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"
ⵓⵢⵙⵓⵙⴰ ⵓⵢⵙⵏⵍⵓ ⵉⵎⵉⵙⵙⵉ ⵏ ⵜⵎⵙⵓⵍⵉⵜ

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option: CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUES

THEME :

ETUDE D'AMENAGEMENT DU COURS D'EAU DE OUED AMROUSSA DE LA VILLE DE BOUINAN

Présenté par :
ZAIDI Nour El Houda

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
BENLAOUKLI Bachir	Professeur	Président
BENSALAH Mohamed Draidi	M.C.B	Examinateur
OSMANI Elhadi	M.A.A	Examinateur
ZAIBAK Issam	M.C.B	Promoteur

Session Octobre 2024

Remerciement

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Dieu tout puissant pour m'avoir donné le courage et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Je souhaite également adresser mes sincères remerciements à M. ZAIBAK pour son rôle fondamental dans la réalisation de ce mémoire. Son expertise, ses précieux conseils et son soutien inestimable ont grandement contribué à la réussite de ce projet, et je lui en suis profondément reconnaissant. Ce travail est le fruit d'une collaboration dont je suis fier.

Je remercie également mes professeurs et enseignants pour leur rôle essentiel dans mon parcours académique, ainsi que les responsables et le personnel de l'École Nationale Supérieure de l'Hydraulique (ENSH) de Blida pour leur soutien.

Je tiens à exprimer mon respect et mes remerciements aux membres du jury, qui auront l'honneur d'évaluer ce travail.

Dédicace

Ce travail est dédié à ceux qui ont toujours été ma source de force et de motivation.

À ma mère, dont l'amour, la patience et le soutien sans faille m'ont permis de surmonter chaque étape. Ta résilience est mon inspiration quotidienne.

À la mémoire de mon père. Bien que tu n'aies pas pu être présent dans ma vie, ton absence m'a poussé à donner le meilleur de moi-même. Ce travail est un hommage à ce que tu représentes pour moi.

À mes frères et sœurs, pour votre présence réconfortante et vos encouragements constants. Vous êtes mon refuge et ma motivation.

À mes amies : Sirine , Sonia , Anfal , Melaak , Wissem et Nessrine qui ont partagé avec moi les hauts et les bas de ce voyage académique. Votre amitié a illuminé ce voyage, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Merci à vous tous, ce mémoire est le fruit de vos encouragements et de votre amour.

Nour El Houda

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل التدابير اللازمة لحماية مدينة "بوعينان" المتواجدة بولاية البليدة من مخاطر الفيضانات المتكررة، خاصة في ظل التوسع العمراني والظروف المناخية المتغيرة. ترتكز الدراسة على تحليل المخاطر المرتبطة بوادي "عمروسة"، باستخدام أدوات المحاكاة الهيدروليكية مثل HEC-RAS وArcGIS لتحديد المناطق أكثر عرضة للفيضانات وتقديم الحلول المناسبة. تم اختيار قناة غابيون كبديل تقني واقتصادي لحماية المنطقة، بناءً على فعاليتها في تصريف مياه الامطار وتقليل مخاطر الفيضانات. هذه الدراسة تسعى إلى تعزيز قدرة المدينة على الصمود وضمان سلامة السكان والممتلكات.

الكلمات المفتاحية: الفيضانات، المحاكاة الهيدروليكية، قناة غابيون، المناطق المعرضة للفيضانات.

Résumé

Cette étude vise à analyser les mesures nécessaires pour protéger la ville de "Bouinan" des risques d'inondation récurrents, en particulier en raison de l'expansion urbaine et des changements climatiques. L'étude se concentre sur l'analyse des risques liés à l'Oued "Amroussa", en utilisant des outils de simulation hydraulique tels que HEC-RAS et ArcGIS pour identifier les zones les plus vulnérables aux inondations et proposer des solutions appropriées. Un canal en gabions a été choisie comme variante technico-économique pour protéger la zone, en raison de son efficacité à drainer les eaux de pluie et à réduire les risques d'inondation. Cette étude contribue à renforcer la résilience de la ville et à assurer la sécurité des habitants et des infrastructures.

Mots clés : Les inondations, simulation hydraulique, canalisation en gabions, zones inondables

Abstract

This study aims to analyze the necessary measures to protect the city of "Bouinan" from recurring flood risks, especially considering urban expansion and changing climatic conditions. The study focuses on analyzing the risks associated with the Oued "Amroussa", using hydraulic simulation tools such as "HEC-RAS" and" ArcGIS" to identify the most flood-prone areas and propose appropriate solutions. A "gabion channel" was selected as the techno-economic variant to protect the area, due to its efficiency in draining rainwater and reducing flood risks. This study seeks to enhance the city's resilience and ensure the safety of both its residents and infrastructure.

Key words: floods, hydraulic simulation, gabion channel, flood-prone areas

Liste des figures

Figure I. 1 : Localisation de la commune Bouinan 6
Figure I. 2 : Classification sismique des wilayas d'Algérie 8
Figure I. 3 : Les quatres agglomérations de Bouinan 10
Figure I. 4 : Cartes des Réseau hydrographique de la ville nouvelle du bouinan 11
Figure I.5 : Retenue Oued Amroussa 12
Figure I. 6 : Évacuateur de crue Oued Amroussa 13
Figure I. 7 : Présence d'eaux usées dans l'oued d'Amroussa. 13
Figure I. 8 : Présence des remblais et des déchets au niveau des ponts oued Amroussa 14
Figure I. 9 : Présence de couvert végital intensse sur l'oued Amroussa 14
Figure I. 10 : Présence des habitations au berge d'oued Amroussa 15
Figure I. 11 : Répartition des vitesses des vents en m/s. 18

Figure II. 1 : Carte du bassin versant Oued Amroussa 22
Figure II. 2 : Carte Hypsométrique du bassin versant d'oued Amroussa 26
Figure II. 3 : Courbe hypsométrique du BV oued Amroussa 28
Figure II. 4 : Réseau hydrographique de sous bassin versant Amroussa « classification Strahler ». 33
Figure II. 5 : Situation de la station hydrométrique 42
Figure II. 6 : Représentation graphique de la loi de Gumbel de la station (021301). 45
Figure II. 7 : Représentation graphique de la loi log normale de la station 021301. 46
Figure II. 8 : Graphe comparatif des résultats d'ajustement par la méthode de Gumbel et Log normale pour la station 021301. 48
Figure II. 9 : Les courbes Intensité-Durée-Fréquence du bassin versant Bouinan 51
Figure II. 10 : Les courbes Hauteur-Durée-Fréquence du bassin versant Bouinan 51
Figure II. 11 : Ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits 54
Figure II. 12 : Graphe de l'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits. 58
Figure II. 13 : Hydrogramme de crue de pour période de retour 100 ans par la méthode Skolovsky. 65

Figure III. 1 : Forces appliquées par l'eau sur les parois (l'une perpendiculaire, l'autre tangentielle) 73
Figure III. 2 : Tirant d'eau, largeur au miroir et section mouillée 74
Figure III. 3 : Canaux artificiels (Source : TOUMI Abdelouaheb - 2016). 77
Figure III. 4 : Interface d'HEC-RAS. 78
Figure III. 5 : TIN (réseau irrégulier triangulé) de la zone d'étude. 79
Figure III. 6 : Insertion fichier de projection. 80
Figure III. 7 : Insertion des données du terrain 80
Figure III. 8 : Définition du tracé d'oueds Amroussa et ces sections en travers. 81
Figure III. 9 : Introduction les données hydrauliques d'oued Amroussa. 82
Figure III. 10 : Lancement de la simulation. 82
Figure III. 11 : Fin de simulation 83
Figure III. 12 : Les profils en travers de deux sections choisies de l'oued Amroussa. 84
Figure III. 13 : Profil en long de l'oued Amroussa à l'état naturel pour une crue centennale. 85
Figure III. 14 : Courbe de tarage Amroussa. 85
Figure III. 15 : Réseau des profondeurs d'eau pour une crue centennale. 89
Figure III. 16 : Carte de vitesse d'eau pour la période de retour 100 ans. 90

Figure IV. 1 : Dimensions du canal trapézoïdale d'oued Amroussa 95
Figure IV. 2 : Profils en travers d'un canal en béton pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued d'oued Amroussa. 97
Figure IV. 3 : Les dimensions du canal trapézoïdale en enrochement du tronçon à aménager de l'oued Amroussa, (Source : logiciel Flow-master). 99
Figure IV. 4 : Profils en travers d'un canal trapézoïdale en enrochement pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Amroussa. 101
Figure IV. 5 : Canal en enrochement. 102
Figure IV. 6 : Coupe en travers d'un canal en gabion. 104
Figure IV. 7 : Profils en travers d'un canal gabionné pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Amroussa 107
Figure IV. 8 : Carte de profondeur d'eau après aménagement pour T = 100 ans. 109
Figure IV. 9 : Profile en travers des dalots de La route nationale N29. 110
Figure IV. 10 : Géométrie du talus 114
Figure IV. 11: Application des charges des roches. 115
Figure IV. 12 : Dessin de la ligne piézométrique 115
Figure IV. 13 : Résultats de calcul 116

Figure V. 1 : Relation entre les personnes du chantier 121
Figure V. 2 : Schéma représentatif de la méthode de PERT. 131
Figure V. 3 : Méthode CPM 134
Figure V. 4 : Diagramme de GANTT du projet 135

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Températures max ; min et moyennes mensuelles 16
Tableau I. 2 : Répartition inter-saisonnière de la pluviométrie sur l'ensemble du bassin versant 16
Tableau I. 3 : Répartition intra-annuelle de l'évaporation 17
Tableau I. 4 : Vitesses mensuelles moyennes du vent (m/s) 17
Tableau I. 5 : Distribution mensuelle de l'humidité de l'air relative en % 18

Tableau II. 1 : Superficie et périmètre du bassin versant étudiés 21
Tableau II. 2 : Indice de compacité du bassin versant etudié 24
Tableau II. 3 : : Paramètres hydro-morphométriques de sous-bassin. 25
Tableau II. 4 : Paramètres Hypsométriques de la zone d'étude. 27
Tableau II. 5 : caractéristiques altimétriques de sous bassin versant. 29
Tableau II. 6 : Classification du relief selon l'indice de pente global d'ORSTOM. 29
Tableau II. 7 : Longueur des courbes de niveau 31
Tableau II. 8 : Classification de Strahler du réseau hydrographique de bassin versant 32
Tableau II. 9 : Calcul du rapport de confluence pour sous bassin versant 34
Tableau II. 10 : Calcul du rapport des longueurs pour sous bassin versant 34
Tableau II. 11 : La longueur de cours d'eau principal 34
Tableau II. 12 : Résultats du calcul du temps de concentration en heure pour le sous bassin étudié. 38
Tableau II. 13 : Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'oued Amroussa 39
Tableau II. 14 : Les caractéristiques de la station hydrométrique 42
Tableau II. 15 : Série des débits maximales annuels prise de la station 021301 43
Tableau II. 16 : Caractéristiques de la série des débits de la station 021301. 43
Tableau II. 17 : Résultats d'ajustement à la loi de Gumbel de la station 021301 44
Tableau II. 18 : Comparaison des caractéristiques de la loi de Gumbel et de l'échantillon 45
Tableau II. 19 : Résultats d'ajustement à la loi log normale de la station 021301. 46
Tableau II. 20 : Comparaison des caractéristiques de la loi log normale et de l'échantillon. 47
Tableau II. 21 : Résultats du test de $\chi 2$ de la station Hydrométrique 021301. 49
Tableau II. 22 : Pluie fréquentielles de courte durée en mm sur le bassin versant de Bouinan 50
Tableau II. 23 : Coordonnées Lambert de la station pluviométrique Soumaa(Source : ANRH Blida). 54
Tableau II. 24 : La série des pluies journalières maximales (Source : ANRH Blida). 55
Tableau II. 25 : Résultats de calcul de b' pour la station prise 57
Tableau II. 26 : Valeurs du débits centennales en fonction du temps pour la zone d'étude Amroussa 58
Tableau II. 27 : Tableau récapitulatif des résultats de calcul des débits de crues fréquentiels par les différentes méthodes 61
Tableau II. 28 : Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue "δ". 63
Tableau II. 29: Les valeurs du temps de base, montée et décrue. 63
Tableau II. 31 : Résultats de calcul pour l'hydrogramme de crue. 63
Tableau II. 32 : Crue de projet recommandée selon la classification du comité national australien des grands barrages (CNAGB) 65
Tableau II. 33 : Estimation du coefficient de perméabilité. 67
Tableau II. 34 : Résultats de calcul de la lame d'eau écoulée. 68
Tableau II. 35 : Résultats de calcul de la dégradation spécifique. 68

Tableau II. 36 : Résultats de calcul des apports solides 68

Tableau III. 1 : Principaux éléments hydrauliques pour toutes les stations 86

Tableau IV. 1 : Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de l'oued Amroussa (canal en béton armé). 95
Tableau IV. 2 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé du tronçon de l'oued Amroussa ,..... 96
Tableau IV. 3 : Devis de la variante canal en béton armé pour le tronçon de l'oued Amroussa après aménagement. 98
Tableau IV. 4 : Dimensions de l'aménagement du tronçon de l'oued Amroussa (canal en enrochement). 99
Tableau IV. 5 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé du tronçon de l'oued Amroussa..... 100
Tableau IV. 6 : les paramètres de la variante d'enrochement (tronçon oued Amroussa). 103
Tableau IV. 7 : Devis de la variante canal en enrochement pour l'oued Amroussa. 103
Tableau IV. 8 : Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné d'oued Amroussa..... 105
Tableau IV. 9 : Récupératif des paramètres de la variante du gabionnage (tronçon oued Amroussa). 105
Tableau IV. 10 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en gabion du tronçon de l'oued Amroussa 105
Tableau IV. 11 : Devis de la variante canal en gabions pour l'oued Amroussa. 108
Tableau IV. 12 : Devis d'ouvrage de traversé pour l'oued Amroussa de la route nationale 111

Tableau V. 1 : Engins utilisés. 124
Tableau V. 2 : Devis des différents travaux d'aménagement de l'oued Amroussa. 125
Tableau V. 3 : Liste des tâches pour le projet. 133

Liste des planches

Planche n°1 : Plan de masse avant l'aménagement

Planche n°2 : Plan de masse après l'aménagement

Planche n°3 : Profil en long de l'oued

Planche n°4 : Coupe et détails de la variante choisie

Liste des abréviations

Abréviations	Signification
ANRH	Agence Nationale des ressources hydrauliques
BA	Béton Armé
BV	Bassin versant
Ca	Coefficient d'allongement
CNAGB	Comité national australien des grands barrages
Ct	Coefficient de torrentialité
DA	Dinar Algérien
Dd	Densité de drainage Km/Km^2 ;
Ds	Le transport solide en (t/Km^2/an)
ESRI	Environmental systems research institute
Fr	Nombre de Froude
G	Accélération due à la gravité (m/s^2)
GRADEX	Gradient de l'exponentielle
HEC- RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
I	Pente hydraulique
IBV	Pente du bassin Versant
Ic	Pente du talweg principale (%)
Im	Pente moyenne du bassin versant m/Km
Imoy	Pente moyenne du cours d'eau m/Km
Ip	Indice de pente de Roche %
IP	Pente piézométrique
Ir	Pente longitudinale du radier
Kc	Indice de compacité
KG	L'indice de compacité de Gravelius
Le	Lamme d'eau écoulée (mm)
MNT	Model numérique du terrain
OMM	L'Organisation météorologique mondiale
ONA	Office national d'Assainissement
ONM	Office National de la Météorologie
ORSTOM	Office de la recherche scientifique et technique outre-mer
P	Périmètre (Km) ;
Pj.max	Pluie maximal journalière (mm)
Qmoy	Débit moyen de la crues (m^3/s)
Qt	Débit à l'instant t (m^3/s) ;
RC	Rapport de la confluence
RH	Rayon hydraulique (m)
RL	Rapport des longueurs
RN	Route Nationale
S	Surface du bassin versant
SBV	Sous Bassin versant
SEAAL	Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger
SIG	Système d'Information Géographique
Sm	Surface mouillée (Km^2)
SONATRACH	Société nationale pour la recherche, la production, le transport, la transformation, et la commercialisation des hydrocarbures
Ta	Désigne la dégradation spécifique en (T /Km^2/an)

Tb	Temps de base (h)
Tc	Temps de concentration (heures)
Td	Temps de décrue (h)
TIN	Triangulated Irregular Network
Tm	Temps de montée de la crue (heures)
Tr	Temps de réalisation
TSA	Tout sur l'Algérie
UNISCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

Table des matières

Remerciement 2
Dédicace 3
ملخص I
Résumé I
Liste des figures I
Liste des tableaux III
Liste des planches V
Liste des abréviations VI
Introduction générale 1
Chapitre I : 4
Description de la zone d'étude 4
Introduction 5
I.1 Localisation géographique de la wilaya de Blida 5
I.2 Situation géographique de la zone d'étude 5
I.3 Limites administratives 5
I.4 Situation topographique 6
I.5 Géologie du site 6
I.6 La sismicité 7
I.7 Situation géologique 8
I . 8 Ville Nouvelle de Bouinan 9
I.8.1 Les cours d'eau traversant la ville Nouvelle de Bouinan 10
I.8.2 Oued Amroussa 11
I.8.3 Retenue Oued Amroussa 12
I.8.4 Évacuateur de crue Oued Amroussa 12
I.9 La situation climatologique 15
I.9.1 Température 15
I.9.2 Précipitation 16
I.9.3 Evaporation 16
I.9.4 Vent 17
I.9.5 L'humidité 18
Conclusion 19
Chapitre II : 20
Etude hydrologique 20
Introduction 21
II.1 Caractéristiques du bassin inversant 21

II.1.1 La surface et le périmètre 21
II.2 La longueur du thalweg principal 22
II.3 Caractéristiques géométriques 23
II.3.1 Indice de compacité de Gravelius Kc 23
II.3.2 Rectangle équivalent 24
II.3.3 Coefficient d'allongement 24
II.4 Les caractéristiques du relief 25
II.4.1 Courbe hypsométrique 25
II.4.2 Altitude caractéristique 28
II.4.3 Indice de pente globale (Ig) 29
II.4.4 Indice de pente M. ROCHE (Ip) 30
II.4.5 Pente moyenne du bassin versant (Im) 30
II.5 Les caractéristiques du réseau hydrographique 32
II.5.1 Rapport de la confluence (Rc) 33
II.5.2 Rapport des longueurs (RL) 34
II.5.3 Les longueurs du cours d'eaux 34
II.5.4 Densité de drainage 35
II.5.5 La densité hydrographique des thalwegs élémentaires « F1 » 35
II.5.6 Le coefficient de torrentialité « Ct » 36
II.6 Détermination du temps de concentration 36
II.7 Etude des crues 40
II.7.1 Présentation des stations utilisées dans les études sur les inondations 41
II.8 Pluies de durée Tc (pluies de courte durée) 49
II.9 Détermination des débits maximums fréquentiels par la méthode du Gradex 51
II.9.1 Méthode du Gradex 51
II.9.1.1 Historique de la méthode du Gradex 52
II.9.1.2 Principe de la méthode 52
II.9.1.3 Les étapes de la méthode 52
II.9.1.4 Application de la méthode 54
II.10 Calcul des débits de pointe 58
II.11 L'hydrogramme de crue 61
II.12 Étude de transport solide 65
Conclusion 68
Chapitre III : 70
Etude des écoulements 70
Introduction 71
Généralités 71

III.1 Rappel de quelques notions 71
III.1.1 Paramètres hydrauliques 71
III.1.2 Les paramètres géométriques 74
III.1.3 Régime d'écoulement 75
III.1.4 Les canaux artificiels 76
III.2 Modélisation d'écoulement 77
III.2.1 Etapes de la simulation 77
III.3 Résultats de la simulation 83
a. Profils en travers 84
b. Le profil en long 84
c. Restitution de la courbe de tarage 85
III.4 La cartographie du risque d'inondation 87
III.4.1 Carte des profondeurs 88
III.4.2 Carte des vitesses 89
Conclusion 90
Chapitre IV : 91
Etude des variantes 91
d'aménagement 91
Introduction 92
IV.1 Dimensionnement des Canaux 92
IV.2 Les techniques d'aménagements 93
IV.2.1 La protection indirecte 93
IV.2.2 La protection directe 93
IV.3 Dimensionnement 94
IV.3.1 Première variante : Canal en béton armé 94
IV.3.2 Deuxième variante : Canal en enrochement 98
IV.3.3 Troisième Variante : Canal en gabions 104
IV.4 Les cartes de profondeur d'eau après aménagement 109
IV.5 Les Ouvrages De Traversées 109
IV.5.1 Les Dalots 109
IV.6 Analyse de la Stabilité des Talus 111
IV.6.1 Présentation du logiciel GeoStudio 112
IV.6.2 Facteur de Sécurité (FS) 112
IV.6.3 Étapes de l'étude de stabilité des talus avec SLOPE/W 113
IV.6.4 Etude et résultats 114
Conclusion 116
Chapitre V : 118

Organisation du chantier 118
Introduction 119
V.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier 120
V.1.1 Le maître d'ouvrage (MO) 120
V.1.2 Le maître d'œuvre (MOE) 120
V.1.3 L'entrepreneur 121
V.2 Installations du chantier 122
V.2.1 Installations destinées au personnel 122
V.2.2 Installations destinées au stockage des matériaux 122
V.2.3 Installations destinées à la réparation des engins 123
V.2.4 Installations pour la préfabrication 123
V.3 Les moyens de chantier 123
V.3.1 Les moyens humains 123
V.3.2 Les moyens matériels 124
V.4 Devis quantitatif et estimatif du projet 124
V.5 La Planification 125
V.5.1 Définition 125
V.5.2 Étapes de la planification 126
V.5.3 Plannings des travaux 126
V.5.4 Techniques de la planification 127
V.5.5 Différentes méthodes basées sur le réseau 129
V.5.6 Méthode de calcul de P.E.R.T 130
V.5.7 Diagramme de Gantt 132
Conclusion 136
Conclusion générale 137
Références bibliographiques 139
ANNEXE 141

Introduction générale

Introduction générale

Les crues et les inondations représentent un défi majeur pour le développement socioéconomique, en particulier dans les zones urbaines vulnérables. Avec l'augmentation de la population, l'urbanisation rapide et les impacts des changements climatiques, le risque d'inondation est en constante évolution, menaçant des vies humaines et provoquant des dommages considérables aux infrastructures. En Algérie, plusieurs régions, dont la ville de Bouinan, sont particulièrement exposées à ce phénomène, aggravé par une gestion inadéquate des terres et des rivières.

Ce mémoire a pour objectif d'analyser et de gérer les risques d'inondation dans la ville de Bouinan, en mettant l'accent sur l'Oued Amroussa et son aménagement. Pour atteindre cet objectif, ce travail s'articule autour des chapitres suivants :

- Présentation de la zone d'étude : Ce chapitre permet d'établir un diagnostic détaillé des différents éléments caractérisant le territoire de Bouinan sur les plans topographique, géologique, démographique et hydraulique, afin de comprendre les facteurs influençant le risque d'inondation.

- Étude hydrologique : Ce chapitre se concentre sur les caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant, l'analyse des pluies maximales journalières et le calcul des intensités, permettant ainsi de déterminer le débit de crue pour différentes périodes de retour.

- Estimation des débits de projet : L'objectif de ce chapitre est de calculer les débits de crue associés à diverses périodes de retour, ce qui est essentiel pour choisir l'aménagement approprié et délimiter les zones inondables.

- Étude des écoulements : Ce chapitre traite de la modélisation des écoulements dans l'Oued Amroussa, visant à définir les hauteurs et les limites d'eau atteintes lors des crues de différentes fréquences, ainsi que d'autres caractéristiques permettant de déterminer les types d'aménagement à retenir.

- Étude des variantes d'aménagement : Ce chapitre examine les différentes options d'aménagement pour l'Oued Amroussa, visant à garantir une protection efficace contre les crues et à minimiser les risques pour la population et les infrastructures.

Introduction générale

- Gestion de projet : Dans ce chapitre, nous aborderons les devis quantitatifs et estimatifs ainsi que l'organisation du chantier pour réaliser notre projet d'aménagement dans les meilleures conditions de sécurité, en respectant les délais d'exécution.

À travers cette étude, nous visons à proposer des solutions concrètes et durables pour la gestion des inondations à Bouinan, en intégrant des méthodes scientifiques rigoureuses et des approches techniques adaptées.

Chapitre I :

Description de la zone d'étude

Introduction

La planification d'un système de protection contre les inondations pour la ville bouinan commence par la compréhension de sa situation géographique, du climat régional, de la morphologie du terrain, et de l'occupation du sol. Ces informations sont cruciales pour déterminer la vulnérabilité de la zone aux inondations et pour choisir le type de développement le plus approprié afin d'assurer une protection maximale. Dans ce sens **chapitre 1** présente la nouvelle ville bouinan et la partie aval d'oued amroussa.

I.1 Localisation géographique de la wilaya de Blida

La wilaya de Blida s'étend sur une superficie de 1 478,62 km². Elle est bordée au sud par la wilaya de Médéa, les montagnes de l'Atlas, la montagne de Chréa et les gorges de la Chiffa. Au nord, elle est bordée par les plaines algériennes, qui comprennent les wilayas d'Alger, de Tipaza et de Boumerdès. À l'ouest, elle est adjacente à la wilaya d'Ain-Defla, et à l'est, elle est limitrophe de la wilaya de Bouira. La région est divisée en 10 daïras et 25 communes, dont 17 ont une population supérieure à 20 000 habitants.

I.2 Situation géographique de la zone d'étude

Bouinan couvre une superficie de 7 309 hectares et est située au centre de la plaine de la Mitidja, à environ 15 kilomètres du chef-lieu de la Wilaya de Blida et à 35 kilomètres au sud-ouest de la capitale, Alger. Soixante pour cent de sa superficie totale (4 385 hectares) est montagneuse. Le chef-lieu de la daïra de Bouinan est constitué d'un centre urbain principal et de trois centres secondaires : Amroussa, Hassainia et El Mellaha (ville de Chréa)

I.3 Limites administratives

La commune de BOUINAN est limitée par les commune de : BOUFARIK , CHEBLI au nord. SOUMAA à l'ouest, HAMMAM MELOUANE à l'est et l'ATLAS BLIDEEN au sud.

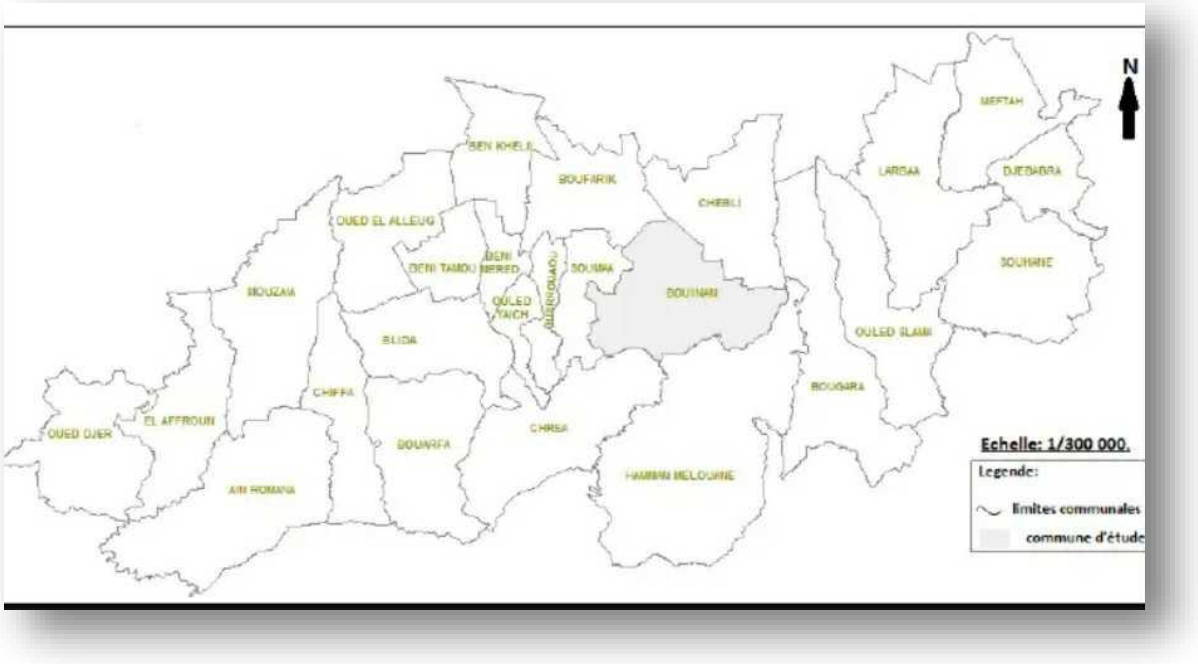


Figure I. 1 : Localisation de la commune Bouinan

I.4 Situation topographique

L'étude topographique est indispensable et joue un rôle crucial dans la conception du système d'assainissement, car l'évacuation des eaux se fait généralement par gravité, sauf dans des cas spécifiques où le terrain nécessite un pompage. La plaine, qui constitue une partie importante de la commune de Bouinan, présente une pente allant de 0 à 5 % dans la zone où se trouve la ville, la pente descendant du sud vers le nord. Dans la partie sud de la ville, l'altitude atteint 269 mètres.

I.5 Géologie du site

La structure géologique est déterminée par des carottages effectués sur le site. Cette méthode permet de créer des coupes géologiques qui définissent la composition du sol. Les visites de chantier ont permis d'observer les premières formations lithologiques dans des excavations de 3 à 6 mètres de profondeur, réalisées au début de la construction.

I.6 La sismicité

La commune de Bouinan est située dans une région où l'intensité sismique est importante (zone III), car elle se trouve au-dessus de la faille tectonique séparant les continents africain et européen. Les études de génie civil doivent donc tenir compte de cette particularité (figure I.3).

- **Situation géologique :**

Le faciès géologique de la zone d'étude est constitué d'une épaisse couche de sédiments alluvionnaires. La partie sud est montagneuse, avec une composition géologique variable comprenant des roches composées d'argiles, de marnes, de graviers et de quartzites. En raison de sa situation sur la bordure sud du bassin sismique de la Mitidja, la région de Blida connaît une activité sismique modérée et est classée en zone III dans le zonage sismique du nord de l'Algérie (Règles Parasismiques Algériennes), CGS, 1999, révisées en 2003). Annuellement, le réseau national de sismographes du Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (CRAAG) enregistre dans cette région plusieurs séismes de magnitudes faibles à modérées, qui ne représentent aucun danger pour les populations et leurs biens. Leur nombre varie d'une année à l'autre ; cette variation temporelle ne reflète cependant pas la variation réelle de la sismicité, car elle est fortement liée au bon fonctionnement du réseau sismologique permanent.

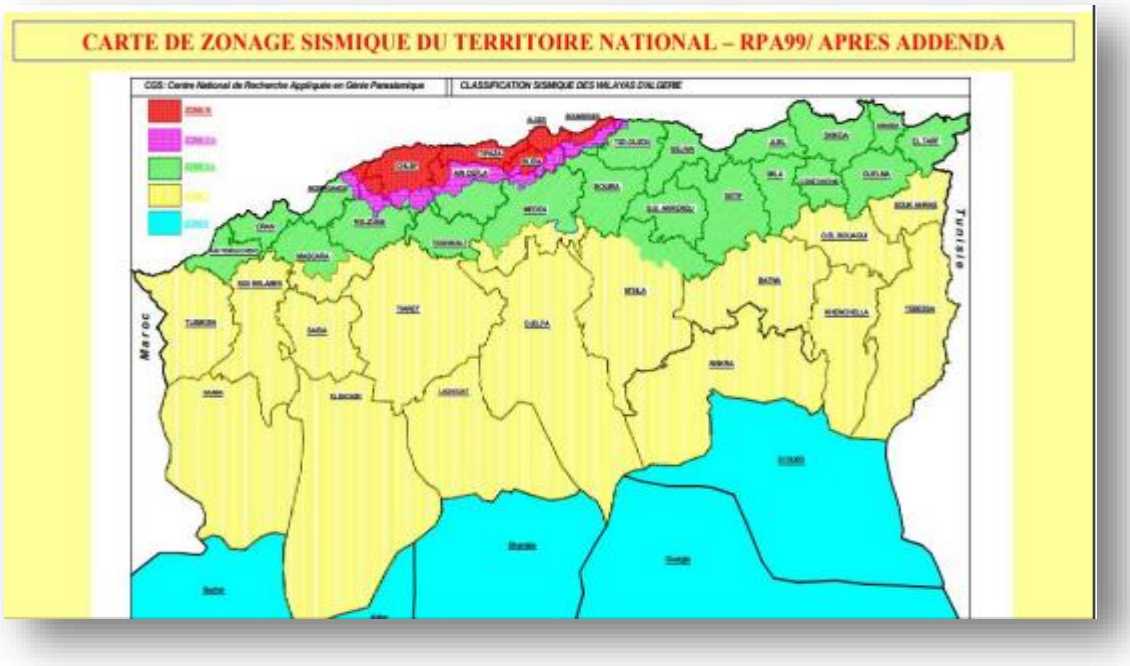


Figure I. 2 : Classification sismique des wilayas d'Algérie (Addenda, 2003)

I.7 Situation géologique

De la mer Méditerranée vers le sud, la région d'Alger présente cinq grands ensembles géomorphologiques :

- Le massif de Bouzaréah
- Le Sahel d'Alger
- La plaine de la Mitidja
- Le cordon dunaire côtier
- La plaine côtière orientale

La zone nord-est en pente douce (5 à 10%) constitue la transition entre un plateau dunaire côtier et un Sahel marneux plus abrupt et plus méridional, où se situe notre zone d'étude. Les faciès géologiques de cette zone sont caractérisés par une épaisse couche de sédiments alluviaux. La partie méridionale comprend des montagnes avec une composition géologique variée d'argiles, de marnes, de graviers et de quartzites.

La commune de Bouinan est située à 16 km au nord-est du chef-lieu de la wilaya de Blida

et à 34 km au sud d'Alger. Elle s'étend sur une superficie de 73,2 km², avec pour coordonnées 35° 11' 27.6" - 34° 57' 46.8" N et 5° 51' 43.2" - 6° 3' 54" E.

Administrativement, elle est délimitée par :

- Boufarik et Chebli au nord

- Chebli et Hammam Melouan à l'est

- Hammam Melouan et Chréa au sud

- Soummaa à l'ouest

Les villes de la commune de Bouinan sont les suivantes : Bouinan, Amroussa, Mellaha, El Hasseinia, Tabaïnette, Chabet Takouk, Saf Saf, Zitoun, Sidi Serhane, Taghzoult, Karoubenne, Zhaïria, El Fouarhia, Ech Chaouia, El Azaïeb, Boudra, Azaznia, Zerarka, Boutebal, Sidi M'Hamed, Beni Kinaa, Taouarga, Aouaichia, Chetouane, Tefaha, Sidi Bouziri, et Ouled Belkaïs.

I.8 Ville Nouvelle de Bouinan

La ville nouvelle de Bouinan, située à 34 km d'Alger dans la commune de Bouinan (Wilaya de Blida), a été créée en vertu du décret n°04-96 du 01 avril 2004, et son plan d'aménagementa été approuvé par le décret n°16/148 du 23 mai 2016. Elle a été conçue avec des vocations diversifiées, notamment en Biotechnologie, Santé, Affaires et commerce, et pour les activités sportives et de loisirs. Occupant un vaste territoire de 2 175 hectares, dont 1 675 hectares sont réservés à l'urbanisation et 500 hectares sont dédiés à la protection environnementale, la villea été déclarée d'utilité publique.

Le programme projeté pour la ville nouvelle de Bouinan comprend une population future estimée à 150 000 habitants, avec 36 000 logements prévus et 204 équipements publics en développement. Il comprend également cinq principaux pôles d'investissement répartis sur une superficie totale de 84 hectares, couvrant les domaines de la détente et des loisirs, des affaires et commerces, de l'industrie de pointe, de la santé et du multimédia. En plus de la création de nouvelles zones, le projet comprend également la mise à niveau de quatre agglomérations

existantes, à savoir Amroussa, Bouinan, Hessainia et Mellaha, sur une superficie de 500 hectares.

Concernant le programme en cours, de nombreux projets sont en phase de réalisation, dont près de 44 000 logements, 43 équipements publics, ainsi que des travaux de viabilisation primaire et secondaire dans différents quartiers. Toutefois, certains domaines tels que l'énergie, les transports et l'assainissement nécessitent encore des développements supplémentaires.

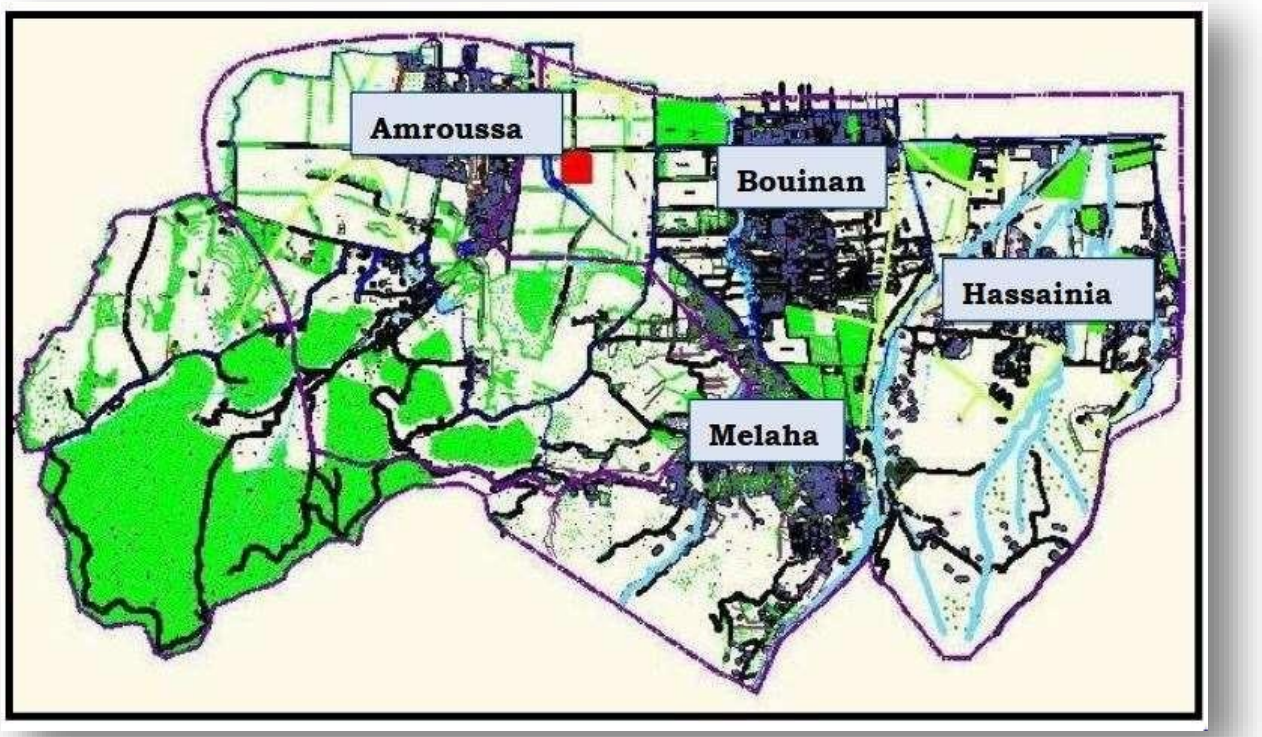


Figure I. 3 : Les quatres agglomérations de Bouinan

I.8.1 Les cours d'eau traversant la ville Nouvelle de Bouinan

La ville nouvelle de Bouinan est traversée par cinq oueds importants, à savoir l'Oued Mehalla,l'Oued Amroussa, l'Oued Bouziri, l'Oued El Had et l'Oued Safsaf. Bien que ces cours d'eau aient joué un rôle vital dans l'équilibre écologique de la région, ils présentent également un danger potentiel en ce qui concerne les inondations. Lors de fortes pluies ou de conditions météorologiques extrêmes, ces oueds peuvent rapidement déborder de leurs rives, mettant en péril la sécurité et les biens des habitants de la ville. Les risques d'inondations augmentent en raison de l'urbanisation croissante et du développement de la ville, qui peuvent altérer le flux naturel des oueds et aggraver les problèmes de drainage. Pour minimiser ces risques, il est essentiel que les autorités locales

mettent en place des mesures efficaces de gestion des eaux pluviales, de surveillance météorologique et d'aménagement du territoire, afin d 'atténuer les conséquences potentielles des inondations et de garantir la sécurité et le bien-être des résidentsde la ville nouvelle de Bouinan.

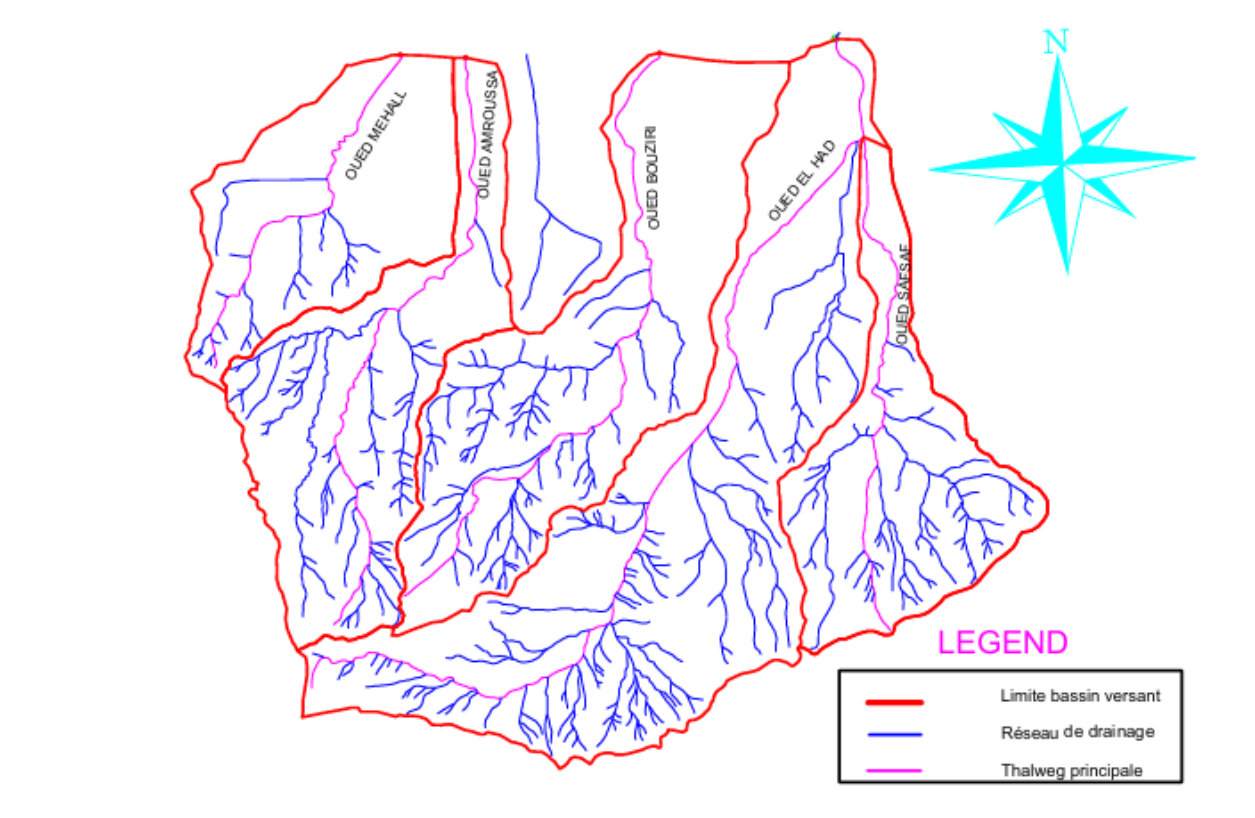


Figure I. 4 : Cartes des Réseau hydrographique de la ville nouvelle du bouinan

I.8.2 Oued Amroussa

L'Oued d'Amroussa, un cours d'eau essentiel, traverse la partie urbaine de la localité, représentant un élément vital du tissu urbain. Situé au cœur même d'Amroussa, cet oued joue un rôle central dans la dynamique de la communauté. En amont de sa trajectoire, une retenue d'eau a été aménagée, régulant ainsi le débit du cours d'eau. Cependant, il est préoccupant de noter que l'intervention humaine a engendré des modifications significatives dans la morphologie du cours d'eau, avec des variations de section prononcées. Ces changements peuvent altérer la capacité de l'oued à gérer les écoulements en période de crues et influencer la stabilité des berges. De manière

inquiétante, des habitations ont été érigées en bordure de l'oued, exposant les résidents à des risques potentiels liés aux inondations et perturbant l'écosystème naturel de l'oued.

I.8.3 Retenue Oued Amroussa

La retenue collinaire établie en amont de l'Oued Amroussa joue un rôle crucial en tant que réserve d'eau utilisée par les agriculteurs de la région. Cette réserve permet d'irriguer les terres agricoles environnantes, améliorant ainsi les pratiques agricoles et contribuant à la productivité des cultures dans la zone.



Figure I.5 : Retenue Oued Amroussa

I.8.4 Évacuateur de crue Oued Amroussa

Levée en amont de l'Oued Amroussa, l'évacuateur de crue joue un rôle vital dans la gestion des débits excédentaires en période de crues, minimisant ainsi les risques d'inondations dans la région.



Figure I. 6 : Évacuateur de crue Oued Amroussa



Figure I. 7 : Présence d'eaux usées dans l'oued d'Amroussa.

La présence d'eaux usées dans l'oued d'Amroussa soulève des préoccupations majeures en raison de son impact potentiel sur la qualité de l'eau des nappes, la santé publique et l'écosystème environnant.



Figure I. 8 : Présence des remblais et des déchets au niveau des ponts oued Amroussa

La présence de remblais et de déchets au niveau des ponts de l'Oued Amroussa suscite des inquiétudes en raison de leur effet sur le drainage naturel, pouvant entraîner des obstructions, des perturbations du flux hydraulique et des risques accrus d'inondations dans la région



Figure I. 9 : Présence de couvert végital intensse sur l'oued Amroussa

La présence d'un couvert végétal dense le long de l'Oued Amroussa peut contribuer aux inondations en ralentissant le flux d'eau et en favorisant l'accumulation de sédiments, nécessitant une gestion équilibrée pour minimiser les risques d'inondations.



Figure I. 10 : Présence des habitations au berge d'oued Amroussa

La présence d'habitations le long des berges de l'Oued Amroussa suscite des préoccupationsen raison des risques accrus d'inondations, mettant en péril la sécurité des résidents.

I.9 La situation climatologique

I.9.1 Température

La température est un facteur très important dans l'évaluation du déficit d'écoulement qui entre dans l'estimation du bilan hydrologique. Les températures de la région d'étude sont traitées à partir d'une seule station climatologique de l'ANRH à savoir la station de Soummaa

Tableau I. 1 : Températures max ; min et moyennes mensuelles

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Année
T max	16.82	17.37	21.3	22.41	26.15	30.08	33.37	33.38	31.27	25.44	21.46	17.47	24,46
T min	7.06	8.02	8.37	10.28	13.25	16.71	19.97	21.22	18.31	15.3	10.53	8.06	13.09
T moy	11.94	12.69	14.84	16.34	19.70	23.12	26.67	27.30	24.79	20.38	16.00	12.76	18.76

D'après ce tableau, la valeur de la température moyenne est de 13,09°C. La valeur maximale est enregistrée pendant le mois d'Août avec une valeur de 33.38 °C. La valeur minimale est de 7.06 °C, enregistrée durant le mois de Janvier.

Les températures moyennes mensuelles allant de novembre à avril sont inférieures à la moyenne annuelle, à comparer avec les températures des mois de mai à octobre qui sont supérieures à cette dernière.

Ceci permet de distinguer deux périodes de l'année : saison froide (de novembre à avril) et saison relativement chaude (de mai à octobre).

I.9.2 Précipitation

Elles varient au cours de l'année, avec des niveaux plus élevés durant les saisons hivernales. Les précipitations influencent directement les écoulements et les risques d'inondation, particulièrement dans les régions où le drainage naturel est limité.

Tableau I. 2 : Répartition inter-saisonnière de la pluviométrie sur l'ensemble du bassin versant

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	juil	Aout	Annuel
P (mm)	29.8	58.6	107.2	92.9	105.5	78.8	74	75.7	56	8.2	1.5	8.4	696.3

I.9.3 Evaporation

Avec un total annuel d'environ 1 200 mm, l'évaporation est un facteur majeur du bilan hydrologique. Elle est influencée par des éléments tels que la température, l'humidité de l'air et la

vitesse du vent. Les mois d'été, marqués par des températures élevées et une humidité faible, enregistrent des taux d'évaporation maximaux.

Tableau I. 3 : Répartition intra-annuelle de l'évaporation

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
%	11	8	4	4	5	5	5	6	9	12	15	16	100
E (mm)	132	96	48	48	60	60	60	72	108	144	180	192	1200

I.9.4 Vent

La vitesse du vent varie selon les saisons, avec des valeurs plus élevées en hiver et plus faibles en été. La moyenne annuelle est d'environ 3,1 m/s. Le vent influence l'évaporation, en particulier dans les périodes chaudes, où il contribue à l'augmentation de l'évapotranspiration.

Tableau I. 4 : Vitesses mensuelles moyennes du vent (m/s)

Mois	Janv	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Année
V (m/s)	3.1	3.3	3.2	3.2	3.0	3.2	3.1	3.0	2.8	2.8	2.9	3.2	3.1

(Source : ONM).

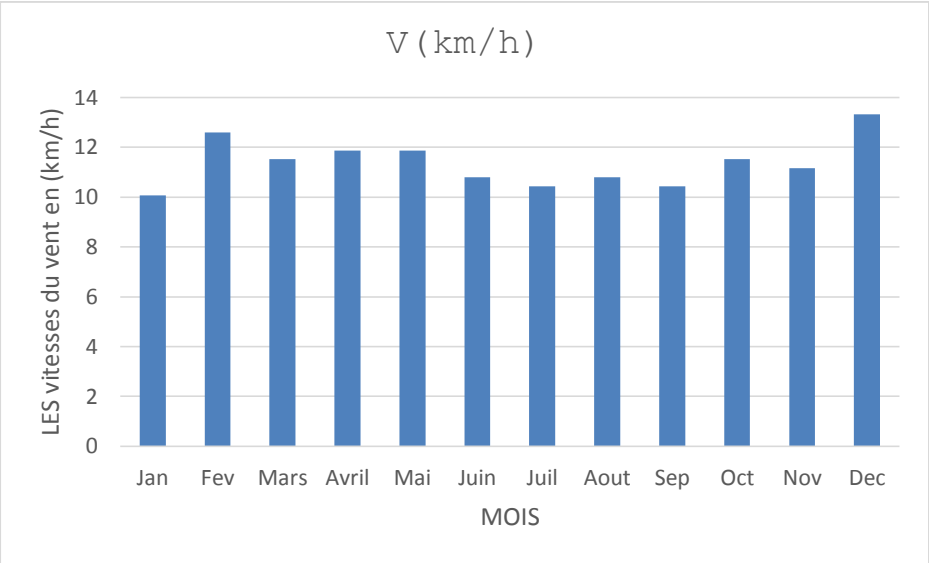


Figure I. 11 : Répartition des vitesses des vents en m/s.

I.9.5 L'humidité

Elle atteint des valeurs maximales pendant l'hiver, avec une humidité relative moyenne de 74 à 77 %, tandis qu'en été, elle est plus faible (45-58 %). L'humidité joue un rôle crucial dans le cycle de l'eau, affectant l'évaporation et la formation de précipitations.

La distribution mensuelle de l'humidité de l'air est présentée dans le tableau suivant

Tableau I. 5 : Distribution mensuelle de l'humidité de l'air relative en %

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Année
T max	98.7	91.3	87.7	86.7	85.2	76.5	66.7	73.3	80.7	85.7	89.4	91.1	83.7
T min	55	54.4	45.7	42.9	41.9	33.3	26.2	29.5	34.7	43.7	53.4	58.6	43.3
T moy	74.7	75.6	68.9	67.2	65.4	55.4	45.7	50.9	58.7	66.5	73.3	77.4	65.1

(Source ONM).

Conclusion

En résumé, l'élaboration d'un système de protection contre les inondations pour Bouinan nécessite de comprendre sa géographie, son climat, son terrain et l'utilisation de ses terres. Le premier chapitre met en évidence les vulnérabilités de la ville et les éléments essentiels de la planification, en notant la situation de Bouinan à Blida, ses 7 309 hectares et ses régions montagneuses. Avec des plans pour abriter 150 000 habitants, la ville est confrontée à des risques d'inondation provenant de cinq oueds. Des stratégies efficaces de gestion de l'eau, y compris des bassins de rétention et des infrastructures de contrôle des inondations, sont essentielles pour assurer la sécurité et le bien-être des habitants.

Chapitre II :
Etude hydrologique

Introduction

L'hydrologie est la science qui étudie le cycle de l'eau et les interactions entre l'atmosphère, la surface de la terre et son sous-sol. Une étude hydrologique vise à analyser les mécanismes à l'origine du ruissellement, de l'écoulement de surface et de la formation des crues. En examinant les caractéristiques climatiques et géomorphologiques d'un bassin versant, une telle étude permet de déterminer les débits de crue pour différentes périodes de retour.

II.9.1 Caractéristiques du bassin inversant

Le bassin versant est caractérisé par divers paramètres morphométriques, notamment la surface, le périmètre, la forme, la pente et le relief. Ces paramètres interagissent généralement en combinaison, affectant les schémas d'écoulement et influençant la réponse hydrologique au sein du bassin versant.

II.1.1 La surface et le périmètre

La délimitation du bassin versant sur une carte d'état majeur sur logiciel Autocad nous a permis de déterminer la superficie et le périmètre d'oued Amroussa représentaient sur le tableau suivant :

Tableau II. 1 : Superficie et périmètre du bassin versant étudiés

Bassin versant	Superficie (km^2)	Périmètre (km)
Oued Amroussa	11.7	20

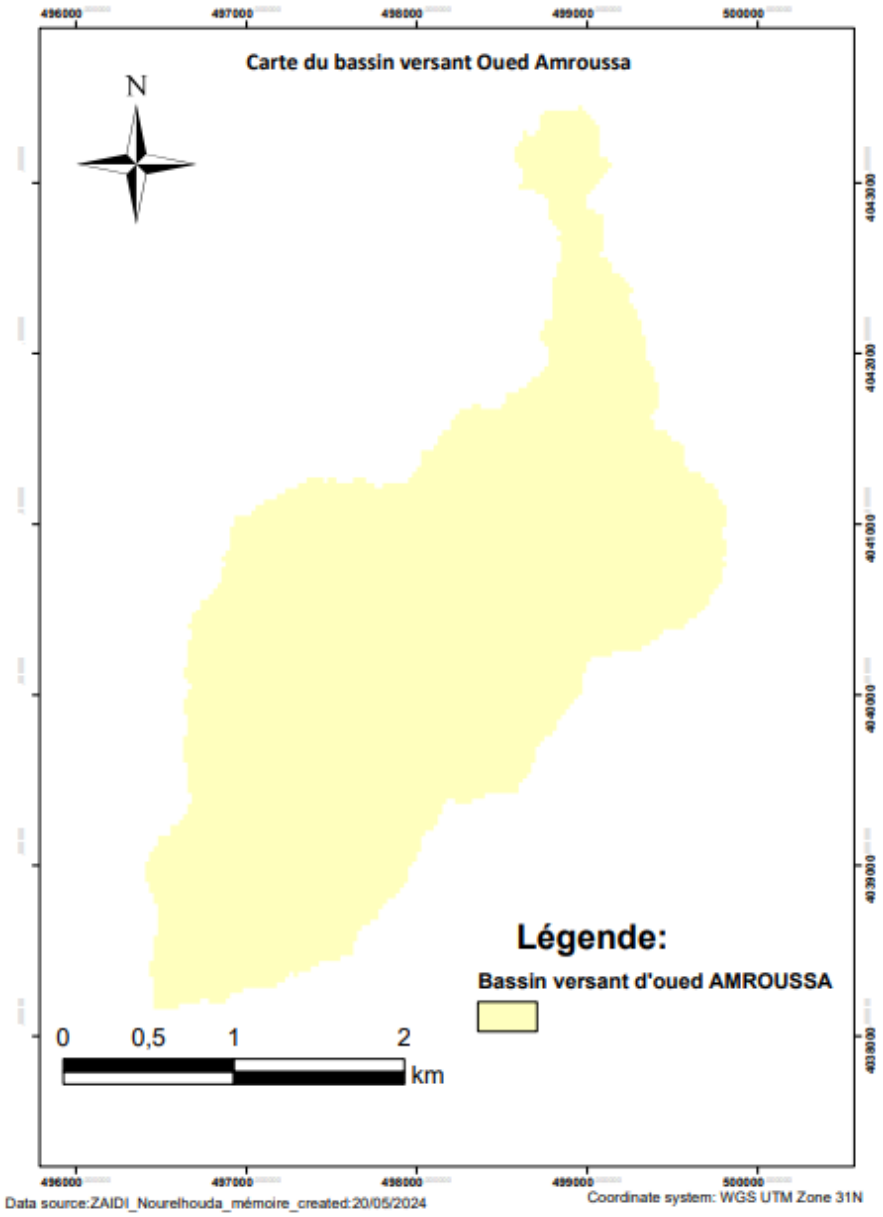


Figure II. 1 : Carte du bassin versant Oued Amroussa

II.2 La longueur du thalweg principal

Le bassin versant d'Oued Amroussa s'étend sur une superficie de 11.7 Km², et une longueur de talweg principale de de 8.7 Km , prend naissance au Djebel Marmoucha sur une altitude de 948 m, et arrive dans l'Oued Fatis qui est un affluant d'Oued Mazafrane dans le grand bassin de l'Algérois, Il est caractérisé par une forme allongée et un indice de compacité de 1,64

II.3 Caractéristiques géométriques

La forme du bassin versant influence la forme de l'hydrogramme des précipitations à la sortie du bassin versant en raison du concept de temps de concentration. Par exemple, un bassin versant allongé réagira différemment d'un bassin versant compact, même dans des conditions météorologiques identiques.

II.3.1 Indice de compacité de Gravelius Kc

La forme du bassin est caractérisée par l'indice de compacité ou indice de Gravelius Il représente le rapport du périmètre du bassin considéré sur celui du cercle de surface équivalent, la formule qui caractérise l'indice de compacité défini par la formule **: (Wisler, C. 1959)**

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28\frac{P}{\sqrt{A}}$$

- Kc : Indice de compacité de Gravelius
- P : le périmètre du BV (Km)
- S : la surface du BV (Km2)

Plus le Kc sera proche de 1, plus le bassin aura une forme ramassée et plus le temps de concentration sera court donc :

- Si KC = 1 => bassin ramassé.

-Si KC > 1 => bassin allongé.

Dans notre cas :

Tableau II. 2 : Indice de compacité du bassin versant etudié

BV	KC	Forme du BV
Oued Amroussa	**1.64**	**Allongé**

II.3.2 Rectangle équivalent

La méthode consiste à déterminer les dimensions d'un bassin fictif de forme rectangulaire ayant même superficie, même périmètre et même indice de compacité que ceux du bassin versant initial. La formule qui nous permet de déterminer les dimensions du rectangle équivalent (longueur et largeur) s'écrit : **(Roche ,1963)**

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1{,}12}\left[1+\sqrt{1-\left(\frac{1{,}12}{Kc}\right)^2}\right]$$

$$l = \frac{Kc\sqrt{A}}{1{,}12}\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{1{,}12}{Kc}\right)^2}\right]$$

Avec :

- L : Longueur du rectangle (Km)
- l : Largeur du rectangle (Km)
- Kc : Indice de compacité de Gravelius
- S : lafc surface du BV (Km2)

II.3.3 Coefficient d'allongement

Ce coefficient est obtenu par la relation suivante :

$$C_a = \frac{{L_{cp}}^2}{S}$$

Avec:

- Lcp : longueur du talweg principal ;
- S : la surface du bassin versant (km2).

- Ce coefficient fournit des indications sur le comportement hydrologique de la zone étudiée

- Un coefficient d'allongement élevé indique un bassin versant plus allongé, ce qui peut influencer le mode d'écoulement de l'eau à travers le réseau hydrographique. Cela peut réduire le temps de concentration, mais le bassin peut également réagir plus rapidement aux précipitations, augmentant ainsi le risque de crues rapides.Les paramètres hydro-morphométriques du bassin versant sont résumés dans le tableau suivant

Tableau II. 3 : : Paramètres hydro-morphométriques de sous-bassin.

Bassin versant	Superficie (km^2)	Périmètre (km)	Kc	L(km)	l(km)	Lcp(km)	Ca
Oued Amroussa	11.7	20	1.64	8.98	0.95	8.7	6.5

II.4 Les caractéristiques du relief

Le relief fait référence aux variations d'altitude, qui affectent des facteurs tels que le ruissellement, les précipitations et la végétation. En outre, la pente influence la vitesse de l'écoulement**.**

II.4.1 Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique représente l'altitude en fonction de la surface, obtenue en mesurant les surfaces entre des bandes d'altitude spécifiques ou des courbes de niveau. Ce processus a été réalisé à l'aide du logiciel ArcGIS, ce qui nous a permis de créer des cartes hypsométriques des bassins étudiés. La courbe est tracée en représentant le pourcentage de la surface totale du bassin au-dessus des altitudes correspondantes sur l'ordonnée. De plus, le diagramme hypsométrique est créé en traçant la surface partielle entre deux bandes d'altitude successives sur l'axe des x et les altitudes correspondantes sur l'axe des y. Ces courbes illustrent les altitudes caractéristiques du terrain.

- **Bassin versant oued Amroussa :**

Les résultats des surfaces partielles sont représentés dans la figure et le tableau suivantes :

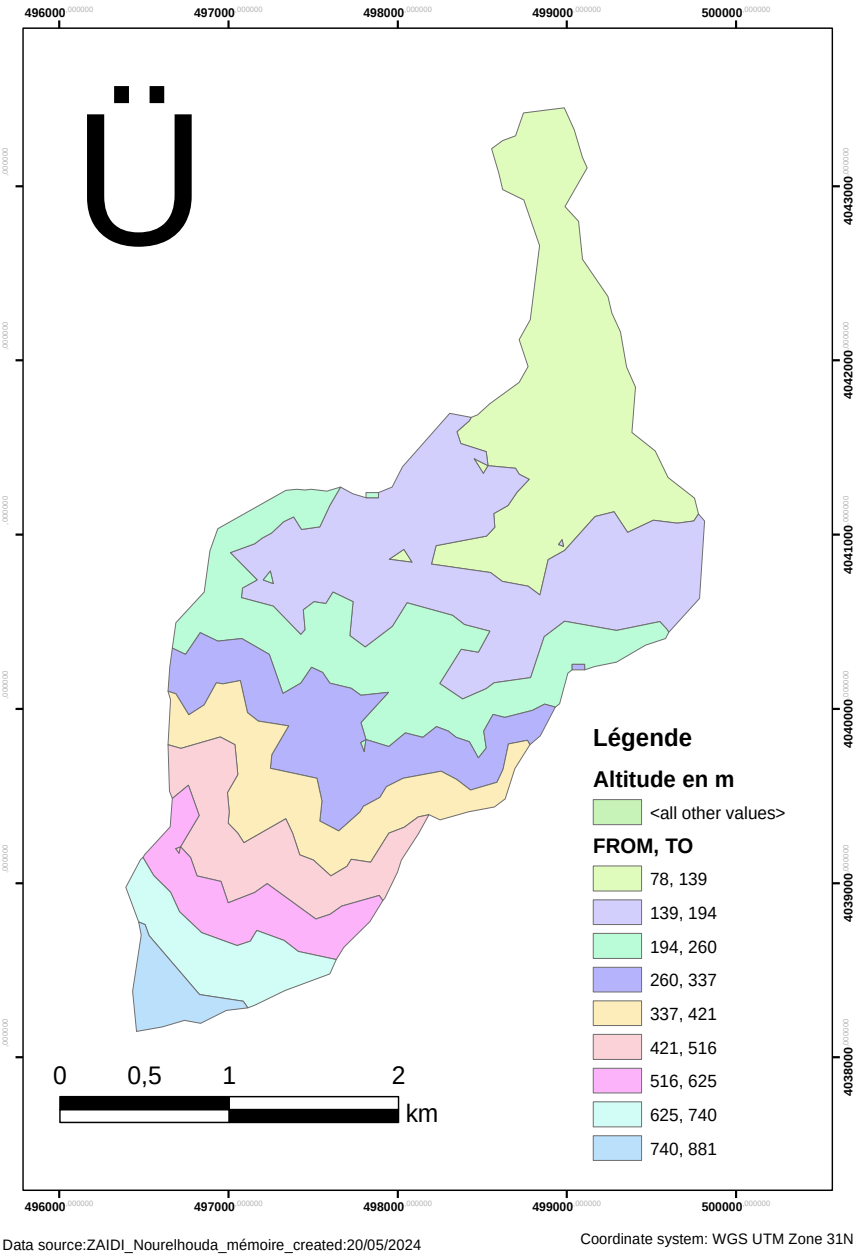


Figure II. 2 : Carte Hypsométrique du bassin versant d'oued Amroussa

Afin de mieux comprendre la répartition des altitudes au sein du bassin versant, une analyse des paramètres hypsométriques a été effectuée. Ces paramètres sont présentés dans le tableau suivant, qui résume les variations d'altitude en fonction des surfaces partielles et cumulées.

Tableau II. 4 : Paramètres Hypsométriques de la zone d'étude.

Altitude	Surface partielle		Surface cumulée
(m)	(km^2)	(%)	(%)
74-100	1.44	12.3	12.3
100-150	1.03	8.8	21.2
150-200	1.77	15.2	36.4
200-250	1.59	13.6	50
250-300	0.96	8.2	58.2
300-350	0.78	6.7	64.9
350-400	0.72	6.2	71.1
400-450	0.51	4.4	75.5
450-500	0.34	2.9	78.4
500-550	0.34	2.9	81.3
550-600	0.29	2.5	83.8
600-650	0.27	2.3	86.1
650-700	0.29	2.5	88.6
700-750	0.28	2.4	91.0
750-800	0.3	2.6	93.6
800-850	0.26	2.2	95.8
850-900	0.2	1.7	97.5
900-948	0.29	2.5	100

Les données du tableau ci-dessus nous permettent de tracer la courbe hypsométrique, qui illustre la distribution des altitudes à travers le bassin versant. Cette courbe est essentielle pour visualiser l'évolution du relief et son influence sur les écoulements hydrologiques.

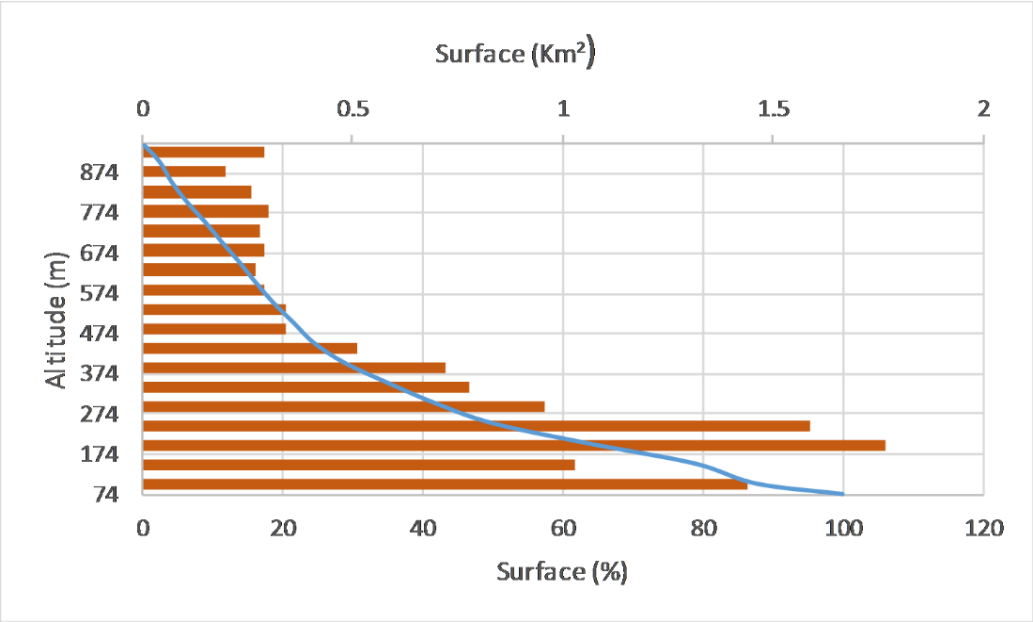


Figure II. 3 : Courbe hypsométrique du BV oued Amroussa

II.4.2 Altitude caractéristique

Les différentes altitudes sont obtenues directement à partir de la carte hypsométrique :

- **Altitude maximale (Hmax) :**

Il s'agit de l'altitude la plus élevée enregistrée dans les limites du bassin.

- **Altitude minimale (Hmin):**

Elle est située à l'exutoire du bassin et sert de point de contrôle.

- **Altitude moyenne (Hmoy) :**

L'altitude moyenne est définie comme l'ordonnée moyenne de la courbe hypsométrique. Elle correspond au rapport entre l'aire sous la courbe hypsométrique et la surface totale du bassin.

Elle peut être calculée à l'aide de la relation suivante :

$$H_{moy} = \sum \frac{S_i \times H_i}{S}$$

Tableau II. 5 : caractéristiques altimétriques de sous bassin versant.

Altitude	Hmax	Hmin	H5%	H50%	H95%	Hmoy
BV oued Amroussa	948	74	650	100	90	304.52

II.4.3 Indice de pente globale (Ig)

Cet indice permet de déterminer la nature du relief en se basant sur la classification de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), devenu l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) depuis 1998. Il est défini comme le rapport entre l'altitude correspondant à 5 % et 95 % de la surface du bassin versant et la longueur du rectangle équivalent. Deux points, S1 et S2, sont pris sur l'axe des abscisses de manière à ce que 95 % de la surface du bassin se situe entre ces deux points, tandis que 5 % de la surface se trouve en dessous de S1 et 5 % au-dessus de S2. (Touaibia, 2015).Il est donné par la formule suivante

$$Ig = \frac{D}{L} = \frac{(H5\% - H95\%)}{L}$$

Avec :

- D : Dénivelée entre H5% et H95% en (m).
- L : Longueur du rectangle équivalent en mètres (m).
- H5% et H95% Altitudes correspondant respectivement aux points S5% et S95% (mètres).

Tableau II. 6 : Classification du relief selon l'indice de pente global d'ORSTOM.

Type de relief	Valeur de l'indice Ig
Relief très faible	Ig <0.002
Relief faible	0.002 < Ig <0.005
Relief assez faible	0.005< Ig < 0.01

Tableau II.6 : Suite

Type de relief	Valeur de l'indice Ig
Relief modéré	0.01< Ig < 0.02
Relief assez fort	0.02< Ig < 0.05
Relief fort	0.05< Ig <0.1
Relief très fort	Ig>0.1

Pour notre cas :

- BV oued Amroussa : Ig= 62.33 % donc le relief est classé type **relief très fort**

II.4.4 Indice de pente M. ROCHE (Ip)

L'indice Ip correspond à la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, pondérée en fonction des surfaces situées entre deux courbes de niveau Hi et Hi-1. Il est exprimé par la formule suivante :

$$Ip = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i}^{n} \sqrt{\text{Si}(\text{Hi} - \text{Hi} - 1)}$$

Avec :

- L : longueur de rectangle équivalent (m).
- Si : surface partielle (%) comprise entre 2 courbes de niveau consécutives ;
- Hi et Hi-1 : la distance entre les courbes de niveau appelée aussi dénivelée.

Donc :

Indice de pente de Roche Ip= 247,26

II.4.5 Pente moyenne du bassin versant (Im)

La pente moyenne est un paramètre crucial qui fournit des informations sur la topographie du bassin versant. Elle est considérée comme une variable indépendante et permet d'estimer le

temps de parcours du ruissellement direct, ce qui influe sur le temps de concentration (Tc). Par conséquent, elle affecte également le débit de pointe lors d'une averse (Touaibia, 2015).

▪ La méthode proposée par Carlier et Leclerc (1964) consiste à calculer la moyenne pondérée des pentes des surfaces élémentaires situées entre deux altitudes données. Une approximation de la pente moyenne est obtenue grâce à la relation suivante :

$$Im = \frac{\Delta H(0.5l1+l2+\cdots+0.5ln)}{S}$$

- ΔH : Différence d'altitude entre H5% et H95% ;
- l1 : Longueur de la courbe de niveau d'ordre 1, 2, ... n (en km) ;
- S : bassin versant (en km²).

Tableau II. 7 : Longueur des courbes de niveau

cote(m)	longeur (Km)	dénivelée (m)	longeur cumulée	surface BV (km)	pente partielle (%)
74-100	2,64	26	2,64	11.7	0,98
100-150	1,78	50	4,42		2,81
150-200	0,8	50	5,22		6,25
200-250	0,62	50	5,84		8,06
250-300	0,46	50	6,3		10,87
300-350	0,36	50	6,66		13,89
350-400	0,25	50	6,91		20,00
400-450	0,13	50	7,04		38,46
450-500	0,27	50	7,31		18,52
500-550	0,2	50	7,51		25,00
550-600	0,17	50	7,68		29,41
600-650	0,16	50	7,84		31,25
650-700	0,15	50	7,99		33,33
700-750	0,15	50	8,14		33,33
750-800	0,1	50	8,24		50,00
800-850	0,25	50	8,49		20,00
850-900	0,15	50	8,64		33,33
900-905	0,06	5	8,7		8,33
Pente moyenne du bassin versant (Im) %	14,76282051				

Pour notre cas :

- BV oued Amroussa : Im = 14.76 %

II.5 Les caractéristiques du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique comprend tous les cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui contribuent à l'écoulement de l'eau. Il constitue l'une des caractéristiques les plus significatives d'un bassin et peut revêtir différentes formes. Pour analyser les caractéristiques d'un réseau hydrographique, les Talwegs ont été classés et numérotés selon la méthode Strahler.

Les résultats de la classification de Talweg sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II. 8 : Classification de Strahler du réseau hydrographique de bassin versant

Numéro d'ordre	Nombre	longueur(km)
1	64	18,16
2	17	8,75
3	6	13.77

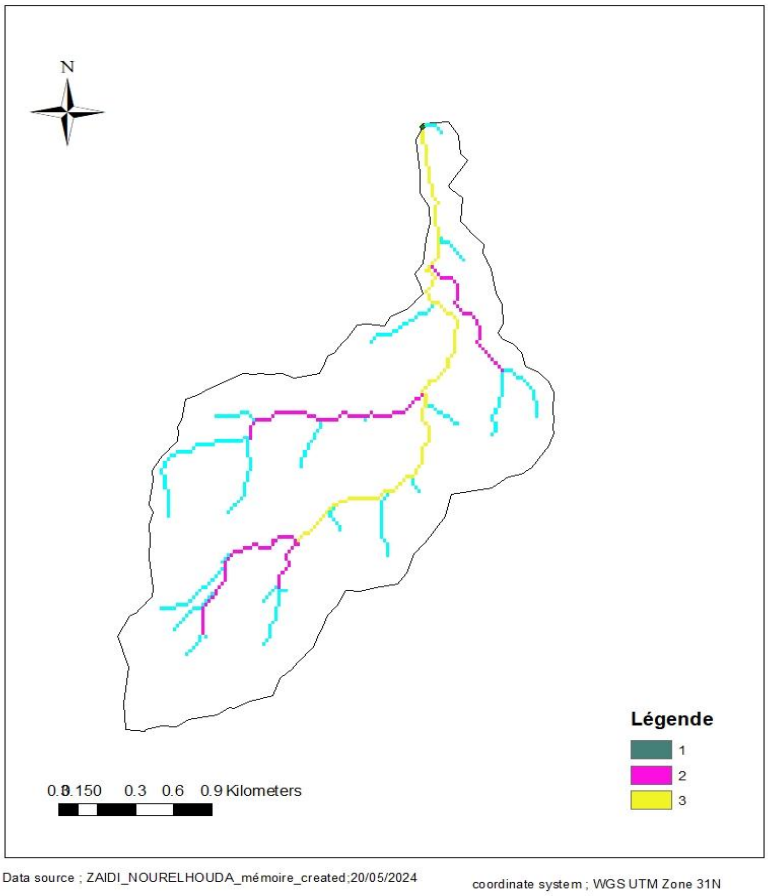


Figure II. 4 : Réseau hydrographique de sous bassin versant Amroussa « classification Strahler ».

II.5.1 Rapport de la confluence (Rc)

C'est un élément important à considérer pour établir des corrélations d'une région à une autre. Selon Strahler (1964), le Rc varie de 3 à 5 pour une région où la géologie n'a aucune influence, il est défini par :

$$Rc = \frac{Nn}{Nn+1}$$

Avec :

- Rc : rapport de confluence.
- Nn : nombre de cours d'eau d'ordre n.
- Nn+1 : nombre de cours d'eau d'ordre n+1

- Rc représente le développement du réseau de drainage. Lorsque ce réseau est bien structuré, le nombre de cours d'eau successifs suit une série géométrique inverse.

Tableau II. 9 : Calcul du rapport de confluence pour sous bassin versant

ordre du cours d'eau	nombre	RL	R_L
1	64	3,76470588	
2	17	2.83	
3	6		3.29867

II.1.2 Rapport des longueurs (RL)

C'est le rapport des longueurs moyennes des cours d'eau d'ordre n aux longueurs moyennes des

cours d'eau d'ordre n -1, donné par :

$$RL = \frac{Ln}{Ln+1}$$

Avec :

- Ln : longueur de cours d'eau d'ordre n.
- Ln+1 : longueur de cours d'eau d'ordre n+1.

Tableau II. 10 : Calcul du rapport des longueurs pour sous bassin versant

ordre du cours d'eau	longueur(km)	RL	R_L
1	18,16	2,07542857	
2	8,75	0.63	
3	13.77		1,3525

II.5.3 Les longueurs du cours d'eaux

Tableau II. 11 : La longueur de cours d'eau principal

Bassin versant	**Longueurs de cours d'eau principal (km)**
Oued Amroussa	**8.7**

II.5.4 Densité de drainage

La densité de drainage est définie par le rapport entre la superficie du bassin versant et la longueur totale de talwegs permanents et temporaire :

$$D = \frac{\sum Li}{A}$$

- n i Li = ∑ : La longueur totale de tous les talwegs (km).
- : La surface totale du bassin versant (km2)

Dans notre cas :

- **Dd= 3.49 km/km²**

II.5.5 La densité hydrographique des thalwegs élémentaires « F1 »

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

Elle se définit par la formule suivante :

$$F1 = \frac{\sum N1}{S}$$

Avec :

- F1 : Densité hydrographique (Km-2)
- N1 : Nombre de cours d'eau d'ordre 1
- A : Superficie du bassin versant (Km2).

Dans notre cas :

F1=5.47 Km-2

II.5.6 Le coefficient de torrentialité « Ct »

Le coefficient de torrentialité est le produit de la densité de drainage par la fréquence des talwegs élémentaires. Il est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$Ct = Dd \times F1$$

Avec

- Dd : Densité de drainage en km/km2 ;
- F1 : Densité hydrographique (Km−2).

Dans notre cas :

Ct=19.1

II.6 Détermination du temps de concentration

On appelle temps de concentration Tc d'un bassin versant, la durée nécessaire pour que la pluie tombée sur le point le plus éloigné hydrologiquement de l'exutoire atteigne celui-ci (Musy,A. 2005)

Dans la pratique, le temps de concentration peut être soit mesuré directement sur le terrain, soit estimé à l'aide de formules empiriques. En l'absence de formule spécifique pour la région, nous avons appliqué la formule empirique la plus pertinente dans notre contexte.

- **Formule de GIANDOTI**

$$Tc = \frac{4\times\sqrt{S}+1.5\times L}{0.8\times\sqrt{(Hmax-Hmin)}}.$$

Où :

- TC : temps de concentration (heures) ;
- S : superficie du bassin (km²) ;

- L : longueur du cours d'eau le plus long (km) ;
- Hmax : Hmax : élévation maximale du bassin (mètres) ;
- Hmin : élévation minimale (sortie) (mètres).

Domaine de validité :

- Valable pour les grands bassins versants.

➢ **Formule de VENTURA :**

$$Tc = 0.1272 \times \sqrt{\frac{S}{I}}$$

Où :

- Tc : Temps de concentration (h).
- S : Surface du BV (Km²).
- I : Pente moyenne du bassin (m/m).

Domaine de validité :

Le bassin versant s'étend de 1 à 20 km², voire plus de 10 km² en fonction de la structure spécifique.

➢ **Formule de KIPRICH :**

$$Tc = \frac{0.000325 \times L^{0.77}}{I^{0.385}}$$

- Tc : Temps de concentration (h).
- I : Pente moyenne du bassin (m/m).
- L : longueur du cours d'eau le plus long (km).

Domaine de validité :

Cette méthode est généralement appliquée aux bassins versants urbanisés, tandis que d'autres formules sont généralement utilisées pour les bassins versants naturels. Pour qu'elle soit valable, les conditions $\mathbf{0.04} < S < \mathbf{0.453}$ Km² et $\mathbf{0.03} < \boldsymbol{I} < \mathbf{0.1}$ doivent être remplies.

- **La formule D'ANRH :**

Pour les conditions physiographique des bassins versants de l'Algérie la Formule du temps de concentration développé par L'ANRH est la suivante : (D.Boutoutaou 2014)

$$T_c = 1.7\left(\frac{SL}{\sqrt{I}}\right)^{0.19}$$

- Tc : Temps de concentration (h).
- I : Pente moyenne du bassin (m/m).
- L : longueur du cours d'eau le plus long (km).
- S : Surface du BV (Km²).

- **La formule de sokolovsky**

$$Tc = \frac{L}{3.6 * V}$$

- L : longueur du cours d'eau (Km).
- V : vitesse moyenne de l'écoulement en crue qui est fonction de la taille du cours d'eau et de la nature du relief. Pour les petits cours d'eau V ≈ 0,7 – 1,2 (m/s).

Le temps de concentration calculé pour les différentes formules est résumé dans le tableau suivant :

Tableau II. 12 : Résultats du calcul du temps de concentration en heure pour le sous bassin étudié.

	Temps de concentration Tc (h)				
Formule	**GIANDOTTI**	**VENTURA**	**KIRPICH**	**D'ANRH**	**SOKOLOVSKY**
Oued Amroussa	0.15	0.43	0.65	1.7	2.99

En raison de la taille du bassin versant, la formule de Kirpich n'est pas adaptée car elle est destinée aux petits bassins versants, alors que la formule de Giandotti s'applique aux très grands bassins versants. Bien que la plus petite valeur soit généralement préférée, nous avons choisi d'utiliser la formule ANRH, qui est spécifiquement conçue pour les bassins versants algériens, afin de garantir que les résultats soient les plus applicables à ce contexte.

Donc :

Tc = 1.7h

- **Vitesse de ruissellement « Vr » :**

Le ruissellement désigne l'écoulement gravitaire des eaux de pluie à la surface du sol, suivant la pente du terrain et le micro-réseau hydrographique, lorsque ces eaux n'ont pas été infiltrées, évaporées ou retenues en surface. Il représente, tout simplement, le rapport entre la distance parcourue et le temps de concentration.

$$Vr = \frac{Lcp}{Tc}$$

Avec :

- Vr : vitesse de ruissellement (km/h) ;
- Lcp : Longueur du cours d'eau principal (km) ;
- Tc : Temps de concentration (h).

Dans notre cas

Vr=5.1 km/h

Tableau II. 13 : Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'oued Amroussa

	Caractéristiques du Relief	**Unités**	**Oued Amroussa**
1	X UTM	XL	497,226,00
2	Y UTM	YL	4,043,840,00
3	Périmètre	P	20

	Caractéristiques du Relief	Unités	Oued Amroussa
4	Surface	S	11,7
5	Longueur du Th Ppal	Lth	8,7
6	Altitude Max	Zx	948
7	Altitude Mini	Zn	74
8	Dénivelée Totale	DZ	874
9	Altitude Moy	Hmoy	304,52
10	Altitude 5%	Z5%	650
11	Altitude 95%	Z95%	90
12	Altitude Médiane 50%	Zme	100
13	Pente Bassin Versant	m/km	248,1196581
14	Pente Talwage principal	I%	21,32455347
Caractéristiques de Forme			
15	Compacité	Kc	1,64
16	Long Rect équivalent	Léq	8,98
17	Larg Rect équivalent	léq	0,95
18	Diamètre du bassin	Do	3,860629301
Caractéristiques Hydrographiques			
19	Nombre de i1	N1	64
20	Facteur de fréquence	F1	5,47008547
21	Somme des longueurs	S(li)	40,68
22	Densité de drainage	Dd	3,49
23	Temps de concentration	Tc	1,701051858
24	vitesse de ruisselement	Vr	5,1

II.7 Etude des crues

Le calcul du débit de pointe est une phase critique de tout projet de protection contre les inondations, car il est fondamental pour sélectionner les infrastructures appropriées et délimiter les zones inondables. Après avoir identifié et analysé les bassins versants concernés, cette étape vise à estimer les débits de crue pour des périodes de retour allant de 10 à 100 ans.

L'estimation de la fréquence des débits de crue dans un bassin versant peut être abordée à l'aide de deux méthodes :

a. Série d'observations des stations hydrométriques : Cette méthode s'appuie sur les données historiques de débit enregistrées dans une station hydrométrique située dans le bassin versant. Des analyses statistiques sont ensuite effectuées sur ces données à l'aide de méthodes telles que la méthode des moments, la loi de Gumbel ou la loi de Pearson III afin d'estimer les débits de crue fréquents.

b. Méthode GRADEX : Lorsque les données hydrométriques sont insuffisantes, la méthode GRADEX constitue une alternative. Elle utilise une relation empirique entre les précipitations et les débits de crue observés dans un bassin versant voisin présentant des caractéristiques similaires. Cette approche permet de transférer les informations du bassin versant voisin à celui étudié, en tenant compte des différences de superficie, de pente, de géologie et d'autres facteurs.

Les deux approches visent à estimer les débits de crue fréquents à l'aide de méthodes probabilistes et statistiques. Toutefois, il est essentiel de reconnaître que les résultats de ces méthodes peuvent comporter des incertitudes et doivent être interprétés avec prudence.

En fin de compte, l'objectif principal des études sur les inondations est de mieux comprendre les processus hydrologiques qui les influencent.

II.7.1 Présentation des stations utilisées dans les études sur les inondations

Dans les études sur les inondations, une série de stations de mesure est utilisée pour recueillir des données hydrologiques et météorologiques essentielles.

Vous trouverez ci-dessous un aperçu des types de stations couramment utilisées dans ces études :

a Station pluviométrique

Ces stations sont spécifiquement équipées pour mesurer les précipitations à l'aide de jauges ou de capteurs qui enregistrent les précipitations sur une période donnée. Les données recueillies sont essentielles pour évaluer le volume d'eau entrant dans un bassin versant et pour prévoir les inondations potentielles.

b Station hydrométrique

Ces stations sont dédiées à la mesure du débit et sont cruciales pour la surveillance et la collecte de données hydrologiques. Ces données sont essentielles pour l'analyse des inondations, la gestion des ressources en eau et d'autres études liées aux systèmes hydriques.

➢ **Présentation de la station hydrométrique**

La station hydrométrique fournit un ensemble de données continues couvrant 21 années, de 1972/1973 à 1993/1994, sans aucune observation manquante. Les débits instantanés maximaux enregistrés dans le sous-bassin de l'oued Bou-Sellam à cette station sont compris entre 0,95 et 236 m^3/s.

➢Les caractéristiques de la station sont montrées dans le Tableau

Tableau II. 14 : Les caractéristiques de la station hydrométrique

station	code	coordonneés			Nombre d'anneés
		X(m)	Y(m)	Z(m)	
Rocher des pigeons	021301	742	328.6	1030	21

➢La figure suivante montre la situation de la station choisie :



Figure II. 5 : Situation de la station hydrométrique (Source : ANRH-Blida).

➢ Le Tableau représente la répartition des débits maximales annuels de la station prise :

Tableau II. 15 : Série des débits maximales annuels prise de la station 021301

N	Année	Qmax(m3 /s)	N	Année	Qmax(m3 /s)
1	1973	203.03	12	1984	20.68
2	1974	541.16	13	1985	48.18
3	1975	41.56	14	1986	114.23
4	1976	112.63	15	1987	100.17
5	1977	69.82	16	1988	27.99
6	1978	57.72	17	1989	299.89
7	1979	61.77	18	1990	62.44
8	1980	90.87	19	1991	227.33
9	1981	57.72	20	1992	560.651
10	1982	29.23	21	1993	13.30
11	1983	29.46	22	1994	251.05

(Source : ANRH Blida)

➢Les caractéristiques de la série pluviométrique sont déterminées à l'aide de logiciel HYFRAN, représentées dans le Tableau n° II.16 :

Tableau II. 16 : Caractéristiques de la série des débits de la station 021301.

Caractéristiques	Valeurs
Moyenne des Qmax en (m^3/s)	137
Écart type « σx » ; Pour n >30 ans	156
Coefficient de variation « Cv »	1.13

- **Choix du modèle fréquentiel**

Dans les études sur les inondations, divers modèles de fréquence sont utilisés pour analyser et prévoir le comportement des rivières lors d'événements extrêmes. Ces modèles estiment les débits pour différentes périodes de retour en analysant statistiquement les données hydrologiques. Voici quelques-uns des modèles fréquemment utilisés, les variables hydrologiques qui leur sont associées et leur validité :

a. Ajustement de la série par la loi de Gumbel

C'est une loi à décroissance exponentielle, elle s'ajuste, pour des durées de 1 heure à Il s'agit d'une loi de décroissance exponentielle qui s'adapte, pour des durées allant d'une heure à quelques jours, aux maxima sur 10 ou 15 jours, aux maxima mensuels, saisonniers ou annuels. Son principal avantage réside dans sa capacité à étendre l'échelle de distribution au-delà de la probabilité de 0,90. Il s'agit d'une fonction double exponentielle (Layan et al., 2007).

$$F(x) = exp^{-exp(\frac{-(x-x0)}{a})}$$

Avec :

- a : est le Gradex, qui signifie le gradient de l'exponentiel (paramètre d'échelle) ;
- x0 : est le paramètre de position (le mode) ;
- a et x0 ont la même dimension que la variable ;

$$U = -ln(-ln(F(x))) = \frac{x-x0}{a}$$

U : est appelée variable réduite de Gumbel.

➢L'ajustement de la série à la loi de Gumbel a été établi par le logiciel Hyfran, les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II. 17 : Résultats d'ajustement à la loi de Gumbel de la station 021301

Période de retour (ans)	Probabilité de fréquence (q)	Qmaxj (m3 /s)	Écart type	Intervalle de confiance
1000	0.999	905	192	529 - 1280
200	0.995	710	149	418 - 1000
100	0.99	625	130	370 - 881
50	0.98	541	112	322 - 760
20	0.95	428	87.5	256 - 599
10	0.9	340	69.3	205 - 476
5	0.8	249	51.3	149 - 350

➢ La représentation des observations sur du papier normal est présentée dans la figure suivante :

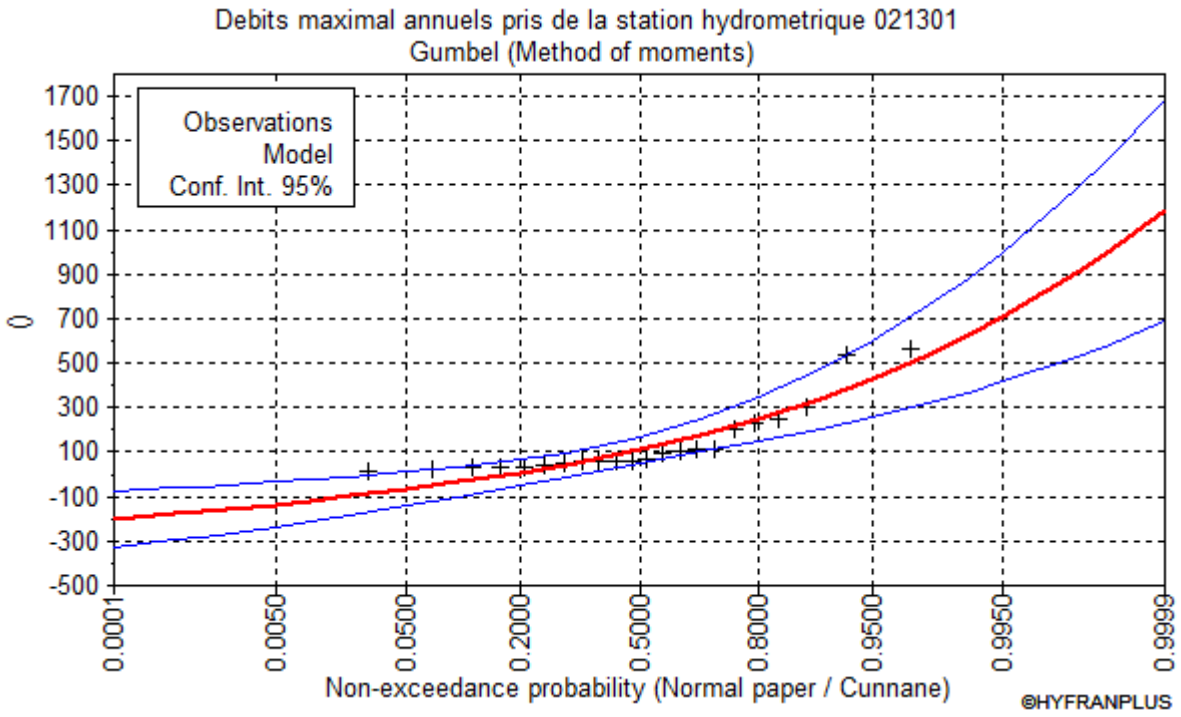


Figure II. 6 : Représentation graphique de la loi de Gumbel de la station (021301).

➢ Les résultats de la comparaison des caractéristiques de la loi de Gumbel et de l'échantillon, sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau II. 18 : Comparaison des caractéristiques de la loi de Gumbel et de l'échantillon

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	Aucun	13.3
Maximum	Aucun	561
Moyen	137	137
Écart type	156	156
Médiane	112	66.1
Coefficient de variation Cv	1.13	1.13
Coefficient d'asymétrie Cs	1.14	1.91
Coefficient d'aplatissement Ck	2.40	4.71

b. Ajustement de la série par la loi log normale « loi de Galton »

Une variable aléatoire x suit une distribution log-normale lorsque v = ln(x) est distribuée normalement. La loi de Galton découle de la loi normale, mais devient asymétrique suite à un changement de variable.

➢L'ajustement de la série à la loi de Log-Normal a également été réalisé par le logiciel Hyfran, les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau n° II.19 :

Tableau II. 19 : Résultats d'ajustement à la loi log normale de la station 021301.

Période de retour (ans)	Probabilité de fréquence (q)	Qmaxj (m3 /s)	Écart type	Intervalle de confiance
1000.0	0.9990	1950	1040	N/D
200.0	0.9950	1150	531	N/D
100.0	0.9900	891	381	N/D
50.0	0.9800	674	263	158 - 1190
20.0	0.9500	444	150	149 - 739
10.0	0.9000	306	91.0	128 - 485
5.0	0.8000	195	49.8	97.5 - 293

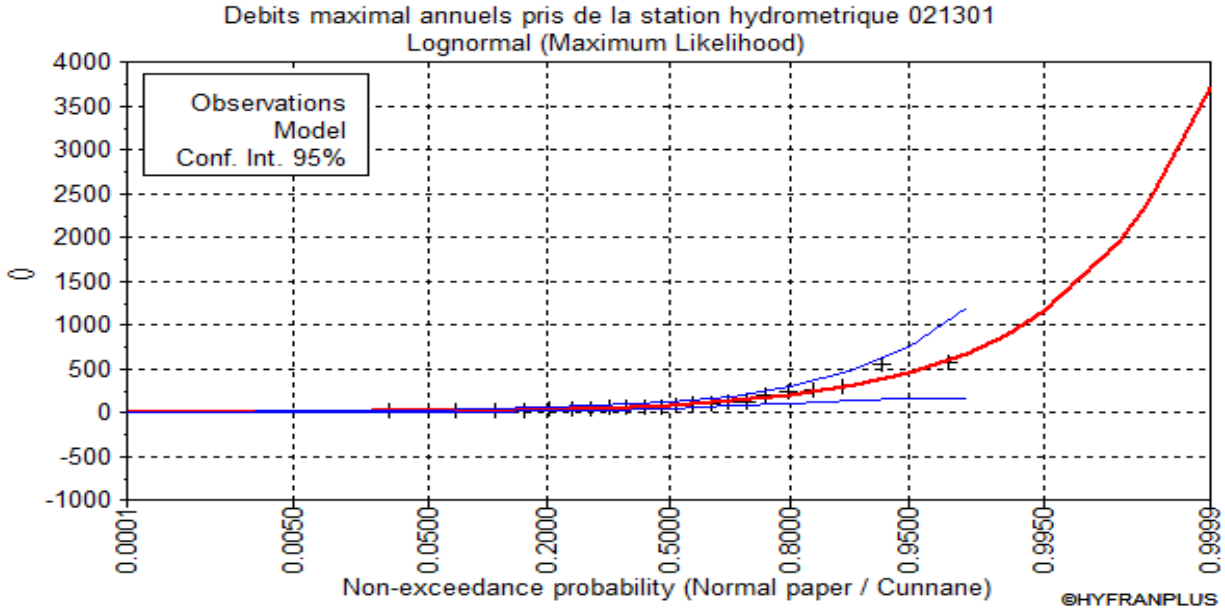


Figure II. 7 : Représentation graphique de la loi log normale de la station 021301.

La représentation des observations sur du papier normal est présentée dans la figure suivante :

➢La comparaison entre les caractéristiques de la loi de Log Normal et de l'échantillon, est montrée dans le tableau suivant :

Tableau II. 20 : Comparaison des caractéristiques de la loi log normale et de l'échantillon.

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	0	13.3
Maximum	Aucun	561
Moyen	139	137
Écart type	189	156
Médiane	82.5	66.1
Coefficient de variation Cv	1.16	1.13
Coefficient d'asymétrie Cs	6.58	1.91
Coefficient d'aplatissement Ck	133	4.71

- **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 (Touaibia, 2015).

Le test le plus utilisé c'est le test de χ 2

- **Ajustement graphique visuelle (la méthode visuelle)**

La figure II.8 montre le graphe des résultats obtenus. Ils représentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions Gumbel et Log Normale à l'aide du logiciel Hyfran-Plus. Visuellement, Il est difficile de déterminer l'ajustement le plus approprié uniquement par observation visuelle, c'est pourquoi une analyse statistique est nécessaire pour appuyer le choix

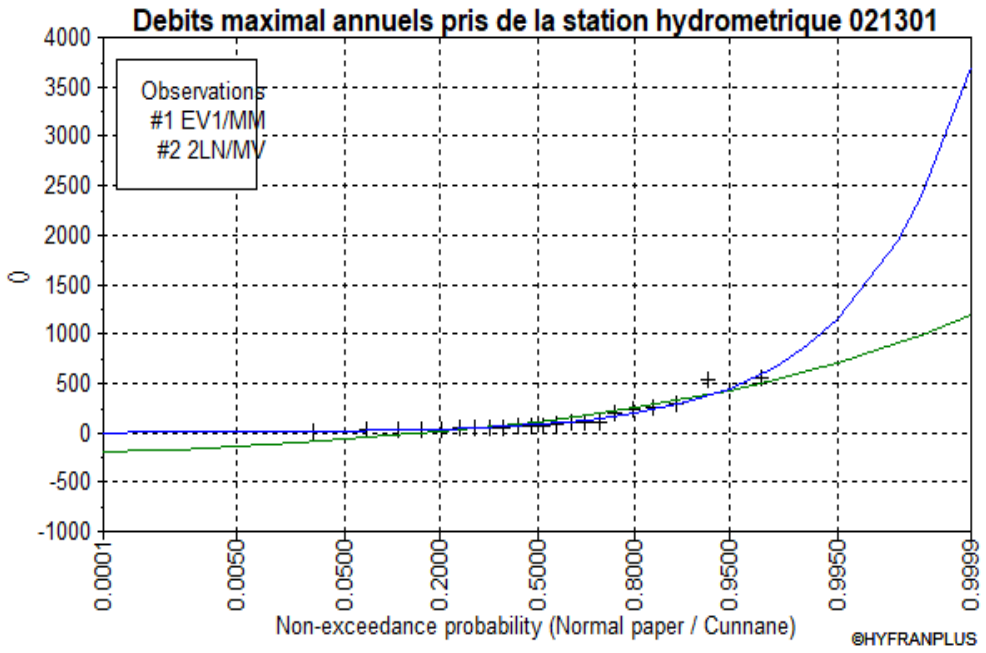


Figure II. 8 : Graphe comparatif des résultats d'ajustement par la méthode de Gumbel et Log normale pour la station 021301.

- **Le test d'adéquation de χ 2**

- 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) (Touaibia, 2015).
- Le test de Khi carré (χ2) est utilisé pour un seuil de signification α imposé en général à 5%, et un degré de liberté « γ » : $\gamma = k - m - 1$: tel que k c'est le nombre de classe et m c'est le nombre de paramètre de la loi.
- La variable aléatoire χ2 , dont la répartition a été étudiée par Person, est définie par l'expression suivante :

$$\chi 2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(ni - \mu i)^2}{\mu i}$$

Avec

- ni : Nombre d'observation contenue dans la classe i ;
- μi : Nombre d'observation théorique calculée dans la classe i.

• Ce test n'est significatif que si μi >5.

- On compare χ2 calculé avec la valeur tabulée (théorique), χ 2 tabulé fonction du nombre de degré de liberté et du seuil de signification α et γ représentée dans l'annexe n° 03 :
  - ✓ Si χ 2 calculé > χ2 tabulé, μ : on rejette l'hypothèse nulle.
  - ✓ Si χ 2 calculé ≤ χ2 tabulé, μ : la loi d'ajustement sera retenue.

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

Tableau II. 21 : Résultats du test de χ2 de la station Hydrométrique 021301.

Loi de distribution	Degré de liberté γ	Nombre de classe	χ 2 calculé	χ 2 théorique
Gumbel	3	6	10.73	10.52
Log Normal	3	6	4.18	4.23

• D'après les résultats obtenus du test du khi carré et de l'ajustement, la série des débits maximaux annuels montre un ajustement adéquat à **la loi Log Normale.**

II.8 Pluies de durée Tc (pluies de courte durée)

Les pluies de courte durée ont été calculées sur la base des données relatives aux pluies maximales journalières en utilisant la relation de Body:

$$P_{tf\%} = P_{Jf\%} * \left(\frac{t}{24}\right)^b$$

Où :

Ptf : Pluie de durée t et de fréquence « f%» en mm;

PJf: pluie maximale journalière de fréquence « f% »;

t : durée de l'averse en heure;

b : Exposant climatique b = 0,41 (source ANRH).

Les valeurs des pluies de courtes durées (inférieur à 24 heures) sur le bassin versant Bouinan sont présentées dans le Tableau II.22

Tableau II. 22 : Pluie fréquentielles de courte durée en mm sur le bassin versant de Bouinan

Durée de l'averse (h)	**Période de retour (ans)**											
	5		**10**		**20**		**50**		**100**		**1000**	
	p% (mm)	Intensité (mm/h)	p% (mm)	Intensité (mm/h)	p% (mm)	Intensité (mm/h)	p% (mm)	Intensité (mm/h)	p% (mm)	Intensité (mm/h)	p% (mm)	Intensité (mm/h)
0	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-
0.25	11.48	45.93	13.39	53.56	15.22	60.89	17.55	70.18	19.39	77.57	25.24	100.97
0.5	15.26	30.51	17.79	35.58	20.22	40.45	23.31	46.63	25.77	51.53	33.54	67.08
0.75	18.01	24.02	21.01	28.01	23.88	31.84	27.53	36.71	30.43	40.57	39.60	52.80
1	20.27	20.27	23.64	23.64	26.87	26.87	30.98	30.98	34.24	34.24	44.56	44.56
1.25	22.21	17.77	25.90	20.72	29.45	23.56	33.94	27.15	37.52	30.01	48.83	39.06
1.5	23.94	15.96	27.91	18.61	31.73	21.16	36.58	24.39	40.43	26.95	52.62	35.08
2.05	27.21	13.27	31.73	15.48	36.07	17.59	41.58	20.28	45.95	22.42	59.81	29.18
2.5	29.51	11.81	34.42	13.77	39.13	15.65	45.10	18.04	49.85	19.94	64.88	25.95
3	31.80	10.60	37.09	12.36	42.16	14.05	48.60	16.20	53.72	17.91	69.92	23.31
4	35.78	8.95	41.73	10.43	47.44	11.86	54.68	13.67	60.44	15.11	78.67	19.67
6	42.26	7.04	49.28	8.21	56.02	9.34	64.57	10.76	71.37	11.90	92.90	15.48
12	56.15	4.68	65.48	5.46	74.43	6.20	85.80	7.15	94.83	7.90	123.43	10.29
24	74.60	3.11	87.00	3.63	98.90	4.12	114.00	4.75	126.00	5.25	164.00	6.83

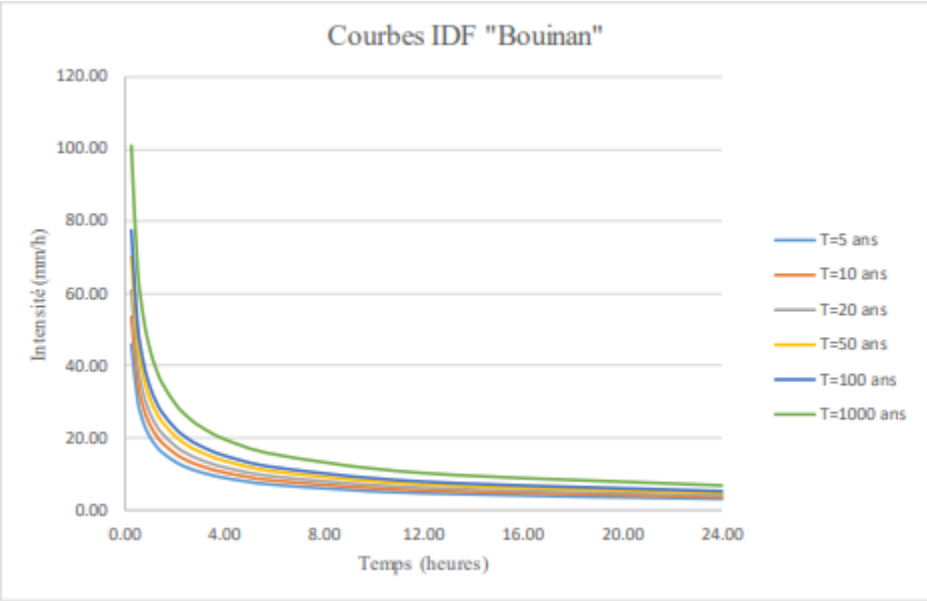


Figure II. 9 : Les courbes Intensité-Durée-Fréquence du bassin versant Bouinan

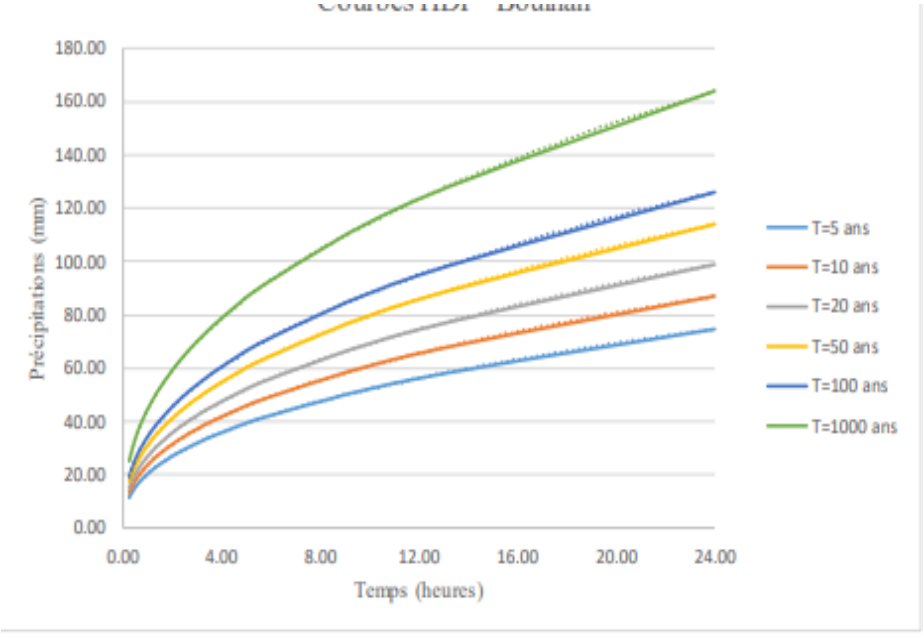


Figure II. 10 : Les courbes Hauteur-Durée-Fréquence du bassin versant Bouinan

II.9 Détermination des débits maximums fréquentiels par la méthode du Gradex

II.9.1 Méthode du Gradex

Le modèle probabiliste Gradex permet d'évaluer les risques de crues extrêmes ainsi que l'extrapolation à différentes périodes de retours.

II.9.1.1 Historique de la méthode du Gradex

La méthode du Gradex est considérée comme étant une approche probabiliste relative au calcul de débits de crues extrêmes d'un oued pour des périodes de retour variant de 100 à 10000 ans, elle a été développée par Guillot et Duband (1967). La réparation homogène des pluies dans le bassin et la superficie du bassin est doit être inférieure à 5000 km2 se sont les deux conditions qui doivent être vérifiées (Guillot, 1980).

En utilisant les pluies, la méthode du GRADEX est considérée comme étant une méthode plus élaborée que les méthodes de prédétermination des crues qui sont essentiellement basées sur le traitement des valeurs de débits observés aux droits des stations hydrométriques (Guillot, 1980).

II.9.1.2 Principe de la méthode

Le principe de la méthode est que le comportement de la loi de probabilité des débits maximum devenu asymptotique au comportement des pluies maximale journalière à partir de la crue du période de retour décennal (Guillot, 1980). Ce principe est appuyé sur la tendance la stabilisation de la capacité de rétention (devenir constante) des bassins-versants à partir de débit décennal (Guillot & Duband, 1967).

II.9.1.3 Les étapes de la méthode

Les étapes à suivre pour mettre en œuvre cette approche sont énumérées ci-dessous :

➢ Déterminer le gradex 'a' à partir de l'ajustement des précipitations maximales journalières (Pjmax) à la loi de Gumbel (**Pj,max (mm) = a. μ + b** avec μ : représentant la variable réduite de Gumbel (μ= -ln (-ln (F)))).

➢ Déterminer le débit décennal via l'ajustement des débits à la loi de Gumbel

➢ Convertir le débit décennal (m3 /s) en lame d'eau (mm) en utilisant l'équation de transformation suivante :

R (mm) = Q * 3, 6 * n (heures) / S (km2)

Avec : n la moyenne des temps de base des hydrogrammes de crues observés

➢ Sur le même graphique d'ajustement des précipitations maximales, tracer une droite, en débutant par le débit décennal (T=10 ans), parallèle à la droite de Gumbel de la série des Pj,max.
➢ Tracer l'équation de la droite de Gumbel des débits dont la forme est la suivante:

$$Q\mu\% = a.\ \mu + b' \text{ ……....(a)}$$

Avec : B' = Q10 ans – Gradex* μ (T=10 ans).

➢ A partir de l'équation (a), on détermine les débits de différentes périodes de retour en mm.

➢ Convertir les débits en m3 /s par la formule de transformation suivante :

$$Q\ (m3/s) = Q\ (mm) * S\ (km2) / 3{,}6 * n\ (h)$$

➢ Calculer les débits de pointes de période de retour par la formule suivante :

$$Qp\ (m3/s) = Q\ (m3/s) * P$$

Avec le coefficient de pointe égal au rapport : P = Qmax / Qmo

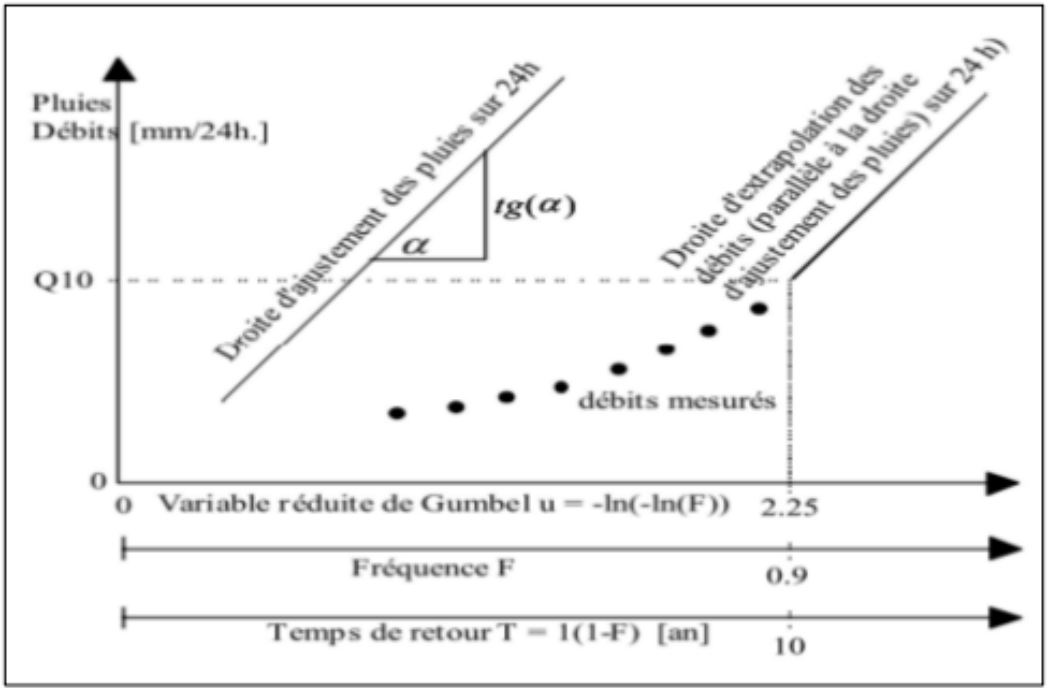


Figure II. 11 : Ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits (Laborde, 2000).

II.9.1.4 Application de la méthode

On a pris une station pluviométrique Soumaa pour l'observation de série de pluies maximales journalières.

- Les caractéristiques de station est montrée dans le Tableau n° II.23 :

Tableau II. 23 : Coordonnées Lambert de la station pluviométrique Soumaa(Source : ANRH Blida).

Code	**Nom**	**X**	**Y**	**Z (mm)**	**Période d'observations**	**P_{moy} (mm)**
02 12 34	Soumaa	517.47	355.9	177	1990-2022	687,92

Tableau II. 24 : La série des pluies journalières maximales (Source : ANRH Blida).

Année	Pjmax (mm)	Année	Pjmax (mm)
1993	86.6	**2008**	72
1994	53.3	**2009**	41
1995	94.4	**2010**	49.9
1996	53.1	**2011**	68.6
1997	65.5	**2012**	108
1998	33.7	**2013**	50
1999	39.5	**2014**	47
2000	39.2	**2015**	48.5
2001	35.3	**2016**	60
2002	60.5	**2017**	81
2003	63.4	**2018**	63
2004	54.1	**2019**	63
2005	89.5	**2020**	23.5
2006	39.2	**2021**	73
2007	49.1	**2022**	40

a. Ajustement de la série à la loi du Gumbel :

Les équations de la droite de Gumbel pour chaque station pluviométrique en utilisant le logiciel Hyfran-Plus sont données ci-dessous :

La station de Soumaa :

$$p(mm) = 14.93\,\mu + 49.03$$

Donc le Gradex a=14.93.

b. Choix du pas de temps :

Après l'examen des enregistrements de la crue de la station de Soumaa, on a estimé le temps de base a n=24h.

c. On n'avait pas d'enregistrements des crues dans la zone étudiée, alors on estime par analogie avec autre bassin versant , de même grandeur le temps de base et le débit décennal,

tel que : $\frac{Q}{S} = \frac{Q'}{S'}$

- Q'10 ans =5.27 m3 /s ;
- S'= 387 km2 .

$$\frac{Q}{11.7} = \frac{5.27}{387}$$

Donc :

- Q10 ans =0.15 m3 /s.

d. On exprimer le débit décennal en lame d'eau équivalente :

Par la formule :

$$R(mm) = \frac{Q(m3\ s\ /) \times 3.6 \times n(heures)}{S(Km2)}$$

N'ayant pas d'enregistrements des crues dans le bassin étudié, nous avons estimé, par analogie avec le bassin versant de l'Oued de taille similaire, le temps de base et le débit décennal, comme suit :

$$R(mm) = \frac{0.15(m3\ s\ /) \times 3.6 \times 24h}{11.7(Km2)}$$

$$R(mm) = 0.049mm/24h$$

e. 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 :

$Q10ans = a * \mu + b'$ $b' = Q10ans - a * \mu$

$\mu 10 = -\ln(-\ln(F)) = -\ln(-\ln(0.9)) = 2.25$ μ

10 ans = 2.25

Variable réduite de Gumbel :

$\mu 10\ ans$ = 2.25

On calcule maintenant les b' :

Tableau II. 25 : Résultats de calcul de b' pour la station prise

Station	Variable réduite de Gumbel "μ"	R10ans	a	b'
Soumaa	2.25	21.4	14.93	-32.49

Donc :

$$Q\mu\% = 14.93 * \mu\% - 32.49$$

f. On trace cette équation sur même graphe que celui de l'ajustement des Pjmax, Pour chaque période de retour, on tire on tire le débit en (mm) et on les exprime en (m3 /s).

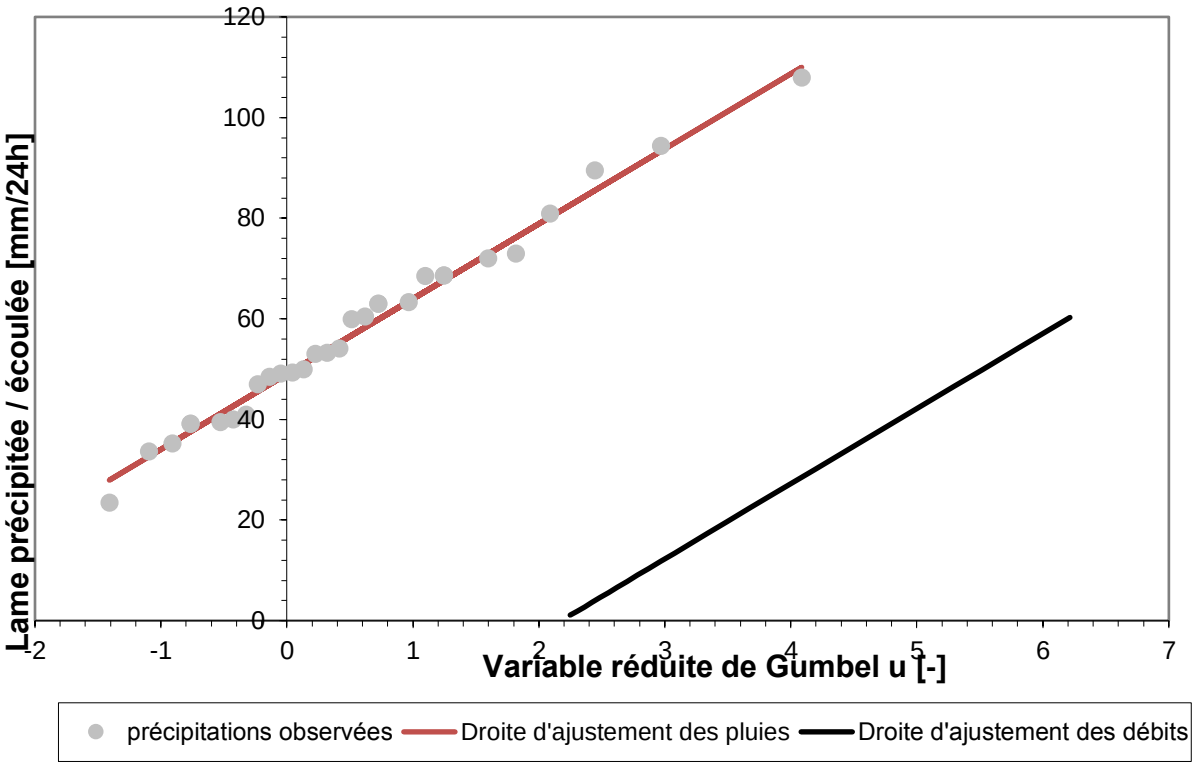


Figure II. 12 : Graphe de l'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits.

Tableau II. 26 : Valeurs du débits centennales en fonction du temps pour la zone d'étude Amroussa

Période de retour	Variable réduite de gumbel	pj max (mm/24 h)	Q (mm/24 h)	Qmax (m3/s)
10.0	2.25	82.6	1.1	1
20.0	2.97	93.4	11.9	4
50.0	3.9	107.3	25.8	9
100.0	**4.60**	**117.7**	**36.2**	**12**
1000.0	6.91	152.2	70.6	20

II.10 Calcul des débits de pointe

-Détermination des crues du bassin versant du Bouinan à l'aide de diverses méthodes couramment appliquées en Algérie:

Pour ce faire, nous avons sélectionné les formules les plus fréquemment utilisées dans les études de crues des cours d'eau algériens. Il s'agit des formules suivantes

- la formule de Maillet-Gauthier

- Formule de Sokolovsky

- Formule de Turraza

- Formule de Giandotti

A. Formule de Mallet-Gautier

La méthode de Mallet – Gautier est couramment utilisée pour les calculs des débits de crues en Algérie. Elle est donnée par la relation suivante :

$$QT = [2\,K\,Log\,(1 + A * P) * \frac{S}{\sqrt{L}}] * \sqrt{(1 + 4LogT - LogS)}$$

Où:

- K : représente la géomorphologie du bassin versent comprise entre 1et 3 prise 2
- P : moyenne des pluies annuelles en m ;
- S : surface du bassin versant en km2 ;
- L : longueur du cours d'eau principal en Km ;
- T : période de retour, en années.
- A : représente les conditions climatiques compris entre 20 et 30 prises 20.

B. Méthode de Sokolovsky

Selon cet auteur, la crue est considérée comme un débit max généré par une averse (une pluie) de courte durée correspondant au temps de concentration. Le temps de montée de la crue est donc pris égal au temps de concentration.

$$Qf\ \% = \frac{(0{,}28 * P_{tcf\%} * \alpha_T * k * S}{T_c}$$

Où :

- Qf % : débit de point d'une fréquence « f » en m3 /s ;
- P tc f % : pluie de courte durée correspondant au temps de concentration « TC » et à une fréquence « f » en mm ;
- S : surface du bassin versant en Km2 ;
- tC : temps de concentration en heures. .
- αT : coefficient de ruissellement de la crue fonction de la période de retour (T).
- (α 5 = 0.27 ; α 10 = 0.30 ; α 20 = 0.35 ; α 50 = 0.40 ; α 100 = 0.45, α 1000 = 0.50).
- k : coefficient de forme de l'hydrogramme de crue. Il est égal à : k = 12 / (4 + 3φ) ;

C. Giandotti :

$$Q\ maxP\% = C\frac{.S\sqrt{(Hmoy - Hmin)}}{1{,}5L + 4\sqrt{S}}\ PTc$$

- Q max P% : Débit maximum de crue en (m3/s) de même fréquence que celle de la pluie de courte durée PTc ;
- S : surface du bassin versant en Km2 ;
- L : Longueur du talweg principal en Km ;
- PTc : Pluie fréquentielle de courte durée correspondant au temps de concentration (m) ;
- H moy : Altitude moyenne en m ;
- H min : Altitude minimale en m.
- C : coefficient qui dépend de la topographie du bassin et qui varie entre 66 et 166 ; On prend 166.

D. Turraza :

$$Qmax = \frac{PTc\ SC_T}{3{,}6\ Tc}$$

- CT : Coefficient de ruissellement ; On prend Ct 0.6.
- TC : le temps de concentration

Tableau II. 27 : Tableau récapitulatif des résultats de calcul des débits de crues fréquentiels par les différentes méthodes .

	Période de retour T	Mallet-Gautier	Sokolovsky	Turraza	Giandotti	Max
Oued AMROUSSA	1000	64.07	75.11	74.51	71.70	75.11
	100	**52.24**	**41.60**	**45.85**	**44.12**	**52.24**
	50	48.11	32.35	40.12	38.61	48.11
	10	36.78	13.87	22.93	22.06	36.78

Interprétation :

- On constate que le débit donné par la méthode Mallet-Gautier est plus grand que les débits des autres méthodes, donc opte à prendre ce débit $\mathbf{Q_{Projet} = 52.24\ m^3/s}$

II.11 L'hydrogramme de crue

Il s'agit d'une courbe illustrant l'évolution des débits en fonction du temps pendant la crue. Elle permet d'estimer certaines caractéristiques liées à la crue, telles que la forme, le volume, le temps de montée et le temps de base. Pour tracer l'hydrogramme, nous utilisons la méthode de SOKOLOVSKY (Touaibia, 2015).

- **Branche de crue (montée) :**

$$Q(t) = Q_{max}(\frac{t}{T_c})^n$$

Tm = Tc (pour les petits bassins versants) ;

Avec :

- Tc : le temps de concentration du bassin versant (heures) ;
- Qm : Débit instantané de montée (m3 /s).

- **Branche La décrue (descente) :**

$$Q(t) = Q_{max}(\frac{(T_b - t)}{T_d})^m$$

$$T_b = T_m + T_d$$

Avec :

- Qt : Débit à l'instant t (m3 /s) ;
- Qmax : Débit maximal de la crues (m3 /s) ;
- Tm : Temps de montée de la crue (h) ;
- Td : Temps de décrue (h) ;
- Tb : Temps de base (h) ;
- m, n : puissance des paraboles (m=3, n=2).

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

- $Tm = Tc$,

$ou\ Tc$: $temps\ de\ concentration.$

- $Td = \delta\ .\ Tm,$

$ou\ \delta\ c\ 'est$ le coefficient de forme de l'hydrogramme de crue.

Tableau II. 28 : 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 perméables.	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

On prend : $\delta = 2.5$

➢Les valeurs sont montrées dans le tableau suivant :

Tableau II. 29: Les valeurs du temps de base, montée et décrue.

Sous bassins versants	Temps de montée (h)	Temps de décrue (h)	Temps de base (h)
Bouinane	2.78	6.95	9.73

➢ Les valeurs du débits centennales en fonction du temps pour la station prise sont montrées dans les tableaux ci-dessous :

Tableau II. 30 : Résultats de calcul pour l'hydrogramme de crue.

Temps (h)	**Qmax (m3 /s) pour période de retour 100 ans**
	Stations pluviométriques
0	0.0
0.2	0.7
0.4	2.9
0.6	6.5
0.8	11.6
1	18.1
1.2	26.0
1.4	35.4
1.6	46.3
1.7	52.2
0.1	48.64
0.3	41.94
0.5	35.89
0.7	30.45

Temps (h)	Qmax (m3 /s) pour période de retour 100 ans
	Stations pluviométriques
0.9	25.58
1.1	21.27
1.3	17.47
1.5	14.15
1.7	11.28
1.9	8.83
2.1	6.67
2.3	5.05
2.5	3.65
2.7	2.53
2.9	1.67
3.1	1.03
3.3	0.58
3.5	0.29
3.7	0.11
3.9	0.03
4.1	0.00
4.25	0.00

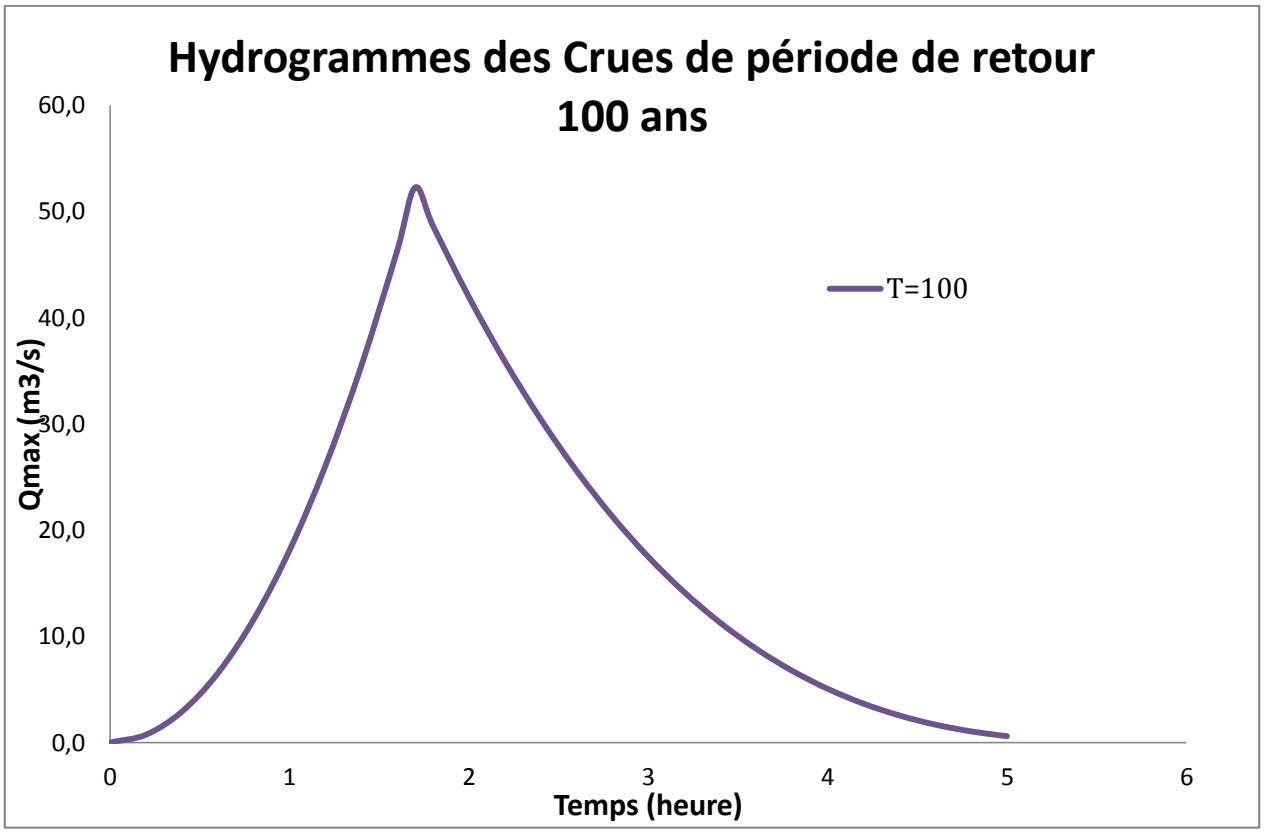


Figure II. 13 : Hydrogramme de crue de pour période de retour 100 ans par la méthode Skolovsky.

Tableau II. 31 : Crue de projet recommandée selon la classification du comité national australien des grands barrages (CNAGB)

Catégories des dommages	Crue de projet recommandé de probabilité de dépassement annuelle
Élevés : Perte de vie, dommage considérable.	1/100000 à 1/10000
Importants : Pas de perte de vie, dommages importants.	1/10000 à 1/1000
Faibles : Pas de perte de vie, dommages légers.	1/1000 à 1/100

- Comme on a une étude de protection contre les inondations on prend la période de retour 100ans.

Qprojet = 52.24m3 /s.

II.12 Étude de transport solide

• Le transport des matières solides en suspension est un phénomène qui a mobilisé des efforts considérables de la part des nations, dans le cadre de la lutte contre la dégradation des terres arables.l'envasement des barrages et l'effet dévastateur des cycles d'inondation et de désertification, qu'il est capable de générer (De Ploey et al., 1991) in (Bouguerra et al., 2016).

En Algérie, le transport solide dans les cours d'eau est très élevé. Cependant, il est mal quantifié dans certains oueds en raison de l'absence ou du manque de données, notamment sur la concentration en particules fines, ainsi que de l'indisponibilité des stations de jaugeage (Bouchelkia & Remini, 2003). Par conséquent, l'estimation du transport solide a été réalisée à partir des formules empiriques les plus couramment utilisées, à savoir :

▪La formule de Tixéront (1960) ;

▪ La formule de Fournier (1960) ;

▪Formule de Sogreah (1969) ;

▪La formule de Gavrilovich (1992) ;

▪ Formule de Kasoul et al. (1997) ;

▪ Formule de Touaïbia et Achite (2003) ;

▪Formules de Meddi (2015).

a Méthode de Tixeront (1960)

Elle s'exprime par la formule suivante :

$$Ta = \alpha Le^{0.15} \ (III.43)$$

Avec :

- Ta : la dégradation spécifique en (T /Km2 /an).
- Le : le ruissellement moyen en (m).

- α : le coefficient de perméabilité fixé comme suit :

Tableau II. 32 : Estimation du coefficient de perméabilité.

Perméabilité du bassin versant	Valeur de α
Perméabilité élevée	8.5
Moyenne à élevée	75
Faible à moyenne	350
Faible	1400
Imperméable	3200

• « Le » se calcule par les formules empiriques :

⊄ La formule de Samie :

$$Le = P\,(293 - 2.2 \times \sqrt{S})$$

Avec :

- P : Pluie moyenne annuelle (m),
- S : Surface du bassin versant (Km2) ;
- Le : Lamme d'eau écoulée (mm).

⊄ La formule de Mallet et Gauthier :

$$Le = 600P(1 - 10^{-0.36P^2})$$

⊄ La formule de Turc :

$$Le = P - \frac{P}{\sqrt{\frac{P^2}{L} + 0.9}}$$

Avec :

- L : coefficient de la température, tel que : $L = 300+25T+0.05T^3$
- T : Température moyenne annuelle.

➢Les résultats de calcul se résument dans le tableau suivant :

Tableau II. 33 : Résultats de calcul de la lame d'eau écoulée.

Le (mm)	**Pmoy annuelle(mm)**	**Formule**		
		Samie (mm)	**Mallet et Gauthier (mm)**	**Turc (mm)**
Sous bassin	687.92	135096380,5	412752	686.46

Tableau II. 34 : Résultats de calcul de la dégradation spécifique.

	Le (mm)	α	Ta (T /Km2 /an).
Sous bassin	412752	8.5	526.45

b Méthode d'estimation au nord Algérien

$$Ds = 328.624Q^{-0.234}S^{-0.197}$$

Avec :

- Ds : le transport solide en (T/Km2 /an) ;
- Q: Débit maximum (m2 /s);
- S : Surface du bassin versant (Km²) ;

➢ Les résultats des apports solides sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II. 35 : Résultats de calcul des apports solides

	Q(m3 /s)	**S(km2)**	**Ds (T/Km2 /an)**
AMROUSSA	52.24	11.7	80.21

Conclusion

L'étude hydrologique constitue une étape cruciale et la plus délicate dans une étude de protection contre les inondations. Le choix du débit de pointe est fondamental pour toute la modélisation hydraulique du cours d'eau, car il permet de prédire les inondations et de déterminer

le type d'aménagement requis pour assurer la protection, ainsi que les coûts liés à sa mise en œuvre.

À l'issue de ce chapitre, on peut conclure que :

- Le débit centennal qu'on a opté à prendre par la méthode Mallet-Gautier

  Q_{Projet} =52.24 m^3/s.

- Le transport solide est estimé à 80.21 T/Km^2/an pour le sous bassin versant de Amroussa.

Chapitre III :
Etude des écoulements

Introduction

Avant de se lancer dans un projet de développement, il est essentiel de réaliser une étude hydraulique complète. Cela implique une analyse détaillée des voies d'eau naturelles et artificielles, ainsi qu'une évaluation des risques d'inondation.

La prévention des inondations devient particulièrement importante pendant les périodes où les niveaux et les débits d'eau sont élevés. La conception de l'infrastructure de protection contre les inondations se concentre généralement sur la gestion de ces niveaux d'eau tout en abordant les problèmes d'érosion.

La modélisation hydraulique vise à prédire numériquement comment les caractéristiques hydrauliques - telles que les débits, les vitesses et les niveaux d'eau - évolueront au cours d'une inondation. Cette approche permet d'identifier les zones d'inondation potentielles, d'estimer les niveaux d'immersion et de mesurer l'augmentation des niveaux d'eau. Il est important de reconnaître que les modèles hydrauliques impliquent souvent des simplifications de systèmes réels.

Généralités

L'étude des écoulements naturels est un élément clé de l'hydraulique à surface libre, qui implique la présence d'une surface libre exposée à l'atmosphère. Dans ce cas, la gravité est la principale force motrice de l'écoulement, contrairement aux écoulements sous pression où les gradients de pression jouent un rôle prépondérant. Ce type d'écoulement est appelé écoulement par gravité.

III.1 Rappel de quelques notions

III.1.1 Paramètres hydrauliques

- **Masse volumique**

La masse volumique de l'eau est notée ρ_w et vaut 1000 kg/m3 dans le cas de l'eau sans matières en suspension.

- **Poids volumique**

de l'eau est noté w w $\gamma = g.\rho$ et vaut 9,81 kN/m3 pour de l'eau sans matières en suspension. g désigne l'accélération de la pesanteur et vaut 9,81 m/s2 . Il ne doit pas être confondu avec la masse volumique définie plus haut ou avec la densité qui est un nombre sans dimension.

- **Débit**

-Le débit (Q) correspond au volume d'eau qui traverse une section perpendiculaire à l'axe du chenal par unité de temps.

- **Vitesse en un point de l'écoulement**

Par définition, la vitesse (v) en un point de l'écoulement est celle de la particule qui passe par ce point à un instant donné.

- **Vitesse Moyenne**

La vitesse moyenne est par définition V = Q / S, $v = \frac{\iint v \cdot dS}{S}$ c'est-à-dire ,

ds désignant un élément de surface ($\iint$ S = ds) .

- **Ligne de courant**

Une ligne de courant est une courbe qui, en chacun de ses points, est tangente au vecteur vitesse à cet endroit précis. Dans un écoulement non permanent, la vitesse en un point donné, notée v, varie au fil du temps, ce qui entraîne une déformation continue des lignes de courant. En revanche, dans un écoulement permanent, ces lignes restent fixes et deviennent les trajectoires suivies par les particules d'eau. Il est intéressant de noter que le profil de la surface libre de l'eau représente une ligne de courant tout à fait particulière.

- **Frottement sur une paroi du canal**

L'eau étant en mouvement, exerce aussi sur un élément de paroi de section *ds*, une force de frottement habituellement notée : $dF = \tau_0$.ds schématisée figure 4).

τ_0 : est la force de frottement par unité de surface ou contrainte tangentielle à la paroi.

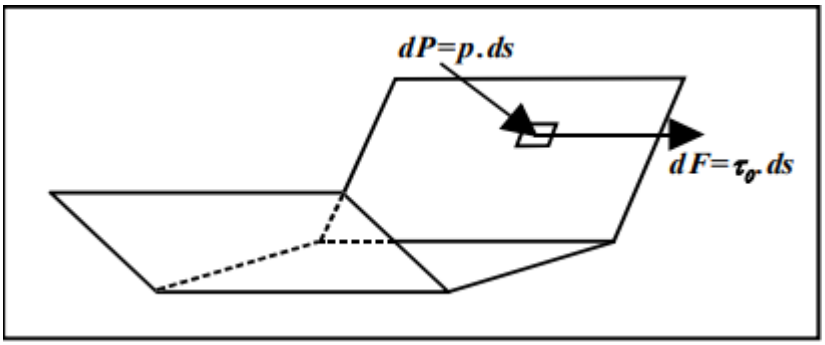


Figure III. 1 : Forces appliquées par l'eau sur les parois (l'une perpendiculaire, l'autre tangentielle)

- **Pente hydraulique (i)**

La pente correspond à l'inclinaison du terrain sur lequel l'eau s'écoule. Elle influence directement la vitesse de l'écoulement et permet d'évaluer les caractéristiques ainsi que les performances hydrauliques d'un système. Cette inclinaison est généralement exprimée en pourcentage. La pente se calcule à l'aide de la relation suivante :

$$I = \Delta Z\ L$$

Avec :

ΔZ : la différence

de niveau entre les altitudes (Z1-Z2).

L : la longueur.

- **Le coefficient de Manning (n)**

Ce paramètre définit la rugosité de la surface d'écoulement ou du lit d'un cours d'eau. Il est généralement déterminé par des expériences pour différentes surfaces telles que le béton, l'herbe, les graviers, etc. Représenté par le symbole "n", ce coefficient est sans dimension.

III.1.2 Les paramètres géométriques

Les paramètres géométriques se réfèrent à une section du chenal dans un plan perpendiculaire à son axe, dont la position est définie par une abscisse (x). Les principaux paramètres comprennent le tirant d'eau (y), la section mouillée (S), la largeur au miroir (L), aussi appelée largeur de la section mouillée, et le périmètre mouillé (P). Ces éléments sont illustrés dans le schéma de la figure 1. Il est important de noter que le périmètre mouillé correspond à la longueur de la paroi en contact avec l'eau (berges et fond), sans inclure le contact entre l'eau et l'atmosphère. Le tirant d'eau est mesuré perpendiculairement au fond du chenal et, en théorie, ne doit pas être confondu avec la hauteur d'eau, qui est une mesure verticale. Cependant, dans les rivières à faible pente, ces deux valeurs sont pratiquement identiques.

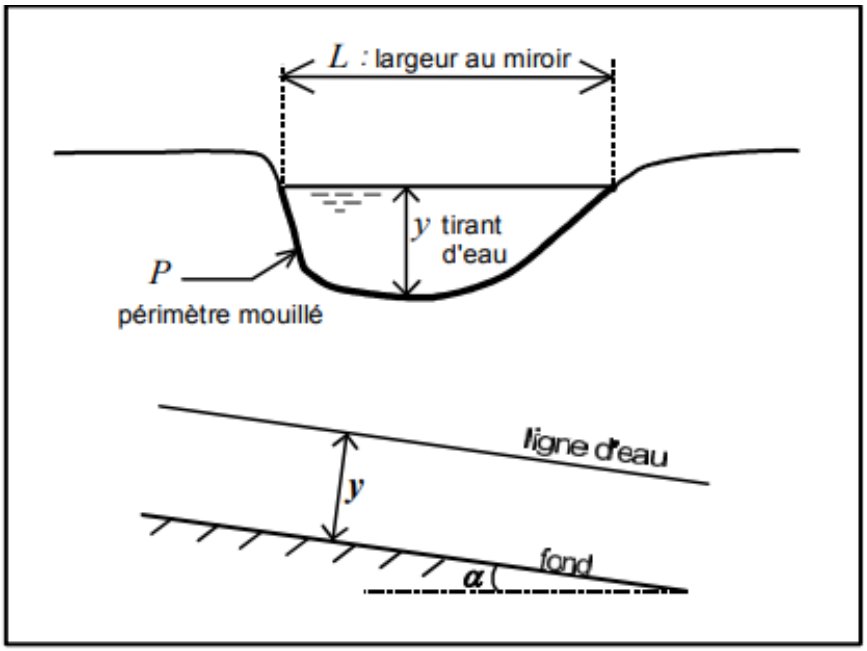


Figure III. 2 : Tirant d'eau, largeur au miroir et section mouillée

Par définition, le rayon hydraulique est le rapport entre section mouillée et périmètre mouillé,

R = S / P.

Si le chenal est rectangulaire, alors $R = \frac{L \cdot y}{L+2 \cdot y}$ Si le chenal est infiniment large, alors R= y.

La pente du chenal, notée i est la pente de son fond, mesurée tout le long de son axe, et comptée positivement si le chenal est descendant. Si z_f désigne la cote du fond mesurée positivement vers le haut, alors $i = -\frac{d_z}{d_x} \cdot = sin\, \alpha$

- Tous les paramètres tels que L, y, S, P et R dépendent du débit et ne sont donc pas des constantes géométriques. La seule constante géométrique, dans notre hypothèse, est la pente (i), car elle est indépendante du débit. Toutefois, il est important de noter que la pente peut varier spatialement.

III.1.3 Régime d'écoulement

Un écoulement peut être classé en différentes catégories en fonction du nombre de Froude, qui considère à la fois les forces d'inertie et les forces gravitationnelles (Lancastre, 1996). Ce nombre est défini comme le rapport entre les forces gravitationnelles et les forces d'inertie, où :

$$\boldsymbol{Fr} = \frac{\boldsymbol{v}}{\sqrt{\boldsymbol{g\, Dh}}}$$

Avec :

- v : Vitesse moyenne de l'écoulement.
- D_h : Profondeur hydraulique.
- g : Accélération gravitationnelle.

Le nombre de Froude permet de classer les écoulements de la manière suivante :

- Écoulement fluvial Fr < 1

- Écoulement torrentiel Fr > 1
- Écoulement critique Fr =1

La classification en régime fluvial, torrentiel ou critique s'applique spécifiquement au cas du régime uniforme.

Lorsque :

- Yn < Yc : écoulement uniforme torrentiel.
- Yn > Yc : écoulement uniforme fluvial.

Par conséquent, les effets du nombre de Reynolds Re', et du nombre de Froude, Fr, donnent quatre régimes d'écoulement. Le rôle du nombre de Reynolds est de permettre le classement des écoulements comme suit :

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

III.1.4 Les canaux artificiels

Ces cours d'eau sont créés artificiellement, comme les canaux ouverts à la surface du sol, utilisés pour des activités telles que la navigation, l'approvisionnement en eau, le drainage ou l'irrigation. Ils peuvent également inclure des canaux couverts, où le liquide n'occupe pas toute la section transversale, comme dans le cas des tunnels hydrauliques, des aqueducs, des drains et des égouts. Les caractéristiques hydrauliques de ces canaux artificiels sont généralement uniformes, ce

qui permet une application efficace des principes de l'hydraulique et assure des résultats satisfaisants.

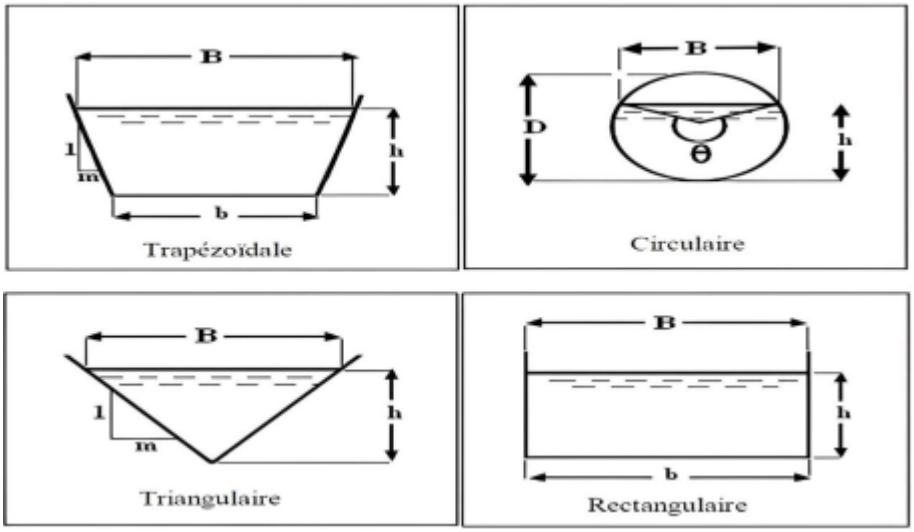


Figure III. 3 : Canaux artificiels (Source : TOUMI Abdelouaheb - 2016).

III.2 Modélisation d'écoulement

La modélisation de l'écoulement permet de simuler et de comprendre le comportement des rivières lors des périodes de crue en s'appuyant sur des outils informatiques et des données hydrologiques. Ce processus consiste à analyser la réaction des rivières face à des crues extrêmes, fournissant ainsi des informations précieuses sur les risques d'inondation. Les résultats obtenus à partir de cette modélisation sont essentiels pour développer des stratégies efficaces d'atténuation de ces risques.

Dans notre étude, nous modéliserons l'Oued Amroussa à l'aide du logiciel HEC-RAS, en utilisant le débit de conception du projet de Qprojet = 52,24 m³/s pour les données hydrologiques.

III.2.1 Etapes de la simulation

La simulation avec le logiciel HEC-RAS comporte plusieurs étapes pour assurer une modélisation précise.

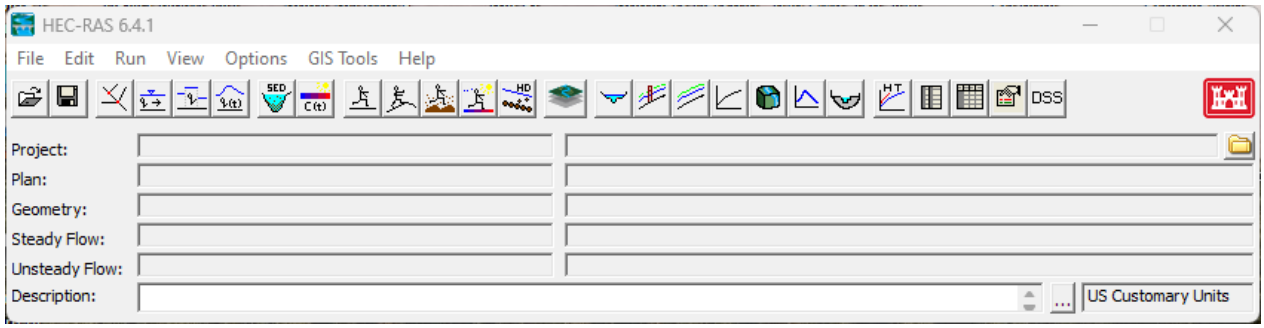


Figure III. 4 : Interface d'HEC-RAS.

a. Importation des données géométriques du terrain

Après avoir lancé le projet HEC-RAS et configuré les unités et paramètres nécessaires, nous importons la géométrie de l'oued Amroussa, y compris toutes les coupes transversales sur toute la longueur du cours d'eau.

- **Construction du TIN « Terrain Irregular Network »**

Le relief peut également être représenté à l'aide d'un échantillonnage semi-dirigé qui incorpore les caractéristiques structurelles du terrain. Cette méthode crée un réseau triangulaire irrégulier (TIN), que nous générons à l'aide du logiciel ArcGIS pour visualiser l'écoulement sur RAS MAPPER et produire des cartes de profondeur, de vitesse et d'autres paramètres. La figure III.5 illustre le TIN établi.

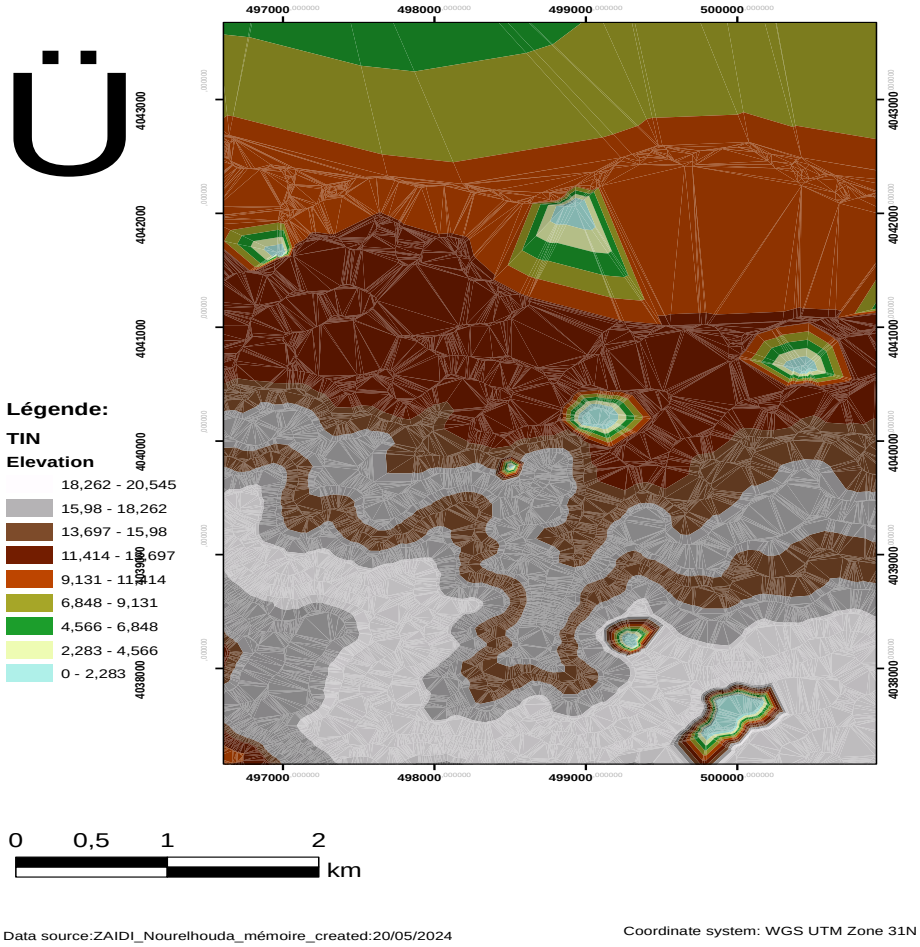


Figure III. 5 : TIN (réseau irrégulier triangulé) de la zone d'étude.

Après avoir construit le TIN, nous exportons le fichier de projection ESRI (au format .prj), qui renferme les informations spécifiques concernant le système de coordonnées adapté à notre zone d'étude. Ce fichier de projection, téléchargé depuis le site web Spatial Reference, est ensuite importé dans le logiciel HEC-RAS, permettant ainsi une simulation précise dans RAS-MAPPER.L'importation de l'image TIN dans RAS MAPPER est illustrée par les figures **III.6** et **III.7**

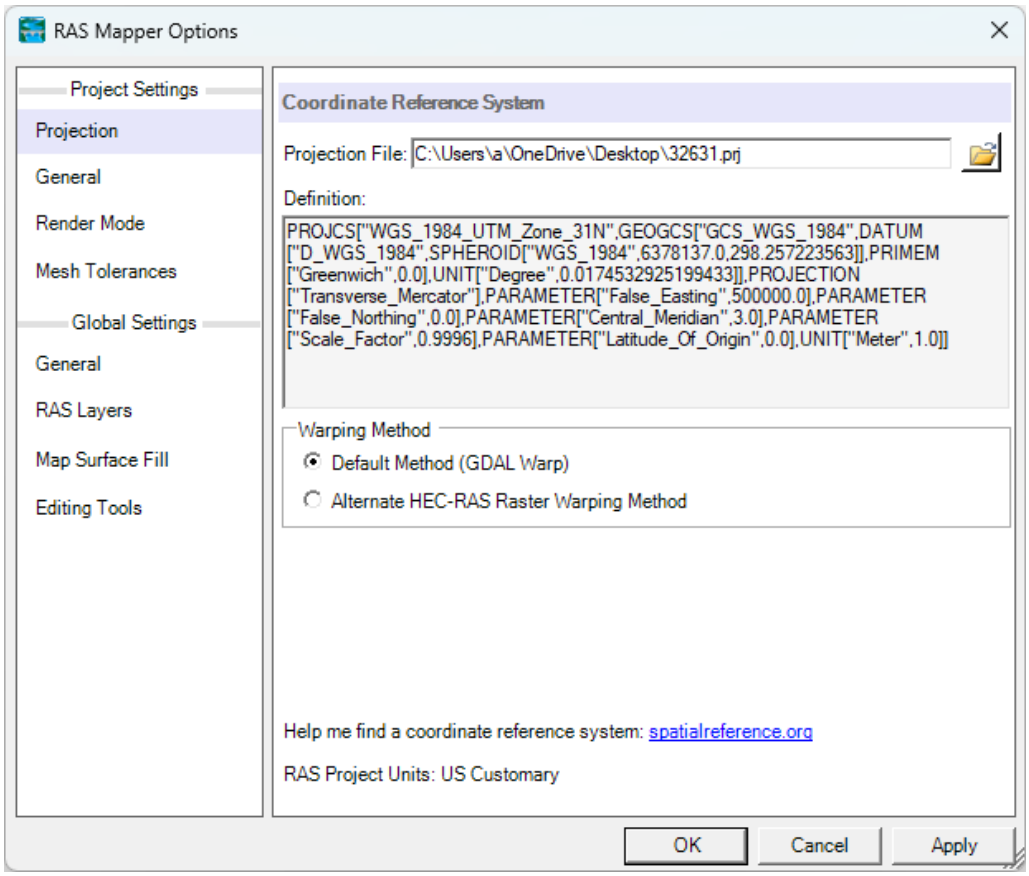


Figure III. 6 : Insertion fichier de projection.

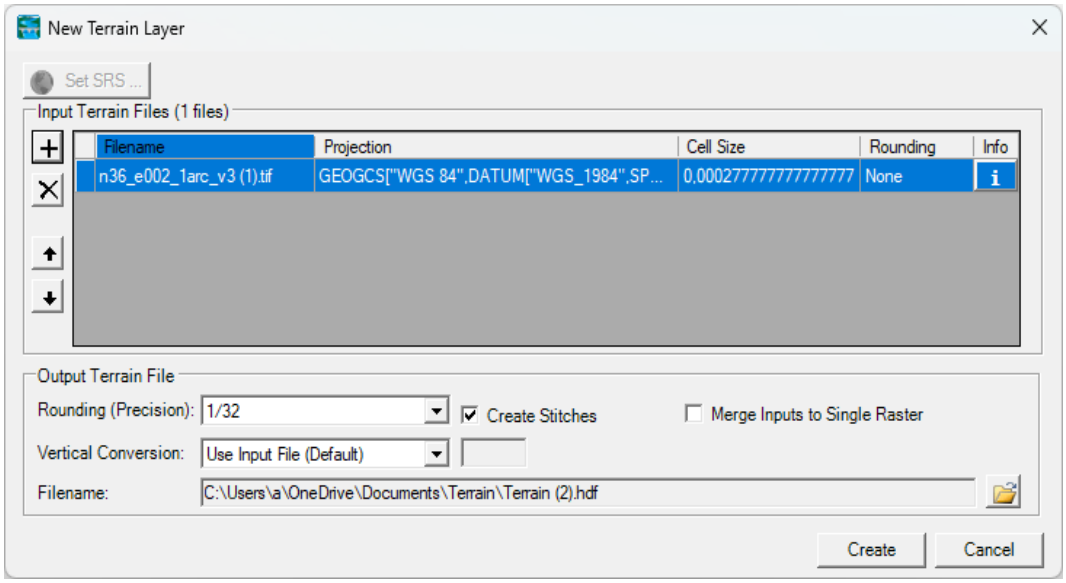


Figure III. 7 : Insertion des données du terrain.



Figure III. 8 : Définition du tracé d'oueds Amroussa et ces sections en travers.

b. Données hydrométriques et conditions aux limites

Après avoir enregistré les données géométriques de chaque tronçon, l'étape suivante de la modélisation hydraulique avec HEC-RAS consiste à définir les débits d'entrée et à établir toutes les conditions aux limites nécessaires pour calculer les profils de surface de l'eau pour chaque segment du réseau hydrographique.

Les conditions aux limites sont essentielles dans la modélisation hydraulique. Pour simuler un écoulement régulier, il est crucial de définir des conditions aux limites en amont, en aval, ou aux deux extrémités de chaque section de cours d'eau afin de déterminer l'élévation de la surface de l'eau à ces points. HEC-RAS peut ensuite procéder aux calculs hydrauliques sur la base de ces conditions.

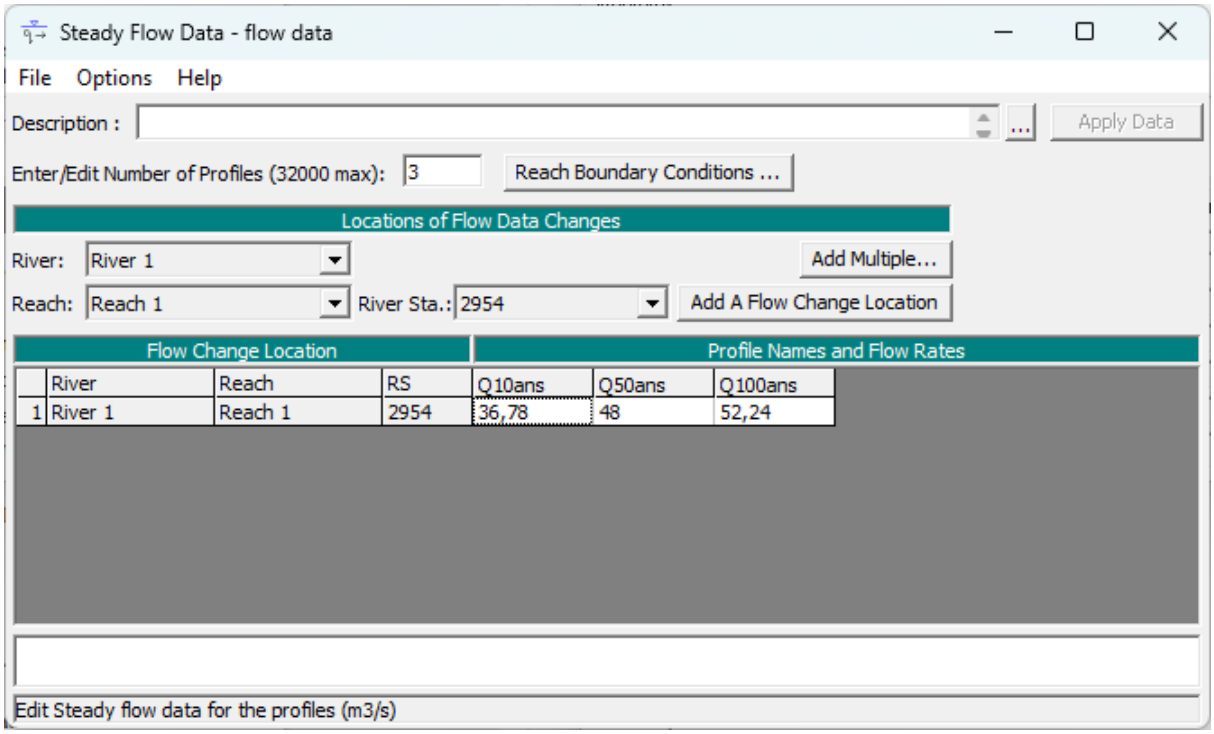


Figure III. 9 : Introduction les données hydrauliques d'oued Amroussa.

c. Simulation

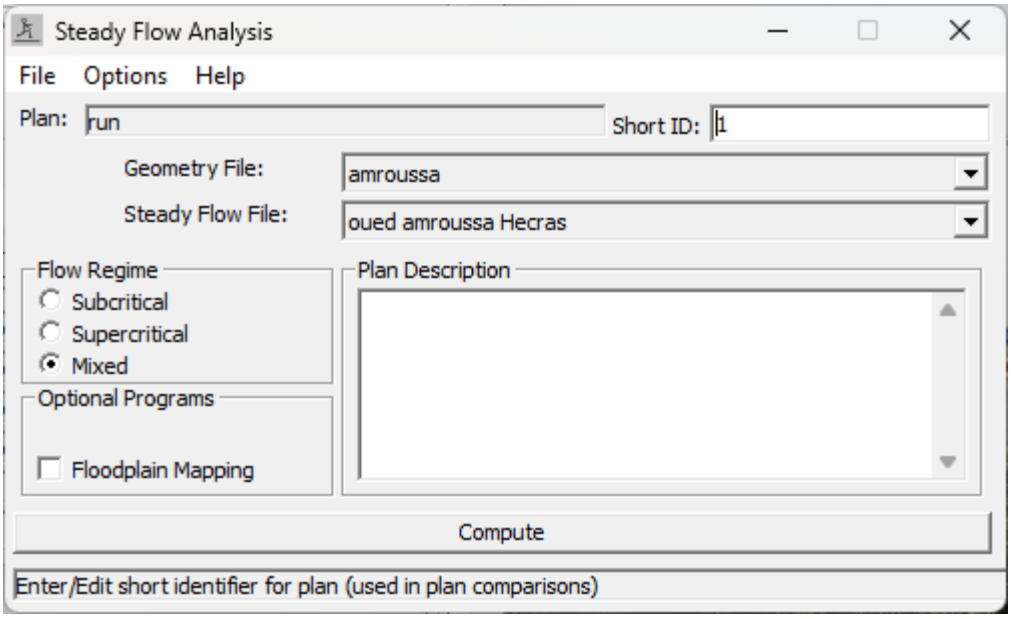


Figure III. 10 : Lancement de la simulation.

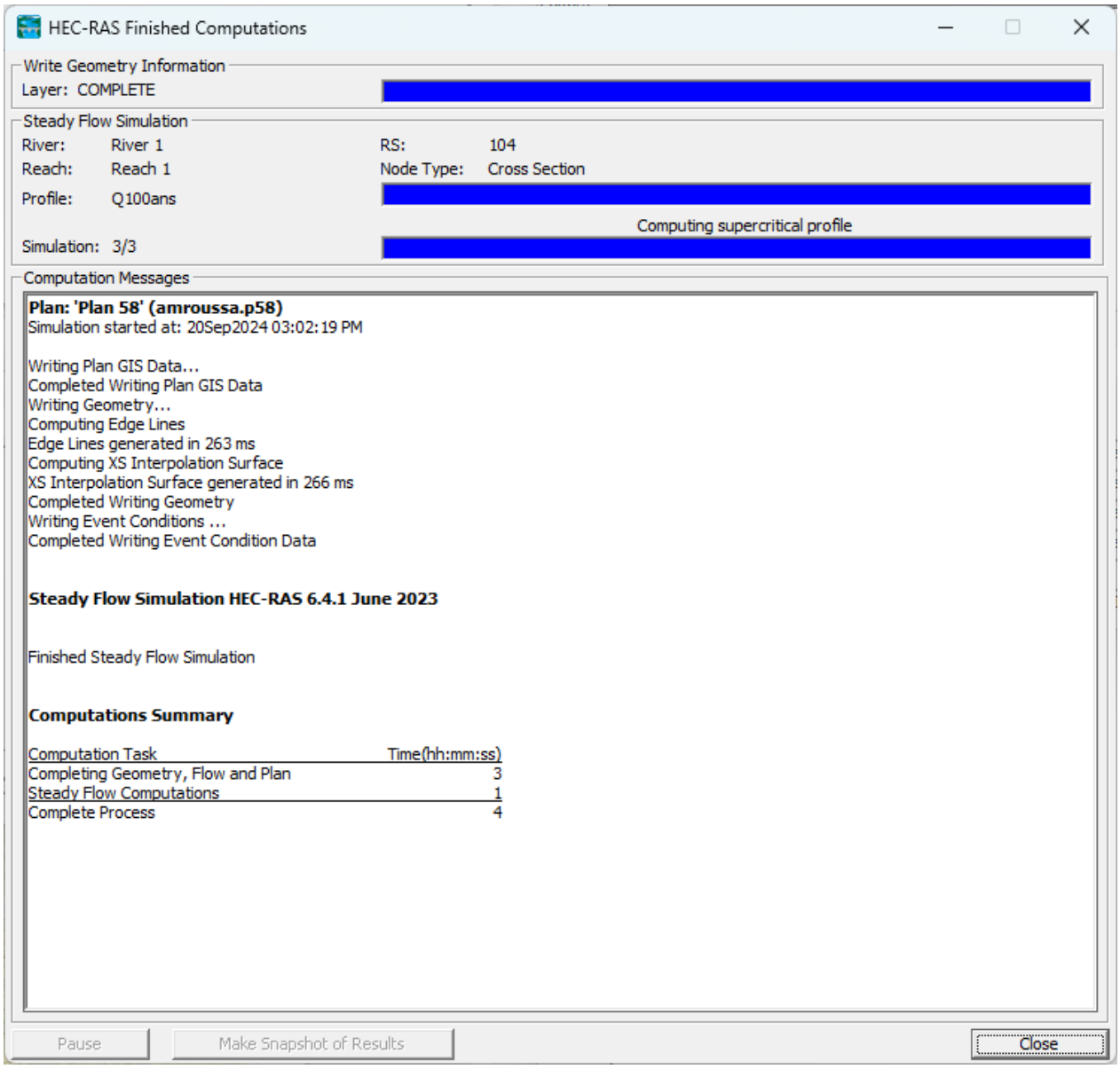


Figure III. 11 : Fin de simulation

III.3 Résultats de la simulation

Les résultats de simulation de HEC-RAS offrent une compréhension complète de l'écoulement régulier au sein d'une rivière ou d'un système hydraulique. Cette analyse permet un examen détaillé de la distribution des vitesses, des niveaux d'eau et des débits dans l'ensemble du réseau hydrographique, ce qui fournit des informations essentielles sur les risques d'inondation potentiels.

a. Profils en travers

L'option de visualisation des résultats par section transversale permet d'examiner en détail chaque endroit spécifique le long du cours d'eau.

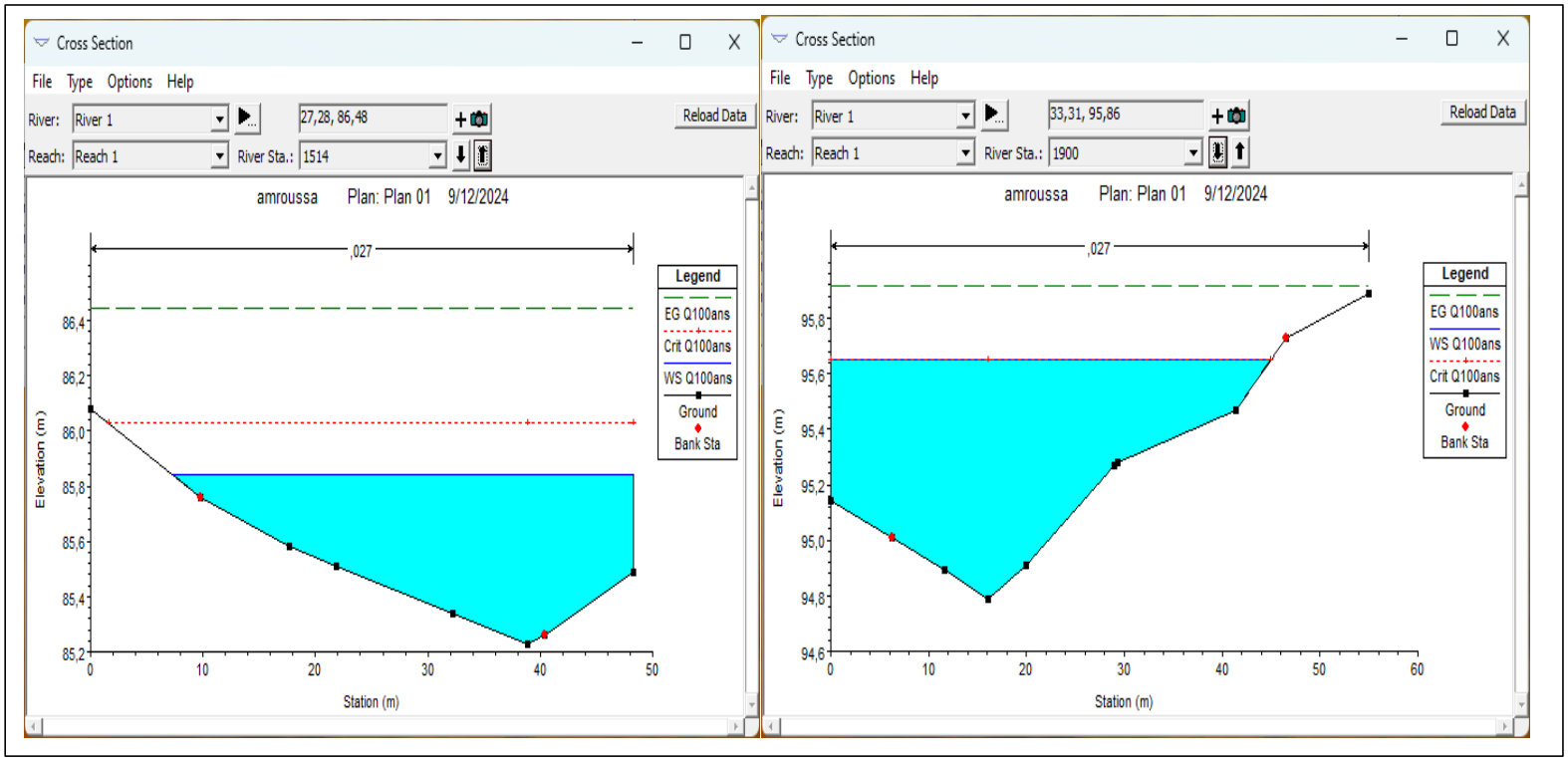


Figure III. 12 : Les profils en travers de deux sections choisies de l'oued Amroussa.

b. Le profil en long

La ligne d'eau fournit une vue en coupe de la zone d'étude, montrant à la fois le niveau et la surface de l'oued, ainsi que le niveau d'eau correspondant pour une période de retour de 100 ans.

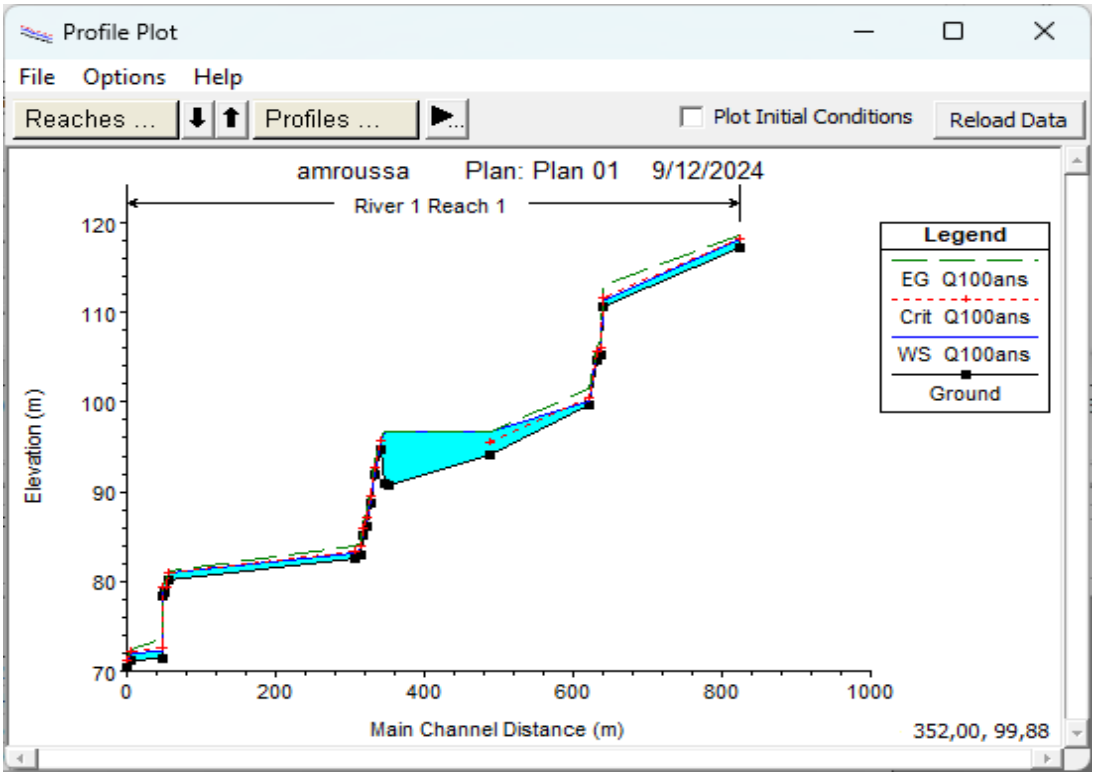


Figure III. 13 : Profil en long de l'oued Amroussa à l'état naturel pour une crue centennale.

c. Restitution de la courbe de tarage

HEC-RAS a permis de générer une représentation montrant la variation de la hauteur d'eau (m) en fonction du débit (m^3/s).

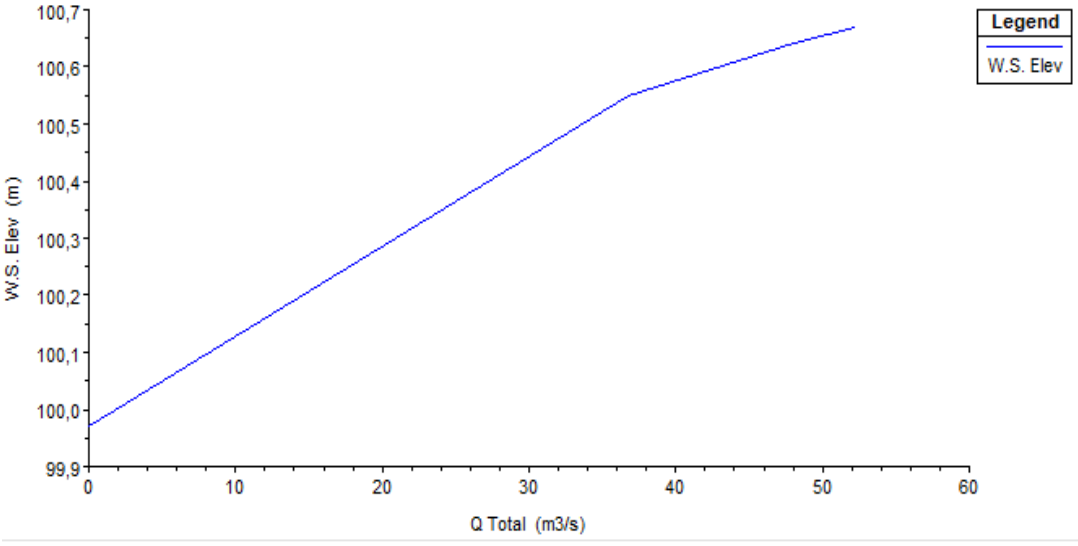


Figure III. 14 : Courbe de tarage Amroussa.

➢ Le logiciel permet également de générer des tableaux récapitulatifs contenant l'ensemble des paramètres hydrauliques, que ce soit pour des structures telles qu'un barrage ou tout autre ouvrage, ainsi que pour des zones de stockage spécifiques. Ces tableaux peuvent être produits pour chaque station (profil en travers) de manière individuelle ou pour l'ensemble des stations simultanément.

Tableau III. 1 : Principaux éléments hydrauliques pour toutes les stations

Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: 1 River: River 1 Reach: Reach 1 Profile: Q100ans

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Reach 1	2954	Q100ans	52,24	117,29	118,30	118,30	118,66	0,007801	2,37	20,16	28,25	0,96
Reach 1	2771	Q100ans	52,24	110,58	111,26	111,72	113,00	0,062582	4,63	9,20	19,52	2,49
Reach 1	2574	Q100ans	52,24	105,17	105,83	106,14	106,91	0,049899	4,71	11,41	27,50	2,29
Reach 1	2468	Q100ans	52,24	104,76	105,61	105,66	105,99	0,010820	2,48	19,35	32,90	1,10
Reach 1	2333	Q100ans	52,24	99,61	100,13	100,42	101,46	0,053142	2,80	11,97	46,90	2,06
Reach 1	2197	Q100ans	52,24	94,08	96,65	95,50	96,70	0,000466	0,99	52,69	35,36	0,27
Reach 1	2061	Q100ans	52,24	90,69	96,70		96,70	0,000002	0,18	306,94	55,70	0,02
Reach 1	1982	Q100ans	52,24	90,96	96,69		96,69	0,000008	0,26	208,45	56,94	0,04
Reach 1	1900	Q100ans	52,24	94,79	95,65	95,65	95,92	0,009299	2,25	23,03	44,99	1,02
Reach 1	1797	Q100ans	52,24	91,82	92,37	92,65	93,31	0,040692	3,78	12,51	30,23	2,01
Reach 1	1712	Q100ans	52,24	88,72	89,21	89,56	90,40	0,043081	3,37	11,25	24,95	2,00
Reach 1	1609	Q100ans	52,24	86,07	86,79	87,10	87,76	0,034216	3,55	12,54	27,22	1,86
Reach 1	1514	Q100ans	52,24	85,23	85,84	86,03	86,44	0,029699	3,33	15,32	41,02	1,73
Reach 1	1290	Q100ans	52,24	83,00	83,73	83,94	84,41	0,027682	3,13	15,03	36,43	1,66
Reach 1	1253	Q100ans	52,24	82,62	83,22	83,43	83,92	0,034350	3,69	14,10	35,00	1,88
Reach 1	1002	Q100ans	52,24	80,24	81,00	81,00	81,24	0,007440	1,80	25,22	50,30	0,88
Reach 1	762	Q100ans	52,24	78,71	80,08	79,44	80,14	0,000727	1,12	47,84	39,90	0,33
Reach 1	737	Q100ans	52,24	78,35	79,31	79,31	79,56	0,006316	2,06	24,99	43,60	0,86
Reach 1	308	Q100ans	52,24	71,43	72,17	72,55	73,63	0,065277	4,88	10,03	24,39	2,56
Reach 1	265	Q100ans	52,24	71,26	71,92	72,10	72,44	0,022736	2,79	17,10	43,31	1,50
Reach 1	104	Q100ans	52,24	70,49	71,09	71,13	71,39	0,011039	2,64	21,75	44,70	1,13

Source : Logiciel HEC-RAS

- **Min Ch. El:** Altitude du radier du canal .
- **Vel chnl:** Vitesse de l'écoulement .
- **W.S Elev :** Altitude du plan d'eau calculé .
- **Flow area :** Section mouillée .
- **Top Width :** Largeur de la surface libre **.**
- **E.G Elev :** Altitude de la ligne d'énergie .
- **Froude chl :** Nombre de Froude .

▪ **E.G slope:** Pente de la ligne d'énergie.

➢ En examinant les niveaux d'eau sur toutes les sections de l'oued, il est évident que des inondations se produisent sur toute sa longueur, influencées par les paramètres suivants :

- La vitesse d'écoulement varie de 0,18 m/s à 4,88 m/s ;
- Le régime d'écoulement change tout au long de l'oued, comme l'indique le nombre de Froude, qui varie entre 0,02 et 2,56.

III.4 La cartographie du risque d'inondation

• Après avoir généré les profils d'inondation avec le logiciel HEC-RAS, l'étape suivante consiste à délimiter et cartographier les zones à risque d'inondation pour déterminer les niveaux d'eau dans les différentes sections des oueds.

• Pour identifier les points de débordement et les zones inondables, nous avons utilisé l'outil RAS-MAPPER de HEC-RAS pour simuler le comportement du cours d'eau lors d'une crue centennale. Cela nous a permis de produire les cartes qui seront présentées dans la phase suivante de notre étude.

• L'objectif de la création de cartes de risques est de mettre en évidence les principaux dangers en se basant sur des critères tels que l'impact anticipé, la probabilité d'occurrence et le degré de contrôle actuel du risque. Ces cartes servent plusieurs objectifs :

✓ Établir un système interne de contrôle ou de gestion des risques ;

✓ Aider la direction à élaborer des stratégies et à prendre des décisions ;

✓ Orienter la planification des audits internes en identifiant les processus ou activités présentant les risques les plus significatifs.

• La gestion des risques consiste à organiser les ressources afin de se préparer et de répondre efficacement aux crises, facilitant ainsi la prise de décision. Cette approche se divise en trois phases :

✓ **Prévision :** Mise en place de mesures visant à anticiper les événements imprévus et à en améliorer la gestion.

✓ **Protection et prévention:** Application d'actions de protection pour atténuer l'impact potentiel d'un risque, tandis que la prévention vise à réduire la probabilité que le risque dépasse le seuil acceptable fixé par l'autorité compétente.

✓ **Communication :** Assurer que les informations soient efficacement partagées avec toutes les parties prenantes impliquées dans la gestion des risques, des particuliers aux autorités régionales.

III.4.1 Carte des profondeurs

La submersion lors d'une inondation se caractérise principalement par son étendue et sa profondeur, ce qui nécessite l'utilisation de modèles hydrauliques ou de représentations numériques des topographies des lits mineurs et majeurs des cours d'eau (Graguid, 2011). En général, elle est classée en trois catégories selon la profondeur :

➢ Submersion légère : avec une profondeur inférieure à 0,5 mètre ;

➢ Submersion modérée : avec une profondeur comprise entre 0,5 et 1 mètre ;

➢ Submersion importante : avec une profondeur dépassant 1 mètre (Graguid, 2011).

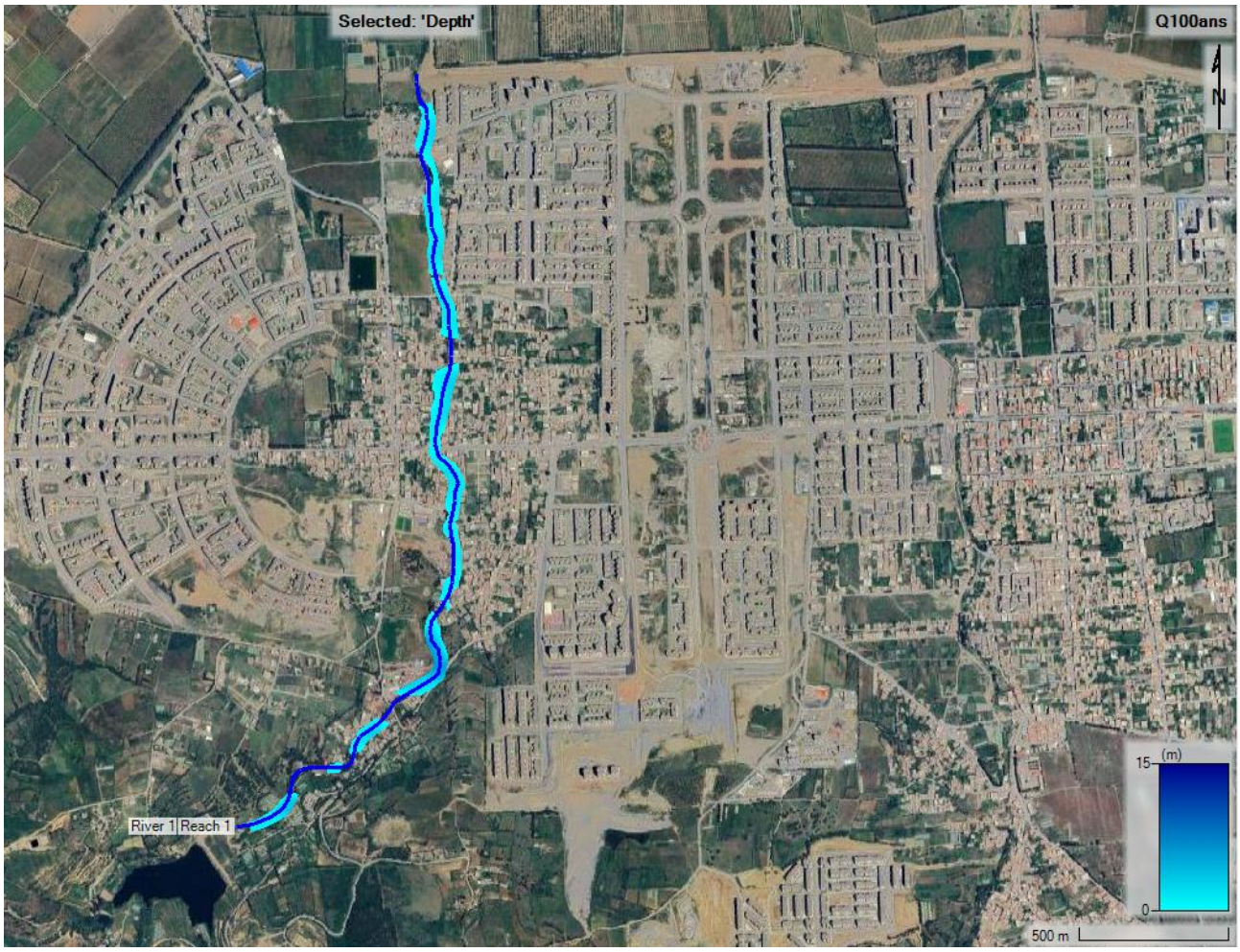


Figure III. 15 : Réseau des profondeurs d'eau pour une crue centennale.

D'après la carte des hauteurs d'eau, la hauteur d'eau varie de 0,25 à 6 mètres. Les zones les plus exposées au risque d'inondation sont situées sur la partie basse de la nouvelle ville de Bouinan,près de l'Oued Amroussa. La concentration de ces zones à haut risque souligne le besoin critique d'une planification urbaine résiliente et de stratégies adaptatives pour réduire les impacts potentiels des inondations. Une telle approche est essentielle pour développer des politiques publiques qui garantissent la sécurité des communautés riveraines et favorisent un développement régional durable.

III.1 Carte des vitesses

Les vitesses d'écoulement de l'eau sont classées en trois classes :

➢ Vitesse faible : dont la vitesse est inférieure à 0.2 m/s .

➢ Vitesse modérée : dont la vitesse se situe entre 0.2 m/s et 0.5 m/s ;

➢ Vitesse forte : dont la vitesse dépasse 0.5 m/s.



Figure III. 16 : Carte de vitesse d'eau pour la période de retour 100 ans.

Conclusion

La modélisation des écoulements est une étape cruciale dans la compréhension du comportement hydraulique d'oued Amroussa et des risques d'inondation associés, à l'aide d'outils informatiques. La simulation révèle que le niveau d'eau dépasse les berges dans la plupart des sections d'oued Amroussa. Nous en concluons que les résidents vivant près du cours d'eau à Bouinan sont vulnérables aux inondations, ce qui souligne la nécessité d'adopter des mesures de gestion de l'eau appropriées pour atténuer ce risque.

Chapitre IV :
Etude des variantes d'aménagement

Introduction

L'étude des aménagements pour protéger la ville de Bouinan contre les crues centennales se concentre sur l'analyse et la conception d'infrastructures visant à réduire les risques d'inondation de l'Oued Amroussa. Son objectif est de dimensionner et concevoir des ouvrages hydrauliques adaptés pour assurer un passage sécurisé des crues centennales et minimiser les dangers. Plusieurs variantes d'aménagement de l'Oued Amroussa seront proposées dans cette étude, et l'une d'elles sera retenue pour une analyse approfondie, garantissant ainsi la protection de Bouinan contre les risques d'inondation.

IV.1 Dimensionnement des Canaux

Pour un écoulement à surface libre à variation lente, on peut considérer que le régime est uniforme. Dans le cas d'un écoulement turbulent, les formules les plus couramment utilisées sont : (Chow, 1959)

- **La formule de Chézy :**

La formule de Chézy est de la forme :

$$V = C\sqrt{RH}.I$$

En remplaçant la formule précédente dans la loi de continuité citée ci-après :

$$Q = V.S$$

Avec :

o C : coefficient de Chézy (m0.5/s) ;

o S : section mouille (m2) ;

o Rh : rayon hydraulique, Rh = S/P (m);

o I : pente de fond du canal (mm/mm) ;

- **La formule de MANNING-STRICKLER :**

C'est la formule la plus utilisé, appelée en bref la formule de Manning-Strickler

Q = K. S. Rh 2 3.I 1 2

Avec :

K =1/n : coefficient de rugosité de STRICKLER, dépend de la nature du matériau du canal

N : Coefficient de rugosité de Manning.

Dans notre dimensionnement, on utilisera la formule de MANNING-STRICKLER et la forme Trapézoïdale.

IV.2 Les techniques d'aménagements

Les aménagements de protection contre les inondations sont des infrastructures conçues pour éliminer les risques de débordement à proximité des zones sensibles (humaines, économiques, etc.). Pour faire face aux inondations lors des crues, deux types de solutions de protection peuvent être envisagées : les protections dites directes et indirectes, selon la nature du problème à résoudre.

IV.2.1 La protection indirecte

La protection indirecte consiste à agir à distance du site menacé, en construisant un ouvrage de dérivation des oueds responsables des inondations vers d'autres bassins situés en dehors de la zone à protéger.

IV.2.2 La protection directe

La protection directe implique une intervention directement sur les sites menacés, en y installant des ouvrages de protection adaptés, capables de réduire de manière significative les

impacts négatifs des crues. Plusieurs techniques d'aménagement peuvent être utilisées, parmi le squelles :

- **Recalibrage du cours d'eau**

Cela consiste à modifier la géométrie du lit du cours d'eau (abaissement du fond et élargissement de la section transversale) afin d'augmenter prioritairement la capacité hydraulique du tronçon.

- **Endiguement du cours d'eau**

L'endiguement consiste à surélever les berges afin de prévenir les débordements et de préserver un maximum d'espace pour l'agriculture et l'urbanisation. Les digues permettent au cours d'eau de contenir un débit supérieur à celui de la capacité naturelle sans provoquer de débordement.

- **Reboisement et les techniques végétales**

Le processus de reboisement repose sur la nature du sol, la qualité des plantes adaptées et le type de climat. Il vise à stabiliser les berges grâce à l'action protectrice du couvert végétal, réduisant ainsi l'érosion et limitant la quantité de sédiments transportés dans l'eau, ce qui améliore la qualité de cette dernière.

IV.3 Dimensionnement

IV.3.1 Première variante : Canal en béton armé

▪ Les caractéristiques du canal ont été déterminées à l'aide du logiciel Flow-Master. Ci-dessous sont présentés les résultats du calcul hydraulique pour le canal trapézoïdal :

Tableau IV. 1 : Dimensions de l'aménagement en béton armé du tronçon de l'oued Amroussa (canal en béton armé).

	Section de départ	Section Darrivé	Longueur (m)	Pente du projet (m/m)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal (m)
OUED AMROUSSA	2954	104	3000	0.001	1	20	22	1

- Les dimensions du canal sont représentées par la figure IV.1 :

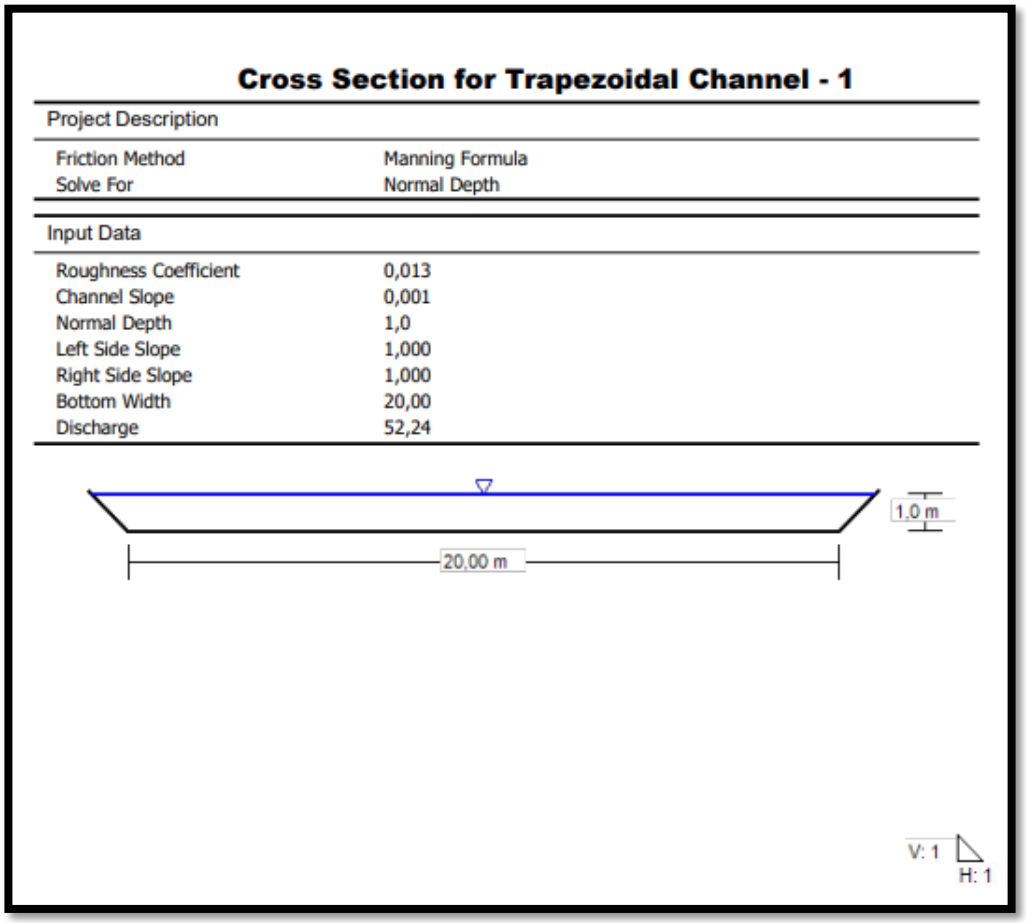


Figure IV. 1 : Dimensions du canal trapézoïdale d'oued Amroussa

(Source : logiciel Flow-master)..

a Paramètres d'écoulement

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

Tableau IV. 2 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé du tronçon de l'oued Amroussa ,

River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
2954	52,24	110	110,87	110,87	111,29	0,00185	2,87	18,18	21,74	1
2771	52,24	100	100,87	100,87	101,29	0,001842	2,87	18,2	21,74	1
2574	52,24	99	99,87	99,87	100,29	0,001829	2,86	18,25	21,75	1
2468	52,24	99	99,87	99,87	100,29	0,001844	2,87	18,2	21,74	1
2333	52,24	99	99,87	99,87	100,29	0,001828	2,86	18,25	21,75	1
2197	52,24	91	91,87	91,87	92,29	0,001843	2,87	18,2	21,74	1
2061	52,24	83	83,87	83,87	84,29	0,001862	2,88	18,14	21,74	1,01
1982	52,24	82	82,87	82,87	83,29	0,00183	2,86	18,24	21,75	1
1900	52,24	82	82,88	82,88	83,29	0,001823	2,86	18,27	21,75	1
1797	52,24	82	82,87	82,87	83,29	0,001845	2,87	18,2	21,74	1
1712	52,24	81	81,87	81,87	82,29	0,001823	2,86	18,27	21,75	1
1609	52,24	81	81,87	81,87	82,29	0,001823	2,86	18,27	21,75	1
1514	52,24	81	81,87	81,87	82,29	0,001839	2,87	18,22	21,75	1
1290	52,24	81	81,87	81,87	82,29	0,001842	2,87	18,21	21,74	1
1002	52,24	73	73,87	73,87	74,29	0,00183	2,86	18,24	21,75	1
762	52,24	72	72,87	72,87	73,29	0,001843	2,87	18,2	21,74	1
737	52,24	72	72,87	72,87	73,29	0,001846	2,87	18,19	21,74	1
308	52,24	71	71,87	71,87	72,29	0,001871	2,88	18,12	21,74	1,01
265	52,24	70	70,87	70,87	71,29	0,001847	2,87	18,19	21,74	1
104	52,24	70	70,81	70,9	71,24	0,001779	2,91	17,93	21,06	1,18

(Source : HEC-RAS).

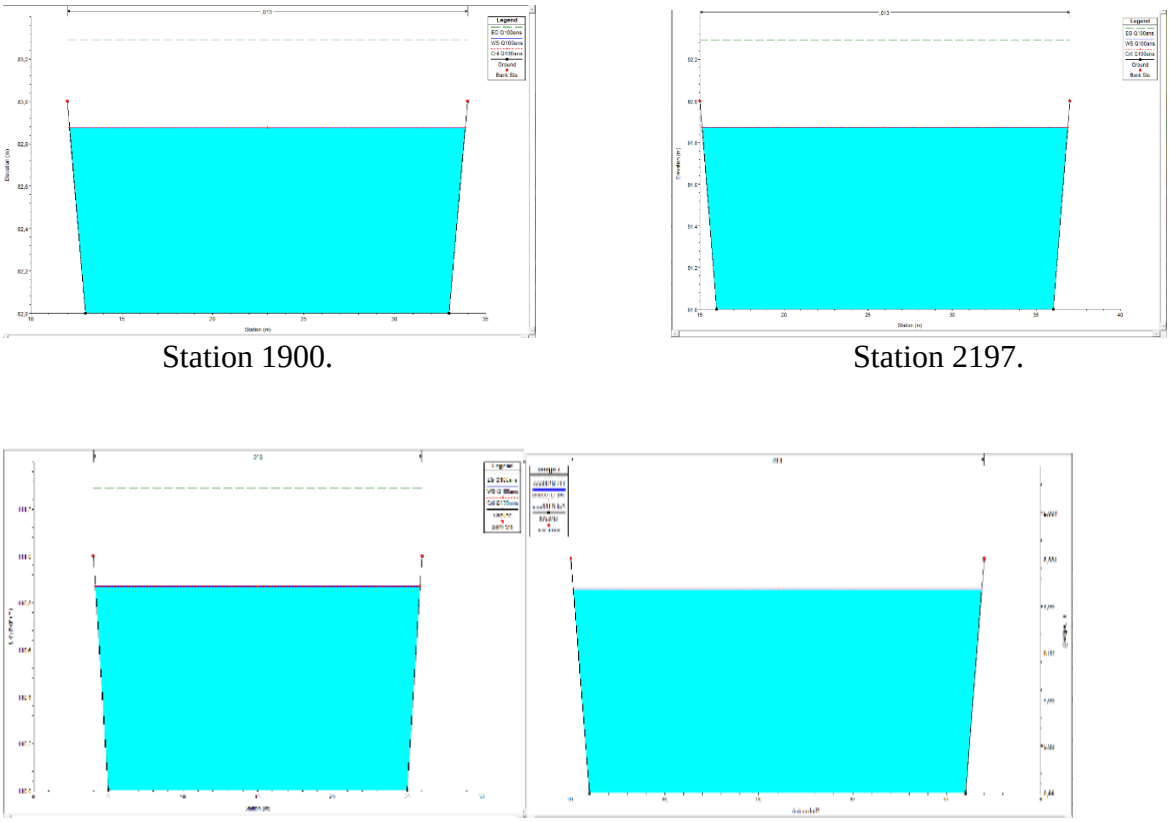
▪ En se basant sur les résultats du tableau, on remarque que :

➢ Selon les valeurs du nombre de Froude, on constate que le régime d'écoulement alterne entre un régime torrentiel et un régime critique.

➢ La vitesse d'écoulement ne dépasse pas 2.91 m/s, ce qui élimine tout risque d'érosion du béton.

b Section en travers

Les sections en travers de l'oued aménagé après la simulation sont représentées dans la figure suivante :



Station 1900. Station 2197.

Station 2954 Station 240

Figure IV. 2 : Profils en travers d'un canal en béton pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued d'oued Amroussa.

- Lors d'une crue centennale de 52.24m^3/s, on constate que notre canal trapézoïdal en béton assure une protection adéquate, empêchant le débordement de l'eau.

c Estimation du coût de la variante

Le devis de la variante du canal en béton armé a été établi en se basant sur les quantités de terrassement, ainsi que sur les volumes de remblai et de déblai calculés à l'aide de HEC-

RAS. Une épaisseur de 15 cm a été retenue pour le béton armé, tandis qu'une épaisseur de 5 cm a été utilisée pour le béton de propreté.

Tableau IV. 3 : Devis de la variante canal en béton armé pour le tronçon de l'oued Amroussa après aménagement.

Désignations des travaux		**Unité**	**Prix unitaire (DA)**	**Quantité**	**Montant (DA/mL)**
Terrassement	**Déblais**	m3	250	27969	6 992 250
	Remblais	m3	700	8,7	6 090
Béton de propreté		m3	13000	3424,5	44 518 500
Béton dosé à 350 Kg/m4		m3	**40000**	10273.5	410 940 000
Montant total					462 456 840
TVA					87 866 799,6
Montant total + TVA					**550 323 639,6 DA**

- **Interprétation**

Avantages : Offre une excellente protection contre les crues avec une bonne efficacité hydraulique. Elle permet d'éviter les débordements et assure un passage sûr du débit centennal de 52,24 m³/s.

Inconvénients : Son coût est élevé (550 millions DA) et son impact environnemental est significatif, car elle modifie le cours naturel de l'oued et perturbe l'écosystème local. En outre, la construction de cette variante nécessite la démolition d'infrastructures existantes, ce qui est un obstacle dans les zones déjà urbanisées. De plus, la zone d'étude étant classée en **zone 3 de sismicité**, cela implique des exigences supplémentaires en matière de résistance sismique, augmentant ainsi les coûts et la complexité de la conception et de la construction.

IV.3.2 Deuxième variante : Canal en enrochement

La troisième proposition envisage la création d'un canal en enrochement de forme trapézoïdale.

Les caractéristiques du canal sont déterminées en utilisant le logiciel Flow-Master .

Ci-dessous sont présentés les résultats du calcul hydraulique pour le canal trapézoïdal :

Tableau IV. 4 : Dimensions de l'aménagement du tronçon de l'oued Amroussa (canal en enrochement).

OUED AMROUSSA	Section de départ	Section Darrivé	Longueur (m)	Pente du projet (m/m)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal (m)
	2954	104	3000	0.001	2	14	18	2

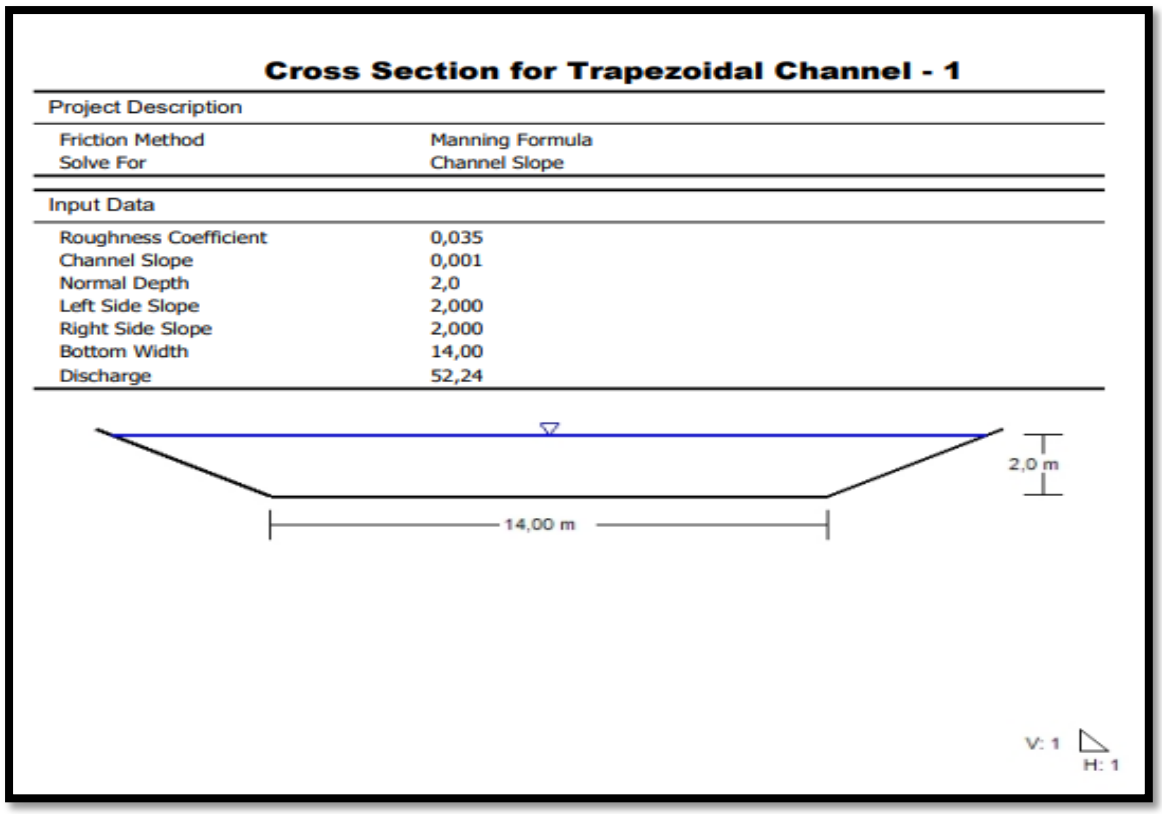


Figure IV. 3 : Les dimensions du canal trapézoïdale en enrochement du tronçon à aménager de l'oued Amroussa, (Source : logiciel Flow-master).

a Paramètres d'écoulement

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

Tableau IV. 5 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdale en béton armé du tronçon de l'oued Amroussa

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
2954	112	113,06	113,06	113,54	0,012857	3,05	17,13	18,25	1,01
2771	108	108,88	109,06	109,61	0,024788	3,78	13,81	17,51	1,36
2574	104	104,59	105,06	106,34	0,09721	5,87	8,9	16,35	2,54
2468	100	100,49	101,06	103,08	0,178877	7,13	7,33	15,96	3,36
2333	99	99,53	100,06	101,69	0,134387	6,51	8,03	16,13	2,95
2197	93	93,85	94,06	94,63	0,027621	3,92	13,34	17,4	1,43
2061	89	89,83	90,06	90,65	0,029489	4	13,06	17,33	1,47
1982	88,5	89,29	89,56	90,2	0,034954	4,23	12,36	17,17	1,59
1900	88	88,76	89,06	89,76	0,040198	4,42	11,81	17,04	1,7
1797	87,5	88,24	88,56	89,3	0,043771	4,55	11,49	16,97	1,76
1712	87	87,73	88,06	88,83	0,046993	4,65	11,23	16,91	1,82
1609	85	85,62	86,06	87,19	0,081452	5,55	9,41	16,47	2,34
1514	82	82,53	83,06	84,69	0,134574	6,51	8,02	16,13	2,95
1290	81	81,51	82,06	83,89	0,156783	6,83	7,64	16,04	3,16
1002	78	79,06	79,06	79,54	0,012855	3,05	17,13	18,25	1,01
762	74	74,62	75,06	76,17	0,079982	5,52	9,47	16,48	2,33
737	72	72,55	73,06	74,55	0,118766	6,26	8,35	16,21	2,79
308	71	71,53	72,13	73,72	0,137243	6,55	7,97	16,12	2,98
265	70	70,87	71,06	71,61	0,025743	3,83	13,64	17,47	1,38
104	68	68,69	69,06	69,93	0,056787	4,94	10,57	16,75	1,99

(Source : HEC-RAS).

D'après les résultats du tableau, on peut noter les observations suivantes :

- Les valeurs du nombre de Froude indiquent un régime d'écoulement torrentiel (Fr > 1).
- La vitesse d'écoulement ne dépasse pas 6.83 m/s, ce qui est admissible pour l'enrochement.

D'un point de vue technique, le canal en enrochement de forme trapézoïdale offre une protection efficace.

b Section en travers

Les sections en travers de l'oued aménagé après la simulation sont représentées dans la figure suivante :

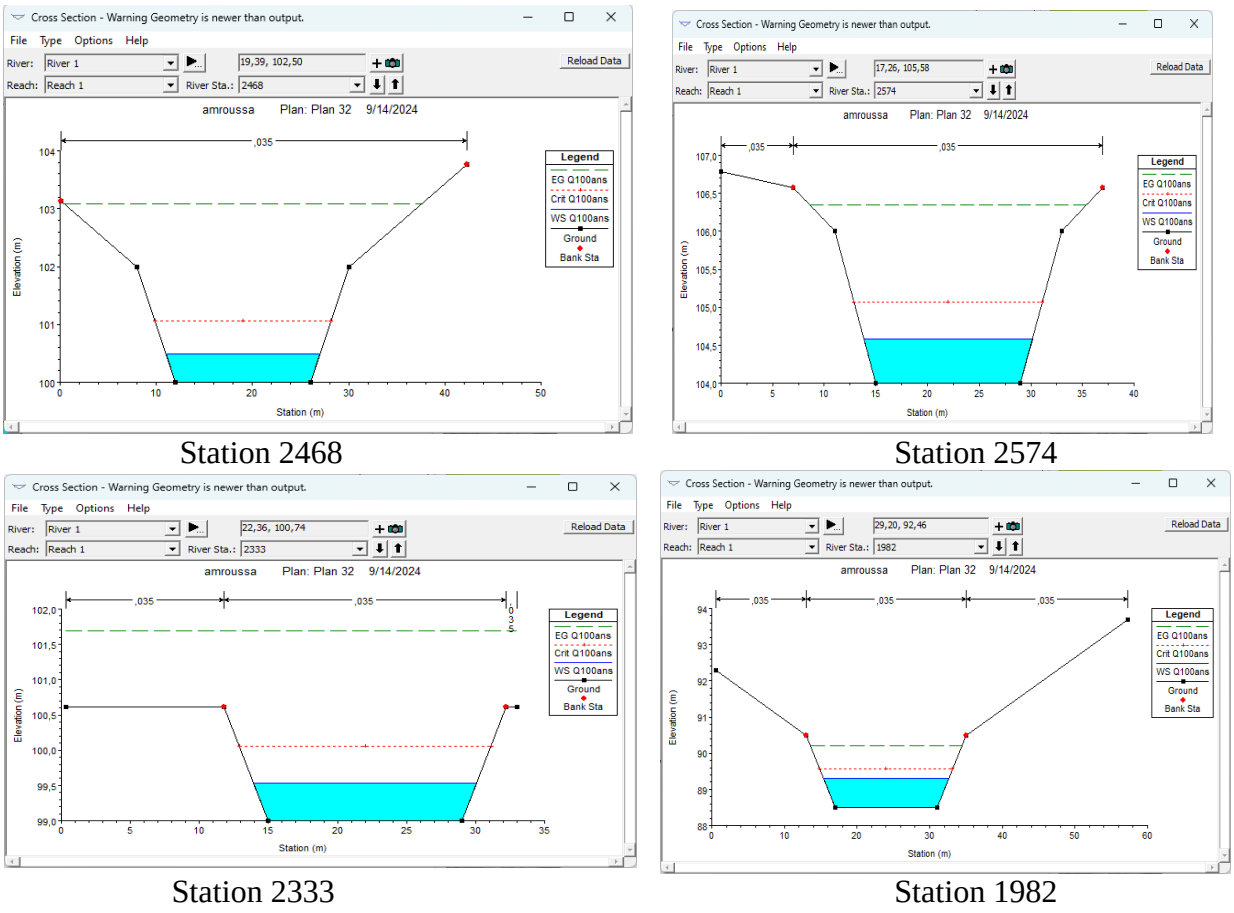


Figure IV. 4 : Profils en travers d'un canal trapézoïdale en enrochement pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Amroussa.

- Lors d'une crue centennale de 52.24m^3/s, on constate que notre canal trapézoïdal en enrochement assure une protection adéquate, empêchant le débordement de l'eau.

c Conception du canal en enrochement

L'enrochement est une méthode fréquemment employée pour stabiliser les berges et le lit des rivières. Elle consiste à empiler des roches provenant de carrières, en respectant une pente modérée des talus, généralement entre 3/2 et 2/1, sans utilisation de béton pour les lier. Pour

l'aménagement de l'Oued Amroussa, destiné à protéger la nouvelle ville de bouinan contre les crues, le poids estimé des blocs de roche varie entre 1 et 1,5 tonne. Le diamètre médian des roches (D50) est d'environ 500 cm.

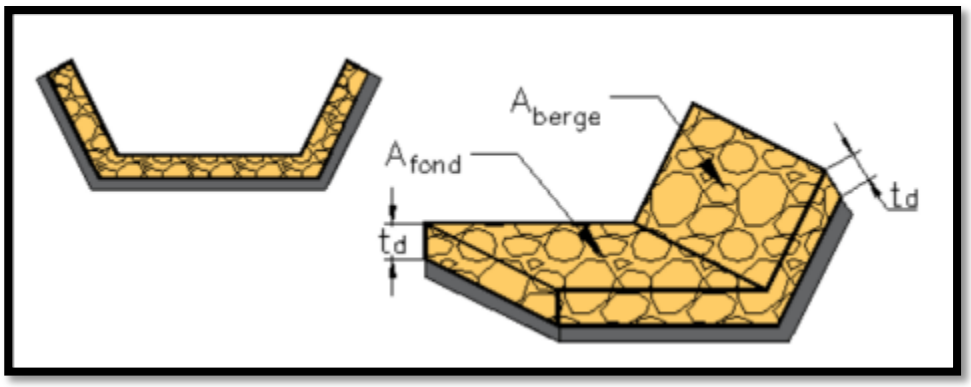


Figure IV. 5 : Canal en enrochement.

- Epaisseur orthogonale théorique td (m) :

td = n× $D50$

- Volume globale de dimensionnement ϑb. d (m3) :

ϑb.d=A× td

Avec :

n : nombre de couche n = 1.

D50 : Diamètre médian D50 = 0.5m.

A : Aire (surface) (m²).

- Les sections d'enrochement :

$$A = L\times lalus$$

Avec :

$$\boldsymbol{ltalus} = h\sqrt{1+m^2}$$

d Estimation du coût de la variante

Hauteur de l'enrochement : $Y=y_c+R = 1.15 + 0.3 = 1.45$ m

Tableau IV. 6 : les paramètres de la variante d'enrochement (tronçon oued Amroussa).

	L(m)	l(m)	n	D50(m)	Td(m)	A(m2)	V(m3)
Fond	3000	14	1	0,5	1	42000	42000
Talus droit	3000	3,35410197	1	0,5	1	10062,306	10062,306
Talus gauche	3000	3,35410197	1	0,5	1	10062,306	10062,306
Volume Totale							62124,6118

Tableau IV. 7 : Devis de la variante canal en enrochement pour l'oued Amroussa.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m3	1825	250	456 250.00
	Remblais	m3	76,52	700	53 564.00
Géotextil		mL	62100	2500	155250000
Enrochement		m3	62124,6118	5000	310 623 059
Montant total					466 382 873
TVA					88612745.87
Montant total + TVA					**554 995 618.9 DA**

Interprétation :

Avantages : Le canal en enrochement est une solution robuste et efficace pour stabiliser les berges et contrôler le débit lors des crues. Elle permet de protéger la zone contre les inondations, avec un bon comportement hydraulique face au régime torrentiel.

Inconvénients : Ce type de canal est coûteux en raison des matériaux (554 millions DA), et il nécessite un entretien régulier pour éviter les déplacements de roches. De plus, l'enrochement occupe un espace important, ce qui peut poser des problèmes dans les zones limitées.

IV.3.3 Troisième Variante : Canal en gabions

Les matelas en gabions sont principalement utilisés pour la réalisation de revêtements et de protections anti-affouillements. Ils se déclinent en plusieurs dimensions, les plus courantes étant 2,0 × 1,0 × 0,5 m et 2,0 × 1,0 × 1,0 m. L'installation des canaux en gabions suit une méthode particulière ; les sacs sont agencés de manière à former une structure en escalier, ce qui garantit la stabilité des berges.

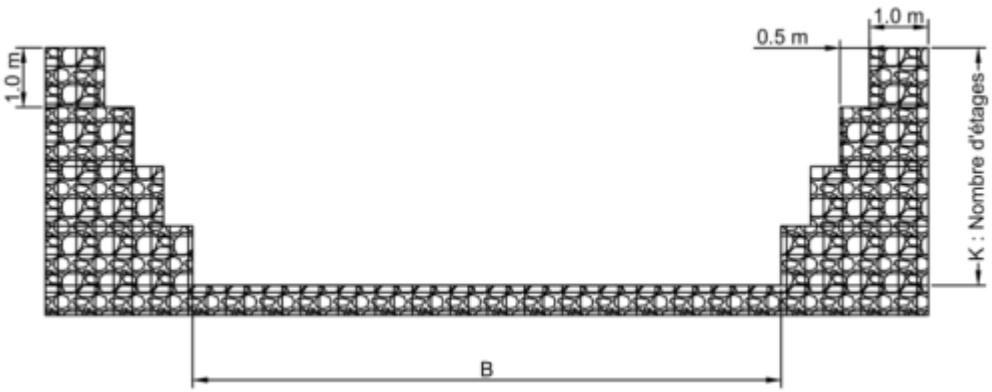


Figure IV. 6 : Coupe en travers d'un canal en gabion.

Les caractéristiques d'une section gabionnée sont les suivantes :

➢ Section Sm (m2) :

$$Sm = 0.5k\,(k-1) + bk$$

➢ Périmètre Pm (m) :

$$Pm = b + 3k - 1$$

➢ Rayon hydraulique Rh (m)

$$R_h = \frac{0{,}5k(k-1)+bk}{b+3K-1}$$

Avec : K est le nombre d'étages.

On fixe la largeur de la base puis on calcule le nombre d'étage qui peut évacuer le débit de crue.

IV.3.3.1 Dimensionnement

- Pour dimensionner ce canal, on suppose que la largeur du canal b, avec un coefficient de Manning n de 0,03 et une pente du canal I = 0,001. Ensuite, on calcule le nombre de gabions nécessaires, noté K, pour un débit centennal.

Tableau IV. 8 : Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné d'oued Amroussa.

K (caisses)	Q (m³/s)	S (m2)	P (m)	R (m)
0	0	0	9	0
1	7,11	9	11	0,82
2	21,04	19	14	1,36
3	39,58	30	17	1,76
4	**62,23**	**42**	**20**	**2,10**
5	88,86	55	23	2,39

- Donc les paramètres de cette variante sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 9 : Récupératif des paramètres de la variante du gabionnage (tronçon oued Amroussa).

Oued Amroussa	B (m)	K	H (m)	n	I (m/m)	Qdim (m^3/s)	Qévacuer(m^3/s)
	9	4	4	0.03	0.001	52.24	62.23

Tableau IV. 10 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en gabion du tronçon de l'oued Amroussa .

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
2954	112	113,51	113,51	114,21	0,011211	3,72	14,06	10	1
2771	108	109,23	109,5	110,32	0,021665	4,61	11,34	10	1,38
2574	103	104,51	104,51	105,21	0,018218	4,72	11,06	10	1,46
2468	100	101,5	101,5	102,21	0,021244	4,52	14,04	10	1,32
2333	96	96,98	97,51	98,77	0,042329	5,93	9,81	10	1,91
2197	92	93,5	93,5	94,21	0,011239	3,72	14,05	10	1

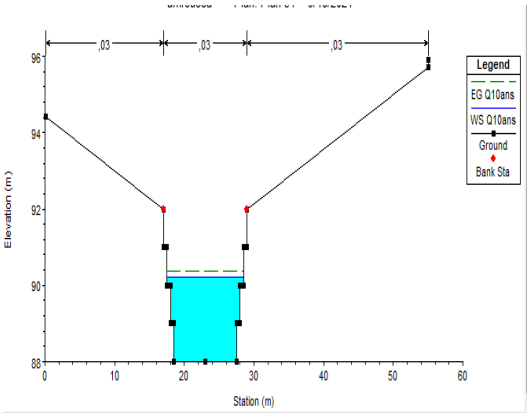
River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
1982	88	92,14		92,21	0,015495	4,19	12,31	10	1,21
1900	88	89,51	89,51	90,21	0,011127	4,21	12,41	10	1,25
1797	87	88,29	88,5	89,27	0,018613	4,38	11,91	10	1,28
1712	86	87,51	87,51	88,21	0,011127	3,71	14,09	10	1
1609	83	84,51	84,51	85,21	0,011211	3,72	14,06	10	1
1514	81	83,32	82,51	83,6	0,022962	4,32	11,05	11	1,52
1290	79	80,5	80,5	81,21	0,01124	3,72	14,05	10	1
1002	77	78,5	78,5	79,21	0,011263	3,72	14,04	10	1
762	74	75,51	75,51	76,21	0,011161	3,71	14,08	10	1
737	72	73,51	73,51	74,21	0,011225	3,72	14,05	10	1
308	68	69,51	69,51	70,21	0,021221	4,51	11,32	10	1,31
265	67	68,38	68,5	69,23	0,01497	4,08	12,79	10	1,15
104	66	67,22	67,51	68,33	0,022826	4,68	11,15	10	1,42

Source : HECRAS

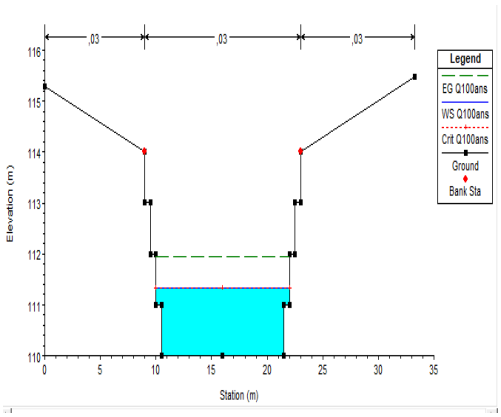
- D'après les résultats du tableau, on peut observer que :

✓ Les valeurs du nombre de Froude indiquent clairement que le régime d'écoulement est en mode torrentiel Fr > 1.

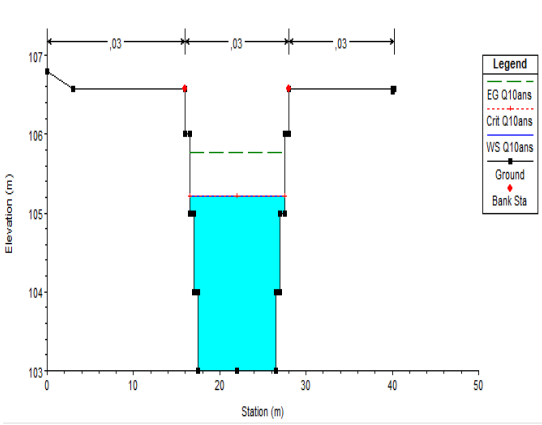
✓ La vitesse d'écoulement ne dépasse pas 5.93 m/s, s ce qui est admissible pour le gabion.



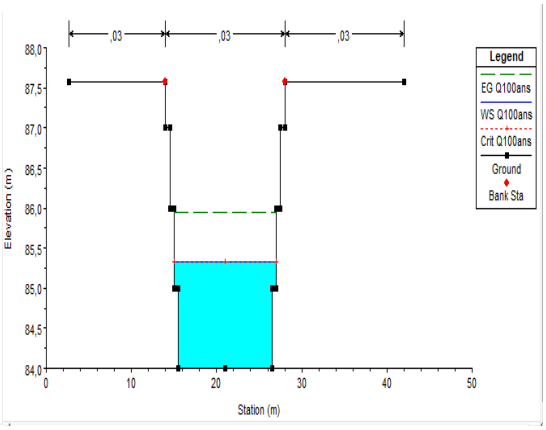
Station 1900



Station 2954



Station 2574



Station 1609

Figure IV. 7 : Profils en travers d'un canal gabionné pour une crue centennale pour le tronçon de l'oued Amroussa

- Lors d'une crue centennale de 52.34 m^3/s, il est notable que notre canal en gabions assure une protection adéquate, évitant tout débordement d'eau.

a Estimation du coût de la variante

Le Tableau n° IV.11 résume le coût de réalisation d'un canal en gabion sur le tronçon de l'oued Amroussa .

Tableau IV. 11 : Devis de la variante canal en gabions pour l'oued Amroussa.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m3	10869	250	2 717 250
	Remblais	m3	8063	700	5 644 100
Géotextile		mL	36000	2500	90 000 000
Gabion		m3	60000	5000	300 000 000
Montant total					398 361 350
TVA					75 688 656.5
Montant total + TVA					**474 050 006 .5 DA**

- **Interprétation**

Avantages

La variante en gabions se distingue par son coût relativement bas (474 millions DA), sa flexibilité et sa facilité de mise en œuvre. Les gabions sont particulièrement efficaces pour la protection des berges et la prévention de l'érosion, tout en respectant mieux l'environnement naturel. En termes d'hydraulique, elle assure une bonne capacité d'évacuation du débit de crue centennal (62,23 m³/s), dépassant légèrement le débit projeté de 52,24 m³/s. Cette solution est également esthétique et écologique, car elle permet à la végétation de s'intégrer aux ouvrages**.**

Inconvénients

Bien que moins coûteuse, cette variante peut nécessiter un entretien périodique, notamment pour vérifier l'intégrité des gabions face aux forces hydrauliques. Cependant, l'entretien reste moins intensif comparé à l'enrochement.

IV.4 Les cartes de profondeur d'eau après aménagement



Figure IV. 8 : Carte de profondeur d'eau après aménagement pour T = 100 ans.

➢ La carte de profondeur d'eau indique clairement que les trois variantes d'aménagement assurent la protection de notre zone contre les risques d'inondations.

IV.5 Les Ouvrages De Traversées

Oued Amroussa traverse un ouvrage routier, à savoir un pont et des routes. Cependant, en l'absence de dimensions et de hauteurs réelles pour cet ouvrage, nous proposons des dalots ou canaux rectangulaires en fonction du débit à gérer pour les traversées routières. De plus, un revêtement en béton spécifique sera recommandé afin de prévenir l'érosion autour du pont et de ses piles.

IV.1 Les Dalots

Les dalots sont des canalisations rectangulaires en béton armé utilisées sous les routes pour l'évacuation des débits d'eau. Sur le plan structurel, deux types de dalots peuvent être envisagés :

- **Dalots préfabriqués :** Ces dalots à section standard sont conçus pour répondre aux conditions d'utilisation courantes, permettant ainsi de satisfaire une grande variété de demandes sur le marché. Ce type de dalot assure rapidité d'exécution et mise en service rapide, ce qui contribue à réduire les coûts.

- **Dalots fabriqués sur site** : Ces dalots sont réalisés selon les besoins spécifiques de l'ouvrage, ce qui permet une meilleure adaptation en termes de section, de hauteur et de surcharge. Cependant, ce type est plus coûteux et nécessite plus de temps pour sa réalisation.

L'assemblage des deux types de dalots est réalisé par différentes méthodes, principalement à l'aide de joints souples en caoutchouc, qui garantissent une étanchéité optimale et une bonne résistance aux efforts radiaux.

- **La route nationale N29** : voici les résultats de dimensionnement de l'ouvrage de traverser

  - Largeur du fond : b = 9m ;
  - La pente : 0.001
  - Nombre des dalots « 3x3x1.5 » : 12 dalots
  - H critique : 1.5 m
  - Hauteur d'eau : h = 2.5 m
  - Epaisseur de la dalle – radier – voiles : e = 30 cm

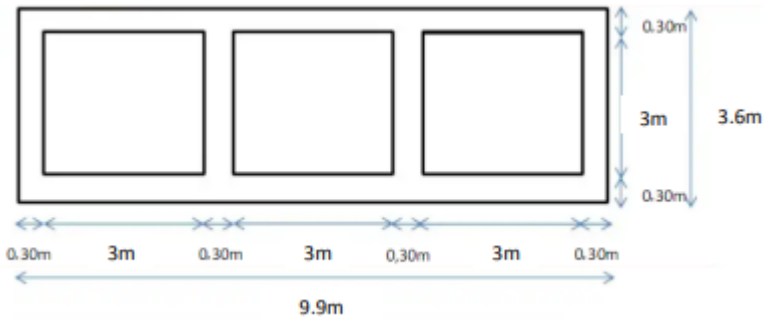


Figure IV. 9 : Profile en travers des dalots de La route nationale N29.

Tableau IV. 12 : Devis d'ouvrage de traversé pour l'oued Amroussa de la route nationale

	travaux	unité	quantité	prix unitaire (da)	Montant (da)
Ouvrage De Traversée	Dalots préfabriqué	3x3x1.5	12	5000	202 500
	Talus bétonné	m3	37800	5000	189 000 000
	Frais de chantier				47 800 625
Montant total					237 003 125
TVA					45 030 593,8
Montant total +TVA					**282 033 719 DA**

Après le dimensionnement des ouvrages de traversée, notamment les ponts, il a été retenu d'installer des **dalots rectangulaires** pour gérer efficacement les débits pendant les crues. Ces dalots, de dimensions **3x3x1,5 m**, assureront un écoulement fluide de l'eau sous les infrastructures routières, tout en réduisant les risques d'érosion autour des piles du pont. Un revêtement en **béton armé** sera appliqué autour des dalots pour renforcer la protection contre l'érosion et garantir la durabilité de l'ouvrage. Cette configuration permet une gestion optimale des flux hydrauliques, tout en assurant la sécurité des infrastructures environnantes et la protection contre les crues.

IV.6 Analyse de la Stabilité des Talus

L'analyse de la stabilité des talus constitue un élément fondamental de la géotechnique, visant à évaluer la résistance des pentes face aux forces pouvant provoquer leur déstabilisation. Cette étude est essentielle pour garantir la sécurité des infrastructures, des bâtiments et des populations avoisinantes. Elle repose sur l'analyse des propriétés géologiques et géotechniques du sol. L'outil choisi pour cette évaluation est le logiciel GeoStudio.

IV.6.1 Présentation du logiciel GeoStudio

GeoStudio est une suite logicielle performante, conçue pour la modélisation et l'analyse géotechnique. Développé par Geo-Slope International, il est largement employé pour évaluer la stabilité des sols, concevoir des projets géotechniques et gérer les risques liés aux terrains.

Principales fonctionnalités

1. **Analyse de la stabilité des talus et des pentes**
   - Évaluation de la stabilité des pentes naturelles et artificielles afin d'assurer leur sécurité.
   - Identification des zones à risque et calcul du facteur de sécurité pour la prévention des glissements de terrain.
2. **Hydro-géotechnique**
   - Simulation des écoulements d'eau dans les sols pour analyser leur impact sur la stabilité et la durabilité des structures.
3. **Analyses de sécurité**
   - Évaluation des risques géotechniques liés aux projets de construction et recommandations pour améliorer la stabilité.

Avantages de GeoStudio

- **Interface intuitive** : Une interface utilisateur ergonomique facilitant la création et la gestion des modèles.
- **Modélisation avancée** : Outils performants permettant l'analyse de divers scénarios géotechniques.
- **Rapports et visualisations** : Génération de rapports détaillés accompagnés de visualisations graphiques.
- **Intégration des données** : Importation de données géologiques et topographiques pour une analyse plus précise.

IV.6.2 Facteur de Sécurité (FS)

Le facteur de sécurité (FS) est un paramètre fondamental pour l'analyse de stabilité des structures géotechniques telles que les talus, les digues, les fondations et les murs de soutènement. Il représente le rapport entre la résistance d'une structure et les charges appliquées, permettant ainsi d'évaluer sa fiabilité et sa sécurité.

IV.6.3 Étapes de l'étude de stabilité des talus avec SLOPE/W

1. Préparation des données

- Collecte des informations géotechniques : propriétés du sol, conditions de chargement et caractéristiques du talus.
- Acquisition des données topographiques : relevés ou plans du site permettant de définir la géométrie du talus.

2. Création du modèle

- Ouverture de SLOPE/W et lancement d'un nouveau projet.
- Définition de la géométrie du talus à l'aide des outils de modélisation.

3. Définition des propriétés du sol

- Attribution des paramètres géotechniques : cohésion, angle de frottement interne, densité.
- Intégration des conditions de drainage et du niveau de la nappe phréatique.

4. Configuration des conditions de chargement

- Ajout des charges et forces externes : charges de construction, circulation, pression de l'eau.
- Définition des contraintes et conditions aux limites.

5. Analyse de stabilité

- Choix de la méthode d'analyse : méthode des cercles de rupture, analyse limite de stabilité, etc.
- Exécution de la simulation pour déterminer le facteur de sécurité et évaluer la stabilité du talus.

IV.6.4 Etude et résultats

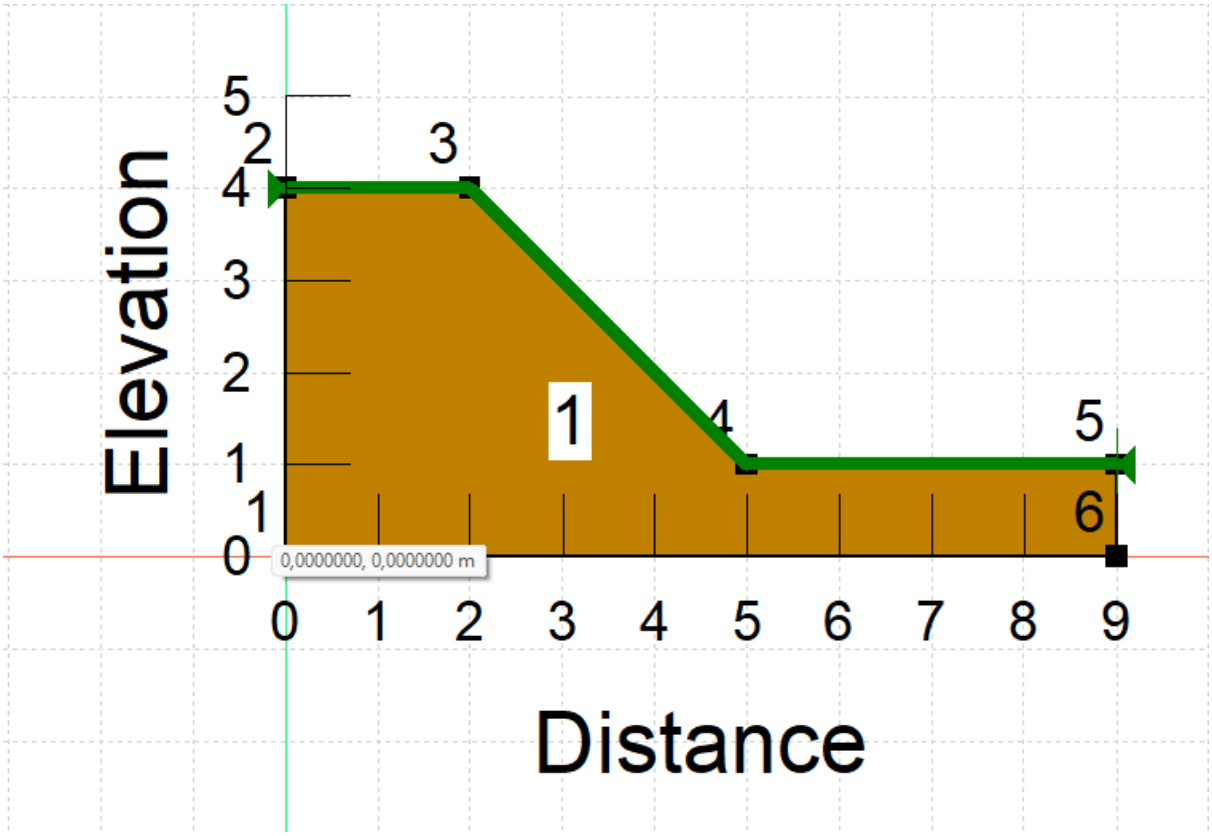


Figure IV. 10 : Géométrie du talus

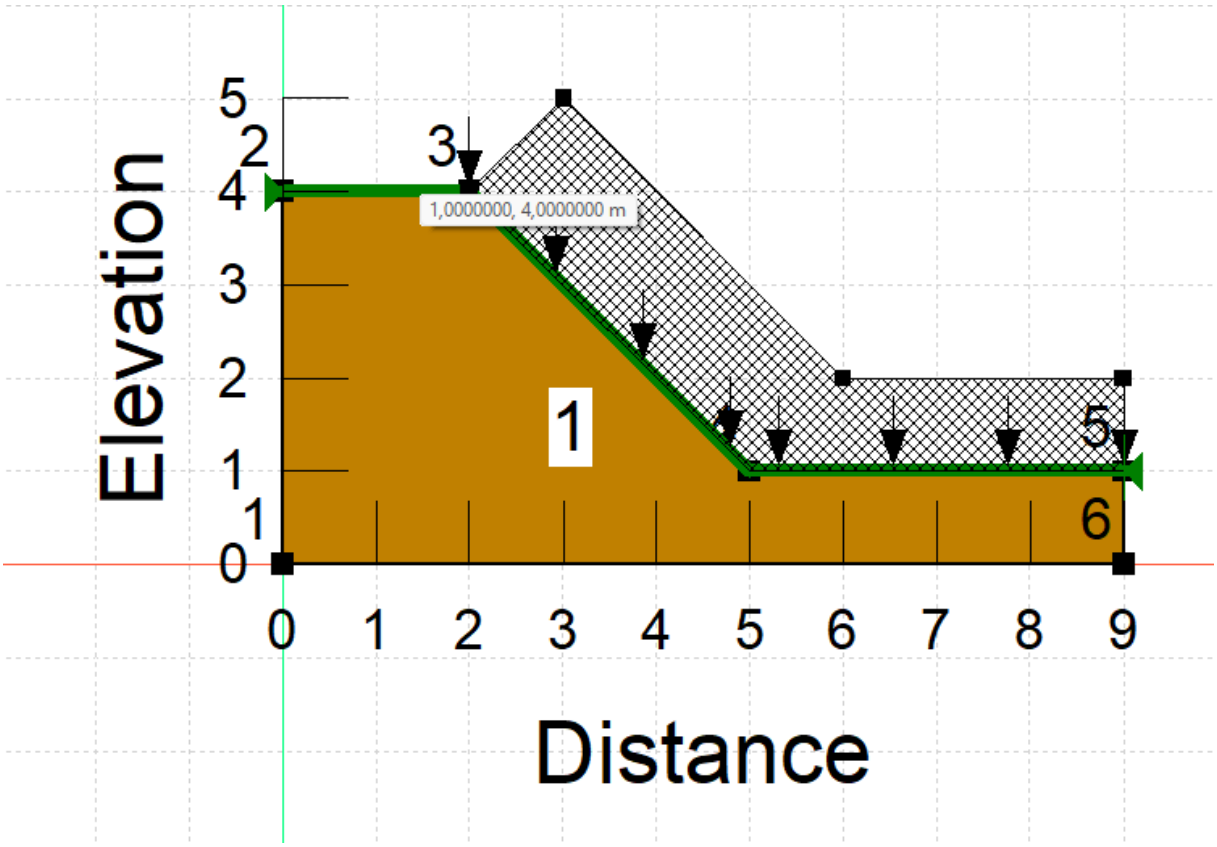


Figure IV. 11: Application des charges des roches.

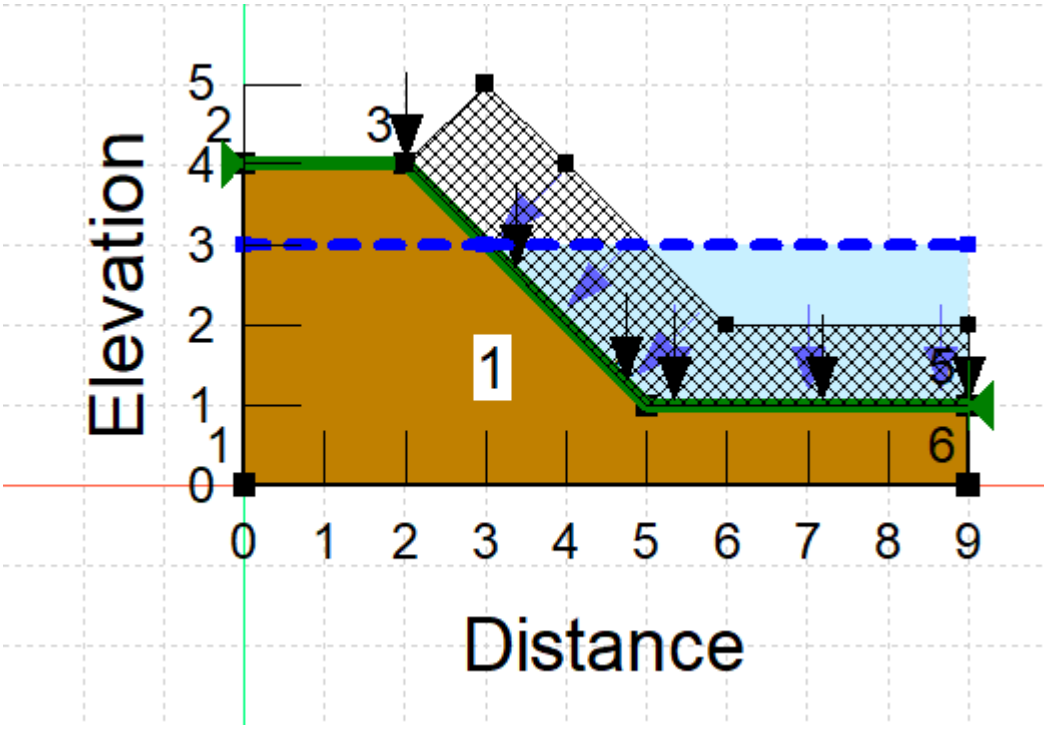


Figure IV. 12 : Dessin de la ligne piézométrique

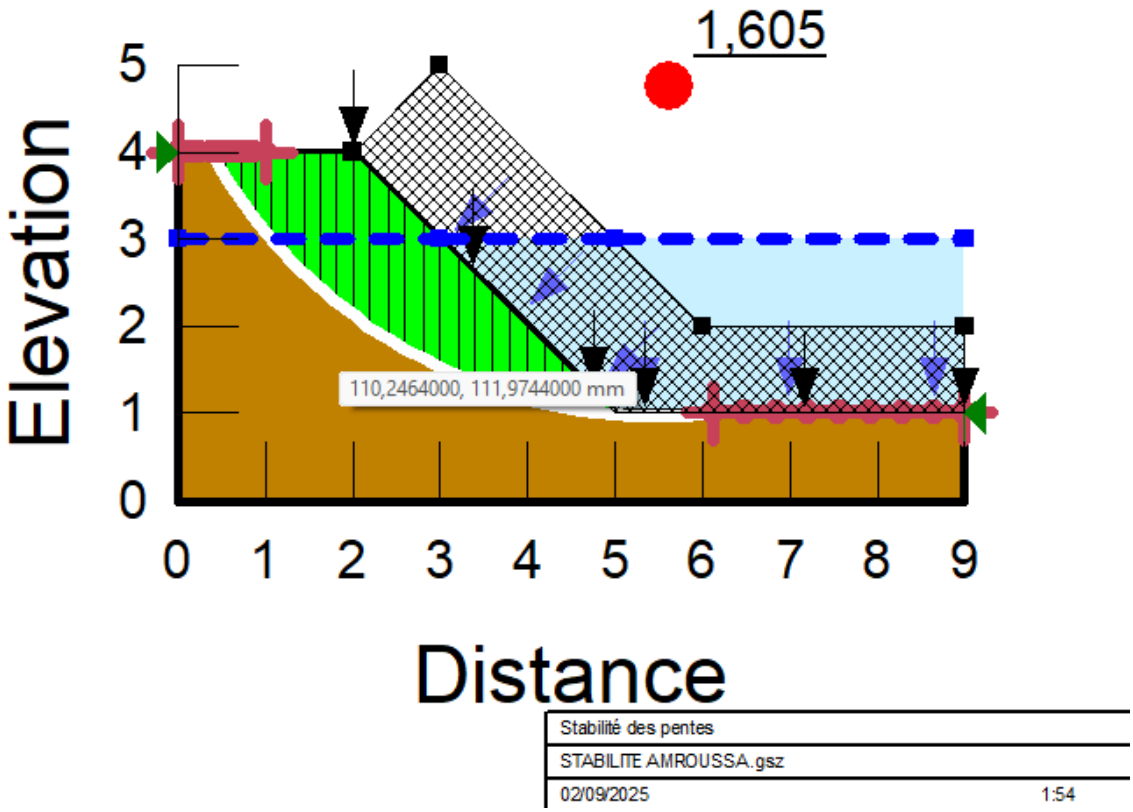


Figure IV. 13 : Résultats de calcul

Conclusion

Après une étude approfondie des trois variantes proposées pour l'aménagement de l'Oued Amroussa, la **variante en gabions** a été retenue comme la solution optimale. Elle présente un excellent équilibre entre coût, performance hydraulique et respect de l'environnement, avec un coût estimé à 474 millions DA et une capacité d'évacuation de 62,23 m³/s, dépassant le débit projeté de 52,24 m³/s, assurant ainsi une protection efficace contre les crues centennales. Cette solution, tout en s'intégrant harmonieusement dans le paysage, garantit la sécurité et la durabilité des infrastructures. En ce qui concerne le pont existant sur la route nationale N29, il a été dimensionné pour inclure trois dalots de dimensions 3x3x1,5 m, permettant ainsi un écoulement optimal des eaux et réduisant les risques d'érosion autour des piles, ce qui contribue à la sécurité de l'ensemble du système hydraulique.

Pour l'analyse des talus dans notre projet, une seule évaluation est réalisée en prenant en compte le scénario le plus défavorable. La ligne piézométrique est positionnée à 2 mètres au-dessus du fond du talus. Le facteur de sécurité minimal obtenu est de 1.605, correspondant au cercle critique. Il est impératif que cette valeur dépasse le seuil admissible de 1.5. Avec un FS de 1.605, le talus étudié dispose ainsi d'une marge de sécurité suffisante face aux charges et aux conditions d'exploitation, garantissant sa stabilité et sa fiabilité.

Chapitre V :

Organisation du chantier

Introduction

Les installations de chantier sont des dispositifs temporaires, placées sur des emprises définitives ou provisoires, conçues pour accueillir le personnel, les équipements et les matériaux nécessaires à la construction d'une infrastructure.

L'installation du chantier a pour objectifs de :

Structurer le chantier :

- Gagner du temps .
- Réduire les pertes de matériaux et éviter les doublons d'équipements .
- Renforcer la sécurité, tant pour les personnes que pour les équipements, tout en améliorant la qualité.

Positionner les différents éléments :

- Organiser les déplacements des engins et véhicules sur le chantier .
- Optimiser les zones de livraison .
- Assurer le bon positionnement des réseaux à l'aide de grillages avertisseurs et de bandes colorées normalisées.

La mise en œuvre de ces installations peut poser des défis considérables. Quelles que soient les difficultés, il est essentiel de bien comprendre l'organisation du chantier. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de :

- Définir avec précision les méthodes d'exécution et les procédures pour appliquer des techniques de construction modernes et efficaces ;

- Répartir et coordonner les tâches en recrutant une du personnel spécialisé ;

- Organiser efficacement les postes de travail, en stabilisant les processus utilisant des mécanismes avancés ;

- Déterminer avec exactitude la quantité et la qualité de la main-d'œuvre, car son coût impacte fortement le prix de revient.

V.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier

V.1.1 Le maître d'ouvrage (MO)

Le maître d'ouvrage est la personne morale ou physique pour laquelle le projet de construction est réalisé. En tant que principal responsable de l'ouvrage, il joue un rôle essentiel d'intérêt général qu'il ne peut déléguer. Il doit s'assurer de la faisabilité et de la pertinence du projet envisagé, en déterminer l'emplacement, définir le programme, établir un budget prévisionnel, assurer le financement, choisir le processus de réalisation, et conclure des contrats avec le maître d'œuvre et les entrepreneurs sélectionnés pour la réalisation des études et l'exécution des travaux.

Le MOA doit également s'entourer des compétences nécessaires pour garantir la bonne définition, conception, et exécution des travaux **(Benoit & Gülseren, 2021).**

Dans le cadre d'un barrage, le maître d'ouvrage est souvent responsable du suivi de toutes les étapes, depuis le lancement de la construction jusqu'à la phase finale de mise en eau, y compris la gestion de cette première mise en eau.

V.1.2 Le maître d'œuvre (MOE)

Le maître d'œuvre, désigné par le maître d'ouvrage, est chargé de concevoir et de superviser la construction ou la réhabilitation de l'ouvrage selon le programme établi par le maître d'ouvrage. Il s'assure également du respect de cette conception tout au long des travaux, garantissant que ceux-ci sont réalisés conformément aux règles de l'art.

La mission du maître d'œuvre est généralement distincte de celle des entreprises chargées des travaux **(Benoit & Gülseren, 2021).**

V.1.3 L'entrepreneur

L'entrepreneur, personne physique ou morale titulaire du contrat de projet, est chargé de construire l'ouvrage conformément aux plans et aux descriptions du maître d'œuvre. Ses responsabilités incluent :

- L'installation et la gestion du chantier ;
- La réalisation partielle ou totale des études d'exécution ;
- La construction de l'ouvrage dans le respect du contrat et des réglementations en vigueur.
- La demande de réception des travaux ;
- L'assurance du parfait achèvement de l'ouvrage (Benoit & Gülseren, 2021).

Le lien contractuel entre les différents intervenants d'un chantier est représenté par la figure suivante :

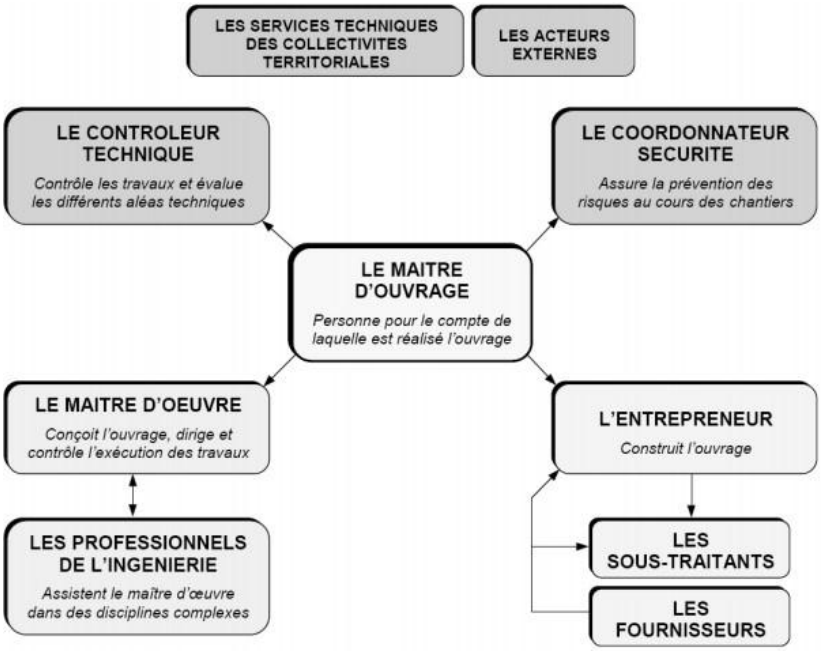


Figure V. 1 : Relation entre les personnes du chantier **(Ghomari, 2013)**

V.2 Installations du chantier

V.2.1 Installations destinées au personnel

Ces installations incluent généralement les dortoirs, vestiaires, réfectoires, installations sanitaires, ainsi que les bureaux du chantier.

V.2.2 Installations destinées au stockage des matériaux

V.2.2.1 Pierres

Les pierres destinées aux enrochements et gabions doivent être de taille, forme, et qualité adéquates pour résister à l'érosion et aux forces hydrauliques. Elles doivent être anguleuses et de taille uniforme afin de garantir une bonne répartition des forces. Le stockage doit se faire dans un endroit sec et propre, à l'abri de la pluie et du gel, en évitant tout contact direct avec le sol pour empêcher la contamination par des particules fines pouvant nuire à leur stabilité.

V.2.2.2 Grille en acier galvanisé

Les grilles en acier galvanisé, composées de fils d'acier tressés et recouverts de zinc pour résister à la corrosion, forment la structure des gabions. La taille des mailles est adaptée aux pierres qui remplissent les gabions. Les grilles doivent être stockées dans un lieu sec, propre, à l'abri du soleil et des intempéries, et ne doivent pas être pliées ni empilées pour éviter toute déformation.

V.2.2.3 Géotextile

Le géotextile, un tissu perméable, est utilisé sous les enrochements et gabions pour empêcher l'érosion du sol et assurer une séparation entre celui-ci et les pierres. Il aide également à drainer l'eau et à prévenir la formation de poches d'eau pouvant déstabiliser l'ouvrage. Le géotextile doit être stocké dans un endroit frais et sec, protégé de la lumière du soleil, sans être plié ou déchiré pour préserver son efficacité.

V.2.2.4 Alimentation en énergie électrique

L'alimentation électrique sera assurée par un groupe électrogène, évitant ainsi le recours à un raccordement au réseau électrique public (SONELGAZ).

V.2.2.5 Alimentation en eau potable

L'eau potable sera fournie par un réservoir de stockage, réapprovisionné quotidiennement.

V.2.2.6 Alimentation en carburant

Le carburant sera acheminé par camions-citernes et stocké dans des réservoirs enterrés équipés de systèmes de pompage.

V.2.3 Installations destinées à la réparation des engins

Les réparations majeures ne sont généralement pas effectuées sur le chantier, mais un atelier bien équipé est indispensable pour assurer l'entretien courant et les réparations d'urgence des engins.

V.2.4 Installations pour la préfabrication

Des hangars, équipés pour la fabrication des éléments de l'ouvrage tels que les poutres, dalles, conduites et murettes, seront mis en place.

V.3 Les moyens de chantier

V.3.1 Les moyens humains

Il est crucial de mobiliser un personnel qualifié pour la réalisation des études préliminaires et la construction. Des informations détaillées sur les compétences, titres et qualifications des équipes doivent être fournies.

V.3.2 Les moyens matériels

Le chantier nécessitera des équipements standards utilisés dans les travaux publics. L'emploi de gros engins mécaniques contribuera à réduire les coûts et les délais des travaux de terrassement.

Tableau V. 1 : Engins utilisés.

Tâches	Engins	Actions
Travaux de préparation	Dozers	Déblayer les obstacles et la végétation
	Pelles	
	Camions	
	Chargeurs	
Terrassement	Pelles	Façonner le canal selon les dimensions prévues
	Niveleuses	
	Camions	
	Dozers	
	Chargeurs	
	Dumpers	
Compactage	Compacteurs à pied de mouton	Consolider les berges de l'oued pour prévenir l'affaissement
	Compacteurs à rouleaux lisses	

V.4 Devis quantitatif et estimatif du projet

L'estimation des coûts des travaux d'aménagement englobe les éléments suivants :

- Le prix unitaire des travaux de terrassement.

- Le prix unitaire de la fourniture et de la pose des gabions ainsi que des matériaux en vrac.

Le devis détaillé du projet est présenté ci-après :

Tableau V. 2 : Devis des différents travaux d'aménagement de l'oued Amroussa.

Désignations des travaux			Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
canal en gabion	Terrassement	Déblais	m3	10869	250	2 717 250
		Remblais	m3	8063	700	5 644 100
	Géotextile		mL	36000	2500	90 000 000
	Gabion		m3	60000	5000	300 000 000
Ouvrage De Traversée	Dalots préfabriqué		3x3 x1.5	12	5000	202 500
	Talus bétonné		m3	37800	5000	189 000 000
	Frais de chantier					47 800 625
Montant total						635 364 475
TVA						120 719 250
Montant total +TVA						**757 083 726 DA**

Le montant global du projet est de 757 083 726 dinars algériens (sept cent cinquante-sept millions quatre-vingt-trois mille sept cent vingt-six DA).

V.5 La Planification

V.5.1 Définition

La planification consiste à identifier, organiser et programmer les différentes tâches d'un projet, tout en déterminant les compétences nécessaires à leur réalisation. C'est un outil que le responsable de projet utilise pour optimiser l'efficacité opérationnelle. Les objectifs de la planification incluent :

- L'organisation des postes de travail.

- La surveillance des opérations en temps réel.

- L'analyse des différentes tâches impliquées.

- La mesure du temps requis pour leur réalisation (chronométrage).

- La recherche de moyens pour simplifier les méthodes de travail.

V.5.2 Étapes de la planification

La planification est un processus qui guide l'exécution des travaux et comprend les étapes suivantes :

- **Collecte d'informations :** Cette étape nécessite la synthèse et l'analyse des données recueillies à partir d'études comparatives, afin d'optimiser l'utilisation du plan de réalisation du projet.

- **Décomposition du projet :** Le projet est divisé en tâches distinctes, chacune ayant un responsable, des besoins en équipement, et une durée de réalisation basée sur le rythme de travail de chaque équipe ou engin.

- **Relations entre les tâches :** Dans la réalisation du projet, deux types de relations sont importantes : la première repose sur une logique séquentielle, où une tâche doit être terminée avant de commencer la suivante, et la seconde concerne les préférences, permettant certaines tâches d'être réalisées en parallèle ou dans un ordre spécifique.

- **Choix de la méthode de calcul** : La méthode de calcul est choisie en fonction du type d'ouvrage à réaliser. Dans les situations où les opérations se succèdent, comme c'est le cas ici, la méthode CPM (Critical Path Method) est généralement privilégiée.

V.5.3 Plannings des travaux

Il existe trois types de plans de travail :

1. Plan de travail au plus tôt : Toutes les opérations commencent dès que possible. Les entreprises choisissent ce type de planning lorsque leurs ressources sont abondantes et qu'elles gèrent plusieurs chantiers simultanément.

2. Plan de travail au plus tard : Les opérations débutent à leur date la plus tardive. Les tâches ne sont pas retardées, ce qui en fait une option privilégiée pour les entreprises ayant des ressources limitées, rendant ce choix plus économique.

3. Plan de travail intermédiaire : Les opérations commencent à une date intermédiaire, entre la date au plus tôt et la date au plus tard. Ce type de plan est sélectionné par les entreprises disposant de ressources suffisantes et travaillant sur un seul chantier, optimisant ainsi l'utilisation de leurs moyens.

V.5.4 Techniques de la planification

Deux principales méthodes de planification existent :

- Méthodes basées sur le réseau : Ces méthodes, telles que le CPM (Critical Path Method) et le PERT (Program Evaluation and Review Technique), utilisent des réseaux de tâches et d'événements pour modéliser et gérer les projets. Elles se concentrent sur l'identification des séquences critiques de tâches influençant la durée totale du projet.

- Méthodes basées sur le graphique : Ces méthodes, comme le diagramme de Gantt, utilisent des représentations graphiques pour illustrer visuellement les tâches et leur chronologie. Les diagrammes de Gantt sont particulièrement adaptés pour suivre l'avancement du projet au fil du temps, mais ils fournissent moins d'informations sur les interdépendances entre les tâches que les méthodes basées sur le réseau.

V.5.4.1 Méthodes basées sur le réseau

Le réseau constitue une représentation graphique d'un projet, permettant de visualiser les relations entre les différentes opérations, qu'elles soient successives, simultanées ou convergentes, ainsi que les durées de réalisation. On distingue principalement deux types de réseaux :

a. Réseau à nœuds

Dans un réseau à nœuds, chaque nœud représente une opération ou une étape dans le processus, tandis que les flèches (ou arêtes) indiquent la séquence ou le flux d'informations entre

ces opérations. Les flèches peuvent être orientées pour montrer l'ordre dans lequel les opérations doivent être effectuées. Cela permet de visualiser et de comprendre les interactions entre les différentes étapes d'un processus.



- L'opération (B) ne peut commencer que lorsque l'opération (A) est entièrement terminée.

b. Réseau à flèches

Dans un réseau à flèches, les opérations sont représentées par des flèches, et les nœuds symbolisent la succession des opérations.



- L'opération A est antérieure à l'opération B.

Il est important de souligner que le graphique ne peut être élaboré sans le réseau, car ce dernier est un outil de calcul essentiel pour obtenir des résultats en réponse à des questions spécifiques. Le graphique constitue une forme d'interprétation des données issues du réseau, rendant ces informations plus accessibles et compréhensibles.

➢ **Construction du réseau :**

Pour élaborer le réseau, il est nécessaire de suivre six étapes fondamentales :

1. Établissement d'une liste des tâches : Cette étape consiste à créer un inventaire détaillé de toutes les tâches nécessaires à l'achèvement du projet. Chaque tâche doit être spécifiquement décrite, incluant des informations sur la durée estimée, les ressources requises, les dépendances, et les responsabilités**.**

2. Détermination des tâches antérieures : Une fois la liste établie, il est essentiel d'identifier les dépendances entre les tâches. Certaines doivent être achevées avant que d'autres puissent commencer, établissant ainsi un ordre logique pour leur exécution.

3. Construction des graphes partiels : Créer des graphes partiels, ou diagrammes de réseau, pour représenter visuellement les relations entre les tâches. Les deux types les plus couramment utilisés sont les graphes PERT et les diagrammes de Gantt.

4. Regroupement des graphes partiels : Si le projet comporte plusieurs sous-projets ou domaines de travail distincts, il est possible de regrouper ces graphes partiels pour former un plan global, offrant une meilleure visibilité de la structure d'ensemble.

5. Identification des tâches de début et de fin : Déterminer les tâches marquant le début et la fin du projet. La tâche de début est souvent désignée comme "tâche de début du projet", tandis que la tâche de fin est connue comme "tâche de fin du projet". Ces tâches sont des jalons importants pour suivre l'avancement du projet.

6. Construction du réseau : À ce stade, tous les éléments précédents sont rassemblés pour créer un réseau de projet complet. Ce réseau met en lumière les relations entre les tâches, les délais, les ressources nécessaires et les jalons, servant d'outil visuel puissant pour la planification, le suivi et la gestion du projet.

V.5.5 Différentes méthodes basées sur le réseau

V.5.5.1 Méthode C.P.M (Critical Path Method)

Cette méthode a pour objectif de réduire les délais de réalisation d'un projet en considérant trois phases distinctes :

1. Première phase : Déterminer les ressources nécessaires pour réaliser la tâche en question.

2. Deuxième phase : Analyser systématiquement le réseau, en détaillant les activités heure par heure et jour par jour, selon l'unité de temps choisie.

3. Troisième phase : Ajuster le réseau en fonction des contraintes ou des conditions imposées par l'entreprise **(Benlaoukli, 2004).**

V.5.5.2 Méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technique)

La technique d'ordonnancement des tâches et de contrôle des programmes consiste à organiser un ensemble de tâches sous forme de réseau, où leur séquence et leurs interdépendances contribuent à la réalisation d'un produit fini.

V.5.5.3 Méthodes basées sur le graphique

- Méthode linéaire (Line of Balance) : Adaptée pour la planification de projets de construction où les tâches sont répétitives, cette méthode est particulièrement efficace pour les projets à grande échelle, comme la construction de bâtiments identiques ou de structures linéaires comme les routes et les voies ferrées.

- Méthode à barres : Cette technique implique la création de deux réseaux et d'un diagramme à barres (plan de travail), facilitant la visualisation des dépendances entre les tâches et la détermination de la séquence d'exécution. Cela aide à gérer le projet en fournissant une vue d'ensemble des activités et de leur chronologie.

Choix de la méthode de calcul

Le choix de la méthode de calcul dépend principalement du type d'ouvrage en cours de construction. Dans les cas où les opérations suivent une séquence spécifique, il est préférable d'opter pour la méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technique) **(Benlaoukli, 2004).**

V.5.6 Méthode de calcul de P.E.R.T

V.5.6.1 Paramètres de la méthode P.E.R.T

Lors de l'application de la méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technique), les paramètres clés à considérer sont les suivants :

- DCP (Date de début au plus tôt) : La date la plus précoce à laquelle une tâche peut commencer, tenant compte des dépendances et des contraintes du projet.

- Tr (Temps de réalisation) : Le temps estimé nécessaire pour accomplir une tâche spécifique.

- DFP (Date de fin au plus tôt) : La date la plus précoce à laquelle une tâche peut être terminée, basée sur les contraintes du projet.

- DCPP (Date de début au plus tard) : La date la plus tardive à laquelle une tâche peut commencer sans affecter le calendrier global du projet.

- DFPP (Date de fin au plus tard) : La date la plus tardive à laquelle une tâche peut être achevée sans impacter le calendrier global du projet.

- MT (Marge Totale) : La marge totale indique le temps supplémentaire disponible pour une tâche sans affecter le chemin critique du projet. Elle est calculée comme la différence entre la date de début au plus tôt (DCP) et la date de début au plus tard (DCPP), ou entre la date de fin au plus tôt (DFP) et la date de fin au plus tard (DFPP).

$$DFP = DCP + T_r \text{ et } DCPP = DFPP - T_r$$

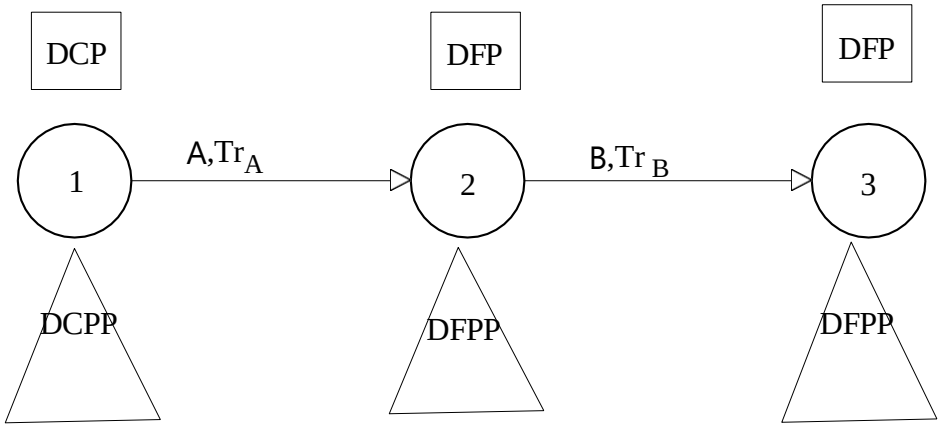


Figure V. 2 : Schéma représentatif de la méthode de PERT.

V.5.6.2 Chemin Critique (C.C)

- Le chemin critique désigne la séquence d'opérations qui détermine la durée totale du projet (DTR), et ces opérations sont caractérisées par une marge totale nulle (0).

- Pour identifier un chemin critique, deux conditions principales doivent être vérifiées :

1. La marge totale (MT) de chaque opération sur ce chemin doit être égale à zéro(MT=0).

2. La somme des durées de ces opérations doit correspondre à la durée totale du projet (DTP).

V.5.7 Diagramme de Gantt

Le diagramme de Gantt est un outil largement utilisé en gestion de projet, offrant une représentation visuelle efficace de l'état d'avancement des différentes activités ou tâches qui composent un projet. Sur le côté gauche du diagramme, on trouve la liste de toutes les tâches à réaliser, tandis que l'en-tête représente les unités de temps pertinentes pour le projet, telles que les jours, les semaines ou les mois. Chaque tâche est représentée par une barre horizontale dont la position et la longueur indiquent la date de début, la durée et la date de fin de la tâche correspondante. Ainsi, ce diagramme permet de visualiser d'un coup d'œil :

- La séquence des tâches et leurs dépendances.

- Les dates de début et de fin prévues pour chaque tâche.

- La durée de chaque tâche.

- Les chevauchements ou les lacunes entre les tâches.

- L'état d'avancement actuel du projet, en comparant les dates planifiées aux dates réelles.

En résumé, le diagramme de Gantt offre une vue d'ensemble claire et globale de la planification du projet, facilitant ainsi sa gestion et son suivi.

La méthode PERT est une approche de planification dont l'objectif est de réduire le temps et les coûts de réalisation du projet tout en augmentant l'efficacité du travail. Pour construire le réseau, il est nécessaire d'abord d'établir les différentes tâches des travaux.

Calcul de la durée de réalisation des travaux

La liste des tâches est présentée ci-dessous :

Tableau V. 3 : Liste des tâches pour le projet.

Tâche	Symbole	Durée
Délimitation de la zone de travaille et sécurisation du périmètre	A	7
prévision d'un accés pour les engins de chantier et les matériaux	B	8
Terrassement	L	7
compactage	D	5
pose géotextile	E	10
assemblage des gabiond	Z	5
pose du fond et premier étage	G	13
pose du deuxiéme étage	H	10
pose du troisiéme étage	W	10
pose quatriéme étage et finition	K	10
finitions et le drainage du canal en gabions	N	10
Transport et positionnement des dalots sur site	P	2
Installation les dalots à l'aide de grues	R	1
Comblement et compactage	S	5
finition et revêtement de la chaussée du pont	Q	5
Clôture	X	1

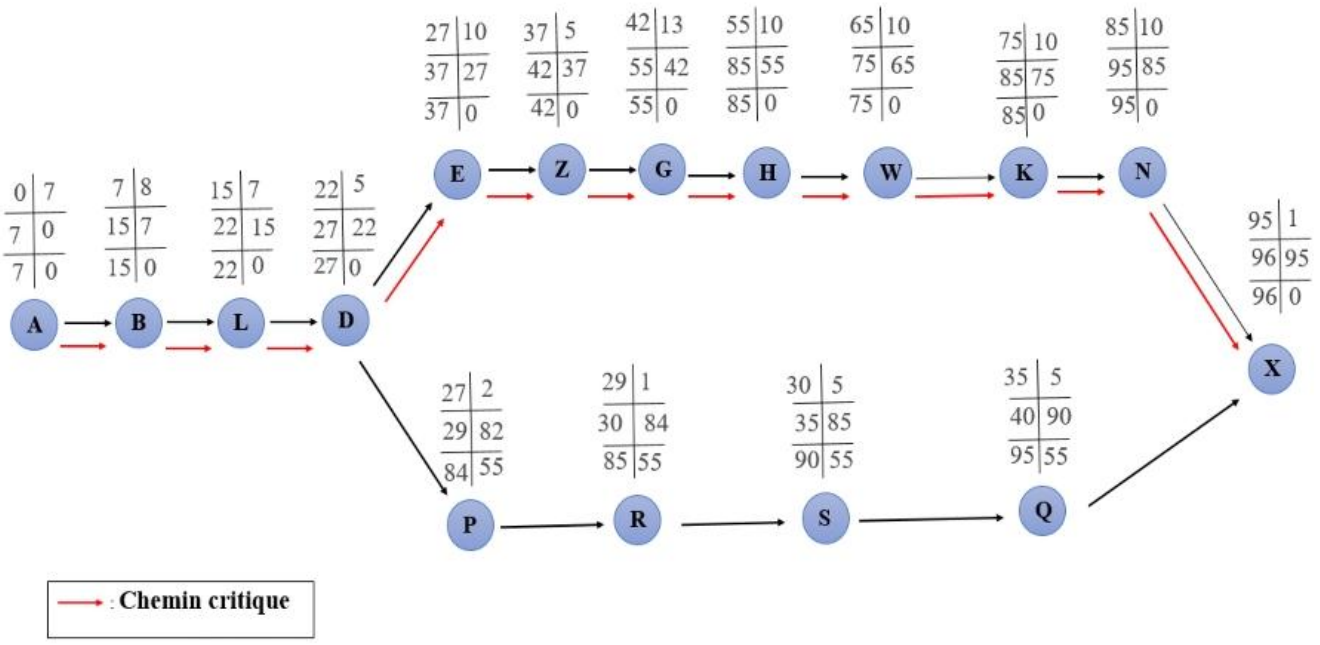


Figure V. 3 : Méthode CPM

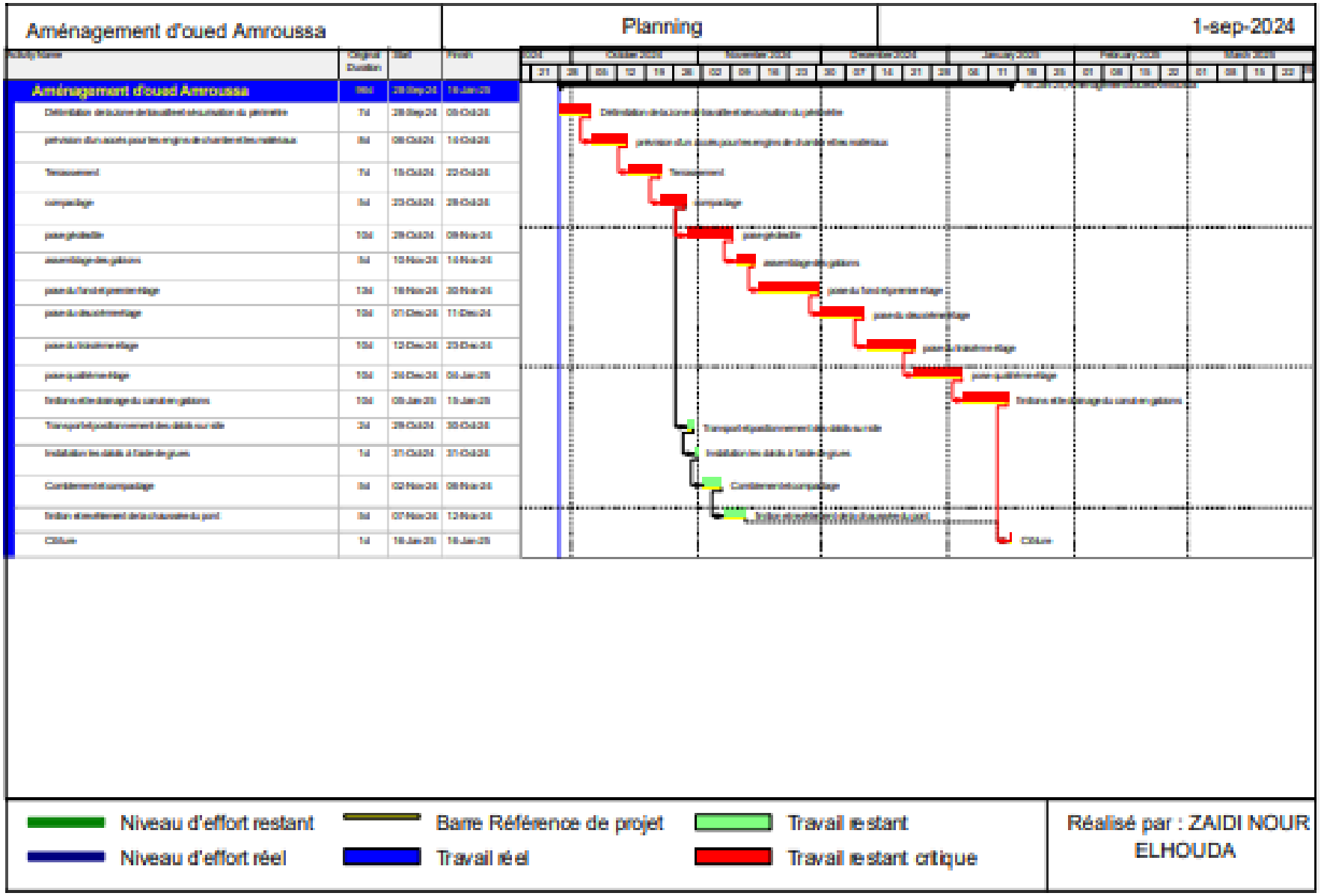


Figure V. 4 : Diagramme de GANTT du projet (source Primavera).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le devis quantitatif et estimatif ainsi que l'organisation du chantier, dans le cadre de l'aménagement d'oued Amroussa. L'objectif est de réaliser ce projet dans les meilleures conditions de sécurité, tout en respectant les délais d'exécution, les coûts et la qualité des travaux.

Le montant total du projet est estimé à **757 083 726** da avec un délai d'exécution de 96 jours.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a porté sur la gestion des crues centennales dans la ville de Bouinan, où plusieurs méthodes hydrologiques ont été employées pour déterminer le débit de crue. Parmi ces méthodes, la méthode de Maillet-Gautier a permis d'obtenir un débit centennal estimé à 52,24 m^3/s. En complément, les formules de Sokolovsky, Turazza , Giandotti,et gradex ont également été appliquées, permettant de comparer et de consolider les résultats obtenus. Ces méthodes multiples ont assuré une évaluation plus précise et fiable du débit de crue, facilitant ainsi le dimensionnement optimal des infrastructures de protection contre les inondations.

Dans le cadre de cette étude, plusieurs logiciels spécialisés ont été utilisés. **HEC-RAS** a servi à la modélisation hydraulique et à l'évaluation des niveaux d'eau pour différentes crues, permettant de simuler les écoulements et d'identifier les zones vulnérables. **ArcGIS** a été utilisé pour la cartographie et l'analyse géographique, facilitant la visualisation des bassins versants et des zones à risque. Ces outils ont joué un rôle central dans l'élaboration des solutions techniques et dans la prise de décision.

Le canal en gabion a été adopté comme solution de protection après une analyse approfondie de différentes variantes. Ce choix repose sur la durabilité du gabion, sa capacité à résister à l'érosion, et son coût relativement modéré par rapport aux autres options. Le projet, chiffré à 731 939 717 DA, sera réalisé sur une durée de 96 jours. Le canal en gabion offre une solution efficace face aux crues tout en s'intégrant dans l'environnement naturel de la zone.

En conclusion, cette étude a permis de fournir des réponses concrètes aux risques d'inondation dans la région de Bouinan, en s'appuyant sur des méthodes hydrologiques robustes et des outils technologiques de pointe. Le projet, avec son coût défini et sa durée de réalisation optimisée, constitue une solution durable pour la protection des infrastructures et des populations contre les aléas hydrologiques.

➢ Références bibliographiques

1. Benlaoukli, B. (2004). Organisation de chantier, la planification des travaux les M.M.O [Working Paper]. Disponible sur : http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/108

2. Bouguerra, S., Bouanani, A., & Baba-Hamed, K. (2016). Transport solide dans un cours d'eau en climat semi-aride : Cas du bassin versant de l'Oued Boumessaoud (nord-ouest de l'Algérie). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 29(3), 179-195. Disponible sur : https://doi.org/10.7202/1038923ar

3. Bouchelkia, H., & Remini, B. (2003). Quantification du transport solide dans le bassin versant algérien du Chellif. *Sciences Eaux & Territoires, 33 Ingénieries-EAT, Article 33 Ingénieries-EAT*. Disponible sur : https://hal.science/hal-00466014/document

4. De Ploey, J., Imeson, A., & Oldeman, L. R. (1991). Soil Erosion, Soil Degradation and Climatic Change. In F. M. Brouwer, A. J. Thomas, & M. J. Chadwick (Éds.), *Land Use Changes in Europe* (Vol. 18, p. 275-292). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3290-9_12

5. Degoutte (2012). Diagnostic, aménagement et gestion des rivières. Disponible sur : https://www.lavoisier.fr/livre/environnement/diagnostic-amenagement-et-gestion-des-rivieres-2-ed/degoutte/descriptif-9782743014698

6. Guillot, & Durand. (1969). La Méthode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies—UNESCO Digital Library. Disponible sur : https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000014626

7. IKHLEF Roumaissa (2023). Étude de protection contre les inondations par Modélisation des affluents Cas : du centre de Bordj Mira (W.Béjaïa).

8. KADI Karim (2023). Protection des communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les risques des inondations de l'oued El Hamiz (W.Alger).

9. Layan, B., Dridri, A., Benaabidate, L., & Zemzami, M. (2007). Détermination des crues de projet par les aspects du débit de pointe et de l'hydrogramme de crue au niveau de la commune Ain Boukellal, bassin versant de l'oued Larbaa, Maroc. Disponible sur : https://doi.org/10.1051/lhb:200403008

10. Roche, M. (1963). Hydrologie de surface. Disponible sur : https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ird_hydrologie_de_surface_marcel_roche_1963.pdf

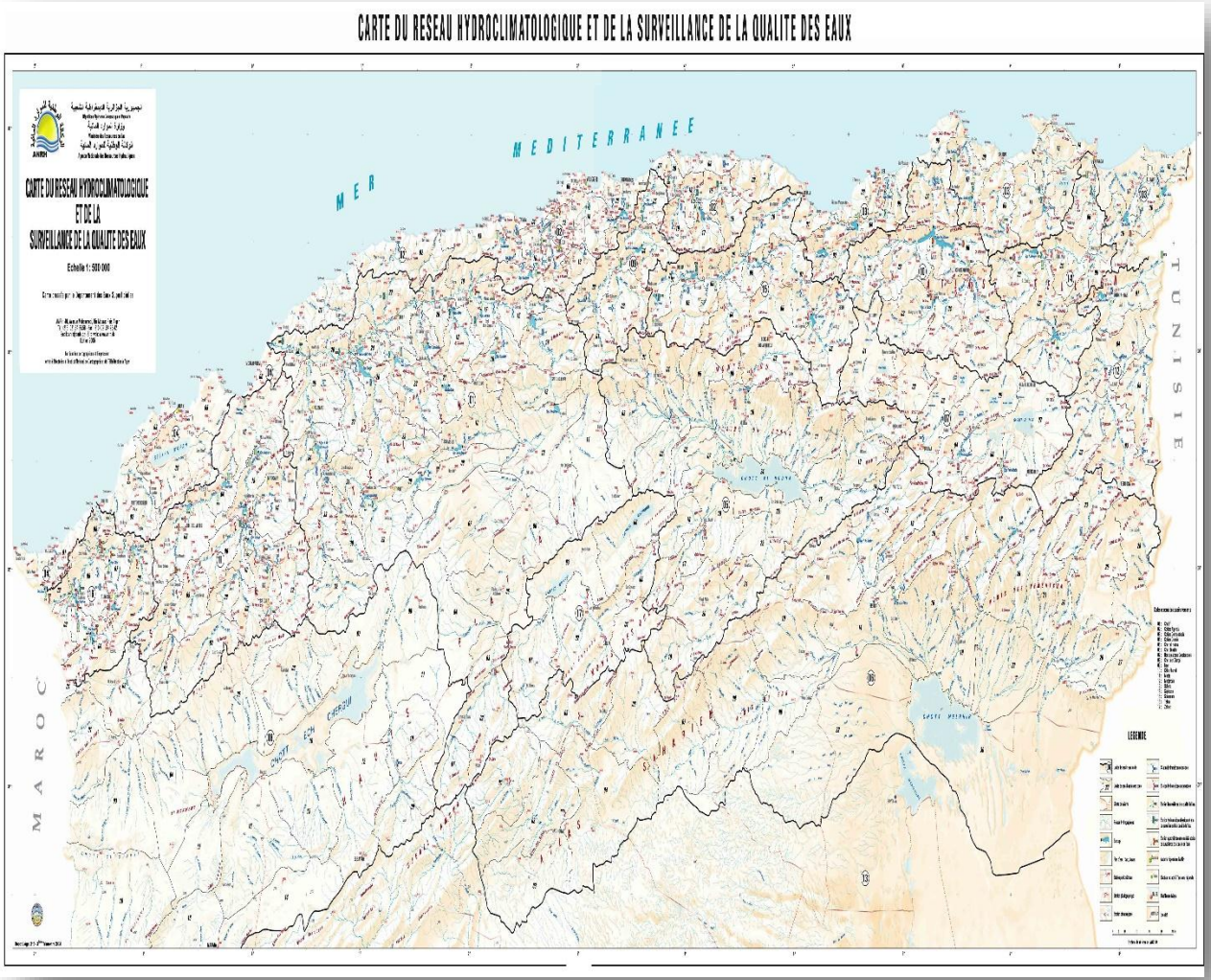
11. Strahler, A. N. (1952). HYPSOMETRIC (AREA-ALTITUDE) ANALYSIS OF EROSIONAL TOPOGRAPHY. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117. Disponible sur : https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2

12. Touaibia, bénina. (2015). Manuel pratique d'hydrologie (2ème Edition). Disponible sur : https://ia801004.us.archive.org/19/items/manuelpratiquedhydrologie/Manuel_pratique_d_hydrologie.pdf

13. Toumi, A. (2016). Hydraulique à surface libre (cours & exercices). 197. Disponible sur : https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/601/1/H.S.L%28Cours%20%26%20Exercices%29-01.pdf

ANNEXE

Annexe n° 01 : Carte du réseau hydroclimatologique et de la surveillance de la qualité des eaux



Annexe n° 02 : Valeur de rugosité de Manning.

Valeurs du coefficient n de Manning

Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,01	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,01	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moëllons bruts	0,017	0,02	0,025	0,03
Pierres sèches	0,025	0,03	0.033	0.035
Moëllons dressés	0.013	0.014	0.015	0.017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0.011	0.012	0.013	0.015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0.0225	0.025	0.0275	0.030
Canaux en terre droits et uniformes	0.017	0.020	0.0225	0.025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0.025	0.030	0.033	0.035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0.035	0.040	0.045	-
Canaux en terre à larges méandres	0.0225	0.025	0.0275	0.030
Canaux en terre dragués	0.025	0.0275	0.030	0.033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0.028	0.030	0.033	0.035
B) Cours d'eau naturels				
1) Propres, rives en ligne droite	0.025	0.0275	0.030	0.033
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0.030	0.033	0.035	0.040
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0.035	0.040	0.045	0.050
4) Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0.040	0.045	0.050	0.055
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0.033	0.035	0.040	0.045
6) Idem 4, avec pierres	0.045	0.050	0.055	0.060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0.050	0.060	0.070	0.080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0.075	0.100	0.125	0.150

Annexe n° 03 : Tableau des Valeurs de $\chi 2$

	γ										
k	0.995	0.990	0.975	0.950	0.900	0.500	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.45	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88
2	0.01	0.02	0.05	0.10	0.21	1.39	4.61	5.99	7.38	9.21	10.60
3	0.07	0.11	0.22	0.35	0.58	2.37	6.25	7.81	9.35	11.34	12.84
4	0.21	0.30	0.48	0.71	1.06	3.36	7.78	9.94	11.14	13.28	14.86
5	0.41	0.55	0.83	1.15	1.61	4.35	9.24	11.07	12.83	15.09	16.75
6	0.68	0.87	1.24	1.64	2.20	5.35	10.65	12.59	14.45	16.81	18.55
7	0.99	1.24	1.69	2.17	2.83	6.35	12.02	14.07	16.01	18.48	20.28
8	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	7.34	13.36	15.51	17.53	20.09	21.96
9	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	8.34	14.68	16.92	19.02	21.67	23.59
10	2.16	2.56	3.25	3.94	4.87	9.34	15.99	18.31	20.48	23.21	25.19
11	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	10.34	17.28	19.68	21.92	24.72	26.76
12	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	11.34	18.55	21.03	23.34	26.22	28.30
13	3.57	4.11	5.01	5.89	7.04	12.34	19.81	22.36	24.74	27.69	29.82
14	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	13.34	21.06	23.68	26.12	29.14	31.32
15	4.60	5.23	6.27	7.26	8.55	14.34	22.31	25.00	27.49	30.58	32.80
16	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	15.34	23.54	26.30	28.85	32.00	34.27
17	5.70	6.41	7.56	8.67	10.09	16.34	24.77	27.59	30.19	33.41	35.72
18	6.26	7.01	8.23	9.39	10.87	17.34	25.99	28.87	31.53	34.81	37.16
19	6.84	7.63	8.81	10.12	11.65	18.34	27.20	30.14	32.85	36.19	38.58
20	7.43	8.26	9.59	10.85	12.44	19.34	28.41	31.41	34.17	37.57	40.00
21	8.03	8.90	10.28	11.59	13.24	20.34	29.62	32.67	35.48	38.93	41.40
22	8.64	9.54	10.98	12.34	14.04	21.34	30.81	33.92	36.78	40.29	42.80
23	9.26	10.20	11.69	13.09	14.85	22.34	32.01	35.17	38.08	41.64	44.18
24	9.89	10.86	12.40	13.85	15.66	23.34	33.20	36.42	39.36	42.98	45.56
25	10.52	11.52	13.12	14.61	16.47	24.34	34.28	37.65	40.65	44.31	46.93
26	11.16	12.20	13.84	15.38	17.29	25.34	35.56	38.89	41.92	45.64	48.29
27	11.81	12.88	14.57	16.15	18.11	26.34	36.74	40.11	43.19	46.96	49.65
28	12.46	13.57	15.31	16.93	18.94	27.34	37.92	41.34	44.46	48.28	50.99
29	13.12	14.26	16.05	17.71	19.77	28.34	39.09	42.56	45.72	49.59	52.34
30	13.79	14.95	16.79	18.49	20.60	29.34	40.26	43.77	46.98	50.89	53.67
40	20.71	22.16	24.43	26.51	29.05	39.34	51.81	55.76	59.34	63.69	66.77
50	27.99	29.71	32.36	34.76	37.69	49.33	63.17	67.50	71.42	76.15	79.49
60	35.53	37.48	40.48	43.19	46.46	59.33	74.40	79.08	83.30	88.38	91.95
70	43.28	45.44	48.76	51.74	55.33	69.33	85.53	90.53	95.02	100.42	104.22
80	51.17	53.54	57.15	60.39	64.28	79.33	96.58	101.88	106.63	112.33	116.32
90	59.20	61.75	65.65	69.13	73.29	89.33	107.57	113.14	118.14	124.12	128.30
100	67.33	70.06	74.22	77.93	82.36	99.33	118.50	124.34	129.56	135.81	140.17