الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR HYDRAULICS
"The MujahidAbdellah ARBAOUI"

المدرسة الوطنية العليا للري
"المجاهد عبد الله عرباوي"
ⵜⴰⵙⴷⴰⵡⵜ ⵜⴰⵏⴰⵎⵓⵔⵜ ⵏ ⵜⵣⵣⵉⵡⵉⵏ ⵏ ⵜⵣⵔⴼⵜ

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : Conception des ouvrages hydrotechniques

THEME :

Etude de protection de la ville de Tipaza contre les inondations de l'oued Merzoug (W. Tipaza)

Présenté par :

DOUDOU Nouh

Devant les membres du jury

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

Session Septembre 2025

Remerciement :

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation de mon mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'État en Hydraulique.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche Mr TOUMI Samir, pour la confiance qu'il m'a accordée, son accompagnement bienveillant, ses encouragements constants et ses conseils précieux qui ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce mémoire et pour l'attention qu'ils lui ont portée.

Ma reconnaissance va également à l'ensemble des enseignants de l'ENSH, qui, par la qualité de leur enseignement et leur disponibilité, ont contribué à ma formation et enrichi mon parcours académique.

Enfin, je souhaite remercier chaleureusement ma famille, mes amis et toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont soutenu, encouragé et accompagné tout au long de ce projet et de mon cursus, et sans qui ce travail n'aurait pas pu voir le jour.

DOUDOU Nouh

Dédicace :

Je dédie ce travail à mes chers parents, dont l'amour, le soutien constant et la confiance en moi ont constitué les fondations de cette réussite académique. Votre présence bienveillante et vos sacrifices resteront toujours ma plus grande source de motivation.

À mes frères et sœurs, pour leur affection sincère, leurs encouragements indéfectibles et leur croyance en mes capacités. Vous êtes ma force et mon inspiration de chaque instant.

À mes amis, qui ont su partager mes joies comme mes épreuves et qui ont contribué à garder mon équilibre tout au long de ce parcours universitaire. Votre soutien inestimable m'a permis d'avancer avec confiance.

À mes enseignants, pour leur savoir, leur patience et leur dévouement à transmettre leurs connaissances. Vos conseils éclairés et votre accompagnement ont été essentiels dans la réalisation de ce mémoire.

À toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont apporté leur aide à l'accomplissement de ce travail, je vous adresse ma profonde gratitude et ma sincère reconnaissance.

Enfin, à moi-même, pour la persévérance, la détermination et les efforts déployés pour franchir chaque étape de ce parcours. Ce mémoire reflète mon engagement, ma volonté et ma passion pour ce domaine d'étude.

DOUDOU Nouh

الملخص

تهدف هذه الدراسة، التي تجمع بين تحليل هيدرولوجي باستخدام HEC-HMS ومحاكاة هيدروليكية بواسطة HEC-RAS وArcGIS، إضافة إلى تقييم خطر الفيضانات والهشاشة، إلى إظهار ارتفاع خطر الفيضانات في مدينة تيبازة. وقد خلصت النتائج إلى أن الحل الأنسب يتمثل في تهيئة الجزء الحرج من واد مرزوق بإنشاء قناة مستطيلة من الخرسانة المسلحةبعرض3 أمتار وارتفاع 2متر، بتكلفة إجمالية مقدرة بـ53,14مليون دينار جزائري،مما يضمن حماية حضرية أفضل وتقليل الأضرار المستقبلية.

الكلمات المفتاحية: تيبازة، الخطر، الفيضانات، تحليل هيدرولوجي، الخرسانة المسلحة.

Résumé :

Cette étude, combinant une analyse hydrologique avec HEC-HMS, une simulation hydraulique avec HEC-RAS et ArcGIS ainsi qu'une évaluation de l'aléa de crue et de la vulnérabilité, a montré le risque élevé d'inondation à Tipaza et conduit à retenir comme solution l'aménagement du tronçon critique de l'oued Merzoug par un canal rectangulaire en béton armé de 3 m de largeur et 2 m de hauteur, pour un coût total estimé à 53,14 millions DA, garantissant une meilleure protection urbaine et la réduction des dommages futurs.

Mots clés : Inondation, Tipaza, Aléa, Crue, Aménagement, canal rectangulaire.

Abstract :

This study, combining a hydrological analysis using HEC-HMS, a hydraulic simulation with HEC-RAS and ArcGIS, as well as an assessment of flood hazard and vulnerability, demonstrated the high risk of flooding in Tipaza. The adopted solution consists of improving the critical reach of the Oued Merzoug by constructing a reinforced concrete rectangular canal (3 m wide and 2 m high), with an estimated total cost of 53.14 million DZD, ensuring better urban protection and reducing future damages.

Keywords : Flood, Tipaza, Hazard, Flood event, Critical reach, Rectangular canal.

Table des matières :

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I : Recherche Bibliographique 4

Introduction : 5

I.1 Aléa, enjeu et vulnérabilité : 5

I.1.1 Aléa : 5

I.1.2 Enjeux : 6

I.1.3 Vulnérabilité : 6

I.2 Risque : 7

I.2.1 Le risque d'inondation : 8

I.2.2 Éléments de gestion du risque : 9

I.3 La crue : 10

I.4 Paramètres fondamentaux du cours d'eau : 10

I.4.1 Lits du cours d'eau : 10

I.5 Les Inondations : 11

I.6 Différents types d'inondations : 12

I.6.1 Inondations de plaine ou par remontée de nappe affleurante : 12

I.6.2 Crues torrentielles : 12

I.6.3 Ruissellement pluvial : 12

I.6.4 Autres types d'inondations : 12

I.7 Causes et conséquences des inondations : 13

I.7.1 Causes des inondations : 13

I.7.2 Conséquences des inondations : 14

I.8 Historique des inondations en Algérie : 14

Conclusion : 16

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude.....17
Introduction :.....18
II.1 Présentation de la zone d'études :.....18
II.2 Climatique :.....20
II.2.1 Vent :.....20
II.2.2 Pluviométrie :.....21
II.2.3 Températures :.....21
II.2.4 Sismicité de Tipaza :.....22
II.3 Situation géologique :.....23
II.4 Occupation du sol :.....24
II.5 Problématiques hydrologiques et risques :.....24
II.5.1 Historique des inondations à Tipaza :.....25
Conclusion :.....26
Chapitre III : Etude hydrologique.....27
Introduction :.....28
III.1 Bassin versant :.....28
III.2 Caractéristiques principales du bassin versant :.....29
III.2.1 Caractéristiques géographiques :.....29
III.2.2 Caractéristiques morphologiques :.....30
III.2.3 Caractéristiques géométriques :.....31
III.3 Caractéristiques hydrographiques :.....35
III.3.1 Étude du relief :.....35
III.3.2 La courbe hypsométrique :.....35
III.3.3 Les indices de pente :.....39
III.4 Étude du réseau hydrographique :.....47

III.4.1 Caractéristiques du réseau hydrographique : 47
III.4.2 Hiérarchisation du réseau : 47
III.4.3 Paramètres hydrographiques : 48
III.4.4 Temps de concentration (Tc) : 50
III.4.5 La vitesse de ruissellement (Vr) : 54
III.5 Etude des crues : 56
III.5.1 Présentation de la station hydrométrique : 56
III.5.2 Choix de la loi d'ajustement : 58
III.5.3 Calcul du débit de crue : 63
III.5.4 ETUDE DES APPORTS SOLIDES : 70
Conclusion : 73
Chapitre IV : Calcul Hydraulique et modélisation 74
Introduction : 75
IV.1 Généralités : 75
IV.1.1 Paramètres Hydraulique : 75
IV.1.2 La physique d'un modèle hydraulique : 77
IV.1.3 Écoulement à surface libre : 78
IV.1.4 Régime d'écoulement : 79
IV.2 Dimensionnement des canaux : 80
IV.2.1 Formule de Chézy : 80
IV.2.2 Formule de MANNING-STRICKLER : 81
IV.3 Modélisation du cours d'eau non Aménagé : 81
IV.3.1 Présentation du logiciel HEC-RAS : 81
IV.3.2 Simulation avec HEC-RAS : 82
IV.3.3 Visualisation des résultats : 84

IV.3.4 Interprétation des résultats : 88
IV.4 Cartographie des zones inondables : 88
IV.4.1 Carte des vitesses : 88
IV.4.2 Carte des profondeurs : 90
IV.4.3 Classes d'aléa : 90
Conclusion : 92
Chapitre V : Étude Des Variante D'aménagement 93
Introduction : 94
V.1 Type des canaux : 94
V.1.1 Les canaux naturels : 94
V.1.2 Les canaux artificiels : 95
V.2 Techniques d'aménagements : 99
V.2.1 La protection directe : 99
V.2.2 La protection indirecte : 99
V.3 Choix des paramètres de dimensionnement : 100
V.3.1 La pente : 100
V.3.2 Coefficient de rugosité : 100
V.3.3 Vitesse d'érosion : 101
V.3.4 Marge de sécurité (Revanche) : 101
V.4 Etude des variantes : 101
V.4.1 Variante N°01 : canal trapézoïdale en béton armé : 102
V.4.2 Variante N°02 : canal rectangulaire en béton armé : 107
V.5 Choix de la variante : 112
Conclusion : 113
Chapitre VI : Organisation de chantier. 114

Introduction : 115
VI.1 Rôles des intervenants sur chantier : 115
VI.1.1 Le maître d'ouvrage : 115
VI.1.2 Le maître d'œuvre : 115
VI.1.3 L'entrepreneur : 116
VI.2 Installation du chantier : 116
VI.3 Évaluation des quantités et estimation budgétaire du projet : 116
VI.4 Planification de projet : 117
VI.4.1 Étapes de la planification : 117
VI.4.2 Plannings des travaux : 118
VI.4.3 Techniques de planification : 118
VI.4.4 Choix de la méthode de calcul : 121
VI.4.5 Méthode de calcul de P.E.R.T : 122
VI.4.6 Exécution de la méthode P.E.R.T : 123
Conclusion : 124
Chapitre VII : Protection et sécurité de travail 125
Introduction : 126
VII.1 Origines des accidents sur les chantiers de construction : 126
VII.1.1 Facteurs liés aux équipements : 126
VII.1.2 Facteurs humains : 126
VII.2 Mesures de prévention des accidents du travail : 127
VII.3 Les dispositifs de protection : 128
VII.3.1 Protection individuelle : 128
VII.3.2 Ordre et organisation du chantier : 132
VII.3.3 Mesures de prévention contre les incendies : 132

VII.4 Travaux de terrassement : 132
VII.4.1 Risques spécifiques aux travaux de terrassement : 132
VII.4.2 Mesures de prévention : 133
VII.5 Plan de sécurité spécifique aux travaux de réalisation : 134
VII.6 Signalisation de sécurité : 135
VII.6.1 Présentation des panneaux de signalisation : 135
VII.6.2 Principes d'une signalisation efficace : 136
VII.6.3 Implémentation de la signalisation sur le chantier : 136
Conclusion : 136
CONCLUSION GENERALE : 137

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I-1 : Risque, l'ensemble vulnérabilités et alea (MEDD, 2004)

Chapitre II :

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

Figure II-2 : Emplacement de la commune de Tipaza.

Figure II-3 : Zonage sismique de l'Algérie (Source : RPA 2024)

Figure II-4 : Le port de Khemisti, wilaya de Tipaza, en mai 2023. (Source : © DR/HORIZONS)

Chapitre III :

Figure III-1 : Cartographie du bassin Oued Merzoug

Figure III-2 : Exemples d'indices de compacité

Figure III-3 : Carte hypsométrique du bassin versant d'Oued Merzoug.

Figure III-4 : Courbe Hypsométrique du Bassin Versant d'Oued Merzoug.

Figure III-5 : Cartographie des pentes dans le bassin versant d'Oued Merzoug.

Figure III-6 : Carte des courbes de niveau du bassin versant d'Oued Merzoug.

Figure III-7 : Schéma du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Merzoug.

Figure III-8 : Extrait de la carte du réseau hydro/climatologique de l'ANRH.

Figure III-9 : Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Gumbel (méthode des moments).

Figure III-10 : Ajustement de la série pluviométrique à la loi de GALTON (maximum de vraisemblance).

Chapitre IV :

Figure IV-1 : l'interface utilisateur du logiciel HEC-RAS version 6.5.

Figure IV-2 : Réseau triangulaire irrégulier (TIN).

Figure IV-3 : Courbe du tarage.

Figure IV-4 : Profils en travers des deux sections d'oued Merzoug.

Figure IV-5 : La variation de la vitesse d'écoulement.

Figure IV-6 : Variation du nombre de Froude en fonction de la distance.

Figure IV-7 : Carte de vitesse d'eau.

Figure IV-8 : Carte de profondeur d'eau.

Figure IV-9 : carte d'aléa pour la crue centennal.

Chapitre V :

Figure V-1 : Le cours d'eau et son milieu environnant (Source : Dr Habibi Brahim - 2013).

Figure V-2 : Canaux artificiels (D'après TOUMI Abdelouaheb - 2016).

Figure V-3 : Enrochement le long d'une rivière. (Source : Google)

Figure V-4 : Canal en Gabion. (Source : Google)

Figure V-5 : Canal en Béton. (Source : Google)

Figure V-6 : Canal en palplanches. (Source : Google)

Figure V-7 : coupe en travers d'un canal trapézoïdal en béton. (Source : Google)

Figure V-8 : Extrait de la feuille de calcul du logiciel FlowMaster. (Variante 1)

Figure V-9 : Profils transversaux d'un canal trapézoïdal lors d'une crue de 100 ans.

Figure V-10 : coupe en travers d'un canal rectangulaire en béton. (Source : Google)

Figure V-11 : Extrait de la feuille de calcul du logiciel FlowMaster. (Variante 2)

Figure V-12 : Profils transversaux d'un canal rectangulaire lors d'une crue de 100 ans.

Chapitre VI :

Figure VI-1 : Schéma représentatif de la méthode de PERT.

Figure VI-2 : Réseau P.E.R.T du projet.

Chapitre VII :

Figure VII-1 : Équipements de protection individuelle des pieds. (Source : SETON et Gaston MILLE)

Figure VII-2 : Équipements de protection individuelle de la tête et le cou. (Source : SETON et

Figure VII-3 : Les protections auditives, (Source : SETON et Cotral)

Figure VII-4 : Équipements de protection individuelle des mains et bras. (Source : SETON)

Figure VII-5 : Équipements de protection individuelle des pieds, (Source : SETON et Gaston MILLE)

Figure VII-6 : Equipements de protection respiratoire. (Source : Amazon et 3 M)

Figure VII-7 : Equipements de protection corporelle.

Liste des tableaux :

Chapitre II :

Tableau II-1 : vitesse horaire moyenne du vent à Tipaza. (Source : Weather Spark, 2025)

Tableau II-2 : Répartition mensuelle des précipitations. (station de Hadjout)

Tableau II-3 : Températures mensuelles minimales, moyennes et maximales à Tipaza. (Source : Weather Spark, 2025)

Chapitre III :

Tableau III-1 : Caractéristiques géomorphologiques du Bassin Oued Merzoug

Tableau III-2 : Paramètres hypsométriques du bassin versant d'Oued Merzoug.

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

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

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

Tableau III-6 : Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M. 1963.

Tableau III-7 : Résultats des calculs des pentes et de la dénivelée spécifique du bassin versant d'oued Merzoug

Tableau III-8 : Résultats des calculs de temps de concentration

Tableau III-9 : Paramètres hydrographiques du bassin versant d'Oued Merzoug.

Tableau III-10 : Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'oued Merzoug.

Tableau III-11 : identification de la station pluviométrique.

Tableau III-12 : Précipitations maximales journalières de la station de Hadjout.

Tableau III-13 : Les modèles fréquentiels et leur pertinence.

Tableau III-14 : résultats de l'ajustement (loi du Gumbel).

Tableau III-15 : Caractéristiques de la loi (Gumbel) et de l'échantillon.

Tableau III-16 : résultats de l'ajustement (loi du Galton).

Tableau III-17 : Caractéristiques de la loi (Galton) et de l'échantillon.

Tableau III-18 : Résultat de test khi2

Tableau III-19 : Résultats de calculs du TC, CN et Lag-time.

Tableau III-20 : résultats du calcul des Q max/j pour les différentes périodes de retours.

Tableau III-21 : Résultats du Ta par la formule de Gravilovic.

Tableau III-22 : Résultats du Ta par la formule de Tixeront (SOGREAH).

Chapitre IV :

Tableau IV-1 : valeurs du coefficient de rugosité n.

Tableau IV-2 : Principaux paramètres hydraulique des stations. (Source : HEC-RAS)

Tableau IV-3 : Critères d'évaluation de l'intensité d'aléa inondation (DDT, 2012).

Chapitre V :

Tableau V-1 : Valeurs du coefficient de rugosité. (Chen et Cotton, 1986)

Tableau V-2 : Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés (Degoutte, 2012).

Tableau V-3 : Dimensions de la variante 1

Tableau V-4 : Principaux paramètres hydraulique des stations du canal (Variante 1).

Tableau V-5 : Coût de la variante 1.

Tableau V-6 : Dimensions de la variante 2

Tableau V-7 : Principaux paramètres hydraulique des stations du canal (Variante 2).

Tableau V-8 : Coût de la variante 2.

Chapitre VI :

Tableau VI-1 : Estimation du budget de la variante de canal rectangulaire en béton armé pour le total de l'oued Merzoug.

Tableau VI-2 : Liste des tâches avec leurs durées.

Chapitre VII :

Tableau VII-1 : Plan de sécurité au travail. (Sedrati, 2018)

Tableau VII-2 : Signification des couleurs de sécurité (Cartier & Sabater, 2004).

Liste des planches :

Planche n°1 : Plan de masse d'oued Merzoug la ville de Tipaza.

Planche n°2 : Section d'aménagement d'oued Merzoug.

Planche n°3 : Profil en long du canal rectangulaire en béton armé.

Planche n°4 : Profil en travers du canal rectangulaire en béton armé.

Liste des Annexes :

Annexe n° 01 : Tableau des valeurs de χ^2.

Annexe n° 02 : Coefficient de rugosité de Manning.

Liste des abréviations :

Abréviation	Signification
ANRH	Agence nationale des ressources hydrauliques
BV	Bassin versant
CRAAG	Centre de recherche appliquée 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 principal (%)
Kc	Indice de compacité
Le	Lame d'eau écoulée
Mnt	Modèle numérique du terrain
OIT	Organisation internationale du travail
ONM	Office national de la météorologie
ORSTOM	Office de la recherche scientifique et technique
pjmax	Pluie maximale journalière
Rh	Rayon hydraulique
Rn	Route nationale
S	Surface du bassin versant
SCS	Soil Conservation Service
SIG	Système d'information géographique
Sm	Surface mouillée
Ta	Dégradation spécifique
Tb	Temps de base
Tc	Temps de concentration
Td	Temps de décrue
TIN	Triangulated Irregular Network
Tm	Temps de montée de la crue

INTRODUCTION GENERALE

Dans l'imaginaire collectif, l'eau représente à la fois une ressource vitale et une menace potentielle. Elle est indispensable à la vie, mais peut aussi, lors de crues violentes, submerger les territoires, endommager les infrastructures et mettre en péril la sécurité des populations. Les phénomènes d'inondation, souvent liés à des précipitations intenses, des crues soudaines ou au débordement des oueds, constituent un risque majeur, en particulier dans les régions méditerranéennes. Ces dernières sont de plus en plus exposées aux épisodes pluvieux extrêmes, dont la fréquence et l'intensité s'accroissent sous l'effet du changement climatique (IPCC, 2019; Cramer et al, 2018). Ces aléas hydrométéorologiques menacent directement les zones urbanisées, les écosystèmes naturels et le développement socio-économique des territoires vulnérables.

L'ampleur des inondations varie depuis de simples débordements localisés jusqu'à de véritables catastrophes régionales. Elles surviennent généralement de façon soudaine et peuvent causer d'importants dommages aux habitations, aux infrastructures routières, aux réseaux d'assainissement ainsi qu'aux équipements publics. Leur rapidité de déclenchement dépend de leur origine : certaines inondations se forment en quelques heures seulement après un épisode pluvieux intense, en particulier dans les oueds méditerranéens, caractérisés par des régimes hydrologiques irréguliers et sensibles aux précipitations extrêmes (Ba et al., 2022).

En Algérie, le risque d'inondation est particulièrement préoccupant, comme en témoignent les événements récents qui ont touché plusieurs wilayas. Face à ce constat, il est impératif pour les collectivités et les acteurs techniques de mettre en œuvre des mesures d'aménagement et de protection adaptées, afin de réduire la vulnérabilité des populations et de préserver la pérennité des infrastructures.

La ville de Tipaza est traversée par l'Oued Merzoug, un cours d'eau régulièrement exposé à des crues saisonnières. Lors de fortes précipitations, cet oued représente un risque important pour la population, en particulier pour les enfants et les personnes vulnérables. Ses débordements entraînent des inondations qui touchent les quartiers riverains, perturbent les voies de circulation et causent des dommages aux habitations et infrastructures implantées à proximité.

L’aménagement et la protection de l’Oued Merzoug sont donc essentiels pour assurer la sécurité des personnes et des biens, tout en contribuant à préserver l’environnement et la qualité de vie des habitants. Cette étude conduit à poser la question suivante : Comment la ville de Tipaza peut-elle renforcer sa résilience face aux risques d’inondation par une gestion intégrée et durable de l’Oued Merzoug ? Le présent travail a pour objectif d’analyser la dynamique hydrologique de l’oued, d’évaluer les scénarios d’inondation, puis de proposer des variantes d’aménagement capables de limiter les débordements et de protéger efficacement les zones exposées.

L’approche adoptée repose sur une combinaison d’analyses hydrologiques, de simulations hydrauliques et de dimensionnements d’ouvrages de protection. Elle s’appuie sur l’exploitation de données pluviométriques, topographiques et hydrologiques, ainsi que sur l’utilisation d’outils numériques de calcul et de modélisation assistée par ordinateur. L’objectif final est de concevoir des solutions techniquement viables, économiquement réalistes et respectueuses de l’environnement local.

Le travail présenté est organisé en sept chapitres, répartis comme suit :

Chapitre I : Ce chapitre est consacré à la recherche bibliographique, présentant les concepts fondamentaux de l’aléa, de la vulnérabilité et du risque d’inondation. Il propose également un état de l’art des méthodes de protection contre les crues, avec un focus sur les pratiques mises en œuvre en Algérie et dans le bassin méditerranéen.

Chapitre II : Il décrit la zone d’étude, en détaillant la localisation géographique, le climat, la géologie et les caractéristiques hydrologiques de l’Oued Merzoug.

Chapitre III : Ce chapitre expose l’étude hydrologique, estimant les débits de crue pour différentes périodes de retour, sur la base de données statistiques et d’analyses pluviométriques.

Chapitre IV : Il présente le diagnostic du lit actuel de l’oued et la modélisation des écoulements en crue, à l’aide du logiciel HEC-RAS, afin de déterminer les zones à risque et les hauteurs d’eau prévisibles.

Chapitre V : Ce chapitre propose différentes variantes d’aménagement hydraulique et analyse leur efficacité, leur faisabilité et leur coût.

Chapitre VI : Ce chapitre aborde l'organisation du chantier, en planifiant les étapes des travaux, les moyens nécessaires et l'échéancier prévisionnel.

Chapitre VII : Enfin, ce chapitre traite des aspects de protection et de sécurité du travail, afin d'assurer la sécurité des travailleurs et la prévention des accidents durant la réalisation du projet.

En conclusion, une synthèse générale des résultats récapitule les principales étapes du travail, met en avant les apports de l'étude et propose des recommandations pour la mise en œuvre des aménagements et le suivi de leur efficacité à long terme.

Chapitre I : Recherche Bibliographique

Introduction :

Les inondations, bien qu'étant des phénomènes naturels inscrits dans l'évolution des paysages, peuvent se transformer en catastrophes majeures lorsqu'elles touchent des zones habitées. Au fil des dernières décennies, l'urbanisation croissante dans les zones à risque a considérablement aggravé les conséquences de ces crues sur les biens et les populations. En Algérie, ce phénomène constitue désormais un enjeu important de sécurité publique et de protection de l'environnement. Face à cette menace, les autorités locales et nationales ont engagé plusieurs actions visant à étudier les mécanismes d'inondation et à développer des stratégies d'aménagement adaptées, notamment autour des oueds urbains (Madi et al., 2023).

I.1 Aléa, enjeu et vulnérabilité :

I.1.1 Aléa :

Dans le domaine des risques naturels, l'aléa est défini comme la probabilité qu'un phénomène potentiellement dangereux se produise dans une zone donnée, à un moment donné, avec une intensité plus ou moins variable. Il représente la composante imprévisible du risque, dont la survenue dépend de processus naturels, souvent partiellement indépendants de l'action humaine.

Certains auteurs, comme Haziza, considèrent l'aléa comme un événement menaçant caractérisé par une intensité, une durée et une localisation spatio-temporelle précises, ainsi qu'une probabilité mesurable (Haziza, 2007). Pour d'autres, tels que Griot et Ayral, l'aléa est directement lié à des mécanismes incontrôlables par l'homme, ce qui accentue son imprévisibilité et sa complexité (Griot & Ayral, 2001).

Par ailleurs, Propeck-Zimmermann met en avant la nature probabiliste de l'aléa, en le définissant comme la possibilité qu'un événement dommageable affecte une zone particulière (Propeck-Zimmermann et al., 2009). D'autres approches plus récentes, comme celle de Gilbert, suggèrent que l'aléa ne constitue pas uniquement une menace, mais aussi une situation révélatrice de la vulnérabilité des systèmes concernés (Gilbert, 2006).

Ainsi, la notion d'aléa ne peut être dissociée de celle de vulnérabilité. Son étude nécessite non seulement de quantifier sa probabilité d'occurrence, mais également d'évaluer la capacité des territoires à résister ou à s'adapter aux effets potentiels d'un tel événement.

I.1.2 Enjeux :

Dans l'étude des risques naturels, les enjeux correspondent à tout ce qui peut être affecté par un phénomène dangereux : il s'agit des personnes, des infrastructures, des activités économiques, du patrimoine culturel et de l'environnement présents dans la zone exposée. Ces éléments peuvent subir des dommages directs ou indirects selon l'intensité de l'aléa et leur propre vulnérabilité (Propeck-Zimmermann et al., 2009).

Les enjeux varient d'un territoire à l'autre, tant en nature qu'en valeur. En zone urbaine, on trouve principalement des bâtiments, des réseaux de transport, des équipements publics et des zones industrielles. En milieu rural ou naturel, les enjeux peuvent inclure des terres agricoles, des ressources en eau ou des habitats écologiques sensibles.

L'importance de ces enjeux dans la gestion du risque d'inondation est capitale. Une même crue peut avoir des conséquences très différentes selon le niveau de concentration des enjeux exposés. Par exemple, une inondation dans une zone inhabitée aura peu d'impact, alors qu'un événement similaire dans un centre urbain peut provoquer des pertes humaines, des dommages matériels majeurs, des perturbations économiques et des atteintes à l'environnement (Chalumeau, 2001).

Ainsi, l'évaluation des enjeux, en complément de l'analyse de l'aléa, permet d'orienter les politiques d'aménagement et de prévention. Elle sert également de base pour prioriser les zones à protéger et définir les moyens de réduire l'exposition des biens et des personnes (EEA, 2016).

I.1.3 Vulnérabilité :

La vulnérabilité désigne la sensibilité d'un territoire, d'une population ou d'un système face à un phénomène naturel dangereux. Elle traduit la capacité plus ou moins grande d'un milieu à subir des dommages lorsqu'il est exposé à un aléa. Cette notion dépend de nombreux facteurs, tels que la densité de population, le type de constructions, la valeur économique des biens exposés, ainsi que le niveau de préparation des populations concernées (Gilbert, 2006).

La vulnérabilité n'est pas uniforme : elle varie selon le degré de fragilité des éléments exposés, mais aussi selon les capacités d'adaptation et de résilience des sociétés. Par exemple, deux territoires soumis à la même crue peuvent subir des conséquences très différentes selon la qualité

des infrastructures, l'efficacité des systèmes d'alerte et la rapidité d'intervention des secours (D'Ercole & Metzger, 2004).

Cette approche met en évidence que le risque n'est pas uniquement une affaire d'aléa. Un phénomène naturel ne devient véritablement dangereux que lorsqu'il touche un espace vulnérable. La gestion du risque passe donc aussi par une réduction de cette vulnérabilité, à travers l'amélioration de l'urbanisation, la sensibilisation des populations, ou encore l'intégration de dispositifs de protection dans l'aménagement du territoire (Chocat, 1997).

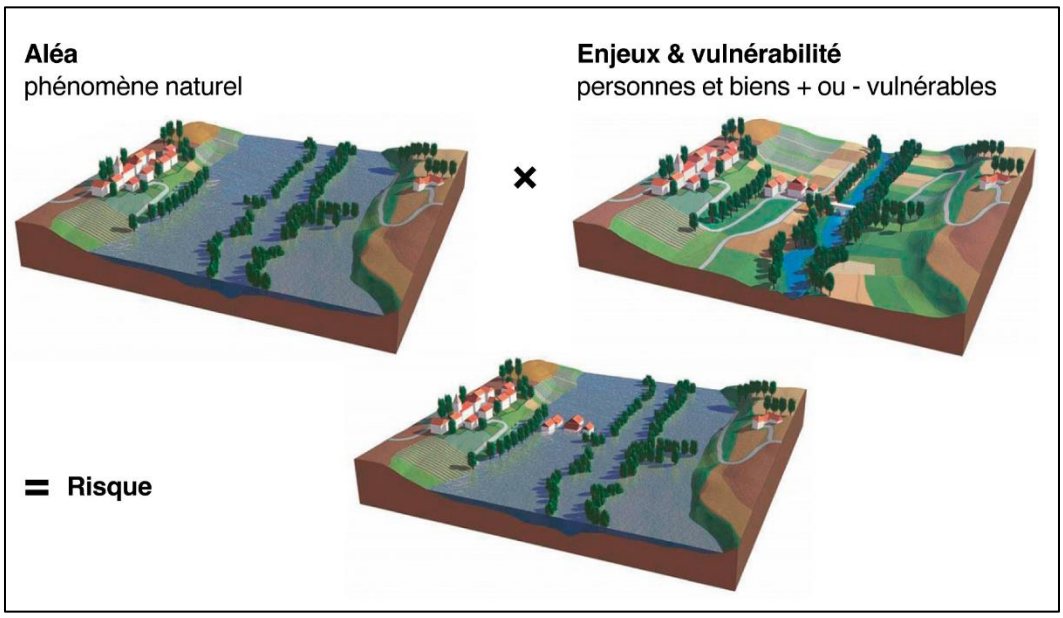


Figure I-1 : Risque, l'ensemble vulnérabilités et alea (MEDD, 2004)

I.2 Risque :

Le risque est défini comme la combinaison entre un aléa et la vulnérabilité des enjeux exposés. Autrement dit, il représente la probabilité qu'un événement dangereux cause des dommages à des personnes, des biens ou à l'environnement, en fonction de la présence d'éléments sensibles sur le territoire concerné (Propeck-Zimmermann et al., 2009).

Un aléa naturel, aussi violent soit-il, ne constitue un risque que s'il affecte un espace habité ou exploité. Ainsi, une crue importante survenant dans une zone inhabitée n'engendrera pas de risque réel, alors qu'un événement de moindre intensité peut avoir des conséquences graves s'il touche

un secteur fortement urbanisé. Cette relation met en évidence le caractère systémique du risque, où l'humain, l'organisation du territoire et les choix d'aménagement jouent un rôle central (D'Ercole & Metzger, 2004).

La notion de risque est aujourd'hui au cœur des politiques de prévention. Elle permet d'évaluer les impacts potentiels d'un aléa, de hiérarchiser les zones critiques, et de mettre en œuvre des stratégies adaptées, allant de la réduction de la vulnérabilité à la maîtrise de l'exposition. Dans ce cadre, on distingue souvent le risque acceptable – tolérable dans un certain contexte – du risque résiduel, qui subsiste même après mise en œuvre des mesures de protection (Salagnac & Garbolino, 2015).

I.2.1 Le risque d'inondation :

Parmi les risques naturels majeurs, le risque d'inondation est l'un des plus fréquents, destructeurs et coûteux à l'échelle mondiale. Il résulte de la rencontre entre un aléa hydrologique – généralement une crue, un débordement de cours d'eau ou un ruissellement pluvial intense – et des enjeux vulnérables situés dans la zone inondable. Autrement dit, ce risque naît lorsque des personnes, des infrastructures ou des écosystèmes se trouvent exposés à un phénomène de submersion temporaire du sol (Chalumeau, 2001).

Les inondations peuvent être provoquées par différents mécanismes : fortes précipitations, saturation des sols, rupture d'ouvrages hydrauliques, remontée de nappe phréatique, ou encore obstruction du lit des oueds. Leur intensité, leur durée et leur vitesse d'écoulement varient selon le contexte géographique, climatique et morphologique du bassin versant. En milieu urbain, le risque est souvent aggravé par l'imperméabilisation des sols et l'insuffisance des réseaux d'évacuation d'eaux pluviales, ce qui favorise les crues rapides et les ruissellements intenses (Salagnac & Garbolino, 2015).

En Algérie, le risque d'inondation représente une préoccupation croissante, notamment dans les zones urbaines situées à proximité des oueds. De nombreux événements survenus au cours des dernières décennies ont entraîné des pertes humaines et matérielles considérables, comme les inondations de Bab El Oued à Alger en 2001, ou celles de Ghardaïa en 2008. Ces événements ont mis en évidence la vulnérabilité de certaines régions face aux aléas hydrométéorologiques, aggravée par une urbanisation non maîtrisée, l'absence d'entretien des lits d'oueds, et le manque de systèmes d'alerte efficaces (Madi et al., 2023).

Face à ce constat, la gestion du risque d'inondation repose sur une approche intégrée combinant plusieurs leviers :

- La prévention par la maîtrise de l'urbanisation en zones inondables.
- La protection via la réalisation d'ouvrages (digues, bassins de rétention).
- La préparation par des dispositifs d'alerte et de plans d'évacuation,
- Et la résilience des territoires par l'éducation, la planification et l'adaptation des infrastructures.

L'analyse du risque d'inondation constitue donc une étape clé dans toute stratégie d'aménagement durable. Elle permet d'anticiper les zones sensibles, d'orienter les choix d'urbanisme et de définir des mesures efficaces pour réduire les impacts des futurs événements extrêmes.

I.2.2 Éléments de gestion du risque :

La gestion du risque repose sur un ensemble de démarches complémentaires visant à anticiper, réduire et encadrer les effets des aléas sur les sociétés et les territoires. Elle s'appuie sur trois piliers essentiels : la culture du risque, la prévention, et la gestion de crise.

Développer une culture du risque consiste à sensibiliser les acteurs concernés – habitants, collectivités, aménageurs – aux dangers potentiels, afin qu'ils adoptent des comportements appropriés en situation normale comme en période de crise. Cette sensibilisation permet une meilleure compréhension des phénomènes naturels et favorise une réaction plus rapide et plus efficace lors des événements extrêmes (Gilard, 1995).

La prévention a pour objectif de réduire l'exposition aux risques en agissant en amont. Elle repose notamment sur la planification de l'occupation du sol, la limitation de l'urbanisation dans les zones inondables, et l'aménagement raisonné des cours d'eau. L'enjeu est d'atteindre un niveau de risque jugé acceptable tout en conciliant développement territorial et sécurité des populations (Ingénieries – EAT, 1995).

En complément, la gestion de crise intervient lorsque l'aléa se concrétise. Elle vise à limiter les conséquences immédiates en protégeant les vies humaines et en réduisant les dommages matériels. Cette gestion s'appuie sur des outils spécifiques comme les systèmes de prévision et d'alerte, les

plans de secours (PCS), les dispositifs d'évacuation, ainsi que les mécanismes de compensation assurantielle.

Pour être efficace, la gestion du risque doit intégrer ces différentes composantes de manière cohérente. C'est dans cette optique que des méthodes comme l'analyse de l'inondabilité ont été développées, afin d'optimiser la connaissance du risque et d'orienter les décisions d'aménagement dans une logique de prévention durable (Gilard, 1995).

I.3 La crue :

Une crue est un phénomène naturel qui se manifeste par une augmentation significative et temporaire du débit d'un cours d'eau, dépassant son niveau habituel. Ce phénomène peut entraîner le débordement du lit mineur vers les zones riveraines appelées lits majeurs, pouvant inonder les espaces avoisinants (MEDD, 2011).

Les crues peuvent être causées par divers facteurs, tels que des précipitations intenses, la fonte rapide des neiges, ou encore des barrages naturels qui cèdent. Leur fréquence, leur durée, leur vitesse, ainsi que leur intensité dépendent des caractéristiques du bassin versant, de la topographie, de la nature des sols et de la couverture végétale.

On distingue généralement les crues ordinaires, qui surviennent régulièrement et sont intégrées dans le fonctionnement normal du fleuve, des crues exceptionnelles, plus rares et souvent destructrices. Ces dernières constituent un risque majeur lorsqu'elles touchent des zones urbanisées ou insuffisamment protégées (Dubois-Maury, 2002).

I.4 Paramètres fondamentaux du cours d'eau :

I.4.1 Lits du cours d'eau :

La configuration d'un cours d'eau peut se décomposer en plusieurs lits, chacun jouant un rôle spécifique selon les conditions hydrologiques. La distinction classique entre lit mineur et lit majeur est utile, mais souvent insuffisante pour représenter les multiples états d'un cours d'eau en fonction des variations de débit et de saisonnalité.

- **Le chenal d'étiage :** C'est la zone la plus basse du cours d'eau, active durant les périodes de sécheresse. Il représente le lit des très basses eaux, où apparaissent souvent des bancs de sédiments ou des îlots temporaires (Le Lay et Piégay, 2007).
- **Le lit mineur habituel :** Délimité souvent par la végétation rivulaire, il est utilisé pour l'écoulement courant, y compris lors des petites crues annuelles. Il constitue l'espace que l'eau occupe régulièrement tout au long de l'année.
- **Le lit majeur immédiat :** Submergé lors des crues modérées, ce lit inclut les anciens méandres, chenaux abandonnés ou berges basses. Il sert de zone d'expansion naturelle des eaux lors de crues significatives.
- **Le lit moyen :** Particulièrement identifiable dans les zones à climat méditerranéen, ce lit est affecté par des crues de fréquence moyenne (période de retour de 1 à 10 ans). Il marque les terrains que la rivière investit occasionnellement lors de crues plus importantes que les ordinaires, sans atteindre encore le lit majeur.

La compréhension et la délimitation précise de ces différents lits sont essentielles pour toute démarche d'aménagement ou de prévention des risques d'inondation, notamment dans les zones urbaines ou à forte vulnérabilité.

I.5 Les Inondations :

Les inondations désignent un phénomène naturel caractérisé par le débordement temporaire d'eaux issues de rivières, d'oueds ou de nappes phréatiques, submergeant des zones qui ne sont habituellement pas immergées (GIEC, 2012). Elles peuvent être causées par des précipitations intenses, une saturation des sols, la fonte des neiges ou des événements marins extrêmes.

Ces événements figurent parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes et destructrices au niveau mondial. Selon Shah et al. (2019), elles sont responsables de pertes humaines significatives, de destructions d'infrastructures et d'importants dégâts économiques, en particulier dans les pays en développement où les systèmes d'alerte et les moyens d'adaptation sont souvent insuffisants.

En plus des facteurs climatiques, la pression croissante de l'urbanisation dans les zones inondables contribue à aggraver leur impact (Shah et al., 2017). Ainsi, la gestion du risque d'inondation

nécessite une approche intégrée combinant prévention, planification urbaine et résilience des territoires face aux événements extrêmes.

I.6 Différents types d'inondations :

Les inondations se manifestent sous différentes formes selon l'origine des apports en eau, la topographie du terrain, les caractéristiques du bassin versant, ainsi que les conditions météorologiques et géologiques. Il est donc essentiel de les classifier afin de mieux comprendre leurs mécanismes et proposer des mesures de gestion adaptées.

I.6.1 Inondations de plaine ou par remontée de nappe affleurante :

Ce type d'inondation survient généralement dans les basses terres et les zones alluviales, où les précipitations prolongées saturent les sols, provoquant une remontée de la nappe phréatique jusqu'à la surface. Cela engendre une submersion progressive, souvent lente, mais durable. Ces inondations sont fréquentes dans les régions à forte perméabilité des sols ou à nappe peu profonde (Ministère de l'Écologie, 2011).

I.6.2 Crues torrentielles :

Les crues torrentielles, typiques des zones montagneuses, se caractérisent par des écoulements très rapides et puissants. Elles résultent d'orages intenses sur des terrains pentus et imperméables, entraînant une montée soudaine du niveau des cours d'eau. Ce type d'inondation est particulièrement dangereux en raison de sa rapidité et de sa capacité à transporter des matériaux solides (Veyret et Reghezza, 2005).

I.6.3 Ruissellement pluvial :

Il s'agit d'inondations causées directement par des pluies intenses, lorsque l'eau ne parvient pas à s'infiltrer dans le sol ou à être évacuée par les réseaux d'assainissement. Elles affectent souvent les milieux urbains fortement imperméabilisés. Le ruissellement peut provoquer une submersion localisée des voiries, caves, ou infrastructures, même en l'absence de débordement des cours d'eau (Lagadec, 2004).

I.6.4 Autres types d'inondations :

D'autres formes existent, bien que moins fréquentes :

- **Inondations littorales :** causées par des tempêtes, marées exceptionnelles ou tsunamis.
- **Inondations par rupture d'ouvrage :** telles que la défaillance de barrages ou digues.
- **Inondations glaciaires :** consécutives à la fonte rapide des glaces ou à la rupture de lacs proglaciaires.

Chacune de ces inondations présente des enjeux particuliers et requiert des stratégies de prévention spécifiques selon leur contexte géographique et humain.

I.7 Causes et conséquences des inondations :

I.7.1 Causes des inondations :

Les inondations résultent de l'interaction de plusieurs facteurs naturels et anthropiques. Parmi les causes principales, on distingue :

- **Les précipitations intenses et prolongées :** Elles constituent la cause la plus fréquente d'inondations, particulièrement lorsqu'elles dépassent la capacité d'infiltration des sols ou de rétention des cours d'eau.
- **La fonte rapide des neiges :** Dans certaines régions, le dégel brutal à la fin de l'hiver peut provoquer une élévation soudaine des niveaux d'eau, entraînant des débordements.
- **L'urbanisation non maîtrisée :** L'imperméabilisation des surfaces (béton, bitume) réduit l'infiltration de l'eau et augmente le ruissellement, surchargeant les réseaux de drainage souvent insuffisants.
- **La réduction des zones humides et l'occupation des lits majeurs** : Le comblement des zones naturelles de rétention (mares, marécages, forêts riveraines) et la construction dans les zones inondables aggravent considérablement le risque d'inondation.
- **La déforestation :** Elle favorise le ruissellement en réduisant l'absorption naturelle des sols et en accélérant l'érosion des versants.
- **Les changements climatiques :** Ils intensifient les extrêmes météorologiques, augmentant la fréquence et la gravité des événements pluvieux.
- **Les défaillances d'infrastructures hydrauliques :** Une rupture de digue, une obstruction de pont ou un mauvais entretien des réseaux de drainage peut transformer un épisode pluvieux ordinaire en catastrophe.

I.7.2 Conséquences des inondations :

Les inondations peuvent avoir des effets dévastateurs, à la fois immédiats et durables, sur divers aspects de la société et de l'environnement :

- **Conséquences humaines :** Elles incluent la perte de vies humaines, des blessés, des déplacements forcés de populations, ainsi que des impacts psychologiques profonds, notamment le stress post-traumatique.
- **Conséquences matérielles :** Les dégâts aux habitations, infrastructures (routes, ponts, réseaux électriques), cultures, et biens personnels peuvent être considérables, avec un coût économique souvent très élevé.
- **Conséquences environnementales :** Les crues violentes provoquent l'érosion des sols, la destruction d'habitats naturels, et la pollution des eaux (par les hydrocarbures, déchets, eaux usées, etc.).
- **Conséquences économiques :** Les inondations paralysent les activités économiques (agriculture, commerce, transports), affectent la production et nécessitent des dépenses importantes pour la reconstruction et l'indemnisation.
- **Conséquences sanitaires :** La stagnation des eaux peut favoriser la prolifération de maladies hydriques (choléra, leptospirose, gastro-entérites) et créer des conditions propices à la prolifération des moustiques vecteurs.

En somme, les inondations représentent un risque global aux répercussions multiples. Leur intensification dans un contexte de changement climatique et de pression urbaine souligne l'urgence de stratégies de prévention et d'adaptation.

I.8 Historique des inondations en Algérie :

L'Algérie a été marquée à travers son histoire contemporaine par de nombreuses inondations destructrices, qui ont révélé la vulnérabilité croissante des zones urbaines face aux événements hydrologiques extrêmes. En raison de sa géographie contrastée et de son climat méditerranéen, caractérisé par des pluies intenses et localisées en automne et en hiver, le pays est régulièrement confronté à des crues soudaines et violentes.

L’une des inondations les plus dramatiques de l’histoire récente remonte à novembre 2001, lorsque la capitale, Alger, et particulièrement la commune de Bab El Oued, fut frappée par des pluies diluviennes. Cet événement tragique causa la mort de plus de 700 personnes et fit plus de 150 disparus, en plus de dégâts matériels considérables (Guettouche, 2012). Cette catastrophe a mis en lumière les insuffisances en matière de planification urbaine, notamment l’urbanisation anarchique dans les lits majeurs et l’envasement des oueds.

D’autres événements marquants incluent :

- Les inondations de 1984 à Batna, qui ont entraîné la mort de dizaines de personnes, affectant gravement les infrastructures locales.
- Les crues de Ghardaïa en 2008, qui ont touché plusieurs ksour (villages traditionnels), provoquant la destruction de centaines d’habitations et le déplacement de nombreuses familles.
- Les inondations de 2012 à Tlemcen et Oran, avec des pertes humaines et matérielles importantes, dues à des systèmes d’évacuation insuffisants et une topographie défavorable.

Plus récemment, en octobre 2019, plusieurs wilayas, dont El Bayadh et Djelfa, ont subi des inondations à la suite d’averses orageuses. Ces épisodes montrent que, malgré les efforts de modernisation des réseaux de drainage et d’alerte, de nombreuses régions restent exposées aux risques hydrologiques, notamment en raison de l’urbanisation croissante, du changement climatique et du manque d’entretien des infrastructures (Bouaziz et al., 2020).

Ces événements ont progressivement sensibilisé les autorités publiques à l’importance de l’aménagement des oueds, de la maîtrise de l’urbanisation et de la mise en place de systèmes de prévision et d’alerte. Toutefois, les politiques de gestion intégrée du risque inondation restent encore limitées dans certaines zones à risque élevé.

Conclusion :

Les inondations, en tant que manifestations naturelles parfois amplifiées par les activités humaines, restent au cœur des préoccupations liées à la gestion des risques hydrologiques. Les catastrophes survenues ces dernières décennies rappellent l'importance d'une meilleure compréhension du comportement des cours d'eau et des dynamiques territoriales qui y sont liées.

Face à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes, notamment dans un contexte de changement climatique, il devient essentiel de disposer d'outils d'analyse et de diagnostic fiables. La connaissance approfondie des mécanismes des crues, des types d'inondations, ainsi que des facteurs de vulnérabilité, constitue une base indispensable pour anticiper les risques et planifier des aménagements adaptés.

Ainsi, une gestion efficace des ressources en eau et de la sécurité des territoires nécessite une approche intégrée, fondée sur la connaissance scientifique, la prévention, et une planification territoriale rigoureuse.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Introduction :

Avant d'entamer toute étude ou projet d'aménagement, il est primordial d'acquérir une connaissance approfondie de la zone étudiée. Cette analyse préliminaire permet de mettre en évidence les caractéristiques naturelles, physiques et humaines susceptibles d'influencer la planification et la réussite du projet. Elle inclut notamment la localisation géographique, la nature géologique et les conditions climatiques locales. Ces facteurs déterminent en grande partie le comportement hydrologique du bassin, surtout dans le cadre de projets liés à la gestion des eaux et à la protection contre les inondations. Dans cette perspective, ce chapitre est consacré à la présentation détaillée de la zone d'étude, constituant ainsi une base essentielle pour la conception d'un aménagement approprié et durable.

II.1 Présentation de la zone d'études :

L'Oued Merzoug est situé dans la wilaya de Tipaza, à l'ouest d'Alger, sur la façade méditerranéenne. Il traverse une partie de la ville de Tipaza, qui constitue le chef-lieu de la wilaya et qui occupe une position stratégique en raison de sa proximité avec la capitale (environ 70 km à l'ouest d'Alger). La commune de Tipaza s'étend sur une superficie d'environ 69 km² et abrite une population estimée à plus de 25 000 habitants (ONS, 2021).

Sur le plan administratif, la ville de Tipaza est délimitée : au nord par la mer Méditerranée, au sud par la commune de Sidi Rached et Hadjout, à l'est par la commune de Ain Tagourait, et à l'ouest, par la commune de Cherchell et Nador.

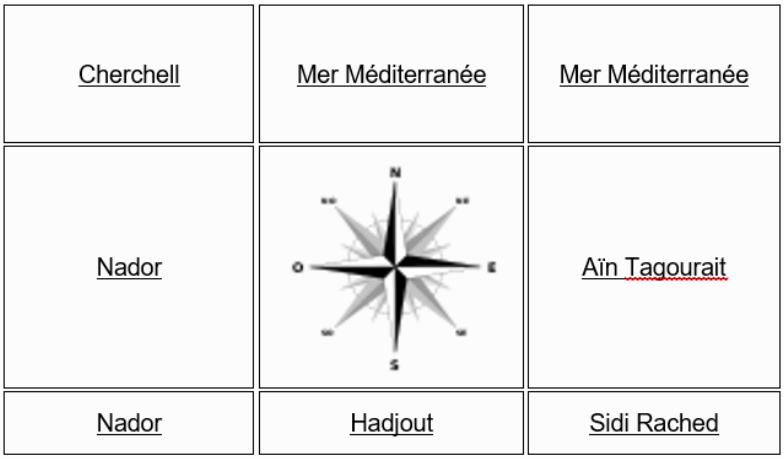


Figure II-1 : Communes limitrophes de la commune de de Tipaza

L’Oued Merzoug prend naissance dans les zones montagneuses du sud de la wilaya et s’écoule vers le nord pour rejoindre la mer Méditerranée à proximité de la ville de Tipaza. Cette configuration, combinée aux épisodes pluvieux intenses caractéristiques du climat méditerranéen, accentue le risque de crues et d’inondations dans la région.

Ces caractéristiques géographiques et administratives définissent le cadre de notre étude, centrée sur la protection de la ville de Tipaza contre les inondations générées par l’Oued Merzoug.

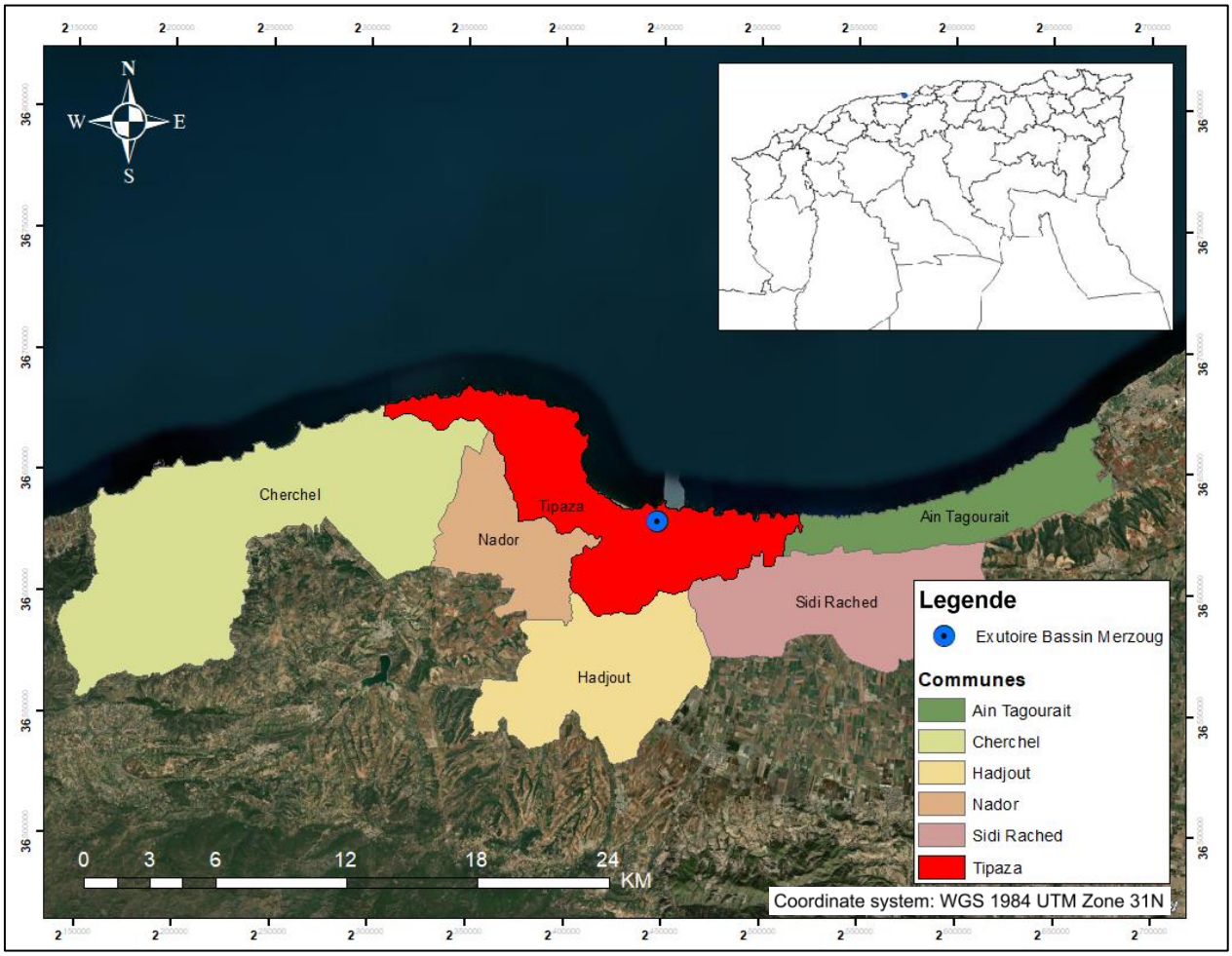


Figure II-2 : Emplacement de la commune de Tipaza.

II.2 Climatique :

L’analyse de la climatologie occupe une place essentielle dans la compréhension des phénomènes hydrologiques. Elle repose sur l’étude de plusieurs paramètres, tels que la pluviométrie, la température, la vitesse et la direction du vent, ainsi que les occurrences de phénomènes particuliers comme le sirocco vent chaud et sec chargé de poussières ou encore le gel. La collecte de ces informations est assurée par différents organismes spécialisés dans l’observation et l’archivage des données météorologiques. En Algérie, l’Office National de la Météorologie (ONM) fournit principalement les données relatives à la température, au vent et à l’évaporation, tandis que l’Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), à travers ses stations implantées dans la wilaya de Tipaza, assure le suivi des précipitations.

II.2.1 Vent :

L'étude des vents est cruciale pour la conception des infrastructures et dans le domaine de l'hydraulique. Il est important de connaître leur répartition mensuelle en termes de vitesse et de fréquence, tout en tenant compte de leur direction (Touaibia, 2015).

Le régime des vents dans la région de Tipaza, où s’écoule l’Oued Merzoug, présente une variation saisonnière modérée. La période la plus venteuse s’étend d’octobre à début mai, avec des vitesses moyennes dépassant 13,8 km/h, et atteint un maximum d’environ 15,5 km/h en décembre. À l’inverse, la période la moins venteuse se situe entre mai et fin octobre, lorsque les vitesses chutent à près de 12,1 km/h, notamment en août. Concernant la direction dominante, le vent souffle principalement de l’ouest entre septembre et mai, alors qu’il s’oriente vers l’est durant la saison estivale, de mai à septembre. Bien que ces vitesses de vent n’aient pas d’impact direct sur les écoulements de surface, elles influencent l’évapotranspiration, la dispersion des particules et l’humidité des sols, jouant ainsi un rôle indirect dans les processus hydrologiques et dans la dynamique du bassin versant (Weather Spark, 2025).

Tableau II-1 : vitesse horaire moyenne du vent à Tipaza. (Source : Weather Spark, 2025)

Mois	sept	oct	nov	déc	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août
Vent moyen (Km/h)	12.7	13.3	14.9	15.5	15.4	15.5	14.6	14.3	12.9	12.3	12.2	12.1

II.2.2 Pluviométrie :

L'analyse de la répartition mensuelle des précipitations à la station de Hadjout met en évidence une forte variation saisonnière. La période humide s'étend généralement de septembre à mai, avec des cumuls mensuels supérieurs à 20 mm. Le mois le plus pluvieux est novembre, enregistrant en moyenne 77,7 mm de précipitations, suivi de décembre (72,8 mm) et janvier (65,9 mm). En revanche, la saison sèche correspond aux mois d'été, de juin à août, où les précipitations chutent nettement, atteignant un minimum de seulement 0,7 mm en juillet. La pluie annuelle moyenne dans la région est estimée à 550 mm, ce qui illustre bien le caractère méditerranéen du climat de Tipaza, marqué par des hivers pluvieux et des étés particulièrement secs.

Tableau II-2 : Répartition 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

II.2.3 Températures :

Le climat de Tipaza se caractérise par une alternance entre une saison estivale chaude et une saison hivernale relativement fraîche. La période la plus chaude s'étend généralement de la fin juin à la mi-septembre, avec des températures maximales quotidiennes dépassant fréquemment les 29°C. Le mois d'août constitue le pic de chaleur, affichant en moyenne une température maximale de 32°C et une minimale avoisinant 22°C.

En revanche, la saison fraîche se prolonge de la fin novembre jusqu'à la fin mars. Durant cette période, les températures maximales quotidiennes restent inférieures à 19°C. Le mois de janvier est le plus froid de l'année, avec des valeurs moyennes oscillant entre 7°C pour les minimales et 16°C pour les maximales (Weather Spark, 2025).

Tableau II-3 : Températures mensuelles minimales, moyennes et maximales à Tipaza. (Source : Weather Spark, 2025)

Mois	sept	oct	nov	déc	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août
Tmax en (°C)	29	25	20	17	16	17	19	21	24	28	31	32
Tmoy en (°C)	24	20	16	12	11	12	14	16	19	23	26	27
Tmin en (°C)	19	16	11	8	7	7	9	11	14	18	21	22

II.2.4 Sismicité de Tipaza :

La wilaya de Tipaza se situe dans une zone sismiquement active, en raison de la convergence entre la plaque africaine et la plaque eurasienne, responsable de la formation des failles dans l'Atlas tellien. Cette activité tectonique se traduit par des secousses régulières de magnitude modérée à forte. Parmi les événements marquants, on cite le séisme du 29 octobre 1989 au Djebel Chenoua magnitude 6,0), qui a causé d'importants dégâts dans la région et dont les répliques ont duré plusieurs mois (CRAAG, 1989). Plus récemment, plusieurs secousses ont été enregistrées, telles que celle du 29 août 2020 (magnitude 4,2) à Sidi-Ghiles (Radio Algérie, 2020), celle du 31 juillet 2021 à Beni Mileuk (magnitude 4,5) (APS, 2021), ou encore celle du 10 décembre 2024 (magnitude 4,0) ressentie dans plusieurs communes de la wilaya (APS, 2024). Selon les bases de données internationales, plus de 100 séismes d'une magnitude supérieure ou égale à 4 ont été recensés entre 2015 et 2025 dans un rayon de 300 km autour de Tipaza, confirmant une activité sismique persistante (Earthquake List, 2025). Ainsi, la sismicité constitue un facteur de risque majeur pour cette région, qui doit être pris en compte dans la conception des ouvrages hydrauliques et de protection contre les inondations.

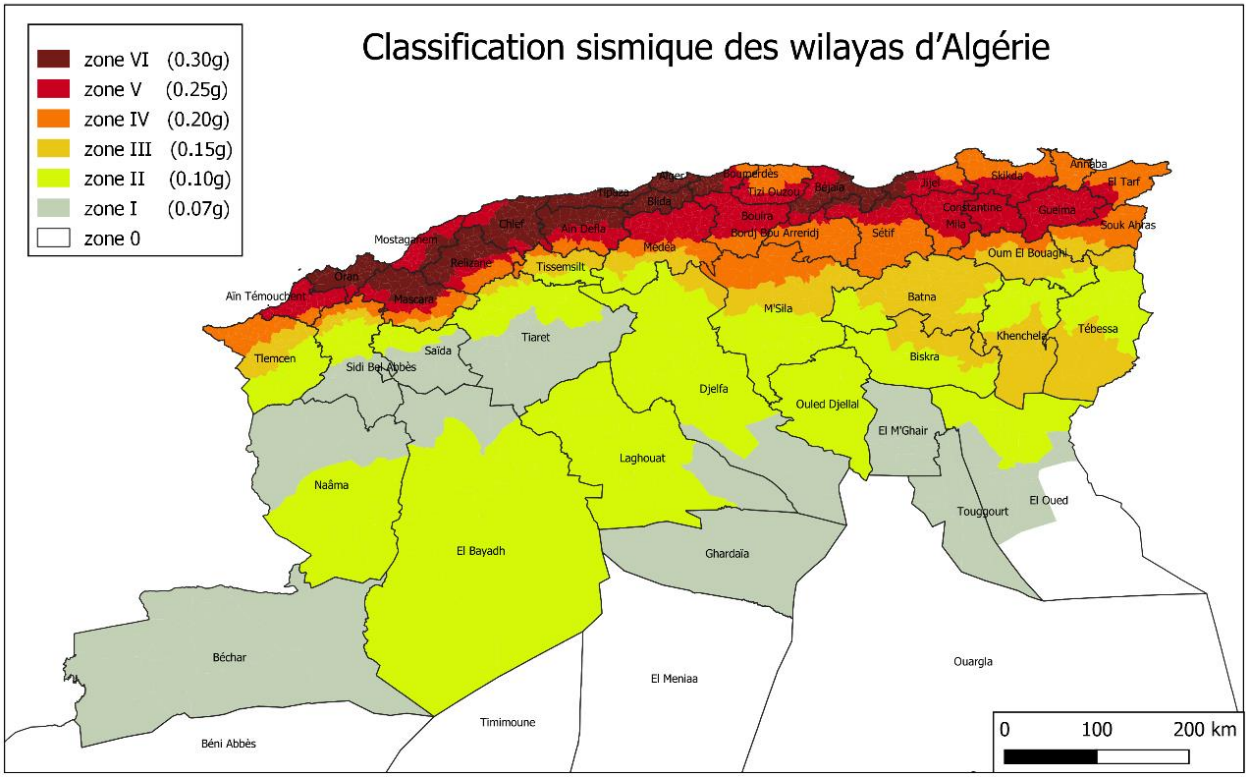


Figure II-3 : Zonage sismique de l'Algérie (Source : RPA 2024)

II.3 Situation géologique :

La région de Tipaza, où s'inscrit le bassin versant de l'Oued Merzoug, fait partie du Tell atlasique, caractérisé par une géologie variée héritée des mouvements orogéniques alpins (Vila, 1980). On y observe principalement des formations sédimentaires d'âge secondaire et tertiaire, constituées de calcaires, de marnes et de grès, issus de dépôts marins successifs. Les alluvions récentes du Quaternaire occupent quant à elles les plaines littorales et les lits des oueds (Durozoy, 1956).

Les terrains marneux et argileux, peu perméables, favorisent le ruissellement de surface, ce qui contribue à accentuer les risques de crues. À l'inverse, les formations calcaires fracturées et karstifiées permettent une infiltration plus importante et participent à l'alimentation des nappes souterraines (ANRH, 2018).

La morphologie et l'hydrologie actuelles sont également influencées par la tectonique active de la région. La présence de failles, héritées de l'orogenèse alpine, ainsi que les séismes enregistrés dans la wilaya de Tipaza, confirment cette instabilité géologique (CRAAG, 2020). Cette dynamique

structurelle joue un rôle déterminant dans l'écoulement des eaux et la sensibilité du bassin versant de l'Oued Merzoug aux phénomènes hydrologiques extrêmes.

II.4 Occupation du sol :

L'occupation des sols dans la région du bassin versant de l'Oued Merzoug présente une diversité qui reflète à la fois les caractéristiques naturelles du territoire et l'évolution des activités humaines. La plaine littorale de Tipaza est marquée par une forte vocation agricole, dominée par les cultures maraîchères, arboricoles et viticoles, qui bénéficient d'un climat méditerranéen favorable et de sols relativement fertiles (MATE, 2018).

Parallèlement, l'urbanisation s'est intensifiée au cours des dernières décennies, notamment autour de la ville de Tipaza, chef-lieu de wilaya, ainsi que dans les zones périurbaines. Cette croissance urbaine s'est souvent faite au détriment des terres agricoles et parfois même dans des zones exposées aux inondations, accentuant ainsi la vulnérabilité de la région face aux crues de l'Oued Merzoug (Bouali, 2015).

Les espaces naturels subsistants, tels que les collines boisées et les maquis, occupent une superficie plus réduite mais jouent un rôle écologique essentiel en contribuant à la régulation hydrique et à la protection contre l'érosion. Toutefois, ces milieux sont menacés par l'expansion urbaine et certaines activités humaines incontrôlées, comme les défrichements ou l'exploitation non durable des ressources.

Ainsi, l'occupation actuelle des sols traduit un déséquilibre entre les besoins agricoles, la pression urbaine et la préservation des espaces naturels. Cette dynamique constitue un facteur clé à prendre en considération dans toute démarche d'aménagement visant à réduire les risques d'inondation et à assurer un développement durable de la région.

II.5 Problématiques hydrologiques et risques :

La ville de Tipaza, située sur le littoral méditerranéen, est soumise à plusieurs problématiques hydrologiques qui accentuent sa vulnérabilité aux inondations. Le régime pluviométrique méditerranéen, caractérisé par des précipitations intenses et concentrées en automne et au printemps, provoque souvent des crues rapides et soudaines. Ces épisodes pluvieux violents sont à

l'origine d'un ruissellement important qui peut dépasser la capacité d'absorption des sols et entraîner des débordements localisés (ANRH, 2020).

À ces facteurs climatiques s'ajoutent des contraintes d'origine anthropique. L'expansion urbaine de Tipaza, en particulier dans les zones basses et à proximité des oueds, a réduit les surfaces naturelles d'infiltration. L'imperméabilisation croissante des sols par les routes, constructions et infrastructures accentue le ruissellement pluvial et surcharge les réseaux d'assainissement souvent insuffisants pour absorber de tels volumes (Bouali, 2015).

Le phénomène d'érosion des versants et l'accumulation de sédiments dans les lits des oueds réduisent par ailleurs la capacité d'écoulement des cours d'eau, accentuant le risque de débordement. À cela s'ajoute l'impact du changement climatique qui, selon les projections, devrait accroître la fréquence et l'intensité des épisodes pluvieux extrêmes dans la région méditerranéenne, renforçant la vulnérabilité de la ville (GIEC, 2021).

Ainsi, les inondations constituent l'un des principaux risques naturels auxquels Tipaza est exposée. Leur gestion nécessite une approche intégrée combinant aménagement hydraulique, régulation de l'urbanisation et renforcement des systèmes d'alerte et de protection civile.

II.5.1 Historique des inondations à Tipaza :

La ville de Tipaza a connu plusieurs épisodes d'inondations notables au cours des dernières décennies. Le 26 avril 2006, de fortes précipitations ont provoqué des crues soudaines causant des dégâts matériels et la mort d'une personne âgée, nécessitant une mobilisation urgente des services de la protection civile (El Watan, 2006). Plus récemment, dans la nuit du 25 mai 2023, la wilaya a enregistré des cumuls pluviométriques exceptionnels variant entre 100 et 160 mm, un record depuis plus de 20 ans. Ces intempéries ont entraîné l'effondrement d'habitations, des coupures de routes et des pertes économiques évaluées à près de 4 milliards de dinars, ce qui a conduit l'État à mettre en place un plan d'aide d'urgence incluant le relogement de plus de 100 familles (APS, 2024). De même, au début de l'automne 2021, des pluies relativement modestes ont suffi à engendrer des inondations perturbant fortement la circulation sur l'axe Alger–Tipaza, mettant en lumière la vulnérabilité des infrastructures hydrauliques et l'insuffisance des systèmes de drainage urbain (TSA, 2021).



Figure II-4 : Le port de Khemisti, wilaya de Tipaza, en mai 2023. (Source : © DR/HORIZONS)

Conclusion :

L'analyse de la zone d'étude a permis de mettre en évidence les principales caractéristiques naturelles, physiques et socio-économiques de la wilaya de Tipaza, ainsi que les problématiques hydrologiques qui y sont associées. La diversité géologique, les conditions climatiques marquées par des épisodes pluvieux intenses, ainsi que la vulnérabilité des infrastructures face aux aléas naturels constituent des facteurs déterminants pour la compréhension du fonctionnement hydrologique local. L'historique des inondations récentes souligne, par ailleurs, la nécessité d'une gestion intégrée et durable des eaux afin de réduire les risques. Cette présentation constitue ainsi une base essentielle pour les études hydrologiques et les propositions d'aménagement développées dans les chapitres suivants.

Chapitre III : Etude hydrologique

Introduction :

L'hydrologie est une branche des sciences de la Terre qui s'intéresse à la distribution, la circulation et les propriétés physico-chimiques des eaux superficielles et souterraines. Elle constitue un domaine interdisciplinaire mobilisant des connaissances en météorologie, géologie, hydraulique et géographie, afin de comprendre le cycle de l'eau et de répondre aux problématiques croissantes liées à sa gestion.

Les études hydrologiques occupent une place centrale dans la prévention des risques naturels, notamment les inondations. Elles permettent d'évaluer les précipitations, les écoulements et les débits, éléments indispensables à la conception d'aménagements hydrauliques efficaces. L'estimation des débits de crue associés à différentes périodes de retour (décennale, vingtennale, centennale, etc.) constitue une étape essentielle pour dimensionner les ouvrages de protection et planifier un aménagement du territoire résilient.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'analyse hydrologique du bassin versant de l'oued Merzoug à Tipaza, à travers le traitement des données pluviométriques et la modélisation des débits de crue. Des outils comme le logiciel ArcGIS seront mobilisés pour caractériser les paramètres morphologiques du bassin, tandis que des méthodes statistiques permettront d'évaluer la fréquence des crues. Cette analyse vise à fournir les éléments nécessaires à la conception de mesures d'aménagement destinées à réduire la vulnérabilité de la zone étudiée face aux inondations.

III.1 Bassin versant :

Le bassin versant, également appelé bassin d'alimentation à une section donnée, représente l'ensemble de la surface topographique drainée par un cours d'eau et ses affluents en amont de cette section spécifique. Tous les flux d'eau qui naissent à l'intérieur de cette surface topographique doivent obligatoirement traverser la section de mesure pour continuer leur chemin vers l'aval. Chaque bassin versant est délimité des autres par une ligne de partage des eaux, tracée sur la carte topographique. Cette délimitation commence à l'exutoire et suit des segments tracés à main levée perpendiculairement aux courbes de niveau, passant par les crêtes et aboutissant à nouveau à l'exutoire (Touaibia, 2015).

- **ArcGIS :**

ArcGIS est un **système d'information géographique (SIG)** largement utilisé en hydrologie pour le traitement, l'analyse et la modélisation des données spatiales liées à l'eau. Ce logiciel permet aux spécialistes de l'eau d'intégrer et de gérer un vaste ensemble de données — topographiques, pluviométriques, climatiques, d'occupation du sol ou encore de réseaux hydrographiques — afin de mener des analyses hydrologiques précises (Esri, 2012).

Grâce à son **ensemble d'outils hydrologiques** tels que ceux proposés par Arc Hydro ou le module Spatial Analyst, ArcGIS facilite la délimitation des bassins versants, le calcul de la direction et de l'accumulation des flux (flow direction et flow accumulation), ainsi que la génération de réseaux hydrographiques et de cartes d'inondation (Esri, 2012).

Dans le contexte des études hydrologiques, ArcGIS permet également d'estimer les débits de crue en combinant des données spatiales et des modèles hydrologiques, ce qui est essentiel pour dimensionner les aménagements de protection fluviale. Cette capacité d'intégration géospatiale en fait un outil précieux pour la planification de la gestion des ressources en eau et la prise de décision face aux événements extrêmes (Esri, 2012).

III.2 Caractéristiques principales du bassin versant :

III.2.1 Caractéristiques géographiques :

L'exutoire du bassin se localise aux coordonnées WGS 1984 UTM (Zone 31 N) suivantes :

- **Longitude : X** = 2.445054°
- **Latitude : Y** = 36.589°
- **Altitude : Z** = 28 m

Ces données géographiques sont essentielles pour la modélisation hydrologique et l'analyse spatiale du bassin. Elles permettent notamment la localisation précise de l'exutoire, point clé pour le calcul des débits de crue, la délimitation du bassin, et la mise en œuvre des mesures de gestion des risques d'inondation.

III.2.2 Caractéristiques morphologiques :

L'analyse morphométrique d'un bassin versant permet de mieux comprendre son comportement hydrologique, en particulier en ce qui concerne l'écoulement des eaux, le ruissellement et les risques d'inondation. Le bassin versant de l'Oued Merzoug présente des caractéristiques morphologiques distinctes, que l'on peut résumer à travers les paramètres suivants :

- **Superficie du bassin versant :**

La superficie du bassin versant de l'Oued Merzoug est une donnée fondamentale. Elle détermine la quantité d'eau susceptible de s'écouler vers l'exutoire en fonction des précipitations. Une grande superficie implique généralement un volume de ruissellement plus important, ce qui peut accroître les risques de crue.

Le bassin versant de l'Oued Merzoug s'étend sur une superficie de S = 3.2415 km².

- **Périmètre :**

Le périmètre du bassin versant correspond à la longueur de la ligne de partage des eaux qui le délimite. Ce paramètre permet de mieux cerner la forme du bassin et d'en déduire certains indices, comme le coefficient de compacité.

Le périmètre du bassin versant de l'Oued Merzoug mesure P = 11.824 km.

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

La longueur de l'Oued Merzoug, mesurée depuis la source jusqu'à l'exutoire, est un facteur influençant le temps de concentration, c'est-à-dire le temps nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir tout le bassin. Un cours d'eau long peut entraîner une crue plus étalée, tandis qu'un cours d'eau court favorise des crues plus brusques.

La longueur du cours d'eau principal (thalweg) pour l'Oued Merzoug est Lcp = 4.38 km.

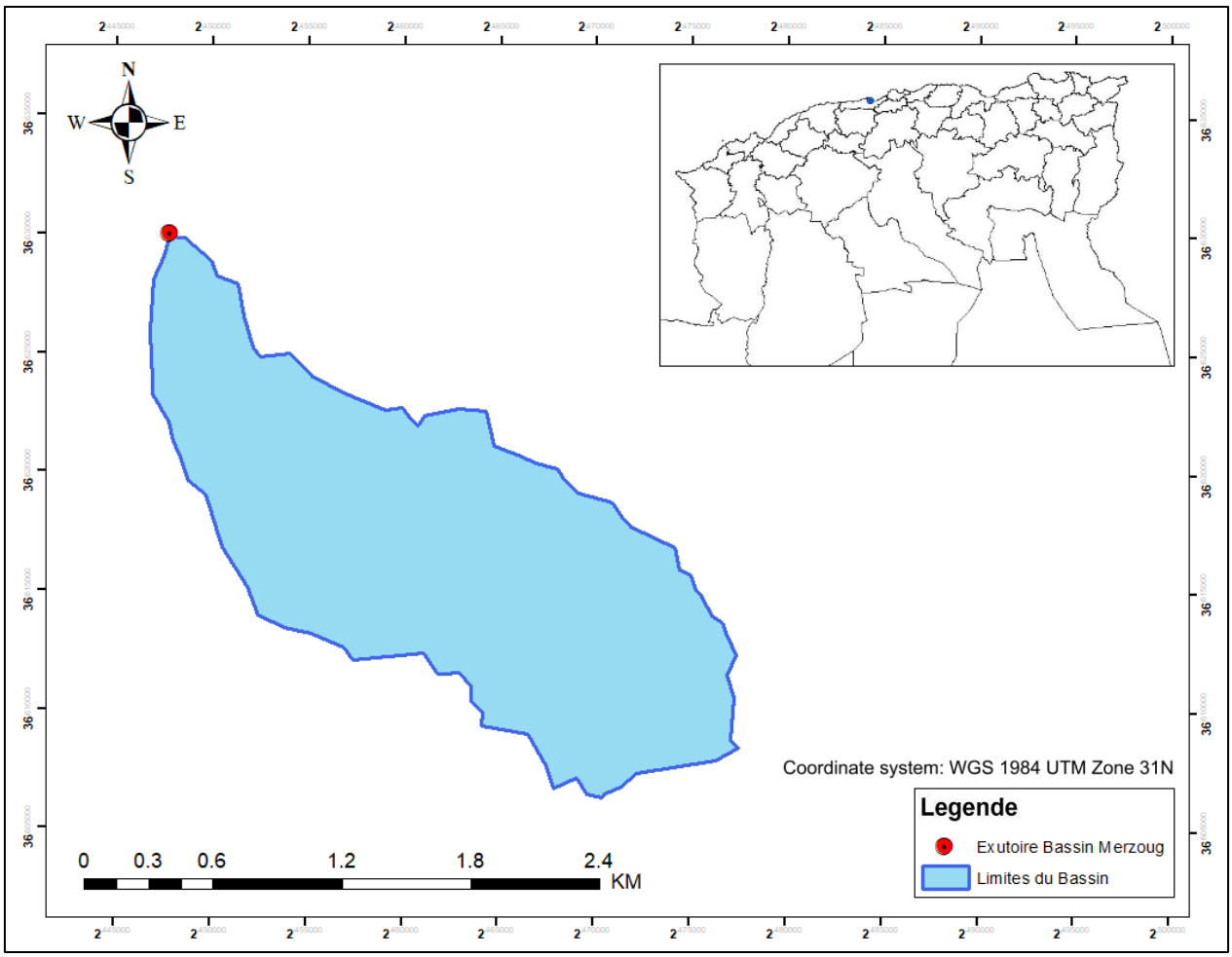


Figure III-1 : Cartographie du bassin Oued Merzoug

III.2.3 Caractéristiques géométriques :

L'étude des caractéristiques géométriques d'un bassin versant permet de décrire sa forme et d'en déduire son comportement hydrologique face aux précipitations. Parmi les paramètres les plus couramment utilisés figurent les indices de compacité et le coefficient d'allongement, ainsi que la notion de rectangle équivalent.

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

L'indice de compacité de Horton correspond au rapport entre la largeur moyenne du bassin versant et la longueur de son cours d'eau principal, et se détermine à l'aide de la formule 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) :**

D'après Gravélius, repris par Loaborde (2000), la forme d'un bassin versant joue un rôle déterminant dans la dynamique de l'écoulement de surface. Pour la caractériser, on utilise l'indice de compacité (KG), ou indice de forme. Ce dernier se définit comme le rapport entre le périmètre réel du bassin (P, en kilomètres) et celui d'un cercle dont la superficie est équivalente à celle du bassin (A, en kilomètres carrés).

L'indice de compacité de Gravélius est calculé par la formule suivante :

$$KG = \frac{P}{2\sqrt{(\pi * S)}} \approx 0.28 * \frac{P}{\sqrt{S}} \qquad \text{(III.2)}$$

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.

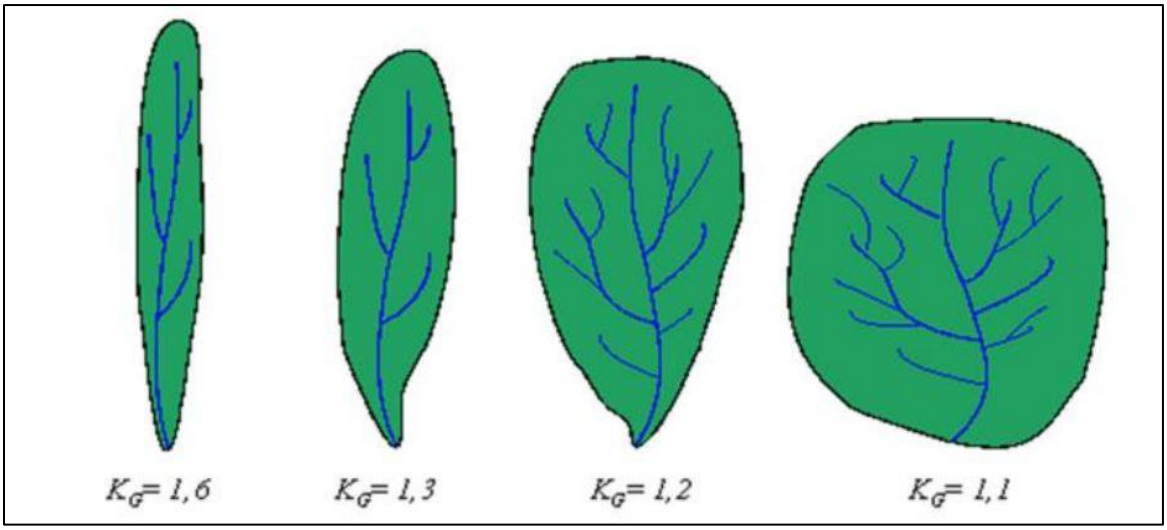


Figure III-2 : Exemples d'indices de compacité

Plus l'indice de compacité (KG) se rapproche de 1, plus la forme du bassin est compacte, ce qui entraîne un temps de concentration réduit. À l'inverse, un KG supérieur à 1 traduit une forme plus allongée, associée à un temps de concentration plus important. Dans notre cas, avec un indice de **1.84**, le bassin versant présente une forme allongée.

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

Ce coefficient est calculé selon la relation suivante :

$$Ca = \frac{Lcp^2}{S} \qquad \text{(III.3)}$$

Où :

- Lcp : Longueur du thalweg principal (km).

- S : Surface du bassin versant (km²).

- **Rectangle équivalent :**

Le rectangle équivalent, ou rectangle de Gravélius, est une représentation schématique du bassin versant sous la forme d'un rectangle possédant les mêmes valeurs d'indice de compacité et d'hypsométrie que le bassin réel.

Cette méthode offre un moyen de comparer les propriétés hydrologiques de plusieurs bassins versants. Les dimensions de ce rectangle, notamment sa surface et son périmètre, sont déterminées de manière à refléter fidèlement les paramètres morphométriques propres au bassin étudié. Si L et l représentent respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent, 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 :

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

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 Merzoug

Désignation		**Symbole**	**Unités**	**Valeur**
Superficie		**S**	**Km^2**	3.2415
Périmètre		**P**	**Km**	11.824
Longueur du talweg principal		**Lcp**	**Km**	4.38
Indice de compacité de Gravélius		**KG**	**/**	1.84
Indice de compacité de Horton		**Kh**	**/**	0.169
Coefficient d'allongement		**Ca**	**/**	5.92
Rectangle équivalent	**Longueur**	**L**	**Km**	5.30
	Largeur	**l**	**Km**	0.61

III.3 Caractéristiques hydrographiques :

III.3.1 Étude du relief :

Le relief constitue un facteur déterminant dans la dynamique hydrologique d'un bassin versant, influençant directement la forme et l'amplitude de l'hydrogramme de crue. Une pente marquée favorise un écoulement rapide des eaux de pluie vers le réseau hydrographique, ce qui réduit le temps de concentration et accélère la montée des débits. Dans de telles conditions, les précipitations atteignent rapidement les cours d'eau, augmentant le risque de crues soudaines et intenses.

III.3.2 La courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique est un outil graphique qui illustre la répartition des altitudes dans un bassin versant. Elle représente la relation entre la surface cumulée située au-dessus d'une certaine

altitude et l'altitude elle-même, exprimée en pourcentage de la surface totale du bassin. Cette représentation permet d'analyser la morphologie générale du terrain, de distinguer les zones de relief élevé, intermédiaire ou bas, et de fournir des indications précieuses sur les processus d'érosion et d'écoulement.

La répartition des surfaces selon les altitudes, ainsi que leur cumul, peuvent être déterminée à l'aide d'outils SIG tels qu'ArcGIS, ce qui permet d'effectuer une analyse topographique approfondie du bassin versant.

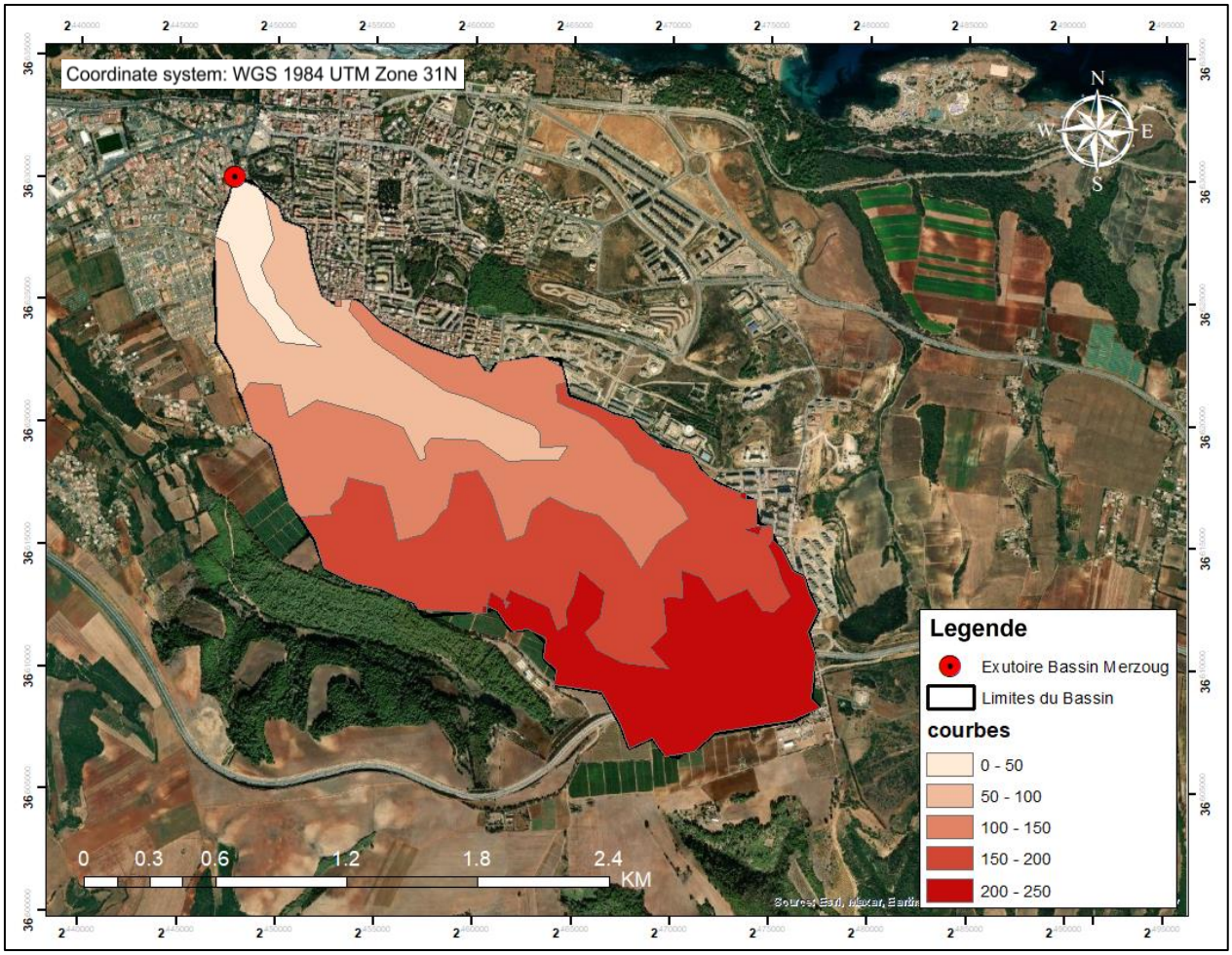


Figure III-3 : Carte hypsométrique du bassin versant d'Oued Merzoug.

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

Tableau III-2 : Paramètres hypsométriques du bassin versant d'Oued Merzoug.

Altitude (m)	S (Km^2)	S Cumulés (km^2)	Surfaces Partielles (%)	S Partielles Cumulés (%)
0 - 50	0.06	0.06	1.90	100
50 – 100	0.36	0.43	11.22	98
100 - 150	1.13	1.56	34.88	86.78
150 – 200	0.81	2.37	25.04	51.9
200 - 250	0.87	3.24	26.86	26.86

Interprétation : L'analyse des données altimétriques montre que le bassin versant présente une amplitude altitudinale allant de 28 m à 243 m.

- **Zones basses (28 à 100 m)**

Elles occupent 13,12 % de la surface totale (0,43 km²) et correspondent à la plaine alluviale près de l'exutoire, particulièrement vulnérable aux inondations.

- **Zones intermédiaires (100 à 200 m)**

Elles représentent la partie dominante du bassin avec 59,92 % (1,94 km²). Elles jouent un rôle de régulation mais peuvent générer un ruissellement rapide en cas de fortes pluies.

- **Zones hautes (200 à 243 m)**

Elles couvrent 26,86 % (0,87 km²) et, situées en amont, contribuent aux crues soudaines en raison de leurs pentes accentuées.

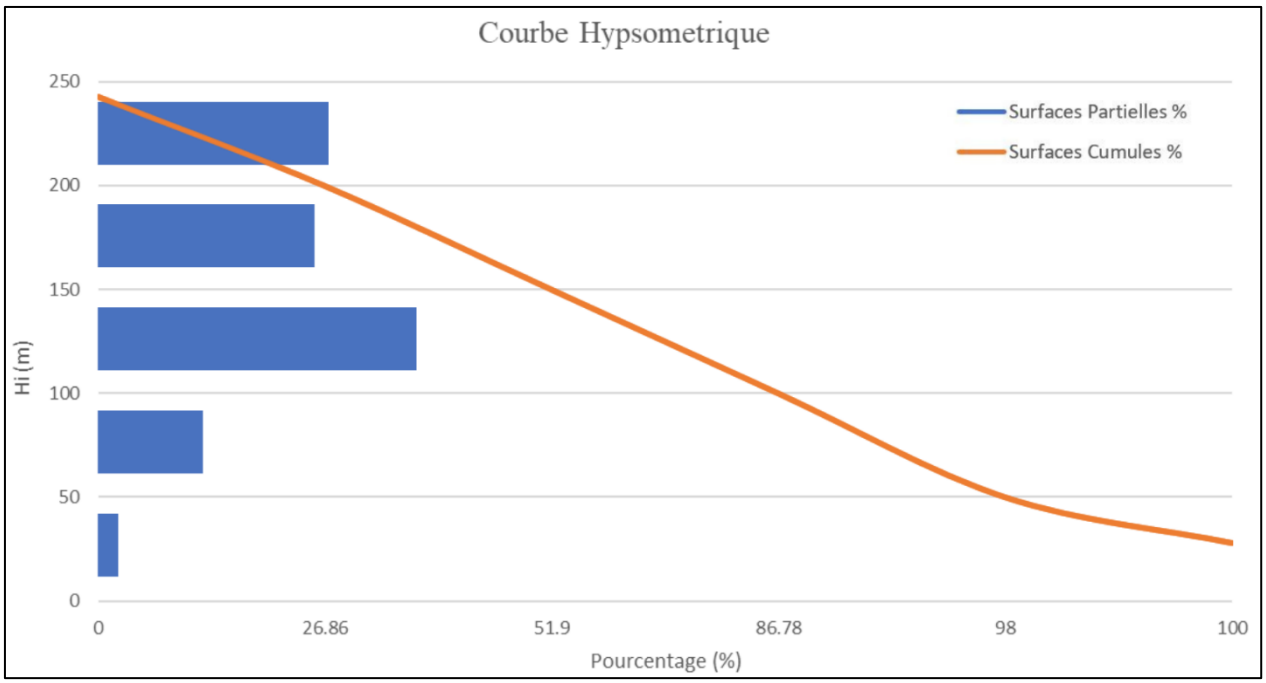


Figure III-4 : Courbe Hypsométrique du Bassin Versant d'Oued Merzoug.

Les caractéristiques altimétriques essentielles peuvent être résumées ainsi :

- **L'altitude maximale et minimale (Hmax–Hmin) :** Ces informations proviennent directement des cartes topographiques. L'altitude maximale correspond au point le plus élevé du bassin versant, tandis que l'altitude minimale représente le point le plus bas, généralement situé à l'exutoire. Ces paramètres revêtent une importance particulière pour établir des relations avec certaines variables climatiques, notamment la température et les précipitations.
- **L'altitude moyenne (Hmoy) :** Cet indicateur, fondamental pour l'analyse du bassin versant, tient compte de l'influence de la zonation climatique verticale. Son calcul repose sur la somme des produits des surfaces partielles Si, situées entre deux courbes de niveau, par leurs altitudes moyennes respectives Hi. La formule de calcul est la suivante :

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

Où :

- Si : Surface partielle entre deux courbes de niveau (km^2).

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

- S : Superficie du bassin versant (km^2).

- **Altitude H5% :** Elle correspond à l'altitude située au niveau où la surface cumulée atteint 5 % sur la courbe hypsométrique du bassin versant.
- **Altitude médiane H50% :** Elle correspond à l'altitude pour laquelle la surface cumulée atteint 50 % sur la courbe hypsométrique du bassin versant.
- **Altitude H95% :** Elle correspond à l'altitude atteinte lorsque la surface cumulée représente 95 % sur la courbe hypsométrique du bassin versant.

Voici un résumé des résultats de calcul présenté dans le tableau suivant :

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

Altitudes (m)	**H** min	**H** max	**H** moy	**H** 5%	**H** 50%	**H** 95%
Bassin versant Merzoug	28	243	156.7	230	155	70

Interprétation : Le tableau indique que l'altitude du bassin versant de l'Oued Merzoug varie entre 28 m et 243 m, avec une moyenne de 156.7 m. La plus grande partie de la superficie se situe entre 70 m (H95 %) et 230 m (H5 %).

III.3.3 Les indices de pente :

Les indices de pente constituent des indicateurs essentiels pour l'analyse et la gestion des territoires. Ils sont largement utilisés par différents acteurs tels que les agronomes, les urbanistes, les forestiers ou encore les gestionnaires des risques naturels. L'étude des variations de pente

permet de mieux comprendre la morphologie d'un bassin versant, d'évaluer la dynamique de l'écoulement et d'anticiper les phénomènes liés à l'érosion ou aux inondations. La production de cartes de pentes, obtenues à partir de données topographiques ou de modèles numériques de terrain, constitue une étape courante pour le calcul de ces indices, particulièrement dans les zones à relief accentué.

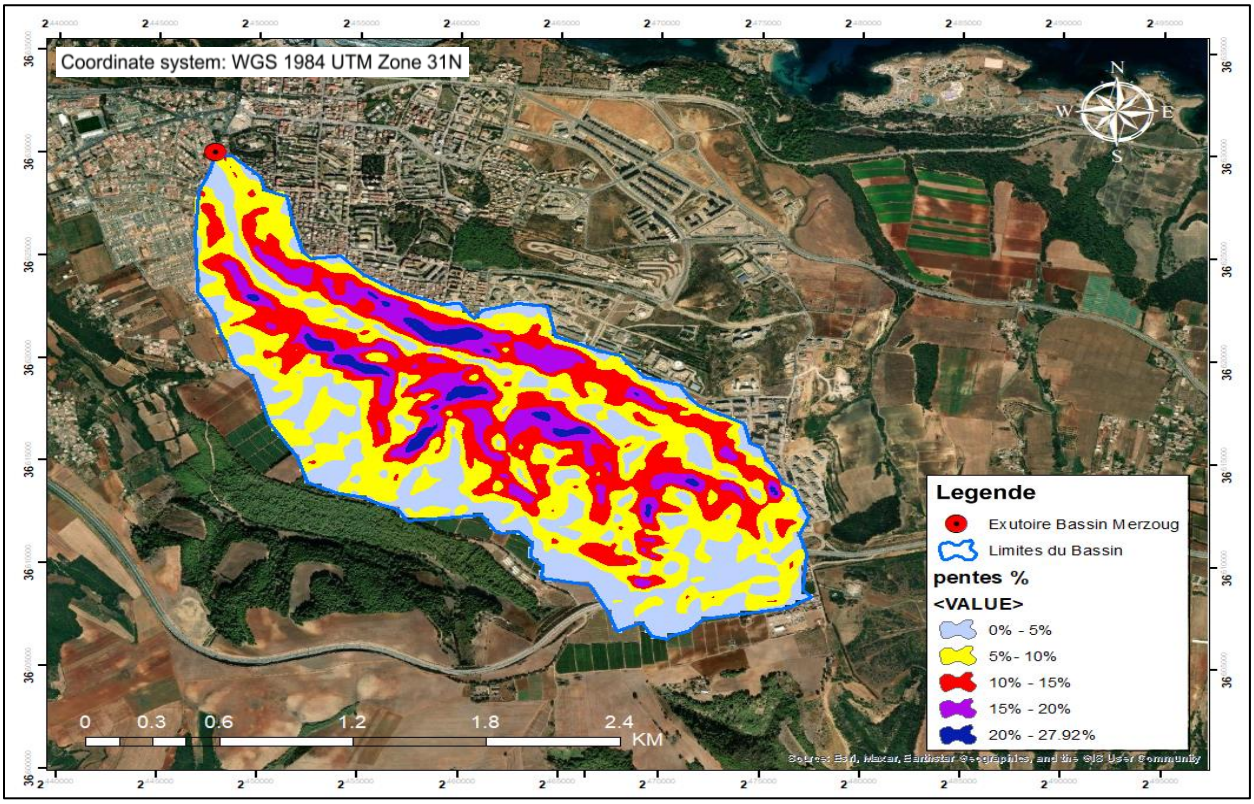


Figure III-5 : Cartographie des pentes dans le bassin versant d'Oued Merzoug.

Les courbes de niveau : sont une représentation cartographique du relief qui relie, par des lignes continues appelées isohypses, l'ensemble des points situés à la même altitude. Elles offrent une visualisation claire des variations topographiques en mettant en évidence les pentes, les vallées et les sommets. Grâce à cette méthode, il est possible de décrire avec précision la morphologie d'un terrain et de faciliter l'analyse géographique ou hydrologique d'une région.

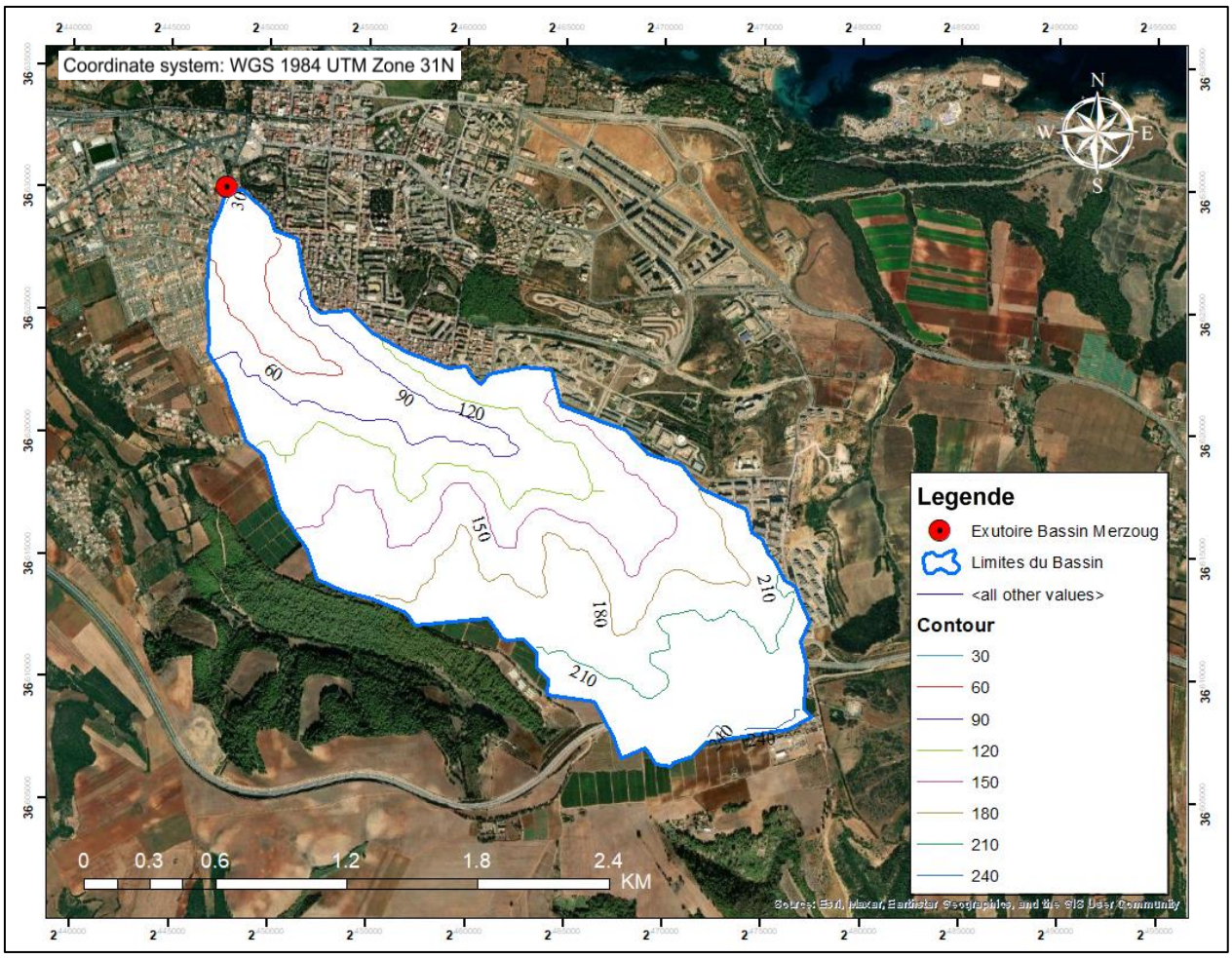


Figure III-6 : Carte des courbes de niveau du bassin versant d'Oued Merzoug.

Interprétation : La carte illustre le relief du bassin versant de l'Oued Merzoug à l'aide de courbes de niveau espacées de 30 mètres.

- **Variation altitudinale** :

  L'altitude du bassin varie entre 28 m à l'exutoire (au nord-ouest, près de la ville de Tipaza) et 243 m en amont (au sud-est du bassin). Cela confirme un gradient altitudinal marqué du sud vers le nord.

- **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.3.3.1 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 5% et les 95% de la surface totale peuvent être reformulées en termes de fréquence.

- Lcp : Longueur du thalweg principal (km).

III.3.3.2 Pente moyenne du bassin versant (Im) :

La pente moyenne est une caractéristique essentielle qui offre des informations sur la configuration topographique du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante, fournissant une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct (et donc sur le temps de concentration Tc), et elle influe directement sur le débit de pointe lors d'une averse (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 Merzoug.

Courbes	Longueur (Km)	ΔH	Surfaces BV (km2)	Im (m/Km)
240	0.42	30	3.2415	167.47
210	2.27			
180	3.48			
150	3.78			
120	3.60			
90	2.98			
60	1.74			
30	0.05			

Interprétation : La pente moyenne élevée du bassin versant de l'Oued Merzoug (167.47 m/km) traduit un relief accentué favorisant un ruissellement rapide, des crues soudaines et une forte vulnérabilité aux inondations en aval.

III.3.3.3 L'indice de pente globale (Ig) :

Est un outil utilisé pour évaluer le relief d'un bassin en se référant à la classification de l'O.R.S.T.O.M. Il est défini comme le rapport entre l'amplitude d'altitude entre les 5% et 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. Pour calculer cet indice, on choisit deux points, S1 et S2, sur l'axe des abscisses de manière à ce que 95% de la surface du bassin soit comprise entre ces deux valeurs, avec 5% de la surface totale du bassin inférieure à S1 et 5% supérieure à S2 (Bénina 2004).

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

Où :

- H 5%, H95% : L'altitude en dessous de laquelle se trouve 5% et 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 < 0.002
2	Relief faible	0.002 < Ig < 0.005
3	Relief assez faible	0.005 < Ig < 0.010
4	Relief modéré	0.010 < Ig < 0.020
5	Relief assez fort	0.020 < Ig < 0.050
6	Relief fort	0.050 < Ig < 0.100
7	Relief très fort	0.100 < Ig

III.3.3.4 L'indice de pente de Roche (Ip) :

L'indice Ip correspond à la pente moyenne pondérée du rectangle équivalent. Il est déterminé à partir des différences d'altitude entre deux courbes de niveau successives (Hi et H{i-1}) et se calcule selon la formule suivante :

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

Où :

- Lr : Longueur du rectangle équivalent (km).

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

III.3.3.5 Indice de pente moyenne (Ipm) :

La pente moyenne d'un cours d'eau joue un rôle déterminant dans l'estimation de la vitesse d'écoulement vers l'exutoire et dans l'évaluation du temps de concentration. Son calcul repose sur l'analyse du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus courante consiste à rapporter la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil à la longueur totale du cours d'eau.

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

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).

III.3.3.6 Dénivelée spécifique (Ds) :

La dénivelée spécifique (Ds) se différencie de l'indice de pente globale en ce sens qu'elle reste indépendante de la variation de la surface du bassin, alors que l'Ig tend à diminuer lorsque celle-ci augmente. Elle est définie par la formule suivante :

$$Ds = Ig\sqrt{S} \qquad \text{(III.12)}$$

Où :

- Ds : Dénivelée spécifique (en mètres).

- Ig : Indice de pente globale (en mètres par mètre).

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

La dénivelée spécifique offre la possibilité d'appliquer la classification de l'O.R.S.T.O.M. (voir Tableau III.6) afin de caractériser les types de relief des bassins versants, et ce, indépendamment de leur superficie.

Tableau III-6 : Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M. 1963.

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

Tableau III-7 : Résultats des calculs des pentes et de la dénivelée spécifique du bassin versant d'oued Merzoug

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Pente du bassin versant	Ibv	m / m	0.049
Pente moyenne du bassin versant	Im	m /Km	167.47
Indice de pente de Roche	Ip	%	32.08
Indice de pente Moyenne	Ipm	m / m	0.04
Indice de pente globale	Ig	m / m	0.03
Dénivelée spécifique	Ds	m	54.35
Relief	/	/	Relief assez fort

Ce tableau regroupe les résultats des calculs relatifs aux différentes pentes ainsi qu'à la dénivelée spécifique du bassin versant de l'Oued Merzoug.

III.4 Étude du réseau hydrographique :

III.4.1 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.4.2 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.4.2.1 Étapes de la hiérarchisation selon Strahler :

1. **Identification des cours d'eau de premier ordre** :
   Les ruisseaux situés en amont, sans affluent, sont considérés comme des cours d'eau de 1er ordre.
2. **Formation d'un cours d'eau d'ordre supérieur** :
   Lorsque deux cours d'eau de même ordre se rejoignent, l'ordre du cours d'eau qui en résulte est augmenté d'une unité (ex. : 1 + 1 = 2).
3. **Conservation de l'ordre en cas d'affluence inégale** :
   Si un cours d'eau d'ordre inférieur rejoint un cours d'eau d'ordre supérieur, ce dernier conserve son ordre (ex. : 2 + 1 = 2).
4. **Progression du réseau** :
   Ce processus est répété tout au long du réseau, jusqu'à ce que l'on identifie le cours principal, qui correspond au cours d'eau de l'ordre le plus élevé dans le bassin.

III.4.2.2 Importance de la hiérarchisation

La hiérarchisation du réseau permet d'évaluer la complexité du drainage, de calculer certains indices morphométriques (comme la densité hydrographique et la fréquence des cours d'eau) et de mieux interpréter la réponse hydrologique du bassin face aux précipitations et aux crues.

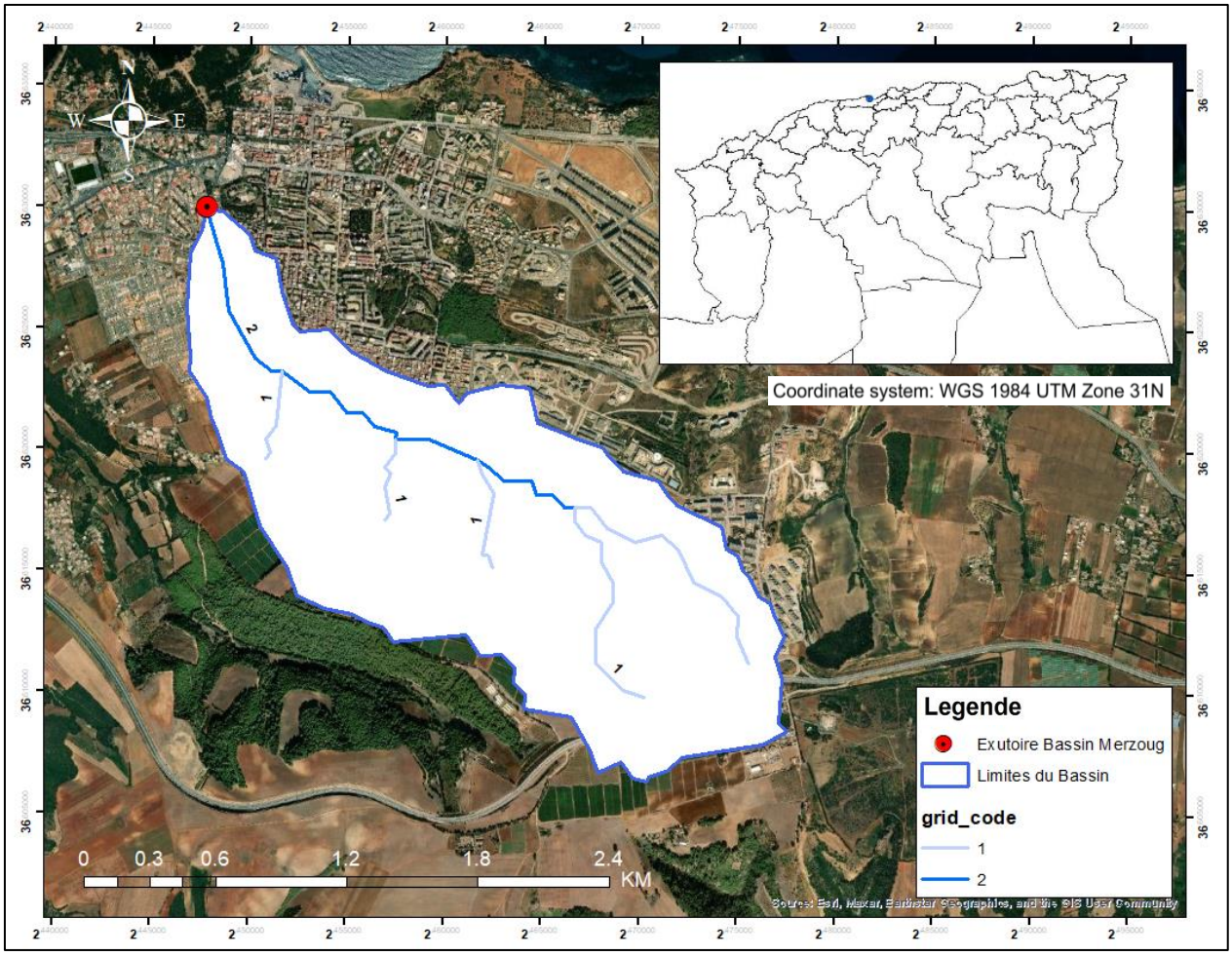


Figure III-7 : Schéma du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Merzoug.

III.4.3 Paramètres hydrographiques :

III.4.3.1 Densité de drainage (Dd) :

La densité de drainage correspond au rapport entre la longueur cumulée de l'ensemble des cours d'eau d'un bassin versant et sa superficie. Cet indicateur traduit la complexité et l'activité du réseau hydrographique : une valeur élevée témoigne d'un réseau dense et ramifié.

Elle s'exprime en km/km² et se calcule selon 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.

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

III.4.3.2 Densité hydrographique des thalwegs élémentaires (F) :

La densité hydrographique des thalwegs élémentaires F représente le nombre total de cours d'eau ou de lignes d'écoulement recensés dans une zone donnée. Exprimée en nombre de voies d'écoulement par unité de surface, elle permet d'apprécier la capacité d'un territoire à drainer les eaux, fournissant ainsi une indication sur la dynamique hydrologique de la région.

$$\mathrm{F} = \frac{\sum \mathrm{N1}}{\mathrm{S}} \qquad \text{(III.14)}$$

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.4.3.3 Coefficient de torrentialité (Ct) :

Le coefficient de torrentialité Ct se détermine en multipliant la densité de drainage par la densité hydrographique des thalwegs élémentaires :

$$\mathrm{Ct} = \mathrm{Dd} * \mathrm{F} \qquad \text{(III.15)}$$

Où :

- F : Densité hydrographique.

- Dd : Densité de drainage.

III.4.4 Temps de concentration (Tc) :

Le temps de concentration Tc d'un bassin versant est défini comme la durée maximale nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point quelconque du bassin et son exutoire. Cette grandeur est souvent difficile à évaluer précisément. Plusieurs formules sont couramment utilisées, parmi lesquelles la formule de Kirpich, datant de 1940, élaborée à la suite des crues dans le nord-est des États-Unis en 1936 (Folmar et al., 2007).

Les méthodes et formules employées pour l'analyse des bassins versants sont généralement conçues en tenant compte des spécificités régionales et des paramètres propres aux zones où elles ont été développées. Ainsi, pour l'étude d'un bassin donné, il est recommandé de retenir la formule la plus adaptée à ses caractéristiques. Dans le cas du nord de l'Algérie, il est préférable d'utiliser des formules élaborées dans des contextes physiogéographiques similaires afin de garantir une meilleure représentativité des résultats. L'estimation du temps de concentration repose le plus souvent sur des formules empiriques telles que :

III.4.4.1 Formule de Giandotti (sud de l'Italie, 1937) :

$$\mathrm{Tc} = \left(\frac{\left(4\sqrt{\mathrm{S}}\right)+(1.5\mathrm{Lcp})}{\left(0.8\sqrt{\mathrm{Hmoy}-\mathrm{Hmin}}\right)}\right)^{0.385} \qquad \text{(III.16)}$$

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.4.4.2 Formule de Sokolovsky :

$$Tc = 4 * \left(\frac{S * Lcp^{0.333}}{\sqrt{Ibv}}\right)^{0.75} \quad \text{(III.17)}$$

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.4.4.3 Formule de SCS ANRH :

$$Tc = \left(\frac{0.87 * Lcp^3}{Hmoy - Hmin}\right)^{0.385} \quad \text{(III.18)}$$

Où :

- Tc : Temps de concentration (h).

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

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

III.4.4.4 Formule de TURAZZA :

$$Tc = \frac{0.108\sqrt[3]{S * Lcp}}{\sqrt{Ipm}} \quad \text{(III.19)}$$

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.4.4.5 Formule de VENTURA :

$$Tc = 0.1275 \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{Ibv}} \quad \text{(III.20)}$$

Où :

- Tc : Temps de concentration (h).

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

- S : Surface du bassin versant (km²).

III.4.4.6 Formule de KIRPICH :

Cette méthode s'applique aux bassins versants dont la superficie est comprise entre 0,4 ha et 81 ha, caractérisés par des sols argileux et présentant une pente moyenne de 3 % à 10 %. Le temps de concentration y est estimé à l'aide de l'équation suivante :

$$Tc = 0.0195 \frac{Lcp^{0.77}}{Ipm^{0.385}} \quad \text{(III.21)}$$

Où :

- Tc : Temps de concentration (h).

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

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

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

Tableau III-8 : Résultats des calculs de temps de concentration

Formules utilisées	Temps de Concentration	Unités
Formule de VENTURA	1.026	h
Formule de KIRPICH	0.014	h
Formule de GIANDOTTI	1.18	h
Formule de TURAZZA	0.024	h
Formule de SOLOVSKY	3.24	h
Formule de SCS ANRH	0.8	h

Choix du temps de concentration :

On constate que certaines valeurs, comme celles obtenues par les formules de Turazza (0,024 h soit environ 1,5 minutes) et de Kirpich (0,014 h soit environ 50 secondes), apparaissent totalement irréalistes pour un bassin de plusieurs kilomètres carrés, car elles sous-estiment considérablement le temps de concentration.

À l'inverse, la formule de Solovsky fournit une valeur très élevée (3,24 h), ce qui ne correspond pas non plus aux caractéristiques d'un bassin de la taille de l'Oued Merzoug.

Ainsi, la valeur jugée la plus représentative est celle obtenue par la formule de Giandotti, soit Tc = 1,18 h, car elle reflète plus fidèlement la dynamique hydrologique du bassin et s'accorde mieux avec ses conditions physiogéographiques.

III.4.5 La vitesse de ruissellement (Vr) :

La vitesse de ruissellement désigne l'écoulement gravitaire des eaux météoriques à la surface du sol, lorsque celles-ci ne s'infiltrent pas, ne s'évaporent pas ou ne sont pas retenues en surface. Cet écoulement suit naturellement la pente du terrain. En Algérie, la méthode de Kirpich est couramment utilisée pour estimer cette vitesse à partir du temps de concentration, selon la relation suivante :

$$Vr = \frac{Lcp}{Tc} \qquad \text{(III.22)}$$

Où :

- Tc : Temps de concentration (h).

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

Le tableau ci-après présente une synthèse des résultats obtenus pour les différents paramètres hydrographiques calculés :

Tableau III-9 : Paramètres hydrographiques du bassin versant d'Oued Merzoug.

Désignation	Symbole	Unités	Valeur
Densité de drainage	Dd	Km/Km^2	1.14
Densité hydrographique	F	Km^{-2}	1.54
Coefficient de torrentialité	Ct	/	1.75
Temps de concentration	Tc	Heures	1.18
Vitesse de ruissellement	Vr	Km/h	3.71

Le tableau suivant regroupe les principales caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'Oued Merzoug.

Tableau III-10 : Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de l'oued Merzoug.

Désignation		Symbole	Unités	Valeur
Superficie		S	Km²	3.2415
Périmètre		P	Km	11.824
Longueur du talweg principal		Lcp	Km	4.38
Indice de compacité de Gravélius		KG	/	1.84
Indice de compacité de Horton		Kh	/	0.169
Coefficient d'allongement		Ca	/	5.92
Rectangle équivalent	**Longueur**	Lr	Km	5.30
	Largeur	lr	Km	0.61
	Surface	Sr	Km²	3.233
	Périmètre	Pr	Km	11.82
Altitudes	**Maximale**	Hmax	m	243
	Moyenne	Hmoy	m	156.7
	Minimale	Hmin	m	28
	Médiane 5%	H 5%	m	230
	Médiane 50%	H 50%	m	155
	Médiane 95%	H 95%	m	70
Pente du bassin versant		Ibv	m / m	0.049
Pente moyenne du bassin versant		Im	m/Km	167.47
Indice de pente de Roche		Ip	%	32.08
Indice de pente Moyenne		Ipm	m / m	0.04
Indice de pente globale		Ig	m / m	0.03
Dénivelée spécifique		Ds	m	54.35
La somme des longueurs des cours d'eau		∑Li	Km	3.69
Nombre des talwegs d'ordre 1		∑N1	/	5
Densité de drainage		Dd	Km/Km^2	1.14
Densité hydrographique		F	Km^{-2}	1.54
Coefficient de torrentialité		Ct	/	1.75
Temps de concentration		Tc	Heures	1.18
Vitesse de ruissellement		Vr	Km/h	3.71

III.5 Etude des crues :

III.5.1 Présentation de la station hydrométrique :

Les données hydrométéorologiques exploitées dans le cadre de cette étude proviennent de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Elles consistent en des relevés journaliers actualisés, regroupés sous forme de tableaux de cumuls mensuels (TCM), à partir desquels les précipitations annuelles ont été reconstituées. L'analyse a été réalisée principalement à partir des observations de la station pluviométrique de Hadjout (0325), la plus représentative et la plus proche de la zone d'étude.

Tableau III-11 : identification de la station pluviométrique.

Station	Code	Série d'observation	Nombre d'années	X	Y	Z
Hadjout	020325	1973-2022	50 ans	475.85	358.85	59



Figure III-8 : Extrait de la carte du réseau hydro/climatologique de l'ANRH.

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-12 : Précipitations 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.5.2 Choix de la loi d'ajustement :

Les lois d'ajustement statistique sont nombreuses, mais leur application à un échantillon n'est pertinente que si les conditions d'homogénéité et de stationnarité des données sont respectées. Parmi les lois les plus couramment utilisées, on distingue la loi log-normale (ou loi de Galton) et la loi de Gumbel.

Le choix d'une loi repose généralement sur deux étapes : un premier ajustement graphique, permettant d'évaluer la concordance visuelle entre les points expérimentaux et la loi théorique, suivi d'un test de dispersion pour confirmer la validité de l'ajustement. Toute anomalie dans la représentation graphique (sinuosités, inflexions marquées ou ruptures de pente) est interprétée comme un signe de mauvais ajustement.

Tableau III-13 : Les modèles fréquentiels et leur pertinence.

Modèle fréquentiel	Variables hydrologiques	Validité
Normale	Débits annuels, Précipitations, Volume de stockage des réservoirs.	Situations où les données sont réparties de manière normale.
Log Normale	Débits annuels maximums, Les précipitations quotidiennes, La pluviométrie annuelle, Nombre de ruissellement par mois, Nombre de ruissellement par an.	Dans les cas où les logarithmes des données sont normalement distribués.
Pearson typeIII (Gamma)	Débits annuels maximums, Les précipitations quotidiennes, La pluviométrie annuelle, Nombre de ruissellement par mois, Nombre de ruissellement par an.	Dans les cas où les données sont réparties selon une distribution de Pearson de type III.
Loi de Gumbel ET Fréchet	Débits annuels maximums	Lorsque les débits maximums annuels sont répartis selon une distribution de Gumbel.
Loi exponentielle	La pluviométrie quotidienne, La période entre deux événements	Dans des conditions où les données sont réparties de manière exponentielle.

HYFRAN-PLUS : Ce logiciel permet d'ajuster différentes distributions statistiques sur une série de données, à condition 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 facilitant le choix de la loi statistique la mieux adaptée pour estimer les quantiles, en particulier pour des périodes de retour élevées.

III.5.2.1 Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Gumbel :

Dans ce travail, le logiciel HYFRAN-PLUS a été employé pour ajuster la série de données à la loi de **Gumbel**, et les principaux résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-14 : résultats de l'ajustement (loi du Gumbel).

Période de retour	Probabilité de fréquence	Pj max (mm)	Écart type	Intervalle de confiance
10	0.9000	82.9	6.11	70.2 - 95.5
20	0.9500	96.0	8.04	79.3 - 113
50	0.9800	113.0	10.9	92 - 135
100	0.9900	125.7	13.3	100.3 - 151

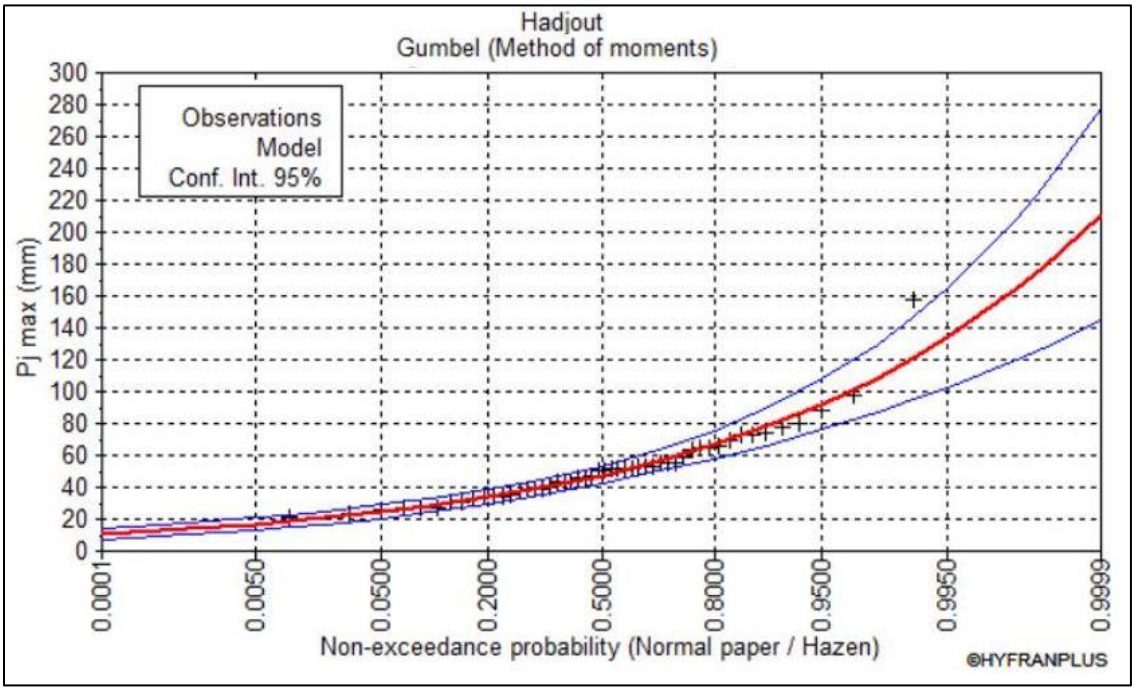


Figure III-9 : Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Gumbel (méthode des moments).

Une comparaison entre les caractéristiques théoriques de la loi de Gumbel et celles de l'échantillon observé a été effectuée, et les résultats correspondants sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-15 : 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

III.5.2.2 Ajustement de la série par la loi log normale « loi de Galton » :

Dans ce travail, le logiciel HYFRAN-PLUS a été employé pour ajuster la série de données à la loi de **Galton**, et les principaux résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-16 : résultats de l'ajustement (loi du Galton).

Période de retour	Probabilité de fréquence	Pj max (mm)	Écart type	Intervalle de confiance
10	0.9000	79.6	6.87	67.6 - 91.5
20	0.9500	92.0	8.68	76.3 - 108
50	0.9800	108	11.1	87.0 - 130
100	0.9900	121	12.9	94.9 - 147

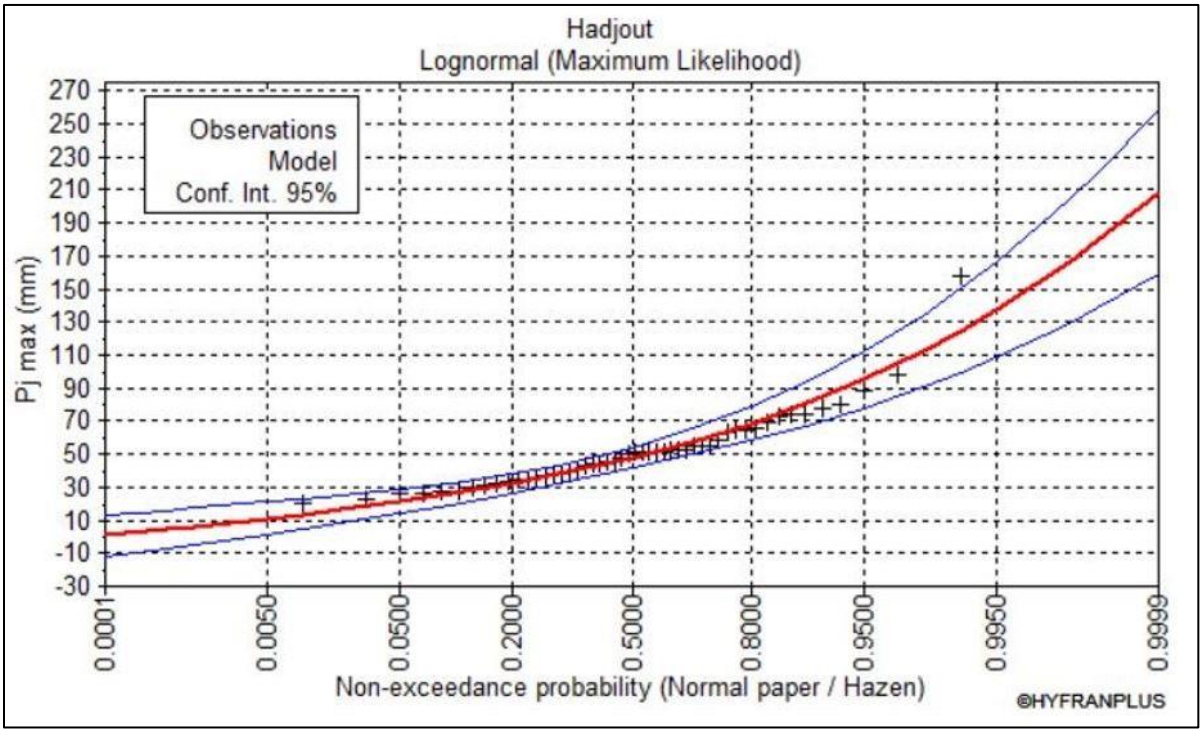


Figure III-10 : Ajustement de la série pluviométrique à la loi de GALTON (maximum de vraisemblance).

Une comparaison entre les caractéristiques théoriques de la loi de Galton et celles de l'échantillon observé a été effectuée, et les résultats correspondants sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-17 : 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.5.2.3 Test de validité de l'ajustement :

Les fréquences observées expérimentalement et celles issues d'une fonction de distribution théorique présentent inévitablement certaines différences. Bien que l'ajustement graphique constitue une étape importante, il demeure insuffisant pour déterminer avec certitude la loi de probabilité la plus appropriée. Pour cela, on recourt aux tests statistiques d'adéquation, qui consistent à comparer le degré de conformité de plusieurs lois afin de retenir celle offrant le meilleur ajustement. Parmi ces tests, le chi-carré (χ^2) figure parmi les plus utilisés.

Test d'adéquation de khi^2 (χ^2) :

Le test d'adéquation, ou test d'ajustement, a pour objectif de vérifier si le modèle statistique choisi s'accorde avec les données observées. Plus précisément, il s'agit d'évaluer la validité de l'hypothèse selon laquelle les observations suivent une loi de probabilité donnée. Dans ce contexte, le test du chi-carré (χ^2) est le plus couramment utilisé.

Le principe consiste à comparer la valeur de χ^2 calculée à partir des données expérimentales avec la valeur χ^2 théorique (tabulée) à un niveau de risque fixé, généralement 5 % (soit un seuil de confiance de 95 %). Cette comparaison permet de juger si les écarts entre les fréquences observées et celles attendues selon la loi théorique 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-18 : 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 passent le test d'adéquation, mais la loi de Gumbel est plus performante car sa valeur de χ^2 calculée (8.32) est plus proche de 0, indiquant un meilleur ajustement aux données.

III.5.3 Calcul du débit de crue :

La détermination du débit maximal revêt une importance particulière en raison des impacts structurels majeurs liés à ces phénomènes hydrologiques. Dans la planification d'aménagements importants, il est nécessaire d'estimer la crue maximale probable afin de concevoir des ouvrages capables de résister à de tels événements. Pour cette évaluation, on recourt à des formules empiriques basées sur la pluviométrie et les caractéristiques physiques du bassin versant, ainsi qu'à des approches numériques, notamment la méthode SCS.

III.5.3.1 Les formules empiriques :

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

$$Qt = Cq * (Pt - P1) \quad \text{(III.23)}$$

Où :

- P1=20 mm en Algérie du nord.

- Cq : coef de ruissellement statistique. Avec : 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 : Temps de base en heures. Avec : $Tb = Tb0 + (L^{1.7}(pa * Vi) * 0.57/1000)$

2) Formule de GIANDOTTI :

$$Qmax = \frac{(A*S*\sqrt{Hmoy+Hmin})}{(1.5L+4\sqrt{S})} \quad \text{(III.24)}$$

Où :

- Qmax : Débit max de la crue (m3/s).

- S : Superficie du bassin versant (km²).

- 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.

3) Formule de Turazza :

$$Qmax = \frac{C*Ptc*S}{3.6*Tc} \quad \text{(III.25)}$$

Où :

- Qmax : Débit max de la crue (m3/s).

- S : Superficie du bassin versant (km²).

- PTc : Pluie correspondant au temps de concentration.

- C : Coefficient de ruissellement.

- Tc : Temps de concentration.

4) Dd Formule de Maillet Gautier :

$$Qmax = \frac{2K\ \log(1+Ap)*S}{\left(L^{0.5}*((1+4\log t-\log S)^{0.5})\right)} \quad \text{(III.26)}$$

Où :

- Qmax : Débit max de la crue (m3/s).

- S : Superficie du bassin versant (km²).

- p : pluie moyenne annuelle (en mm).

- 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).

- Tc : Temps de concentration.

III.5.3.2 Méthode S.C.S :

Les méthodes employées dans les sections (Turazza, Maillet Gautier, Sigreah ANRH et Giandotti) sont relativement simples. Elles permettent, d'une part, d'estimer l'ordre de grandeur des crues et, d'autre part, par comparaison, d'évaluer le degré d'incertitude associé. Toutefois, ces approches ne fournissent que la valeur des débits de pointe des hydrogrammes, sans renseigner ni sur leur volume ni sur leur forme.

C'est pourquoi il a été jugé nécessaire de recourir également à la méthode de l'hydrogramme unitaire du SCS. Plus sophistiquée et plus précise, celle-ci permet de générer des hydrogrammes complets, construits à partir d'hyétogrammes de précipitations correspondant aux mêmes périodes de retour.

La méthode SCS repose sur l'hypothèse que l'intensité des précipitations varie en fonction de la durée de l'événement, et que le ruissellement dépend principalement des caractéristiques de l'hyétogramme de pluie, contrairement à la méthode de Turazza qui se base davantage sur le temps de concentration. Elle prend également en compte le taux de saturation initial des sols. Le principe consiste à admettre qu'à tout instant, le rapport entre l'infiltration cumulée et l'infiltration potentielle initiale est équivalent au rapport entre le ruissellement cumulé et la pluie cumulée.

L'hydrogramme unitaire obtenu par la méthode SCS est fondé sur la transformation des précipitations en débits, en intégrant notamment le temps de réponse (ou temps de retard, Tlag), défini comme le décalage entre le centre de gravité de la masse pluviale et le pic de l'hydrogramme unitaire.

$$\mathrm{Tlag} = 0.6 * \mathrm{Tc} \qquad \text{(III.27)}$$

Où :

- Tc : Temps de concentration.

Selon la méthode SCS, la fraction de la pluie contribuant à la formation du débit de pointe est exprimée par l'équation suivante :

$$\mathrm{Pe} = \frac{(\mathrm{P}-\mathrm{Ia})^2}{\mathrm{P}-\mathrm{Ia}+\mathrm{S}} \qquad \text{(III.28)}$$

Où :

- Pe : est le ruissellement.

- S : Rétention maximale.

- Ia : Perte initiale avec Ia = 0,2*S

- P : Hauteur de pluie accumulée.

La pluie adoptée correspond à un orage de type SCS II d'une durée de 24 heures, dont le temps de réponse (Tlag), exprimé en heures, est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$Tc = \frac{227L^{0.8}\left((1000/CN)-9\right)^{0.7}}{10^5\sqrt{Sb}} \qquad \text{(III.29)}$$

Où :

- Tc = 1.67 x Lag Time

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

- Sb : Pente moyenne du bassin versant (%).

Les pertes liées à l'interception et à l'infiltration sont estimées à partir du nombre de courbe (Curve Number, CN), utilisé dans la méthode SCS. Ce paramètre intègre les caractéristiques de perméabilité des sols, les modes d'occupation du bassin ainsi que l'état de surface.

Le nombre de courbe (CN) a été déterminé à partir de la carte d'occupation du sol, représentée ci-après :

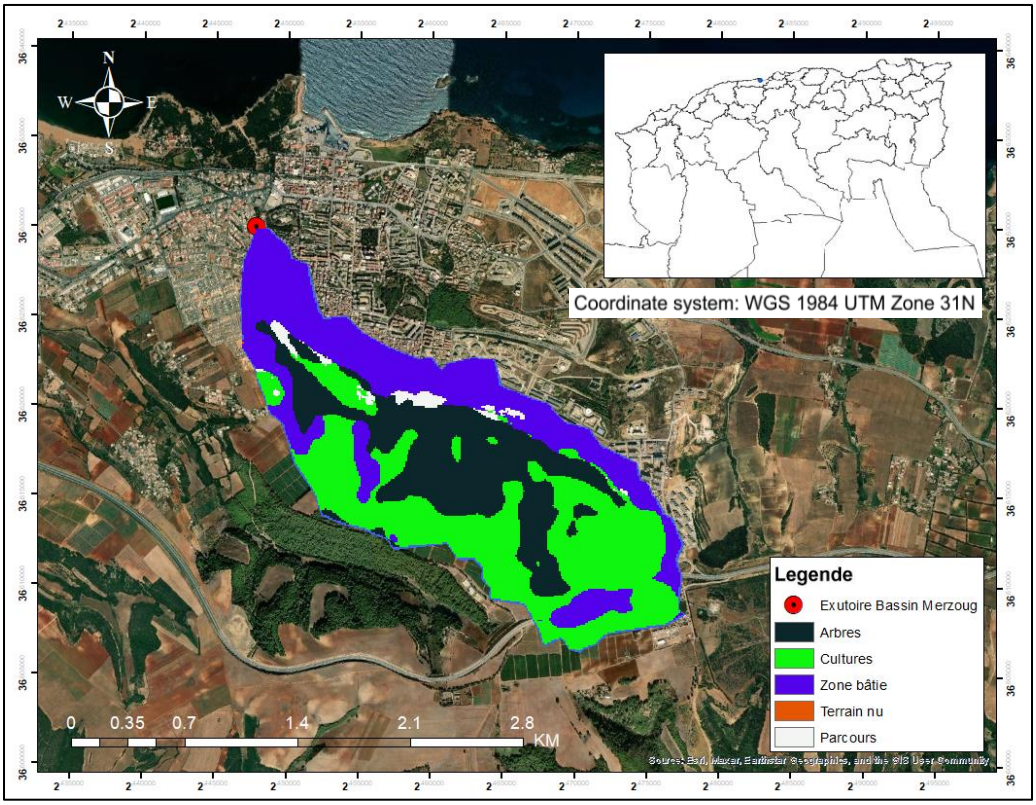


Figure III-11 : Carte d'occupation du sol du bassin versant.

Chaque couleur de la carte correspond à un type d'occupation de sol spécifique, auquel est associé un nombre de courbe (CN) particulier. Le tableau ci-dessous présente les valeurs de CN attribuées à chaque type d'occupation de sol.

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		

Figure III-12 : Valeurs de Curve-Number par Type de sol.

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

Tableau III-19 : Résultats de calculs du TC, CN et Lag-time.

Bassin versant	CN	Tc (h)	Lag (h)	Lag (min)
Oued Merzoug	75.92	1.18	0.71	42.65

Présentation du modèle HEC-HMS :

Le Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), développé par le Hydrologic Engineering Center (HEC) du US Army Corps of Engineers, constitue un outil complet de modélisation hydrologique des bassins versants. Il permet de simuler l'ensemble du processus pluie-débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au ruissellement total généré à un instant donné. Le logiciel offre plusieurs modules de simulation, couvrant des phénomènes tels que l'infiltration, le ruissellement de surface, l'évaporation et même la fonte nivale (United States Army Corps of Engineers, 2016).

Les figures suivantes représentent l'occupation de sol du bassin versants ainsi que son Hydrogrammes de crues pour la période de retour 100 ans.

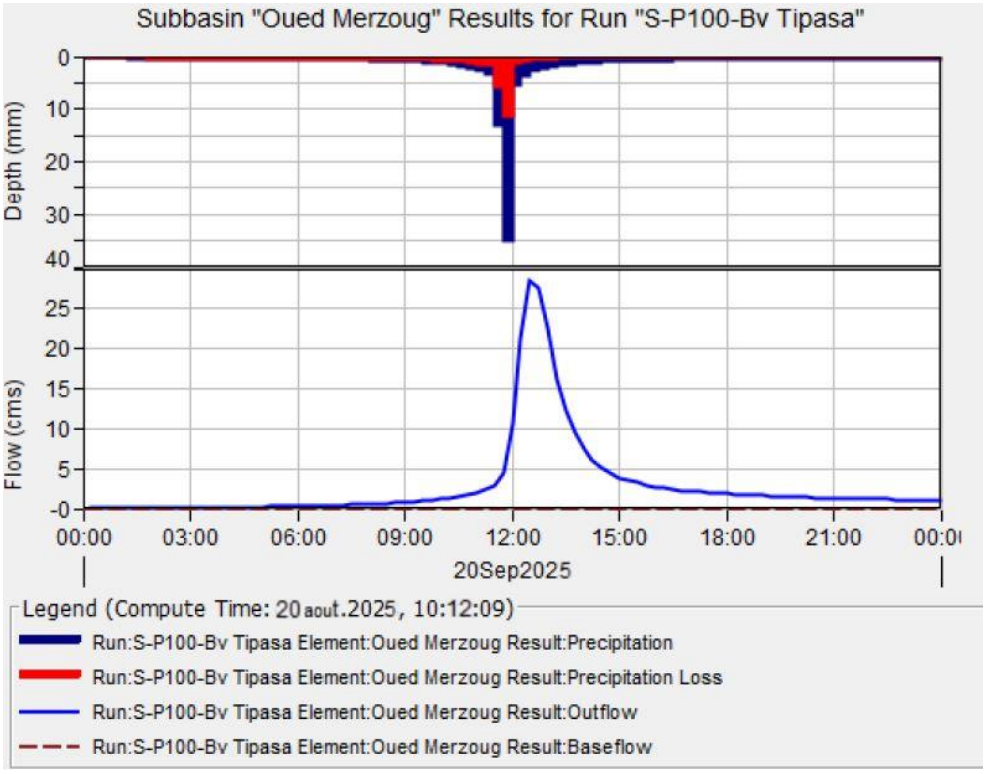


Figure III-13 : Résultat de la simulation pour une période de retour 100 ans.

Le tableau suivant représente les résultats du calcul des Q max/j pour les différentes périodes de retours :

Tableau III-20 : résultats du calcul des Q max/j pour les différentes périodes de retours.

Bassins Versant oued Merzoug					
Périodes de retours	**SOGREAH ANRH (m3/s)**	**GIANDOTTI (m3/s)**	**TURAZZA (m3/s)**	**MAILLET GAUTIER (m3/s)**	**SCS (m3/s)**
10 ans	13.48	29.79	10.97	21.25	**15.3**
20 ans	16.29	32.54	11.98	23.93	**19.1**
50 ans	19.93	36.06	13.27	27.07	**24.3**
100 ans	22.65	38.69	14.24	29.22	**28.4**

Discussion des Résultats :

La méthode SCS se distingue par son niveau de détail, permettant d'obtenir des hydrogrammes complets, indispensables pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Ainsi, l'adoption des résultats issus de cette méthode est vivement recommandée.

III.5.4 ETUDE DES APPORTS SOLIDES :

III.5.4.1 Estimation de l'apport solide :

La quantification des apports solides constitue un paramètre essentiel dans toute étude hydrologique des oueds. La connaissance, même approximative, de la charge solide susceptible d'être transportée par le cours d'eau jusqu'à la retenue permet d'adopter des mesures adaptées lors du dimensionnement des canaux et de garantir une durée de vie acceptable de l'ouvrage. Plusieurs auteurs ont proposé des formules d'estimation de ces apports solides en intégrant les caractéristiques géologiques et morphologiques du bassin versant. Parmi les plus couramment utilisées en Algérie, on peut citer :

1) **Formule de Gavrilovic :**

$$Ta = Es * Rm \quad \text{(III.30)}$$

Où :

- Ta : Quantité des apport solide (Tonne / an).

- Es : production moyenne annuelle de matériaux érodés par 1 km^2 du bassin versant.

$$Es = 3.14T * P_0 * \sqrt{Z^3} \quad \text{(III.31)}$$

Où :

- Po : Pluie moyenne annuelle P0 = 550 mm

- Z : Coefficient d'érosion relative du bassin, on prend Z = 0.65

- T : coefficient de température.

$$T = \sqrt{\frac{T_0}{10}} + 0.1 \quad \text{(III.32)}$$

Où :

- To : Température moyenne annuelle T0 = 17.80°

Donc T = 1.43 et Es = 1297,96 Tonne/ km2/ an

$$R_m = \frac{\sqrt{P * Hmoy}}{0.2 * (L+1)} \quad \text{(III.33)}$$

Où :

- Rm : Coefficient de rétention des matériaux dans le bassin versant.

- P : Périmètre du bassin versant en km.

- Hmoy : Altitude moyenne du bassin versant.

- L : Longueur du cours d'eau principal en km.

Tableau III-21 : Résultats du Ta par la formule de Gravilovic.

Bassins Versants	P (km)	Hmoy (km)	L (km)	Rm	Es (Tonne/km2/an)	S (km²)	Ta (Tonne/an)
Oued merzoug	11.824	0.157	4.38	0.47	1297.96	3.2415	**1991.09**

2) Formule de Tixeront (SOGREAH) :

En se basant sur les travaux de Tixeront réalisés en Tunisie, Sogreah a proposé pour l'Algérie, et plus particulièrement pour les bassins versants à perméabilité faible à moyenne, la formule suivante :

$$E_s = 350 * R^{0.15} \quad \text{(III.34)}$$

Où :

- R : Lame ruisselée annuelle (mm).

$$R = 31.54 * M_0 \quad \text{(III.35)}$$

Où :

- Mo : Module spécifique moyen (l/s.km²)

$$M_0 = 11.80 * P^{2.82} \quad \text{(III.36)}$$

Où :

- P : Moyenne des pluies annuelles (m)

$$M_0 = 11.80 * (0.550)^{2.82} = 2.19\ \text{l/s. Km} \quad \text{(III.37)}$$

Tableau III-22 : Résultats du Ta par la formule de Tixeront (SOGREAH).

Bassins Versants	R (mm)	Es (Tonne/km2/an)	S (km²)	Ta (Tonne/an)
Oued merzoug	68.96	660.47	3.2415	**2140.91**

La valeur de l'érosion spécifique retenue est celle donnée par la formule de SOGREAH (Tixeront), car elle présente l'avantage d'être bien adaptée aux conditions algériennes.

Conclusion :

L’étude hydrologique menée a permis d’analyser les débits de crues correspondant aux différentes périodes de retour des bassins versants considérés, en recourant à deux approches distinctes : les formules empiriques et la méthode SCS-CN intégrée dans le modèle hydrologique HEC-HMS.

L’examen comparatif des résultats a conduit à privilégier la méthode SCS-CN, jugée plus représentative des conditions locales. Ainsi, le débit de crue centennale a été estimé à 28,4 m^3/s, et les hydrogrammes correspondants ont été établis pour une période de retour de 100 ans, permettant de mettre en évidence l’évolution temporelle des crues au sein du bassin versant.

Par ailleurs, l’évaluation des apports solides a abouti à une estimation de 2140,91 tonnes/an pour le bassin versant de l’oued Merzoug, valeur significative à prendre en considération dans toute démarche de gestion et de dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

En somme, ces résultats fournissent une base solide pour la compréhension du comportement hydrologique et sédimentaire du bassin versant, et constituent un appui essentiel pour la conception des aménagements hydrauliques et la prévention des risques liés aux crues et à l’envasement.

Chapitre IV : Calcul Hydraulique et modélisation

Introduction :

La modélisation des écoulements dans un cours d'eau constitue une étape essentielle dans les études de prévention et de gestion des inondations. Elle permet d'évaluer les niveaux d'eau atteints lors de crues de différentes fréquences et d'analyser les caractéristiques hydrauliques associées, afin de mieux comprendre le comportement de l'écoulement. L'objectif principal est d'identifier les zones potentiellement inondables lors d'événements de crue spécifiques et d'élaborer des cartes d'inondation fiables. Ces informations facilitent la délimitation des tronçons de cours d'eau nécessitant des aménagements et orientent le choix des mesures de protection les plus adaptées.

IV.1 Généralités :

IV.1.1 Paramètres Hydraulique :

Ils représentent des variables ou des caractéristiques décrivant l'écoulement de l'eau dans un système hydraulique. Ces paramètres sont essentiels pour analyser et évaluer le comportement et les performances d'un tel système. Parmi les plus couramment utilisés, on peut citer :

- **Débit (Q)** : représente le volume d'eau qui s'écoule à travers une section donnée d'un canal ou d'un cours d'eau par unité de temps. Il constitue un paramètre fondamental pour quantifier la capacité hydraulique d'un système, généralement exprimé en mètres cubes par seconde (m^3/s) ou en litres par seconde (l/s).
- **Vitesse d'écoulement (V)** : correspond à la rapidité avec laquelle l'eau se déplace à l'intérieur du système hydraulique. Elle varie en fonction de plusieurs facteurs, tels que la géométrie du canal, la pente, ou encore la rugosité des parois. Ce paramètre joue un rôle essentiel dans l'évaluation des performances hydrauliques et du transport solide. Il est habituellement exprimé en mètres par seconde (m/s).
- **L'indice de Manning (n) :** ce coefficient caractérise la rugosité de la surface d'écoulement ou du lit d'un cours d'eau. Il est déterminé à partir d'expérimentations réalisées sur différents types de revêtements (béton, herbe, graviers, etc.). Ce paramètre, noté n, est sans dimension et joue un rôle essentiel dans l'estimation de la vitesse et du débit des écoulements en surface libre.

Tableau IV-1 : valeurs du coefficient de rugosité n.

Caractéristiques du lit ou du Revêtement	Valeur de la rugosité n
Canal avec revêtement en béton.	0.014
Canal en terre	0.022
Canal en enrochement	0.025
Canal en Gabion.	0.030

- **La pente hydraulique (i) :** elle correspond à l'angle ou à l'inclinaison de la surface sur laquelle l'eau s'écoule. Ce paramètre influe directement sur la vitesse d'écoulement et permet d'analyser les caractéristiques ainsi que les performances hydrauliques d'un système. La pente est généralement exprimée en pourcentage.

  On calcule la pente par la relation suivante :

$$I = \Delta Z / L \qquad \text{(IV.1)}$$

  Où :

  - ΔZ : c'est la différence de niveau entre les altitudes(Z1-Z2).

  - L : c'est la longueur.

- **La pression(p) :** elle correspond à la force exercée par l'eau sur une surface donnée. Elle s'exprime généralement en Pascal (Pa) ou en bar. Dans le cas d'une surface libre, la pression est approximativement équivalente à la pression atmosphérique standard, soit environ 1 bar.
- **La profondeur critique (hc) :** elle correspond à la profondeur particulière de l'eau pour un débit donné, à partir de laquelle l'écoulement change de régime, passant du subcritique au supercritique ou inversement.

IV.1.2 La physique d'un modèle hydraulique :

L'étude des inondations de plaine repose principalement sur les modèles hydrauliques basés sur la résolution des équations de Barré de Saint-Venant (équations tridimensionnelles de Navier-Stokes intégrées sur la verticale). (Roux, 2004)

- **Équation de conservation de la masse :**

$$\frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = qL \qquad \text{(IV.2)}$$

- **Équation de conservation de la quantité de mouvement :**

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{S}\right) + gS\left(\frac{\partial z}{\partial x} + J\right) = KL.\, q_L.\, V \qquad \text{(IV.3)}$$

Où :

- S : La surface mouillée, c'est-à-dire l'aire de la section transversale occupée par le fluide (m2).

- Q : Le débit (m3 /s).

- qL: Le débit par unité de longueur (m2 /s) d'apport ($qL \geq 0$) ou de fuite ($qL < 0$)

- g : l'accélération de la pesanteur (m/s2).

- Z : la cote de la surface libre (m).

- J : la pente de la ligne d'énergie (m/m), également appelée perte de charge linéaire.

- KL : un coefficient tel que : KL= {1 $si\ qL < 0$; 0 $si\ qL \geq 0$}

- V : la vitesse moyenne dans une section transversale (m/s).

- X : l'abscisse curviligne (m).

- t : le temps (s).

IV.1.3 Écoulement à surface libre :

L'étude des écoulements naturels relève de l'hydraulique à surface libre, caractérisée par la présence d'une surface en contact direct avec l'atmosphère. Dans ce type d'écoulement, la gravité constitue la force motrice principale, contrairement à l'hydraulique en charge où c'est le gradient de pression qui domine. On désigne ainsi ces écoulements sous le terme d'écoulements gravitaires.

IV.1.3.1 Variabilité dans le temps :

Les écoulements peuvent être classés en fonction de la variabilité de certaines caractéristiques hydrauliques, telles que le tirant d'eau et la vitesse, en fonction du temps.

- **L'écoulement stationnaire (permanent) :** Un écoulement est dit permanent lorsque, en tout point du fluide, les caractéristiques telles que la vitesse ou la hauteur d'eau demeurent constantes au cours du temps ($\partial v/\partial t = 0$; $\partial h/\partial t = 0$, etc.).
- **L'écoulement non stationnaire (non permanent) :** À l'inverse, un écoulement est qualifié de non permanent lorsque ses caractéristiques varient avec le temps en un même point, comme la vitesse ou le tirant d'eau ($\partial v/\partial t \neq 0$; $\partial h/\partial t \neq 0$, etc.).

IV.1.3.2 Variabilité dans l'espaces :

On peut également distinguer les écoulements en fonction de la variation spatiale de leurs caractéristiques hydrauliques, telles que la vitesse ou le tirant d'eau :

- **Écoulement uniforme :** Un écoulement est dit uniforme lorsque ses caractéristiques restent identiques le long du canal. Dans ce cas, la pente du canal est parallèle à la surface libre de l'eau.
- **Écoulement non uniforme :** Un écoulement est qualifié de non uniforme lorsque ses paramètres varient d'un point à un autre. Cette variation peut être progressive, lorsque la vitesse augmente ou diminue graduellement dans le sens de l'écoulement (accéléré ou décéléré), ou brusque, lorsque les conditions hydrauliques changent rapidement sur une courte distance.

IV.1.4 Régime d'écoulement :

Dans un canal à surface libre, l'écoulement de l'eau est influencé par l'action simultanée de plusieurs forces : forces d'inertie, forces de gravité et forces de frottement (liées à la viscosité et à la rugosité du lit).

L'analyse de ces régimes repose sur des nombres adimensionnels, principalement le nombre de Reynolds et le nombre de Froude, qui permettent de classer les écoulements en différentes catégories.

- **Nombre de Reynolds (Re) :** Le nombre de Reynolds traduit le rapport entre les forces d'inertie et les forces de frottement visqueux. Il est défini par la relation :

$$\mathrm{Re} = \frac{\mathrm{V.D}}{\nu} \qquad \text{(IV.4)}$$

Où :

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

- D : Diamètre en m.

- ν : viscosité cinématique du fluide (m²/s).

Permet de distinguer :

- Écoulement laminaire : Re < 500.

- Écoulement turbulent : Re > 500.

- **Nombre de Froude (Fr) :** Le nombre de Froude exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces de gravité. Il est donné par :

$$\mathrm{Fr} = \frac{\mathrm{V}}{\sqrt{\mathrm{g.Dh}}} \qquad \text{(IV.5)}$$

Où :

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

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

- Dh : profondeur hydraulique (m).

Il permet de classifier :

- Écoulement fluvial (subcritique) : Fr < 1.

- Écoulement torrentiel (supercritique) : Fr > 1.

- Écoulement critique : Fr = 1.

- **Combinaison des régimes (Re & Fr) :** La combinaison des deux critères conduit à quatre régimes possibles d'écoulement :
  - Écoulement fluvial laminaire : Fr < 1 et Re < 500.
  - Écoulement fluvial turbulent : Fr < 1 et Re > 500.
  - Écoulement torrentiel laminaire : Fr > 1 et Re < 500.
  - Écoulement torrentiel turbulent : Fr > 1 et Re > 500.

IV.2 Dimensionnement des canaux :

Dans le cas d'un écoulement à surface libre faiblement variable, on peut considérer que le régime est uniforme. Pour un écoulement turbulent, les formules les plus couramment utilisées sont alors les suivantes :

IV.2.1 Formule de Chézy :

$$V = C\sqrt{Rh.I} \quad \text{(IV.6)}$$

En remplaçant avec :

$$Q = V.S \quad \text{(IV.7)}$$

En obtient :

$$Q = C.S.(Rh.I)^{0.5} \quad \text{(IV.8)}$$

Où :

- C : Coefficient de Chézy (m0.5/s).

- S : Section mouille (m2).

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

- I : Pente de fond du canal (mm/mm).

IV.2.2 Formule de MANNING-STRICKLER :

Il s'agit de la formule la plus couramment utilisée, généralement désignée sous le nom de formule de Manning-Strickler.

$$Q = K.S.Rh^{2/3}.I^{1/2} \quad \text{(IV.9)}$$

Où :

- K : coefficient de rugosité (ou de Strickler).

- S : Section mouillée.

- Rh : rayon hydraulique, en m.

- I : pente du tronçon du cours d'eau, en m/m.

IV.3 Modélisation du cours d'eau non Aménagé :

IV.3.1 Présentation du logiciel HEC-RAS :

HEC-RAS, conçu par l'US Army Corps of Engineers, est un logiciel de modélisation hydraulique unidimensionnelle destiné à simuler les écoulements à surface libre dans les cours d'eau naturels ou artificiels, tout en tenant compte des obstacles rencontrés le long du lit. Il offre également des fonctionnalités pour la modélisation du transport solide et de la qualité de l'eau. À travers cet outil, il est possible de définir avec précision la géométrie des profils en travers et en long des rivières, ainsi que les caractéristiques des ouvrages hydrauliques associés.

IV.3.2 Simulation avec HEC-RAS :

La simulation avec HEC-RAS repose sur une démarche structurée, nécessitant la création et l'utilisation de plusieurs fichiers interdépendants afin de mener une analyse hydraulique complète d'un cours d'eau.

- La première étape consiste à initier un nouveau projet dans HEC-RAS en renseignant un titre approprié, en choisissant le système d'unités à utiliser et en définissant l'emplacement de sauvegarde du fichier de projet.

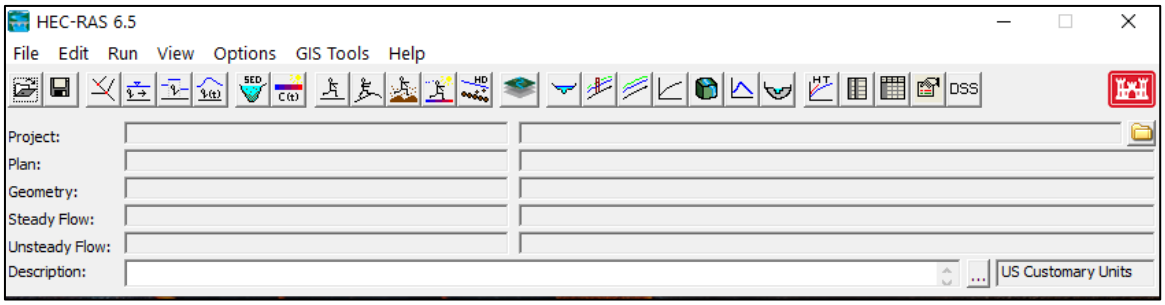


Figure IV-1 : l'interface utilisateur du logiciel HEC-RAS version 6.5.

- La deuxième étape consiste à construire le modèle géométrique des oueds étudiés. Dans cette recherche, la géométrie a été élaborée directement sur RAS-Mapper en suivant plusieurs étapes :
  - Création du TIN (Triangular Irregular Network) : le relief est modélisé à partir d'un échantillonnage semi-dirigé irrégulier tenant compte des caractéristiques structurelles du terrain. Ce modèle prend la forme d'un réseau triangulaire irrégulier (TIN), généré à l'aide du logiciel ArcGIS, afin de représenter le terrain, visualiser l'écoulement sur RAS-Mapper et produire des cartes de profondeur, de vitesse, etc.

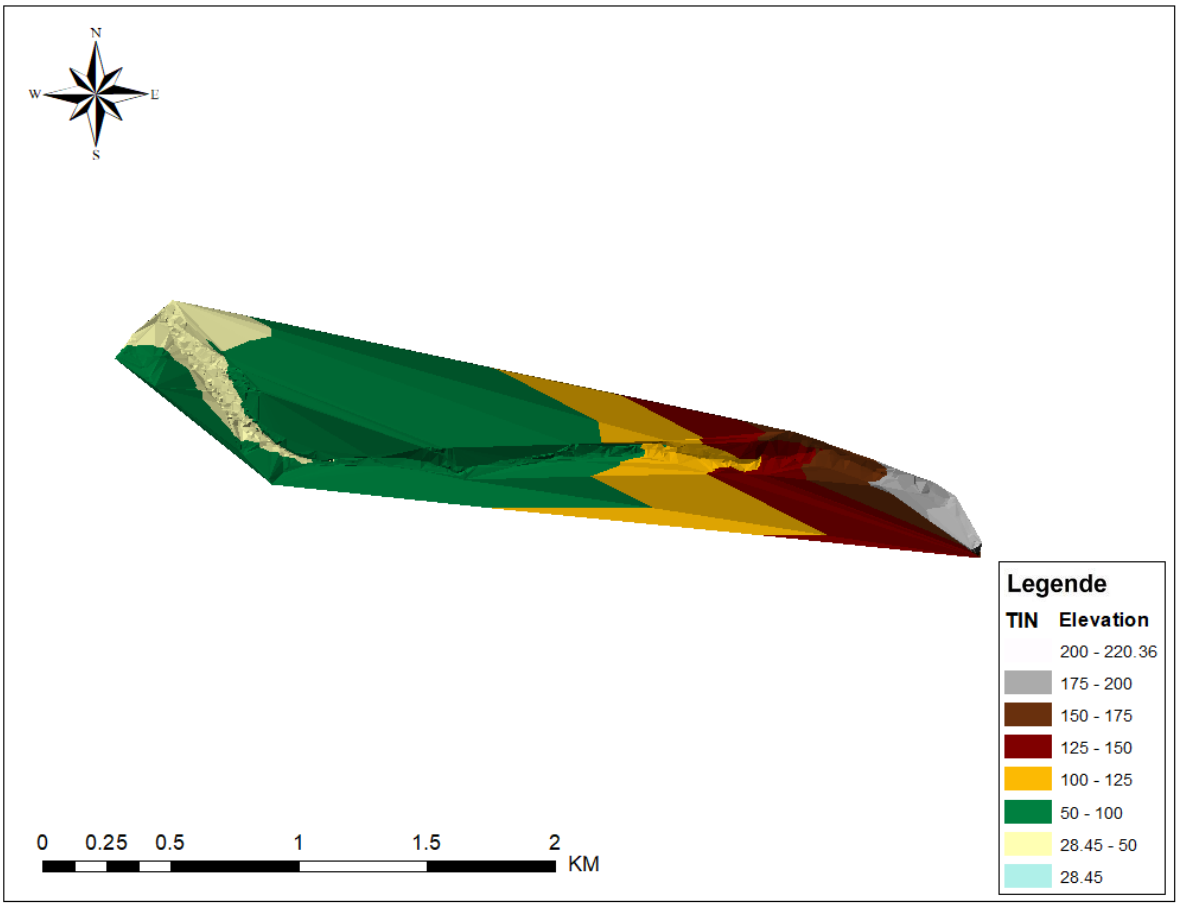


Figure IV-2 : Réseau triangulaire irrégulier (TIN).

- Importation du modèle de terrain dans RAS-Mapper : via Project → Insertion fichier de projection → Insertion des données du terrain.
- Création d'une nouvelle géométrie dans RAS-Mapper avec affichage de la barre d'édition.
- Dessin de l'axe principal de l'oued ainsi que de ses limites latérales (bank lines) et du tracé des écoulements (flow path lines).
- Définition des sections transversales nécessaires à la modélisation hydraulique.
- Enregistrement de la géométrie pour finaliser cette étape.

- La troisième étape consiste à importer le modèle géométrique. Cette opération implique l'ouverture du fichier contenant les informations établies sur RAS-Mapper, notamment les données relatives aux sections transversales. À ce stade, il est également nécessaire d'attribuer les coefficients de Manning à chaque section afin de représenter la rugosité du lit et des berges. Dans le cadre de notre étude, les valeurs adoptées pour le coefficient de Manning varient autour de 0,022.
- La quatrième étape consiste à élaborer le fichier de débits pour un écoulement permanent. Cette étape implique l'introduction des débits associés aux différentes périodes de retour, notamment celle de 100 ans, sous la forme d'un fichier qui servira lors de la simulation hydraulique. Ce fichier doit également préciser les conditions aux limites propres à chaque profil étudié.
- La cinquième étape consiste à générer le fichier plan, qui regroupe et relie les fichiers de géométrie et de débits nécessaires à la simulation.
- La sixième étape correspond au lancement de la simulation : une fois les données géométriques et hydrométriques intégrées et les conditions aux limites définies, il convient de sélectionner le régime d'écoulement adapté parmi les options disponibles (fluvial, torrentiel ou mixte).

Pour commencer les calculs. Dans notre cas, nous options pour un régime mixte avant de démarrer la simulation. En ce qui concerne le débit centennal calculé dans la partie hydrologique, il est de 28.4 m3/s.

IV.3.3 Visualisation des résultats :

Après l'exécution du calcul avec HEC-RAS, une large gamme de résultats peut être obtenue. Il est possible de générer les profils des zones inondables en fonction du débit analysé, d'extraire les vitesses d'écoulement ainsi que les lignes d'eau et d'énergie. La répartition des vitesses sur le lit mineur et les deux rives peut également être visualisée pour chaque section transversale.

- Courbe de tarage restituée : L'utilisation de HEC-RAS a permis de générer une courbe de tarage, représentant graphiquement la relation entre la hauteur d'eau et le débit (exprimé en m^3/s), et illustrant ainsi la dynamique hydraulique du cours d'eau.

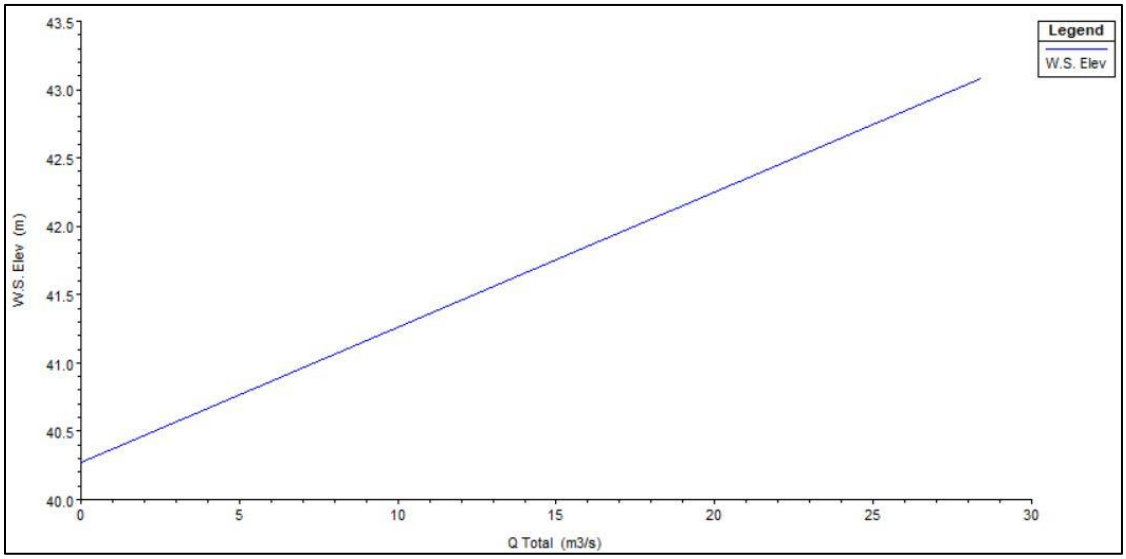
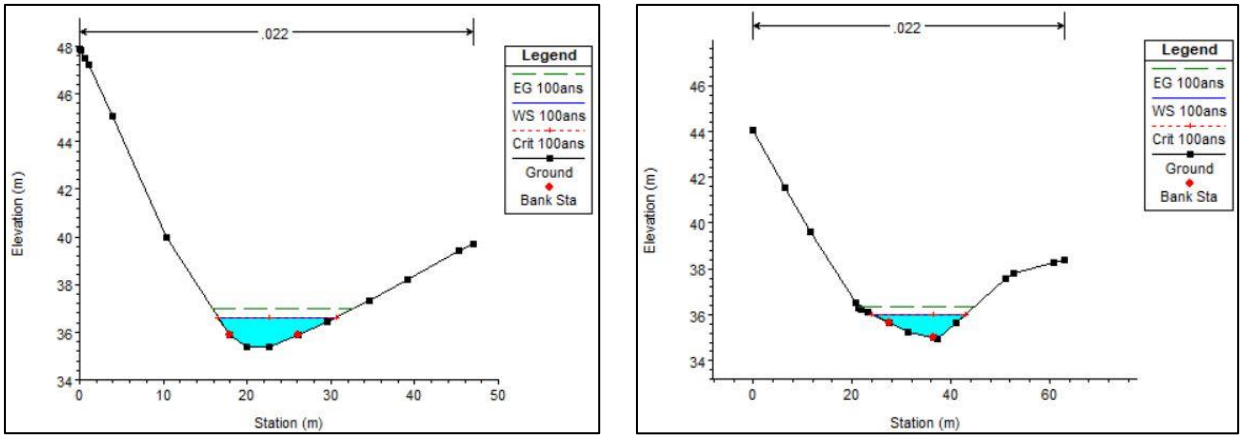


Figure IV-3 : Courbe du tarage.

- Profils en travers : L'analyse des résultats par profils transversaux a permis d'obtenir des informations détaillées sur chaque section du cours d'eau, mettant en évidence que la majorité des tronçons étudiés présentent un risque élevé de submersion en cas de crue.



Station 210 Station 160

Figure IV-4 : Profils en travers des deux sections d'oued Merzoug.

- Vitesse découlement :

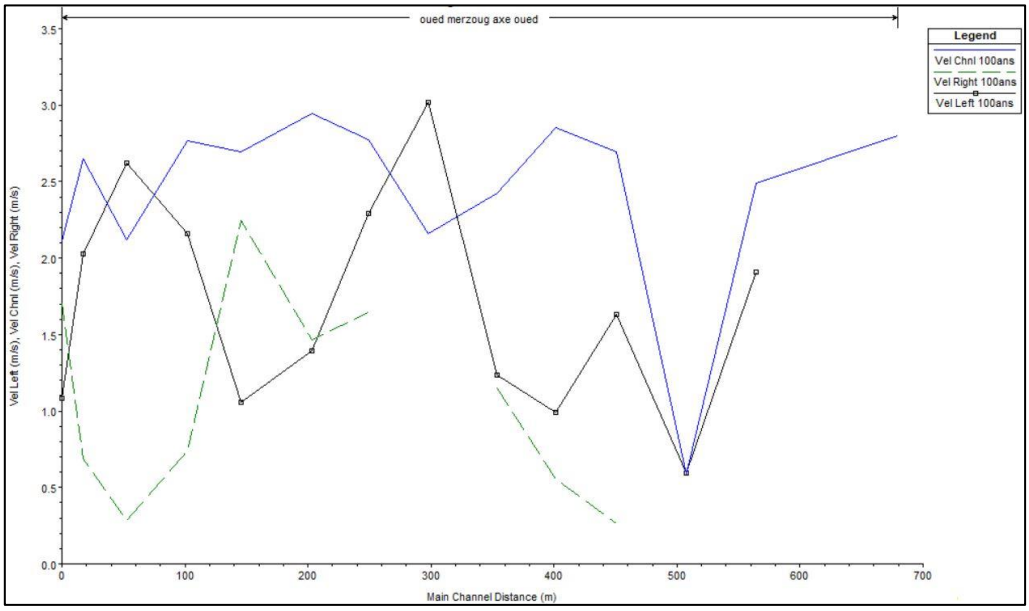


Figure IV-5 : La variation de la vitesse d'écoulement.

- Évolution du nombre de Froude :

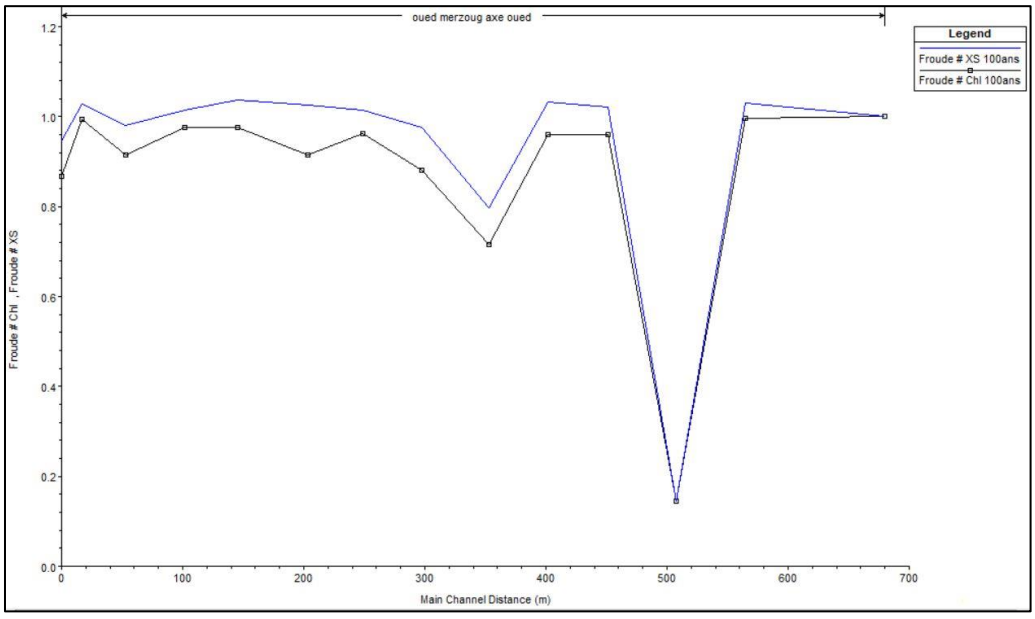


Figure IV-6 : Variation du nombre de Froude en fonction de la distance.

- Tableau récapitulatif : Le logiciel offre également la possibilité de générer des tableaux récapitulatifs regroupant l'ensemble des paramètres hydrauliques relatifs aux différentes structures (barrages, ouvrages de régulation, zones de stockage, etc.). Ces tableaux peuvent être établis soit individuellement pour chaque profil en travers, soit globalement pour l'ensemble des stations étudiées.

Tableau IV-2 : Principaux paramètres hydraulique des stations. (Source : HEC-RAS)

River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
560	28.4	45.14	46.09	46.09	46.38	0.005484	2.49	12.29	22.84	1
510		40.27	43.09		43.1	0.000086	0.59	47.86	27.6	0.14
460		41.58	42.72	42.72	43.06	0.004798	2.69	11.41	17.5	0.96
410		38.72	40.04	40.04	40.45	0.004673	2.85	10.2	13.25	0.96
360		37.78	39.24		39.51	0.002366	2.42	12.99	15.04	0.72
310		37.74	38.93	38.93	39.32	0.004408	2.16	10.67	13.06	0.88
260		36.56	37.47	37.47	37.8	0.004651	2.77	11.69	18.09	0.96
210		35.37	36.6	36.6	37.01	0.003966	2.95	10.77	14.04	0.92
160		34.99	36.02	36.02	36.35	0.004918	2.7	11.6	19.01	0.97
110		33.59	34.65	34.65	34.98	0.004895	2.77	11.41	17.57	0.98
60		31.61	32.62	32.62	32.93	0.004908	2.12	11.7	18.14	0.92
20		30.08	31.14	31.14	31.43	0.005279	2.65	12.42	23.04	0.99
0		30.16	30.96	30.96	31.11	0.004233	2.12	18.04	53.2	0.87

- Min Ch. El : Altitude du radier du canal.
- Velchnl : Vitesse d'écoulement.
- W.S Elev : Altitude du plan d'eau calculé.
- Flowarea : Section mouillée.
- Top Width : Largeur au miroir.
- E.G Elev : Altitudes de la ligne d'énergie.
- Froude # chl : Nombre de Froude.
- E.G slope : Pente de la ligne d'énergie.

IV.3.4 Interprétation des résultats :

En examinant le niveau d'eau dans l'ensemble des sections transversales de l'oued, il est évident qu'il présente des conditions de crue le long de son cours, en fonction des paramètres hydrauliques suivants :

- La vitesse d'écoulement varie entre 0,59 m/s et 2,95 m/s, traduisant des vitesses relativement modérées mais suffisantes pour générer des risques d'érosion locale dans certaines sections.
- Le régime d'écoulement, représenté par le nombre de Froude, évolue le long de l'oued avec des valeurs comprises entre 0,14 et 1,00. Ce qui confirme une variabilité hydraulique en fonction de la géométrie et de la pente du lit.

IV.4 Cartographie des zones inondables :

Après l'analyse des données hydrologiques et l'établissement des profils d'inondation à l'aide du logiciel HEC-RAS, les zones à risque ont pu être identifiées et cartographiées. Cette démarche repose sur la détermination des niveaux d'eau dans différentes sections des cours d'eau, ce qui permet de mieux comprendre les dynamiques d'écoulement et de repérer les secteurs potentiellement submergés. L'outil RAS-MAPPER, intégré à HEC-RAS, a été utilisé pour simuler une crue centennale et générer des cartes précises des zones inondables. Les sections suivantes présenteront et analyseront ces cartes, afin de contribuer à une meilleure gestion des risques et à la planification des mesures de prévention.

IV.4.1 Carte des vitesses :

Les vitesses d'écoulement de l'eau sont généralement réparties en trois catégories :

- **Vitesse faible :** inférieure à 0,2 m/s ;
- **Vitesse modérée :** comprise entre 0,2 m/s et 0,5 m/s ;
- **Vitesse forte :** supérieure à 0,5 m/s.

La carte ci-après illustre la distribution spatiale de ces vitesses le long de l'Oued Merzoug.



Figure IV-7 : Carte de vitesse d'eau.

Interprétation :

Les cartes de vitesse d'écoulement constituent un outil fondamental pour analyser la dynamique hydraulique de l'oued. Elles mettent en évidence les secteurs où les vitesses sont plus élevées, généralement localisés dans les tronçons resserrés ou présentant une pente accentuée. Ces zones sont particulièrement sensibles à l'érosion et aux instabilités de berge.

À l'inverse, d'autres parties du cours d'eau présentent des vitesses plus faibles, ce qui s'explique par une pente plus douce et une géométrie plus élargie du lit.

Dans le cas étudié, la vitesse d'écoulement varie entre 0,59 m/s et 2,95 m/s, ce qui traduit une dynamique relativement modérée, mais suffisante pour induire des contrastes notables entre les tronçons rapides et les tronçons calmes de l'oued.

IV.4.2 Carte des profondeurs :

La figure suivante illustre la répartition spatiale des profondeurs d'eau le long de l'Oued Merzoug.



Figure IV-8 : Carte de profondeur d'eau.

Interprétation :

Les cartes de profondeur d'eau permettent de visualiser la répartition des hauteurs d'eau le long de l'oued. Les résultats montrent que cette hauteur varie entre 0 et 3,5 mètres. Les secteurs où la profondeur est plus importante correspondent à des zones potentiellement inondables. Ces tronçons, présentant un risque accru de submersion, nécessitent une vigilance particulière dans le cadre de la planification et de la gestion des risques liés aux inondations.

IV.4.3 Classes d'aléa :

L'évaluation des aléas liés aux inondations repose sur la combinaison de deux paramètres essentiels : la vitesse d'écoulement et la hauteur de submersion. Sur cette base, quatre zones de danger sont

distinguées et représentées par des codes couleurs spécifiques, conformément aux critères d'évaluation résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV-3 : Critères d'évaluation de l'intensité d'aléa inondation (DDT, 2012).

	Faible V<0.2m/s	Moyenne 0.2m/s<v<0.5	Forte v>0.5m/s
Faible H<0.5m	Faible	Moyen	Fort
Moyenne 0.5m<H<1m	Moyen	Moyen	Fort
Fort 1m<H<2m	Fort	Fort	Fort
Très fort H>2m	très fort	très fort	Très fort

La carte des aléas relative à l'Oued Merzoug est présentée ci-dessous :

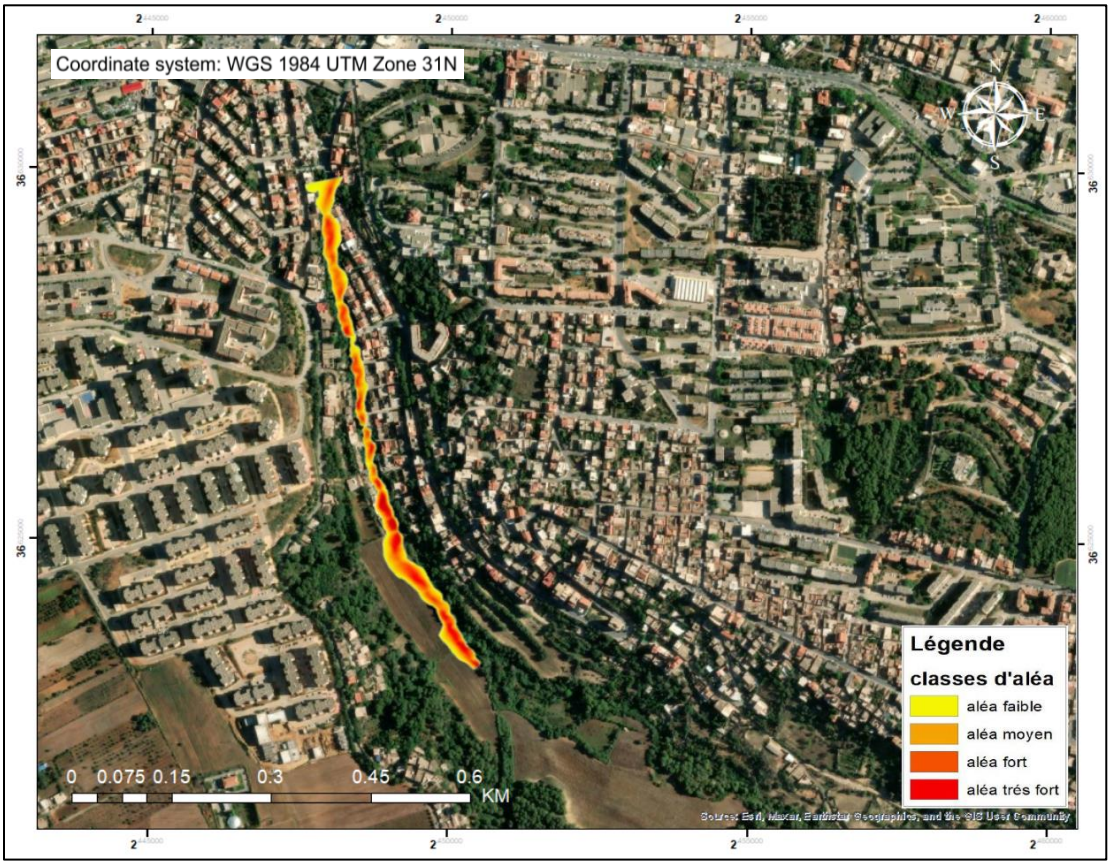


Figure IV-9 : carte d'aléa pour la crue centennal.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons analysé les écoulements au niveau de l'oued Merzoug, à l'état non aménagé, en utilisant le modèle hydrodynamique HEC-RAS pour simuler une crue de période de retour centennale. Cette démarche a permis d'identifier les principales zones inondables et de réaliser une cartographie des profondeurs, indiquant la hauteur d'eau en différents points du cours d'eau.

L'analyse des cartes de risques a montré que le secteur étudié présente un aléa variant de moyen à fort. Ainsi, la mise en place d'aménagements hydrauliques s'avère indispensable afin de garantir la protection des populations, des infrastructures et de l'environnement.

Chapitre V : Étude Des Variante D’aménagement

Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de proposer des solutions d'aménagement visant à assurer une protection efficace de la ville de Tipaza contre les inondations provoquées par l'Oued Merzoug. En s'appuyant sur les résultats hydrologiques et hydrauliques présentés dans les chapitres précédents, deux variantes d'aménagement seront étudiées et comparées. L'analyse portera à la fois sur leur efficacité hydraulique et sur leur rentabilité technico-économique, afin de retenir la solution la plus appropriée et la plus durable pour réduire le risque d'inondation dans la zone concernée.

V.1 Type des canaux :

V.1.1 Les canaux naturels :

Les canaux naturels regroupent les rivières, torrents, fleuves et estuaires qui se forment spontanément à la surface ou en profondeur du sol. Ils se caractérisent généralement par des formes géométriques et des propriétés hydrauliques irrégulières.

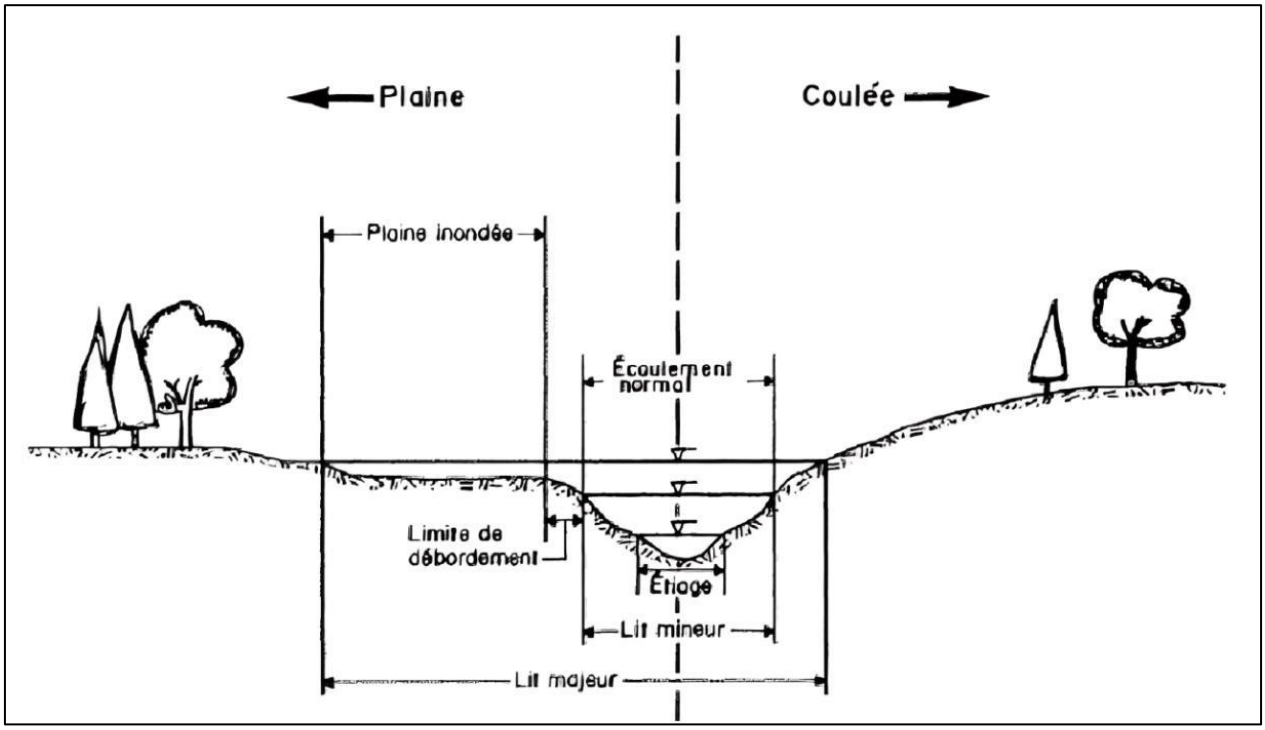


Figure V-1 : Le cours d'eau et son milieu environnant (Source : Dr Habibi Brahim - 2013).

V.1.2 Les canaux artificiels :

Les cours d'eau artificiels sont des canaux aménagés par l'homme dans le but de conduire l'eau vers un exutoire déterminé. Selon les besoins et les contraintes du projet, plusieurs formes géométriques de sections transversales peuvent être adoptées, notamment trapézoïdale, rectangulaire ou encore circulaire.

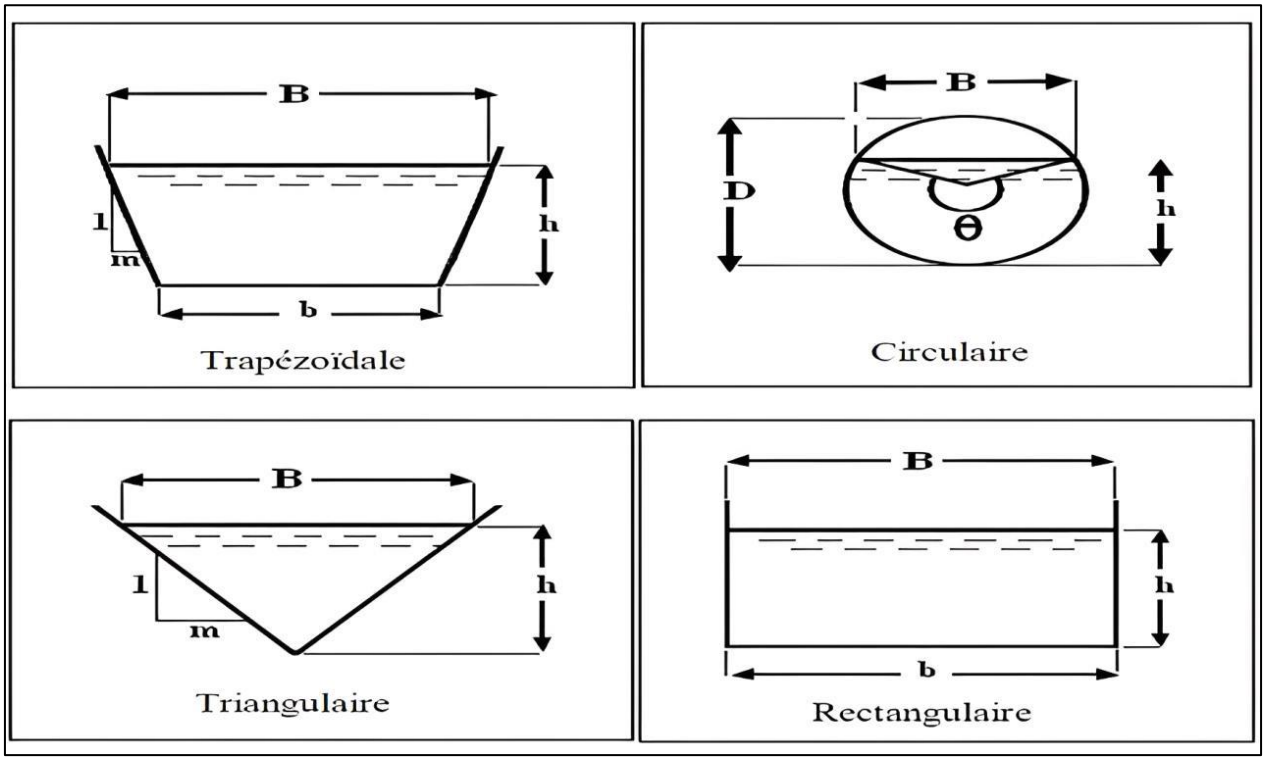


Figure V-2 : Canaux artificiels (D'après TOUMI Abdelouaheb - 2016).

Types d'aménagements en fonction des matériaux utilisés :

- **Aménagement en enrochement :** Ce type d'aménagement repose sur l'utilisation de matériaux minéraux tels que des roches, pierres ou blocs de béton, afin de stabiliser et renforcer les berges. En plus de leur robustesse et de leur durabilité, ces structures présentent un aspect esthétique qui s'intègre harmonieusement dans le paysage environnant.



Figure V-3 : Enrochement le long d'une rivière. (Source : Google)

- **Gabions :** Les gabions sont des cages rectangulaires en treillis métallique ou grillage, remplies de pierres ou de blocs de béton. Ils sont utilisés pour des fonctions similaires à l'enrochement, notamment la stabilisation, la protection contre l'érosion et l'amélioration visuelle des berges. Leur flexibilité et leur capacité à s'adapter à différents terrains, tout en assurant une bonne perméabilité, en font une solution durable et polyvalente.



Figure V-4 : Canal en Gabion. (Source : Google)

- **Aménagements en béton ou en métal :** Le béton et le métal sont largement utilisés pour aménager les cours d'eau, en raison de leur solidité et de leur durabilité. Ils permettent de répondre efficacement aux besoins de stabilisation des rives, de lutte contre l'érosion et d'intégration dans les projets de développement urbain ou rural.



Figure V-5 : Canal en Béton. (Source : Google)

- **Palplanches :** Les palplanches sont des panneaux métalliques enfoncés verticalement dans le sol le long des berges. Elles offrent une protection robuste et pérenne contre l'érosion, tout en contribuant à maintenir l'intégrité des écosystèmes aquatiques et riverains.



Figure V-6 : Canal en palplanches. (Source : Google)

- **Aménagements par végétalisation :** Également appelés techniques de génie biologique, ces aménagements consistent à utiliser des plantes pour stabiliser les berges et améliorer la qualité écologique du milieu aquatique. Souvent combinée à d'autres méthodes, la végétalisation favorise la durabilité, la biodiversité et l'intégration paysagère.
- **Aménagements en matériaux synthétiques :**
    - **Géotextiles :** tissus synthétiques perméables, fabriqués en polypropylène ou polyester, utilisés pour le drainage, la filtration, le renforcement des sols et le contrôle de l'érosion.
    - **Géogrilles :** structures tridimensionnelles rigides, généralement en polyester ou HDPE, destinées à renforcer les sols, stabiliser les talus et soutenir des remblais ou chaussées.
    - **Différences principales :** les géotextiles sont souples et adaptés aux fonctions de séparation et filtration, tandis que les géogrilles offrent une résistance mécanique élevée pour le renforcement structurel.
- **Aménagements combinés :** Cette approche intégrée combine plusieurs matériaux (enrochement, béton, géotextiles, végétaux, etc.) afin d'optimiser la stabilité des berges, gérer efficacement les eaux pluviales et réduire les besoins en entretien. Elle permet d'adapter les solutions aux spécificités locales tout en minimisant les impacts environnementaux et en préservant les écosystèmes.

V.2 Techniques d'aménagements :

Les systèmes de prévention des inondations regroupent l'ensemble des infrastructures et aménagements destinés à limiter ou empêcher les débordements dans les zones sensibles, qu'elles soient habitées, économiques ou environnementales. Afin de réduire les risques liés aux crues, deux grandes catégories de protections peuvent être mises en place, selon la nature du problème à traiter:

V.2.1 La protection directe :

La protection directe consiste à intervenir directement sur les zones menacées par les inondations, en y installant des ouvrages adaptés capables de réduire efficacement les risques. Parmi les principales techniques, on distingue :

- **Recalibrage du cours d'eau :** cette opération vise à accroître la capacité hydraulique de l'oued en abaissant son lit ou en élargissant la section transversale.
- **Protection des cours d'eau par digues :** l'élévation des rives permet de contenir les crues et de sécuriser les zones urbanisées ou agricoles avoisinantes, tout en augmentant la capacité d'écoulement.
- **Reboisement et techniques végétales :** l'utilisation de la végétation contribue à stabiliser les berges, limiter l'érosion et améliorer la qualité des eaux.
- **Aménagement du lit artificiel :** dans les zones urbaines, le lit de l'oued peut être consolidé par du béton, des pierres ou des gabions, afin de renforcer sa stabilité et de limiter les débordements.

V.2.2 La protection indirecte :

La protection indirecte repose sur des aménagements situés en amont ou en dehors de la zone menacée. Elle consiste à réguler, stocker ou dévier les eaux afin de réduire l'intensité des crues. Les principales approches sont :

- **Création de canaux souterrains ou de dérivation :** ces ouvrages permettent de détourner une partie ou la totalité des eaux d'un oued vers un autre bassin, situé hors de la zone à protéger.
- **Construction de barrages :** en régulant et en stockant les eaux en amont, ils limitent le débit de pointe et atténuent l'impact des crues sur les zones habitées.

- **Aménagement des bassins versants :** l'installation de seuils en gabions ou l'application de méthodes biologiques (reboisement, fascines, etc.) permet de ralentir les écoulements, de retenir les sédiments et de réduire l'érosion.

V.3 Choix des paramètres de dimensionnement :

Avant d'entamer les calculs hydrauliques, il est indispensable de définir avec précision la pente de projet, le coefficient de rugosité, la vitesse critique d'érosion, ainsi que la marge de sécurité dans les canaux (appelée revanche).

V.3.1 La pente :

La pente d'un cours d'eau se définit comme le rapport entre la différence d'altitude mesurée entre deux points situés le long de son tracé et la distance horizontale qui les sépare. Elle traduit l'inclinaison générale du lit et joue un rôle fondamental dans la dynamique de l'écoulement, puisqu'elle influence directement la vitesse des eaux, la capacité de transport solide ainsi que les phénomènes d'érosion et de sédimentation.

V.3.2 Coefficient de rugosité :

La rugosité d'un canal est directement liée au type de revêtement utilisé. Chaque matériau présente une résistance particulière à l'écoulement de l'eau, traduite par un coefficient de rugosité. Le tableau suivant illustre les valeurs de rugosité associées aux différents types de revêtements :

Tableau V-1 : Valeurs du coefficient de rugosité. (Chen et Cotton, 1986)

Caractéristiques du lit ou du revêtement	Valeur de la rugosité n
Canal avec revêtement en béton	0.014
Canal en terre	0.022
Canal en pierre sèche	0.025
Canal en Gabion	0.030

V.3.3 Vitesse d'érosion :

Afin d'éviter la dégradation des fonds et des berges des canaux provoquée par l'action dynamique de l'écoulement, il est indispensable de veiller à ce que la vitesse moyenne du courant ne dépasse pas une valeur critique appelée vitesse limite maximale. Cette vitesse représente le seuil au-delà duquel les matériaux constituant le lit et les berges risquent d'être arrachés, entraînant ainsi des phénomènes d'érosion et d'instabilité. Les valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion, propres aux lits consolidés, sont présentées dans le tableau ci-après :

Tableau V-2 : 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 - 4.00
Gabions	4.00 - 6.00
Revêtement en béton	6.00 - 10.00
Béton amélioré	< 10.00

V.3.4 Marge de sécurité (Revanche) :

Pour assurer la capacité hydraulique des cours d'eau, rajouter une revanche pour intégrer, soit les incertitudes liées aux calculs hydrauliques ou des processus hydrauliques tel que la formation des vagues causées par des obstacles. Une revanche comprise entre 0,5 et 1 m est recommandée, on prend une revanche de 0,5 m.

V.4 Etude des variantes :

Dans le cadre de cette étude, deux variantes d'aménagement des cours d'eau seront proposées. Chacune de ces options devra répondre à des critères de faisabilité technico-économique tout en tenant compte des spécificités locales, notamment la configuration topographique, le degré d'urbanisation ainsi que la répartition des activités humaines et économiques dans la zone étudiée.

V.4.1 Variante N°01 : canal trapézoïdale en béton armé :

V.4.1.1 Description :

Canal trapézoïdal en béton armé, avec une largeur de 2 m à la petite base et des talus présentant un coefficient de pente m = 1, correspondant à un angle de 45°. Cette configuration géométrique offre une bonne stabilité tout en simplifiant l'exécution technique des travaux.

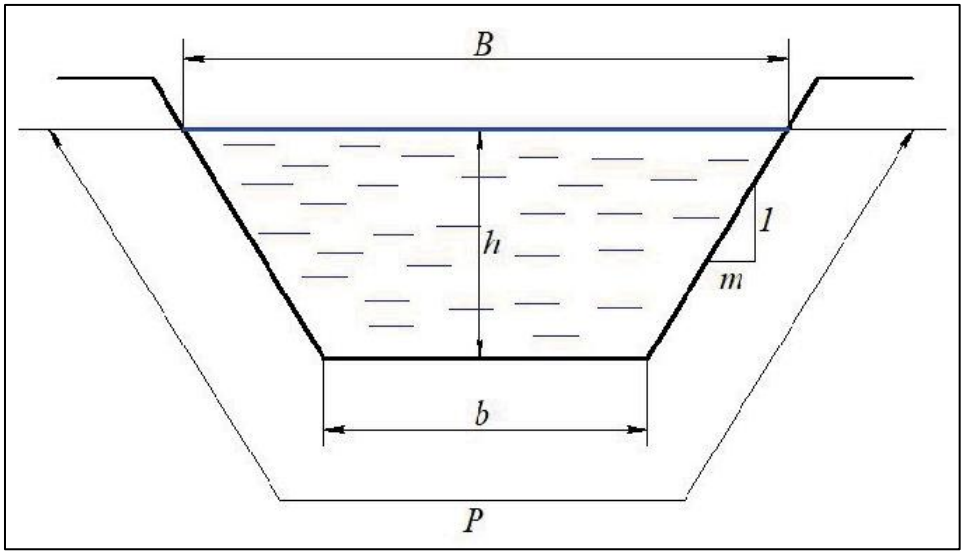


Figure V-7 : coupe en travers d'un canal trapézoïdal en béton. (Source : Google)

- **Avantages :**
  - Grande capacité hydraulique grâce à la section trapézoïdale, permettant une meilleure évacuation des crues.
  - Stabilité accrue des parois et réduction des risques d'érosion latérale.
  - Adaptation plus harmonieuse à l'environnement naturel et au lit initial du cours d'eau.
- **Inconvénients :**
  - Occupation au sol plus importante, ce qui peut poser problème en zone urbaine dense.

V.4.1.2 Dimensionnement :

Le dimensionnement du canal a été effectué à l'aide du logiciel FLOW MASTER. La première variante proposée correspond à la réalisation d'un canal en béton armé de forme trapézoïdale. D'après les résultats obtenus, la profondeur normale de cette section est estimée à 1,9809 m. L'ouvrage s'étendra sur 560 mètres le long du tronçon de l'oued situé à proximité des habitations du quartier Haï Sidi Abdelkader, zone particulièrement exposée au risque d'inondation.

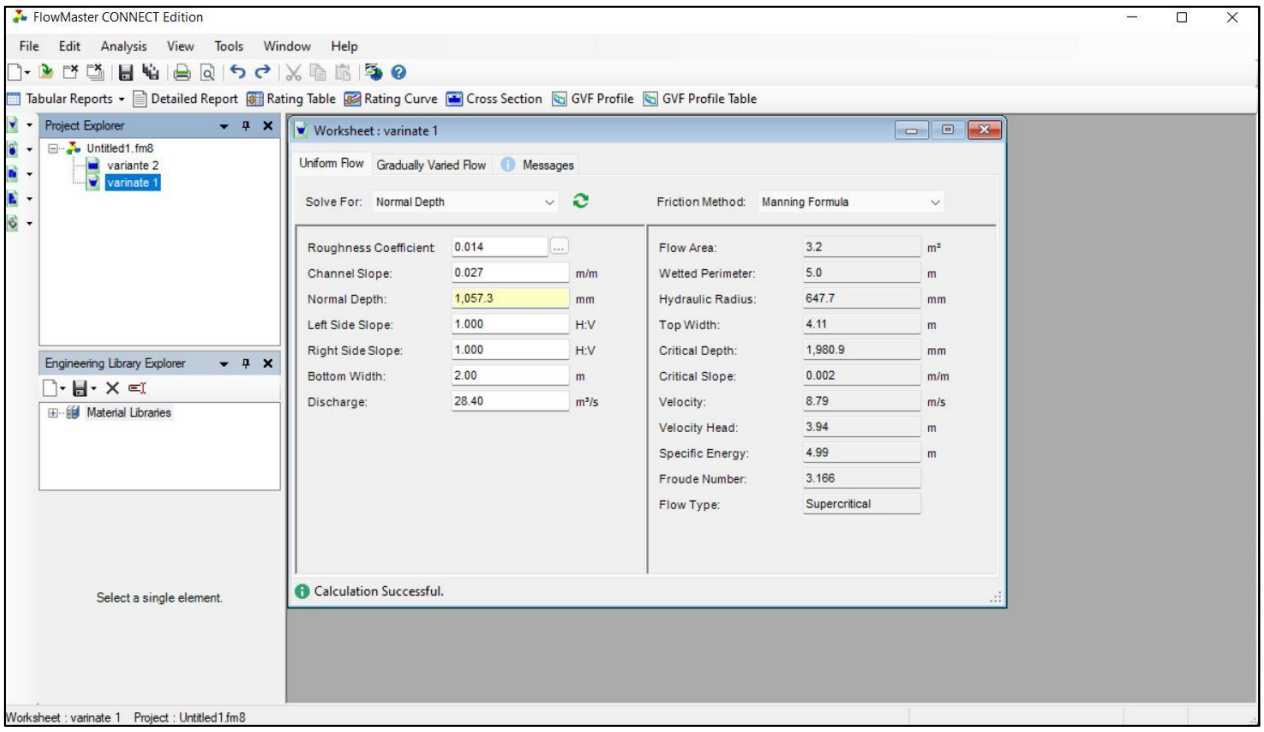


Figure V-8 : Extrait de la feuille de calcul du logiciel FlowMaster. (Variante 1)

Tableau V-3 : Dimensions de la variante 1

Variante N°02	Longueur (m)	La rugosité	Pente du canal (m/m)	Largeur du fond (m)	Fruit de talus	Largeur supérieure (m)	Profondeur critique (mm)	Hauteur du canal (m)
Canal trapézoïdal	560	0.014	0.027	2	1	6	1980.9	2

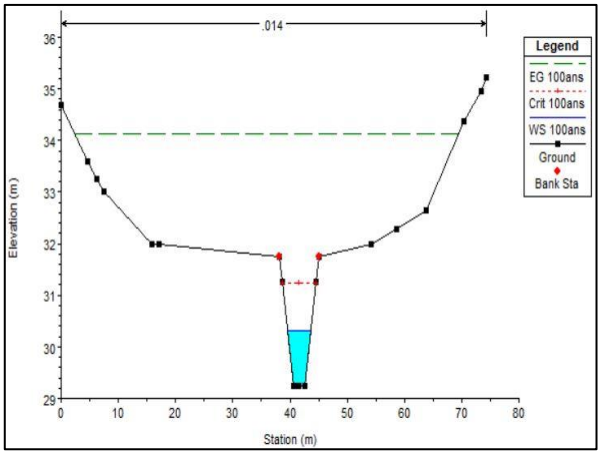
V.4.1.3 Résultats de la simulation :

Les résultats issus de la simulation réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS sont présentés dans le tableau ci-après :

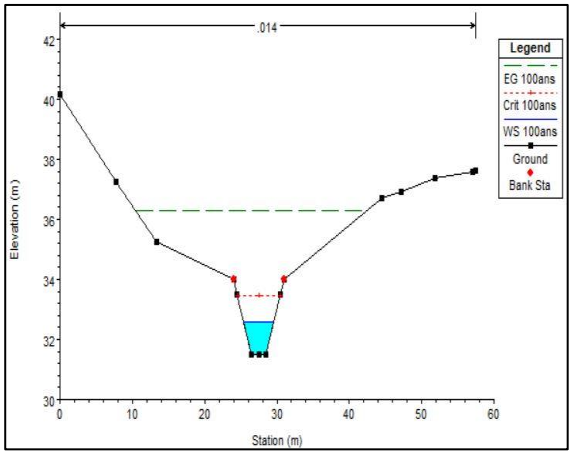
Tableau V-4 : Principaux paramètres hydraulique des stations du canal (Variante 1).

River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
560	28.4	44	45.24	45.97	47.77	0.014721	7.04	4.04	4.49	2.37
510	28.4	41.5	42.55	43.47	46.52	0.027263	8.82	3.22	4.11	3.18
460	28.4	40.25	41.34	42.22	44.96	0.024043	8.42	3.37	4.18	2.99
410	28.4	39	40.09	40.97	43.75	0.024487	8.48	3.35	4.17	3.02
360	28.4	37.75	38.83	39.72	42.56	0.025052	8.55	3.32	4.16	3.05
310	28.4	36.5	37.6	38.47	41.16	0.023515	8.35	3.4	4.2	2.96
260	28.4	35.25	36.34	37.22	39.98	0.024264	8.45	3.36	4.18	3.01
210	28.4	34	35.08	35.97	38.84	0.025366	8.59	3.31	4.15	3.07
160	28.4	32.75	33.85	34.72	37.36	0.023011	8.29	3.43	4.21	2.93
110	28.4	31.5	32.58	33.47	36.3	0.024968	8.54	3.33	4.16	3.05
60	28.4	30.25	31.33	32.22	35.07	0.025169	8.56	3.32	4.16	3.06
20	28.4	29.25	30.32	31.22	34.14	0.025896	8.65	3.28	4.14	3.1
0	28.4	28.75	29.81	30.72	33.69	0.026436	8.72	3.26	4.13	3.13

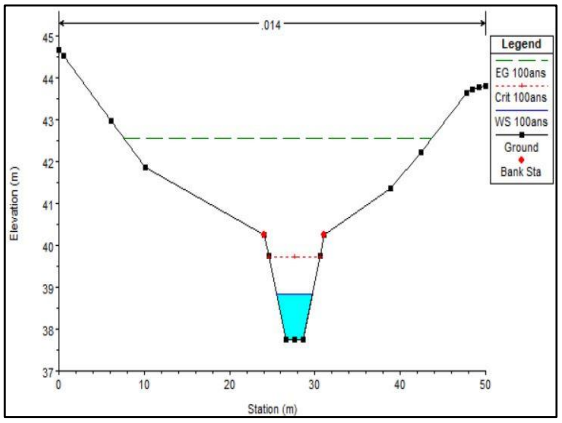
- Min Ch. El : Altitude du radier du canal.
- El chnl : Vitesse d'écoulement.
- W.S Elev : Altitude du plan d'eau calculé.
- Flow area : Section mouillée.
- Top Width : Largeur au miroir.
- E.G Elev : Altitudes de la ligne d'énergie.
- Froude chl : Nombre de Froude.
- E.G slope : Pente de la ligne d'énergie.



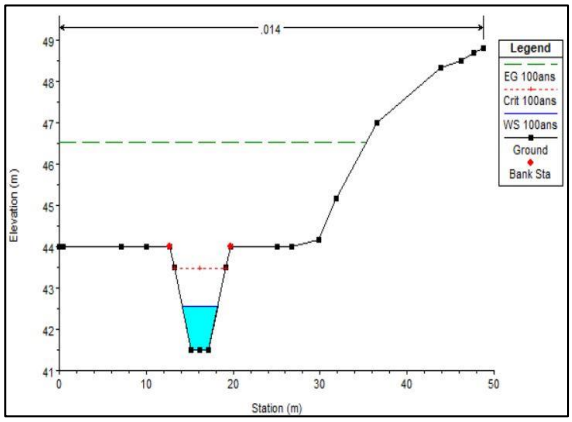
Station 20



Station 110



Station 360



Station 510

Figure V-9 : Profils transversaux d'un canal trapézoïdal lors d'une crue de 100 ans.

Interprétation :

L'analyse du nombre de Froude met en évidence un régime d'écoulement torrentiel, avec des valeurs comprises entre 2.37 et 3.18 le long du canal. Ces valeurs, toutes supérieures à 1, confirment la présence d'un écoulement rapide et dynamique.

La vitesse de l'écoulement varie entre 7.04 m/s et 8.72 m/s, ce qui reflète un régime particulièrement énergique. Ces vitesses, bien que relativement élevées, nécessitent une attention renforcée pour limiter les phénomènes d'érosion et assurer la durabilité des ouvrages, notamment sur les parois du canal trapézoïdal.

V.4.1.4 Estimation du coût associé à la variante proposée :

Le devis relatif à la variante du canal en béton armé a été établi sur la base des quantités de terrassement, ainsi que des volumes de remblai et de déblai obtenus à partir des calculs réalisés avec le logiciel HEC-RAS.

Tableau V-5 : Coût de la variante 1.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA/m^3)	Montant (DA)
Terrassement	Déblais	(m^3)	3265	300	979,500
	Remblais	(m^3)	8800	800	9,680,000
Béton de propreté		(m^3)	168	8500	1,428,000
Béton		(m^3)	1125	33000	37,125,000
Montant total					**49,212,500**

V.4.2 Variante N°02 : canal rectangulaire en béton armé :

V.4.2.1 Description :

Canal de section rectangulaire de 3 m de largeur et 2 m de hauteur, réalisé également sur un linéaire de 560 m.

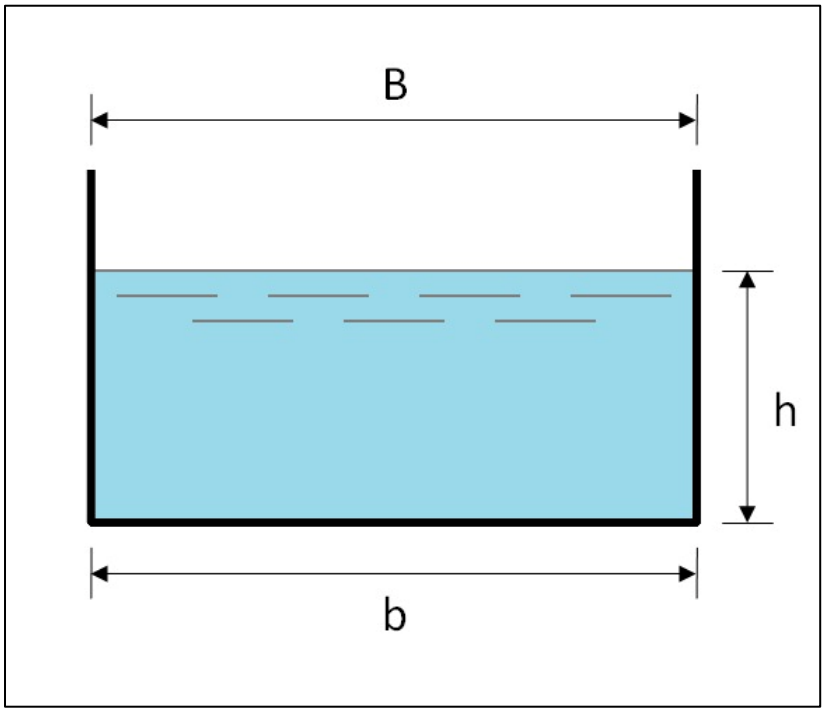


Figure V-10 : coupe en travers d'un canal rectangulaire en béton. (Source : Google)

- **Avantages :**
  - Conception simple et économique, facilitant la mise en œuvre et réduisant les coûts.
  - Moindre emprise au sol, adaptée aux zones urbanisées et aux espaces restreints.
  - Entretien et curage plus aisés grâce à la géométrie régulière.
- **Inconvénients :**
  - Capacité hydraulique limitée par rapport à la section trapézoïdale, surtout en cas de crues exceptionnelles.
  - Moindre intégration dans l'environnement naturel du cours d'eau.
  - Risque accru de contraintes hydrauliques sur les parois verticales, nécessitant un dimensionnement rigoureux pour éviter fissures et dégradations.

V.4.2.2 Dimensionnement :

Le dimensionnement du canal a été effectué à l'aide du logiciel FLOW MASTER. La première variante proposée correspond à la réalisation d'un canal en béton armé de forme trapézoïdale. D'après les résultats obtenus, la profondeur normale de cette section est estimée à 2,0907 m. L'ouvrage s'étendra sur 560 mètres le long du tronçon de l'oued situé à proximité des habitations du quartier Haï Sidi Abdelkader, zone particulièrement exposée au risque d'inondation.

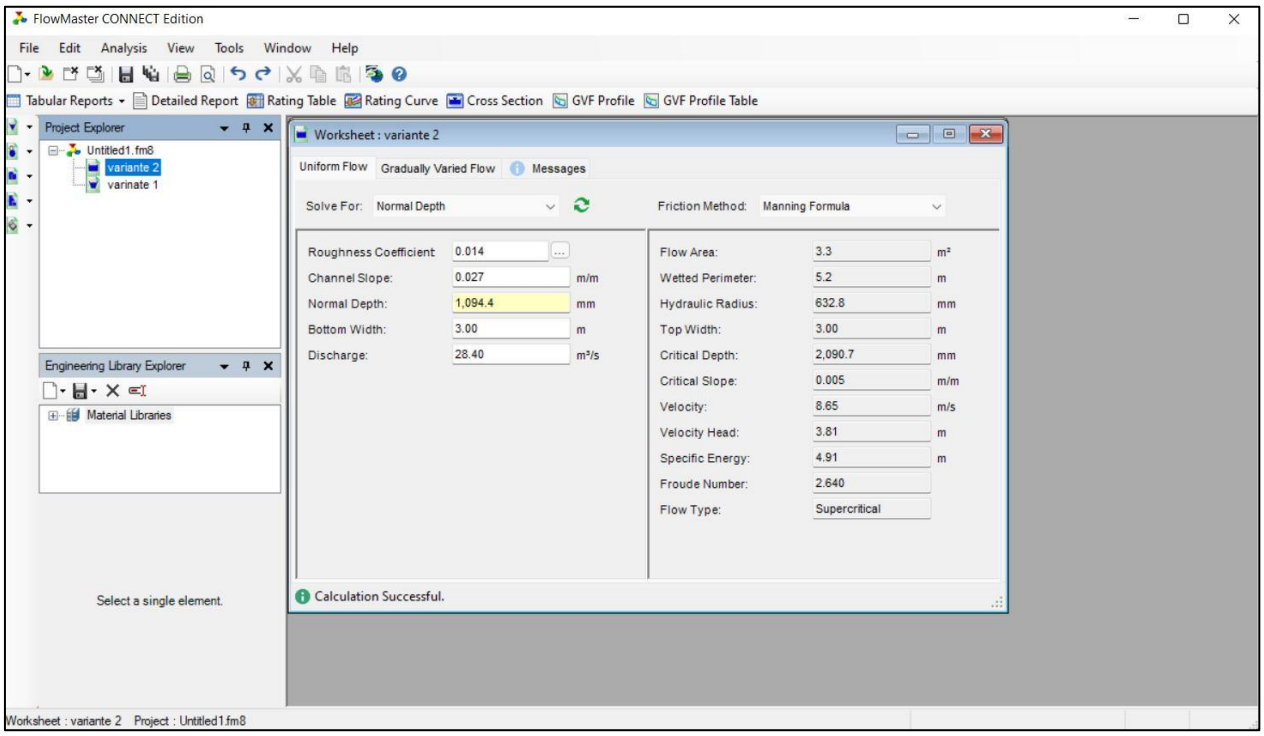


Figure V-11 : Extrait de la feuille de calcul du logiciel FlowMaster. (Variante 2)

Tableau V-6 : Dimensions de la variante 2

Variante N°02	Longueur (m)	La rugosité	Pente du canal (m/m)	Largeur du fond (m)	Profondeur critique (mm)	Hauteur du canal (m)
Canal trapézoïdal	560	0.014	0.027	3	2090.7	2

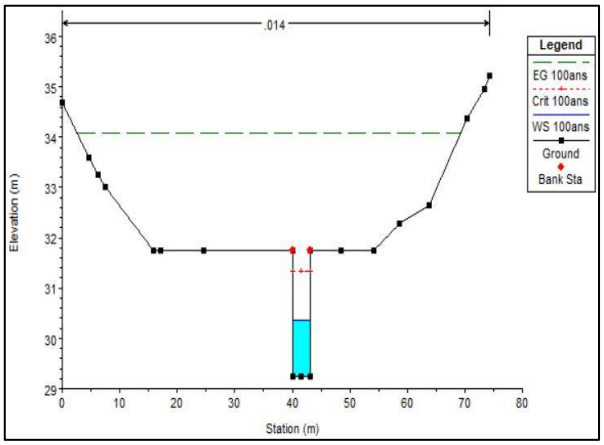
V.4.2.3 Résultats de la simulation :

Les résultats issus de la simulation réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS sont présentés dans le tableau ci-après :

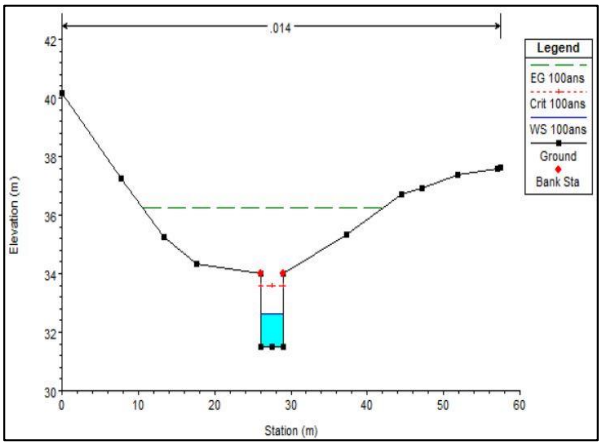
Tableau V-7 : Principaux paramètres hydraulique des stations du canal (Variante 2).

River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
560	28.4	44	45.38	46.08	47.78	0.014372	6.87	4.14	3	1.87
510	28.4	41.5	42.58	43.58	46.52	0.028313	8.8	3.23	3	2.71
460	28.4	40.25	41.39	42.33	44.91	0.024117	8.3	3.42	3	2.48
410	28.4	39	40.13	41.08	43.7	0.024559	8.36	3.4	3	2.51
360	28.4	37.75	38.87	39.83	42.5	0.025136	8.43	3.37	3	2.54
310	28.4	36.5	37.65	38.58	41.1	0.023435	8.22	3.46	3	2.45
260	28.4	35.25	36.39	37.33	39.92	0.024278	8.32	3.41	3	2.49
210	28.4	34	35.12	36.08	38.77	0.025457	8.47	3.35	3	2.56
160	28.4	32.75	33.91	34.83	37.29	0.022853	8.14	3.49	3	2.41
110	28.4	31.5	32.62	33.58	36.24	0.025021	8.42	3.37	3	2.53
60	28.4	30.25	31.37	32.33	35	0.025193	8.44	3.37	3	2.54
20	28.4	29.25	30.36	31.33	34.07	0.025951	8.53	3.33	3	2.58
0	28.4	28.75	29.85	30.83	33.62	0.026515	8.59	3.3	3	2.61

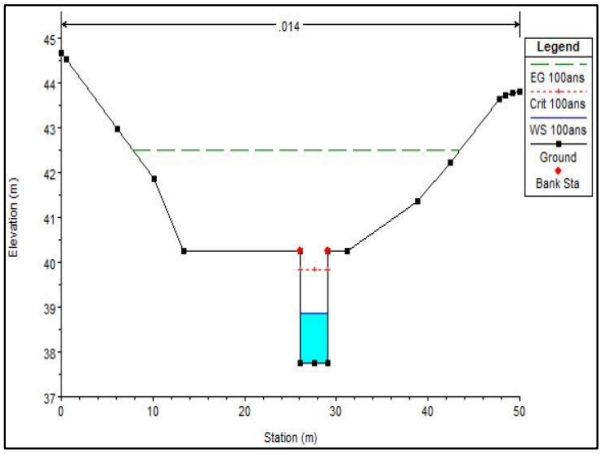
- Min Ch. El : Altitude du radier du canal
- Vel chnl : Vitesse d'écoulement ;
- W.S Elev : Altitude du plan d'eau calculé ;
- Flow area : Section mouillée ;
- Top Width : Largeur au miroir ;
- E.G Elev : Altitudes de la ligne d'énergie ;
- Froude chl : Nombre de Froude ;
- E.G slope : Pente de la ligne d'énergie.



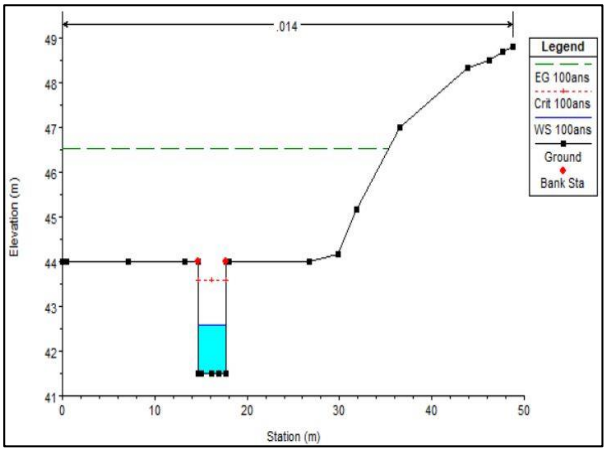
Station 20



Station 110



Station 360



Station 510

Figure V-12 : Profils transversaux d'un canal rectangulaire lors d'une crue de 100 ans.

Interprétation :

L'analyse du nombre de Froude montre que le régime d'écoulement est torrentiel, avec des valeurs comprises entre 1.87 et 2.71 le long du canal. Par ailleurs, la vitesse moyenne de l'écoulement varie entre 6.87 m/s et 8.59 m/s, ce qui indique un écoulement relativement rapide. Ce niveau de vitesse nécessite une attention particulière pour limiter les risques d'érosion, mais la conception en béton armé contribue à assurer la stabilité des parois.

Sur le plan hydraulique, la section du canal reste globalement adaptée puisque la surface d'écoulement se maintient entre 3.23 m² et 4.49 m², avec une largeur en surface constante de 3 m, ce qui garantit un écoulement régulier et limite les risques de débordement.

D'un point de vue technique, les résultats de la simulation confirment que les dimensions proposées pour les tronçons du canal rectangulaire en béton armé sont appropriées et permettent de maîtriser l'écoulement torrentiel, tout en offrant une sécurité structurelle vis-à-vis des risques hydrauliques.

V.4.2.4 Estimation du coût associé à la variante proposée :

Le devis relatif à la variante du canal en béton armé a été établi sur la base des quantités de terrassement, ainsi que des volumes de remblai et de déblai obtenus à partir des calculs réalisés avec le logiciel HEC-RAS.

Tableau V-8 : Coût de la variante 2.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Terrassement	Déblais	(m^3)	2180	300	654,000
	Remblais	(m^3)	6130	1100	6,743,000
Béton de propreté		(m^3)	168	8500	1,428,000
Béton		(m^3)	1086	33000	35,838,000
Montant total du projet					**44,663,000**

V.5 Choix de la variante :

Après l'analyse comparative des deux variantes proposées (canal trapézoïdal et canal rectangulaire en béton armé), le choix s'est porté sur la Variante 2, correspondant au canal rectangulaire.

En effet, les résultats de la simulation hydraulique ont montré que cette configuration assure un régime d'écoulement torrentiel, avec un nombre de Froude compris entre 1.87 et 2.71, ce qui demeure stable et maîtrisable. De plus, la vitesse de l'écoulement varie entre 6.87 m/s et 8.59 m/s, soit légèrement inférieure à celle observée dans la variante trapézoïdale (7.04 à 8.72 m/s). Cette caractéristique réduit les risques d'érosion et améliore la durabilité de l'ouvrage.

Sur le plan hydraulique, la section rectangulaire présente une surface d'écoulement comprise entre 3.23 m² et 4.49 m² et une largeur constante de 3 m, garantissant un écoulement régulier et une meilleure maîtrise des hauteurs d'eau. Cette géométrie simple facilite également la construction, l'entretien et la mise en place d'éventuelles protections supplémentaires.

En comparaison, la variante trapézoïdale, bien qu'offrant une largeur de surface plus importante (≈ 4.1 à 4.5 m), engendre des vitesses plus élevées et donc une contrainte plus forte sur les parois, nécessitant des dispositifs de protection coûteux et complexes contre l'érosion.

Ainsi, le choix de la Variante 2 apparaît comme le plus judicieux d'un point de vue hydraulique, technique et économique, puisqu'il permet d'assurer la sécurité de l'écoulement, de limiter les risques de dégradation des berges et d'optimiser les coûts de construction et d'entretien.

Conclusion :

Dans ce chapitre, deux variantes d'aménagement ont été étudiées afin de réduire le risque d'inondation et de protéger les zones sensibles situées le long de l'Oued Merzoug. Une comparaison technique, hydraulique et économique a été réalisée entre un canal trapézoïdal et un canal rectangulaire en béton armé.

À l'issue de cette analyse, la Variante 2, correspondant au canal rectangulaire en béton armé, a été retenue. Ce choix s'explique par sa meilleure stabilité hydraulique, ses vitesses d'écoulement modérées et sa conception plus simple et durable par rapport à la variante trapézoïdale.

Une simulation hydraulique effectuée à l'aide du logiciel HEC-RAS a permis de confirmer l'efficacité de cette solution d'aménagement, en démontrant sa capacité à contenir le débit de projet et à limiter les risques de débordement, tout en garantissant une sécurité accrue pour les zones urbanisées traversées par l'oued.

Chapitre VI : Organisation de chantier.

Introduction :

L'aménagement d'un cours d'eau en canal en béton armé constitue un projet d'envergure qui exige une planification rigoureuse et une gestion efficace afin d'assurer la réussite des travaux. Ce type de canal se distingue par sa durabilité, sa faible rugosité et sa robustesse, garantissant à la fois efficacité hydraulique, longévité et sécurité.

Dans ce chapitre, il sera question de présenter l'organisation générale du chantier, depuis la mise en place et le phasage des travaux, jusqu'à l'estimation des coûts et des délais d'exécution. L'objectif est de mettre en évidence les moyens techniques et humains mobilisés, tout en soulignant l'importance du respect des normes de sécurité et des contraintes environnementales. Une organisation optimale du chantier permettra ainsi de réduire les délais, de maîtriser les dépenses et d'assurer la qualité de l'ouvrage.

VI.1 Rôles des intervenants sur chantier :

VI.1.1 Le maître d'ouvrage :

Le maître d'ouvrage (MOA) est le responsable principal du projet. Il s'assure de la faisabilité et de l'opportunité de l'opération, définit sa localisation et son programme, fixe et garantit le budget prévisionnel, et choisit le mode de réalisation. Il établit les contrats avec le maître d'œuvre et les entreprises en charge des études et des travaux. En pratique, il supervise l'ensemble du processus, depuis la conception jusqu'à la mise en service de l'ouvrage, et veille à la bonne exécution du projet.

VI.1.2 Le maître d'œuvre :

Le maître d'œuvre est la personne, physique ou morale, désignée par le maître d'ouvrage pour concevoir et diriger les travaux. Sa mission englobe plusieurs responsabilités : il élabore les plans et les spécifications techniques du projet, coordonne la collaboration entre les différents intervenants, et assure la direction de l'exécution afin de garantir la conformité des réalisations aux exigences prévues. Il veille également au contrôle technique, en s'assurant de la qualité et du respect des normes, et assiste le maître d'ouvrage lors de la réception de l'ouvrage en vérifiant sa conformité et en préparant les documents nécessaires.

VI.1.3 L’entrepreneur :

L’entrepreneur est une personne physique ou morale qui conclut un contrat de travaux avec le maître d’ouvrage et qui assume la responsabilité de l’exécution des travaux, et parfois de la conception détaillée des ouvrages. Durant toute la phase de construction, le chantier ainsi que l’ouvrage restent sous sa responsabilité jusqu’à leur réception définitive.

VI.2 Installation du chantier :

L’installation du chantier comprend l’aménagement des espaces nécessaires pour le personnel, tels que les dortoirs, vestiaires, réfectoires, sanitaires et bureaux, ainsi que les zones de stockage adaptées aux matériaux principaux et complémentaires (ciment, acier, remblai, etc.). Elle prévoit également l’alimentation en électricité grâce à un groupe électrogène, l’approvisionnement en eau potable par un réservoir réapprovisionné quotidiennement, et l’alimentation en carburant assurée par des camions-citernes, le tout stocké dans des réservoirs sécurisés. Les engins de chantier doivent être installés sur un terrain stable et entretenus régulièrement pour garantir leur bon fonctionnement, tandis que des hangars équipés servent à la préfabrication des éléments de l’ouvrage (poutres, dalles, conduites, etc.). Concernant les moyens du chantier, ils regroupent les ressources humaines, constituées de personnel qualifié pour les études et la construction, et les ressources matérielles, comprenant des équipements adaptés aux travaux publics. Les engins mobilisés pour la construction du canal en béton armé incluent des chargeurs, dozers, camions, pelles et niveleuses pour les phases de préparation et de terrassement, des compacteurs à rouleaux lisses ou à pied de mouton pour le compactage, ainsi que des bétonneuses et pompes à béton pour la production et le coulage du béton.

VI.3 Évaluation des quantités et estimation budgétaire du projet :

Les coûts relatifs à la variante retenue sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau VI-1 : Estimation du budget de la variante de canal rectangulaire en béton armé pour le total de l'oued Merzoug.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Terrassement	Déblais	(m^3)	2180	300	654,000
	Remblais	(m^3)	6130	1000	6,743,000
Béton de propreté		(m^3)	168	8500	1,428,000
Béton		(m^3)	1086	33000	35,838,000
Montant total du projet					44,663,000
Montant total en TVA (19%)					**53,143,270**

VI.4 Planification de projet :

Le planning correspond à l'activité qui consiste à identifier, organiser et planifier les différentes tâches d'un projet, tout en définissant les compétences nécessaires à leur exécution. Il représente ainsi un outil essentiel pour le responsable du projet afin d'optimiser l'efficacité opérationnelle. Ses principaux objectifs sont d'organiser les postes de travail, de suivre en temps réel l'avancement des opérations, de préciser les responsabilités de chaque acteur, d'évaluer le temps requis pour accomplir chaque tâche et enfin de rechercher des solutions permettant de simplifier et d'améliorer les méthodes de travail.

VI.4.1 Étapes de la planification :

La planification vise à orienter et organiser la mise en œuvre des travaux. Elle comprend les étapes suivantes :

- **Collecte d'informations :** cette phase consiste à regrouper et analyser les données issues des études préliminaires et comparatives, afin de faciliter l'élaboration et l'utilisation efficace du plan de réalisation du projet.
- **Décomposition du projet :** le projet est divisé en différentes tâches, chacune étant attribuée à un responsable avec des besoins spécifiques en matériel et une durée d'exécution définie selon la cadence de travail des équipes ou des engins.

- **Relations entre les tâches :** deux types de relations sont essentiels : la relation séquentielle, où une tâche doit être achevée avant le démarrage de la suivante, et la relation parallèle, qui permet à certaines tâches d'être réalisées simultanément ou dans un ordre de préférence.
- **Choix de la méthode de calcul :** la méthode retenue dépend du type d'ouvrage. Dans le cas de projets comportant une succession d'opérations, comme celui-ci, la méthode du CPM (Critical Path Method) est généralement la plus adaptée.

VI.4.2 Plannings des travaux :

On distingue principalement trois types de plannings utilisés dans l'organisation des chantiers :

- **Plan de travail au plus tôt :** toutes les opérations démarrent dès leur date de commencement la plus précoce. Ce type de planning est privilégié lorsque l'entreprise dispose de ressources importantes et qu'elle est engagée sur plusieurs projets simultanément.
- **Plan de travail au plus tard :** chaque tâche débute à la date la plus tardive possible sans générer de retard global. Cette méthode est souvent adoptée dans les situations où les ressources sont limitées, car elle permet une meilleure optimisation économique.
- **Plan de travail intermédiaire :** les opérations commencent à une date située entre le plus tôt et le plus tard. Ce type de planning est généralement choisi quand les ressources disponibles sont suffisantes et concentrées sur un seul projet, ce qui permet de rationaliser leur utilisation.

VI.4.3 Techniques de planification :

Deux approches principales sont couramment utilisées pour organiser et suivre les projets :

- **Méthodes basées sur le réseau :** elles incluent notamment la méthode du chemin critique (CPM) et la technique PERT (Program Evaluation and Review Technique). Ces méthodes reposent sur la construction de réseaux de tâches et d'événements afin de modéliser le projet. Elles permettent d'identifier les séquences critiques de tâches qui déterminent la durée totale du chantier et d'optimiser la planification en conséquence.

- **Méthodes graphiques :** la plus répandue est le diagramme de Gantt, qui offre une représentation visuelle claire des tâches et de leur chronologie. Cette méthode est particulièrement adaptée au suivi de l'avancement du projet dans le temps, bien qu'elle décrive moins précisément les relations de dépendance entre les différentes tâches que les approches basées sur le réseau.

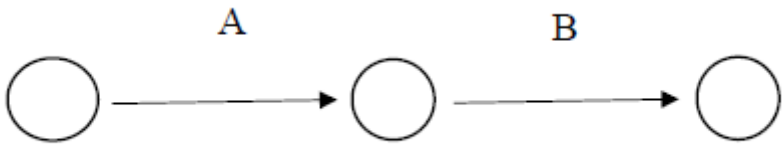
VI.4.3.1 Méthodes basées sur le réseau :

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

- **Réseau à nœuds :** chaque nœud correspond à une opération ou une étape du projet, tandis que les flèches indiquent la séquence et le flux entre ces opérations. L'ordre des flèches précise la chronologie des tâches. Par exemple, l'opération B ne peut commencer qu'après l'achèvement complet de l'opération A.



- **Réseau à flèches :** ici, chaque opération est représentée par une flèche, et les nœuds symbolisent les points de succession ou de liaison entre les tâches. Ainsi, l'opération A précède directement l'opération B.



VI.4.3.2 Construction du réseau :

La mise en place d'un réseau de projet suit six étapes fondamentales :

- **Établissement de la liste des tâches :** il s'agit d'identifier l'ensemble des activités nécessaires à la réalisation du projet, en précisant leur durée, les ressources mobilisées, les dépendances éventuelles et les responsabilités assignées.
- **Détermination des tâches antérieures :** certaines tâches doivent impérativement être achevées avant que d'autres puissent commencer. Cette étape permet donc de définir les liens de dépendance et l'ordre logique d'exécution.
- **Construction des graphes partiels :** ces représentations intermédiaires (diagrammes de Gantt ou graphes PERT) facilitent la visualisation des relations entre les différentes activités.
- **Regroupement des graphes partiels :** dans le cas de projets complexes comportant plusieurs sous-ensembles, les graphes partiels sont combinés afin de créer une vision globale et cohérente du projet.
- **Identification des tâches de début et de fin :** il convient de repérer l'activité initiale qui marque le lancement du projet et celle qui en détermine la clôture, deux étapes clés pour le suivi de l'avancement.
- **Construction du réseau global** : l'ensemble des informations collectées est intégré dans un réseau complet, mettant en évidence les liens entre tâches, les échéances, les ressources nécessaires et les jalons majeurs. Ce réseau constitue un outil visuel essentiel pour la planification, le suivi et la gestion du projet.

VI.4.3.3 Différentes méthodes basées sur le réseau :

- Méthode C.P.M (Critical Path Method) :
  La méthode du chemin critique a pour objectif principal de réduire les délais d'exécution d'un projet en identifiant les activités déterminantes qui conditionnent sa durée globale. Elle repose sur trois étapes essentielles :
  - Identification des ressources humaines nécessaires : déterminer le personnel requis pour la réalisation de chaque tâche.

- Analyse détaillée du réseau : décomposer l'ensemble des activités selon l'unité de temps retenue (heures, jours), en précisant leurs enchaînements et leurs dépendances.
- Ajustement du réseau : adapter la planification en tenant compte des contraintes techniques, organisationnelles ou propres à l'entreprise.

- Méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technique) :
  La méthode PERT consiste à organiser un projet sous forme de réseau dans lequel les tâches sont représentées comme des activités interdépendantes. Elle met en évidence l'ordre de réalisation et les relations de dépendance entre ces tâches, afin de garantir l'achèvement du projet dans les délais prévus.
- Méthodes graphiques :
  La planification graphique repose sur des représentations visuelles permettant de mieux organiser et suivre les tâches d'un projet.
  - Méthode linéaire (ou technique de la ligne d'équilibre) : particulièrement adaptée aux projets comportant des opérations répétitives, cette méthode est efficace pour les chantiers de grande envergure tels que les routes, les voies ferrées ou la construction de bâtiments similaires, car elle permet de représenter la progression régulière des tâches dans le temps et l'espace.
  - Méthode à barres (ou diagramme de Gantt) : elle consiste à établir un planning visuel mettant en évidence la durée et la chronologie des différentes tâches. Ce diagramme facilite la compréhension des enchaînements et la gestion globale du projet en offrant une vue d'ensemble des activités prévues.

VI.4.4 Choix de la méthode de calcul :

Le choix dépend du type de projet. Dans les cas où les tâches doivent être exécutées dans un ordre précis, il est recommandé d'utiliser la méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique), qui permet de prendre en compte les dépendances entre activités et d'optimiser la planification.

VI.4.5 Méthode de calcul de P.E.R.T :

VI.4.5.1 Paramètres de la méthode P.E.R.T :

L'utilisation de la méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique) repose sur la prise en compte de plusieurs paramètres fondamentaux :

- **DCP (Date de début au plus tôt) :** correspond au moment le plus précoce où une tâche peut commencer, en fonction des dépendances et contraintes identifiées.
- **Tr (Temps de réalisation) :** durée estimée nécessaire à l'achèvement d'une tâche donnée.
- **DFP (Date de fin au plus tôt) :** moment le plus précoce où une tâche peut être terminée, en tenant compte du calendrier et des contraintes.
- **DCPP (Date de début au plus tard) :** dernière date possible pour commencer une tâche sans compromettre l'échéancier global du projet.
- **DFPP (Date de fin au plus tard) :** limite maximale à laquelle une tâche doit être achevée pour ne pas retarder le projet.
- **MT (Marge totale) :** intervalle de temps dont une tâche peut disposer sans affecter le chemin critique. Elle se calcule en comparant les dates les plus tôt et les plus tard :

MT = DCPP – DCP, ou bien MT = DFPP – DFP.

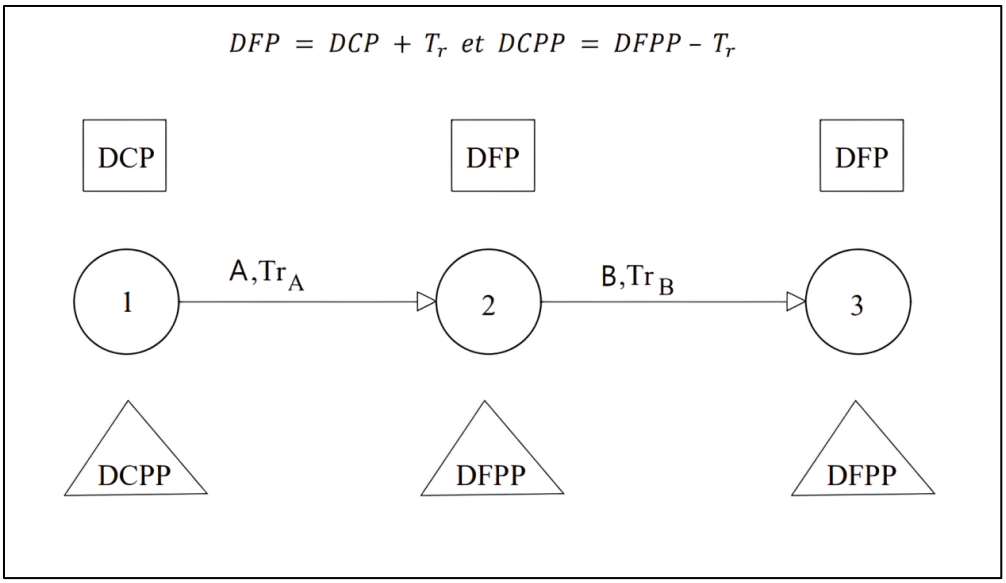


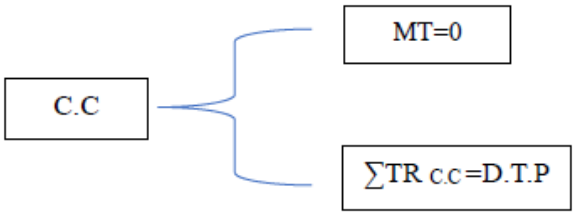
Figure VI-1 : Schéma représentatif de la méthode de PERT.

VI.4.5.2 Chemin critique (C.C) :

Le chemin critique représente la séquence d'activités qui détermine directement la durée totale d'un projet. Autrement dit, tout retard sur l'une des tâches qui le composent entraîne automatiquement un retard sur l'ensemble du projet.

Pour identifier correctement ce chemin, deux conditions fondamentales doivent être respectées :

- Toutes les tâches du chemin critique doivent avoir une marge totale nulle, ce qui signifie qu'elles ne disposent d'aucune flexibilité dans le temps.
- Les liaisons logiques entre les activités doivent être respectées de manière stricte, garantissant ainsi que l'enchaînement des tâches reflète fidèlement les dépendances du projet.



VI.4.6 Exécution de la méthode P.E.R.T :

Pour élaborer le réseau, il est indispensable de commencer par identifier l'ensemble des tâches à réaliser dans le cadre des travaux, puis de préciser pour chacune d'elles la durée prévue d'exécution. Cette étape constitue la base de la planification, car elle permet de structurer le projet en séquences ordonnées et de faciliter l'organisation du calendrier global.

La liste des tâches est illustrée dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI-2 : Liste des tâches avec leurs durées.

Opération	Code	Temps de réalisation en jours
Installation du chantier	A	15
Déblai	B	20
Lit du gravier	C	10
Compactage (gravier)	D	11
Exécution de lit du béton de propreté	E	15
Exécution de béton armé	F	70
Remblai	G	25
Compactage (remblai)	H	14
Travaux de finition	I	15

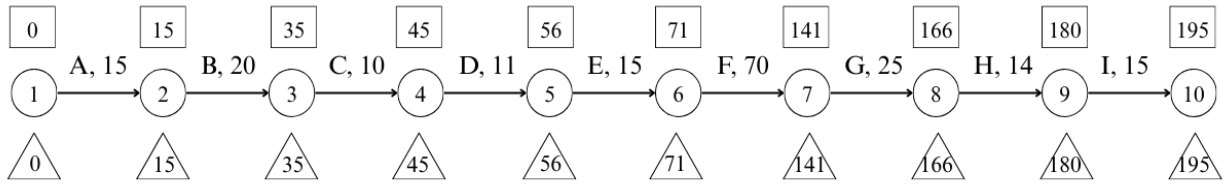


Figure VI-2 : Réseau P.E.R.T du projet.

Conclusion :

Dans ce chapitre, le devis quantitatif et estimatif ainsi que l'organisation du chantier pour l'aménagement de l'oued Merzoug ont été présentés. L'étude vise à assurer des conditions optimales de sécurité, tout en maîtrisant les délais, les coûts et la qualité d'exécution. Le projet est évalué à un montant total de 53,143,270 DA pour une durée d'exécution prévue de 195 jours.

Chapitre VII : Protection et sécurité de travail

Introduction :

Chaque année, environ 2,78 millions de travailleurs perdent la vie à la suite d'accidents ou de maladies professionnelles, tandis que près de 374 millions subissent des blessures (OIT, 2021). Ces accidents touchent particulièrement les travailleurs temporaires et précaires, plus exposés aux risques (MEN, 2022). Ils résultent le plus souvent de défaillances dans les systèmes de prévention, telles qu'une législation insuffisante ou un contrôle réglementaire limité. Pour y remédier, une collaboration étroite entre employeurs et employés est essentielle, à travers des programmes intégrant la médecine du travail, la sécurité des machines et la gestion des risques. Une telle approche permet non seulement de réduire la fréquence des accidents, mais aussi de protéger les responsables de chantiers face aux manquements aux normes de sécurité.

VII.1 Origines des accidents sur les chantiers de construction :

L'analyse des accidents du travail constitue une étape essentielle dans la démarche de prévention. Elle vise à identifier les causes de l'accident et à définir des mesures correctives appropriées afin d'éviter qu'il ne se reproduise.

VII.1.1 Facteurs liés aux équipements :

Les causes d'accidents d'origine matérielle sont regroupées sous le facteur « équipements ». Celui-ci concerne l'ensemble des conditions dangereuses susceptibles d'évoluer au cours du travail. Elles peuvent être liées :

- À la profession et au poste occupé,
- À la nature et aux caractéristiques des matériaux utilisés,
- Aux outils et aux machines, notamment leur implantation et leur entretien,
- Aux conditions d'exécution du travail, telles que l'éclairage ou les variations climatiques,
- Ainsi qu'aux dispositifs d'hygiène et de sécurité, incluant la ventilation et les équipements de protection.

VII.1.2 Facteurs humains :

Contrairement aux conditions matérielles, les comportements à risque relèvent du facteur humain. Ils sont plus difficiles à anticiper, car ils dépendent des réactions individuelles propres à chaque travailleur. Ces comportements peuvent être influencés par des aspects psychologiques et

émotionnels variables d'une personne à l'autre, nécessitant parfois l'intervention de spécialistes pour mieux les comprendre et les prévenir.

VII.2 Mesures de prévention des accidents du travail :

L'employeur, conformément au Code du travail, a l'obligation de mettre en place des mesures de prévention adaptées. Celles-ci comprennent la mise en œuvre de dispositifs visant à éliminer ou réduire les dangers liés au travail, l'organisation d'actions d'information et de formation pour les employés, ainsi que la mobilisation de ressources matérielles et humaines suffisantes. Ces mesures doivent être ajustées en fonction de l'évolution de l'entreprise. En cas de manquement, la responsabilité civile ou pénale de l'employeur peut être engagée.

Les neuf principes fondamentaux de prévention peuvent être résumés comme suit :

- Éviter les risques en supprimant les dangers ou en limitant l'exposition des travailleurs.
- Évaluer les risques afin d'en mesurer la gravité et d'adopter les mesures adaptées.
- Traiter les risques à la source, en intégrant la prévention dès la conception des postes, équipements et procédés de travail.
- Adapter les tâches aux capacités et caractéristiques individuelles des travailleurs pour préserver leur santé.
- Mettre à jour en permanence les dispositifs de prévention en fonction des avancées technologiques et organisationnelles.
- Remplacer les procédés ou produits dangereux par des alternatives moins nocives ou sans danger.
- Adopter une approche globale intégrant les dimensions techniques, sociales, environnementales et organisationnelles.
- Privilégier les protections collectives par rapport aux protections individuelles, plus efficaces à long terme.
- Informer et former régulièrement les salariés, dès leur intégration, afin de développer une véritable culture de la sécurité au travail.

VII.3 Les dispositifs de protection :

VII.3.1 Protection individuelle :

Le port d'équipements de protection individuelle constitue une mesure de prévention fondamentale, permettant de réduire considérablement les risques d'accidents susceptibles d'affecter différentes parties du corps telles que la tête, les mains, les pieds ou encore les yeux.

- **Protection des yeux :**

  Les principaux risques concernent les projections de particules métalliques, la poussière, les projectiles ou encore certains rayonnements. Pour y faire face, différents équipements de protection peuvent être utilisés, tels que les lunettes de sécurité, les masques de soudage, les écrans faciaux ou les visières de protection.



Figure VII-1 : Équipements de protection individuelle des pieds. (Source : SETON et Gaston MILLE)

- **Protection de la tête et du cou :**

  Les risques incluent les chutes d'objets, les chocs, les coupures ou encore l'exposition au soleil et aux produits chimiques. Pour limiter ces dangers, on utilise des casques de sécurité, des casquettes anti-heurt, ainsi que des cagoules ou écrans adaptés selon la nature du travail.

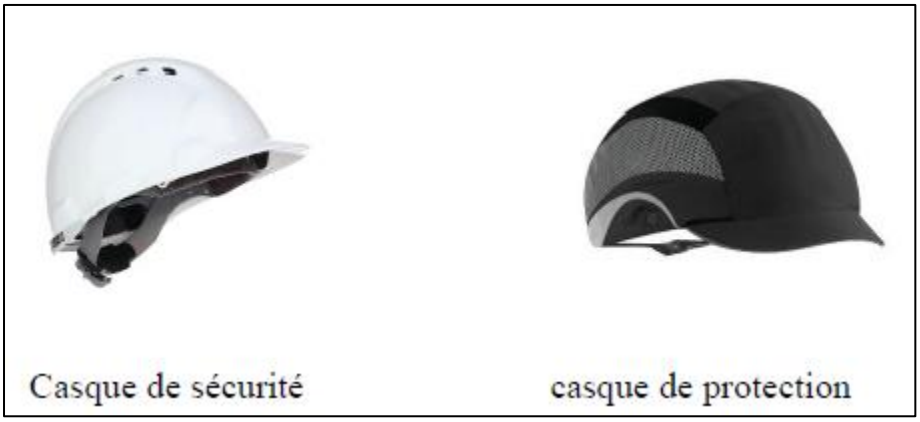


Figure VII-2 : Équipements de protection individuelle de la tête et le cou. (Source : SETON et Hansler Smith)

- **Protection des oreilles :**

  Les travailleurs peuvent être exposés à des niveaux sonores élevés susceptibles de provoquer des lésions auditives. Les protections adaptées comprennent les bouchons d'oreilles, les casques antibruit et les arceaux acoustiques.

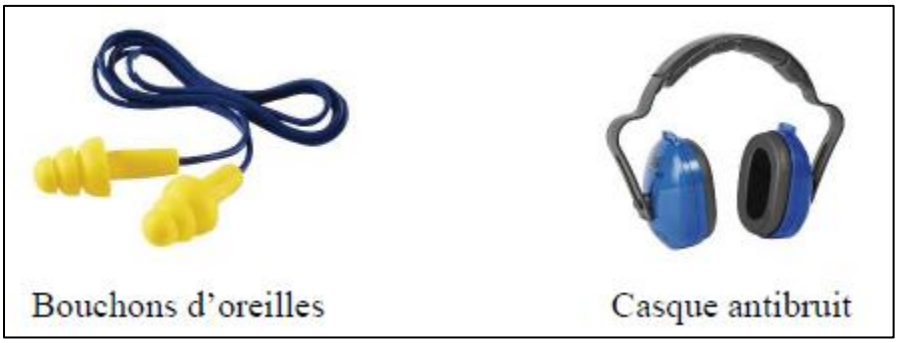


Figure VII-3 : Les protections auditives, (Source : SETON et Cotral)

- **Protection des mains et des bras :**

  Les dangers principaux sont les coupures, brûlures, perforations, produits chimiques ou encore les risques mécaniques liés aux machines. Les gants de protection (anti-coupures, anti-chaleur, isolants électriques, etc.) et les manchettes constituent les équipements adaptés.

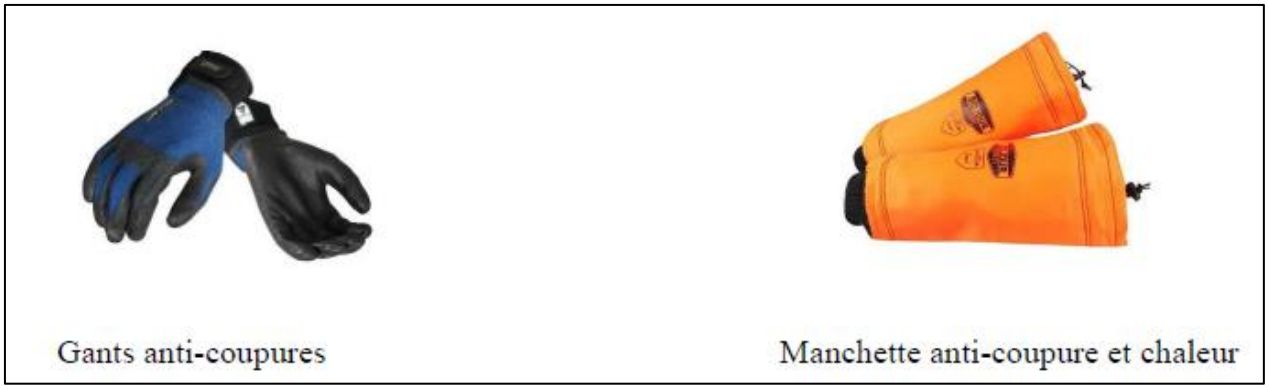


Figure VII-4 : Équipements de protection individuelle des mains et bras. (Source : SETON)

- **Protection des pieds et des jambes :**

  Les risques comprennent les chutes d'objets lourds, les écrasements, perforations, glissades ou projections de produits chimiques. Les équipements recommandés sont les chaussures de sécurité à embout renforcé, les bottes anti-perforation, ainsi que les guêtres de protection.



Figure VII-5 : Équipements de protection individuelle des pieds, (Source : SETON et Gaston MILLE)

- **Protection des poumons :**

  L'inhalation de poussières, fumées, gaz ou vapeurs toxiques constitue le principal danger. Pour s'en protéger, on utilise des masques filtrants, des demi-masques, des masques complets ou encore des appareils respiratoires isolants en fonction du niveau de risque.



Figure VII-6 : Equipements de protection respiratoire. (Source : Amazon et 3 M)

- **Protection de l'ensemble du corps :**

  Certains environnements de travail présentent des risques généralisés : chaleur, froid extrême, produits chimiques, flammes ou rayonnements. Les équipements adaptés incluent les combinaisons de protection, les gilets pare-flammes, les vêtements haute visibilité, ainsi que les harnais de sécurité pour les travaux en hauteur.



Figure VII-7 : Equipements de protection corporelle.

VII.3.2 Ordre et organisation du chantier :

Le maintien de l'ordre sur un chantier constitue un élément essentiel pour garantir la sécurité. Cela implique de veiller à ce que les accès et les passages restent toujours dégagés et que les matériaux soient entreposés de façon adéquate, afin de réduire les risques d'accidents pour les travailleurs.

VII.3.3 Mesures de prévention contre les incendies :

La mise en place d'un dispositif efficace de protection contre les incendies est indispensable sur tout chantier. Il est essentiel de désigner un responsable chargé de la sécurité incendie et d'organiser un système clair de gestion et de communication en cas d'urgence. Parmi les mesures prioritaires figurent l'installation d'équipements adaptés avec un contrôle régulier des extincteurs, la définition de signaux d'alerte précis, ainsi que l'organisation périodique d'exercices d'évacuation et d'extinction. Les travaux de soudure doivent être confiés uniquement à des professionnels qualifiés. De plus, il est impératif d'assurer un stockage sécurisé des déchets inflammables, d'éloigner les matériaux combustibles des zones où des travaux par le feu sont effectués, et de garantir une transmission rapide des signaux d'alerte en cas d'incident.

VII.4 Travaux de terrassement :

Tout ouvrage repose sur le sol, ce qui rend indispensable une étude approfondie des terrains de fondation. Après la reconnaissance du site, l'implantation de l'ouvrage nécessite la réalisation de fouilles, de tranchées et d'excavations, désignées sous le terme de déblais. À l'inverse, les remblais consistent à combler des espaces vides à l'aide de terre ou d'autres matériaux appropriés.

VII.4.1 Risques spécifiques aux travaux de terrassement :

Les chantiers de terrassement présentent plusieurs dangers potentiels, parmi lesquels :

- La circulation intense des engins et machines de chantier.
- Les glissements ou instabilités de terrain.
- La rupture accidentelle de canalisations souterraines.
- L'utilisation d'explosifs lors de certaines opérations.
- Les chutes de matériaux ou de personnel au cours des excavations.
- Le risque de chute sur des zones planes ou en hauteur, aggravé par la présence de sols glissants ou encombrés.

- Le contact accidentel des engins avec des lignes électriques aériennes sous tension.
- Les blessures liées aux pièces en mouvement des machines ou à leur conduite.
- Les collisions entre véhicules, engins de chantier ou différentes machines.

VII.4.2 Mesures de prévention :

- **Machines et outils :**
  - Les machines doivent être utilisées et entretenues uniquement par du personnel qualifié ayant suivi une formation appropriée.
  - Toute opération de nettoyage ou d'entretien doit se faire après l'arrêt complet de la machine.
  - La charge maximale indiquée sur les équipements de levage doit toujours être respectée.
  - Après un impact ou une chute, un outil électrique portable ne doit pas être réutilisé avant d'avoir été inspecté par un technicien compétent.
  - L'utilisation d'outils électriques portatifs en extérieur est interdite par temps de pluie.
- **Installations électriques :**
  - L'installation, la modification, la réparation ou l'entretien des systèmes électriques doivent être réalisés uniquement par une personne qualifiée.
  - Lors de travaux à proximité de lignes aériennes ou de câbles souterrains, il est impératif de respecter les distances de sécurité.

- **Premiers secours :**
  - En cas de blessure, même légère (coupure, piqûre, etc.), prévenir immédiatement le chef de chantier.
  - Consulter rapidement un professionnel de santé afin d'éviter toute complication.
  - Utiliser la trousse de premiers secours mise à disposition sur le chantier.
  - En cas d'infection persistante malgré les soins, il est indispensable de consulter un médecin.

VII.5 Plan de sécurité spécifique aux travaux de réalisation :

Étant donné que les travaux de terrassement constituent une étape essentielle de la construction, un plan de sécurité spécifique a été établi pour encadrer les terrassements généraux, les ouvrages de soutènement ainsi que les fondations profondes.

Tableau VII-1 : Plan de sécurité au travail. (Sedrati, 2018)

Objectifs visés	**Mesures appropriées à envisager**
1) Prévenir les risques d'accident Par chutes, chutes et engins de terrassement.	Disposition concernant : • La réalisation du chantier de jour comme nuit. • Les zones interdites au public. • Les précautions particulières à prendre en cas de brouillard. • Réglementation de la circulation, signalisation interne aux chantiers, dépôts (panneaux, repérages,).
2) Limiter les risques d'incidents lors de l'approvisionnement du chantier. Assurer la stabilité, la consolidation et la reprise des éléments stockés.	Repérage des lignes électriques.
3) Prévenir les accidents lors de l'utilisation du matériel : De renversement des engins ; De l'éboulement des terrains.	-Disposition à prendre pour le guidage des camions et des engins notamment lors des manœuvres en marche arrière.
4) Eviter les heurtes entre les engins et renversement des engins.	- Interdiction de dépassement et de stationnement.
5) Assurer la stabilité à la conservation et la reprise aisée des éléments stockés.	- Définition des lieux de stockage des divers matériaux. - Moyens de calage de chargement et de déchargement.
6) Eliminer les surcharges en bordure des fouilles.	- Mode de stockage des déblais et leur mode de déchargement.
7) Prévenir les chutes des objets.	- Examen des câbles soumis à des sollicitations particulières
8) Prévenir des ruptures des organes de levage.	Disposition et consignes particulières concernant l'entretien des matériels, des installations, les engins et les véhicules.
9) Heurts des personnes par les outils.	Les travailleurs qui utilisent la pioche ou la pelle dans leurs activités doivent être tenus à une distance suffisant les uns des autres.

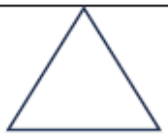
VII.6 Signalisation de sécurité :

La signalisation de sécurité a pour rôle d'avertir les travailleurs des dangers éventuels et d'indiquer les consignes à respecter. Elle se présente sous diverses formes, comme des panneaux, des codes de couleur, ou encore des signaux lumineux et sonores, adaptés à la nature du risque.

VII.6.1 Présentation des panneaux de signalisation :

La signification des signaux est définie en fonction de leur couleur et de leur forme, comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau VII-2 : Signification des couleurs de sécurité (Cartier & Sabater, 2004).

COULEUR FORME			
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.6.2 Principes d'une signalisation efficace :

Une signalisation de sécurité doit être claire et concise afin d'éviter toute ambiguïté. L'usage simultané de signaux lumineux ou sonores susceptibles de créer une confusion doit être proscrit. L'efficacité repose également sur le choix pertinent des couleurs, des symboles et du texte, ainsi que sur le positionnement adéquat et accessible des panneaux. Un entretien régulier et le remplacement des signalisations endommagées sont indispensables. Enfin, la formation des employés à la compréhension et à la reconnaissance des signaux de sécurité constitue une étape essentielle pour garantir leur efficacité.

VII.6.3 Implémentation de la signalisation sur le chantier :

La mise en place d'une signalisation adaptée est indispensable pour assurer la sécurité des travailleurs et prévenir les accidents.

- **Aux points d'accès :** obligation du port des équipements de protection individuelle (bottes, casque, gants) et interdiction d'entrée pour les personnes non autorisées.
- **Près des tableaux électriques :** signalisation du danger d'électrocution.
- **Dans les zones de stockage de produits inflammables :** interdiction de fumer ou d'utiliser des flammes nues.
- **Aux endroits exposés aux chutes d'objets :** avertissement du danger de chute.
- **Sur l'ensemble du chantier :** indication des moyens de lutte contre l'incendie, signalisation des voies et sorties de secours, ainsi que localisation claire des différentes installations.

Conclusion :

La prévention doit être envisagée non pas comme une simple mesure corrective, mais comme une démarche proactive fondée sur des principes défensifs. Grâce aux progrès techniques et scientifiques, elle tend aujourd'hui à devenir une action anticipative visant à éliminer les risques à leur source plutôt qu'à seulement les réduire. La sécurité doit être intégrée et adoptée par l'ensemble des acteurs du chantier — employés, ouvriers et responsables — afin d'éviter les accidents évitables et de garantir que la recherche de productivité ne se fasse jamais au détriment de la protection des personnes.

CONCLUSION GENERALE :

Cette étude a été réalisée dans le but de protéger la ville de Tipaza contre les inondations liées à une crue de période de retour centennale. Pour atteindre cet objectif, nous avons proposé l'aménagement de l'oued Merzoug afin d'accroître sa capacité d'évacuation du débit de pointe.

Dans un premier temps, les données topographiques, géologiques, démographiques et hydrauliques de la zone d'étude ont été analysées afin de représenter fidèlement le bassin versant. Les caractéristiques hydromorphométriques ont été étudiées à l'aide du logiciel ArcGIS, ce qui a permis de produire plusieurs types de cartes.

L'analyse des pluies maximales journalières, réalisée avec le logiciel HYFRON, a montré une intensité de 125,7 mm pour une période de retour centennale. Sur cette base, les pluies de courte durée ont été calculées et les courbes IDF établies.

Les débits de crue du bassin versant ont ensuite été déterminés à partir de formules empiriques et de la méthode SCS-CN intégrée au modèle hydrologique HEC-HMS. Les résultats ont indiqué un débit de pointe de 28,4 m^3/s pour l'oued Merzoug. Une simulation hydraulique, menée avec HEC-RAS, a permis de visualiser l'évolution des paramètres hydrauliques (hauteur d'eau, vitesse d'écoulement, régimes hydrauliques) sur les différentes sections étudiées. Cette simulation a également mis en évidence un risque élevé de débordement pour le débit centennal, confirmé par la carte des profondeurs obtenue.

Enfin, deux variantes d'aménagement ont été proposées pour le tronçon de l'oued traversant les zones habitées. Après une analyse technico-économique et écologique, la solution retenue consiste à aménager ce tronçon par un canal rectangulaire en béton armé, d'une largeur de 3 m au fond, d'une hauteur de 2 m et doté d'une revanche de 0,5 m, sur une longueur totale de 560 m. Le coût global du projet est estimé à 53 143 270 DA, avec un délai prévisionnel d'exécution de 195 jours.

Références bibliographiques :

- **ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques), 2018.** Études hydrogéologiques de la région de Tipaza. Disponible sur : http://www.anrh.dz
- **ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques), 2020.** Rapport hydrologique annuel – Wilaya de Tipaza.
- **APS, 2021.** Secousse de 4,5 degrés sur l'échelle de Richter dans la wilaya de Tipaza (31 juillet 2021). Algérie Presse Service. Disponible sur : https://www.aps.dz/regions/125520-secousse-de-4-5-degres-sur-l-echelle-de-richter-dans-la-wilaya-de-tipaza
- **APS, 2024.** Inondations à Tipasa : des décisions présidentielles illustrant la dimension solidaire de l'État. Disponible sur : https://www.aps.dz/societe/164809-inondations-a-tipasa-des-decisions-presidentielles-illustrant-la-dimension-solidaire-de-l-etat
- **APS, 2024.** Secousse tellurique de magnitude 4,0 ressentie dans la wilaya de Tipaza (10 décembre 2024). Algérie Presse Service. Disponible sur : https://www.aps.dz/algerie/179960
- **Ba, M., Derdous, O., & Bouanani, A. (2022).** Flood risk assessment in Mediterranean basins under climate variability: Case studies in North Africa. Natural Hazards, 114, 1597–1616. Disponible sur : https://doi.org/10.1007/s11069-022-05634-5
- **Bénina, Touaibia (2004).** Manuel pratique d'hydrologie. Alger : Presses Madani Frères. ISBN 978-9947-0-0367-1
- **Bouali, A. (2015).** Urbanisation et vulnérabilité aux risques naturels en zone littorale : cas de Tipaza. Revue Algérienne de Géographie et Aménagement du Territoire.
- **Bouaziz, A., Boudjemaa, D., & Hammadi, A. (2020).** Urbanisation et vulnérabilité aux inondations en Algérie : cas des zones semi-arides. Revue Nature & Technologie, B.
- **Chalumeau, B. (2001).** Le risque d'inondation : connaissance et prévention. Paris : Presses Universitaires de France.
- **Chocat, B. (1997).** Gestion intégrée des eaux pluviales urbaines. Techniques de l'Ingénieur.
- **CRAAG, 1989.** Rapports sur le séisme du 29 octobre 1989 (Djebel Chenoua, Tipaza). Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (CRAAG). Disponible sur : https://www.craag.dz/index.php/copie-reseau-sismologique/

- **CRAAG (Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique), 2020.** Rapports sur la sismicité en Algérie. Disponible sur : https://www.craag.dz
- **Cramer, W., Guiot, J., & Marini, K. (2018).** Climate change and Mediterranean ecosystems and societies. Science, 321(5890), 760–763. Disponible sur : https://doi.org/10.1126/science.1159199
- **D'Ercole, R., & Metzger, P. (2004).** La vulnérabilité : concept central pour une géographie du risque. Annales de Géographie, 113(640), 115-132.
- **Dubois-Maury, J. (2002).** Hydrologie et risques naturels. Paris : Ellipses.
- **Durozoy, G. (1956).** Esquisse géologique du Tell algérien. Bulletin du Service de la Carte Géologique de l'Algérie.
- **Earthquake List, 2025.** Liste des séismes enregistrés dans la région de Tipaza (2015–2025). Disponible sur : https://earthquakelist.org/algeria/tipaza/
- **El Watan (2006).** Des dégâts dans plusieurs wilayas. Disponible sur : https://www.djazairess.com/fr/elwatan/41887
- **Esri (2012).** ArcGIS Hydrology Toolset and Arc Hydro for surface-water modelling.
- **Folmar et al. (2007).** Multiple-methods investigation of recharge at a humid-region fractured rock site, Pennsylvania, USA. Disponible sur : https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-006-0149-6
- **Gilard, O. (1995).** Méthode Inondabilité : Comprendre pour mieux aménager. In Ingénieries – EAT, Spécial Risques Naturels.
- **Gilbert, C. (2006).** La vulnérabilité : une nouvelle approche des risques. CNRS Éditions.
- **GIEC. (2012).** Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation.
- **GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), 2021.** Rapport d'évaluation AR6.
- **Griot, C., & Ayral, P.-A. (2001).** Cours sur les risques naturels, Université Montpellier II.
- **Guettouche, M.S. (2012).** Les inondations en Algérie : état des lieux et gestion du risque. Revue des risques majeurs.
- **Haziza, M. (2007).** Gestion de crise et planification d'urgence. Dunod.
- **Ingénieries – EAT. (1995).** Numéro spécial : Risques naturels. Ministère de l'Environnement – France.

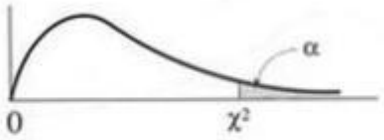
- **IPCC (2019).** Special Report on Climate Change and Land. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible sur : https://www.ipcc.ch/srccl/
- **Lagadec, P. (2004).** La gestion des crises. Éditions d'Organisation.
- **Le Lay, Y. F., & Piégay, H. (2007).** Geomorphologie fluviale et gestion des cours d'eau. Editions Quae.
- **Madi, A., Boucenna, A., & Kherici, N.** (2023). Analyse du risque d'inondation en zone urbaine en Algérie. Revue des Sciences de l'Eau, 36(1), 45-58.
- **MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement), 2018.** Rapport sur l'occupation des sols et l'urbanisation en Algérie.
- **MEDD (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie). (2011**). La gestion du risque inondation.
- **MEN. (2022).** Document de synthèse : Informations générales pour l'examen des instruments relatifs aux accidents du travail et aux maladies professionnelles (Mécanisme d'examen des normes ; p. 13). Disponible sur : https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_norm/---normes/documents/genericdocument/wcms_852784.pdf
- **MTECT, MEDD, 2004**. Les risques majeurs, guide général, 63 p. Traitements : SDES, 2021.
- **Office National des Statistiques (ONS).** Statistiques communales, Wilaya de Tipaza, 2021.
- **OIT. (2021).** Améliorer la sécurité et la santé au travail dans les petites et moyennes entreprises [manuel du participant]. 84. Disponible sur : https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_dialogue/---lab_admin/documents/publication/wcms_792225.pdf
- **Propeck-Zimmermann, E., Dubois-Maury, J., & D'Ercole, R. (2009).** Risque et société. Armand Colin.
- **Radio Algérie, 2020.** Séisme de magnitude 4,2 enregistré à Sidi-Ghiles, Tipaza. Disponible sur : https://radioalgerie.dz/news/fr/article/20200829/198464.html
- **Roux, H. (2004).** Estimation de paramètres en hydraulique fluviale, à partir de données caractéristiques de l'imagerie aérienne [PhD Thesis, Institut National Polytechnique (Toulouse)]. Disponible sur https://ut3-toulouseinp.hal.science/tel-04603938/

- **Salagnac, J.-L., & Garbolino, E. (2015).** La gestion des risques naturels. Paris : Lavoisier.
- **Shah, A. A., et al. (2017).** Urban Flood Risk and Climate Change: A Review.
- **Shah, A. A., et al. (2019).** Disaster Risk in Developing Countries: Causes, Consequences, and Adaptation Strategies.
- **Touaibia, Bénina. (2015).** Manuel pratique d'hydrologie (2ème Edition). Disponible sur : http://www.hec.usace.army.mil/software/
- **TSA (2021).** Inondations en Algérie : le prix de l'incurie et de l'incivisme. Disponible sur : https://www.tsa-algerie.dz/inondations-en-algerie-le-prix-de-lincurie-et-de-lincivisme
- **Veyret, Y., & Reghezza, M. (2005).** Risques et catastrophes naturels. Armand Colin.
- **Vila, J.M. (1980).** La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse de Doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- **Weather Spark – Données météo pour Tipaza (vitesse et direction du vent).** Disponible sur : https://fr.weatherspark.com/y/47087/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Tipaza-Alg%C3%A9rie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e

Annexes :

Annexe n° 01 : Tableau des valeurs de χ^2.

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



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

Annexe n° 02 : Coefficient de rugosité de Manning.

Valeurs du coefficient n de Manning

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