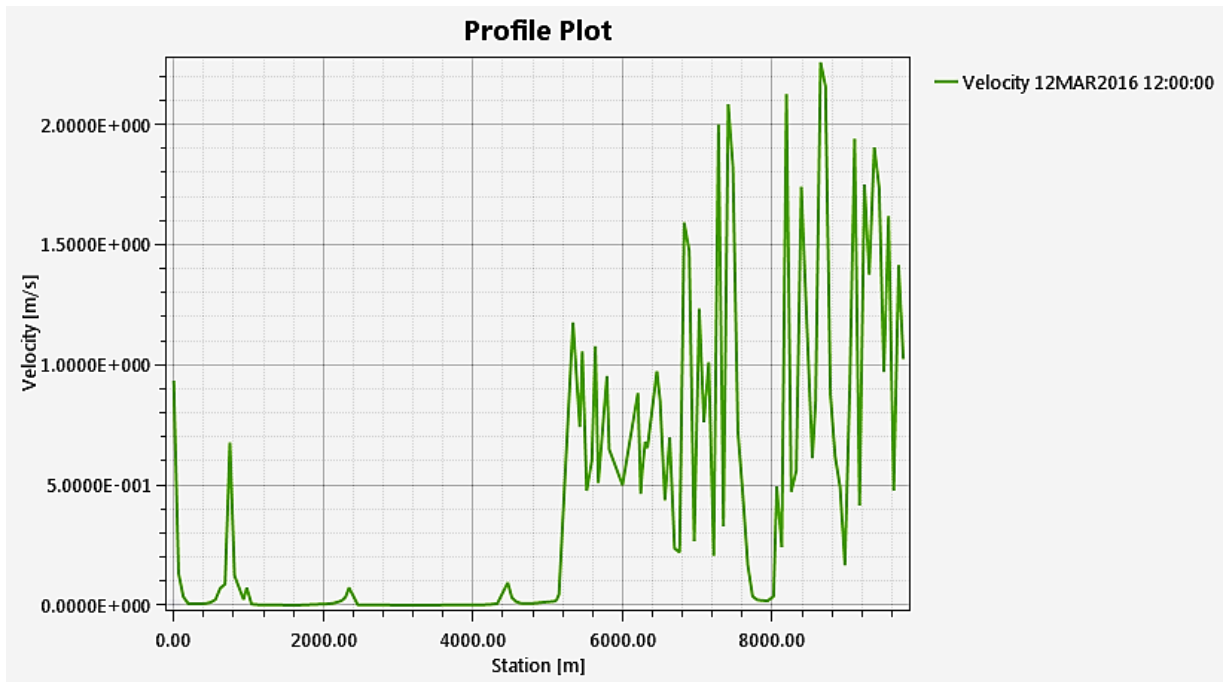


Figure 5. 21: Variation spatiale de la vitesse d'écoulement.

De la figure ci-dessus il apparait clairement que la variation de la vitesse est très importante dans les sections amont de l'oued. Cette variation diminue progressivement à partir de l'embouchure du barrage. A l'intérieur de la retenue la vitesse devient stable jusqu'aux sections aval (à l'amont immédiat de la digue) ou elle augmente encore une fois en raison des vidanges.

5.5.3. Concentration des sédiments

La concentration totale des sédiments (en mg/litre) augmente progressivement dans l'espace et dans le temps. Cette variation peut être influencée par plusieurs paramètres tel que; le débit, la pente et la rugosité du lit. Une augmentation importante est observée particulièrement, au niveau des sections transversales situées à l'amont du barrage. Un exemple des sections : 9883, 8971 et 6824 est illustré sur la Figure 5.23. La valeur maximale atteinte pour les trois sections est estimée à environ 22,35 g/l (voir fichier de sortie donné en Annexe 5). Cependant, à l'intérieur de la retenue, la variation de la concentration n'est observée que pendant les périodes de crue (mois de Mars) c'est-à-dire uniquement pour les débits les plus importants (stations 4861, 2896, 1182, 133 de la Figure 5.24).

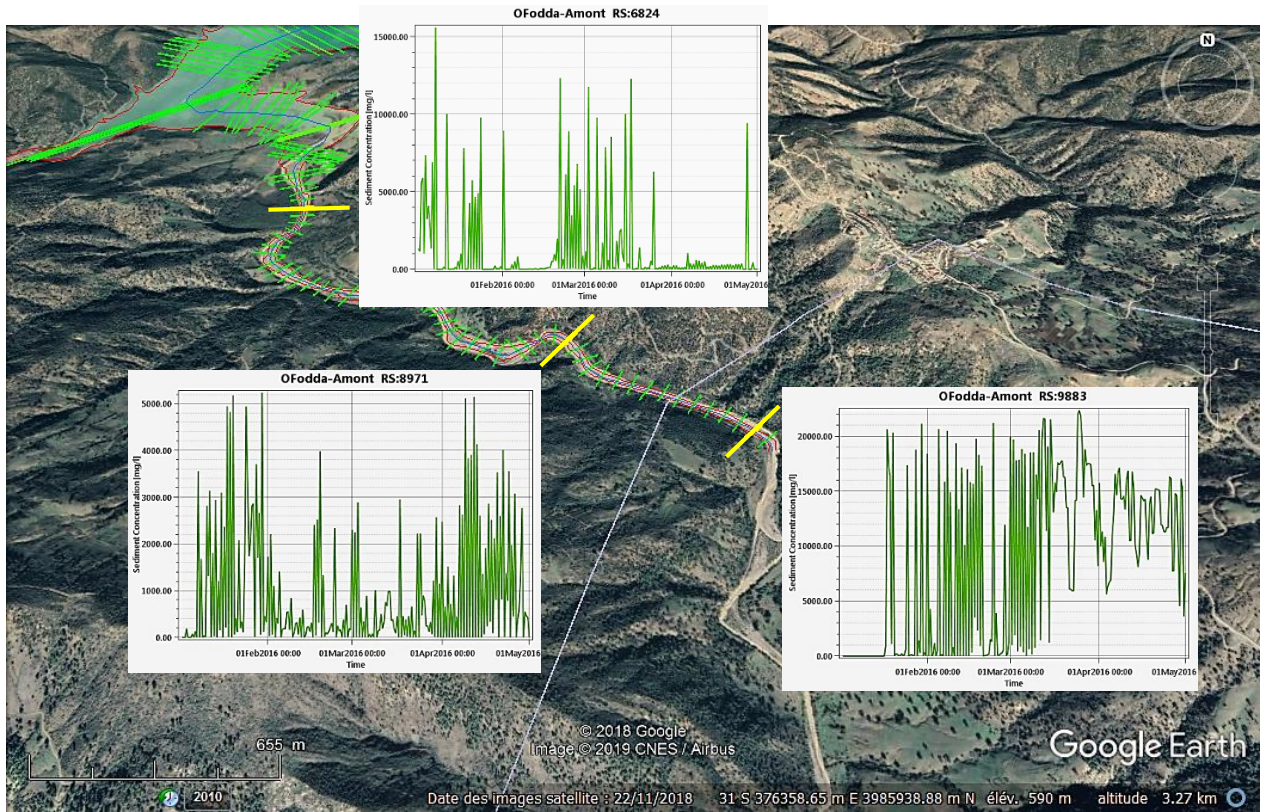


Figure 5.233: Variation temporelle de la concentration au niveau des sections amont d'oued Fodda.

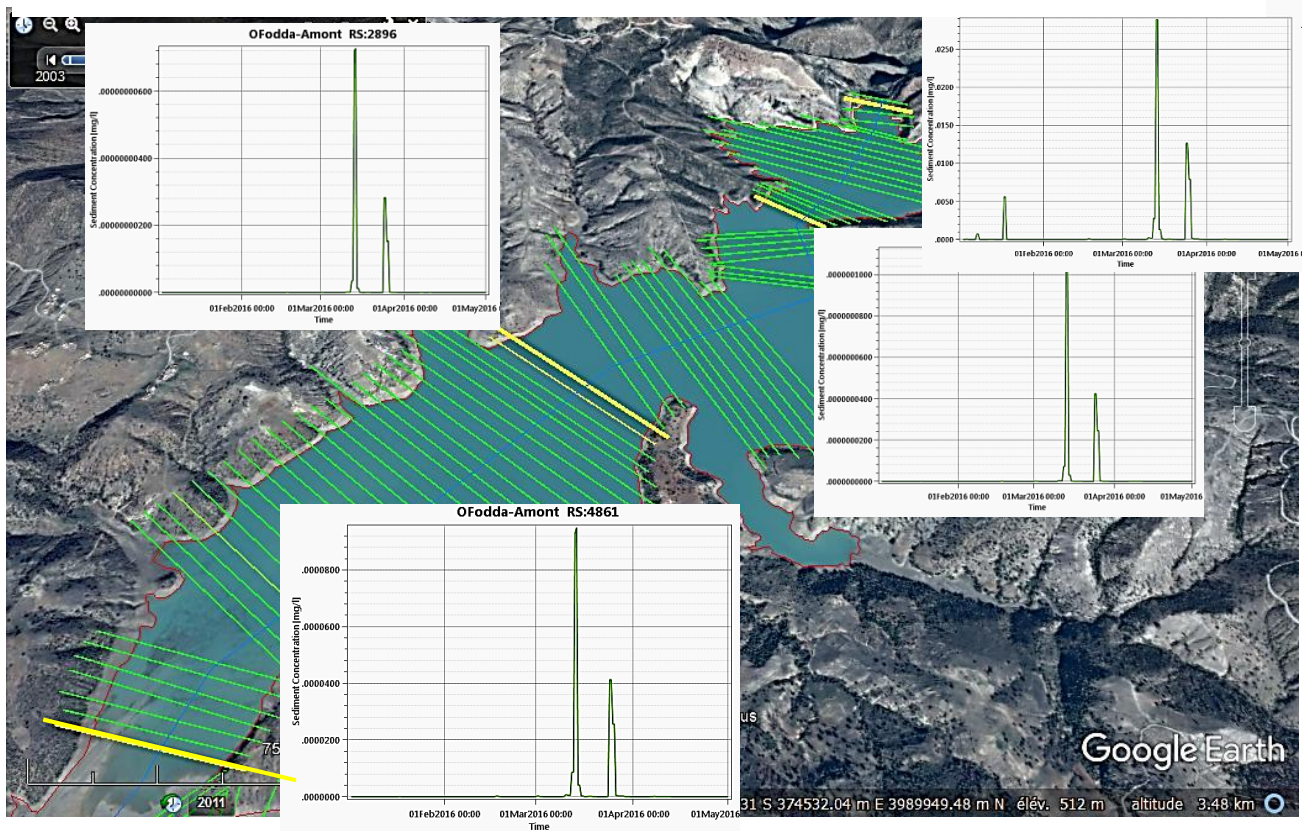


Figure 5.224: Variation temporelle de la concentration au niveau de la retenue du barrage oued Fodda.

Le profil de la variation spatiale de la concentration des sédiments peut être affiché pour toute la durée de la simulation. Une variation très importante est observée au niveau des sections transversales amont de l'oued Fodda et également dans les sections de l'extrémité aval à l'amont immédiat de la digue du barrage. Sur la Figure 5.25 un exemple est illustré en considérant les deux crues : 23 Janvier et 02 Février de l'année 2016.

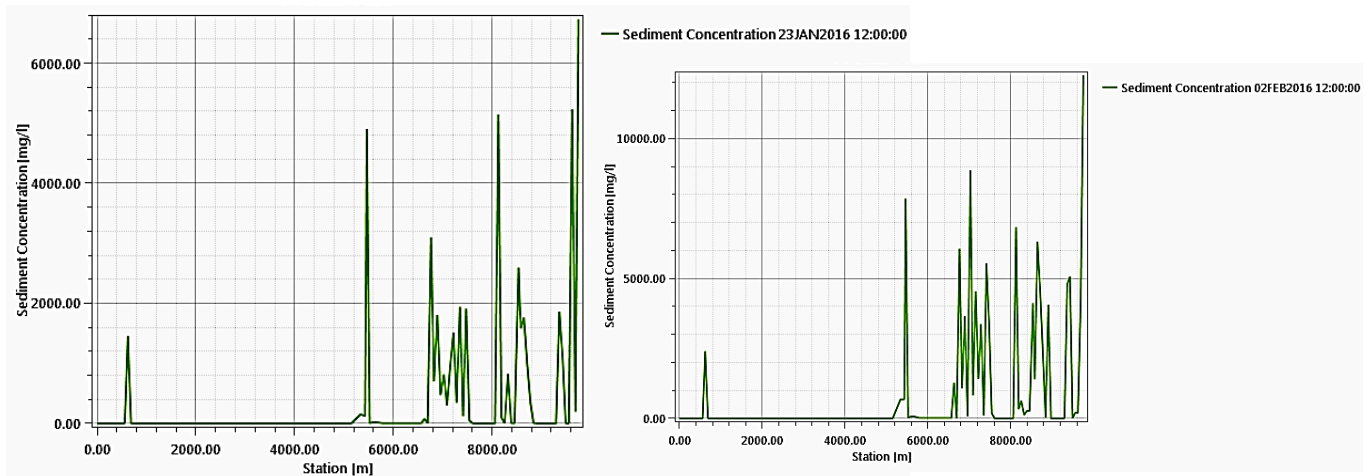


Figure 5.24: Variation spatiale de de la concentration des sédiments (exemple des crues : 23 Janvier et 02 Février 2016).

La valeur maximale de la concentration des sédiments est estimée à environ 6736.267 mg/l pour la crue du 23 Janvier et 12278.532 mg/l pour la crue du 02 Février. Un fichier de sortie est représenté en Annexe 6.

PARTIE 2

CARTOGRAPHIE DES PHÉNOMÈNES ÉROSION ET DÉPÔTS DANS LA RETENUE DU BARRAGE OUED FODDA

5.6. Méthodologie

Pour déterminer l'évolution du fond de la retenue du barrage oued Fodda durant la période 2004 -2017, nous avons suivis initialement les mêmes étapes développées dans le chapitre 4 pour l'élaboration de la carte bathymétrique. Ces étapes se résument par l'organigramme méthodologique de la Figure 5.26 :

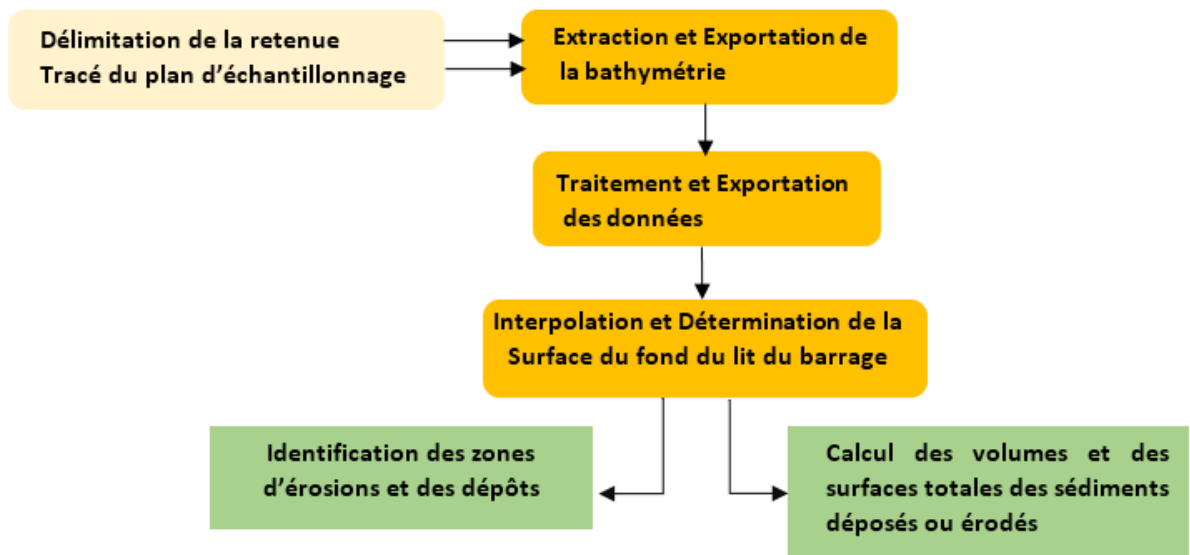


Figure 5. 25: Diagramme méthodologique pour l'étude de l'évolution du fond de la retenue du barrage Oued Fodda.

5.7. Estimation de la capacité de stockage de la retenue du barrage oued Fodda

Une surface de réseau triangulé irrégulier (TIN) a été essentiellement utilisée pour le calcul de la capacité de stockage de la retenue oued Fodda, en considérant les valeurs extraites de l'année 2004 (Figure 5.27). Le volume obtenu est comparé avec celui des derniers levés bathymétriques. Le calcul a été établi sur ArcMap à travers l'application Surface-Volume (Figure 5.28).

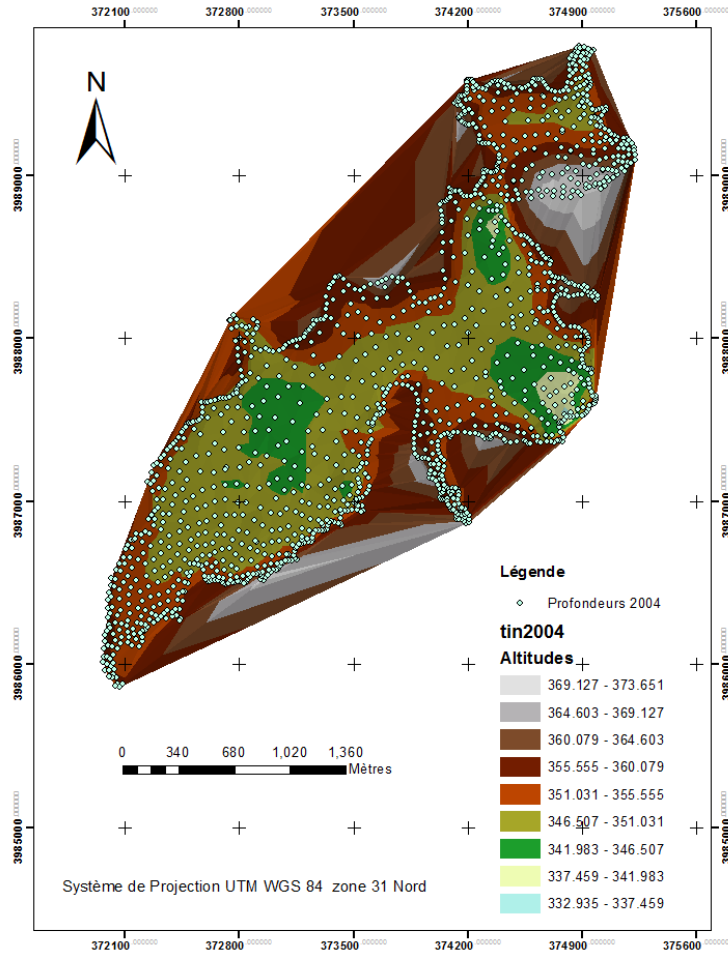


Figure 5. 26: Distribution spatiale des points introduits à travers une surface Tin.

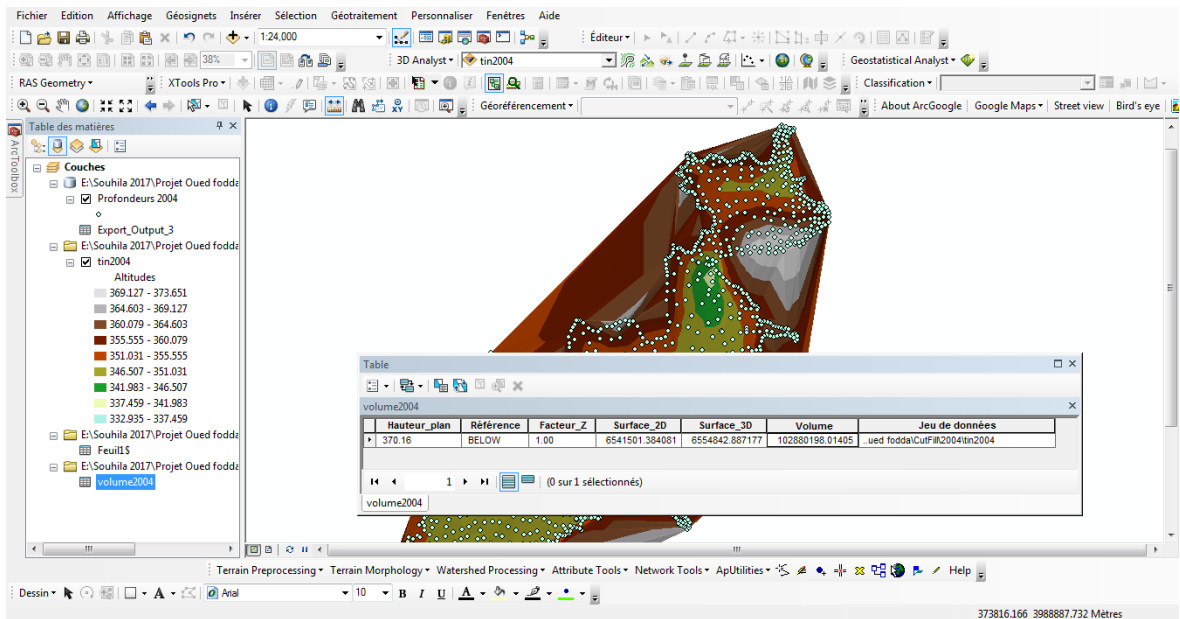


Figure 5.27: Estimation de la capacité de stockage de la retenue du barrage oued Fodda pour l'année 2004 sur ArcMap.

La capacité de stockage est estimée à : 102880198.01405 m³, soit 102.88 hm³. Cette valeur est très proche du volume correspondant au dernier levé (102.85 hm³). Les mêmes étapes de calcul ont été effectuées pour l'estimation du volume de stockage de la retenue pour l'année 2017, en utilisant le fichier de données de l'année considérée (2017). Les résultats obtenus sont résumés comme suit :

Volume estimé pour une cote RN = 370.5 m	Volume estimé pour une cote PEH = 374 m
105.414 hm ³	134. 409 hm ³

Une fois le volume est estimé, nous avons utilisé une méthode d'interpolation géostatistique exacte, qui implique le passage de la surface produite par chaque valeur d'échantillon prélevé. Il s'agit de la fonction de base radiale (RBV). Cette dernière permet de produire des surfaces lisses à partir d'un grand nombre de points et produit des résultats satisfaisants pour des surfaces aux variations subtiles, telle que l'altitude. L'utilisation de cette fonction, nous a permis d'interpoler les élévations extraites et de construire les couches d'évolution de la surface du fond du lit de la retenue du barrage (Figure 5.29) pour les deux années d'étude (2004- 2017).

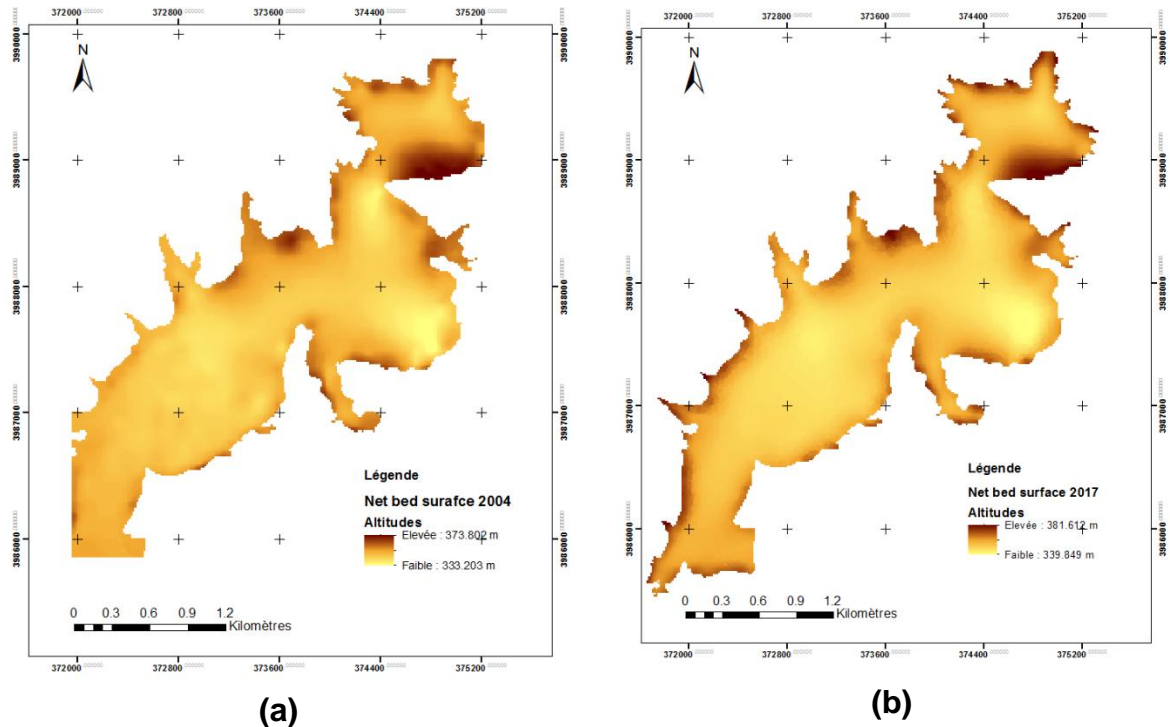


Figure 5.28: Évolution du fond du lit de la retenue Oued Fodda : (a) le 31/12/2004, (b) le 02/04/ 2017.

De la figure ci-dessus nous remarquons que la hauteur du lit de la retenue d'oued Fodda a varié considérablement durant la période 2004 - 2017. La différence d'élévation maximale a été estimée à environ 7.81 m.

5.7. Identification des zones d'érosion et de dépôts

Une fois la couche d'évolution de la surface du fond du lit de la retenue est cartographiée, nous avons utilisé l'outil Remblais/déblais (Cut Fill) sur ArcMap, pour identifier les zones d'érosion et de sédimentation (Figure 5.30). Cette fonction récapitule les superficies et les volumes modifiés, en prenant des surfaces d'un emplacement donné à deux périodes différentes. Elle permet d'identifier les régions de suppression et d'ajout du matériau de surface, et également, les zones où les surfaces n'ont pas été modifiées.

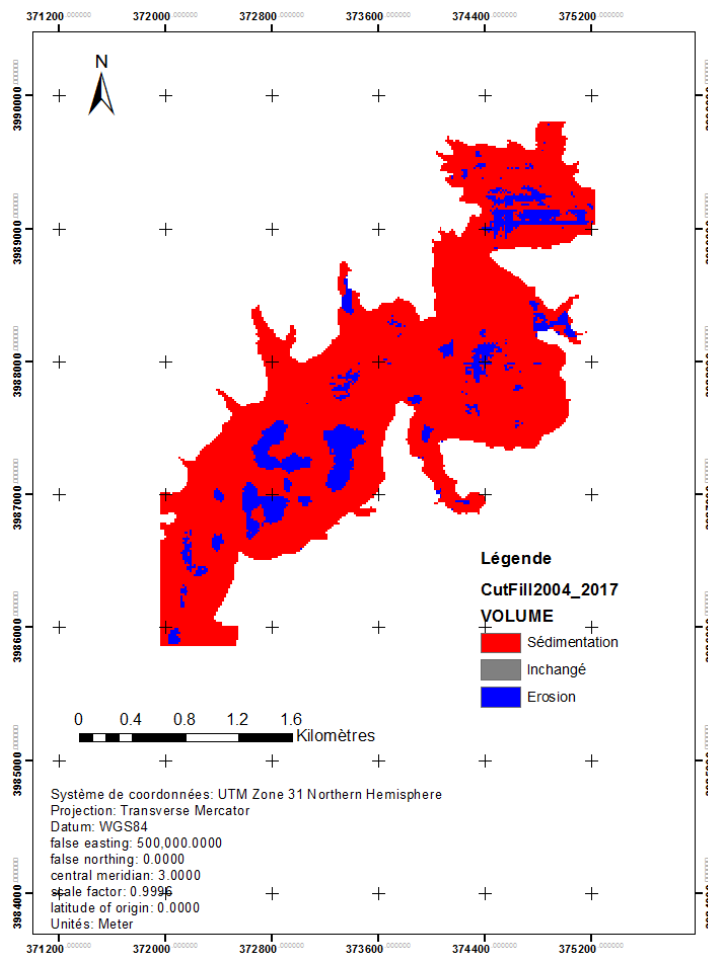


Figure 5.29 : Identification des zones de sédimentation et d'érosion du fond de la retenue Oued Fodda (2004- 2017).

5.8. Calcul des volumes des sédiments déposés ou érodés (2004-2017)

Par défaut, lorsque l'outil Remblais/déblais est exécuté, une représentation spécialisée lui est appliquée de façon à mettre en surbrillance les emplacements de remblais/déblais. Le déterminant se trouve dans la table attributaire du raster en sortie. Il considère qu'un volume est positif à l'endroit où des matériaux ont été retirés (déblai) et négatif lorsque des matériaux ont été ajoutés [108]. Cette option nous a permis d'exploiter la table attributaire de la carte (Figure 5.29) pour le calcul des volumes déposés ou érodés durant la période considérée. Les résultats sont exportés vers des fichiers Excel.

5.8.1. Volumes des dépôts

Le volume total des sédiments déposés au fond de la retenue oued Fodda, durant la période 2004-2017 peut être calculé soit sur Excel, ou bien directement sur ArcGIS avec l'outil Statistiques sur la base de la table attributaire des surfaces et des volumes des dépôts présentés en Annexe 7. Ce volume est estimé à environ 9425814.518738 m³ soit 9.43 hm³. Cependant, le volume moyen des sédiments déposés est évalué à 0.3 hm³ (Figure 5.31).

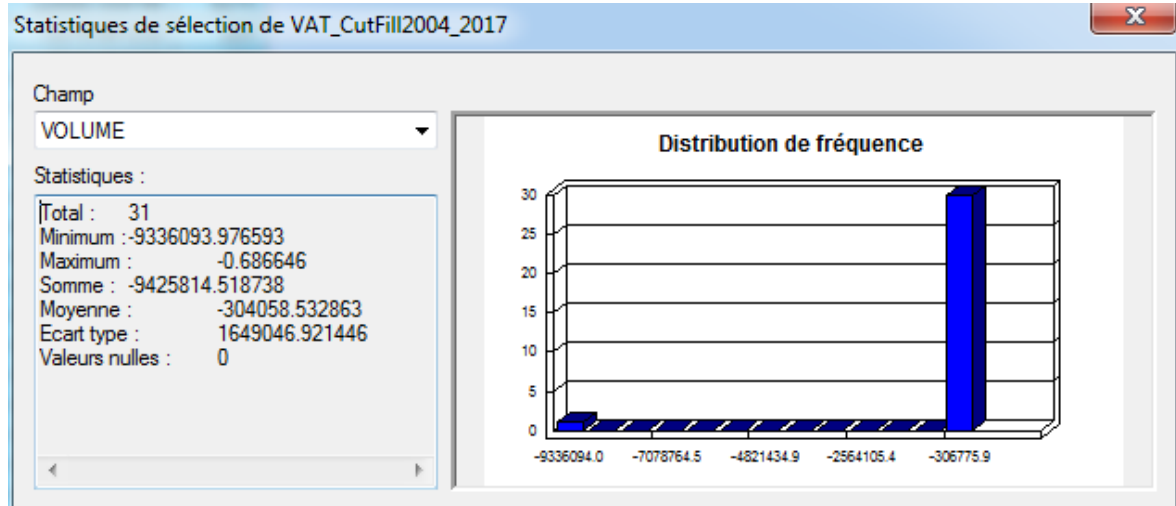


Figure 5.30: Fenêtre des statistiques des volumes des dépôts au fond de la retenue durant les années 2004-2017

Le diagramme Sédimentation- Erosion (Figure 5.32) montre le volume important des sédiments déposés au fond de la retenue du barrage Oued Fodda. Ceci explique les résultats de l'analyse bathymétrique, étudiée au chapitre 4 précédant, où nous avons enregistré un taux de comblement d'environ 45.43% sur une période de 11 ans (2004-2015) en tenant compte des opérations de dévasement effectuées.

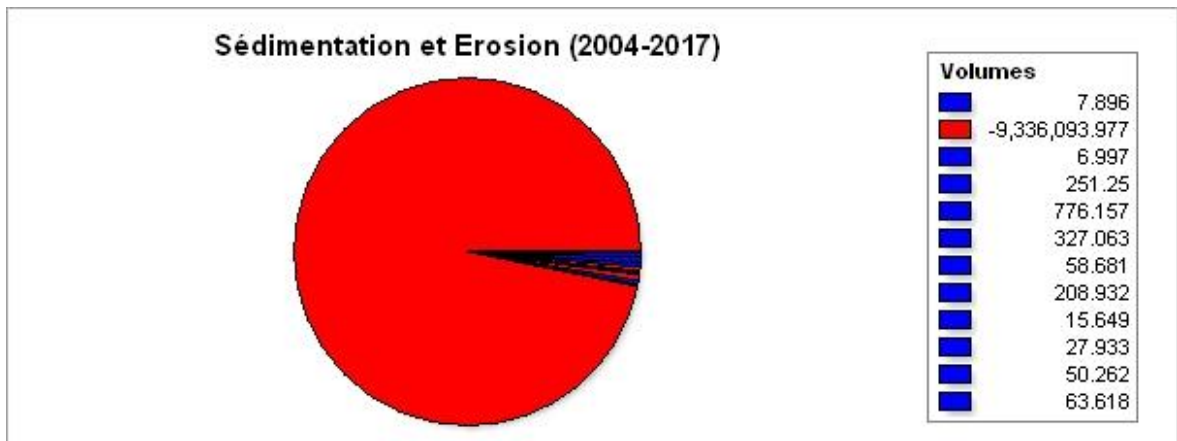


Figure 5.31: Diagramme Érosion- Dépôts (2004-2017).

5.8.2. Volume des sédiments érodés

Les volumes des sédiments arrachés, suite à la dégradation du fond de la retenue durant la période considérée sont représentés en Annexe 8. Le volume total érodé est estimé à environ : 0.21 hm³ (Figure 5.33).

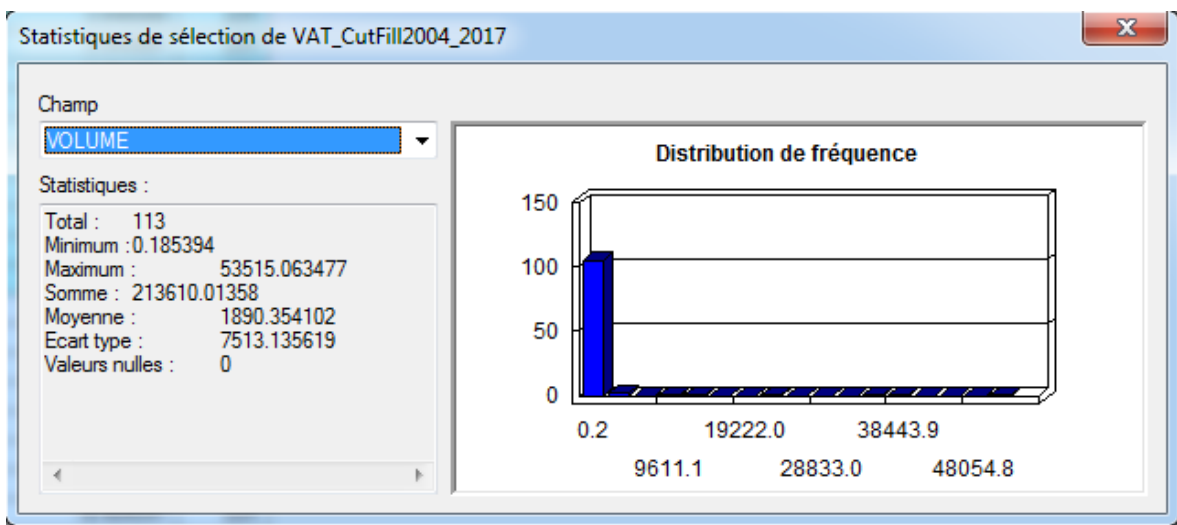


Figure 5.32: Fenêtre des statistiques des volumes érodés durant l'année 2017.

5.9. Conclusion

Dans ce chapitre la simulation du transport solide a été effectuée à l'aide du logiciel HEC-RAS. Le modèle a bien fonctionné, une fois tous les paramètres ont été définis dans leurs plages effectives. Bien qu'il n'y ait aucune station hydrométrique disponible à l'amont de la retenue du barrage oued Fodda, les débits solides ont été calculés et HEC-RAS a produit des résultats raisonnablement concordants pour la période d'étude avec un coefficient de détermination R^2 qui est égal à 0,92.

Le lit du tronçon étudié est formé essentiellement par du sable (77.37%) et environ 90% de notre échantillon est situé dans la plage de la validité granulométrique d'Englund Hansen. Cette formule a donné des meilleurs résultats par rapport aux autres fonctions de transport disponibles sur HECRAS.

La simulation n'a pas fonctionné pour le modèle « Active Layer ». Cependant La méthode de Thomas (Exner 5) a été validée pour l'ensemble des fonctions de transports. Pour le calcul de la vitesse de sédimentation la formule de Van Rijn a été considérée comme la méthode la plus conforme pour notre modèle.

Concernant les résultats de la simulation, nous avons observé une augmentation de la masse des sédiments (cumulée) de l'extrémité amont (station 9945) jusqu'à l'embouchure du barrage (5000 – 6500m) à partir duquel la masse se stabilise progressivement pour atteindre une valeur de 712699.25 tonnes à l'amont immédiat de la digue du barrage. Cette faible variation observée dans la retenue du barrage oued Fodda peut être justifiée par l'influence de plusieurs paramètres tel que : la rugosité du fond de la retenue, les faibles débits et les faibles vitesses. Cette dernière a été estimée pour les crues du 12, 13, 14 du mois de Mars 2016 avec une valeur maximale de 1.443 m/s, et d'une valeur minimale d'environ 0.332 m/s observée pour la journée du 23 Janvier. La concentration des sédiments marque également une augmentation importante au niveau des sections transversales situées à l'amont du barrage. La valeur maximale observée pour les trois sections choisies (9883, 8971 et 6824) est estimée à environ 22,35 g/l. Cependant, à l'intérieur de la retenue, la variation de la concentration était très faible. Elle n'est observé que pendant les périodes de crue (mois de Mars) c'est-à-dire uniquement pour les débits les plus importants.

L'évolution du fond de la retenue a été également étudiée pour la période 2004-2017. Un volume total des sédiments déposés a été estimé à environ 9.43 hm³. Cependant le volume total érodé est évalué à environ : 0.21 hm³.

CONCLUSION GÉNÉRALE

A la lumière des résultats obtenus dans le cadre de ce présent travail, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

L'étude hydrologique a montré que le bassin haut et moyen Cheliff présente un relief fort, avec une altitude moyenne de 628,9 m et une densité spécifique de 15.46m. Le réseau hydrographique est très dense, et la densité de drainage calculée, varie entre 0.57 et 1.54 km/km². Les précipitations se caractérisent par une irrégularité interannuelle.

L'approche qualitative, par intégration des SIG et l'utilisation de l'application Model builder sur ArcGis, a permis l'identification des zones les plus exposées au risque érosif. Celles-ci, occupent la majeure partie du bassin soit environ 68,021%. Ces zones favorisent l'apparition des ravinements. Elles sont essentiellement localisées à l'amont des bassins O. Chelif Ghrib, O. Ebda et Oued Fodda. Les zones où l'érosion est très peu répandue sont réparties sur une très faible surface, soit environ 0.168% de la superficie totale du bassin.

L'étude de la bathymétrie de la retenue d'oued Fodda, a montré que le volume du réservoir a diminué considérablement, depuis l'année de sa mise en eau (1932) jusqu'à l'année du dernier levé (2004). Le taux d'envasement estimé est de 54.29%. La capacité de la retenue a diminué progressivement, pour atteindre un volume moyen annuel minimal de 45.13 hm³ durant la période (2015 - 2016). L'analyse des comptes rendus mensuels (CRM) du barrage, mis à notre disposition, révèle une augmentation d'une perte de capacité de 1.66 jusqu'à 4.248 hm³ durant la période 2004-2015. Soit un taux d'envasement de 45.43%. Ce taux de comblement, est très important vis-à-vis des opérations de dévasement qui ont été effectuées durant le mois de février de la même année.

L'analyse statistique de l'échantillon des variables (profondeurs) choisies, distingue une répartition plus ou moins symétrique et uniforme, avec un aplatissement assez faible par rapport à la courbe normale. 25% des valeurs sont inférieurs à 7.16 m alors que 25% sont supérieures à 15.27 m, et donc 50% des valeurs sont concentrés autour d'une moyenne de 11.052m. Cette dernière, représente la profondeur d'eau moyenne stockée dans la retenue du barrage oued

Fodda pour le 02 Avril 2017. La correction des points aberrants. A été faite à l'issus du diagramme QQ-Plot. L'analyse du semi-variogramme a montré un bon ajustement par adaptation du modèle exponentiel. Ce dernier est retenu pour l'interpolation par krigeage ordinaire.

Cette partie a été complétée par **l'élaboration de la carte bathymétrique** de la retenue Oued Fodda. Les profondeurs d'eau ont été réparties en 6 classes. La profondeur minimale ne dépasse pas les 7m, et la profondeur maximale est observée à 37m environ. Cette carte bathymétrique nous a permis de suivre l'évolution de la profondeur d'eau en fonction de la surface, durant l'année 2017.

La simulation du transport solide a été effectuée à l'aide du logiciel HEC-RAS. Le modèle a bien fonctionné, une fois tous les paramètres ont été définis dans leurs plages effectives. L'observation du profil du lit, du tronçon étudié, a été sélectionnée comme critère de comparaison des résultats du modèle avec les valeurs réelles observées. La validation a été justifiée par une estimation quantitative avec un coefficient de détermination, R^2 , qui est égal à 0,92.

L'analyse granulométrique du tronçon de l'oued Fodda a montré qu'environ 90% de notre échantillon est situé dans la plage de la validité granulométrique d'Engelund Hansen. Par conséquent, cette formule a été utilisée pour l'évaluation du transport solide à l'amont et au niveau du barrage.

La masse et la concentration des sédiments ont marqué une augmentation importante au niveau des sections transversales situées à l'amont du barrage. Une masse totale cumulée a été estimée à environ 712699.25 tonnes à l'amont immédiat de la digue et une concentration maximale de 22.35 g/l a été observée particulièrement pour trois sections principales choisies sur le tronçon de l'oued Fodda amont. Cependant, à l'intérieur de la retenue, la variation de la concentration n'est observée que pendant les périodes de crue c'est-à-dire uniquement pour les débits les plus élevés.

La dernière partie de cette étude consiste à **l'étude de l'évolution des dépôts** dans la retenue du barrage oued Fodda. Cette dernière a montré que : la capacité de stockage estimée pour la journée du 02/04/2017 est de 105.414 hm³ correspondante à une cote normale retenue de 370.5m.

L'évolution du fond a été cartographiée et les résultats ont montrés que : l'altitude maximale estimée pour l'année 2017 est de 381.612 m. Cependant, la hauteur minimale est évaluée à environ 339.849 m

L'identification des volumes des dépôts et d'érosion, nous a permis de calculer Le volume total des sédiments déposés au fond de la retenue d'oued Fodda. Ce volume est évalué à environ 9.43 hm³. Cependant, le volume moyen des sédiments érodés est estimé à 0.3 hm³. Cette différence de volume traduit le taux de comblement élevé et également l'accélération du phénomène d'envasement dans la région.

D'après les résultats suscités, nous pouvons conclure que la retenue du barrage oued Fodda est exposée à des graves problèmes qui menacent la capacité de stockage et la potabilité de ses eaux. La réduction du volume en eau du barrage, remarquée durant la période 2004-2017 est une détérioration de la qualité de l'eau stockée. À terme, les dépôts des sédiments peuvent nuire au bon fonctionnement de l'ouvrage. Au-delà de l'optimisation économique, les exigences pour la durabilité à long terme favorisent les mesures pour atténuer ce problème. La carte « érosion-dépôt » élaborée, fournit un excellent outil pour les gestionnaires du barrage. L'utilisation de la retenue elle-même pour le dévasement peut être économiquement efficace, surtout que les volumes des sédiments ont été identifiés.

Comme perspectives, et pour améliorer les résultats de cette étude, il serait plus intéressant d'étudier le même cas avec deux ou trois autres logiciels et comparer leurs résultats avec les données observées. Il serait également plus judicieux d'étudier des modèles 2D, et 3D afin de mieux reproduire les évolutions morphologiques et les flux transportés au niveau de chaque section transversale de l'oued ou de la retenue . Et finalement, les simulations doivent être utilisées pour prédire d'éventuels futurs changements dans le profil du lit de l'oued et les résultats seront principalement exploités pour l'établissement des stratégies de gestion et d'exploitation permettant de limiter le phénomène de sédimentation.

ANNEXES

Annexe 1 : Vitesses de chute de Toffaleti

Sand Grain Settling Velocity Versus Temperature, SP.G. 2.69, Shape Factor 0.9																	
TEMP °y	SETTLING VELOCITY IN FT./SEC								TEMP °y	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	.595	1.00	1.41	1.95	68	.022	.067	.168	.358	.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	.136	.316	.600	1.00	1.41	1.95	70	.022	.069	.171	.361	.647	1.00	1.41	1.95
41	.015	.048	.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 : Classes des grains utilisées par défaut sur HEC-RAS

Nature des sédiments	Intervalle des diamètres des grains (mm)	Diamètre moyen (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

Annexe 3 : Fichier de sortie des paramètres hydrauliques obtenus suite à la simulation du transport des sédiments (exemple de la station 9945).

HEC-RAS Plan: P8TS River: OFodda Reach: Amont												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Amont	9945	02Jan2016 0000	0.12	388.04	390.08		390.08	0.000000	0.00	24.59	24.05	0.00
Amont	9945	03Jan2016 0000	0.50	390.31	390.49	390.49	390.54	0.021385	0.97	0.51	5.43	1.01
Amont	9945	04Jan2016 0000	0.13	390.60	390.70	390.70	390.72	0.025692	0.70	0.18	3.63	1.00
Amont	9945	05Jan2016 0000	0.08	390.78	390.86	390.86	390.87	0.027623	0.61	0.13	3.41	1.00
Amont	9945	06Jan2016 0000	0.13	390.94	391.03	391.03	391.05	0.026809	0.64	0.20	4.70	0.99
Amont	9945	07Jan2016 0000	1.30	391.23	391.38	391.38	391.42	0.023045	0.88	1.47	19.08	1.02
Amont	9945	08Jan2016 0000	0.14	391.40	391.42	391.42	391.43	0.036058	0.45	0.31	15.89	1.02
Amont	9945	09Jan2016 0000	0.08	391.44	391.45	391.45	391.46	0.027465	0.33	0.24	15.76	0.85
Amont	9945	10Jan2016 0000	0.12	391.47	391.49	391.49	391.50	0.036437	0.42	0.28	15.85	1.00
Amont	9945	11Jan2016 0000	0.22	391.52	391.54	391.54	391.56	0.033676	0.52	0.42	16.21	1.03
Amont	9945	12Jan2016 0000	0.43	391.58	391.63	391.63	391.65	0.027506	0.63	0.68	16.88	1.00
Amont	9945	13Jan2016 0000	0.21	391.66	391.69	391.69	391.70	0.023123	0.45	0.46	16.45	0.86
Amont	9945	14Jan2016 0000	0.13	391.70	391.72	391.72	391.73	0.035769	0.43	0.30	16.07	1.00
Amont	9945	15Jan2016 0000	0.13	391.74	391.76	391.76	391.77	0.035815	0.43	0.30	16.11	1.00
Amont	9945	16Jan2016 0000	0.10	391.78	391.79	391.79	391.80	0.039772	0.41	0.26	16.02	1.03
Amont	9945	17Jan2016 0000	2.35	391.92	392.04	392.04	392.09	0.019994	1.01	2.34	22.59	1.00
Amont	9945	18Jan2016 0000	1.29	392.13	392.21	392.21	392.24	0.022880	0.82	1.57	22.69	1.00
Amont	9945	19Jan2016 0000	0.69	392.26	392.32	392.32	392.34	0.026293	0.67	1.04	22.92	1.00
Amont	9945	20Jan2016 0000	0.12	392.34	392.35	392.35	392.36	0.037560	0.39	0.30	18.71	1.00
Amont	9945	21Jan2016 0000	0.09	392.37	392.38	392.38	392.39	0.052016	0.40	0.23	18.64	1.13
Amont	9945	22Jan2016 0000	0.06	392.39	392.40	392.40	392.41	0.044563	0.31	0.18	18.53	1.01
Amont	9945	23Jan2016 0000	0.05	392.41	392.42	392.42	392.43	0.049929	0.30	0.16	18.63	1.04
Amont	9945	24Jan2016 0000	0.66	392.47	392.50	392.50	392.52	0.039763	0.55	1.20	47.52	1.11
Amont	9945	25Jan2016 0000	0.09	392.51	392.52	392.52	392.52	0.072089	0.30	0.31	47.38	1.19
Amont	9945	26Jan2016 0000	0.14	392.53	392.54	392.54	392.54	0.046084	0.31	0.45	47.40	1.02
Amont	9945	27Jan2016 0000	0.19	392.55	392.56	392.56	392.56	0.044981	0.34	0.54	47.41	1.04
Amont	9945	28Jan2016 0000	0.14	392.57	392.58	392.58	392.58	0.045975	0.31	0.45	47.40	1.02
Amont	9945	29Jan2016 0000	0.46	392.60	392.62	392.62	392.63	0.041440	0.49	0.95	47.45	1.09
Amont	9945	30Jan2016 0000	0.06	392.62	392.63	392.63	392.63	0.028441	0.19	0.31	47.38	0.75
Amont	9945	31Jan2016 0000	0.08	392.64	392.65		392.65	0.032868	0.23	0.36	47.39	0.83
Amont	9945	01Feb2016 0000	0.44	392.66	392.68	392.68	392.70	0.039870	0.47	0.94	47.45	1.07
Amont	9945	02Feb2016 0000	0.09	392.69	392.70	392.70	392.70	0.073738	0.30	0.31	47.38	1.21
Amont	9945	03Feb2016 0000	0.15	392.71	392.72	392.72	392.72	0.043594	0.31	0.48	47.40	1.00
Amont	9945	04Feb2016 0000	0.44	392.74	392.76	392.76	392.77	0.040142	0.47	0.93	47.45	1.07

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Amont	9945	04Feb2016 0000	0.44	392.74	392.76	392.76	392.77	0.040142	0.47	0.93	47.45	1.07
Amont	9945	05Feb2016 0000	0.10	392.76	392.77	392.77	392.78	0.093060	0.34	0.31	47.38	1.36
Amont	9945	06Feb2016 0000	0.12	392.78	392.79	392.79	392.79	0.041066	0.28	0.42	47.39	0.95
Amont	9945	07Feb2016 0000	0.48	392.81	392.83	392.83	392.84	0.043476	0.50	0.95	47.45	1.12
Amont	9945	08Feb2016 0000	0.20	392.84	392.85	392.85	392.86	0.042172	0.35	0.57	47.41	1.01
Amont	9945	09Feb2016 0000	0.09	392.86	392.86	392.86	392.87	0.075297	0.31	0.30	47.38	1.22
Amont	9945	10Feb2016 0000	0.43	392.88	392.90	392.90	392.91	0.039772	0.46	0.92	47.45	1.06
Amont	9945	11Feb2016 0000	0.15	392.91	392.92	392.92	392.93	0.039589	0.31	0.49	47.40	0.96
Amont	9945	12Feb2016 0000	0.41	392.94	392.96	392.96	392.97	0.038394	0.45	0.90	47.45	1.04
Amont	9945	13Feb2016 0000	0.06	392.97	392.97		392.98	0.034100	0.20	0.29	47.38	0.81
Amont	9945	14Feb2016 0000	0.39	392.99	393.01	393.01	393.02	0.037894	0.44	0.89	47.45	1.03
Amont	9945	15Feb2016 0000	0.23	393.02	393.03	393.03	393.04	0.047823	0.38	0.60	47.42	1.09
Amont	9945	16Feb2016 0000	1.26	393.08	393.12	393.12	393.14	0.027761	0.64	1.97	47.57	1.01
Amont	9945	17Feb2016 0000	4.13	393.21	393.30	393.30	393.35	0.020937	0.95	4.37	47.86	1.00
Amont	9945	18Feb2016 0000	1.74	393.35	393.40	393.40	393.43	0.028048	0.73	2.37	47.64	1.05
Amont	9945	19Feb2016 0000	0.66	393.43	393.46	393.45	393.47	0.026863	0.49	1.34	47.52	0.93
Amont	9945	20Feb2016 0000	0.07	393.46	393.47	393.47	393.47	0.044789	0.23	0.30	47.39	0.94
Amont	9945	21Feb2016 0000	0.13	393.48	393.49	393.49	393.49	0.047747	0.30	0.42	47.40	1.02
Amont	9945	22Feb2016 0000	0.22	393.50	393.51	393.51	393.52	0.076622	0.43	0.51	47.41	1.34
Amont	9945	23Feb2016 0000	0.74	393.54	393.57	393.57	393.58	0.030660	0.53	1.39	47.52	1.00
Amont	9945	24Feb2016 0000	0.17	393.58	393.59	393.59	393.59	0.046279	0.34	0.51	47.42	1.04
Amont	9945	25Feb2016 0000	0.17	393.60	393.61	393.61	393.61	0.046348	0.34	0.51	47.42	1.04
Amont	9945	26Feb2016 0000	0.20	393.62	393.64	393.64	393.64	0.025854	0.30	0.66	47.43	0.81
Amont	9945	27Feb2016 0000	0.46	393.66	393.69	393.69	393.69	0.021054	0.40	1.17	47.50	0.81
Amont	9945	28Feb2016 0000	0.17	393.70	393.71	393.71	393.71	0.046670	0.34	0.51	47.42	1.05
Amont	9945	29Feb2016 0000	0.72	393.74	393.76	393.76	393.78	0.030970	0.53	1.36	47.53	1.00
Amont	9945	01Mar2016 0000	4.09	393.86	393.95	393.95	393.99	0.020963	0.94	4.34	47.94	1.00
Amont	9945	02Mar2016 0000	2.37	394.01	394.07	394.07	394.10	0.023634	0.79	3.02	47.78	1.00
Amont	9945	03Mar2016 0000	0.69	394.10	394.13	394.13	394.14	0.031165	0.52	1.33	47.54	1.00
Amont	9945	04Mar2016 0000	0.79	394.16	394.19	394.19	394.21	0.030748	0.55	1.44	47.56	1.01
Amont	9945	05Mar2016 0000	0.71	394.22	394.25	394.25	394.26	0.030877	0.53	1.34	47.55	1.00
Amont	9945	06Mar2016 0000	0.14	394.26	394.27	394.27	394.27	0.044388	0.31	0.45	47.42	1.00
Amont	9945	07Mar2016 0000	0.71	394.29	394.32	394.32	394.34	0.030861	0.53	1.34	47.55	1.00
Amont	9945	08Mar2016 0000	0.66	394.35	394.38	394.38	394.39	0.031792	0.52	1.28	47.55	1.00

HEC-RAS Plan: P8TS River: OFodda Reach: Amont												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Amont	9945	08Mar2016 0000	0.66	394.35	394.38	394.38	394.39	0.031792	0.52	1.28	47.55	1.00
Amont	9945	09Mar2016 0000	1.82	394.43	394.48	394.48	394.51	0.025040	0.72	2.53	47.75	1.00
Amont	9945	10Mar2016 0000	5.83	394.60	394.71	394.71	394.77	0.019558	1.06	5.51	48.26	1.00
Amont	9945	11Mar2016 0000	5.30	394.82	394.93	394.93	394.98	0.019810	1.02	5.18	48.27	1.00
Amont	9945	12Mar2016 0000	12.80	395.12	395.32	395.32	395.41	0.016666	1.37	9.33	49.17	1.01
Amont	9945	13Mar2016 0000	26.99	395.63	395.95	395.95	396.10	0.014390	1.74	15.50	50.99	1.01
Amont	9945	14Mar2016 0000	10.14	396.11	396.28	396.28	396.36	0.017774	1.27	8.00	49.77	1.01
Amont	9945	15Mar2016 0000	4.26	396.37	396.46	396.46	396.51	0.021092	0.95	4.48	48.95	1.00
Amont	9945	16Mar2016 0000	1.97	396.52	396.58	396.58	396.60	0.024786	0.74	2.67	48.41	1.00
Amont	9945	17Mar2016 0000	3.15	396.65	396.73	396.73	396.77	0.022335	0.86	3.67	48.96	1.00
Amont	9945	18Mar2016 0000	3.22	396.80	396.88	396.88	396.92	0.023415	0.88	3.68	49.19	1.02
Amont	9945	19Mar2016 0000	2.50	396.95	397.01	397.01	397.04	0.023480	0.79	3.16	49.17	1.00
Amont	9945	20Mar2016 0000	1.31	397.05	397.10	397.10	397.12	0.027045	0.64	2.04	48.69	1.00
Amont	9945	21Mar2016 0000	0.78	397.13	397.17	397.17	397.18	0.018670	0.47	1.67	48.55	0.80
Amont	9945	22Mar2016 0000	0.76	397.20	397.24	397.24	397.25	0.018534	0.46	1.66	48.67	0.80
Amont	9945	23Mar2016 0000	1.38	397.28	397.32	397.32	397.34	0.027305	0.65	2.11	49.23	1.01
Amont	9945	24Mar2016 0000	20.63	397.58	397.83	397.83	397.93	0.016086	1.44	14.35	68.64	1.00
Amont	9945	25Mar2016 0000	17.76	398.02	398.20	398.20	398.29	0.016928	1.33	13.31	74.01	1.01
Amont	9945	26Mar2016 0000	5.01	398.28	398.35	398.35	398.39	0.022190	0.88	5.73	73.61	1.00
Amont	9945	27Mar2016 0000	3.89	398.42	398.48	398.48	398.52	0.024139	0.81	4.79	73.56	1.01
Amont	9945	28Mar2016 0000	3.89	398.55	398.61	398.61	398.65	0.023781	0.81	4.82	73.56	1.01
Amont	9945	29Mar2016 0000	2.06	398.66	398.70	398.70	398.72	0.026790	0.65	3.17	73.47	1.00
Amont	9945	30Mar2016 0000	1.48	398.74	398.77	398.77	398.79	0.028956	0.58	2.54	73.43	1.00
Amont	9945	31Mar2016 0000	0.88	398.79	398.82	398.82	398.83	0.042842	0.53	1.65	73.38	1.13
Amont	9945	01Apr2016 0000	0.98	398.85	398.87	398.87	398.88	0.022303	0.46	2.15	73.41	0.85
Amont	9945	02Apr2016 0000	0.96	398.90	398.93	398.93	398.94	0.022329	0.45	2.12	73.41	0.85
Amont	9945	03Apr2016 0000	0.71	398.95	398.97	398.97	398.98	0.036543	0.46	1.52	73.37	1.03
Amont	9945	04Apr2016 0000	0.72	398.99	399.02	399.02	399.03	0.037122	0.47	1.53	73.38	1.04
Amont	9945	05Apr2016 0000	0.79	399.04	399.06	399.06	399.07	0.040187	0.50	1.58	73.38	1.09
Amont	9945	06Apr2016 0000	2.69	399.11	399.17	399.17	399.19	0.018690	0.65	4.14	73.54	0.87
Amont	9945	07Apr2016 0000	3.24	399.22	399.28	399.28	399.31	0.025956	0.77	4.20	73.55	1.03
Amont	9945	08Apr2016 0000	1.94	399.32	399.36	399.36	399.38	0.027267	0.64	3.05	73.48	1.00
Amont	9945	09Apr2016 0000	2.52	399.42	399.47	399.47	399.49	0.018909	0.63	3.98	73.54	0.87
Amont	9945	10Apr2016 0000	2.55	399.52	399.57	399.57	399.60	0.027051	0.71	3.59	73.52	1.02
Amont	9945	11Apr2016 0000	2.05	399.61	399.66	399.66	399.68	0.027538	0.65	3.14	73.49	1.01
Amont	9945	12Apr2016 0000	1.41	399.69	399.72	399.72	399.74	0.029729	0.58	2.45	73.45	1.01
Amont	9945	13Apr2016 0000	0.83	399.75	399.78	399.78	399.79	0.023118	0.43	1.92	73.41	0.85
Amont	9945	14Apr2016 0000	0.82	399.80	399.83	399.83	399.84	0.023161	0.43	1.91	73.41	0.85
Amont	9945	15Apr2016 0000	0.90	399.85	399.88	399.88	399.89	0.034391	0.50	1.79	73.41	1.03
Amont	9945	16Apr2016 0000	0.96	399.90	399.92	399.92	399.94	0.041638	0.55	1.76	73.40	1.13
Amont	9945	17Apr2016 0000	0.81	399.95	399.98	399.98	399.99	0.023354	0.43	1.89	73.41	0.85
Amont	9945	18Apr2016 0000	0.89	400.00	400.02	400.02	400.04	0.033825	0.50	1.79	73.41	1.02
Amont	9945	19Apr2016 0000	0.88	400.05	400.07	400.07	400.09	0.034016	0.50	1.77	73.41	1.02
Amont	9945	20Apr2016 0000	0.93	400.10	400.12	400.12	400.13	0.041723	0.54	1.72	73.40	1.13
Amont	9945	21Apr2016 0000	0.93	400.14	400.17	400.17	400.18	0.040756	0.54	1.73	73.41	1.11
Amont	9945	22Apr2016 0000	0.83	400.19	400.21	400.21	400.23	0.035675	0.49	1.69	73.40	1.04
Amont	9945	23Apr2016 0000	0.87	400.24	400.26	400.26	400.27	0.033353	0.49	1.77	73.41	1.01
Amont	9945	24Apr2016 0000	0.83	400.28	400.31	400.31	400.32	0.034694	0.49	1.70	73.41	1.02
Amont	9945	25Apr2016 0000	0.89	400.33	400.35	400.35	400.37	0.041055	0.53	1.69	73.41	1.11
Amont	9945	26Apr2016 0000	0.24	400.36	400.37	400.37	400.38	0.045075	0.32	0.75	73.34	1.02
Amont	9945	27Apr2016 0000	0.91	400.40	400.42	400.42	400.44	0.037606	0.52	1.76	73.41	1.07
Amont	9945	28Apr2016 0000	0.28	400.43	400.44	400.44	400.45	0.049779	0.35	0.79	73.34	1.08
Amont	9945	29Apr2016 0000	0.89	400.47	400.49	400.49	400.50	0.038579	0.52	1.72	73.41	1.08
Amont	9945	30Apr2016 0000	0.29	400.50	400.52	400.52	400.52	0.026831	0.30	0.97	73.36	0.82

Annexe 4 : Masses des sédiments cumulées (en tonnes)

Stations	CM	VFS	FS	MS	CS	VCS	VFG	FG	MG	Masse cum
9752.66	2712.556	4238.29	10445.65	89367.773	179949.39	193747.25	95519.74	48501.992	20995.7	645478.375
9689.94	3483.578	5135.78	11731.85	95840.438	188015.23	199657.95	97655.73	49276.375	21235.9	672032.875
9623.921	4667.973	6267.11	13339.83	103451.79	196352.2	204871.67	99272.7	49760.023	21354.9	699338.125
9556.041	5088.382	6540.22	13649.74	104655.31	197486.78	205510.06	99447.36	49801.055	21361	703539.938
9493.101	5552.315	6811.92	13962.26	105855.71	198510.34	205965.88	99513.68	49782.703	21342.1	707296.875
9430.181	5508.075	6767.63	13873.94	105195.82	197283.14	204699.56	98901.51	49480.082	21215.4	702925.125
9364.65	5503.99	6763.49	13864.83	105120.27	197134.72	204538.63	98823.81	49437.586	21195.6	702382.875
9297.75	5515.602	6771.85	13883.27	105257.41	197379.03	204775.44	98926.84	49482.117	21212	703203.562
9233.25	5771.774	6850.12	13941.24	105377.25	197350.41	204668.2	98860.62	49449.148	21202.2	703470.938
9166.48	6281.443	6999.1	14110.77	106168.27	198418.75	205568.44	99247.95	49632.406	21277.1	707704.188
9102.83	6466.883	7058.35	14176.6	106404.79	198672.48	205782.59	99345.72	49671.57	21295.4	708874.438
9038.35	6710.371	7076.8	14177.4	106380.56	198628.55	205742.97	99328.17	49672.156	21291.1	709008.125
8971.89	6991.572	7126.9	14253.95	106904.85	199555.91	206682.98	99778.02	49889.012	21381	712564.188
8907.189	6993.372	7110.32	14221.47	106664.47	199113.64	206232.06	99563.98	49785.645	21338.2	711023.188
8841.51	7005.855	7093.27	14189.52	106441.56	198709.47	205811.63	99352.95	49679.531	21296.8	709580.562
8778.46	6994.626	7081.35	14166.05	106267.66	198399.72	205512.72	99219.91	49622.633	21273.4	708538.000
8712.36	6977.41	7064.89	14134.12	106033.2	197975.08	205080.38	99010.33	49516.484	21227.4	707019.250
8646.271	6948.843	7036.34	14077	105606.24	197180.41	204256.59	98611.04	49316.457	21143.9	704176.812
8580.78	6943.831	7027.6	14061.61	105504.6	197016.38	204102.77	98543.65	49293.168	21137.6	703631.188
8537.09	6954.394	7023.37	14059.22	105545.98	197158.63	204338.25	98710.32	49407.941	21198.1	704396.250
8455.609	6984.234	7057.36	14135.31	106155.37	198378.84	205633.41	99340.14	49719.172	21327.9	708731.688
8388.289	6971.624	7048.51	14114.3	105986.81	198059.98	205342.53	99208.14	49651.695	21300.6	707684.125
8322.259	7008.069	7061.49	14142.09	106182.96	198379.67	205587.03	99294.1	49675.711	21301.3	708632.438
8254.469	7042.104	7081.13	14176.85	106400.04	198713.09	205891.63	99425.87	49731.336	21321.9	709784.000
8190.439	7038.381	7081.17	14174.12	106370.51	198636.81	205797.03	99378.68	49710.133	21315.4	709502.250
8128.179	6995.811	7036.47	14083.19	105678.52	197337.97	204458.47	98727.85	49381.25	21173.9	704873.500
8060.199	7068.323	7105.62	14217.21	106658.02	199126.34	206238.3	99565.65	49784.031	21335.2	711098.688
8017.909	7121.771	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712695.125
7936.879	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
7868.719	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
7800.749	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
7737.409	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
7672.349	7127.003	7126.89	14253.88	106904.56	199555.59	206682.8	99777.95	49888.992	21381	712698.688
7608.319	7119.489	7119.68	14240.65	106812.61	199394.78	206519.72	99702.04	49852.898	21366.9	712128.750
7541.009	7111.531	7110.47	14220.65	106649.31	199089.19	206236.41	99587.52	49810.242	21354.4	711169.750
7475.839	7092.628	7091.41	14182.52	106364.41	198570.39	205708.95	99331.82	49687.355	21303.9	709333.375
7412.409	7064.021	7062.53	14124.76	105931.8	197763.38	204869.89	98924.82	49483.512	21217.7	706442.375
7349.049	7033.579	7033.03	14068.06	105536.14	197042.05	204098.59	98540.29	49285.223	21129.5	703766.562
7281.919	7005.102	7010.72	14025.64	105233.22	196509.09	203589.88	98304.61	49173.926	21086.3	701938.438
7218.279	6968.369	6977.96	13962.82	104785.59	195693.25	202774.47	97932.43	49000.555	21028.4	699123.875
7151.539	6900.499	6911.46	13837.79	103936.8	194290.7	201471.73	97354.45	48749.352	20936.4	694389.250

7086.119	6856.335	6868.44	13756.25	103377.36	193372.36	200618.31	96980.65	48583.422	20875.4	691288.500
7024.819	6816.293	6836.1	13697.23	102942.11	192564.34	199779.69	96606.39	48401.473	20801.2	688444.750
6956.599	6855.181	6894.29	13826.54	104108.06	195161.66	202964.27	98301.74	49307.516	21190.6	698609.875
6890.919	6859.94	6908.51	13860.3	104314.49	195414.83	203068.08	98259.04	49255.562	21163.2	699103.938
6823.479	6835.07	6886.51	13815.44	103987.15	194830.39	202443.89	97946.45	49106.406	21100.3	696951.500
6762.109	6825.515	6881.61	13827.71	104224.01	195546.63	203332.78	98391.52	49309.82	21178.9	699518.438
6694.709	6933.443	6998.8	14044.9	105623.56	197492.16	204766.05	98937.68	49521.801	21251.4	705569.812
6630.219	6946.395	7009.86	14058.14	105675.61	197646.89	205044.52	99096.88	49615.469	21290.8	706384.562
6565.369	7001.537	7062.6	14184.3	106654.58	199334.38	206560.67	99742.41	49879.559	21379	711799.062
6502.489	7029.648	7082.03	14202.6	106707.73	199373.69	206580.67	99747.92	49880.93	21379.3	711984.500
6458.759	7030.183	7082.23	14202.61	106706.77	199371.2	206578.39	99746.99	49880.574	21379.2	711978.125
6331.389	7032.255	7083.16	14202.92	106706.81	199371.59	206579.36	99747.51	49880.801	21379.2	711983.688
6301.779	6949.683	7083.57	14203.11	106707.97	199373.84	206581.97	99748.84	49881.305	21379.3	711909.625
6263.819	6955.485	7086.35	14205.56	106716.05	199381.09	206585.59	99749.76	49881.68	21379.5	711941.000
6241.959	6927.02	7086.86	14207.12	106730.77	199408.02	206608.48	99758.02	49883.691	21379.7	711989.625
6204.429	6927.275	7087.06	14207.34	106731.66	199408.97	206609.11	99758.23	49883.762	21379.7	711993.125
5998.499	6935.186	7087.07	14207.39	106731.61	199408.92	206609.08	99758.23	49883.758	21379.7	712000.938
5820.919	6936.223	7087	14207.25	106730.56	199406.89	206606.95	99757.19	49883.293	21379.5	711994.875
5791.279	6936.234	7087.04	14207.36	106731.57	199408.95	206609.14	99758.21	49883.746	21379.7	712001.938
5674.959	6928.145	7076.13	14187.37	106581.05	199128.16	206324.39	99627.52	49825.184	21358.8	711036.688
5636.409	6894.084	7076.14	14187.23	106578.79	199119.22	206315.77	99623.88	49823.711	21358.3	710977.062
5588.959	6882.619	7069.13	14172.99	106474.81	198931.97	206130.48	99541.28	49785.734	21343.5	710332.500
5520.189	6862.339	7083.86	14208.48	106733.62	199388.31	206582.05	99747.77	49880.371	21379	711865.812
5461.149	6768.525	6990.38	14020.46	105314.42	196722.23	203814.72	98406.52	49205.543	21087.1	702329.938
5427.599	6788.096	7006.99	14067.66	105795.34	197853.5	205172.69	99155.48	49625.762	21284.8	706750.312
5337.389	6804.646	7021.63	14097	106021.91	198284.33	205625.22	99368.56	49723.246	21319.7	708266.250
5149.359	7126.995	7127	14254.01	106905.05	199556.09	206683.09	99778.05	49889.023	21381	712700.312
5117.81	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
5092.01	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
4777.98	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
4732.03	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
4684.06	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
4628.479	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
4580.37	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
4519.5	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
4465.319	7127.003	7127	14254	106905.03	199556.08	206683.09	99778.05	49889.023	21381	712700.312
4325.06	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
4275.069	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
4221.929	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
4165.399	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
4099.29	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
4029.19	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3964.05	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3902.11	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3834.28	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312

3773.42	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3705.59	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3641.88	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3575.59	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3509.969	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3441.199	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3382.669	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3317.089	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3250.829	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3185.589	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3120.589	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
3061.939	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2989.74	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2948.04	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2893.66	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2823.44	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2766.49	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2588.67	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2515.76	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2458.58	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2343.43	7127.003	7127	14254.01	106905.05	199556.09	206683.09	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2295.29	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2255.21	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2210.63	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2147.41	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2096.85	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
2035.32	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
1984.33	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
1703.92	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
1672.35	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
1627.7	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
1459.54	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
1415.31	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
1362.89	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
1314.19	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
1270.72	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
1152.86	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
1118.1	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
1074.05	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
1039.48	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
976.26	7127.003	7127	14254.01	106905.05	199556.09	206683.09	99778.05	49889.023	21381	712700.312
932.63	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
812.63	7127.003	7126.99	14254	106905.01	199556.06	206683.08	99778.04	49889.023	21381	712700.188
750.78	7108.988	7108.55	14218.07	106656.37	199111.7	206236.22	99569.68	49789.785	21340.2	711139.625
685.56	7111.532	7111.07	14223.9	106694.03	199216.64	206385.55	99659.73	49844.84	21367.9	711615.188

620.6	7119.032	7118.21	14236.5	106773.26	199346.61	206497.14	99709.49	49865.84	21374.7	712040.750
558.34	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
491.08	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
425.45	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
355.87	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
255.73	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
197.65	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
127.68	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
63.58	7127.003	7127	14254.01	106905.06	199556.09	206683.11	99778.05	49889.023	21381	712700.312
0	7126.993	7126.99	14253.99	106904.89	199555.8	206682.78	99777.9	49888.949	21381	712699.250

Annexe 5 : Concentration des sédiments observée aux niveaux des sections transversales amont : 9883, 8971 et 6824.

Date	Station 9883	Station 8971	Station 6824	Date	Station 9883	Station 8971	Station 6824
02-01-16 12:00	0	0.241	1326.429	22-01-16 12:00	37.694	202.303	4665.358
03-01-16 0:00	0	0.34	1146.099	23-01-16 0:00	192.58	339.609	0.034
03-01-16 12:00	0	1.969	5585.584	23-01-16 12:00	34.433	109.492	4912.191
04-01-16 0:00	0	187.917	5880.467	24-01-16 0:00	85.387	1582.03	0.003
04-01-16 12:00	0	1.206	1004.371	24-01-16 12:00	643.987	4937.562	9775.119
05-01-16 0:00	0	1.991	7344.413	25-01-16 0:00	17359.471	3382.917	0.344
05-01-16 12:00	0	0.182	3227.634	25-01-16 12:00	0	1739.182	0.105
06-01-16 0:00	0	75.112	4091.416	26-01-16 0:00	81.931	2039.57	0.025
06-01-16 12:00	0	3.957	2906.413	26-01-16 12:00	129.033	2813.248	0.767
07-01-16 0:00	0	132.382	1327.916	27-01-16 0:00	30.117	2866.903	0.106
07-01-16 12:00	0	0.682	6910.722	27-01-16 12:00	83.033	13.086	4.545
08-01-16 0:00	0.008	3553.629	3.614	28-01-16 0:00	18771.234	3705.3	0.219
08-01-16 12:00	0	0.147	15600.12	28-01-16 12:00	0.002	1702.564	4.957
09-01-16 0:00	0	1681.413	0.132	29-01-16 0:00	1433.857	2662.032	0.237
09-01-16 12:00	0	0	0.416	29-01-16 12:00	265.24	57.102	226.684
10-01-16 0:00	0	33.809	0.1	30-01-16 0:00	21143.154	5235.319	1.842
10-01-16 12:00	0	13.832	4.256	30-01-16 12:00	0	118.667	50.212
11-01-16 0:00	0	2816.756	0.267	31-01-16 0:00	316.424	463.334	0.288
11-01-16 12:00	0.001	1316.965	150.711	31-01-16 12:00	9.22	324.63	181.196
12-01-16 0:00	0.002	3140.354	1.762	01-02-16 0:00	18403.684	1725.16	0.495
12-01-16 12:00	0.021	7.268	10019.605	01-02-16 12:00	11.242	30.637	8930.64
13-01-16 0:00	0.069	1804.595	0.49	02-02-16 0:00	4276.01	2207.855	0.352
13-01-16 12:00	0.022	22.226	15.448	02-02-16 12:00	0.248	56.618	2.618
14-01-16 0:00	0.018	2941.456	0.48	03-02-16 0:00	125.605	1098.156	0.099
14-01-16 12:00	0.009	3.425	24.515	03-02-16 12:00	1173.671	0.004	12.968
15-01-16 0:00	0.006	1209.713	0.452	04-02-16 0:00	0.648	420.055	0.287
15-01-16 12:00	0.017	155.71	120.596	04-02-16 12:00	525.663	295.414	309.691
16-01-16 0:00	0.011	3094.143	0.632	05-02-16 0:00	20655.135	1412.005	1.714
16-01-16 12:00	0.021	0	521.535	05-02-16 12:00	0	0.504	516.011
17-01-16 0:00	0.007	2369.751	0.565	06-02-16 0:00	137.451	171.384	0.714
17-01-16 12:00	1005.893	213.993	996.477	06-02-16 12:00	21.593	185.957	825.624
18-01-16 0:00	20643.455	4942.792	1.259	07-02-16 0:00	15851.207	182.526	0.742
18-01-16 12:00	17146.834	14.068	7819.665	07-02-16 12:00	0.444	533.356	7.678
19-01-16 0:00	16407.865	4824.445	2.348	08-02-16 0:00	20501.867	545.981	7.048
19-01-16 12:00	1082.345	1.014	15.083	08-02-16 12:00	0.09	159.109	4.206
20-01-16 0:00	20314.75	5178.76	31.425	09-02-16 0:00	14909.819	841.733	4.505
20-01-16 12:00	7.031	59.407	4274.43	09-02-16 12:00	0	0	2.347
21-01-16 0:00	177.103	407.679	4.273	10-02-16 0:00	805.927	96.135	2.443
21-01-16 12:00	165.322	111.917	5734.297	10-02-16 12:00	0.058	288.969	14.785
22-01-16 0:00	37.235	2082.608	0.134	11-02-16 0:00	19375.797	320.08	15.287

11-02-16 12:00	0	57.364	8.135	05-03-16 0:00	18834.791	346.114	10.257
12-02-16 0:00	13377.45	424.739	8.722	05-03-16 12:00	325.682	0.004	9781.746
12-02-16 12:00	0.001	0.002	24.027	06-03-16 0:00	18399.463	891.419	0.873
13-02-16 0:00	17153.84	591.335	23.425	06-03-16 12:00	12.61	0	20.494
13-02-16 12:00	0	0.033	6.29	07-03-16 0:00	11764.554	69.824	0.519
14-02-16 0:00	10103.229	46.173	6.605	07-03-16 12:00	608.245	0	1724.971
14-02-16 12:00	0.001	221.689	35.618	08-03-16 0:00	18527.098	75.238	3.97
15-02-16 0:00	16995.289	224.293	34.105	08-03-16 12:00	149.734	0.07	7863.732
15-02-16 12:00	0.013	120.514	26.403	09-03-16 0:00	18537.352	1014.066	0.992
16-02-16 0:00	15826.426	311.798	24.618	09-03-16 12:00	741.91	0.006	583.147
16-02-16 12:00	278.002	2.797	75.446	10-03-16 0:00	16524.648	148.711	9.198
17-02-16 0:00	15680.499	2409.679	76.772	10-03-16 12:00	14244.487	157.647	8543.802
17-02-16 12:00	3495.411	36.855	113.862	11-03-16 0:00	20558.193	504.324	43.978
18-02-16 0:00	19771.588	2517.999	111.398	11-03-16 12:00	1431.953	187.415	102.377
18-02-16 12:00	2322.266	319.257	512.015	12-03-16 0:00	19614.73	339.173	12.935
19-02-16 0:00	18318.213	3982.991	480.669	12-03-16 12:00	21621.168	755.484	1823.845
19-02-16 12:00	901.525	0.104	961.168	13-03-16 0:00	21569.543	669.95	40.767
20-02-16 0:00	17336.799	1330.103	528.958	13-03-16 12:00	11372.491	981.357	2401.309
20-02-16 12:00	0.337	12.72	1982.187	14-03-16 0:00	19066.891	988.218	2583.102
21-02-16 0:00	39.911	103.574	37.35	14-03-16 12:00	1208.832	357.625	995.435
21-02-16 12:00	45.205	73.23	12323.621	15-03-16 0:00	21560.994	385.456	478.087
22-02-16 0:00	118.862	130.969	46.164	15-03-16 12:00	17782.008	188.752	10013.634
22-02-16 12:00	181.182	227.124	633.727	16-03-16 0:00	13071.355	92.89	13.949
23-02-16 0:00	1526.903	304.119	25.095	16-03-16 12:00	15785.069	451.841	362.461
23-02-16 12:00	1303.418	112.431	6112.38	17-03-16 0:00	14937.797	4.585	42.091
24-02-16 0:00	21221.055	2334.601	35.138	17-03-16 12:00	17613.506	2949.067	12278.298
24-02-16 12:00	0.015	0	8903.18	18-03-16 0:00	17402.021	1.698	0.775
25-02-16 0:00	3925.674	248.467	32.678	18-03-16 12:00	17621.914	456.858	8.124
25-02-16 12:00	95.393	132.372	3468.436	19-03-16 0:00	17793.402	46.88	23.702
26-02-16 0:00	58.47	168.056	63.486	19-03-16 12:00	16320.835	380.675	49.363
26-02-16 12:00	207.619	4.942	5410.815	20-03-16 0:00	16249.983	16.308	20.883
27-02-16 0:00	257.43	379.665	34.342	20-03-16 12:00	13511.885	454.91	1398.012
27-02-16 12:00	513.3	0.296	6795.634	21-03-16 0:00	13485.689	0.132	11.081
28-02-16 0:00	11954.138	696.761	15.68	21-03-16 12:00	6102.29	661.509	24.434
28-02-16 12:00	19.736	0.014	5168.382	22-03-16 0:00	6072.948	0.001	5.104
29-02-16 0:00	197.449	193.806	21.014	22-03-16 12:00	5950.875	151.137	131.479
29-02-16 12:00	1336.613	159.221	880.902	23-03-16 0:00	5922.931	0.028	7.648
01-03-16 0:00	19937.088	2303.13	28.672	23-03-16 12:00	14130.164	2223.865	96.055
01-03-16 12:00	1007.416	2.599	1145.119	24-03-16 0:00	14189.283	0.005	10.763
02-03-16 0:00	19703.285	2244.406	49.278	24-03-16 12:00	22041.957	2222.465	548.138
02-03-16 12:00	1878.282	7.264	11753.006	25-03-16 0:00	22352.32	468.205	255.991
03-03-16 0:00	17806.305	2887.616	5.921	25-03-16 12:00	21827.289	895.272	6283.616
03-03-16 12:00	424.457	0.001	2.607	26-03-16 0:00	19537.627	775.878	6.509
04-03-16 0:00	17868.494	640.311	0.929	26-03-16 12:00	14421.802	242.601	60.07
04-03-16 12:00	839.576	0.001	94.072	27-03-16 0:00	18816.299	248.784	3.454

27-03-16 12:00	17354.531	119.17	104.877	19-04-16 0:00	14507.882	2119.967	0.23
28-03-16 0:00	17537.336	335.213	3.936	19-04-16 12:00	11119.813	800.34	274.151
28-03-16 12:00	17499.834	71.852	212.207	20-04-16 0:00	11231.331	3532.286	0.239
29-03-16 0:00	17442.238	1214.447	4.866	20-04-16 12:00	15208.89	0.067	318.643
29-03-16 12:00	15493.423	11.018	237.164	21-04-16 0:00	15204.339	2598.514	0.271
30-03-16 0:00	15532.06	2571.677	1.829	21-04-16 12:00	15138.544	812.508	318.888
30-03-16 12:00	10526.483	0.04	294.389	22-04-16 0:00	15083.539	4012.59	0.261
31-03-16 0:00	13286.671	1151.999	0.62	22-04-16 12:00	11945.872	10.286	237.541
31-03-16 12:00	8171.82	0.039	147.547	23-04-16 0:00	11893.597	1376.392	0.245
01-04-16 0:00	15757.743	2474.371	0.175	23-04-16 12:00	11341.57	780.558	327.994
01-04-16 12:00	9965.245	0.001	249.078	24-04-16 0:00	11283.286	3556.673	0.272
02-04-16 0:00	11319.067	665.878	0.216	24-04-16 12:00	11713.814	0.072	323.879
02-04-16 12:00	8566.474	0.042	234.033	25-04-16 0:00	11675.472	1973.05	0.252
03-04-16 0:00	10848.783	1513.774	0.181	25-04-16 12:00	16313.425	447.592	359.924
03-04-16 12:00	5611.89	0	100.879	26-04-16 0:00	16150.941	3075.534	0.269
04-04-16 0:00	6379.135	722.111	0.128	26-04-16 12:00	7720.428	0.003	7.909
04-04-16 12:00	6735.494	0.022	99.228	27-04-16 0:00	7758.914	352.17	0.175
05-04-16 0:00	6897.536	1325.19	0.128	27-04-16 12:00	14791.836	599.701	9422.558
05-04-16 12:00	10908.338	0	134.577	28-04-16 0:00	14616.44	1344.714	0.352
06-04-16 0:00	12814.233	447.582	0.149	28-04-16 12:00	9716.4	2770.911	1.994
06-04-16 12:00	16572.314	6.149	1047.389	29-04-16 0:00	4536.594	0	0.147
07-04-16 0:00	14645.822	2825.745	0.614	29-04-16 12:00	16144.666	549.231	432.472
07-04-16 12:00	16719.316	1.487	378.833	30-04-16 0:00	15291.042	458.47	0.466
08-04-16 0:00	17113.727	2629.978	0.918	30-04-16 12:00	3607.093	420.791	13.028
08-04-16 12:00	14301.178	0.252	348.27				
09-04-16 0:00	14268.389	5115.102	0.474				
09-04-16 12:00	14574.125	1.036	590.528				
10-04-16 0:00	13324.895	3834.588	0.634				
10-04-16 12:00	16040.368	0.171	556.21				
11-04-16 0:00	16856.713	3907.763	0.624				
11-04-16 12:00	10513.756	0.189	401.319				
12-04-16 0:00	10528.304	5149.229	0.525				
12-04-16 12:00	16796.375	0.009	498.045				
13-04-16 0:00	15277.869	4131.347	0.332				
13-04-16 12:00	10020.429	0.018	155.753				
14-04-16 0:00	9222.164	2603.07	0.175				
14-04-16 12:00	8097.84	0.46	186.833				
15-04-16 0:00	9320.281	1355.511	0.182				
15-04-16 12:00	14639.204	62.303	259.065				
16-04-16 0:00	14378.322	1907.201	0.219				
16-04-16 12:00	14115.553	234.486	257.612				
17-04-16 0:00	14277.146	2862.494	0.229				
17-04-16 12:00	10853.556	337.017	225.456				
18-04-16 0:00	8758.913	2515.174	0.205				
18-04-16 12:00	13851.115	92.955	291.141				

Annexe 6 : Concentration des sédiments pour les deux crues du 23 Janvier et 02 Février.

Stations	Crue du 23 Janvier	Crue du 02 Février	Stations	Crue 23 Janvier	Crue 02 Février
9752.66	6736.267	12278.532	7151.539	938.868	4547.86
9689.94	192.58	4276.01	7086.119	300.441	824.548
9623.921	5232.569	197.29	7024.819	815.975	8873.271
9556.041	0	197.29	6956.599	472.126	73.301
9493.101	0	0.488	6890.919	1807.315	3654.076
9430.181	1079.785	5070.713	6823.479	700.856	1063.896
9364.65	1859.158	4797.223	6762.109	3102.679	6063.167
9297.75	0	0.029	6694.709	0.034	0.352
9233.25	0	0.002	6630.219	75.859	1275.7
9166.48	0	0	6565.369	1.251	16.122
9102.83	0	0	6502.489	1.251	16.122
9038.35	0	0.002	6458.759	1.251	16.122
8971.89	0	0	6331.389	1.251	16.122
8907.189	0	4065.629	6301.779	1.251	13.938
8841.51	4.243	21.412	6263.819	1.251	13.938
8778.46	339.609	2207.855	6241.959	1.251	13.938
8712.36	996.2	4502.118	6204.429	1.251	13.938
8646.271	1764.261	6317.424	5998.499	1.251	13.938
8580.78	1577.52	1393.194	5820.919	1.251	13.938
8537.09	2592.206	4127.125	5791.279	1.251	13.938
8455.609	2.117	263.166	5674.959	15.22	63.392
8388.289	2.117	263.166	5636.409	17.063	63.453
8322.259	820.973	122.519	5588.959	17.063	63.453
8254.469	0	630.077	5520.189	2.393	28.389
8190.439	95.715	322.752	5461.149	4904.481	7857.952
8128.179	5149.612	6838.812	5427.599	122.274	680.106
8060.199	0	0	5337.389	148.745	680.106
8017.909	0	0	5149.359	0	0
7936.879	0	0	5117.81	0	0
7868.719	0	0	5092.01	0	0
7800.749	0	0	4777.98	0	0
7737.409	0	0	4732.03	0	0
7672.349	0	0	4684.06	0	0
7608.319	0	0.336	4628.479	0	0
7541.009	47.432	180.74	4580.37	0	0
7475.839	1912.505	3431.698	4519.5	0	0
7412.409	120.187	5549.74	4465.319	0	0
7349.049	1942.783	94.645	4325.06	0	0
7281.919	339.864	3374.761	4275.069	0	0
7218.279	1515.476	1405.187	4221.929	0	0

Stations	Crue du 23 Janvier	Crue du 02 Février	Stations	Crue du 23 Janvier	Crue du 02 Février
3964.05	0	0	1118.1	0	0
3902.11	0	0	1074.05	0	0
3834.28	0	0	1039.48	0	0
3773.42	0	0	976.26	0	0
3705.59	0	0	932.63	0	0
3641.88	0	0	812.63	0	0
3575.59	0	0	750.78	0.003	2.312
3509.969	0	0	685.56	0.601	0
3441.199	0	0	620.6	1459.814	2398.474
3382.669	0	0	558.34	0	0
3317.089	0	0	491.08	0	0
3250.829	0	0	425.45	0	0
3185.589	0	0	355.87	0	0
3120.589	0	0	255.73	0	0
3061.939	0	0	197.65	0	0
2989.74	0	0	127.68	0	0
2948.04	0	0	63.58	0	0
2893.66	0	0	0	0	0
2823.44	0	0			
2766.49	0	0			
2588.67	0	0			
2515.76	0	0			
2458.58	0	0			
2343.43	0	0			
2295.29	0	0			
2255.21	0	0			
2210.63	0	0			
2147.41	0	0			
2096.85	0	0			
2035.32	0	0			
1984.33	0	0			
1703.92	0	0			
1672.35	0	0			
1627.7	0	0			
1459.54	0	0			
1415.31	0	0			
1362.89	0	0			
1314.19	0	0			
1270.72	0	0			
1152.86	0	0			

Annexe 7 : Table attributaire des surfaces et des volumes des dépôts durant la période 2004-2017.

VOLUME	AREA
-9336093.977	4335525
-12.65487671	225
-28.68804932	225
-21.66366577	225
-39.81170654	225
-19.66552734	225
-2.938842773	225
-111.4013672	450
-15.99884033	225
-8.404541016	225
-61.17324829	450
-53101.93634	14400
-1453.031158	2250
-176.6738892	1575
-904.5249939	5850
-2204.853058	1125
-1223.835754	225
-22690.5098	4275
-20.1461792	450
-5.877685547	225
-1.29776001	225
-26.06506348	900
-49.65820313	450
-23.53134155	225
-2.966308594	450
-5279.981232	225
-0.686645508	225
-2218.050385	450
-2.437591553	225
-11.23352051	450
-0.844573975	225

Annexe 8 : Table attributaire des surfaces et des volumes des dépôts durant la période 2004-2017.

VOLUME	AREA	VOLUME	AREA	VOLUME	AREA
7.89642334	225	558.1604004	1125	462.6686096	5625
6.996917725	225	38.28048706	225	593.5707092	2250
251.2504578	225	130.9913635	2025	8.226013184	225
776.1566162	1575	149.1325378	675	8.541870117	450
327.0629883	2250	21.01821899	225	48.99215698	675
58.6807251	225	34.44900513	450	47.77679443	450
208.9324951	900	55.66635132	225	1025.196075	7875
15.64865112	225	1726.171875	9225	1543.599701	14175
27.93273926	225	3.54309082	225	261.99646	225
50.26245117	225	3590.592957	33300	195.3231812	5175
63.6177063	450	4.85458374	225	17.29660034	225
19.81658936	450	8.679199219	225	441.0461426	2700
535.3363037	2475	8.445739746	225	209.5298767	2025
96.62475586	450	31.23550415	450	1095.426178	8325
21.24481201	225	1.435089111	225		
4.682922363	225	14.49508667	450		
0.185394287	225	194.2382813	900		
173.8243103	2475	217.0074463	900		
0.748443604	225	61.09085083	1125		
3.646087646	225	30.30166626	450		
14.1242981	225	1442.855072	6975		
0.343322754	225	28.51638794	225		
1.805877686	225	15.4838562	225		
49.85733032	450	6.481933594	225		
78.1539917	450	1.970672607	225		
6077.430725	28575	867.8443909	6075		
15.97824097	225	7.264709473	225		
102.3170471	900	22.42584229	675		
50.61950684	1125	12.17422485	225		
6.756591797	225	192.6315308	2250		
6.159210205	225	1.647949219	225		
6.57119751	225	248.7236023	2700		
40198.16437	80550	4.442596436	225		
2.554321289	225	7.086181641	225		
34.42840576	450	1070.274353	5400		
12.00256348	225	5.328369141	225		
26.67617798	225	432.723999	3375		
21.1555481	225	114.9375916	900		
15.44952393	225	23783.12759	75825		
101.4175415	450	78.12652588	450		
11.45324707	225	11.3571167	225		
14106.89163	13725	53515.06348	87525		
1226.88446	3375	2279.628754	6975		
11705.93262	26550	132.5019836	675		
85.24703979	225	147.7043152	225		
631.7550659	1350	52.64511108	225		
77.63214111	225	20.26977539	225		

RÉFÉRENCES

- [1] Cheggour A., “ Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des S.I.G. : Application au bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas, Maroc ”, Thèse de doctorat, (Juin 2008), 204p.
- [2] A. Bouzid, L'expérience de la Tunisie dans la protection des sols et des barrages. Séminaire national sur l'érosion et l'envasement des barrages, Alger, 1991.
- [3] B. Touaibia, Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. Sécheresse 21(2010), pp. 1-6.
- [4] B. Morsli, M. Habi, M. Meddi. Dynamique de l'érosion en zone méditerranéenne algérienne : facteurs explicatifs de variation du ruissellement et de l'érosion sous différentes occupations du sol. Rev. Sci. Eau 26(2) (2013), pp. 89-105.
- [5] M. Achite, B. Touaibia, S. Ouillon, Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences et Perspectives. 14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments. Marrakech, Morocco, (2006). pp. 14-19.
- [6] SADIKI A., BOUHLASSA S., AUAJJAR J., FALEH F & MACAIRE5 J.J., “ Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab”, Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre n°26, (2004), 69-79.
- [7] Benkaci S., Abir D, Oumellal D., Remini B., 2018, “ Modélisation de l'érosion du bassin haut et moyen Cheliff par l'application Model builder sur ArcGis ”, Journal Of Materials And Engineering Structures 5 (Avril 2018), 81- 93.
- [8] Agence Du Bassin Hydrographique Cheliff Zahrez, A.B.H. “ Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Cheliff- Aval du barrage de Boughzoul”, (2004), 62p.
- [9] REMINI B., HALLOUCHE W., “ Evolution de l'envasement du barrage de l'Oued El Fodda ”. Revue Eau énergie air, n°1, (Avril 2007a), 75-78.
- [10] García-Ruiz J.M., Nadal-Romero E., Lana-Renault N., Beguería S., “ Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges”, Geomorphology 198, (2013), 20-36.
- [11] Laflen, J.M., et Roose E.J., “Methodologies for assessment of soil degradation due water erosion”. CRC Press LLC, USA, (1997), 85 p.

- [12] FAO et MARA., “ Lutte contre l'érosion et conservation des sols”. Projet MOR 71/536 (1977).
- [13] Ben Slimane A., “ Rôle de l'érosion ravinatoire dans l'envasement des retenues collinaires dans la Dorsale tunisienne et le Cap Bon ”. Thèse de Doctorat en Cotutelle, Eaux Continentales et Société et Production végétale, Montpellier Sup Agro et INAT, France et Tunisie, (2013), 194 p.
- [14] Ouvry J.F., “ Dégradation des sols par l'érosion hydrique : quels remèdes en région de grandes cultures ”, Edition GREP, ISSN 0245-9442. Pour 2012/1 (N° 213), (2012), 163-176.
- [15] Roose E., “ Dégradation des terres et développement en Afrique de l'Ouest ”. Comm. Coll. de Gembloux (Belgique) mu/tigr., (1985), 30 p.
- [16] Ellison W.D., “ Studies of raindrop erosion”, Agric. Eng. 25, (1944), 131-181.
- [17] Touré M. Karambiri H. “ Conservation des eaux et des sols ”, (2 décembre 2004). <http://www.bf.refer.org/toure/>
- [18] Zaher H., “ Conservation des sols et de l'eau ”. École Nationale Forestière d'Ingénieurs, Département Sol Eau Biodiversité. MAROC (2010).
- [19] WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. “Predicting Rainfall Erosion Losses”; A guide to conservation planning, Agriculture handbook No. 537. US department of Agriculture Science and Education Administration, Washington, DC, USA, (1978), 163 p.
- [20] KING D., LE BISSONNAIS Y. “Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe”. Comptes Rendus de l'Académie Agricole de France, 78, 6, (1992), pp. 91-105.
- [21] Fox D., “La dégradation des sols dans le monde”. Université de Nice Sophia Antipolis (2008).
- [22] Ritter J., “ L'érosion du sol – Causes et effets”, Fiche technique. MAAARO, [Le ministère Agriculture Aliments Rural](#), (2012).
- [23] Millward, A.A., Mersey, J.E., “Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed”. CATENA, (1999), pp.109-129;
- [24] Dabral, P.P., Baithuri, N., Pandey, A., “ Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing ”. Water Resources Management, (2008), pp. 1783-1798.

- [25] Bonilla, C.A., Reyes, J.L., Magri, A., "Water erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework", central Chile. Chilean Journal of Agricultural Research, (2010), pp. 159-169.
- [26] Pandey, A., Mathur, A., Mishra, S.K., Mal, B.C. "Soil erosion modeling of a Himalayan watershed using RS and GIS". Environmental Earth Sciences, (2009), pp.399-410.
- [27] Robert P. Stonen Don Hilborn,, "Équation universelle des pertes en terre (USLE) " Agdex : 572/751. Fiche technique, (2012).
- [28] Hyeon S. K., "Soil erosion modeling using RUSLE and GIS on the IMHA watershed", south Korea, (2006), p. 75
- [29] Garde, R. J. et Kathyari, U. C., "Erosion prediction models for large catchments", in: Proceedings of the International Symposium on Water Erosion, Sedimentation, and Resource Conservation, Dehradun, India, (1990), pp.89-102.
- [30] Roose E., " Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols", (GCES), Bulletin pédologique de la FAO 70, (1994).
- [31] Williams, J. R., " Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor". Proceedings of the sediment Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, (1975).
- [32] CIMUSA KULIMUSHI Luc. " Appui de la télédétection et SIG sur l'évaluation de la sensibilité a l'érosion hydrique par utilisation de l'équation universelle de perte de sol révisée (USLE/RUSLE) du bassin versant de kabare", (2017), 30p.
- [33] Antonie Denis, " Travaux Pratique sur les systèmes d'Informations Géographiques (SIG), Initiation à ARC-GIS ". Université de Liège (ULG), Belgique, (2012), 94p.
- [34] Rapport final, "Gestion sédimentaire du Haut-Rhône français, Comité Technique Franco-Suisse sur la Gestion Sédimentaire Du Rhône Genevois et du Haut-Rhône Français", DR-B 13-0764d, Octobre 2014, 135p.
- [35] Couvert, B. Lefort, Ph, Peiry, J.L., Belleudy, Ph., "La gestion des rivières-Transport solide et atterrissements". Guide méthodologique, les études des Agences de l'Eau, n°65, (1994).
- [36] Remini.W et Remini.B, " La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du Nord ". Courrier du Savoir N°04, (Juin 2003), pp. 65-69.
- [37] Malavoi J.R; Garnier, C.C; Landon, N; Recking, A; Baran, P. "Éléments de connaissance pour la gestion". Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), (2012).
- [38] KOULINSKI V. "Diagnostic morphodynamique et plan de gestion du transport solide du bassin versant de l'Isère en amont de la confluence avec l'Arly", Résumé, S.A.R.L. Eaux Torrents et Rivières de Montagne (E.T.R.M.), Février (2009), 14p.

- [39] NIVET A. C., “Caractérisation du transport solide en ravine et cours d’eau permanent“. CEMAGREF – UR AEMA, Site atelier de la baie du Robert (2007-2009), Unité de Recherche « Agriculture et espace insulaire ».
- [40] Probst, J. L., et Amiotte Suchet, P., “Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb“. *Hydrol. Sci. J.* 37, (1992), pp. 621-637.
- [41] Degoutte, G., “Aide-mémoire d’hydraulique à surface libre“. Cours à L’Institut de sciences et industries du vivant et de l’environnement. AgroParisTech, France, (2001).
- [42] Tadesse Tufa Borji, “Sedimentation and Sustainability of Hydropower Reservoirs: Cases of Grand Ethiopian Renaissance Dam on the Blue Nile River in Ethiopia“. Thèse de Master en Hydropower Development, Norwegian University of Science and Technology, (2013), 161p.
- [43] Kondolf, G. M., Gao, Y., Annandale, G. W., Morris, G. L., Jiang, E., Zhang, J., Cao, Y., Carling, P., Fu, K., Guo, Q., Hotchkiss, R., Peteuil, C., Sumi, T., W., W. H., Wang, Z., Wei, Z., Wu, B., Wu, C. et Yang, C. T. “ Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers : Experiences from five continents“. *Earth’s Future*, (2014), pp. 256– 280.
- [44] Graf, W. H., “Storage losses in reservoirs“. *International water power & dam construction*, (1984), pp. 37-40.
- [45] Remini B & Bensafia.D , 2016, “ Envasement des barrages dans les régions arides : exemples Algériens”. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°27, (Sept 2016), pp. 63-90.
- [46] Fan J. et Morris G. L. “Reservoir sedimentation. I : Delta and density current deposits“. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(3), (1992a), pp. 354–369.
- [47] Morris G. L. et Fan, J. “Reservoir Sedimentation Handbook : Design and Management of Dams, Reservoirs and Watersheds for Sustainable” USE. McGraw-Hill, New-York, (1998), 805 p.
- [48] Kathleen M. Healy, Amanda L., Daniel M. Hanes, Lisa G. Chambers, “ State of the practice of sediment management in reservoirs: minimizing sedimentation and removing deposits”. 10th Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling, (2015), 10p.
- [49] Guertault L., “Évaluation des processus hydro-sédimentaires d’une retenue de forme allongée : application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône”, thèse de doctorat, (2015), 242p.
- [50] Remini W., Remini B., “La sédimentation dans les barrages de l’Afrique du nord“, *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 02, (Juin 2003), pp. 45-54 .
- [51] Haregeweyn, N., Poesen, J., Nyssen, J., De Wit, J., Haile, M., Govers, G. et Deckers, S., “Reservoirs in Tigray (Northern Ethiopia) : characteristics and sediment deposition problems”. *Land degradation & development*, (2003), pp.211–230.

- [52] Ledec, G. et Quintero, J. D., "Good Dams and Bad Dams: Environmental Criteria for Site Selection of Hydroelectric Projects". World Bank, Washington DC, (2003), 30 p
- [53] Bougacha, S. et Tassoulas, J. L. "Seismic response of gravity dams. II : Effects of sediments". Journal of Engineering Mechanics, (1991), pp. 1839–1850.
- [54] Encyclopédie de l'environnement " Quelques exemples de gestion des sédiments". UGA Editions.
- [55] Bogardi, J., "Sediment Transport in Alluvial Streams", Budapest, Hungary, (1974), 823p.:
- [56] Di Silvio G. "Modeling desiltation of reservoirs by bottom-outlet flushing. In Movable Bed Physical Models", Springer Netherlands, (1990), pp. 159–171.
- [57] Remini B. et Hocini N. " Les chasses au barrage de Beni Amrane " Algérie EQUIPEMENT, pp. 25-27.
- [58] Grimardias, D., Guillard, J., Cattaneo, F., "Drawdown flushing of a hydroelectric reservoir on the Rhône River: Impacts on the fish community and implications for the sediment management". Journal of Environmental Management, (2017), pp. 239-249.
- [59] Remini B., "La technique du soutirage en ALGERIE", Bulletin du réseau Erosion (France) n°20, vol. 2. pp. 172- 177
- [60] REMINI B. et OUIDIR K. "Le barrage réservoir d'Erraguène (Algérie) : une expérience de plus d'un demi-siècle dans le soutirage des courants de densité". Larhyss Journal, n°32, (Dec. 2017), pp. 213-244.
- [61] Musy A., Higy C., 2004, " Hydrologie, une science de la nature ". PPUR presses polytechniques, (Avril, 2004), 314 p.
- [62] Environmental Systems Research Institute, Inc.). Esri. "ArcGis 10.2.1 for desktop", USA Copyright © 1995-2013.
- [63] Blue Marble Geographics (USA), " Global mapper v15.2.3 ". Copyright ©2002-2014.
- [64] Guerra, A.J.T. et Cunha S.B., " Processus érosifs sur les pentes. Géomorphologie: actualisation de bases et concepts ", Bertrand Brésil, Rio de Janeiro, 7^{ème} Edition, (1998), pp. 149-209.
- [65] Perrodon, A., " Étude géologique des bassins néogènes sublinoraux de l'Algérie nord Occidentale ". Thèse Paris, Publ. Serv. Cane géo/. Algérie, nouv. Ser. no. 12, (1957).
- [66] Achour F., BOUZELBOUDJEN M., SERGE A. PIEYNS, " Variabilité spatio-temporelle des ressources en eau en région semi-aride: application au bassin du Chélif ", Algérie. Water Resources Variability in Africa during lile XXIh Century (Proceedings of the Abidjan 98 Conference held at Abidjan, Cote d'Ivoire,. IAHS Publ. n°. 252. (November 1998), pp. 225-234.

- [67] Kireche, O., “ Étude géologique structurale des massifs de la plaine du Chélif (Doui, Rouina, Temoulga) ”. Thèse Doctorat 3è cycle, USTHB, Alger, (1977).
- [68] Guenab A. et A. Benmessaoud, “ Annuaire hydrogéologique de la nappe alluviale du haut et moyen chelif ”, (Février 2004), 30p.
- [69] Mehaiguene M., “ Bilan hydrologique et ressources en eau de surface du bassin Cheliff-Zahrez ”, thèse de Magister, (2005), 141p.
- [70] Rapport technique du barrage Sidi Yacoub, Wilaya De Chlef, (Septembre 2004). 31 p.
- [71] Rapport technique du barrage oued Fodda, Wilaya De Chlef,, (Septembre 2004), 33p.
- [72] DJEZZAR M., “Biodiversité et diagnose piscicole de trois lacs de barrages du haut Cheliff (Ain-Defla, Algérie) : Ghrib, Harreza et Sidi M’Hamed Bentaïba”, thèse de Doctorat, (08 Mars 2015), 203 p.
- [73] Rapport Technique du Barrage Harreza, Wilaya De Ain Defla, (Avril 2005), 25 p.
- [74] MEGUENNI K , REMINI B, “EVALUATION du debit solide dans le bassin versant de Harreza (ALGERIE) ”. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 07, (Juin 2008), pp. 7-19.
- [75] Rapport Technique du barrage Deurdeur, Wilaya De Ain Defla Novembre 2005,31p.
- [76] TOUAIBIA B. “Problématique de l’érosion et du transport solide en Algérie septentrionale”. Sécheresse 21 (1e), (2010à), pp. 1-6.
- [77] Rapport technique du Barrage Ghrib, Wilaya De Ain Defla, (Aout 2004), 73p.
- [78] Cahier d'Instructions EDF-CIH, 1ère version ALGERIE - SIDI M'HAMED BEN TAIBA, 181 p.
- [79] ANBT, “Levés bathymétriques de onze barrages en exploitation campagne de mesures barrage de Sidi M’hamed Ben Taiba”, Wilaya d’AIN DEFLA (MAI 2014), 49p.
- [80] Kassoul M., Abdelgader A. et Belorgey M., “Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie”. Revue des sciences de l'eau, Volume 10, numéro 3, (1997), pp.339 -358.
- [81] BOUN HENG M., “La sédimentation dans les lacs de barrage à java, Indonésie processus, rythmes et impacts”, Thèse de doctorat, (22 mars 2013), 294p.
- [82] Cissokho R., “ Développement d’un indice de vulnérabilité à l’érosion éolienne à partir d’images satellitaires, dans le bassin arachidier du Sénégal : cas de la région de Thiès ”. Thèse de doctorat, Université de Montréal, (Juillet 2011), 251p.

- [83] Anderson R.V., Smith E.E., Westby Q.H., “ Carte géologique du bassin Chelif-Habra ”, Extrait de la carte d’Algérie 1/200.000ème, feuille n°18, Service géographique de l’Armée, (1936).
- [84] Carte géologique détaillée, Oued Fodda”, échelle 1/50.000ème, Feuille N°82 (B6-C12), Service géologique de l’Algérie. Imp. A. Jourdan, Alger, (1906).
- [85] Tucker C.J., “Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation”, Remote Sensing of Environment, Volume 8, Issue 2, (May 1979), pp. 127-150.
- [86] Sader S. A., Winne J. C. , “ RGB-NDVI Color Composites for Visualizing Forest Change Dynamics ”, International Journal of Remote Sensing, Vol. 13, No. 16, (1992), pp. 3055-3067.
- [87] Barbut M., Drouhin G., Durand J.H., “ Cartes des sols de l’Algérie (Plaines du Chelif) ”, échelle 1/50.000ème. Cartes (N°1 à N°5). Inspection Générale de l’Agriculture (I.G.A.) du G.G. de l’Algérie, (1956).
- [88] Projet DINEPA-OIEau-UNICEF, “ Mesure de protection contre l'érosion ”, Fiche technique. Code 5.2.1. FIT 2. Extrait du référentiel technique national EPA. République d’Haïti : Fascicule techniques/directives techniques/etc. 2.5.1 DIT1. (2012/2013).
- [89] Tahiri M., Tabyaoui H., El Hammichi F., Tahiri A., El Hadi H., “ Évaluation et quantification de l'érosion et la sédimentation à partir des modèles RUSLE, MUSLE et déposition intégrés dans un SIG. Application au SousBassin de l'Oued Sania Bassin de Tahaddart, Rif nord occidental, Maroc ”. Eur. J. Sci. Res. 125(2), (2014), 157-178.
- [90] Brosser P., “Interpolation spatiale“, (2011-2012), 53p.
- [91] Meylan, P. “ Régionalisation de données entachées d’erreurs de mesure par krigeage : application à la pluviométrie Hydrologie Continentale ”, (1986), 25-34.
- [92] DELHOMME J.P., “ Application de la Théorie des Variables Régionalisées dans les Sciences de l’Eau ”. Thèse présentée à l’Université de Paris 6. (1976).
- [93] Marcotte D., “Géologie et géostatistique minières (partie géostatistique) ”. Cours GLQ3401, <http://www.groupe.polymtl.ca/geo/marcotte/glq3401geo.html>
- [94] Thomas D. “ Analyse Spatiale avec ArcGis : méthodes et outils ”. Actes de la conférence francophone ESRI. (2003).
- [95] Johnston K., Ver Hoef J.M., Krivoruchko K., Lucas N., “Using ArcGIS Geostatistical Analyst”. ESRI Inc. Redlands, California, (2001).

- [96] Laurent A., “Évaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain”. La conférence francophone ESRI- 1^{er} et 2 octobre- Versailles (SIG 2008).
- [97] HEC-RAS 5.03 « River Analysis System ». U.S. Army Corps Engineers. September 2016. Available: <http://www.hec.usace.army.mil/>
- [98] HEC-RAS River Analysis System, “Guide de laboratoire Exemple pour la rivière du Loup”. Université du Québec. CTN-762 Ressources hydriques, 17 p.
- [99] Brunner, G. W. & HEC, HEC-RAS User's Manual. Davis - CA USA: US Army Corps of Engineers, Hydrological Engineering Centre, (2010).
- [100] Qaid B., Raja A.B., “Simulating bathymetric changes in reservoirs due to sedimentation, Application to Sakuma dam”. Japan, (2012), 57p.
- [101] Appendix I HEC-RAS Modeling of Rainbow River, MFL Technical Support— Freshwater Stream Final Report. Inc. for the Southwest Florida Water Management District, Brooksville, Florida. (2017), 91 p.
- [102] Haghiabi A. H. and Zaredehdasht E., “Evaluation of HEC-RAS Ability in Erosion and Sediment Transport Forecasting”. World Applied Sciences Journal Vol.17, No11, (2012), pp.1490-1497.
- [103] Matthieu Dufresne, “Transport solide”, École nationale du génie de l’eau et de l’environnement, Strasbourg, (2012), 73 p.
- [104] Brunner G., “HEC-RAS Hydraulic Reference Manual”, (2010), 417 p.
- [105] HEC RAS River Analysis system, “Hydraulic Reference Manual”, Version 5.0 CPD 69, (February 2016). 538p.
- [106] Ayad Sleibi M., Sadeq Oleiwi S., Al Alwani K. M., “Application of HEC-RAS Model to Predict Sediment Transport for Euphrates River” Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences (NJES) Vol.20 No.3, (2017), pp.570-577.
- [107] Jimenez, J. A. & Madsen, O. S., “A Simple Formula to Estimate Settling Velocity of Natural Sediments”, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 129(2), (2003), pp. 70-78.
- [108] ArcGis for desktop, “Fonctionnement de l’outil Remblai / Déblai”. Esri (2016), Environmental Systems Research Institute, Inc.