الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR HYDRAULICS
"The MujahidAbdellah ARBAOUI"

المدرسة الوطنية العليا للري
"المجاهد عبد الله عرباوي"
ⵜⴰⵙⴷⴰⵡⵜ ⵜⴰⵖⵍⴰⵢⵜ ⵏ ⵜⵎⵙⵙⴰⵔⵜ ⵏ ⵜⵣⵔⴼⵜ

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique

Option : CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUES

THEME :

ETUDE DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS DE LA VILLE DE SIDI AICH, WILAYA DE BEJAIA

Présenté par :
TAKA Hani

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
HADJ SADOK Ahmed	Professeur	Président
ZAIBAK Issam	M.A. A	Examinateur
BOUZIANE Mamar	M.A. A	Examinateur
BENLAOUKLI Bachir	Professeur	Promoteur

Session novembre 2021

Remerciement

Je tiens à remercier toute l'équipe pédagogique de l'École Nationale Supérieure d'hydraulique et les intervenants professionnels responsables du mon parcours en hydraulique, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Je voudrais également remercier à mon promoteur, BENLAOUKLI Bachir, qui m'a fait confiance et m'a fait apprendre avec ses conseils et explications.

Je tiens à remercier à toute l'équipe de la direction d'hydraulique de la wilaya de béjaia qui m'a accueilli de la meilleure façon pour mon intégration et apprentissage au cours de préparation de ce modeste travail.

Je remercie également toutes ma famille plus précisément mon père, ma mère, mes frères pour leur soutien durant mon parcours

ملخص

في الآونة الأخيرة، وفي السياق العالمي لتغير المناخ الذي تم تسليط الضوء عليه بشكل متزايد، أصبحت الفيضانات هي الخطر الأكثر شيوعًا الذي يهدد السكان والممتلكات، بهذا المعنى، مدينة سيدي عيش الواقعة في أقصى شمال شرق حوض الصومام في شمال الجزائر، تعاني من فيضان متكرر لمياه وادي الصمام، وهذا الوضع دفعنا إلى إجراء دراسة للوقاية من الفيضانات.

أولاً، أتاح علاج SIG باستخدام ARC-GIS استخراج جميع الخصائص اللازمة للدراسة الهيدرولوجية. هذا، بناءً على المعالجة الإحصائية للحد الأقصى للهطول اليومي واستخدام الصيغ التجريبية المختلفة، أدى إلى حساب تدفق الذروة لفترات العودة المختلفة. ثم أقيمت دراسة هيدروليكية باستخدام HEC-RAS بمحاكاة انتشار هذه التدفقات في الأقسام المدروسة. للوصول في النهاية لاستغلال النتائج التي تم الحصول عليها في رسم خرائط مناطق الفيضانات تحت-ARC GIS، تظهر الخرائط التي تم الحصول عليها وجود فيضانات تهدد الطريق والإنشاءات والسوق والأنشطة الزراعية على مستوى مدينة سيدي عيش.

من أجل حل هذه المشكلة، اقترحنا ترتيبًا هيدروليكيًا يتكون من بناء قناة مستطيلة على الجزء الذي يعبر المدينة، والجزء الآخر سيكون قناة من المحجر التي تتكون من تثبيت الضفاف والقاع بواسطة كومة من المحجر.

الكلمات المفتاحية: الفيضانات، نقطة التدفق، منسوب المياه، HEC-RAS، SIG، ARC-GIS.

RESUME

Au cours des dernières temps, et dans un contexte global de changements climatiques de plus en plus mis en évidence, les inondations ont devenu le risque le plus prépondérant qui menace les populations et les biens, dans ce sens, la ville de sidi aich situé à l'extrême nord-est du bassin de soummam au nord du Algérie, souffre des débordements récurrents des eaux de l'Oueds soummam, cette situation nous a incités à réaliser une étude de protection contre les inondations.

Dans un premier temps, un traitement SIG à l'aide d'ARC-GIS a permis d'extraire l'ensemble des caractéristiques nécessaires pour l'étude hydrologique. Celle-ci, basé sur le traitement statistique des précipitations journalières maximales et en utilisant différentes formules empiriques, a abouti au calcul du débit de pointe pour différentes périodes de retour. Ensuite une étude hydraulique à l'aide de HEC-RAS a simulé la propagation de ces débits dans les tronçons étudiés. Pour arriver à la fin à exploiter les résultats obtenus dans la cartographie des zones inondables sous ARC-GIS, les cartes obtenues montrent l'existence de débordements menaçant la route, les constructions, le Souk et les activités agricoles au niveau du la ville de sidi aich.

Afin de résoudre ce problème, nous avons proposé un aménagement hydraulique qui consiste à construire un canal rectangulaire sur la partie qui traverse la ville, l'autre partie sera un canal en enrochement qui consiste à stabiliser les berges et le fond par un empilement d'enrochement de carrière.

Mots-clés : crues, débit de point, niveau d'eau, HEC-RAS, SIG, ARC-GIS.

ABSTRACT

Recently, floods have become the most prominent risk that threatens people and property. Sidi aich city, located in Soummam basin northern of Algeria, suffers from recurrent overflows of wadi Soummam, this situation prompted us to carry out a study to protect the area against floods.

At first, we extracted all the characteristics necessary for the hydrological study from a GIS model based on ARC-GIS. Secondly, the hydrological study based on the statistical analysis of maximum daily rainfall and using different empirical formulas, led to the calculation of peak flow for different return periods. Then a hydraulic study using HEC-RAS simulated the propagation of these flows in the studied sections. Finally, we exploited the results in flood mapping under ARC-GIS. The obtained maps prove the existence of overflows threatening roads, buildings, the weekly market and agricultural areas in the city.

In order to solve this problem, we have proposed many interventions which consists in building a rectangular canal on the part that crosses the city, the other part will be a riprap canal which consists in stabilizing the banks and the bottom by a pile of quarry riprap.

Keywords: flood, point flow, water level, HEC-RAS, SIG, ARC, GIS.

.

SOMMAIRE

Remerciements

Résume

Sommaire

List des tableaux

List des figures

Liste des planches

Introduction générale 1

CHAPITRE I : GENERALITES ET CARACTERISTIQUES

Introduction ---------- 2
I.1 Bassin versant ---------- 2
I.1.1 Définition du bassin versant ---------- 2
I.1.2 Les limites d'un bassin versant ---------- 3
I.1.3 Les caractéristiques dynamiques d'un bassin versant : ---------- 3
I.2 Cours d'eau : ---------- 4
I.2.1 Définition du Cours d'eau : ---------- 4
I.2.2 Types de Cours d'eau : ---------- 4
I.2.3 La structure du cours d'eau : ---------- 5
I.2.4 Caractéristique géométrique d'un cours d'eau : ---------- 7
I.2.5 Morphologie d'un cours d'eau : ---------- 8
I.3 Crues et inondations : ---------- 8
I.3.1 Différence entre crue et inondation : ---------- 8
I.3.2 Processus de formation des crues : ---------- 9
I.3.3 Types d'inondations : ---------- 9
I.3.4 Influence des facteurs naturels : ---------- 13
I.3.5 Aléa, enjeu, risque et vulnérabilité : ---------- 13
I.4 Méthodes d'aménagement des cours d'eau : ---------- 17
I.4.1 Recalibrage : ---------- 17
I.4.2 Rectification : ---------- 18
I.4.3 Enrochements : ---------- 18
I.4.4 Déplacement de cours d'eau : ---------- 19
I.4.5 Protection des berges ou endiguement : ---------- 19
I.4.6 Seuils / ouvrages transversaux : ---------- 20
I.4.7 Suppression de la ripisylve : ---------- 20
Conclusion : ---------- 21

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.

Introduction : ---------- 22
II.1 Le bassin versant de la Soummam : ---------- 22
II.1.1 Présentation de bassin versant de la Soummam : ---------- 22

SOMMAIRE

II.1.2 Principaux cours d'eau : ---------- 23
II.1.2.1 Principaux affluents de l'Oued Soummam : ---------- 24
II.1.3 La vallée de la Soummam : ---------- 24
II.2 Caractéristique de la zone d'étude : ville de Sidi aich :---------- 25
II.2.1 Situation géographique : ---------- 25
II.2.2 Situation Démographique : ---------- 26
II.2.3 Situation Climatique : ---------- 27
II.2.4 Situation Hydrographique et Hydrogéologique : ---------- 27
Conclusion : ---------- 28

CHAPITRE III : ETUDE HYDROLOGIQUE

III.1 Etude géomorphologique : ---------- 29
III.1.1 Caractéristiques morphologiques :---------- 29
III.1.1.1 Superficie :---------- 29
III.1.1.2 Périmètre : ---------- 29
III.1.1.3 Longueur du thalweg principal :---------- 29
III.1.2 Caractéristiques géométriques : ---------- 29
III.1.2.1 Indice de compacité de Horton (K_H) : ---------- 29
III.1.2.2 Indice de compacité de Gravelius : ---------- 30
III.1.2.3 Rectangle équivalent : ---------- 30
III.1.2.4 Coefficient d'allongement :---------- 31
III.2 Etude du relief : ---------- 31
III.2.1 Courbe et paramètres hypsométrique :---------- 31
III.2.2 Caractéristiques altimétriques : ---------- 33
III.2.2.1 Altitude maximale et minimale : ---------- 33
III.2.2.2 Altitude moyenne : ---------- 33
III.2.2.3 Altitude médiane ou $H_{50\%}$: ---------- 34
III.2.2.4 Altitude à 5% ou $H_{5\%}$:---------- 34
III.2.2.5 Altitude 95% ou $H_{95\%}$: ---------- 34
III.2.3 Les Indices de pente : ---------- 35
III.2.3.1 Pente du sous bassin versant du sidi aich : ---------- 36
III.2.3.2 Indice de pente globale I_g : ---------- 36
III.2.3.3 Indice de pente moyenne I_{pm} : ---------- 37
III.2.3.4 Indice de pente de Roche I_p : ---------- 38
III.2.3.5 La dénivelée spécifique Ds :---------- 38
III.3 Etude du réseau hydrographique : ---------- 39
III.3.1 Paramètre hydrographique : ---------- 40
III.3.1.1 Densité de drainage : ---------- 40
III.3.1.2 Pente moyenne du cours d'eau principal : ---------- 41
III.3.1.3 La densité hydrographique des thalwegs élémentaires F_l :---------- 41
III.3.1.4 Le coefficient de torrentialité C_t : ---------- 42
III.3.1.5 Temps de concentration Tc : ---------- 42
III.3.1.6 Vitesse de ruissellement : ---------- 44

SOMMAIRE

III.4 Etude des crues : ---------- 46
III.4.1 Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles avec la station hydrométrique : ……46
III.4.1.1 Présentation de la station hydrométrique :---------- 46
III.4.1.2 Ajustement de la série à la loi de GUMBEL : ---------- 47
III.4.1.3 Ajustement à la loi Log Normale (Loi de Galton) : ---------- 50
III.4.1.4 Choix de la loi d'ajustement : ---------- 51
III.4.2 Détermination des débits maximums fréquentiels par la méthode du GRADEX : 53
III.4.2.1 Principe de la méthode :---------- 53
III.4.2.2 Hypothèses de la méthode :---------- 53
III.4.2.3 Les étapes de la méthode : ---------- 54
III.4.2.4 Application numérique de la méthode de GRADEX :---------- 55
III.4.3 Hydrogramme de crues :---------- 59
III.4.4 Etude des apports solides :---------- 64
III.4.4.1 Méthode d'estimation du Nord Algérien :---------- 64

CHAPITRE IV : DIAGNOSTIC ET MODELISATION DU COURS D'EAU NON AMENAGE

Introduction: ---------- 65
VI.1.1 Types d'écoulement :---------- 65
VI.1.1.1 Variabilité dans le temps ---------- 65
VI.1.1.2 Variabilité dans l'espace ---------- 66
VI.1.2 Régime d'écoulement :---------- 67
IV.2 Diagnostique et modélisation du cours d'eau non Aménagé : ---------- 68
IV.2.1 Etat de l'oued à la zone d'étude : ---------- 68
IV.2.2 Modélisation de l'écoulement : ---------- 70
IV.2.2.1 Présentation du logiciel HEC-RAS ---------- 70
IV.2.2.2 Etapes de simulation par HEC-RAS---------- 70
IV.2.2.2.1 La topographie : ---------- 70
IV.2.2.2.2 Modélisation de l'Oued ---------- 71
IV.2.2.2.3 Données hydrométriques et conditions aux limites :---------- 73
IV.2.2.2.4 Simulation : ---------- 75
Conclusion :---------- 82

CHAPITRE V : ETUDES DES VARIANTES D'AMENAGEMENT

Introduction :---------- 99
V.1 Calcul hydraulique des canaux :---------- 83
V.2 Les démarches de dimensionnement : ---------- 84
V.2.1 Etat de l'oued avant l'aménagement :---------- 84
V.2.2 Proposition pour l'aménagement du cours d'eau : ---------- 85
V.3 Choix des paramètres de dimensionnement---------- 86
V.3.1 La pente du projet---------- 86

SOMMAIRE

V.3.2 Le coefficient de rugosité : ---------- 86
V.3.3 Revanche des canaux (marge de sécurité) : ---------- 86
V.3.4 La vitesse d'érosion : ---------- 87
V.4 Etude des variantes d'aménagement de l'oued : ---------- 87
V.4.1 Canal trapézoïdal en béton armé : ---------- 87
V.4.1.1 Dimensionnement ---------- 87
V.4.1.2 Les paramètres d'écoulement : ---------- 88
V.4.1.3 Estimation du coût de la variante : ---------- 92
V.4.2 Canal rectangulaire : ---------- 93
V.4.2.1 Dimensionnement ---------- 93
V.4.2.2 Les paramètres d'écoulement : ---------- 94
V.4.2.3 Estimation du coût de la variante : ---------- 96
V.4.3 Canal mixte : ---------- 97
V.4.3.1 Dimensionnement : ---------- 97
V.4.3.2 Les paramètres d'écoulement : ---------- 97
V.4.3.3 Estimation du coût de la variante : ---------- 98
V.5 Choix de la variante de l'aménagement : ---------- 98
V.5.1 Critère d'évaluation : ---------- 98
V.5.2 Le choix de la variante : ---------- 98
Conclusion : ---------- 99

CHAPITRE VI : ORGANISATION DE CHANTIER

Introduction : 100
VI.1 Organisation de chantier : 100
VI.1.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur le chantier : 100
VI.1.1.1 Le maitre de l'ouvrage : ---------- 100
VI.1.1.2 Le maitre d'œuvre : ---------- 100
VI.1.1.3 L'entrepreneur ---------- 100
VI.1.2 Exécution des travaux : 100
VI.1.3 Les moyens de chantier : 101
VI.1.3.1 Les moyens humains : 101
VI.1.3.2 Les moyens matériels : 101
VI.1.4 Pièces contractuelles du marché : 102
VI.1.4.1 Devis descriptif : 102
VI.1.4.2 Devis quantitatif : 102
VI.1.4.3 Devis estimatif : 102
VI.2 Planification : 103
VI.2.1 Les étapes de la planification : 103
VI.2.2 Les techniques de planification : 103
VI.2.2.1 Méthodes basées sur le réseau : 104
VI.2.2.1.1 Définition : 104
VI.2.2.1.2 Construction du réseau : 104
VI.2.2.1.3 Différentes méthodes basées sur le réseau : 105

SOMMAIRE

VI.2.2.1.4 Le chemin critique : 106
VI.2.2.2 Méthodes basées sur le graphique : 106
VI.2.2.2.1 Les étapes de la planification : ---------- 106
VI.2.2.3 Diagramme de Gantt : 106
VI.2.3 Choix de la méthode de calcul : 106
Conclusion : 109

Conclusion générale 110

Liste des références

Annexes

LISE DES TABLEAUX

Tableau I. 1: Qualification de l'aléa en fonction de la hauteur d'eau et type de crue. (Source : DGUHC)..... 14
Tableau I. 2: Degré de danger des crues en fonction de la vitesse du courant. (Source : DGUHC)..... 15

Tableau II. 1: Principaux affluents de l'Oued Soummam. 24
Tableau II. 2: Informations sur les habitants et la population de Sidi Aïch 27

Tableau III. 1: Paramètres Hypsométriques du sous bassin versant de sidi aich 32
Tableau III. 2: Caractéristiques altimétriques du sous bassin versant du sidi aich: 34
Tableau III. 3: Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global. 37
Tableau III. 4: Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M.à partir de Ds..... 38
Tableau III. 5: Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique dusous bassin versant de sidi aich 39
Tableau III. 6: les formules empiriques pour l'estimation du temps de concentration. 43
Tableau III. 7: Paramètres hydrographiques du sous bassin sidi aich 44
Tableau III. 8: Caractéristiques géomorphologiques du sous bassin versant sidi-aich 45
Tableau III. 9: Caractéristique de la station hydrométrique « Sidi Aich » (source ANRH). ... 46
Tableau III. 10: Débits maximums journaliers de la station de Sidi Aich. (Source : DRE)..... 47
Tableau III. 11: Résultats d'ajustement à la loi de GUMBEL. 48
Tableau III. 12: Comparaison des caractéristiques de la loi de GUMBEL et de l'échantillon . 49
Tableau III. 13: Résultats d'ajustement de la loi Log Normale 50
Tableau III. 14: Comparaison des caractéristiques de la loi Log Normale et de l'échantillon . 50
Tableau III. 15: Résultats du test de Khi carré. 52
Tableau III. 16: Stations pluviométriques. 56
Tableau III. 17: Pluies maximales journalières des stations : Ighil Ali, Maouchi Ahmed et Boubirek 56
Tableau III. 18: Débits de pointe de bassin versant par la méthode GRADEX. 58
Tableau III. 19: Résultats de l'ajustement des trois stations par la méthode du GRADEX. 59
Tableau III. 20: Valeur du coefficient de forme de l'hydrogramme de crue δ..... 60
Tableau III. 21: Valeurs des débits de crues en fonction du temps. 60
Tableau III. 22: Crue de projet recommandé. 63
Tableau III. 23: Résultat du transport solide. 64

Tableau IV. 1: les principaux paramètres hydrauliques issus de la simulation. 79

Tableau V. 1: Eléments géométriques pour différentes sections de canaux 84
Tableau V. 2: Valeurs de coefficient de rugosité (Table de rugosité de Manning)..... 86
Tableau V. 3: Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés (Degoutte, 2012)..... 87
Tableau V. 4: Dimensionnement de l'aménagement (Canal trapézoïdal en béton armé). 88
Tableau V. 5: Paramètres d'écoulement de la variante (canal trapézoïdal en béton armé). 88
Tableau V. 6: Devis de la variante (canal trapézoïdal en béton armé). 92
Tableau V. 7: Dimensionnement de l'aménagement (Canal rectangulaire en béton armé 93
Tableau V. 8: Paramètres d'écoulement de la variante (canal rectangulaire en béton armé). .. 94
Tableau V. 9: Devis de la variante (canal rectangulaire en béton armé). 96
Tableau V. 10: Dimensionnement de l'aménagement (Canal mixte). 97

LISE DES TABLEAUX

Tableau V. 11: Paramètres d'écoulement de la variante (canal mixte).....97
Tableau V. 12: Devis de la variante (canal mixte). 98

Tableau VI. 1: les engins utilisés.....101
Tableau VI. 2: Devis quantitatif et estimatif 102
Tableau VI. 3: Liste des opérations et leurs durées.....107
Tableau VI. 4: Succession des taches.....107

Figure I. 1: Deux bassins versants voisins. 2
Figure I. 2: lignes de partage des eaux. 3
Figure I. 3: limites du lit majeur et lit mineur. 5
Figure I. 4: Ripisylve 6
Figure I. 5: la berge dans un cours d'eau(verniers,1995). 6
Figure I. 6: canal trapézoïdal et définition des termes. 7
Figure I. 7: Inondation de plaine sur le Rhône en 2003. 9
Figure I. 8: Inondation à montée rapide sur les Gardons et le Vidourle en 2002 10
Figure I. 9: Inondation par ruissellement à Nîmes en 1988. 10
Figure I. 10: Inondation marine à Montpellier en 1970 11
Figure I. 11: Procédés de remontée de la nappe 11
Figure I. 12: Embâcle formé dans un cours d'eau. 12
Figure I. 13: Inondation par rupture d'une protection. 12
Figure I. 14: Procédés du transport solide. 15
Figure I. 15: Atteintes aux hommes, aux biens et aux activités. 16
Figure I. 16: Rectification, recalibrage et drainage sur le ruisseau de l'étang à Availles Limouzine. (Source : Michel Bramard,(86)). 17
Figure I. 17: Rectification et recalibrage à Servon 1986. (source : Michel Bramard,(86)). 18
Figure I. 18: Enrochement de berge. 18
Figure I. 19: Déplacement complet de cours d'eau : l'Armance. (Source : Geoportail). 19
Figure I. 20: Travaux de protections des berges d'un cours d'eau. 19
Figure I. 21: Exemples de seuils. 20
Figure I. 22: Technique du génie végétal. 21

Figure II. 1: carte d'altitudes du Bassin versant de la Soummam. 22
Figure II. 2: carte des cours d'eau principaux. 23
Figure II. 3: Le sous-bassin versant de la Soummam auquel appartient la nappe alluviale. 25
Figure II. 4: Passage d'oued Soummam sur la ville de Sidi-aich(source : google earth pro) . 26
Figure II. 5: concentration de la population bassin versant de la Soummam. 26
Figure II. 6: Sous bassin versant du Sidi aich. 28

Figure III. 1: carte hypsométrique du sous bassin versant sidi aich 32
Figure III. 2: Répartition des surfaces et courbe hypsométrique du sous bassin versant sidi aich. 33
Figure III. 3: Carte des altitudes du sous bassin versant Sidi aich 35
Figure III. 4: Carte des pentes du sous bassin versant Sidi aich. 36
Figure III. 5: Carte du réseau hydrographique 40
Figure III. 6: Graphique de l'ajustement à la loi de GUMBEL 49
Figure III. 7: Graphique de l'ajustement à la loi Log Normale. 50
Figure III. 8: Carte de situation géographique des stations pluviométriques 55
Figure III. 9: Graphe de l'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits. 58
Figure III. 10: Hydrogramme de crue de la zone d'étude par la méthode Skolovsky. 63

Figure IV. 1: Ecoulement suivant le temps (Source : TOUMI Abdelouaheb, 2016) 65

Figure IV. 2: Schéma illustrant les différents types d'écoulements 66
Figure IV. 3: Position des points constaté (source : google earth) 69
Figure IV. 4: Photographie prises au niveau de Sidi Aich Lors de la crue de décembre 2002 69
Figure IV. 5: Interface HEC-RAS 70
Figure IV. 6: Introduction du fichier de projection dans RAS Mapper. 71
Figure IV. 7: Importation du fichier terrain dans RAS Mapper. 72
Figure IV. 8: l'axe de l'oued et les sections en travers de l'oued sur RAS Mapper. 72
Figure IV. 9: l'axe de l'oued et les sections en travers de l'oued. 73
Figure IV. 10: Attribution de Coefficient de Manning aux différentes parties 74
Figure IV. 11: Introduction des débits dans HEC-RAS 74
Figure IV. 12: Introduction de la pente normale dans HEC-RAS 75
Figure IV. 13: Profil en long du cours d'eau à l'état naturel 76
Figure IV. 14: Vue en Plan en 3D de l'Oued 76
Figure IV. 15: Section en travers 5078 d'oued soummam 77
Figure IV. 16: Section en travers 5679 d'oued soummam 78
Figure IV. 17: Section en travers 4680 d'oued soummam 78
Figure IV. 18: Section en travers 1772 d'oued soummam 79
Figure IV. 19: Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance à partir de l'exutoire 80
Figure IV. 20: Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued Soummam 80
Figure IV. 21: Cartographie des hauteurs d'eau approche hydraulique dans la zone d'étude. 81
Figure IV. 22: Cartographie des vitesses fortes approche hydraulique dans la zone d'étude .. 82

Figure V. 1: Fenêtre principale du logiciel FlowMaster. 86
Figure V. 2: canal trapézoïdale 87
Figure V. 3: Profile en long de l'oued en 2D après l'aménagement 89
Figure V. 4: Modification de la section en traves par logiciel HEC-RAS 90
Figure V. 5: Modification du cours d'eau par logiciel HEC-RAS 90
Figure V. 6: Section en travers 1772 (Résultats Hec-Ras pour l'aménagement en béton). 91
Figure V. 7: Section en travers 3108 (Résultats Hec-Ras pour l'aménagement en béton). 91
Figure V. 8: Résultats données par logiciel FlowMaster pour l'aménagement en béton). 92
Figure V. 9: canal rectangulaire 93
Figure V. 10: Profile en long de l'oued en 2D après l'aménagement 94
Figure V. 11: Section en travers 1772 (Résultats Hec-Ras pour l'aménagement en béton). ... 95
Figure V. 12: Section en travers 3108 (Résultats Hec-Ras pour l'aménagement en béton). ... 95
Figure V. 13: Résultats données par logiciel FlowMaster pour l'aménagement en béton). 96
Figure V. 14: Carte des inondations après la projection du canal mixte (HEC-RAS). 99

Figure VI. 1: Réseau à flèche 104
Figure VI. 2: Réseau à nœuds. 104
Figure VI. 3: Les paramètres de calcul dans la méthode C.P.M 105
Figure VI. 4: Réseau de planification des tâches par la méthode C 108

Liste des planches

Planche N° 01 : PLAN DE SITUATION

Planche N°02 : PROFIL EN LONG

Planche N°03 : PROFIL EN TRAVERS

Planche N° 04 : PLAN DE MASSE

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'eau sous toutes ses formes (fleuves et rivières, lacs, marais, zones humides, nappes souterraines), joue des rôles multiples dans le fonctionnement des écosystèmes. Pourtant, elle est également source de graves difficultés en particulier dans les domaines de la santé et de l'environnement. Les évolutions climatiques engendrent parfois des crues ou inondations et orages brutaux qui sont sans doute le risque naturel majeur qui fait le plus de victimes et de dégâts à travers le monde.

L'Algérie, l'un des pays du sud de la Méditerranée, est caractérisée par un climat semi- aride à aride sur la majeure partie de son territoire. La région a été témoinde nombreuses inondations destructrices rapides au cours des dernières années, les plus destructrices se produisant dans la zone nord. De même, la ville de sidi aich, wilaya de bejaia, à connue plusieurs inondations qui se manifestent de façon catastrophique, constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social.

Certes, nous ne sommes pas encore en mesure de maîtriser les forces de la nature mais nous sommes cependant capables d'endiguer cours d'eau et de construire des ouvrages suffisamment résistants pour neutraliser les forces de la nature ; et comme les phénomènes naturels ne sont pas près de cesser, il importe de faire face aux problèmes qu'ils suscitent par le biais de mesures de prévention, d'atténuation et de préparation appropriées. La prévention est essentielle, qu'il s'agisse de recenser les dangers naturels, d'évaluer les menaces qu'ils font peser sur les personnes et les biens.

Afin d'éviter ce risque majeur et pour être capables d'assurer une gestion intégrée et durable de l'eau, notre étude consiste à réaliser un aménagement. Du fait que la ville de sidi aich est traversée par un oued qui peut être à l'origine d'une inondation. L'étude de protection contre ces inondations est un travail méthodique, qui consiste à suivre une procédure bien déterminée, elle commence par le diagnostic du site d'étude dans le but de dégager l'ensemble des informations et caractéristiques nécessaires. Ensuite, une étude hydrologique est envisagée pour décrire le transfert pluie-débit au sein des bassins concernés et dont le fruit correspond aux débits de différentes fréquences ou périodes de retour. L'exploitation des débits de pointe obtenus dans une étude hydraulique permet de décrire la propagation des crues dans les tronçons concernés sous différents aspects : hauteur, débit, vitesse... ces informations constituent la base de la délimitation des zones menacées par le risque d'inondation. Sur la base des résultats issus des études précédentes, la phase finale consiste à prendre les mesures adéquates pour la protection de la localité étudiée contre les débordements lors des crues.

CHAPITRE I : GENERALITES ET CARACTERISTIQUES

Chapitre I : GENERALITES ET CARACTERISTIQUES

Introduction

Nous ne sommes pas en mesure de maîtriser les forces de la nature, mais nous sommes capables de connaître, de recenser, identifier, évaluer, prévenir et maîtriser les risques et les dangers et faire face aux menaces pesant sur les personnes et sur les biens, Ce chapitre est consacré au cadre théorique, expliquera et présentera certaines généralités et définitions que l'on retient des concepts fondamentaux liés aux crues et inondations.

I.1 Bassin versant

I.1.1 Définition du bassin versant

Le bassin versant est une zone géographique délimitée par des frontières naturelles appelées lignes de crêtes. Il correspond à l'ensemble de la surface recevant les eaux qui circulent naturellement vers un même cours d'eau ou vers une même nappe d'eau souterraine.

Chaque bassin versant se subdivise en un certain nombre de bassins élémentaires (appelés « sous-bassins versants ») correspondant à la surface d'alimentation des affluents se jetant dans le cours d'eau principal.

Le bassin versant est constitué d'un cours d'eau principal, qui prend sa source sur les têtes de bassin en amont. Ce cours d'eau, appelé rivière, s'écoule dans le fond de la vallée pour se jeter dans un fleuve ou rejoindre la mer (c'est alors un fleuve), en aval, à l'exutoire du bassin versant. Le cours d'eau principal collecte l'eau provenant de ses propres affluents, de résurgence de nappe et s'alimente également de l'eau de pluie.

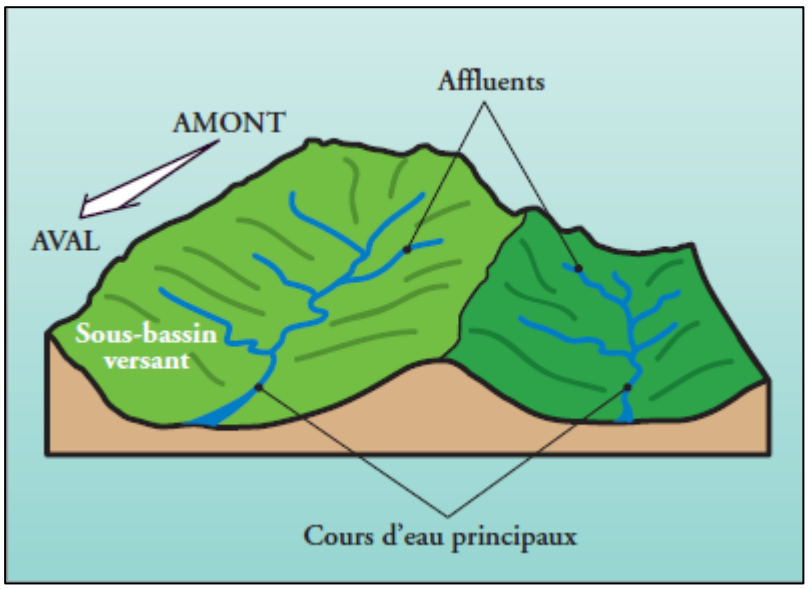


Figure I. 1: Deux bassins versants voisins.

Source : https://www.s2rivieres.com/le-territoire/fonctionnement.html

I.1.2 Les limites d'un bassin versant

Un bassin versant est une aire délimitée par des lignes de partage des eaux à l'intérieur de laquelle les précipitations sont concentrées vers un même exutoire. La plupart du temps, la ligne de partage des eaux correspond aux lignes de crêtes qui définissent un bassin versant topographique, ce dernier étant utilisé dans la plupart des cas pour les calculs hydrologiques.

Les limites d'un bassin versant peuvent aussi être modifiées par des interventions anthropiques, comme la réalisation de nouveaux fossés de drainage, d'un réseau routier ou encore le déplacement d'un cours d'eau.

Il est important de préciser par ailleurs que la notion de bassin versant est intrinsèquement liée à l'endroit défini comme son exutoire. Il peut s'agir, par exemple, d'un ponceau situé à mi-parcours d'un cours d'eau dont le bassin versant est situé en amont et dont il faut connaître la taille et les caractéristiques hydrologiques.

Néanmoins, il est possible que les échanges souterrains ne suivent pas la topographie du terrain. C'est pourquoi, selon la finalité d'un aménagement, d'une étude ou encore dans des configurations géologiques particulières, il peut être intéressant d'avoir recours à un hydrogéologue afin de bien comprendre la limite des échanges entre la nappe d'eau souterraine et le cours d'eau.

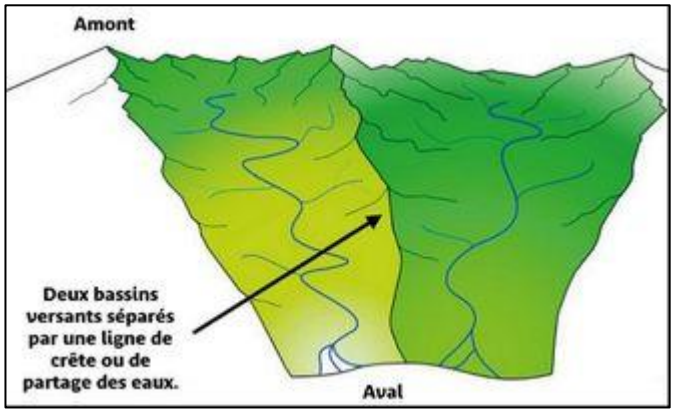


Figure I. 2: lignes de partage des eaux.

Source : https://www.ongbleuversant.org/expeditions-renversantes/la-demarche/un-bassin-versant/

I.1.3 Les caractéristiques dynamiques d'un bassin versant :

Les caractéristiques dynamiques d'un bassin versant dépendent de nombreux facteurs physiques (taille, relief, orientation, nature du sol et du sous-sol…) et biologiques (couverture végétale, écosystèmes…). L'influence de l'homme sur ces facteurs physiques et biologiques est souvent un déterminant supplémentaire à la dynamique du bassin. L'occupation du sol déterminée par les activités humaines (culture, urbanisation, réseaux routiers et ferrés, extraction de granulat…), peut, en effet, engendrer des obstacles à la circulation naturelle des cours d'eau, modifier la qualité et la quantité des matériaux mobilisables et changer ou supprimer les couverts végétaux présent à proximité du cours d'eau.

I.2 Cours d'eau :

I.2.1 Définition du Cours d'eau :

De nombreux termes sont utilisés pour désigner les structures dans lesquelles l'eau s'écoule, un cours d'eau est un terme général pour désigner un fleuve, une rivière, un ruisseau, un torrent, un oued.

Voici les principales définitions que les dictionnaires en donne :

Dans Le Petit Larousse illustré, un cours d'eau est un « nom très général donné à toutes les eaux courantes de quelque importance (rivières, fleuves) »,

Le Petit Robert définit un cours d'eau comme étant de « l'eau courante s'écoulant dans un chenal ».

I.2.2 Types de Cours d'eau :

Il existe un grand nombre de mots pour désigner les différents types de cours d'eau.

- **Ruisseau** : petit cours d'eau, de faible largeur et de longueur limitée, alimentée par des sources d'eau naturelles, souvent affluent d'un étang, d'un lac ou d'une rivière. Les ruisseaux se trouvent à la tête des bassins versants.
- **Rivière** : cours d'eau moyennement important, à écoulement continu ou intermittent, suivant un tracé défini et se jetant dans un autre cours d'eau, un lac, une mer. Abondant, et particulièrement celui qui se jette dans un fleuve.
- **Fleuve** : cours d'eau important, long et au débit élevé, comptant de nombreux affluents et se jetant dans la mer.
- **Oued** : terme d'origine arabe désignant un cours d'eau temporaire dans les régions arides ou semi--arides. Son écoulement dépend des précipitations et il peut rester à sec pendant de très longues périodes.
- **Torrent** : cours d'eau au débit rapide et régulier, situé sur une pente plus ou moins prononcée. Les torrents se retrouvent sur des terrains accidentés ou en montagne. Ce terme est utilisé principalement pour désigner les cours d'eau de montagne avec un lit rocheux et encaissé.
- **Fossé** : fosse creusée en long dans le sol servant à l'écoulement des eaux, à la séparation des terrains (ex. fossé de voie publique ou privée, fossé mitoyen, fossé de drainage).
- **Émissaire** : canal d'évacuation des eaux de drainage.

I.2.3 La structure du cours d'eau :

a. Aval et amont :

La partie plus élevée du cours d'eau par rapport à l'observateur s'appelle l'amont, la partie moins élevée s'appelle l'aval.

b. La rive gauche et la rive droite :

La rive gauche et la rive droite d'un cours d'eau sont identifiées par un observateur se déplaçant dans le sens de l'écoulement de l'eau, de l'amont vers l'aval.

c. Bras :

Un bras est une partie d'un cours d'eau reliant souvent deux entités hydrographiques. On distingue : le « bras principal », le « bras secondaire », le « bras-mort » (où l'eau ne circule plus).

d. Lit majeur et lit mineur :

Le Lit désigne tout l'espace occupé, en permanence ou temporairement, par un cours d'eau. on distingue le lit mineur (lit du cours d'eau en écoulement normal) et lit majeur (lit qu'occupe le cours d'eau lors des crues, incluant les zones inondées.

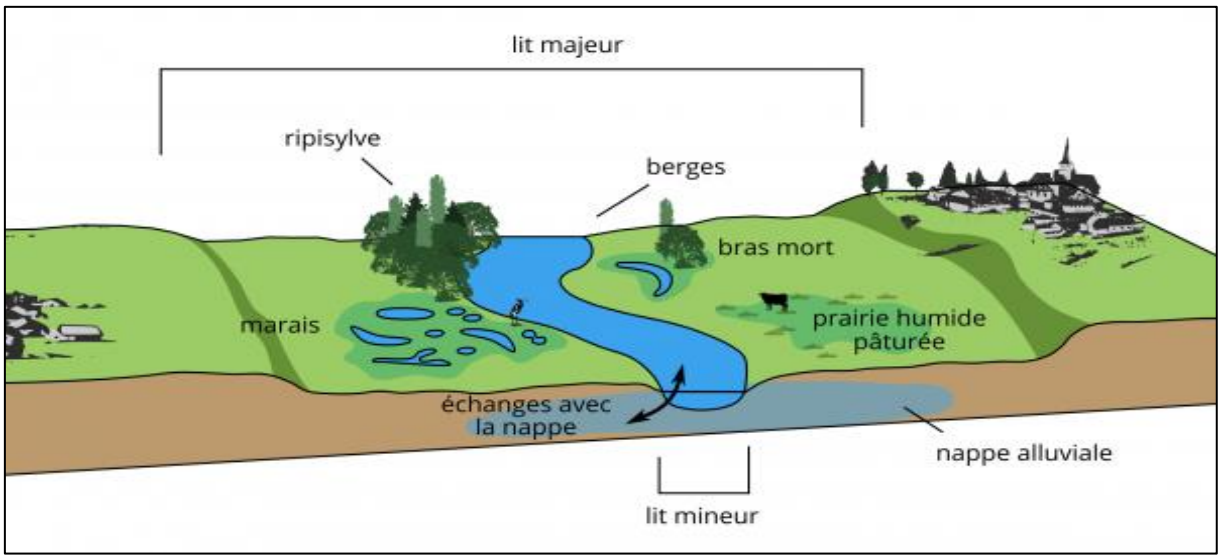


Figure I. 3: limites du lit majeur et lit mineur.

Source : https://www.s2rivieres.com/le-territoire/fonctionnement.html

e. La berge :

La berge est la portion de terrain qui limite tout cours d'eau et elle est subdivisée en deux parties talus et pied de talus. La limite inférieure de la berge est le point le plus bas du pied (fond du lit); la limite supérieure étant le point le plus haut du talus au-delà duquel on considère la plaine alluviale. Ces limites déterminent ce que l'on appelle le lit mineur du cours d'eau.

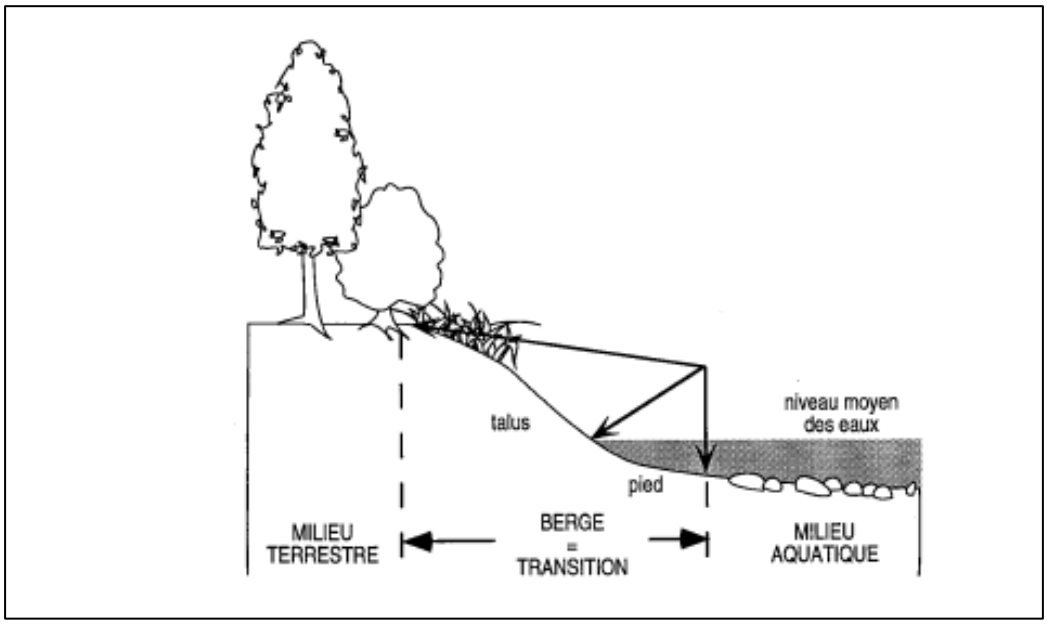


Figure I. 4: la berge dans un cours d'eau(verniers,1995).

f. La ripisylve :

La ripisylve est l'ensemble des formations boisées (arbres, arbustes, buissons) qui se trouvent aux abords d'un cours d'eau. L'absence de ripisylve favorise l'érosion et le déplacement du cours d'eau.

La ripisylve et les berges jouent un rôle important dans la diversification de l'habitat, l'apport en matière organique et en bois mort dans le cours d'eau. Sa partie émergée favorise l'installation de mammifères et d'oiseaux et régule la température. Son système racinaire offre des zones d'ombre, de repos et de reproduction à certaines espèces de poissons et d'invertébrés et joue un rôle d'épuration de l'eau.

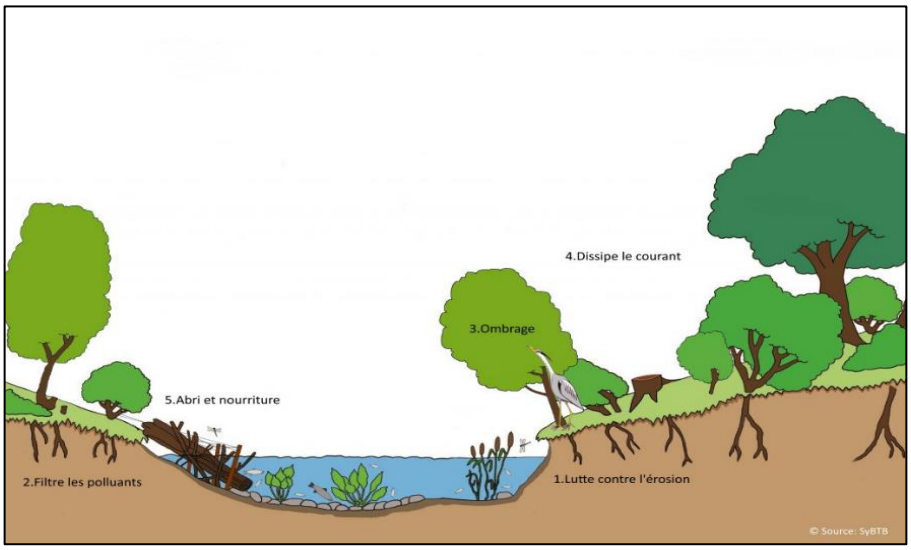


Figure I. 5: Ripisylve

Source : https://www.s2rivieres.com/le-territoire/fonctionnement.html

I.2.4 Caractéristique géométrique d'un cours d'eau :

Avant de présenter les lois de l'hydraulique, la connaissance des caractéristiques géométriques se rapportant aux canaux et aux cours d'eau s'impose. Voici les principales caractéristiques utiles.

- **Section** "*A*" : Section normale à la direction de l'écoulement et au travers de laquelle l'eau s'écoule.
- **Périmètre mouillé** "*P*" : Longueur de la ligne de contact entre le canal et l'eau dans un plan normal à la direction de l'écoulement.
- **Rayon hydraulique** "*R*" : Rapport entre la section d'écoulement "*A*" et le périmètre mouillé "*P*".
- **Profondeur d'écoulement** ou **hauteur d'eau** "*y*" : Épaisseur d'eau dans le cours d'eau au-dessus du fond.
- **Pente des talus** : La pente d'un talus est le déplacement horizontal pour une élévation unitaire du talus (L/L). Chaque talus peut avoir sa pente propre.
- **Largeur au fond "***b*" : Largeur du cours d'eau au bas de la section
- **Largeur de surface** ou **largeur au miroir** "*t*" : Largeur de la surface libre de l'eau dans le canal
- **Largeur du canal** ou **largeur d'ouverture** "*T*" : Largeur du canal d'une rive à l'autre.
- **Revanche** "*yr*" : Hauteur libre considérée au-dessus du plan d'eau lors du design ou différence entre la profondeur du cours d'eau "*d*" et la profondeur d'écoulement.
- **Profondeur hydraulique** "*D*" : Rapport entre la section d'écoulement et la largeur de la surface libre de l'eau.

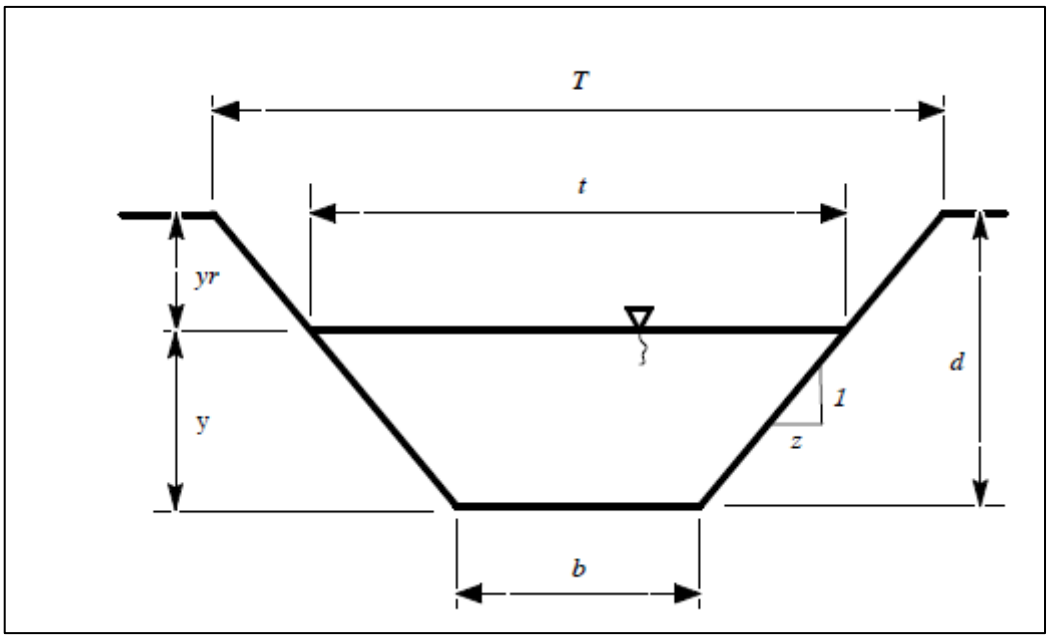


Figure I. 6: canal trapézoïdal et définition des termes.

Source : Verniers,G. 1995.Aménagement écologique des berges des cours d'eau -- techniques de stabilisation.Presses Universitaires de Namur, Belgique

I.2.5 Morphologie d'un cours d'eau :

La morphologie des cours d'eau correspond à la forme qu'ils adoptent en fonction des conditions climatiques et géologiques (nature du sol, débit, pente, granulométrie du fond, etc.).

I.2.5.1 Variables influant sur la morphologie des cours d'eau :

- **Les débits solides et liquides « variables motrices » :**

Un cours d'eau est un système dynamique dont la forme (en long et en travers) dépend principalement du processus d'érosion/ dépôts de matériaux. Ce mécanisme est lui-même déterminé essentiellement par les débits liquides et solides, « variables motrices » de l'hydromorphologie d'un cours d'eau. Le débit liquide (Q), variable selon les saisons (précipitations), et le débit solide (Qs), déterminé par la charge en matériaux minéraux fins et/ou grossiers, sont à l'origine des processus d'érosion et de dépôt. L'équilibre du cours d'eau oscillera en effet entre érosion et dépôts, selon que l'un ou l'autre des débits sera prédominant.

- **La puissance spécifique d'un cours d'eau, fonction du débit et de la pente :**

Il apparaît que les vitesses d'écoulement de l'eau sont des éléments déterminants de la morphologie des cours d'eau. Ces vitesses d'écoulement de l'eau, qui sont fonction de la pente et du débit, conditionnent la puissance spécifique du cours d'eau qui, par dissipation énergétique, provoque les phénomènes d'érosion et de transport des sédiments et des matériaux. Cette puissance spécifique caractérise ainsi les potentialités dynamiques et morphologiques d'un cours d'eau (BIOTEC et Malavoi, 2007).

- **Les caractéristiques des sédiments (grossiers, fins ou mixtes)** influent sur leur transportabilité.
- **La végétation des berges** assure une relative protection des berges face au phénomène d'érosion.

I.3 Crues et inondations :

I.3.1 Différence entre crue et inondation :

Il faut bien distinguer crue et inondation. La crue désigne une période de fort débit d'un fleuve ou d'une rivière. Il peut y en avoir plusieurs au cours de l'année, en fait chaque fois que se produit un épisode de pluie ou d'orage intense. On peut parler par exemple de la crue annuelle, qui est le débit le plus élevé observé pour une année donnée. Pour qu'il y ait inondations, il faut que le débit de crue dépasse un seuil donné, au-delà duquel la rivière sort de son « lit mineur », c'est-à-dire son tracé normal, puis déborde dans son lit dit « majeur ». Dès lors, le cours d'eau s'élargit dans la plaine, en général alluviale, formée précisément par le dépôt d'alluvions lors des crues précédentes. Ce sont des phénomènes naturels, qui façonnent l'environnement, avec lesquels les écosystèmes naturels sont en parfait équilibre.

I.3.2 Processus de formation des crues :

Comprendre ce processus revient à analyser les différents facteurs concourant à la formation et à l'augmentation temporaire des débits d'un cours d'eau. En simplifiant, on distingue :

- Eau mobilisable, constituée de l'eau reçue par le bassin versant ;
- Ruissellement, qui correspond à la part de l'eau qui n'a pu s'infiltrer dans le sol. Il dépend de la nature du sol, de son occupation de surface et de l'intensité de l'épisode pluvieux ;
- Temps de concentration, qui est défini par la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau partant du point le plus éloigné de l'exutoire du bassin versant parvienne jusqu'à celui-ci ;
- Propagation de l'onde de crue, qui est fonction de la structure du lit et de la vallée alluviale, notamment de la pente et des caractéristiques du champ d'inondation.

I.3.3 Types d'inondations :

a) Inondations de plaine :

Elles se produisent lorsque la rivière sort lentement de son lit mineur et inonde la plaine pendant une période relativement longue. La rivière occupe son lit moyen et éventuellement son lit majeur.



Figure I. 7: Inondation de plaine sur le Rhône en 2003.

Source : http://www.noe.gard.fr/index.php/le-gard-et-le-risque-inondation/comprendre-le-phenomene-inondation

b) Inondation par crues torrentielles :

Lorsque des précipitations intenses, telles des averses violentes, tombent sur tout un bassin versant, les eaux ruissellent et se concentrent rapidement dans le cours d'eau, engendrant des crues torrentielles brutales et violentes. Elles se produisent sur une période inférieure à 12 h, ce qui rend la prévention très difficile.

Le cours d'eau transporte de grandes quantités de sédiments et de flottants (bois morts, etc.), ce qui se traduit par une forte érosion du lit et un dépôt des matières transportées.



Figure I. 8: Inondation à montée rapide sur les Gardons et le Vidourle en 2002

Source : http://tpe-inondation-1s1.e-monsite.com/pages/types-d-inondations.html

c) Inondation par ruissellement pluvial :

L'imperméabilisation du sol due aux aménagements (bâtiments, routes, parkings…) limitent l'infiltration des précipitations dans le sol et accentuent le ruissellement. Ceci occasionne souvent la saturation et le refoulement du réseau d'assainissement des eaux pluviales. Il en résulte des écoulements plus ou moins importants et souvent rapides dans les rues. Lorsque ce dernier se produit en milieu urbain on appelle ça le ruissellement urbain.



Figure I. 9: Inondation par ruissellement à Nîmes en 1988.

Source : https://www.midilibre.fr/2019/10/03/nimes-retour-en-images-sur-les-tragiques-inondations-de-1988,8455509.php

d) Inondation par submersion marine :

Cette inondation concerne le niveau de la mer qui, lors de conditions météorologiques extrêmes (associant dépressions atmosphériques, vents violents, fortes houles, phénomènes marégraphiques et tempêtes) s'élève considérablement et inonde les zones côtières. Cette inondation peut aussi être déclenchée par des séismes sous-marins qui peuvent entrainer un tsunami selon la magnitude.



Figure I. 10: Inondation marine à Montpellier en 1970

e) Inondation par remontée de nappes :

Après la pluie, une partie de l'eau s'infiltre jusqu'à finir dans les nappes phréatiques. Ces dernières sont des masses d'eau contenues dans les vides et fissures du sol. La pluie recharge donc la nappe. Au cours de l'année, les variations du niveau de l'eau sont appelées *battements de nappe*. En automne, la nappe atteint un niveau faible. C'est *l'étiage.* L'accumulation des pluies fait augmenter le niveau de l'eau. Lors de très fortes perturbations, l'eau ressurgit à la surface de la terre à cause d'un trop plein d'eau. C'est *l'inondation par remontée de nappe.*

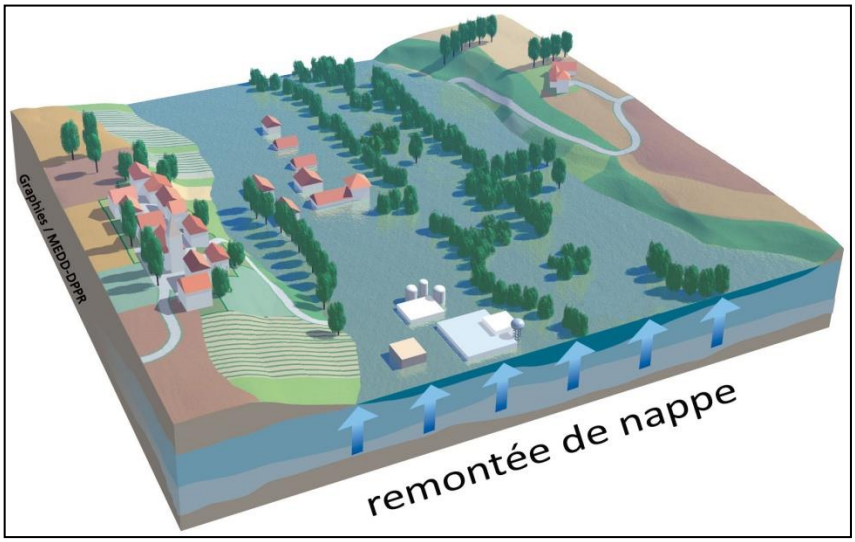


Figure I. 11: Procédés de remontée de la nappe

f) Inondation par rupture d'embâcle :

Après de fortes pluies hivernales, des branchages s'accumulent dans les cours d'eau aux endroits les plus étroits.

Puis, lors d'un gros orage estival, de petits branchages viennent « boucher » les ouvertures restantes, dès lors, un petit barrage naturel est créé retenant l'eau. Lorsque le barrage cède, une inondation peut être déclenchée. La grande quantité d'eau retenue est dévastatrice car imprévisible.



Figure I. 12: Embâcle formé dans un cours d'eau.

g) Inondation par rupture d'une protection :

L'inondation suivant la rupture de digue est un phénomène très brutal et d'autant plus dommageable que le site étudié est proche de la digue. Une rupture peut provoquer l'entrée d'un mur d'eau de plusieurs mètres de haut. Il est très difficile de prévoir la rupture d'un ouvrage de protection, ce qui rend la prévention de ce type d'accident particulièrement incertaine.

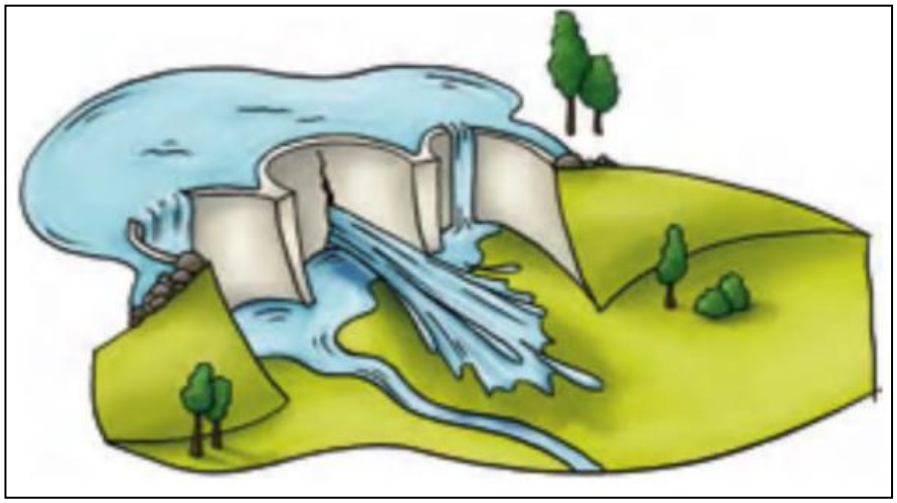


Figure I. 13: Inondation par rupture d'une protection.

I.3.4 Influence des facteurs naturels :

De nombreux paramètres influencent l'apparition d'une crue. Tout d'abord la quantité et surtout la répartition spatiale et temporelle des pluies, par rapport au bassin versant, sont déterminantes. Il peut s'agir de pluies répétées et prolongées de régime océanique (celles affectant par exemple les grands bassins de la Loire ou de la Seine) ou d'averses intenses de courte durée, qui touchent de petits bassins versants.

La nature et l'occupation du sol dictent l'évaporation et la consommation d'eau par les plantes. L'absorption d'eau par le sol, l'infiltration dans le sous-sol ou le ruissellement influencent fortement le temps de concentration des eaux. Enfin, la topographie du lit, la pente et la forme du bassin versant jouent également. Ainsi, pour une même quantité de pluie, une crue apparaîtra ou non.

À ces paramètres s'ajoutent des facteurs naturels aggravants, comme la formation et la rupture d'embâcles ou la fonte des neiges. Concernant la fonte des neiges, il est rare que des crues importantes soient provoquées uniquement par ce phénomène, même s'il demeure un facteur aggravant.

Les matériaux flottants transportés par le courant peuvent en effet s'accumuler en amont des passages étroits. La rupture éventuelle de ces embâcles provoque une onde puissante et destructrice en aval.

I.3.5 Aléa, enjeu, risque et vulnérabilité :

I.3.5.1 Définitions :

a. Aléa :

Manifestation d'un phénomène, naturel ou résultant de l'activité de l'homme, potentiellement dangereux et destructeur**.**

b. Enjeu :

Ensemble des personnes, des biens et des services susceptibles d'être affectés par le phénomène. L'impact de l'aléa sur les enjeux dépend de leur importance (nombre, nature, etc.) et de leur vulnérabilité**.**

c. Risque :

Un risque est le produit d'un aléa et d'un enjeu. On considère que le risque existe dès qu'un aléa pourrait se manifester dans une zone où des enjeux humains, économiques ou environnementaux sont en présence. Sans conséquences, un aléa n'est donc pas un risque. La gravité du risque est proportionnelle à la vulnérabilité des enjeux.

d. Vulnérabilité :

Exprime et mesure le niveau de conséquence prévisible de l'aléa sur les enjeux. Elle caractérise la plus ou moins grande résistance d'un enjeu.

I.3.5.2 Paramètres principaux :

Quatre paramètres principaux sont nécessaires pour qualifier l'aléa inondation.

a. Période de retour de crues :

On associe souvent à la notion de crue, la notion de période de retour (crue décennale, centennale, millennale, etc.) : Plus cette période est grande, plus les débits et l'intensité sont importants. On distingue par ordre croissant

- Les crues fréquentes : dont la période de retour est comprise entre un et deux ans.
- Les crues moyennes : dont la période de retour est comprise entre dix et vingt ans.
- Les crues exceptionnelles : dont la période de retour est de l'ordre de cent ans.
- La crue maximale vraisemblable : qui occupe l'intégralité du lit majeur.

Les événements les plus souvent représentés sur la carte d'aléa sont la crue décennale (Q_{10}) et la crue centennale (Q_{100}).

L'aléa de référence servant de base à l'élaboration des documents réglementaires correspond à l'événement centennal ou au plus fort événement connu, s'il présente une fréquence supérieure à cent ans.

b. Hauteur et durée de submersion :

La hauteur de submersion peut avoir un impact important sur le bâti, notamment lorsqu'elle dépasse la cote de référence. La structure porteuse de l'habitation peut être endommagée et les sols et murs gorgés d'eau. Lorsque la durée de submersion est importante (supérieure à 24 h voire 48 h), des problèmes sanitaires peuvent survenir, l'eau étant souvent sale, contaminée par les égouts ou parfois le mazout échappé des cuves.

Pour l'homme, on considère généralement que des hauteurs d'eau supérieures à 50 cm sont dangereuses. À titre d'exemple, une voiture commence à flotter à partir de 30 cm d'eau.

Tableau 0-1 : Qualification de l'aléa en fonction de la hauteur d'eau et type de crue. (Source : DGUHC)

Tableau I. 1: Qualification de l'aléa en fonction de la hauteur d'eau et type de crue. (Source : DGUHC)

Hauteur d'eau (m)	Crue lente	Crue semi rapide	Crue torrentielle
H < 0.5	Modéré	Modéré	Modéré (en fonction des vitesses) - Fort
0.5 < H < 1	Modéré	Fort	Fort
H > 1	Fort	Fort	Fort

c. Vitesse du courant :

La vitesse d'écoulement est conditionnée par la pente du lit et sa rugosité. Elle peut atteindre plusieurs mètres par seconde. La dangerosité de l'écoulement dépend du couple hauteur / vitesse.

À titre d'exemple, à partir de 0,50 m / s, la vitesse du courant devient dangereuse pour l'homme, avec un risque d'être emporté par le cours d'eau ou d'être blessé par des objets charriés à vive allure.

Tableau I. 2: Degré de danger des crues en fonction de la vitesse du courant. (Source : DGUHC)

	Faible	**Moyenne**	**Forte = dangereuse**			
Vitesse en m/s	0.2	0.25	0.5	1	1.25	1.5
Vitesse en Km/h	0.72	0.9	1.8	3.6	4.5	5.4

d. Volume de matière transportée :

Ce volume est communément appelé transport solide. Il s'agit de matériaux (argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs, etc.) se trouvant dans les cours d'eau, et dont le transport peut s'effectuer soit par suspension dans l'eau, soit par déplacement sur le fond du lit, du fait des forces liées au courant. Le terme de transport solide ne comprend pas le transport des flottants (bois morts...).

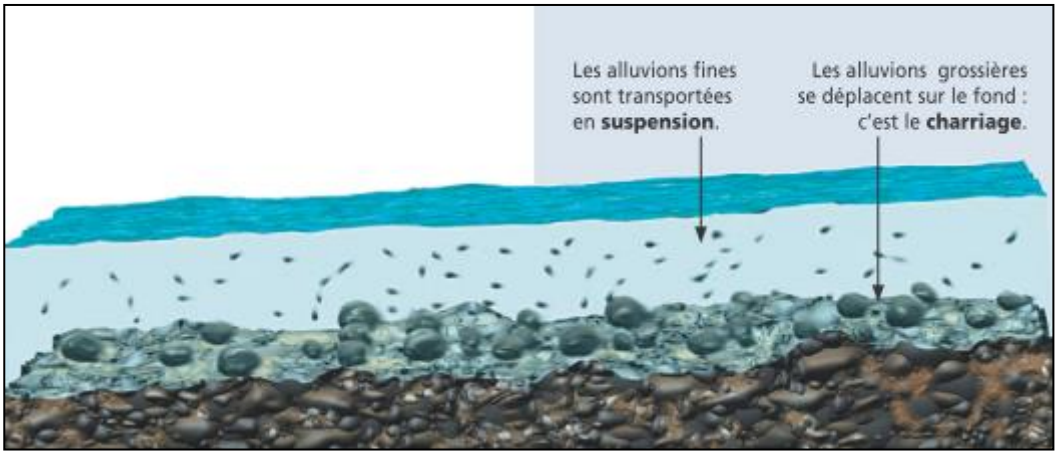


Figure I. 14: Procédés du transport solide.

I.3.5.3 Conséquences :

a) Atteintes aux hommes, aux biens et aux activités :

La vulnérabilité de la population est provoquée en particulier par sa localisation en zone inondable. Sa mise en danger survient surtout lorsque les délais d'alerte et d'évacuation sont trop courts ou inexistants, lors des crues rapides ou torrentielles.

Le danger se traduit par le risque d'être emporté ou noyé, ainsi que par l'isolement sur des îlots coupés de tout accès. Lors des inondations du Sud-Est des dix dernières années, plus du tiers des victimes étaient des automobilistes surpris par la crue.

L'interruption des communications peut gêner, voire empêcher l'intervention des secours. Par ailleurs, on estime que les dommages indirects (perte d'activité, chômage technique, etc.) sont souvent plus importants que les dommages directs occasionnés aux biens mobiliers et immobiliers.



Figure I. 15: Atteintes aux hommes, aux biens et aux activités.

Source : https://www.aps.dz/regions/128864-risques-d-inondations-a-alger-28-points-noirs-recenses

b) Atteintes à l'environnement :

Les dégâts au milieu naturel sont dus à l'érosion, aux déplacements du lit ordinaire, aux dépôts de matériaux, etc. Les phénomènes d'érosion, de charriage, de suspension de matériaux et d'alluvionnement participent à l'évolution du milieu naturel dans ces aspects positifs comme négatifs.

Pour les zones industrielles situées en zone inondable, un risque de pollution et d'accident technologique est à prendre en compte.

I.4 Méthodes d'aménagement des cours d'eau :

Les cours d'eau sont des milieux dynamiques évoluant perpétuellement en fonction des caractéristiques physiques et saisonnières. La qualité de vie d'un cours d'eau dépend de nombreux facteurs tels que la vitesse du courant, la sinuosité du lit, le débit, la qualité de la ripisylve, le taux d'oxygène dissous….

Ces facteurs peuvent être dégradés ou modifiés, c'est pourquoi les cours d'eau doivent être entretenus ou aménagés afin de maintenir leurs différentes fonctionnalités pour différents usages, et de restaurer leur bon état écologique.

Sans intervention de l'Homme, la richesse des cours d'eau disparait. En effet, les lits des cours d'eau s'encombrent de divers détritus et les berges sont envahies par la végétation. L'envasement prend alors le dessus, les capacités d'écoulement sont réduites et les risques d'inondation augmentent. La qualité écologique diminue, les cours d'eau sont alors moins diversifiés en termes d'espèces (animales et végétales).

Les objectifs et les techniques d'aménagement des cours d'eau ont évolué en relation avec l'intérêt que l'homme attache à certaines des fonctions de la rivière pour l'exploiter ou la protéger.

I.4.1 Recalibrage :

Il s'agit d'un élargissement et d'un approfondissement du cours d'eau. Les berges sont totalement découpées et re-profilées, en général à 45° minimum. Les écoulements se font alors dans le fond d'un « fossé anti-char », de manière linéaire sans que la moindre diversité d'habitat ne puisse se recréer. Ainsi transformés, les cours d'eau font alors également office d'exutoire pour les collecteurs de drains, et accélèrent les écoulements, pouvant provoquer, dans les régions où ces dispositifs sont nombreux, des inondations à l'aval lors des épisodes de pluie importants.



Figure I. 16: Rectification, recalibrage et drainage sur le ruisseau de l'étang à Availles Limouzine.

(Source : Michel Bramard,(86)).

I.4.2 Rectification :

L'action consiste à supprimer les méandres du cours d'eau, de manière à obtenir un tracé rectiligne. Cela permet de raccourcir la rivière, et donc, d'augmenter sa pente, ce qui accélère l'écoulement donc diminuer l'emprise de la rivière sur le foncier. La rectification est la plupart du temps accompagnée d'un recalibrage.

Un rescindements est enfin pratiqué pour améliorer la navigabilité des grands cours d'eau. Notons que le rescindement/rectification d'un cours d'eau a souvent été couplé à d'autres interventions telles que le sur calibrage du nouveau lit et la protection des berges contre l'érosion.



Figure I. 17: Rectification et recalibrage à Servon 1986. (Source : Michel Bramard,(86)).

I.4.3 Enrochements :

Rochers mis en place au niveau de la berge pour stabiliser celle-ci. Les rochers, souvent des blocs de granite bleus ou gris, voire rouges, sont alors posés voire enfoncés dans la berge pour éviter que celle-ci ne s'érode.



Figure I. 18: Enrochement de berge.

Source : https://genibiodiv.inrae.fr/le-genie-vegetal-un-atout-pour-lamenagement-des-berges/les-principales-techniques-damenagement-des-berges/

I.4.4 Déplacement de cours d'eau :

Un certain nombre de cours d'eau ont été volontairement déplacés de leur position initiale naturelle vers l'un ou l'autre côté du fond de vallée. Ces déplacements sont souvent très anciens (plusieurs siècles).

L'objectif était principalement de gagner des terres cultivables ou d'améliorer leur exploitabilité en libérant une partie des espaces agricoles de la présence d'un cours d'eau. Ce type d'intervention reste toutefois limité aux petits et moyens cours d'eau (jusqu'à une dizaine de mètres de largeur environ).

Notons que le déplacement d'un cours d'eau a souvent été couplé à d'autres interventions telles que :

- La rectification et le recalibrage du nouveau lit mineur.
- La protection des berges contre l'érosion.
- La suppression de la ripisylve (systématique sur au moins l'une des deux berges).
- L'endiguement.

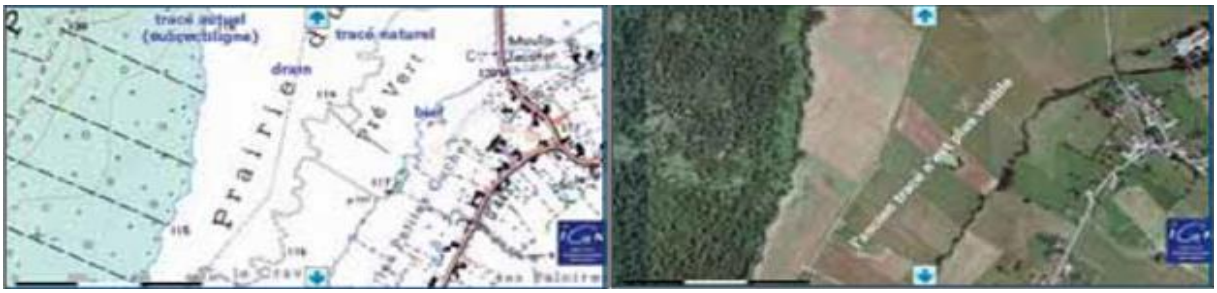


Figure I. 19: Déplacement complet de cours d'eau : l'Armance. (Source : Geoportail).

I.4.5 Protection des berges ou endiguement :

Le principe de l'endiguement est simple : on érige le long du cours d'eau, dans la zone où se situent les enjeux à protéger, des structures linéaires plus ou moins sophistiquées (du simple remblai de terre ou de graviers issus de curages jusqu'à des constructions de génie civil de plusieurs mètres de haut). L'endiguement peut être uni- ou bilatéral, large ou étroit, de faible ou de forte hauteur selon les sites, les enjeux, les moyens techniques et financiers des collectivités.



Figure I. 20: Travaux de protections des berges d'un cours d'eau.

I.4.6 Seuils / ouvrages transversaux :

La plupart des cours d'eau sont parsemés de nombreux seuils (hauteur de chute inférieure à 5 m) résultant d'anciens usages énergétiques (forges, moulins) ou agricoles (irrigation). Ces ouvrages n'ont pour la plupart plus de vocation économique active. Ils génèrent par contre des impacts importants sur les caractéristiques abiotiques (hydromorphologie, physico-chimie de l'eau, etc.) et biologiques (entraves à la circulation des espèces, dérive typologique, etc.), des hydrosystèmes. Ils peuvent cependant, rarement, présenter des intérêts : maintien d'une lame d'eau en étiage, maintien d'un niveau de nappe pour l'alimentation en eau potable ou l'irrigation, stabilisation du fond du lit, etc.

Ce type d'action anthropique a un effet immédiat sur l'homogénéisation des faciès d'écoulement, donc des habitats aquatiques. Des dizaines de milliers de kilomètres de cours d'eau sont aujourd'hui sous l'influence directe de seuils.

Notons que les seuils sont souvent associés à d'autres interventions telles que :

- La rectification du lit mineur.
- Le recalibrage.
- La protection des berges contre l'érosion.
- La suppression de la ripisylve.



Figure I. 21: Exemples de seuils.

I.4.7 Suppression de la ripisylve :

Il est fréquent que la végétation des berges des cours d'eau soit partiellement ou intégralement supprimée lors de la réalisation de travaux de chenalisation.

Mais la suppression totale ou partielle de la ripisylve peut aussi être simplement due à des interventions plus ou moins fréquentes des riverains (notamment dans les zones agricoles) ou des organismes gestionnaires (syndicats, collectivités locales, etc.).



Figure I. 22: Technique du génie végétal.

Conclusion :

La réduction des dommages causés par des catastrophes nécessite en premier lieu une connaissance des régions sujettes à ce risque ainsi qu'une identification des facteurs favorisant et amplifiant ces phénomènes, et pour lutter contre les dégâts, plusieurs techniques d'aménagement s'offre à nous. Le choix d'une technique se fait selon des critères morphologiques, économiques, paysagers, et environnementaux. Lors du choix de la technique, une démarche consiste à aider la nature pour protéger l'objectif, sans causer des grandes modifications sur la dynamique de la rivière afin d'éviter la destruction des caractéristiques de ce milieu vivant.

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.

Introduction :

Ce chapitre est consacré à une description générale du bassin versant de Ia SOUMMAM, la région d'étude SIDI AICH pour avoir le maximum de données et pour connaître les caractéristiques de la zone d'étude.

II.1 Le bassin versant de la Soummam :

II.1.1 Présentation de bassin versant de la Soummam :

Le bassin versant de la Soummam est situé au Nord-Est de l'Algérie entre les méridiens3°60' et 5°57' et les parallèles 35°84' et 36°74'**.** Il est caractérisé par la présence de deux plateaux (le plateau du Bouira et le plateau du Sétif) et de la vallée de la Soummam. Le bassin couvre une superficie de 9125 Km^2et possède un périmètre de 554 km, Il est limité au Nord par la mer méditerranée et par les montagnes de la grande Kabylie (Djurdjura), à l'Ouest par la chaine de Djurdjura et les massifs côtiers de Bejaia, à l'Est plateau sétifien, au Sud, le plateau de Bouira et le domaine des Bidan.

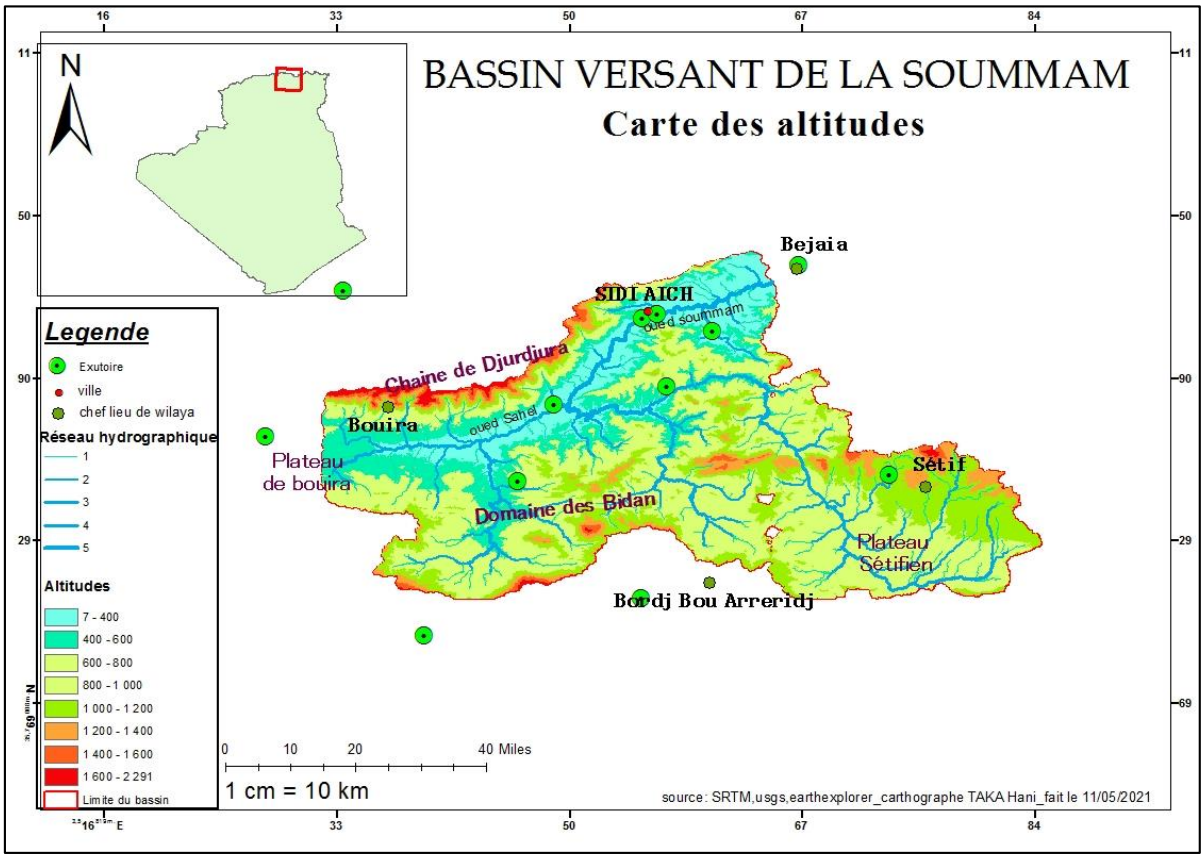


Figure II. 1: carte d'altitudes du Bassin versant de la Soummam.

II.1.2 Principaux cours d'eau :

Le bassin versant de la Soummam couvre une région essentiellement montagneuse caractérisée par un réseau hydrographique très marqué et bien alimenté dont l'exutoire est le golfe de Béjaia.

Le système de drainage principal du bassin versant de la Soummam comprend vers l'Ouest oued Sahel, qui prend sa source dans les régions de Ain Bessam et de Sour El Ghozlane, et vers l'Est, l'oued Boussalam d'une longueur de l'ordre de 144 km, qui prend quant à lui sa source dans le plateau sétifien. Ces deux rivières se réunissent près d'Akbou pour former l'oued Soummam qui se jette dans la mer méditerranée à Béjaïa après un parcours de 80km environ.

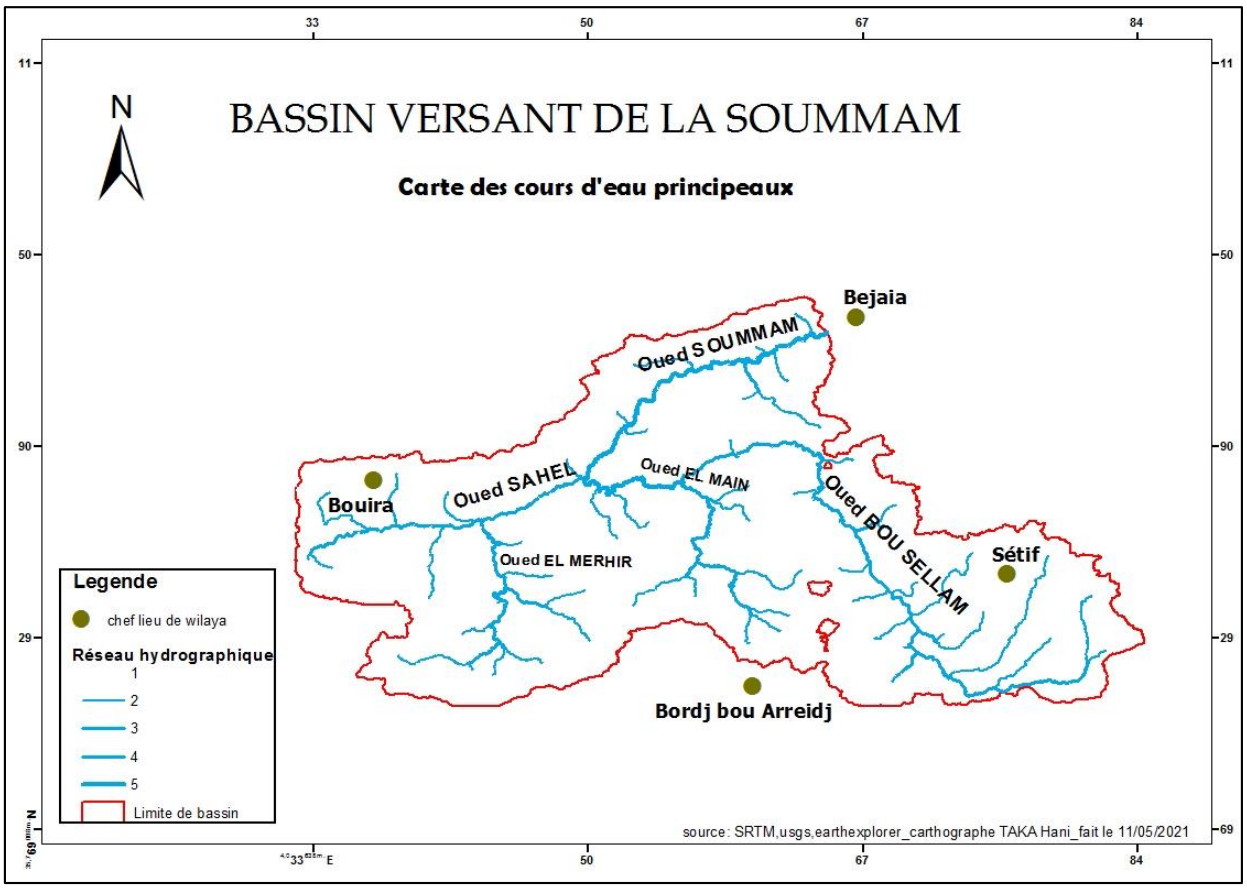


Figure II. 2: carte des cours d'eau principaux.

II.1.2.1 Principaux affluents de l'Oued Soummam :

Tableau II. 1: Principaux affluents de l'Oued Soummam.

Source : Résultats météorologique, Station météorologique de Bejaia, 2002.

Affluent	Superficie du bassin versant (Km^2)	Position par rapport à l'Oued	Quantité d'eau (m^3/an)
Oued Sahel	3800	Amont	/
Oued Boussellam	4300	Amont	/
Oued Ighzer Amokrane	80	Rive droite	12.10^6
Oued R'mila	100	Rive droite	28.10^6
Oued El-kseur	55	Rive droite	12.10^6
Oued Ghir	50	Rive droite	12.10^6
Oued Amizour	55	Rive gauche	/
Oued Amassine	195	Rive gauche	15.10^6
Oued Imoula	40	Rive gauche	4.10^6
Oued Seddouk	125	Rive gauche	10.10^6

II.1.3 La vallée de la Soummam :

La vallée de la Soummam appartient administrativement à la wilaya de Bejaia, troisième fleuve d'Algérie, elle constitue la partie la plus avale du bassin versant de la Soummam.

Son relief hétérogène et son climat méditerranéen lui ont permis d'entretenir une diversité de milieux terrestres et aquatiques. Les zones humides sont assez représentées tant par leur diversité que par leur superficie. On y retrouve des cours d'eau permanents et temporaires dont le plus important est l'oued Soummam qui s'allonge approximativement sur 83 km orientée SW-NE de Tazmalt à Béjaia (bougie).

Pour les eaux souterraines, il a été mis en évidence la présence, sous les alluvions, d'un réservoir s'étalant de Tazmalt à Sidi- Aich et de Sidi-Aich à Bejaia (figure). La division en deux zones de cette réserve se justifie par la présence à Sidi-Aich d'un seuil géologique qui, du point de vue hydraulique, constitues-en quelque sorte une barrière. L'alimentation desdeux nappes se fait par l'oued Sahel,l'oued Soummam, leurs affluents et les précipitationsainsi que les affluents miocènes.

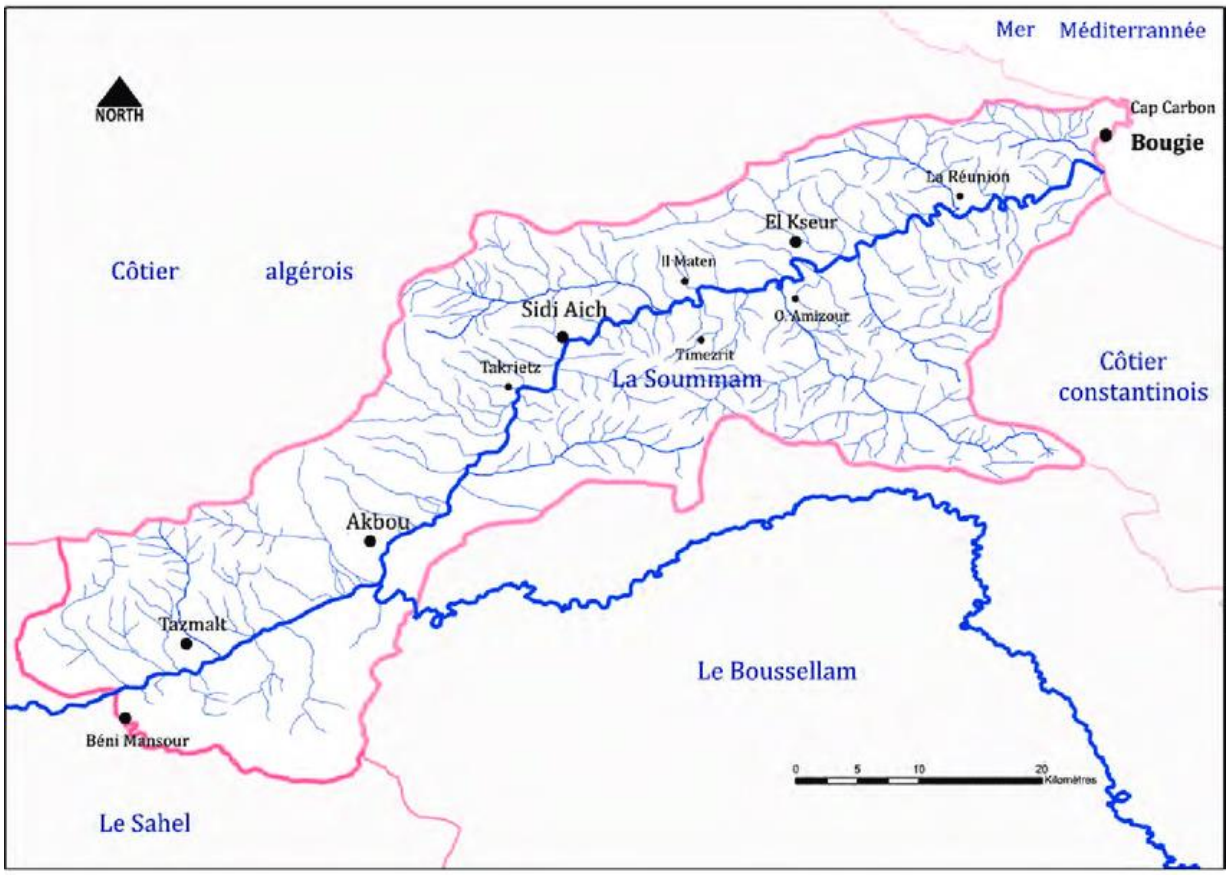


Figure II. 3: Le sous-bassin versant de la Soummam auquel appartient la nappe alluviale.

Source : Modélisation des écoulements souterrains dans les alluvions de la Basse Vallée de la Soummam (Nord-Est Algérien) et perspective sur l'évolution des prélèvements - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Le-sous-bassin-versant-de-la-Soummam-auquel-appartient-la-nappe-alluviale_fig2_316889411 [accessed 24 Jun, 2021]

II.2 Caractéristique de la zone d'étude : ville de Sidi aich :

II.2.1 Situation géographique :

Notre zone d'étude appartient en totalité à la ville de SIDI AICH à environ 45 Km de Bougie, 36° 36′ 46″ Nord, 4° 41′ 18″ Est. Une ville d'une superficie de 770 hectares (7,70 km²) traversée par l'Oued Soummam qui la coupe en deux parties (rive gauche et rive droite).Cette zone est le siège d'inondations fréquentes à cause des flots tumultueux qui proviennent de l'oued Soummam et ses affluents.



Figure II. 4: Passage d'oued Soummam sur la ville de Sidi-aich(source : google earth pro) .

II.2.2 Situation Démographique :

La topographie de la wilaya de Béjaia a conditionné dans une large mesure la répartition de sa population, Les zones de plaine, longeant l'Oued Soummam où se concentre plus de la moitié de la population, connaissent une forte densité (1 789,0 hab. /Km² à Sidi Aich, et 1413 hab. /Km² à la ville de Bejaia),Les zones montagneuses, notamment le massif des Babors au sud de la wilaya, le prolongement du Djurdjura à l'ouest et le massif d'Akfadou se joignant aux hauteurs d'El Kseur et de Toujda, se dressent en parallèle de part et d'autre de l'Oued Soummam. Ces deux grandes parties du territoire de la wilaya, classées zones difficiles, connaissent une densité de population très faible en comparaison avec la densité moyenne de la wilaya qui est de 297 hab. /Km² .

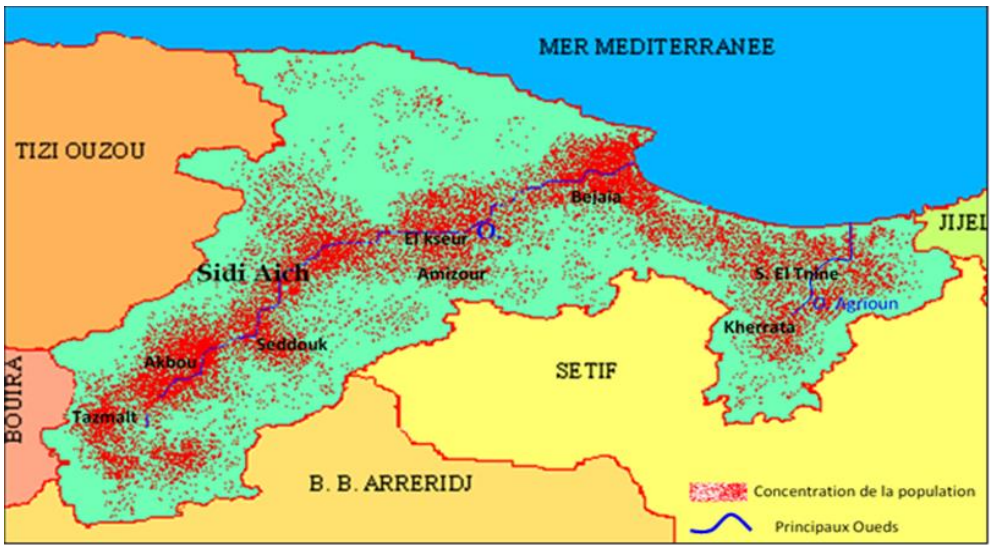


Figure II. 5: concentration de la population bassin versant de la Soummam.

Source : « Population ». Consulté le 24 juin 2021.http://www.dsp bejaia.dz/index.php/population.

Tableau II. 2: Informations sur les habitants et la population de Sidi Aïch

Nombre d'habitants à Sidi Aïch	13 775 habitants
Densité de population à Sidi Aïch	1 789,0 /km²

Source : « Sidi Aïch, Sidi Aïch, Béjaïa, Algérie - DB-City : Toutes les infos sur les Pays, Régions, Villes et Villages ». Consulté le 24 juin 2021.

II.2.3 Situation Climatique :

La commune de Sidi Aïch est exposée aux influences du climat méditerranéen du Nord Estet du climat aride du Sud-Ouest. Elle présente un climat méditerranéen sub-humide, caractérisé par une saison humide de Novembre à la mi-Mai etune saison sèche de la mi-mai à la mi-Juin et des courtes périodes de sub-sécheresse entre ces deux périodes principales

II.2.4 Situation Hydrographique et Hydrogéologique :

La ville de Sidi Aïch est caractérisée par un réseau hydrographique dense, il est constitué principalement par l'Oued Soummam qui est alimenté à partir des petits cours d'eau qui prennent leurs ressources sur les hauteurs des montagnes et s'orientent vers l'Oued Soummam le principal collecteur des eaux superficielles de la région ; il présente un écoulement permanent et se jette dans la baie de Bejaïa. Il divise la commune de Sidi-Aich en deux rives.

La rive gauche, l'Oued Soummam est composé de plusieurs affluents qui sont :

- Ighzer Bou-Haddad.
- Targa Ouada.
- Ighzer Oukhendouk.
- Ighzer Bouzermane.
- Targa Tasgounfouts.
- Ighzer Maala.

Par contre au niveau de la rive droite, il existe qu'un seul affluent appelé : Ighzer N'Chbib, Du point de vue hydrologique, la ville de Sidi-Aich est divisée en dix-huit (18) sous-bassins versants (BV), tracés par dix-huit cours d'eaux.

À l'entrée de Sidi Aich coté SW un rétrécissement très important surtout, la largeur du lit mineur Oued Soummam est très faible, ce qui engendre un recul des eaux de crues sur la plaine en amont de Sidi Aich et un débordement sur la ville côté gauche aux environs du marché à la sortie de la ville. Le champ d'inondation est faible et il reste limité sur la rive gauche de moindre importance

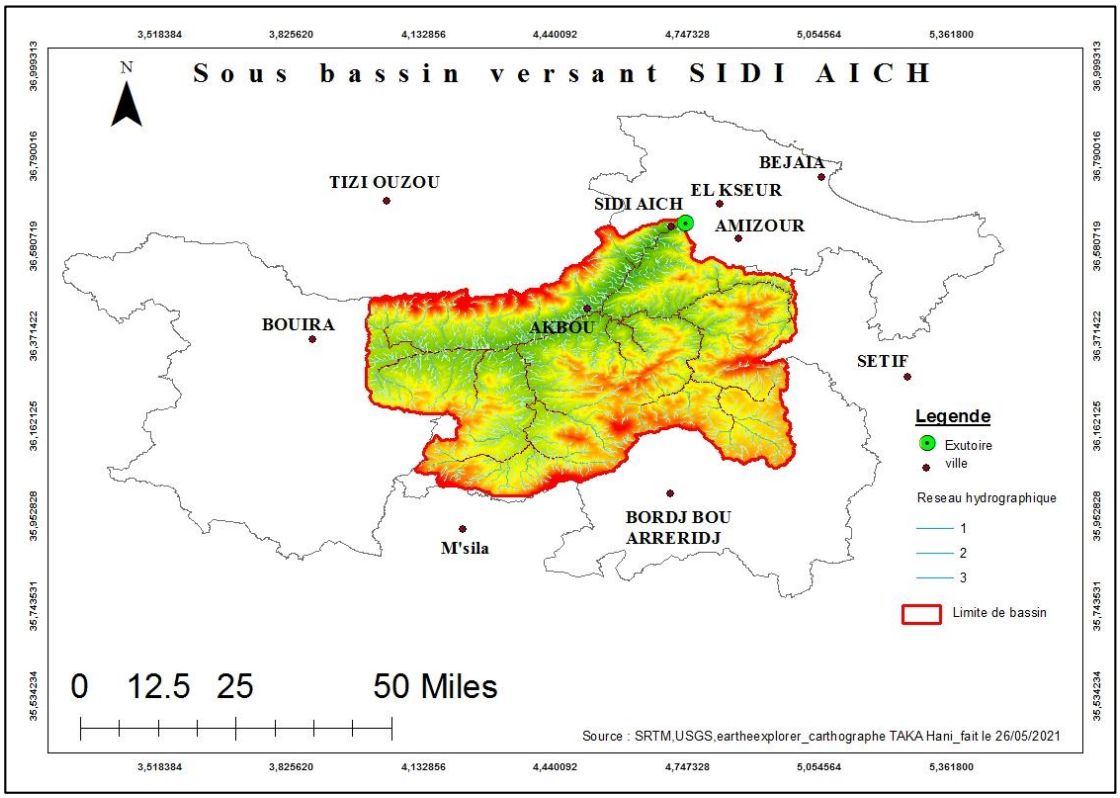


Figure II. 6: Sous bassin versant du Sidi aich.

Conclusion :

Dans ce chapitre ; on a donné un aperçu général sur la zone d'étude, on a défini les caractéristiques nécessaires du site et on a déterminé les données de base pour entamer le projet qui est la protection contre les inondations de la ville de sidi aich.

CHAPITRE III :

ETUDE HYDROLOGIQUE

CHAPITRE III : ETUDE HYDROLOGIQUE

Introduction :

Dans le cadre de l'étude de protection contre les inondations de la ville de sidi aich wilaya de Bejaia, L'étude hydrologique est celle où nous déterminerons les caractéristiques hydrologiques de la zone d'étude, la crue de projet sera la caractéristique principale à déterminer. Cette crue sera la principale composante à fournir au modèle pour le dimensionnement des ouvrages de protection, aussi son évolution en différents points du cours d'eau est indispensable pour prévoir différents scénarios de protection.

III.1 Etude géomorphologique :

III.1.1 Caractéristiques morphologiques :

III.1.1.1 Superficie :

La superficie des bassins versants facilite la comparaison des bassins. Elle représente l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau. À ce titre, les débits y sont fortement tributaires. L'aire du sous bassin versant de sidi aich est de **4392.366 km²**

III.1.1.2 Périmètre :

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant. Il est un indicateur de la taille du bassin versant. Le périmètre de la zone d'étude est de **404.97 km.**

III.1.1.3 Longueur du thalweg principal :

La longueur du thalweg principal à pour valeur : **Lcp = 37.037 Km**

III.1.2 Caractéristiques géométriques :

III.1.2.1 Indice de compacité de Horton (K_H) :

L'indice de compacité de Horton exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal.il se calcule par la relation :

$$K_H = \frac{A}{L^2}$$

Avec :

A : superficie du bassin en Km 2.

L : Longueur du cours d'eau principal(km).

Pour : K_h<1 le bassin est de forme allongée

K_h>1 le bassin est de forme ramassée

Pour sous bassin versant de sidi aich on obtient :

K_H = 3.202

III.1.2.2 Indice de compacité de Gravelius :

L'indice de compacité de Gravelius permet de caractériser la morphologie des bassins versants. Celle-ci ayant un rôle notoire dans l'écoulement des eaux et à ce titre, dans l'allure des hydrogrammes. Ce coefficient est égal à 1 lorsque le bassin est parfaitement circulaire car le cercle est l'élément le plus compact. Cette valeur croîtra au fur et à mesure que la compacité du système diminue et peut aller à 3 pour les bassins très allongés. Cette morphologie du bassin a une influence sur l'écoulement des eaux. En effet, les bassins versants circulaires sont mieux drainés contrairement au bassin versant allonger.

Indice de Gravelius « K_c » Appel aussi indice de forme, cet indice caractérise la forme du bassin, et exprime l'allongement des bassins versants.

$$K_c = \frac{P}{2.\sqrt{\pi.A}}$$

Avec :

K_c : indice de compacité.
P : périmètre du bassin en Km.
A : superficie du bassin en Km ^{2}.

La valeur de cet indice pour le sous bassin versant de sidi aich est de 1.724 ce qui traduit, la forme allongée du bassin, par conséquent c'est un bassin mal drainé.

K_c = 1,724.

III.1.2.3 Rectangle équivalent :

C'est une transformation purement géométrique en un rectangle de dimensions L et l'ayant la même surface et le même indice de compacité. Il permet de comparer les bassins versants entre eux du point de vue de l'écoulement (Touaibia, 2004).

Les dimensions du rectangle équivalent sont obtenues comme suit :

$$\begin{cases} L = \frac{Kc.\sqrt{A}}{1.12}\left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2}\right] \\ l = \frac{Kc.\sqrt{A}}{1.12}\left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2}\right] \end{cases}$$

Ainsi pour le sous bassin versant du sidi aich , les dimensions sont :

$$\begin{cases} \textbf{L= 179.57 km} \\ \textbf{l = 24,46 km} \end{cases}$$

Le rapport de ces deux dimensions est de **7.34** ce qui confirme le caractère allongé du bassin.

III.1.2.4 Coefficient d'allongement :

$$\text{Ca} = \frac{Lcp^2}{A}$$

Tel que :

L_{cp}: La longueur du talweg principal (Km) ;

A : superficie du bassin en Km 2.

On obtient : **Ca= 0.312**

III.2 Etude du relief :

Le relief a une très grande influence sur la forme de l'hydrogramme de crue, une forte pente provoque un écoulement plus rapide, donc un temps de concentration plus court d'où une montée plus rapide de la crue. L'importance de son étude est caractérisée par la répartition altimétrique du terrain par une courbe appelée 'Courbe hypsométrique'

III.2.1 Courbe et paramètres hypsométrique :

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.

Elle est d'une grande importance dans l'étude du relief d'un bassin versant. Sur un graphe, on porte en ordonnée l'altitude et en abscisse la surface exprimée en %. La courbe hypsométrique est tracée à partir des résultats des calculs de la répartition du bassin versant par tranches d'altitudes, après détermination des surfaces partielles. Elle représente la fraction de la surface comprise entre deux courbes de niveau consécutives. On la considère comme une sorte de profil du bassin versant ets pente moyenne, c'est un élément synthétique de comparaison de la topographie de divers impluviums

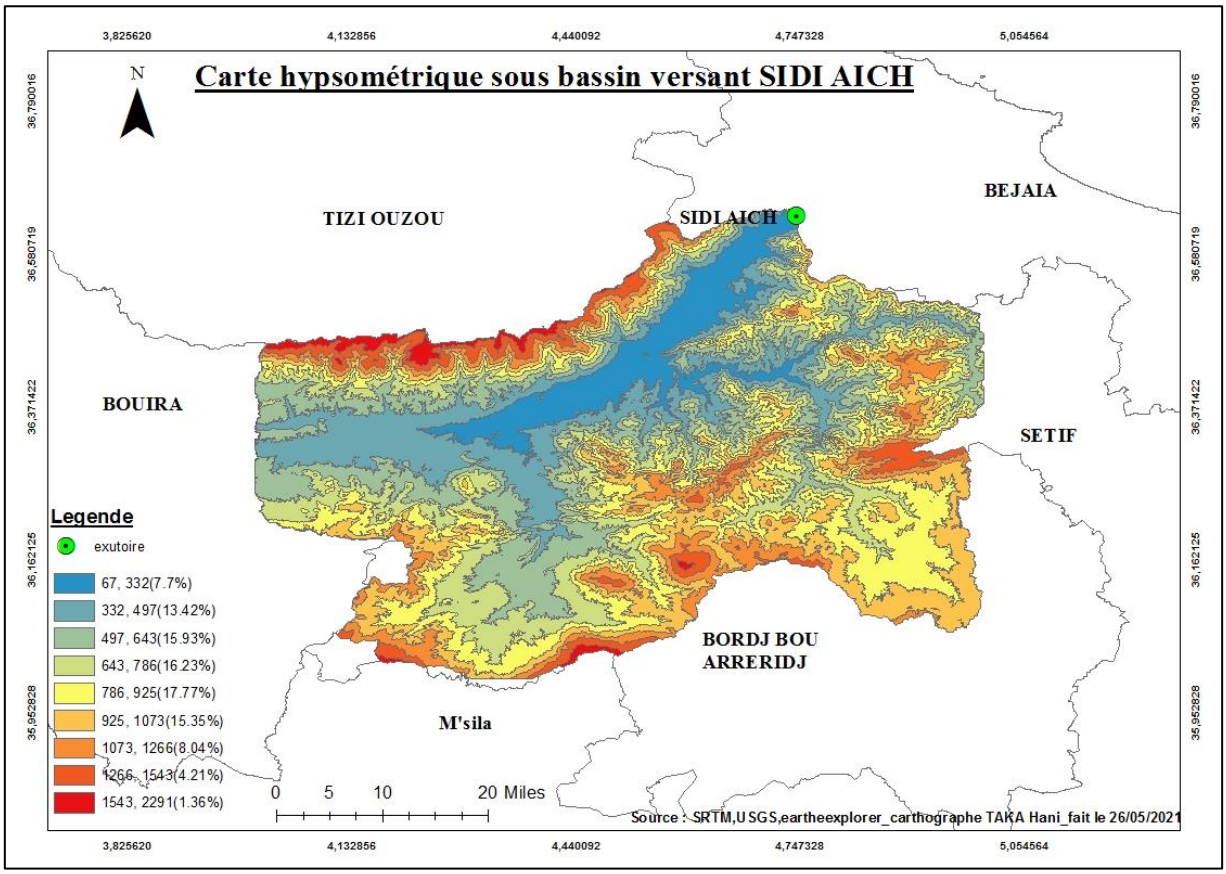


Figure III. 1: carte hypsométrique du sous bassin versant sidi aich

Les facteurs hydrologiques sont très liés aux altitudes. Ainsi, il est nécessaire de connaître la répartition des surfaces en fonction de leurs altitudes. La courbe hypsométrique donne la répartition des altitudes en fonction de la superficie du bassin. La répartition des surfaces élémentaires et leurs cumule en fonction des altitudes ont été obtenues avec logiciel ArcGIS, les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III. 1: Paramètres Hypsométriques du sous bassin versant de sidi aich

Altitudes (m)	***Surfaces (km²)***	***Surfaces partielles) (%)***	***Surfaces cumulées (Km²)***	***Surfaces partielles cumulées (%)***
67-332	*342.323*	*7.79%*	*342.323*	*7.79%*
332-497	*585.7445*	*13.34%*	*928.0675*	*21.13%*
497-643	*692.4589*	*15.77%*	*1620.5264*	*36.89%*
643-786	*705.1865*	*16.05%*	*2325.7129*	*52.95%*
786-925	*770.5286*	*17.54%*	*3096.2415*	*70.49%*
925-1073	*667.7343*	*15.20%*	*3763.9758*	*85.69%*
1073-1266	*356.8782*	*8.12%*	*4120.854*	*93.82%*
1266-1543	*193.8757*	*4.41%*	*4314.7297*	*98.23%*
1543-2291	*77.63635*	*1.77%*	*4392.36605*	*100.00%*

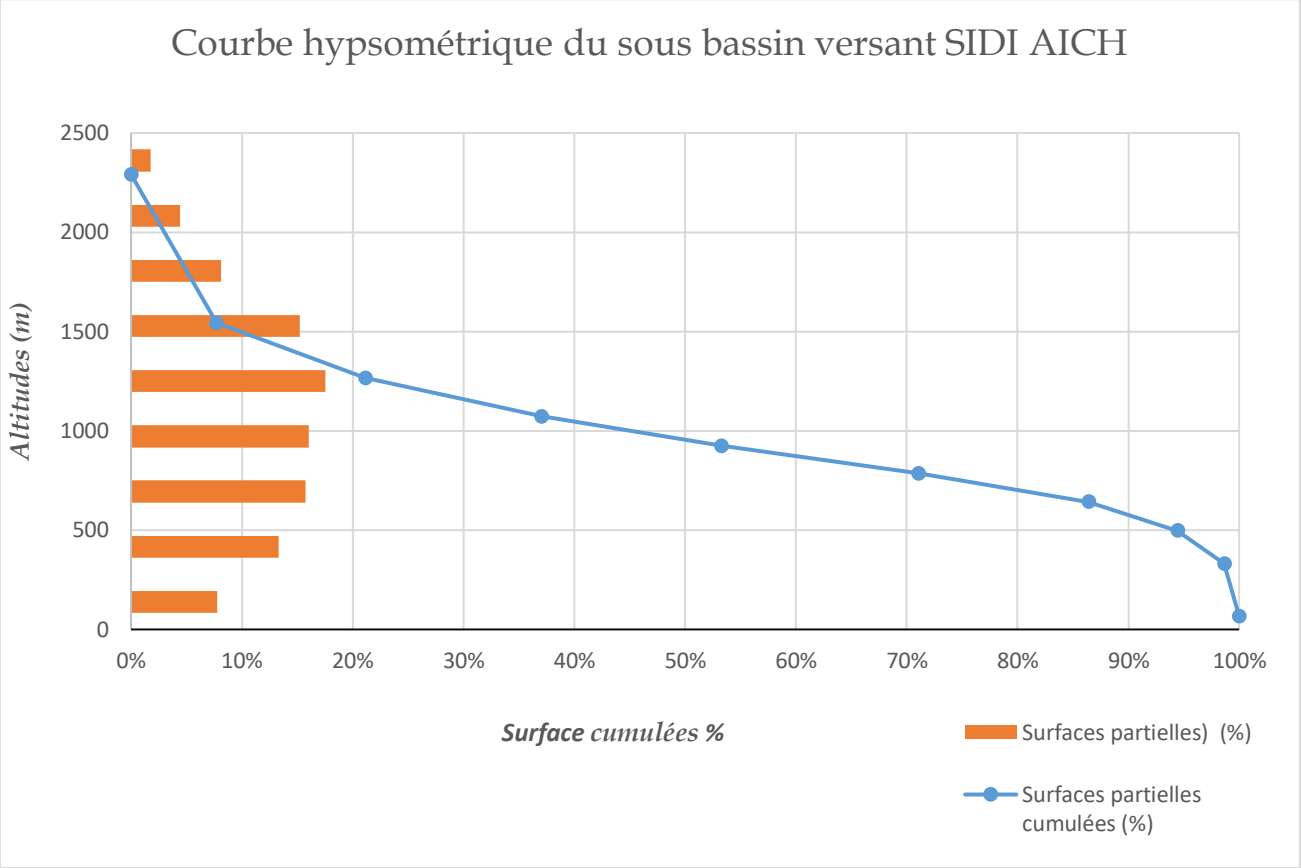


Figure III. 2: Répartition des surfaces et courbe hypsométrique du sous bassin versant sidi aich

III.2.2 Caractéristiques altimétriques :

III.2.2.1 Altitude maximale et minimale :

Elles sont obtenues directement à partir de la carte topographique, l'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin, tandis que l'altitude minimale montre le point le plus bas, généralement à l'exutoire du bassin.

Ces altitudes sont déterminées sur la courbe hypsométrique.

$$\begin{cases} \mathbf{H_{max} = 2291\ m} \\ \mathbf{H_{min} = 67\ m} \end{cases}$$

III.2.2.2 Altitude moyenne :

Elle est calculée par la formule suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum_i H_i . S_i}{S_T}$$

Avec :

$$H_i = \frac{H_{I+n} + H_n}{2}$$

H_{moy} : altitude moyenne du bassin versant en (m) ;

S_i : aire comprise entre deux courbes de niveau (km^2) ;

H_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau en (m).

III.2.2.3 Altitude médiane ou $H_{50\%}$:

C'est la projection du point qui correspond à 50% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.

III.2.2.4 Altitude à 5% ou $H_{5\%}$:

C'est la projection du point qui correspond à 5% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique

III.2.2.5 Altitude 95% ou $H_{95\%}$:

C'est la projection du point qui correspond à 95% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique

Le tableau suivant récapitulera les résultats des caractéristiques altimétriques du sous bassin versant du sidi aich :

Tableau III. 2: Caractéristiques altimétriques du sous bassin versant du sidi aich:

Altitude caractéristique	***Valeur (m)***
Altitude max	*2291*
Altitude min	*67*
Altitude médiane (50%)	*951*
Altitude à 5%	*1795*
Altitude à 95%	*464*
Altitude moyenne	*768.24*

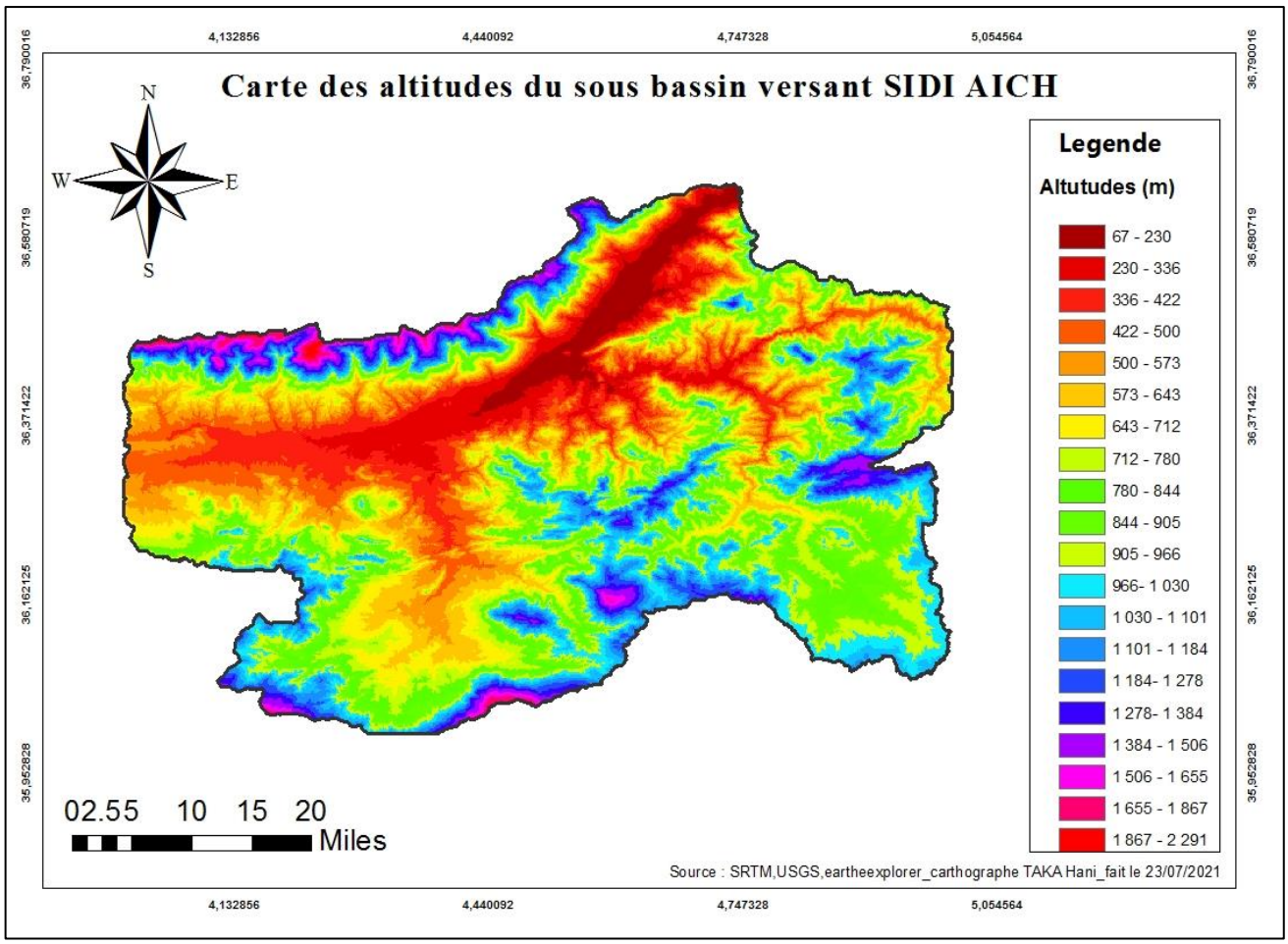


Figure III. 3: Carte des altitudes du sous bassin versant Sidi aich

III.2.3 Les Indices de pente :

L'objet de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications. On les utilise aussi dans l'estimation des vitesses d'écoulements superficiels.

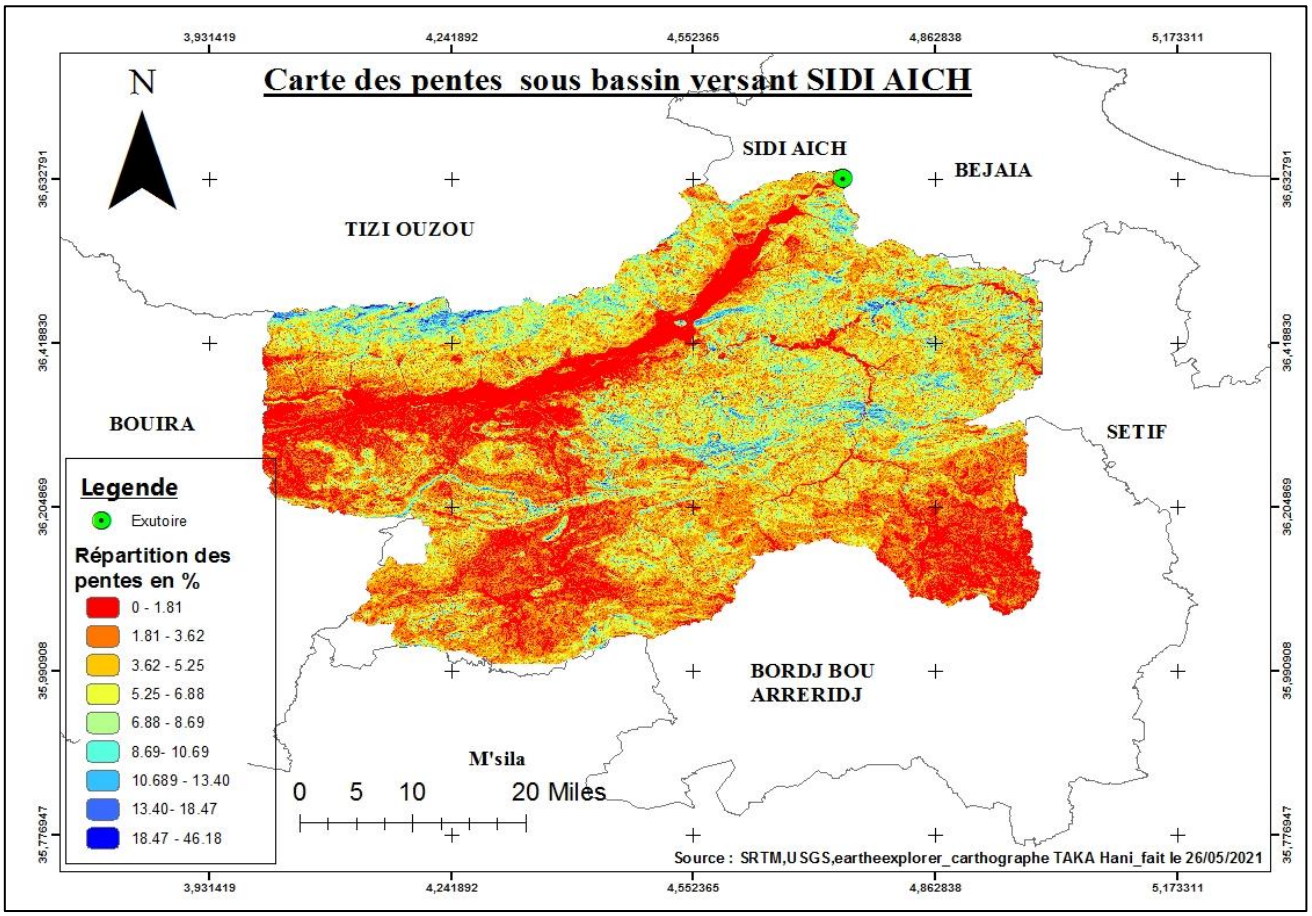


Figure III. 4: Carte des pentes du sous bassin versant Sidi aich

III.2.3.1 Pente du sous bassin versant du sidi aich :

La pente du sous bassin versant est calculée comme suit :

$$I_{BV} = \frac{(H_{max} - H_{min})}{L_{talweg}}$$

Avec :

$L_{Talwegs}$: Longueur de talwegs (km) ;
H_{max} et H_{min}: Hauteur maximale et minimale (m).

$$\mathbf{I_{BV} = 60.048}$$

III.2.3.2 Indice de pente globale I_g :

Indice de pente globale représente la pente moyenne de 90% de la superficie du bassin, il est obtenu à partir de la courbe hypsométrique, on prend la dénivelée (D) entre les altitudes H5% – H95%. Il permet de caractériser une pente représentative de la pente moyenne des versants.

Cet indice est calculé comme suit :

$$I_g = \frac{D}{L_{RE}} = \frac{(H_{5\%} - H_{95\%})}{L_{RE}}$$

Avec :

D : dénivelée $H_{5\%}$ - $H_{95\%}$, définie sur la courbe hypsométrique (m).

L_{RE} : longueur du rectangle équivalent (km).

Ig = 7.412m/km

Tableau III. 3: Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global.

Relief		***Valeurde Ig***
1	*Relief très faible*	*Ig <0.002*
2	*Relief faible*	*0.002<Ig<0.005*
3	*Relief assez faible*	*0005<Ig<0.01*
4	*Relief modéré*	*0.01<Ig<0.02*
5	*Relief assez fort*	*0.02<Ig<0.05*
6	*Relief fort*	*0.05<Ig<0.1*
7	*Relief très fort*	*0.1<Ig*

Il s'agit de caractériser le relief du bassin en se basant sur l'indice de pente globale, selon la classification de l'ORSTOM, il s'agit d'un relief fort qui favoriserait le ruissellement.

III.2.3.3 Indice de pente moyenne I_{pm} :

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct (le temps de concentration). Cette variable influence donc sur le débit observé.

Le calcul des pentes moyennes et partielles de cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

Elle est donnée par la formule :

$$I_{pm} = \frac{\Delta H}{L_{RE}} = \frac{Hmax - Hmin}{L_{RE}}$$

Avec :

ΔH : dénivelé entre l'altitude maximale et minimale (m) ;

L_{RE} : longueur du rectangle équivalent.

D'où :

I_{pm} = 12.38%.

III.2.3.4 Indice de pente de Roche I_p :

L'indice de pente IP de M.Roche sert à déterminer la pente moyenne avec les données réelles du bassin versant. Il est donné par la formule :

$$I_P = \frac{1}{\sqrt{L_r}} \sum_{i=1}^{n} \sqrt{S_i H_i}$$

Avec :

I_P: Indice de pente de Roche.

L_r: Longueur du rectangle équivalent (m).

S_i: Surface partielle (%) comprise entre 2 courbes de niveau consécutives H_i et H_{i+1}

Dans notre cas on obtient : **I_p= 18.78%**

L'indice «Ig» décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente, il était donc difficile de comparer des bassins de tailles différentes.

III.2.3.5 La dénivelée spécifique Ds :

La dénivelée spécifique «Ds» permet d'utiliser la classification de l'O.R.S.T.O.M .(tableauIII-4) qui permet définir les différents types de relief des bassins versants quelque soient leurs superficies.

La dénivelée spécifique donne une idée générale sur le relief du bassin, elle est donnée par la formule suivante :

$$D_S = I_g \times \sqrt{A} = D \times \sqrt{\frac{I}{Lr}}$$

Avec

D : dénivelée $H_{5\,\%}$ - $H_{95\,\%}$, définie sur la courbe hypsométrique (m).

I_g : indice de pente global

A : surface du bassin versant

Dans le sous bassin versant sidi aich on obtient une dénivelée spécifique de **491.23 m**

Tableau III. 4: Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M.à partir de Ds

Classe	***Intervalle***	***Type du relief***
R1	*Ds<10m*	*Relief très foible.*
R2	*10<Ds<25m*	*Relief faible.*
R3	*25<Ds<50m*	*Relief assez faible.*
R4	*50<Ds<100m*	*Relief modéré.*
R5	*100<Ds<250m*	*Relief assez fort.*
R6	*250<Ds<500m*	*Relief fort.*
R7	*Ds>500m*	*Relief très fort.*

O.R.S.T.O.M : Ancien Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, devenu en1984 Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération et en1998Institut de recherche pour le développement (I.R.D.).

Les résultats des calculs sont logés dans le tableau suivant :

Tableau III. 5: Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique dusous bassin versant de sidi aich

Paramètre	***Symbole***	***Unité***	***Valeur***
Pente du basin versant	I_{BV}	*m/Km*	*60.048*
Indice de pente de Roche	I_p	*%*	*18.78*
Indice de pente moyenne	I_{pm}	*m/Km*	*12.38*
Indice de pente globale	I_g	*m/Km*	*7.412*
Dénivelée spécifique	*Ds*	*m*	*491.23*
Relief	*/*	*/*	*Relif fort*

III.3 Etude du réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est défini comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement.

D'après la classification de Schum on trouve que le talweg principal de sous bassin de sidi aich est d'ordre 7.

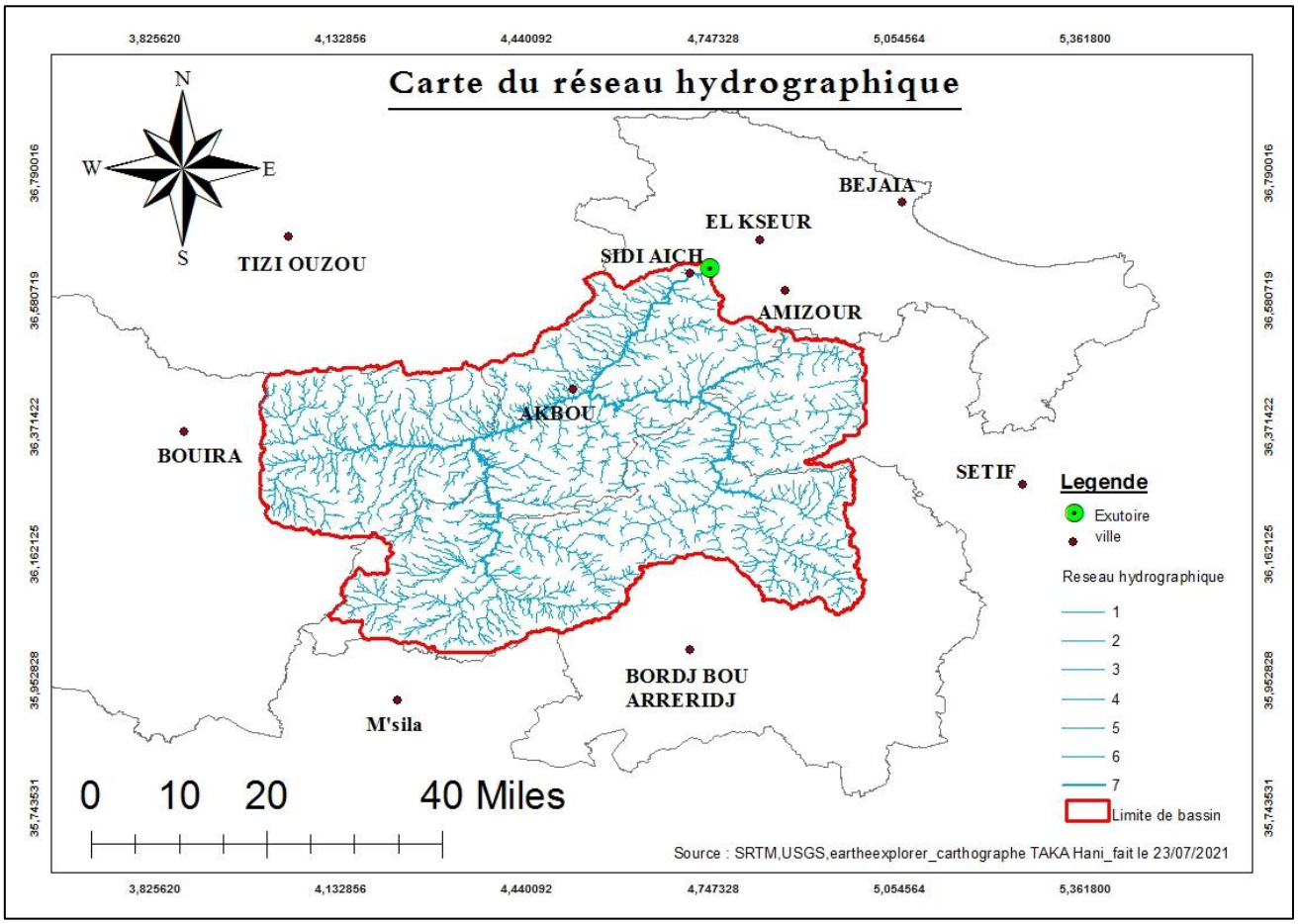


Figure III. 5: Carte du réseau hydrographique

III.3.1 Paramètre hydrographique :

III.3.1.1 Densité de drainage :

Ce paramètre est en quelque sorte un reflet de la dynamique du bassin, de la stabilité du réseau hydrographique et du type de ruissellement de surface.

Elle correspond au quotient de la longueur totale des rivières par la surface du bassin versant. Elle est donnée par la formule suivante :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^{n} L_i}{S}$$

Avec :

D_d: densité de drainage (Km/Km^2) .
L_i: longueur des cours d'eau (Km) .
n: L'ordre le plus élevé dans la classification (n=7)
S : surface du bassin (Km^2).

On obtient : **D_d = 0,8238 km/km^2.**

III.3.1.2 Pente moyenne du cours d'eau principal :

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se déplace vers l'exutoire du bassin, et donc le temps de concentration des eaux. Cette variable influence donc sur le débit maximal observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer entièrement ou en partie dans le sol.

Le calcul des pentes moyennes et partielles de cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$P_{moy} = \frac{\Delta H}{\Delta L}$$

Avec :

P_{moy}: pente moyenne du cours d'eau (m/m) ;

ΔH: dénivellation entre deux points suffisamment distance (m) ;

ΔL: longueur du cours d'eau principal (m).

On aura :

$$\mathbf{P_{moy} = 0.259\%}$$

III.3.1.3 La densité hydrographique des thalwegs élémentaires F_l :

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

$$F_l = \frac{\sum N1}{S}$$

Avec :

F1: Densité hydrographique.
N1:Nombre de cours d'eau d'ordre1.

S: Superficie du bassin versant (Km^2).

$$\mathbf{F_1 = 0.581}$$

III.3.1.4 Le coefficient de torrentialité C_t :

Il est donné par l'équation suivante :

$$C_t = D_d \times F$$

Avec :

D_d : Densité de drainage.

F : Densité hydrographique.

C_t = 0.479

III.3.1.5 Temps de concentration Tc :

Le Temps de concentration est défini comme le temps maximal que met une goutte pour parcourir tout le bassin-versant jusqu'à l'exutoire de ce bassin, Théoriquement on estime que TC est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Pratiquement le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide de formules le plus souvent empiriques.

Les méthodes et les formules utilisées reflètent un caractère régional, traduit par des paramètres propres à la région dans laquelle sont développées ces formules. Il faut en général choisir la formule qui correspond le mieux au type de bassin-versant analysé, pour cela on donne la priorité à celle qui nous semble applicable, élaborées dans les conditions physico-géographiques analogues à celles de la partie Nord de l'Algérie. L'estimation du temps de concentration est obtenue grâce à des formules empiriques dans le tableau suivant :

Tableau III. 6: les formules empiriques pour l'estimation du temps de concentration.

Formules empiriques	***Désignations***	***Temps de concentration (h)***
Formule de VENTURA $T_c = 0.1275 \times \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{I_{BV}}}$	*Tc : Temps de concentration (h)* *I_{BV} : Pente du bassin versant (m/m) ;* *S : Surface du bassin versant (Km2).*	***34.36***
Formule de KIRPICH $T_c = 0.0663 \times \frac{L_{cp}^{0.77}}{I_g^{0.385}}$	*Tc : Temps de concentration (h) ;* *I_g : Indice de pente globale (%) ;* *L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (m).*	***Non applicable***
Formule de GIANDOTTI $T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L_{cp}}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$	*Tc : Temps de concentration (h) ;* *Lcp: Longueur du cours d'eau principal(Km)* *S : Surface du bassin versant (Km2) ;* *Hmoy : Altitude moyenne du bassin versant (m) ;* *Hmin : Altitude minimale du bassin versant (m).*	***15.1361***
Formule de TURAZZA $T_c = 0.108 \frac{\sqrt[3]{S \times L_{cp}}}{\sqrt{I_{pm}}}$	*T_c:Temps de concentration (h)* *S:Surfacedubassinversant(Km^2)* *L_{cp}:Longueur du cours d'eau principal(Km)* *I_{pm}:Pente moyenne du cours d'eau (m/m).*	***11.58***
Formule ESPAGNOLE $T_c = 0.126 \times 60 \times \left(\frac{L_{cp}}{I_{pm}^{0.25}}\right)^{0.76}$	*T_c:Temps de concentration (min)* *L_{cp}:Longueur du cours d'eau principal(Km)* *I_{pm}:Pente moyenne du cours d'eau principal (m/m)*	***45.08***
Formule de SOLOVSKY $T_c = 4 \times \left[\frac{(S_{BV} + L_{cp})^{0.333}}{\sqrt{I_{BV}}}\right]^{0.75}$	*Tc : Temps de concentration (h) ;* *Lcp ; Longueur du thalweg principal (Km) ;* *SBV : Superficie du bassin versant (km2) ;* *IBV : Pente du bassin versant (m/km*	***16.01***

Les formules utilisées sont celles recommandées pour le Nord algérien, celle-ci nous donnent des résultats différents, et la valeur du temps de concentration retenue est la valeur minimale des valeurs proches. donc on prend la valeur qui est estimée par la formule de TURAZA qui est recommandée pour les grands bassins versants : **T_c = 11.58.**

III.3.1.6 Vitesse de ruissellement :

On entend par ruissellement, l'écoulement par gravité à la surface du sol, suivant la pente du terrain et dans le micro-réseau hydrographique, des eaux météorologiques qui ont échappé à l'infiltration, à l'évaporation et au stockage superficiel. C'est, tout simplement, le rapport entre la longueur parcourue par le temps de concentration.

C'est la vitesse avec laquelle l'eau s'écoule dans le réseau hydrographique pour atteindre l'exutoire, elle est donnée par la formule suivante :

$$V_R = \frac{Lcp}{T_c}$$

Avec :

L_{cp} : longueur du talweg principal (Km) ;

T_c : temps de concentration (h).

On aura :

V_R = 3.198 Km/h.

Tableau III. 7: Paramètres hydrographiques du sous bassin sidi aich

Désignation	***Symbole***	***Unité***	***Valeur***
Densité de drainage	*Dd*	*Km/Km²*	***0.8238***
Densité hydrographique	*F*	*Km-2*	***0.581***
Coefficient de torrentialité	*Ct*	*/*	***0.479***
Temps de concentration	*Tc*	*Heures*	***11.58***
Vitesse de ruissellement	*Vr*	*Km/h*	***3.19***

Tableau III. 8: Caractéristiques géomorphologiques du sous bassin versant sidi-aich

Désignation		***Symbole***	***Unités***	***Valeur***
Superficie		*S*	*Km^2*	***4392.37***
Périmètre		*P*	*Km*	***404.97***
Indice de compacité de Gravelius		*K_C*	*/*	***1,72***
Longueur du thalweg principal		*L_p*	*Km*	***37.037***
Coefficient d'allongement		*C_a*	*/*	***0.312***
Indice de compacité de Horton		*K_h*	*/*	***3.202***
Rectangle equivalent	*Longueur*	*L*	*Km*	***179.57***
	Larger	*l*	*Km*	***24.46***
Surface du rectangle équivalent		*Sr*	*Km^2*	***4392.282***
Périmètre du rectangle equivalent		*Pr*	*Km*	***408.06***
Altitudes	*Maximale*	*H_{max}*	*m*	***2291***
	Moyenne	*H_{moy}*	*m*	***768.24***
	Minimale	*H_{min}*	*m*	***67***
	Médiane5%	*$H_{5\%}$*	*m*	***1795***
	Médiane50%	*$H_{50\%}$*	*m*	***951***
	Médiane95%	*$H_{95\%}$*	*m*	***464***
Pente du basin versant		*I_{BV}*	*m/Km*	***60.048***
Indice de pente de Roche		*I_p*	*%*	***0.1878***
Indice de pente moyenne		*I_{pm}*	*m/Km*	***12.38***
Indice de pente globale		*I_g*	*m/Km*	***7.412***
Dénivelée spécifique		*D_s*	*m*	***491.23***
La somme des longueurs des cours d'eau		*$\sum Li$*	*Km*	***3503.499***
Nombredestalwegsd'ordre1		*$\sum N1$*	*/*	***2553***
Densité de drainage		*D_d*	*Km/Km^2*	***0.8238***
Densité hydrographique		*F*	*Km^{-2}*	***0.581***
Coefficient de torrentialité		*C_t*	*/*	***0.479***
Temps de concentration		*T_c*	*Heures*	***11.58***
Vitesse de ruissellement		*Vr*	*Km/h*	***3.198***

III.4 Etude des crues :

La détermination des crues est orientée de préférence vers les observations hydrométriques, lorsqu'elles existent sur le bassin versant propre du site à étudier, ou par analogie avec un bassin voisin. A défaut de ces dernières, des modèles et des formules empiriques basées sur la pluviométrie peuvent être utilisés. Ces modèles dépendent de la précipitation et du déficit. L'estimation du débit de crue fréquentielle du bassin versant est calculé grâce aux approches suivantes **:**

- La série d'observation de la station hydrométrique.
- Formules empiriques.
- La méthode de GRADEX.

III.4.1 Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles avec la station hydrométrique :

III.4.1.1 Présentation de la station hydrométrique :

Pour l'étude des crues de sous bassin versant du sidi aich, la station qui contrôle la plus grande partie du bassin est la station de Sidi Aich (15 10 01) située sur l'oued Soummam à 40 Km de l'embouchure de l'oued vers la mer, elle possède 40 années d'observations avec 15 ans d'interruption. L'écoulement moyen annuel mesuré au niveau de cette station est de 465,1 hm^3 (source ANRH).

Tableau III. 9: Caractéristique de la station hydrométrique « Sidi Aich » (source ANRH).

Station	***Code***	***Coordonnées***		***Nom de l'Oued***	***Apport annuel (Hm^3)***	***Période d'obs.***	***Série d'obs.***
		X (Km)	***Y (Km)***				
Sidi Aich	***15 10 01***	*678,20*	*369,65*	*Soummam*	*465,1*	*1954- 1995*	*41*

La série des débits maximums journaliers de la station de Sidi Aich est représentée dans le tableau suivant :

Tableau III. 10: Débits maximums journaliers de la station de Sidi Aich. (Source : DRE)

Année	$Q_{max.j}$ $[m^3/s]$	***Année***	$Q_{max.j}$ $[m^3/s]$	***Année***	$Q_{max.j}$ $[m^3/s]$
1954	*372*	*1968*	*518*	*1982*	*939*
1955	*354*	*1969*	*1600*	*1983*	*619*
1956	*126*	*1970*	*374*	*1984*	*455*
1957	*530*	*1971*	*1429*	*1985*	*1644*
1958	*413*	*1972*	*734*	*1986*	*759*
1959	*233*	*1973*	*1820*	*1987*	*481*
1960	*524*	*1974*	*151*	*1988*	*739*
1961	*130*	*1975*	*746*	*1989*	*1067*
1962	*320*	*1976*	*189*	*1990*	*669*
1963	*655*	*1977*	*502*	*1991*	*546*
1964	*350*	*1978*	*447*	*1992*	*528*
1965	*620*	*1979*	*573*	*1993*	*670*
1966	*350*	*1980*	*1196*	*1994*	*745*
1967	*350*	*1981*	*655*	*1995*	*515*

III.4.1.2 Ajustement de la série à la loi de GUMBEL :

La fonction de répartition a la forme suivante :

$$f(x) = e^{-e^{\frac{(x-\beta)}{\alpha}}}$$

La variable réduite u de Gumbel est définie par :

$$u = \frac{x - \beta}{\alpha}$$

D'ou : $F(x)=e^{-e^{-u}}$

Où α et β sont les paramètres de la loi. Le paramètre α est un paramètre caractéristique de la dispersion. On démontre que β est le mode (la valeur la plus probable).

L'estimation des paramètres peut être calculée par la méthode des moments :

$$\alpha = 0.78.s$$

$$\beta = \overline{x} - 0.45.s$$

Avec :

S: L'écart type de l'échantillon.

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

La variable réduite u de Gumbel se calcule par :

$$u = -\log(-\log(F(x)));$$

$F(x)$:la probabilité au non dépassements.
L'équation de fréquence la loi de Gumbel s'écrit :

$$x_T = \overline{x} + k_T.s$$

Si la taille de l'échantillon est supérieure à 100, on peut démontrer en remplaçant α et βparleurs valeurs dans l'équation de fréquence que :

$$k_T = -0.45 - 0.78.\ \text{Log}\left[-\log\left(1-\frac{1}{T}\right)\right]$$

Si la taille de l'échantillon est inférieure à100, le facteur kT est obtenu à partir de valeurs tabulées en fonction de la taille de l'échantillon.

L'ajustement de la série à la loi de GUMBEL a été établi par le logiciel HYFRONT, les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant

Tableau III. 11: Résultats d'ajustement à la loi de GUMBEL.

Période de retour(ans)	***Probabilité de fréquence(q)***	***Débit max jour en(m^3/s)***	***Ecart-type***	***Intervalle de confiance***
1000	*0.9999*	*2370*	*251*	*2360 -3650*
100	*0.99*	*1730*	*174*	*1390 -2070*
50	*0.98*	*1540*	*152*	*1240 - 1840*
20	*0.95*	*1280*	*122*	*1040-1520*
10	*0.9*	*1080*	*99.2*	*890-1280*
5	*0.8*	*878*	*77.0*	*727-1030*

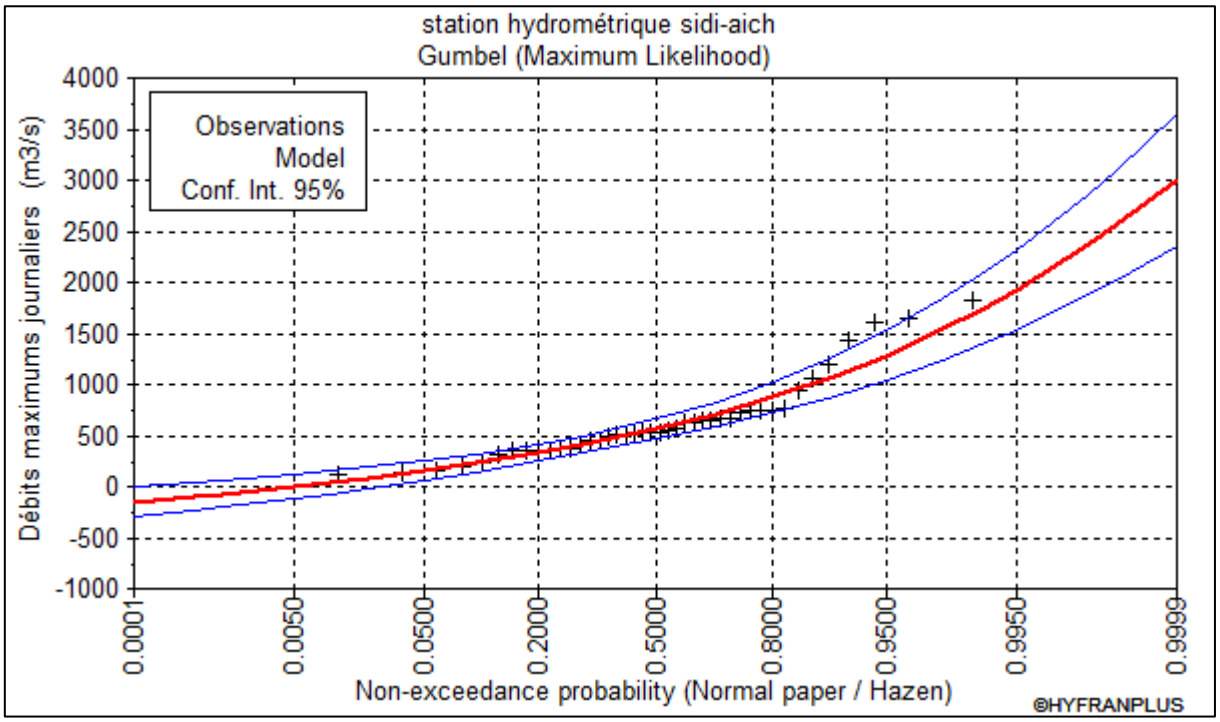


Figure III. 6: Graphique de l'ajustement à la loi de GUMBEL

Tableau III. 12: Comparaison des caractéristiques de la loi de GUMBEL et de l'échantillon

Paramètres	***Caractéristiques de la loi de Gumbel***	***Caractéristiques de l'échantillon***
Minimum	*Aucun*	*126*
Maximum	*Aucun*	*1820*
Moyenne	*623*	*634*
Ecart type	*354*	*399*
Médiane	*565*	*529*
Coefficient de variation (Cv)	*0.567*	*0.63*
Coefficient d'asymétrie(Cs)	*1.14*	*1.48*
Coefficient d'aplatissement(Ck)	*2.4*	*4.42*

III.4.1.3 Ajustement à la loi Log Normale (Loi de Galton) :

Tableau III. 13: Résultats d'ajustement de la loi Log Normale

Période de retour(ans)	*Probabilité de fréquence(q)*	*Débit max jr en (m^3/s)*	*Ecart-type*	*Intervalle de confiance*
1000	*0.999*	*3650*	*853*	*1970-5320*
100	*0.99*	*2260*	*424*	*1430-3090*
50	*0.98*	*1910*	*327*	*1270-2550*
20	*0.95*	*1480*	*220*	*1050-1910*
10	*0.9*	*1180*	*154*	*877-1480*
5	*0.8*	*895*	*101*	*698 -1090*

Tableau III. 14: Comparaison des caractéristiques de la loi Log Normale et de l'échantillon

Paramètres	*Caractéristiques de la loi Log Normale*	*Caractéristiques de l'échantillon*
Minimum	*0.00*	*126*
Maximum	*Aucun*	*1820*
Moyenne	*623*	*634*
Ecart-type	*444*	*399*
Médiane	*530*	*529*
Coefficient de variation (Cv)	*0.69*	*0.63*
Coefficient d'asymétrie(Cs)	*2.4*	*1.48*
Coefficient d'aplatissement(Ck)	*14.7*	*4.42*

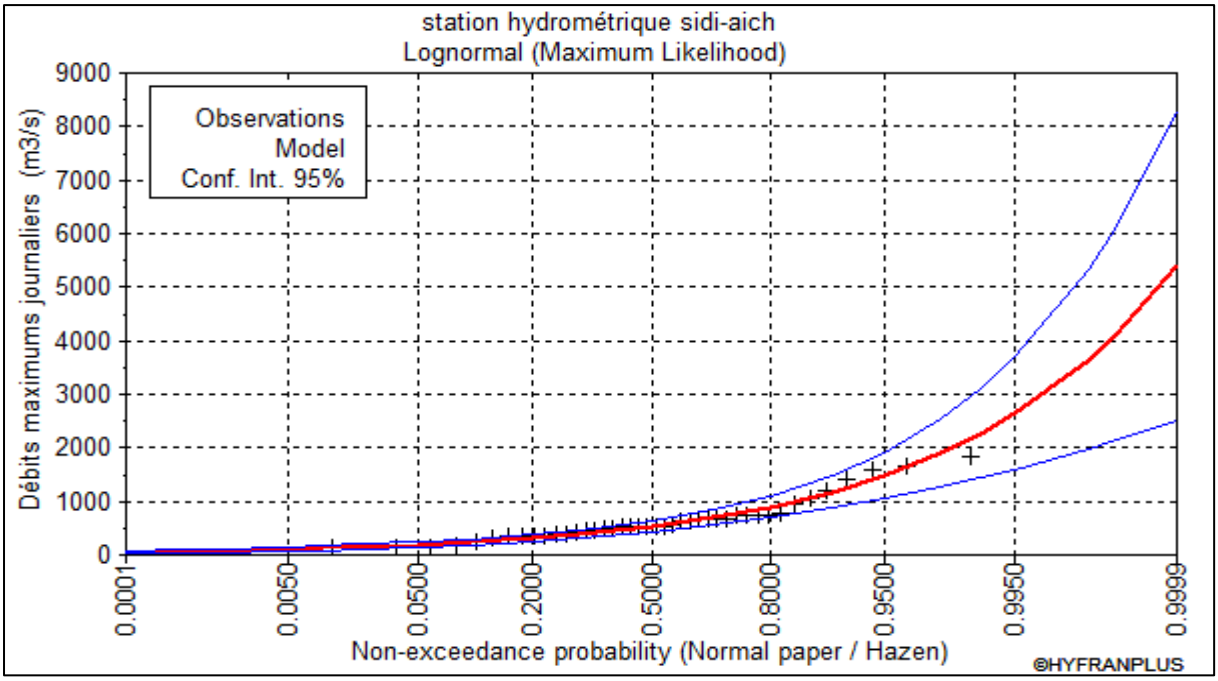


Figure III. 7: Graphique de l'ajustement à la loi Log Normale.

III.4.1.4 Choix de la loi d'ajustement :

Il existe toujours des écarts entre les fréquences expérimentales des valeurs observées et les fréquences des mêmes valeurs calculées à partir d'une fonction de répartition quelconque. L'ajustement graphique est la première étape mais reste insuffisante pour le choix définitif de la loi théorique. Le test statistique d'adéquation consiste à comparer l'adéquation de plusieurs lois afin d'adopter le moins mauvais ajustement. Les tests les plus utilisés sont le test χ^2 et le teste de Kolmogorov Smirnov.

→ Ajustement graphique visuelle (la méthode visuelle)

Les figures 7 et 8, montrent les graphiques des résultats obtenus. Ils représentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions GUMBEL et Log Normale a l'aide du logiciel Hyfran. Visuellement, on ne peut pas choisir l'ajustement le plus adéquat c'est pour cela on procède à l'analyse statistique.

→ Analyse des critères statistiques : Le test d'adéquation de khi carré (χ2)

Le but d'un test d'adéquation (d'ajustement) est de vérifier que le modèle choisi est cohérent avec les données, plus exactement nous allons construire une procédure de test afin de vérifier si l'hypothèse que les observations sont issues d'une loi donnée est valide. Le test le plus usuel est celui du khi carré (χ2).

Le test de Khi carré (χ2) est utilisé pour un seuil de signification α imposé en général à5%, et un degré de liberté $\gamma = k - m - 1$: tel que k c'est le nombre de classe et m c'est le nombre de paramètre de la loi. (Touaibia, 2015).

La variable aléatoire χ2, dont la répartition a été étudiée par Person, est définie par l'expression suivante :

$$\boldsymbol{\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(k_i + \mu_i)^2}{\mu_i}}$$

$\boldsymbol{k_i}$: Nombre d'observation contenue dans la classe i.

$\boldsymbol{\mu_i}$: Nombre d'observation théorique calculée dans la classe i.

NB: Ce test n'est significatif que si $\boldsymbol{\mu_i \geq 5}$.

$\chi^2_{calculé}$est comparée à une valeur tabulée ou théorique, $\chi^2_{tabulée}$, fonction du nombre de degré de liberté et du seuil de signification α imposé en général à 5%

$\chi^2_{théorique}$est tiré dela tablede χ^2en fonction de γ et α représentée dans **l'annexe N°7**

$\chi^2_{calculé} \geq \chi^2_{tabulée}$: On rejette l'hypothèse nulle.

$\chi^2_{calculé} \leq \chi^2_{tabulée}$: La loi d'ajustement sera retenue.

Les résultats obtenus par le test de khi carré ont été faits par logiciel Hyfran et sont représentés dans le tableau ci-dessus :

Tableau III. 15: Résultats du test de Khi carré.

Loi de distribution	*Degré de liberté* γ	*Nombre de classe*	$\chi^2_{calculé}$	$\chi^2_{tabulée}$
Gumbel	***5***	***8***	***7.14***	***11.07***
Log Normale	***5***	***8***	***10.19***	***11.07***

A partir des résultats obtenus du test khi carré et d'ajustement, la série des débits maximums annuels présente un ajustement adéquat **au deux loi (la loi Gumbel et log normal**

III.4.2 Détermination des débits maximums fréquentiels par la méthode du GRADEX :

La méthode du GRADEX est considérée comme étant une approche hydropluviométrique probabiliste inhérente au calcul des débits de crues extrêmes d'un cours d'eau pour des périodes de retour allant de 100 à 10000 ans, elle est développée par Guillot et Duband (1967).
Elle s'applique à des bassins versants de quelques dizaines à plusieurs milliers de Km² (jusqu'à 5000 Km²), recevant des pluies relativement homogènes du point de vue spatial (Guillot, 1980). La méthode du GRADEX, en s'appuyant sur l'information pluviométrique, constitue une amélioration substantielle des méthodes de prédétermination des crues basées sur le traitement statistique des seules valeurs de débits observés (Guillot, 1980).

III.4.2.1 Principe de la méthode :

La méthode part du principe que lorsque le débit dépasse une certaine valeur, le sol est saturé. Cette valeur nommée débit seuil (ou point pivot), peut varier du débit décennal au débit cinquantennal, selon les sols et les caractéristiques du bassin versant. Ainsi, pendant le temps de base de ruissellement D (assimilé à la durée caractéristique), tout accroissement de pluie induit le même accroissement en débit.

Le principe de cette méthode, qui s'appuie sur les observations climatologiques historiques, est de déduire le comportement asymptotique de la loi de probabilité des volumes de crues rares de la loi de probabilité des cumuls des pluies extrêmes. En effet la valeur moyenne de la capacité de rétention du bassin tend à devenir constante pour les crues du période de retour décennal.

La méthode du Gradex fournit un support de calcul cohérent et vraisemblable en 'appuyant sur une approche fréquentielle des précipitations locales ou régionales intenses, Cette approche se fait essentiellement par l'intermédiaire d'un paramètre proportionnel à l'écart type des fortes précipitations (P_{jmax}). On nomme ce paramètre fondamental le Gradex (gradient des valeurs extrêmes).

III.4.2.2 Hypothèses de la méthode :

- **Hypothèse 01 :**

Les débits maximums recherchés sont provoqués uniquement par des pluies maximales, uniformément réparties sur le bassin. Il n'y a donc pas diverses origines de formation des crues

- **Hypothèse 02 :**

Les pluies maximales et les débits correspondants suivent une même loi de distribution statistique, dite des extrême en raison de la nature du phénomène étudié (crues rares). Ceci exprime surtout le fait que le comportement asymptotique des lois de distribution des pluies et des débits est identique. La loi de GUMBEL (GUMBEL, 1958) est souvent utilisée dans ce but et dans ce cas uniquement, le caractère exponentiel de cette distribution est décrit par la

pente de la droite d'ajustement des pluies observées, mesurées sur un diagramme de probabilité adéquat. La pente de cette droite est le gradient de cette distribution exponentielle.

- **Hypothèse 03 :**

On admet que la rétention moyenne du bassin versant atteint sa valeur maximale pour une crue décennale Q10 ans.

III.4.2.3 Les étapes de la méthode :

→ Choisir le pas de temps n heures (généralement égale à la moyenne des temps de base des hydrogrammes de crues disponibles, Pour la commodité des calculs on retiendra une valeur très arrondie, par exemple 2, 4, 6 ... 48 heures.). Le résultat final, débits de pointe dépendent peu de h (il suffit de ne pas commettre d'erreur d'ordre de grandeur sur h).

→ Ajuster par la loi de GUMBEL des pluies maximales journalières.

→ Calculer le GRADEX des précipitations.

$$P(mm) = a\mu + b$$

Avec :
μ : variable réduite de GUMBEL.
a : pente de la droite de GUMBEL.

→ Ajuster de la série des débits observés à la loi de GUMBEL et déterminer débit décennal.

→ Exprimer le débit décennal en lame d'eau équivalente par la formule :

$$R(mm) = \frac{Q(m^3/s) * 3.6 * n(h)}{S(Km^2)}$$

→ Extrapoler de la distribution des débits au-delà de 0.9 (T=10 ans) par une droite de pente égale au GRADEX de la pluie.

$$Q(\mu\%) = a\mu + b'$$

Avec :
a : le GRADEX de la pluie.
μ : variable réduite de GUMBEL (μ= -ln (-ln (F))).
b' = $Q_{10\ ans}$ – a. μ(T=10 ans).

→ Tracer la droite de l'équation * sur même graphe que l'ajustement des Pjmax.

→ Tirer les Q pour chaque période de retour (en mm).

→ Exprimer ces Q en m3/s par la formule :

$$Q(m^3/s) = \frac{Q(mm) * S(Km^2)}{3.6 * n}$$

→ Calcul des débits de pointe :

→ Calculer sur les hydrogrammes des crues observées le rapport « p » égal au rapport débit de pointe sur débit moyen :

P : coefficient de pointe.

$$p = \frac{Qmax}{Qmoy}$$

$$Qp\ (m^3/s)\ =\ Q\ (m^3/s)\ *\ p$$

III.4.2.4 Application numérique de la méthode de GRADEX :

- ✓ Le choix du pas de temps : **n=24h** (Le temps de basede la crue dans le bassin Algérois varie entre 16 et 38 heures)
- ✓ Ajustement des séries pluviométriques (précipitations maximales journalières - Tableau III-17) à la loi de GUMBEL, en utilisant le logiciel HYFRAN.

Vu que la protection s'étends sur la ville de SIDI AICH alors on applique la méthode GRADEX sur les stations pluviométriques les plus proche de la ville, toutes les stations pluviométriques sont caractérisées par : leur code, nom et situation géographique (voir la carte et le tableau ci-dessous).

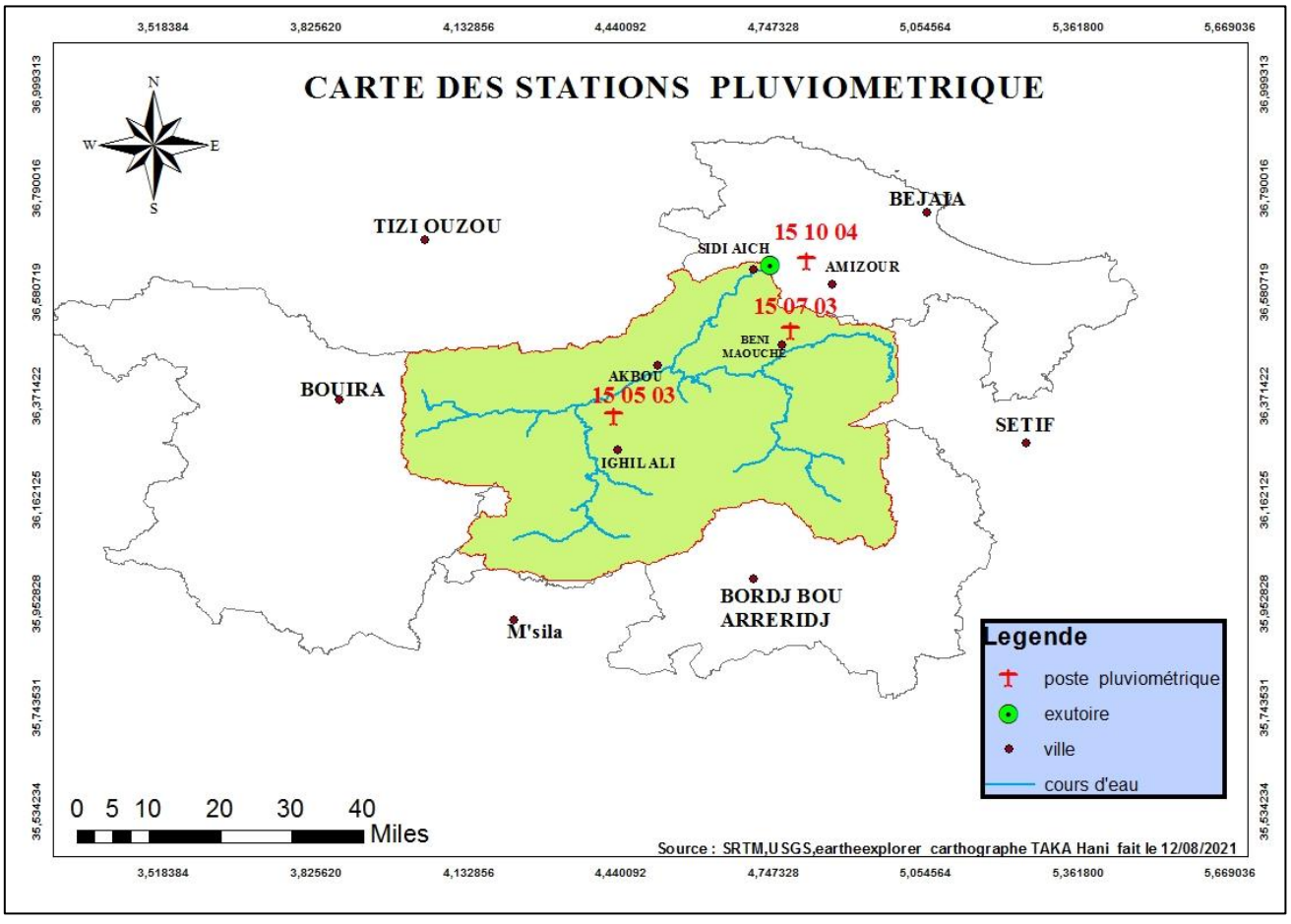


Figure III. 8: Carte de situation géographique des stations pluviométriques

Tableau III. 16: Stations pluviométriques.

Stations	*Code*	*Commune*
Maouchi Ahmed	*15 10 04*	*AMIZOUR*
Boubirek	*15 07 03*	*BENI MEOUCH*
Ighil ali	*15 05 03*	*IGHIL ALI*

Tableau III. 17: Pluies maximales journalières des stations : Ighil Ali, Maouchi Ahmed et Boubirek

Ighil Ali		***Maouchi Ahmed***		***Boubirek***	
Pmax.j (mm)	***Année***	***Pmax.j (mm)***	***Année***	***Pmax.j (mm)***	***Année***
31.8	*1975*	*44.3*	*1975*	*26*	*1975*
37.3	*1976*	*45.6*	*1976*	*38.2*	*1976*
33.7	*1977*	*21.6*	*1977*	*33.5*	*1977*
34	*1978*	*36.5*	*1978*	*36.5*	*1978*
24.5	*1979*	*52.3*	*1979*	*37.2*	*1979*
39	*1980*	*36.9*	*1980*	*39*	*1980*
51.5	*1981*	*66.3*	*1981*	*64*	*1981*
33.5	*1982*	*41.4*	*1982*	*46*	*1982*
69	*1983*	*53.4*	*1983*	*96*	*1983*
33.5	*1984*	*68*	*1984*	*68*	*1984*
49	*1985*	*40.5*	*1985*	*66.1*	*1985*
30	*1986*	*55.5*	*1986*	*49.2*	*1986*
37.5	*1987*	*48*	*1987*	*172*	*1987*
40	*1988*	*29.5*	*1988*	*32*	*1988*
34	*1989*	*46.3*	*1989*	*41*	*1989*
30	*1990*	*29.2*	*1990*	*29.5*	*1990*
34	*1991*	*56.2*	*1991*	*55.3*	*1991*
31	*1992*	*40*	*1992*	*38.8*	*1992*
36	*1993*	*38.4*	*1993*	*45.8*	*1993*
42	*1994*	*37.2*	*1994*	*35*	*1994*
70	*1995*	*39*	*1995*	*48.3*	*1995*
17	*1996*	*62.6*	*1996*	*58.7*	*1996*
9	*1997*	*18.6*	*1997*	*21.5*	*1997*
67	*1998*	*52.5*	*1998*	*45.6*	*1998*
56	*1999*	*26.5*	*1999*	*36.3*	*1999*
41	*2000*	*36.1*	*2000*	*55.5*	*2000*
37	*2001*	*32.3*	*2001*	*45.8*	*2001*
33.2	*2002*	*24*	*2002*	*30.8*	*2002*
76	*2003*	*56.6*	*2003*	*58.7*	*2003*

- ✓ Calculer du GRADEX des précipitations :

L'équation de la droite de GUMBEL est :

$$P\,(mm) = 10.19 \times \mu + 36.72$$

(Résultats d'ajustement de la série pluviométrique (Pjmax) de la station **AHMED MAOUCHI (**15 10 04) à la loi de Gumbel en utilisant le logiciel HYFRAN)

Le GRADEX est donc **: a = 10.19mm**

- ✓ L'ajustement de la série des débits maximums journaliers à la loi log normal nous a donné un débit décennal de **1180 m³/s**
- ✓ Le débit décennal en lame d'eau équivalente :

$$R(mm) = \frac{Q\left(\frac{m^3}{s}\right) * 3.6 * n(h)}{S(Km^2)} = \frac{1180 * 3.6 * 24}{4392.366} = 23.21 \text{ mm/24h}$$

$$R(10ans) = 23.21 \text{ mm/24h}$$

- ✓ Extrapoler de la distribution des débits au-delà de 0.9 (T=10 ans) par une droite de pente égale au GRADEX de la pluie.

$$Q(10ans) = a\mu + b'$$

$$b' = Q(10ans) - a\mu$$

La variable réduite de GUMBEL :

$$\mu = -ln(-\ln(f)) = -\ln(-\ln(\frac{1}{1-10})) = 2.25$$

$$Donc : \ b' = 0.2825$$

On obtient :

$$\mathbf{Q(10ans) = 10.19\mu + 0.28}$$

- ✓ On Trace la droite de cette équation sur même graphe que l'ajustement des P_{jmax} :

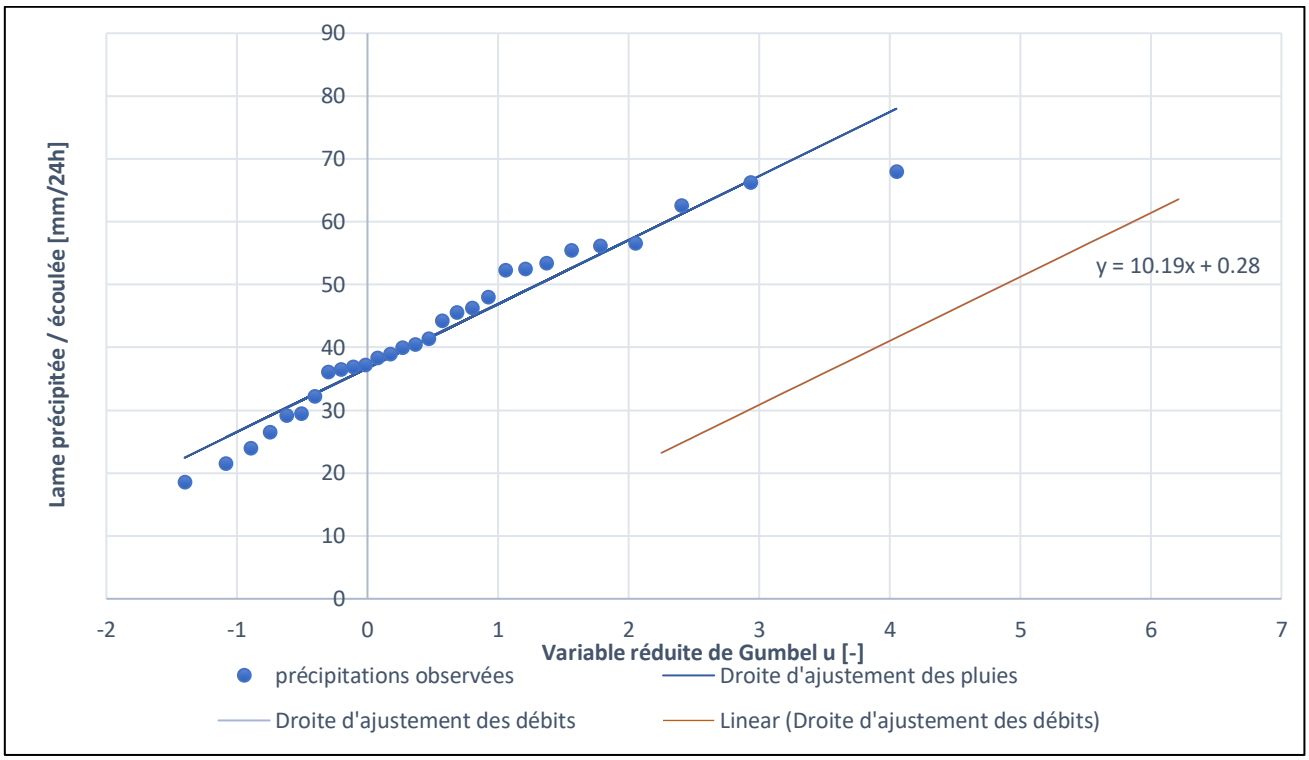


Figure III. 9: Graphe de l'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits.

- ✓ On Tire les débits pour chaque période de retour en **mm** et on les exprime en **m^3/s** par la formule :

$$Q(m^3/s) = (Q(mm) * S(Km^2))/(3.6 * n)$$

- ✓ Pour le calcul des débits de pointe le coefficient de pointe Cp=1 (le débit décennal est calculé à partir les débits maximums)

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau III. 18: Débits de pointe de bassin versant par la méthode GRADEX.

Temps de retour	***Fréquence empirique selon Hazen***	***Variable réduite de Gumbel u***	***Précipitations estimées***	***Débits moyen extrapolés***	***Débits moyen extrapolés***	***Débits de pointe extrapolés***
[ans]	*[-]*	*[-]*	*[mm/24h]*	*[mm/24h]*	*[m3/s]*	*[m3/s]*
10	*0.900*	*2.25*	*59.6*	***23.2***	***1180***	***1180***
50	*0.980*	*3.90*	*76.5*	***40.0***	***2035***	***2035***
100	*0.990*	*4.60*	*83.6*	***47.2***	***2397***	***2397***
500	*0.998*	*6.21*	*100.0*	***63.6***	***3233***	***3233***
1000	*0.999*	*6.91*	*107.1*	***70.7***	***3592***	***3592***

On applique la même méthode pour les stations de : **Boubirek (15 07 03)** et **Ighil ali (15 05 03)** dont les résultats sont dans le tableau (III.19) suivant :

Tableau III. 19: Résultats de l'ajustement des trois stations par la méthode du GRADEX.

Période de retour	***Station hydrométrique Sidi Aich (15 10 01)***	***Débit maximal annuel (m^3/s)***		
		Station maouchi ahmed(15 10 04)	***Station Boubirek (15 07 03)***	***Station Ighil ali (15 05 03)***
10	*1180*	*1180*	*1180*	*1180*
20	*1480*	*1553*	*1981*	*1619*
50	*1910*	*2035*	*3018*	*2188*
100	***2260***	***2397***	***3794***	***2614***
1000	*3650*	*3592*	*6361*	*4022*

On constate que la station pluviométrique BOUBIREK donne un débit centennal supérieure au d'autre stations donc le débit de projet est de **3794 m^3/s.**

III.4.3 Hydrogramme de crues :

C'est une courbe représentant l'évolution des débits en fonction du temps pendant la crue, il permet d'estimer quelques caractéristiques relatives à la crue telle que, la forme, le volume, temps de montée et temps de base, pour tracer l'hydrogramme de crue, on utilise la méthode de Sokolovsky qui le divise en deux parties non symétriques, calculé à partir des temps de montée et de décrue.

→ **Temps de montée :**

$$Q_m = Q_{max}\left(\frac{t}{T_m}\right)^2$$

→ **Temps de décrue :**

$$Q_d = Q_{max}\left(\frac{T_b - t}{T_d}\right)^3$$

$$T_b = T_d + T_m$$

Avec : T_m : Temps de montée (h).
T_d : Temps de décrue (h).
T_b : Temps de base de la crue (h).
Q_{max} : Débit maximal (m^3/s).

Pour les crues d'avers, c'est-à-dire les crues engendrées par la pluie cette méthode prend :

$$T_d = \delta * T_m$$

Où δ : Coefficient de forme de l'hydrogramme des crues.

Tableau III. 20: Valeur du coefficient de forme de l'hydrogramme de crue δ

Description du cours d'eau	Valeur de δ
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants dénudés et faiblement permeable.	2,0 - 2.5
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants brisés ou perméables, moyens cours d'eau avec terrasses de lit majeur normales.	3.0 – 4.0
Grands et moyens cours d'eau avec des terrasses de débordements étendues.	4.0 - 7.0

$T_m = T_c$, avec T_c le temps de concentration du bassin versant (h).

$T_d = ð \times T_m$, d'où: ð c'est le coefficient de forme de l'hydrogramme de crue.

On prend δ=3 Donc :

$T_m = 11.58\ heures$ et $T_d = 34.74\ heures.$

Tableau III. 21: Valeurs des débits de crues en fonction du temps.

temps (h)	***Période de retour « 100 ans »***			
	Maouchi ahmed (15 10 04)	*Boubirek (15 07 03)*	*Ighil ali (15 05 03)*	*Station hydrométrique sidi aich (15 10 01)*
	Q (m^3/s)	*Q (m^3/s)*	*Q (m^3/s)*	*Q (m^3/s)*
0	*0*	*0.0*	*0.0*	*0.0*
0.5	*4.47*	*7.1*	*4.9*	*4.2*
1	*17.88*	*28.3*	*19.5*	*16.9*
1.5	*40.22*	*63.7*	*43.9*	*37.9*
2	*71.50*	*113.2*	*78.0*	*67.4*
2.5	*111.72*	*176.8*	*121.8*	*105.3*
3	*160.88*	*254.6*	*175.4*	*151.7*
3.5	*218.97*	*346.6*	*238.8*	*206.5*
4	*286.00*	*452.7*	*311.9*	*269.7*
4.5	*361.97*	*572.9*	*394.7*	*341.3*
5	*446.88*	*707.3*	*487.3*	*421.3*
5.5	*540.72*	*855.9*	*589.7*	*509.8*
6	*643.51*	*1018.6*	*701.8*	*606.7*
6.5	*755.23*	*1195.4*	*823.6*	*712.1*
7	*875.88*	*1386.4*	*955.2*	*825.8*
7.5	*1005.48*	*1591.5*	*1096.5*	*948.0*
8	*1144.01*	*1810.8*	*1247.6*	*1078.6*
8.3	*1231.42*	*1949.1*	*1342.9*	*1161.0*
8.5	*1291.48*	*2044.2*	*1408.4*	*1217.7*
9	*1447.89*	*2291.7*	*1579.0*	*1365.1*
9.5	*1613.24*	*2553.5*	*1759.3*	*1521.0*

10	*1787.52*	*2829.3*	*1949.3*	*1685.4*
10.5	*1970.74*	*3119.3*	*2149.2*	*1858.1*
11	*2162.90*	*3423.5*	*2358.7*	*2039.3*
11.5	***2364.00***	*3741.8*	*2578.0*	*2228.9*
11.58	***2397.00***	***3794.0***	***2614.0***	***2260.0***
12	*2311.11*	*3658.1*	*2520.3*	*2179.0*
12.5	*2211.56*	*3500.5*	*2411.8*	*2085.2*
13	*2114.92*	*3347.5*	*2306.4*	*1994.0*
13.5	*2021.13*	*3199.1*	*2204.1*	*1905.6*
14	*1930.16*	*3055.1*	*2104.9*	*1819.8*
14.5	*1841.96*	*2915.5*	*2008.7*	*1736.7*
15	*1756.48*	*2780.2*	*1915.5*	*1656.1*
15.5	*1673.70*	*2649.1*	*1825.2*	*1578.0*
16	*1593.55*	*2522.3*	*1737.8*	*1502.5*
16.5	*1516.01*	*2399.6*	*1653.3*	*1429.4*
17	*1441.02*	*2280.9*	*1571.5*	*1358.7*
17.5	*1368.55*	*2166.2*	*1492.4*	*1290.3*
18	*1298.55*	*2055.4*	*1416.1*	*1224.3*
18.5	*1230.98*	*1948.4*	*1342.4*	*1160.6*
19	*1165.79*	*1845.2*	*1271.3*	*1099.2*
19.5	*1102.95*	*1745.8*	*1202.8*	*1039.9*
20	*1042.40*	*1649.9*	*1136.8*	*982.8*
20.5	*984.12*	*1557.7*	*1073.2*	*927.9*
21	*928.05*	*1468.9*	*1012.1*	*875.0*
21.5	*874.15*	*1383.6*	*953.3*	*824.2*
22	*822.37*	*1301.7*	*896.8*	*775.4*
22.5	*772.69*	*1223.0*	*842.6*	*728.5*
23	*725.04*	*1147.6*	*790.7*	*683.6*
23.5	*679.40*	*1075.4*	*740.9*	*640.6*
24	*635.71*	*1006.2*	*693.3*	*599.4*
24.5	*593.94*	*940.1*	*647.7*	*560.0*
25	*554.04*	*876.9*	*604.2*	*522.4*
25.5	*515.97*	*816.7*	*562.7*	*486.5*
26	*479.68*	*759.2*	*523.1*	*452.3*
26.5	*445.13*	*704.6*	*485.4*	*419.7*
27	*412.29*	*652.6*	*449.6*	*388.7*
27.5	*381.10*	*603.2*	*415.6*	*359.3*
28	*351.52*	*556.4*	*383.3*	*331.4*
28.5	*323.52*	*512.1*	*352.8*	*305.0*
29	*297.05*	*470.2*	*323.9*	*280.1*
29.5	*272.05*	*430.6*	*296.7*	*256.5*
30	*248.51*	*393.3*	*271.0*	*234.3*
30.5	*226.36*	*358.3*	*246.9*	*213.4*
31	*205.57*	*325.4*	*224.2*	*193.8*
31.5	*186.09*	*294.5*	*202.9*	*175.5*
32	*167.88*	*265.7*	*183.1*	*158.3*

32.5	*150.90*	*238.9*	*164.6*	*142.3*
33	*135.11*	*213.9*	*147.3*	*127.4*
33.5	*120.46*	*190.7*	*131.4*	*113.6*
34	*106.91*	*169.2*	*116.6*	*100.8*
34.5	*94.41*	*149.4*	*103.0*	*89.0*
35	*82.93*	*131.3*	*90.4*	*78.2*
35.5	*72.42*	*114.6*	*79.0*	*68.3*
36	*62.84*	*99.5*	*68.5*	*59.2*
36.5	*54.14*	*85.7*	*59.0*	*51.0*
37	*46.28*	*73.3*	*50.5*	*43.6*
37.5	*39.23*	*62.1*	*42.8*	*37.0*
38	*32.93*	*52.1*	*35.9*	*31.0*
38.5	*27.34*	*43.3*	*29.8*	*25.8*
39	*22.42*	*35.5*	*24.5*	*21.1*
39.5	*18.14*	*28.7*	*19.8*	*17.1*
40	*14.43*	*22.8*	*15.7*	*13.6*
40.5	*11.27*	*17.8*	*12.3*	*10.6*
41	*8.61*	*13.6*	*9.4*	*8.1*
41.5	*6.40*	*10.1*	*7.0*	*6.0*
42	*4.61*	*7.3*	*5.0*	*4.3*
42.5	*3.19*	*5.0*	*3.5*	*3.0*
43	*2.09*	*3.3*	*2.3*	*2.0*
43.5	*1.28*	*2.0*	*1.4*	*1.2*
44	*0.71*	*1.1*	*0.8*	*0.7*
44.5	*0.34*	*0.5*	*0.4*	*0.3*
45	*0.13*	*0.2*	*0.1*	*0.1*
45.5	*0.03*	*0.0*	*0.0*	*0.0*
46	*0.00*	*0.0*	*0.0*	*0.0*

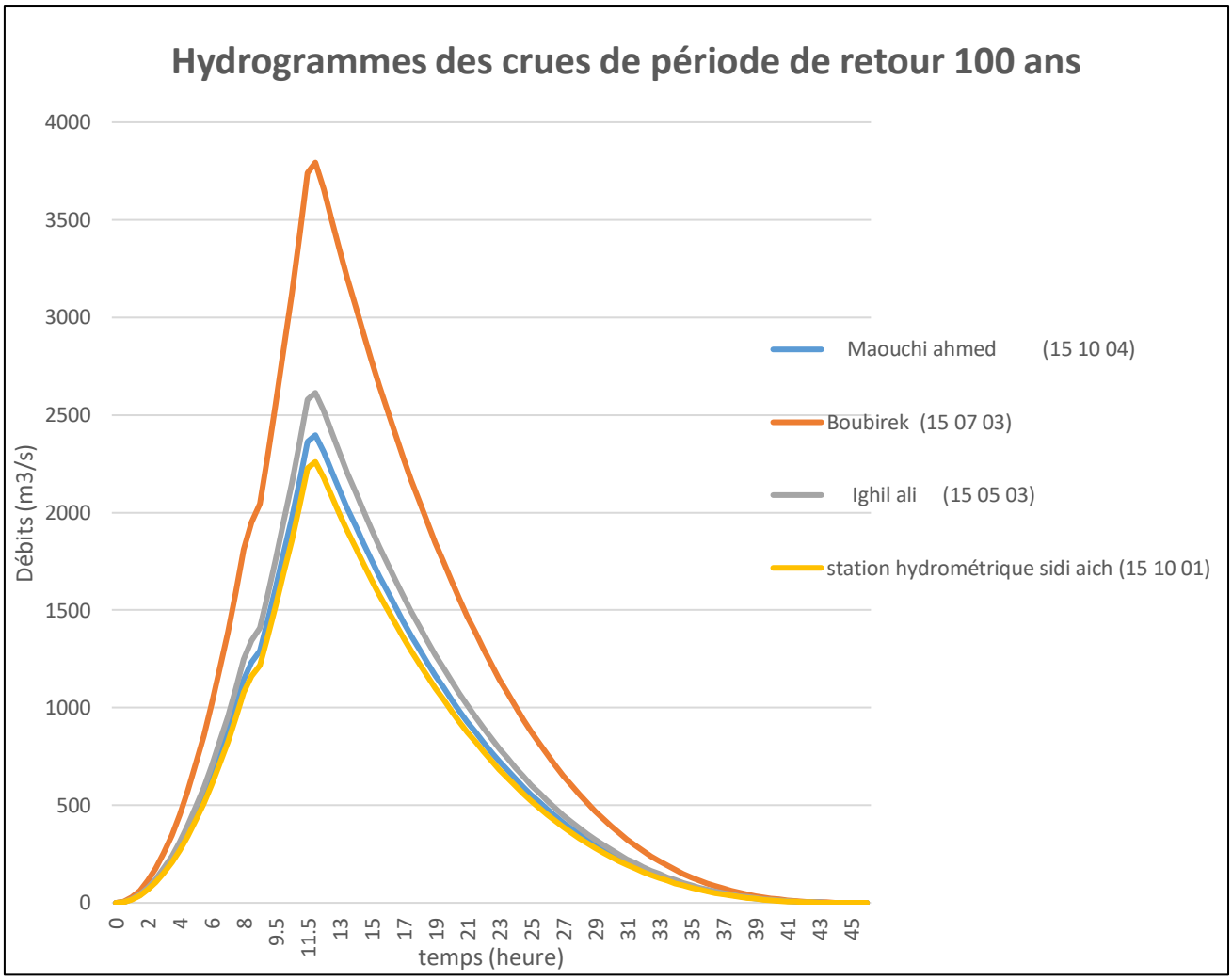


Figure III. 10: Hydrogramme de crue de la zone d'étude par la méthode Skolovsky.

Le tableau suivant nous montre les catégories des dommages :

Tableau III. 22: Crue de projet recommandé.

Catégorie des dommages		***Crues de projet recommandé de probabilité de dépassement annuelle***
Elevés	- *Perte de vies.* - *Dommages considérables.*	*1/100000 à 1/10000*
Importants	- *Pas de pertes de vies.* - *Dommages Importants.*	*1/10000 à 1/1000*
Faibles :	- *Pas de perte de vies.* - *Dommages légers.*	*1/1000 à 1/100*

On opte pour une période de retour de 100 ans. Donc le débit de projet est de **Q=3794 m^3/s**

III.4.4 Etude des apports solides :

Les apports solides dépendent de l'étendue et du relief du bassin versant, et de la résistance du sol à l'érosion liée elle-même à :

- La couverture végétale.
- La nature géologique des roches.

Deux méthodes sont utilisées pour le calcul des apports soldes :

III.4.4.1 Méthode d'estimation du Nord Algérien :

$$D_s = 328.62 \times Q^{-0.234} \times S^{-0.197}$$

Avec :

D_s : Transport solide (T/Km²/an).

Q : Debit maximum (m^3/s).

S : Surface du bassin versant (Km^2).

Application numérique :

La valeur du transport solide est donnée dans le tableau suivant :

Tableau III. 23: Résultat du transport solide.

Q (m^3/s)	***S (Km^2)***	***D_s (T/Km^2/an)***
3794	*4392.366*	***9.15***

Conclusion :

L'établissement de ce chapitre a pour but le calcul des caractéristiques du bassin versant qui influence le cours d'eau ainsi que l'estimation du débit de crue centennal afin de pouvoir réaliser unaménagement adéquat à la situation de l'Oued.

CHAPITRE IV : DIAGNOSTIC ET MODELISATION DU COURS D'EAUNON AMENAGE

CHAPITRE IV : DIAGNOSTIC ET MODELISATION DU COURS D'EAUNON AMENAGE

Introduction :

L'étude hydraulique consiste à faire le diagnostic de la zone d'étude pour tout événement hydraulique, L'analyse hydraulique pour l'établissement des zones inondables est basée sur la modélisation hydraulique le long de l'oued par l'utilisation du logiciel HEC-Ras dans le but de réaliser un modèle hydraulique pour calculer l'élévation de la ligne d'eau de écoulements, d'une part, et d'autre part pour déterminer les zones de débordement.

IV.1 Les bases hydrodynamiques des écoulements à surface libre :

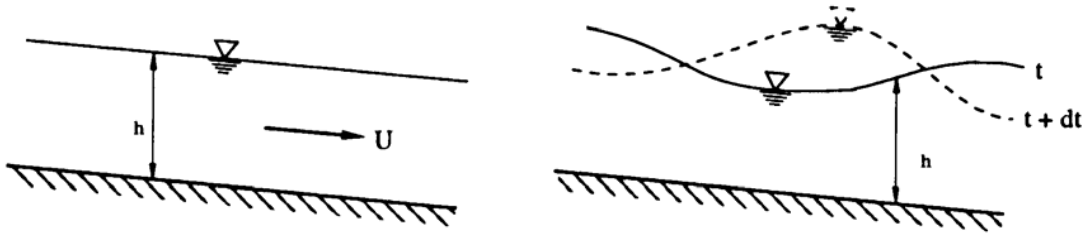
Les écoulements dans les canaux naturels (rivière) et artificiels (irrigation, assainissement) sont, dans la plupart des cas, des écoulements à surface libre. La surface libre est l'interface entre l'air et l'eau. La pression y est égale le plus souvent à la pression atmosphérique.

VI.1.1 Types d'écoulement :

On peut définir les écoulements suivants la variabilité des caractéristiques hydrauliques tels que le tirant d'eau et la vitesse en fonction du temps et de l'espace :

VI.1.1.1 Variabilité dans le temps

L'écoulement est permanent si la vitesses U et la profondeur h restent invariables dans le temps en grandeur et en direction. Le mouvement est non-permanent dans le cas contraire.



Ecoulement permanent *Ecoulement non-permanent*

Figure IV. 1: Ecoulement suivant le temps (Source : TOUMI Abdelouaheb, 2016)

Au sens strict, l'écoulement dans les canaux est rarement permanent. Néanmoins les variations temporelles sont, dans certains cas, suffisamment lentes pour que l'écoulement puisse être considéré comme une succession de régime permanent. On peut alors définir ainsi le régime quasi-permanent.

VI.1.1.2 Variabilité dans l'espace

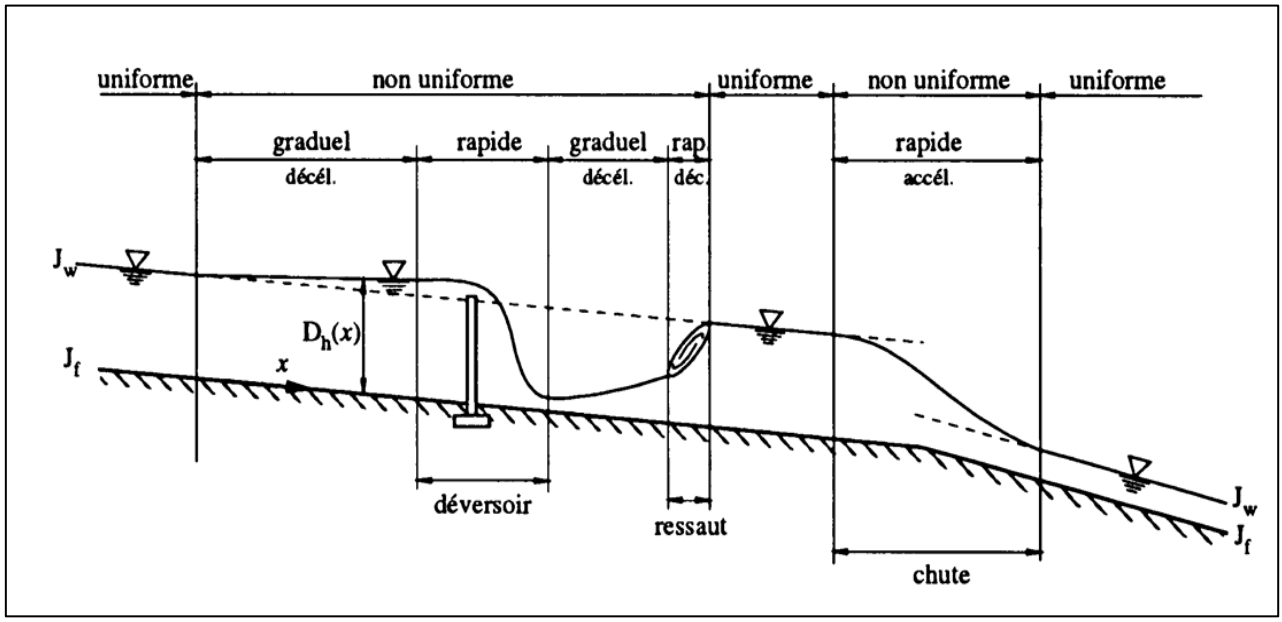
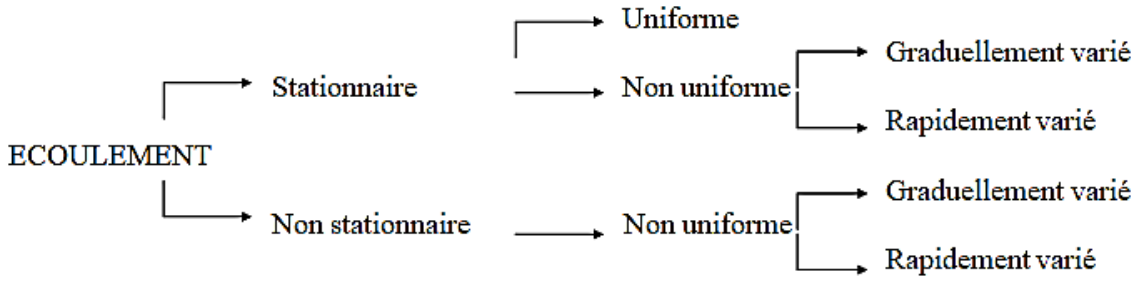


Figure IV. 2: Schéma illustrant les différents types d'écoulements

- Le mouvement est uniforme si les paramètres caractérisant l'écoulement restent invariables dans les diverses sections du canal. La ligne de la pente du fond est donc parallèle à la ligne de la surface libre.
- Le mouvement est non-uniforme ou varié si les paramètres caractérisant l'écoulement changent d'une section à l'autre. La pente de la surface libre diffère de celle du fond.
- Un écoulement non-uniforme peut être accéléré ou décéléré suivant que la vitesse croît ou décroît dans le sens du mouvement.
- Lors que le mouvement est graduellement varié, la profondeur ainsi que les autres paramètres varient lentement d'une section à l'autre.
- Lorsque le mouvement est rapidement varié, les paramètres caractérisant l'écoulement changent brusquement, parfois avec des discontinuités. Cela se manifeste en général au voisinage d'une singularité, telle qu'un seuil, un rétrécissement, un ressaut hydraulique ou une chute brusque.



VI.1.2 Régime d'écoulement :

Un écoulement peut être soumis aux différents types d'écoulement qui sont classées par le nombre de Froude en tenant compte des forces d'inertie, forces de gravité (Lancastre, 1996). Il est défini comme le rapport entre les forces de gravité et les forces d'inertie ou :

$$F_r = \sqrt{\frac{Q^2 L}{g S^3}} = \frac{V}{\sqrt{g \times h}}$$

Avec :
V : la vitesse moyenne.
L : largeur en miroir.
h : profondeur hydraulique.
S : section mouillée.
Lorsque :

- → Fr = 1 : le régime est critique (supercritique) ;
- → Fr < 1 : le régime est fluvial (subcritique) ;
- → Fr > 1 : le régime est torrentiel.

Un autre nombre adimensionnel utilisé dans l'étude hydraulique, il est défini comme le rapport entre la force de viscosité et celle d'inertie, le nombre de Reynolds :

$$R_e = \frac{V \times h}{v}$$

Avec :
V : vitesse moyenne.
h : profondeur.
v : viscosité cinématique.
Lorsque :

- → Re < 500 : écoulement laminaire.
- → Re < 2000 : écoulement turbulent.
- → 500 < Re < 2000 : écoulement de transition

Donc la combinaison des deux nombres donne la classification suivante :

- → Fr < 1, Re < 500 : écoulement fluvial-laminaire.
- → Fr < 1, Re > 2000 : écoulement fluvial-turbulent.
- → Fr > 1, Re < 500 : écoulement torrentiel-laminaire.
- → Fr > 1, Re > 2000 : écoulement torrentiel-turbulent.

IV.2 Diagnostique et modélisation du cours d'eau non Aménagé :

IV.2.1 Etat de l'oued à la zone d'étude :

L'étude de protection contre les inondations et un travail méthodique, qui consiste à suivre une procédure bien déterminée. Elle commence par le diagnostic du site d'étude dans le but de dégager l'ensemble des informations et caractéristiques nécessaires, le tableau suivant les problèmes constaté à la zone d'étude

Tableau IV-1 : problèmes constatés à la zone d'étude

Zone	Etat
Pont Sidi Aich	• En aval du pont, et à la sortie de Sidi Aich le cours d'eau d'Oued Soummam se partage en deux parties avec la création d'une zone de dépôt très importante qui empêche un bon écoulement d'eau de crue. Cette configuration accentue l'érosion des berges et favorise le débordement des eaux de crues. - La largeur du pont environ 150 m - La hauteur : 7,60 m
Pont métallique (Passerelle)	• Un ouvrage très important d'une hauteur de 10 m. La largeur du lit mineur est importante avec un plan d'eau 25 m. Pour un éventuel aménagement, la servitude est importante.
Confluence Oued Ighzer Bou-Haddad	• L'oued est situé sur la rive gauche de l'oued Soummam ; il traverse la ville de Sidi Aich. Il est aménagé partiellement en amont au niveau du pont situé au centre de Sidi Aich. Au point de confluence, cet oued provoque une zone de remblaiement. Les sédiments arrachés sont éjectés au niveau de la Soummam, ce qui contribue aux problèmes d'inondation. Sur la rive gauche, on note la présence d'un rejet des eaux usées.

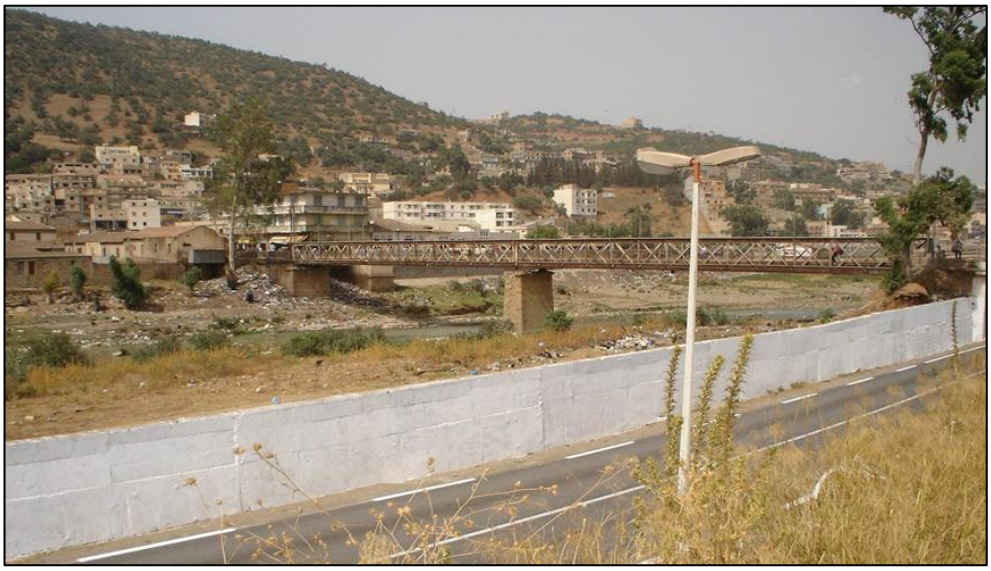




Figure IV. 3: Position des points constaté (source : google earth)



Figure IV. 4: Photographie prises au niveau de Sidi Aich Lors de la crue de décembre 2002

(source : dre)

IV.2.2 Modélisation de l'écoulement :

La modélisation hydraulique consiste à construire un modèle permettant de représenter sous forme numérique les caractéristiques géométriques et hydrauliques des cours d'eau étudiés. Ce modèle numérique doit permettre de déterminer les niveaux de submersions pour une crue donnée et d'en cartographier les résultats.

IV.2.2.1 Présentation du logiciel HEC-RAS

HEC-RAS (HYDROLOGIC ENGINERING CENTER, RIVER ANALYSIS SYTEME), est un logiciel de simulation largement utilisé par les hydrauliciens, un logiciel informatique capable de modéliser des écoulements à surface libre dans les canaux naturels et artificiels avec la prise en compte des ouvrages de franchissement. Il permet de simuler les écoulements graduellement variés en régime transitoire, d'effectuer les calculs de lignes d'eau en régime dynamique en simulant les différents obstacles le long du cours d'eau. La modélisation de l'Oued se base sur les profils en travers, tient compte de tous les ouvrages existants, et permet de définir différents coefficients de rugosité pour chaque section.

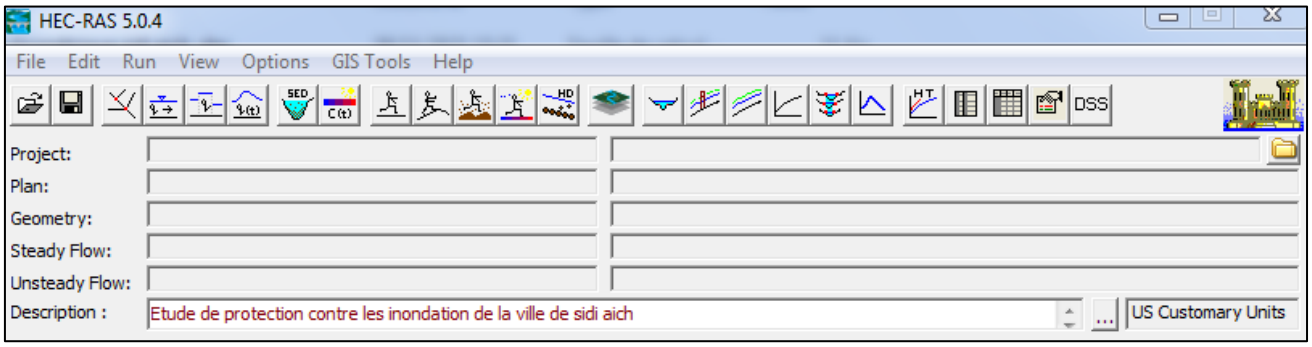


Figure IV. 5: Interface HEC-RAS

IV.2.2.2 Etapes de simulation par HEC-RAS

IV.2.2.2.1 La topographie :

Les données de la topographie sont indispensables à la réalisation de la présente étude. C'est grâce à ces données qu'il est possible d'intégrer la géométrie de l'oued dans le modèle. L'approche utilisée consiste à établir une série de profils topographiques à travers le lit de l'oued. L'élaboration de tels profils nécessite un fond de base qui peut être un modèle numérique de terrain, une carte topographique, etc. D'une manière générale, plus on dispose de documents et d'informations sur la topographie, plus nos profils seront représentatifs de la géométrie réelle de la section de l'oued.

Toutefois, la fiabilité des résultats dépend aussi bien de la qualité de ces documents topographiques (échelle, résolution, etc.) que de leur manipulation et exploitation.

IV.2.2.2.2 Modélisation de l'Oued

La modélisation de la rivière consiste à définir la géométrie des oueds étudiés elle se base sur les profils en travers et les données d'ouvrages hydraulique existants (pont, déversoir …).

Les étapes suivies pour la modélisation de l'oued Soummam :

- ✓ A l'aide du logiciel ArcMap 10.5, on a créé un fichier terrain (. IMG.AUX), à partir du modèle numérique de terrain MNT de la zone d'étude.
- ✓ Importer le fichier terrain (. IMG.AUX) dans le logiciel HEC-RAS dans RAS Mapper (**Figure IV.6)** suit la projection nord Algérie (extension de fichier. PRJ) **(FigureIV.5)**, qui contient des informations sur un système de coordonnées particulier adéquat a notre zone d'étude, qu'on a téléchargé à partir du site-web 'Spatial Reference'.

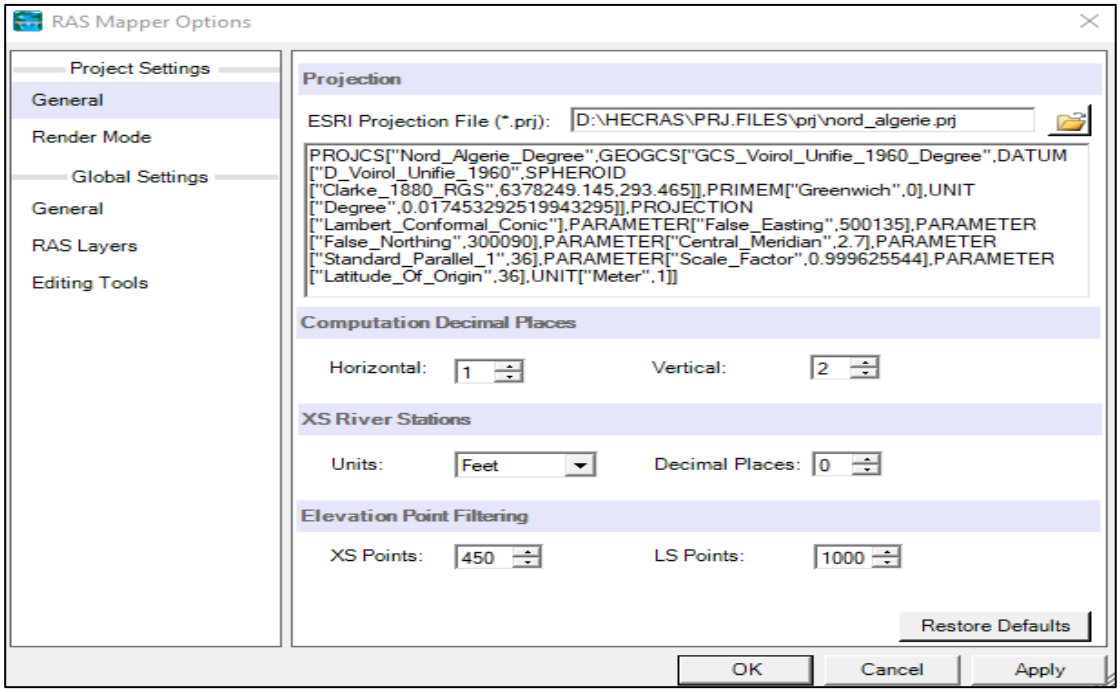


Figure IV. 6: Introduction du fichier de projection dans RAS Mapper.

.

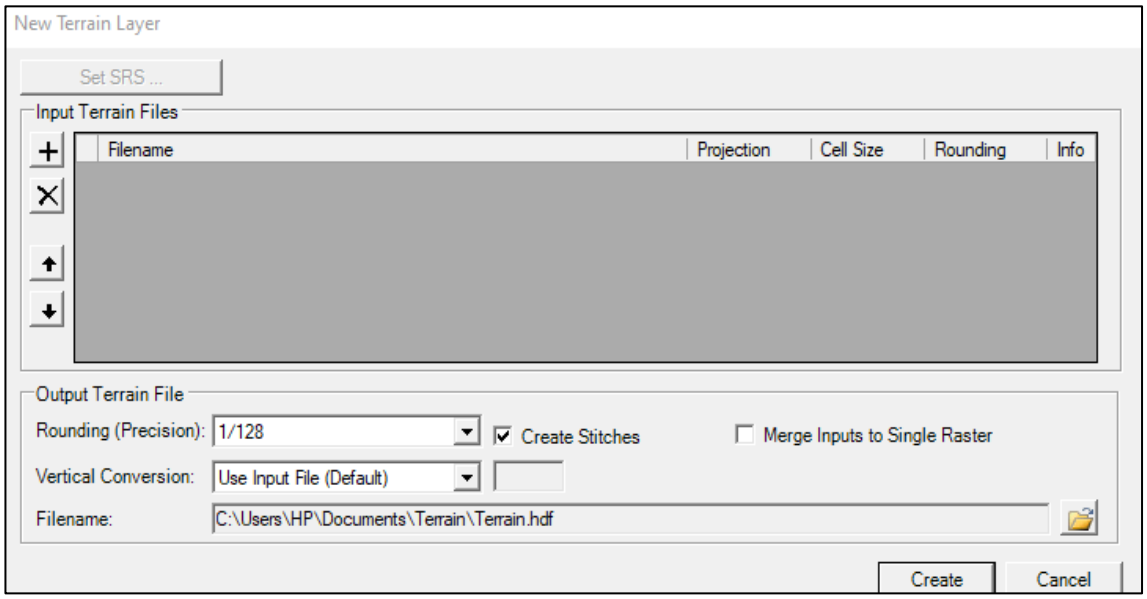


Figure IV. 7: Importation du fichier terrain dans RAS Mapper.

- ✓ Dans RAS Mapper, tracer l'axe de l'Oued, le lit mineur, le lit majeur ainsi que les sections transversales.

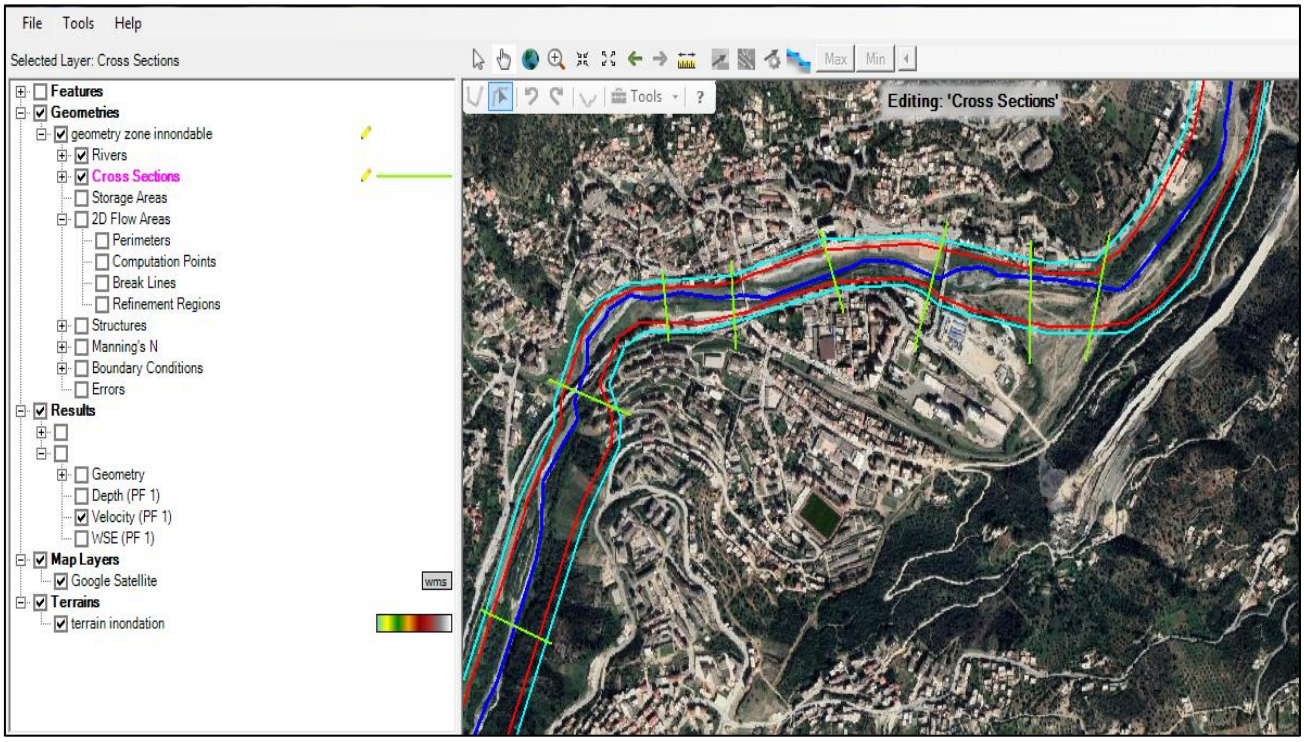


Figure IV. 8: l'axe de l'oued et les sections en travers de l'oued sur RAS Mapper.

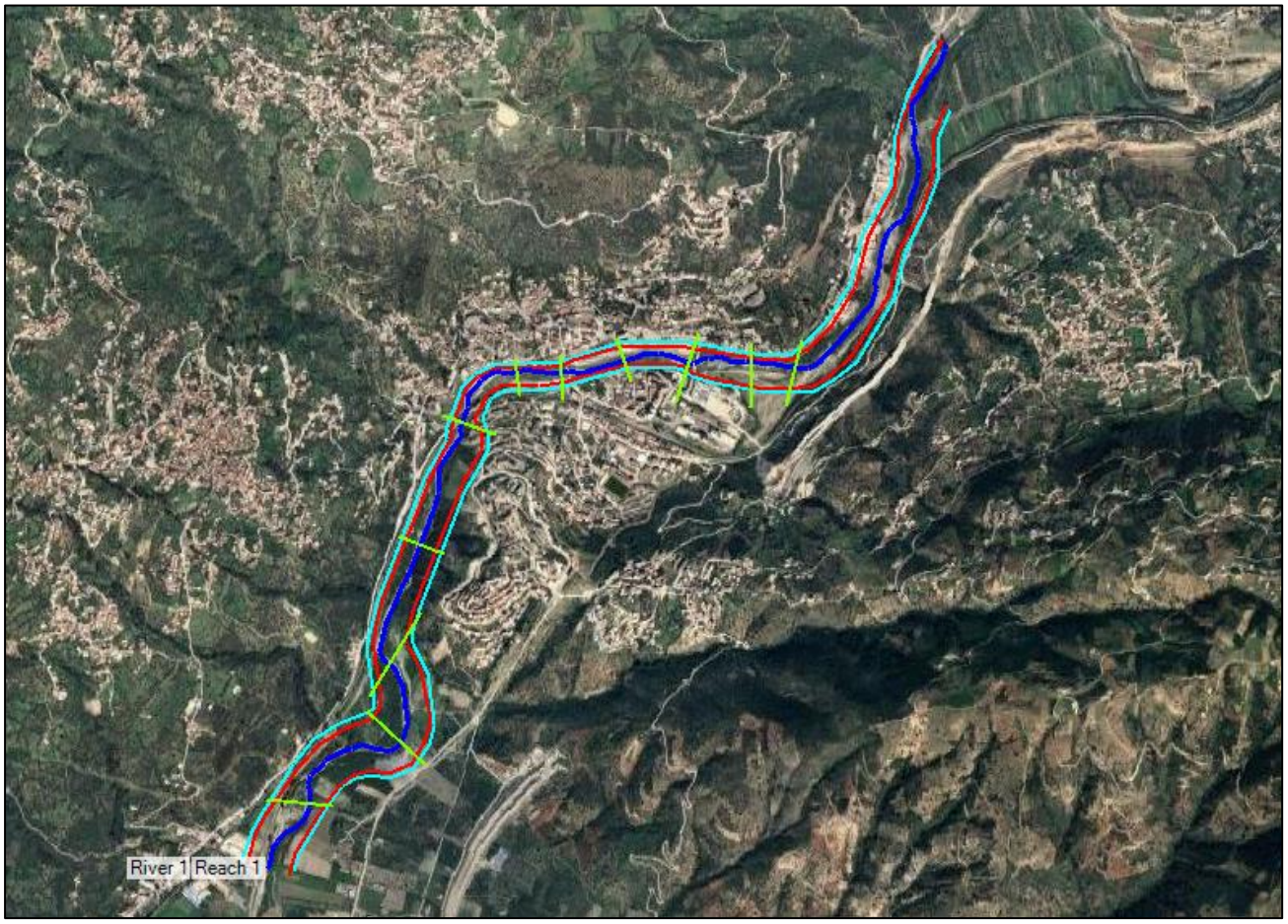
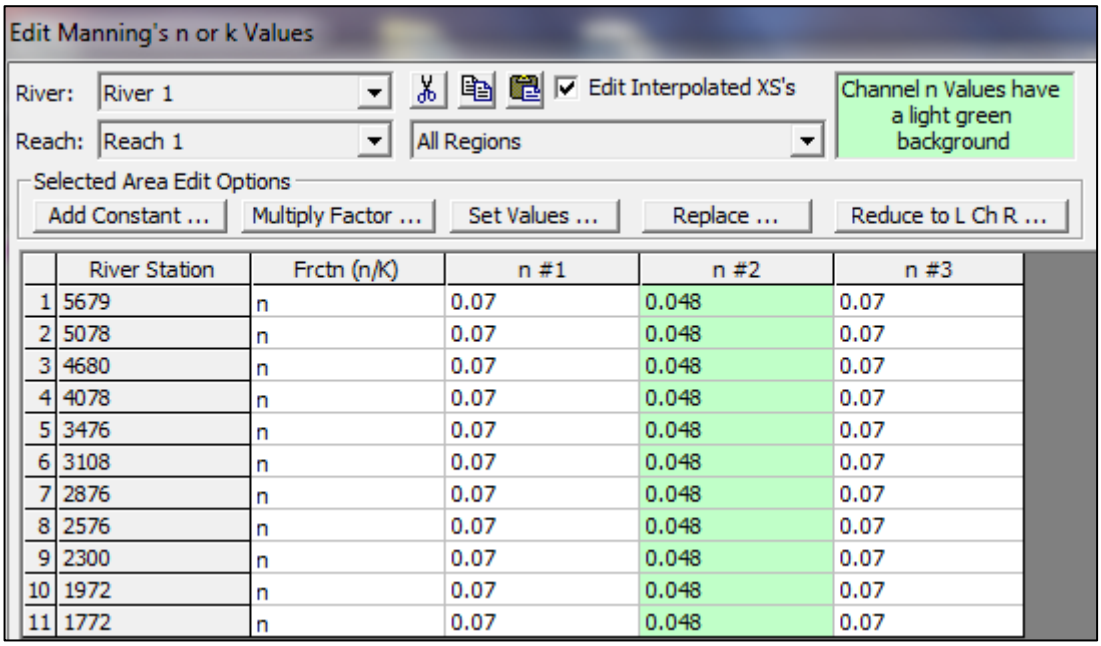


Figure IV. 9: l'axe de l'oued et les sections en travers de l'oued.

IV.2.2.2.3 Données hydrométriques et conditions aux limites :

Après avoir importé notre terrain sur RAS Mapper et défini la géométrie de l'oued étudié, il nous reste d'importer le débit et les conditions aux limites.

✓ Le coefficient de Manning est un paramètre qui représente la rugosité de la surface du lit de l'oued. Le modèle géométrique établi d'après la série de profils transversaux permet de subdiviser la section de l'oued en trois parties séparées reportés sur chaque ligne transversale : le lit majeur, le lit de l'oued et le lit mineur. Un coefficient de Manning est attribué à ces différentes parties. Lors de la simulation des crues de l'oued sidi aich, les valeurs de 0,048 pour le lit l'oued et 0,07 pour les rives ont été attribuées à ce coefficient (voir annexe N°09).



	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	5679	n	0.07	0.048	0.07
2	5078	n	0.07	0.048	0.07
3	4680	n	0.07	0.048	0.07
4	4078	n	0.07	0.048	0.07
5	3476	n	0.07	0.048	0.07
6	3108	n	0.07	0.048	0.07
7	2876	n	0.07	0.048	0.07
8	2576	n	0.07	0.048	0.07
9	2300	n	0.07	0.048	0.07
10	1972	n	0.07	0.048	0.07
11	1772	n	0.07	0.048	0.07

Figure IV. 10: Attribution de Coefficient de Manning aux différentes parties

✓ Dans le cadre de la présente étude, on s'intéresse uniquement à l'étendue des lames d'eau générées par les débits de pointe, sans prêter attention à la durée des crues ni aux volumes d'eaux qui en résultent. De ce fait la modélisation sera faite en régime permanent en considérant le débit de pointe. Le modèle est encadré par deux conditions aux limites amont et aval définies comme étant les plans d'eau correspondant à une pente hydraulique égale à la pente du lit de l'oued.

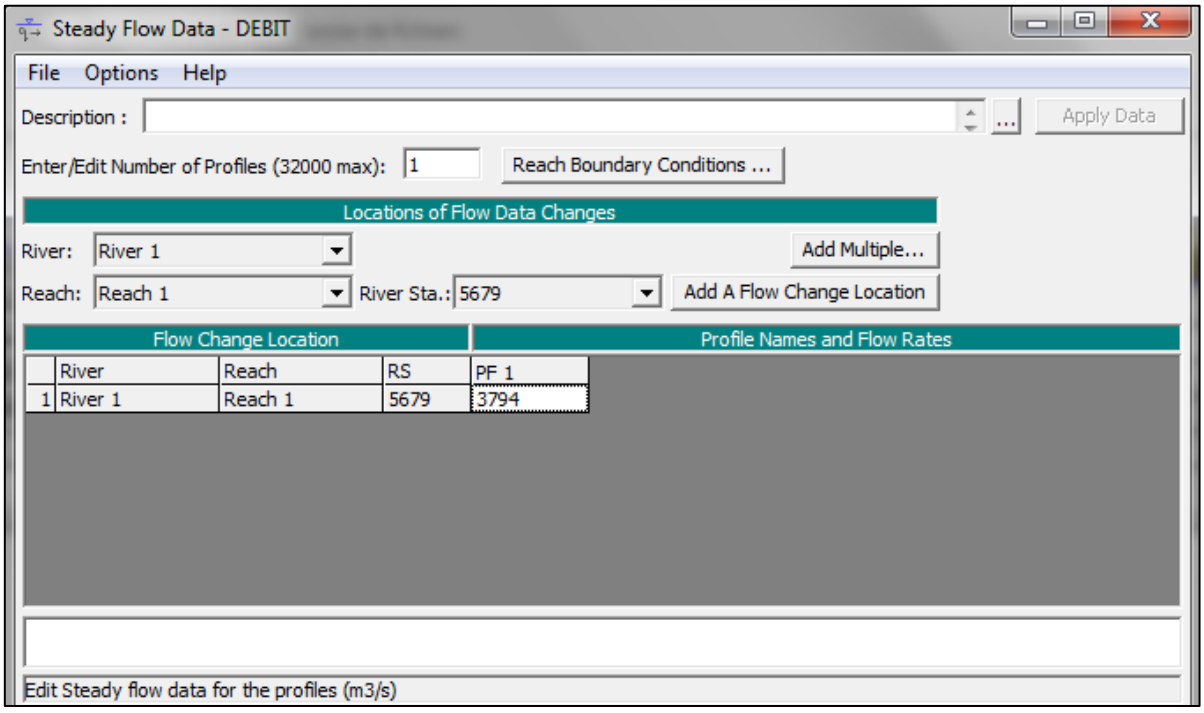


Figure IV. 11: Introduction des débits dans HEC-RAS

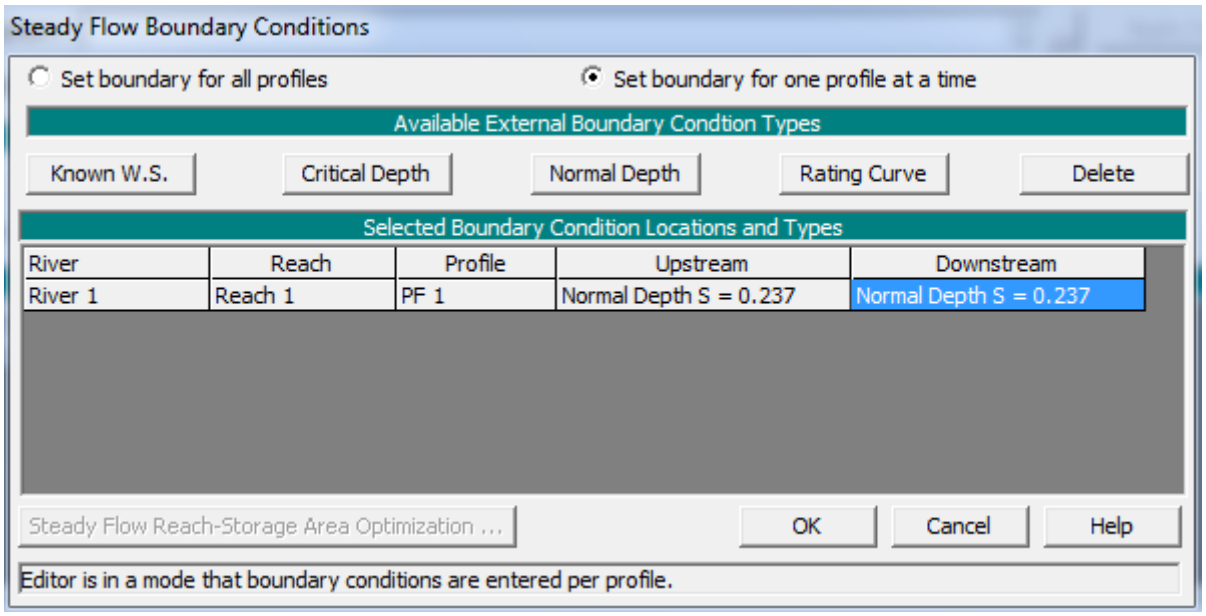


Figure IV. 12: Introduction de la pente normale dans HEC-RAS

IV.2.2.2.4 Simulation :

L'intégration des différents paramètres de calcul dans le logiciel HEC-RAS nous a permis d'effectuer les calculs et d'extraire des résultats comme :

- → La vue de profil en long du tronçon simulé
- → Une vue de trois dimensions du niveau d'eau dans chaque profil en travers dans le tronçon d'étude
- → Les profils en travers.
- → Tableaux récapitulatifs de l'ensemble des paramètres hydrauliques
- → Les vitesses d'écoulement dans chaque section.
- → Les zones inondables

✓ **Le profil en long :**

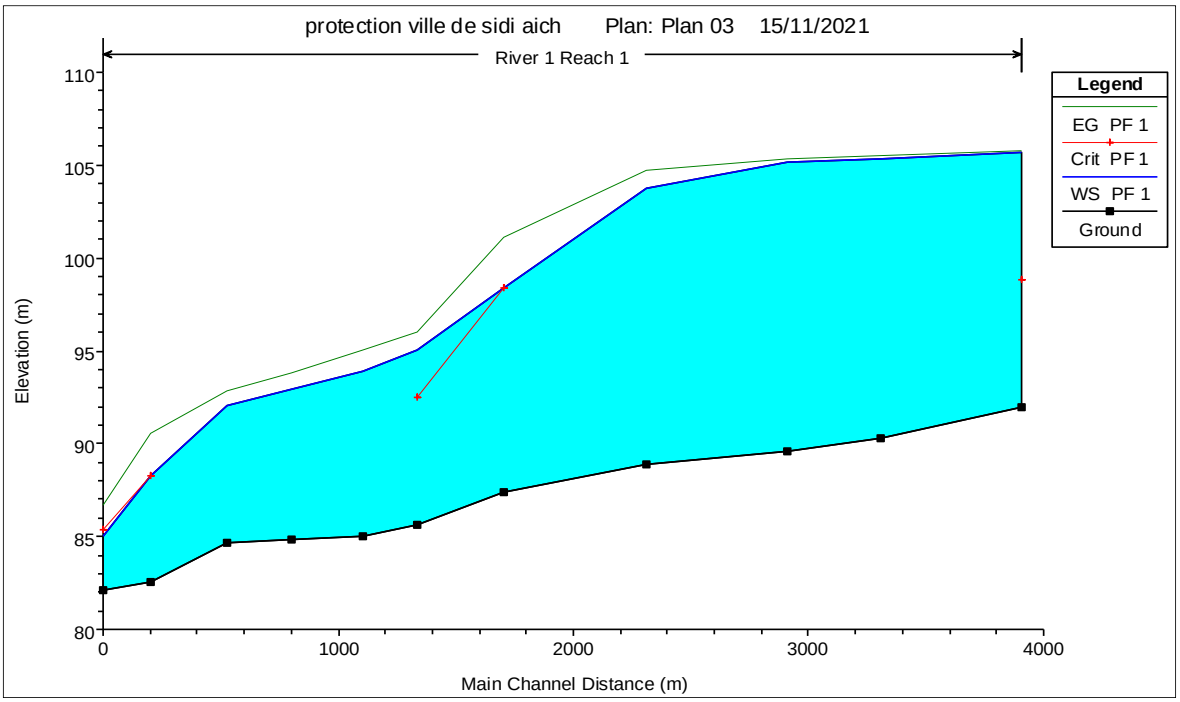


Figure IV. 13: Profil en long du cours d'eau à l'état naturel

✓ **Une vue de trois dimensions du niveau d'eau dans chaque profil en travers dans le tronçon d'étude :**

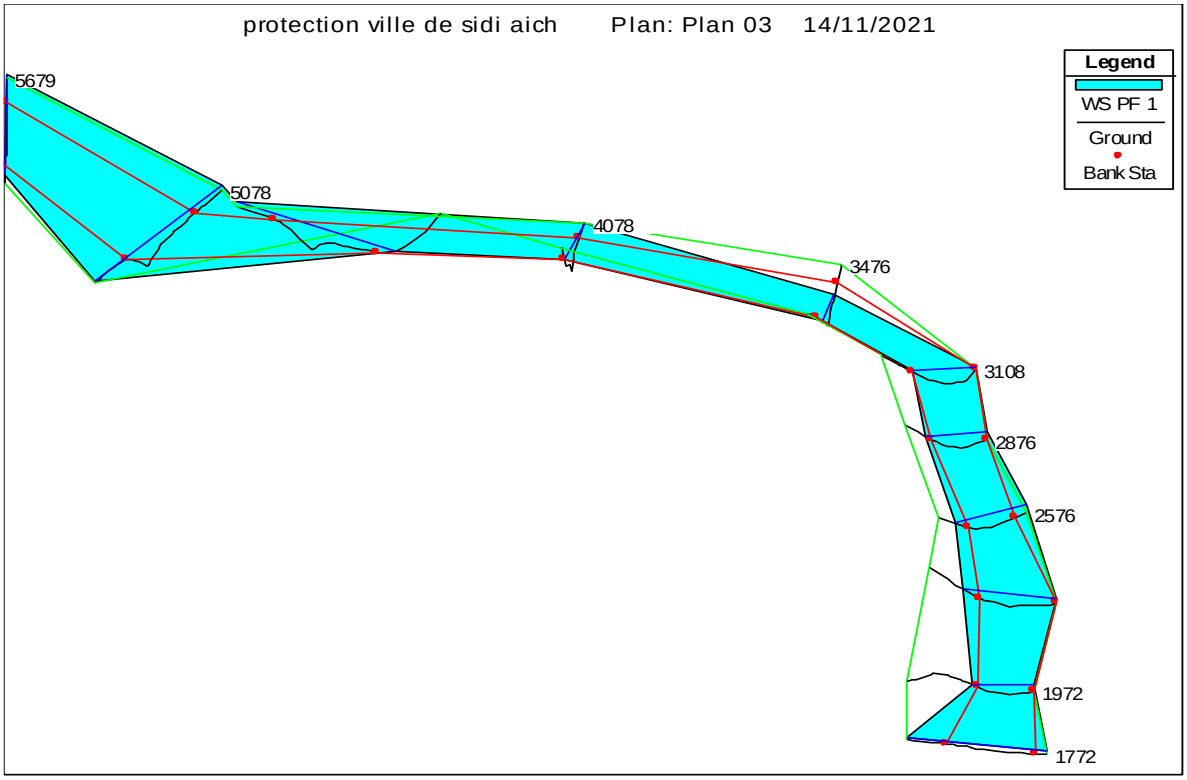


Figure IV. 14: Vue en Plan en 3D de l'Oued

✓ Les profils en travers

Les profils en travers permettent de visualiser les résultats de la simulation sous forme de coupe perpendiculaire au cours d'eau. Ils offrent une image détaillée de la géométrie de dernier en un point particulier.

Les figures 15,16,17,18 montrent des profils en travers de l'oued soummam qui permet de comparer les hauteurs d'eau résultantes des débits sortant par rapport à celles des débits entrants.

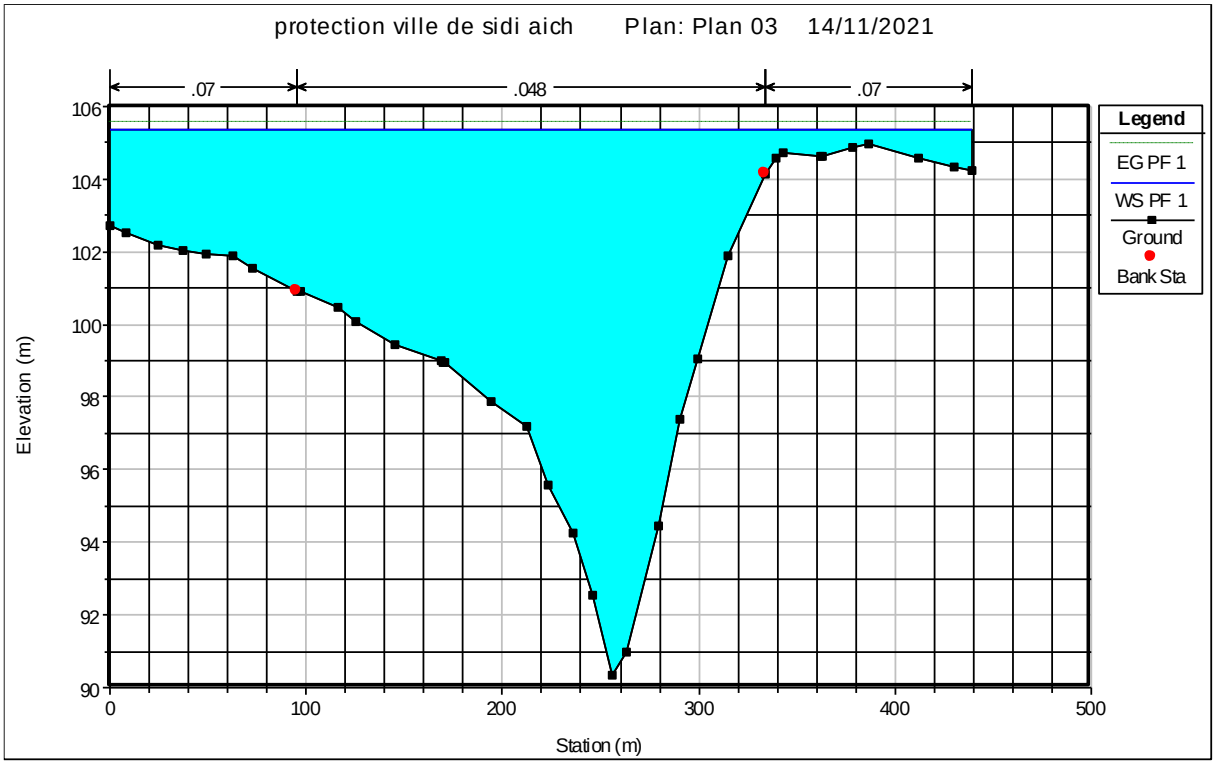


Figure IV. 15: Section en travers 5078 d'oued soummam

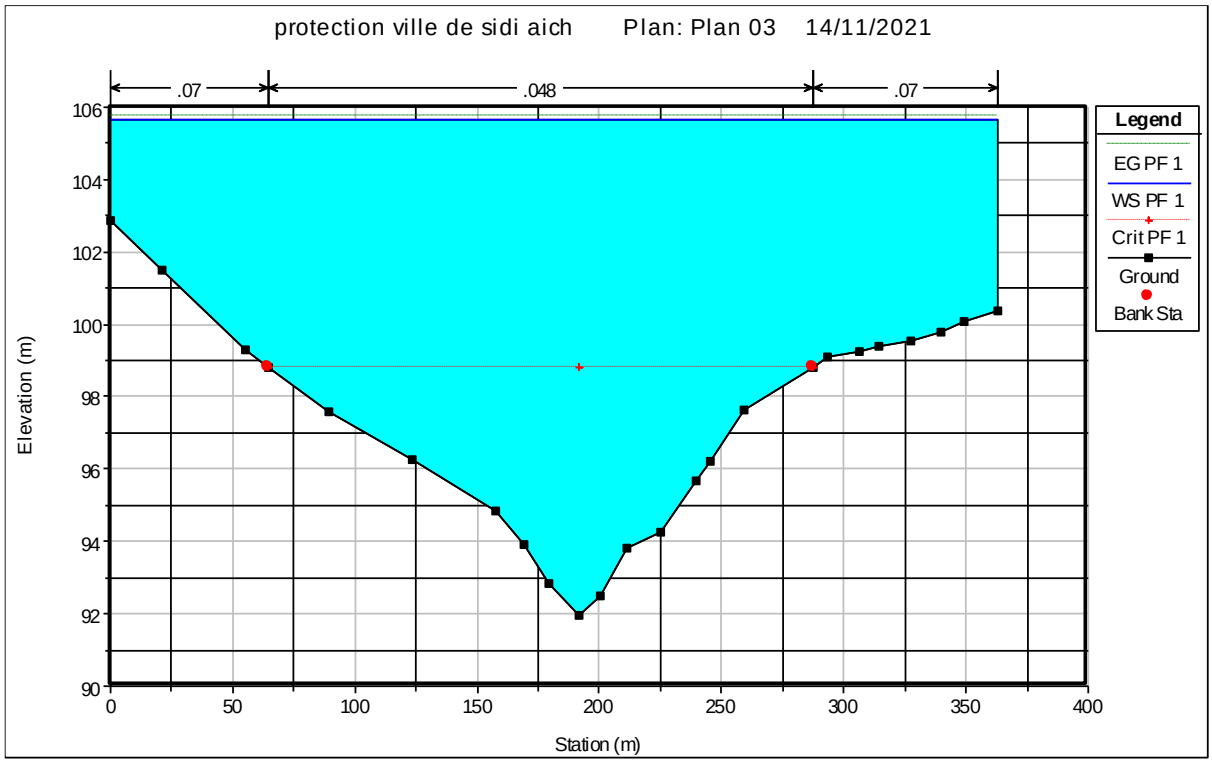


Figure IV. 16: Section en travers 5679 d'oued soummam

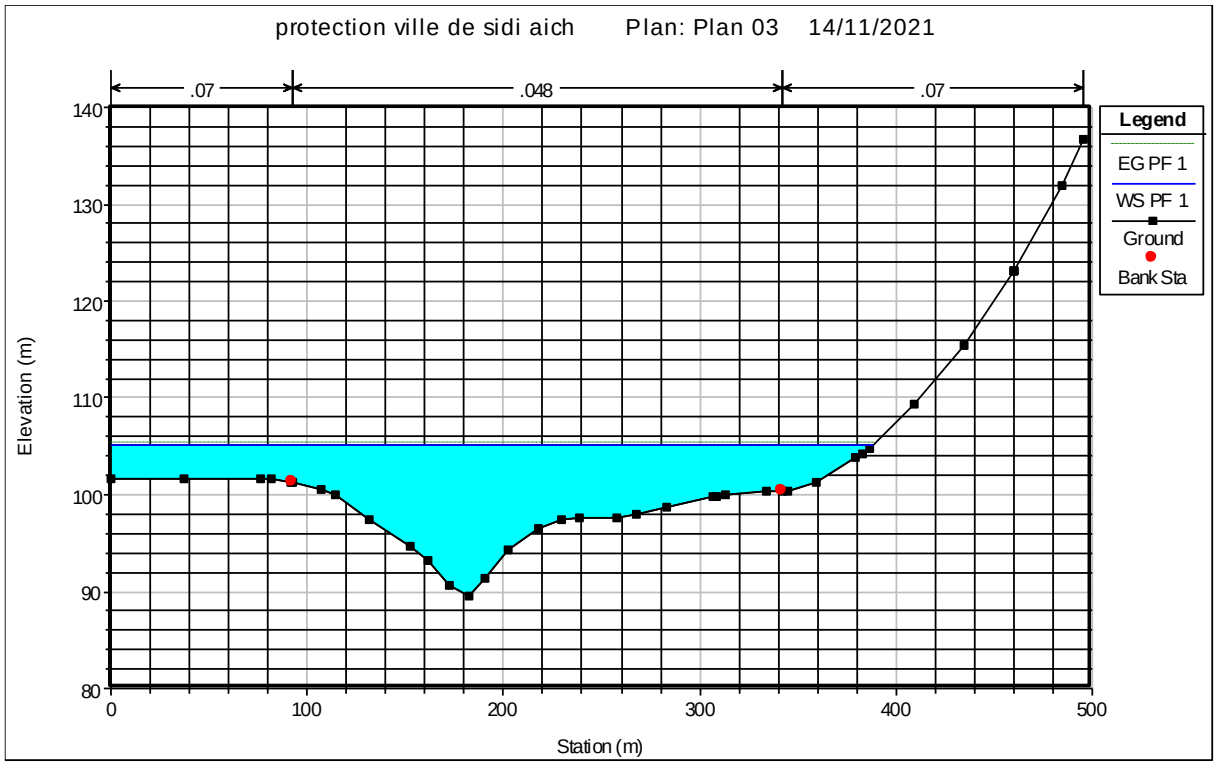


Figure IV. 17: Section en travers 4680 d'oued soummam

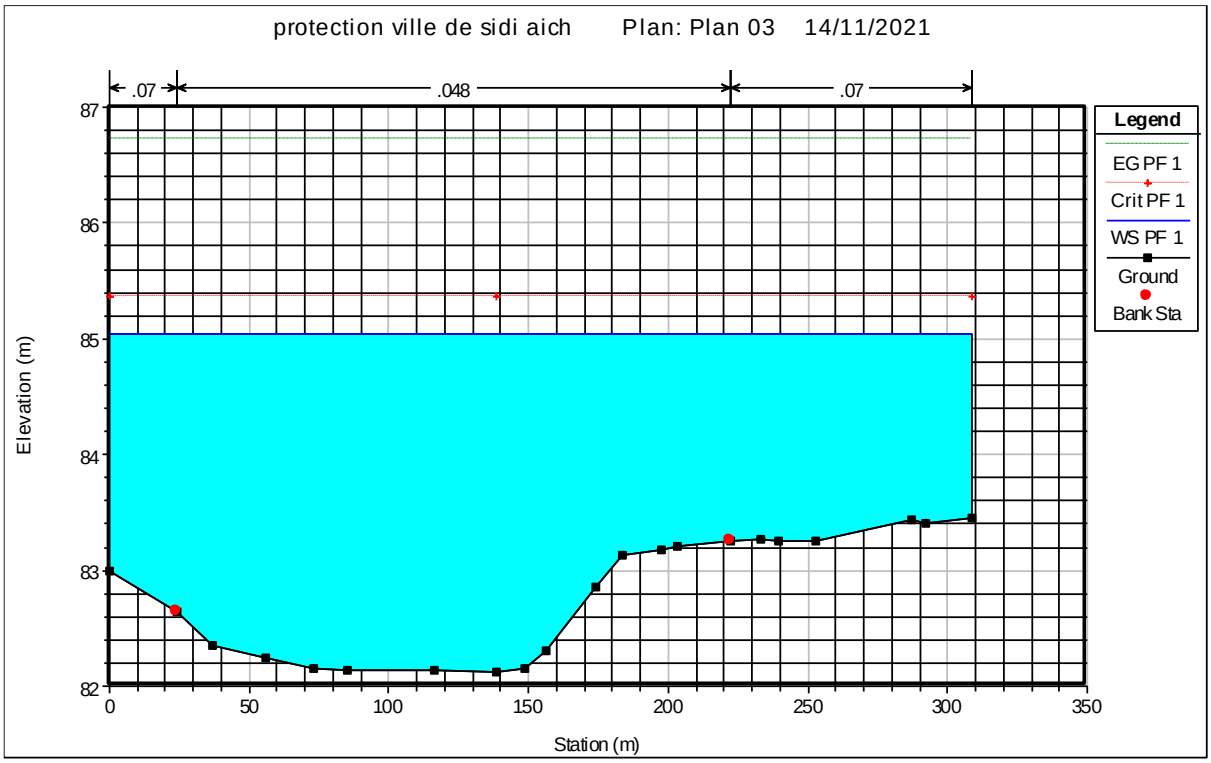


Figure IV. 18: Section en travers 1772 d'oued soummam

✓ **Tableaux récapitulatifs de l'ensemble des paramètres hydrauliques :**

Tableau IV. 1: les principaux paramètres hydrauliques issus de la simulation.

River Station	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
5679	91.97	105.67	98.83	105.77	0.000241	1.49	2977.38	362.7	0.15
5078	90.32	105.36		105.54	0.000591	1.94	2214.78	439.1	0.23
4680	89.57	105.20		105.34	0.000425	1.72	2489.85	388.54	0.19
4078	88.85	103.73		104.71	0.003132	4.43	910.77	142.97	0.51
3476	87.35	98.42	98.42	101.10	0.013477	7.25	523.13	98.24	1
3108	85.6	95.07	92.49	96.00	0.003531	4.26	891.21	137.23	0.53
2876	85.02	93.88		95.04	0.004604	4.77	805.12	134.4	0.6
2576	84.83	92.97		93.82	0.003129	4.3	1006.77	168.16	0.52
2300	84.69	92.06		92.84	0.003822	3.97	1006.51	204.02	0.54
1972	82.56	88.23	88.23	90.53	0.014058	6.72	570.31	131.32	0.99
1772	82.12	85.05	85.36	86.73	0.024627	6.14	711.35	308.4	1.22

✓ **Les vitesses d'écoulement dans chaque section :**

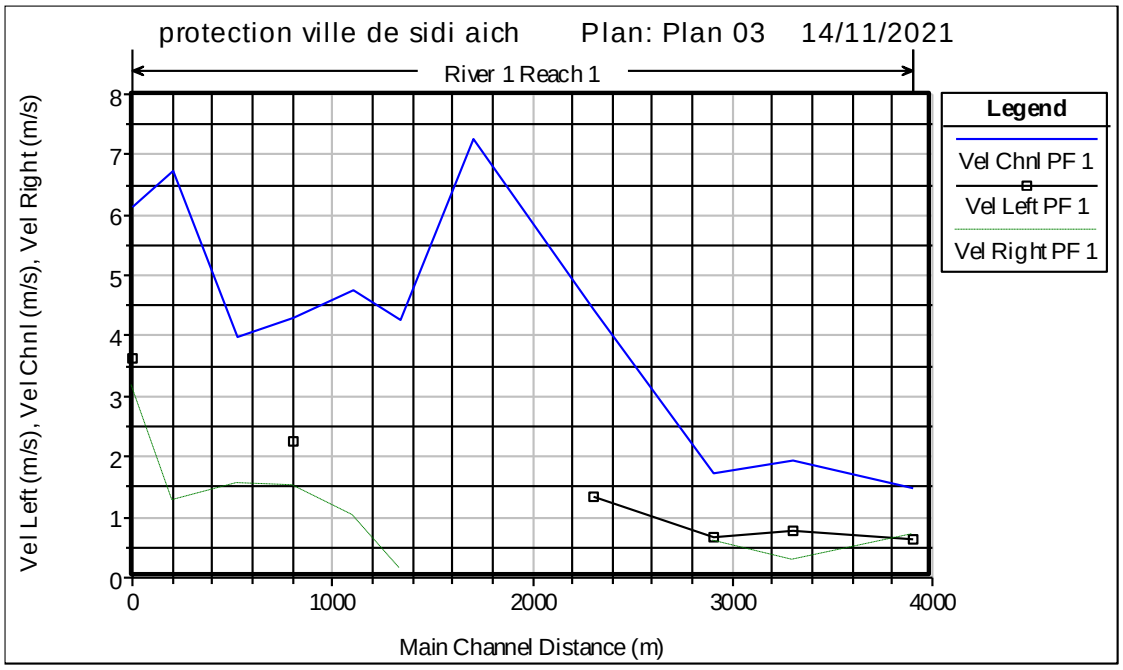


Figure IV. 19: Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance à partir de l'exutoire.

✓ **Courbe de tarage :**

HEC-RAS a permis de fournir une représentation de la variation de la hauteur d'eau en (m) enf onction de débit en m3 /s.

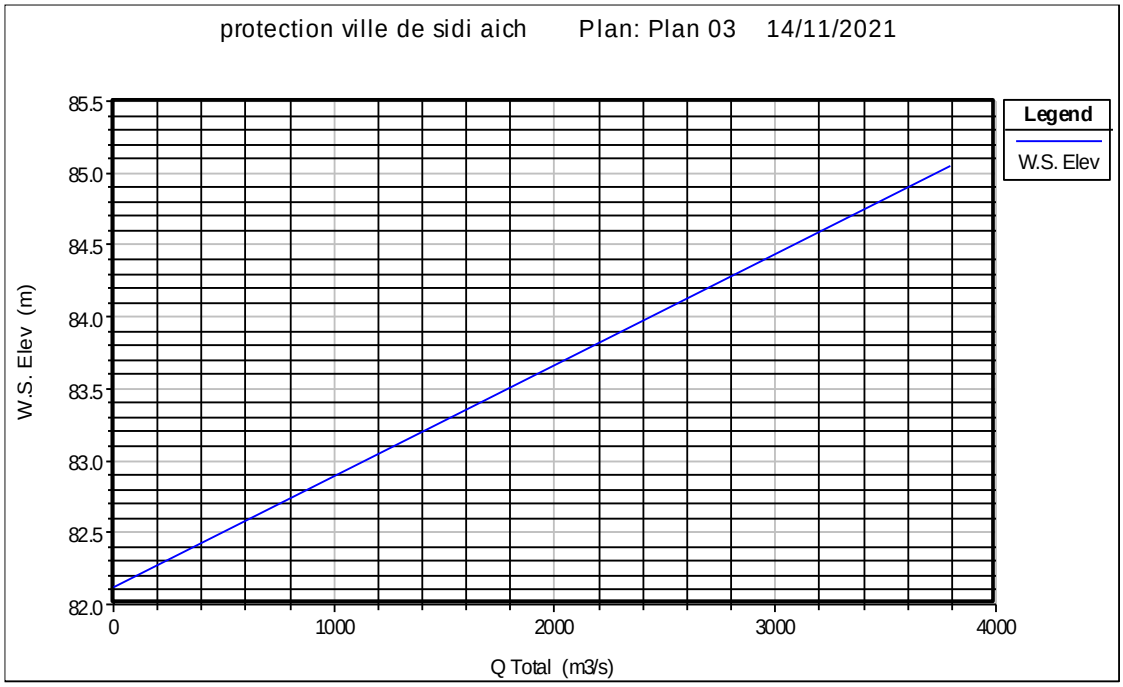


Figure IV. 20: Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued Soummam

✓ **Interprétation :**

L'analyse de l'ensemble des résultats obtenues révèle l'existence de plusieurs points menacés par le débordement des eaux à partir des tronçons étudiés :

- La vitesse d'écoulement varie entre 1.49 m/s et 7.25 m/s.
- La hauteur d'eau qui varie entre 2.93 m et 15.63 m.
- Les valeurs du nombre de Froude variant entre 0.15 et 1.22

✓ **Les zones inondables :**

L'approche hydraulique a donc donné lieu à une cartographie des zones inondables représentées selon leur classe de hauteur d'eau par un dégradé de couleur. Sur cette cartographie figure également les zones de vitesse forte calculées par le logiciel HEC-RAS (voir figure IV-21 et IV-22).

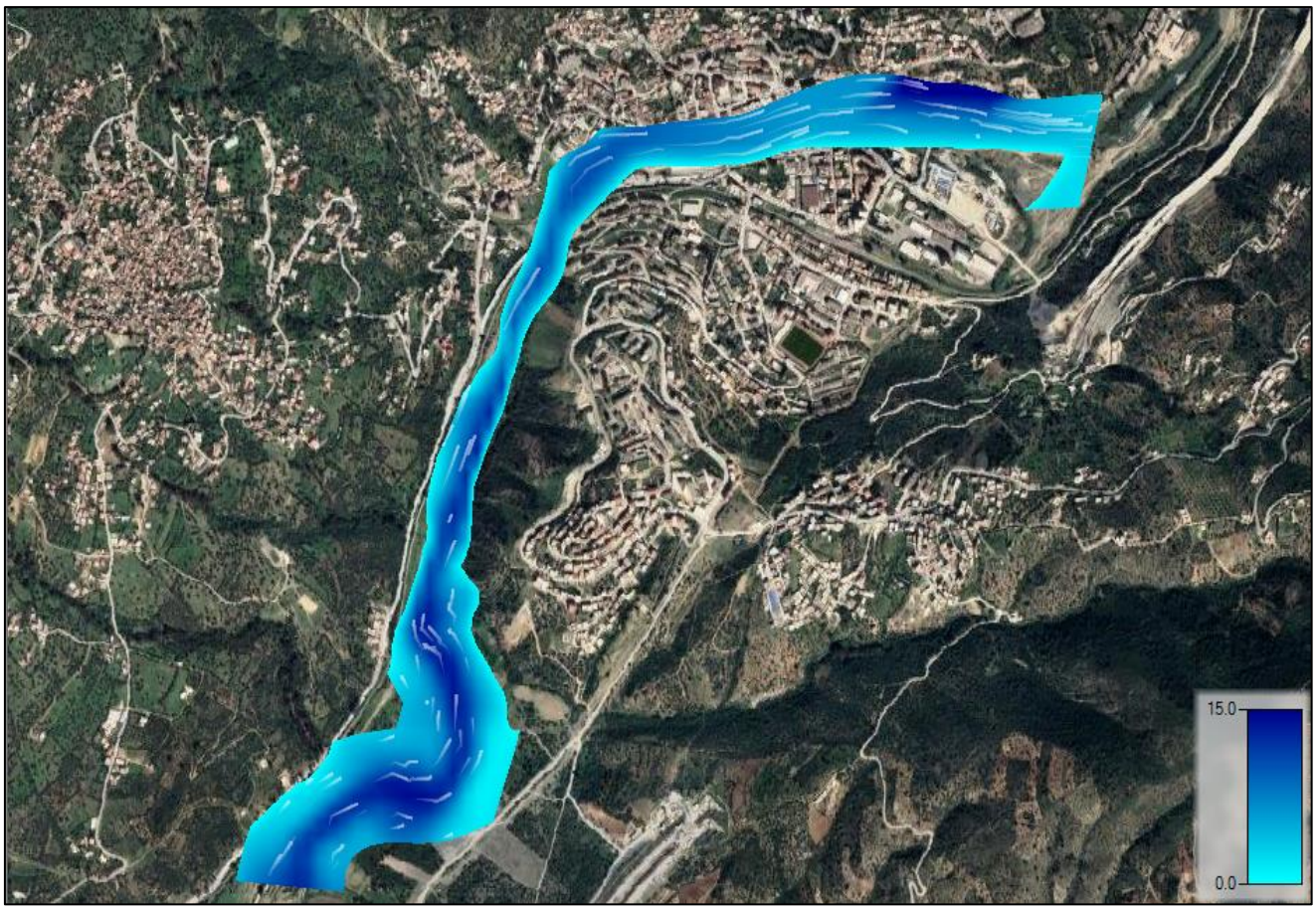


Figure IV. 21: Cartographie des hauteurs d'eau approche hydraulique dans la zone d'étude.

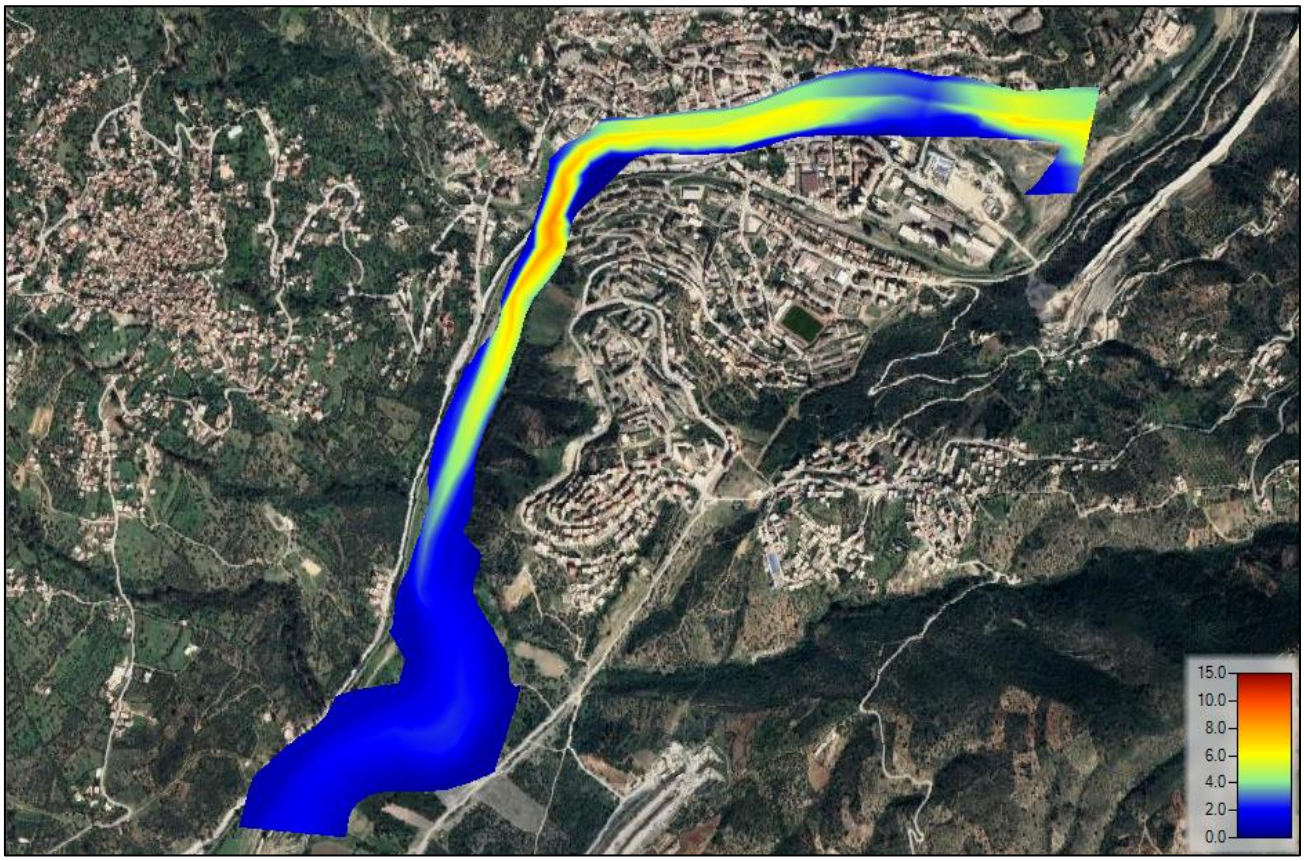


Figure IV. 22: Cartographie des vitesses fortes approche hydraulique dans la zone d'étude

Conclusion :

L'exploitation de débits de pointe obtenu dans une étude hydrologique permet de décrire la propagation des crues dans les tronçons concernés sous différents aspects : hauteur, débit, vitesse... ces informations constituent la base de la délimitation des zones menacées par le risque d'inondation, Pour notre cas, l'études réalisées nous a permis de délimiter les zones inondables au niveau du la ville de sidi aich. Nous avons déterminé les zones menacées fortement au risque d'inondation, Les cartes obtenues ont permis aussi de visualiser la répartition de la profondeur des eaux, ce qui nous aidera à proposer des aménagements adéquats pour protéger la ville contre les inondations.

CHAPITRE V :

ETUDES DES VARIANTES D'AMENAGEMENT

CHAPITRE V : ETUDES DES VARIANTES D'AMENAGEMENT

Introduction :

Les cours d'eau sont des milieux dynamiques évoluant perpétuellement en fonction des caractéristiques physiques et saisonnières. La qualité de vie d'un cours d'eau dépend de nombreux facteurs tels que la vitesse du courant, la sinuosité du lit, le débit, la qualité de la ripisylve, le taux d'oxygène dissous…Ces facteurs peuvent être dégradés ou modifiés, c'est pourquoi les cours d'eau doivent être entretenus ou aménagés afin de maintenir leurs différentes fonctionnalités pour différents usages, et de restaurer leur bon état écologique.

Sans intervention de l'Homme, la richesse des cours d'eau disparait. En effet, les lits des cours d'eau s'encombrent de divers détritus et les berges sont envahies par la végétation. L'envasement prend alors le dessus, les capacités d'écoulement sont réduites et les risques d'inondation augmentent. La qualité écologique diminue, les cours d'eau sont alors moins diversifiés en termes d'espèces (animales et végétales). On entend par « Aménagement hydrauliques », des modifications du lit mineur des rivières telles que les modifications du profil en long et du profil en travers suite à des travaux de rectification de méandres ou de recalibrage, les modifications de tracé de cours d'eau, la création de plans d'eau sur cours, les travaux de curage de cours d'eau …

Dans ce chapitre on va étudier les différentes variantes de protection contre inondation de la ville de sidi aich et choisir la plus efficace à un cout abordable.

V.1 Calcul hydraulique des canaux :

La formule utilisée pour le dimensionnement est celle de Manning Strickler, elle est donnée par la relation suivante :

$$\boldsymbol{Q = \frac{1}{n} \times R_h^{\frac{2}{3}} \times S i^{\frac{1}{2}}}$$

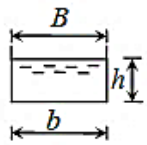
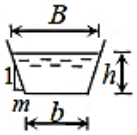
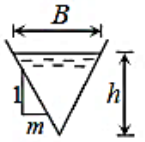
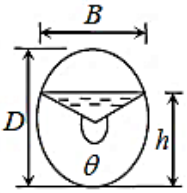
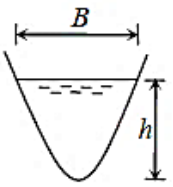
Avec :

Q : Débit de dimensionnement (m^3/s).
n : Rugosité du canal.
S : Section mouillée du canal en (m^2).
P : Périmètre mouillée (m).
I : pente du tronçon de cours d'eau (pente du fond) en (m/m).
R_h : rayon hydraulique en (m) tel que :

$$R_h = \frac{S}{P}$$

Le tableau suivant donne les formules des éléments géométriques pour cinq différents types de section des canaux :

Tableau V. 1: Eléments géométriques pour différentes sections de canaux

					
	Rectangle	Trapèze	Triangle	Cercle	Parabole
Surface A	bh	$(b+mh)h$	mh^2	$\frac{1}{8}(\theta - sin\theta)D^2$	$\frac{2}{3}Bh$
Périmètre mouillé P	$b+2h$	$b+2h\sqrt{1+m^2}$	$2h\sqrt{1+m^2}$	$\frac{1}{2}\theta D$	$B+\frac{8}{3}\frac{h^{2^*}}{B}$
Rayon hydraulique R_h	$\frac{bh}{b+2h}$	$\frac{(b+mh)h}{b+2h\sqrt{1+m^2}}$	$\frac{mh}{2\sqrt{1+m^2}}$	$\frac{1}{4}\left[1-\frac{sin\theta}{\theta}\right]D$	$\frac{2B^2h}{3B^2+8h^2}^*$
Largeur B	b	$b+2mh$	$2mh$	$(sin\,\theta/2)D$ ou $2\sqrt{h(D-h)}$	$\frac{3}{2}\frac{A}{h}$
Profondeur hydraulique H_h	h	$\frac{(b+mh)h}{b+2mh}$	$\frac{1}{2}h$	$\left[\frac{\theta - sin\theta}{sin\,\theta/2}\right]\frac{D}{8}$	$\frac{2}{3}h$

V.2 Les démarches de dimensionnement :

V.2.1 Etat de l'oued avant l'aménagement :

- → L'oued Soummam travers la ville de sidi aich sur une longueur de 6.40 km avec une pente moyenne de 0,237%.
- → En amont un rétrécissement d'oued Soummam, une érosion importante accompagnée d'un affouillement des berges.
- → La largeur maximale du canal varie entre 70 m et 140 m (plan de situation de la ville).
- → La vitesse d'écoulement varie entre 1.49 m/s et 7.25 m/s (résultat de simulation par HECRAS).
- → La hauteur d'eau qui varie entre 2.93 m et 15.63 m (résultat de simulation par HECRAS).
- → Les valeurs du nombre de Froude variant entre 0.15 et 1.22 (résultat de simulation par HECRAS)

V.2.2 Proposition pour l'aménagement du cours d'eau :

Après avoir pris en considération état de l'oued déjà cités, et choisi d'aménager le cours d'eau, il faut maintenant choisir l'aménagement adéquat pour atteindre un but qui peut être la protection des berges.

- ✓ L'aménagement du canal sera fait après curage de l'oued, et nettoyage de ses déchets, le canal prévu sera de forme trapézoïdale ou rectangulaire.
- ✓ Changer-le tracé du cours d'eau afin de réduire la longueur du cours d'eau (3908m) ce qui implique :
  - Augmentation pente moyenne à 0.343%.
  - Augmentation de la vitesse et la diminution de la section.
- ✓ Pour remédier aux problèmes d'érosion, il faut un recalibrage et reprofilage d'Oued Soummam et protection des berges par enrochements ou mur en gabionnage jusqu'au lit majeur afin de protéger les infrastructures existantes.
- ✓ En proposée trois types d'aménagement qui pouvant supporter une grande vitesse d'écoulement et au même temps une petite valeur de coefficient de Manning moyenne qui sont :
  - Un canal trapézoïdal en béton armée.
  - Un canal rectangulaire en béton armée.
  - Un canal mixte (la partie qui traverse la ville sera un canal rectangulaire en béton armé et l'autre partie sera un canal en enrochement).
- ✓ Pour les ponts passerelle en charpente métallique, ne peut pas faire aucun type d'aménagement, sauf l'aménagement en béton armée
- ✓ L'exécution des calculs hydrauliques ont été effectuée sous le logiciel FlowMaster, la fenêtre principale pour les calculs hydrauliques est présentée comme suit :

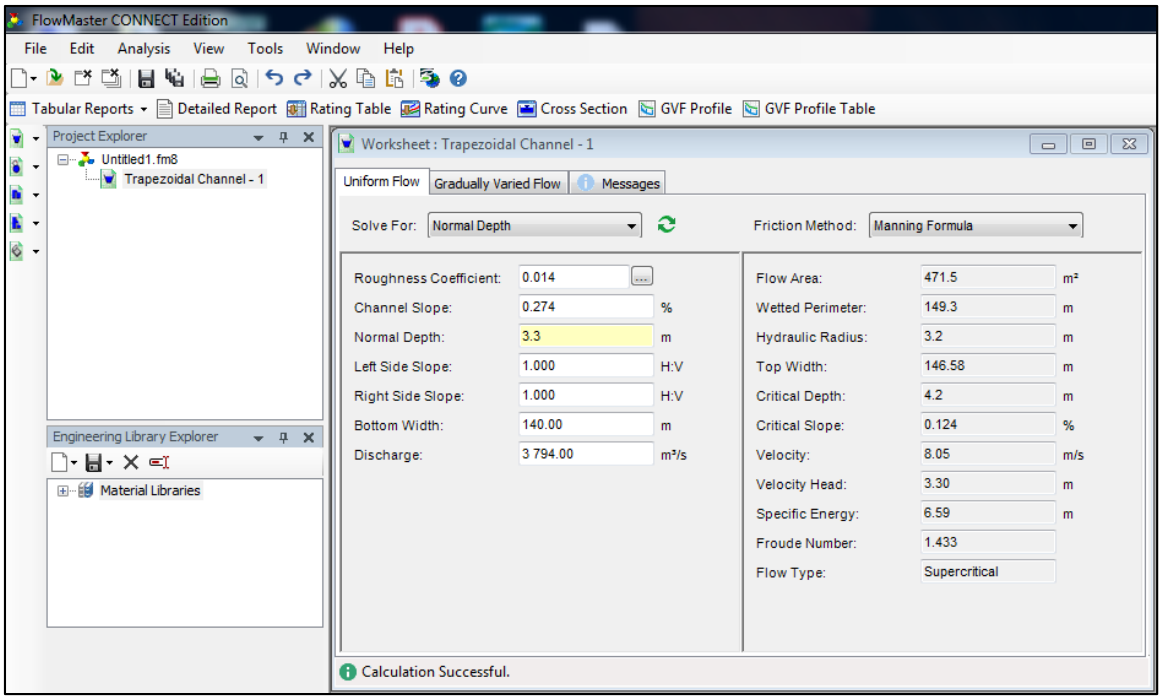


Figure V. 1: Fenêtre principale du logiciel FlowMaster.

V.3 Choix des paramètres de dimensionnement

V.3.1 La pente du projet

Le choix de la pente du projet relève d'une grande importance avant de procéder au calcul hydraulique, telle que doit être la vitesse de l'eau assure un débit suffisent sans entraîner érosion du canal.

Dans les conditions normales, la pente longitudinale d'un canal varie 1/10 000 (10cm/1km) a 1/100(10m/1km).

Dans notre cas, nous allons choisir la pente moyenne de chaque tronçon, de telle sorte nous maintenons la pente moyenne du cours d'eau est presque constent (i=0.343 %).

V.3.2 Le coefficient de rugosité :

Tableau V. 2: Valeurs de coefficient de rugosité (Table de rugosité de Manning)

Caractéristiques du lit ou du revêtement	***Valeur de la rugosité « n »***
Canal en gabion	*0.030*
Canal en pierres sèches	*0.025*
Canal en terre droit et uniforme	*0.017*
Canal à revêtement en béton	*0.014*

V.3.3 Revanche des canaux (marge de sécurité) :

On préfère toujours ajouter une revanche aux tirants d'eau dans les canaux à surface libre afin de tenir compte de l'accumulation de dépôt solide, de croissance de la végétation, La marge de sécurité varie généralement, entre 0,30 m pour les petits canaux, et 0.60 à 1.20 m pour les grands canaux.

V.3.4 La vitesse d'érosion :

Afin éviter les ruptures du fond et des berges des canaux sur l'action dynamique d'un courant d'eau, la vitesse de celui-ci ne doit pas être supérieure à la vitesse limite maximale. Les valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolides sont données dans le tableau ci-dessous (Degoutte, 2012).

Tableau V. 3: Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés (Degoutte, 2012)

Lit	Vitesse (m/s)
Pavage de pierre à une couche	***2.50 - 4.00***
Gabions	***4.00 - 6.00***
Revêtement en béton	***6.00 - 10.00***
Béton amélioré	***<10.00***

V.4 Etude des variantes d'aménagement de l'oued :

V.4.1 Canal trapézoïdal en béton armé :

La section trapèze est la section la plus utilisée dans les canaux de protection contre les inondations grâce aux nombreux avantages techniques qu'elle présente.

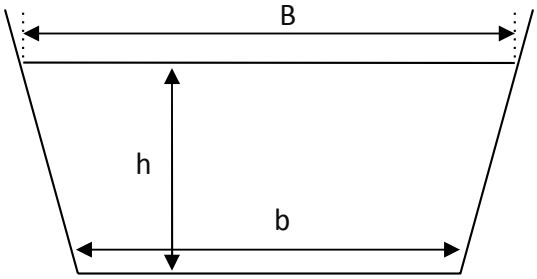


Figure V. 2: canal trapézoïdale

V.4.1.1 Dimensionnement

Les dimensions des canaux trapézoïdaux en béton armés de chaque tronçon sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau V. 4: Dimensionnement de l'aménagement (Canal trapézoïdal en béton armé).

Tronçon	*Section de départ*	*Section d'arrivée*	*Longueur (m)*	*Pente (%)*	*Largeur du fond (m)*	*Hauteur du canal (m)*	*Fruit de talus (m)*	*Valeur de « n »*
1	*5679*	*5078*	*600.60*	*0.274%*	*120*	*4.10*	*1*	*0.014*
2	*5078*	*4680*	*397.90*	*0.194%*	*120*	*4.50*	*1*	*0.014*
3	*4680*	*4078*	*602.10*	*0.119%*	*100*	*5.70*	*1*	*0.014*
4	*4078*	*3476*	*602.30*	*0.250%*	*100*	*4.60*	*1*	*0.014*
5	*3476*	*3108*	*367.70*	*0.440%*	*80*	*4.50*	*1*	*0.014*
6	*3108*	*2876*	*232.60*	*0.289%*	*80*	*5.00*	*1*	*0.014*
7	*2876*	*2576*	*300.30*	*0.644%*	*70*	*4.40*	*1*	*0.014*
8	*2576*	*2300*	*276.50*	*0.467%*	*70*	*4.80*	*1*	*0.014*
9	*2300*	*1972*	*328.00*	*0.376%*	*100*	*4.20*	*1*	*0.014*
10	*1972*	*1772*	*200.40*	*0.721%*	*100*	*3.50*	*1*	*0.014*

V.4.1.2 Les paramètres d'écoulement :

Les résultats de la simulation sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V. 5: Paramètres d'écoulement de la variante (canal trapézoïdal en béton armé).

Tronçon	*Débit (m^3/s)*	*Vitesse (m/s)*	*Tiran d'eau (m)*	*Section mouillée (m^2)*	*Périmètre mouillé (m)*	*Rayon hydraulique (m)*	*Froude*	*Régime*
1	*3794*	*5.01*	*3.60*	*444.96*	*130.18*	*3.42*	*1.14*	*Torrentiel*
2	*3794*	*6.27*	*4.00*	*496.00*	*131.31*	*3.78*	*1.07*	*Torrentiel*
3	*3794*	*5.77*	*5.20*	*547.04*	*114.71*	*4.77*	*1.80*	*Torrentiel*
4	*3794*	*7.48*	*4.10*	*426.81*	*111.60*	*3.82*	*1.00*	*Torrentiel*
5	*3794*	*10.07*	*4.00*	*336.00*	*91.31*	*3.68*	*1.56*	*Torrentiel*
6	*3794*	*8.69*	*4.50*	*380.25*	*92.73*	*4.10*	*1.42*	*Torrentiel*
7	*3794*	*10.58*	*3.90*	*288.21*	*81.03*	*3.56*	*1.84*	*Torrentiel*
8	*3794*	*11.71*	*4.30*	*319.49*	*82.16*	*3.89*	*2.14*	*Torrentiel*
9	*3794*	*9.90*	*3.70*	*383.69*	*110.47*	*3.47*	*1.73*	*Torrentiel*
10	*3794*	*10.43*	*3.00*	*309.00*	*108.49*	*2.85*	*1.81*	*Torrentiel*

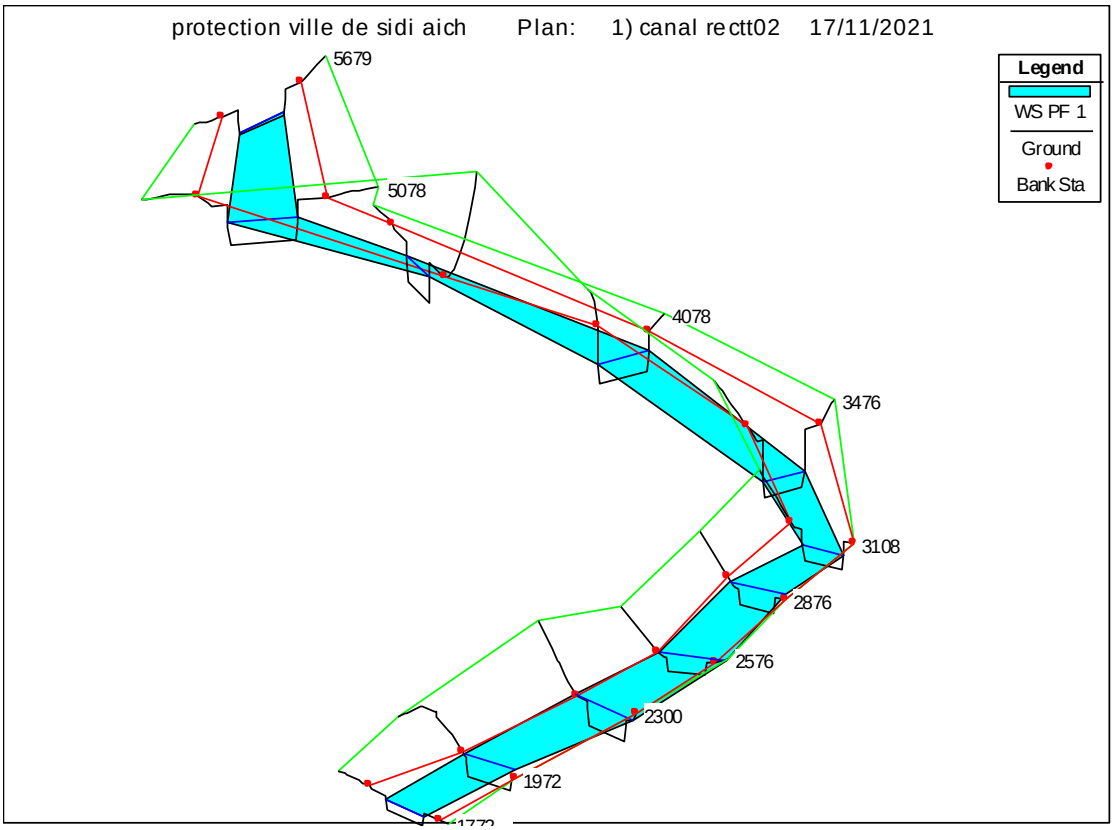


Figure V. 3: Profile en long de l'oued en 2D après l'aménagement

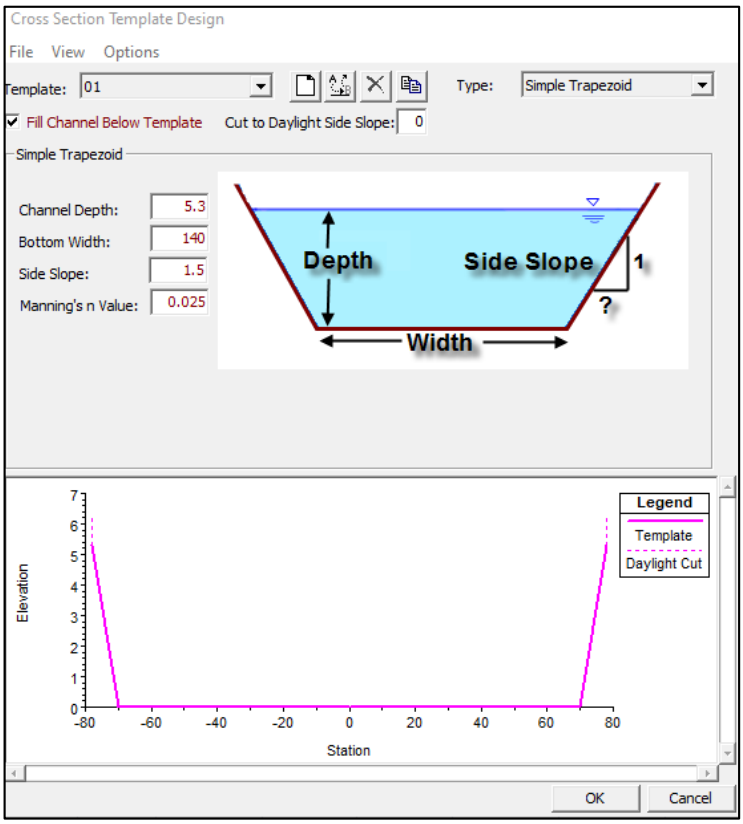
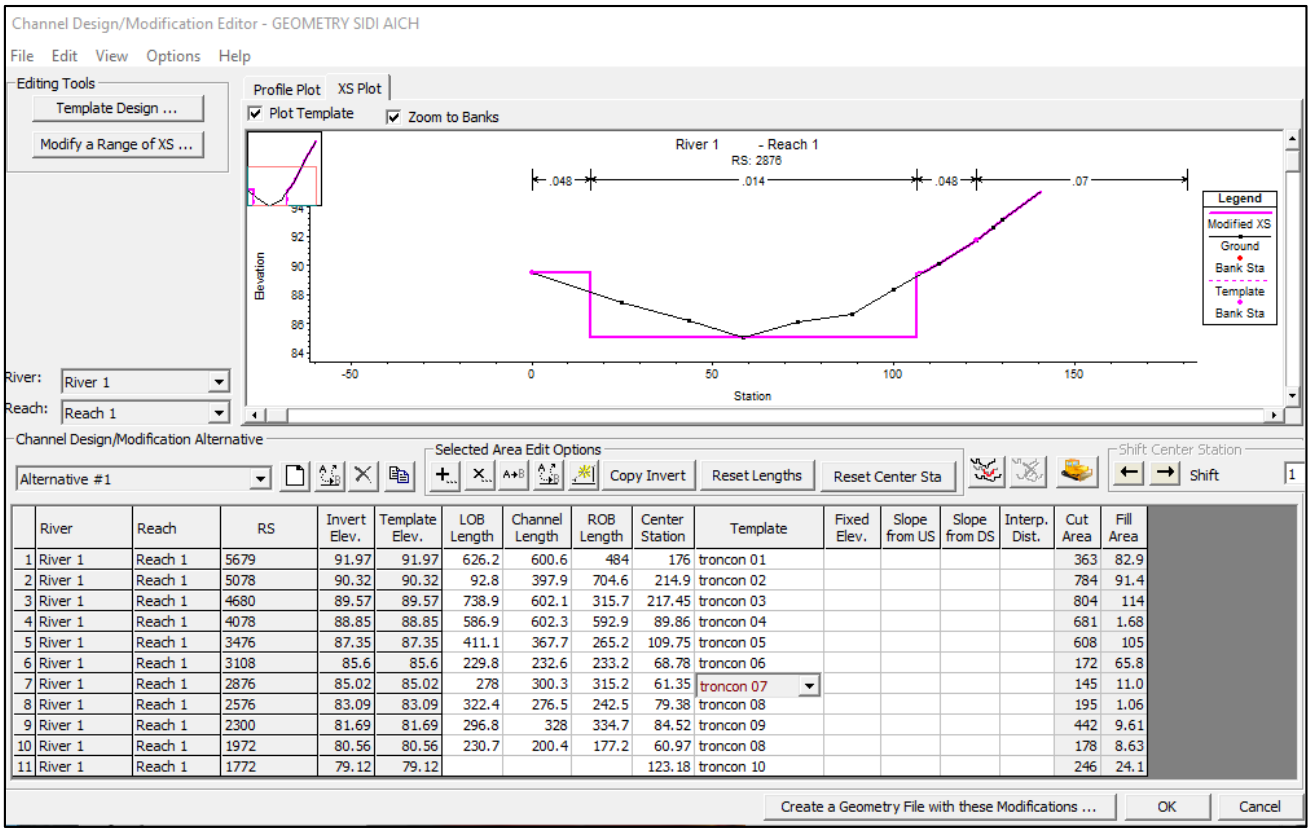


Figure V. 4: Modification de la section en traves par logiciel HEC-RAS



	River	Reach	RS	Invert Elev.	Template Elev.	LOB Length	Channel Length	ROB Length	Center Station	Template	Fixed Elev.	Slope from US	Slope from DS	Interp. Dist.	Cut Area	Fill Area
1	River 1	Reach 1	5679	91.97	91.97	626.2	600.6	484	176	troncon 01					363	82.9
2	River 1	Reach 1	5078	90.32	90.32	92.8	397.9	704.6	214.9	troncon 02					784	91.4
3	River 1	Reach 1	4680	89.57	89.57	738.9	602.1	315.7	217.45	troncon 03					804	114
4	River 1	Reach 1	4078	88.85	88.85	586.9	602.3	592.9	89.86	troncon 04					681	1.68
5	River 1	Reach 1	3476	87.35	87.35	411.1	367.7	265.2	109.75	troncon 05					608	105
6	River 1	Reach 1	3108	85.6	85.6	229.8	232.6	233.2	68.78	troncon 06					172	65.8
7	River 1	Reach 1	2876	85.02	85.02	278	300.3	315.2	61.35	troncon 07					145	11.0
8	River 1	Reach 1	2576	83.09	83.09	322.4	276.5	242.5	79.38	troncon 08					195	1.06
9	River 1	Reach 1	2300	81.69	81.69	296.8	328	334.7	84.52	troncon 09					442	9.61
10	River 1	Reach 1	1972	80.56	80.56	230.7	200.4	177.2	60.97	troncon 08					178	8.63
11	River 1	Reach 1	1772	79.12	79.12				123.18	troncon 10					246	24.1

Figure V. 5: Modification du cours d'eau par logiciel HEC-RAS

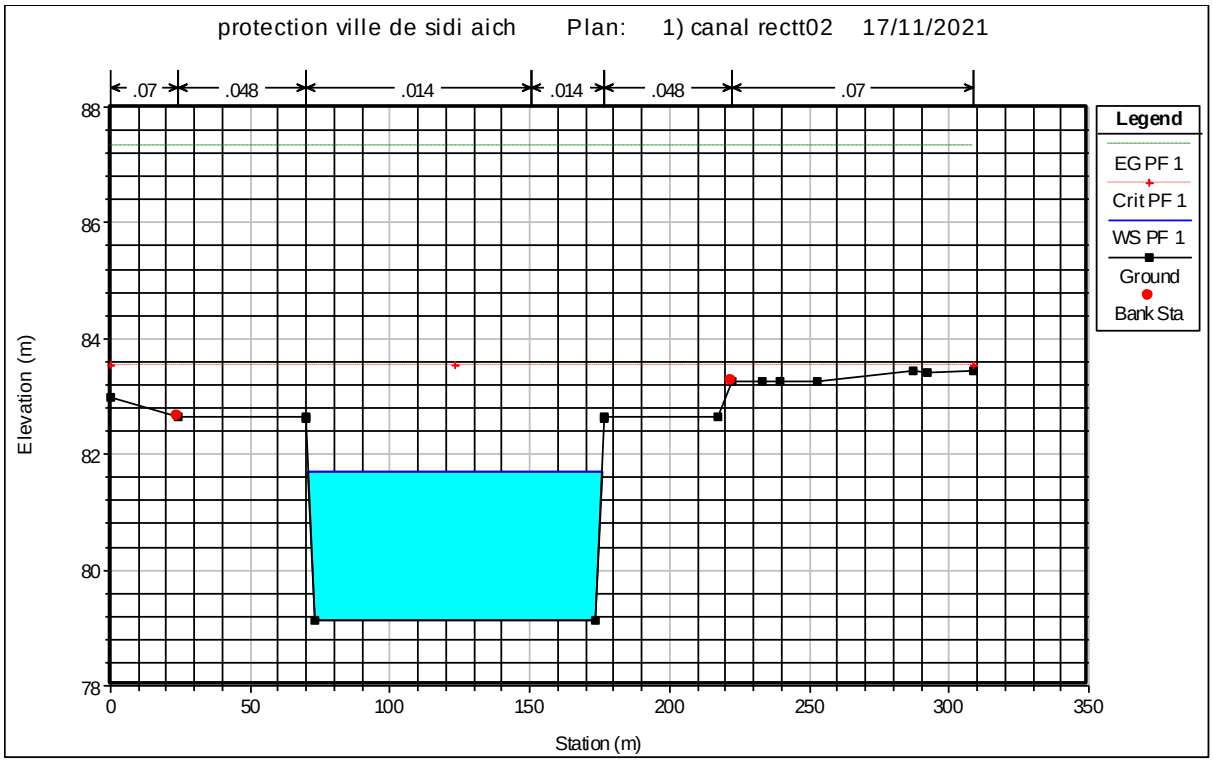


Figure V. 6: Section en travers 1772 (Résultats Hec-Ras pour l'aménagement en béton).

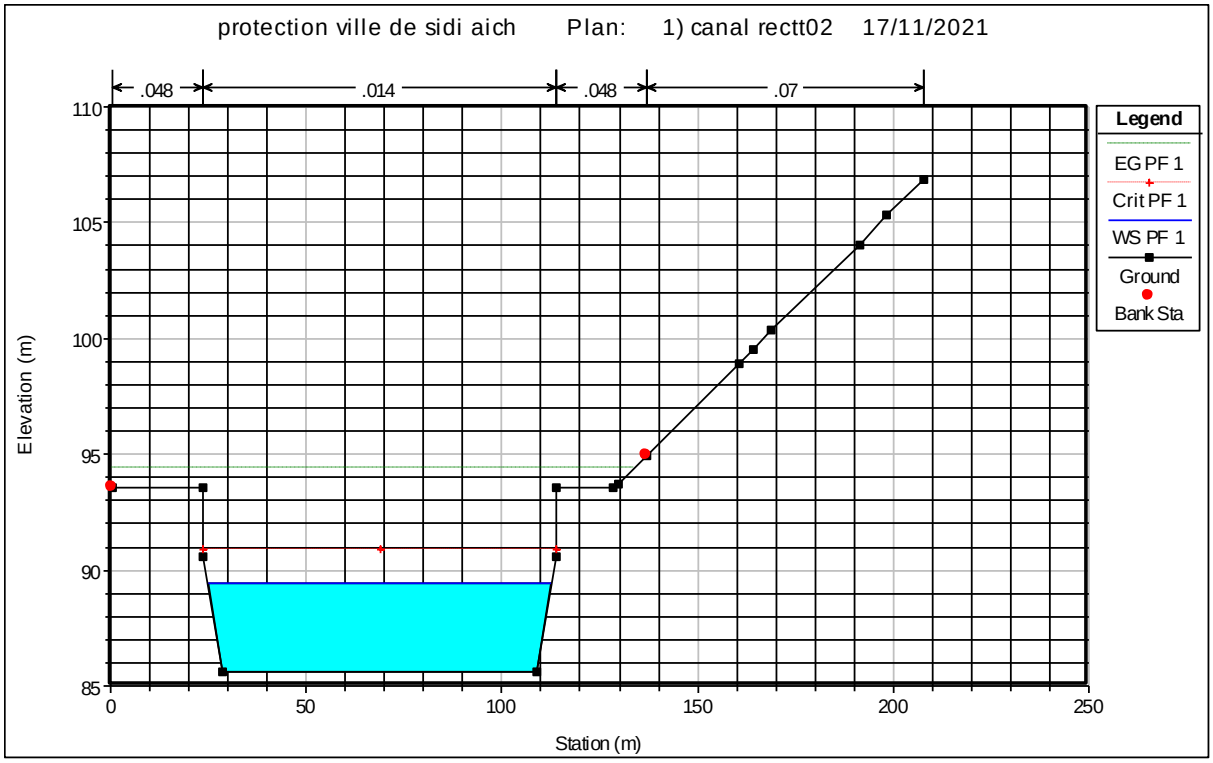


Figure V. 7: Section en travers 3108 (Résultats Hec-Ras pour l'aménagement en béton).

Cross Section for Trapezoidal Channel - 1

Project Description	
Friction Method	Manning Formula
Solve For	Normal Depth

Input Data	
Roughness Coefficient	0.014
Channel Slope	0.274
Normal Depth	3.3
Left Side Slope	1.000
Right Side Slope	1.000
Bottom Width	140.00
Discharge	3 794.00

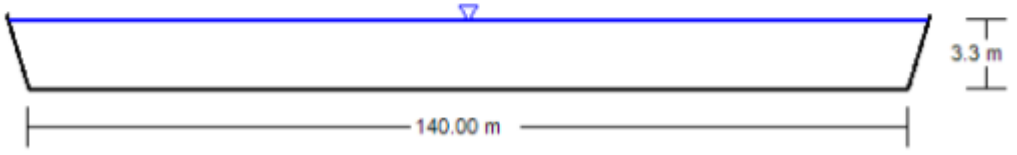


Figure V. 8: Résultats données par logiciel FlowMaster pour l'aménagement en béton).

V.4.1.3 Estimation du coût de la variante :

On opte pour une épaisseur de 15 cm pour le béton armé, pour le béton de propreté on prend une épaisseur de 10cm. Le tableau suivant résume les coûts de la variante :

Tableau V. 6: Devis de la variante (canal trapézoïdal en béton armé).

Désignation des travaux	*Unité*	*Quantité*	*Prix Unitaire (DA)*	*Montant (DA)*
Terrassement en grande masse y/c nettoyage et curage de l'oued	***m^3***	*812848.77*	*200.00*	*162 569 754.10*
Evacuation des terres excédentaires à la décharge publique distance ≤ à 5 km	***m^3***	*541899.1803*	*300.00*	*162 569 754.10*
Couche de béton de propreté ép= 10cm	***m^3***	*43241.3753*	*6000.00*	*259 448 251.80*
Réalisation d'une couche de béton dosé a 350 kg/M3 y compris coffrage et ferraillage	***m^3***	*64862.06295*	*32000.00*	*2 075 586 014.39*
Montant total				**2 660 173 774.39**

V.4.2 Canal rectangulaire :

L'aménagement consiste en une projection d'un canal de forme rectangulaire couvert en béton armé.

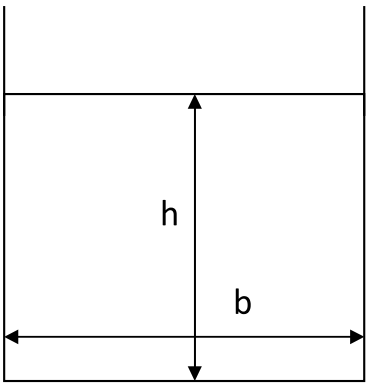


Figure V. 9: canal rectangulaire

V.4.2.1 Dimensionnement

Les dimensions des canaux trapézoïdaux en béton armés de chaque tronçon sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau V. 7: Dimensionnement de l'aménagement (Canal rectangulaire en béton armé

Tronçon	*Section de départ*	*Section d'arrivée*	*Longueur (m)*	*Pente (%)*	*Largeur du fond (m)*	*Hauteur du canal (m)*	*Valeur de « n »*
1	*5679*	*5078*	*600.60*	*0.274%*	*140*	*3.80*	*0.014*
2	*5078*	*4680*	*397.90*	*0.194%*	*140*	*4.20*	*0.014*
3	*4680*	*4078*	*602.10*	*0.119%*	*140*	*4.80*	*0.014*
4	*4078*	*3476*	*602.30*	*0.250%*	*100*	*4.80*	*0.014*
5	*3476*	*3108*	*367.70*	*0.440%*	*100*	*4.10*	*0.014*
6	*3108*	*2876*	*232.60*	*0.289%*	*100*	*4.60*	*0.014*
7	*2876*	*2576*	*300.30*	*0.644%*	*90*	*3.90*	*0.014*
8	*2576*	*2300*	*276.50*	*0.467%*	*90*	*4.30*	*0.014*
9	*2300*	*1972*	*328.00*	*0.376%*	*140*	*3.50*	*0.014*
10	*1972*	*1772*	*200.40*	*0.721%*	*140*	*3.00*	*0.014*

V.4.2.2 Les paramètres d'écoulement :

Les résultats de la simulation sont présentés dans le tableau ci-dessous

Tableau V. 8: Paramètres d'écoulement de la variante (canal rectangulaire en béton armé).

Tronçon	*Débit (m^3/s)*	*Vitesse (m/s)*	*Tiran d'eau (m)*	*Section mouillée (m^2)*	*Périmètre mouillé (m)*	*Rayon hydraulique (m)*	*Froude*	*Régime*
1	*3794*	*8.92*	*3.30*	*462.00*	*146.6*	*3.15*	*1.57*	*Torrentiel*
2	*3794*	*6.93*	*3.70*	*518.00*	*147.4*	*3.51*	*1.15*	*Torrentiel*
3	*3794*	*7.20*	*4.30*	*602.00*	*148.6*	*4.05*	*1.00*	*Torrentiel*
4	*3794*	*8.80*	*4.30*	*430.00*	*108.6*	*3.96*	*1.35*	*Torrentiel*
5	*3794*	*9.91*	*3.60*	*360.00*	*107.2*	*3.36*	*1.62*	*Torrentiel*
6	*3794*	*6.85*	*4.10*	*410.00*	*108.2*	*3.79*	*1.01*	*Torrentiel*
7	*3794*	*8.88*	*3.40*	*306.00*	*96.8*	*3.16*	*1.42*	*Torrentiel*
8	*3794*	*6.63*	*3.80*	*342.00*	*97.6*	*3.50*	*1.09*	*Torrentiel*
9	*3794*	*6.82*	*3.00*	*420.00*	*146*	*2.88*	*1.00*	*Torrentiel*
10	*3794*	*9.50*	*2.50*	*350.00*	*145*	*2.41*	*1.89*	*Torrentiel*

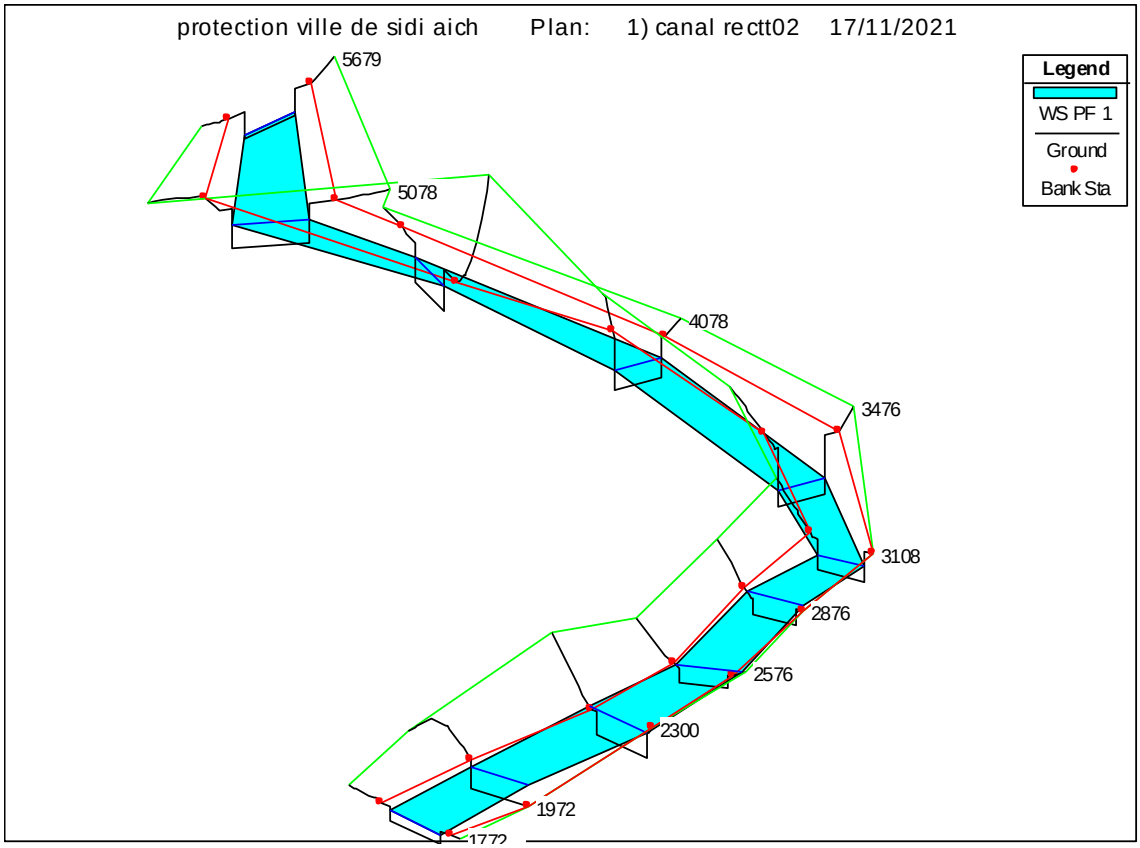


Figure V. 10: Profile en long de l'oued en 2D après l'aménagement

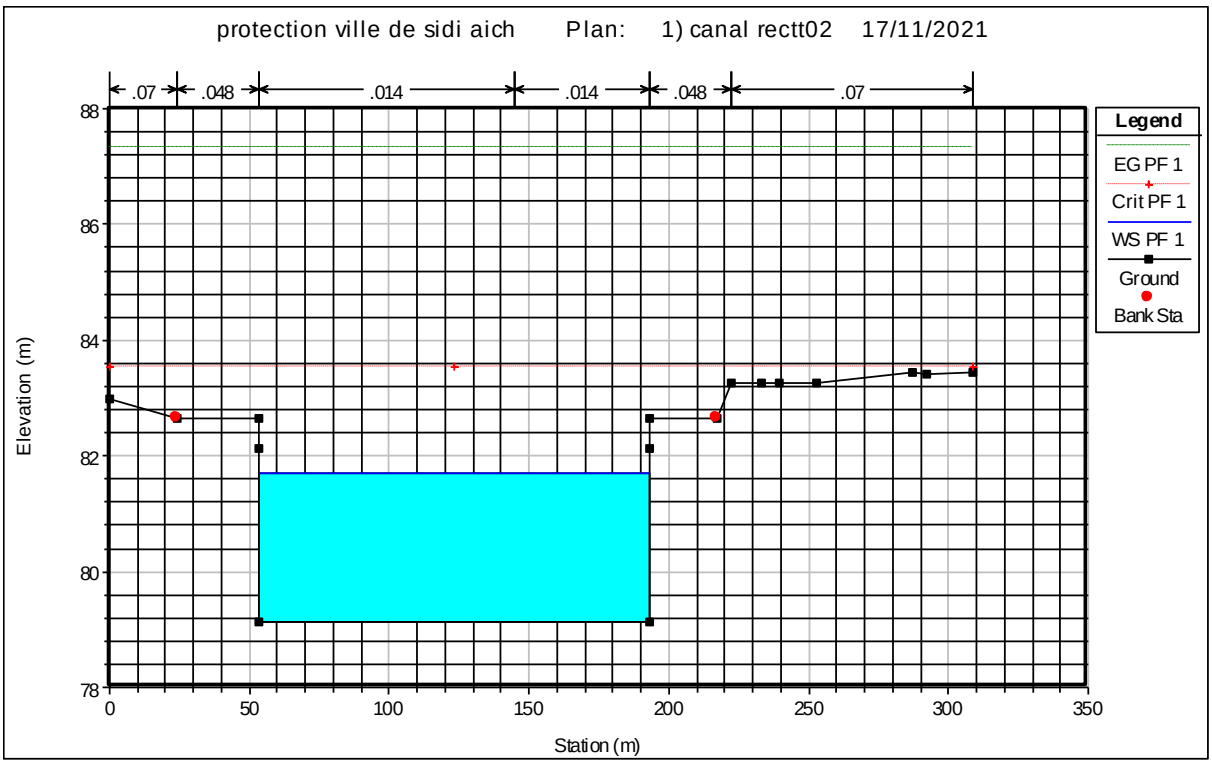


Figure V. 11: Section en travers 1772 (Résultats Hec-Ras pour l'aménagement en béton).

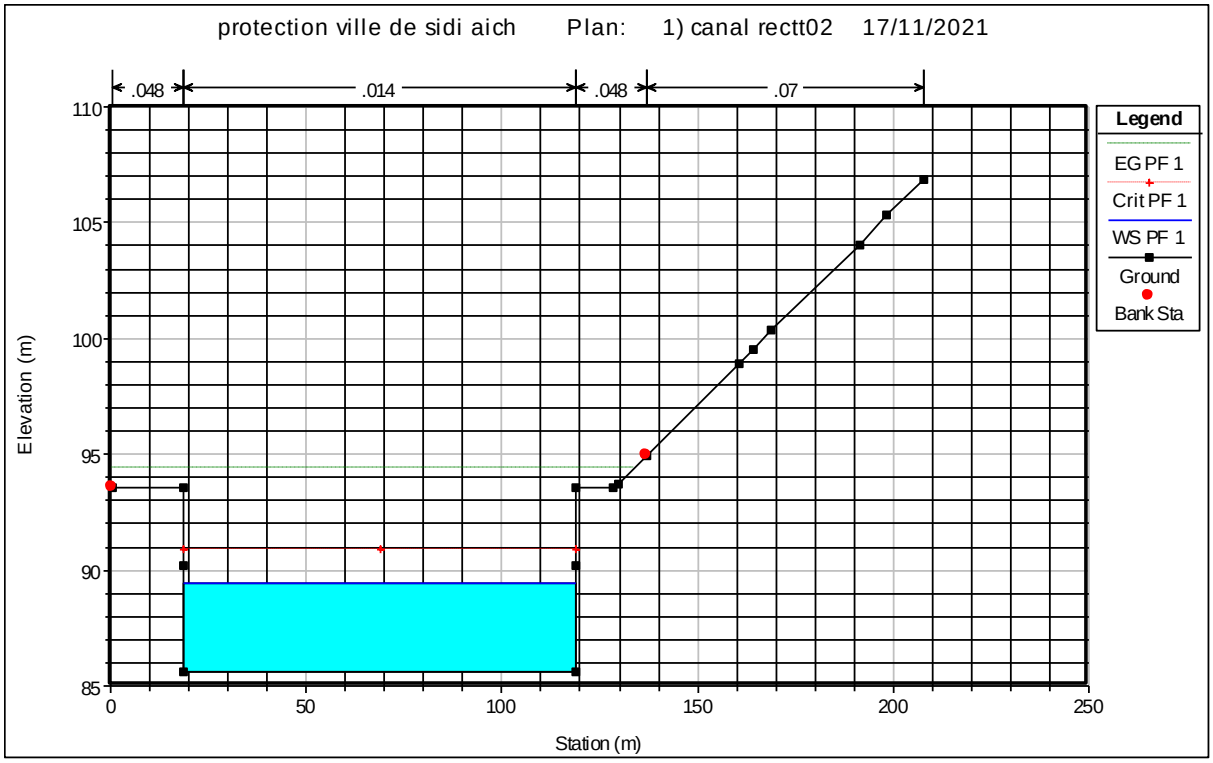


Figure V. 12: Section en travers 3108 (Résultats Hec-Ras pour l'aménagement en béton).

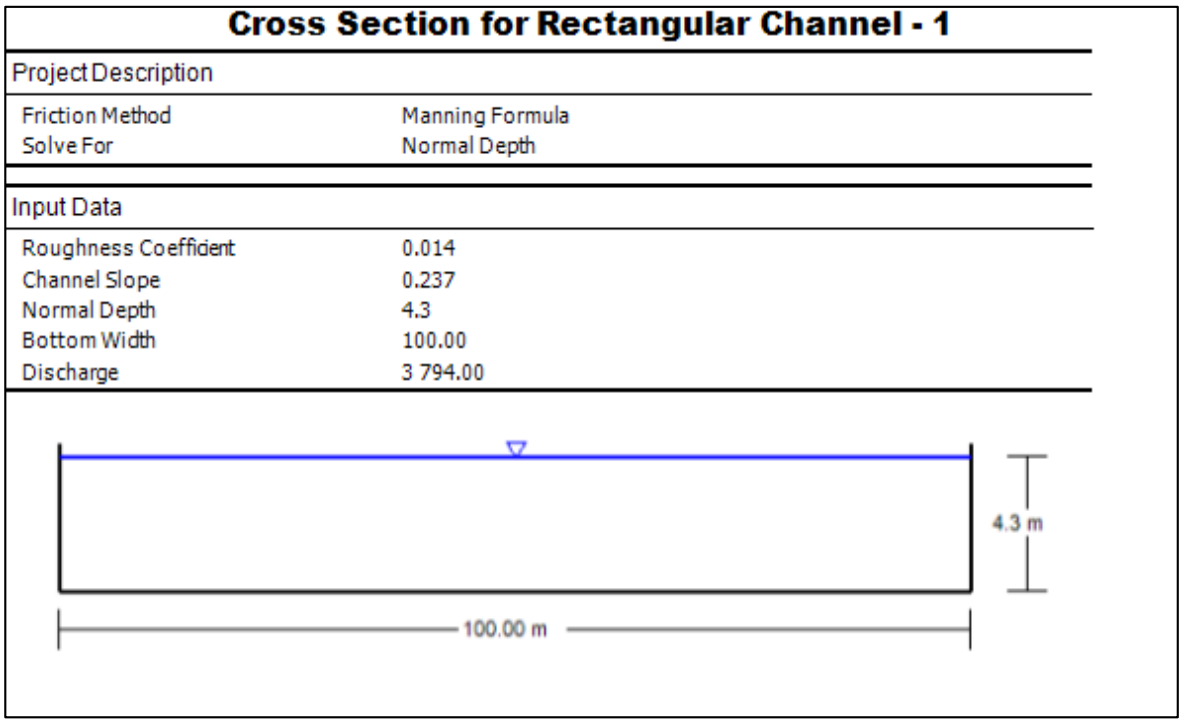


Figure V. 13: Résultats données par logiciel FlowMaster pour l'aménagement en béton).

V.4.2.3 Estimation du coût de la variante :

On opte pour une épaisseur de 15 cm pour le béton armé, pour le béton de propreté on prend une épaisseur de 10cm. Le tableau suivant résume les coûts de la variante :

Tableau V. 9: Devis de la variante (canal rectangulaire en béton armé).

Désignation des travaux	*Unité*	*Quantité*	*Prix Unitaire (DA)*	*Montant (DA)*
Terrassement en grande masse y/c nettoyage et curage de l'oued	m^3	*863567.7*	*200.00*	*172 713 540.00*
Evacuation des terres excédentaires à la décharge publique distance ≤ à 5 km	m^3	*575711.80*	*300.00*	*172 713 540.00*
Couche de béton de propreté ép= 10cm	m^3	*50307.4860*	*6000.00*	*301 844 916.00*
Réalisation d'une couche de béton dosé a 350 kg/M3 y compris coffrage et ferraillage	m^3	*75461.229*	*32000.00*	*2 414 759 328.00*
Montant total				***3 062 031 324.00***

V.4.3 Canal mixte :

Cette variante se compose de deux parties. La partie qui traverse la ville sera un canal rectangulaire en béton armé et l'autre partie sera un canal en enrochement qui consiste à stabiliser les berges (et le fond) par un empilement d'enrochement de carrière avec un fruit des talus assez faible de l'ordre de 1.5/1 afin de garantir une stabilité et faciliter la pose, l'épaisseur de la protection est au moins égale à 50 cm pour des raisons pratique de mise en œuvre.

V.4.3.1 Dimensionnement :

Les dimensions de chaque tronçon sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau V. 10: Dimensionnement de l'aménagement (Canal mixte).

Tronçon	*Section de départ*	*Section d'arrivée*	*Longueur (m)*	*Pente (%)*	*Largeur du fond (m)*	*Hauteur du canal (m)*	*Fruit de talus (m)*	*Valeur de « n »*
1	*5679*	*5078*	*600.60*	*0.274%*	*140*	*5.30*	*1.5*	*0.025*
2	*5078*	*4680*	*397.90*	*0.194%*	*140*	*5.10*	*1.5*	*0.025*
3	*4680*	*4078*	*602.10*	*0.119%*	*140*	*5.90*	*1.5*	*0.025*
4	*4078*	*3476*	*602.30*	*0.250%*	*140*	*4.80*	*1.5*	*0.025*
5	*3476*	*3108*	*367.70*	*0.440%*	*100*	*3.60*	*-*	*0.014*
6	*3108*	*2876*	*232.60*	*0.289%*	*100*	*4.10*	*-*	*0.014*
7	*2876*	*2576*	*300.30*	*0.644%*	*90*	*3.40*	*-*	*0.014*
8	*2576*	*2300*	*276.50*	*0.467%*	*90*	*3.80*	*-*	*0.014*
9	*2300*	*1972*	*328.00*	*0.376%*	*140*	*3.00*	*-*	*0.014*
10	*1972*	*1772*	*200.40*	*0.721%*	*140*	*2.50*	*-*	*0.014*

V.4.3.2 Les paramètres d'écoulement :

Les résultats de la simulation sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V. 11: Paramètres d'écoulement de la variante (canal mixte).

Tronçon	*Débit (m^3/s)*	*Vitesse (m/s)*	*Tiran d'eau (m)*	*Section mouillée (m^2)*	*Périmètre mouillé (m)*	*Rayon hydraulique (m)*	*Froude*	*Régime*
1	*3794*	*8.50*	*5.3*	*784.14*	*159.11*	*4.93*	*1.18*	*Torrentiel*
2	*3794*	*7.21*	*5.1*	*753.02*	*158.39*	*4.75*	*1.02*	*Torrentiel*
3	*3794*	*9.81*	*5.9*	*878.22*	*161.27*	*5.45*	*1.29*	*Torrentiel*
4	*3794*	*6.86*	*4.8*	*706.56*	*157.31*	*4.49*	*1.00*	*Torrentiel*
5	*3794*	*9.98*	*3.6*	*360*	*107.2*	*3.36*	*1.68*	*Torrentiel*
6	*3794*	*6.34*	*4.1*	*410*	*108.2*	*3.79*	*1.00*	*Torrentiel*
7	*3794*	*6.41*	*3.4*	*306*	*96.8*	*3.16*	*1.11*	*Torrentiel*
8	*3794*	*8.60*	*3.8*	*342*	*97.6*	*3.5*	*1.41*	*Torrentiel*
9	*3794*	*5.42*	*3*	*420*	*146*	*2.88*	*1.00*	*Torrentiel*
10	*3794*	*9.60*	*2.5*	*350*	*145*	*2.41*	*1.94*	*Torrentiel*

V.4.3.3 Estimation du coût de la variante :

On opte pour une épaisseur de 15 cm pour le béton armé, pour le béton de propreté on prend une épaisseur de 10cm. Le tableau suivant résume les coûts de la variante :

Tableau V. 12: Devis de la variante (canal mixte).

Désignation des travaux	*Unité*	*Quantité*	*Prix Unitaire (DA)*	*Montant (DA)*
Terrassement en grande masse y/c nettoyage et curage de l'oued	*m^3*	*1173501.645*	*200.00*	*234 700 328.90*
Evacuation des terres excédentaires à la décharge publique distance ≤ à 5 km	*m^3*	*782334.4297*	*300.00*	*234 700 328.90*
Couche de béton de propreté ép. = 10cm	*m^3*	*19758.6200*	*6000.00*	*118 551 720.00*
Réalisation d'une couche de béton dosé a 350 kg/M3 y compris coffrage et ferraillage,	*m^3*	*29637.93*	*32000.00*	*948 413 760.00*
Fourniture et mise en place d'une couche d'enrochement y/compris compactage et arrosage des terres naturel	*m^3*	*122651.1808*	*4000.00*	*490 604 723.16*
Fourniture et pose de la Géotextile	*ml*	*2202.90*	*1100*	*2 423 190.00*
Montant total				***2 029 394 050.96***

V.5 Choix de la variante de l'aménagement :

V.5.1 Critère d'évaluation :

Le choix de la variante va se faire selon plusieurs critères :

- Efficacité hydraulique : correspond au potentiel d'amélioration de la capacité hydraulique que peuvent apporter les mesures.
- Difficultés de réalisation : correspond au degré de difficulté de la réalisation technique.
- Enjeux environnementaux : ce critère tient compte de l'utilisation du sol au voisinage (zone urbaine, agricole,) et des déficits ou richesses environnementaux actuelles.
- Durabilité : correspond à la durée de vie de l'aménagement.
- Entretien : correspond à l'ampleur et à la fréquence des entretiens nécessaires.
- Coût : correspond à l'appréciation du coût de construction.

V.5.2 Le choix de la variante :

Les trois variantes semblent pouvoir évacuer le débit de crue sans débordement mais d'un point de vue financier, les deux variantes : canal en béton armé (trapézoïdal et rectangulaire) seraient rejetées car le coût est plus élevé, donc la projection d'un canal mixte parait plus économique.



Figure V. 14: Carte des inondations après la projection du canal mixte (HEC-RAS).

Conclusion :

Au cours de ce chapitre, trois variables ont été proposées pour la protection de la ville de sidi aich contre les inondations. Par la suite, une étude technico-économique a été élaborée pour le choix le plus convenable.

Le choix final consiste principalement à la projection d'un canal mixte. Un canal en béton est projeté dans la zone urbaine. En dehors de cette zone, un canal en enrochement est conçu pour protéger les traversées de routes.

CHAPITRE VI : ORGANISATION DE CHANTIER

CHAPITRE VI : ORGANISATION DE CHANTIER

Introduction :

L'organisation d'un chantier est l'ensemble des dispositions envisagées pour l'exécution dans les meilleures conditions possibles d'un travail pour abaisser les coûts de productions en favorisant à l'homme et à la machine un contexte favorable de façon à accroître la productivité. Pour cela il faut toujours commencer par une étude théorique et ensuite la partie pratique. Dans la première on détermine le temps de réalisation avec précision, le matériel à utiliser, la main d'ouvre nécessaire et les matériaux de construction nécessaires. Dans la deuxième partie on passe à l'exécution des travaux sur terrain. Donc en vue de la bonne organisation d'un travail, on cherche à le rendre plus économique, de bonne qualité et les délais les plus brefs possibles.

VI.1 Organisation de chantier :

VI.1.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur le chantier :

Il nous parait indispensable de rappeler les rôles des différentes personnes amenées à intervenir dans l'acte de construction.

VI.1.1.1 Le maitre de l'ouvrage :

C'est une personne physique ou morale pour laquelle s'exécutent les travaux, il définit le but à atteindre, organise toutes les opérations d'investissement, choisit le maitre d'œuvre et les BET, assure le suivi et le contrôle des travaux, et finance les travaux réalisés.

VI.1.1.2 Le maitre d'œuvre :

C'est une personne physique ou morale, chargée par le maître de l'ouvrage de recevoir l'ouvrage, d'établir le dossier de consultation des entreprises, d'assister le maître d'ouvrage dans le dépouillement des offres, de contrôler l'exécution des travaux et de proposer leur réception et leur règlement, après en avoir établi le décompte.

VI.1.1.3 L'entrepreneur

Personne physique ou morale, titulaire d'un marché de travaux conclu avec le maître d'ouvrage, chargée de l'exécution des travaux et, parfois, de la conception détaillée des ouvrages. L'entrepreneur est responsable du chantier et de l'ouvrage en cours de construction tant que celui-ci n'a pas été réceptionné.

VI.1.2 Exécution des travaux :

Les principales opérations à exécuter dans notre projet :

- Installation du chantier.
- Décapage de la terre végétale et ouverture de piste.
- Excavation de la tranchée.
- Compactage.

- Mise en œuvre de gabion.
- Le bétonnage.
- Déménagement du chantier.

VI.1.3 Les moyens de chantier :

VI.1.3.1 Les moyens humains :

On doit justifier la mise en œuvre du personnel compétent pour la réalisation des études préalables et pour la construction en précisant leurs titres et leurs compétences. Le personnel nécessaire pour ce projet est : conducteur des travaux (pour le suivi de chantier et le suivi d'ouvriers), contre maître, chauffeurs pour les engins et les camions ouvriers, ferrailleurs, soudeurs, coffreurs, et topographes.

VI.1.3.2 Les moyens matériels :

Le matériel du chantier est décrit dans le tableau suivant :

Tableau VI. 1: les engins utilisés.

Taches	Engins	Actions
Travaux de préparation	Doseurs	Enlever les obstacles et les herbes
	Pelles	
	Camions	
	Chargeurs	
Terrassement	Pelles	Donner la forme exacte du canal
	Niveleuse	
	Camions	
	Doseurs	
	Chargeurs	
	Dumpers	
Compactage	Compacteurs à pieds de mouton	Consolider les berges de l'oued pour éviter l'affaissement
	Tous types de compacteurs à rouleaux lisses	

VI.1.4 Pièces contractuelles du marché :

Ce sont les différents documents qui constituent le contrat des travaux :

- La déclaration souscrire.
- La soumission.
- Le cahier des charges.
- Le devis descriptif.
- Les devis quantitatif et estimatif.
- Le bordereau des prix unitaires.

VI.1.4.1 Devis descriptif :

C'est un document qui précise pour chaque état intervenant dans la construction la nature et les caractéristiques des matériaux à utiliser. Il peut dans certain cas indiquer des techniques de construction.

VI.1.4.2 Devis quantitatif :

C'est un document dressé par le métreur, de qui établit pour chaque état d'ouvrage, les quantités détaillées s'y rapportent.

VI.1.4.3 Devis estimatif :

C'est le devis indicatif auquel on ajoute le prix unitaire et le prix total. Il indique le prix unitaire des terrassements et le prix unitaire de fourniture et de pose

Le tableau suivant donne les montants de réalisation de la variante retenue :

Tableau VI. 2: Devis quantitatif et estimatif

Désignation des travaux	***Unité***	***Quantité***	***Prix Unitaire (DA)***	***Montant (DA)***
Terrassement en grande masse y/c nettoyage et curage de l'oued	m^3	*1173501.645*	*200.00*	*234 700 328.90*
Evacuation des terres excédentaires à la décharge publique distance ≤ à 5 km	m^3	*782334.4297*	*300.00*	*234 700 328.90*
Couche de béton de propreté ép. = 10cm	m^3	*19758.6200*	*6000.00*	*118 551 720.00*
Réalisation d'une couche de béton dosé a 350 kg/M3 y compris coffrage et ferraillage,	m^3	*29637.93*	*32000.00*	*948 413 760.00*
Fourniture et mise en place d'une couche d'enrochement y/compris compactage et arrosage des terres naturel	m^3	*122651.1808*	*4000.00*	*490 604 723.16*
Fourniture et pose de la Géotextile	*ml*	*2202.90*	*1100*	*2 423 190.00*
Montant total				***2 029 394 050.96***

VI.2 Planification :

Elle consiste à chercher constamment la meilleure façon d'utiliser avec économie la main d'œuvre et les autres moyens de mise en œuvre pour assurer l'efficacité de l'action à entreprendre, elle consiste en :

- Installation des postes de travail.
- Observations instantanées.
- Analyse des tâches.
- Chronométrage.
- Définition des objectifs et des attributions.
- Simplification des méthodes.
- Stabilisation des postes de travail.

VI.2.1 Les étapes de la planification :

La planification est le processus de la ligne de conduite des travaux à réaliser, elle comprend des étapes suivantes :

- Collection des informations : l'établissement d'une synthèse d'analyse des informations acquises par des études comparatives permet l'usage correct du plan de réalisation de notre projet.
- Décomposition du projet : le projet sera décomposé en taches, et nous attribuons à chaque tâche un responsable et ses besoins en matériels, et sa durée de réalisation en fonction de la cadence des travaux de chaque engin.
- Relations entre les tâches : il existe deux relations essentielles entre les tâches lors de la réalisation ; l'une porte sur un enchaînement logique et l'autre sur un enchaînement préférentiel.
- Choix de la méthode de calcul : le choix de la méthode de calcul repose essentiellement sur le type d'ouvrage à construire. Il est préférable dans le cas où les opérations se suivent comme dans notre cas d'opter pour la méthode C.P.M.
- Attribution des durées : Le temps de réalisation de chaque tâche sera calculé par la formule suivante :

$$T = \frac{Q}{N \times R}$$

Avec :

T : temps de réalisation en heures.
Q : quantité de travail en (m3, m2, m…).
N : La norme de travail, on prend N =7 h/j.
R : rendement de travail.

VI.2.2 Les techniques de planification :

Il existe trois principales méthodes de planification à savoir :

- Méthode basée sur le réseau ou méthode C.P.M.
- Méthode basée sur le graphique (diagramme de Gantt) ou méthode des barres.

VI.2.2.1 Méthodes basées sur le réseau :

VI.2.2.1.1 Définition :

Le réseau est une représentation graphique d'un projet qui permet d'indiquer la relation entre les différentes opérations qui peuvent être successives, simultanées, convergentes et la durée de réalisation. on distingue deux types de réseaux :

- ✓ **Réseau à flèches :** L'opération est représentée par une flèche et la succession des opérations par des nœuds.

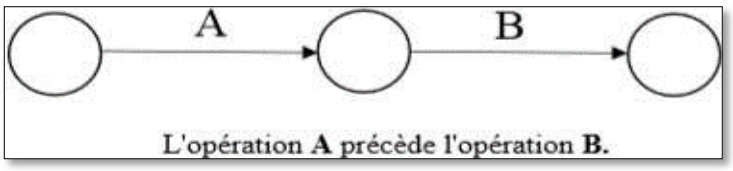


Figure VI. 1: Réseau à flèche

- ✓ **Réseau à nœuds :** L'opération est représentée par un nœud et la succession des opérations par des flèches**.**

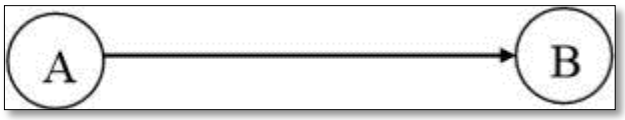


Figure VI. 2: Réseau à nœuds.

L'opération B ne peut commencer que si l'opération A est complètement achevée.

VI.2.2.1.2 Construction du réseau :

Pour construire un réseau, il convient d'effectuer les six opérations suivantes :

- Établissement d'une liste des tâches : il s'agit dans cette première phase de procéder à un inventaire très précis et détaillé de toutes les opérations indispensables à la réalisation d'un projet.
- Détermination des tâches antérieures : après avoir dressé la liste des tâches à effectuer, il n'est pas toujours facile de construire un réseau, car il n'est pas aisé de dire si les tâches antérieures doivent être successives ou convergentes.
- Construction des graphes partiels.
- Regroupement des graphes partiels.
- Détermination des tâches de début de l'ouvrage et de fin de l'ouvrage.
- Construction du réseau.

VI.2.2.1.3 Différentes méthodes basées sur le réseau :

- **Méthode C.P.M (Méthode française) :**

C'est une méthode de planification, elle a pour objectif de réduire le temps et le coût de réalisation du projet et augmenter le rendement du travail en tenant compte de trois phases :

1ère phase : l'effectif nécessaire pour effectuer le travail considéré.

2ème phase : analyser systématiquement le réseau, heure par heure, jour par jour, selon l'unité de temps retenu.

3ème phase : adapter le réseau aux conditions ou contraintes fixées par l'entreprise.

❖ **Les paramètres de calcul dans la méthode C.P.M**

Les paramètres indispensables dans l'exécution de cette méthode sont les suivants : DCP, t_r, DFP, DCPP, DFPP et MT.

DCP	t_r
DFP	DCPP
DFPP	MT

Figure VI. 3: Les paramètres de calcul dans la méthode C.P.M

Avec :

t_r : Temps de réalisation.

DCP : Date de commencement au plus tôt.

DCPP : Date de commencement au plus tard.

DFP : Date de finition au plus tôt.

DFPP : Date de finition au plus tard.

MT : Marge totale, intervalle de temps nécessaire pour le déroulement de l'opération tel que :

$$\begin{cases} DFP = DCP + t_r \\ DCPP = DFPP - t_r \end{cases}$$

- **Méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technical):**

C'est-à-dire technique d'ordonnancement des tâches et contrôle des programmes, c'est une méthode consistant à mettre en ordre sous forme de réseau plusieurs tâches qui grâce à leur chronologie et leur dépendance concourent toutes à l'obtention d'un produit fini.

VI.2.2.1.4 Le chemin critique :

C'est le chemin qui donne la durée totale du projet (DTR) reliant les opérations possédant la marge totale nulle (0). Donc pour retrouver un chemin critique il suffit de vérifier la double condition suivante :

$$MT = 0$$
$$\sum TR_{cc} = DTP$$

VI.2.2.2 Méthodes basées sur le graphique :

- **Méthode linéaire (ligne of balance Technic) :**

Cette méthode est destinée à la planification des projets de construction dont les travaux son répétitifs.

- **Méthode à barres :**

Cette technique consiste à déterminer deux réseaux et un diagramme à barres (plan de travail).

VI.2.2.2.1 Les étapes de la planification :

La planification est le processus de la ligne de conduite des travaux à réaliser, elle comprend les étapes suivantes :

- **Collection des informations :**

L'établissement d'une synthèse d'analyse des informations acquises par des études comparatives permet l'usage correct du plan de réalisation du projet.

- **Décomposition du projet :**

C'est une partie importante car chaque projet peut être analysé de diverses manières. Nous attribuons à chaque tâche un responsable et ses besoins en matériels.

- **Relations entre les tâches :**

Il existe deux relations essentielles entre les tâches lors de la réalisation. L'une porte sur un enchaînement logique et l'autre sur un enchaînement préférentiel.

VI.2.2.3 Diagramme de Gantt :

Cette technique consiste à déterminer deux réseaux afin de planifier avec le diagramme à barres. Les taches sont mentionnées dans ligne, et la durée de chaque tâche est représenté par une barre (dessinée à l'échelle) tel que la longueur correspond à sa durée réelle, en respectant la date de début et de fin de cette tâche.

VI.2.3 Choix de la méthode de calcul :

Le choix de la méthode de calcul repose essentiellement sur le type d'ouvrage à construire. Il est préférable dans le cas où les opérations se suivent comme dans notre cas d'opter pour la méthode CPM.

Tableau VI. 3: Liste des opérations et leurs durées.

Désignation d'opération	***Code***	***Durée (Jours)***
Installation du chantier	*A*	15
Travaux de terrassement sur les tronçons 1,2,3 et 4	*B*	60
Travaux de terrassement sur les tronçons 5,6,7,8,9 et 10	*C*	80
Compactage des tronçons 1,2,3 et 4	*D*	15
Compactage des tronçons 5,6,7,8,9 et 10	*E*	25
Pose d'enrochement sur le tronçon 1,2,3 et 4	*F*	20
Exécution de lit du béton de propreté sur les tronçons 5,6,7,8,9 et 10	*G*	30
Exécution de béton armé pour les canaux sur les tronçons 5,6,7,8,9 et 10	*H*	90
Déménagement du chantier	*I*	15

Dans le tableau suivant on présente chaque tache avec celles qui précède :

Tableau VI. 4: Succession des taches.

Opération	Précède	Succède
A	/	B
B	A	C-D
C	B	E
D	B	E-F
E	C	G
F	D	G
G	E	H
H	G	I
I	H	/

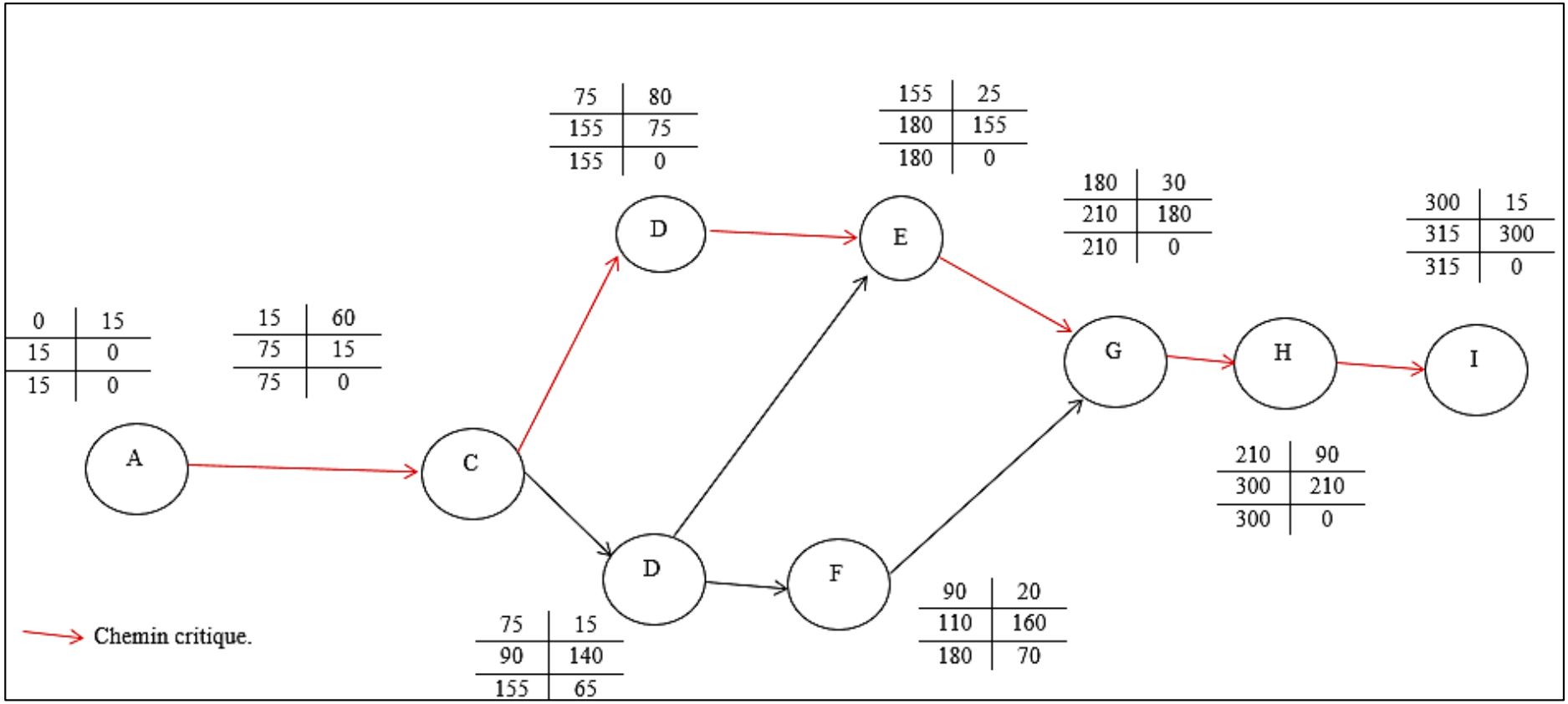


Figure VI. 4: Réseau de planification des tâches par la méthode C

Conclusion :

L'organisation du chantier avec ces trois branches citées dans ce chapitre constitue une importance primordiale dans la réalisation et l'achèvement dans les délais de tous les projets.

Une bonne organisation est tributaire de la planification du chantier par une bonne définitiondu réseau par différentes méthodes.

La recherche du chemin critique est très importante pour mieux justifier la décomposition du projet. D'après nos calculs, le temps de réalisation de l'aménagement contre les inondations da la ville de sidi aich est estimée à 10 Mois et 15 jours.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'Algérie a connu dans son histoire plusieurs épisodes catastrophiques liés aux inondations, ces inondations malheureusement touchent les populations en causant dans la plupart des cas, des pertes humaines et matérielles considérables.

Face à cela nous avons décidé de nous intéresser à la question sous ses différents aspects relatifs à la gestion du risque inondation et les différents moyens de lutte. Parmi ces moyens, nous avons cité le retour d'expérience : c'est une étape importante, elle a permis à l'homme de comprendre que les phénomènes tels que les inondations sont des phénomènes dont on ne peut pas à tous les coûts apprivoisées le comportement, ce qu'il pouvait faire par contre c'est comprendre leurs fonctionnements pour mieux les prévenir. Cette compréhension peut passer par l'identification des sites exposés à ce genre de phénomènes pour en étudier les caractéristiques.

Parmi ces sites en Algérie, nous avons choisi le bassin versant de la soummam qui est souvent le sujet d'évènements pluviométriques qui causent des crues catastrophiques qui touche la ville de Sidi aich et les localités avoisinantes. Ce bassin versant avait fait le sujet de plusieurs études qui ont été à l'origine d'une multitude d'aménagements qui n'ont dans la plupart des cas pas suffit à dulcifier les crues très importantes qu'a connu l'oued soummam.

Dans notre travail nous nous sommes intéressés à deux aspects indispensables pour se prémunir contre les inondations : l'aspect gestion de la crise et l'aspect prévention. Le premier moyen de lutte pour lequel nous avons consacré toute une partie de notre travail est l'identification des zones potentiellement exposées au risque, cette identification s'est faite en cartographiant les zones vulnérables au niveau de la ville de Sidi aich. Pour ce faire notre étude s'est faite en couplant un modèle hydrologique grâce auquel nous estimons la crue de projet, à un modèle hydraulique qui simule l'écoulement de surface pour identifier l'extension de la zone inondable.

A propos des résultats obtenus nous pouvons faire la recommandation suivante : c'est que d'un point de vue législatif, il vaudrait mieux mettre en place de nouvelles directives dans le code de l'environnement, afin de mieux gérer le développement urbain, routier et industriel par la mise en place de mesures compensatoires qui doivent assurer la transparence hydraulique des nouvelles installations. Néanmoins, pour que ces mesures soient efficaces, la caractérisation de l'aléa inondation doit être précise et adaptée au contexte hydro(géo)logique de la zone étudiée.

Références

Organismes de référence :

- Direction des ressources en eau wilaya de Bejaia (DRE) : https://www.mre.gov.dz/
- Bibliothèque Ecole Nationale supérieure d'hydraulique : https://library.ensh.dz/
- Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique – ENSH : https://moodle.ensh.dz

Sites internet consultés :

- Vallée de l'oued Soummam | Service d'information sur les Sites Ramsar. (s. d.). Consulté 02 juillet 2021, à l'adresse https://rsis.ramsar.org/fr/ris/1898?language=fr
- *ResearchGate*. (s. d.), à l'adresse https://www.researchgate.net

- Cours d'eau—LAROUSSE. (s. d.). Consulté 23 juin 2021, à l'adresse https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/cours_deau
- EarthExplorer. (s. d.). Consulté 8 mai 2021, à l'adresse https://earthexplorer.usgs.gov/
- First-level Administrative Divisions, Algeria, 2015 in EarthWorks. (s. d.). Consulté 26 juin 2021, à l'adresse https://earthworks.stanford.edu/catalog/stanford-mg551ss9842
- Sidi Aïch, Sidi Aïch, Béjaïa, Algérie - DB-City : Toutes les infos sur les Pays, Régions, Villes et Villages. (s. d.). Consulté 24 juin 2021, à l'adresse https://fr.db-city.com/fr.db-city.com/Alg%C3%A9rie--B%C3%A9ja%C3%AFa--Sidi-A%C3%AFch--Sidi-A%C3%AFch
- HEC-RAS Documentation. (s. d.). Consulté 12 septembre 2021, à l'adresse https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx
- Toutes les ressources. (s. d.), à l'adresse https://bneuf.auf.org/resource/home

- SNDL Systeme National de Documentation en Ligne. (s. d.)., à l'adresse https://www.sndl.cerist.dz

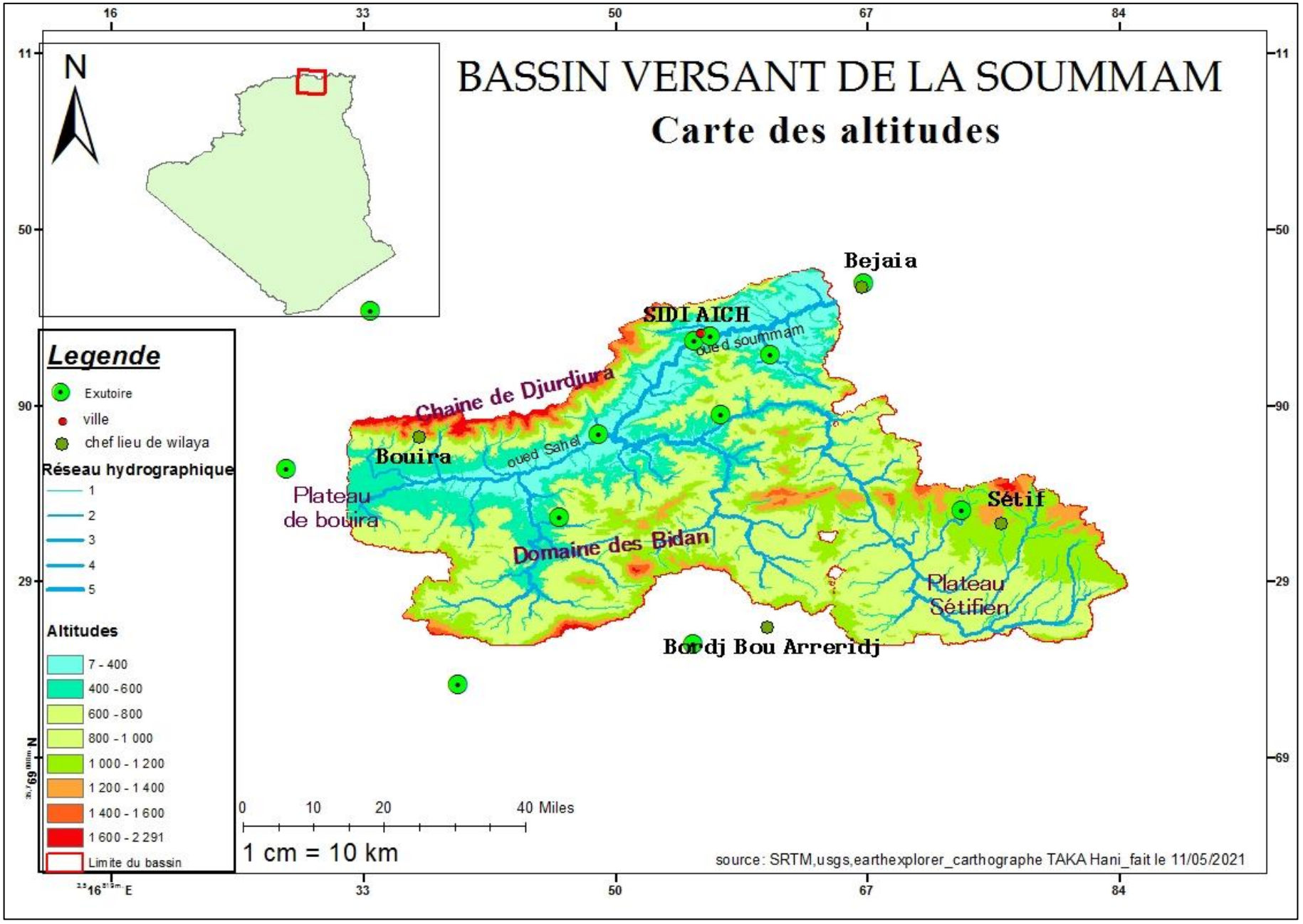
Bibliographie

- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE. (Aout 2004). Les inondations**.**
- Direction Départementale des Territoires et de la Mer de l'Hérault. Décembre 2012 « Etude de définition des zones inondables du bassin versant du Libron». Commune de Boujan-sur-Libron.
- Direction des ressources en eau de Bejaia. Mars 2014 « Rapport PDAU Tazm «alt phase II».
- France, nature, environnement. Septembre 2012 « Morphologie des cours d'eau **».**

- Direction de l'eau, des milieux aquatiques et de l'agriculture (DEMAA), service eaux de surface, Décembre 2007 « Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau ». France.
- DEGOUTTE, G. (2001). HYDRAULIQUE ET DYNAMIQUE FLUVIALE.
- Robert Lagacé,. (2015). AMÉNAGEMENT DES COURS D'EAU ET CONSERVATION DES SOLS. Université Laval.
- Touaibia Bénina, 2004. Manuel Pratique d'Hydrologie. Presse Madani frères, Blida, Algérie
- Vazquez, J. (s. d.). HYDRAULIQUE A SURFACE LIBRE. 104.
- Aïssa MOALI (FDR- version 2006-2008) Fiche Descriptive Ramsar de la Vallée de l'oued Soummam

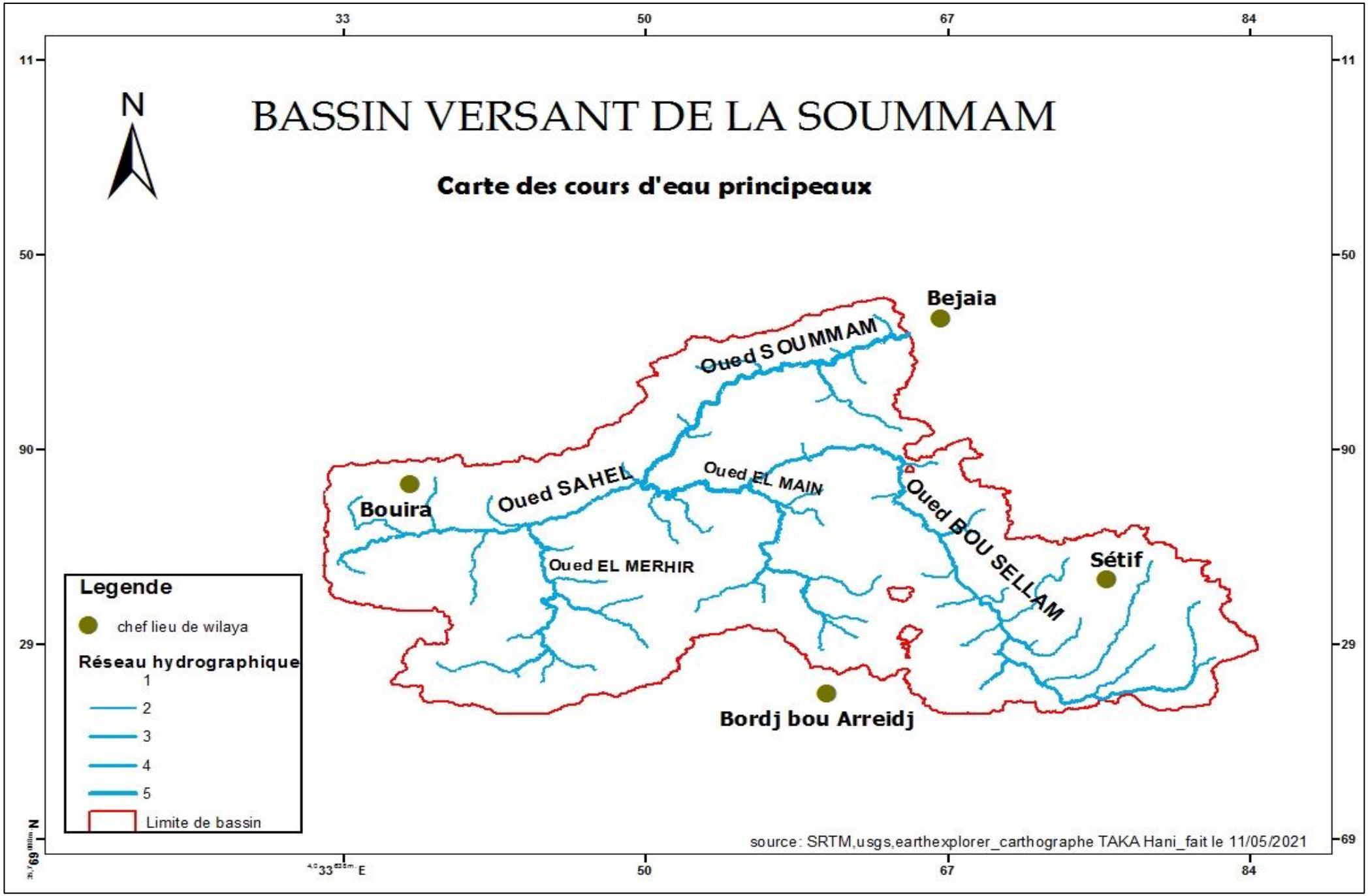
ANNEXE N°01

I- Carte d'altitudes du Bassin versant de la Soummam (**source :** SRTM, USGS, earthexplorer)



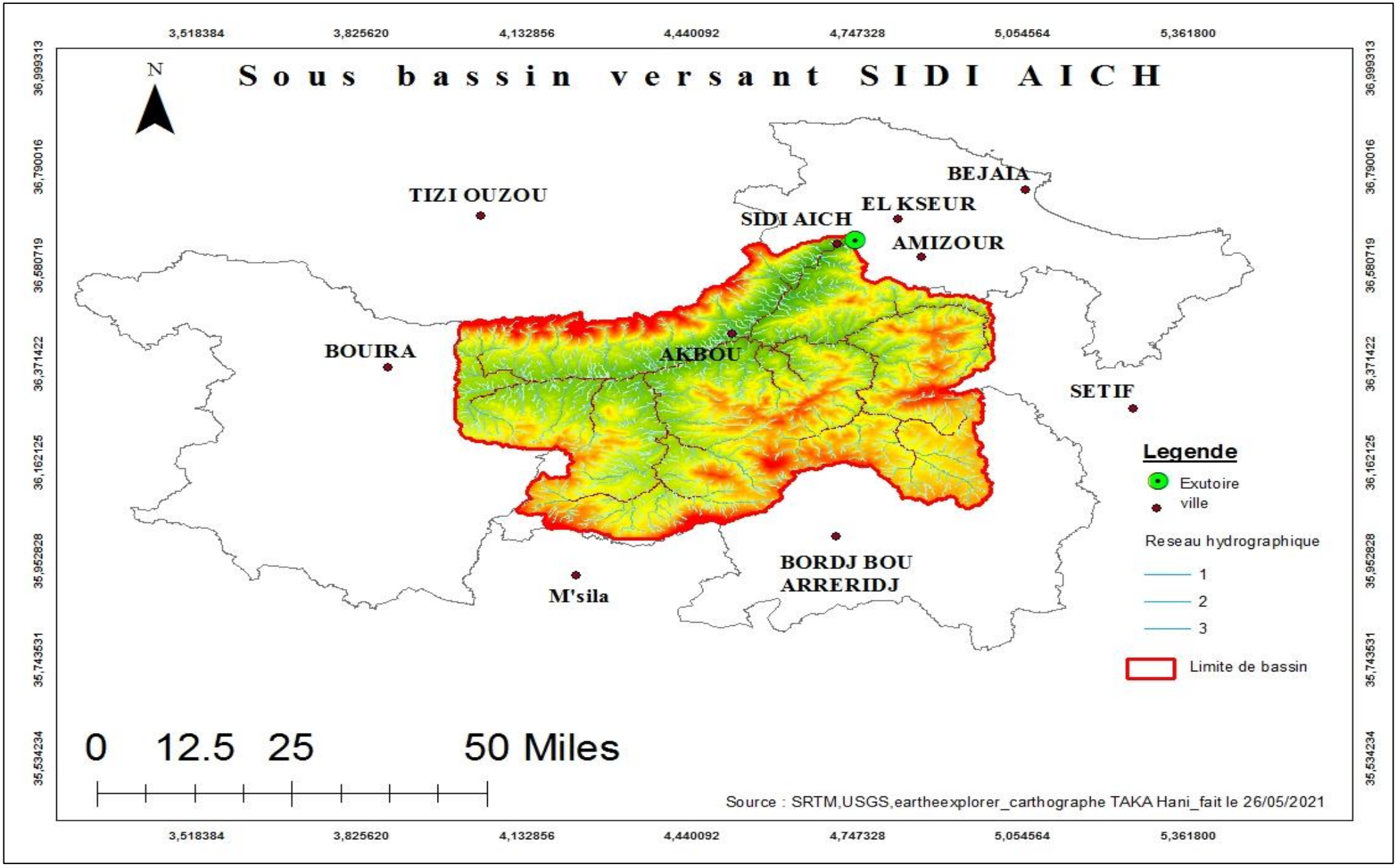
ANNEXE N°02

II- Carte des cours d'eau principaux (**source :** SRTM, USGS, earthexplorer).



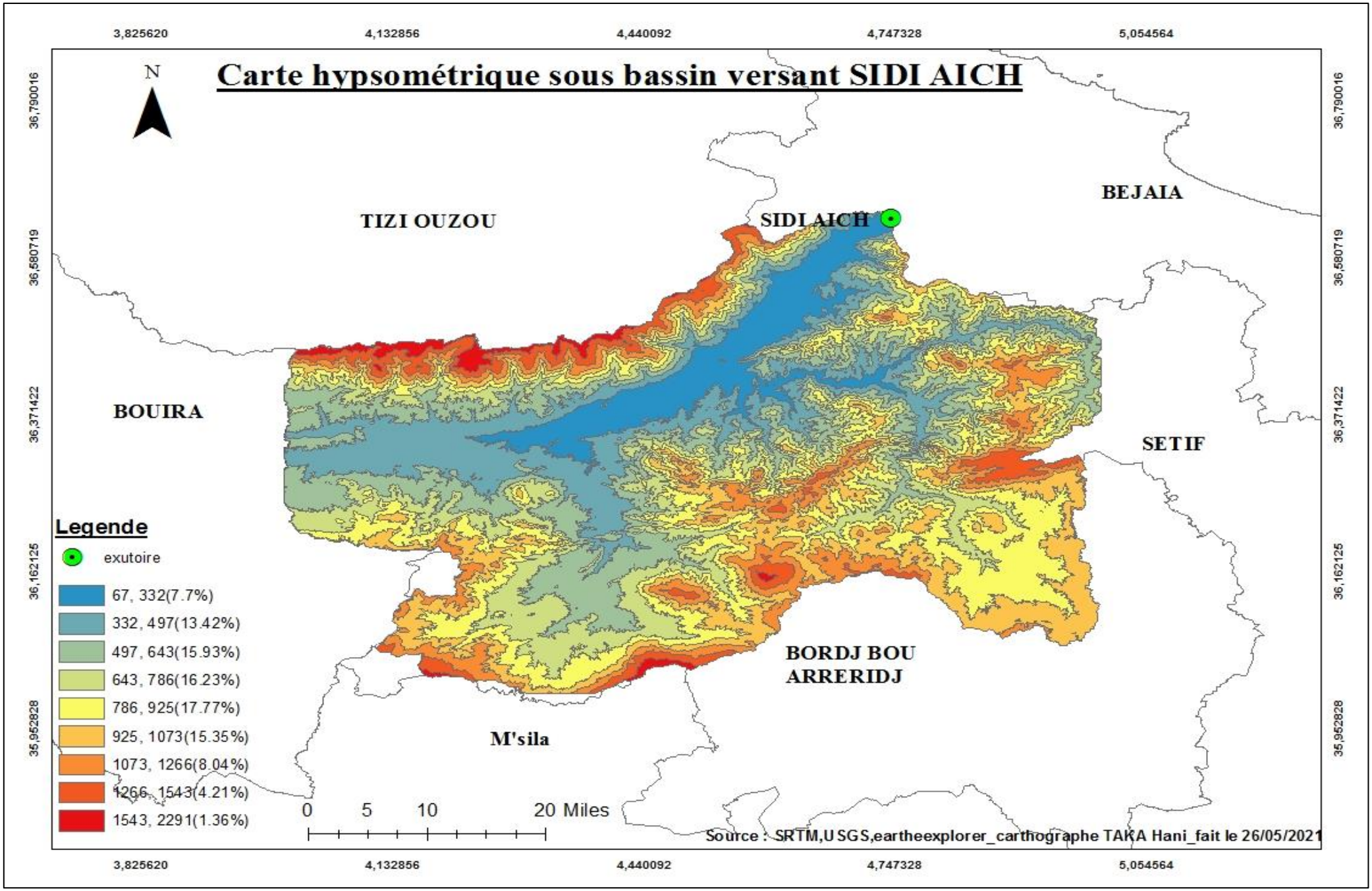
ANNEXE N°03

III- Carte de Sous bassin versant du Sidi aich (**source :** SRTM, USGS, earthexplorer).



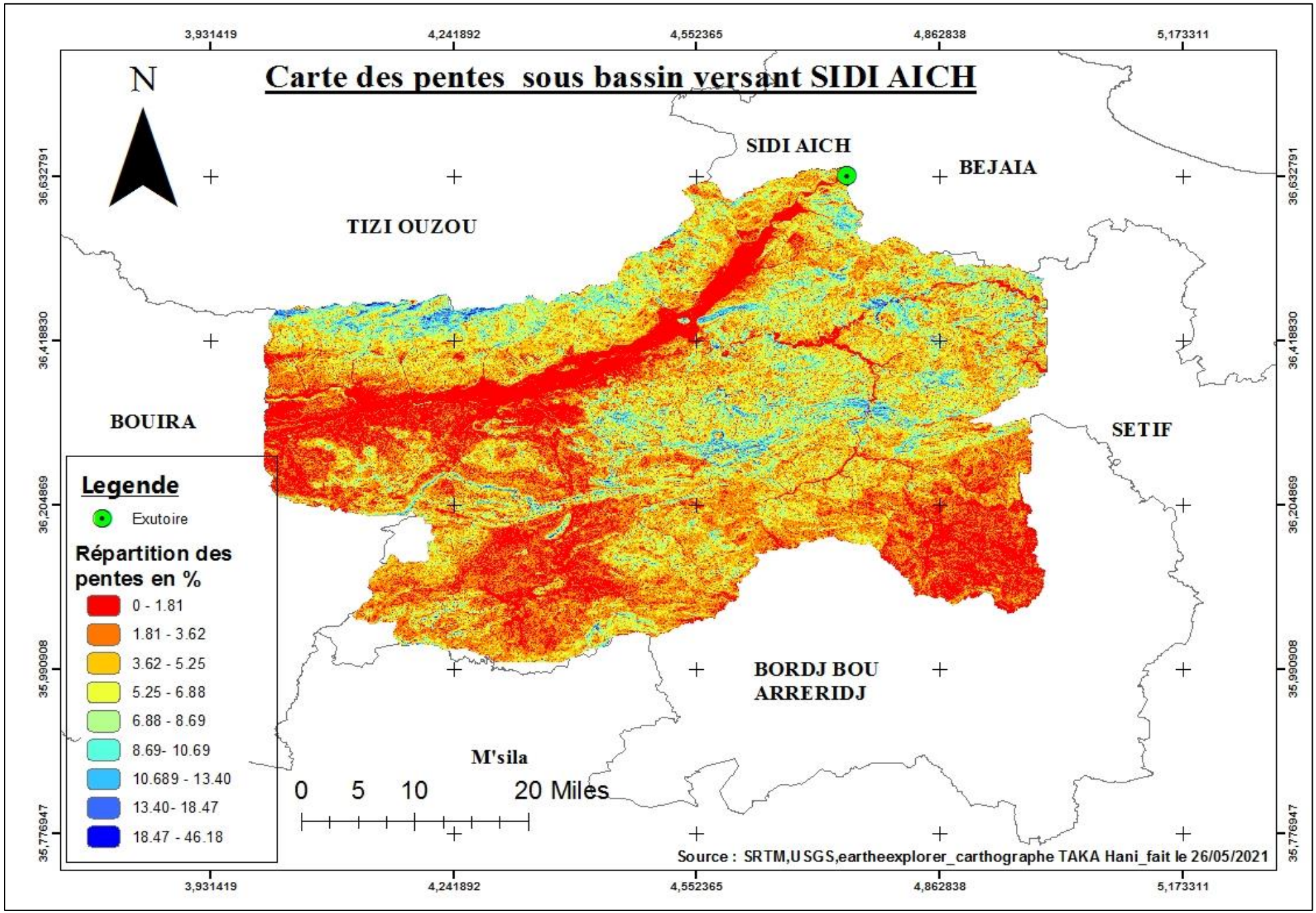
ANNEXE N°04

IV- Carte hypsométrique du sous bassin versant sidi aich (**source :** SRTM, USGS, earthexplorer).



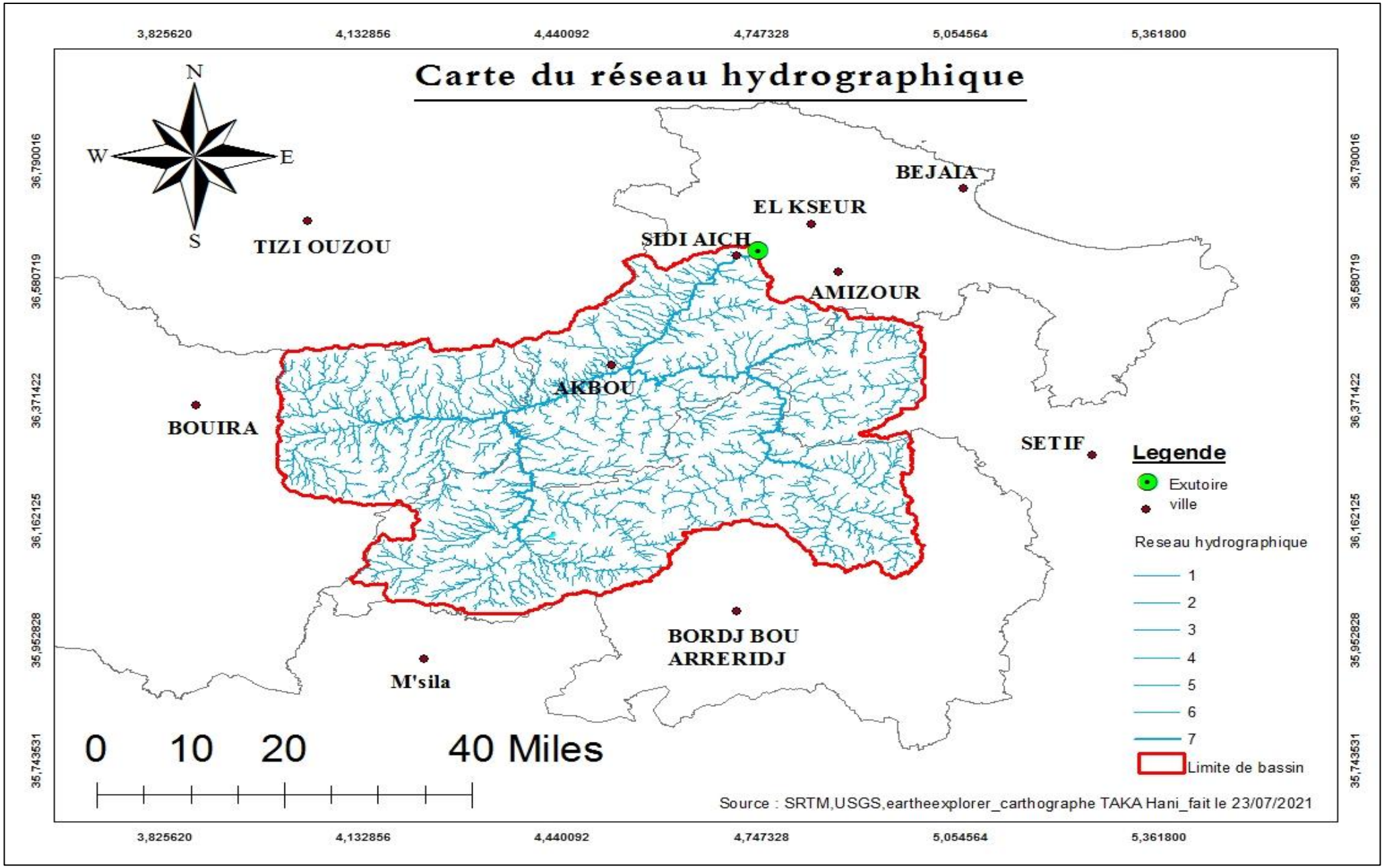
ANNEXE N°05

V- Carte des pentes du sous bassin versant Sidi aich (**source :** SRTM, USGS, earthexplorer).



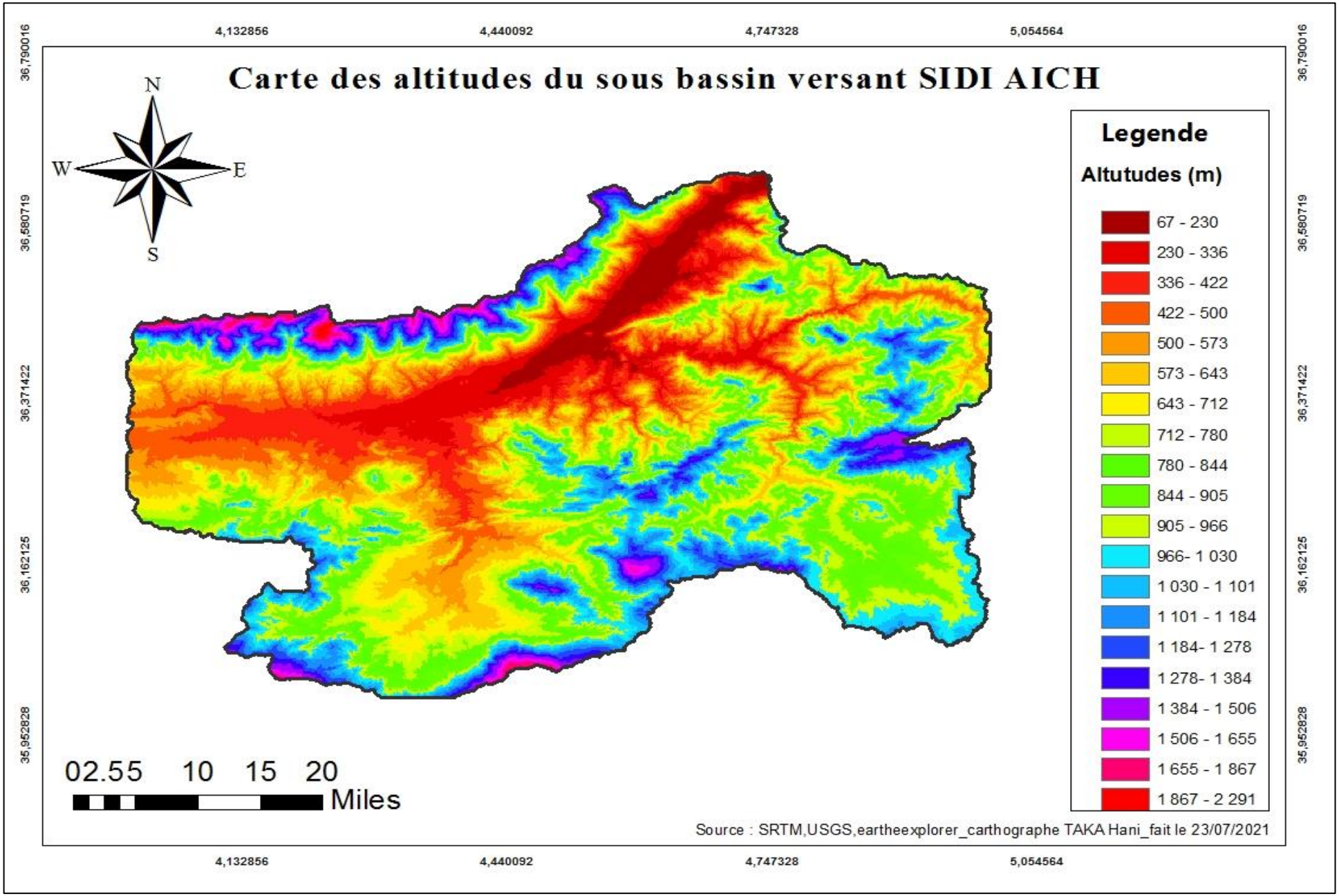
ANNEXE N°06

VI- Carte du réseau hydrographique



ANNEXE N°06

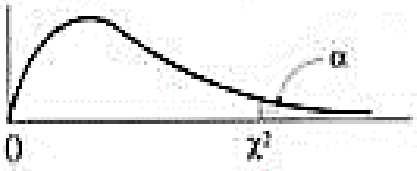
VII- Carte des altitudes du sous bassin versant SIDI AICH



ANNEXE N°7

VIII- Table de χ^2

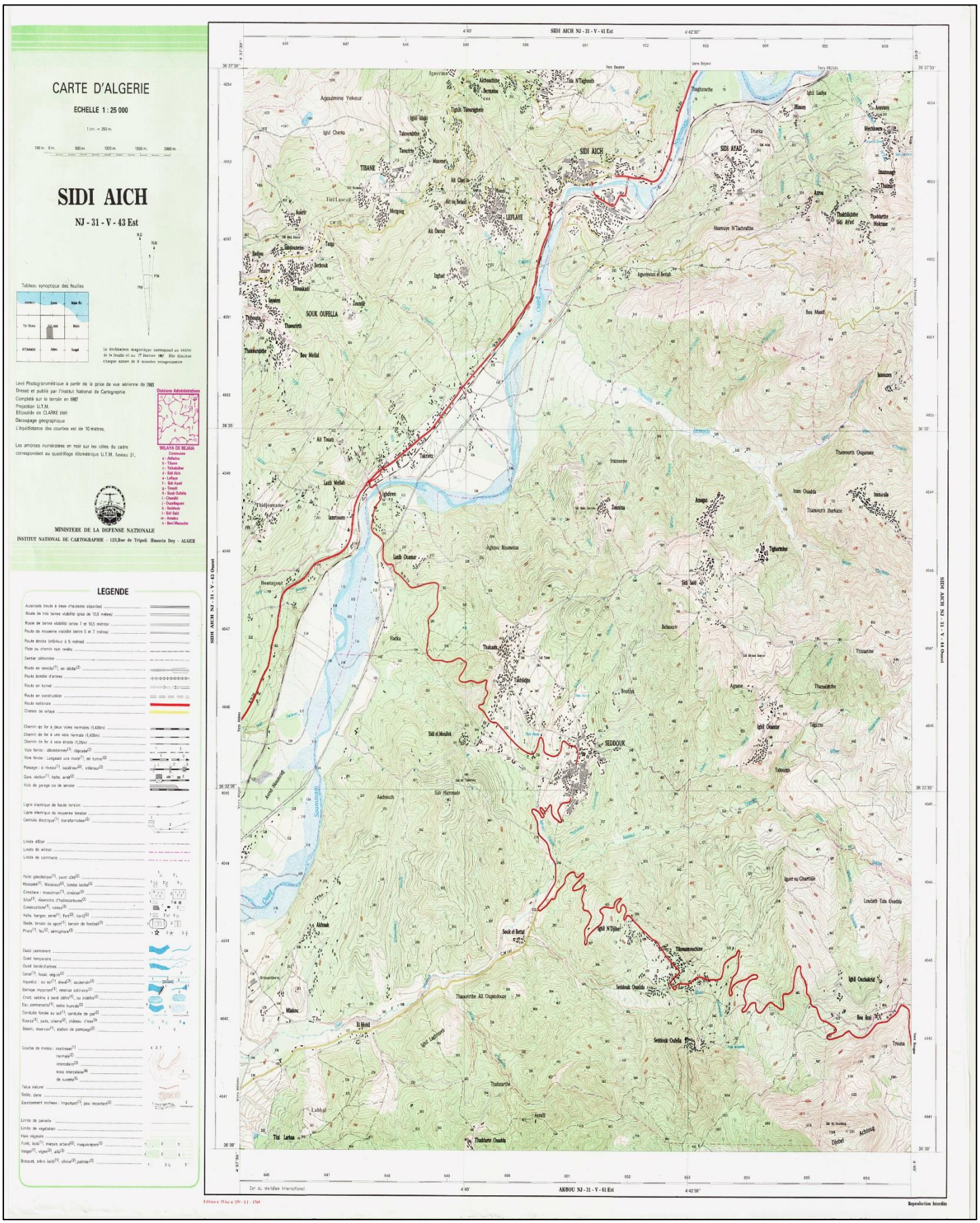
Table χ^2 : points de pourcentage supérieurs de la distribution χ^2



dl	.995	.990	.975	.950	.900	.750	.500	.250	.100	.050	.025	.010	.005
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.10	0.45	1.32	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88
2	0.01	0.02	0.05	0.10	0.21	0.58	1.39	2.77	4.61	5.99	7.38	9.21	10.60
3	0.07	0.11	0.22	0.35	0.58	1.21	2.37	4.11	6.25	7.82	9.35	11.35	12.84
4	0.21	0.30	0.48	0.71	1.06	1.92	3.36	5.39	7.78	9.49	11.14	13.28	14.86
5	0.41	0.55	0.83	1.15	1.61	2.67	4.35	6.63	9.24	11.07	12.83	15.09	16.75
6	0.68	0.87	1.24	1.64	2.20	3.45	5.35	7.84	10.64	12.59	14.45	16.81	18.55
7	0.99	1.24	1.69	2.17	2.83	4.25	6.35	9.04	12.02	14.07	16.01	18.48	20.28
8	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	5.07	7.34	10.22	13.36	15.51	17.54	20.09	21.96
9	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	5.90	8.34	11.39	14.68	16.92	19.02	21.66	23.59
10	2.15	2.56	3.25	3.94	4.87	6.74	9.34	12.55	15.99	18.31	20.48	23.21	25.19
11	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	7.58	10.34	13.70	17.28	19.68	21.92	24.72	26.75
12	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	8.44	11.34	14.85	18.55	21.03	23.34	26.21	28.30
13	3.56	4.11	5.01	5.89	7.04	9.30	12.34	15.98	19.81	22.36	24.74	27.69	29.82
14	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	10.17	13.34	17.12	21.06	23.69	26.12	29.14	31.31
15	4.60	5.23	6.26	7.26	8.55	11.04	14.34	18.25	22.31	25.00	27.49	30.58	32.80
16	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	11.91	15.34	19.37	23.54	26.30	28.85	32.00	34.27
17	5.70	6.41	7.56	8.67	10.09	12.79	16.34	20.49	24.77	27.59	30.19	33.41	35.72
18	6.26	7.01	8.23	9.39	10.86	13.68	17.34	21.60	25.99	28.87	31.53	34.81	37.15
19	6.84	7.63	8.91	10.12	11.65	14.56	18.34	22.72	27.20	30.14	32.85	36.19	38.58
20	7.43	8.26	9.59	10.85	12.44	15.45	19.34	23.83	28.41	31.41	34.17	37.56	40.00
21	8.03	8.90	10.28	11.59	13.24	16.34	20.34	24.93	29.62	32.67	35.48	38.93	41.40
22	8.64	9.54	10.98	12.34	14.04	17.24	21.34	26.04	30.81	33.93	36.78	40.29	42.80
23	9.26	10.19	11.69	13.09	14.85	18.14	22.34	27.14	32.01	35.17	38.08	41.64	44.18
24	9.88	10.86	12.40	13.85	15.66	19.04	23.34	28.24	33.20	36.42	39.37	42.98	45.56
25	10.52	11.52	13.12	14.61	16.47	19.94	24.34	29.34	34.38	37.65	40.65	44.32	46.93
26	11.16	12.20	13.84	15.38	17.29	20.84	25.34	30.43	35.56	38.89	41.92	45.64	48.29
27	11.80	12.88	14.57	16.15	18.11	21.75	26.34	31.53	36.74	40.11	43.20	46.96	49.64
28	12.46	13.56	15.31	16.93	18.94	22.66	27.34	32.62	37.92	41.34	44.46	48.28	50.99
29	13.12	14.26	16.05	17.71	19.77	23.57	28.34	33.71	39.09	42.56	45.72	49.59	52.34
30	13.78	14.95	16.79	18.49	20.60	24.48	29.34	34.80	40.26	43.77	46.98	50.89	53.67
40	20.67	22.14	24.42	26.51	29.06	33.67	39.34	45.61	51.80	55.75	59.34	63.71	66.80
50	27.96	29.68	32.35	34.76	37.69	42.95	49.34	56.33	63.16	67.50	71.42	76.17	79.52
60	35.50	37.46	40.47	43.19	46.46	52.30	59.34	66.98	74.39	79.08	83.30	88.40	91.98
70	43.25	45.42	48.75	51.74	55.33	61.70	69.34	77.57	85.52	90.53	95.03	100.44	104.24
80	51.14	53.52	57.15	60.39	64.28	71.15	79.34	88.13	96.57	101.88	106.63	112.34	116.35
90	59.17	61.74	65.64	69.13	73.29	80.63	89.33	98.65	107.56	113.14	118.14	124.13	128.32
100	67.30	70.05	74.22	77.93	82.36	90.14	99.33	109.14	118.49	124.34	129.56	135.82	140.19

ANNEXE N°8

IX- Carte topographique sidi-aich (ECHELLE 1/25.000)



ANNEXE N°09

X- Valeurs de n de Manning.

Cas d'un cours d'eau naturels.

Type de canal et description	Minimum	Normal	Maximum
1. Canaux principaux			
a. Propres, droits, pleins, sans failles ni fosses profondes	0.025	0.030	0.033
b. Identique au précédent, mais plus de pierres et de mauvaises herbes	0.030	0.035	0.040
c. Propre, sinueux, quelques fosses et hauts-fonds	0.033	0.040	0.045
d. Identique au précédent, mais quelques herbes et pierres.	0.035	**0.045**	0.050
e. Identique au précédent, paliers inférieurs, pentes et sections plus inefficaces	0.040	0.048	0.055
f. Identique à "d" mais plus de pierres	0.045	0.050	0.060
g. Bords lents, mauvaises herbes, bassins profonds.	0.050	0.070	0.080
h. Bords de rivière très envahis par les mauvaises herbes, bassins profonds ou canaux de dérivation avec des peuplements denses de bois et de broussailles.	0.070	0.100	0.150
2. Plaines d'inondation			
a. Pâturage sans broussailles			
1. Herbe courte	0.025	0.030	0.035
2. Herbe haute	0.030	0.035	0.050
b. Zones cultivées			
1. Pas de culture	0.020	0.030	0.040
2. Cultures en ligne matures	0.025	0.035	0.045
3. Cultures de plein champ matures	0.030	0.040	0.050
c. Broussailles			
1. Broussailles éparses, mauvaises herbes lourdes	0.035	0.050	0.070
2. Broussailles légères et arbres, en hiver	0.035	0.050	0.060
3. Broussailles légères et arbres, en été	0.040	0.060	0.080
4. Broussailles moyennes à denses, en hiver	0.045	0.070	0.110
5. Broussailles moyennes à denses, en été	0.070	0.100	0.160
d. Arbres			
1. Terrain défriché avec souches d'arbres, pas de pousses.	0.030	0.040	0.050
2. Identique au précédent, mais avec de fortes pousses	0.050	0.060	0.080
3. Forte densité de bois, peu d'arbres abattus, peu de sous-bois, écoulement sous les branches	0.080	0.100	0.120
4. Identique au précédent, mais avec un écoulement dans les branches	0.100	0.120	0.160
5. Saules denses, été, droits	0.110	0.150	0.200
3. Cours d'eau de montagne, pas de végétation dans le chenal, berges généralement abruptes, avec des arbres et des broussailles sur les berges submergées.			
a. Fond : graviers, galets, et quelques blocs rocheux	0.030	0.040	0.050
b. Fond : galets avec de gros blocs rocheux	0.040	0.050	0.070

Cas des canaux revêtus ou construits

Type de canal et description	Minimum	Normal	Maximum
1. Béton			
a. Finition à la truelle	0.011	0.013	0.015
b. Finition à la taloche	0.013	0.015	0.016
c. Fini, avec fond de gravier	0.015	0.017	0.020
d. Non fini,	0.014	0.017	0.020
e. Gunite, bonne section	0.016	0.019	0.023
f. Gunite, section ondulée	0.018	0.022	0.025
g. Sur une bonne roche excavée	**0.017**	**0.020**	
h. Sur roche excavée irrégulière	0.022	0.027	
2. La taloche de fond en béton est finie avec des côtés de :			
a. Pierre dressée au mortier	0.015	0.017	0.020
b. Pierre aléatoire en mortier	0.017	0.020	0.024
c. Maçonnerie de moellons de ciment, plâtrée	0.016	0.020	0.024
d. Maçonnerie de moellons de ciment	0.020	0.025	0.030
e. Moellons secs sur enrochement	0.020	0.030	0.035
3. Fond de gravier avec des côtés de :			
a. Béton moulé	0.017	0.020	0.025
b. Pierre aléatoire en mortier	0.020	0.023	0.026
c. Moellons secs ou enrochements	0.023	0.033	0.036
4. Brique			
a. Vitrée	0.011	0.013	0.015
b. En mortier de ciment	0.012	0.015	0.018
5. Métal			
a. Surfaces lisses en acier	0.011	0.012	0.014
b. Métal ondulé	0.021	0.025	0.030
6. Asphalte	0.013	0.013	
a. Lisse	0.016	0.016	
b. Grossier			
7. Couverture végétale	0.030		0.500

Cas des canaux excavés ou dragué

Type de canal et description	Minimum	Normal	Maximum
1. Terre, droite et uniforme			
a. Propre, récemment achevé	0.016	**0.018**	0.020
b. Propre, après altération	0.018	0.022	0.025
c. Gravier, section uniforme, propre	0.022	0.025	0.030
d. Avec herbe courte, peu de mauvaises herbes	0.022	0.027	0.033
2. Terre, sinueux et léthargique			
a. Pas de végétation	0.023	0.025	0.030
b. Herbe, quelques mauvaises herbes	0.025	0.030	0.033
c. Adventices denses ou plantes aquatiques dans les canaux profonds	0.030	0.035	0.040
d. Fond de terre et côté des gravats	0.028	0.030	0.035
e. Fond pierreux et berges envahies de mauvaises herbes	0.025	0.035	0.040
f. Fond de galets et berges propres	0.030	0.040	0.050
3. Drague-excavée ou draguée	0.025	0.028	0.033
a. Pas de végétation	0.035	0.050	0.060
b. Broussailles légères sur les berges			
4. Coupes de roche			
a. Lisse et uniforme	0.025	0.035	0.040
b. En dents de scie et irrégulières	0.035	0.040	0.050
5. Canaux non entretenus, mauvaises herbes et broussailles			
a. Fond propre, broussailles sur les côtés	0.040	0.050	0.080
b. Même chose que ci-dessus, stade d'écoulement le plus élevé	0.045	0.070	0.110
c. Adventices denses, stade le plus élevé de l'écoulement	0.050	0.080	0.120
d. Broussailles denses, stade élevé	0.080	0.100	0.140