الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR HYDRAULICS
"The MujahidAbdellah ARBAOUI"

المدرسة الوطنية العليا للري
"المجاهد عبد الله عرباوي"

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUE

THEME :

Etude d'aménagement de l'Oued Terbout pour la protection de la Ville de TIPAZA contre les inondations (W.Tipaza)

Présenté par :

Faci Smail

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
HADJ SADOUK Ahmed	Professeur	Président
ZAIBAK Issam	M.C. B	Examinateur
BOUZIANE Mamar	M.C. B	Examinateur
TOUMI Samir	M.C. B	Promoteur

Session septembre 2025

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant, qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens ensuite à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Toumi Samir, mon encadrant, pour son suivi rigoureux, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Ma gratitude va également à l'ensemble des professeurs de l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique (ENSH), qui, durant mon parcours, m'ont transmis leur savoir, leurs compétences et leur passion, constituant ainsi la base solide de ma formation.

Je souhaite aussi remercier sincèrement toutes les personnes qui m'ont soutenu et aidé de près ou de loin dans ce travail.

Enfin, une pensée particulière à mes camarades de promotion, avec qui j'ai partagé des moments d'apprentissage, d'entraide et de fraternité, rendant ce parcours universitaire plus enrichissant et mémorable.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents, dont l'amour inébranlable et le soutien sans faille m'ont toujours porté. Vous avez été mes piliers, mes guides et ma source de force. Sans vous, ce parcours aurait été bien plus difficile. Merci pour votre patience, vos sacrifices et votre confiance infinie en moi.

À mes trois sœurs, pour leur tendresse, leur complicité et leur présence constante. Votre amour et vos encouragements ont illuminé mes jours et m'ont donné la force de continuer.

À mes amis Nouh, Ayach, Fouad et Brahim, pour les rires partagés, les moments inoubliables et le soutien sincère. Votre amitié m'a porté dans les moments de doute et m'a inspiré à toujours persévérer.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى حماية مدينة تيبازة من الفيضانات من خلال تهيئة وادي تربوت 1 و 2. وتعتمد الدراسة على تحليل هيدرولوجي ، مما سمح بتقييم خطر الفيضانات، **ArcGIS**و **HEC-HMS**و **HEC-RAS** وهيدروديناميكي للأحواض المائية باستخدام نماذج وتحديد المناطق المعرضة لها ودراسة الهشاشة. واستنادًا إلى دراسة تقنية–اقتصادية وبيئية، تم اقتراح حل يتمثل في إنجاز قناة مبنية بالحجارة المصفوفة(gabion)، مع تقدير التكاليف المالية وتنظيم أشغال المشروع.

الكلمات المفتاحية: الفيضانات، المناطق المعرّضة للخطر، وادي تربوت 1 و 2، الدراسة الهيدرولوجية، المحاكاة الهيدروديناميكية، قناة الغابون، التهيئة.

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans l'objectif de protéger la ville de Tipaza contre les inondations à travers l'aménagement de l'oued Terbout 1 et 2. L'étude repose sur une analyse hydrologique et hydrodynamique des bassins versants à l'aide des modèles, HEC-RAS, HEC-HMS et ArcGIS, permettant d'évaluer l'aléa des crues, les zones inondables ainsi que la vulnérabilité. Sur la base d'une étude technico-économique et écologique, la solution retenue consiste en la réalisation d'un canal en gabion, accompagnée d'estimations financières et d'une organisation adaptée du chantier.

Mots-clés : inondations, zones à risque, oued Terbout 1 et 2, étude hydrologique, simulation hydrodynamique, canal en gabion, aménagement.

Abstract

This work aims to protect the city of Tipaza from flooding through the development of Oued Terbout 1 and 2. The study is based on hydrological and hydrodynamic analyses of the watersheds using , **HEC-RAS**, **HEC-HMS**, and **ArcGIS**, which made it possible to assess flood hazards, identify flood-prone areas, and evaluate vulnerability. Based on a techno-economic and ecological study, the proposed solution consists of constructing a gabion channel, along with financial estimations and proper project planning.

Keywords: floods, risk areas, Oued Terbout 1 and 2, hydrological study, hydrodynamic simulation, gabion channel, development.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I : Recherche Bibliographique 4

Introduction : 4

I.1 L'aléa d'inondation 5

I.1.1 Définition de l'aléa naturel 5

I.1.2 Typologie des inondations 6

I.2 Facteurs influençant l'aléa d'inondation 9

I.2.1 Climat 9

I.2.2 Topographie et géologie 9

I.2.3 Occupation du sol 9

I.2.4 Changements climatiques et transformations anthropiques 9

I.3 Paramètres hydrologiques 10

I.3.1 Période de retour 10

I.3.2 Intensité des pluies 10

I.3.3 Débit de pointe 10

I.3.4 Profondeur de submersion, vitesse d'écoulement et durée de submersion 10

I.4 La vulnérabilité 11

I.4.1 Définition et caractéristiques 11

I.4.2 Types de vulnérabilité 12

I.5 Notion de résilience 13

I.5.1 Définition de la résilience selon le cadre international 13

I.5.2 Les « 4 R » de la résilience en ingénierie 13

I.6 Le risque d'inondation 14

I.6.1 Définition et équation du risque 14

I.6.2 Outils d'évaluation du risque 14

I.7 Les techniques de protection contre les inondations 16

I.7.1 Les mesures structurelles 16
I.7.2 Les mesures non structurelles 17
I.8 La gestion intégrée du risque 18
I.9 État de l'art : expériences et pratiques 18
I.9.1 Expériences en Algérie 18
I.9.2 Dispositif institutionnel et stratégies nationales 19
I.9.3 Enseignements pour Tipasa 20
I.10 Conséquences des inondations : 21
Conclusion : 22
Chapitre II : Présentation de la zone d'étude 25
Introduction 25
II.1 Caractéristiques physiques et naturelles 25
II.1.1 Situation géographique 25
II.1.2 Situation topographique 26
II.1.3 Situation géologique 27
II.2 Conditions climatiques 28
II.2.1 Pluviométrie 28
II.2.2 Température 31
II.2.3 Vent 31
II.3 Sismicité 31
II.4 Évolution historique et développement urbain de la ville de Tipaza : entre patrimoine et enjeux d'aménagement 32
II.5 Enjeux humains, économiques et sociaux 34
II.6 Vulnérabilité territoriale face au risque d'inondation 34
II.7 Risques et vulnérabilités liés aux inondations à Tipaza 35
II.8 Cadre institutionnel, réglementaire et organisationnel de la gestion des inondations 36
Chapitre III : Etude hydrologique 38

Introduction : 38
III.1 Bassin versant : 39
III.1.1 Rôle et importance du bassin versant 39
III.1.2 Le cycle hydrologique 40
III.1.3 Lien avec l'aménagement 41
III.1.4 Critères de délimitation 42
III.1.5 Outils de délimitation des bassins versants 42
III.2 Caractéristiques principales du bassin versant : 43
III.2.1 Présentation du bassin versant de l'Oued Terbout 43
III.2.2 Caractéristiques géographiques : 43
III.2.3 Caractéristiques morphologiques : 44
III.3 Caractéristiques morphologiques : 47
III.4 Caractéristiques hydrographiques : 52
III.4.1 Étude du relief : 52
III.4.2 La courbe hypsométrique : 52
III.4.3 Altitudes caractéristiques du bassin versant 54
III.5 Les indices de pente : 57
III.5.2 Pente moyenne du bassin versant (Im) : 61
III.5.3 L'indice de pente globale (Ig) : 62
III.5.4 L'indice de pente de Roche (Ip) : 63
III.6 Étude du réseau hydrographique : 65
III.6.1 Caractéristiques du réseau hydrographique : 65
III.6.2 Hiérarchisation du réseau : 65
III.6.3 Paramètres hydrographiques : 67
III.6.4 Temps de concentration (Tc) : 69
III.7 Étude de crue 75
III.7.1 Caractéristiques morphométriques du bassin 75

III.7.2 Analyse des données pluviométriques 76
III.7.3 Précipitations maximales journalières 76
III.7.4 Station pluviométrique de référence et justification de son choix 76
III.7.5 Analyse fréquentielle et choix du modèle d'ajustement 78
III.8 Ajustement par la loi de Gumbel 80
III.9 Teste de validité de l'ajustement 83
III.10 Estimation des débits d'eaux pluviales 84
III.10.1 Les formules empiriques 85
III.10.2 Méthode S.C.S 87
III.10.3 Conclusion 90
Chapitre IV : Modélisation hydraulique et cartographie des zones à risque d'inondation 92
Introduction générale 92
IV.1 Fondements théoriques de l'écoulement hydraulique 92
IV.1.1 Notions de base en hydraulique fluviale 92
IV.1.2 II.2. Équations de référence 94
IV.2 Diagnostique et modélisation du cours d'eau non Aménagé 99
IV.2.1 . Situation de l'oued dans la zone d'étude : 99
IV.3 Approches et méthodes de modélisation hydraulique 103
IV.4 1. Choix du modèle hydraulique 104
IV.4.1 Présentation du logiciel HEC-RAS 104
IV.4.2 Objectif du logiciel 105
IV.4.3 Fonctionnement de HEC-RAS 106
IV.4.4 Application de HEC-RAS à l'Oued étudié 106
IV.5 Cartographie du risque d'inondation 116
IV.5.1 Carte des profondeurs 116
Conclusion 117
Chapitre V : Étude Des Variante D'aménagement 119

Introduction 119
V.1 Principes généraux des aménagements hydrauliques 119
V.1.1 Techniques d'aménagement 120
V.1.2 La protection indirecte 120
V.1.3 La protection directe 122
V.1.4 Coefficient de rugosité 125
V.1.5 Marge de sécurité dans les canaux (Revanche) 126
V.1.6 Vitesse d'érosion 126
V.2 Propositions d'aménagement de l'Oued Terbout 127
V.2.1 Variantes proposées pour l'aménagement de l'oued Terbout 1 127
V.2.2 Méthode de calcul hydraulique 130
V.2.3 Calcule des variantes 130
V.3 Calcul économique 135
Conclusion 137
Chapitre VI : ORGANISATION DES CHANTIER 139
Introduction 139
VI.1 Organisation et ordonnancement du chantier 139
VI.2 Devis quantitatif et estimatif du projet : 141
VI.3 Volume des travaux 142
VI.4 Planification 143
VI.4.1 Planification de projet 143
VI.4.2 Étapes de la planification 144
VI.5 Types et techniques de planification 144
VI.5.1 Construction du réseau 144
VI.5.2 Méthodes basées sur le graphique 144
VI.5.3 Méthode de calcul P.E.R.T 145
VI.5.4 Chemin critique 146

VI.6 Le diagramme de Gantt 146
Conclusion 148
Chapitre VII : Sécurité de travaille 150
Introduction 150
VII.1 Les causes des accidents survenant lors de la phase de construction 150
VII.2 Mesures de prévention contre les accidents du travail 151
VII.3 Dispositifs de protection 153
VII.4 Les travaux de terrassement 155
VII.4.1 Machines et outils 156
VII.4.2 Installations électriques 157
VII.5 Premiers secours 157
VII.6 Plan de sécurité pour les travaux de réalisation 157
VII.7 Signalisation de sécurité 159
VII.7.1 Description des panneaux de signalisation 159
VII.7.2 Principes de conception et d'utilisation d'une signalisation de sécurité adaptée 160
VII.7.3 Application de la signalisation de sécurité sur le chantier 161
Conclusion 162
Conclusion générale 164
Reference 166

Liste des tableaux

Tableau II-1Répartition mensuelle des précipitations, station de Hadjout 29
Tableau II-2 ;Répartition mensuelle des précipitations, station de Ain Tagourait 29
Tableau II-3Vitesse du vent à la station de Attatba wilaya de Tipaza (période 1972 – 2008) (ONM-Dar El Beida) 31
Tableau III-1 : Caractéristiques géomorphologiques du Bassin Oued terbout 1et 2 51
Tableau III-2 Paramètres hypsométriques des bassins versants 55
Tableau III-3: Caractéristiques altimétriques du bassin versant d'Oued terbout 57

Tableau III-4 Pente moyenne du bassin versant d'Oued terbout. 62
Tableau III-5 : Classification O.R.S.T.O.M du relief à partir de l'indice de pente globale 63
Tableau III-6 Résultats des calculs des pentes et de la dénivelée spécifique du bassin versant d'oued Terbout1 64
Tableau III-7Résultats des calculs de temps de concentration 73
Tableau III-8 Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'oued terbout1et2..... 74
Tableau III-9 identification de la station pluviométrique. 76
Tableau III-10Précipitations maximales journalières de la station de Hadjout. 77
Tableau III-11 : résultats de l'ajustement (loi du Gumbel). 80
Tableau III-12 : Caractéristiques de la loi (Gumbel) et de l'échantillon. 81
Tableau III-13 : résultats de l'ajustement (loi du Galton). 82
Tableau III-14 : Caractéristiques de la loi (Galton) et de l'échantillon. 83
Tableau III-15 : Résultat de test khi2 84
Tableau III-16 Valeurs des Curve-Number 88
Tableau III-17Résultats de calculs du TC, CN et Lag-time 89
Tableau III-18 calcule de débit de crue 89
Tableau IV-1 présentation des paramètres hydraulique 115
Tableau V-1 valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés (Degoutte, 2012) 127
Tableau V-2 Résultats hydrauliques –canal trapézoïdal en gabions (Flow Master) 130
Tableau V-3 Résultats hydrauliques –canal trapézoïdal en gabions (Flow Master) 131
Tableau V-4 paramètres hydrauliques 132
Tableau V-5 Résultats hydrauliques – canal rectangulaire en béton (Flow Master) 133
Tableau V-6 paramètres hydrauliques 134
Tableau V-7 Estimation du coût de la variantes N°2 136
Tableau VI-1Devis quantitatif et estimatif du projet 143
Tableau VI-2 les tâche des travaux 147
Tableau VII-1: Plan de sécurité au travail (Sedrati, 2018). 158
Tableau VII-2 Signification des couleurs de sécurité (Cartier & Sabater, 2004). 160

Liste des figures

Figure I-1Bab El Oued, 10 novembre 2001- Algerie360 4
Figure I-2Inondation de Ghardaia en 2008 ALGERIE – Vitaminedz 5
Figure I-3 Principaux processus superficiels et souterrains de génération des débits de crue (d'après Ambroise, 1995). 6
Figure I-4 L'inondation par ruissellement (© Agence française pour la biodiversité / Réalisation Matthieu Nivesse (d'après OIEau), 2018 - LO-OL) 7
Figure I-5 L'inondation par remontée de nappe (© Agence française pour la biodiversité / Réalisation Matthieu Nivesse (d'après OIEau), 2018 - LO-OL) 8
Figure I-6 L'inondation par submersion marine (© Agence française pour la biodiversité / Réalisation Matthieu Nivesse (d'après OIEau), 2018 - LO-OL) 8
Figure I-7 Le risque, croisement entre aléa et vulnérabilité (Garitte G., 2006) 12
Figure I-8 Les risques d'inondation (©Eaufrance) 14
Figure I-9 Nombre total de décès pour la période 1969-2022 22
Figure II-1 Communes limitrophes de la commune de de Tipaza 26
Figure II-2Situation de la commune de Tipaza dans la Wilaya 26
Figure II-3 carte géologique de Tipaza 28
Figure II-4Répartition mensuelle des précipitations, station de Hadjout 29
Figure II-5: Répartition mensuelle des précipitations, station de Ain Tagourait 30
Figure II-6: carte pluviométrique pour le nord de l'Algérie 30
Figure II-7: Zonage sismique de l'Algérie selon le RPA 2024 31
Figure II-8: Situation urbanistique actuelle de la ville de Tipaza 33
Figure II-9 inondation a Ayouna (captures extraites d'une séquence vidéo) 35
Figure III-1BASIN VERSANT 39
Figure III-2cycle hydrologique 41
Figure III-3 Cartographie du bassin Oued Terbout 45
Figure III-4 Cartographie du bassin Oued Terbout1 46
Figure III-5 Cartographie du bassin Oued Terbout2 46
Figure III-6 : Cartographie du bassin Oued Terbout1et2 47
Figure III-7 : Exemples d'indices de compacité 49

Figure III-8 Carte hypsométrique du bassin versant d'oued Terbout 1 53
Figure III-9 Carte hypsométrique du bassin versant d'oued Terbout 2 53
Figure III-10Courbe Hypsométrique du Bassin Versant d'Oued Terbout 56
Figure III-11 Cartographie des pentes dans le bassin versant d'Oued Terbout 1 58
Figure III-12 Cartographie des pentes dans le bassin versant d'Oued terbout 2. 58
Figure III-13 Carte des courbes de niveau du bassin versant d'oued terbout1. 59
Figure III-14 : Carte des courbes de niveau du bassin versant d'oued terbout 2 60
Figure III-15 Schéma du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued terbout1. 66
Figure III-16 Schéma du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued terbout2 67
Figure III-17 : Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Gumbel (méthode des moment) ..81
Figure III-18 : Ajustement de la série pluviométrique à la loi de GALTON (maximum de vraisemblance). 82
Figure III-19 Carte d'occupation de sol de la ville de Tipaza 88
Figure III-20 l'Hydrogrammes de crues pour les différentes périodes de retours 89
Figure IV-1 type d'ecoulement 93
Figure IV-2 regime d'ecoulement 94
Figure IV-3 Image satellitaire d'oued Terbout et ces deux effluents 99
Figure IV-4 Image satellitaire représente les 3 traversées de l'affluents Terbout 1 100
Figure IV-5 Etat des ouvrages de traversées des route par Affluent d'Oued Terbout 1 « OT1 , OT2 , OT3 » 100
Figure IV-6 L'etat des ouvragede l'oued Terbout 1 101
Figure IV-7 : Constructions sur la rive droite d'Oued Terbout 101
Figure IV-8 Image satellitaire de l'ouvrage de traversée de la RN11 « OT04 » 102
Figure IV-9 Photos de L'amont et l'aval de la traversée de route 102
Figure IV-10 Etat du canal à ciel ouvert qui longe la route 103
Figure IV-11 carte de tin 107
Figure IV-12 Chargement du fichier ESRI (.prj) dans RAS Mapper 108
Figure IV-13 Représentation géométrique de l'oued Terbout1 109
Figure IV-14 définition de débit 110
Figure IV-15 Courbe de trace 111
Figure IV-16 Profil en travers d'une section de l'oued terbout 1 112
Figure IV-17 Profil en travers de l'oued trbout 1 113
Figure IV-18 Courbe de tarage du tronçon modélisé de l'oued terbout 1 113
Figure IV-19: Variation des hauteurs 116

Figure IV-20 Variation des vitesses au niveau de la traversée de routes « Oued Terbout » 117
Figure V-1 : Protection des berges en gabionnage 128
Figure V-2 canal rectangulaire en béton 129
Figure V-3 comparaison entre les variantes 129
Figure V-4 : les sections transversales pour le canal de gabion 132
Figure V-5 les sections transversales de canal de béton 135
Figure V-6 Section type de canal en gabion 137
Figure VI-1 diagramme de GANTT 148
Figure VII-1 Protections individual 154
Figure VII-2 protection pour les oreilles 154
Figure VII-3 protection de corps 154

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation	Signification
ANRH	Agence nationale des ressource hydraulique
BV	Bassin versant
CRAAG	Centre de recherche appliqué Applique en Astrophysique et Géophysique
Da	Dinar algérien
Fr	Nombre de Froude
G	Accélération due à la gravité
Ibv	Pente du bassin versant
IC	Pente du talweg principale %
Kc	Indice de compacité
Le	Lamme d'eau écoulée
Mnt	Model numérique du terrain
OIT	L'organisation internationale du travail
ONM	Office national de la météorologie
ORSTOM	Office de la recherche scientifique et technique
pjmax	Pluie maximal journalière
Rh	Rayon hydraulique
Rn	Route nationale
S	Surface du bassin versant
SCS	soil conversation service
SIG	Système d'information géographique

Sm	Surface mouillé
Ta	Désigne la dégradation spécifique
Tb	Temp de base
Tc	Temps de concentration
Td	Temps de décrue
TIN	Trinagulated irregular network
Tm	Temps de montée de la crue

LISTE DES PLANCHE

Plans de masse de la ville de Tipaza zone d'oued Terbout……01/04

Plans de la section en travers……02/04

Profil en long de l'oued Terbout1 après aménagement…….03/04

Plans de la section aménage……..……04/04

INTRODUCTION

INTRODUCTION GENERALE

L'eau, source de vie, peut aussi devenir source de danger. Ce qui, un jour, permet à une région de prospérer peut, le lendemain, la plonger dans le chaos. Les crues soudaines, les inondations, l'érosion ou encore les submersions marines sont autant de phénomènes naturels qui, lorsqu'ils se déclenchent, menacent les territoires, les écosystèmes et les populations qui en dépendent. Ces événements, souvent liés à des déséquilibres hydrologiques, deviennent de plus en plus fréquents à travers le monde en raison des effets visibles du changement climatique.

Aujourd'hui, les inondations représentent un risque majeur, tant au niveau local qu'international. Leur ampleur peut varier : elles peuvent se limiter à des débordements localisés ou prendre la forme de catastrophes touchant plusieurs régions ou pays. Elles sont provoquées par une diversité de phénomènes, allant des fortes précipitations aux crues de rivières, en passant par les tsunamis. Selon leur nature, elles peuvent survenir brutalement — comme dans le cas des crues éclair — ou s'installer progressivement dans le temps.

Les zones urbaines situées à proximité des oueds ou des fleuves sont particulièrement exposées à ce type de risques. Les oueds, en particulier, sont des cours d'eau souvent secs pendant une grande partie de l'année, mais qui peuvent se transformer en torrents impétueux dès les premières pluies intenses. Leur débordement incontrôlé peut causer des dégâts humains et matériels considérables, surtout lorsque l'aménagement du territoire n'est pas adapté à ces aléas.

L'Algérie n'échappe pas à cette réalité. Le pays a connu ces dernières années plusieurs épisodes d'inondations destructrices, révélant la vulnérabilité de certaines de ses villes face à ces phénomènes. C'est notamment le cas de la ville de Tipaza, traversée par plusieurs oueds, dont l'oued Terbout. Ce dernier constitue un point critique en matière de gestion des eaux pluviales, car il traverse des zones urbanisées et mal protégées contre les crues.

Dans ce contexte, il devient indispensable de repenser l'aménagement de ces cours d'eau. Mettre en place des systèmes de protection efficaces, améliorer la capacité des collecteurs, et intégrer les risques hydrologiques dans la planification urbaine sont aujourd'hui des priorités pour garantir la sécurité des habitants et la durabilité du territoire. Le présent mémoire s'inscrit dans cette dynamique, en

s'intéressant à la problématique suivante : comment aménager l'oued Terbout afin de réduire les risques d'inondation dans la ville de Tipaza et protéger ses habitants

À travers une étude technique et territoriale, ce travail vise à proposer des solutions concrètes d'aménagement hydraulique adaptées aux réalités du terrain et aux enjeux environnementaux actuels.

Le présent mémoire est structuré en huit chapitres complémentaires, permettant d'assurer une progression logique de la recherche et de la mise en œuvre du projet.

- **Chapitre I** : Il constitue une base théorique à travers une recherche bibliographique portant sur les notions essentielles liées à l'aléa, à la vulnérabilité et au risque d'inondation. Il propose également un état de l'art des techniques de protection contre les crues, en mettant un accent particulier sur les pratiques adoptées en Algérie et dans le bassin méditerranéen.

- **Chapitre II** : Ce chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude. Il décrit en détail la localisation géographique, le contexte climatique et géologique, ainsi que les principales caractéristiques hydrologiques de l'Oued terbout.

- **Chapitre III** : Il développe l'étude hydrologique en procédant à l'estimation des débits de crue pour différentes périodes de retour, sur la base de traitements statistiques et d'analyses pluviométriques.

- **Chapitre IV** : Ce chapitre est dédié au diagnostic du lit actuel de l'oued et à la modélisation des écoulements de crue à l'aide du logiciel **HEC-RAS**. Cette étape vise à identifier les zones vulnérables et à déterminer les hauteurs d'eau susceptibles d'être atteintes.

- **Chapitre V** : Il présente les différentes variantes d'aménagement hydraulique envisagées, en évaluant leur efficacité, leur faisabilité et leur coût.

- **Chapitre VI** : Il aborde l'organisation du chantier, en détaillant la planification des travaux, les moyens humains et matériels mobilisés, ainsi que l'échéancier prévisionnel.

- **Chapitre VII** : Enfin, ce chapitre est consacré aux aspects de sécurité et de protection du travail, afin de garantir la prévention des accidents et d'assurer la sécurité des travailleurs durant l'exécution du projet.

Chapitre I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Recherche Bibliographique

Introduction :

Les inondations constituent l'un des aléas naturels les plus fréquents et les plus dévastateurs à l'échelle mondiale. Selon les rapports des Nations Unies et de la Banque Mondiale, elles représentent près de 40 % des catastrophes naturelles recensées dans le monde, causant chaque année d'importants dommages humains, matériels et environnementaux. Leur intensité et leur fréquence sont fortement influencées par le changement climatique, l'urbanisation rapide et souvent non maîtrisée, ainsi que par la déforestation et la dégradation des écosystèmes naturels.

En Algérie, les inondations se classent parmi les catastrophes naturelles les plus redoutées. Le pays a connu plusieurs événements tragiques, dont les inondations de Bab El Oued en novembre 2001, qui ont causé plus de 700 victimes, ou encore celles de Ghardaïa en 2008 et de Béjaïa en 2019, ayant provoqué d'énormes pertes matérielles et perturbé durablement la vie socio-économique des régions touchées. Ces événements rappellent la nécessité de mieux comprendre les mécanismes générateurs d'inondations et de renforcer les dispositifs de prévention et de protection, en particulier dans les zones urbaines vulnérables.

La figure suivante montre une vue des inondations survenues dans le quartier de Bab El Oued.



Figure I-1Bab El Oued, 10 novembre 2001- Algerie360

La figure suivante présente une photographie prise lors des inondations à Ghardaïa, mettant en évidence l'ampleur des dégâts causés par le débordement des eaux.



Figure I-2Inondation de Ghardaia en 2008 ALGERIE – Vitaminedz

Dans ce contexte, il devient indispensable d'analyser le risque d'inondation à travers trois composantes essentielles : **l'aléa**, qui correspond à la probabilité d'occurrence d'un événement hydrologique potentiellement dangereux ; **la vulnérabilité**, qui exprime la sensibilité des sociétés, des infrastructures et des écosystèmes à cet événement ; et enfin, le **risque**, qui résulte de l'interaction entre l'aléa et la vulnérabilité. L'étude de ces notions est primordiale pour développer des stratégies efficaces de gestion et de réduction du risque.

L'objectif de ce chapitre est donc de poser le **cadre théorique** de la recherche en présentant les concepts fondamentaux liés à l'aléa, à la vulnérabilité et au risque d'inondation. Il s'agira également de proposer un **état de l'art des méthodes et techniques de protection contre les crues**, en distinguant les approches structurelles et non structurelles, et en mettant en lumière les pratiques adoptées en **Algérie** et dans le **bassin méditerranéen**.

Ainsi, après avoir rappelé l'importance du phénomène d'inondation et les enjeux qu'il soulève, il est nécessaire de définir les **notions fondamentales** qui structurent toute analyse scientifique de ce risque. La compréhension de l'**aléa**, de la **vulnérabilité** et du **risque d'inondation** constitue en effet une étape préalable incontournable pour appréhender les dynamiques hydrologiques et identifier les moyens de protection adaptés.

I.1 L'aléa d'inondation

I.1.1 Définition de l'aléa naturel

L'« aléa naturel » est souvent défini comme la possibilité qu'un phénomène d'origine naturelle, potentiellement destructeur, se produise dans une région donnée. Il englobe à la fois la probabilité temporelle et spatiale de survenue d'un événement ainsi que son intensité . Selon le glossaire de Géoconfluences, l'aléa est un phénomène résultant de processus échappant en partie au contrôle

humain – comme l'inondation – et qui ne devient un **risque** qu'en présence d'enjeux humains, économiques ou environnementaux vulnérables Géo confluences.

I.1.2 Typologie des inondations

L'inondation est un phénomène complexe qui peut se manifester sous différentes formes selon l'origine, la dynamique et le contexte géographique. Une typologie claire permet non seulement d'identifier les mécanismes déclencheurs, mais aussi de mieux évaluer les impacts et de définir des stratégies de protection adaptées. On distingue principalement les catégories suivantes :

- **Crues fluviales (débordements de cours d'eau)**

Elles surviennent lorsque le débit d'un cours d'eau dépasse la capacité de son lit mineur ou moyen, entraînant son débordement vers la plaine alluviale. Elles sont généralement la conséquence de pluies continues et intenses sur le bassin versant, parfois associées à la fonte nivale. Ces crues se caractérisent par une montée progressive des eaux, une durée souvent longue et des zones d'inondation étendues. Elles peuvent provoquer des dommages importants sur les infrastructures, l'agriculture et les zones urbanisées situées à proximité des cours d'eau.

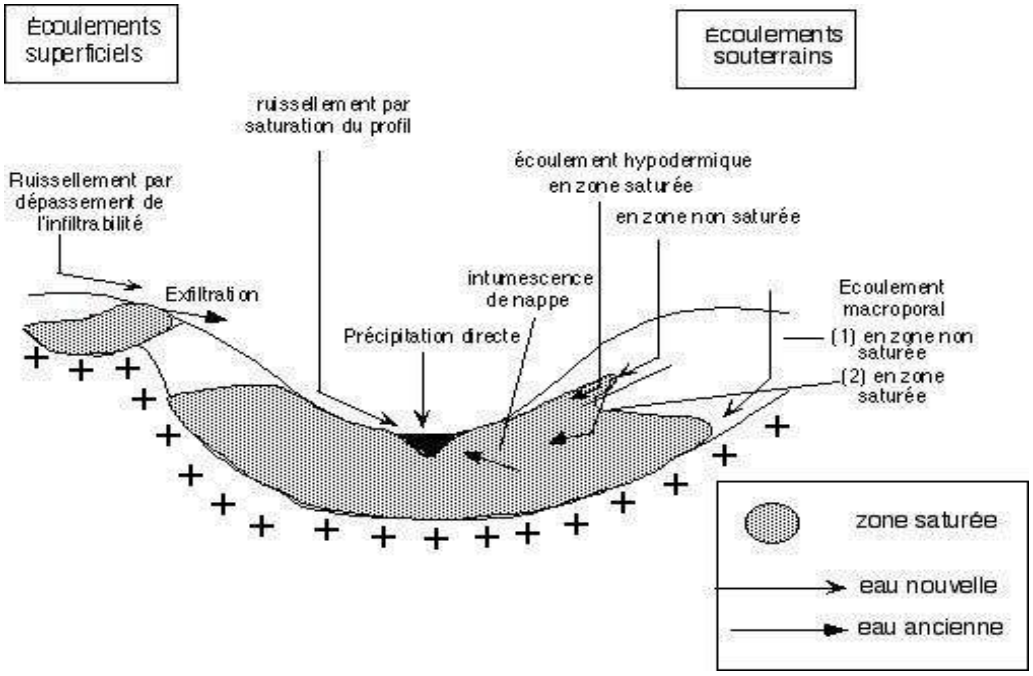


Figure I-3 Principaux processus superficiels et souterrains de génération des débits de crue (d'après Ambroise, 1995).

Exemple : les crues de la Seine à Paris en 1910 ou plus récemment les crues de la Moulouya au Maroc.

- **Inondations pluviales ou ruissellement urbain**

Ces inondations sont particulièrement fréquentes en milieu urbain. Elles se produisent lorsque de fortes précipitations tombent sur des surfaces imperméabilisées (routes, trottoirs, parkings), ce qui empêche l'infiltration naturelle de l'eau. Les réseaux d'assainissement, souvent sous-dimensionnés, se retrouvent saturés, entraînant un écoulement rapide en surface et parfois des accumulations localisées d'eau. Ces inondations sont généralement brutales, de courte durée mais très destructrices, surtout dans les grandes agglomérations.

Exemple : les inondations de Bab El Oued (Alger) en novembre 2001, causées par des pluies torrentielles et le ruissellement urbain.



Figure I-4 L'inondation par ruissellement (© Agence française pour la biodiversité / Réalisation Matthieu Nivesse (d'après OIEau), 2018 - LO-OL)

- **Remontée de nappe phréatique**

Ce type d'inondation est lié au comportement des aquifères. Lorsque les précipitations sont abondantes et durables, ou que la recharge de la nappe est excédentaire par rapport aux débits de sortie, le niveau de la nappe phréatique peut remonter jusqu'à affleurer en surface. Ce phénomène entraîne une inondation lente, diffuse et persistante, souvent difficile à maîtriser. Contrairement aux crues ou aux ruissellements, les remontées de nappes se manifestent sur de longues périodes et affectent particulièrement les zones basses et mal drainées.

Exemple : les inondations par remontée de nappe observées dans le nord de la France après les hivers pluvieux de 1999-2001.

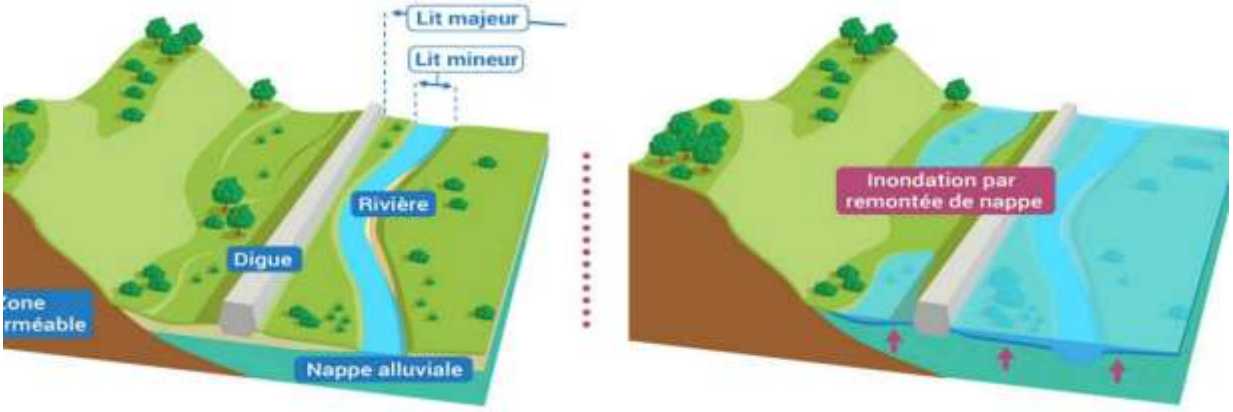


Figure I-5 L'inondation par remontée de nappe (© Agence française pour la biodiversité / Réalisation Matthieu Nivesse (d'après OIEau), 2018 - LO-OL)

- **Submersions marines**

La submersion marine résulte d'un envahissement temporaire ou permanent des zones côtières par la mer. Elle peut être causée par plusieurs phénomènes combinés : élévation du niveau de la mer, marée de tempête, houle ou encore tsunami. Ses conséquences sont particulièrement graves dans les régions littorales densément peuplées, car elle associe à la fois des risques d'érosion côtière, d'inondation et de salinisation des sols et nappes.

Exemple : la tempête Xynthia (2010) sur les côtes atlantiques françaises, qui a provoqué la submersion de vastes zones littorales.

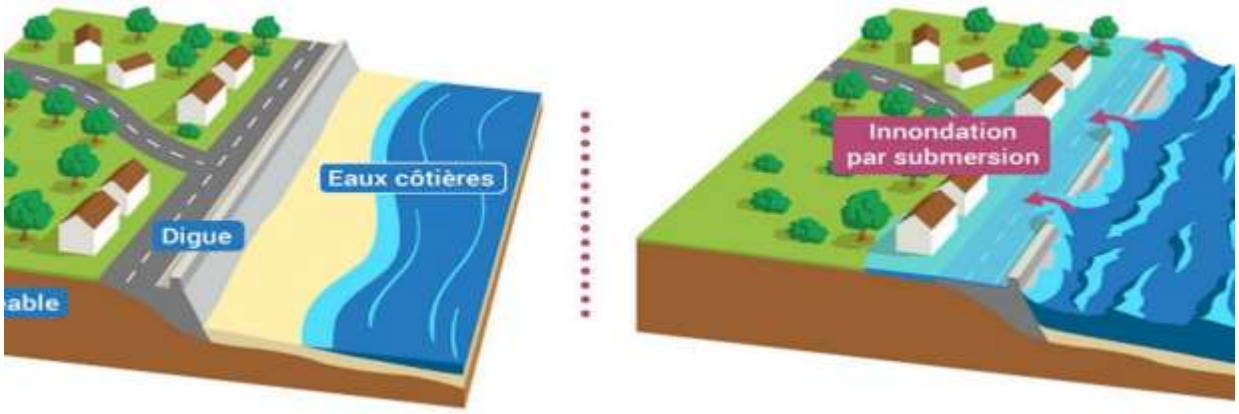


Figure I-6 L'inondation par submersion marine (© Agence française pour la biodiversité / Réalisation Matthieu Nivesse (d'après OIEau), 2018 - LO-OL)

I.2 Facteurs influençant l'aléa d'inondation

L'aléa d'inondation dépend d'un ensemble de facteurs naturels et liés à l'action humaine, qui modulent sa fréquence, son intensité et son caractère destructeur. Selon l'Observatoire des Territoires à Risques d'Inondation (OTRI), les principaux éléments modulateurs sont : la pluviométrie, la topographie, la nature et l'occupation des sols OTRI.

I.2.1 Climat

Les variations climatiques – notamment l'intensité des précipitations, la fréquence des orages et les événements extrêmes – jouent un rôle déterminant. En milieu méditerranéen, les épisodes pluvieux intenses durant l'automne ou le printemps augmentent significativement l'aléa d'inondation OTRI.

I.2.2 Topographie et géologie

Le relief d'un territoire et la perméabilité de ses sols influent fortement sur les inondations. Les zones à relief marqué, à sols peu perméables ou à aquifères confinés sont particulièrement vulnérables à des crues rapides ou à la stagnation des eaux. Ces caractéristiques topographiques et géologiques locales peuvent intensifier le risque OTRI.

I.2.3 Occupation du sol

L'urbanisation, l'imperméabilisation des surfaces (routes, bâtiments) et la disparition des zones naturelles favorisent le ruissellement rapide des eaux de pluie, surchargeant les systèmes d'assainissement. L'aggravation de cette situation est régulièrement observée dans les zones urbaines en expansion, notamment celles implantées dans des plaines sensibles aux crues OTRIvitaminedz.com.

I.2.4 Changements climatiques et transformations anthropiques

L'évolution du climat – avec la probable augmentation des épisodes de fortes pluies – tend à renforcer la fréquence et l'intensité des inondations. Par ailleurs, le développement urbain non contrôlé et la densification du bâti contribuent à modifier les régimes naturels de gestion des eaux. En Tunisie, par exemple, il est observé que même sans preuve claire d'un changement climatique, l'urbanisation croissante a déjà entraîné des transformations hydrologiques significatives, nécessitant une réévaluation des infrastructures anti-inondation OpenEdition Journals.

I.3 Paramètres hydrologiques

Les paramètres hydrologiques sont essentiels pour caractériser un aléa d'inondation. Ils permettent d'évaluer la probabilité de survenue d'un événement et son impact potentiel. Voici les principaux paramètres utilisés :

I.3.1 Période de retour

La **période de retour** (ou intervalle de répétition) d'un événement est l'intervalle de temps moyen entre deux occurrences d'une même intensité. Par exemple, un événement centennal a une chance de 1 % d'être dépassé chaque année, et non qu'il survienne tous les 100 ans. Il est défini par la relation :
P=1/T
avec TTT la période de retour en années et PPP la probabilité annuelle d'excès SERCbrighthubengineering.com.

I.3.2 Intensité des pluies

L'**intensité pluviométrique** correspond à la quantité de pluie tombée par unité de temps (généralement en mm/h). Ce paramètre est crucial pour estimer le ruissellement. Il est directement lié à la méthode rationnelle (Rational Method) :
Q=C×I×A
où Q est le débit de pointe, C le coefficient de ruissellement, I l'intensité de la pluie et A la superficie du bassin versant iswm.nctcog.orghydrocad.net.

I.3.3 Débit de pointe

Le **débit de pointe** est le débit maximal attendu lors d'une crue. Il s'exprime souvent en m³/s. Plusieurs méthodes, telles que la méthode rationnelle, les courbes unitaires (Unit Hydrograph), ou les analyses de fréquence, permettent de l'estimer www.slideshare.netIOSR Journals.

I.3.4 Profondeur de submersion, vitesse d'écoulement et durée de submersion

Ces variables décrivent la dynamique de l'eau lors d'un événement inondant :

- **Profondeur (hauteur)** : hauteur d'eau atteinte lors de la crue.
- **Vitesse d'écoulement** : vitesse du courant d'inondation, fondamentale pour évaluer les risques d'érosion et l'impact sur les infrastructures True Geometry's Bloggeobalcanica.org.

- **Durée de submersion** : durée pendant laquelle une zone reste inondée, qui influence les vulnérabilités sociales, environnementales et économiques. Les outils hydrodynamiques comme les modèles HEC-RAS reproduisent l'évolution dans le temps de la submersion, de la profondeur et de la vitesse FEMAgeobalcanica.org.

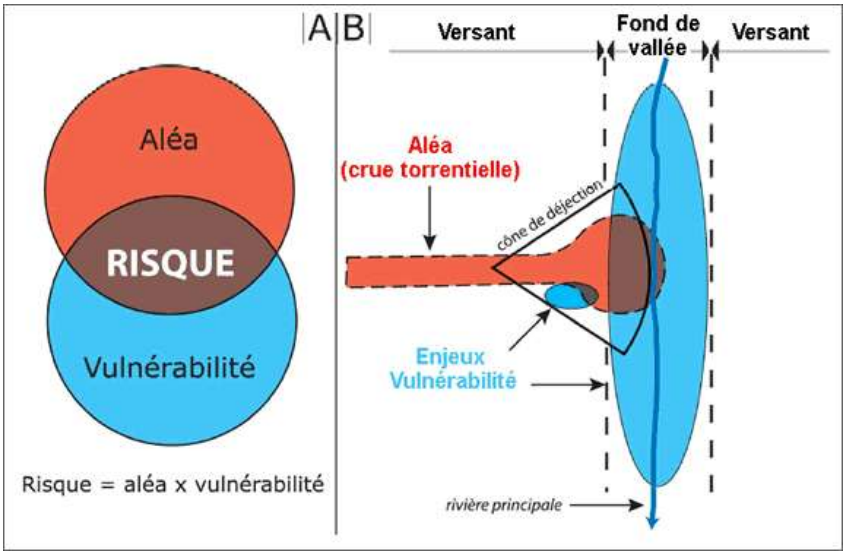
Ces paramètres hydrologiques (période de retour, intensité des précipitations, débit de pointe, profondeur, vitesse et durée de submersion) forment la base de toute modélisation fiable du risque d'inondation. Ils permettent de définir les scénarios de conception, d'évaluer la vulnérabilité des zones concernées et d'orienter les mesures de gestion ou les infrastructures de protection à adopter.

I.4 La vulnérabilité

I.4.1 Définition et caractéristiques

La **vulnérabilité** représente les caractéristiques d'une communauté, d'un système ou d'un bien qui le rendent susceptible aux effets dommageables d'un aléa naturel. Elle est largement reconnue comme un élément clé dans l'analyse du risque, car plus une entité est vulnérable, plus les conséquences d'un événement seront importantes . Le cadre conceptuel de la réduction du risque de catastrophe (DRR) confère à la vulnérabilité une dimension multidimensionnelle, dynamique et contextuelle, influencée par des facteurs physiques, sociaux, économiques, environnementaux et institutionnels cdema.orgMDPI.

Selon l'IPCC (GIEC), la vulnérabilité est définie comme la « propension ou disposition à être affecté négativement », incorporant des éléments tels que la sensibilité et la capacité d'adaptation MDPI.



Légende :

A : Schéma théorique.

B : Application à un territoire montagnard : les implantations humaines, localisées en fond de vallée et bas de versants, doivent faire face à un aléa torrentiel.

Figure I-7 Le risque, croisement entre aléa et vulnérabilité (Garitte G., 2006)

I.4.2 Types de vulnérabilité

On distingue plusieurs types de vulnérabilité, chacun correspondant à des dimensions spécifiques du risque :

- **Vulnérabilité physique** : Elle exprime la sensibilité des infrastructures, bâtiments et équipements aux dommages causés par une inondation. Elle est évaluée en fonction des éléments à risque (Elements-at-Risk, EaR) et peut être exprimée sur une échelle allant de 0 (aucun dommage) à 1 (dommage total) Charim.

- **Vulnérabilité économique** : Elle concerne les conséquences matérielles sur l'activité économique, comme les perturbations d'entreprise, la perte d'emploi ou l'aggravation de la pauvreté. La capacité financière d'une communauté, l'accès au crédit, aux assurances et aux ressources influencent fortement cette vulnérabilité SpringerLinkMDPI.

- **Vulnérabilité sociale** : Elle fait référence à la capacité des individus et des communautés à faire face à une catastrophe. Elle dépend de facteurs tels que l'éducation, la structure familiale, le statut socio-économique, l'âge, le handicap, etc. Les populations les plus marginalisées sont souvent les plus vulnérables SpringerLink+1.

- **Vulnérabilité environnementale** : Elle correspond à la susceptibilité des milieux naturels (sols, forêts, zones humides, biodiversité) aux perturbations produites par les inondations. Elle joue aussi un rôle déterminant dans la résilience écologique et les services écosystémiques SpringerLinkCharim.

- En complément, certains travaux ajoutent la **vulnérabilité institutionnelle**, qui reflète la capacité des institutions à préparer, répondre et reconstruire après une catastrophe, selon leur niveau de coordination, leur législation et leur participation citoyenne SpringerLink.

I.5 Notion de résilience

I.5.1 Définition de la résilience selon le cadre international

La **résilience**, telle que définie par l'UNISDR (Office des Nations Unies pour la Réduction des Risques de Catastrophe), correspond à la « capacité d'un système, d'une communauté ou d'une société exposée à un aléa à résister, absorber, s'adapter, se transformer et se rétablir de ses effets dans un délai et de manière efficace, incluant la préservation et la restauration de ses structures et fonctions essentielles grâce à la gestion des risques » UNDRRUNDRR.

Cette définition souligne que la résilience ne se limite pas au simple retour à l'état antérieur (reprise), mais comprend également un processus adaptatif et transformateur permettant de renforcer la sécurité face aux crises à venir.

I.5.2 Les « 4 R » de la résilience en ingénierie

Dans le domaine de l'ingénierie, la résilience est caractérisée par quatre attributs, souvent appelés les **« 4 R »** :

- **Robustesse** (Robustness) – la capacité d'un système à résister à un impact donné sans perte de fonctionnalité.
- **Redondance** (Redundancy) – la présence de solutions ou ressources alternatives permettant de maintenir la continuité en cas de défaillance.
- **Ingéniosité** (Resourcefulness) – la capacité à identifier les ressources disponibles, à s'organiser et à trouver des solutions créatives face à l'imprévu.
- **Rapidité** (Rapidity) – la vitesse à laquelle un système peut rétablir ses fonctions prioritaires et prévenir les pertes futures Resilience NinjaScienceDirectWikipedia.

Cette approche est notamment utilisée pour évaluer la résilience sismique des infrastructures critiques ou urbaines, en valorisant des stratégies qui réduisent la probabilité d'échec, les conséquences de celui-ci, ainsi que le temps de rétablissement ScienceDirectTRB Online Pubs.

I.6 Le risque d'inondation

I.6.1 Définition et équation du risque

Le **risque d'inondation** peut être défini comme la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un aléa hydrologique et de la vulnérabilité des éléments exposés (biens, personnes, infrastructures, activités). Il est souvent exprimé par la relation suivante :

Risque=Alea Vulnérabilité×Enjeux Risque = Aléa \times Vulnérabilité \times Enjeux Risque= Alea Vulnérabilité´ ×Enjeux

Selon **Boudou et al. (2016)**, le risque n'existe que si un aléa rencontre une vulnérabilité significative au sein d'un territoire. Ainsi, une crue majeure dans une zone inhabitée ne constitue pas un risque, mais seulement un aléa. À l'inverse, même une inondation modérée peut se traduire par un risque élevé si les enjeux humains et économiques y sont concentrés (Boudou et al., 2016, Natural Hazards and Earth System Sciences.



Figure I-8 Les risques d'inondation (©Eaufrance)

I.6.2 Outils d'évaluation du risque

L'évaluation du risque d'inondation repose sur plusieurs outils complémentaires :

- **Cartographie des aléas et des zones inondables**

- Elle permet de représenter spatialement l'extension des crues probables et d'identifier les zones les plus vulnérables.

- Ces cartes sont essentielles pour l'aménagement du territoire, la prévention et la planification des secours.

- La Directive Européenne 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation recommande explicitement la production de **cartes de dangers et de risques** pour toutes les zones sensibles (Directive 2007/60/CE, Journal officiel de l'UE

Modélisation hydrologique et hydraulique

Des logiciels spécialisés permettent de simuler le comportement des cours d'eau et du ruissellement en cas de crue.

Parmi les outils les plus utilisés :

- **HEC-RAS** (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), développé par l'US Army Corps of Engineers, pour la modélisation hydraulique unidimensionnelle et bidimensionnelle.

- **MIKE Flood**, qui combine modèles hydrologiques et hydrauliques, particulièrement adapté aux zones urbaines et littorales (DHI, 2017)

- **SWMM (Storm Water Management Model)**, développé par l'EPA, conçu pour le ruissellement pluvial et la gestion des réseaux d'assainissement urbains (Rossman, 2015, Storm Water Management Model User's Manual, EPA

➢ **Analyses de scénarios**

- Elles permettent d'évaluer les dommages potentiels en fonction de différentes intensités d'aléas (crue décennale, centennale, millénniale).

- Ces scénarios sont souvent intégrés dans les **Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI)** en France, ou des dispositifs similaires à l'échelle internationale.

➢ **Échelles d'analyse**

L'évaluation du risque peut s'effectuer à différentes échelles, selon l'objectif et le contexte :

➢ **Locale (urbaine ou communale) :**

- Utilisée pour la planification urbaine et la gestion de crise.

- Exemple : simulation d'inondation d'un quartier traversé par un oued.

➢ **Régionale (bassin versant)** :

- Permet d'analyser les interactions entre amont et aval d'un cours d'eau.
- Utile pour la mise en place de systèmes d'alerte précoce et de mesures de régulation.

➢ **Nationale et supra-nationale** :

- Vise à évaluer l'exposition globale d'un pays ou d'une région aux inondations, dans une logique de stratégie de gestion intégrée.
- Exemple : la **Directive Inondation européenne** impose aux États membres de produire des **cartes de risques à l'échelle nationale** et de mettre en œuvre des plans de gestion intégrés (European Commission, 2015).

I.7 Les techniques de protection contre les inondations

La gestion des inondations repose sur un ensemble de **mesures structurelles et non structurelles**, combinées dans une approche intégrée. Ces techniques visent à réduire l'intensité des aléas, limiter l'exposition et accroître la résilience des territoires.

I.7.1 Les mesures structurelles

Les mesures structurelles regroupent les aménagements physiques et techniques destinés à contrôler ou contenir les écoulements d'eau. Elles représentent la forme « classique » de protection contre les inondations.

- **Barrages et réservoirs** :
  Ces ouvrages permettent de stocker l'eau en période de crue afin de réguler les débits en aval. Ils jouent un rôle majeur dans l'atténuation des crues, mais posent aussi des enjeux environnementaux et sociaux liés à l'inondation des vallées lors de leur mise en eau ([Chow et al., 1988, Applied Hydrology]).

- **Digues et canaux de dérivation** :
  Les digues visent à contenir les eaux dans le lit majeur et protéger les zones habitées, tandis que les canaux dérivent une partie des écoulements pour réduire la pression hydraulique. Toutefois, ces aménagements peuvent reporter le risque vers l'aval et nécessitent un entretien rigoureux ([Pilon & Kundzewicz, 2008, Journal of Flood Risk Management]).

- **Bassins de rétention et d'écrêtement des crues** :
  Ces ouvrages temporisent les crues en stockant provisoirement l'eau excédentaire. Ils sont particulièrement adaptés en milieu urbain ou périurbain, où les surfaces imperméabilisées favorisent le ruissellement rapide ([Ashley et al., 2007, Urban Water Journal]).

- **Aménagements urbains (réseaux d'assainissement pluvial, stations de pompage)** :
  En milieu urbain, les réseaux pluviaux dimensionnés correctement, associés à des stations de pompage, permettent d'évacuer rapidement les eaux en cas de fortes pluies. Leur efficacité dépend d'un entretien constant et de la prise en compte des épisodes extrêmes liés au changement climatique ([Butler & Davies, 2011, Urban Drainage]).

I.7.2 Les mesures non structurelles

Les mesures non structurelles complètent les aménagements techniques en agissant sur la planification, la prévention et la gestion des populations exposées. Elles visent à **réduire la vulnérabilité** plutôt que l'aléa lui-même.

- **Planification et réglementation** :
  Le zonage réglementaire (interdiction de construire dans les zones inondables, plans d'occupation des sols adaptés) constitue un outil central de réduction de l'exposition. La Directive Européenne 2007/60/CE sur la gestion des risques d'inondation recommande une stricte intégration du risque dans l'aménagement du territoire.

- **Systèmes d'alerte précoce et gestion de crise** :
  Les systèmes d'alerte basés sur la prévision hydrométéorologique permettent d'avertir les populations à temps et de réduire les pertes humaines. L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) insiste sur leur rôle essentiel dans la réduction de la vulnérabilité ([WMO, 2011, Manual on Flood Forecasting and Warning]).

- **Sensibilisation et éducation des populations** :
  L'information du public, la formation des riverains et des écoles contribuent à développer une culture du risque. Comme le rappelle **UNDRR (2015)**, la sensibilisation constitue l'un des piliers de la Stratégie de Sendai pour la réduction des risques de catastrophes.

- **Assurance et mécanismes financiers** :
  Les systèmes d'assurance contre les catastrophes naturelles permettent de compenser les pertes

économiques. Dans certains pays comme la France, le régime **CatNat** (Catastrophes naturelles) constitue un outil essentiel de solidarité nationale ([Lamond & Penning-Rowsell, 2014, Flood Hazards, Impacts and Responses]).

- **Solutions fondées sur la nature (NBS – Nature-Based Solutions)** :
  Le reboisement, la restauration des zones humides et la promotion de l'infiltration des eaux pluviales permettent de ralentir les écoulements et de stocker l'eau de manière naturelle. Ces solutions sont mises en avant par l'Union européenne comme alternatives durables aux ouvrages lourds ([European Commission, 2021, Nature-based solutions for flood risk management]).

I.8 La gestion intégrée du risque

La gestion intégrée du risque d'inondation repose sur une approche holistique qui combine les différentes mesures et acteurs. Elle est souvent structurée autour de **quatre piliers fondamentaux** :

- **Prévention** : limiter l'exposition par l'aménagement du territoire et la réglementation.
- **Protection** : réduire l'intensité des aléas par les ouvrages hydrauliques ou naturels.
- **Préparation** : mettre en place des systèmes d'alerte, de planification et de formation des acteurs.
- **Réaction** : organiser les secours et accompagner le relèvement post-catastrophe.

Selon **Plate (2002, Natural Hazards**), la réussite d'une gestion intégrée repose sur une approche participative, associant autorités, experts, société civile et populations locales. La gouvernance territoriale est donc un facteur clé de réussite, permettant une meilleure appropriation des mesures et une résilience accrue des communautés.

I.9 État de l'art : expériences et pratiques

I.9.1 Expériences en Algérie

➢ **Historique de quelques inondations marquantes**

- **Bab El Oued (Alger), 9–10 novembre 2001**
  Un épisode pluvieux intense sur le bassin de l'Oued Koriche (≈10 km²) a provoqué des crues éclair et des coulées de boue dévastatrices. Les analyses post-événement soulignent le rôle aggravant de l'urbanisation dense, de l'occupation des lits et des embâcles, au-delà du forçage météorologique. Le

bilan humain a dépassé plusieurs centaines de victimes selon les rapports internationaux et la presse de l'époque. ClimatoOpenEdition JournalsOCHAReliefWeb

- **Ghardaïa, 2–5 octobre 2008**
  Des pluies intenses sur le M'Zab ont généré des crues rapides touchant la vallée et plusieurs ksour. Les premières estimations faisaient état d'au moins 33 décès, puis des bilans consolidés ont relevé jusqu'à 89 victimes, des milliers de sinistrés et des dommages considérables aux habitations, voies et réseaux. (Les écarts de chiffres proviennent des mises à jour successives en phase de crise.) ReliefWebIFRC

- **Béjaïa et Nord algérien, automne 2019**
  Plusieurs épisodes orageux ont engendré des inondations urbaines et des crues éclair locales. Les services de la Protection civile ont rapporté des interventions à Béjaïa (axes routiers submergés, secours d'automobilistes) et, plus largement, des victimes et dégâts ponctuels dans le Nord en novembre 2019. El MoudjahidFloodList

Impacts typiques observés.

Les impacts récurrents incluent pertes humaines, destructions d'habitations (notamment en zones de talwegs urbanisés), endommagement d'infrastructures (voies, ponts, réseaux), interruptions de services, et perturbations économiques locales. Les retours d'expérience insistent sur l'occupation des zones inondables, l'insuffisance d'entretien des ouvrages de drainage et la gestion des déchets comme facteurs aggravants. OpenEdition Journals.

I.9.2 Dispositif institutionnel et stratégies nationales

- **Cadre légal : Loi n° 04-20 (25 décembre 2004)**
  Texte structurant pour la **prévention des risques majeurs** et la **gestion des catastrophes** dans une perspective de développement durable : plans généraux de prévention par type de risque (dont inondations), information du public, intégration dans l'aménagement, et articulation avec les plans ORSEC. Des mises à jour récentes du Journal officiel précisent les volets « prévention inondations » (classification des zones, carte nationale d'inondabilité, prescriptions d'urbanisme). Ministère de l'Intérieurjoradp.dzPreventionWeb

- **Plans ORSEC (Organisation des Secours)**
  Le dispositif prévoit des **plans ORSEC** emboîtés (national, inter-wilayas, wilaya, communal, sites sensibles) pour organiser et coordonner les moyens humains et matériels en cas de catastrophe ; les

modalités d'élaboration et d'exercice ont été actualisées (décret exécutif 19-FAOLEXjoradp.dzEl MoudjahidRadio AlgérieAPSanrh.dz+1repository.enp.edu.dz

I.9.3 Enseignements pour Tipasa

L'analyse des expériences méditerranéennes en matière de gestion des risques d'inondation offre des leçons précieuses pour le contexte de Tipasa. Ces enseignements permettent d'identifier à la fois les points forts à reproduire et les limites à éviter, tout en tenant compte des spécificités locales.

Points forts :

- La mise en place de **systèmes d'alerte précoce** dans plusieurs pays méditerranéens (Espagne, Italie, France) a permis de réduire considérablement les pertes humaines en anticipant les épisodes pluvieux extrêmes. Ces dispositifs, souvent basés sur des réseaux de télédétection et de modélisation hydrométéorologique, pourraient être adaptés aux réalités de Tipasa.

- L'importance donnée à la **planification urbaine et au zonage** des zones inondables constitue également une mesure clé. Dans certaines régions, les constructions en zones à risque sont strictement encadrées, ce qui limite l'exposition des populations aux aléas.

- Les **solutions fondées sur la nature**, comme la restauration de zones humides ou le reboisement des bassins versants, se sont révélées efficaces pour ralentir le ruissellement et réduire les crues rapides.

Limites observées :

- Malgré les progrès, plusieurs pays méditerranéens peinent à assurer une coordination institutionnelle efficace entre acteurs locaux, régionaux et nationaux. Cette difficulté peut également concerner l'Algérie, où la multiplicité des intervenants (ANRH, Protection civile, collectivités locales) entraîne parfois un chevauchement des responsabilités.

- Le financement durable des projets de protection reste une contrainte majeure. Les infrastructures lourdes comme les digues ou les bassins de rétention nécessitent des investissements considérables, difficilement soutenables pour des budgets publics limités.

- La sensibilisation des populations demeure inégale : dans certains cas, l'existence de plans de prévention n'a pas empêché des comportements à risque lors des crues.

➢ **Adaptation au contexte de Tipasa :**

Compte tenu de la **croissance urbaine rapide** et de l'**urbanisation anarchique** qui caractérisent plusieurs zones de la wilaya, il apparaît essentiel d'intégrer la gestion du risque d'inondation dans les plans d'aménagement du territoire. Les expériences méditerranéennes montrent l'importance d'un **cadre réglementaire clair** interdisant les constructions dans les zones inondables, tout en proposant des mécanismes de compensation pour les populations concernées.

De plus, la **situation climatique semi-aride** de Tipasa, combinée à des précipitations parfois intenses et concentrées dans le temps, impose le recours à des solutions mixtes : d'une part des infrastructures de rétention et de drainage adaptées, d'autre part des approches basées sur la **renaturation des cours d'eau** et l'amélioration de l'infiltration des eaux pluviales.

Enfin, l'une des leçons les plus pertinentes concerne la nécessité de renforcer la **gouvernance participative**. L'implication des habitants, des associations locales et des collectivités territoriales dans la prévention et la gestion de crise permettrait d'améliorer la résilience du territoire face aux inondations, en cohérence avec les recommandations de la Stratégie internationale de prévention des catastrophes (UNDRR, 2019).

I.10 Conséquences des inondations :

- Les inondations peuvent provoquer des impacts graves et durables sur la société et l'environnement :

- **Impacts humains :** Elles entraînent des pertes de vies, des blessures, des déplacements forcés et des conséquences psychologiques importantes, telles que le stress post-traumatique.

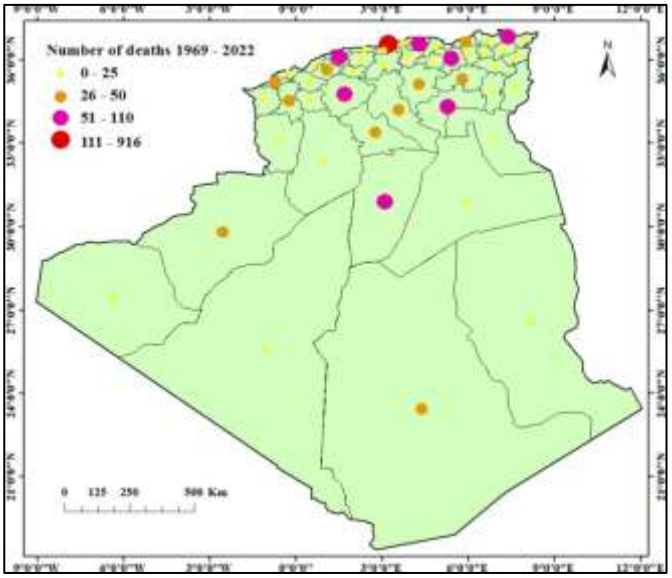


Figure I-9 Nombre total de décès pour la période 1969-2022

- **Impacts matériels :** Les habitations, infrastructures (routes, ponts, réseaux électriques), cultures et biens personnels peuvent subir des dommages considérables, entraînant des coûts économiques élevés.

- **Impacts environnementaux :** Les crues peuvent causer l'érosion des sols, la destruction d'habitats naturels et la pollution des cours d'eau par des déchets, hydrocarbures ou eaux usées.

- **Impacts économiques :** Les activités agricoles, commerciales et de transport peuvent être interrompues, affectant la production et générant des dépenses importantes pour la reconstruction et l'indemnisation.

- **Impacts sanitaires :** La stagnation de l'eau favorise la propagation de maladies hydriques (choléra, leptospirose, gastro-entérites) et crée un terrain propice au développement des moustiques vecteurs.

En résumé, les inondations constituent un risque multidimensionnel, dont l'intensité peut s'accroître avec le changement climatique et l'urbanisation croissante. Cela souligne la nécessité urgente de mettre en place des mesures de prévention et des stratégies d'adaptation adaptées.

Conclusion :

Les inondations, bien qu'étant des phénomènes naturels, sont souvent amplifiées par les activités humaines et représentent un enjeu majeur pour la gestion des risques hydrologiques. Les catastrophes des dernières décennies soulignent la nécessité de mieux comprendre le comportement des cours d'eau et les dynamiques territoriales qui influencent leur fonctionnement.

Dans un contexte de changement climatique et de multiplication des événements extrêmes, il est indispensable de disposer d'outils fiables pour l'analyse et le diagnostic des risques. Une connaissance approfondie des mécanismes des crues, des types d'inondations et des facteurs de vulnérabilité constitue la base pour anticiper ces risques et concevoir des aménagements adaptés.

Ainsi, une gestion efficace des ressources en eau et de la sécurité des territoires repose sur une approche intégrée, combinant **connaissance scientifique, prévention et planification rigoureuse**, afin de limiter les impacts des inondations sur les populations et l'environnement.

Chapitre II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Introduction

Avant d'entreprendre toute étude ou projet d'aménagement, il est essentiel de bien comprendre la zone concernée. Une analyse préalable du territoire permet d'identifier l'ensemble des caractéristiques naturelles, physiques et humaines susceptibles d'influencer la conception et la réussite du projet. Cela comprend notamment la situation géographique, la configuration géologique, ainsi que les conditions climatiques locales. Ces éléments jouent un rôle déterminant dans le comportement hydrologique du site, en particulier lorsqu'il s'agit de projets liés à la gestion des eaux et à la prévention des inondations. Ainsi, ce chapitre vise à présenter en détail la zone d'étude afin de poser les bases techniques et contextuelles nécessaires à l'élaboration d'un aménagement adapté et durable.

II.1 Caractéristiques physiques et naturelles

II.1.1 Situation géographique

L'oued Terbout se situe dans la wilaya de Tipaza, à l'ouest d'Alger. Il traverse la ville de Tipaza en passant par sa partie ouest, à proximité immédiate d'axes routiers importants comme la rocade de Tipaza et la Route Nationale n°11 (RN11). Son lit prend naissance à une altitude d'environ 200 mètres et descend progressivement jusqu'à son point de rejet, l'oued Nador.

Cet oued draine les eaux de deux affluents principaux et joue un rôle clé dans l'évacuation des eaux de pluie dans cette zone urbanisée. Une partie de son lit, notamment en aval vers la route de Chenoua, est aménagée sous forme de canal à ciel ouvert de section rectangulaire (1600 mm × 3500 mm), ce qui permet de mieux gérer les écoulements.

Il est important de souligner qu'à l'origine, l'oued Terbout ne représentait pas une menace en termes d'inondations. Toutefois, au fil du temps, des constructions non réglementées ont été érigées sur la rive droite de l'oued, sans tenir compte des risques liés aux crues. Ce phénomène d'urbanisation anarchique, combiné à l'augmentation des épisodes pluvieux intenses, a contribué à accroître la vulnérabilité de cette zone face aux débordements.

L'étude de la situation géographique de l'oued Terbout permet ainsi de mieux comprendre les enjeux liés à son aménagement et à la protection de la ville de Tipaza contre les inondations.

Cherchell	Mer Méditerranée	Mer Méditerranée
Nador		Aïn Tagourait
Nador	Hadjout	Sidi Rached

Figure II-1 Communes limitrophes de la commune de de Tipaza

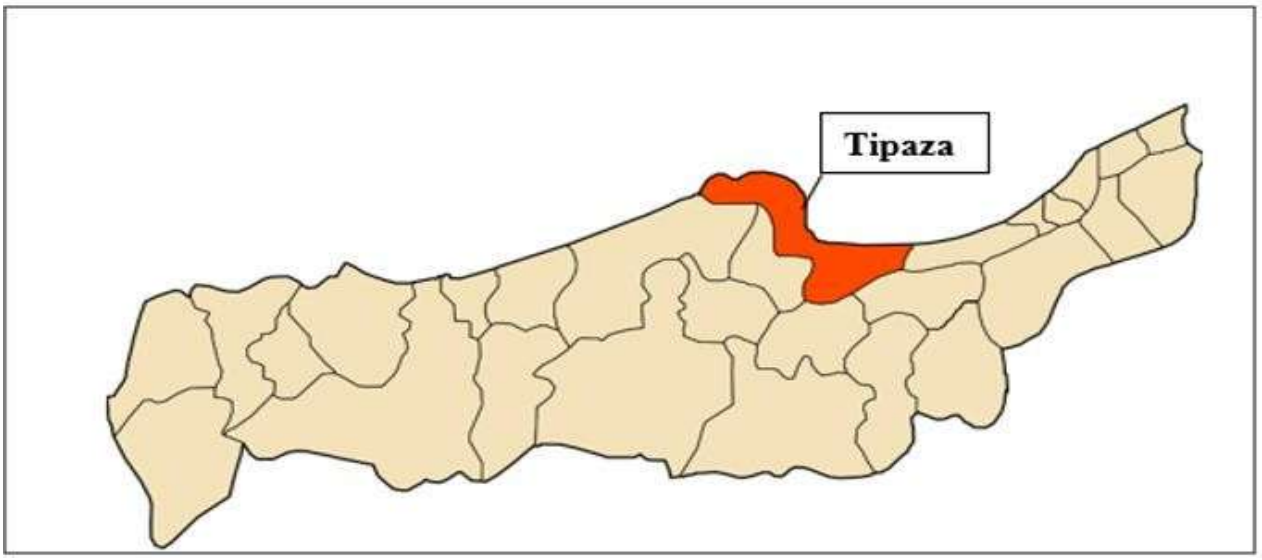


Figure II-2Situation de la commune de Tipaza dans la Wilaya

II.1.2 Situation topographique

La topographie de la commune de Tipaza présente une configuration contrastée, marquée par une alternance entre zones littorales, reliefs collinaires et dépressions. L'oued Terbout prend naissance dans une zone légèrement vallonnée située à environ 200 mètres d'altitude, au sud-ouest de la ville, avant de s'écouler vers le nord en direction de la mer Méditerranée. Son parcours traverse des terrains en pente douce, ce qui favorise l'accumulation rapide des eaux pluviales, notamment en cas de précipitations intenses.

La zone traversée par l'oued se caractérise par une pente générale descendante, ce qui accentue la vitesse d'écoulement en période de crue. Toutefois, en approchant du centre urbain et des infrastructures routières majeures comme la RN11 et la rocade de Tipaza, le relief devient plus plat, ralentissant le débit et augmentant les risques de débordement lorsque la capacité hydraulique du lit de l'oued est dépassée.

Par ailleurs, certaines zones construites se trouvent dans des dépressions naturelles ou sur des berges peu élevées, rendant ces secteurs particulièrement vulnérables aux inondations. Le manque d'infrastructures de drainage suffisantes ou leur sous-dimensionnement dans ces zones accentue encore le risque.

La lecture de la topographie locale est donc un facteur essentiel pour comprendre la dynamique des écoulements de surface, identifier les points sensibles, et orienter les choix d'aménagement visant à prévenir les crues et protéger la population.

II.1.3 Situation géologique

La région de Tipaza présente un contexte géologique typique des zones côtières méditerranéennes, marqué par une dominance de formations sédimentaires. On y retrouve principalement des roches telles que le calcaire et le grès, issues de l'accumulation et de la compaction progressive de sédiments marins au fil des millénaires.

L'importance du calcaire dans cette région a favorisé le développement de phénomènes karstiques. En effet, l'action de l'eau souterraine sur cette roche carbonatée a engendré la formation de grottes, de dolines et de nombreuses dépressions caractéristiques du relief local.

D'un point de vue historique, cette richesse géologique a influencé le patrimoine architectural de Tipaza. Le calcaire local a notamment servi à la construction de nombreux édifices romains encore visibles aujourd'hui, tels que des temples, des théâtres et autres vestiges archéologiques.

Sur le plan des risques, la zone côtière de Tipaza n'est pas exempte de contraintes. L'érosion marine constitue une menace permanente pour les littoraux, tandis que certaines zones, en raison de leur nature géologique, peuvent être exposées à des glissements de terrain, en particulier lors de fortes précipitations.

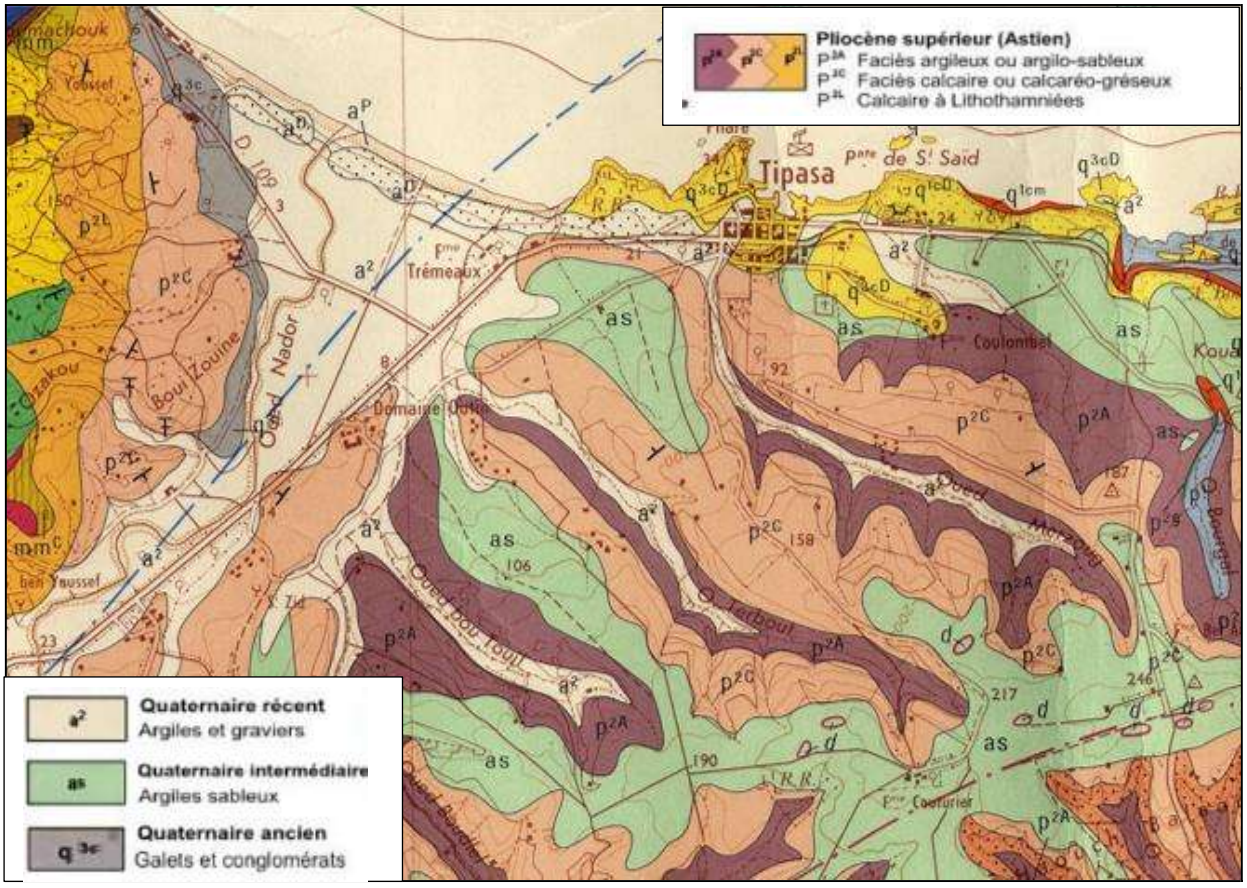


Figure II-3 carte géologique de Tipaza

II.2 Conditions climatiques

II.2.1 Pluviométrie

Les données recueillies dans les stations de Hadjout et Aïn Tagourait mettent en évidence une répartition saisonnière marquée des précipitations. On distingue deux périodes bien définies au cours de l'année :

Une saison humide, s'étendant généralement d'octobre à mai, durant laquelle les précipitations sont plus abondantes.

Une saison sèche, de juin à septembre, caractérisée par de faibles apports pluviométriques, voire une absence totale de pluie.

Cette variabilité saisonnière joue un rôle important dans le régime hydrologique des oueds de la région, notamment l'oued Terbout, influençant fortement le risque de crues et d'inondations lors des épisodes de fortes pluies.

Tableau II-1Répartition mensuelle des précipitations, station de Hadjout

Mois	sept	oct	nov	déc	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août
P en mm	21,7	48,9	77,7	72,8	65,9	64,0	61,2	54,3	30,7	6,9	0,7	3,3
P en %	**4,3**	9,6	15,3	14,3	13,0	12,6	12,0	10,7	6,0	**1,4**	**0,1**	**0,6**

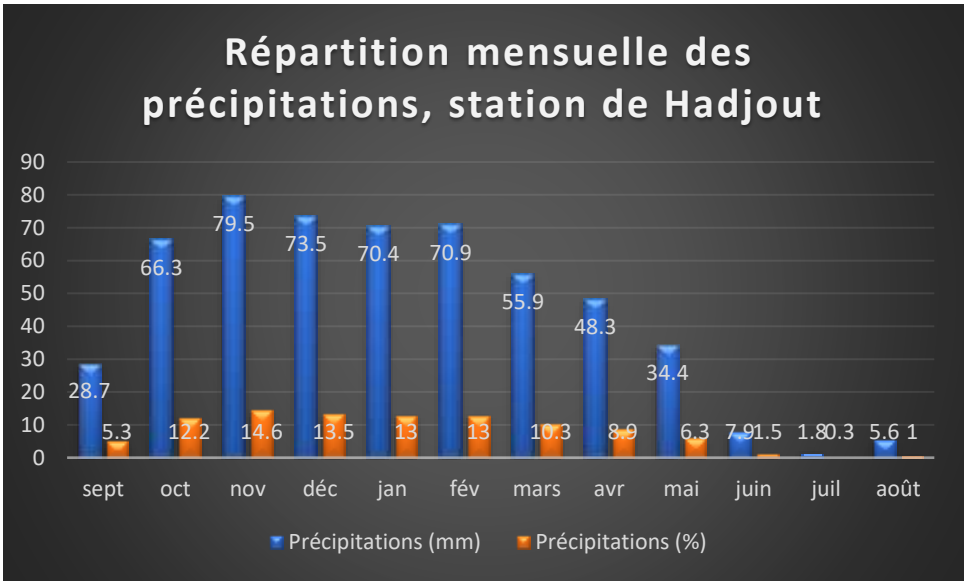


Figure II-4Répartition mensuelle des précipitations, station de Hadjout

Tableau II-2 ;Répartition mensuelle des précipitations, station de Ain Tagourait

Mois	sept	oct	nov	déc	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août
P en mm	28,7	66,3	79,5	73,5	70,4	70,9	55,9	48,3	34,4	7,9	1,8	5,6
P en %	**5,3**	12,2	14,6	13,5	13,0	13,0	10,3	8,9	6,3	**1,5**	**0,3**	**1,0**

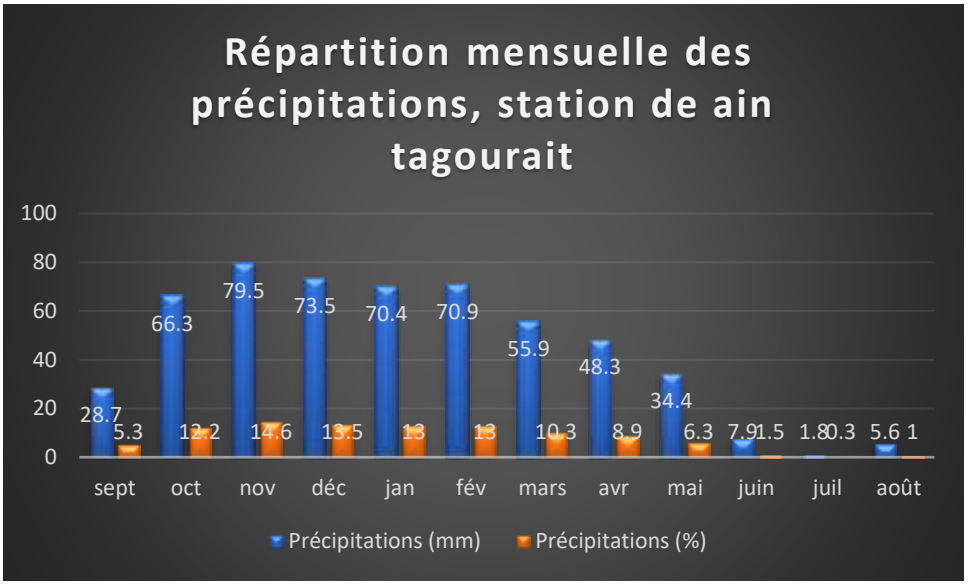


Figure II-5: Répartition mensuelle des précipitations, station de Ain Tagourait

La figure suivante présente une carte illustrant la répartition pluviométrique dans le nord de l'Algérie :

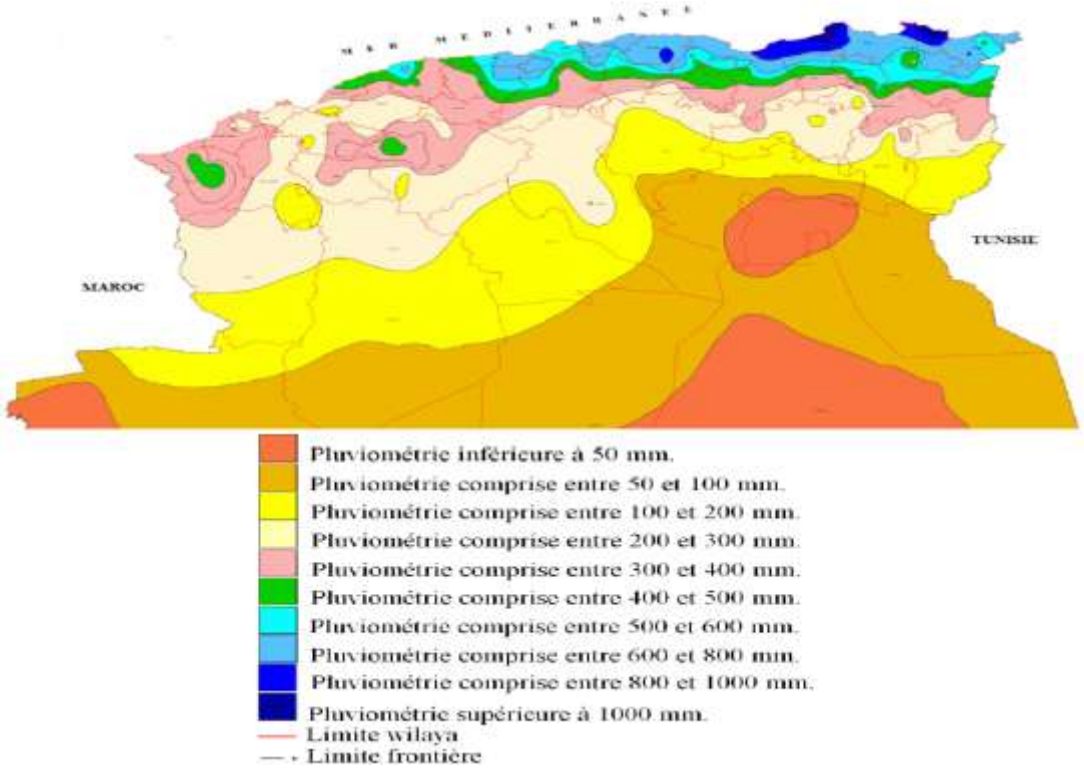


Figure II-6: carte pluviométrique pour le nord de l'Algérie

II.2.2 Température

Le climat de la ville de Tipaza se caractérise par des étés très chauds, secs et généralement dégagés, tandis que les hivers sont relativement longs, frais, venteux et partiellement nuageux.

Sur l'ensemble de l'année, les températures varient en moyenne entre 7 °C et 32 °C, avec des extrêmes rarement inférieurs à 3 °C ou supérieurs à 36 °C.

La période estivale, notamment juillet et août, est la plus chaude avec des températures pouvant atteindre 33 °C, alors que les mois d'hiver (de décembre à février) enregistrent les valeurs les plus basses, avoisinant 5 °C.

II.2.3 Vent

Le climat de Tipaza est influencé par des régimes de vents qui varient selon les saisons. En période hivernale, les vents dominants soufflent principalement du Nord-Ouest. Provenant de la mer Méditerranée, ils contribuent à adoucir les températures durant cette saison.

En été, ce sont les vents d'Est et du Nord qui prédominent. Leur effet est généralement rafraîchissant, ce qui atténue légèrement les fortes chaleurs estivales caractéristiques de la région.

Tableau II-3Vitesse du vent à la station de Attatba wilaya de Tipaza (période 1972 – 2008) (ONM-Dar El Beida)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout
Vitesse du vent (m/s)	1,9	1,9	2	1,8	1,7	1,6	1,6	1,5	1,6	1,7	1,9	1,7

II.3 Sismicité

La wilaya de Tipaza est située dans une zone à risque sismique non négligeable. Initialement classée en zone sismique 2, elle a été reclassée en zone 3 après le violent séisme survenu dans la région de Boumerdès en mai 2003. Cette reclassification s'appuie sur des analyses approfondies réalisées par les institutions géophysiques nationales, tenant compte de l'activité tectonique de la région. Un événement sismique marquant a eu lieu le 29 octobre 1989 à 19h09 (TU), dont l'épicentre a été localisé sur le versant ouest du mont Chenoua (36°36,9' N – 2°19,57' E), selon les relevés du CRAAG (Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique). Ce séisme a provoqué des dommages considérables aux infrastructures, témoignant de la vulnérabilité du bâti face aux aléas telluriques. Ces éléments soulignent la nécessité d'intégrer des mesures préventives dans les plans d'urbanisme et de veiller à l'application rigoureuse des normes parasismiques dans tout projet de construction ou de réhabilitation dans la région.

Figure II-7: Zonage sismique de l'Algérie selon le RPA 2024



II.4 Évolution historique et développement urbain de la ville de Tipaza : entre patrimoine et enjeux d'aménagement

La ville de Tipaza, fondée à l'origine par les Phéniciens au cours du 5e ou 6e siècle avant J.-C., possède un riche patrimoine historique. Elle devint ensuite un important centre romain, comme en témoignent les vestiges archéologiques encore visibles aujourd'hui. Ce passé en fait non seulement un site culturel d'envergure, mais aussi un territoire façonné par l'histoire et les interactions entre l'homme et son environnement naturel.

Après l'indépendance en 1962, la ville s'est progressivement développée autour de deux noyaux principaux : le centre colonial historique et la cité Oued Merzoug. Ce développement s'est accéléré à partir de la création de la wilaya de Tipaza en 1984, avec la mise en place de plusieurs programmes de logements (de type HLM, barres, et cités administratives semi-préfabriquées) pour répondre aux besoins du nouveau chef-lieu.

Au fil du temps, cette expansion a donné naissance à deux pôles d'extension majeurs :

À l'Est, s'est développé un véritable pôle urbain structurant, marqué par la construction de nouvelles zones d'habitation et l'implantation d'une université, consolidant le rôle éducatif et institutionnel de la ville.

À l'Ouest, un autre pôle d'extension a vu le jour, renforçant la connexion entre Tipaza et les zones périphériques, et accueillant de nouveaux équipements.

Cependant, cette dynamique urbaine s'est parfois heurtée à des contraintes naturelles insuffisamment prises en compte, notamment la présence des oueds, dont l'oued Terbout, qui traverse la ville et se jette dans l'oued Nador. Alors que cet oued ne causait historiquement pas de dégâts, l'urbanisation désordonnée — notamment sur sa rive droite — a accru la vulnérabilité de certains secteurs en cas de fortes précipitations.

Ainsi, la croissance urbaine rapide de Tipaza, bien qu'indispensable au développement de la ville, appelle aujourd'hui à une réflexion approfondie sur les stratégies d'aménagement, en particulier pour prévenir les risques liés aux inondations.

Pression urbaine, occupation du sol et infrastructures face au risque d'inondation

La ville de Tipaza, classée comme zone urbaine selon l'étude d'actualisation du Plan National de l'Eau (PNEtE 2010–2030), compte entre 20 000 et 100 000 habitants. Cette dynamique démographique s'accompagne d'une forte pression foncière, notamment dans les secteurs Est et Ouest où s'opèrent les principales extensions urbaines. Le développement de zones bâties et imperméabilisées, souvent sans planification préalable, a profondément modifié les caractéristiques naturelles du sol, réduisant sa capacité d'infiltration et accentuant les risques de ruissellement en période de fortes précipitations.

L'occupation du sol reflète une diversité d'usages : zones agricoles, espaces naturels, sites industriels, et quartiers résidentiels se côtoient, souvent à proximité de l'oued Terbout. Ce dernier traverse une ville où l'urbanisation anarchique a parfois empiété sur son lit majeur. En parallèle, la ville dispose d'un réseau de voiries, de ponts et de réseaux techniques qui, bien que développés, ne sont pas toujours adaptés à la gestion efficace des eaux pluviales. Les ouvrages hydrauliques existants, tels que les canaux ouverts, les buses ou les bassins de rétention, montrent des signes d'insuffisance ou de dégradation, ce qui limite leur capacité à maîtriser les débordements de l'oued. Les réseaux de drainage sont souvent sous-dimensionnés ou obstrués, aggravant les problèmes d'écoulement lors des épisodes pluvieux intenses.

Ainsi, l'ensemble de ces facteurs – densification urbaine, artificialisation des sols, insuffisance des infrastructures – accentue la vulnérabilité de Tipaza face au risque d'inondation, rendant nécessaire une réflexion approfondie sur l'aménagement urbain et la gestion durable des eaux.



Figure II-8: Situation urbanistique actuelle de la ville de Tipaza

II.5 Enjeux humains, économiques et sociaux

Les inondations récurrentes que connaît la ville de Tipaza, notamment dans certaines zones sensibles comme la rue Mouhamed Ayouna, engendrent des conséquences considérables sur plusieurs plans. D'un point de vue humain, ces événements représentent une menace directe pour la sécurité des habitants. Ils perturbent fortement la vie quotidienne, provoquant des évacuations, des pertes matérielles, voire parfois des accidents corporels. L'urbanisation rapide et parfois anarchique, en particulier sur les berges de l'oued Terbout, accentue la vulnérabilité de la population locale face à ces aléas hydrologiques.

Sur le plan économique, les inondations entraînent des dommages aux infrastructures publiques et privées, tels que les routes, les commerces ou les habitations. La proximité de zones commerciales comme celle du centre El Manar augmente les risques de perturbation des activités économiques, affectant à la fois les commerçants et les consommateurs. De plus, les coûts liés aux réparations, à la remise en état et aux dispositifs d'intervention d'urgence pèsent lourdement sur les budgets communaux.

Enfin, les enjeux sociaux sont également importants. Les inondations aggravent les inégalités en affectant plus durement les populations résidant dans les quartiers mal équipés en infrastructures de drainage. Cela engendre un sentiment d'abandon, nuit à la cohésion sociale et accentue les tensions locales, surtout en période de crise. La gestion efficace de ce risque devient donc un impératif non seulement environnemental, mais aussi socio-économique pour assurer un développement urbain durable à Tipaza.

II.6 Vulnérabilité territoriale face au risque d'inondation

La vulnérabilité de la commune de Tipaza face au risque d'inondation est accentuée par la forte densité de sa population, notamment concentrée autour des principaux axes routiers et à proximité de l'oued Terbout. Cette répartition spatiale des habitants expose un nombre significatif de résidents aux effets directs des crues, particulièrement dans les quartiers urbanisés sans planification adéquate. En parallèle, plusieurs activités économiques, notamment des commerces, marchés de proximité et services, sont localisés dans des zones potentiellement inondables, comme l'axe commercial autour de la rue Mouhamed Ayouna. Cela accentue les pertes économiques en cas d'événement pluvieux intense. De plus, la présence d'équipements sensibles tels que des établissements scolaires, des structures sanitaires (dispensaires, cliniques), ainsi que des routes stratégiques (comme la RN11), augmente considérablement les enjeux. L'inaccessibilité de ces infrastructures durant les épisodes d'inondation compromet à la fois la sécurité de la population et le bon fonctionnement des services essentiels.

Nous avons pu obtenir une vidéo documentant des épisodes d'inondation survenus au niveau de la rue Mouhamed Ayouna, à proximité du centre commercial El Manar.Les images suivantes sont des captures extraites de cette séquence vidéo, illustrant l'ampleur du phénomène observé.



Figure II-9 inondation a Ayouna (captures extraites d'une séquence vidéo)

II.7 Risques et vulnérabilités liés aux inondations à Tipaza

La commune de Tipaza, en raison de sa topographie en pente et de sa proximité avec la mer Méditerranée, reste particulièrement vulnérable aux phénomènes d'inondation. L'historique local témoigne de plusieurs épisodes pluvieux marquants, ayant provoqué des débordements ponctuels de certains oueds, notamment dans les quartiers urbanisés en contrebas comme la rue Mohamed Ayouna, où une vidéo récemment récupérée montre clairement l'impact de l'eau sur la voirie et les habitations. Ces inondations, souvent liées à des pluies de forte intensité sur de courtes durées, entraînent des dégâts importants sur les infrastructures urbaines, les routes, les habitations et les équipements publics. Les zones les plus exposées sont généralement situées en aval des oueds, là où le relief favorise l'accumulation rapide des eaux de ruissellement, particulièrement dans les secteurs urbanisés sans dispositifs de drainage adéquats. Cette vulnérabilité est aggravée par la présence d'habitats précaires, d'équipements sensibles (écoles, hôpitaux, routes stratégiques), ainsi que par une croissance urbaine non maîtrisée, souvent en marge de la réglementation. L'identification et la cartographie des zones à risque s'imposent donc comme une étape clé pour orienter les futures politiques d'aménagement et renforcer la résilience du territoire face aux aléas hydrométéorologiques.

II.8 Cadre institutionnel, réglementaire et organisationnel de la gestion des inondations

La gestion des risques d'inondation dans la commune de Tipaza repose sur un cadre institutionnel et réglementaire structuré, mais parfois difficile à appliquer sur le terrain. Elle s'appuie principalement sur des documents d'urbanisme tels que le Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU) et le Plan d'Occupation des Sols (POS), qui visent à organiser l'espace urbain tout en prenant en compte les contraintes naturelles et hydrologiques. Toutefois, malgré les prescriptions réglementaires interdisant l'urbanisation en zones inondables, de nombreuses constructions ont vu le jour dans des secteurs à risque, souvent en raison de la pression foncière croissante et du manque de contrôle strict de l'occupation du sol. La responsabilité des collectivités locales, notamment de l'APC de Tipaza et des services techniques de la wilaya, est donc centrale dans la prévention et la gestion des inondations, notamment à travers le contrôle de l'urbanisation et la maintenance des réseaux d'assainissement. Dans ce cadre, un important travail de recueil de données a été mené par le bureau d'études auprès des différentes directions locales (DRE, SEAAL, Urbanisme, APC, SONALGAZ, Algérie Télécom…), à la suite des courriers envoyés par la Direction des Ressources en Eau (DRW) de Tipaza. La collecte s'est concentrée sur plusieurs thématiques essentielles : les études antérieures d'assainissement et de protection contre les inondations, les plans et schémas des réseaux existants (assainissement, AEP), les projets d'urbanisation en cours, les données démographiques, les consommations en eau potable, l'activité économique, ainsi que les réseaux techniques des différents concessionnaires. Ces informations constituent une base indispensable à toute planification rationnelle et à la mise en place de mesures efficaces de prévention contre les inondations dans la ville de Tipaza.

Chapitre III : ETUDE HYDROLOGIQUE

Chapitre III : Etude hydrologique

Introduction :

L'hydrologie est la science qui étudie la présence, la distribution et la dynamique de l'eau sur notre planète. Elle s'intéresse non seulement à l'eau de surface, comme les rivières, les lacs ou les zones humides, mais aussi à l'eau souterraine contenue dans les aquifères. L'objectif principal de cette discipline est de comprendre le cycle hydrologique dans son ensemble, en identifiant les processus d'évaporation, de précipitation, d'infiltration, de ruissellement et de stockage. Cette compréhension permet de mieux prévoir la disponibilité et le comportement de l'eau dans le temps et dans l'espace.

Historiquement, l'hydrologie est apparue comme une réponse aux besoins des sociétés humaines qui devaient maîtriser l'eau pour l'agriculture, l'approvisionnement en eau potable ou la protection contre les crues. Aujourd'hui, son rôle s'est considérablement élargi. Elle est devenue un outil incontournable pour la gestion intégrée des ressources en eau, surtout dans un contexte marqué par le changement climatique, la croissance démographique et l'urbanisation. Ces phénomènes exercent une pression croissante sur les ressources hydriques, accentuant les risques de pénurie ou d'inondations.

L'hydrologie se situe au carrefour de plusieurs disciplines : elle mobilise des notions de climatologie, de géologie, de pédologie, mais aussi de mathématiques et d'informatique pour la modélisation des phénomènes. Son intérêt est donc à la fois scientifique et pratique, car elle permet d'élaborer des stratégies de gestion durable de l'eau, d'aménagement des bassins versants et de prévention des catastrophes naturelles.

Ce chapitre est consacré à l'étude hydrologique du bassin versant, en commençant par la description de ses caractéristiques géographiques, morphologiques et géométriques. Il aborde ensuite l'analyse du relief, du réseau hydrographique et de ses principaux paramètres, tels que la hiérarchisation, le temps de concentration et la vitesse de ruissellement. Enfin, une attention particulière est accordée à l'étude des crues, à travers l'exploitation des données hydrométriques et l'application de méthodes de calcul fréquentiel.

Cette analyse permettra ainsi de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin versant et de disposer d'éléments fiables pour l'évaluation et la gestion des ressources en eau.

III.1 Bassin versant :

Un bassin versant est une unité hydrologique délimitée par des lignes de crête, appelées lignes de partage des eaux, qui séparent les écoulements vers différents exutoires. À l'intérieur de ce périmètre naturel, l'ensemble des précipitations et des écoulements de surface ou souterrains convergent vers un point de sortie unique, généralement un cours d'eau principal ou un plan d'eau. Le bassin versant constitue ainsi l'échelle de base pour l'analyse hydrologique, car il intègre les interactions entre le climat, le relief, la géologie, la couverture du sol et les activités humaines qui influencent le régime hydrique et la dynamique des écoulements.

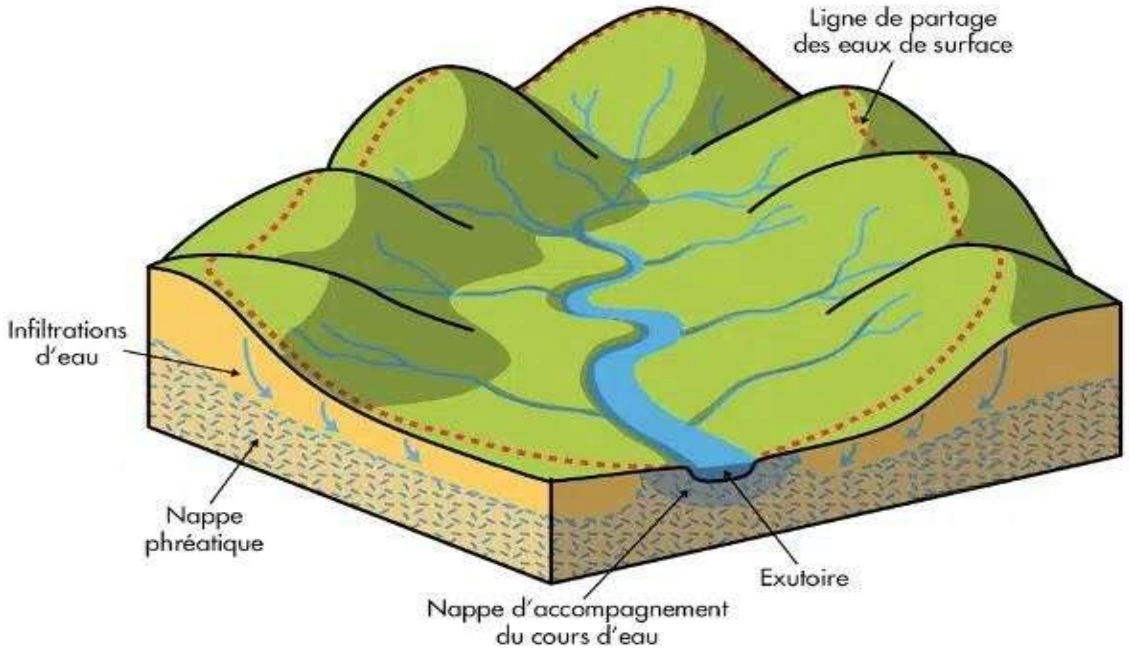


Figure III-1BASIN VERSANT

III.1.1 Rôle et importance du bassin versant

Le bassin versant joue un rôle fondamental dans la compréhension et la gestion des ressources en eau. En tant qu'unité spatiale naturelle, il constitue le cadre de référence pour l'étude du cycle hydrologique, car il regroupe tous les phénomènes liés aux précipitations, au ruissellement, à l'infiltration et à l'écoulement vers un exutoire commun. Son importance réside dans le fait qu'il permet d'analyser les interactions entre les caractéristiques physiques (relief, géologie, sols), les conditions climatiques et les activités humaines qui influencent directement le régime hydrique.

Sur le plan de l'aménagement, le bassin versant représente une base indispensable pour la planification des ouvrages hydrauliques, la protection contre les inondations, la gestion durable de l'eau pour

l'irrigation, l'alimentation en eau potable ou encore la préservation des écosystèmes aquatiques. Il offre également un cadre pertinent pour évaluer les impacts du changement climatique et de l'urbanisation sur la disponibilité et la qualité des ressources en eau.

Ainsi, l'étude du bassin versant est à la fois un outil scientifique d'analyse hydrologique et un instrument pratique de gestion intégrée, favorisant un équilibre entre exploitation des ressources et protection de l'environnement.

III.1.2 Le cycle hydrologique

Le cycle hydrologique représente l'ensemble des processus naturels par lesquels l'eau circule en permanence entre l'atmosphère, la surface terrestre et le sous-sol. Ce cycle est alimenté par l'énergie solaire qui provoque l'évaporation de l'eau des océans, des lacs et des sols, ainsi que la transpiration des végétaux, formant ainsi de la vapeur d'eau. Celle-ci se condense dans l'atmosphère pour donner naissance aux précipitations (pluie, neige, grêle) qui retombent sur la surface terrestre.

Une partie de ces précipitations alimente les écoulements de surface sous forme de ruissellement et rejoint les cours d'eau, les lacs et les océans. Une autre partie s'infiltre dans le sol et recharge les nappes souterraines, tandis qu'une fraction retourne rapidement dans l'atmosphère par évaporation et évapotranspiration. Ce mouvement continu permet de maintenir un équilibre dynamique entre les différents réservoirs d'eau : atmosphérique, de surface et souterrain.

Le cycle hydrologique est donc un processus fondamental pour la régulation du climat, la recharge des ressources en eau et le maintien des écosystèmes. Sa compréhension est essentielle dans le domaine de l'aménagement, car elle permet de mieux prévoir la disponibilité en eau, de gérer les risques liés aux crues et sécheresses, et d'élaborer des stratégies durables face aux impacts du changement climatique.

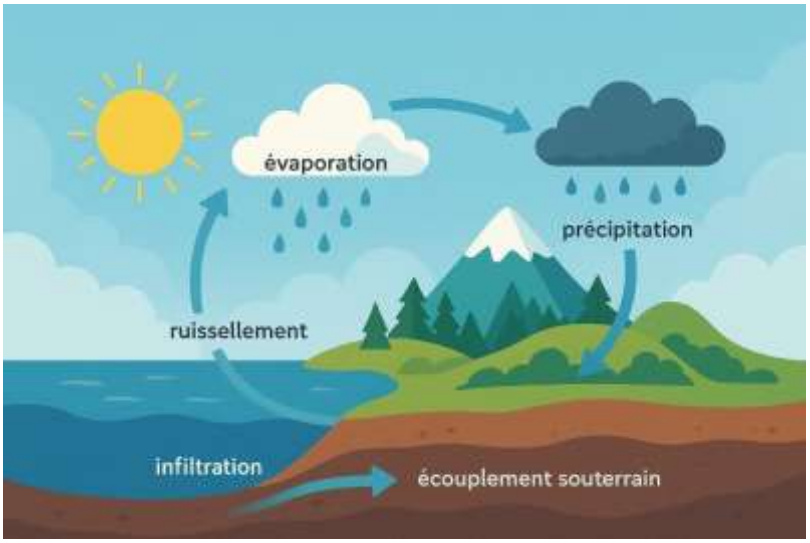


Figure III-2cycle hydrologique

III.1.3 Lien avec l'aménagement

Le bassin versant constitue une unité de base incontournable pour la planification et la mise en œuvre des projets d'aménagement. En effet, il permet de raisonner l'organisation de l'espace et la gestion des ressources en tenant compte des caractéristiques naturelles du milieu. L'analyse de ses composantes physiques et hydrologiques aide à dimensionner les ouvrages hydrauliques, à concevoir des réseaux de drainage, à prévenir les inondations et à optimiser l'utilisation des sols pour l'agriculture et l'urbanisation.

Par ailleurs, la gestion par bassin versant favorise une approche intégrée, où l'eau est considérée comme une ressource commune à partager entre différents usages : alimentation en eau potable, irrigation, industrie, énergie et préservation des écosystèmes. Cette approche permet de concilier développement socio-économique et protection de l'environnement, notamment face aux pressions croissantes liées au changement climatique et à l'expansion urbaine.

Ainsi, l'étude du bassin versant ne se limite pas à une analyse scientifique, mais s'inscrit dans une démarche d'aménagement durable, visant à assurer un équilibre entre exploitation des ressources et préservation des milieux naturels.

III.1.4 Critères de délimitation

La délimitation d'un bassin versant repose principalement sur l'identification des lignes de partage des eaux qui séparent les écoulements dirigés vers des exutoires différents. Elle s'effectue généralement à partir de cartes topographiques en reliant les points de crête et les sommets de relief, perpendiculairement aux courbes de niveau, jusqu'à revenir à l'exutoire. L'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) et des modèles numériques de terrain a considérablement amélioré la précision de cette opération.

Les critères les plus déterminants sont liés au relief (altitude, pentes, crêtes), à la réseau hydrographique (cours d'eau principal et affluents) et à la topographie locale, qui conditionnent les directions de l'écoulement. En outre, la géologie et la perméabilité des sols peuvent également influencer la délimitation, notamment dans le cas des bassins versants souterrains.

Ainsi, la délimitation constitue une étape essentielle pour toute étude hydrologique ou projet d'aménagement, car elle permet de définir avec exactitude l'espace drainé et de caractériser les processus hydrologiques qui s'y déroulent.

III.1.5 Outils de délimitation des bassins versants

La délimitation d'un bassin versant s'effectuait traditionnellement à partir des cartes topographiques papier, en traçant manuellement les lignes de partage des eaux en reliant les points de crête et les sommets de relief. Cette méthode, bien qu'efficace, reste limitée en précision et exige un travail fastidieux.

Avec l'évolution des technologies géospatiales, l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG), et en particulier du logiciel ArcGIS, a profondément amélioré cette opération. Grâce aux Modèles Numériques de Terrain (MNT) et aux outils d'analyse hydrologique intégrés, il est désormais possible de délimiter automatiquement et avec une grande précision les bassins versants. ArcGIS permet d'identifier l'exutoire, de calculer la direction et l'accumulation des flux, puis de générer les limites exactes du bassin.

Ces outils offrent plusieurs avantages : gain de temps, reproductibilité des résultats, possibilité de travailler à différentes échelles spatiales, et intégration avec d'autres données (climat, sols, occupation du sol) pour une analyse plus complète. Ils sont ainsi devenus indispensables dans les études

hydrologiques modernes et dans les projets d'aménagement, où la fiabilité de la délimitation conditionne la qualité des analyses et des décisions de gestion.

III.2 Caractéristiques principales du bassin versant :

III.2.1 Présentation du bassin versant de l'Oued Terbout

Le bassin versant de l'Oued Terbout constitue l'unité hydrologique de base considérée dans cette étude. Il est organisé autour de trois sous-bassins principaux : l'Oued Terbout 1, l'Oued Terbout 2 et l'Oued Terbout (tronçon principal). Chacun de ces sous-bassins se distingue par des caractéristiques morphométriques propres, telles que la superficie drainée, la longueur du cours d'eau principal, la pente moyenne ou encore le temps de concentration.

La subdivision du bassin en trois entités hydrologiques distinctes permet d'appréhender avec davantage de précision la répartition spatiale des écoulements. Chaque sous-bassin constitue une unité fonctionnelle qui capte et concentre les précipitations, générant ainsi des apports hydriques spécifiques. Ces contributions se combinent progressivement pour former l'écoulement total observé à l'exutoire du bassin.

Cette organisation hiérarchisée met en évidence l'importance des interactions entre les sous-bassins et souligne le rôle structurant du réseau hydrographique dans le fonctionnement global du bassin versant. L'étude détaillée de chacun des trois sous-bassins offre ainsi une meilleure compréhension des mécanismes de formation des crues et de la dynamique hydrologique de l'Oued Terbout.

III.2.2 Caractéristiques géographiques :

Le bassin versant de l'Oued Terbout présente une organisation spatiale structurée autour de trois sous-unités hydrologiques : l'Oued Terbout 1, l'Oued Terbout 2 et le tronçon principal de l'Oued Terbout. Chacune de ces entités est caractérisée par un exutoire géoréférencé dans le système de projection **UTM (Zone 31 N) WGS1984**, constituant un point de référence indispensable pour la délimitation et l'analyse hydrologique.

Les exutoires identifiés se présentent comme suit :

- **Exutoire du sous-bassin Oued Terbout 1** : (X = 36° 35′ 03.122″ N ; Y = 2° 25′ 40.817″ E)
- **Exutoire du sous-bassin Oued Terbout 2** : (X = 36° 34′ 59.78″ N ; Y = 2° 25′ 9.89″ E)

Toutefois, dans le cadre de la présente recherche, l'analyse s'est portée uniquement sur les sous-bassins **Oued Terbout 1** et **Oued Terbout 2**, jugés représentatifs des dynamiques locales et disposant de données plus exploitables pour la modélisation hydrologique. L'exutoire du bassin principal est mentionné à titre de repère géographique, sans faire l'objet d'une investigation approfondie.

III.2.3 Caractéristiques morphologiques :

Les caractéristiques morphologiques d'un bassin versant regroupent l'ensemble des paramètres liés à sa forme, à sa structure et à sa configuration spatiale. Elles permettent de décrire la manière dont le relief et la topographie influencent l'écoulement des eaux, le temps de concentration et la dynamique hydrologique. L'analyse de ces caractéristiques constitue une étape essentielle, car elles conditionnent non seulement la réponse du bassin aux précipitations, mais aussi les risques potentiels de crues et les possibilités d'aménagement Parmi les principaux paramètres morphologiques, on distingue :

- **Superficie du bassin versant :**

La superficie du bassin versant, notée **A**, correspond à l'aire totale drainée par le réseau hydrographique jusqu'à son exutoire. Elle constitue le paramètre fondamental dans toute étude hydrologique, car elle conditionne directement le volume d'eau susceptible d'être généré par les précipitations. En effet, plus la surface d'un bassin est grande, plus la quantité d'eau collectée est importante, ce qui influence les débits et la dynamique des crues.

Ce paramètre, généralement exprimé en **kilomètres carrés (km^2)**, est essentiel pour de nombreuses applications, notamment le calcul du débit spécifique, l'estimation des coefficients de ruissellement, ainsi que la modélisation hydrologique et hydraulique du bassin.

- **Périmètre :**

Le périmètre d'un bassin versant, noté **P**, correspond à la longueur totale de la limite extérieure du bassin, définie par la ligne de partage des eaux. Il s'agit donc de la frontière naturelle séparant les écoulements dirigés vers l'exutoire étudié de ceux alimentant les bassins voisins. Ce paramètre,

généralement exprimé en kilomètres (km), joue un rôle important dans le calcul d'indices morphométriques, tels que l'indice de compacité (Kc), utilisé pour comparer la forme du bassin à celle d'un cercle. Ainsi, le périmètre constitue un indicateur complémentaire à la superficie pour caractériser la forme et la structure du bassin versant, et il contribue à l'évaluation de sa réponse hydrologique face aux précipitations.

- **Longueur du cours d'eau principal :**

La longueur du cours d'eau principal, notée **Lcp**, correspond à la distance mesurée le long de l'axe du talweg reliant la source la plus éloignée du bassin à l'exutoire. Ce paramètre représente l'élément central du réseau hydrographique et constitue une référence fondamentale pour l'analyse morphométrique d'un bassin versant.

La valeur de Lcp, exprimée en kilomètres (km), est essentielle pour plusieurs applications : elle intervient notamment dans le calcul du temps de concentration (Tc), qui définit le délai nécessaire pour que l'eau de la zone la plus éloignée atteigne l'exutoire. Elle contribue également à la caractérisation de la forme du bassin et à l'évaluation de sa réactivité hydrologique face aux événements pluvieux.

Voici la figure qui illustre la cartographie du bassin Oued Terbout :

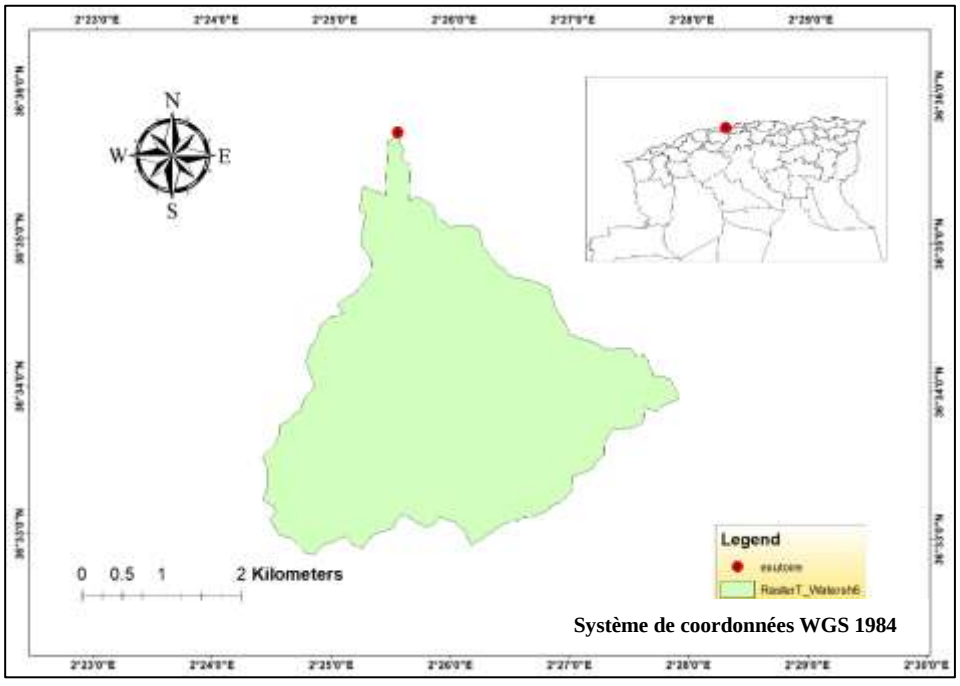


Figure III-3 Cartographie du bassin Oued Terbout

Voici la figure qui illustre la cartographie du bassin Oued Terbout 1 :

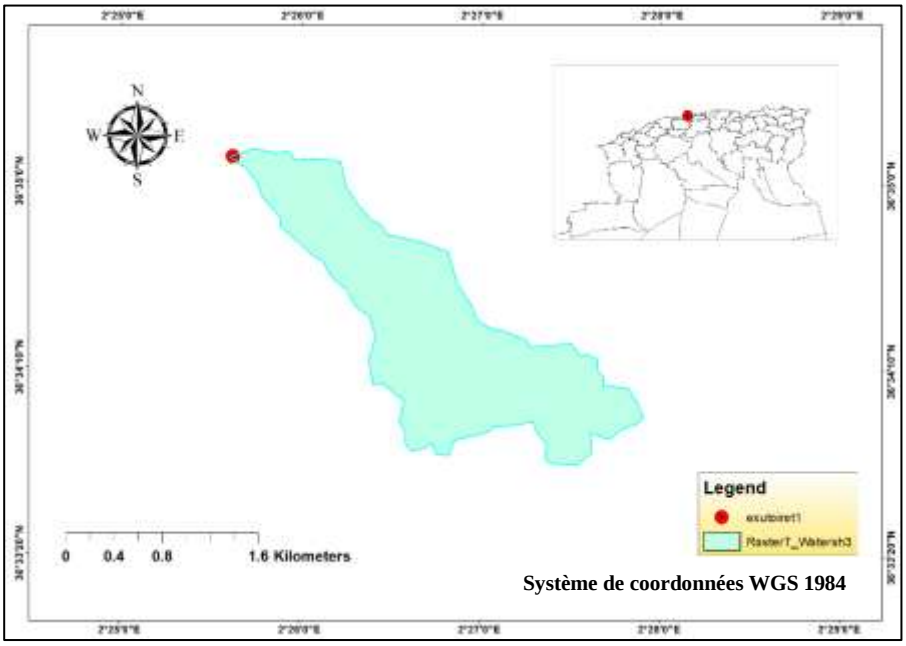


Figure III-4 Cartographie du bassin Oued Terbout1

Voici la figure qui illustre la cartographie du bassin Oued Terbout 2 :

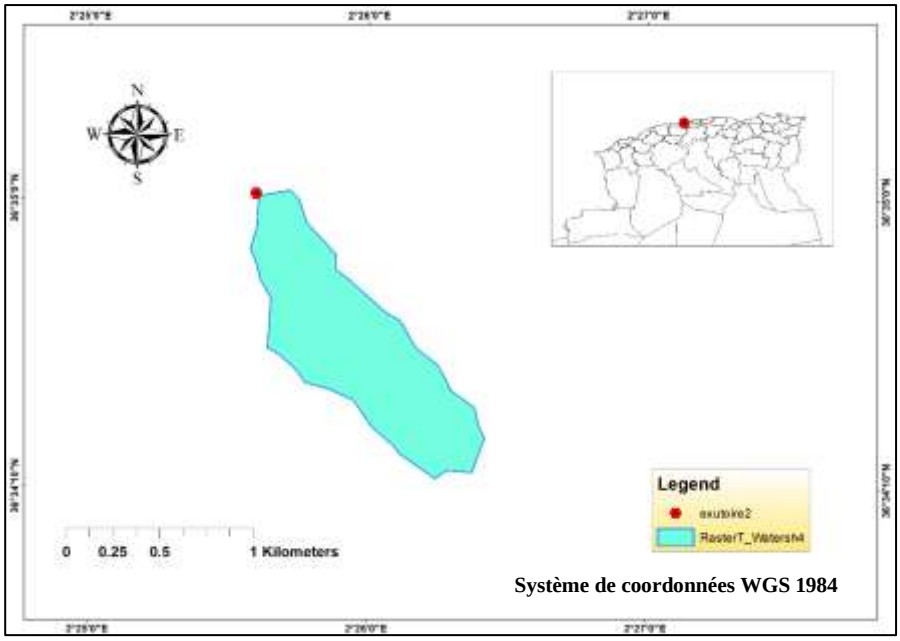


Figure III-5 Cartographie du bassin Oued Terbout2

Voici la figure qui illustre la cartographie du bassin Oued Terbout 1et2 :

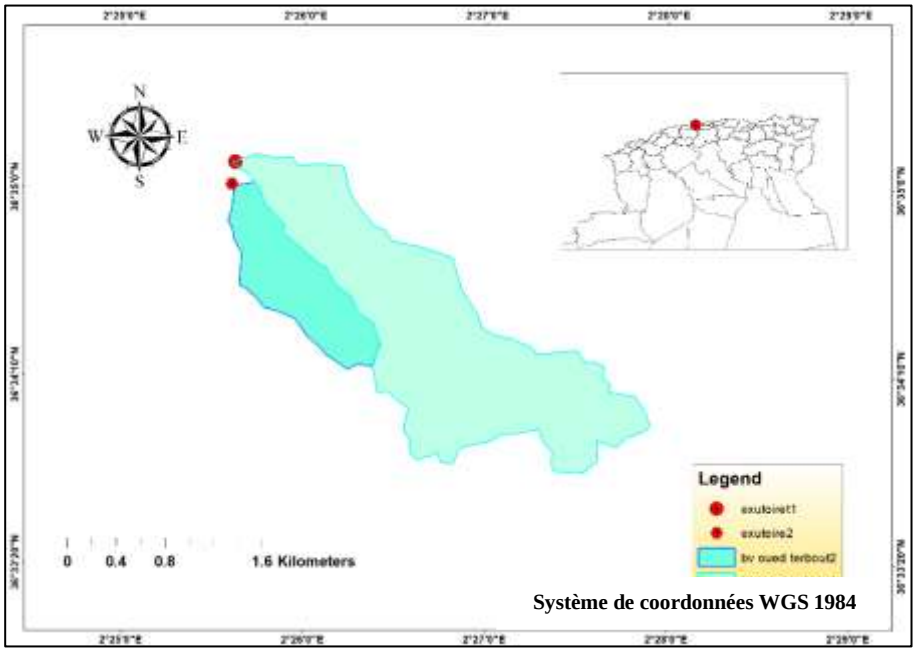


Figure III-6 : Cartographie du bassin Oued Terbout1et2

III.3 Caractéristiques morphologiques :

L'étude des caractéristiques morphologiques d'un bassin versant permet de compléter l'analyse morphométrique en mettant en évidence la forme, la compacité et l'élongation du bassin. Ces paramètres, calculés à partir de la superficie, du périmètre et de la longueur du cours d'eau principal, fournissent des informations essentielles sur la dynamique hydrologique et la réactivité du bassin face aux précipitations.

- **Indice de compacité de Horton (Kh) :**

L'indice de compacité, tel que défini par Horton, constitue un paramètre morphométrique permettant de caractériser la forme d'un bassin versant. Il correspond au rapport entre sa largeur moyenne et la longueur du cours d'eau principal, et il se calcule selon l'expression mathématique suivante :

$$Kh = \frac{S}{Lcp^2} \qquad \text{(III.1)}$$

Où :

- KH : Indice de compacité de Horton.

- S : Surface du bassin versant (km²).\

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

Interprétation :

- Si Kh > 1 : Le bassin est considéré comme ramassé.

- Si Kh < 1 : Le bassin est considéré comme allongé.

- **Indice de compacité de Gravélius (KG) :**

Selon Gravélius, cité par Loaborde (2000), la morphologie d'un bassin versant influence directement la dynamique des écoulements de surface. Afin de quantifier cet aspect, il est courant de recourir à l'indice de compacité (Kg), également appelé indice de forme. Ce paramètre exprime le rapport entre le périmètre réel du bassin (P, en kilomètres) et celui d'un cercle hypothétique ayant une superficie équivalente à celle du bassin (S, en kilomètres carrés). Le calcul de cet indice s'effectue à partir de la formule suivante :

$$KG = \frac{P}{2\sqrt{(\pi * S)}} \approx 0.282 * \frac{P}{\sqrt{S}} \quad \text{(III.2)}$$

Où :

- KG : Indice de compacité de Gravélius.

- P : Périmètre du bassin versant (km).

- S : Surface du bassin versant (km²).

- A : Superficie d'un cercle de même surface que le bassin.

Interprétation :

- Si KG = 1 : Indique un bassin compact.

- Si 1 < KG < 1.3 : Indique un bassin moins compact.

- Si KG > 1.3 : Indique un bassin allongé.

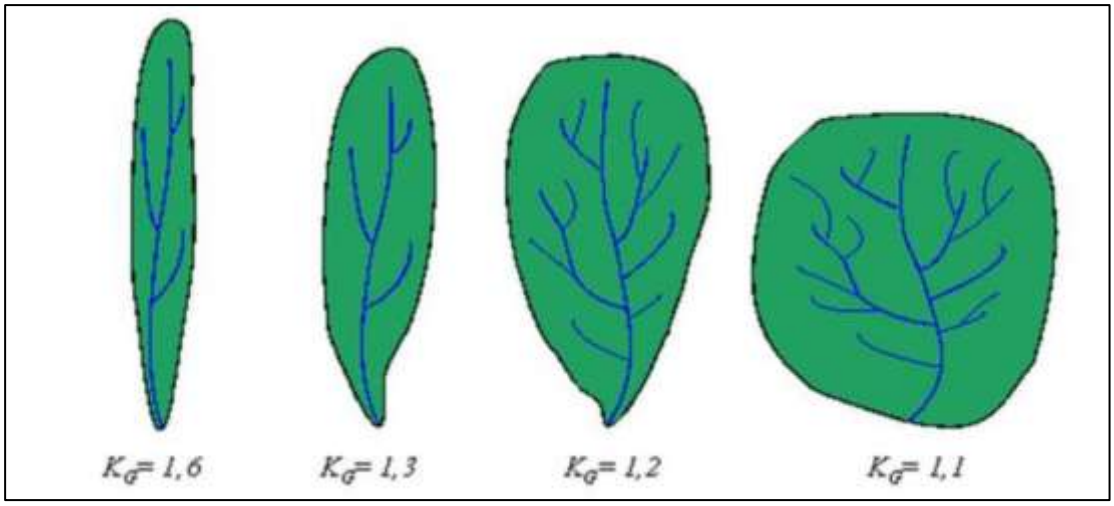


Figure III-7 : Exemples d'indices de compacité

- **Coefficient d'allongement (Ca) :**

Ce coefficient est calculé selon la relation suivante :

$$Ca = \frac{Lcp}{\sqrt{S}} \quad \text{(III.3)}$$

Où :

- Lcp : Longueur du thalweg principal (km).

- S : Surface du bassin versant (km²).

- **Rectangle équivalent :**

Le rectangle équivalent, souvent désigné sous le nom de rectangle de Gravélius, constitue une méthode géométrique permettant de représenter de manière simplifiée un bassin versant réel. L'idée est de remplacer la forme irrégulière et complexe du bassin par un rectangle dont la surface et le périmètre sont identiques à ceux du bassin étudié. Ce rectangle conserve ainsi les principaux

paramètres morphométriques, en particulier l'indice de compacité et les caractéristiques hypsométriques, garantissant une représentativité fidèle des propriétés hydrologiques du bassin.

L'intérêt de cette approche réside dans sa capacité à faciliter la comparaison entre plusieurs bassins versants, en ramenant leurs formes variées à une géométrie commune et facilement interprétable. Elle permet également d'étudier l'influence de la forme du bassin sur les processus hydrologiques tels que le ruissellement, la concentration des écoulements et la réponse hydrologique aux événements pluvieux.

Dans cette représentation, la longueur (L) et la largeur (l) du rectangle sont calculées de manière à respecter l'équivalence de surface (A) et de périmètre (P) avec le bassin réel. Cette simplification géométrique offre donc une base pratique pour l'analyse comparative, tout en restant suffisamment fidèle aux caractéristiques morphométriques du bassin.

Alors :

$$P = 2 * (L + l) \quad \text{Et} \quad S = L * l \quad \text{et} \quad KG = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{S}} \qquad \text{(III.4)}$$

En combinant ces trois relations, on obtient :

$$L = \frac{KG * \sqrt{S}}{1.12} * \left(1 + \sqrt{1 - \left\{\frac{1.12}{KG}\right\}^2}\right) \qquad \text{(III).5}$$

Où :

- L : Longueur du rectangle équivalent (km).

- l : Largeur du rectangle équivalent (km).

- S : Surface du bassin versant (km²).

- KG : Indice de compacité de Gravélius.

Les caractéristiques géomorphologiques propres au bassin versant de l'Oued Merzoug sont présentées dans le tableau ci-après.

Tableau III-1 : Caractéristiques géomorphologiques du Bassin Oued terbout 1et 2

Désignation	Symbole		Unités	Bassin versant	Valeur	Interprétation
Superficie	S		Km^2	Bv oued terbout1	2.95	Bassin de petite taille, réagit rapidement aux pluies.
				Bv oued terbout2	0.75	Très petit bassin, réactions encore plus rapides et sensibles aux averses locales.
Périmètre	P		Km	Bv oued terbout1	13.86	Contour assez irrégulier, forme peu compacte.
				Bv oued terbout2	5.88	Contour plus réduit mais également peu régulier.
Longueur du talweg principal	Lcp		Km	Bv oued terbout1	4.57	Talweg assez long, favorise une propagation progressive des écoulements.
				Bv oued terbout2	2.2	Talweg plus court, concentration des eaux plus rapide.
Indice de compacité de Gravélius	KG		/	Bv oued terbout1	2.26	Bassin allongé, pics de crue modérés.
				Bv oued terbout2	1.89	Forme moins allongée, crues plus rapides.
Indice de compacité de Horton	Kh		/	Bv oued terbout1	0.14	Confirme l'allongement marqué.
				Bv oued terbout2	0.15	Légèrement plus compact, réponse plus vive.
Coefficient d'allongement	Ca		/	Bv oued terbout1	7.06	Bassin fortement allongé, écoulements étalés dans le temps.
				Bv oued terbout2	6.39	Allongement marqué, mais plus faible que Terbout 1.
Rectangle équivalent	Longueur	Lr	Km	Bv oued terbout1	6.47	Bassin fortement allongé, écoulements étalés dans le temps.
				Bv oued terbout2	2.65	Allongement marqué, mais plus faible que Terbout 1.
	Largeur	lr	Km	Bv oued terbout1	0.46	Forme très étirée, faible largeur latérale.
				Bv oued terbout2	0.29	Bassin plus compact et moins étiré.

- **Interprétation morphométrique et implications hydrologiques du bassin versant**

L'analyse des indicateurs morphométriques et géométriques met en évidence que les bassins étudiés présentent une superficie réduite, une forme allongée et un indice de compacité relativement faible. Ces caractéristiques traduisent une réponse hydrologique généralement rapide aux précipitations, du fait de la petite taille qui favorise une concentration accélérée des écoulements. Cependant, l'allongement marqué limite la mise en phase des apports provenant des différentes zones, ce qui contribue à modérer l'intensité des crues par rapport à un bassin plus compact. Ainsi, les crues peuvent se former rapidement, mais leurs pics demeurent atténués par la géométrie même du bassin. Il reste toutefois essentiel de rappeler que d'autres paramètres – tels que la pente, l'occupation du sol ou encore la nature géologique – influencent fortement la dynamique hydrologique et doivent être considérés pour une interprétation plus complète et précise.

III.4 Caractéristiques hydrographiques :

III.4.1 Étude du relief :

Le relief joue un rôle central dans la dynamique hydrologique d'un bassin versant, car il conditionne directement la vitesse et l'intensité de la réponse hydrologique. En effet, des pentes fortes favorisent un écoulement rapide des eaux pluviales vers le réseau hydrographique, ce qui réduit le temps de concentration et entraîne une montée accélérée des débits. Dans ce contexte, les précipitations rejoignent plus vite les cours d'eau, accentuant ainsi le risque de crues soudaines et intenses.

III.4.2 La courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique constitue un indicateur graphique permettant de représenter la répartition des altitudes à l'intérieur d'un bassin. Elle met en relation la surface cumulée au-dessus d'une altitude donnée et cette altitude, le tout exprimé en pourcentage de la superficie totale. Cet outil permet d'appréhender la morphologie générale du bassin, d'identifier les zones de hautes, moyennes et basses altitudes, et d'en tirer des informations utiles sur les processus d'érosion, de ruissellement et d'écoulement.

Grâce aux Systèmes d'Information Géographique (SIG), et notamment à des logiciels comme ArcGIS, il est possible d'établir cette courbe avec précision. Cela permet de réaliser une analyse topographique détaillée, essentielle pour mieux comprendre le comportement hydrologique du bassin.

Voici la figure qui illustre la Carte hypsométrique du bassin versant d'oued Terbout 1 :



Figure III-8 Carte hypsométrique du bassin versant d'oued Terbout 1

Voici la figure qui illustre la Carte hypsométrique du bassin versant d'oued Terbout 2 :

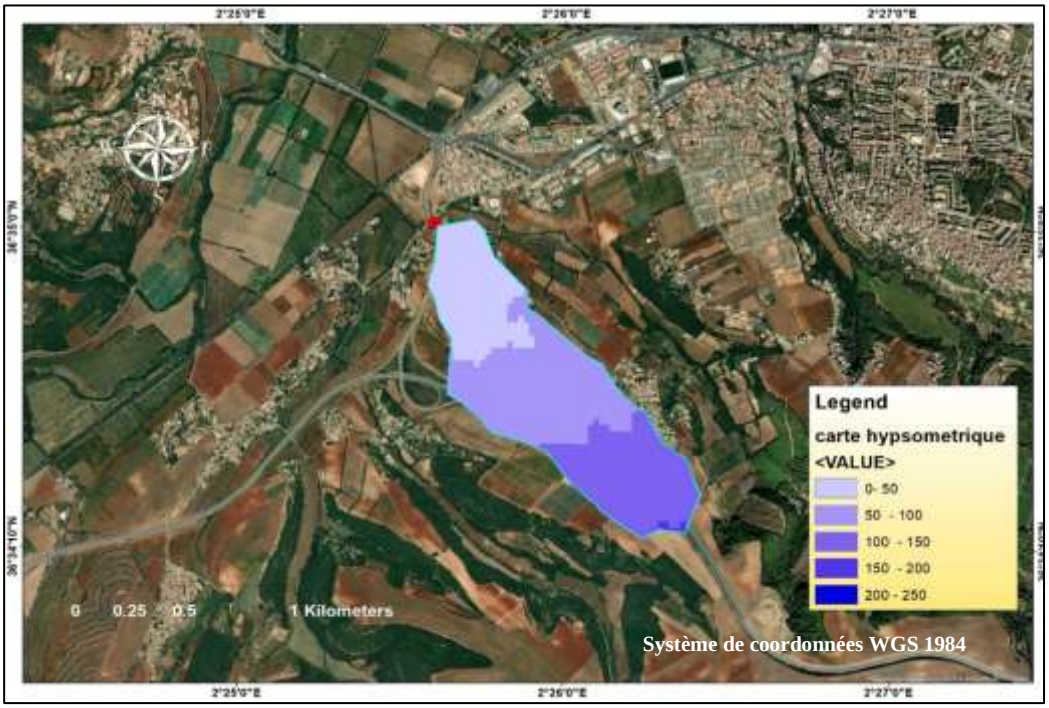


Figure III-9 Carte hypsométrique du bassin versant d'oued Terbout 2

La répartition des surfaces selon les altitudes, ainsi que leurs cumuls, a été obtenue à l'aide du logiciel ArcGIS.

III.4.3 Altitudes caractéristiques du bassin versant

Les caractéristiques altimétriques essentielles peuvent être résumées ainsi :

- Altitude **maximale et minimale (Hmax – Hmin)** :

Ces valeurs sont directement issues de l'analyse des cartes topographiques. L'altitude maximale correspond au point culminant du bassin, tandis que l'altitude minimale se situe généralement à l'exutoire. Elles sont particulièrement utiles pour établir des corrélations avec certains facteurs climatiques tels que la répartition des précipitations ou la variation des températures.

- Altitude **moyenne (Hmoy)** :

Cet indicateur, essentiel pour caractériser l'influence des conditions climatiques liées à la zonation altitudinale, se calcule à partir d'une pondération des altitudes moyennes (Hi) par les surfaces partielles correspondantes (Si), délimitées entre deux courbes de niveau. La formule de calcul comme suivant :

$$\boldsymbol{Hmoy} = \sum \frac{\boldsymbol{Si} * \boldsymbol{Hi}}{\boldsymbol{S}} \qquad \text{(III.6)}$$

Où :

- Si : Surface partielle entre deux courbes de niveau (km²).

- Hi : Différence d'altitude moyenne entre deux courbes de niveau successives (m).

- S : Superficie du bassin versant (km²).

- **Altitude H5% :**

Elle correspond au point bas de la courbe hypsométrique où la surface cumulée atteint 5 % de la superficie totale. Cet indicateur permet d'identifier les zones situées à proximité de l'exutoire, généralement les plus vulnérables aux phénomènes d'inondation. Il est essentiel pour comprendre la dynamique de concentration des eaux et l'exposition des plaines alluviales.

- **Altitude moyenne (Hmoy)**

Déterminée à partir de la pondération des surfaces partielles par leurs altitudes respectives, elle reflète le niveau altimétrique moyen du bassin. Cet indicateur joue un rôle majeur dans l'évaluation des influences climatiques (température, précipitations) et conditionne les processus hydrologiques tels que l'écoulement, l'infiltration et l'évapotranspiration.

- **Altitude médiane H50% :**

Cette valeur correspond à l'altitude à laquelle la moitié de la surface du bassin est située au-dessus et l'autre moitié en dessous. Elle constitue un indicateur robuste de la distribution altimétrique, utile pour comparer des bassins de morphologie différente. Elle renseigne aussi sur l'équilibre des pentes et la structure générale du relief.

- **Altitude H95% :**

Elle correspond au niveau où 95 % de la surface du bassin est déjà cumulée, soit proche des points culminants. Cet indicateur est particulièrement important pour caractériser les zones amont, sources principales des écoulements et lieux de forte énergie érosive. Sa valeur permet d'évaluer la capacité du bassin à générer rapidement des apports en eau lors d'événements pluvieux intenses

Tableau III-2 Paramètres hypsométriques des bassins versants

Bassins versants	H	Hi	S (m²)	Si (Km²)	Si(cumulé)	SI (%)	Si (%) Cumulé	Hmoy (m)
BV Terbout 01	0-50	25	251585	0,25	0,25	8,53	9	137.7
	50-100	75	592909	0,59	0,84	20,10	29	
	100-150	125	834055	0,83	1,68	28,27	57	
	150-200	175	612084	0,61	2,29	20,75	78	
	200-250	225	646267	0,65	2,94	21,91	100	
BV Terbout 02	0-50	25	105958	0,11	0,11	14,13	14	88.8
	50-100	75	326686	0,33	0,43	43,56	58	
	100-150	125	311588	0,31	0,74	41,55	99	
	150-200	175	6821	0,01	0,75	0,91	100	
	200-250	225	0	0,00	0,75	0	100	

L'analyse des paramètres hypsométriques met en évidence des différences notables entre les deux bassins :

- **Bassin d'Oued Terbout 1** :

La surface est répartie principalement entre les classes d'altitude 100–250 m, qui concentrent près de 70 % de la superficie totale. Cette distribution traduit un relief relativement élevé et étagé, avec une altitude moyenne de **137,7 m**. Le bassin présente donc une variabilité topographique marquée, ce qui peut influencer la dynamique des écoulements et allonger le temps de concentration.

- **Bassin d'Oued Terbout 2** :

La majorité de la surface se situe entre 50 et 150 m, représentant plus de 85 % du bassin. L'altitude moyenne y est nettement plus faible, de l'ordre de 88,8 m, traduisant un relief bas et peu contrasté. Cette configuration favorise une convergence rapide des apports vers l'exutoire et peut conduire à une réponse hydrologique plus vive lors des épisodes pluvieux.

En résumé, **Oued Terbout 1** se distingue par un relief plus élevé et diversifié, induisant des écoulements potentiellement plus étalés dans le temps, tandis qu'Oued Terbout **2** se caractérise par une topographie basse et concentrée, propice à des crues rapides.

Voici le graphe ci-dessus pour obtenir les altitudes :

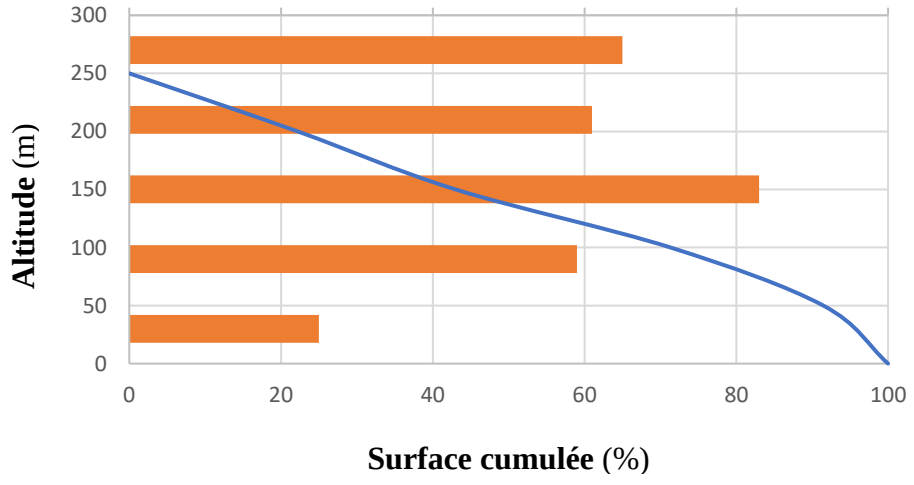


Figure III-10Courbe Hypsométrique du Bassin Versant d'Oued Terbout

Tableau III-3: Caractéristiques altimétriques du bassin versant d'Oued terbout

Altitudes (m)	**H min**	**H max**	**H** moy	**H** 5%	**H** 50%	**H** 95%
Bv terbout1	6	231	137.7	45	135	200
Bv terbout2	9	153	88.8	35	90	140

Interprétation :

Pour le BV Terbout 1, l'altitude moyenne est de 137,7 m, ce qui traduit une prédominance des terrains de moyenne altitude. L'altitude des 5 % les plus bas (45 m) correspond aux zones aval, proches de l'exutoire. L'altitude médiane (135 m) indique que la moitié de la surface du bassin se situe en dessous de ce niveau, ce qui confirme une répartition équilibrée entre parties basses et hautes. Enfin, l'altitude des 95 % les plus hauts (200 m) représente les zones sommitales, qui constituent les principales zones de collecte des écoulements.

Pour le BV Terbout 2, l'altitude moyenne (88,8 m) montre un relief globalement plus bas que celui du bassin précédent. L'altitude minimale à 5 % (35 m) localise les parties aval. L'altitude médiane (90 m) traduit une relative homogénéité des altitudes, la majorité du bassin se situant autour de ce niveau. Les zones hautes atteignent 140 m (H 95 %), ce qui montre que les terrains d'amont sont moins élevés et moins étendus que dans le BV Terbout 1.

III.5 Les indices de pente :

Les indices de pente sont des outils essentiels pour l'analyse et la gestion des territoires. Ils sont utilisés par divers professionnels, tels que les agronomes, urbanistes, forestiers ou responsables de la prévention des risques naturels. L'étude des variations de pente permet de mieux appréhender la morphologie d'un bassin versant, de comprendre la dynamique des écoulements et de prévoir les phénomènes liés à l'érosion ou aux inondations. La réalisation de cartes de pentes, à partir de données topographiques ou de modèles numériques de terrain, constitue une étape clé pour le calcul de ces indices, notamment dans les zones présentant un relief marqué.

Voici la figure qui illustre la Cartographie des pentes dans le bassin versant d'Oued Terbout1

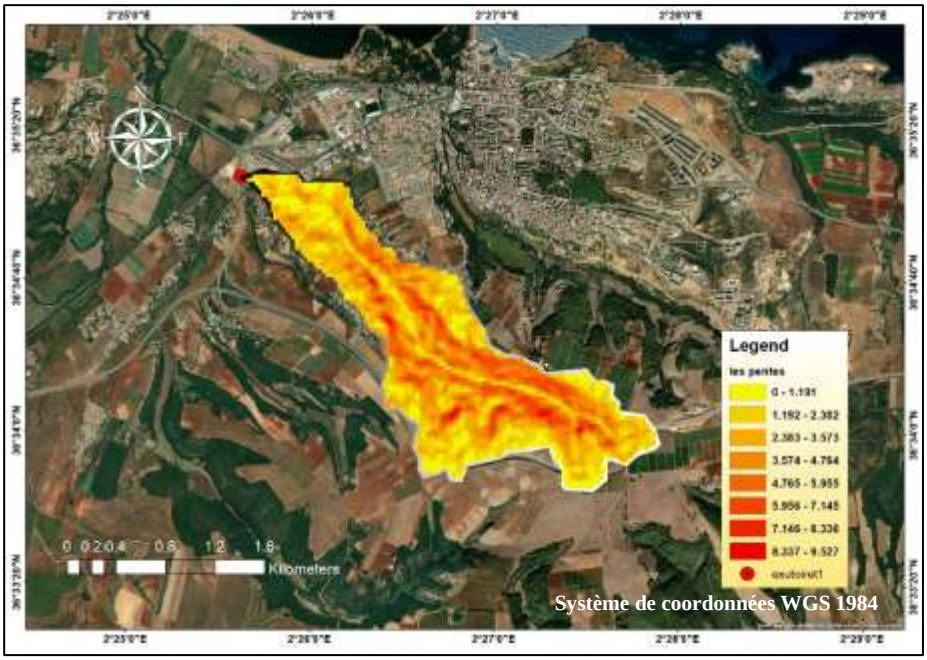


Figure III-11 Cartographie des pentes dans le bassin versant d'Oued Terbout 1

Voici la figure qui illustre la Cartographie des pentes dans le bassin versant d'Oued Terbout2

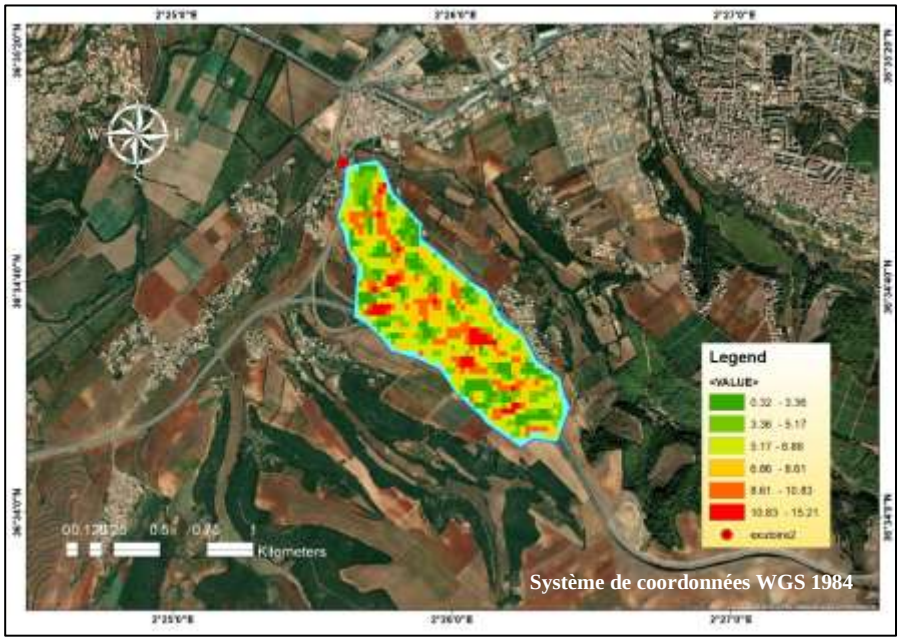


Figure III-12 Cartographie des pentes dans le bassin versant d'Oued terbout 2.

Les courbes de niveau : Les courbes de niveau sont des représentations cartographiques du relief qui relient, par des lignes continues appelées isohypses, tous les points ayant la même altitude. Elles permettent une visualisation claire des variations topographiques, mettant en avant les pentes, les vallées et les sommets. Cette méthode permet de décrire avec précision la morphologie d'un terrain et d'améliorer l'analyse géographique ou hydrologique d'une région.

Voici la figure qui illustre la Carte des courbes de niveau du bassin versant d'oued Terbout1

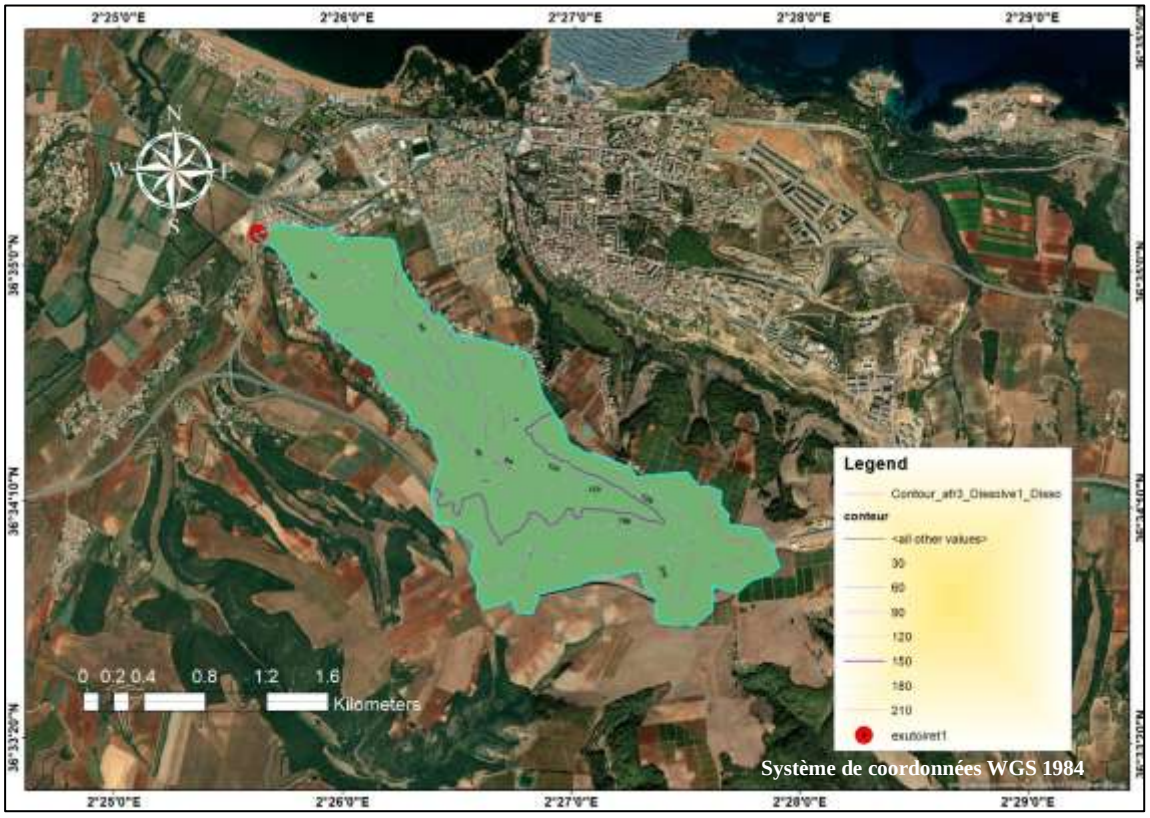


Figure III-13 Carte des courbes de niveau du bassin versant d'oued terbout1.

Voici la figure qui illustre la Carte des courbes de niveau du bassin versant d'oued Terbout2

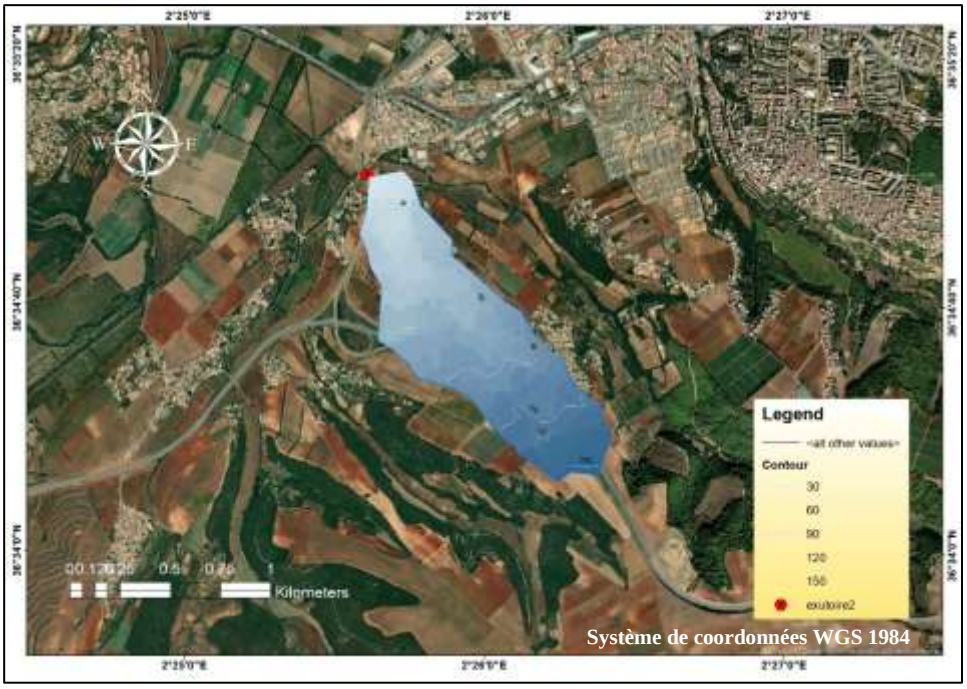


Figure III-14 : Carte des courbes de niveau du bassin versant d'oued terbout 2

Interprétation : La carte montre le relief du bassin versant de l'Oued Terbout1et 2 en utilisant des courbes de niveau distantes de 30 mètres.

- **Organisation du relief** :

- **En amont (sud et sud-est) :** les courbes de niveau sont rapprochées, indiquant des pentes fortes et un relief accidenté. Ces zones favorisent un ruissellement rapide, contribuant à l'augmentation du débit de crue.

- **En partie centrale :** les courbes sont plus espacées, montrant un **relief modéré**. Cette zone joue un rôle de transition, ralentissant légèrement l'écoulement.

- **En aval (nord-ouest, près de l'exutoire) :** le terrain devient plus plat avec de larges espaces entre les courbes, ce qui correspond à une **plaine alluviale**. C'est la zone la plus vulnérable aux inondations, car elle reçoit l'ensemble des eaux de ruissellement provenant de l'amont.

III.5.1.1 Pente du bassin versant (Ibv) :

Cette grandeur est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$Ibv = \frac{|Hmax - Hmin|}{Lcp} \quad \text{(III.7)}$$

Où :

- Hmax – Hmin : Les altitudes qui représentent respectivement les 95% et les 5% de la surface totale peuvent être reformulées en termes de fréquence.

- Lcp : Longueur du thalweg principal (km).

L'utilisation des altitudes correspondant à 5 % et 95 % de la surface cumulée permet d'obtenir une estimation plus représentative de la pente moyenne, en limitant l'influence des valeurs extrêmes qui pourraient fausser le calcul.

III.5.2 Pente moyenne du bassin versant (Im) :

La pente moyenne constitue une caractéristique clé du bassin, reflétant sa configuration topographique. Elle est considérée comme une variable indépendante, influençant le temps de parcours du ruissellement direct, et par conséquent le temps de concentration (Tc), ainsi que le débit de pointe lors d'une pluie intense (TOUAIBIA, 2004).

$$Im = \frac{\Delta H(0.5L1 + L2 + \cdots + 0.5Ln)}{S} \quad \text{(III.8)}$$

Où :

- ΔH : Différence d'altitude entre deux courbes de niveau successives (m).

- L1, L2, …, Ln : Les longueurs des courbes de niveau (km).

- S : Superficie du bassin versant (km²).

Tableau III-4 Pente moyenne du bassin versant d'Oued terbout.

Courbes	Longueur (Km)	ΔH	Surfaces BV (km2)	Im (m/m)
210	2.37	30	2.95	0.17
180	3.01			
150	3.78			
120	2.90			
90	2.77			
60	1.97			
30	1.30			

Interprétation :

Le tableau illustre la répartition des pentes le long du thalweg principal du bassin. La pente moyenne est calculée pour chaque segment en rapportant la différence d'altitude à la longueur correspondante. Les segments courts présentent des pentes locales plus prononcées, tandis que les segments plus longs affichent des variations d'altitude plus faibles.

Globalement, le bassin se caractérise par une pente moyenne élevée, favorisant un ruissellement rapide et un temps de concentration relativement court. Ces paramètres sont déterminants pour l'évaluation du débit de pointe lors des épisodes pluvieux et pour l'analyse hydrologique du bassin.

III.5.3 L'indice de pente globale (Ig) :

Il s'agit d'un outil permettant d'évaluer le relief d'un bassin selon la classification proposée par l'O.R.S.T.O.M. Cet indice est défini comme le rapport entre l'amplitude des altitudes correspondant à 5 % et 95 % de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. Pour le calculer, on détermine deux points, S1 et S2, sur l'axe des abscisses de sorte que 95 % de la surface totale du bassin se situe entre ces deux valeurs, tandis que 5 % de

la surface reste en dessous de S1 et 5 % au-dessus de S2 (Bénina, 2004).

$$Ig = \frac{D}{Lr} = \frac{|H5\% - H95\%|}{Lr} \quad \text{(III.9)}$$

Où :

- H 5% : L'altitude en dessous de laquelle se trouve 5% de la surface totale du bassin (en mètres).

- H 95% : L'altitude en dessous de laquelle se trouve 95% de la surface totale du bassin (en mètres).

- Lr : La longueur du rectangle équivalent entre deux points..

Tableau III-5 : Classification O.R.S.T.O.M du relief à partir de l'indice de pente globale

Relief		**Valeur de I_g**
1	Relief très faible	Ig < 2
2	Relief faible	2 < Ig < 5
3	Relief assez faible	5 < Ig < 10
4	Relief modéré	10 < Ig < 20
5	Relief assez fort	20 < Ig < 50
6	Relief fort	50 < Ig < 100
7	Relief très fort	100 < Ig

III.5.4 L'indice de pente de Roche (Ip) :

L'indice Ip permet de caractériser la pente moyenne pondérée du rectangle équivalent d'un bassin versant. Il est déterminé à partir des variations d'altitude entre deux courbes de niveau successives et se calcule selon la formule présentée ci-dessous. Cet indice offre une estimation plus représentative de la pente moyenne, en tenant compte de la distribution altimétrique du bassin.

$$Ip = \frac{1}{\sqrt{Lr}} \sum \sqrt{Si * Hi} \qquad \text{(III.10)}$$

Où :

- Lr : Longueur du rectangle équivalent (km).

- Si : Surface partielle entre deux courbes de niveau (km²).

III.5.4.1 Indice de pente moyenne (Ipm) :

La pente moyenne d'un cours d'eau constitue un paramètre clé pour estimer la vitesse d'écoulement vers l'exutoire et déterminer le temps de concentration. Elle s'évalue à partir de l'analyse du profil

longitudinal du cours d'eau principal ainsi que de ses affluents. La méthode la plus utilisée consiste à rapporter la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil à la longueur totale du cours d'eau, offrant ainsi une estimation globale de sa pente moyenne.

$$Ipm = \frac{Hmax - Hmin}{Lr} \quad \text{(III.11)}$$

Où :

- Hmax – Hmin : Différence d'altitude entre les points les plus élevés et les plus bas du profil du cours d'eau (en mètres).

- Lr : Longueur du rectangle équivalent (km).

Tableau III-6 Résultats des calculs des pentes et de la dénivelée spécifique du bassin versant d'oued Terbout1

Paramètres	Symboles	Unités	Bassin versant	Valeurs	Interprétation
Pente du bassin versant	Ibv	m /m	Bv terbout1	0.17	La pente du bassin indique un relief marqué, favorisant un écoulement rapide et un temps de concentration court.
			Bv terbout2	0.12	
Pente moyenne du bassin versant	Im	m /Km	Bv terbout1	0.171	La pente moyenne indique une forte inclinaison du thalweg, favorisant un ruissellement rapide et des débits de pointe élevés.
			Bv terbout2	0.163	
Indice de pente de Roche	Ip	%	Bv terbout1	2.0427	L'indice pondéré reflète la distribution altimétrique du bassin, indiquant des pentes modérées à fortes et un impact notable sur l'érosion et l'écoulement.
			Bv terbout2		
Indice de pente Moyenne	Ipm	m /Km	Bv terbout1	0.047	L'indice de pente moyenne pondérée reflète la pente globale du bassin, incluant à la fois les zones abruptes et les parties plus douces.
			Bv terbout2	0.064	
Indice de pente globale	Ig	m /km	Bv terbout1	0.024	L'indice de pente globale estime la pente moyenne du bassin, montrant que le relief global est moins prononcé que celui du thalweg principal.
			Bv terbout2	0.040	
			Bv terbout2	34.64	

En se référant aux classifications établies par l'O.R.S.T.O.M., le bassin versant de l'Oued Terbout1 présente un relief modéré, selon la dénivelée spécifique, et un relief assez fort si l'on considère l'indice de pente globale. Dans l'ensemble, cela traduit un terrain à pentes significatives, combinant des zones abruptes le long du thalweg et des versants plus doux, favorisant un écoulement rapide des eaux et un potentiel érosif important.

III.6 Étude du réseau hydrographique :

III.6.1 Caractéristiques du réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique d'un bassin versant se compose de l'ensemble des cours d'eau, depuis les ruisseaux de tête jusqu'au cours principal, qui drainent et organisent l'écoulement des eaux de surface. Ces cours d'eau sont hiérarchisés selon leur ordre et interconnectés pour former une structure ramifiée appelée **chevelu hydrographique**. L'étude des caractéristiques du réseau hydrographique repose sur l'analyse de plusieurs paramètres, tels que la densité de drainage, l'ordre des cours d'eau, leur longueur et leur répartition, afin de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin et son comportement lors des épisodes de crue.

III.6.2 Hiérarchisation du réseau :

La hiérarchisation d'un réseau hydrographique consiste à classer les cours d'eau en fonction de leur importance et de leur position dans le bassin versant. Cette classification permet de mieux comprendre la structure du réseau de drainage et d'analyser le comportement hydrologique du bassin. Parmi les méthodes disponibles, la plus couramment utilisée est celle de **Strahler (1957)**.

III.6.2.1 Étapes de la hiérarchisation selon Strahler :

Dans un bassin versant, les ruisseaux situés en amont et ne recevant aucun affluent sont identifiés comme des cours d'eau de premier ordre. Lorsque deux cours d'eau de même ordre se rejoignent, le cours d'eau résultant voit son ordre augmenté d'une unité, ce qui permet de suivre l'évolution des pentes et des débits le long du réseau. En revanche, lorsqu'un cours d'eau d'ordre inférieur rejoint un cours d'eau d'ordre supérieur, l'ordre de ce dernier reste inchangé, garantissant une hiérarchisation cohérente du réseau hydrographique. Ce processus est répété à chaque confluence tout au long du bassin, jusqu'à ce que le cours principal, correspondant à l'ordre le plus élevé, soit clairement identifié, ce qui permet de caractériser la structure et la dynamique de l'écoulement au sein du bassin.

III.6.2.2 Importance de la hiérarchisation

La hiérarchisation du réseau hydrographique permet d'apprécier la complexité du système de drainage, de déterminer certains indices morphométriques tels que la densité et la fréquence des cours d'eau, et d'interpréter plus précisément la réponse hydrologique du bassin face aux précipitations et aux épisodes de crue.

Voici la figure qui illustre le schéma du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Terbout1.

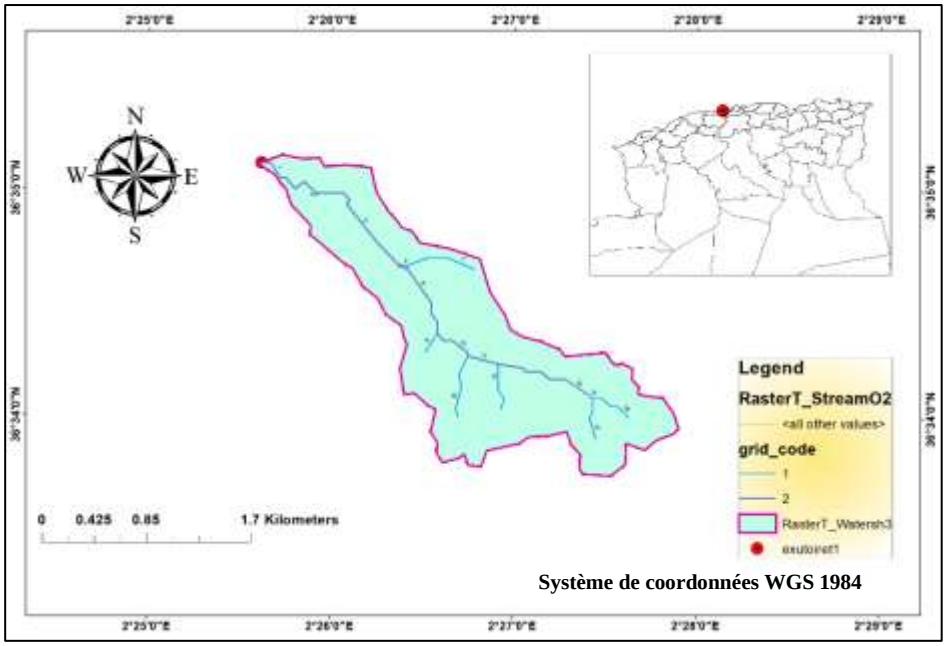


Figure III-15 Schéma du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued terbout1.

Voici la figure qui illustre le schéma du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Terbout2.

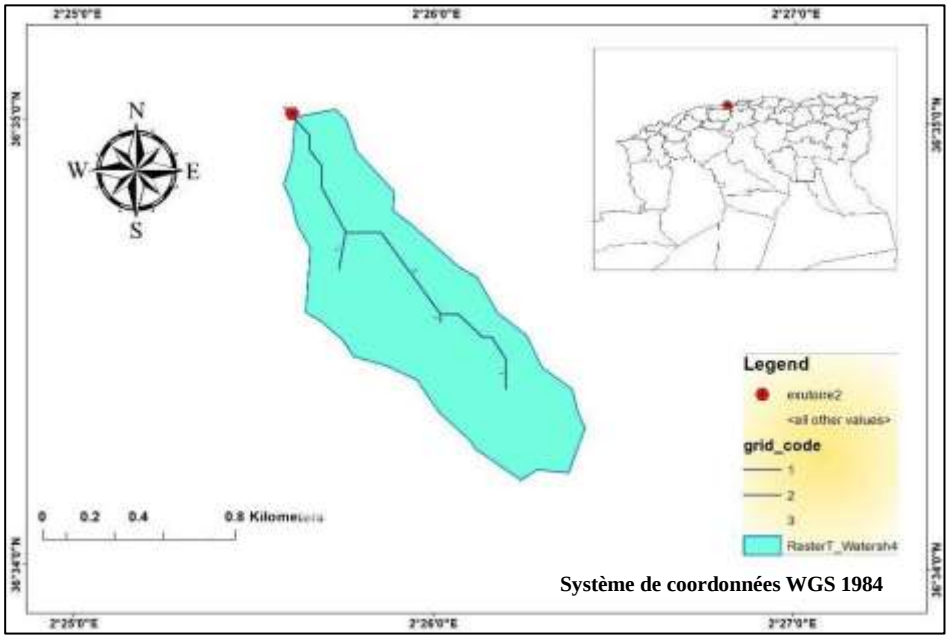


Figure III-16 Schéma du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued terbout2

III.6.3 Paramètres hydrographiques :

III.6.3.1 Densité de drainage (Dd) :

La densité de drainage d'un bassin versant correspond au rapport entre la longueur totale de ses cours d'eau et sa superficie. Cet indicateur reflète la complexité et l'organisation du réseau hydrographique : une valeur élevée traduit un réseau dense et fortement ramifié. Elle s'exprime en km/km² et peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$Dd = \frac{\sum_{i=1}^{n} li}{S} \qquad \text{(III.13)}$$

Où :

- $\sum_{i=1}^{n} li$: La somme des longueurs de tous les cours d'eau considérés dans le bassin versant.

- n : L'ordre le plus élevé dans la classification.

La densité de drainage peut être distinguée en deux catégories, en fonction du type d'écoulement observé :

- **Densité de drainage temporaire (Ddt) :**

Représente les talwegs qui coulent temporairement.

$$Ddt = \frac{\sum lit}{S} \quad \text{(III.14)}$$

Où :

- $\sum lit$: Représente la longueur des oueds temporaires.

- **Densité de drainage permanente (Ddp) :**

Représente les cours d'eau qui ont un écoulement permanent.

$$Ddp = \frac{\sum lip}{S} \quad \text{(III.15)}$$

Où :

- $\sum lip$: Représente la longueur des oueds permanents.

Ces mesures permettent de caractériser les différents types d'écoulements présents dans le réseau hydrographique d'un bassin versant.

III.6.3.2 Densité hydrographique des thalwegs élémentaires (F) :

La densité hydrographique des thalwegs élémentaires (FFF) correspond au nombre total de cours d'eau ou de lignes d'écoulement présents dans une zone donnée. Exprimée en nombre de voies d'écoulement par unité de surface, elle permet d'évaluer la capacité du territoire à drainer les eaux et fournit ainsi des informations sur la dynamique hydrologique de la région.

$$F = \frac{\sum N1}{S} \quad \text{(III.16)}$$

Où :

- F : Densité hydrographique, exprimée en nombre de cours d'eau par unité de surface.

- S : Superficie du bassin versant (en kilomètres carrés).

- N1 : Nombre de cours d'eau d'ordre 1.

III.6.3.3 Coefficient de torrentialité (Ct) :

Le coefficient de torrentialité est obtenu en multipliant la densité de drainage par la densité hydrographique des thalwegs élémentaires, permettant ainsi d'évaluer l'intensité et la concentration du ruissellement dans le bassin.

$$Ct = Dd * F \quad \text{(III.1)}$$

Où :

- F : Densité hydrographique.

- Dd : Densité de drainage.

III.6.4 Temps de concentration (Tc) :

Le temps de concentration d'un bassin versant correspond à la durée maximale nécessaire pour qu'une goutte d'eau parcoure le trajet hydrologique entre un point quelconque du bassin et son exutoire. Sa détermination précise reste souvent complexe, et plusieurs formules empiriques sont couramment utilisées. Parmi elles, la formule de Kirpich, développée en 1940 à la suite des crues survenues dans le nord-est des États-Unis en 1936 , constitue une référence classique.

Les méthodes employées pour l'estimation du temps de concentration tiennent généralement compte des spécificités régionales et des caractéristiques propres aux bassins étudiés. Ainsi, pour une analyse locale, il est recommandé de choisir la formule la mieux adaptée aux conditions physio géographiques du bassin concerné. Dans le contexte du nord de l'Algérie, l'utilisation de relations développées pour des zones présentant des conditions similaires permet d'obtenir des résultats plus représentatifs et fiables. L'estimation du temps de concentration repose le plus souvent sur des approches empiriques, telles que :

III.6.4.1 Formule de Giandotti (sud de l'Italie, 1937) :

La formule de Giandotti, développée en 1937 pour les bassins versants du sud de l'Italie, constitue l'une des méthodes empiriques classiques pour estimer le temps de concentration d'un bassin. Elle relie ce paramètre à des caractéristiques morphométriques du bassin, telles que la longueur du thalweg

et la pente moyenne, permettant ainsi d'évaluer la vitesse d'écoulement et la réactivité hydrologique du bassin face aux précipitations.

$$Tc = \left(\frac{(4\sqrt{S})+(1.5+Lcp)}{(0.8\sqrt{Hmoy-Hmin})}\right)^{0.385} \quad \text{(III.18)}$$

Où :

- Tc : Temps de concentration (h).

- Hmoy et Hmin : Altitudes moyenne et minimale du bassin versant (m).

- S : Surface du bassin versant (km²).

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

III.6.4.2 Formule de Solovsky :

La formule de Solovsky constitue une méthode empirique développée pour estimer le temps de concentration des bassins versants en se basant sur leurs caractéristiques morphométriques et topographiques. Elle prend en compte des paramètres tels que la longueur du thalweg principal et la pente moyenne, permettant d'évaluer la vitesse d'écoulement et la réactivité du bassin face aux précipitations. Cette formule est particulièrement adaptée aux bassins présentant des conditions physiographiques similaires à celles pour lesquelles elle a été élaborée.

$$Tc = 4 * \left(\frac{S * Lcp^{0.333}}{\sqrt{Ibv}}\right)^{0.75} \quad \text{(III.19)}$$

Où :

- Tc : Temps de concentration (h).

- Ibv : Pente du bassin versant (m/km).

- S : Surface du bassin versant (km²).

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

III.6.4.3 Formule de SCS ANRH :

La formule SCS ANRH, développée dans le cadre des études hydrologiques de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, constitue une méthode empirique pour l'estimation du temps de concentration des bassins versants. Elle repose sur les caractéristiques morphométriques et physiographiques du bassin, telles que la longueur du thalweg et la pente moyenne, afin d'évaluer la vitesse d'écoulement et la réactivité du bassin face aux précipitations. Cette approche est particulièrement adaptée aux conditions hydroclimatiques et géographiques locales, garantissant des résultats représentatifs pour la gestion et la planification des ressources en eau.

$$Tc = \left(\frac{0.87 * Lcp^3}{Hmoy - Hmin}\right)^{0.385} \quad \text{(III.20)}$$

Où :

- Tc : Temps de concentration (h).

- Hmoy et Hmin : Altitudes moyenne et minimale du bassin versant (m).

- S : Surface du bassin versant (km²).

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

III.6.4.4 Formule de TURAZZA :

La formule de Turazza constitue une méthode empirique développée pour l'estimation du temps de concentration des bassins versants. Elle prend en considération des paramètres morphométriques, tels que la longueur du thalweg principal et la pente moyenne, afin d'évaluer la rapidité de l'écoulement et la réponse hydrologique du bassin face aux précipitations. Cette formule est adaptée aux bassins présentant des caractéristiques physiographiques et climatiques similaires à celles pour lesquelles elle a été initialement développée.

$$Tc = \frac{0.108^3 \sqrt{S * Lcp}}{\sqrt{Ipm}} \quad \text{(III.21)}$$

Où :

- Tc : Temps de concentration (h).

- Ipm : Indice de pente moyenne (m/m).

- S : Surface du bassin versant (km²).

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

III.6.4.5 Formule de VENTURA :

La formule de Ventura est une méthode empirique utilisée pour estimer le temps de concentration des bassins versants. Elle s'appuie sur les caractéristiques morphométriques du bassin, notamment la longueur du thalweg principal et la pente moyenne, afin d'évaluer la vitesse d'écoulement et la réponse hydrologique face aux précipitations. Cette approche est particulièrement pertinente pour des bassins présentant des conditions physiographiques similaires à celles pour lesquelles la formule a été élaborée, permettant ainsi d'obtenir des estimations fiables et représentatives.

$$Tc = 0.1275 \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{Ibv}} \qquad \text{(III.22)}$$

Où :

- Tc : Temps de concentration (h).

- Ibv : Pente du bassin versant (m/m).

- S : Surface du bassin versant (km²).

III.6.4.6 Formule de KIRPICH :

La formule de Kirpich, développée en 1940 à la suite des crues survenues dans le nord-est des États-Unis en 1936, constitue l'une des méthodes empiriques classiques pour estimer le temps de concentration des bassins versants. Elle relie ce paramètre à des caractéristiques morphométriques du bassin, telles que la longueur du thalweg principal et la pente moyenne, permettant d'évaluer la rapidité de l'écoulement et la réactivité hydrologique du bassin face aux précipitations. Cette formule est particulièrement utilisée pour des bassins de petite à moyenne taille et demeure une référence couramment appliquée dans les études hydrologiques. Le temps de concentration y est estimé à l'aide de l'équation suivante :

$$Tc = 0.0195 \frac{Lcp^{0.77}}{Ipm^{0.385}} \qquad \text{(III.23)}$$

Où :

- Tc : Temps de concentration (h).

- Lcp : Longueur du cours d'eau principal (m).

- Ipm : Indice de pente moyenne (m/m).

Le tableau suivant regroupe les valeurs du temps de concentration obtenues à partir des différentes formules de calcul :

Tableau III-7Résultats des calculs de temps de concentration

Formules utilisées	Tc bv terbout1	Tc bv terbout2	Unités
Formule de VENTURA	0.037	0.016	h
Formule de KIRPICH	1.52	0.72	h
Formule de GIANDOTTI	1.53	0.95	h
Formule de TURAZZA	0.04	0.015	h
Formule de SOLOVSKY	3.5	0.92	h
Formule de SCS ANRH	1.36	0.72	h

Choix du temps de concentration : Nous avons pris la moyenne des trois formules indiquées.

Tableau III-8 Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'oued terbout1et2.

Désignation		Symbole	Unités	Bv terbout1	Bv terbout2
Superficie		S	Km^2	2.95	0.75
Périmètre		P	Km	13.86	5.88
Longueur du talweg principal		L_{cp}	Km	4.57	2.2
Indice de compacité de Gravélius		KG	/	2.26	1.89
Indice de compacité de Horton		Kh	/	0.14	0.15
Coefficient d'allongement		Ca	/	7.06	6.39
Rectangle equivalent	**longueur**	Lr	Km	6.47	2.65
	largeur	lr	Km	0.46	0.29
Altitudes	**Maximale**	H_{max}	m	231	153
	Moyenne	H_{moy}	m	137.7	88.8
	Minimale	H_{min}	m	6	9
	Médiane 5%	H5%	m	45	35
	Médiane 50%	H50%	m	135	90
	Médiane 95%	H95%	m	200	140
Pente du bassin versant		IBV	m/m	0.033	0.047
Pente moyenne du bassin versant		Im	m/m	0.171	0.120
Indice de pente de Roche		Ip	%	6.46	5.35
Indice de pente Moyenne		Ipm	m/m	0.047	0.064
Indice de pente globale		Ig	m/m	0.024	0.04
Dénivelée spécifique		Ds	m	41.22	34.64
La somme des longueurs des cours d'eau		$\sum Li$	Km	18.09	13.23
Nombre des talwegs d'ordre 1		$\sum N1$	/	8.295	3.74
Densité de drainage		Dd	Km/Km^2	2.1	1.7
Densité hydrographique		F	Km^{-2}	0.5	0.450
Coefficient de torrentialité		Ct	/	1.05	0.77
Temps de concentration		Tc	Heures	1.47	0.80
Vitesse de ruissellement		Vr	Km/h	3.10	2.75

III.7 Étude de crue

L'analyse des crues constitue un aspect central de l'étude hydrologique d'un bassin versant, permettant de mieux comprendre la dynamique des écoulements extrêmes et d'évaluer les risques associés. Elle repose sur l'exploitation des données pluviométriques et hydrométriques, ainsi que sur l'application de modèles hydrologiques adaptés aux caractéristiques morphométriques et physiographiques du bassin.

L'objectif de cette étude est d'estimer la fréquence et l'intensité des crues, de déterminer les débits maximaux correspondant à différentes périodes de retour et d'identifier les zones susceptibles d'être inondées. Ces informations sont essentielles pour la planification et la gestion des ressources en eau, ainsi que pour la conception d'ouvrages de protection tels que les digues et les bassins de rétention.

Pour le bassin versant de l'Oued Terbout 1, l'étude de crue permettra de mettre en relation les paramètres morphométriques, la hiérarchisation du réseau hydrographique et le temps de concentration avec les caractéristiques des crues. Cette approche fournit une base solide pour évaluer la vulnérabilité du bassin et formuler des recommandations visant à améliorer sa gestion hydraulique et la prévention des risques d'inondation.

III.7.1 Caractéristiques morphométriques du bassin

Le bassin versant de l'Oued Terbout 1 présente une superficie totale d'environ 2,963 km², avec un réseau hydrographique relativement bien structuré et un thalweg principal de 3,728 km. L'analyse des altitudes montre une répartition progressive du relief, avec des zones d'altitude moyenne occupant la majorité du bassin, ce qui traduit un profil hypsométrique régulier.

La pente moyenne le long du thalweg principal est relativement élevée, indiquant un écoulement rapide des eaux vers l'exutoire, tandis que l'indice de pente globale et la dénivelée spécifique confirment un relief modéré à assez fort, caractérisé par des zones abruptes et des versants plus doux. La hiérarchisation du réseau hydrographique met en évidence des cours d'eau de premier ordre en amont et un cours principal d'ordre supérieur, reflétant une structure du drainage classique et une répartition homogène des affluents.

Ces caractéristiques morphométriques influencent directement la dynamique du ruissellement et constituent la base pour l'estimation du temps de concentration, la densité de drainage et la capacité du bassin à réagir aux épisodes pluvieux.

III.7.2 Analyse des données pluviométriques

L'étude hydrologique du bassin versant s'appuie sur l'exploitation des données pluviométriques disponibles afin de caractériser la distribution des précipitations dans le temps et l'espace. L'analyse des séries de pluies maximales permet d'identifier les périodes de forte occurrence, de déterminer les valeurs extrêmes et d'estimer les précipitations de retour pour des périodes de 10 à 100 ans. Cette démarche repose sur l'application de modèles fréquentiels, qui décrivent statistiquement la probabilité d'apparition d'événements de grande intensité. Le choix de la loi d'ajustement statistique appropriée assure la fiabilité des résultats et constitue une base essentielle pour le calcul des débits maximaux, l'estimation du temps de concentration et l'évaluation du risque de crue, éléments indispensables à la gestion hydraulique et à la prévention des inondations dans le bassin.

III.7.3 Précipitations maximales journalières

Les précipitations maximales journalières désignent les plus fortes hauteurs de pluie enregistrées sur une durée de 24 heures au cours d'une année hydrologique. Ces événements extrêmes, bien que rares, jouent un rôle déterminant dans la genèse des crues, pouvant engendrer des débits importants et constituer une menace sérieuse pour les infrastructures et les aménagements. Leur analyse fréquentielle permet d'estimer les valeurs associées à différentes périodes de retour, offrant ainsi un outil indispensable pour la modélisation hydrologique, le dimensionnement des ouvrages de protection et la gestion des risques liés aux inondations.

III.7.4 Station pluviométrique de référence et justification de son choix

L'étude hydrologique s'appuie sur les observations fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Les calculs prennent comme référence les données de la station pluviométrique de **Hajout**, couvrant une série continue de 1981 à 2023. Ces données constituent la base pour l'analyse statistique des précipitations, l'évaluation des tendances pluviométriques, l'identification des épisodes extrêmes et l'estimation des pluies de projet. La qualité et la régularité des enregistrements assurent également la fiabilité des modélisations hydrologiques et des études de crue réalisées.

Tableau III-9 identification de la station pluviométrique.

Station	Code	Série d'observation	Nombre d'années	X	Y	Z
Hadjout	020325	1972-2022	50 ans	475.85	358.85	59

La distribution des pluies maximales journalières enregistrées à la station sur une période de 50 ans est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-10Précipitations maximales journalières de la station de Hadjout.

Année	Pj max (mm)	Année	Pj max (mm)	Année	Pj max (mm)
1973	73.7	**1992**	51.1	**2011**	58.9
1974	44	**1993**	79.5	**2012**	51.5
1975	51.3	**1994**	34.4	**2013**	45.3
1976	45.8	**1995**	69	**2014**	55
1977	51.5	**1996**	40.5	**2015**	65
1978	98	**1997**	51.7	**2016**	55.5
1979	50.5	**1998**	73.5	**2017**	72.8
1980	77.1	**1999**	23.2	**2018**	52.6
1981	43.2	**2000**	33.6	**2019**	47.4
1982	53	**2001**	38.5	**2020**	25.7
1983	63.5	**2002**	32.5	**2021**	64.3
1984	158.1	**2003**	35.3	**2022**	53.1
1985	87.9	**2004**	30.2		
1986	65.8	**2005**	26.7		
1987	30.9	**2006**	27.1		
1988	38.7	**2007**	43.6		
1989	20.6	**2008**	27.1		
1990	34.4	**2009**	39.3		
1991	55.5	**2010**	37.2		

III.7.5 Analyse fréquentielle et choix du modèle d'ajustement

Les résultats d'une analyse fréquentielle dépendent fortement du modèle statistique retenu, aucun modèle n'étant universellement valide pour toutes les situations hydrologiques. À partir d'un échantillon de n observations, on construit généralement l'histogramme des fréquences ainsi que la courbe de fréquence cumulée de non-dépassement. Lorsque le nombre d'observations devient important, l'objectif est d'identifier la loi de probabilité la plus représentative de la population étudiée. La fréquence observée est alors remplacée par une densité de probabilité théorique.

HYFRAN-PLUS : Ce logiciel permet d'ajuster diverses distributions statistiques à une série de données, sous réserve que celles-ci soient indépendantes, homogènes et stationnaires. Développé dans le cadre du **Système d'Aide à la Décision (SAD)**, il constitue un outil performant qui facilite la sélection de la loi statistique la plus appropriée pour l'estimation des quantiles, notamment pour des périodes de retour importantes.

- **Les méthodes d'ajustement**

Différentes lois de probabilité sont couramment utilisées en hydrologie en fonction du type de variable étudiée :

Loi Normale : appliquée principalement aux précipitations annuelles, aux débits moyens et aux volumes de stockage des réservoirs.

Loi Log-Normale : adaptée aux débits maximaux annuels, aux précipitations journalières et annuelles, ainsi qu'aux volumes de ruissellement mensuels et annuels.

Loi de Pearson type III (Gamma) : souvent utilisée pour modéliser les débits maximaux annuels, les précipitations (journalières et annuelles) et les volumes de ruissellement.

Lois de Gumbel et de Fréchet : spécifiquement destinées à l'étude des valeurs extrêmes, notamment les débits maximaux annuels.

Loi exponentielle : employée pour l'analyse des précipitations journalières et des durées entre deux événements pluvieux.

Loi de Goodrich : adaptée aux valeurs moyennes annuelles, qu'il s'agisse de précipitations ou de débits.

La loi de Gumbel, largement utilisée en hydrologie pour l'analyse fréquentielle des valeurs extrêmes (notamment les précipitations maximales journalières et les débits de crue), est définie par sa fonction de répartition :

$$F(x) = e^{-e^{-y}} \qquad \text{(III.24)}$$

Avec

$y = \alpha(x - x0)$: Variable réduite de Gumbel ;

α, x0 : coefficients d'ajustement ;

x : précipitation maximale journalière (mm) ;

1 : Pente de la droite de régression ;

α

Donc : L'équation de la droite de Gumbel est donnée par :

$$P_{\max.j} = \frac{1}{\alpha} y + X0 \qquad \text{(III.25)}$$

Cette relation permet d'estimer les précipitations maximales journalières correspondant à différents temps de retour, et donc d'évaluer la probabilité d'occurrence des pluies extrêmes dans le bassin de l'Oued Terbout 1.

La fréquence expérimentale en utilisant la formule de Hazen qui s'applique pour les lois normales et quasi normales :

$$F(x) = \frac{m-0.5}{n} * 100 \qquad \text{(III.26)}$$

m : rang de précipitation.

n : nombre d'observations

La variable de Gumbel pour chaque valeur observée ;

$$y = -[\mathrm{Ln}(-\mathrm{Ln}F(x))] \qquad (III.27)$$

III.8 Ajustement par la loi de Gumbel

L'ajustement de la série pluviométrique des pluies maximales journalières à la loi de Gumbel a été réalisé afin d'estimer les hauteurs de précipitations pour différents temps de retour. Comme présenté dans les résultats suivants, cette méthode permet de relier les valeurs extrêmes observées aux probabilités d'occurrence et constitue une base pour l'évaluation des débits de crue dans notre bassin.

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 :

Avec :

- T : période de retour (T=10ans).
- q : probabilité au non dépassement.
- XT : précipitation maximale journalière

Tableau III-11 : résultats de l'ajustement (loi du Gumbel).

Période de retour	Probabilité de fréquence	Pj max (mm)	Écart type	Intervalle de confiance
10	0.90	82.9	6.11	70.2 - 95.5
20	0.95	96.0	8.04	79.3 - 113
50	0.98	113.0	10.9	92 - 135
100	0.99	125.7	13.3	100.3- 151

Voici la figure qui illustre Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Gumbel (méthode des moment)

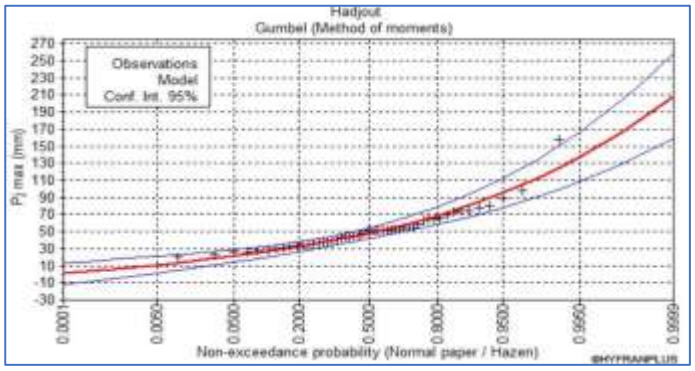


Figure III-17 : Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Gumbel (méthode des moment)

Une mise en parallèle entre les propriétés théoriques de la loi de Gumbel et celles issues de l'échantillon observé a été réalisée, et les résultats associés sont exposés dans le tableau ci-après.

Tableau III-12 : Caractéristiques de la loi (Gumbel) et de l'échantillon.

Paramètres	**Caractéristiques de la loi**	**Caractéristiques de l'échantillon**
Minimum	None	20.6
Maximum	None	158
Moyen	51.7	51.7
Écart type	23.3	23.3
Médian	47.9	50.8
Coefficient de variation Cv	0.450	0.450
Coefficient d'asymétrie Cs	1.32	2.12
Coefficient d'aplatissement Ck	6.27	9.59

Ajustement log normal

Tableau III-13 : résultats de l'ajustement (loi du Galton).

Période de retour	Probabilité de fréquence	Pj max (mm)	Écart type	Intervalle de confiance
10	0.90	79.6	6.87	67.6 - 91.5
20	0.95	92.0	8.68	76.3 - 108
50	0.98	108	11.1	87.0 - 130
100	0.99	121	12.9	94.9 - 147

Voici la figure qui illustre l'ajustement de la série pluviométrique à la loi de GALTON (maximum de vraisemblance).

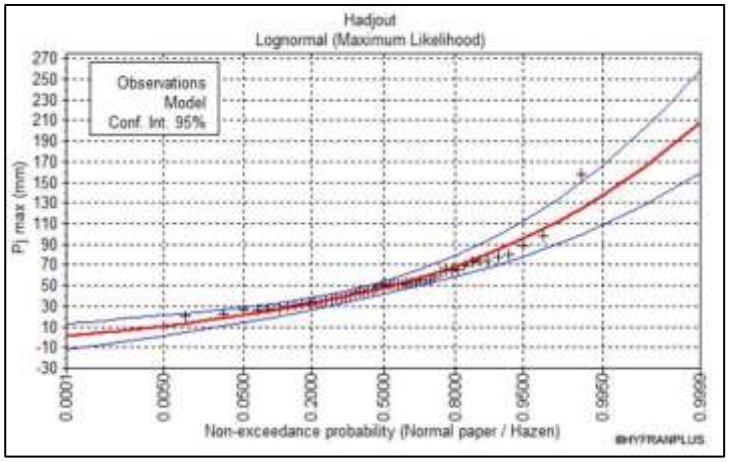


Figure III-18 : Ajustement de la série pluviométrique à la loi de GALTON (maximum de vraisemblance).

Une mise en parallèle entre les propriétés théoriques de la loi de Galton Log normal et celles issues de l'échantillon observé a été réalisée, et les résultats associés sont exposés dans le tableau ci-après.

Tableau III-14 : Caractéristiques de la loi (Galton) et de l'échantillon.

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	0	20.6
Maximum	None	158
Moyen	51.6	51.7
Écart type	21.5	23.3
Médian	47.6	50.8
Coefficient de variation Cv	0.417	0.450
Coefficient d'asymétrie Cs	1.14	2.12
Coefficient d'aplatissement Ck	2.40	9.59

III.9 Teste de validité de l'ajustement

Les fréquences obtenues lors des observations et celles estimées à partir d'une loi de probabilité théorique montrent forcément certaines divergences. Même si la représentation graphique constitue une étape significative, elle demeure insuffisante pour déterminer avec précision la loi de distribution la plus appropriée. Pour répondre à cet objectif, on recourt à des tests statistiques d'adéquation, lesquels permettent de confronter différentes lois et de retenir celle qui présente la correspondance la plus satisfaisante. Parmi ces tests, le chi-deux (χ^2) figure parmi les plus utilisés.

Test d'adéquation du chi-carré (χ^2) :

Le test d'adéquation, ou test d'ajustement, vise à vérifier si le modèle statistique choisi correspond aux données observées. Concrètement, il s'agit de tester l'hypothèse selon laquelle les observations suivent une loi de probabilité donnée. Le test du chi-carré compare la valeur de χ^2 calculée à partir des données expérimentales à la valeur théorique tabulée pour un **niveau de risque déterminé**,

généralement de 5 % (soit un seuil de confiance de 95 %). Cette comparaison permet de déterminer si les écarts entre les fréquences observées et celles attendues sont statistiquement significatifs.

- Si χ^2 calculé > χ^2 théorique (tabulé) : la loi d'ajustement est rejetée.
- Si χ^2 calculé < χ^2 théorique (tabulé) : la loi d'ajustement est acceptée.

La valeur théorique (tabulée) de χ^2 est obtenue à partir des tables statistiques en fonction du degré de liberté (γ) et du seuil de signification α, généralement fixé à 5 % (Touaibia, 2015).

Dans cette étude, le test du chi-carré (χ^2) a été appliqué à l'aide du logiciel HYFRAN-Plus, et les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III-15 : Résultat de test khi2

Loi de distribution	Degré de liberté ɣ	Nombre de classe	χ2 calculée	χ2 théorique (tabulé)
Gumbel	6	9	8.32	12.592
Galton	6	9	11.20	12.592

Les deux lois satisfont le test d'adéquation, toutefois la **loi de Gumbel** se révèle plus performante, car sa valeur calculée de χ^2 (8,32) est plus proche de zéro, ce qui traduit un meilleur ajustement aux données.

III.10 Estimation des débits d'eaux pluviales

La détermination des débits de pointe revêt une importance majeure en hydrologie, compte tenu de l'impact significatif que peuvent avoir ces phénomènes extrêmes sur les ouvrages et aménagements. Dans le cadre de la planification et de la conception d'infrastructures hydrauliques, il est indispensable d'évaluer le débit maximal de crue auquel les structures devront résister.

Pour cette estimation, deux approches complémentaires sont généralement mobilisées. La première repose sur l'application de formules empiriques, établies à partir des caractéristiques pluviométriques et morphométriques du bassin versant. La seconde consiste en l'utilisation de méthodes numériques,

telles que la procédure développée par le Soil Conservation Service (SCS), permettant une modélisation plus détaillée du processus pluie-débit.

III.10.1 Les formules empiriques

- **Formule de SOGREAH-ANRH (1989) :**

$$Qt=Cq.\ (Pt-P1) \qquad (III.30)$$

Avec :

- P1=20 mm en Algérie du nord
- Cq: coef de ruissellement statistique
- Cq = (S/6) *Tb-0.77
- Qt : Débit de pointe (en m3/s) de période de retour t
- Pt : Pluie journalière max. de période de retour t
- Tb = Tb0+(L^1.7(Pa*Vi) 0.57/1000)
- Tb : Temps de base en heures
- Tb0 = 2.33 pour les stations du Nord Algérie

- **Formule de GIANDOTTI**

$$Qmax= (A.S\ \sqrt{}Hmoy+Hmin)/(1.5\ L\ +4\sqrt{}S)$$

- Qmax : Débit max de la crue (m3/s).
- S : Superficie du bassin versant (km²).
- PTc : Pluie correspondant au temps de concentration.
- L : Longueur du thalweg principal.

- Hmoy et Hmin : respectivement altitudes moyenne et minimale du bassin versant.
- A : Coefficient fonction des conditions topographiques généralement pris égal à 120 -160 pour de petits bassins de morphologie assez douce.
- Tronçon Superficie (Km) L (km) Hmoy (m) Hmin (m) Ptc (mm

➢ **Formule de Turazza**

$$Qmax = \frac{C.P_{Tc}.S}{3.6.T_c} \qquad \text{(III.31)}$$

- Avec :
- max : Débit max de la crue (m3/s).
- PTc : Pluie correspondant au temps de concentration.
- C : Coefficient de ruissellement.
- S : Superficie du bassin versant (km²).
- Tc : Temps de concentration

➢ **Formule de Maillet Gautier**

$$Qmax=2K\,Log(1+Ap)\,*S/(L^{0,5})*((1+4Logt-Logs)^{0,5}) \qquad \text{(III.32)}$$

Avec :

- Qmax : débit de crue de période de retour voulue (en m3/s)
- p : pluie moyenne annuelle (en m)
- s : superficie du BV en Km²

- t : période de retour t
- L : longueur du talweg principal
- A : coefficient égal à 20 pour l'Algérie
- K : coefficient variant avec la pente du bassin de 0.5 à 5 (on prend en considération une valeur moyenne de k = 3).

III.10.2 Méthode S.C.S

La méthode du **Soil Conservation Service (SCS)**, développée initialement aux États-Unis, constitue une approche hydrologique de référence pour la transformation de la pluie en débit. Contrairement aux méthodes empiriques classiques (Turazza, Maillet-Gauthier, Sigréah-ANRH, Giandotti), qui se limitent à estimer les débits de pointe, la méthode SCS permet de reconstituer l'ensemble de l'hydrogramme de crue. Elle offre ainsi une représentation plus réaliste du processus hydrologique en intégrant à la fois l'intensité, la durée et la répartition temporelle des précipitations.

L'un des atouts majeurs de cette méthode est sa capacité à prendre en compte l'état initial du sol, notamment son degré de saturation, ce qui conditionne la part des précipitations infiltrées par rapport au ruissellement généré. Elle repose sur l'hypothèse que, pour un instant donné, le rapport entre l'infiltration cumulée et l'infiltration potentielle maximale est équivalent au rapport entre le ruissellement cumulé et la pluie cumulée.

La construction de l'hydrogramme unitaire SCS est basée sur la transformation de l'hyétogramme de pluie efficace en hydrogramme de crue, en introduisant un paramètre clé : le **temps de réponse hydraulique (Tlag)**. Ce dernier correspond au décalage temporel entre le centre de gravité de la pluie efficace et le sommet de l'hydrogramme. Des études expérimentales menées sur différents bassins versants ont permis d'établir des relations empiriques fiables pour l'estimation de ce paramètre.

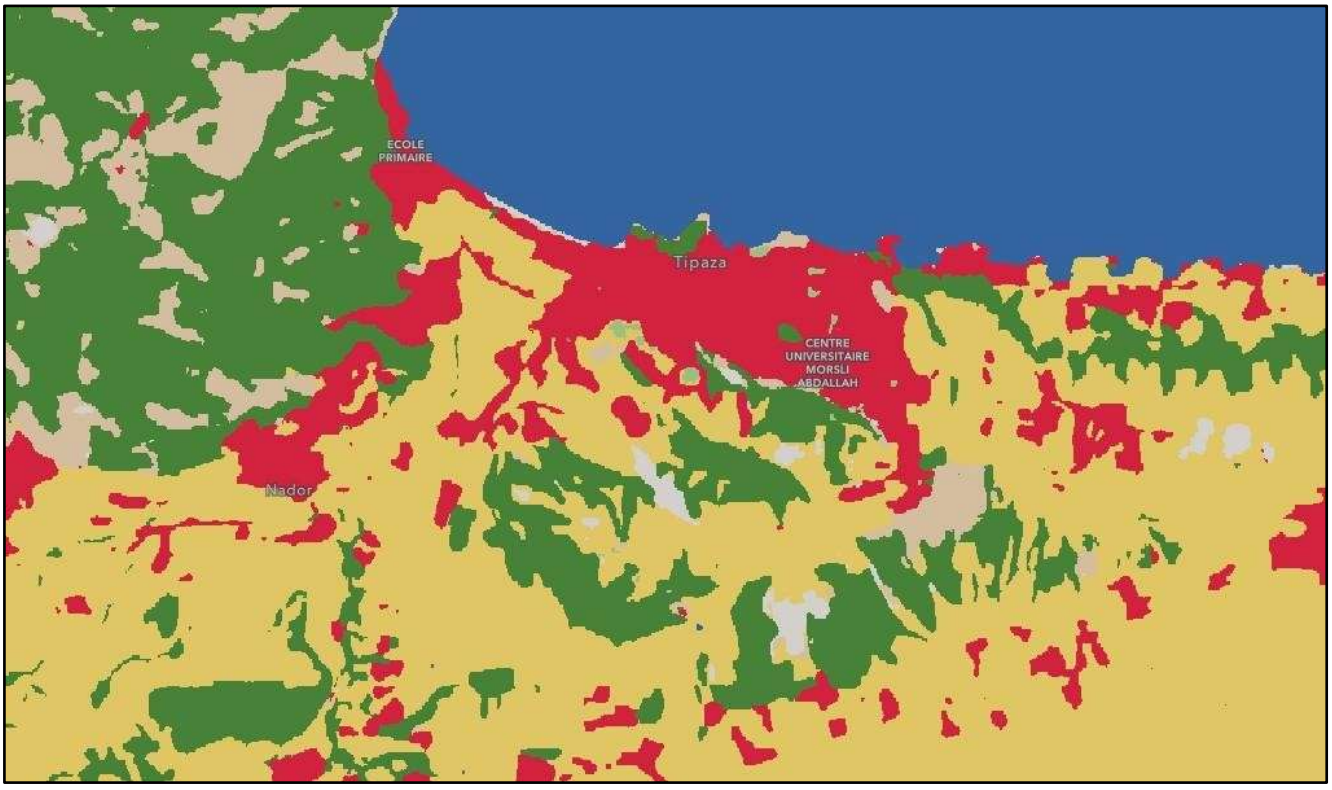


Figure III-19 Carte d'occupation de sol de la ville de Tipaza

Les différentes couleurs indiquent la répartition des principales classes d'occupation du sol dans la zone étudiée :

Tableau III-16 Valeurs des Curve-Number

Land use	Curve Number	Manning coefficient
Natural forest	0.55	0.6
Secondary forest	0.60	0.6
Mixed agriculture	0.66	0.5
Plantation	0.66	0.45
Settlements	0.85	0.012
Shrub	0.60	0.45
Bareland	0.86	0.018
Dryland farming	0.76	0.02
Source: Schwab et al. 1981		

Le tableau suivant représente les résultats de calcul du temp de concentration, Curve number et Lag-time de chaque bassin versant

Tableau III-17Résultats de calculs du TC, CN et Lag-time

Bassin versant	CN	Tc	Lag (h)	Lag (min)
BV Terbout 1	74,74	1,29	0,78	46,58
BV Terbout 2	74,81	0,85	0,51	30,70

Les figures suivantes représentent l'Hydrogrammes de crues pour les différentes périodes de retours

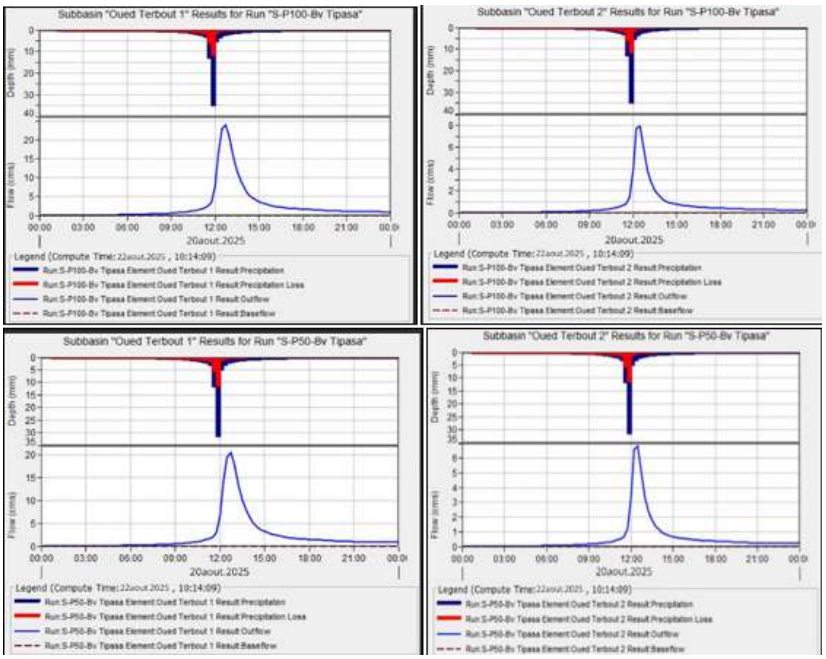


Figure III-20 l'Hydrogrammes de crues pour les différentes périodes de retours

La présentation des résultats se fait dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-18 calcule de débit de crue

	20 ans		20ans		50ans		100ans	
	Bv trbout1	Bv trbout2	Bv trbout1	Bv trbout2	Bv trbout1	Bv trbout2	Bv trbout1	Bv trbout2
SOGREAH ANRH(m^3/s)	12.49	3.70	15.09	4.47	18.47	5.47	20.99	6.22
GIANDOTTI (m^3/s)	25.14	13.47	27.47	14.71	30.44	16.30	32.66	17.49
TURAZZA(m^3/s)	7.66	5.25	8.37	5.74	9.27	6.35	9.95	6.82

MAILLET GAUTIER(m^3/s)	19.07	7.48	21.46	8.32	24.25	9.30	26.17	9.99
SCS(m^3/s)	12.9	4.3	16.1	5.3	20.5	6.8	23.9	7.9

III.10.3 Conclusion

L'examen comparatif des différentes méthodes d'estimation des débits de crue met en évidence leurs limites. Les approches empiriques, telles que celles de Turazza, Maillet-Gauthier, Sigréah-ANRH ou Giandotti, permettent uniquement d'obtenir une approximation du débit de pointe, sans donner d'indications sur la forme ni sur le volume des hydrogrammes. Ces méthodes restent utiles pour une première estimation, mais leur portée demeure restreinte lorsqu'il s'agit de concevoir et de dimensionner des ouvrages hydrauliques.

À l'inverse, la méthode du **Soil Conservation Service (SCS)** offre une modélisation plus complète et plus précise. Elle permet de générer des hydrogrammes entiers, intégrant la dynamique temporelle du ruissellement, l'influence des précipitations effectives et l'état initial d'humidité des sols. Cette richesse d'information constitue un atout majeur pour l'évaluation réaliste des crues et le dimensionnement fiable des infrastructures hydrauliques.

Ainsi, le choix de la méthode **SCS** s'impose dans ce travail en raison de sa capacité à représenter de manière détaillée le processus pluie-débit et à fournir les éléments nécessaires à la conception et à la protection des ouvrages contre les événements extrêmes.

Chapitre IV : Modélisation hydraulique et cartographie des zones à risque d'inondation

Chapitre IV : Modélisation hydraulique et cartographie des zones à risque d'inondation

Introduction générale

L'inondation est l'un des aléas naturels les plus fréquents et les plus dévastateurs, particulièrement dans les zones méditerranéennes et semi-arides où la variabilité des précipitations et la vulnérabilité des milieux accentuent les impacts. Face à l'accroissement démographique, à l'urbanisation rapide et au changement climatique, la nécessité de comprendre et de prévoir le comportement hydraulique des cours d'eau devient une priorité.

Dans ce contexte, la simulation hydraulique représente un outil scientifique et technique de premier plan. Elle permet de reproduire virtuellement les conditions d'écoulement dans un bassin versant, d'anticiper les zones susceptibles d'être inondées et de contribuer à la mise en place de stratégies efficaces de gestion des risques. Associée aux Systèmes d'Information Géographique (SIG), la modélisation hydraulique facilite l'élaboration de cartes thématiques qui orientent les décisions d'aménagement et de protection civile.

IV.1 Fondements théoriques de l'écoulement hydraulique

IV.1.1 Notions de base en hydraulique fluviale

Les écoulements en milieu naturel sont soumis à des lois physiques qui traduisent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Deux grands types d'écoulements sont observés :

- **Écoulement permanent** :

On parle d'écoulement permanent lorsque les principales variables hydrauliques, telles que la vitesse, le débit ou encore le tirant d'eau, restent constantes au cours du temps. Dans ce cas, les conditions hydrauliques à une section donnée du cours d'eau ne présentent aucune variation temporelle. Ce type d'écoulement est souvent observé dans les rivières en période d'étiage ou dans les canaux artificiels où les apports et les pertes sont régulés.

- **Écoulement transitoire (ou non permanent)** :il se caractérise par une variation temporelle des paramètres hydrauliques. Les vitesses, les débits et les hauteurs d'eau évoluent en fonction du temps. Ce comportement est le plus fréquent en milieu naturel, notamment lors des épisodes de crues, où l'augmentation rapide des apports pluviaux engendre une modification continue des conditions d'écoulement. Les écoulements transitoires constituent un enjeu majeur pour la modélisation hydraulique, car ils conditionnent la formation des ondes de crue, leur propagation et, par conséquent, l'évaluation du risque d'inondation.

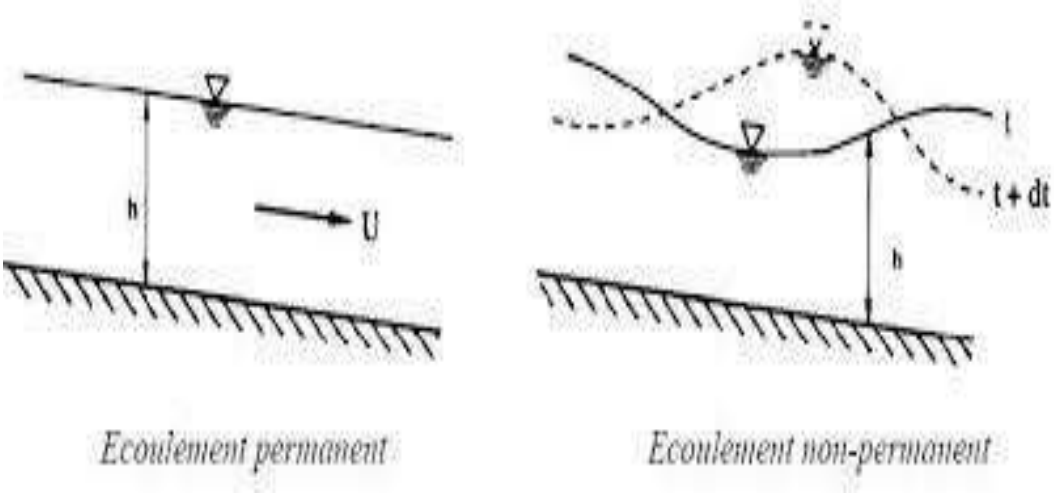


Figure IV-1 type d'ecoulement

En fonction de la régularité du profil hydraulique, on distingue plusieurs types d'écoulement :

- **Écoulement uniforme** :

Il se manifeste lorsque les grandeurs hydrauliques (profondeur, vitesse, section mouillée) restent constantes le long d'un tronçon donné du cours d'eau. Autrement dit, le profil ne présente pas de variation spatiale notable.

- **Écoulement non uniforme** :

Il survient lorsque les paramètres hydrauliques évoluent selon la position. Les vitesses, les hauteurs d'eau et parfois même la direction des écoulements changent progressivement ou brusquement le long du lit.

- **Écoulement laminaire ou turbulent** :

Cette distinction repose principalement sur le nombre de Reynolds et sur la rugosité du fond. Dans un régime laminaire, les filets d'eau s'écoulent de manière régulière et parallèle, sans agitation marquée. À l'inverse, dans un régime turbulent, l'écoulement est caractérisé par des mouvements désordonnés et tourbillonnaires, qui dominent la plupart des cours d'eau naturels.

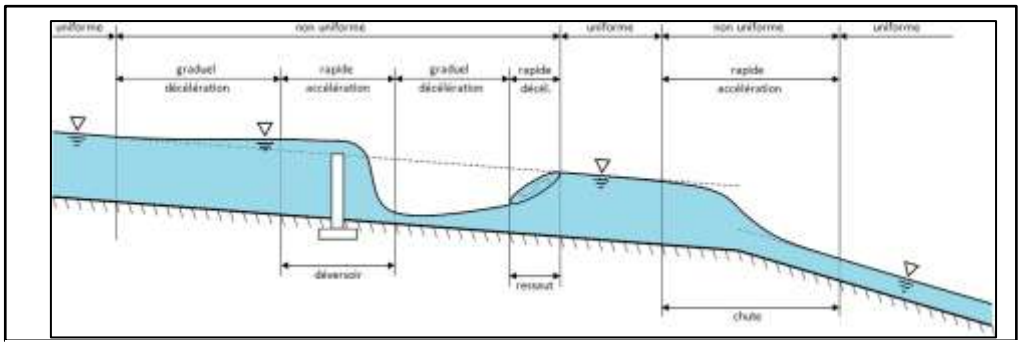


Figure IV-2 regime d'ecoulement

IV.1.2 II.2. Équations de référence

L'étude des écoulements en rivière repose sur les équations de Navier-Stokes, dont les simplifications aboutissent aux équations de Saint-Venant. Celles-ci sont largement utilisées dans les modèles hydrauliques, car elles décrivent de façon satisfaisante la propagation d'ondes de crues tout en restant compatibles avec les données disponibles.

- **Équation de continuité** :

Elle exprime le principe fondamental de conservation de la masse, en reliant l'évolution des débits et des volumes d'eau dans un tronçon hydraulique donné.

- **Équation de quantité de mouvement** :

Elle décrit la conservation de la dynamique de l'écoulement en tenant compte des principales forces en jeu, notamment la gravité, les frottements exercés par le lit et les effets d'inertie liés aux variations de vitesse et de direction.

Ces deux équations constituent le socle des modèles hydrauliques. Leur résolution repose généralement sur des méthodes numériques, utilisant des schémas explicites ou implicites. Ces

approches permettent de reproduire, avec une précision acceptable, l'évolution spatio-temporelle des débits et des hauteurs d'eau dans l'ensemble du réseau hydrographique.

- **Nombre de Reynolds (**Re**)**

Le nombre de Reynolds est un paramètre adimensionnel qui exprime le rapport entre les forces d'inertie, qui tendent à maintenir le mouvement de l'eau, et les forces visqueuses (ou de frottement), qui s'opposent à ce mouvement. Il constitue donc un indicateur fondamental pour caractériser le régime de l'écoulement.

Lorsque Re < 500, l'écoulement est dit **laminaire** : les particules d'eau se déplacent en couches parallèles, avec peu ou pas de mélange transversal.

Lorsque Re > 500–600, l'écoulement devient **turbulent** : il se traduit par des mouvements désordonnés, des tourbillons et un mélange intense, phénomène largement dominant dans les rivières et canaux naturels.

Le nombre de Reynolds est ainsi un outil de base pour distinguer les régimes hydrodynamiques et déterminer la formule empirique la plus appropriée pour le calcul des vitesses et débits.

Le nombre de Froude permet de comparer les forces d'inertie aux forces de pesanteur. Il traduit l'influence relative de la gravité dans le contrôle de l'écoulement et s'écrit :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g\ Dh}} \qquad (IV.1)$$

où :

v : vitesse moyenne de l'écoulement (m/s),

g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²),

Dh : profondeur hydraulique (rapport de la surface mouillée à la largeur de la surface libre).

En fonction de la valeur de Fr, on distingue trois régimes :

Écoulement fluvial ou subcritique (Fr < 1) : la vitesse est inférieure à la vitesse de propagation des ondes de surface, l'eau s'écoule lentement et les effets gravitaires dominent.

Écoulement critique (Fr = 1) : l'énergie spécifique est minimale et le régime est instable.

Écoulement torrentiel ou supercritique (Fr > 1) : l'eau s'écoule rapidement, la vitesse est supérieure à celle de propagation des ondes, et les effets d'inertie dominent.

- **Combinaison Reynolds–Froude**

L'analyse conjointe des deux nombres permet d'obtenir une classification plus complète des écoulements :

Fluvial laminaire : Fr < 1 et Re < 500,

Fluvial turbulent : Fr < 1 et Re > 500,

Torrentiel laminaire : Fr > 1 et Re < 500,

Torrentiel turbulent : Fr > 1 et Re > 500.

Cette classification est essentielle dans la modélisation hydraulique, car elle détermine le comportement des écoulements ainsi que la validité des formules empiriques utilisées.

- **Dimensionnement des canaux à surface libre**

Dans le cas des écoulements à surface libre, notamment ceux rencontrés dans les rivières ou canaux, on considère souvent un régime **uniforme lentement varié**. Dans cette hypothèse, les paramètres hydrauliques tels que la vitesse, la profondeur et la section mouillée sont supposés constants sur un tronçon donné.

Deux formules empiriques sont principalement utilisées pour décrire la relation débit–géométrie–rugosité :

- **Formule de Chézy**

Expression de Chézy se présente sous la forme :

$$\overline{V} = C\sqrt{Rh.I} \qquad (IV.2)$$

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

$$Q = V.S \qquad (IV.3)$$

Avec :

C : Coefficient de Chézy ($m^{0.5}/s$) ;

S : Section mouille (m^2) ;

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

I : Pente de fond du canal (mm/mm) ;

- **Formule de MANNING-STRICKLER** :

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

$$Q = K.S.R^{2/3}.I^{1/2} \qquad (IV.4)$$

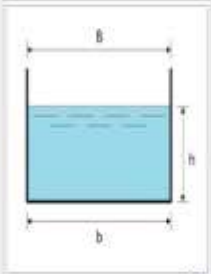
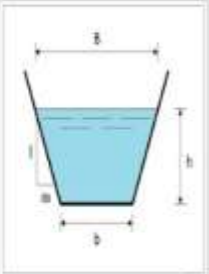
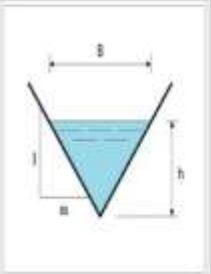
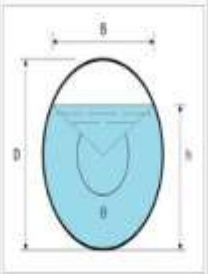
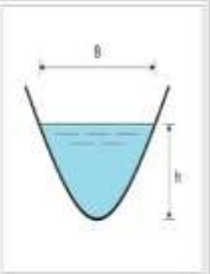
Avec :

K =1/n : coefficient 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

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

Tableau IV.1: Différents types des canaux avec leurs caractéristiques géométriques. (Graf et al., 2000)

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

- **La section rectangulaire** est la plus simple à calculer, adaptée aux canaux artificiels.
- **La section trapézoïdale** est la plus utilisée en hydraulique agricole et fluviale (meilleure stabilité des berges).
- **La section triangulaire** s'applique aux petits fossés ou rigoles d'irrigation.
- **La section circulaire** correspond aux conduites fermées (drains, collecteurs), mais elle est aussi étudiée lorsqu'elle est partiellement remplie (écoulement à surface libre).

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

IV.2.1 . Situation de l'oued dans la zone d'étude :

L'Oued Terbout est localisé à la sortie ouest de la ville de Tipaza, en contrebas de la rocade de Tipaza et de la RN11. Il prend naissance à une altitude d'environ 200 m et draine deux affluents principaux avant de se rejeter dans l'Oued Nador.

Historiquement, cet oued n'a jamais été à l'origine d'inondations notables. Cependant, au fil du temps, des constructions anarchiques se sont développées sur sa rive droite, sans tenir compte des risques liés aux crues éventuelles, notamment en période de fortes précipitations.

Dans sa partie aval, le cours de l'oued longe la route menant vers Chanoua et a été aménagé par un canal à ciel ouvert de section rectangulaire, présentant des dimensions de **1,60 m de hauteur** et **3,50 m de largeur**. Cet aménagement vise à canaliser les écoulements, mais reste sensible aux phénomènes de surcharge en cas d'épisodes pluvieux intenses.

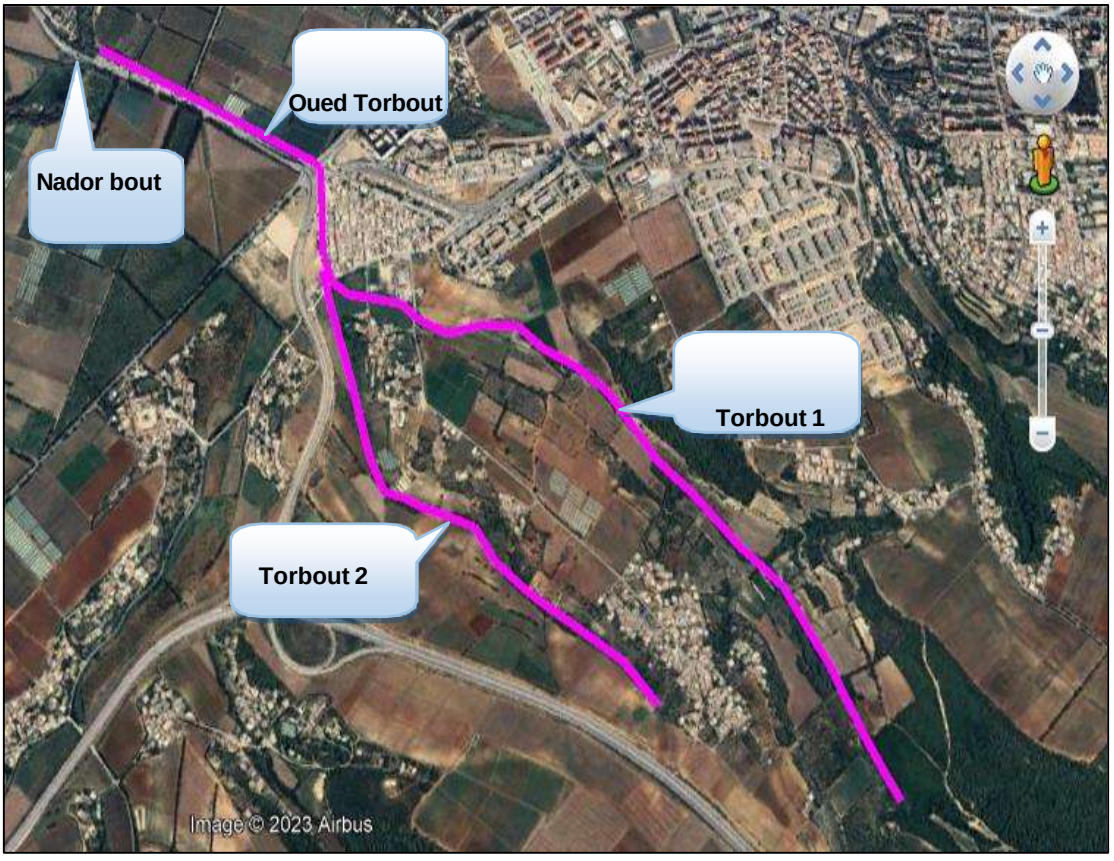


Figure IV-3 Image satellitaire d'oued Terbout et ces deux effluents

Voici une Image satellitaire représente les 3 traversées de l'affluents Terbout 1:



Figure IV-4 Image satellitaire représente les 3 traversées de l'affluents Terbout 1

Voici des figures qui illustrent l'etat des ouvrages de traversées des routes par Affluent d'Oued Terbout1



Figure IV-5 Etat des ouvrages de traversées des route par Affluent d'Oued Terbout 1 « OT1 , OT2 , OT3 »

Voici des figures qui montrent L'etat des ouvrages de l'oued Terbout 1



Figure IV-6 L'etat des ouvragede l'oued Terbout 1

Voici une Image satellitaire de Constructions sur la rive droite d'Oued Terbout :



Figure IV-7 : Constructions sur la rive droite d'Oued Terbout

Voici une Image satellitaire de l'ouvrage de traversée de la RN11 « OT04 » :



Figure IV-8 Image satellitaire de l'ouvrage de traversée de la RN11 « OT04 »

Voici des photos de L'amont et l'aval de la traversée de route :



Figure IV-9 Photos de L'amont et l'aval de la traversée de route



Figure IV-10 Etat du canal à ciel ouvert qui longe la route

Au cours de l'étude de terrain, plusieurs désordres ont été relevés sur le tracé de l'Oued Terbout et de ses affluents :

Le lit des affluents est obstrué par une végétation dense, notamment par la présence d'arbres et de broussailles.

Les traversées **OT1, OT2 et OT3** de l'affluent Terbout 1 présentent des encombrements importants dus à des dépôts de terres et à une accumulation de végétaux.

Au niveau de la traversée de la **RN11**, l'oued est affecté par des dépôts de terre et divers déchets, réduisant sa capacité d'écoulement.

La **rive droite de l'Oued Terbout** est marquée par la présence de constructions anarchiques, réalisées sans considération des risques liés aux inondations.

Dans la **partie aval**, en direction de l'Oued Nador, le canal à ciel ouvert est obstrué par des déchets, des dépôts de terre ainsi que des couches végétales, limitant l'efficacité de l'ouvrage d'écoulement

IV.3 Approches et méthodes de modélisation hydraulique

- **Modélisation 1D**

La modélisation unidimensionnelle (1D) considère l'écoulement selon l'axe longitudinal du cours d'eau. Elle permet d'obtenir des profils de ligne d'eau et des vitesses moyennes dans le lit mineur.

Cette approche est adaptée aux rivières à tracé simple, mais elle reste limitée pour décrire l'inondation dans les plaines alluviales.

- **Modélisation 2D**

La modélisation bidimensionnelle (2D) permet de prendre en compte les écoulements horizontaux (en plan). Elle est donc mieux adaptée aux plaines inondables et aux zones urbaines où les écoulements latéraux jouent un rôle déterminant. Les résultats obtenus sont plus réalistes, notamment pour la cartographie de l'extension spatiale des inondations.

- **Modélisation 3D**

La modélisation tridimensionnelle (3D) reproduit les gradients de vitesses et de pressions dans toutes les directions. Bien que très précise, elle est rarement utilisée à grande échelle en raison de son coût computationnel élevé et de la complexité des données nécessaires. Elle est réservée à des études fines, par exemple autour des ouvrages hydrauliques (ponts, barrages, vannes).

IV.4 1. Choix du modèle hydraulique

Le choix de l'outil **HEC-RAS (version 6.5)** s'explique par plusieurs raisons :

Sa capacité à représenter aussi bien les écoulements permanents que transitoires en régime à surface libre, y compris lors des débordements vers les plaines inondables.

Son accès libre et gratuit, ce qui en fait un outil largement utilisé dans la recherche et la pratique professionnelle

La possibilité d'intégrer différents ouvrages hydrauliques tels que les digues, ponts ou encore dispositifs de régulation (vannes, barrages) .

La disponibilité d'outils cartographiques permettant la délimitation et l'analyse des zones exposées au risque d'inondation.

IV.4.1 Présentation du logiciel HEC-RAS

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) est un logiciel développé par le Hydrologic Engineering Center de l'U.S. Army Corps of Engineers. Il est conçu pour la modélisation des écoulements à surface libre dans les rivières, canaux et plaines inondables.

Ce programme est aujourd'hui largement adopté par les bureaux d'études, les universités et les organismes publics à travers le monde.
Il se distingue par une interface intuitive qui facilite la configuration des scénarios de simulation et l'exploitation des résultats. HEC-RAS offre également des fonctionnalités avancées de visualisation et d'édition, permettant de représenter de manière détaillée les conditions hydrauliques et les zones potentiellement inondables.

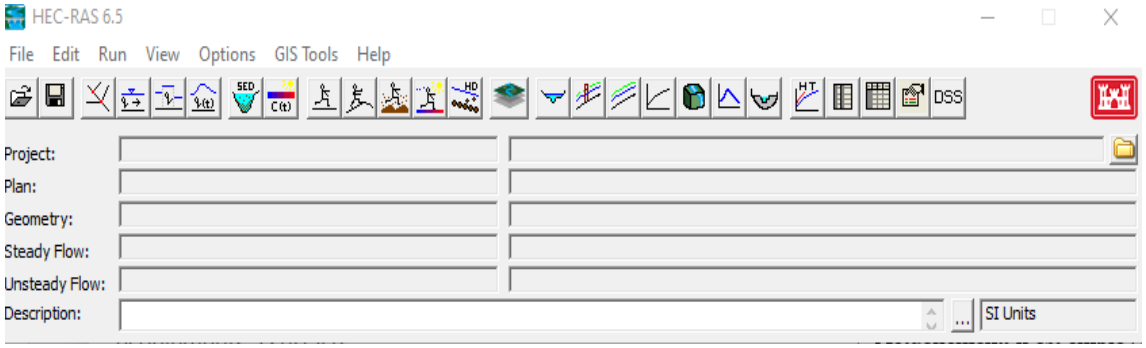


Figure IV.7 : Interface du logiciel HEC-RAS (version 6.5)

IV.4.2 Objectif du logiciel

L'objectif fondamental du logiciel HEC-RAS est de permettre la réalisation de calculs hydrauliques unidimensionnels appliqués aux réseaux de cours d'eau, qu'ils soient naturels ou artificiels. Il permet d'évaluer les hauteurs de la ligne d'eau en différents points du réseau, à partir d'un jeu de données hydrologiques et géométriques.

Le programme est conçu pour traiter aussi bien les régimes permanents que les régimes non permanents, en s'appuyant sur les hydrogrammes de propagation des crues afin de simuler l'évolution temporelle et spatiale des écoulements.

HEC-RAS repose sur la résolution des équations de Saint-Venant 1D, qu'il s'agisse de conditions stables ou transitoires, permettant ainsi de déterminer la progression de la ligne d'eau le long du profil étudié. Le modèle utilise l'équation d'énergie unidimensionnelle, intégrant les pertes de charge dues aux frottements par la formule de Manning-Strickle**r**, ainsi que les pertes liées aux contractions et expansions de l'écoulement.

Dans les situations présentant des variations rapides, telles que les ressauts hydrauliques, les écoulements au droit des ouvrages (ponts, seuils, confluences de rivières**)**, l'équation de l'énergie

est remplacée par l'équation de la quantité de mouvement, offrant une description plus précise des phénomènes hydrauliques complexes (Cheloufi & Foual, 2018).

IV.4.3 Fonctionnement de HEC-RAS

Le logiciel **HEC-RAS** offre la possibilité de simuler avec précision un vaste éventail de conditions d'écoulement. Son **centre de contrôle**, élément central du programme, permet de gérer, combiner et exploiter plusieurs types de données indispensables à la modélisation hydraulique, à savoir :

- Les informations géométriques du réseau hydrographique ;
- Les débits et les conditions aux limites associées ;
- Les paramètres de calcul nécessaires à la simulation ;
- Les résultats issus du traitement numérique (Idrici, 2017).

IV.4.4 Application de HEC-RAS à l'Oued étudié

- **Données nécessaires à la mise en œuvre du modèle**

L'application du modèle HEC-RAS exige la constitution d'une banque de données complète relative à la zone d'étude. Parmi les éléments essentiels, on retrouve :

- Une série de couples distance–altitude pour l'ensemble des profils en travers de l'oued ;
- La distance séparant deux sections transversales successives (prise à la fois sur les rives et sur l'axe principal du cours d'eau) ;
- Les coefficients de contraction et d'expansion des écoulements ;
- Les informations relatives au régime d'écoulement ainsi que les conditions aux limites (Jabbour, 2006).

- **Construction du modèle numérique de terrain (TIN)**

Pour utiliser HEC-RAS, il est d'abord nécessaire de construire le **TIN** du cours d'eau étudié. Le **TIN (Triangulated Irregular Network)** est un modèle numérique de terrain basé sur un maillage

de triangles irréguliers, qui permet de représenter avec précision la topographie du lit et des berges de l'oued. Cette étape est indispensable, car elle constitue la base de la modélisation hydraulique et conditionne la fiabilité des résultats obtenus.

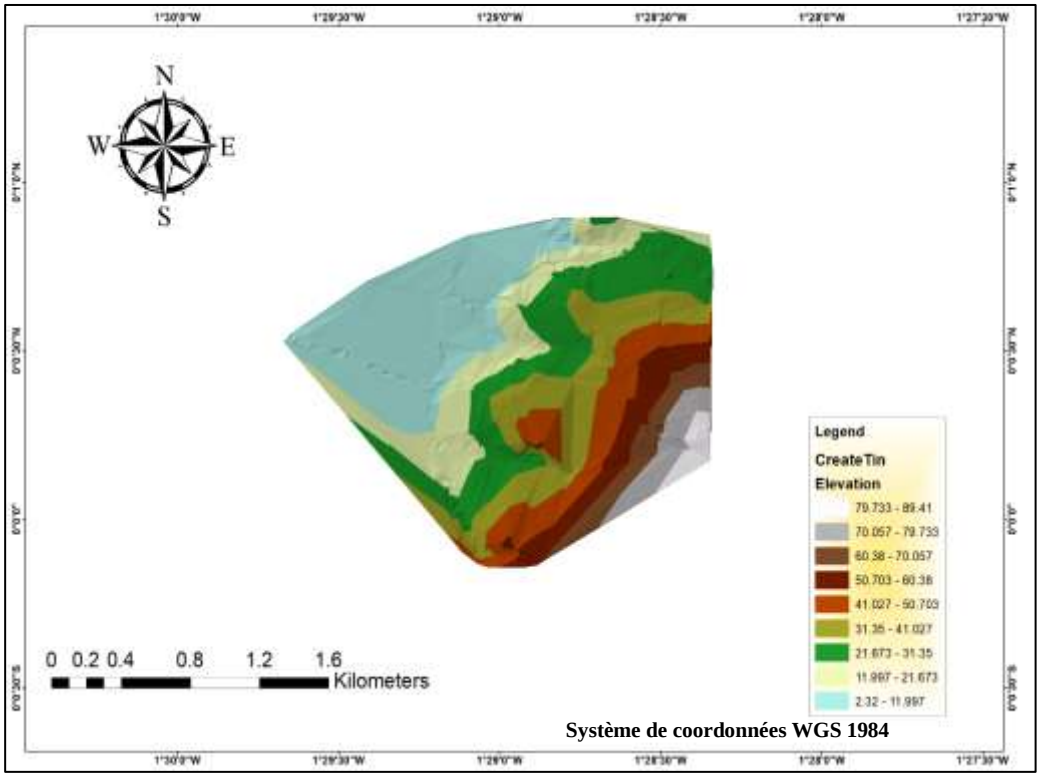


Figure IV-11 carte de tin

Après l'élaboration du TIN et son exportation, il convient de sélectionner le projet dans HEC-RAS puis d'intégrer le fichier ESRI (.prj) contenant les références spatiales. Ce fichier, qui définit le système de coordonnées, garantit la cohérence géographique des données dans l'environnement du modèle. L'ensemble de ces opérations s'effectue à travers l'outil RAS Mapper, qui constitue une interface essentielle pour la gestion et la visualisation des informations géospatiales. En effet, RAS Mapper permet non seulement d'importer et d'afficher les modèles numériques de terrain (MNT), mais aussi de tracer le réseau hydrographique (rivières et tronçons), de positionner les sections transversales et d'assurer la superposition correcte des données cartographiques. Par ailleurs, il offre la possibilité de visualiser directement les résultats des simulations hydrauliques (lignes d'eau, zones inondées, vitesses, profondeurs), ce qui en fait un outil central dans la mise en œuvre et l'analyse des modèles sous HEC-RAS.

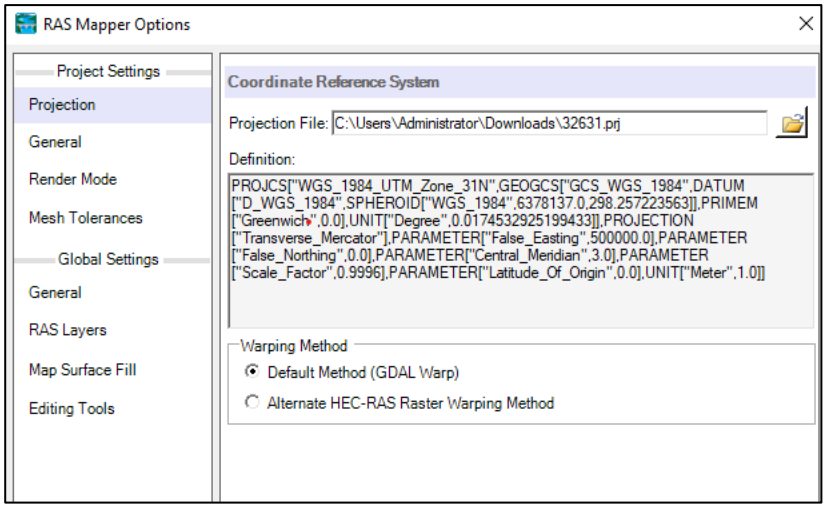


Figure IV-12 Chargement du fichier ESRI (.prj) dans RAS Mapper

Après l'insertion du fichier de projection et la mise en place des références spatiales, il est procédé au tracé de l'axe principal de l'oued, qui représente la ligne d'écoulement. À partir de cet axe, on définit ensuite le lit mineur, correspondant à la zone principale d'écoulement, ainsi que les limites d'inondation, qui délimitent l'extension possible des eaux lors des crues. Enfin, des coupes transversales (cross sections) sont tracées perpendiculairement à l'axe de l'oued afin de représenter la morphologie du lit et de servir de base aux calculs hydrauliques. Les résultats de ces étapes sont illustrés dans la figure ci-après, qui présente la configuration spatiale de l'axe de l'oued, du lit mineur, des limites d'inondation et des sections transversales.

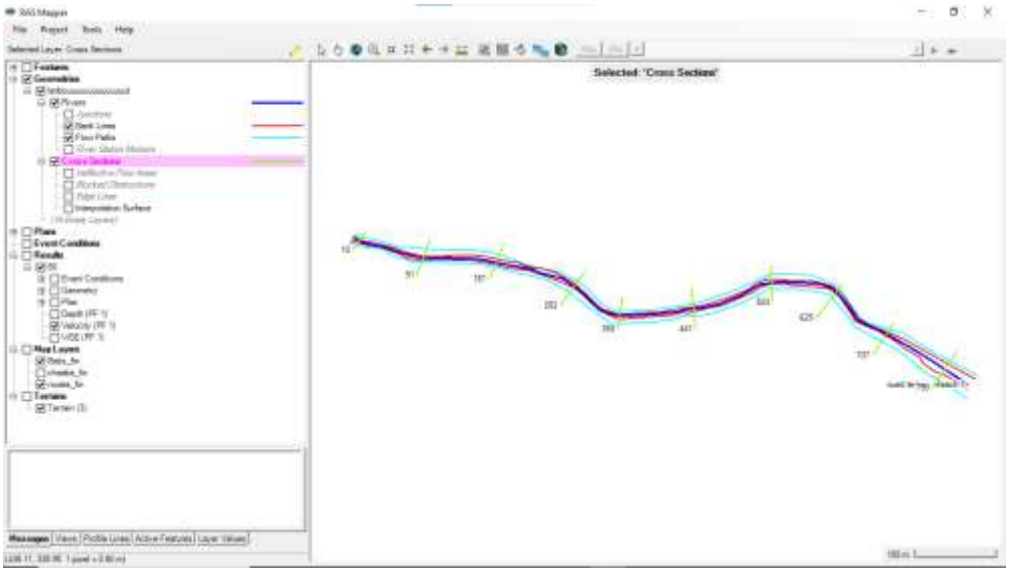


Figure IV-13 Représentation géométrique de l'oued Terbout1

- **Apports hydrologiques et conditions aux limites**

Après la préparation de la géométrie, il est procédé à l'insertion des données hydrométriques et des conditions aux limites dans HEC-RAS. Les données hydrométriques regroupent principalement les débits observés ou estimés, qui constituent l'information de base pour la modélisation hydraulique. Selon le type de simulation choisi, ces débits peuvent être introduits sous forme de valeurs fixes dans le cas d'un régime permanent (*Steady Flow*), ou bien sous forme d'hydrogrammes, représentant la variation du débit en fonction du temps, dans le cas d'un régime transitoire (*Unsteady Flow*). Les conditions aux limites, quant à elles, permettent de définir le comportement de l'écoulement aux extrémités du tronçon étudié. En amont, on impose généralement un débit d'entrée, tandis qu'en aval, on fixe un niveau d'eau, une condition critique ou encore une courbe de tarage, afin de représenter le plus fidèlement possible la réalité hydraulique du site. Ces informations sont indispensables car elles assurent la fermeture du modèle et conditionnent la fiabilité des résultats produits par la simulation.

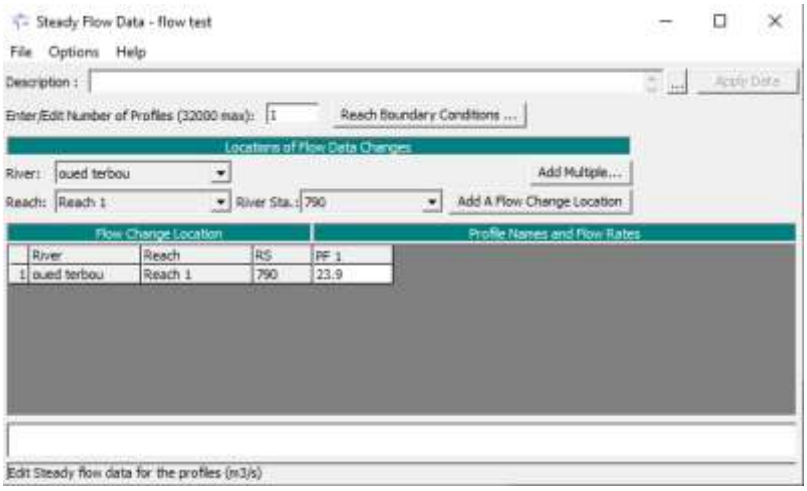


Figure IV-14 définition de débit

- **Simulation**

La simulation hydraulique sous HEC-RAS s'effectue à travers plusieurs étapes successives. Dans un premier temps, il est nécessaire de préparer la géométrie du modèle en définissant la rivière, ses tronçons ainsi que les sections transversales, en intégrant également les ouvrages éventuels tels que les ponts ou les barrages. Ensuite, on procède à l'introduction des données d'écoulement : pour un régime permanent, il s'agit de renseigner directement les débits, tandis qu'en régime transitoire, on introduit un hydrogramme représentant l'évolution du débit en fonction du temps. Une étape essentielle consiste aussi à définir les conditions aux limites, en fixant en amont un débit d'entrée et en aval un niveau d'eau ou une condition critique. Une fois ces éléments préparés, on crée un plan de calcul dans le module d'analyse approprié, en sélectionnant la géométrie et les données d'écoulement associées. Le calcul est alors lancé afin que le logiciel détermine automatiquement les profils de la ligne d'eau, les vitesses ainsi que les lignes d'énergie. Enfin, l'analyse des résultats se fait soit sous forme graphique, à travers les profils en long et les coupes transversales, soit sous forme tabulaire grâce aux tableaux récapitulatifs fournis par HEC-RAS.

- **Courbe de trace**

Les résultats issus de la simulation hydraulique sont présentés sous forme de courbes de tracé (curve plots), mettant en évidence la relation entre le débit et la hauteur d'eau. Ce type de représentation graphique, souvent désigné sous le terme de courbe hauteur-débit, constitue un outil fondamental en

hydraulique puisqu'il permet de visualiser la réponse du cours d'eau face à différentes conditions d'écoulement et facilite ainsi l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus. Les figures ci-après illustrent cette évolution et mettent en évidence les variations de la ligne d'eau en fonction des débits simulés.

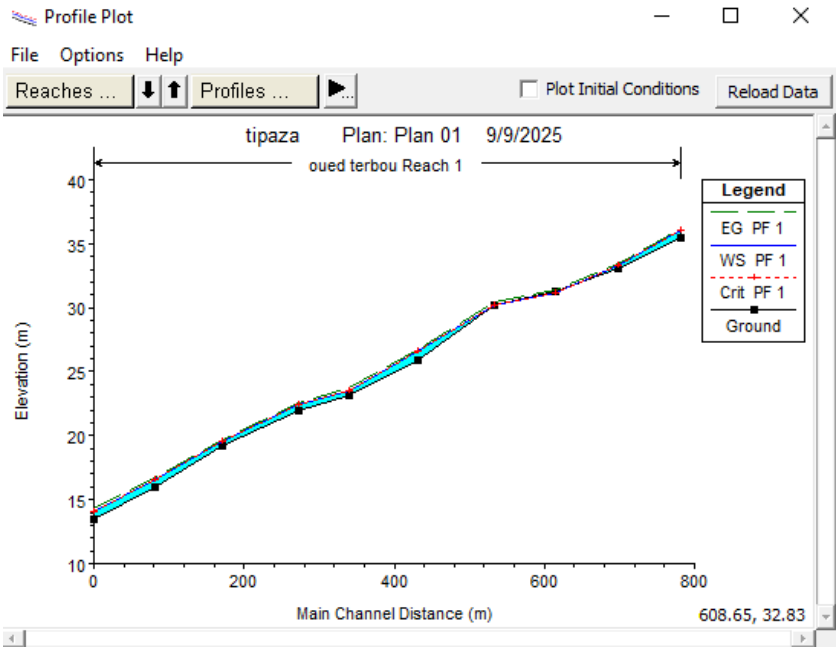


Figure IV-15 Courbe de trace

- **Profile en travers des sections**

L'analyse du profil en travers de l'oued Terbout 1 met en évidence la topographie du lit et des berges ainsi que le comportement hydraulique de l'écoulement pour le débit simulé. La ligne du terrain naturel (Ground) traduit la forme du chenal et la largeur disponible pour l'écoulement, tandis que la ligne d'eau (WS) illustre le niveau atteint par la surface libre. Lorsque cette ligne reste confinée entre les points de berge (Bank Stations), l'écoulement demeure contenu dans le lit mineur ; en revanche, si elle dépasse ces limites, un débordement vers la plaine d'inondation est observé. La présence de la ligne d'énergie (EG) légèrement au-dessus de la ligne d'eau reflète les pertes liées aux vitesses et aux frottements. L'ensemble de ces éléments permet d'évaluer la capacité hydraulique de la section, d'identifier les zones critiques et d'anticiper d'éventuels risques de débordement, **comme l'illustre la figure ci-après**.

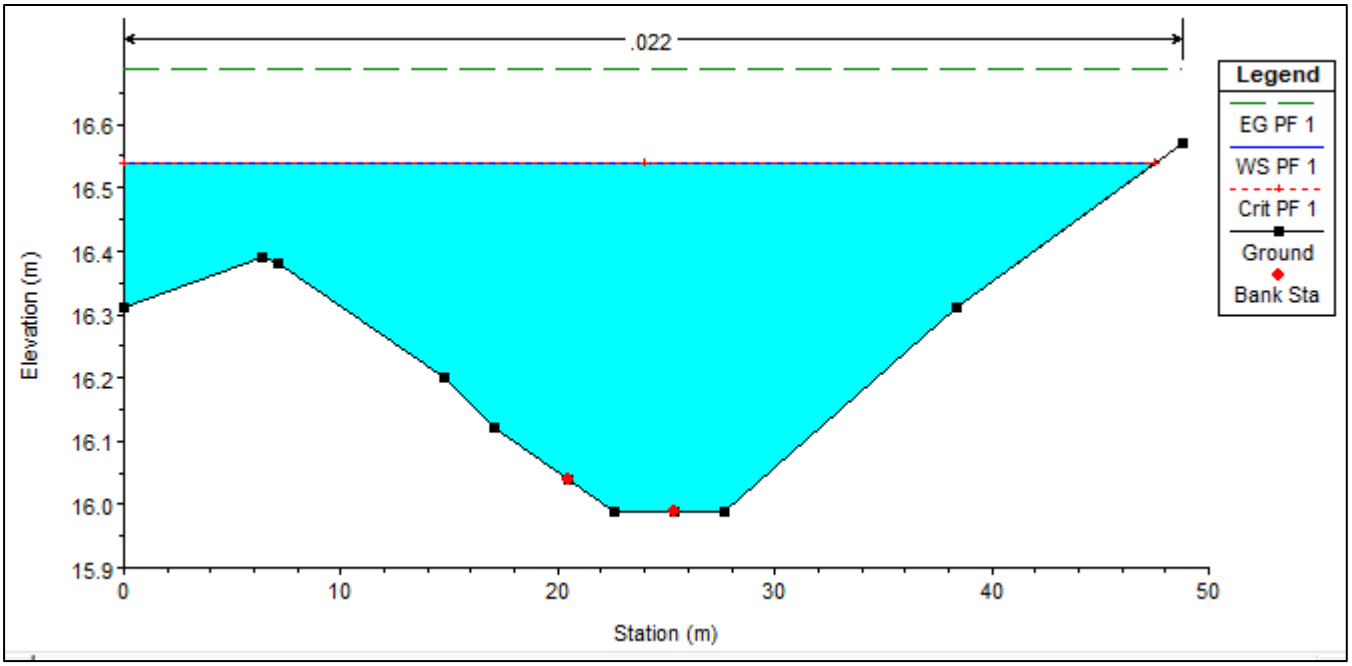
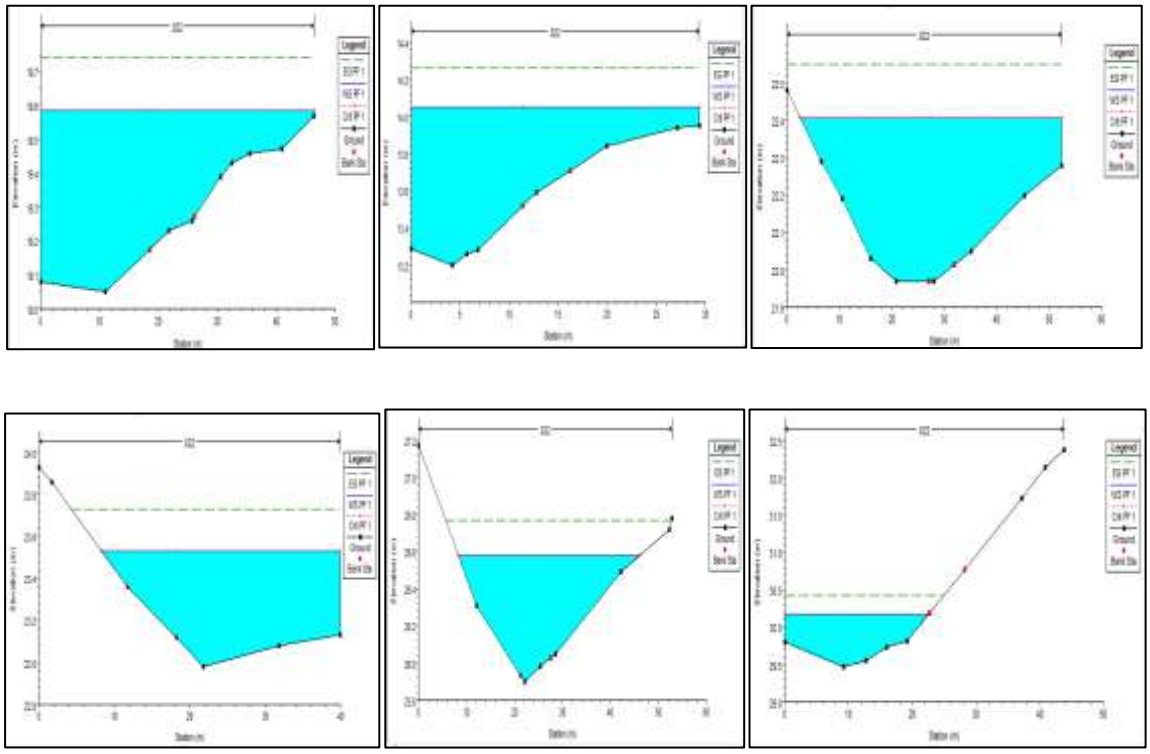


Figure IV-16 Profil en travers d'une section de l'oued terbout 1

Voici les profil en travers de l'oued trbout 1 :



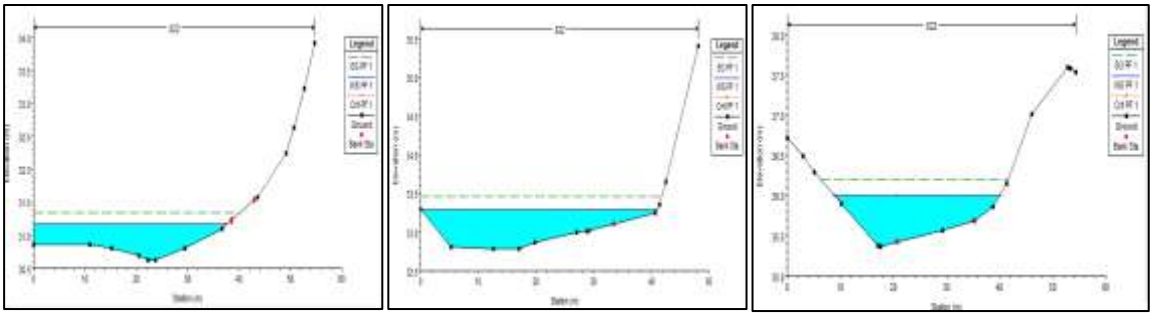


Figure IV-17 Profil en travers de l'oued trbout 1

Le logiciel HEC-RAS a permis de générer une représentation graphique de l'évolution de la hauteur d'eau (m) en fonction du débit (m^3/s), comme l'illustrent les figures suivantes. Cette relation, appelée **courbe hauteur-débit** ou **courbe de tarage**, exprime le lien entre le débit circulant dans le cours d'eau et le niveau d'eau correspondant, et constitue un outil essentiel pour l'analyse hydraulique et la prévision des crues.

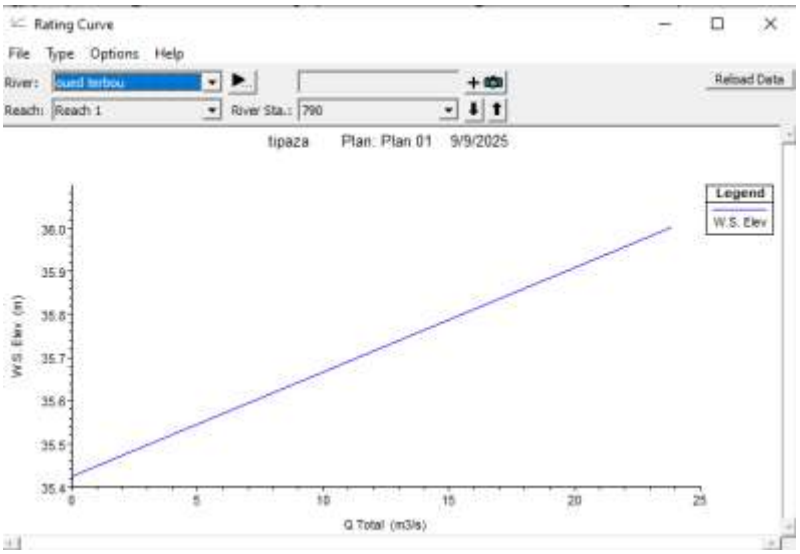


Figure IV-18 Courbe de tarage du tronçon modélisé de l'oued terbout 1

Dans le cadre de cette étude, le logiciel **HEC-RAS** a permis de générer un ensemble de résultats numériques relatifs aux conditions d'écoulement dans l'oued Terbout 1. Ces résultats comprennent différents **paramètres hydrauliques** tels que la hauteur d'eau, la vitesse moyenne, le débit, la pente

hydraulique ou encore le nombre de Froude. Ces indicateurs constituent des éléments essentiels pour apprécier la dynamique de l'écoulement, vérifier la capacité du lit à contenir les crues et identifier les zones où le risque d'inondation ou d'érosion est élevé. **La figure suivante présente la synthèse des principaux paramètres hydrauliques obtenus à partir des simulations sous HEC-RAS.**

Tableau IV-1 présentation des paramètres hydraulique

Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: 15 River: oued terbout 1 Reach: Reach 1 Profile: PF 1 Reload Data

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	379	PF 1	23.90	35.96	37.27		37.41	0.003278	1.87	15.52	17.89	0.54
Reach 1	375	PF 1	23.90	35.69	37.09	37.00	37.38	0.007085	2.57	10.99	14.96	0.78
Reach 1	372	PF 1	23.90	35.59	36.95	36.95	37.34	0.012940	2.94	8.76	12.12	1.00
Reach 1	368	PF 1	23.90	35.42	36.64	36.64	37.06	0.013186	2.98	8.60	11.18	1.01
Reach 1	364	PF 1	23.90	34.88	36.25	36.25	36.65	0.011784	2.95	8.81	11.66	0.97
Reach 1	359	PF 1	23.90	34.55	35.73	35.73	36.12	0.012265	3.01	8.95	12.30	0.99
Reach 1	355	PF 1	23.90	34.08	35.30	35.30	35.68	0.011220	3.03	9.17	12.13	0.96
Reach 1	350	PF 1	23.90	34.03	35.16	35.16	35.50	0.010274	2.96	10.08	15.03	0.93
Reach 1	346	PF 1	23.90	34.08	34.99	34.99	35.29	0.011659	2.76	10.39	16.94	0.96
Reach 1	341	PF 1	23.90	33.80	34.43	34.43	34.73	0.015116	2.57	9.87	16.64	1.04
Reach 1	337	PF 1	23.90	33.25	33.90	33.90	34.20	0.012681	2.21	10.20	16.64	0.93
Reach 1	333	PF 1	23.90	32.90	33.49	33.49	33.80	0.010560	1.89	10.48	17.12	0.84
Reach 1	328	PF 1	23.90	32.51	33.17	33.17	33.50	0.011542	2.16	9.98	15.32	0.90
Reach 1	322	PF 1	23.90	32.05	32.71	32.71	33.04	0.010622	2.01	10.15	16.55	0.85
Reach 1	318	PF 1	23.90	31.62	32.45	32.45	32.79	0.010047	2.22	10.11	15.81	0.86
Reach 1	315	PF 1	23.90	31.45	32.28	32.27	32.61	0.009990	2.23	10.03	14.85	0.85
Reach 1	312	PF 1	23.90	31.34	32.33		32.55	0.005694	1.96	12.48	15.79	0.67
Reach 1	309	PF 1	23.90	31.25	32.35		32.52	0.004264	1.84	13.59	14.60	0.59
Reach 1	305	PF 1	23.90	31.17	32.09	32.09	32.48	0.011920	2.72	9.16	12.00	0.96
Reach 1	299	PF 1	23.90	31.07	31.93	31.93	32.31	0.012624	2.78	9.16	12.06	0.99
Reach 1	291	PF 1	23.90	30.89	31.68	31.68	32.03	0.012941	2.68	9.50	13.80	0.99
Reach 1	286	PF 1	23.90	30.54	31.41	31.41	31.73	0.013485	2.88	9.67	14.94	1.02
Reach 1	280	PF 1	23.90	30.15	31.09	31.09	31.40	0.013170	2.88	10.04	16.44	1.01
Reach 1	275	PF 1	23.90	29.99	30.86	30.86	31.17	0.013558	2.90	10.01	16.38	1.03
Reach 1	269	PF 1	23.90	29.60	30.54	30.54	30.83	0.012137	2.99	10.49	17.48	0.99
Reach 1	264	PF 1	23.90	29.28	30.46		30.62	0.005150	2.25	13.93	18.50	0.67
Reach 1	259	PF 1	23.90	29.21	30.44		30.59	0.004588	2.12	14.35	18.26	0.63
Reach 1	254	PF 1	23.90	29.34	30.23	30.23	30.54	0.014185	2.85	9.95	16.61	1.04
Reach 1	250	PF 1	23.90	29.51	30.00	30.00	30.25	0.015830	2.12	10.84	21.79	1.01
Reach 1	246	PF 1	23.90	29.11	29.74	29.74	30.01	0.015548	2.26	10.42	19.33	1.01
Reach 1	241	PF 1	23.90	28.80	29.31	29.31	29.58	0.015562	1.98	10.49	19.91	0.98
Reach 1	238	PF 1	23.90	28.52	29.07	29.07	29.34	0.015289	2.21	10.52	19.86	1.00
Reach 1	232	PF 1	23.90	28.07	28.68	28.68	28.93	0.014169	2.32	10.93	21.10	0.99
Reach 1	227	PF 1	23.90	27.78	28.43	28.43	28.70	0.014296	2.56	10.60	19.50	1.02

Total flow in cross section.

IV.5 Cartographie du risque d'inondation

La cartographie des zones inondables constitue une étape essentielle dans l'évaluation et la gestion des risques hydrauliques. Elle repose sur l'analyse hydrologique et hydraulique des crues, complétée par des simulations réalisées à l'aide de modèles numériques tels que HEC-RAS. Ces simulations permettent de déterminer les niveaux d'eau atteints pour différents scénarios de crues et d'identifier les secteurs les plus exposés aux submersions.

L'outil RAS-MAPPER, intégré dans HEC-RAS, offre la possibilité de générer des cartes précises représentant l'étendue des inondations potentielles. Ces cartes mettent en évidence les zones vulnérables et constituent un support d'aide à la décision pour la planification territoriale et la mise en œuvre de mesures de prévention et de protection.

IV.5.1 Carte des profondeurs

Le paramètre de profondeur est l'un des plus déterminants pour évaluer l'impact d'une inondation. En effet, la dangerosité d'un événement de crue ne dépend pas uniquement de son étendue spatiale, mais également de la hauteur d'eau atteinte. La modélisation hydraulique permet de reproduire numériquement la dynamique des écoulements et de représenter les profondeurs associées à des crues de différentes périodes de retour.

Les cartes obtenues offrent ainsi une vision claire des zones les plus sensibles, en distinguant les secteurs faiblement, moyennement ou fortement submergés. Elles constituent un outil indispensable pour l'aménagement du territoire et pour la mise en place de stratégies de gestion des risques d'inondation.



Figure IV-19: Variation des hauteurs

Évolution des hauteurs d'eau dans l'oued Terbout (crue centennale) :

La simulation hydraulique correspondant à la période de retour de 100 ans (P100) a permis d'analyser l'évolution des hauteurs d'eau le long de l'oued Terbout. Les résultats obtenus mettent en évidence les niveaux atteints par la ligne d'eau en fonction des sections étudiées, ce qui permet d'évaluer la capacité d'écoulement du lit et d'identifier les zones potentiellement exposées au risque de débordement. Parallèlement, les cartes de vitesse générées par HEC-RAS apportent une lecture complémentaire en montrant la répartition spatiale des vitesses d'écoulement, permettant ainsi de localiser les secteurs où le courant est le plus intense et où les risques d'érosion sont accrus. **Les figures suivantes illustrent ces résultats en présentant à la fois la variation des hauteurs d'eau et la distribution des vitesses dans l'oued Terbout**



Figure IV-20 Variation des vitesses au niveau de la traversée de routes « Oued Terbout »

Conclusion

Dans ce chapitre, l'analyse hydraulique de l'oued Terbout 1 a été réalisée à l'aide du modèle HEC-RAS, en considérant le scénario d'une crue centennale. Les résultats de la simulation ont permis de mettre en évidence les zones sensibles aux débordements et d'établir une cartographie précise des hauteurs d'eau. Cette approche a contribué à identifier les secteurs les plus exposés, où l'intensité de l'aléa varie de modérée à élever. L'interprétation de ces résultats montre la nécessité de prévoir des aménagements adaptés afin de limiter les risques d'inondation et de renforcer la sécurité des habitants, des infrastructures et des espaces environnants.

Chapitre V : ETUDE DES VARIANTES

Chapitre V : Étude Des Variante D'aménagement

Introduction

L'étude des variantes d'aménagement constitue une étape fondamentale dans la gestion et la prévention des risques liés aux inondations. En effet, la conception d'un projet hydraulique ne peut se limiter à une seule solution, mais doit explorer plusieurs alternatives afin d'identifier celle qui s'adapte le mieux au contexte du bassin versant étudier. Ces variantes sont généralement évaluées à travers une approche multicritère intégrant des paramètres hydrauliques, techniques, économiques, sociaux et environnementaux.

L'objectif de cette analyse est donc de comparer différentes options d'aménagement, qu'il s'agisse de solutions structurelles (digues, canalisations, bassins de rétention, recalibrage de lits, etc.) ou non structurelles (zonage réglementaire, aménagements paysagers, entretien du lit, etc.). Chaque alternative est examinée selon son efficacité hydrologique et hydraulique, sa faisabilité technique, son coût d'investissement et d'entretien, ainsi que son impact sur l'environnement et l'urbanisation.

Ainsi, cette démarche permet de proposer un scénario optimal et durable, capable de réduire efficacement le risque d'inondation tout en respectant les contraintes locales et les objectifs de développement du territoire.

V.1 Principes généraux des aménagements hydrauliques

La gestion des cours d'eau et des zones inondables repose sur la mise en œuvre d'aménagements hydrauliques adaptés aux caractéristiques physiques, hydrologiques et socio-économiques du bassin versant. Ces aménagements visent principalement à réduire les risques liés aux crues, à protéger les zones urbanisées et agricoles, et à assurer une meilleure maîtrise des écoulements.

De manière générale, deux grandes catégories d'interventions peuvent être distinguées : les solutions **structurelles**, qui consistent en la réalisation d'ouvrages physiques destinés à modifier ou à contrôler l'écoulement, et les solutions non structurelles, qui relèvent plutôt de la planification, de la réglementation et de la gestion préventive du risque.

V.1.1 Techniques d'aménagement

La prévention des inondations repose sur la mise en œuvre de différentes techniques d'aménagement adaptées aux caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques des bassins versants. L'objectif principal de ces interventions est d'évacuer les eaux de crue de manière sécurisée vers l'exutoire, tout en assurant la stabilité des berges et en limitant les impacts environnementaux.

Ces aménagements peuvent être regroupés en deux grandes catégories : **les protections indirectes** et **les protections directes**.

V.1.2 La protection indirecte

La protection indirecte constitue une approche préventive visant à réduire l'impact des crues **avant même que celles-ci n'atteignent les zones vulnérables**. Elle repose sur des aménagements implantés en amont ou à distance des secteurs exposés, dans le but de diminuer l'intensité et le volume des débits acheminés vers les zones urbanisées. L'objectif est double :

Réguler les écoulements afin de limiter les débits de pointe responsables des inondations.

Réduire la vulnérabilité des espaces habités en intervenant sur la dynamique des crues à une échelle plus large que le site menacé.

Ainsi, les dispositifs de protection indirecte ne se contentent pas de protéger ponctuellement une zone sensible, mais visent à agir sur l'ensemble du fonctionnement hydrologique du bassin versant.

Les principales techniques utilisées dans ce cadre sont les suivantes :

- **Les canaux de dérivation périphériques**

Les canaux de dérivation constituent une solution efficace pour **rediriger les eaux excédentaires** vers des exutoires situés en dehors des zones à protéger. Ils consistent en la construction d'ouvrages linéaires permettant de transférer une partie, voire la totalité, des débits d'un cours d'eau vers un autre bassin hydrographique ou vers une plaine inondable non urbanisée.

Cette technique présente l'avantage de réduire directement la charge hydraulique qui menace les secteurs habités. Toutefois, elle nécessite une **analyse fine de la topographie et de la capacité hydraulique des zones réceptrices**, afin d'éviter le transfert du risque d'inondation vers d'autres

territoires. Dans certains cas, des dispositifs de régulation, tels que des vannes ou des seuils, sont intégrés pour contrôler les volumes dérivés.

- **Les barrages de retenue et de laminage des crues**

Les barrages constituent l'un des moyens les plus efficaces pour **lisser les hydrogrammes de crue** et réduire l'intensité des débits en aval. Ils permettent de stocker temporairement les volumes excédentaires lors des épisodes pluvieux extrêmes, puis de les restituer progressivement une fois la crue passée.

Le rôle du barrage est donc double :

Le stockage : il retient une partie du volume d'eau en excès, ce qui permet d'éviter que l'onde de crue n'atteigne son maximum dans les zones habitées.

Le laminage : il aplatit la pointe de crue et réduit la probabilité de débordement.

Pour être efficace, la conception d'un barrage de retenue doit tenir compte du **volume de stockage nécessaire**, de la **capacité de l'évacuateur de crues** et de la **sécurité structurelle de l'ouvrage**. Par ailleurs, ces ouvrages peuvent aussi contribuer à d'autres usages, comme l'alimentation en eau potable, l'irrigation ou encore la production d'énergie hydroélectrique.

- **L'aménagement des bassins versants**

L'aménagement du bassin versant constitue une approche complémentaire et durable, visant à **agir directement sur les processus hydrologiques et érosifs en amont**. L'idée est de limiter la vitesse d'écoulement et de favoriser l'infiltration des eaux de pluie, tout en réduisant le transport solide qui aggrave les inondations en colmatant les lits des cours d'eau.

Les principales mesures mises en œuvre sont :

Le reboisement et la végétalisation : en améliorant la couverture végétale, ces techniques favorisent l'infiltration et réduisent le ruissellement direct, tout en stabilisant les sols.

Les ouvrages de correction torrentielle : comme les seuils en gabions, les banquettes ou les petits barrages en terre, qui permettent de ralentir les écoulements et de piéger les sédiments en amont.

La gestion des pratiques agricoles : par l'adoption de techniques culturales adaptées (labours suivant les courbes de niveau, haies brise-vent, rotations culturales), on peut limiter la dégradation des sols et l'augmentation du ruissellement.

Ces interventions, souvent qualifiées de **mesures douces**, présentent l'avantage de concilier protection contre les inondations et préservation de l'environnement.

V.1.3 La protection directe

Contrairement aux mesures de protection indirecte, qui interviennent à l'échelle du bassin versant ou en amont des zones vulnérables, la **protection directe** consiste à **agir localement, sur les sites directement exposés aux inondations**. L'objectif est de réduire ou d'empêcher l'envahissement des zones habitées, agricoles ou industrielles par les eaux, en installant des ouvrages de défense adaptés aux conditions hydrauliques et géotechniques du milieu.

Ces interventions visent à contrôler l'écoulement **au point de contact avec les zones sensibles**, et sont souvent considérées comme des mesures de « dernier rempart » contre les crues. Elles se déclinent sous plusieurs techniques principales :

- **Le recalibrage du cours d'eau**

Le recalibrage consiste à **modifier la géométrie du lit** afin d'augmenter sa capacité d'écoulement. Cela peut se traduire par :

- L'élargissement de la section transversale,
- L'approfondissement du lit par abaissement du fond,
- Ou encore le redressement de certains tronçons.

Cette méthode permet d'accueillir des débits supérieurs sans débordement. Toutefois, elle doit être mise en œuvre avec précaution, car elle peut accélérer les vitesses d'écoulement et accentuer les phénomènes d'érosion ou d'instabilité des berges en aval. Dans ce sens, elle est souvent associée à d'autres mesures comme l'enrochement ou le végétalisation des rives.

- **L'endiguement du cours d'eau**

L'endiguement est une technique largement utilisée dans les zones urbaines et agricoles. Il consiste à ériger des digues ou des levées le long des berges, afin de **contenir les eaux dans le lit mineur même lors de crues importantes**.

Les digues offrent une protection directe et efficace, car elles permettent au cours d'eau d'accepter un débit bien supérieur à celui de plein bord. Néanmoins, elles présentent certaines limites : en cas de dépassement de leur capacité ou de rupture, les dégâts peuvent être considérables. Leur conception doit donc intégrer des critères de sécurité élevés, incluant la hauteur de protection, la stabilité géotechnique et l'entretien régulier des ouvrages.

- **Le reboisement et les techniques végétales de stabilisation**

Bien que souvent considérées comme des mesures indirectes à l'échelle du bassin, les **techniques végétales** peuvent aussi être appliquées directement sur les berges et les abords du cours d'eau. Leur rôle est d'assurer une **stabilité naturelle** des rives, de limiter l'érosion et de réduire l'entraînement de sédiments.

Le choix des espèces végétales dépend des conditions pédologiques et climatiques, ainsi que de la résistance mécanique des racines. Le reboisement et la plantation d'arbustes rivulaires constituent des méthodes durables, qui présentent l'avantage de renforcer l'intégration paysagère des ouvrages hydrauliques et d'améliorer la biodiversité.

- **Mise en place d'un lit artificiel (béton, enrochement, gabionnage, matelas Reno)**

Dans les secteurs urbanisés où la pression foncière est forte et où les risques sont élevés, il est fréquent de recourir à des **aménagements artificiels du lit**. Ces ouvrages consistent à protéger les berges et/ou le fond du cours d'eau par des structures résistantes telles que :

- **Des revêtements en béton armé**

Le recours au béton armé dans l'aménagement des lits de cours d'eau constitue une solution robuste et durable. Il consiste à recouvrir les berges ou le fond du lit par des dalles continues ou préfabriquées, renforcées par un ferraillage interne assurant une meilleure résistance mécanique.

Cette technique se révèle particulièrement efficace dans les zones urbaines où la maîtrise des écoulements doit être stricte, et où l'espace disponible pour les aménagements est limité. Le béton

armé présente une **forte résistance aux vitesses élevées d'écoulement** et nécessite un entretien relativement réduit. Cependant, il présente des limites notables, notamment son **coût élevé** et son **impact écologique négatif**, lié à la disparition d'habitats aquatiques et à l'imperméabilisation du lit, ce qui entraîne une rupture avec le fonctionnement naturel du cours d'eau.

- **Des enrochements massifs :**

L'enrochement consiste à disposer des blocs de pierres, de taille importante, le long des berges ou du fond du lit. Ce dispositif vise à **dissiper l'énergie cinétique de l'écoulement** et à stabiliser les zones exposées à l'érosion.

Comparée au béton armé, cette technique est plus souple et mieux intégrée au paysage, surtout lorsque les roches utilisées proviennent de carrières locales. Elle permet de concilier efficacité hydraulique et intégration esthétique. Toutefois, son efficacité dépend fortement de la qualité de la mise en place : un mauvais ancrage ou un choix inadapté de blocs peut entraîner une déstabilisation lors de crues exceptionnelles. Son coût peut également devenir élevé si l'approvisionnement en pierres nécessite un transport sur de longues distances.

- **Des gabions :**

Les gabions sont constitués de cages métalliques, généralement en treillis galvanisé, remplies de pierres de dimensions variables. Disposés en murs ou en talus, ils permettent de **protéger efficacement les berges** tout en maintenant une certaine perméabilité. Contrairement au béton, les gabions présentent l'avantage de laisser infiltrer l'eau, ce qui limite la pression hydrostatique exercée sur l'ouvrage.

Un autre atout majeur réside dans leur **souplesse structurelle**, qui leur permet de s'adapter aux tassements différentiels du sol sans rupture. Avec le temps, la végétation peut coloniser les interstices entre les pierres, favorisant ainsi une intégration écologique et paysagère. Néanmoins, la durée de vie des gabions demeure limitée par la **corrosion des treillis métalliques**, bien que l'utilisation de fils revêtus de PVC ou d'alliages anticorrosion puisse prolonger leur durabilité.

- **Ou encore des matelas Reno (grilles métalliques remplies de pierres) :**

Les matelas Reno représentent une variante des gabions. Il s'agit de cages métalliques de faible hauteur mais de grande extension en surface, remplies de pierres, et disposées le long des berges ou

au fond du lit. Leur rôle principal est de **stabiliser les pentes douces et de protéger le pied des berges contre le sapement**.

Grâce à leur conception aplatie, ces structures sont particulièrement efficaces pour contrôler l'érosion de fond et limiter la mobilité latérale du cours d'eau. Tout comme les gabions, les matelas Reno présentent une bonne intégration écologique et favorisent la colonisation végétale. Toutefois, leur longévité reste conditionnée à la résistance des treillis, qui doivent être protégés contre la corrosion et les sollicitations mécaniques liées aux crues.

Ces techniques présentent une grande efficacité mécanique et garantissent une stabilité face aux crues. Toutefois, elles restent coûteuses et peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement, en réduisant la continuité écologique et la capacité auto-épuratrice du cours d'eau. Leur utilisation doit donc être justifiée par l'importance des enjeux à protéger et accompagnée de mesures compensatoires, si possible.

V.1.4 Coefficient de rugosité

Le coefficient de rugosité est un paramètre hydraulique fondamental qui traduit la résistance exercée par le lit et les berges d'un cours d'eau à l'écoulement. Il prend en compte la nature du substrat (sable, gravier, roches, limons), la végétation, ainsi que les irrégularités morphologiques de la section. Cette résistance influence directement la vitesse de l'eau, les hauteurs de submersion et, par conséquent, la capacité d'écoulement du chenal.

Dans la modélisation hydraulique, le coefficient de rugosité est généralement représenté par le coefficient de Manning (n) ou, dans certains cas, par celui de Strickler (K = 1/n). Le choix de ce paramètre est déterminant, car il conditionne la précision des résultats de simulation des crues. Il est souvent estimé à partir de tables empiriques proposées par la littérature, ou bien calé à partir de mesures de terrain lorsque des données hydrométriques sont disponibles.

Une bonne estimation du coefficient de rugosité permet d'obtenir une représentation fidèle du comportement hydraulique du cours d'eau et contribue ainsi à améliorer la fiabilité des cartes de risque d'inondation et des études de dimensionnement des ouvrages.

Tableau V.1: les valeurs du coefficient de rugosité ‘n’. (Chen et cotton,1986)

Caractéristique du lit ou du revêtement	Valeur de la rugosité
Canal avec revêtement en béton	0.014
Canal en terre	0.022
Canal en pierre	0.025
Canal en Gabion	0.035

V.1.5 Marge de sécurité dans les canaux (Revanche)

Dans les canaux à surface libre, il est nécessaire de prévoir une marge de sécurité au-dessus de la ligne d’eau calculée afin de limiter tout risque de débordement. Cette réserve, appelée revanche, permet de prendre en considération différents aléas pouvant modifier le niveau réel de l’écoulement, tels que l’accumulation de sédiments, le développement de la végétation, les effets du vent ou encore la formation de remous locaux.

La valeur de cette marge n’est pas fixe : elle varie selon les dimensions et les caractéristiques du canal. Pour les petits canaux, une hauteur de l’ordre de 0,30 m est souvent jugée suffisante, tandis que pour les grands ouvrages, elle peut atteindre entre 0,60 m et 1,20 m. Toutefois, il convient d’adapter ces valeurs aux conditions spécifiques de chaque site, en tenant compte des contraintes particulières qui pourraient justifier un ajustement.

Tableau V.2: Revanches utilisées (Degoutte, 2012).

Débit (m^3/s)	Q< 0.75	0.75<Q<1.5	1.5<Q<8.5	Q>8.5
Revanche (m)	0.45	0.6	0.75	0.9

V.1.6 Vitesse d’érosion

La vitesse d’érosion correspond à la vitesse limite au-delà de laquelle l’écoulement d’eau commence à provoquer la déstabilisation et l’entraînement des matériaux constituant le lit ou les berges d’un canal. Lorsque cette valeur critique est dépassée, l’écoulement peut générer une dégradation progressive de la structure, entraînant des phénomènes tels que l’affouillement, l’élargissement ou la déformation de la section hydraulique.

Cette vitesse critique dépend de plusieurs facteurs, notamment de la nature et de la granulométrie des sols, de la cohésion des matériaux, ainsi que de la rugosité et de la pente du canal. Ainsi, pour

des sols fins ou peu consolidés, la vitesse d'érosion tolérable sera relativement faible, tandis que pour des terrains rocheux ou fortement consolidés, cette limite peut être beaucoup plus élevée.

La connaissance précise de la vitesse d'érosion est indispensable pour le dimensionnement et la protection des ouvrages hydrauliques, car elle permet de définir des mesures de stabilisation adaptées, telles que le revêtement du lit, la protection des berges ou l'aménagement de seuils dissipateurs d'énergie.

Tableau V-1 valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés (Degoutte, 2012)

Lit	Vitesse (m/s)
Pavage de pierre a une couche	2.50 - 4.50
Gabions	4.00 -6.00
Revêtement en béton	6.00-10.00
Béton amélioré	<10.00

V.2 Propositions d'aménagement de l'Oued Terbout

V.2.1 Variantes proposées pour l'aménagement de l'oued Terbout 1

Dans le cadre de cette étude, trois variantes d'aménagement ont été envisagées afin de protéger les zones vulnérables et de sécuriser l'écoulement des crues le long d'un tronçon de 790 m de l'oued Terbout 1. Chaque solution proposée présente des caractéristiques techniques et des avantages spécifiques, que nous détaillons ci-après.

V.2.1.1 Variante 1 : Canal en gabion

La troisième variante consiste en l'aménagement d'un canal trapézoïdal revêtu en gabions. Cette solution assure une bonne capacité d'écoulement tout en offrant une protection efficace contre l'érosion, grâce à la flexibilité et à la perméabilité des gabions. De plus, le profil trapézoïdal permet une meilleure intégration paysagère, en réduisant l'impact visuel et écologique par rapport à une structure en béton armé.

Le canal proposé présente une largeur en surface de 2 m. Sa grande base (D1), d'une largeur de 2,25 m (2 × 1,125 m), est associée à une hauteur de 1,125 m. Sur cette base repose une seconde base (D2), centrée, d'une largeur de 1,125 m et d'une hauteur de 1,125 m, ce qui confère au canal une forme trapézoïdale bien adaptée à l'aménagement en gabions.



Cas de suscitons des plusieurs chute



Protection des berges en gabionnage

Figure V-1 : Protection des berges en gabionnage

V.2.1.2 **Variante 2 : Canal rectangulaire en béton**

La deuxième variante proposée consiste en la réalisation d'un canal rectangulaire en béton armé d'une largeur de 3 m et d'une hauteur utile de 2 m, auquel s'ajoute une revanche de 0,5 m, soit une hauteur totale de 2,5 m.

Ce type d'ouvrage présente une excellente stabilité structurelle, une résistance élevée aux sollicitations hydrauliques et une durabilité remarquable.

Le revêtement en béton permet de limiter les pertes par infiltration et de réduire considérablement les risques d'érosion des berges.

En contrepartie, ce choix implique un coût de réalisation relativement élevé et exige un entretien régulier afin de prévenir l'envasement et le colmatage du canal.



Figure V-2 canal rectangulaire en béton

Voici un tableau qui montre une comparaison entre les deux variantes

Figure V-3 comparaison entre les variantes

Variante	Avantage	Inconvénient
Canal rectangulaire en béton	- Très résistant et durable. - Bonne maîtrise de l'écoulement. - Faibles pertes par infiltration. - Protection efficace contre l'érosion.	- Coût de réalisation élevé. - Impact environnemental et paysager important. - Entretien nécessaire pour éviter l'envasement.
Canal trapézoïdal en gabion	- Bonne capacité d'écoulement. - Protection contre l'érosion grâce aux gabions. - Intégration paysagère et écologique meilleure. - Coût modéré comparé au béton.	- Durée de vie plus limitée que le béton. - Risque de dégradation des gabions. - Nécessite un entretien fréquent.

V.2.2 Méthode de calcul hydraulique

- **Outil de calcul**

À partir des résultats issus du traitement cartographique et de l'analyse hydrologique, le dimensionnement hydraulique des sections de canal a été établi en considérant la crue de période de retour centennale (Q100). Le calcul des paramètres hydrauliques nécessaires à la définition des sections d'aménagement des oueds a été effectué à l'aide du logiciel **FlowMaster**, spécialement conçu pour l'analyse et le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

V.2.3 Calcule des variantes

V.2.3.1 Calcule pour la première variante

- **Le calcule hydraulique**

Après le calcul des principaux paramètres hydrauliques à l'aide de Flow Master, et avant la phase de simulation sous HEC-RAS, nous avons obtenu les résultats suivants pour le canal trapézoïdal revêtu en gabions

Tableau V-2 Résultats hydrauliques –canal trapézoïdal en gabions (Flow Master)

Variante N°01	Type	Label	Coefficient de rugosité	ngueur (m)	Pente du canal (m/m)	Profondeur normale (m)	Talu gauche (H:V)	Talu droit (H:V)	Largeur inférieure (m)	Débit (L/s)	Surface moullé (m²)
Oued Terbout 01	Trapezoidal en gabion	S01 OT01	0.03	50	0.020	**2.0**	0.250	0.250	**2.00**	20 770.00	6.1
		S04 OT01	0.03	150	0.020	**2.0**	0.250	0.250	**2.00**	21 140.00	6.2
		S04 OT01	0.03	200	0.020	**2.0**	0.250	0.250	**2.00**	21 330.00	3.8
		S04 OT01	0.03	340	0.020	**2.0**	0.250	0.250	**2.00**	23060.00	4.0
		S04 OT01	0.03	520	0.020	**2.2**	0.250	0.250	**2.00**	23310.00	4.0
		S04 OT01	0.03	790	0.020	**2.2**	0.250	0.250	**2.00**	23900.00	4.1

Tableau V-3 Résultats hydrauliques –canal trapézoïdal en gabions (Flow Master)

Variante N°01	Type	Label	Périmètre mouillé (m)	Rayon hydraulique (m)	Largeur supérieure (m)	Profondeur critique (mm)	Pente critique (m/m)	Vitesse (m/s)	Vitesse ENH (m)	Énergie spécifique (m)	Nombre de Froude
Oued Terbout 01 Section S2	Trapézoïdal en gabion	S01 OT01	6.1	0.8	3.01	2.0	0.019	4.13	0.87	2.88	1.018
		S04 OT01	6.2	0.8	3.02	2.1	0.019	4.14	0.88	2.91	1.017
		S07 OT01	6.2	0.8	3.02	2.1	0.019	4.15	0.88	2.92	1.017
		S35 OT01	6.4	0.8	3.08	2.2	0.020	4.22	0.91	3.06	1.013
		S39 OT01	6.5	0.9	3.08	2.2	0.020	4.23	0.91	3.08	1.012
		S69	6.5	0.9	3.10	2.2	0.020	4.26	0.92	3.13	1.011

Interprétation

Le canal trapézoïdal en gabions présente un écoulement **proche du régime critique** avec des vitesses modérées (≈4,1–4,3 m/s) et un nombre de Froude voisin de 1, traduisant un écoulement plus stable et mieux contrôlé. Le rayon hydraulique légèrement supérieur favorise une bonne capacité d'évacuation, tandis que les pentes critiques restent raisonnables. Cette configuration limite les risques d'érosion et offre une meilleure intégration hydraulique et environnementale par rapport au canal en béto

- **Simulation par HEC-RAS**

Suite au dimensionnement hydraulique préalable, une simulation a été réalisée sous HEC-RAS afin d'évaluer les performances du canal trapézoïdal revêtu en gabions. L'objectif de cette analyse est de vérifier la capacité d'écoulement, la répartition des vitesses et le comportement du profil en conditions de crue. Les résultats présentés ci-après permettent d'apprécier l'efficacité de cette variante en termes de protection contre l'érosion et d'intégration hydraulique, tout en tenant compte de la rugosité spécifique des gabions.

- **Les sections transversales**

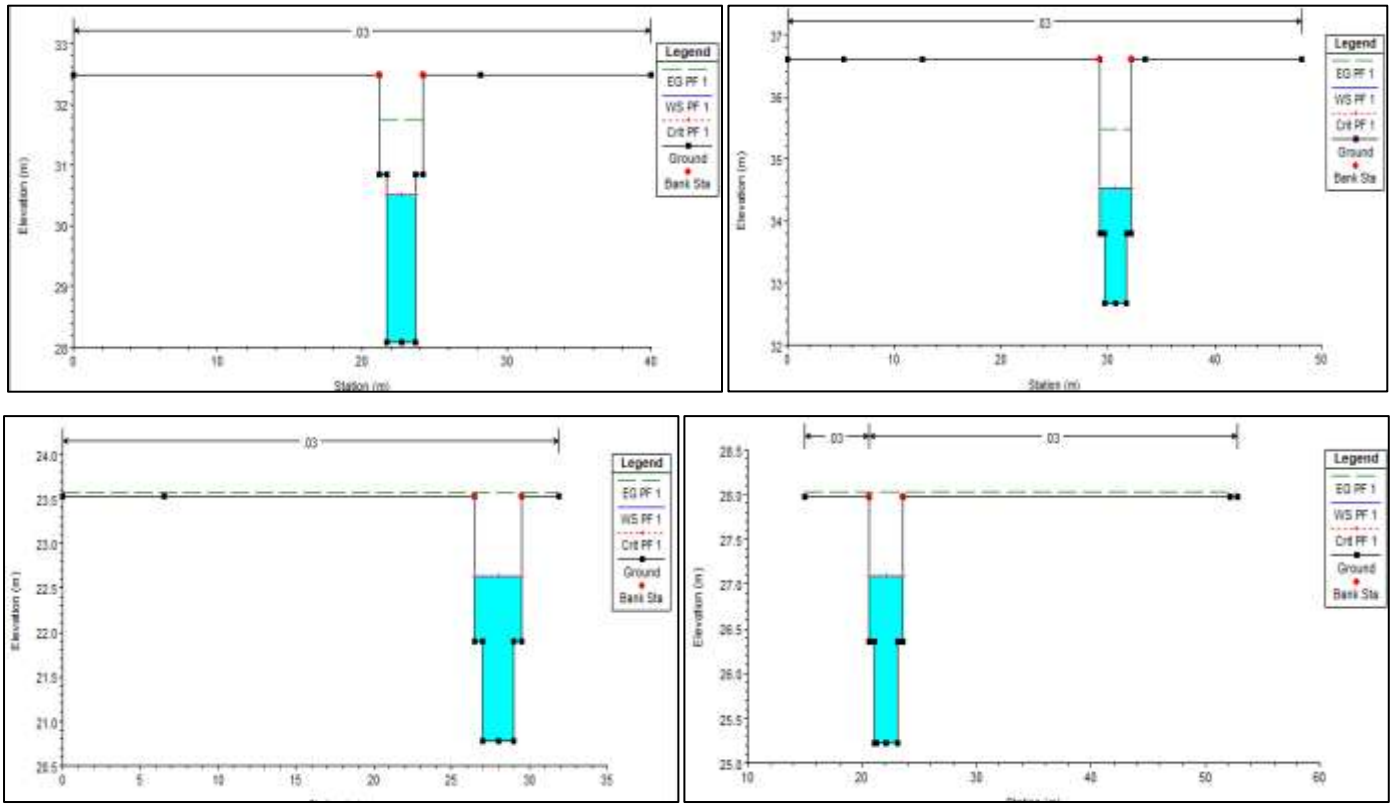


Figure V-4 : les sections transversales pour le canal de gabion

- **Les paramètres hydrauliques**

Tableau V-4 paramètres hydrauliques

HEC-RAS Plan: 20 River: oued terbou Reach: Reach 1 Profile: PF 1 — Reload Data

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	790	PF 1	23.90	35.00	37.23	37.23	38.17	0.024524	4.29	5.57	3.00	1.01
Reach 1	707	PF 1	23.90	32.68	34.76	34.91	35.87	0.030711	4.67	5.12	3.00	1.14
Reach 1	625	PF 1	23.90	30.38	32.60	32.61	33.55	0.024786	4.31	5.54	3.00	1.01
Reach 1	543	PF 1	23.90	28.08	30.52	30.52	31.75	0.034304	4.91	4.87	2.00	1.00
Reach 1	441	PF 1	23.90	25.23	27.31	27.47	28.42	0.030516	4.66	5.13	3.00	1.14
Reach 1	350	PF 1	23.90	22.68	24.80	24.96	26.01	0.023076	5.06	5.24	3.00	1.11
Reach 1	282	PF 1	23.90	20.78	22.73	23.01	24.02	0.037574	5.03	4.75	3.00	1.28
Reach 1	181	PF 1	23.90	17.95	20.18	20.18	21.12	0.024505	4.29	5.57	3.00	1.01
Reach 1	91	PF 1	23.90	15.43	17.50	17.66	18.62	0.030987	4.68	5.10	3.00	1.15
Reach 1	10	PF 1	23.90	13.16	15.39	15.39	16.33	0.024603	4.30	5.56	3.00	1.01

V.2.3.2 Calcule de la deuxième variante

À la suite du dimensionnement et des calculs effectués sous Flow Master, les paramètres hydrauliques caractéristiques du canal rectangulaire en béton armé ont été déterminés. Ces résultats permettent d'évaluer la capacité d'écoulement, la hauteur d'eau, la vitesse moyenne ainsi que les conditions de

stabilité hydraulique de l'ouvrage. Le tableau suivant récapitule les principales valeurs obtenues pour cette variante :

Tableau V-5 Résultats hydrauliques – canal rectangulaire en béton (Flow Master)

Variante N°01	Type	Label	Coefficient de rugosité	ngueur (m)	Pente du canal (m/m)	Profondeur normale (mm)	Largeur inférieure (m)	Débit (L/s)	Surface moullé (m²)
Oued Terbout 01	Rectangular en betone	S01 OT01	0.014	50	0.020	**1.00**	**3.00**	20 770.00	3.7
		S04 OT01	0.014	150	0.020	**1.00**	**3.00**	21 140.00	3.7
		S04 OT01	0.014	200	0.020	**1.00**	**3.00**	21 330.00	3.8
		S04 OT01	0.014	340	0.020	**1.00**	**3.00**	23060.00	4.0
		S04 OT01	0.014	520	0.020	**1.10**	**3.00**	23310.00	4.0
		S04 OT01	0.014	790	0.020	**1.10**	**3.00**	23900.00	4.1

Tableau Résultats hydrauliques – canal rectangulaire en béton (Flow Master)

Variante 02	Type	Label	Périmètre mouillé (m)	Rayon hydrauliq ue (mm)	Largeur supérieu re (m)	Profondeur critique (mm)	Pente critique (m/m)	Vitesse (m/s)	Vitesse EN H (m)	Énergie spécifique (m)	Nombre de Froude
Oued Terbout 01	Rectangular en betone	S01 OT01	4.9	0.6	3.0	1.7	0.004	7.11	2.58	3.55	2.301
		S04 OT01	5.0	0.6	3.0	1.7	0.004	7.15	2.60	3.59	2.298
		S07 OT01	5.0	0.6	3.0	1.7	0.004	7.16	2.62	3.61	2.297
		S35 OT01	5.1	0.6	3.0	1.8	0.005	7.32	2.74	3.78	2.282
		S39 OT01	5.1	0.6	3.0	1.8	0.005	7.35	2.75	3.81	2.282
		S69	5.2	0.6	3.0	1.9	0.005	7.40	2.79	3.87	2.277

Interprétation

Le canal rectangulaire en béton présente un écoulement **supercritique** avec des vitesses relativement élevées (7,1 à 7,4 m/s) et un nombre de Froude supérieur à 2, traduisant un régime torrentiel. Le périmètre mouillé et le rayon hydraulique restent stables, garantissant une bonne régularité de l'écoulement. Toutefois, ces vitesses importantes nécessitent la mise en place de

dispositifs dissipateurs d'énergie afin de limiter les risques d'érosion et de dégradation en aval, ce qui peut influencer les coûts d'entretien et de protection.

➢ **Simulation par HEC-RAS**

Après le dimensionnement hydraulique, une simulation a été effectuée sous HEC-RAS afin d'analyser le comportement hydraulique du canal rectangulaire en béton armé. Cette étape vise à vérifier la capacité d'évacuation des crues, la distribution des vitesses d'écoulement ainsi que la stabilité de la section. Les résultats obtenus permettent d'évaluer l'efficacité de cette solution en termes de performance hydraulique et de durabilité, tout en tenant compte de la rugosité réduite caractéristique du revêtement en béton.

- **Les paramètres hydrauliques**

Tableau V-6 paramètres hydrauliques

HEC-RAS Plan: 53 River: oued terbou Reach: Reach 1 Profile: PF 1 Reload D

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	790	PF 1	23.90	35.00	36.86	36.86	37.80	0.004621	4.29	5.57	3.00	1.00
Reach 1	707	PF 1	23.90	32.68	33.69	34.53	36.83	0.023591	7.85	3.04	3.00	2.49
Reach 1	625	PF 1	23.90	30.38	31.36	32.24	34.75	0.026320	8.16	2.93	3.00	2.64
Reach 1	543	PF 1	23.90	28.08	29.05	29.94	32.53	0.027296	8.27	2.89	3.00	2.69
Reach 1	441	PF 1	23.90	25.23	26.18	27.09	29.72	0.027858	8.33	2.87	3.00	2.72
Reach 1	350	PF 1	23.90	22.68	23.64	24.54	27.18	0.027956	8.34	2.87	3.00	2.73
Reach 1	282	PF 1	23.90	20.78	21.73	22.63	25.28	0.028005	8.35	2.86	3.00	2.73
Reach 1	181	PF 1	23.90	17.95	18.90	19.81	22.46	0.028030	8.35	2.86	3.00	2.73
Reach 1	91	PF 1	23.90	15.43	16.38	17.29	19.93	0.027949	8.34	2.87	3.00	2.72
Reach 1	10	PF 1	23.90	13.16	14.12	15.02	17.66	0.027876	8.33	2.87	3.00	2.72

- **Les sections transversales**

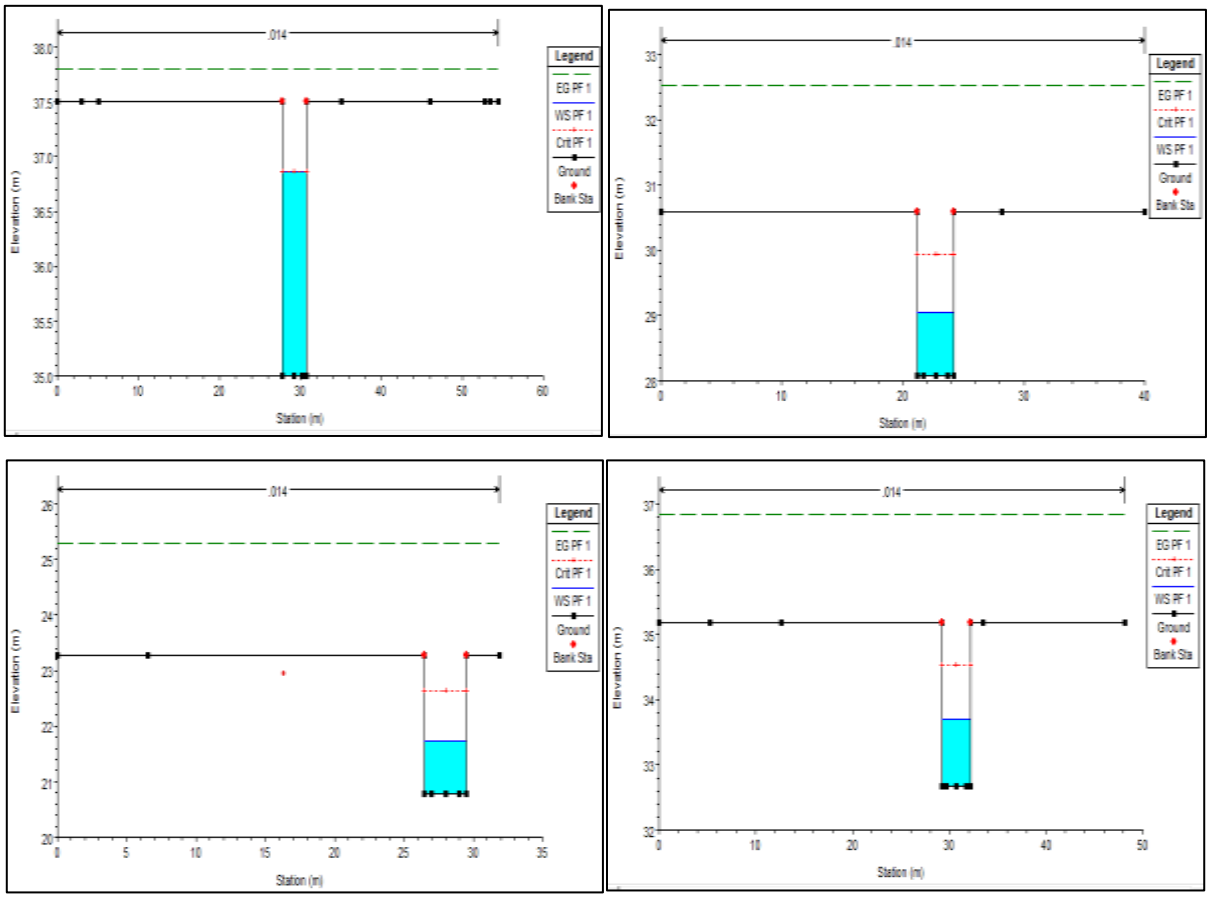


Figure V-5 les sections transversales de canal de béton

V.3 Calcul économique

Afin de comparer les différentes variantes d'aménagement proposées, une estimation économique a été réalisée. Ce calcul permet d'évaluer les coûts associés à la construction de chaque solution, en tenant compte principalement des volumes de matériaux, du prix unitaire des fournitures et de la main-d'œuvre. L'objectif est de disposer d'une base chiffrée claire pour apprécier l'investissement requis et faciliter le choix de la solution la plus adaptée. Les résultats détaillés de cette estimation sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.6 : Estimation du coût de la variantes N°1

Travaux		Unité	Quantité	X unitaire (DA)	ntant total (DA)
TERRASSEMENT	Déblai	m^3	2239.6	300.00	671880.00
	Remblai	m^3	1921	700.00	1344700
Gabion		CAISSE	1 185	6000	7 110 000
Remplissag		m^3	3000	3000	9 000 000
MONTANT EN HT					18126580.00
TVA 19%					3443050 .00
MONTANT EN TTC					21569630.00

Voici l'estimation du coût de la variantes de béton :

Tableau V-7 Estimation du coût de la variantes N°2

TERASSEMNT	Déblai	m^3	2144.244	300.00	643274.00
	Remblai	m^3	3382.2	700.00	2367540.00
Beton arme		m^3	1680,625	32000.00	53780000.00
Beton de propreté		m^3	237	9000	2 133 000
MONTANT EN HT					58 923 814.00
TVA 19%					11195525.00
MONTANT EN TTC					70 119 339.00

La figure suivante illustre la section type du canal en gabion adoptée dans le cadre de la variante retenue :

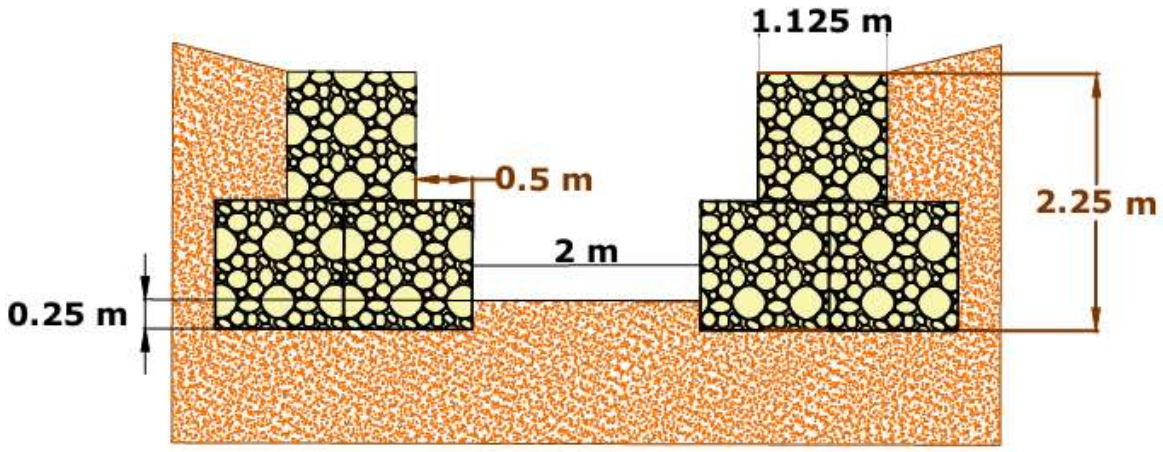


Figure V-6 Section type de canal en gabion

Conclusion

À l'issue de l'analyse technique et économique des différentes variantes proposées pour l'aménagement de l'Oued Terbout, il ressort que la solution en **gabions** constitue l'option la plus appropriée. En plus de sa bonne intégration dans l'environnement naturel et de sa capacité à limiter l'érosion, cette variante présente un coût global relativement maîtrisé par rapport au canal en béton armé.

Ce choix permet donc de concilier les impératifs techniques, environnementaux et financiers, tout en garantissant une solution durable et économiquement avantageuse pour la protection contre les inondations.

Chapitre VI : ORGANISATION DES CHANTIER

Chapitre VI : ORGANISATION DES CHANTIER

Introduction

L'organisation du chantier constitue une étape essentielle dans la réalisation d'un projet d'aménagement ou de construction. Elle permet d'assurer une exécution rationnelle et efficace des travaux, tout en respectant les délais, les coûts et les normes de qualité. Une organisation rigoureuse garantit également la sécurité du personnel et la réduction des impacts environnementaux.

VI.1 Organisation et ordonnancement du chantier

L'ordonnancement du chantier constitue une étape clé pour assurer l'efficacité et la réussite du projet. Une organisation rigoureuse permet non seulement de gagner du temps, mais aussi de réduire les pertes matérielles et d'éviter les doubles utilisations d'équipements. Elle contribue également à améliorer la sécurité des travailleurs et du matériel, tout en garantissant une meilleure qualité d'exécution.

La disposition des différents éléments sur le site doit être pensée de manière stratégique. Il s'agit notamment de faciliter la circulation des engins et véhicules, de prévoir des zones adaptées pour les livraisons et de sécuriser l'implantation des réseaux à l'aide de grillages avertisseurs et de bandes de signalisation normalisées.

Toutefois, la mise en place d'une telle organisation peut présenter des difficultés en raison de la complexité des travaux et des contraintes du terrain. Pour surmonter ces obstacles, il est essentiel de :

- Définir avec précision les techniques d'exécution ainsi que les procédures associées, en intégrant des méthodes modernes et performantes,
- Optimiser la répartition et la coordination des tâches grâce à une équipe qualifiée et spécialisée,
- Organiser les postes de travail de manière appropriée, en stabilisant les processus où une mécanisation avancée est nécessaire,

- Évaluer avec exactitude la quantité et la qualité de la main-d'œuvre requise, puisque le coût global du chantier dépend en grande partie du facteur humain.

➢ **Moyens humains**

La main-d'œuvre constitue un facteur déterminant pour la réussite du chantier. Elle est composée de plusieurs catégories de personnel :

- **Le personnel d'encadrement**, comprenant le chef de chantier, les ingénieurs et les techniciens responsables du suivi,
- **La main-d'œuvre spécialisée**, telle que les conducteurs d'engins, les mécaniciens et les opérateurs de machines,
- **La main-d'œuvre non qualifiée**, affectée aux travaux d'exécution simples et aux tâches de soutien.

La répartition des responsabilités entre ces différentes catégories favorise une meilleure coordination et un déroulement harmonieux des travaux.

➢ **Moyens matériels**

Les engins et équipements constituent une composante majeure de l'organisation du chantier. Leur choix dépend de la nature et de l'importance des travaux à réaliser. Parmi les matériels fréquemment utilisés, on peut citer :

- Les pelles mécaniques, bulldozers et niveleuses pour les terrassements,
- Les compacteurs et rouleaux vibrants pour la préparation des assises,
- Les camions et bennes pour le transport des matériaux,
- Les équipements de levage et de manutention pour les ouvrages spécifiques.

Une organisation adéquate de la maintenance est également nécessaire afin d'assurer la disponibilité continue du matériel.

➢ **Moyens financiers**

Le suivi financier du chantier repose sur une estimation préalable des coûts, qui inclut :

- Les dépenses liées à la main-d'œuvre,
- Les coûts de mobilisation et d'entretien des engins,
- Les frais d'acquisition des matériaux,
- Une provision pour imprévus.

Une gestion rigoureuse des coûts permet d'éviter les dépassements budgétaires et de garantir la viabilité économique du projet.

VI.2 Devis quantitatif et estimatif du projet :

➢ **Terrassements**

- Fouilles (m³) : volume d'excavation pour assise et fondations.
- Déblai/remblai (m³) : volume évacué ou réutilisé.
- Mise à niveau / réglage (m² ou m³).

➢ Fondations et assises

- Massifs ou lit de pose (gravillon, couche de fondation) (m³).
- Béton de propreté / semelle si nécessaire (m³).

➢ **Gabions**

- Nombre de **panier(s) / caisson(s)** (pièces) : selon dimensions (L×H×P).
- Volume extérieur de gabion (m³) = L × H × P (dimensions extérieures).
- Volume utile de pierre (m³) — voir **facteur de remplissage** ci-dessous.

➢ **Remplissage (pierres)**

- Volume de pierre nécessaire (m³ ou tonnes) pour remplir les gabions.
- Masse (tonnes) = volume (m³) × densité apparente (≈ 1,6–1,8 t/m³ selon pierre).

➢ **Filtrations et géotextiles**

- Géotextile (m²) : nappes sous gabions, séparation, recouvrement (prévoir recouvrement de 10%).
- Tôles/grillages avertisseurs le cas échéant (m).

➢ **Remblayage et compactage**

- Remblai derrière gabion (m³), compactage (m² ou m³).
- Fourniture et pose couches de remblai (épaisseur × surface).

➢ **Finitions et protection**

- Revêtement de berge, plantations, protection temporaire (m² / m).

➢ Frais généraux, marge et imprévus

- Mobilisation / démobilisation (forfait).
- Provision pour imprévus (5–10 %).
- TVA / taxes (selon contexte).

VI.3 Volume des travaux

Avant toute modélisation hydraulique sur HEC-RAS, il est indispensable de définir les profils types et d'évaluer les volumes de matériaux nécessaires à l'aménagement. Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Covadis, qui permet d'exploiter les relevés topographiques disponibles pour tracer l'axe du cours d'eau. À partir de cet axe, les profils types sont construits en intégrant les paramètres géométriques recherchés, tels que la largeur, la profondeur et la pente des berges, ainsi que les solutions de protection prévues (matelas Reno, gabions, béton, etc.).

Une fois les profils établis, la ligne de projet est générée et ajustée afin de prendre en compte les contraintes locales et les objectifs de l'aménagement. Covadis fournit alors les outils nécessaires pour quantifier les volumes de terrassement, le béton à mettre en œuvre, les gabions à poser, les géotextiles à installer, ainsi que l'ensemble des matériaux inclus dans les profils types.

Cette démarche garantit une estimation fiable des quantités de matériaux, offrant ainsi une base solide pour la planification et la gestion du projet. Enfin, afin d'obtenir une évaluation financière, un tableau récapitulatif des calculs quantitatifs et estimatifs est présenté ci-après, détaillant les volumes de chaque matériau pris en compte dans l'étude.

Tableau VI-1Devis quantitatif et estimatif du projet

Travaux		Unité	Quantité	X unitaire (DA)	ontant total (DA)
TERRASSEMENT	Déblai	m^3	2239.6	300.00	671880.00
	Remblai	m^3	1921	700.00	1344700
Gabion		CAISSE	1 185	6000	7110000
Remplissag		m^3	3000	3000	9 000 000
géotextile		m^3	2 666,25	200	533 250
Transport et main d'oeuvre		/	/	/	3 681 000
MONTANT EN HT					22 340 830
TVA 19%					4 244 758
MONTANT EN TTC					26 585 588

Le coût total des travaux d'aménagement par gabions est estimé à **26 585 588 DA TTC**, soit **vingt-six millions cinq cent quatre-vingt-cinq mille cinq cent quatre-vingt-huit dinars toutes taxes comprises**.

VI.4 Planification

VI.4.1 Planification de projet

La planification de projet désigne l'organisation et la structuration des différentes tâches nécessaires à la réalisation d'un ouvrage. Elle permet non seulement de définir les responsabilités et les compétences requises, mais aussi d'optimiser l'efficacité du travail. Les objectifs principaux d'un planning sont de suivre en temps réel l'avancement des opérations,

d’évaluer les durées nécessaires à chaque étape et de simplifier les méthodes de travail grâce à une organisation rationnelle.

VI.4.2 Étapes de la planification

La mise en place d’un planning commence par la collecte et l’analyse des informations issues d’études comparatives. Ensuite, le projet est décomposé en plusieurs tâches précises, chacune étant attribuée à une équipe avec ses moyens matériels et une durée d’exécution. Ces tâches peuvent être liées par une succession logique (ordre obligatoire) ou par des préférences permettant une réalisation parallèle. Pour ce type d’ouvrage, la méthode du chemin critique (CPM) est souvent adoptée car elle identifie les tâches essentielles qui déterminent la durée totale du projet.

VI.5 Types et techniques de planification

Trois types de plan de travail peuvent être envisagés : au plus tôt, où les tâches commencent dès que possible ; au plus tard, qui vise à minimiser les coûts en retardant au maximum les débuts des opérations ; et un plan intermédiaire qui équilibre entre disponibilité des ressources et optimisation du temps. Pour représenter ces plannings, on distingue les méthodes basées sur le réseau (CPM et PERT) et celles basées sur les graphiques, comme le diagramme de Gantt. Alors que les réseaux montrent les relations entre les tâches, le Gantt offre une meilleure vision chronologique de l’avancement.

VI.5.1 Construction du réseau

La réalisation d’un réseau de planification suit plusieurs étapes. Il faut d’abord établir une liste détaillée des tâches avec leurs durées, ressources et dépendances. Vient ensuite l’identification des tâches antérieures, puis la construction de graphes partiels représentant les enchaînements logiques. Ces graphes peuvent être regroupés pour donner une vue d’ensemble du projet. Enfin, on détermine les tâches de début et de fin avant de construire le réseau global. Cet outil visuel permet au responsable de projet de mieux contrôler les délais, les ressources et le suivi global du chantier.

VI.5.2 Méthodes basées sur le graphique

Pour la planification et le suivi des projets de construction, plusieurs méthodes graphiques permettent de visualiser les tâches et leur enchaînement. Parmi celles-ci, la méthode linéaire et la méthode à barres sont les plus couramment utilisées.

La méthode linéaire, ou Line of Balance, est particulièrement adaptée aux projets où certaines opérations se répètent de manière identique à plusieurs reprises. Elle est idéale pour les grandes constructions, telles que les bâtiments standardisés ou les ouvrages linéaires comme les routes et les voies ferrées, où la répétition des tâches peut être exploitée pour améliorer l'efficacité de la planification.

La méthode à barres repose sur l'élaboration d'un diagramme et de réseaux permettant de visualiser les interdépendances entre les activités. Elle facilite la détermination de la séquence optimale des opérations et offre une vision globale du calendrier du projet, utile pour coordonner les différentes tâches et suivre leur avancement.

Le choix de la méthode de planification dépend essentiellement de la nature de l'ouvrage et du type de travaux à réaliser. Dans le cas de projets où les opérations suivent une séquence particulière, la méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technique) s'avère particulièrement adaptée (Benlaoukli, 2020).

VI.5.3 Méthode de calcul P.E.R.T

La méthode P.E.R.T repose sur l'analyse des tâches en termes de durée et de dépendances, afin d'optimiser le planning et de gérer les marges de sécurité. Les principaux paramètres à considérer sont :

- **DCP (Date de début au plus tôt – Early Start)** : moment le plus tôt auquel une tâche peut débuter en tenant compte des contraintes et des dépendances.
- **Tr (Temps de réalisation)** : durée estimée pour accomplir une tâche.
- **DFP (Date de fin au plus tôt – Early Finish)** : date la plus proche à laquelle une tâche peut être achevée.
- **DCPP (Date de début au plus tard – Late Start)** : dernière date possible pour commencer une tâche sans retarder le projet.
- **DFPP (Date de fin au plus tard – Late Finish)** : dernière date possible pour terminer une tâche sans impacter le calendrier global.

- **MT (Marge Totale)** : temps supplémentaire dont dispose une tâche sans affecter le chemin critique, calculé comme la différence entre les dates de début ou de fin au plus tôt et au plus tard :

- DFP=DCP+TretDCPP=DFPP–TrDFP = DCP + Tr \quad \text{et} \quad DCPP = DFPP – TrDFP=DCP+TretDCPP=DFPP–Tr

Ces paramètres permettent de construire un planning précis et de déterminer les éventuelles marges disponibles pour chaque tâche, contribuant ainsi à une gestion efficace du projet.

VI.5.4 Chemin critique

Le chemin critique représente la suite d'opérations dont la durée totale détermine la durée globale du projet. Les tâches situées sur ce chemin sont caractérisées par une **marge totale nulle (MT = 0)**.

Pour identifier le chemin critique, deux conditions doivent être vérifiées :

- Chaque opération incluse dans le chemin doit avoir une marge totale nulle.

- La somme des durées des opérations sur ce chemin doit correspondre à la durée totale du projet.

La détermination du chemin critique est essentielle pour la planification, car elle permet de repérer les tâches qui ne peuvent être retardées sans retarder l'ensemble du projet, offrant ainsi un outil de suivi indispensable pour la réussite du planning.

VI.6 Le diagramme de Gantt

Le diagramme de Gantt est un outil largement utilisé en gestion de projet, reconnu pour sa capacité à représenter visuellement l'avancement des différentes activités d'un projet. Il se compose d'une liste des tâches à réaliser sur le côté gauche et d'un en-tête représentant 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 respectivement la date de début, la durée et la date de fin de l'activité.

Ce diagramme permet de visualiser rapidement :

- la séquence et les dépendances entre les tâches,

- les dates prévues de début et de fin pour chaque activité,
- la durée de chaque tâche,
- les chevauchements ou les périodes d'inactivité entre les tâches,
- et l'état d'avancement du projet en comparant les dates planifiées aux dates réelles.

Ainsi, le diagramme de Gantt offre une vision globale et claire de la planification, facilitant le suivi et la gestion des différentes étapes du projet.

Par ailleurs, la méthode PERT (Program *Evaluation and Review Technique*) constitue une approche complémentaire de planification, visant à réduire le temps et les coûts de réalisation tout en optimisant la performance du travail.

Le tableau ci-dessous synthétise les tâches prévues pour l'aménagement du canal en gabion, en indiquant leur durée, leur séquence et les marges disponibles, offrant une vision claire de la planification du projet.

Tableau VI-2 les tâche des travaux

Notation	Opération	Durée
A	Installation du chantier	15
B	Terrassement	20
C	Compactage	10
D	Installation du géotextile	10
E	Montage des gabions	15
F	Remplissage des gabions	25
G	Vérification et finition	10
H	Clôture	1

I'llustration suivante présente le diagramme de GANTT

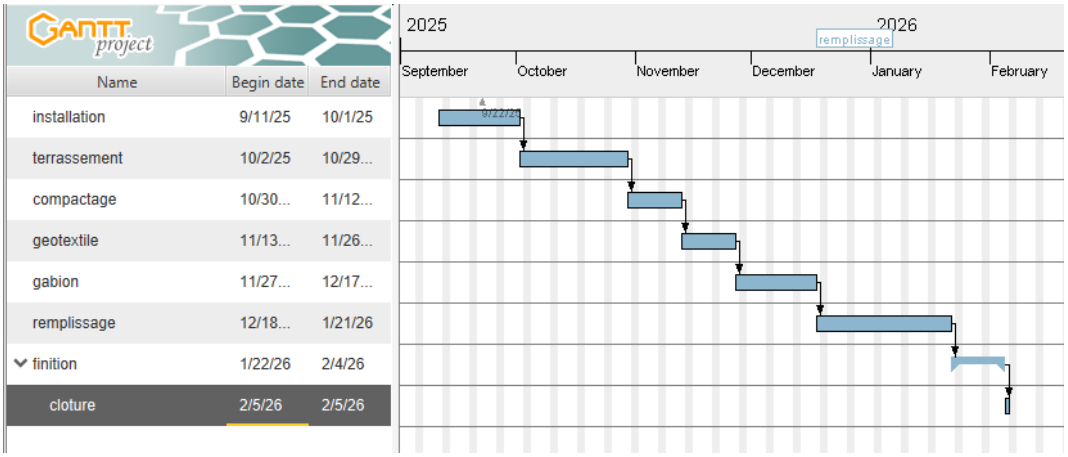


Figure VI-1 diagramme de GANTT

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons estimé le **coût** et le **temps de réalisation** du projet d'aménagement de l'Oued Terbout 1, consistant en la construction d'un canal trapézoïdal en gabions. Le projet est conçu pour assurer sécurité et efficacité dans l'exécution des travaux.

Le **coût total** du projet est estimé à **26 585 588 DA**, et le **délai de réalisation** est de **106 jours**.

Chapitre VII : SECURITE DE TRAVAILLE

Chapitre VII : Sécurité de travaille

Introduction

La sécurité au travail constitue un pilier fondamental dans toute activité professionnelle, en particulier dans le domaine du génie civil et des travaux publics, où les risques liés aux chantiers sont multiples. Elle englobe l'ensemble des mesures, procédures et pratiques destinées à protéger la santé des travailleurs, à prévenir les accidents et à réduire les dangers susceptibles de compromettre la réussite du projet.

En effet, un chantier de construction ou d'aménagement implique l'utilisation de machines lourdes, la manipulation de matériaux variés, l'exposition à des environnements instables ainsi qu'à des conditions climatiques parfois défavorables. Ces facteurs, s'ils ne sont pas correctement anticipés et maîtrisés, peuvent provoquer des incidents graves, allant de simples blessures à des accidents mortels.

Mettre en place une politique de sécurité efficace revient donc à instaurer une culture de prévention au sein du chantier. Cela se traduit par la formation du personnel, le respect des normes en vigueur, l'utilisation des équipements de protection individuelle (EPI), ainsi que la mise en œuvre de dispositifs collectifs de sécurité. Au-delà de la protection des travailleurs, la sécurité contribue également à l'efficacité et à la qualité des travaux, en réduisant les interruptions dues aux accidents et en améliorant la productivité.

Ainsi, la sécurité du travail ne doit pas être considérée comme une contrainte, mais comme une exigence incontournable et un facteur déterminant dans la réussite durable de tout projet.

VII.1 Les causes des accidents survenant lors de la phase de construction

La phase de construction est l'une des étapes les plus critiques d'un projet, car elle concentre une diversité d'activités qui présentent de nombreux risques pour la sécurité des travailleurs. Les accidents qui surviennent durant cette phase sont généralement la conséquence de plusieurs facteurs interdépendants, que l'on peut regrouper comme suit :

➢ **Facteurs humains**

- Le manque de formation et de sensibilisation du personnel aux règles de sécurité.
- La fatigue, la négligence ou le non-respect volontaire des consignes.
- L'absence ou le mauvais usage des équipements de protection individuelle (EPI).

➢ **Facteurs liés à l'organisation du chantier**

- Une planification insuffisante des tâches et des méthodes d'exécution.
- Une mauvaise coordination entre les différentes équipes ou corps de métiers.
- Le non-respect des normes et règlements de sécurité en vigueur.

➢ **Facteurs techniques et matériels**

- L'utilisation de machines ou d'outils défectueux, mal entretenus ou inadaptés.
- La manipulation de matériaux lourds ou instables sans dispositifs de sécurité.
- L'absence de protections collectives telles que les garde-corps, filets ou signalisation adéquate.

➢ **Facteurs environnementaux**

- Les conditions climatiques défavorables (pluie, vent, chaleur extrême) qui augmentent les risques de chute ou de glissade.
- Les contraintes liées au terrain, telles que l'instabilité des sols ou la proximité de cours d'eau.
- L'encombrement du chantier par des matériaux mal entreposés.

En résumé, les accidents sur chantier ne résultent pas uniquement du hasard, mais bien de l'interaction entre les comportements humains, l'organisation du travail, l'état du matériel et l'environnement extérieur. Leur prévention repose donc sur une approche globale, visant à agir simultanément sur chacun de ces facteurs.

VII.2 Mesures de prévention contre les accidents du travail

La prévention des accidents sur chantier repose sur la mise en place d'une politique de sécurité rigoureuse, intégrant à la fois des mesures organisationnelles, techniques et humaines. L'objectif principal est de protéger la santé des travailleurs tout en garantissant la continuité et

la qualité des travaux. Les principales actions préventives peuvent être regroupées comme suit :

➢ **Mesures organisationnelles**

- Élaborer un **plan de sécurité et de santé** adapté aux spécificités du chantier.
- Assurer une **planification claire des tâches** afin d'éviter les interférences entre différents corps de métiers.
- Définir et faire respecter des **procédures de circulation interne** pour les engins et le personnel.
- Mettre en place une **signalisation adéquate** pour prévenir les risques liés aux zones dangereuses.

➢ **Mesures humaines**

- Former régulièrement les travailleurs sur les **règles de sécurité** et les gestes à adopter en cas d'urgence.
- Sensibiliser le personnel à l'utilisation correcte des **équipements de protection individuelle (EPI)** tels que casques, gants, chaussures de sécurité et harnais.
- Encourager une **culture de la sécurité** où chaque travailleur est acteur de sa propre protection et de celle de ses collègues.

➢ **Mesures techniques**

- Entretenir régulièrement les engins et matériels pour garantir leur bon fonctionnement.
- Installer des **protections collectives** telles que garde-corps, filets de sécurité, barrières ou échafaudages conformes aux normes.
- S'assurer que les matériaux soient **stockés de manière stable et sécurisée** afin d'éviter tout effondrement ou chute.

➢ **Mesures environnementales**

- Adapter les travaux aux conditions météorologiques en prévoyant, par exemple, l'arrêt temporaire des activités en cas de pluie intense ou de vents violents.

- Maintenir les zones de travail propres et dégagées pour limiter les risques de glissades ou de chutes.

- Mettre en place des dispositifs de drainage et de stabilisation pour prévenir les risques liés à l'instabilité des sols.

VII.3 Dispositifs de protection

La sécurité des travailleurs sur chantier repose en grande partie sur l'utilisation de dispositifs de protection adaptés. Ces derniers se divisent généralement en deux grandes catégories : **les protections individuelles** et **les protections collectives**.

➢ **Protections individuelles (EPI)**

Les équipements de protection individuelle (EPI) sont destinés à protéger chaque travailleur contre les risques spécifiques auxquels il peut être exposé. Parmi les plus courants, on distingue :

- **Le casque de sécurité**, contre les chutes d'objets et les chocs.

- **Les gants de protection**, adaptés selon les tâches (manutention, produits chimiques, travaux électriques).

- **Les chaussures de sécurité**, équipées de semelles antidérapantes et de coques renforcées.

- **Les harnais et lignes de vie**, utilisés pour les travaux en hauteur.

- **Les lunettes ou visières**, contre les projections de particules et produits dangereux.

- **Les masques de protection**, contre les poussières, gaz ou fumées toxiques.

Ces dispositifs, bien qu'indispensables, ne suffisent pas à eux seuls. Leur efficacité dépend de la qualité du matériel, de son bon entretien et surtout du respect de son utilisation par les travailleurs.



Figure VII-1 Protections individual



Figure VII-2 protection pour les oreilles



Figure VII-3 protection de corps

➢ **Protections collectives**

Contrairement aux EPI, les dispositifs de protection collective visent à protéger simultanément l'ensemble des travailleurs présents sur un chantier. Ils sont considérés comme prioritaires dans la hiérarchie des mesures de sécurité. On peut citer notamment :

- **Les garde-corps et rampes de sécurité**, installés sur les zones en hauteur.
- **Les filets de sécurité** et plateformes de travail sécurisées.
- **Les dispositifs de signalisation** (panneaux, marquages au sol, feux, barrières).
- **Les protections contre les chutes de matériaux**, comme les bâches, palissades ou clôtures.
- **Les dispositifs d'aération et de ventilation**, en cas de travaux en espaces confinés.
- **Les extincteurs et systèmes d'alerte incendie**, indispensables pour prévenir et intervenir en cas de départ de feu.

Complémentarité des dispositifs

Une politique de sécurité efficace repose sur la **combinaison de ces deux types de protection**. En effet, si les protections collectives permettent de réduire globalement les risques, les EPI assurent une protection supplémentaire face aux dangers résiduels.

VII.4 Les travaux de terrassement

Tout ouvrage d'art repose sur un sol qui doit être étudié avec précision avant toute mise en œuvre. Une analyse approfondie des terrains est donc nécessaire pour assurer la stabilité et la sécurité de la construction. Une fois cette étape réalisée, les opérations de terrassement peuvent commencer. Elles comprennent :

- Les **déblais** : travaux d'excavation, de fouilles et de tranchées pour dégager le sol.
- Les **remblais** : opérations inverses consistant à combler les vides avec de la terre ou des matériaux adaptés.

Ces activités présentent plusieurs **risques spécifiques**, parmi lesquels :

- Circulation et manœuvre des engins.
- Glissements ou effondrements de terrain.
- Rupture accidentelle de canalisations souterraines.
- Utilisation d'explosifs.
- Chutes de matériaux ou de personnel dans les zones d'excavation.
- Chutes de personnes sur sols glissants, encombrés ou en hauteur.
- Contact accidentel des machines avec des lignes électriques aériennes.
- Blessures liées au fonctionnement des pièces mobiles des engins.
- Accidents dus à la conduite ou à la collision d'engins de chantier.

Pour prévenir ces risques, plusieurs **mesures de sécurité** doivent être appliquées :

VII.4.1 Machines et outils

- Seules des personnes qualifiées et formées doivent manipuler et entretenir les engins (pelles mécaniques, grues, appareils de levage, postes de soudage, etc.).
- Toute opération de nettoyage ou de maintenance doit être effectuée après l'arrêt complet de la machine.
- Le respect strict des charges maximales d'utilisation indiquées sur les grues et autres appareils de levage est obligatoire.
- Des précautions doivent être prises pour éviter les collisions entre engins ainsi que la chute de matériaux.
- Tout outil électrique portable ayant subi un choc ou une chute doit être contrôlé par un technicien compétent avant réutilisation.

- Il est déconseillé d'utiliser des outils électriques portatifs à l'extérieur par temps de pluie.

VII.4.2 Installations électriques

- L'installation, la modification, la réparation et l'entretien des équipements électriques doivent être réalisés uniquement par un électricien qualifié et désigné.

- Lors de travaux à proximité de lignes aériennes ou de câbles souterrains, les distances de sécurité doivent impérativement être respectées.

VII.5 Premiers secours

En cas de petit accident (coupure, piqûre, blessure légère) :

- Avertir immédiatement le responsable du chantier.

- Consulter rapidement un professionnel de santé, même pour une blessure mineure, afin d'éviter toute complication.

- Utiliser la trousse de premiers secours disponible sur le chantier.

- En cas d'infection ou d'aggravation de la plaie, faire appel sans délai à un médecin.

VII.6 Plan de sécurité pour les travaux de réalisation

Compte tenu du rôle essentiel que jouent les terrassements dans la construction d'une retenue, un dispositif de sécurité spécifique a été mis en place. Ce plan couvre l'ensemble des opérations de terrassement général, ainsi que les travaux de soutènement et de fondations profondes, afin de garantir leur exécution dans des conditions optimales de sûreté.

Tableau VII-1: Plan de sécurité au travail (Sedrati, 2018).

Objectifs visés	Mesures de prévention à mettre en œuvre
Prévenir les risques d'accidents liés aux chutes et aux équipements de terrassement.	- Organisation des travaux en sécurité, de jour comme de nuit. - Délimitation stricte des zones interdites au public. - Mise en place de consignes particulières en cas de faible visibilité (ex. : brouillard). - Régulation de la circulation interne et signalisation adéquate (panneaux, marquages, balisage lumineux).
Réduire les incidents lors de l'approvisionnement du chantier.	- Définition d'itinéraires sécurisés pour les camions d'approvisionnement. - Aménagement de zones spécifiques de chargement et de déchargement. - Présence d'un signaleur lors des manœuvres à risque.
Prévenir les accidents électriques.	- Localisation et balisage des lignes électriques aériennes et souterraines. - Respect des distances de sécurité. - Intervention uniquement par des électriciens qualifiés.
Assurer la sécurité des travailleurs face aux engins et machines.	- Formation obligatoire des conducteurs d'engins. - Respect des charges maximales d'utilisation. - Interdiction d'approcher des zones de travail des engins sans autorisation. - Vérification quotidienne de l'état des machines.
Protéger le personnel contre les risques de chute de hauteur ou de matériaux.	- Installation de garde-corps et filets de protection dans les zones à risque. - Port obligatoire des EPI (casque, harnais, chaussures de sécurité). - Interdiction de stationner sous une zone de levage.
Garantir des conditions de travail sûres sur le plan sanitaire.	- Mise à disposition d'une trousse de secours sur le chantier. - Présence d'un personnel formé aux premiers secours. - Prise en charge immédiate des blessures, même mineures. - Hygiène sur le chantier (points d'eau, sanitaires).

Améliorer la sécurité incendie et explosion.	- Stockage des produits inflammables dans des zones sécurisées. - Signalisation claire des zones à risque. - Formation du personnel à la manipulation des extincteurs.
Limiter l'impact environnemental et protéger les riverains.	- Réduction des nuisances sonores et poussières (arrosage, bâches). - Gestion des déchets et évacuation contrôlée. - Mise en place de barrières pour limiter l'accès du public et la pollution.

VII.7 Signalisation de sécurité

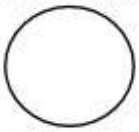
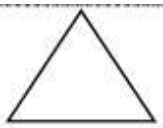
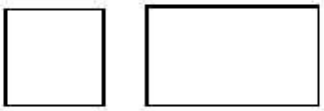
La mise en place d'une signalisation de sécurité contribue à la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs. Elle a pour objectif d'avertir les employés des dangers éventuels présents sur leur lieu de travail et de leur rappeler les consignes à respecter. Cette signalisation informe également sur les risques spécifiques liés à certaines situations, activités ou équipements.

Selon la nature du danger, différents supports peuvent être utilisés : panneaux, codes couleurs, signaux lumineux ou sonores.

VII.7.1 Description des panneaux de signalisation

La signification d'un signal repose à la fois sur **sa couleur** et **sa forme**. Ces deux éléments combinés permettent d'indiquer clairement le type d'information ou de danger. Le tableau ci-après présente l'interprétation des principales couleurs de sécurité.

Tableau VII-2 Signification des couleurs de sécurité (Cartier & Sabater, 2004).

Forme / Couleur			
Rouge	Interdiction (attitudes dangereuses)	/	Matériel et équipement de lutte contre l'incendie (identification et localisation)
Jaune ou jaune orangé	/	Avertissement (attention, précaution)	/
Bleu	Obligation (comportement ou action spécifique)	/	Information ou instruction
Vert	/	/	**Signal de sauvetage ou de secours** (portes, issues, voies, matériels, postes, locaux) **Situation de sécurité** (retour à la normale)

VII.7.2 Principes de conception et d'utilisation d'une signalisation de sécurité adaptée

La signalisation de sécurité constitue un élément essentiel pour prévenir les accidents et renforcer la protection des travailleurs sur un chantier de construction. Afin d'assurer son efficacité, certaines recommandations doivent être respectées :

- Éviter la mise en place simultanée de signaux lumineux pouvant prêter à confusion.
- Ne pas installer un signal lumineux près d'une source de lumière parasite qui pourrait réduire sa visibilité.
- Ne pas activer deux signaux sonores en même temps afin d'éviter toute ambiguïté.
- Utiliser au maximum les codes couleurs, les pictogrammes normalisés et, si nécessaire, un message textuel clair pour améliorer la compréhension.

Positionner les panneaux de sécurité dans des lieux visibles, stratégiques et accessibles à tous les intervenants.

- Procéder régulièrement à la vérification, l'entretien et le remplacement des dispositifs afin de garantir leur lisibilité et leur efficacité.

- Former et sensibiliser le personnel pour qu'il sache identifier rapidement la signification de chaque signal et réagir en conséquence.

VII.7.3 Application de la signalisation de sécurité sur le chantier

Dans le cadre des travaux liés à la réalisation et à la protection de la retenue, la mise en œuvre de la signalisation de sécurité doit être adaptée aux conditions spécifiques du chantier. Les mesures retenues sont les suivantes :

➢ **Aux accès principaux du chantier** :

- Obligation du port des équipements de protection individuelle (EPI) : bottes, casque et gants.

- Interdiction d'entrée pour toute personne non autorisée.

➢ **À proximité des installations électriques** :

- Panneaux de mise en garde signalant le danger d'électrocution.

➢ **Dans les zones de stockage de produits inflammables** :

Interdiction de fumer et d'utiliser toute flamme nue.

➢ **Dans les zones présentant un risque de chute d'objets** :

- Mise en place de panneaux avertissant du danger lié aux chutes de matériaux.

➢ **Sur l'ensemble du chantier** :

- Signalisation de l'emplacement des dispositifs de lutte contre l'incendie.

- Balisage des voies d'évacuation et des sorties de secours.

- Repérage clair et signalisation des équipements de sécurité essentiels.

Conclusion

L'analyse des différents aspects liés à la sécurité dans les travaux de construction met en évidence l'importance cruciale de la prévention pour réduire les risques d'accidents et protéger la vie des travailleurs. Les travaux de terrassement, l'utilisation des engins, la gestion des installations électriques, ainsi que la mise en place d'une signalisation adaptée constituent des étapes sensibles nécessitant des mesures rigoureuses et spécifiques.

La mise en œuvre d'un plan de sécurité structuré, combinant règles de prévention, équipements de protection individuelle, contrôle régulier des machines et signalisation conforme, permet de garantir un environnement de travail sécurisé et conforme aux normes en vigueur. Cette démarche contribue également à optimiser la productivité du chantier en limitant les interruptions dues aux incidents.

Dans le cadre particulier de la réalisation d'ouvrages hydrauliques destinés à la protection contre les inondations, la sécurité des intervenants et la maîtrise des risques constituent une condition préalable à la réussite du projet. La protection des travailleurs et la prévention des accidents ne doivent donc pas être perçues comme de simples obligations réglementaires, mais comme une composante essentielle de la durabilité et de la performance des infrastructures construites.

Conclusion Générale

Conclusion générale

En conclusion, ce mémoire a porté sur l'analyse et la proposition de solutions pour la protection de la ville de Tipaza contre les inondations centennales, en se concentrant plus particulièrement sur l'aménagement de l'Oued Terbout. L'étude a commencé par une analyse exhaustive des données disponibles, comprenant les informations topographiques, géologiques, hydrologiques et pluviométriques, permettant de caractériser de manière précise le bassin versant et de comprendre ses dynamiques d'écoulement.

Les caractéristiques hydro-morphométriques ont été étudiées à l'aide du logiciel **ArcGIS**, ce qui a permis de réaliser des cartes détaillées et de mieux représenter la structure du bassin versant. L'analyse des pluies maximales journalières, effectuée avec **HYFRAN-PLUS**, a permis de déterminer l'intensité des précipitations pour une période de retour centennale, suivie du calcul des pluies de courte durée et de la construction des courbes IDF, essentielles pour la modélisation hydrologique.

Les débits de crue ont ensuite été estimés grâce à des formules empiriques et à la méthode **SCS-CN** via le modèle **HEC-HMS**, révélant un débit maximum de **23,9 m³/s**. La simulation hydraulique réalisée avec **HEC-RAS** a permis de visualiser l'évolution des paramètres hydrauliques tels que la hauteur et le débit, et d'identifier les zones où le risque de débordement est le plus élevé. Ces résultats ont mis en évidence la nécessité de mesures d'aménagement adaptées pour limiter l'exposition des populations et des infrastructures.

Deux variantes d'aménagement ont été étudiées et comparées selon des critères techniques, économiques et environnementaux. La solution retenue consiste en un **canal trapézoïdal en gabions**, jugé optimal pour contenir le débit centennal tout en respectant les contraintes écologiques et budgétaires. Le projet est estimé à **26 585 588 DA** et sa réalisation devrait s'étaler sur **106 jours**.

Ce travail illustre l'importance d'une approche intégrée combinant analyse scientifique, modélisation hydrologique et évaluation technico-économique pour la gestion des risques d'inondation. Il fournit une base solide pour la planification future des aménagements hydrauliques

À Tipaza et démontre que des solutions efficaces peuvent être mises en œuvre pour protéger les populations et réduire les impacts environnementaux des crues. En perspective, ces résultats pourraient servir à étendre la méthodologie à d'autres bassins versants de la région et à renforcer la résilience du territoire face aux phénomènes extrêmes accentués par le changement climatique.

Reference

- Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). (1993). *Carte des pluies annuelles de l'Algérie du Nord (Période 1921–1989)*. Alger: ANRH.
- Ashley, R., et al. (2007). Urban flood management strategies. Urban Water Journal.
- Benlaoukli, B. (2020). Organisation de chantier, la planification des travaux les M.M.O [Working Paper]. Disponible sur http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/56
- Butler, D., & Davies, J. (2011). Urban Drainage. CRC Press.
- Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique (CRAAG). (2003). *Étude sismotectonique de la région centre-nord de l'Algérie*. Alger: CRAAG.
- Charim. Elements at Risk and Vulnerability Assessment.
- Climato, OpenEdition Journals. (2001). Inondations de Bab El Oued.
- Degoutte, G., & Fry, J. J. (2002). Petits barrages : Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi [Small dams: guidelines for design, construction and monitoring]. Disponible sur https://hal.science/hal-02580482/
- Direction de l'Urbanisme et de la Construction de la Wilaya de Tipaza. (2022). *Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU) de la commune de Tipaza*. Tipaza: DUC.
- Direction des Ressources en Eau de la Wilaya de Tipaza (DRE Tipaza). (2023). *Rapport sur les études d'assainissement et de protection contre les inondations*. Tipaza: DRE.
- El Moudjahid. (2019). *Inondations de Béjaïa et Nord algérien*.
- European Commission. (2021). *Nature-Based Solutions for Flood Risk Management*. https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation
- Geobalcanica.org. (n.d.). Hydrodynamic Modeling of Floods. https://www.geobalcanica.org

- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press.
- ISWM NCTCOG. (n.d.). Rational Method for Peak Flow Estimation. https://www.iswm.nctcog.org/hydrocad.net
- Jaafar, H. H., Ahmad, F. A., & El Beyrouthy, N. (2019). GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design. Scientific Data, 6(1), 145. Disponible sur https://doi.org/10.1038/s41597-019-0155-x
- Loi n° 04-20 du 25 décembre 2004. Prévention des risques majeurs et gestion des catastrophes en Algérie. Journal officiel de la République algérienne. https://www.joradp.dz
- Ministère des Ressources en Eau et de la Sécurité Hydrique (MRE). (2010). *Plan National de l'Eau 2010–2030 (PNEt-E)*. Alger: MRE.
- Musy, A. (2005). *Cours d'hydrologie générale*. Laboratoire d'hydrologie et aménagements (HYDRAM), Institut des sciences et technologies de l'environnement (ISTE), École polytechnique fédérale (EPFL).
- OTRI. (2019). *Observatoire des Territoires à Risques d'Inondation*.
- Plate, E.J. (2002). *Natural Hazards*. Springer.
- Pilon, P., & Kundzewicz, Z.W. (2008). Flood risk management. Journal of Flood Risk Management.
- ReliefWeb / IFRC. (2008). Inondations à Ghardaïa.
- SERC Brighthub Engineering. (n.d.). Hydrology and Flood Modeling. https://www.brighthubengineering.com
- SpringerLink / MDPI. *Socio-economic and Environmental Vulnerability Studies*.
- Touaibia, B. (2015). *Manuel pratique d'hydrologie*. Blida, Algérie.

- UNDRR. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

- World Bank. (2020). *Natural Disasters Overview*. Banque Mondiale.

Référence sitographiques :

https://earthexplorer.usgs.gov/

https://www.youtube.com/

https://www.openstreetmap.org/

https://www.arcgis.com/home/item.html?id=d3da5dd386d140cf93fc9ecbf8da5e31

https://www.linkedin.com

https://www.google.com/intl/fr/earth/about/