جمهورية 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"

ⵓⵢⵙⵔⵙ ⵓⵢⵙⵏⵍⵓ ⵉⵎⵉⵙⵙ ⵏ ⵜⵎⵙⵓⵍⵉⵜ

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option:CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUES

THEME :

PROTECTION DE COMMUNE DE KHALOUIA WILAYA DE MASCARA CONTRE INNONDATION

Présenté par :
Kaidomar Mohamed Osmane

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
Hadj Sadok Ahmed	Professeur	Président
Zaibak Issam	M.C.B	Examinateur
Bouziane Mamaar	M.A.A	Examinateur
Bensalah Mohamed Draidi	M.C.B	Promoteur

Session-2025

Dédicace

De la plus profonde des affections qui puissent émaner de mon être, je dédie ce travail, fruit de mes efforts et de ma détermination, en un vibrant témoignage d'amour filial, de respect inconditionnel et d'une gratitude sans borne.

À toi, mon cher père défunt Hacene , qui n'es plus de ce monde mais dont la présence bienveillante et les enseignements précieux m'ont accompagné jusqu'ici. C'est grâce à ton amour, ta sagesse et ton soutien indéfectible que j'ai pu surmonter les obstacles et poursuivre mes études avec ardeur. Bien que tu ne sois plus là pour partager ce moment avec moi, sache que ton souvenir reste gravé dans mon cœur et que je continuerai à honorer ta mémoire en suivant la voie que tu m'as tracée. Puisse Dieu t'accueillir en Son Paradis et te combler de Ses grâces éternelles.

À toi, ma chère mère, qui as su me réconforter dans les moments de doute et m'encourager sans relâche, je dis merci du fond du cœur. Ton amour inconditionnel et ta force m'ont été d'un soutien inestimable. Que ce travail soit un témoignage de ma profonde gratitude et de mon respect éternel.

À toi, mon frère Kader et mes sœurs, qui avez toujours été là pour moi, merci pour votre affection et votre soutien indéfectible. Que cette réussite soit aussi la vôtre.

À toi, ma très chère amie Ouissal , qui as su m'épauler et m'encourager dans les moments les plus difficiles, je dédie ce travail en signe de notre amitié indéfectible. Votre présence à mes côtés a été un véritable réconfort.

À vous mes amis qui m'ont apporté leur aide et leur soutien, en particulier à, qui m'a accompagné tout au long de ce parcours et m'a conseillé avec bonté et discernement, Omar, Illyés, alaa , amine , dahmen , Hakim et hamza .

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin sans oublier notre cher encadrant MR Draidi Bensalah

Que Dieu vous bénisse et vous accorde santé, bonheur et longue vie et que ce modeste travail soit un témoignage de mon affection et de mon respect pour tous ceux qui m'ont accompagné sur ce chemin.

SOMMAIRE

Chapitre I : Présentation de la zone d'études

Introduction 1

I.1 Présentation de la zone études : 1

I.2 Climatologie 2

I.2.1 Températures 3

I.2.2 Vent 4

I.2.3 Les précipitations 5

Conclusion 6

Chapitre II : Etude hydrologique

Introduction 8

II.1.1 Caractéristiques principales du bassin versant : 9

II.1.2 Le relief : 12

II.1.3 Etude du réseau hydrographique 22

II.2.1 La série d'observation de la station hydrométrique 31

II.2.2 Estimation des débits maximums fréquentiels à l'aide de la méthode GRADEX : 39

II.2.4 Choix de la crue du projet : 50

Conclusion 51

Chapitre III : Diagnostic et modélisation du cours d'eau

Introduction 53

Généralités 53

III.1 Rappel de quelques notions : 54

III.1.1 Paramètres Hydraulique : 54

III.1.2 Paramètres géométriques 55

III.2 Type d'écoulement 57

III.2.1 Variable dans le temps 57

III.2.2 Variabilité dans l'espace : 58

III.3 Régime d'écoulement : 59

III.4.2 Les canaux artificiels 61

III.5. Diagnostique et modélisation du cours d'eau non Aménagé : 62

III.5.1 Modélisation de l'écoulement : 62

III.5.2 Application d'HEC-RAS sur Oued Rihane 64
III.6 La cartographie du risque d'inondation : 74
III.6.1 Carte des profondeurs : ..... **Erreur ! Signet non défini.**
III.6.2 Carte des vitesses ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Conclusion : 78

Chapitre IV : Études des variantes d'aménagement

Introduction : 80
IV.1 Les divers types d'aménagements : 80
IV.1.1 Protection contre les crues : 80
IV.1.2 Protection contre l'érosion : 82
IV.2 Calcul hydraulique des canaux : 83
IV.2.1 Ecoulement uniforme dans les canaux à ciel ouvert : 83
IV.2.2 Les formules générale de l'écoulement : 84
IV.3 Étude de Variantes 90
IV.3.1 Canal en béton 91
IV.3.2 Les Sections en travers 94
IV.3.2 Canal en enrochement 98
IV.3.3 Canal en gabion : 106
IV.3.4 Proposition 112
Conclusion 112

Chapitre V : Organisation de chantier

Introduction 115
V.1 Généralité 115
V.1.1 Rôles et responsabilités des participants au chantier 115
V.2 Devis quantitatif et estimatif du projet 118
V.3 Généralité sur les plannings 119
V.3.1 Définition de planification des travaux 119
V.3.2 Plannings généraux de gestion de l'entreprise 119
V.3.3 Phases de planification 120
V.3.4 Planification des travaux 121
V.3.6 Différentes méthodes basées sur le réseau 123
V.3.7 Méthode de calcul PERT 124
V.3.8 Méthodes basées sur le graphique 125

V.3.9 Méthode de calcul PERT 125
V.3.10 Diagramme de Gantt 127
Conclusion 131
Conclusion générale 131

Liste des tableaux

Chapitre I : Présentation de la zone d'études.

Tableau I.1 : Températures mensuelles minimales, moyennes et maximales enregistrées à la station choisie en (°C) (1996 / 2022). (Source : ONM).

Tableau I.2 Moyennes mensuelles de la vitesse du vent à la station meterologique d'Oued Maoussa (km/h) (1996/2022).

Tableau I.3 Répartition des pluies mensuelles interannuelles de la station pluviométrique 111401

Chapitre II : Etude hydrologique.

Tableau II.1 : Les paramètres hydro morpho métriques du bassin versant d'Oued Maoussa.

Tableau II.2 : Paramètres Hypsométriques du bassin versant d'Oued Maoussa.

Tableau II.3 : caractéristiques altimétriques du bassin versant d'Oued Maoussa

Tableau II.4 : Pente moyenne (Im) du bassin versant d'Oued Maoussa

Tableau II.5 : Classification O.R.S.T.O.M du relief à partir l'indice de pente global.

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

Tableau II.7 : Résultats des calculs des pentes et du dénivelé spécifique du bassin versant de l'Oued Maoussa

Tableau II.8: Résultats de calculs de temps de concentration.

Tableau II.9: Résultats de calculs de temps de concentration.

Tableau II.10: Paramètres hydrographiques d'Oued Maoussa

Tableau II.11: Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued Maoussa

Tableau II.12: Caractéristique de la station hydrométrique « Ghriss » (Source : ANRH).

Tableau II.13: Caractéristiques dès les station Pluviométrique (Source : ANRH).

Tableau II.14: Série des débits maximales annuels prise de la station 111412 (Source : ANRH).

Tableau II.15: modèles fréquentiels et leurs validités.

Tableau II.16: Résultats d'ajustement à la loi de Gumbel.

Tableau II.17: Comparaison des caractéristiques entre la loi de GUMBEL et l'échantillon.

Tableau II.18: Résultats d'ajustement à la loi de Log normal.

Tableau II.19: Comparaison des caractéristiques de la loi de Log normal et de l'échantillon.

Tableau II.20 : Résultats du test de $\chi 2$.

Tableau II.21: Caractéristique des stations pluviométriques (Source : ANRH).

Tableau II.22: Précipitations maximales journalières de la station pluviométrique de la station de Maoussa 111401 (Source : ANRH).

Tableau II.23: Résultats d'ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de la station de Maoussa 111401

Tableau II.24: : Résultat de calcul pour la station de Maoussa pour les différentes périodes de retour.

Tableau II.25: Résultats de l'ajustement des stations prises.

Tableau II.26: Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue "δ".

Tableau II.27: Paramètres de calcul de l'hydrogramme de crue

Tableau II.28: Valeurs du débits centennales en fonction du temps pour la zone d'étude

Chapitre III : Diagnostic et modélisation du cours d'eau.

Tableau III.1 Principaux éléments hydrauliques pour toutes les stations (Source : Logiciel HEC-RAS)

Chapitre IV : Études des variantes d'aménagement.

Tableau IV.1 : Présente les valeurs pour six types de parois.

Tableau IV.2 : Valeurs du coefficient de rugosité (Chen et Cotton, 1986)

Tableau IV.3 : Revanches utilisées (Degoutte, 2012).

Tableau IV.4 : Les limites de la vitesse d'érosion pour les lits.

Tableau IV.5: Dimensions de l'aménagement en béton armé pour le tronçon amont de l'Oued Maoussa

Tableau IV.6 : Dimensions de l'aménagement en béton armé pour le tronçon aval de l'Oued Maoussa

Tableau IV.7 : Résultats de la simulation de l'écoulement pour le canal en béton de l'Oued Maoussa (Source : HEC-RAS).

Tableau IV.8 : Devis pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé en amont de l'Oued Maoussa.

Tableau IV.9 : Devis pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé du tronçon intermédiaire de l'Oued Maoussa.

Tableau IV.10 : Devis pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé en aval de l'Oued Maoussa .

Tableau IV.11 : Devis total pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé de l'Oued Maoussa

Tableau IV.12 Dimensions de l'aménagement en enrochement pour le tronçon amont de l'Oued Maoussa.

Tableau IV.13 Dimensions de l'aménagement en enrochement pour le tronçon aval de l'Oued Maoussa

Tableau IV.14 : Résultats de la simulation de l'écoulement pour le canal en enrochement de l'oued Maoussa (Source : HEC-RAS)

Tableau IV.15 Calcul Les Sections d'enrochement.

Tableau IV.16 Calcul Volumes d'enrochement.

Tableau IV.17 Sections du géotextile.

Tableau IV.18 Estimation pour la variante du canal en enrochement de l'oued Maoussa

Tableau IV.19 Dimensions de canal de l'aménagement en gabion de l'Oued Maoussa (Amont).

Tableau IV.20 Résultats des calculs du nombre de caisses nécessaires pour le canal en gabions en amont de l'oued Maoussa

Tableau V.21 Dimensions de canal de l'aménagement en gabion de l'Oued Maoussa (Aval).

Tableau IV.22 Résultats des calculs du nombre de caisses nécessaires pour le canal en gabions en aval de l'oued Maoussa.

Tableau IV.23 Résultats de la simulation de l'écoulement dans un canal en gabions de l'Oued Maoussa (Source : HEC-RAS).

Tableau IV.24 Devis de la variante canal en gabion en amont d'oued Maoussa.

Tableau IV.25 Devis de la variante canal en gabion en aval d'oued Maoussa

Tableau IV.26 Devis de la variante canal en gabion Totale d'oued Maoussa

Tableau IV.27 Les critères de choix de la variante adéquate pour l'aménagement de l'oued Maoussa

Chapitre V : Organisation de chantier.

Tableau V.1 Devis global pour la variante du canal trapézoïdal en gabion pour l'oued Maoussa.

Tableau V.2 Liste des opérations et leurs durées pour la construction d'un canal en Gabion.

List des figures

Chapitre I : Présentation de la zone d'études

Chapitre I : Présentation de la zone d'études

Figure I-1 : Presentation de la commune de Maoussa

Figure I.2 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à la station choisie (1996-2022).

Figure I.3 Distribution des vitesses du vent en m/s (1996-2022).

Figure I.4 Evolution de la pluviométrie mensuelle interannuelles

Chapitre III : Etude hydrologique

Figure II.1 : Différents types des BV selon le coefficient de Gravelius K_G.

Figure II.2 : Carte hypsométrique de bassin versant d'Oued Maoussa.

Figure II.3 : Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Maoussa .

Figure II.4 : Carte des pentes du bassin versant d'Oued Maoussa.

Figure II.5 : Carte des courbes des niveaux du bassin versant d'Oued Maoussa **Figure**

II.6 : Graphique d'ajustement à la loi de Gumbel de la station 111412

Figure II.7 : Graphique d'ajustement à la loi de Log normal de la station 111412

Figure II.8 : Comparaison entre les deux lois d'ajustement de la station 111412

Figure II.9: Hydrogramme de crue pour période de retour 100 ans pour les différentes stations.

Figure II.10 : Hydrogramme de crue du projet pour la station pluviométrique Maoussa 111401

Chapitre III : Diagnostic et modélisation du cours d'eau.

Figure III.1 : Schéma représente la dimensionnalité et directionnalisé de l'écoulement (Source : Roland O. YONABA - 2015).

Figure III.2 : Schéma représente la pente.

Figure III.3 : Coupe transversale d'un canal naturel.

Figure III.4 : Écoulement permanent.

Figure III.5 : Écoulement non permanent.

Figure III.6 : Diagramme représentant les divers types d'écoulements.

Figure III.7: Diagramme illustrant les divers types de régimes d'écoulement.

Figure III.8 : Cours d'eau dans son environnement (Source : Dr Habibi Brahim - 2013)

Figure III.9 : Canaux artificiels (Source : TOUMI Abdelouaheb - 2016).

Figure III.10 : Interface utilisateur du logiciel HEC-RAS (version 6.5).

Figure III.11 : Insertion fichier de projection.

Figure III.12 : Insertion des données du terrain.

Figure III.13 Définition du tracé de l'oued Maoussa et des sections en travers de l'oued.

Figure III.14 Introduction des données hydrauliques d'Oued Maoussa.

Figure III.15 Définition des conditions aux limites.

Figure III.16 Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued Maoussa

Figure III.17 : Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued Maoussa.

Figure III.18 : Réseau des profondeurs d'eau pour une crue centennale.

Figure III.19 : Carte de vitesse d'eau pour la période de retour 100 ans.

Chapitre IV : Études des variantes d'aménagement.

Figure IV.1 : Écoulement uniforme entre les extrémités.

Figure IV.2 : Éléments géométriques pour différentes sections de canaux ouverts

Figure IV.3 : Présentation des tronçons et localisation de la zone d'étude

Figure IV.4 : Canal en béton armé de forme trapézoïdale.

Figure IV.5 : Dimensions de l'aménagement en béton armé pour le tronçon amont de l'Oued Maoussa

Figure V.6 : Dimensions de l'aménagement en béton armé pour le tronçon aval de l'Oued Maoussa

Figure IV.7 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon Amont d'oued Maoussa (station 1882).

Figure IV.8 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon En milieu d'oued Maoussa (station 872).

Figure IV.09 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon aval d'oued Maoussa (station 1882).

Figure IV.10 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon aval d'oued Maoussa (station 872).

Figure IV.11 Les éléments constructifs d'un canal en enrochement.

Figure IV.12 Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement cote amont d'oued Maoussa

Figure IV.13 Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement en aval d'oued Maoussa .

Figure IV.14 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue de 100 ans sur le tronçon Amont d'oued Maoussa (station 1882).

Figure IV.15: Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon du milieu d'oued Maoussa (station 872).

Figure IV.16 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon aval d'oued Maoussa (station 64).

Figure IV.17: Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon aval d'oued Maoussa (station 15).

Figure IV.18 : Section d'un canal en enrochement.

Figure IV.19 Cage de gabion.

Figure IV.20 Schéma de canal en gabion

Figure IV.21 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon d'oued amont Maoussa (station 1882)

Figure IV.22 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon amont d'oued Maoussa (station 872).

Figure IV.23 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon du milieu d'oued Maoussa (station 64).

Chapitre V : Organisation de chantier.

Figure V.1 Diagramme illustratif de la méthode PERT.

Figure V.2 Réseau de planification des taches par la méthode CPM.

Figure V.3 Chronogramme du Projet pour la Variante de Gabionnage avec le Logiciel Gantt Project.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير نظام متكامل لإدارة وادي ماوسا، الذي يمر عبر بلدية خلوية , مدينة معسكر، لضمان تدفق آمن لمياه الفيضانات وحماية الموارد المحلية. بدأنا بوصف خصائص منطقة الدراسة، تلتها تحليل شامل للجوانب المورفولوجية والهيدرولوجية لحوض التصريف. قمنا بحساب التدفق الأقصى وأجرينا محاكاة هيدروليكية باستخدام برمجيات HEC-RAS و ArcGISلتحديد المناطق المعرضة للفيضانات على طول الوادي، الذي يمتد على حوالي 5 كيلومترات في المدينة. بعد تقييم عدة خيارات للحماية، قررنا بناء قناة من الحجارة الشبكية، والتي تعتبر الحل الأكثر ملاءمة من الناحيتين الفنية والاقتصادية. تضمن هذه المقاربة الاستباقية الأمان والاستدامة، مما يسهم في إدارة فعالة لمخاطر الفيضانات

Résumé

Cette recherche a pour objectif de développer un système intégré pour la gestion de l'Oued Maoussa, qui traverse la commune de Khalouia , ville de Mascara, afin d'assurer un écoulement sécurisé des eaux de crue et de protéger les ressources locales. Nous avons commencé par décrire les caractéristiques de la zone d'étude, suivies d'une analyse approfondie des aspects morphologiques et hydrologiques du bassin versant. Nous avons calculé le débit maximal et réalisé des simulations hydrauliques à l'aide des logiciels HEC-RAS et ArcGIS pour identifier les zones vulnérables aux inondations le long de l'oued, qui s'étend sur environ 5 kilomètres dans la ville. Après avoir évalué plusieurs options de protection, nous avons décidé de construire un canal en gabions, considéré comme la solution la plus adaptée tant sur le plan technique qu'économique. Cette approche proactive garantit sécurité et durabilité, contribuant ainsi à une gestion efficace des risques d'inondation

Abstract

This study aims to develop an integrated system for the management of the Oued Maoussa, which flows through the Khalouia commune in the city of Mascara, to ensure safe drainage of floodwaters and protect local resources. We began by describing the characteristics of the study area, followed by a comprehensive analysis of the morphological and hydrological aspects of the watershed. We calculated the maximum flow rate and conducted hydraulic simulations using HEC-RAS and ArcGIS software to identify flood-prone areas along the river, which extends approximately 5 kilometers through the city. After evaluating several protection options, we decided to construct a gabion channel, considered the most suitable solution from both technical and economic perspectives. This proactive approach ensures safety and sustainability, contributing to effective flood risk management.

Introduction générale

Les inondations, qui figurent parmi les risques naturels les plus dévastateurs au niveau mondial, ont été responsables de plus de 80 % des catastrophes naturelles recensées entre 1995 et 2005, selon l'Institut international de l'eau de Stockholm. Elles provoquent environ 500 000 décès par an et entraînent des destructions massives d'infrastructures (Bachi, 2011). En Algérie, ce risque est classé parmi les dix principaux risques majeurs selon la loi n° 04-20 du 25 décembre 2004, relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes (J.O.R.A., 2004). Il occupe la deuxième position, juste après les séismes, en raison de l'ampleur considérable des dommages qu'il engendre. La région méditerranéenne, où se situe l'Algérie, est particulièrement sensible aux manifestations climatiques extrêmes telles que les inondations, les sécheresses et les incendies de forêts. Le changement climatique, principalement attribuable aux activités humaines, a accentué l'imprévisibilité des conditions météorologiques. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) classe cette région parmi les 24 « zones à risque élevé » les plus vulnérables aux changements climatiques. Cette vulnérabilité est exacerbée dans les zones du nord, caractérisées par un climat semi-aride à aride. Des régions telles que Mascara en sont des exemples notables, en raison de leurs conditions topographiques défavorables et d'une infrastructure d'assainissement insuffisante (Zeroual et al., 2019 ; Llasat et al., 2010).

Les inondations entraînent non seulement des dégâts matériels importants, mais elles mettent également en péril la confiance des populations dans la sécurité de leurs conditions de vie. Elles révèlent les limites des sociétés modernes, qui, malgré les avancées techniques, peinent parfois à maîtriser ces risques. Cette perte de confiance souligne la nécessité impérieuse d'implémenter des mesures efficaces pour atténuer les risques d'inondation et garantir la sécurité des communautés. Pour faire face aux défis des inondations et des risques climatiques, l'Algérie a mis en place des initiatives visant à protéger ses infrastructures et ses populations. La gestion de l'eau est essentielle, englobant l'utilisation, la pénurie et les inondations. Il est crucial d'évaluer les impacts du changement climatique pour développer des stratégies d'adaptation efficaces. Anticiper les effets futurs permet de mieux préparer et protéger les territoires vulnérables. Les décideurs doivent être équipés d'outils pour gérer les crises de manière proactive. Bien que les précipitations ne puissent être contrôlées, les risques peuvent être atténués grâce aux prévisions en temps réel et à l'évaluation des paramètres hydrologiques, tels que le débit des crues *(Javelle, 2001).*

La région de Mascara , située dans l'ouest de l'Algérie, est particulièrement vulnérable aux catastrophes naturelles telles que les inondations. L'oued Maoussa , qui traverse le centre de la ville, est l'un des cours d'eau les plus redoutables de la région en raison de ses crues importantes. En effet, il la divise en deux parties distinctes, traversant à la fois des zones vitales et des quartiers résidentiels, ce qui impacte profondément les principales zones urbaines de la ville. En 2019, la population de la wilaya de Mascara a connu une augmentation notable de 10 973 habitants, atteignant un total de 1 459 000 personnes. Exactement 25 000 personnes a Khalouia particulièrement du côté de l'oued .En cas de fortes précipitations et d'inondations, les conséquences peuvent être désastreuses, entraînant des dommages significatifs aux

infrastructures de la ville, y compris aux équipements et aux bâtiments, ainsi que des pertes humaines.

Pour atténuer ces impacts et protéger les infrastructures ainsi que les zones résidentielles, il est impératif de mettre en place un aménagement spécifique le long de l'oued. Cet aménagement doit non seulement assurer la sécurité des habitants et de leurs biens contre les crues exceptionnelles, mais aussi être économiquement viable. L'objectif est de concevoir des solutions qui minimisent les coûts tout en offrant une protection efficace, afin de gérer durablement les risques d'inondation et garantir la résilience de la ville face à de futurs événements climatiques. L'objectif principal de ce travail est de déterminer la crue de projet. Pour ce faire, l'étude et l'aménagement du cours d'eau ont nécessité l'utilisation du logiciel HECRAS, qui permet de simuler les inondations sur des périodes de retour de 25, 50 et 100 ans *(Yahyaoui, 2012).* Nous ne pouvons pas maîtriser les aléas climatiques comme les crues, mais comment anticiper efficacement ces risques et quelles stratégies d'aménagement du territoire peuvent renforcer la résilience face aux inondations ?

Le mémoire se concentre sur la conception d'un système de protection pour la ville Mascara Khalouia , les inondations de l'oued Maoussa , notamment lors de crues centennales. L'objectif est de proposer des solutions d'aménagement efficaces tout en préservant l'environnement. Le travail inclut l'estimation des débits de crue, l'identification des zones inondables, la modélisation hydraulique avec HEC-RAS, et l'évaluation de diverses options de protection pour choisir la meilleure solution pour les zones urbaines et périurbaines.

Chapitre 01 : Le premier chapitre présente une analyse exhaustive de la zone d'étude, en détaillant ses caractéristiques géographiques, géologiques, hydrogéologiques et climatiques. Il situe l'aménagement du cours d'eau de l'oued Maoussa.

Chapitre 02 : Le deuxième chapitre se divise en deux parties principales. La première partie présente les caractéristiques physiologiques et géomorphologiques des deux sous-bassins versants de l'Oued Maoussa, en utilisant des logiciels SIG comme ArcMap, Global Mapper et Google Earth pour analyser les données spatiales, géographiques et topographiques. La seconde partie se concentre sur l'étude hydrologique visant à évaluer les débits de crue à différentes périodes de retour. Cette analyse est fondée sur une analyse statistique fréquentielle des données de débit, réalisée avec le logiciel HYFRAN, afin de prévoir les débits des crues de l'Oued Maoussa en fonction des caractéristiques du bassin versant.

Chapitre 03 : Le troisiéme chapitre se concentre sur l'évaluation hydraulique de l'Oued Maoussa dans son état naturel, avant toute intervention d'aménagement. En utilisant les logiciels HEC-RAS et RAS Mapper, une simulation du comportement de l'Oued sans aménagement est réalisée pour mesurer les hauteurs d'eau associées aux débits prévus. Les résultats, sous forme de cartes des profondeurs d'eau, permettent d'identifier les zones à risque d'inondation et de guider les futures interventions d'aménagement pour une gestion optimale des risques d'inondation.

Chapitre 04 : Le quatrième chapitre est dédié à la conception de l'aménagement de l'Oued Meaoussa , en mettant l'accent sur le dimensionnement hydraulique de la section d'écoulement. Il présente diverses options d'aménagement élaborées avec le logiciel FLOWMASTER, tout en incluant une estimation financière pour évaluer le coût des solutions proposées.

Chapitre 05 : Le cinquiéme chapitre est dédié à l'organisation du chantier, visant à garantir le bon déroulement du projet. Il inclut des prévisions détaillées des coûts et des délais nécessaires à la réalisation de l'aménagement.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDES :

Introduction

Pour établir un système de protection contre les inondations dans une ville, il est fondamental de commencer par une analyse approfondie de plusieurs éléments clés. Il est nécessaire de prendre en compte la situation géographique, le climat local, la morphologie du terrain, ainsi que la densité et l'occupation de la population. Ces données sont essentielles pour évaluer la vulnérabilité de la zone face aux inondations et pour sélectionner les aménagements les plus adaptés afin de garantir la sécurité de la ville.

Dans ce cadre, le premier chapitre se concentre sur l'étude des sections amont et aval de Oued Maoussa , Cette analyse permettra de mieux comprendre les défis spécifiques liés à ces zones et d'élaborer des stratégies efficaces pour la protection contre les inondations.

I.1 Présentation de la zone études :

La commune de Khalouia est située au cœur de la wilaya de Mascara. Avec une superficie de 20 km carré,

La commune est stratégiquement située entre Ain Fares a l'ouest , Tigheniff au sud , commune El bordj au nord et a l'est .

Elle est entourée de paysages variés, comprenant des plaines fertiles et des collines, notamment la chaîne des Benichougrane au nord. Le climat de la région est semi-aride, avec des étés chauds et des hivers frais, ce qui influence l'agriculture locale. Khalouia est également traversée par plusieurs oueds, notemment Oued Maoussa qui traverse la ville .



Figure I-1 : Presentation de la commune de Khalouia

I-2 Climatologie

L'étude de la climatologie nous permet de mieux appréhender les phénomènes hydrologiques tels que les précipitations, les températures, la vitesse et nature du vent et les périodes de gel.

Les données climatiques sont recueillies par plusieurs organismes spécialisés dans la mesure, le traitement et le stockage de ces informations. Par exemple, l'Office National de Météorologie , fournit des données concernant la température, la vitesse du vent et l'évaporation. En ce qui concerne les précipitations, celles-ci sont mesurées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques dans la wilaya d'Oran.

En analysant ces divers paramètres, nous pouvons mieux comprendre leur impact sur le cycle de l'eau et les ressources hydriques. Cela constitue une étape essentielle pour assurer une gestion durable de l'eau, surtout face aux défis que pose la variabilité climatique et le changement climatique.

I.2.1 Températures

L'étude de la température est essentielle dans une analyse hydrique, car elle influence directement plusieurs processus clés du cycle de l'eau. La température de l'air affecte l'évapotranspiration, ce qui permet d'évaluer les déficits d'écoulement dans un bassin versant. , comprendre la température est fondamental pour évaluer les ressources en eau et assurer une gestion durable face aux défis climatiques.

Le tableau ci-dessous présente les températures minimales, moyennes et maximales mensuelles enregistrées à la station sélectionnée sur une période de 36 ans (1986-2022).

Tableau I.1 Températures mensuelles minimales, moyennes et maximales enregistrées à la station choisie en (°C) (1996 / 2022). (Source : ONM).

MOIS	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUI	AUO
Tmoy (°C)	23.1	17.9	12.3	8.9	8.3	9.8	11.5	14.2	17.9	21.9	26.3	27
Tmin (°C)	18.6	13.9	8.6	5.7	4.6	5.9	7.6	10.1	13.6	17.5	21.5	22.4
Tmax (°C)	27.6	21.9	16	12.2	12.1	13.8	15.5	18.4	22.2	26.3	31.2	31.6

Avec :

Tmin : Température minimale mensuelle (°C);

Tmoy : Température moyenne mensuelle (°C);

Tmax : Température maximale mensuelle (°C).

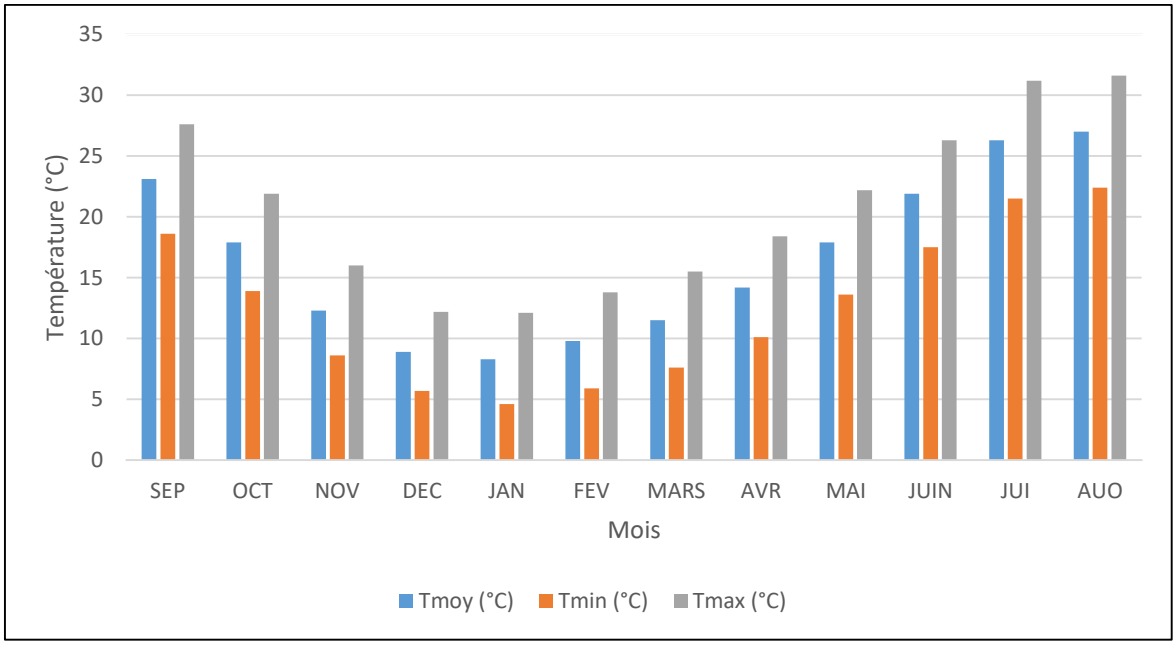


Figure I.2 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à la station choisie (1996-2022).

I.2.2 Vent

L'analyse des vents est essentielle pour la conception des infrastructures et dans le domaine de l'hydraulique. Il contient de connaître leur répartition mensuelle quant à leur vitesse et leur fréquence sans pour autant négliger leur direction *(Touaibia, 2015).*

Le tableau ci-dessous Les vitesses moyennes du vent moyen enregistrées à la station choisie sur une période de 36 ans (1986-2022).

Tableau I.2 Moyennes mensuelles de la vitesse du vent à la station meterologique de Oued Maoussa (m/s) (1996/2022).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Vent moy (m/s)	4.3	4.0	3.6	3.4	3.2	3.3	3.7	3.8	4.0	4.5	4.8	4,7

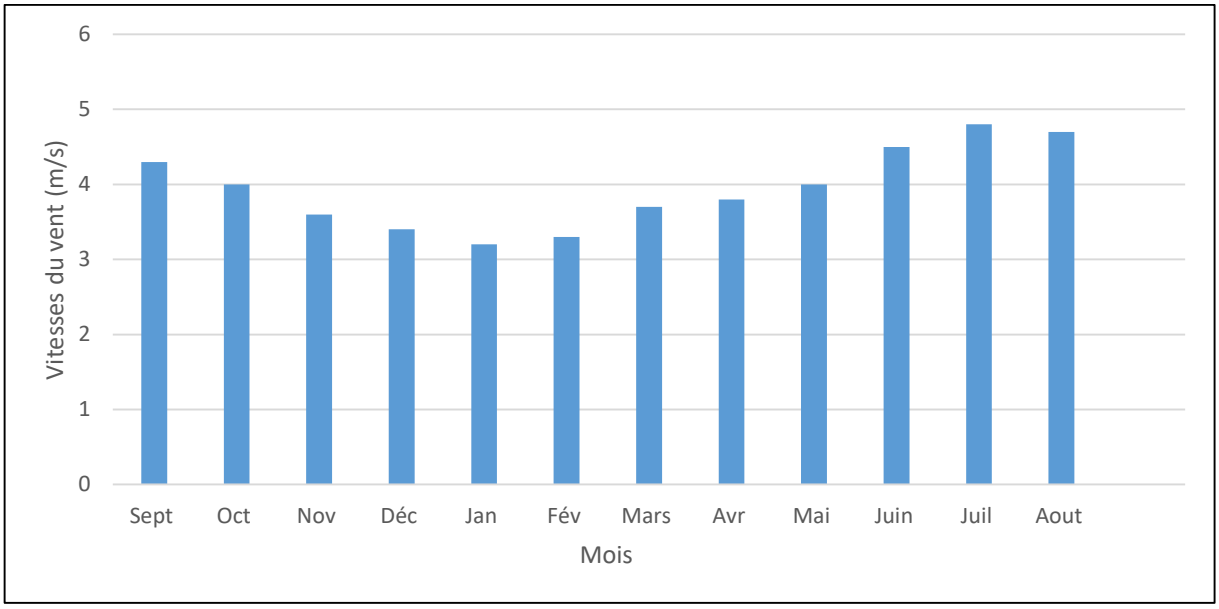


Figure I.3 Distribution des vitesses du vent en m/s (1996-2022).

I.2.3 Les précipitations

Les précipitations se réfèrent à toutes les eaux météorologiques collectées par un bassin versant ou une surface spécifique. La hauteur de précipitation est la hauteur de la lame d'eau précipitée qui s'accumulerait sur une surface horizontale si toutes les précipitations y étaient sous forme liquide *(Touaibia, 2015).*

Le tableau ci-dessous Les précipitations enregistrées à la station Maoussa sur une période de 36 ans (1986-2022).

Tableau I.3 Répartition des pluies mensuelles interannuelles de la station pluviométrique 111401

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Pv (mm)	15	50	55	60	45	40	35	30	25	10	5	5

Le graphe ci-dessous represente la pluviométrie en (mm) en fonction du temps (Mois)

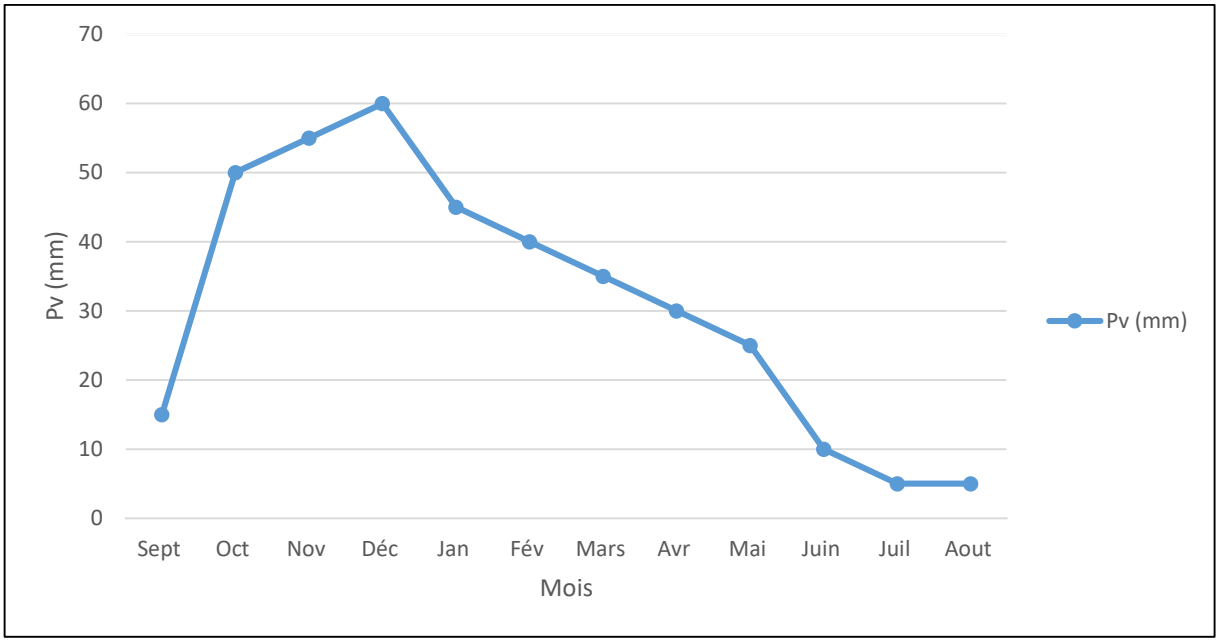


Figure I.4 Evolution de la pluviométrie mensuelle interannuelles

Conclusion

Le chapitre aborde la situation, la topographie et le climat de la région de Oued Maoussa Mascara.C'est la phase la plus importante, elle est basée sur la collecte d'informations brutes et la vérification de la fiabilité des décisions.

Chapitre II : Etude hydrologique

Introduction

L'hydrologie, en tant que branche des sciences de la Terre, se concentre sur l'analyse de la distribution spatiale et temporelle des ressources en eau, tant de surface que souterraines, ainsi que sur leurs caractéristiques chimiques, biologiques et physiques. Ce domaine interdisciplinaire intègre plusieurs disciplines scientifiques pour faire face aux défis liés à la gestion et à l'utilisation durable des ressources en eau. Les études hydrologiques sont fondamentales pour le développement d'infrastructures hydrauliques. L'un de leurs principaux objectifs est d'estimer les débits maximaux pour différentes périodes de retour, telles que T=10 ans et T=20 ans. Ce chapitre vise à identifier les paramètres hydrologiques clés de la zone d'étude, en se concentrant sur le bassin versant de Oued Maoussa , situé dans la ville de Tigheniff , à Mascara. Pour ce faire, nous utiliserons le logiciel ArcGIS afin de déterminer ces caractéristiques. En outre, nous chercherons à estimer les périodes de retour et à évaluer les débits de crue nécessaires à la conception d'aménagements fluviaux, dans le but de protéger la zone contre les inondations

Bassin versant

Le bassin versant constitue l'unité fondamentale de l'équilibre hydrologique, définissant la zone drainée par une rivière et ses affluents. Les cours d'eau prennent généralement naissance dans des zones variées et collectent les eaux de ruissellement des terres environnantes. L'eau s'écoule vers la rivière, atteignant son point le plus bas, appelé exutoire.

Chaque bassin versant est séparé des autres par une ligne de partage des eaux. Cette limite est déterminée sur la carte topographique. En commençant par l’exutoire, en trace à main levée des segments perpendiculairement aux courbes de niveau en passant par les crêtes, aboutissant automatiquement à l’exutoire (Touaibia, 2015).

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) dans le monde, ArcGIS est utilisé par des professionnels à travers le globe pour mettre les connaissances géographiques au service de diverses applications, telles que le gouvernement, les entreprises, la science, l'éducation et les médias

III.1.1 Caractéristiques principales du bassin versant :

III.1.1.1 Caractéristiques géographiques :

Les coordonnées UTM (Zone 31) de l'exutoire sont les suivantes :

Longitude : 0.290°.

Latitude : 35.447°.

L'altitude : 536 m.

III.1.1.2 Caractéristiques morphologiques

➢ Surface

La superficie d'un bassin versant désigne la zone géographique délimitée par les contours de la ligne de partage des eaux ou du bassin lui-même. Pour mesurer cette étendue, on peut utiliser divers outils, comme un planimètre ou appliquer la méthode des petits carrés. Cette mesure est généralement exprimée en kilomètres carrés (km^2), offrant ainsi une indication claire de la taille du bassin versant

Le bassin versant d'Oued Maoussa a une superficiel de **S =44,61km2.**

➢Périmètre

Le pourtour du bassin versant correspond à la frontière externe de celui-ci. Chaque bassin présente une réponse unique aux précipitations qu'il reçoit. Ces caractéristiques hydrologiques sont influencées à la fois par le climat de la région et par les particularités physiques propres au bassin considéré

Le périmètre de bassin versant d'Oued Maoussa est **P= 36,49 km**

➢Longueur du thalweg (cours d'eau principal)

Un talweg désigne le tracé formé par les points ayant l'altitude la plus basse, que ce soit au fond d'une vallée ou dans le lit d'un cours d'eau

La longueur du cours d'eau principal est : **Lcp = 11.77 Km**

III.1.1.3 Caractéristiques géométriques :

➢ **Indice de compacité de Horton (K_h) :**

L'indice de compacité de Horton est obtenu en calculant le rapport entre la largeur moyenne du bassin versant et la longueur du cours d'eau principal. Il se calcule par la relation :

$$K_h = \frac{S}{Lcp^2} \qquad \textbf{(II.1)}$$

Avec :

K_h : Indice de compacité de Horton.

S : Surface de bassin versant (km^2).

Lcp : La longueur du cours d'eau principale (km).

Pour :

- $K_h > 1$ …….. Bassin ramassée.
- $K_h < 1$ …….. Bassin allongée.

➢ **Indice de compacité de Gravélius (K_G) :**

Selon M. GRAVELIUS (Loaborde 2000), la configuration d'un bassin versant a un impact direct sur le comportement de l'écoulement de surface. Cette configuration est quantifiée par un paramètre appelé indice de compacité (KG), également désigné comme indice de forme. Cet indice est défini comme le rapport entre le périmètre (P) du bassin, mesuré en kilomètres (km), et le périmètre d'un cercle ayant la même superficie (A), exprimée en kilomètres carrés (km^2) Il est donné par la formule suivante :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi * S}} \approx 0{,}282 * \frac{P}{\sqrt{A}} \qquad \textbf{(II.2)}$$

Avec :

K_G : Indice de compacité de Gravélius.

P : périmètre de bassin versant (km).

S : Surface de bassin versant (km^2).

Pour :

- K_G =1 ……. Bassin compacte.
- 1< K_G < 1, 3 ……. Bassin moins compacte.
- K_G >1,3 …… Bassin allongée.

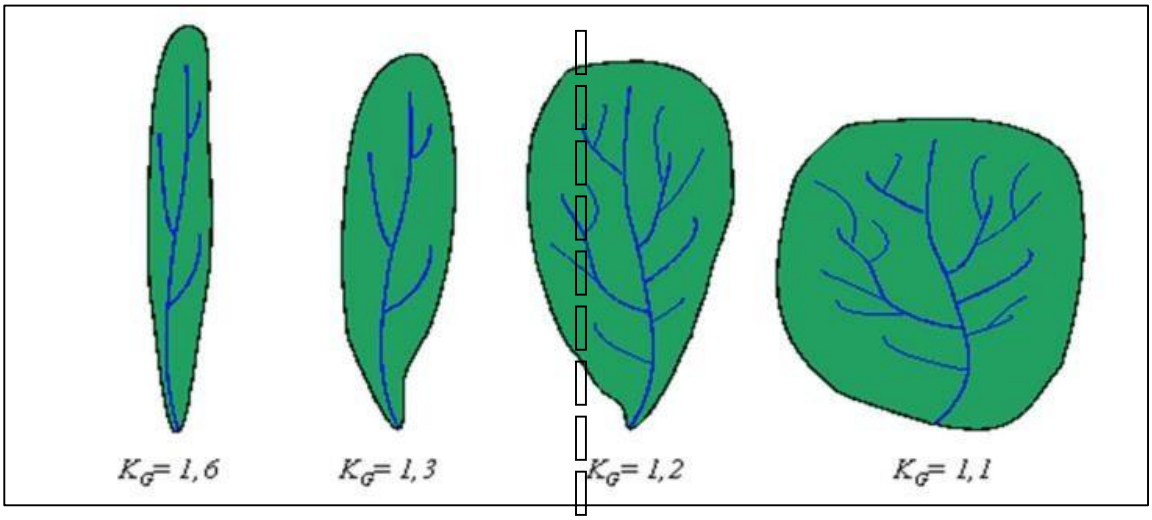


Figure II.1 : Différents types des BV selon le coefficient de Gravelius K_G.

Si l'indice de compacité (KG) s'éloigne de 1, cela signifie que le bassin présente une forme plus compacte, ce qui entraîne un temps de concentration plus court.

Et dans notre bassin versant avec une valeur de KG = 1,68 alors il est de forme bassin allongée.

➢ **Coefficient d'allongement ($C_{a)}$:**

Ce coefficient est obtenu par la relation suivante :

$$C_a = \frac{Lcp^2}{S} \qquad \textbf{(II.3)}$$

Avec :

L_{cp} : Longueur de talweg principal (km).

S : Surface de bassin versant (km^2).

Ce coefficient offre des informations sur la configuration hydrologique de la zone étudiée. Un coefficient d'allongement élevé indique que le bassin versant est plus étiré, ce qui peut affecter le déplacement de l'eau à travers le réseau hydrographique. Cela pourrait réduire le temps nécessaire à l'accumulation des eaux, mais cela peut également entraîner une réaction plus rapide aux précipitations, provoquant ainsi des crues plus soudaines

➢ **Rectangle équivalent :**

Le rectangle équivalent, ou rectangle de Gravélius, est une méthode qui consiste à représenter le bassin versant par un rectangle ayant les mêmes caractéristiques d'indice de compacité et d'hypsométrie que le bassin étudié. Cette approche permet de comparer les bassins versants du point de vue de leur comportement hydrologique.

Les paramètres géomorphologiques du bassin versant d'Oued Maoussa sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : Les paramètres hydro morpho métriques du bassin versant d'Oued Maoussa.

Désignation	Symbole	Unités	Valeur
Superficie	S	Km^2	44.61
Périmètre	P	Km	36.49
Indice de compacité de Gravélius	KG	/	1,54
Longueur du thalweg principal	Lcp	Km	11.77
Coefficient d'allongement	Ca	/	3.105
Indice de compacité de Horton	Kh	/	0.322
Longueur Rectangle équivalent	L	Km	15.49
Largeur Rectangle équivalent	l	Km	2.88

II.1.2 Le relief :

L'influence exercée par le relief sur l'écoulement est intuitivement compréhensible. Cela s'explique par les variations de plusieurs paramètres hydrométéorologiques en fonction de l'altitude, tels que les précipitations, les températures et les vents. De plus, la configuration du

bassin versant joue un rôle crucial. La pente du terrain influe également sur la vitesse de l'écoulement. Pour caractériser le relief, divers indices ou caractéristiques sont utilisés.

II.1.2.1 La courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique fournit une représentation globale de la topographie d'un bassin versant, illustrant la répartition de sa surface en fonction de l'altitude. Sur l'axe horizontal, elle indique la proportion de la superficie du bassin située au-dessus ou en dessous de chaque niveau d'altitude, qui est représenté sur l'axe vertical. Ainsi, cette courbe permet de visualiser la distribution des surfaces en lien avec les altitudes.

La courbe hypsométrique est tracée avec les altitudes sur l'axe des ordonnées et les pourcentages de surface sur l'axe des abscisses. Elle est élaborée grâce à des calculs qui déterminent comment la surface du bassin versant se répartit entre différentes altitudes, en calculant les surfaces partielles entre les courbes de niveau successives. Cette courbe représente la proportion de la surface totale comprise entre deux courbes de niveau adjacentes et offre une vue condensée du profil du bassin versant. La pente moyenne de cette courbe, dérivée des données, est un indicateur clé pour comparer la topographie de différents bassins versants. Les surfaces élémentaires et leurs cumuls à diverses altitudes sont obtenus à l'aide du logiciel ArcGIS.

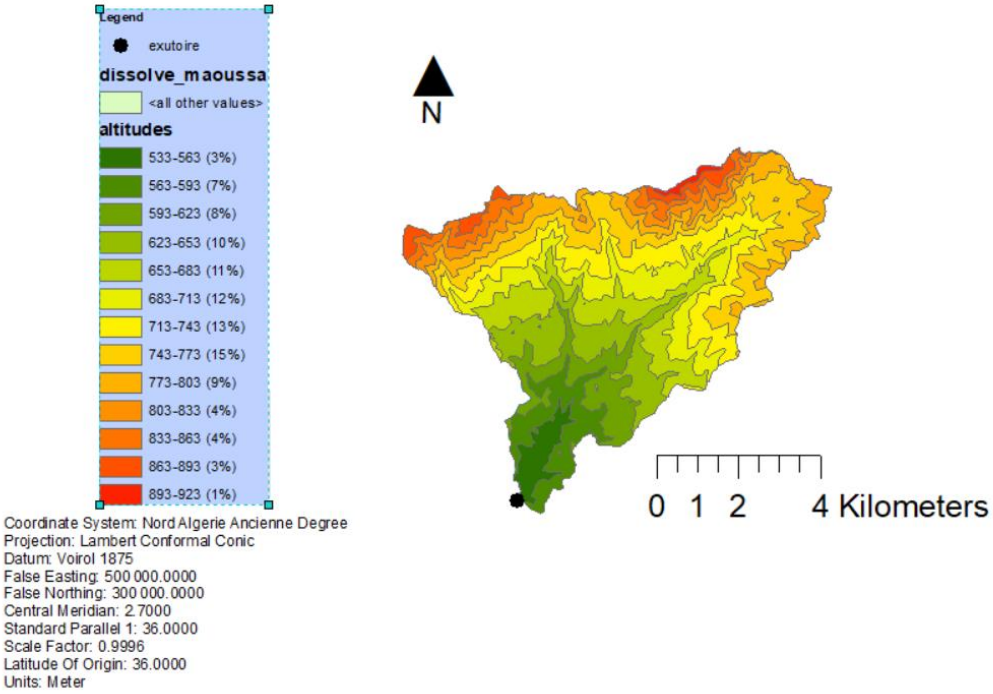


Figure II.2 : Carte hypsométrique de bassin versant d'Oued Maoussa.

La distribution des surfaces élémentaires et leurs totaux cumulés en fonction des altitudes ont été calculés à l'aide du logiciel ArcGIS.

Tableau II.2 : Paramètres Hypsométriques du bassin versant d'Oued Maoussa.

Gridcode	Altitudes (m)	Hi (m)	Surface	Prc (%)	Cum desc (%)
1	533-563	548	1.451627	3	100
2	563-593	578	3.136392	7	97
3	593-623	593	3.452256	8	90
4	623-653	608	4.741531	10	82
5	653-683	668	4.828141	11	72
6	683-713	698	5.243039	12	61
7	713-743	728	5.764647	13	49
8	743-773	758	6.558653	15	36
9	773-803	788	4.241147	9	21
10	803-833	818	2.009946	4	12
11	833-863	848	1.80098	4	8
12	863-893	878	1.148749	3	4
13	893-923	908	0.227416	1	1
			44.604525	100	0

La courbe ci-dessous présente la courbe hypsométrique d'Oued Maoussa :

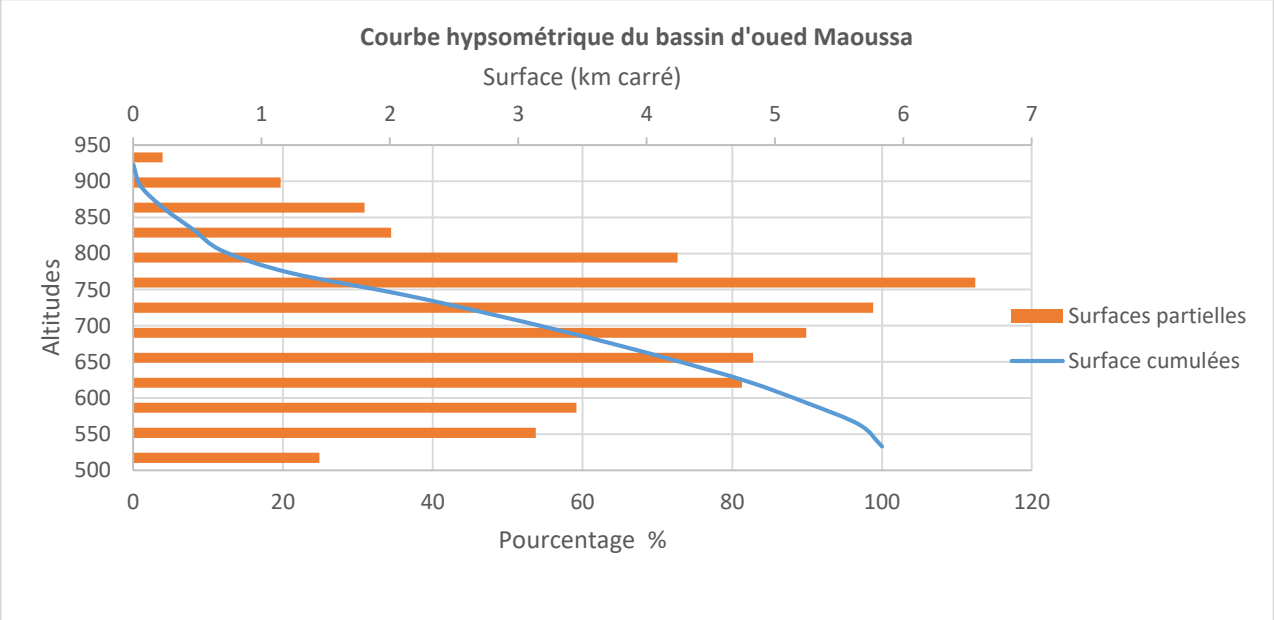


Figure II.3 : Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Maoussa .

Les caractéristiques topographiques majeures en matière d'altitude comprennent :

:➢ **Altitude maximale et minimale (Hmax–Hmin)** : Ces valeurs sont directement extraites des cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin versant, tandis que l'altitude minimale correspond au point le plus bas, généralement situé à l'exutoire. Ces deux mesures sont essentielles pour établir des corrélations avec des variables climatiques telles que la température et les précipitations.

➢ **Altitude moyenne (Hmoy)** : L'altitude moyenne du bassin versant est un indicateur clé qui reflète l'impact de la zonation climatique verticale. Elle est déterminée en additionnant le produit des surfaces partielles Si situées entre les courbes de niveau et leurs altitudes moyennes associées Hi.

Il est donné par la formule suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum Si * Hi}{S} \qquad \text{(II-4)}$$

Avec :

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

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

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

➢ **Altitude H5% :** Il s'agit de la projection du point représentant 5% de la surface totale cumulée sur la courbe hypsométrique.

➢ **Altitude médiane H50% :** Cette altitude correspond à la projection du point qui indique 50% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.

➢ **Altitude médiane H95% :** Cette mesure représente la projection du point qui correspond à 95% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.

Un résumé des résultats de calculs dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.3 : caractéristiques altimétriques du bassin versant d'Oued Maoussa .

Altitudes	Hmin	Hmax	Hmoy	H5%	H50%	H95%
BV Maoussa	533	923	706.52	830	707	580

II.1.2.2 Les indices de pente : a compréhension de l'altitude des pentes revêt une importance considérable, notamment pour les professionnels de la forêt, les agriculteurs, les urbanistes et les gestionnaires des risques naturels. Cette connaissance facilite l'interprétation des caractéristiques du terrain et aide à appréhender la morphologie des zones montagneuses ou des vallées. L'élaboration de cartes des pentes est une méthode couramment utilisée pour

évaluer différents indices de pente, ce qui s'avère particulièrement bénéfique dans les régions montagneuses, comme l'illustre la figure suivante :

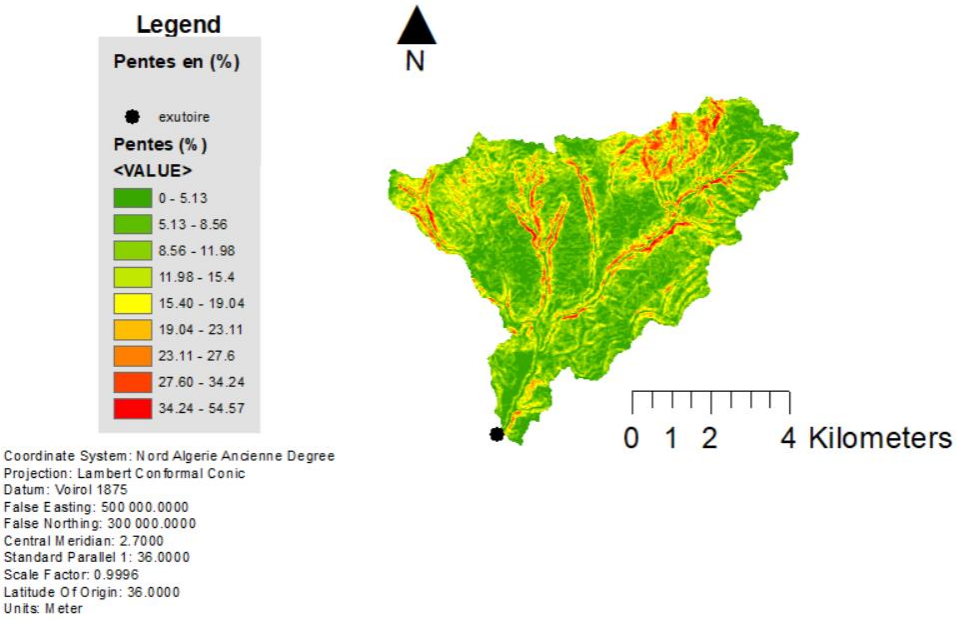


Figure II.4 : Carte des pentes du bassin versant d'Oued Maoussa.

De plus, la carte en courbes de niveau présente une représentation topographique des caractéristiques du terrain à l'aide d'un ensemble de courbes de niveau disposées de manière régulière. Cette carte est montrée dans la figure suivante :

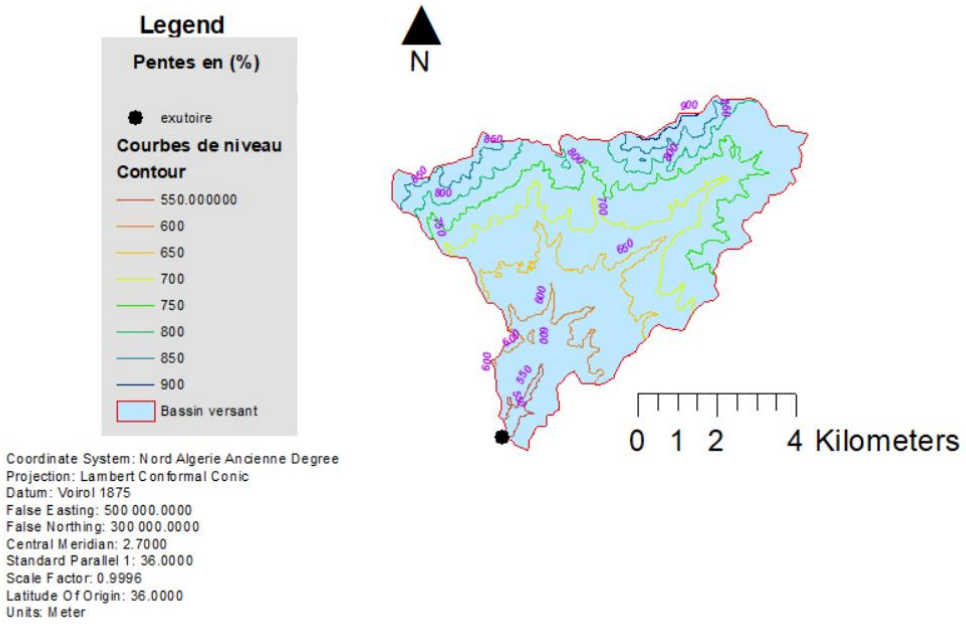


Figure II.5 : Carte des courbes des niveaux du bassin versant d'Oued Maoussa .

1) Pente du bassin versant I_{bv} :

Elle est définie par la formule suivante :

$$I_{bv} = \frac{Hmax - Hmin}{Lcp} \qquad \textbf{(II.5)}$$

Avec :

Hmax – Hmin : Les altitudes correspondant aux 5% et 95% de la surface totale—en termes de fréquence.

L_{cp} : Longueur de talweg principal (km).

2) Pente moyenne du bassin versant I_m :

La pente moyenne constitue un élément clé qui fournit des renseignements sur la configuration topographique du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante. Elle permet d'estimer le temps de parcours du ruissellement direct (et, par conséquent, le temps de concentration Tc) et a un impact direct sur le débit de pointe lors d'une précipitation (TOUAIBIA, 2004).

$$I_m = \frac{\Delta H \{0,5L1+L2+...+0,5Ln\}}{S} \quad \text{(II.6)}$$

Avec :

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

L1, L2, …, Ln : Les longueurs des courbes de niveaux (Km).

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

Tableau II.4 : Pente moyenne (Im) du bassin versant d'Oued Maoussa

Courbes	**Longueur**	**ΔH**	**Surface BV (Km^2)**	**Im (m/Km)**
550	5,867	50	44.61	116.98
600	4,044			
650	2,748			
700	2,666			
750	1,941			
800	1,287			
850	0,613			
900	0,235			

Indice de pente globale (Ig) :

L'indice de pente globale (Ig) est un outil d'évaluation du relief, fondé sur la classification établie par l'O.R.S.T.O.M (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer). Il se calcule en prenant le rapport entre la dénivelée, qui est la différence d'altitude entre les points représentant 5 % et 95 % de la surface du bassin, et la longueur du rectangle équivalent. Pour déterminer ces points, on choisit deux abscisses, S1 et S2, sur l'axe horizontal, de sorte que 95 % de la surface du bassin se situe entre ces deux valeurs, tandis que 5 % de la surface totale est inférieure à S1 et 5 % est supérieure à S2 (Bénina 2004)

4) Indice de pente de Roche I_P :

Cet indice permet de déduire la nature du relief en se référant à la classification de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre – Mer (ORSTOM) depuis 1998 sous l'appellation de l'Institut de recherche pour le développement (IRD).

I_P est donné par la formule :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{Lr}} \sum \sqrt{Si * Hi} \qquad \text{(II.7)}$$

Avec :

L_r : longueur du rectangle équivalent (km).

Si : Surface partielle entre deux courbes de niveau (Km2).

Indice de pente moyenne I_{pm} :

La pente moyenne d'un cours d'eau influence la vitesse d'écoulement de l'eau vers l'exutoire du bassin et le temps de concentration. Pour calculer les pentes moyennes des cours d'eau, on se base sur le profil longitudinal du cours d'eau principal ainsi que de ses affluents. La méthode la p—lus fréquemment employée pour calculer la pente longitudinale d'un cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre son point le plus élevé et son point le plus bas par la distance totale parcourue par le cours d'eau.

I_{pm} est donné par la formule :

$$I_{pm} = \frac{Hmax - Hmin}{Lr} \qquad \text{(II-8)}$$

Avec :

L_r : longueur du rectangle équivalent (km).

$H_{max} – H_{min}$: Les altitudes auxquelles se situent les 5% et 95% de la surface totale (m).

6) Dénivelée spécifique D_s :

Puisque l'indice de pente globale décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente. La dénivelée spécifique Ds ne présente pas cet inconvénient (Bénina, 2004).

La dénivelée spécifique est définie par la formule suivante :

$$D_s = I_g\sqrt{S} = D\sqrt{\frac{1}{Lr}} \qquad \text{(II-9)}$$

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

Classe	Intervalle	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.

Cela n'implique que le relief du bassin versant ; est un Relief modéré

50m<DS<100m

(Selon O.R.S.T.O.M).

Tableau II.7 : Résultats des calculs des pentes et du dénivelé spécifique du bassin versant de l'Oued Maoussa

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Pente du bassin versant	Ibv	m/Km	33.13
Pente moyenne de bassins versant	Im	m/Km	116.98
Indice de pente globale I_g	I_g	m/km	7.94

Indice de pente moyenne Ipm	Ipm	m/km	25.18
Indice de pente de Roche (Ip)	I_p	%	34.06
Dénivelée spécifique Ds	Ds	m	53.03
Relief	/	/	Relief modéré

II.1.3 Etude du réseau hydrographique

II.1.3.1 Caractéristiques du réseau hydrographique

Les principaux cours d'eau d'un fleuve reçoivent l'apport des affluents les plus significatifs, qui à leur tour sont alimentés par des affluents de rang inférieur, et ainsi de suite jusqu'aux ruisseaux et petits cours d'eau situés à la source du bassin, formant ainsi le réseau hydrographique des bassins versants. La description complète d'un tel réseau implique l'identification de divers paramètres.

Hiérarchisation du réseau

La ramification d'un cours d'eau est établie en attribuant un numéro à chaque segment en fonction de son importance. Un cours d'eau sans affluent est classé comme ordre 1. Lorsque deux cours d'eau de même ordre se rejoignent, le cours d'eau résultant est classé à l'ordre n+1. En revanche, si deux cours d'eau d'ordres différents se rencontrent, le cours d'eau résultant prend l'ordre le plus élevé des deux. L'ordre maximal correspond à celui du cours d'eau principal à l'exutoire

III.1.3.2 Paramètres hydrographiques :

1) Densité de drainage Dd

La densité de drainage est un concept qui décrit le rapport entre la longueur totale des talwegs (Li) d'un bassin et sa surface totale (S). Exprimée en km/km², cette mesure constitue un indicateur important de la dynamique du bassin, de la stabilité de son réseau hydrographique et du type de ruissellement de surface. Elle permet d'évaluer la manière dont l'eau s'écoule à travers le bassin. La densité de drainage est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^{n} li}{S} \qquad \textbf{(II-10)}$$

Avec :

$\sum_i^n li$: La somme des longueurs de tous les cours d'eau pris en compte dans le bassin versant.

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

La densité de drainage représente deux formes différentes de drainage.

Densité de drainage temporaire (Ddt) représente les talwegs qui coulent temporairement

$$D_{dt} = \frac{\sum lit}{S} \qquad \text{(II-11)}$$

lit : Longueurs des oueds temporaires.

La densité de drainage permanente (D_{dp}) : représente les cours d'eau qui ont un écoulement permanent :

$$D_{dp} = \frac{\sum lip}{S} \qquad \text{(II-12)}$$

lip : Longueurs des oueds permanents.

La densité hydrographique des thalwegs élémentaires F

La densité hydrographique est un concept qui reflète le nombre total de cours d'eau ou de voies d'écoulement dans une zone donnée. Elle est habituellement exprimée en termes de nombre de voies d'écoulement par unité de surface. Cette mesure permet d'évaluer la capacité de transport d'eau à travers une région spécifique.

$$F = \frac{\sum N1}{S} \qquad \text{(II-13)}$$

Avec :

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

3)Coefficient de torrentialité Ct :

Le coefficient de torrentialité est déterminé en multipliant la densité de drainage par la fréquence des talwegs élémentaires.

$$Ct = Dd * F \left(\frac{}{* \overline{Hmoy \quad Hmin)}}\right) \qquad \text{(II-14)}$$

Avec :

Dd : Densité de drainage.

F : Densité hydrographique.

4) Temps de concentration Tc :

Le temps de concentration T*c* des eaux sur un bassin versant est défini comme la durée maximale nécessaire pour qu'une goutte d'eau parcourt le chemin hydrologique entre un point du bassin et son exutoire. Cette mesure peut être difficile à estimer avec précision. Plusieurs formules, dont certaines sont anciennes, comme celle de Kirpich datant de 1940 et développée après les inondations survenues dans le nord-est des États-Unis en 1936 (Folmar et al. 2007), sont couramment utilisées.Les méthodes et formules employées sont souvent adaptées à des régions spécifiques, reflétant les caractéristiques uniques de chaque zone géographique. Il est généralement conseillé de sélectionner la formule la plus appropriée en fonction du type de bassin versant étudié. À cet effet, il convient de privilégier celles qui ont été élaborées dans des conditions physico-géographiques similaires à celles du nord de l'Algérie. L'estimation du temps de concentration peut être réalisée à l'aide des formules empiriques suivantes :

➢ **Formule de GIANDOTTI (sud Italie 1937)**

Donnée par :

$$Tc = \frac{(4\sqrt{S}) + (1{,}5 + 0{,}385Lcp)}{(0{,}8 \sqrt{\quad} \quad -} \qquad \text{(II-15)}$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

H_{moy} - H_{min} : Altitudes moyenne et minimale du bassin versant (m).

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

L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (Km).

➢ **Formule de SOKOLOVSKY**

Donnée par :

$$Tc = 4 * \left(\frac{S * Lcp^{0,333}}{\sqrt{Ibv}}\right)^{0,75} \quad \text{(II-16)}$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

Lcp : Longueur du thalweg principal (Km).

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

I_{bv} : Pente du bassin versant (m/Km).

➢ **Formule de SCS ANRH**

Donnée par :

$$Tc = \left(\frac{0,87 * Lcp^3}{Hmoy - Hmin}\right)^{0,385} \quad \text{(II-17)}$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

H_{moy} - H_{min} : Altitudes moyenne et minimale du bassin versant (m).

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

L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (Km).

➢ **Formule de TURAZZA**

Donnée par :

$$Tc = \frac{0{,}108\sqrt[3]{S*Lcp}}{\sqrt{Ipm}} \quad \text{(II-18)}$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (Km).

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

I_{pm} : Indice de pente moyenne (m/m).

➢ **Formule de VENTURA**

Donnée par :

$$Tc = 0{,}1275\frac{\sqrt{S}}{\sqrt{Ibv}} \quad \text{(II-19)}$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

I_{bv} : Pente du bassin versant (m/m).

S : Surface du bassin versant (Km2).

➢ **Formule de KIRPICH**

Cette méthode est adaptée aux bassins versants dont la superficie varie entre 0,4 hectare et 81 hectares, présentant des sols argileux et une pente moyenne comprise entre 3 % et 10 %. Le temps de concentration est déterminé à l'aide de l'équation suivante :

$$Tc = 0{,}0195 * \frac{(Lcp)^{0{,}77}}{\quad}$$

$$0{,}385$$

$$(\ Ipm)$$

(II-20)

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (m).

I_{pm} : Indice de pente moyenne (m/m).

✓ **Choix du temps de concentration :**

Les équations que nous utilisons sont spécifiquement recommandées pour le nord de l'Algérie. Ces formules produisent des résultats variés, et la valeur du temps de concentration retenue est celle qui est la plus faible parmi celles qui sont proches les unes des autres. Nous avons écarté les valeurs extrêmes, qu'elles soient très élevées ou très basses, afin de ne conserver que les valeurs moyennes.

Tableau II.8: Résultats de calculs de temps de concentration

Formules utilisées	Temps de concentration en heures
Formule de GIANDOTTI	2.34
Formule de SOLOVSKY	34.20
Formule de SCS ANRH	1.56
Formule de TURAZZA	4.28
Formule de VENTURA	0.147

Formule de KIRPICH	0.038

Tableau II.9: Résultats de calculs de temps de concentration.

Formules utilisées	Temps de concentration en heures
Formule de TURAZZA	4.283
Formule de SCS ANRH	1.556
Formule de GIANDOTTI	2.342

Nous avons décidé d'adopter le résultat issu de la loi de **SCS ANRH**, car cette formule nous fournit le temps de concentration le plus optimal .

5) Vitesse de ruissellement V_r : Le ruissellement se définit comme l'écoulement gravitaire des eaux à la surface du sol, où les précipitations qui n'ont pas été absorbées, évaporées ou retenues en surface suivent la pente naturelle du terrain. En Algérie, la méthode de KIRPICH est couramment utilisée pour estimer la vitesse du ruissellement, en se basant sur le temps de concentration.

La vitesse de ruissellement se calcule par la formule suivante :

$$Vr = \frac{Lcp}{Tc} \quad \text{(II-21)}$$

On résume les résultats de calcul des paramètres hydrographiques dans le tableau suivant :

Tableau III.10: Paramètres hydrographiques d'Oued Maoussa .

Désignation	**Symbole**	**Unités**	**Valeur**
Densité de drainage	Dd	Km/Km^2	7.95
Densité hydrographique	F	Km-2	17.48
Coefficient de torrentialité	Ct	/	7.26
Temps de concentration	Tc	Heures	1.55
Vitesse de ruissellement	Vr	Km/h	7.59

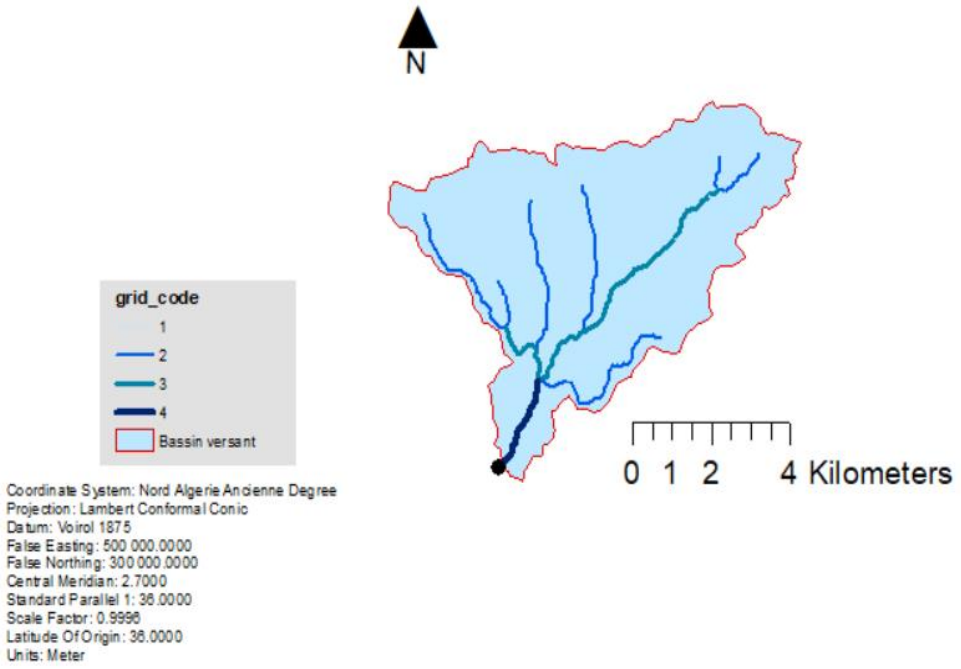


Figure II.6 : Carte du réseau hydrographique d'Oued Maoussa .

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued Maoussa

Tableau III.11: Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued Maoussa

Rectangle équivalent	**Longueur**	Lr	Km	15.49
	Largeur	l	Km	2.88
Altitudes	**Maximale**	Hmax	m	923
	Moyenne	Hmoy	m	706.52
	Minimale	Hmin	m	533
	Médiane 5%	H5%	m	830
	Médiane 50%	H50%	m	707
	Médiane 95%	H95%	m	580
Pente du bassin versant		Ibv	m/Km	153.8

Pente moyenne du bassin versant	Im	m/Km	89.65
Indice de pente de Roche	Ip	%	17.26
Indice de pente moyenne	Ipm	m/Km	25.18
Indice de pente globale	Ig	m/Km	7.94
Dénivelée spécifique	Ds	m	53.03
La somme des longueurs des cours d'eau	∑Li	Km	28.45
Nombre des talwegs d'ordre 1	∑N1	/	51
Densité de drainage	Dd	Km/Km2	7.95
Densité hydrographique	F	Km-2	17.48
Coefficient de torrentialité	Ct	/	7.26
Temps de concentration	Tc	Heures	1.55
Vitesse de ruissellement	Vr	Km/h	7.59

II.2 Etude des crues

Dans le cadre d'un projet de prévention des inondations, l'évaluation du débit maximal est une étape essentielle. Cette évaluation permet de choisir les aménagements les plus adaptés et d'identifier les zones à risque d'inondation. Après avoir identifié les bassins versants de la zone concernée et déterminé leurs caractéristiques, l'objectif est d'estimer les débits de crue pour des périodes de retour allant de 10 à 100 ans. L'estimation du débit de crue fréquentielle du bassin versant s'effectue par le biais de deux approches.

La série d'observation de la station hydrométrique

Méthode de GRADEX

II.2.1 La série d'observation de la station hydrométrique

L'évaluation du temps de retour d'une valeur spécifique peut être effectuée par l'analyse fréquentielle d'une série prolongée de débits maximaux. Cette prédiction repose sur l'élaboration et l'application d'un modèle fréquentiel, qui est une formule mathématique simulant le comportement statistique d'un processus. Ces modèles illustrent la probabilité d'occurrence d'un événement d'une certaine valeur. La fiabilité des résultats de l'analyse fréquentielle dépend du choix du modèle utilisé. Dans cette étude, nous avons opté pour une loi statistique d'ajustement, couramment employée pour ajuster les séries de précipitations maximales et les débits associés.

II.2.1.1 Présentation de la station hydrométrique

Dans le cadre de l'étude des inondations, diverses stations de mesure sont sollicitées pour recueillir des données hydrologiques et météorologiques. L'analyse des précipitations maximales annuelles est essentielle pour identifier les événements de pluie extrême associés à différentes périodes de retour. Cela nécessite une série chronologique des précipitations maximales sur la période la plus longue possible. Malheureusement, aucune station hydrométrique n'est disponible dans notre zone d'intérêt. Ainsi, nous avons décidé de nous tourner vers la station de Ghriss .

Tableau II.12: Caractéristique de la station hydrométrique « Ghriss » (Source : ANRH).

Station	**Code**	**Coordonnées**		**Période d'observation**
Ghriss	11 14 12	**Latitude**	**Longitude**	1970-2017
		35.05°N	1.47°O	

Tableau II.13: Caractéristiques dès les station Pluviométrique (Source : ANRH).

Code de la station	**Nom de la station**	**Type de la station**	**Les coordonnées**		**Période d'observation**
			Latitude	**Longitude**	
111401	Maoussa	Pluviométrique	35.20°N	0.13°E	1974-2018
111402	Frouha	Pluviométrique	35.24°N	0.13°E	1984-2018
111405	Matemore	Pluviométrique	35.02°N	1.47°O	1967-2018

Le tableau suivant représente la répartition des débits maximales annuels de la station prise pour une période de 43 ans.

Tableau II.14: Série des débits maximales annuels prise de la station 111412 (Source : ANRH).

Qmax (m^3/s)	Années	Qmax (m^3/s)	Années	Qmax (m^3/s)	Années
40.3	1970	51.5	1989	3.68	2003
30.5	1971	23.2	1990	6.78	2004
28.5	1972	26.1	1991	44.6	2005
29.4	1973	15	1992	26.64	2006
26.8	1974	34.3	1993	15.57	2007
37.1	1975	55.5	1994	28.24	2008
40.2	1977	38.6	1995	18.99	2009
32.5	1978	30.9	1996	0.8	2010
26.7	1979	37.4	1997	8.8	2011
58.4	1980	39.5	1998	242	2013
34.3	1981	20.4	1999	15	2014
26.9	1983	34.82	2000	43	2015
43.2	1984	27.4	2001	2.10	2016
46.8	1987	25.98	2002	90.50	2017
30	1988				

II.2.1.2 Ajustement de la série des débits et les pluies maximales journalières

L'exactitude des résultats d'une analyse fréquentielle dépend fortement du choix du modèle fréquentiel, notamment de sa nature. Bien qu'il existe plusieurs facteurs pouvant faciliter cette sélection, il n'existe malheureusement pas de méthode universelle et infaillible.À partir d'un échantillon de n*n* observations, on crée un histogramme représentant la fréquence d'apparition et une courbe de fréquence cumulée de non-dépassement. Lorsque n*n* est suffisamment grand, l'objectif est de déterminer la loi de distribution de la population. À ce stade, la fréquence se convertit en densité de probabilité.

Tableau II.15: modèles fréquentiels et leurs validités.

Lois	Variables
Normale	Précipitations annuelles, Débits, Volume de stockage des réservoirs

Log Normale	Débits maxima annuels, Précipitations journalières, Précipitations annuelles, Volume du ruissellement mensuel, Volume du ruissellement annuel
Pearson type III (Gamma)	Débits maxima annuels, Précipitations journalières, Précipitations annuelles, Volume du ruissellement mensuel, Volume du ruissellement annuel
Loi de Gumbel et Fréchet	Débits maxima annuels
Loi exponentielle	Précipitations journalières, Durée entre deux événements
Loi de Goodrich	Valeurs moyennes annuelles (débits, précipitations, etc..

Logiciel HYFRAN-PLUS :

Le logiciel HYFRAN-PLUS permet de calibrer différentes distributions statistiques sur une série de données, tant que les conditions d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité sont respectées (voir publications sur le Système d'Aide à la Décision, SAD). Un outil de ce système a été développé pour faciliter la sélection de la distribution la plus adaptée afin d'estimer les quantiles pour des périodes de retour élevées.

1. Ajustement de la série à la loi de GUMBEL :

La loi de Gumbel est largement reconnue pour modéliser la distribution des valeurs extrêmes. Cette loi, qui est une distribution double exponentielle, représente la distribution limite des valeurs maximales d'un échantillon de n*n* valeurs. Lorsque l'on considère le maximum annuel d'une variable, correspondant au maximum de 365 valeurs quotidiennes, cette loi est capable de représenter efficacement les séries de maxima annuels. L'ajustement de ces séries à la loi de Gumbel a été effectué à l'aide du logiciel HYFRAN-PLUS, et les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.16: Résultats d'ajustement à la loi de Gumbel.

Période de retour	Probabilité de fréquence	Débit max jour	Écart type	Intervalle de confiance
1000	0.999	214	31.8	152 – 276
100	0.99	149	21.6	107 – 191
50	0.98	129	18.6	93.0 – 166
20	0.95	103	14.5	74.7 – 132
10	0.9	82.9	11.5	60.4 – 105
5	0.8	61.8	8.51	45.1 - 78.5
2	0.5	29.9	5.06	19.9 - 39.8

Le Graphe ci-dessous présente l'ajustement à la loi de Gumbel de la station 111412

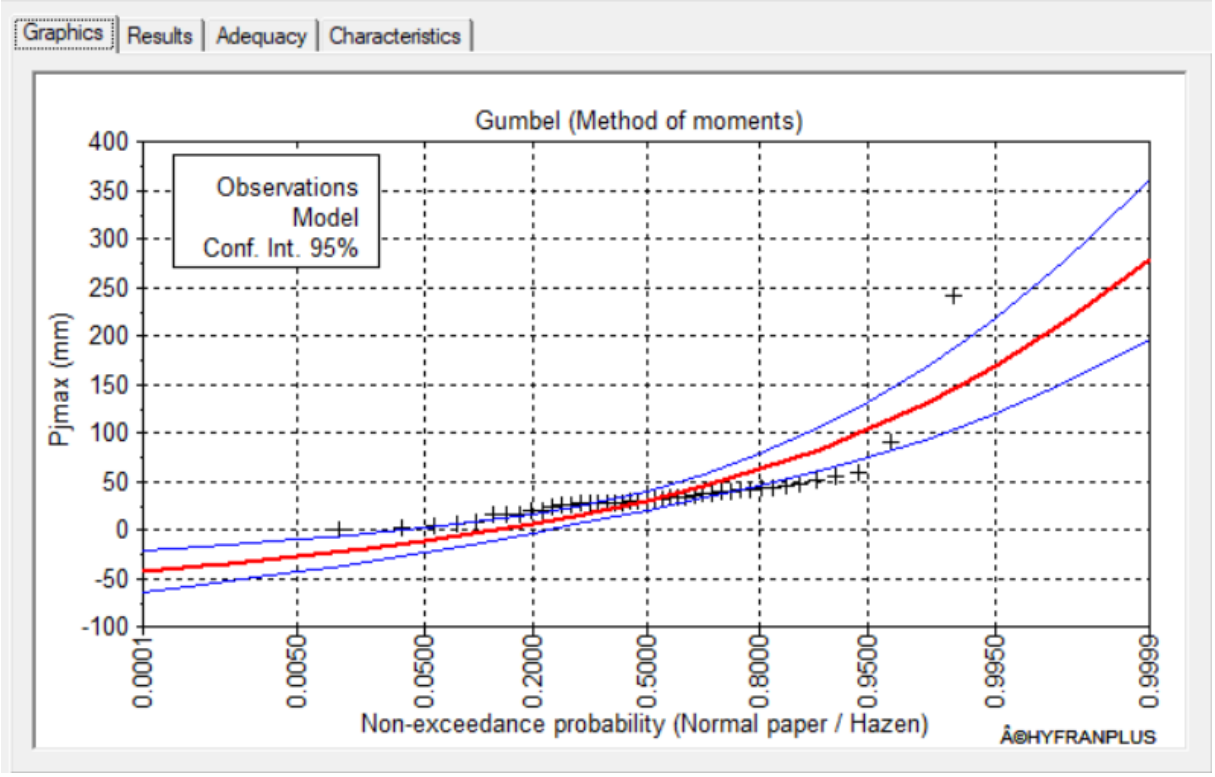


Figure II.6 : Graphique d'ajustement à la loi de Gumbel de la station 111412

Voici une comparaison des propriétés de la loi de Gumbel et de l'échantillon, présentée dans le tableau suivant :

Tableau II.17: Comparaison des caractéristiques entre la loi de GUMBEL et l'échantillon.

Paramètres	Caractéristiques de l'échantillon	Caractéristiques de la loi
Minimum	None	0.8
Maximum	None	242
Moyen	35.8	35.8
Écart type	36.1	36.1
Médian	29.9	30
Cv	1.01	1.01
Cs	1.14	4.64
Ck	2.4	24.9

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

Une variable aléatoire *X* est considérée comme suivant une distribution log-normale lorsque la variable *v*, qui représente le logarithme naturel de x (c'est-à-dire v=ln*x*), suit une distribution normale. La loi de Galton, qui est une variante de la loi normale, devient asymétrique après une transformation de variable.L'ajustement des données à la loi log-normale a été effectué à l'aide du logiciel HYFRAN. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.18: Résultats d'ajustement à la loi de Log normal.

Période de retour	Probabilité de fréquence	Débit max jour	Écart type	Intervalle de confiance
1000	0.999	469	163	150 – 789
100	0.99	229	63.7	104 – 354
50	0.98	177	45.2	88.9 – 266
20	0.95	121	26.7	68.4 – 173
10	0.9	85.9	16.7	53.2 – 119
5	0.8	56.8	9.49	38.2 - 75.4
2	0.5	25.8	3.69	18.5 - 33.0

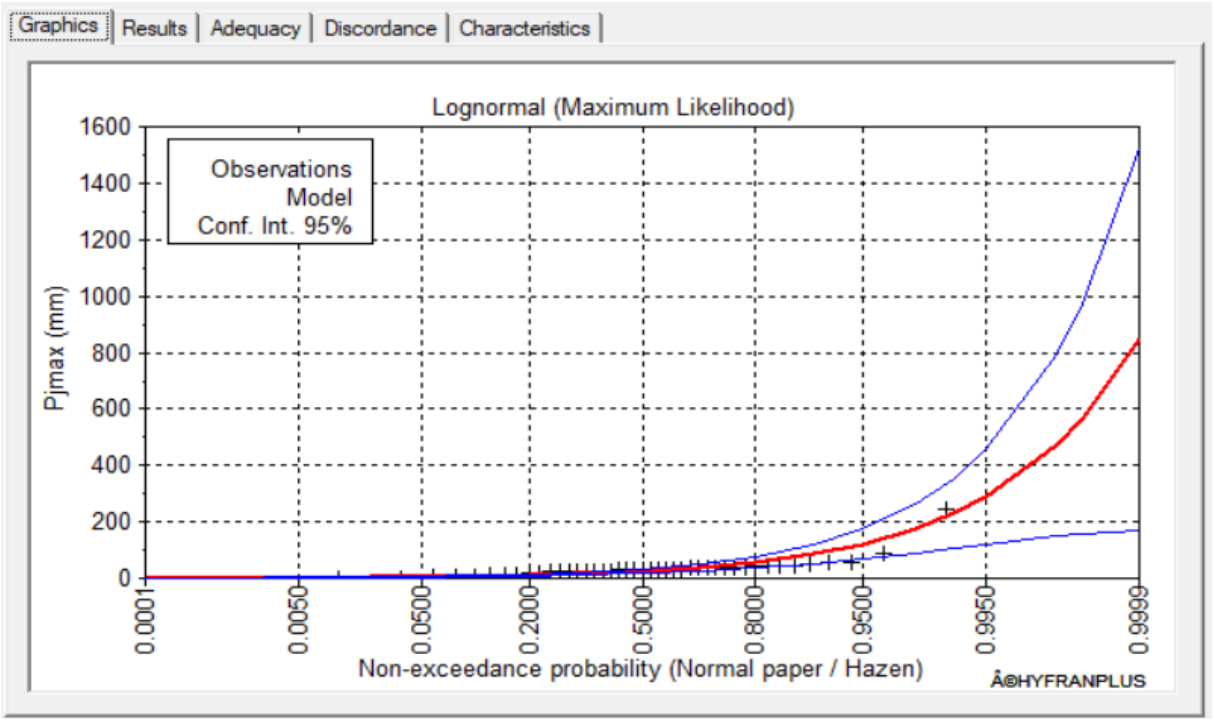


Figure II.7 : Graphique d'ajustement à la loi de Log normal de la station 111412

Voici une comparaison des propriétés de la loi log-normale et de l'échantillon, illustrée dans le tableau suivant :

Tableau III.19: Comparaison des caractéristiques de la loi de Log normal et de l'échantillon.

Paramètres	**Caractéristiques de l'échantillon**	**Caractéristiques de la loi**
Minimum	0	0.8
Maximum	None	242
Moyen	40.1	35.8
Écart type	47.7	36.1
Médian	25.8	30
Cv	1.19	1.01
Cs	5.25	4.64
Ck	76.7	24.9

Comparaison entre les deux Lois d'ajustement :

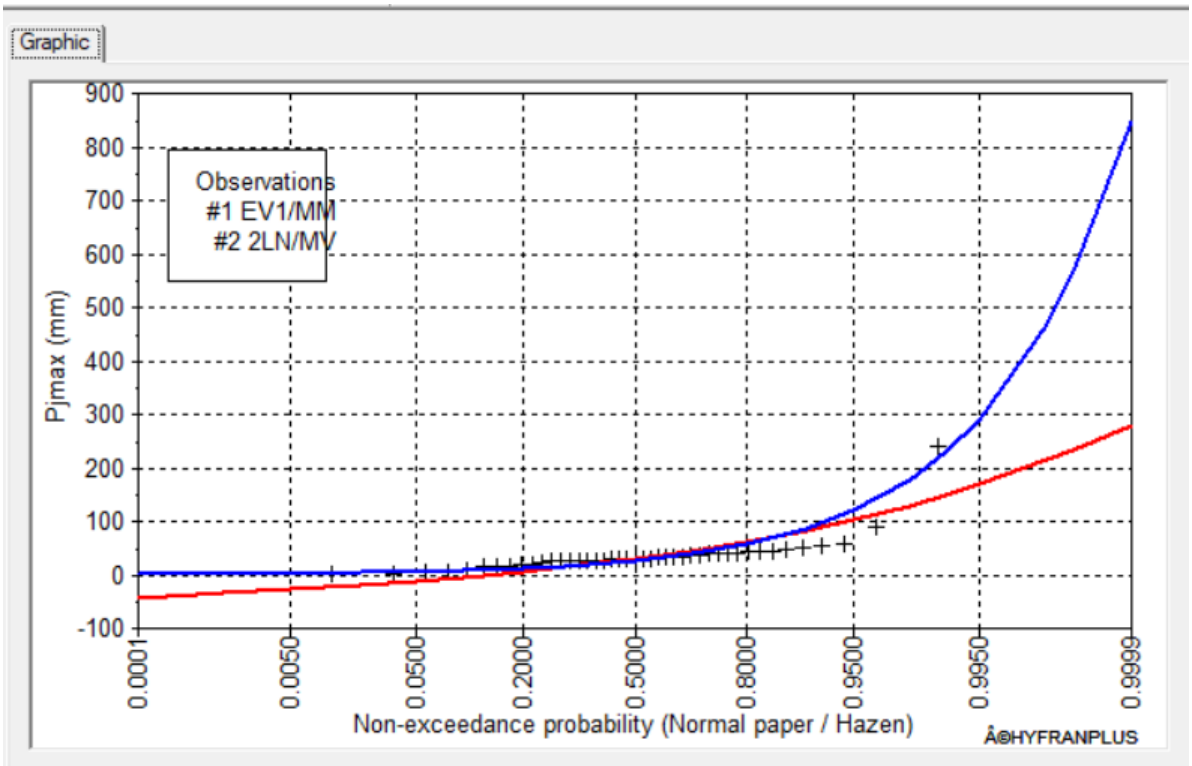


Figure II.8 : Comparaison entre les deux lois d'ajustement de la station 111412.

II.2.1.3 Choix de la loi d'ajustement :

Il est inévitable de constater des différences entre les fréquences expérimentales des valeurs observées et celles dérivées d'une fonction de distribution arbitraire. Bien que l'ajustement graphique constitue une étape préliminaire importante, il ne suffit pas à lui seul pour déterminer de manière définitive la loi théorique à adopter. Le test statistique d'adéquation est une méthode permettant de comparer la pertinence de plusieurs lois afin de sélectionner celle qui offre le meilleur ajustement. Parmi les tests les plus fréquemment utilisés, on retrouve le test du chi-carré (χ^2).

➢ **Le test d'adéquation de χ 2**

L'objectif d'un test d'adéquation, également connu sous le nom de test d'ajustement, est de vérifier si le modèle choisi correspond bien aux données observées. Plus précisément, il s'agit de mettre en place une procédure de test pour valider l'hypothèse selon laquelle les observations proviennent d'une loi particulière. Dans ce contexte, le test du chi-carré (χ^2) est le plus fréquemment utilisé.

Pour choisir la loi appropriée, nous comparons les valeurs de χ^2 calculées avec celles théoriques (tabulées) à un niveau de risque de 5 %, ce qui correspond à un seuil de confiance de 95 %.

Cette comparaison permet d'évaluer si les écarts entre les fréquences empiriques et théoriques sont statistiquement significatifs. Si la valeur χ^2 calculée dépasse la valeur χ^2 théorique, cela indique un écart significatif entre les données observées et la distribution théorique envisagée. La valeur χ^2 théorique est obtenue à partir de la table de χ^2 en fonction des paramètres γ et α.

Le test du chi-carré (χ^2) est généralement appliqué avec un seuil de signification α fixé à 5 % et un degré de liberté γ (Touaibia, 2015).

Si $\chi 2$ calculée > $\chi 2$ théorique (tabulé) : On refuse la loi d'ajustement.

Si $\chi 2$ calculée $\leq \chi 2$ théorique (tabulé) : La loi d'ajustement sera retenue.

Les résultats du test du chi carré χ 2 ont été obtenus à l'aide du logiciel HYFRAN Plus et sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II.20 : Résultats du test de $\chi 2$.

Loi de distribution	Degré de liberté γ	Nombre de classe	$\chi 2$ calculée	$\chi 2$ théorique (tabulé)
Gumbel	6	9	44.28	14.45
LogNorm	6	9	13.74	14.45

D’après les résultats du test du chi-carré et du test d’ajustement, il apparaît que la série des débits maximaux annuels s’ajuste de manière appropriée à la loi **Log Normale.**

II.2.2 Estimation des débits maximums fréquentiels à l'aide de la méthode GRADEX :

La méthode du Gradex est considérée comme étant une approche hydro pluviométrique probabiliste inhérente au calcul des débits de crues extrêmes d’un cours d’eau pour des périodes de retour allant de 100 à 10000 ans, elle est développée par *(Guillot & Durand, 1969).*

La méthode du GRADEX, en s’appuyant sur l’information pluviométrique, constitue une amélioration substantielle des méthodes de prédétermination des crues basées sur le traitement statistique des seules valeurs de débits observés *(Garavaglia, 2011).*

1. Hypothèses de la méthode :

Le postulat de base de la méthode est l'existence d'une relation entre la distribution des débits et celle des pluies génératrices. Cette méthode repose sur trois hypothèses suivantes *(Meddi et Zeroual, 2018)* **:**

Hypothèse N° 1 : La distribution des précipitations sur le bassin est asymptotiquement décrite par une loi de Gumbel ou une loi exponentielle, selon la méthode d'échantillonnage utilisée. Le Gradex représente la pente de la courbe de distribution sur un graphique qui montre les précipitations en fonction du logarithme de la période de retour.

Hypothèse N° 2 : Le déficit d'écoulement, défini comme la différence entre le volume d'eau précipité et celui écoulé à l'exutoire du bassin versant sur une période de temps donnée, cesse d'augmenter en moyenne au-delà d'une certaine valeur de pluie. En d'autres termes, au-delà d'un certain seuil de saturation du bassin versant, la distribution du déficit d'écoulement ne dépend plus de la valeur de la pluie ou du débit. Graphiquement, cette hypothèse se traduit par un parallélisme entre la fonction de répartition des précipitations et celle des écoulements sur une période de temps donnée, à partir d'un point pivot fixé généralement entre 10 et 50 ans selon le bassin versant étudier.

Hypothèse N° 3 : Indépendamment de sa fréquence ou de sa durée de retour, le débit de crue de pointe (valeur maximale observée) peut être déterminé à partir du volume d'eau écoulé (sur la période de temps considérée), en utilisant un coefficient de multiplication moyen spécifique au bassin versant. Ce coefficient, également connu sous le nom de coefficient de forme ou de coefficient d'affinité, peut être estimé à partir des hydrogrammes des crues enregistrées sur le bassin versant.

II.2.2.1 Les phases de la méthode :

Ajuster par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières**.**

Calculer le Gradex des précipitations a (pente de la droite de Gumbel).

$$P(mm) = a * \mu + b. \qquad \text{(II-23)}$$

Ajustement des débits observés à la loi de Gumbel pour déterminer le débit décennal (point pivot de l'extrapolation des débits). Exprimer le débit décennal en termes de lame d'eau équivalente par la formule :

$$R(mm) = \frac{Q(\frac{m3}{s}) * 3{,}6 * n\ (heurs)}{S(Km_2)} \quad \text{(II-24)}$$

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

$$Q(\mu\%) = a * \mu + b' \quad \text{(II-25)}$$

Avec :

a : Gradex de la pluie.

μ : Variable réduite de Gumbel.

Et :

$$\mu = -ln(-ln(F)) \quad \text{(II-26)}$$

$$F = \frac{1}{1-T} \quad \text{(II-27)}$$

Pour T=10ans :

$$b' = Q10ans - a\mu. \quad \text{(II-28)}$$

- Calcul du débit de pointe

$$Cp = \frac{Qmax}{Qmoy} \quad \text{(II-29)}$$

Ainsi :

$$Qp = Cp * Q \quad \text{(II-30)}$$

Sélectionner une durée de pas de temps n heures (habituellement équivalente à la moyenne des intervalles de temps de base des hydrogrammes de crues disponibles). Pour des raisons pratiques, une valeur arrondie est souvent retenue, comme 2, 4, 6... jusqu'à 48 heures. Les débits

de pointe résultants sont relativement insensibles à n ; il est simplement crucial de ne pas commettre d'erreur significative dans l'ordre de grandeur de n.

III.2.2.2 Application de la méthode de GRADEX

On a pris trois stations pluviométriques pour les observations des séries de pluies maximales journalières.

Tableau II.21: Caractéristique des stations pluviométriques (Source : ANRH).

Station	Code	Coordonnées		Nombre d'années
		Latitude	Longitude	
Maoussa	111401	35.20°N	0.13°E	35
Frouha	111402	35.24°N	0.13°E	33
Matmore	111405	35.02°N	1.47°O	37

Tableau II.22: Précipitations maximales journalières de la station pluviométrique de la station de Maoussa 111401 (Source : ANRH).

Année	Pjmax (mm)	Année	Pjmax (mm)
1974	47.8	2003	23.3
1975	45.6	2004	24.6
1977	26.8	2005	44.3
1980	26.9	2006	22.1
1985	35.8	2007	40
1986	24.6	2008	32.3
1987	33.4	2009	34.7
1988	35.7	2010	37.1
1989	17.2	2011	39.2
1990	32.1	2012	35.4
1993	59	2013	26.7
1994	45.6	2014	18.7
1996	32.1	2015	26.5

1997	31.8	2016	33.6
1998	24.2	2017	37.2
1999	16.5	2018	27.6
2000	34.1		
2001	30.8		
2002	36		

- Nombres d'heures : n = 2 h.
- Ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de la station de Maoussa 111401.

Tableau II.23: Résultats d'ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de la station de Maoussa 111401.

Période de retour	**Probabilité de fréquence**	**Débit max jour**	**Ecart type**	**Intervalle de confiance**
1000	0.999	145	32	82.0 – 208
100	0.99	106	18.7	69.0 – 142
50	0.98	94.3	15.3	64.4 – 124
20	0.95	79.6	11.2	57.7 – 102
10	0.9	68.5	8.44	52.0 - 85.1
5	0.8	57.1	6.04	45.3 - 69.0
2	0.5	40.3	3.64	33.2 - 47.5

- L'équation de la droite de Gumbel pour la station pluviométrique de Maoussa en utilisant le logiciel Hyfran-Plus sont données ci-dessous :

$$P(mm) = 9.05\mu + 28.7 \qquad \text{(II-31)}$$

Avec :

Le Gradex ‘a’ : a= 9.05

b= 28.7

- Le débit décennal de la station hydrométrique de 111412 est :

$\boldsymbol{Q_{10ans}}$ = 82.9m^3/s

- On exprimer le débit décennal en lame d’eau équivalente :

$$R(mm) = \frac{Q(^{m3}_{s}) * 3{,}6 * n\ (heurs)}{S(Km2)} \qquad \text{(II-32)}$$

R(mm) = 160.6 mm/24h

- Étendre la distribution des débits au-delà de 0.9 (T=10 ans) en utilisant une droite ayant une pente équivalente au Gradex de la pluie :

$Q_{10ans} = a * \mu + b'$ ⟶ $b' = Q_{10ans} - a * \mu$

$\mu_{10} = -\ln(-\ln(F)) = -\ln(-\ln(0.9)) = 2.25$ ⟶ $\mu_{10\,ans} = 2{,}25$

Alors :

$b' = 140.18$

Donc :

$\boldsymbol{Q\mu_{\%}} = 9.05\ \mu + 140.18$

Tableau II.24: : Résultat de calcul pour la station de Maoussa pour les différentes périodes de retour.

Temps de retour (ans)	Fréquence empirique selon Hazen	u	Précipitation	Débits moyen (mm/24h)	Débits moyen (m3 /s)	Débits de Point
10	0.900	2.25	73.3	160.6	83	116
20	0.950	2.97	86.0	173.2	89	125
50	0.980	3.90	102.4	189.7	98	137
100	**0.990**	**4.60**	**114.7**	**202.0**	**104**	**146**
1000	0.999	6.91	155.4	242.6	125	175

- On applique les mêmes étapes de la méthode de GRADEX sur les autres stations

Tableau II.25: Résultats de l'ajustement des stations prises.

Période de retours (ans)	Station hydrométrique Gheris	Stations pluviométriques		
		Maoussa	**Frouha**	**Matmore**
10	116	116	116	116
20	125	125	121	122
50	136	137	127	130
100	**145**	**146**	**131**	**137**
1000	165	175	142	151

✓ La station pluviométrique donne le plus grand débit qui est de 146 m^3/s, on le prend donc comme débit du projet.

III.2.3 L'hydrogramme de crue :

Un hydrogramme est une courbe qui représente l'évolution des débits en fonction du temps pendant une crue. Il permet d'estimer diverses caractéristiques relatives à la crue, telles que sa

forme, son volume, le temps de montée et le temps de base. Pour tracer l'hydrogramme, on utilise la méthode de Sokolovsky (Touaibia, 2015). Cette approche consiste à construire une courbe à l'aide de deux équations paraboliques : l'une pour modéliser la montée de la crue et l'autre pour sa décrue.

- **Branche de crue (montée) :**

$$Q(t) = Q_{max} * \left(\frac{Tm}{Tc} \right) \qquad \text{(II-32)}$$

Tm = Tc (pour les petits bassins versants).

Avec :

Tc : qui est le temps de concentration du bassin versant (heures).

Q_m : Débit instantané de montée (m3/s).

- **Branche de décrue (descente) :**

$$Q(t) = Q_{max} * \left(\frac{Tb - Tm}{Td} \right) \qquad \text{(II-33)}$$

Avec :

Q(t) : Débit à l'instant t (m3/s).

Q_{max} : Débit maximal de la crue (m3/s).

-Tm : temps de montée (h)

$$\boldsymbol{Tm = Tc} \qquad \text{(II-34)}$$

- Td : temps de décrue (h)

$$\boldsymbol{Td = \delta \times Tm} \qquad \text{(II-35)}$$

- Tb : temps de base (h)

$$\boldsymbol{Tb = Tm + Td} \qquad \text{(II-36)}$$

- m,n : puissances des paraboles (m=3 ; n=2)

Tableau II.26: Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue "δ".

Description du cours d'eau	**Valeur de "δ"**
Petits ruisseaux et vallées dans des bassins versants sans végétation et peu perméables.	2,0 – 2,5
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants brisés ou perméables, moyens cours d'eau avec terrasses de lit majeur normales	3,0 – 4,0
Rivières de taille moyenne à grande, avec des plaines d'inondation étendues.	4,0 – 7,0

Tableau II.27: Paramètres de calcul de l'hydrogramme de crue.

Paramètre	**Unités**	**Valeur**
Tc	Heures	1.51
Tm	Heures	1.51
Td	Heures	3.02
Tb	Heures	4.53
m	/	3
n	/	2
δ	/	2

Le tableau suivant présente l'hydrogramme de crue pour période de retour 100 ans les différentes stations :

Tableau II.28: Valeurs du débits centennales en fonction du temps pour la zone d'étude.

Temps	Période de retour 100 ans		
	Station hydrometrique	Stations pluviométrique	
	Gheris	Frouha	Maoussa
	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)
0	0	0	0
0.1	0.363580545	0.574536205	0.640322793
0.2	1.454322179	2.298144818	2.561291171
0.3	3.272224902	5.170825841	5.762905136
0.4	5.817288715	9.192579273	10.24516469
0.5	9.089513618	14.36340511	16.00806982
0.6	13.08889961	20.68330336	23.05162054
0.7	17.81544669	28.15227402	31.37581685
0.8	23.26915486	36.77031709	40.98065874
0.9	29.45002412	46.53743257	51.86614622
1	36.35805447	57.45362046	64.03227929
1.1	43.99324591	69.51888075	77.47905794
1.2	52.35559844	82.73321346	92.20648217
1.3	61.44511206	97.09661857	108.214552
1.4	71.26178676	112.6090961	125.5032674
1.5	81.80562256	129.270646	144.0726284
1.51	**82.9**	**131**	**146**
1.6	75.70709165	119.633643	133.3321518
1.7	68.21706155	107.7977692	120.1410252
1.8	61.23809086	96.76948013	107.849955
1.9	54.75212094	86.52023936	96.427137
2	48.74109315	77.02151029	85.84076719
2.1	43.18694887	68.24475635	76.05904143
2.2	38.07162944	60.16144098	67.05015559
2.3	33.37707625	52.7430276	58.78230557
2.4	29.08523064	45.96097966	51.22368725

2.5	25.17803399	39.78676058	44.34249652
2.6	21.63742765	34.1918338	38.10692927
2.7	18.44535299	29.14766275	32.48518139
2.8	15.58375138	24.62571087	27.44544876
2.9	13.03456418	20.59744159	22.95592727
3	10.77973275	17.03431834	18.98481281
3.1	8.80119846	13.90780456	15.50030127
3.2	7.080902665	11.18936368	12.47058853
3.3	5.600786734	8.850459134	9.863870485
3.4	4.34279203	6.862554354	7.64834302
3.5	3.288859916	5.197112775	5.792202024
3.6	2.420931757	3.82559783	4.263643383
3.7	1.720948915	2.719472954	3.030862986
3.8	1.170852755	1.850201579	2.062056721
3.9	0.75258464	1.189247139	1.325420475
4	0.448085933	0.708073067	0.789150136
4.1	0.239298	0.378142798	0.421441592
4.2	0.108162202	0.170919765	0.19049073
4.3	0.036619905	0.057867401	0.064493439
4.4	0.006612471	0.010449139	0.011645606
4.5	8.12639E-05	0.000128415	0.000143119
4.53	0	0	0

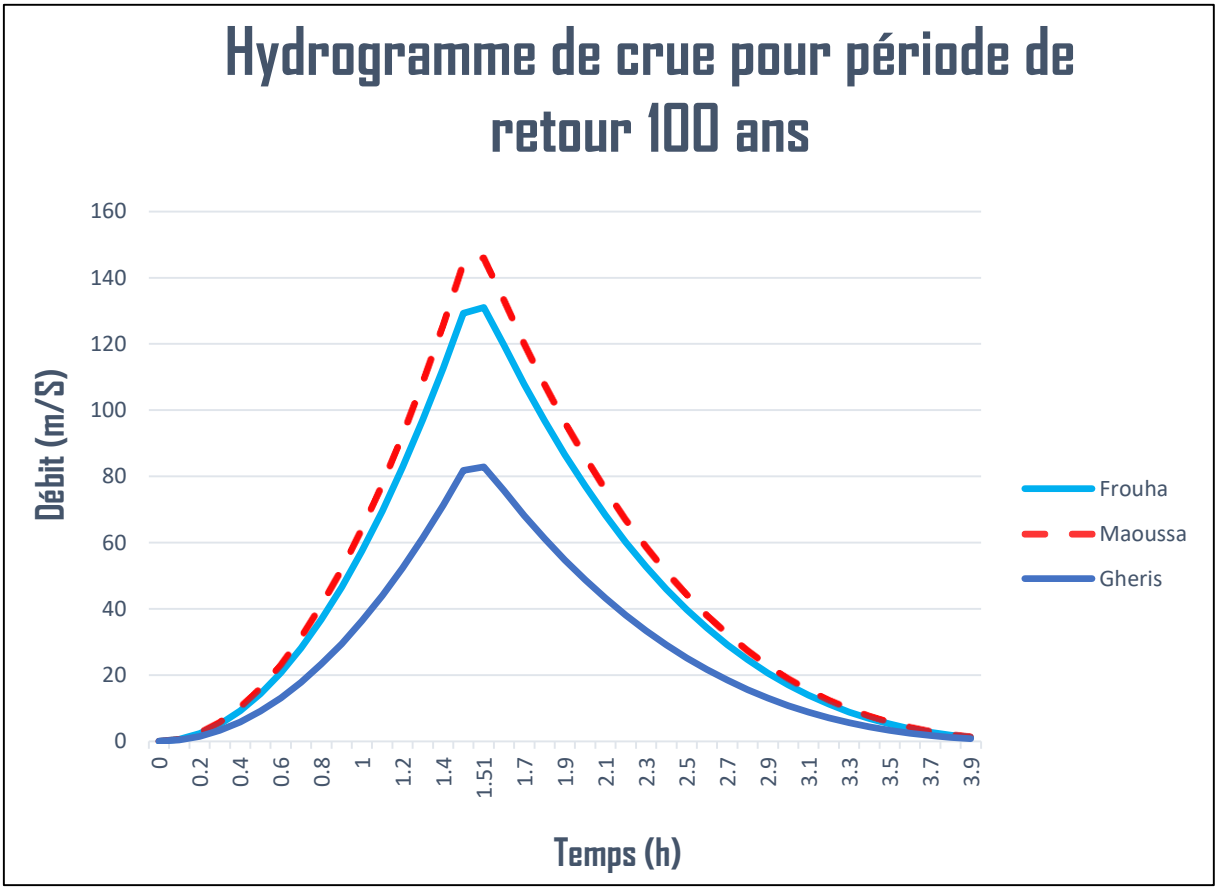


Figure II.9: Hydrogramme de crue pour période de retour 100 ans pour les différentes stations.

II.2.4 Choix de la crue du projet :

La crue de projet est définie comme la crue maximale que la structure doit être capable de gérer, en fonction d'une probabilité spécifique. Le choix de cette crue repose principalement sur l'importance de la structure à construire, les conséquences potentielles en aval, ainsi que sur des considérations techniques et économiques liées à l'aménagement et à l'environnement.

Dans le cadre de notre initiative de lutte contre les inondations, nous avons retenu une période de retour de 100 ans. Par conséquent, nous avons décidé d'adopter un débit de conception de 146 m^3/s

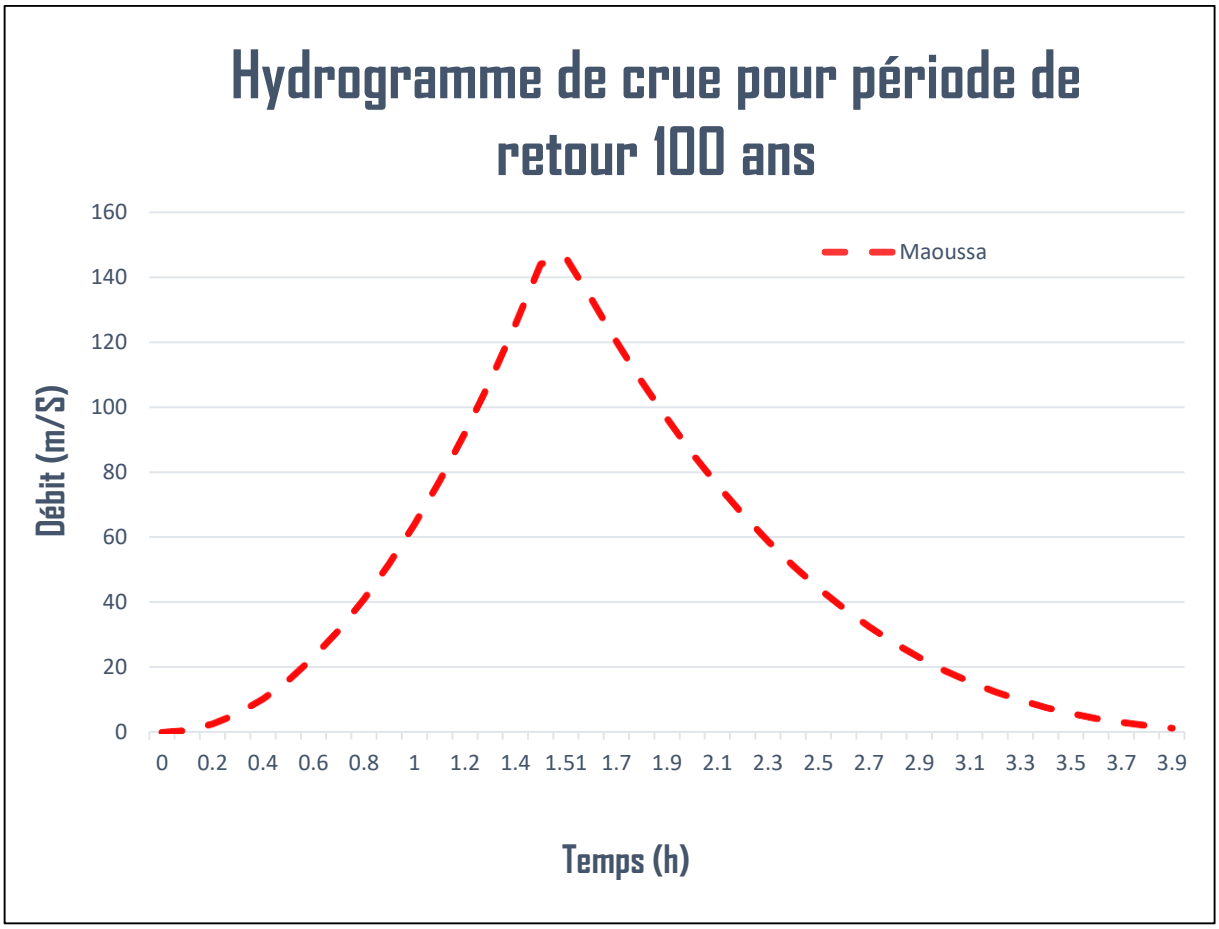


Figure II.10 : Hydrogramme de crue du projet pour la station pluviométrique Maoussa 111401

Conclusion

Ce chapitre vise à identifier les paramètres hydrologiques nécessaires à l'aménagement de l'Oued Maoussa, dans le but de protéger les villes d'Oued Maoussa. Pour cette étude hydrologique, nous avons exploité les données fournies par la station hydrométrique ainsi que celles des stations pluviométriques situées dans le bassin versant de l'Oued Maoussa. En appliquant la méthode GRADEX, nous avons déterminé le débit centennal des crues. En conclusion, nous avons retenu un débit de projet de 146 m³/s.

Chapitre III : Diagnostic et modélisation du cours d'eau.

Introduction

Avant de commencer tout projet d'aménagement, il est crucial de mener une étude hydraulique approfondie. Cette démarche implique une analyse détaillée des écoulements dans les canaux, qu'ils soient naturels ou artificiels, ainsi qu'une évaluation des risques d'inondation.

La prévention des inondations devient particulièrement importante lorsque les niveaux d'eau montent et que les débits sont élevés. La conception des infrastructures de protection contre les crues se concentre généralement sur la gestion des hauteurs d'eau, tout en tenant compte des problèmes d'érosion.

La modélisation hydraulique vise à prédire numériquement l'évolution des caractéristiques hydrauliques lors d'une crue, telles que les débits, les vitesses d'écoulement et les niveaux d'eau. Cette approche permet d'identifier les zones à risque d'inondation, de calculer les temps d'immersion et d'estimer la montée des eaux. Il est important de souligner que les modèles hydrauliques représentent des simplifications schématiques des systèmes réel

Généralités

L'étude des écoulements naturels s'inscrit dans le domaine de l'hydraulique à surface libre, qui se distingue de l'hydraulique en charge par la présence d'une surface libre exposée directement à l'atmosphère. Dans ce contexte, la gravité est le principal moteur de l'écoulement, contrairement aux écoulements en charge où c'est le gradient de pression qui domine. Ces écoulements sont donc qualifiés d'écoulements gravitaires.

Une caractéristique fondamentale de ces écoulements est la faible profondeur de l'eau par rapport à la longueur de l'écoulement, que ce soit pour une rivière ou une conduite. Les écoulements à surface libre et leurs applications sont variés, englobant non seulement les rivières et les cours d'eau, mais aussi les écoulements dans des conduites partiellement remplies, comme dans les systèmes d'irrigation ou d'assainissement.

Pour modéliser ces écoulements, il est nécessaire de diviser le domaine global en deux sous-domaines non miscibles, séparés par une interface claire représentant la surface libre. Le premier sous-domaine est constitué d'un volume d'eau, tandis que le second, situé au-dessus, est rempli d'air.

III.1 Rappel de quelques notions :

III.1.1 Paramètres Hydraulique :

- Débit : Le débit est la mesure de la quantité d'eau qui s'écoule à travers un canal sur une période déterminée. C'est un paramètre crucial pour évaluer le volume d'eau circulant dans un système hydraulique. Il est généralement exprimé en mètres cubes par seconde (m^3/s) ou en litres par seconde (l/s).

- Vitesse de l'écoulement (V) : La vitesse d'écoulement indique la rapidité avec laquelle l'eau se déplace à travers un système. Cette vitesse peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que la forme du canal, la pente et la rugosité de la surface. Son évaluation est essentielle pour analyser les performances hydrauliques et le transport des sédiments. En général, elle est exprimée en mètres par seconde (m/s) .

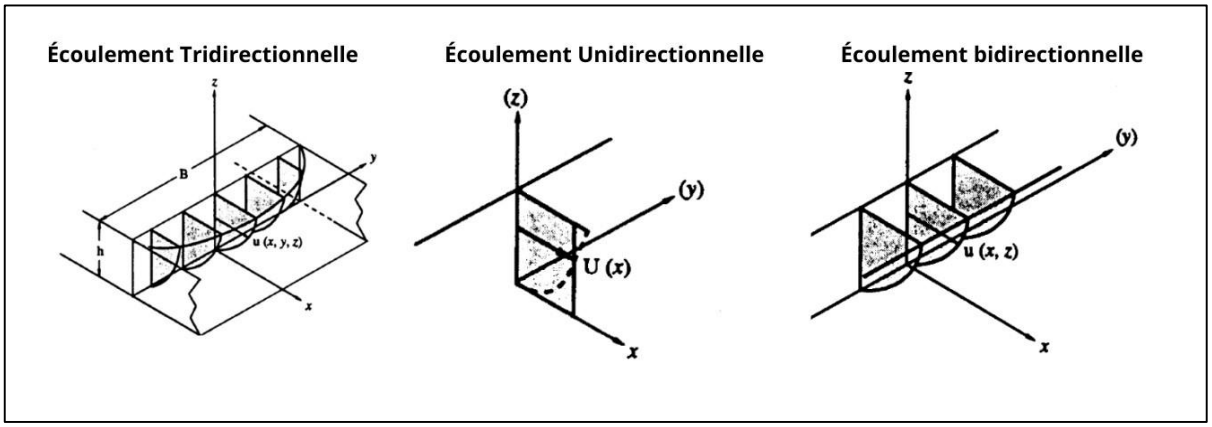


Figure III.1 : Schéma représente la dimensionnalité et directionnalisé de l'écoulement (Source : Roland O. YONABA - 2015).

-Pente hydraulique (i) : La pente fait référence à l'inclinaison du terrain sur laquelle l'eau s'écoule. Elle influence la vitesse de l'écoulement et est utilisée pour évaluer les caractéristiques et les performances hydrauliques d'un système. Cette mesure est généralement exprimée en pourcentage.

On calcule la pente par la relation suivante :

$$I = \frac{\Delta Z}{L} \qquad \text{(III-1)}$$

Avec :

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

L : la longueur.

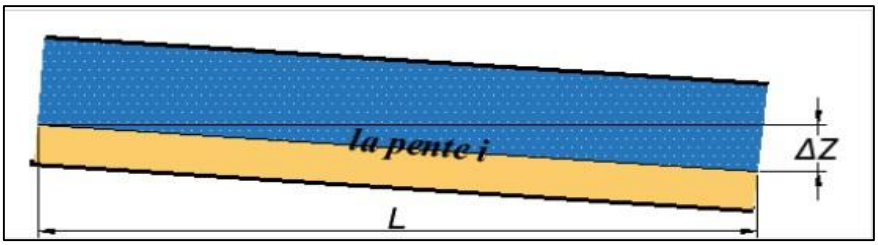


Figure III.2 : Schéma représente la pente.

-Le coefficient de Manning (n) : est un paramètre qui définit la rugosité de la surface d'écoulement ou du lit d'un cours d'eau. Ce coefficient est généralement déterminé par des expérimentations sur différentes surfaces telles que le béton, l'herbe et les graviers. Il est symbolisé par "n" et est adimensionnel.

-La pression : quant à elle représente la force exercée par l'eau sur une surface spécifique. Elle est couramment exprimée en pascals (Pa) ou en bars. À la surface libre d'un canal, la pression est approximativement équivalente à la pression atmosphérique, soit environ 1 bar.

- **Poids volumique γ_w :** Le poids volumique de l'eau est noté :

$$\gamma w = g . \rho w \qquad \text{(III-2)}$$

Avec :

ρ_w : La densité de l'eau est de 1000 kg/m³.

g : désigne l'accélération de la pesanteur et vaut 9.81 m/s^2.

III.1.2 Paramètres géométriques

• **Hauteur normale hn :** C'est la hauteur d'un écoulement permanent uniforme dans un bief. La hauteur normale est fonction du débit Q, de la rugosité K, et de la pente moyenne.

• **Largeur au miroir (B)** : C'est la distance horizontale entre les parois du canal mesurée à la surface de l'eau, elle exprimé en mètres.

• **Périmètre mouillé (P)** : C'est la longueur du contour de la section transversale du canal en contact avec l'eau.

• **Surface mouillée transversale (S)** : C'est l'aire de la section transversale du canal occupée par l'eau.

- **Rayon hydraulique :** C’est la longueur caractéristique est noté :

- **Pente longitudinale (i)** : La pente longitudinale désigne l'inclinaison du fond du canal dans la direction de l'écoulement.

- **Largeur au fond (b)** : Il s'agit de la distance horizontale entre les deux parois ou bords inférieurs d'un canal.

- **Lit mineur** : Ce terme fait référence au lit habituel d'un cours d'eau, en opposition au lit majeur, qui représente l'empreinte maximale historique du cours d'eau ou la plaine inondable. Le terme "niveau des plus hautes eaux" (PHE) est également utilisé pour décrire la cote maximale atteinte par la surface libre d'un cours d'eau.

- **Lit majeur** : Ce terme désigne la zone occupée par le cours d'eau lors des périodes de crue, englobant les zones inondées. Le lit d'étiage, ou chenal d'étiage, désigne quant à lui la partie du cours d'eau occupée pendant les périodes d'étiage, lorsque le débit est au plus bas.

- **Tirant d’eau** : Cela correspond à la profondeur maximale d'un section d'écoulement

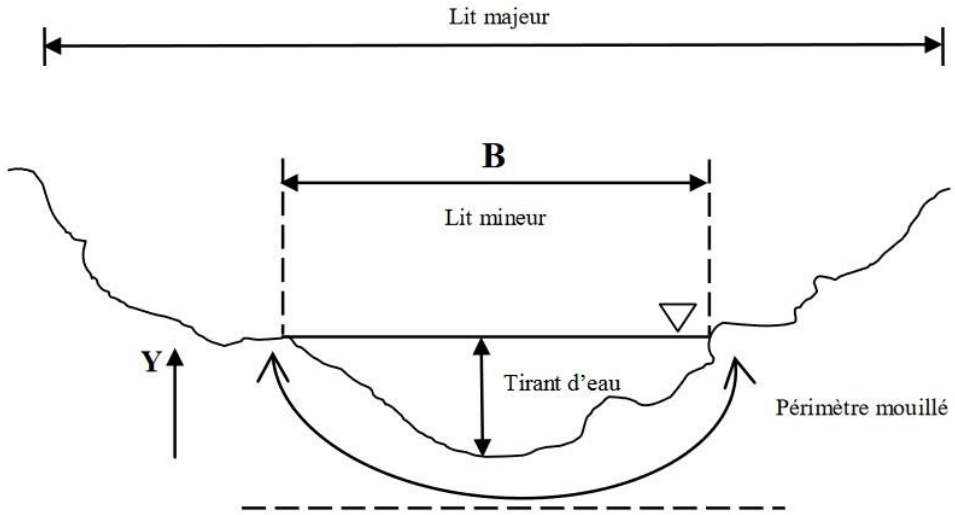


Figure III.3 : Coupe transversale d'un canal naturel.

III.2 Type d'écoulement

III.2.1 Variable dans le temps

- **Écoulement stationnaire (permanent)**

Un écoulement est dit permanent lorsque les vitesses moyennes et ponctuelles (V et U), ainsi que la profondeur (h), restent constantes dans le temps et à tous les points de l'espace, quelle que soit la direction. En conséquence, le débit reste constant entre les différentes sections du canal, sans apport latéral.

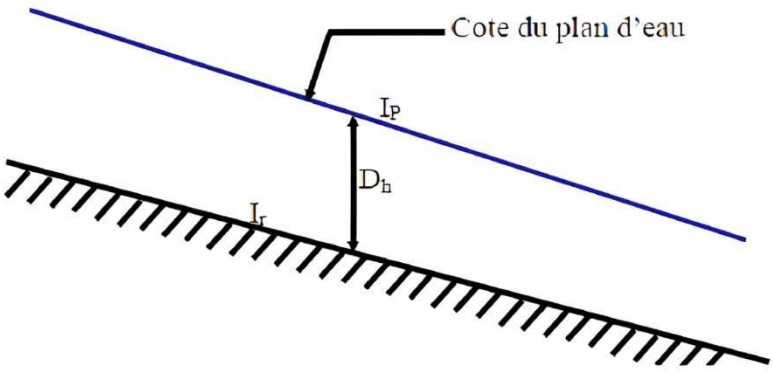


Figure III.4 : Écoulement permanent.

- **Écoulement non stationnaire (non permanent) :**

Un écoulement est qualifié de non permanent lorsque la profondeur de l'eau (h) et d'autres paramètres, tels que les vitesses moyennes (V) et ponctuelles (U), varient dans le temps. Cela entraîne une instabilité du débit, qui fluctue au fil du temps.

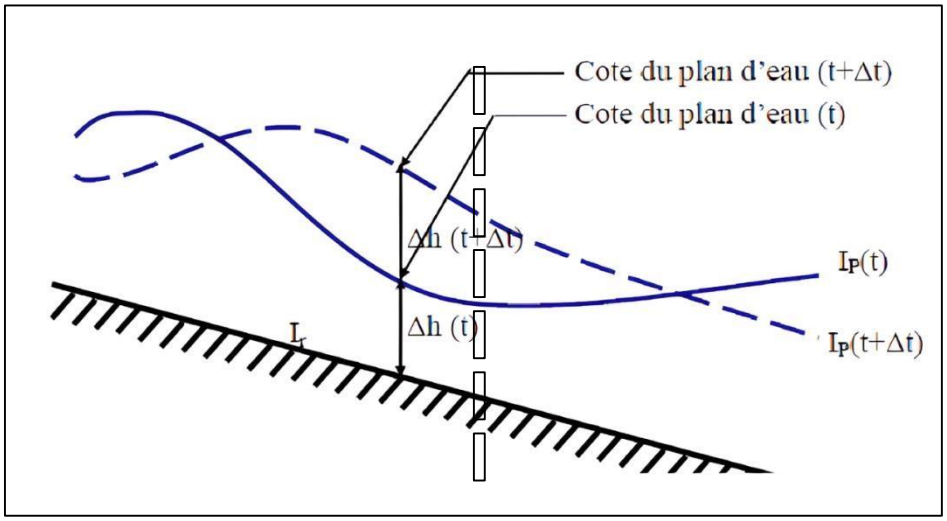


Figure III.5 : Écoulement non permanent. .

III.2.2 Variabilité dans l'espace :

-On considère qu'un écoulement est uniforme lorsque la profondeur, la pente, la vitesse et la section transversale demeurent constantes sur une distance spécifique du canal.

Écoulement non uniforme : Dans ce cas, la vitesse et la profondeur du fluide varient le long du cours d'eau.

-Pour un écoulement non uniforme graduellement varié, les variations de profondeur et de vitesse se produisent progressivement le long du canal.

-En revanche, dans un écoulement non uniforme rapidement varié, les changements de profondeur et de vitesse se produisent rapidement et de manière brusque le long du canal.

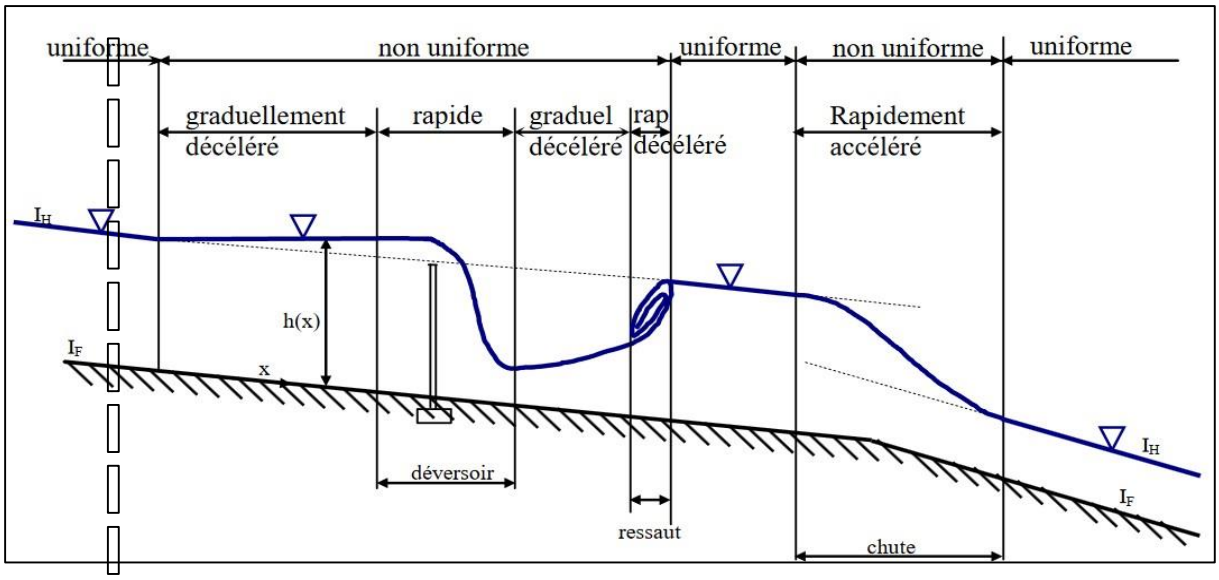


Figure III.6 : Diagramme représentant les divers types d'écoulements.

III.3 Régime d'écoulement :

Un écoulement peut être catégorisé en différents types en fonction du nombre de Froude, qui prend en compte les forces d'inertie et les forces gravitationnelles. *(Lancastre,1996).*

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

Écoulement fluvial $F_r < 1$

Écoulement torrentiel $Fr > 1$

Écoulement critique $F_r = F_{rc} = 1$

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

Lorsque :

$Y_n < Y_c$: écoulement uniforme torrentiel.

Yn > Yc : écoulement uniforme fluvial.

Par conséquent, les effets du nombre de Reynolds $R_{e'}$, et du nombre de Froude, F_r, donnent quatre régimes d'écoulement.

Le rôle du nombre de Reynolds est de permettre le classement des écoulements comme suit :

Re < 500 : écoulement laminaire.

Re > 2000 : écoulement turbulent.

500 < Re < 2000 : écoulement de transition

Donc la combinaison des deux nombres donne la classification suivante :

Fr < 1 et Re < 500 : écoulement fluvial-laminaire.

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

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

Fr > 1 et Re > 2000 : écoulement torrentiel-turbulent.

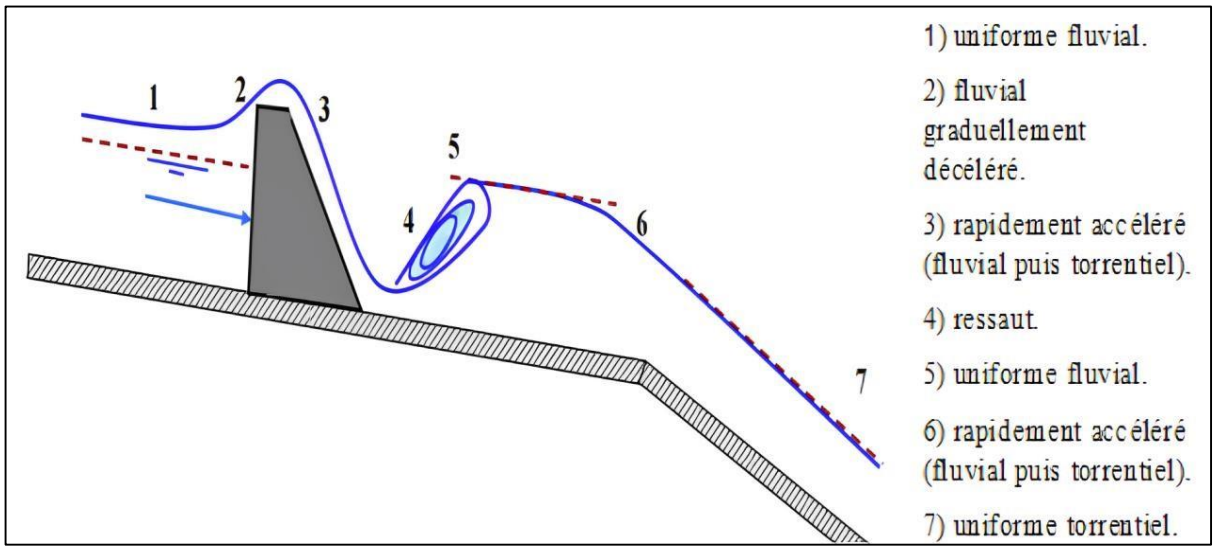


Figure III.7: Diagramme illustrant les divers types de régimes d'écoulement.

Dans les oueds et les rivières, l'eau s'écoule généralement à ciel ouvert, en surface, et est influencée par divers facteurs tels que la pente, la géométrie du canal et la rugosité du profil hydraulique. En fonction de leur aménagement, on distingue deux types de cours d'eau :

Les canaux naturels

Les canaux naturels désignent les cours d'eau qui se forment naturellement sur ou sous terre, tels que les ruisseaux, les torrents, les rivières, les fleuves et les estuaires. Leurs caractéristiques géométriques et hydrauliques sont souvent assez irrégulières.

Les canaux artificiels

Les canaux artificiels, quant à eux, sont des cours d'eau créés par l'homme. Ils incluent des canaux découverts (comme ceux utilisés pour la navigation, l'adduction d'eau, l'évacuation, l'irrigation et le drainage) ainsi que des canaux couverts (comme les tunnels hydrauliques, aqueducs, drains et égouts).

Ces deux types de cours d'eau jouent un rôle crucial dans la gestion des ressources en eau et l'aménagement du territoire.

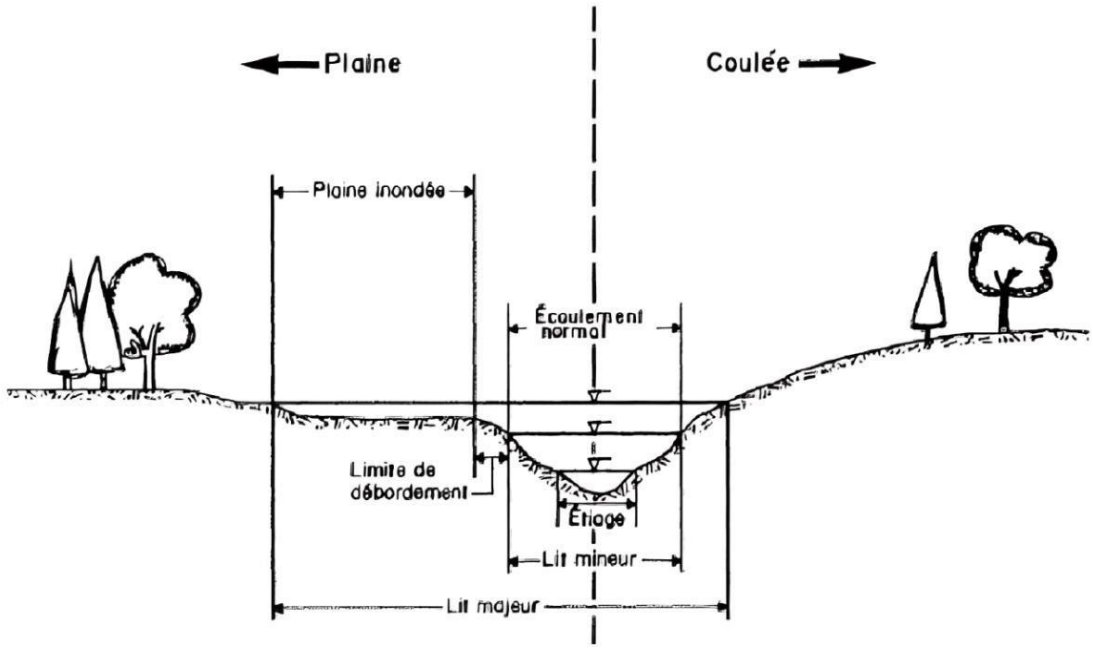


Figure III.8 : Cours d'eau dans son environnement (Source : Dr Habibi Brahim - 2013).

IV.4.2 Les canaux artificiels

Les canaux artificiels sont des cours d'eau créés par l'activité humaine, comprenant des canaux découverts construits au niveau du sol, utilisés pour la navigation, l'approvisionnement en eau, le drainage et l'irrigation, ainsi que des canaux couverts où les liquides ne remplissent pas toute la section, comme les tunnels hydrauliques, aqueducs, drains et égouts. Les caractéristiques

hydrauliques de ces canaux sont généralement uniformes, et l'application des principes de l'hydraulique conduit souvent à des résultats satisfaisants

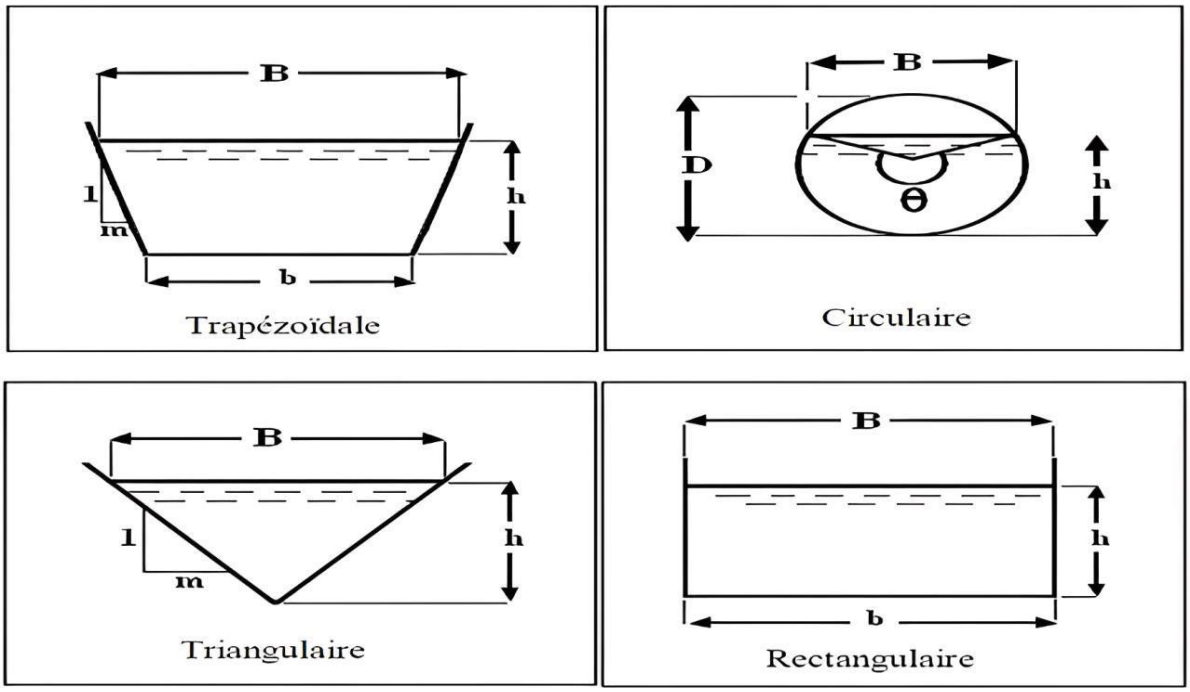


Figure III.9 : Canaux artificiels (Source : TOUMI Abdelouaheb - 2016).

III.5. Diagnostique et modélisation du cours d'eau non Aménagé :

III.5.1 Modélisation de l'écoulement :

III.5.1.1 Choix du type de modèle hydraulique :

Nous avons sélectionné le logiciel HEC-RAS (version 6.5) pour notre étude en raison de ses nombreux avantages :

Gratuit et accessible : HEC-RAS peut être facilement téléchargé en ligne sans frais.

Analyse des ouvrages : Il permet d'étudier l'impact de la construction d'ouvrages tels que des ponts, des seuils et des épis sur les cours d'eau.

Étude des inondations : Ce logiciel est utile pour analyser les inondations et comprendre leurs mécanismes.

Modélisation 1D et 2D : HEC-RAS offre la possibilité de réaliser des modélisations en une ou deux dimensions des rivières et des plaines d'inondation, fournissant ainsi une vision précise des différentes situations.

Prise en compte des régimes d'écoulement : Le logiciel intègre divers types de régimes d'écoulement, notamment les régimes subcritiques, de transition et supercritiques, tout en considérant les effets des ouvrages hydrauliques.

Résultats cartographiques : Il permet d'exploiter les résultats cartographiques pour identifier les zones à risque et prendre des mesures appropriées.

III.5.1.2 Présentation du logiciel HEC-RAS :

Développé et distribué gratuitement par le Centre d'Ingénierie Hydrologique de l'US Army Corps of Engineers, HEC-RAS est un logiciel de simulation des écoulements dans les cours d'eau et les canaux. Jusqu'à la version 5.0, le modèle était principalement unidimensionnel, ce qui limitait la modélisation des variations hydrauliques dues aux changements de forme de la section transversale, aux coudes et autres aspects des écoulements en 2D ou 3D. À partir de la version 5.0, le logiciel a permis la modélisation en 1D ou 2D des rivières et des plaines d'inondation (Cheloufi & Foual, 2018).

HEC-RAS intègre divers aspects hydrologiques et hydrauliques, tels que l'analyse du ruissellement des précipitations, l'hydraulique fluviale, l'évaluation des dommages causés par les inondations, la simulation des écoulements permanents et non permanents, le transport des sédiments, l'analyse de la qualité de l'eau, ainsi que des fonctions facilitant la conception des ouvrages hydrauliques (Cheloufi & Foual, 2018).

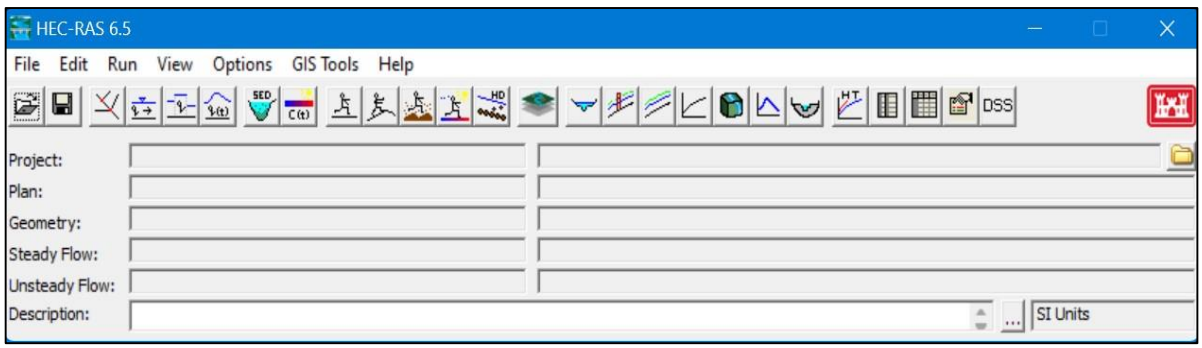


Figure III.10 : Interface utilisateur du logiciel HEC-RAS (version 6.5).

III.5.1.3 Objectif du logiciel HEC-RAS :

HEC-RAS est un logiciel qui calcule les hauteurs d'eau le long des canaux naturels et artificiels en utilisant des données d'écoulement permanent. Il détermine la hauteur de l'eau à différentes sections du canal et peut également simuler des crues à l'aide d'hydrogrammes, permettant ainsi de prédire la montée et la descente de l'eau en cas d'augmentation soudaine du débit.

Le logiciel repose sur le modèle unidimensionnel de Saint-Venant, ce qui signifie qu'il analyse l'écoulement de l'eau dans une seule direction le long du canal. HEC-RAS utilise l'équation de l'énergie pour calculer les hauteurs d'eau, prenant en compte des facteurs tels que la friction sur le fond du canal et les variations de largeur qui peuvent influencer l'écoulement. Dans des situations où l'écoulement change rapidement, comme près des ponts ou aux confluences de rivières, il applique l'équation de quantité de mouvement pour obtenir des calculs plus précis.

HEC-RAS est donc un outil essentiel pour les ingénieurs hydrauliques, permettant une modélisation détaillée et précise des systèmes fluviaux et des impacts potentiels des crues.

III.5.1.4 Fonctionnement de HEC-RAS :

HEC-RAS possède une capacité avancée pour modéliser une variété étendue de conditions d'écoulement. Le centre de commande, élément central d'HEC-RAS, facilite la gestion et l'intégration des divers types de données :

- Géométrie ;
- Débits et conditions aux limites ;
- Conditions de calcul ;
  - ➢ Résultats.

III.5.2 Application d'HEC-RAS sur Oued Rihane

III.5.2.1 Banque de données nécessaires à l'application du modèle HEC-RAS :

Pour utiliser le modèle HEC-RAS, il est essentiel de disposer d'une banque de données spécifique à la zone d'étude, comprenant :

- Une série de couples distance-altitude pour toutes les sections transversales ;
- La distance entre deux sections successives (rives et axe du canal) ;
- Les coefficients de contraction et d'expansion ;
- Les données sur l'écoulement et les conditions aux limites *(Jabbour, 2006).*

III.5.2.2 Les données géométriques :

Les données géométriques nécessaires pour l'étude comprennent l'établissement de la connectivité du réseau hydrographique, c'est-à-dire le schéma du système de rivière, ainsi que les données des sections transversales et les informations sur les ouvrages hydrauliques existants ou projetés, tels que les ponts, barrages, structures latérales et déversoirs (Idrici, 2017).

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

Nous utilisons le logiciel ArcGIS pour créer un modèle numérique de terrain (MNT) basé sur un échantillonnage semi-dirigé irrégulier. Ce modèle est représenté sous la forme d'un réseau triangulaire irrégulier, connu sous le nom de Triangular Irregular Network (TIN). Grâce à ce TIN, nous sommes en mesure de visualiser l'écoulement des cours d'eau sur RAS Mapper et de produire des cartes détaillées qui illustrent des caractéristiques importantes telles que la profondeur de l'eau et la vitesse du courant.

Un TIN est une méthode numérique utilisée pour représenter la morphologie de surface, construite en triangulant un ensemble de points appelés nœuds. Ces nœuds sont reliés par des arêtes pour former un réseau de triangles, ce qui permet une représentation précise des variations topographiques. Les TINs s'adaptent mieux aux terrains complexes en offrant une résolution plus élevée dans les zones où la surface est très variable, tout en ayant une résolution plus faible dans les zones moins variables.

ArcGIS prend en charge la triangulation de Delaunay, qui garantit que les triangles formés ne contiennent aucun nœud à l'intérieur de leurs cercles circonscrits, maximisant ainsi l'angle intérieur minimal de tous les triangles et évitant les formes longues et étroites. Cela permet d'obtenir une représentation plus précise des caractéristiques du terrain, comme les crêtes et les cours d'eau 127.

En utilisant ce TIN, nous pouvons non seulement visualiser l'écoulement des cours d'eau, mais aussi simuler divers scénarios hydrologiques, ce qui est essentiel pour la gestion des ressources en eau et l'évaluation des risques d'inondation.

Une fois que nous avons établi notre Triangular Irregular Network (TIN), nous l'exportons sous la forme d'un fichier de projection ESRI (.prj). Ce fichier contient des informations relatives au système de coordonnées spécifique à notre zone d'étude, que nous avons obtenues à partir du site "Spatial Reference". Par la suite, nous importons ce TIN dans le logiciel HEC-RAS pour permettre une simulation précise avec RAS Mapper.

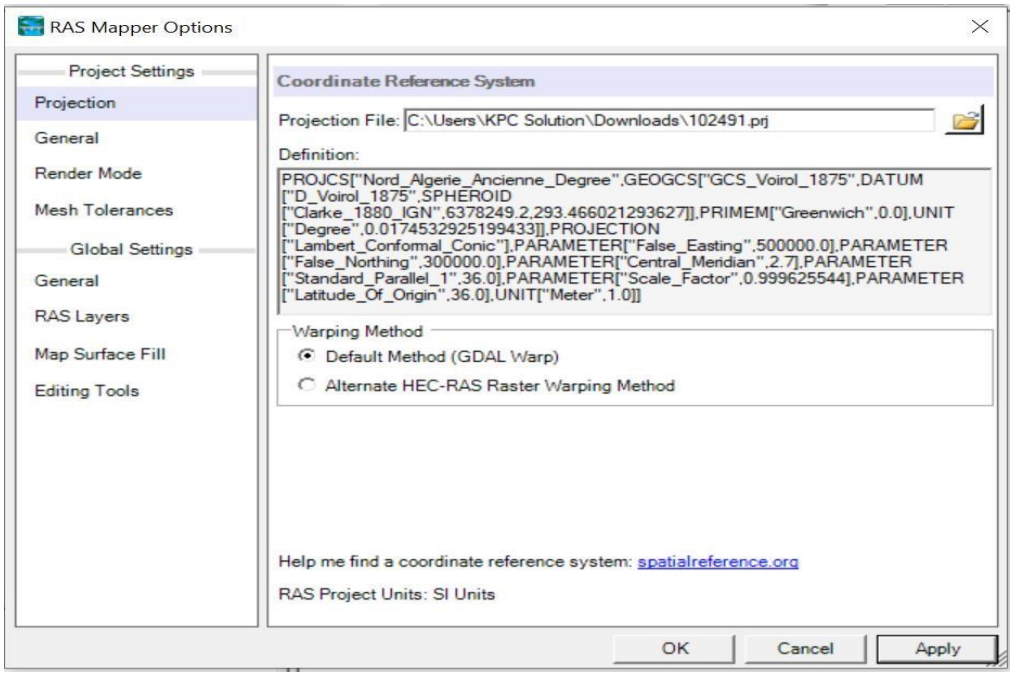


Figure III.11 : Insertion fichier de projection.

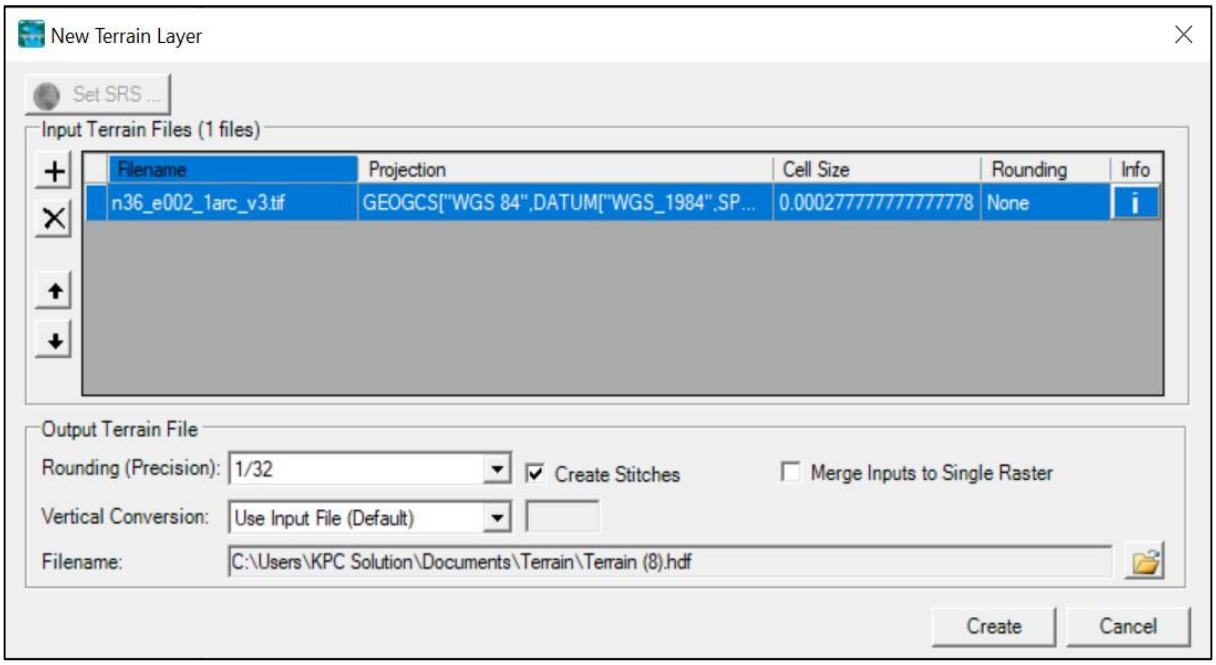


Figure III.12 : Insertion des données du terrain.

Après avoir importé avec succès les données dans HEC-RAS, nous commençons par tracer l'axe de la rivière, le lit mineur et le lit majeur, ainsi que les sections transversales. Cependant, les profils obtenus ne contiennent pas les profondeurs nécessaires. Il est donc essentiel d'ajuster leur géométrie pour obtenir des sections transversales avec une forme correcte, permettant ainsi une représentation précise de la rivière et de son lit.Pour ce faire, nous devons :

Modifier les sections transversales : Utiliser l'éditeur de géométrie dans HEC-RAS pour ajuster manuellement les profondeurs et les largeurs des sections transversales afin qu'elles reflètent fidèlement la réalité du terrain.

Vérifier la continuité des profils : S'assurer que les profils de profondeur sont continus le long de l'écoulement, en vérifiant que les changements de profondeur se font de manière réaliste et progressive.

Utiliser des données topographiques : Intégrer des données topographiques précises pour guider les ajustements des sections transversales. Cela peut inclure des relevés de terrain ou des modèles numériques de terrain (MNT) qui fournissent des informations détaillées sur la topographie environnante.

Simuler et valider : Une fois les ajustements effectués, il est crucial de simuler l'écoulement à travers le modèle pour valider que les modifications apportées permettent une représentation réaliste du comportement hydraulique de la rivière.

Ces étapes sont essentielles pour garantir que le modèle HEC-RAS fournit des résultats fiables et précis pour l'analyse hydrologique et la gestion des ressources en eau.

Les sections transversales tirées à partir du RAS MAPPER sont représentées dans la figure suivante :

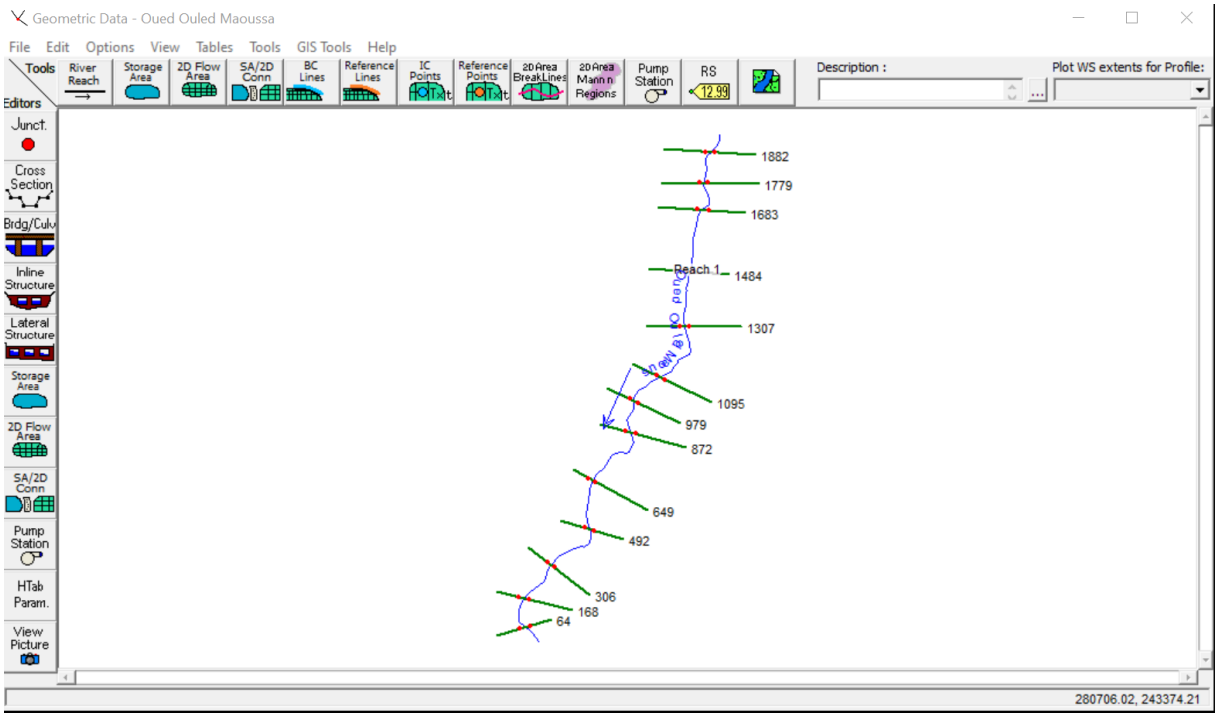


Figure III.13 Définition du tracé de l'oued Maoussa et des sections en travers de l'oued.

- **Condition aux limites (Boundary condition) :**

Une fois que les données géométriques de chaque section ont été enregistrées, la prochaine étape dans la modélisation hydraulique avec HEC-RAS consiste à définir les débits d'entrée et à établir toutes les conditions limites nécessaires pour le calcul des profils de surface d'eau pour chaque section du réseau fluvial.

Les conditions limites sont cruciales dans la modélisation hydraulique. Pour simuler un écoulement permanent, il est essentiel de définir des conditions limites à l'amont, à l'aval, ou aux deux extrémités, afin de déterminer l'altitude de la surface de l'eau à chaque segment du cours d'eau. C'est sur cette base que HEC-RAS peut réaliser les calculs hydrauliques.

Dans notre étude, en raison de l'écoulement en régime mixte, des calculs appropriés sont effectués, ce qui nécessite l'introduction de conditions limites aux extrémités amont et aval. Nous avons choisi d'utiliser la profondeur normale comme condition, ce qui implique la définition d'une pente d'énergie. HEC-RAS se servira de cette valeur pour calculer la profondeur en appliquant l'équation de Manning. Pour estimer cette pente d'énergie, nous mesurons la pente du tronçon en aval de notre segment modélisé.

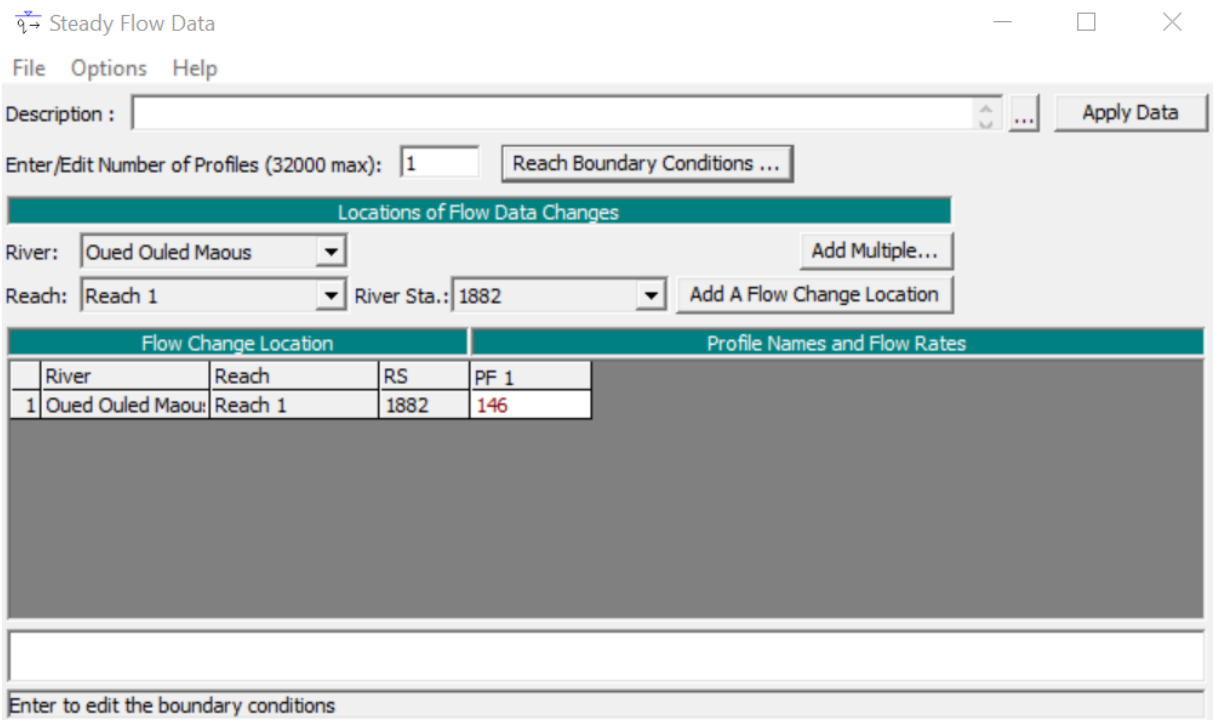


Figure III.14 Introduction des données hydrauliques d'Oued Maoussa.

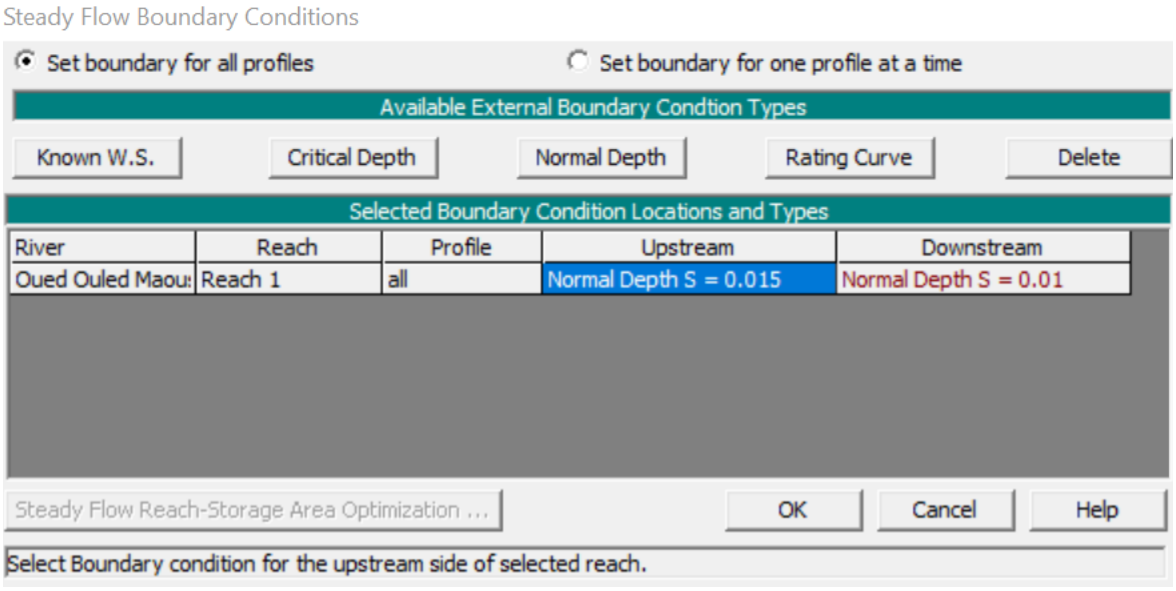


Figure III.15 Définition des conditions aux limites.

➢ **Simulation :**

✓ Après avoir saisi les données géométriques et hydrométriques et défini les conditions aux limites, il est essentiel de choisir le régime fluvial approprié parmi les options disponibles : fluvial, torrentiel ou mixte, afin de commencer les calculs.

✓ Dans notre étude, nous avons opté pour un régime mixte avant de démarrer la simulation.

✓ Concernant le débit centennal calculé dans la section hydrologique, celui-ci s'élève à 146 m^3/s.

III.5.2.3 Résultats de la simulation :

Les résultats issus de la simulation réalisée avec HEC-RAS fournissent une compréhension approfondie de l'écoulement constant au sein d'un système fluvial ou hydraulique particulier. Cette simulation permet d'effectuer une analyse détaillée de la distribution des vitesses, des niveaux d'eau et des débits à travers le réseau hydrographique. Ces informations sont essentielles pour mieux anticiper les risques d'inondation.

- **Le profil en long :**

La ligne d'eau représente une coupe transversale du tronçon étudié, affichant le niveau de la surface de l'oued ainsi que le niveau d'eau associé à une période de retour centennale

- **Restitution de la courbe de tarage :**

À l'aide de HEC-RAS, nous avons obtenu une représentation graphique montrant la variation de la hauteur d'eau en fonction du débit m^3/s.

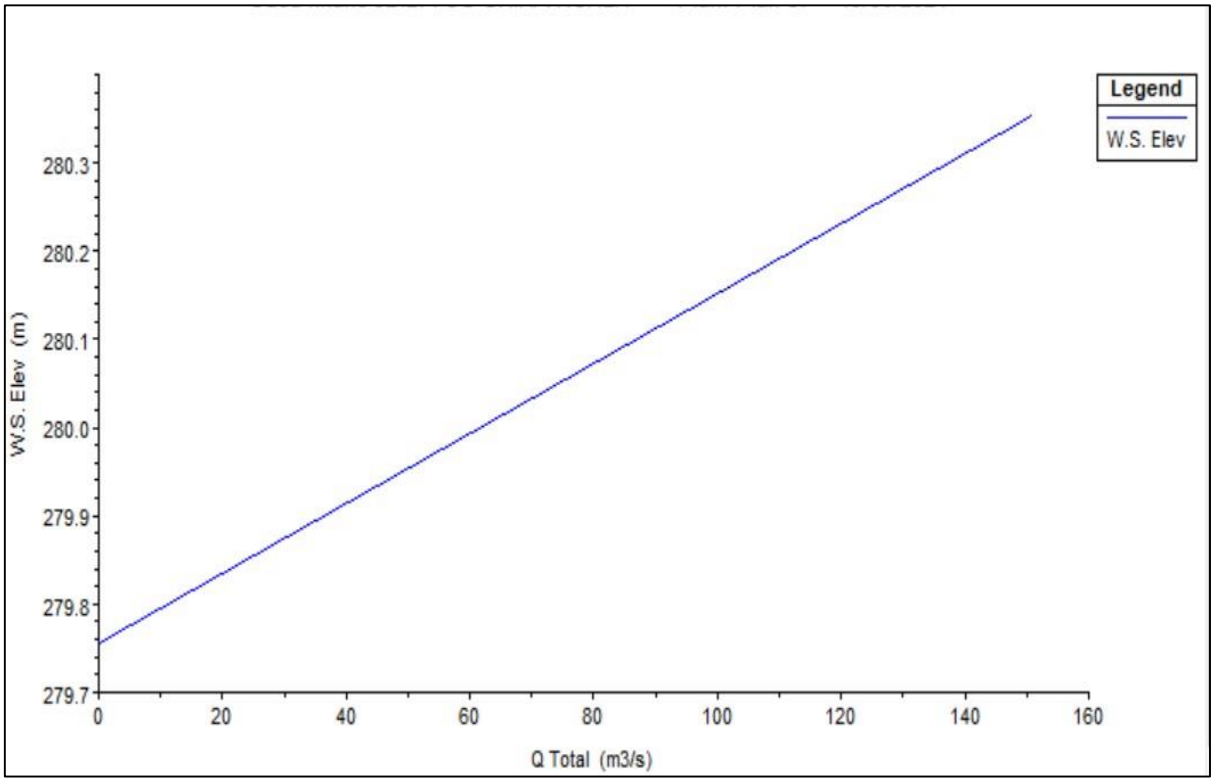
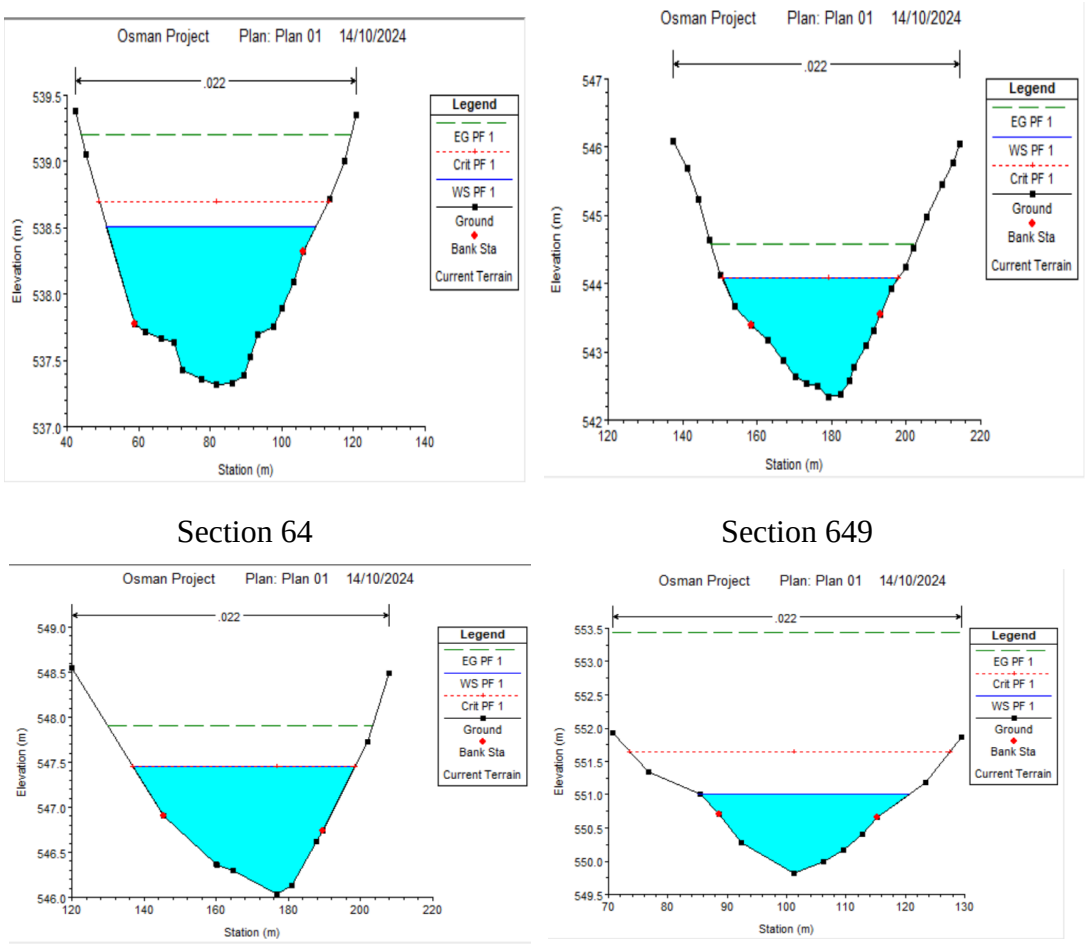


Figure III.16 Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued Maoussa

- **Les profils en travers :**

En utilisant l'option d'affichage des résultats par profil transversal, nous avons pu obtenir des informations détaillées à chaque point le long du tracé du cours d'eau. Nous avons observé que la majorité des sections sont susceptibles d'être submergées



Section 64 Section 649

Section 1095 Section 1484

Figure III.17 : Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued Maoussa.

• Le logiciel permet également de créer des tableaux récapitulatifs regroupant tous les paramètres hydrauliques pour différentes structures, telles qu'un barrage ou tout autre ouvrage, ainsi que pour une surface de stockage spécifique. Ces tableaux peuvent être générés pour chaque station (profil en travers) individuellement ou pour l'ensemble des stations en même temps.

Tableau III.1 : Principaux éléments hydrauliques pour toutes les stations (Source : Logiciel HEC-RAS).

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Reach 1	1882	PF 1	146.00	555.17	556.46	556.81	557.62	0.015022	4.78	30.66	38.63	1.71
Reach 1	1779	PF 1	146.00	554.64	556.02	552.49	556.03	0.000036	0.26	347.83	181.90	0.09
Reach 1	1683	PF 1	146.00	554.80	555.68	555.68	555.99	0.005713	2.49	59.57	98.86	1.01
Reach 1	1484	PF 1	146.00	550.31	551.01	551.64	553.44	0.037471	4.44	21.88	35.34	2.37
Reach 1	1307	PF 1	146.00	546.90	547.80	548.12	548.80	0.017072	4.18	33.08	51.75	1.74
Reach 1	1095	PF 1	146.00	546.04	547.46	547.46	547.91	0.003868	3.23	52.36	59.96	0.93
Reach 1	979	PF 1	146.00	545.27	546.13	546.42	547.08	0.015202	4.38	33.80	50.28	1.68
Reach 1	872	PF 1	146.00	542.26	544.69	543.49	544.75	0.000215	1.16	150.42	91.88	0.24
Reach 1	649	PF 1	146.00	542.78	544.07	544.07	544.58	0.004339	2.21	47.51	47.37	0.88
Reach 1	492	PF 1	146.00	539.62	543.65	541.33	543.68	0.000060	0.81	216.60	87.33	0.14
Reach 1	306	PF 1	146.00	541.74	543.17	543.17	543.61	0.003849	3.23	53.77	63.70	0.93
Reach 1	168	PF 1	146.00	537.45	537.78	538.58	541.94	0.071213	3.61	16.60	29.89	2.86
Reach 1	64	PF 1	146.00	537.36	538.51	538.70	539.20	0.008537	3.87	41.00	57.70	1.31

- Min $^{Ch.\ El}$: Altitude du radier du canal.
- Vel ^{chnl} : Vitesse d'écoulement.
- W.S ^{Elev} : Altitude du plan d'eau calculé.
- Flowa ^{rea} : 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.

III.5.2.4 Interprétation des résultats :

En examinant le niveau d'eau dans toutes les sections transversales de l'oued, nous constatons qu'il est inondé sur toute sa longueur, selon les paramètres suivants :

➢ La vitesse d'écoulement varie de 0.26 m/s à 4,78 m/s ;

➢ Le régime d'écoulement évolue tout au long de l'oued, comme en témoignent les valeurs du nombre de Froude, qui oscillent entre 0,09 et 2,86.

III.6 La cartographie du risque d'inondation :

➢ Après avoir généré les profils d'inondation à l'aide du logiciel HEC-RAS, notre prochaine étape consiste à délimiter et cartographier les zones à risque d'inondation. Pour ce faire, il est essentiel de déterminer les niveaux d'eau dans différentes sections des oueds.

➢ Afin d'identifier les points de débordement et les zones à risque, nous avons utilisé l'outil RAS-MAPPER dans HEC-RAS pour simuler l'état du cours d'eau lors d'une crue centennale. Cette méthode nous a permis de produire les cartes qui seront présentées dans la prochaine phase de notre étude.

➢ La création de cartes des risques vise à identifier les principaux dangers en fonction de plusieurs critères, tels que l'impact anticipé, la probabilité d'occurrence et le niveau actuel de contrôle des risques. L'élaboration de ces cartes peut être justifiée par les objectifs suivants :

✓ Établir un système interne de contrôle ou de gestion des risques approprié.

✓ Aider la direction dans l'élaboration de sa stratégie et dans la prise de décisions.

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

➢ La gestion des risques implique l'organisation et les ressources nécessaires pour se préparer et réagir efficacement en cas de crise, facilitant ainsi la prise de décision. Cette approche comprend trois phases :

✓ **Prévision** : mise en place de mesures pour anticiper un événement imprévu et améliorer sa gestion.

✓ **Protection et prévention** : réduction de la gravité potentielle d'un risque par des mesures de protection, tandis que la prévention vise à diminuer la probabilité qu'un risque dépasse un seuil d'acceptabilité fixé par l'autorité compétente.

✓ **Communication d'informations** : fournir des informations à tous les intervenants dans la gestion des risques, allant des individus aux autorités locales.

III.6.1 Carte des profondeurs :

La submersion lors d'une inondation est principalement caractérisée par son étendue et sa profondeur, nécessitant l'utilisation de modèles hydrauliques ou la représentation numérique des topographies des lits mineurs et majeurs des cours d'eau *(Graguid, 2011).* Elle se divise généralement en trois catégories en fonction de la profondeur :

- Submersion légère : avec une profondeur inférieure à 0,5 mètre ;
- Submersion modérée : avec une profondeur comprise entre 0,5 et 1 mètre ;
- Submersion importante : avec une profondeur dépassant 1 mètre *(Graguid, 2011).*



Figure III.7 : Réseau des profondeurs d'eau pour une crue centennale.

• D'après la carte de profondeur d'eau obtenue, la hauteur d'eau varie entre 0,5 et 3 m. Les zones à fort risque de submersion se situent dans le coté de centre-ville d'Oued Maoussa. La concentration des zones à risque près de la confluence met en évidence l'importance cruciale d'une planification urbaine résiliente et de stratégies d'adaptation pour atténuer les impacts potentiels de la submersion. Cette approche est indispensable pour formuler des politiques publiques visant à garantir la sécurité des communautés riveraines et à promouvoir un développement durable dans la région.

III.6.2 Classes d'aléa :

La quantification des aléas liés aux inondations peut être effectuée en combinant deux facteurs : la vitesse d'écoulement et la hauteur de submersion. Quatre zones de danger peuvent être clairement identifiées par des couleurs spécifiques, selon des critères d'évaluation résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 : Critères d'évaluation de l'intensité d'aléa inondation (DDT, 2012).

	Faible V < 0.2 m/s	Moyenne 0.2 m/s < V < 0.5 m/s	Forte V > 0.5 m/s
H< 0.5 m	Faible	Moyen	Fort
0.5 m< H< 1 m	Moyen	Moyen	Fort
1.0 m< H< 2.0 m	Fort	Fort	Fort
H > 2.0 m	Très fort	Très fort	Très fort

La figure ci-dessous presente la Ccrte de l'aléa pour la crue centennale.

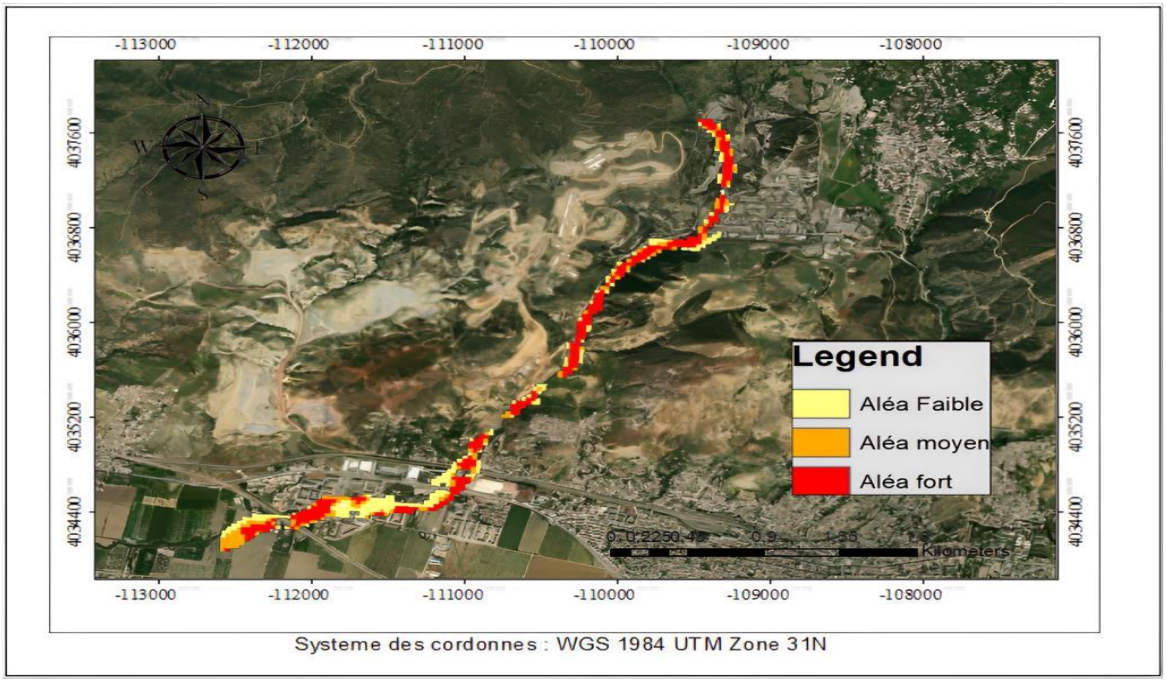


Figure III.8: Carte de l'aléa pour la crue centennale.

V.4.2 Vue en 3D des tronçons de l'Oued Maoussa après l'aménagement :

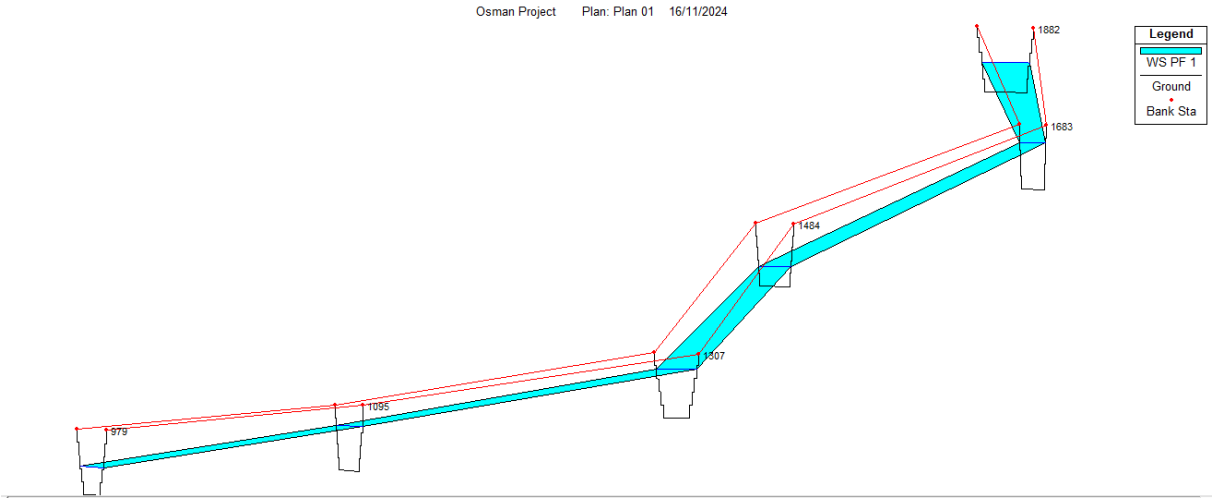


Figure V.18 Vue en 3D du tronçon amont de l'Oued Maoussa.

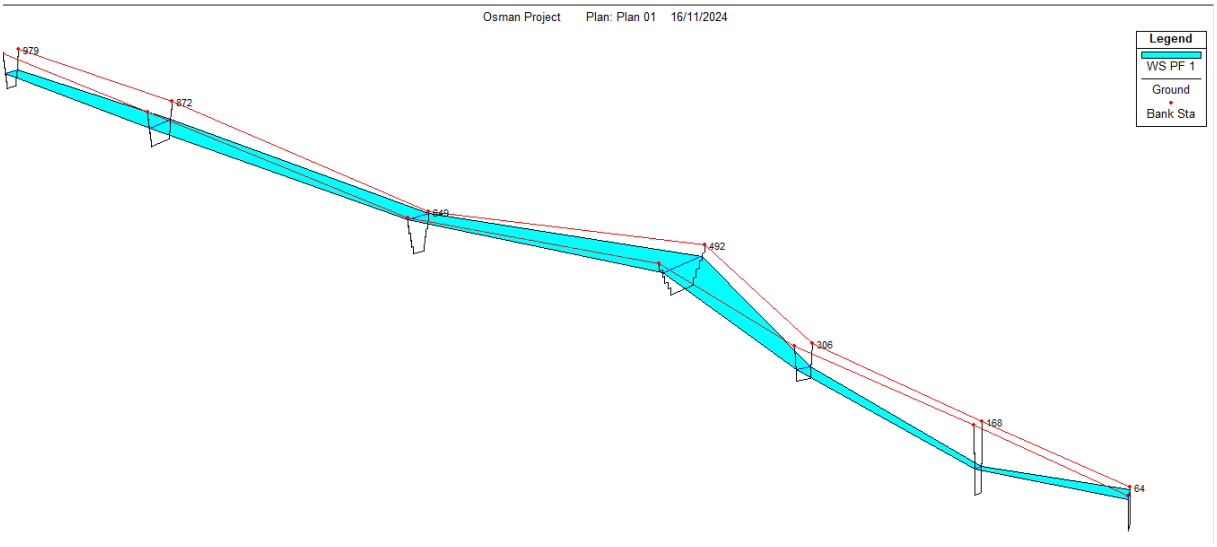


Figure V.19 Vue en 3D du tronçon aval de l'Oued Maoussa**.**

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons examiné la situation de notre zone d'étude et sa réaction face aux inondations provoquées par une crue centennale. Grâce au logiciel HEC-RAS, nous avons identifié les différentes zones inondables et créé une carte des profondeurs, ce qui nous a permis de mesurer la profondeur d'eau à divers emplacements.

Cette analyse approfondie des zones sensibles constitue une base solide pour planifier des mesures préventives ciblées. Les résultats obtenus nous orientent vers la prochaine étape du projet, où nous étudierons en détail différentes alternatives. L'objectif sera d'explorer des solutions innovantes et durables pour renforcer la protection contre les inondations, tout en tenant compte des caractéristiques spécifiques des zones à risque.

Chapitre IV :

Études des variantes d'aménagement.

Introduction :

L'étude vise à garantir une protection efficace de la ville de Maascara contre les inondations, en particulier celles de type centennal. Cette protection implique la proposition et la sélection des solutions de construction les plus adaptées, en tenant compte des conditions naturelles spécifiques à la région. Les solutions doivent être techniquement et économiquement viables, tout en étant bien intégrées au terrain.

Le choix des options repose sur les résultats des chapitres précédents, prenant en considération les caractéristiques naturelles de la zone d'étude. L'objectif principal est d'évacuer les eaux de crue vers un exutoire, tout en respectant les conditions d'écoulement et la stabilité des berges, sans négliger l'impact environnemental de ces aménagements. Le processus de sélection des variantes s'effectue à travers plusieurs étapes méthodologiques

IV.1 Les divers types d'aménagements :

IV.1.1 Protection contre les crues :

Les approches pour diminuer le risque d'inondations dans les zones sensibles et inondables se divisent en deux catégories : directs et indirects.

IV.1.1.1 Protection directe (rapprochée) :

La protection directe consiste à agir directement sur le site menacé, en appliquant les mesures suivantes :

-Curage : L'opération d'aménagement visant à éliminer les obstacles et les dépôts qui entravent le flux des eaux contribue de manière significative à l'amélioration des conditions d'écoulement dans le cours d'eau. Cette initiative permet de libérer le passage en retirant les obstructions et en supprimant les dépôts, ce qui favorise un écoulement plus fluide. De plus, le débroussaillage revêt une importance particulière, surtout dans les zones urbanisées, où il est essentiel pour des raisons sanitaires. Il est également nécessaire dans les sections courantes du cours d'eau pour réduire la rugosité et accroître la capacité de débit.

-Recalibrage : Opération d'aménagement visant à modifier le profil du lit d'un cours d'eau pour améliorer son écoulement. Cette action inclut l'élargissement et l'approfondissement des

sections du cours d'eau, augmentant ainsi leur capacité d'évacuation et garantissant une section mouillée conforme aux critères de protection requis. Elle peut également comprendre le redressement du lit et la stabilisation des berges pour optimiser la gestion hydraulique.

-Réalisation des canaux : L'opération d'aménagement vise à restaurer le couloir d'origine de l'oued, ce qui est particulièrement important lorsque le lit de l'oued et son domaine hydraulique ont été entièrement envahis par des constructions ou des infrastructures routières. Cette approche est essentielle pour régénérer l'espace naturel de l'oued et rétablir son fonctionnement hydraulique

-Protection des berges : Cela englobe l'ensemble des structures conçues pour maintenir la stabilité des terres face aux forces de l'eau. Les berges sont fréquemment impactées par les courants violents lors des crues, et les sols peuvent également être déplacés en raison de l'infiltration d'eau après ces événements. Il est également essentiel de protéger les berges à proximité de certaines infrastructures, comme les ponts .

-Endiguement des oueds : Cette initiative consiste à ériger des digues le long des deux berges du cours d'eau. Facilement réalisable grâce aux ressources locales en main-d'œuvre et en matériaux, cette méthode offre une protection ciblée qui peut être mise en œuvre de manière progressive, en commençant par les zones les plus riches et densément peuplées afin de les protéger des crues. Cependant, ce procédé peut entraîner une élévation significative du niveau des eaux et compliquer le drainage des terrains bas (Nedelec et al., 2004)

IV.1.1.2 Protection indirect (Eloignées) :

La protection indirecte consiste à protéger les sites menacés en intervenant à distance, en dehors du périmètre d'aménagement. Cette approche implique la construction d'ouvrages sur les cours d'eau responsables des inondations, afin de prévenir les impacts sur les zones menacées.

Aménagement des bassins versants Pour contrer l'érosion, des techniques biologiques peuvent être mises en œuvre en complément de la construction de seuils en gabions. Ces méthodes visent à diminuer la vitesse des écoulements et à favoriser le dépôt des sédiments en amont.

Construction de barrages : Installation de seuils pour stocker et réguler les crues en amont des zones sensibles. Il est crucial d'optimiser le volume et la capacité de régulation des barrages

afin d'assurer une protection adéquate et de répondre efficacement aux exigences de gestion des crues

Création de canaux périphériques : Cette approche consiste à rediriger les eaux des rivières vers des canaux périphériques, permettant ainsi de les acheminer vers des zones situées en dehors des zones à protéger. Cette déviation peut concerner tout ou partie du débit d'un cours d'eau, facilitant ainsi une gestion efficace des eaux et la protection des zones vulnérables.

IV.1.2 Protection contre l'érosion :

Le risque d'érosion découle de l'interaction entre l'aléa érosif et les enjeux locaux. Ce phénomène est fréquemment observé dans les zones non urbanisées, en particulier lorsque les bords de route ne s'alignent pas avec les rives des rivières. Pour protéger les oueds contre l'érosion, il est essentiel de mettre en œuvre différentes stratégies visant à stabiliser les sols et à maîtriser l'érosion provoquée par les écoulements d'eau .

IV.1.2.1 Érosion du lit :

L'érosion du lit peut être causée par plusieurs facteurs :

Les extractions dans le lit : Ces activités ont un impact direct qui peut entraîner une érosion régressive en amont, ainsi qu'une érosion progressive en aval.

Cause d'origine naturelle : Le lit du cours d'eau modifie sa pente afin de s'adapter aux nouvelles conditions hydrologiques et aux fluctuations dans le transport des sédiments.

IV.1.2.2 Érosion des berges :

Les cours d'eau naturels et les canaux de drainage évacuent les eaux de ruissellement ainsi que les effluents provenant des réseaux souterrains. L'érosion des berges est causée par le sapement, l'affouillement et l'effondrement des rives, résultant de divers facteurs tels que des aménagements inadéquats, un manque d'entretien, l'accès du bétail et la proximité des terres cultivées. Les défauts de conception des sorties de drainage, comme l'absence de tuyaux rigides ou de blocs antiérosifs appropriés, aggravent cette situation. Les conséquences de cette érosion incluent la perte de terres arables, l'affaiblissement des structures telles que les ponts, une augmentation des besoins en nettoyage et en entretien des canaux, ainsi que le ravinement des voies de circulation et des zones adjacentes aux clôtures.

2. Éboulement :

L’éboulement (ou effondrement) est un mécanisme par lequel un volume de berges cohérentes se rompt en raison d'un affouillement à sa base.

3. Affouillement :

L'affouillement est une forme d'érosion qui se produit au niveau de la base d'une berge ou d'une structure. Il constitue une spécificité de l'érosion des berges.

IV.2 Calcul hydraulique des canaux :

IV.2.1 Ecoulement uniforme dans les canaux à ciel ouvert :

Les écoulements dans les canaux ouverts, ou à surface libre, ont une surface en contact avec l'air, soumise à la pression atmosphérique. Ainsi, la forme et les dimensions de cette surface liquide peuvent fluctuer. Lorsque la variation de l'écoulement est progressive, on peut considérer que, dans chaque section du canal, la pente de la ligne de charge correspond à celle d'un régime uniforme.

IV.2.1.1 Les caractéristiques de l'écoulement uniforme :

Le régime d'écoulement dans les canaux à ciel ouvert est qualifié de « uniforme » lorsque :

- Le débit de l'eau reste constant à travers chaque section des tronçons proposés.
- Conditions de Frottement Uniformes
- La pente longitudinale est constante sur l'ensemble des sections du canal.
- La section transversale du canal est constante sur toute sa longueur.
- La rugosité des parois est uniforme.

L'écoulement véritablement uniforme est très rare dans les canaux naturels et relativement peu fréquent dans les canaux artificiels. Il ne se rencontre que dans des canaux prismatiques très longs, éloignés des extrémités.

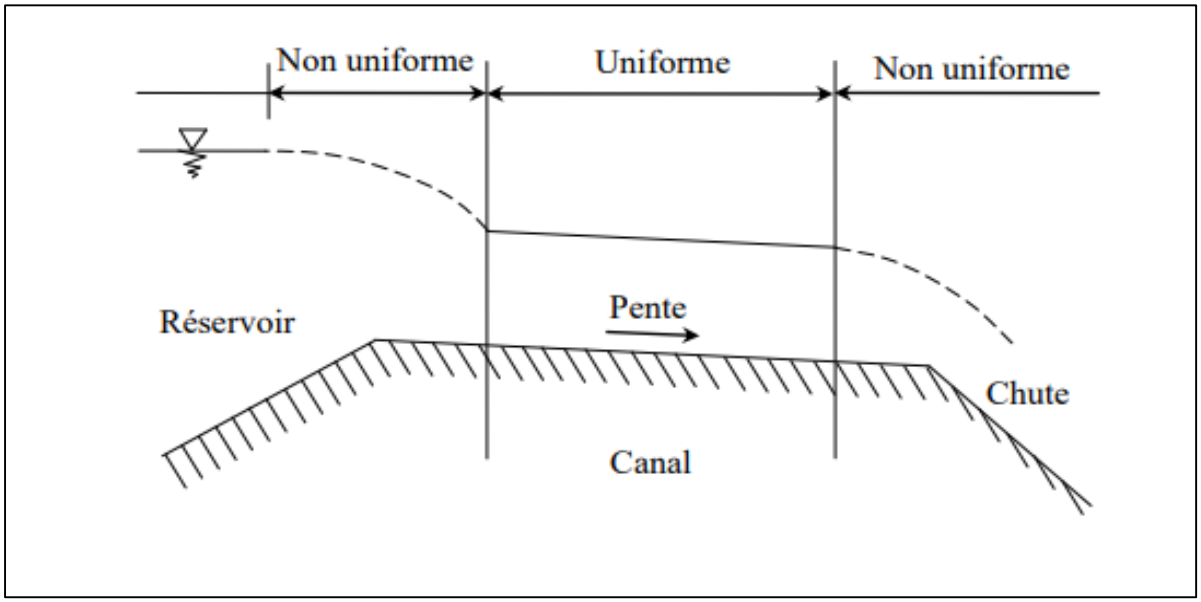


Figure IV.1 : Écoulement uniforme entre les extrémités.

IV.2.2 Les formules générale de l'écoulement :

- **La formule de Chézy**

Cette formule a été établie pour la première fois en 1775. Cependant, la formule fondamentale pour calculer un écoulement permanent uniforme est la formule de Chézy. Cette formule permet de déterminer la vitesse de l'eau en fonction de la rugosité du canal, du rayon hydraulique et de la pente comme suit :

$$V = C \times \sqrt{RI} \qquad (IV.1)$$

On sait que : $$Q = V \times S \qquad (IV.2)$$

Donc : $$Q = C \times S \times \sqrt{RI} \qquad (IV.3)$$

Avec :

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

R_h : Rayon hydraulique étant la surface mouillée sur le périmètre mouillé.

n : Coefficient de rugosité.

I : Pente de fond du canal.

« Coefficient de Chézy C » dépend des caractéristiques géométriques et hydrauliques de l'écoulement, telles que la forme de la section et la nature des parois du canal. Divers hydrauliciens ont proposé différentes expressions pour ce coefficient. Parmi les plus courantes, on trouve les formules suivantes :

- **La formule de Manning-Strickler**

La formule de Manning-Strickler, initialement développée pour les calculs relatifs aux canaux naturels, permet de déterminer la vitesse moyenne d'écoulement. Elle repose sur le coefficient de rugosité hydraulique, le rayon hydraulique, et la pente hydraulique, laquelle correspond à la pente géométrique du canal lorsque l'écoulement se fait à surface libre. Cette formule est exprimée par l'équation suivante :

$$C = \frac{1}{n} \times Rh^{\frac{1}{6}} \qquad \text{(IV.4)}$$

On trouve : $$V = Ks \times Rh^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{I} \qquad \text{(IV.5)}$$

Finalement : $$Q = \times\ Rh^{\frac{2}{3}} \times Sm\ \times \sqrt{I} \qquad \text{(IV.6)}$$

Avec :

Q : Débit de dimensionnement (m^3/s).
n : Coefficient de rugosité du canal.
Sm : Section mouillée du canal (m^2).
I : Pente du tronçon du cours d'eau (pente du fond) en m/m.
Rh : Rayon hydraulique (m).

- **La formule d'Agroskine**

$$C = \frac{1}{n} + 17.72log(Rh) \qquad \text{(IV.7)}$$

Avec :

C : Coefficient de Chézy (m^0.5/s).

Rh : Rayon hydraulique.

n : Coefficient de rugosité.

- **La formule de Bazin**

$$C = \frac{87}{1+\frac{mb}{\sqrt{Rh}}} \qquad \text{(IV.8)}$$

Avec

(γ) ou (mb) : Coefficient de Bazin.

Rh : Rayon hydraulique.

Tableau IV.1 : Présente les valeurs pour six types de parois.

N° des catégories	Nature des parois	γ
1	Parois très unies (ciment, bois raboté)	0,06
2	Parois unies (planches, briques, pierres de taille, etc.)	0,16
3	Parois en maçonnerie de moëllons	0,46
4	Parois de nature mixte (sections en terre très régulières)	0,85
4	Canaux en terre dans les conditions ordinaires	1,30
6	Canaux en terre avec fonds de galets, parois herbées	1,75

- **La formule de Pavlovsky**

$$C = \frac{1}{n} + Rh^{\frac{1}{y}} \qquad \text{(IV.9)}$$

y : Représente l'exposant déterminé selon la relation complète.

$$y = 2.5 \times \sqrt{n} - 0.13 - 0.75 \times \sqrt{Rh} \times (\sqrt{n} - 0.1) \qquad \text{(IV.10)}$$

Différents types de canaux avec leurs caractéristiques géométriques et formules associées pour les sections de canaux.

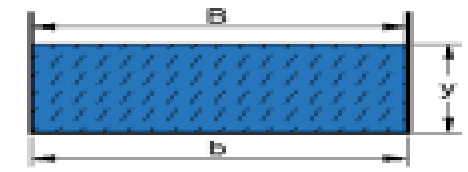
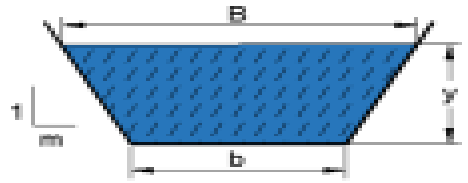
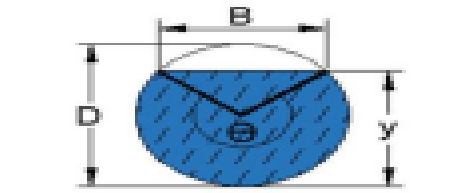
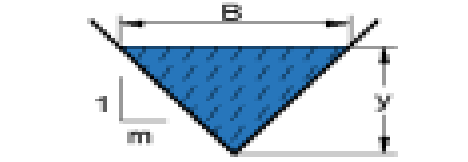
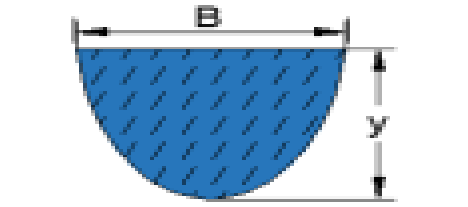
	**Type**	Rectangulaire
	Largeur au miroir B	b
	Surface S	$b*y$
	Périmètre P	$b+2y$
	Rayon hydraulique R	$\frac{b*y}{b+2y}$
	**Type**	Trapézoïdale
	Largeur au miroir B	$b+2m*y$
	Surface S	$(b+my)*y$
	Périmètre P	$b+2y\sqrt{1+m^2}$
	Rayon hydraulique R	$\frac{(b+my)*y}{b+2y\sqrt{(1+m^2)}}$
	**Type**	Circulaire
	Largeur au miroir B	$2\sqrt{y(D-y)}$
	Surface S	$\frac{1}{8}(\theta-\sin\theta)D^2$
	Périmètre P	$\frac{1}{2}\theta D$
	Rayon hydraulique R	$\frac{1}{4}\left[1-\frac{\sin\theta}{\theta}\right]D$
	**Type**	Triangulaire
	Largeur au miroir B	$2my$
	Surface S	my^2
	Périmètre P	$2y\sqrt{1+m^2}$
	Rayon hydraulique R	$\frac{my}{2\sqrt{1+m^2}}$
	**Type**	Parabolique
	Largeur au miroir B	$\frac{3S}{2y}$
	Surface S	$\frac{2}{3}By$
	Périmètre P	$B+\frac{8y^2}{3B}$
	Rayon hydraulique R	$\frac{2B^2y}{3B^2+8y^2}$

Figure IV.2 : Éléments géométriques pour différentes sections de canaux ouverts.

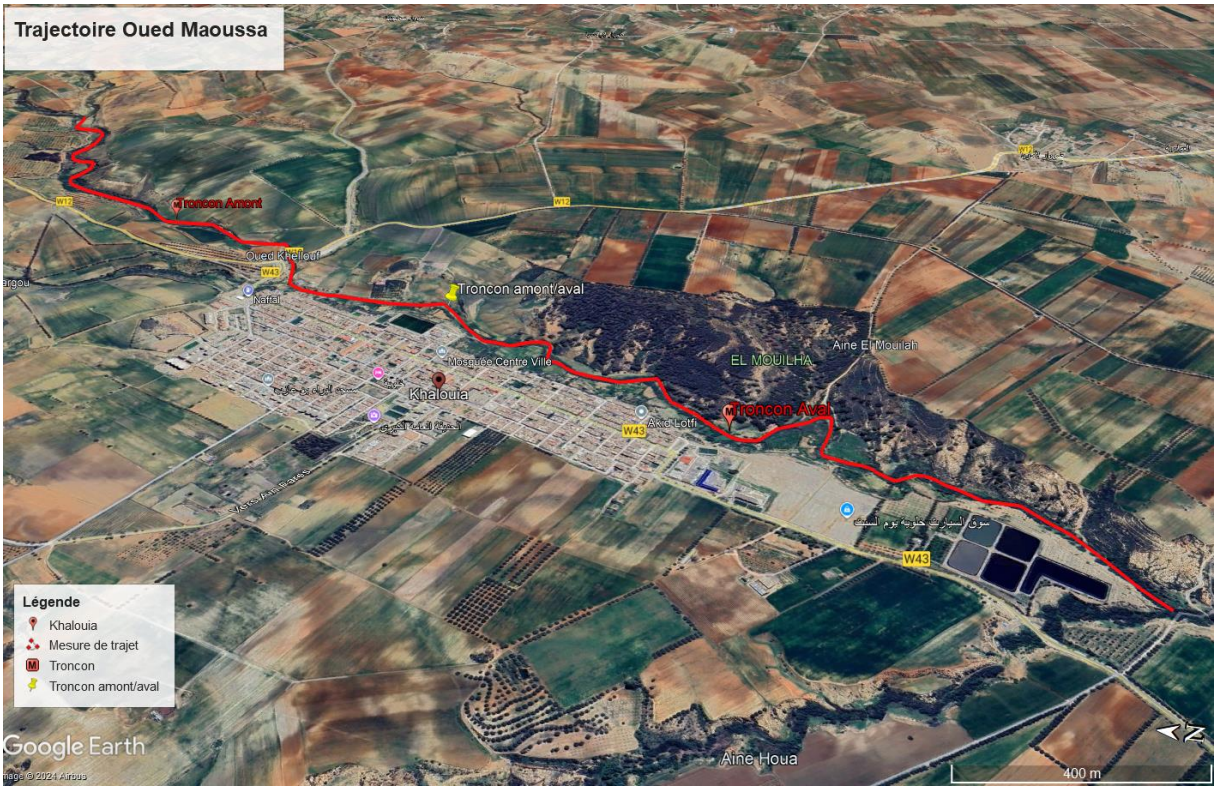


Figure IV.3 : Présentation des tronçons et localisation de la zone d'étude

IV.2.3.1 Sélection de la pente appropriée pour le projet

Lors de l'aménagement d'un oued, il est crucial de bien choisir la pente des tronçons pour optimiser l'écoulement, réduire les risques d'érosion et d'inondation, et garantir une efficacité hydraulique. Dans ce cadre, nous avons sélectionné deux pentes uniformes sur leurs tronçons respectifs pour assurer une gestion efficace des débits et minimiser les impacts environnementaux.

IV.2.3.2 Le coefficient de rugosité

Le coefficient de rugosité évalue la résistance de l'écoulement de l'eau due aux irrégularités du revêtement du canal, affectant ainsi la vitesse et le débit. Les valeurs de rugosité pour différents revêtements sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau IV.2 : 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.	0.013-0.014
Canal en terre	0.022
Canal en pierre sèche	0.025
Canal en Gabion.	0.030

IV.2.3.3 Marge de sécurité dans les canaux (Revanche)

Dans les canaux à surface libre, une perte de charge imprévue peut provoquer une élévation de la surface libre et un risque de débordement. Il est donc crucial de prévoir une marge de sécurité au-dessus du niveau d'eau calculé pour compenser des facteurs tels que l'accumulation de dépôts solides, la croissance de la végétation, et les vagues générées par le vent. Cette marge de sécurité varie généralement de 0,30 m pour les petits canaux à 0,60 à 1,20 m pour les grands canaux. Il est essentiel de considérer toutes les circonstances pouvant influencer ces valeurs (Lencastre, 2008).

Tableau IV.3 : Revanches utilisées (Degoutte, 2012).

Débit (m^3/s)	$Q > 8.5$	$1.5 < Q < 8.5$	$0.75 < Q < 1.5$	$Q < 0.75$
Revanche (m)	0.9	0.75	0.60	0.45

IV.2.3.4 Vitesse d'érosion

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

Tableau IV.4 : Les limites de la vitesse d'érosion pour les lits.

Lit de canal	Vitesse (m/s)
Pavage de pierre à une couche	2.5--4.0
Gabions	4.0--6.0
Revêtement en béton	6.0—10.0
Béton amélioré	10.00

IV.3 Étude de Variantes

Dans cette étude, trois variantes d'aménagement de l'oued Maoussa sont proposées pour protéger la ville de Mascara contre les crues centennales. Chacune de ces variantes est conçue pour évacuer un débit de projet de 146 m^3/s.

Les Variantes sont :

- Canal trapézoïdal en béton armée.
- Canal trapézoïdal en enrochement.
- Canal trapézoïdal en gabion.

- Pour chaque variante, nous réaliserons des calculs hydrauliques en utilisant des simulations avec HEC-RAS sur chaque tronçon du cours d'eau pour vérifier l'état d'écoulement. Nous fournirons également une analyse détaillée des différentes options d'aménagement, ce qui nous permettra de sélectionner la solution la plus adaptée en termes de performance technique et de faisabilité économique.

- Pour optimiser les interventions de sécurité civile lors des inondations et réduire la vulnérabilité des résidents, il est crucial de mettre en place des plans d'action, d'alerter la population, et de préparer des scénarios de gestion de crise. Il est également essentiel de surveiller l'immersion des digues pour prévenir la formation de vagues et de prévoir des mesures pour faciliter les interventions en cas de crue, tout en protégeant les infrastructures contre les inondations.

IV.3.1 Canal en béton

La première variante proposée est un canal trapézoïdal en béton armé, choisi pour ses nombreux avantages. Ce design assure une gestion efficace des débits d'eau, réduit les risques d'obstruction et offre une grande stabilité face aux forces hydrauliques, minimisant ainsi l'érosion. Le béton armé garantit une durabilité élevée et une longue durée de vie, même sous des conditions de charge intense. La pente du talus, avec un coefficient de m=1 pour un angle de 45°, facilite la construction et l'adaptation au terrain. Ce type de canal permet une mise en œuvre rapide, nécessite peu de maintenance, et s'intègre bien dans les environnements urbains tout en protégeant contre l'érosion.

Nous utilisons d'abord FLOW-MASTER pour établir les caractéristiques hydrauliques des canaux. Ensuite, nous réalisons une analyse plus détaillée avec HEC-RAS pour affiner nos résultats et évaluer avec précision les performances des canaux sous diverses conditions d'écoulement.

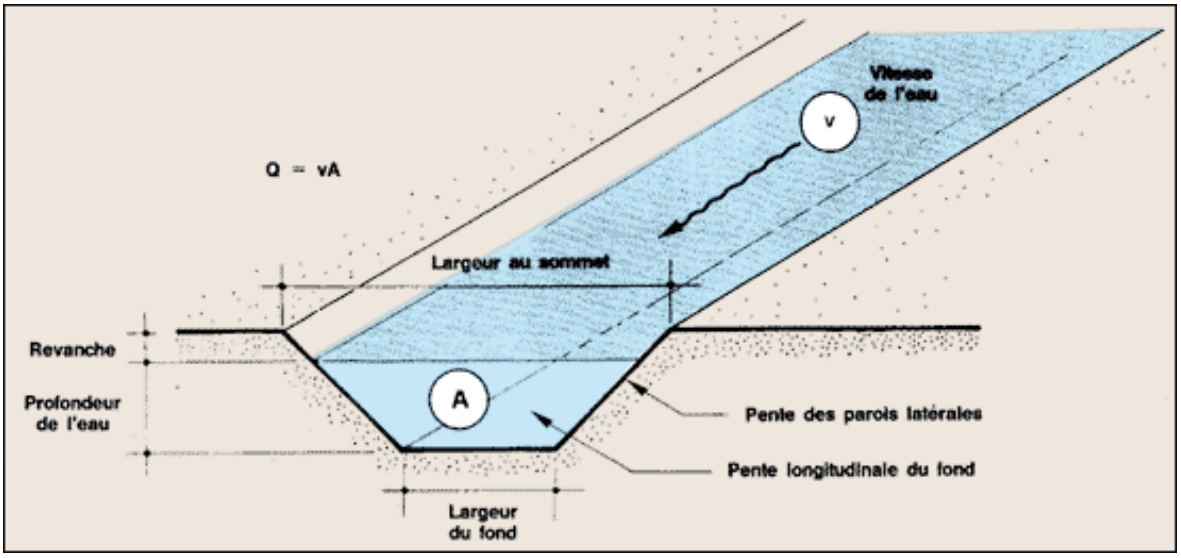


Figure IV.4 : Canal en béton armé de forme trapézoïdale.

- **Dimensionnement**

La première variante proposée concerne la conception d'un canal en béton armé de forme trapézoïdale, s'étendant sur une longueur de 4720 mètres. Ce canal est divisé en deux tronçons, traversant le centre de la ville et divisant ainsi la ville en deux parties. Il est conçu pour gérer un débit de 146 m^3/s.

- **Variante 01 (Tronçon Amont) :**

Voici les résultats du calcul hydraulique pour le tronçon amont du canal trapézoïdal en béton.

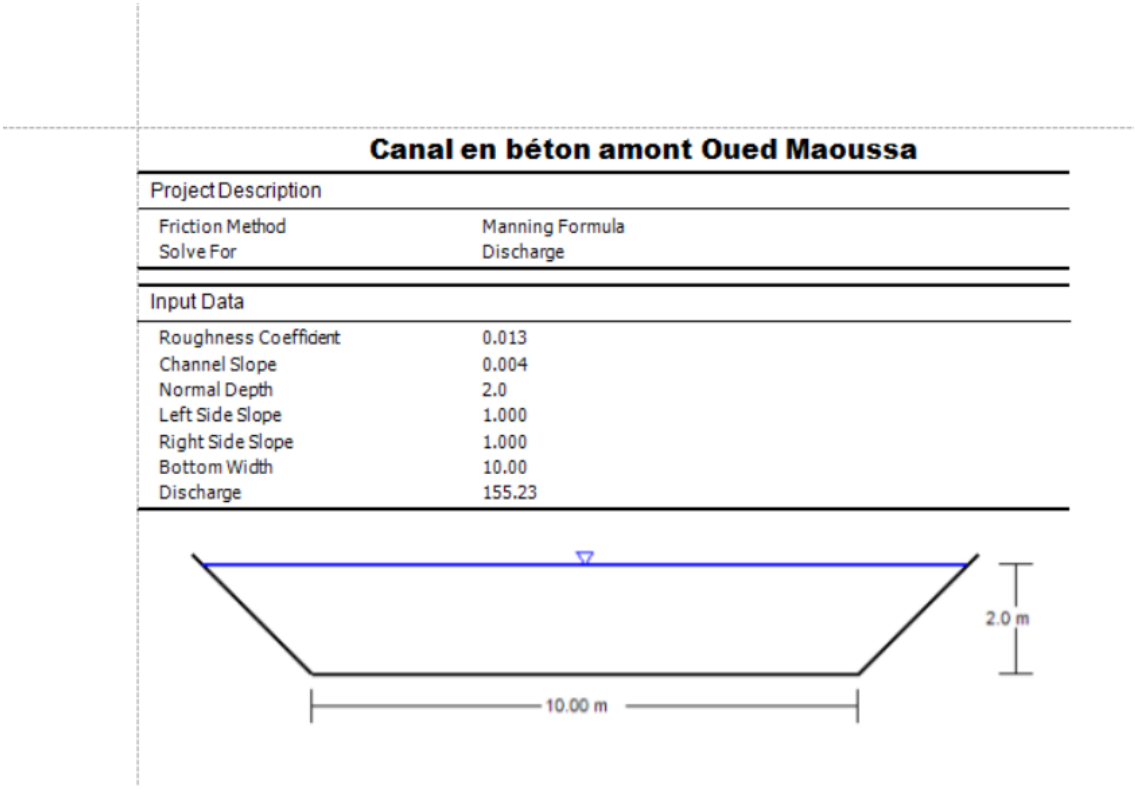


Figure IV.5 : Dimensions de l'aménagement en béton armé pour le tronçon amont de l'Oued Maoussa

Tableau IV.5: Dimensions de l'aménagement en béton armé pour le tronçon amont de l'Oued Maoussa

Tronçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal (m)	La rugosité
Amont	1882	979	2300	0.004	1	10	14	2	0.013

Variante 01 (Tronçon Aval) :

Voici les résultats du calcul hydraulique pour le tronçon aval du canal trapézoïdal en béton.

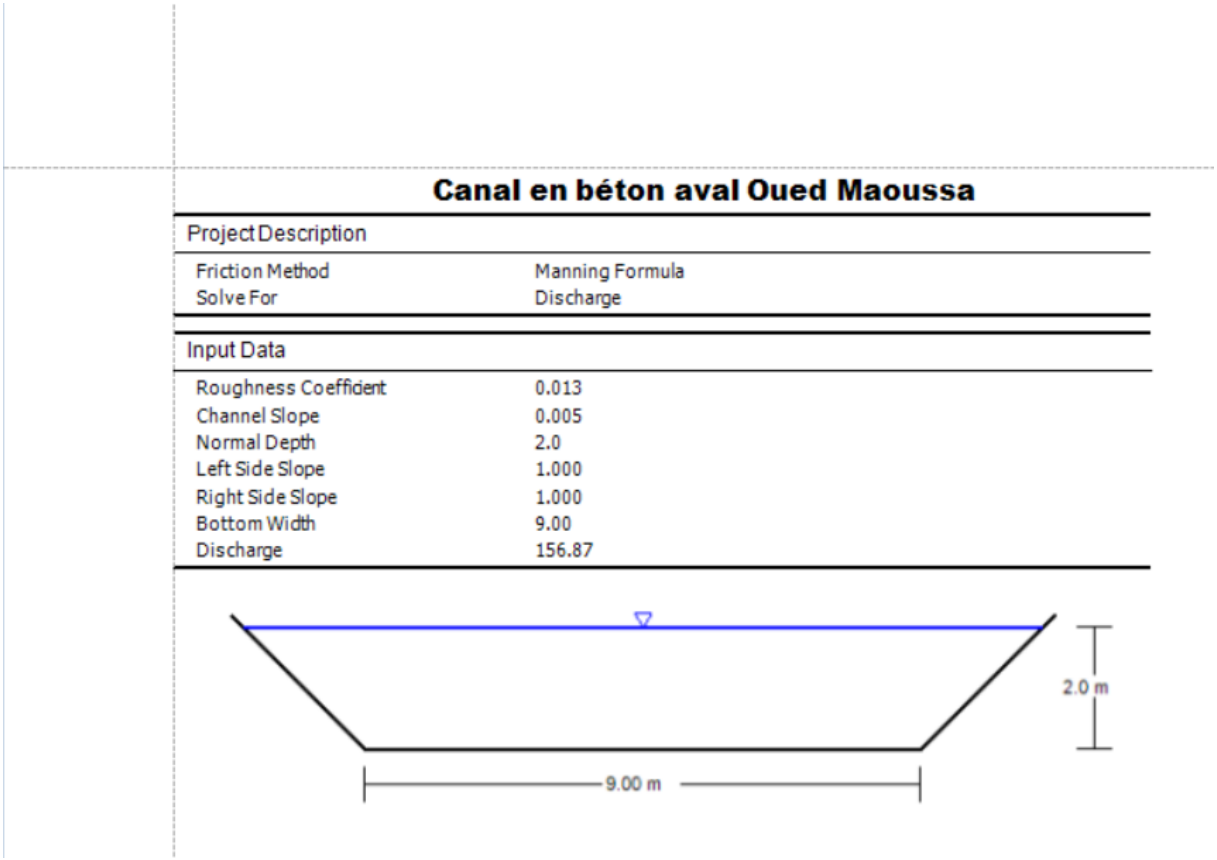


Figure IV.6 : Dimensions de l'aménagement en béton armé pour le tronçon aval de l'Oued Maoussa^

Tableau IV.6: Dimensions de l'aménagement en béton armé pour le tronçon aval de l'Oued Maoussa

Tronçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal	La rugosité
Aval	979	64	2420	0.005	1	9	13	2	0.013

- **Paramètre d'écoulement**

Les résultats de la simulation sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau IV.7 : Résultats de la simulation de l'écoulement pour le canal en béton de l'Oued Maoussa (Source : HEC-RAS).

River Station	Min Ch El (m)	W.S Elev (m)	Crit W.S (m)	E.G Elev (m)	E.G Slop (m/m)	Vel Chnl(m /s)	Flow Area (m2)	Top Width(m)	Froud# Chl
1882	555.17	556.77	556.83	557.39	0.005003	6.53	15.73	16.14	1.05
1683	554.80	555.59	555.68	556.02	0.009026	6.93	22.41	18.55	1.25
1484	549.81	550.99	551.59	553.05	0.025132	7.40	35.89	15.77	2.23
1307	546.90	547.72	548.09	548.90	0.019273	7.82	46.09	16.60	1.88
1095	546.04	547.43	547.43	547.88	0.004178	6.03	45.80	17.34	0.94
979	545.26	546.15	546.42	547.06	0.012692	7.46	26.82	16.54	1.58
872	542.26	544.70	543.49	544.75	0.000207	6.13	37.34	19.11	1.24
649	542.33	544.05	544.05	544.58	0.003942	7.54	31.22	18.37	1.15
492	539.62	543.59	541.33	543.62	0.000064	6.83	18.92	17.03	1.34
306	541.74	543.11	543.11	543.54	0.004595	6.09	40.01	18.49	1.02
168	536.67	537.63	538.44	541.55	0.079357	8.78	14.86	15.81	1.72
64	537.32	538.52	538.6	539.05	0.005767	6.12	17.11	16.71	1.09

Interprétation

- Selon nombre de Froude : Selon les valeurs du nombre de Froude, il est notable que le régime d'écoulement est torrentiel lorsque Fr > 1 ,et fleuvial lorsque Fr < 1, ce qui est clairement observé dans les résultats, confirmant ainsi ces 02 types d'écoulement.
- Selon la vitesse : La vitesse d'écoulement, qui est superieure a 6 m/s et infeirieur a 10 m/s , est conforme à la vitesse admissible . Cette vitesse est acceptable pour un canal en enrochement. D'un point de vue technique, un canal enrochement offre une bonne protection.

IV.3.2 Les Sections en travers

Les sections transversales de l'Oued Maoussa après simulation sont montrées dans la figure ci-dessous :

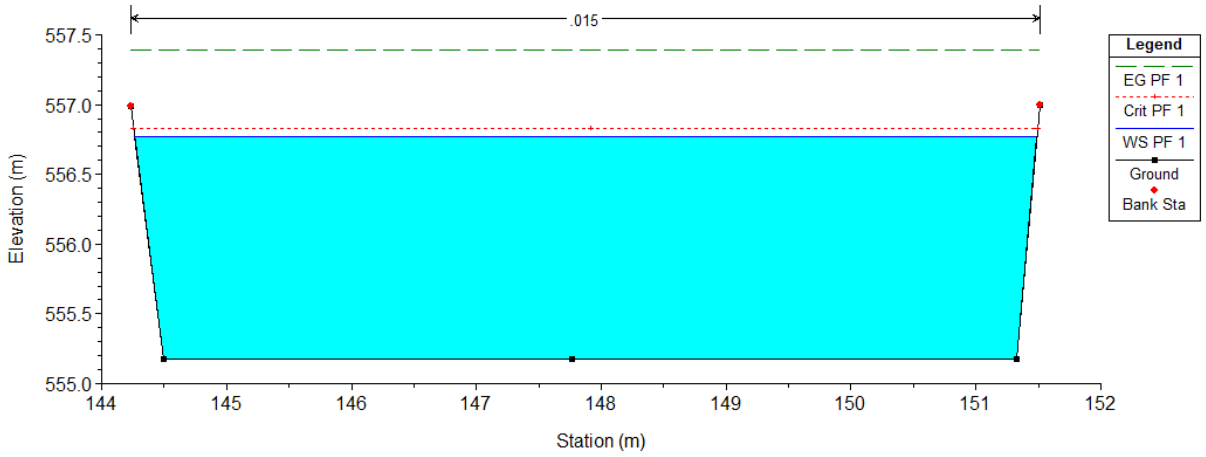


Figure IV.7 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon Amont d'oued Maoussa (station 1882).

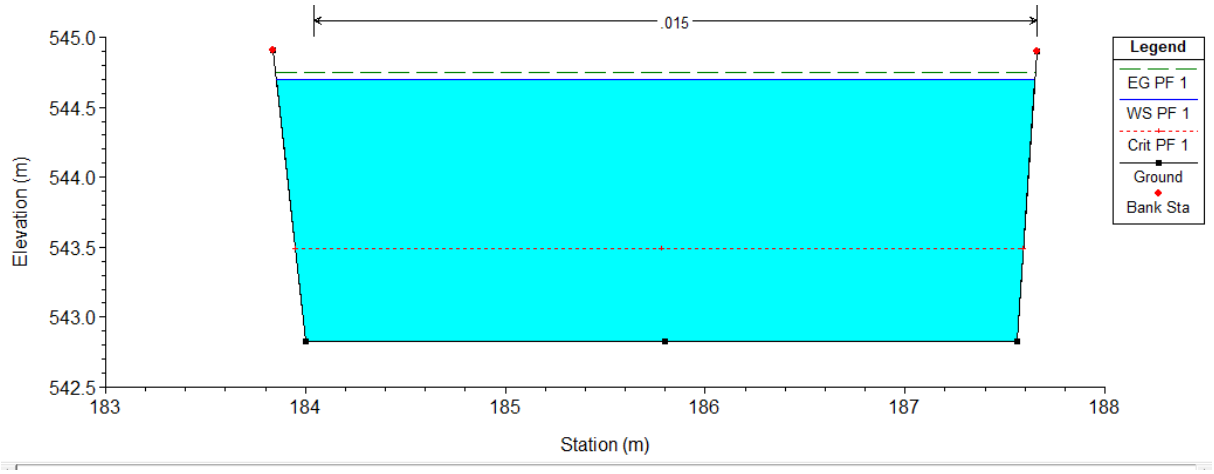


Figure IV.8 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon En milieu d'oued Maoussa (station 872).

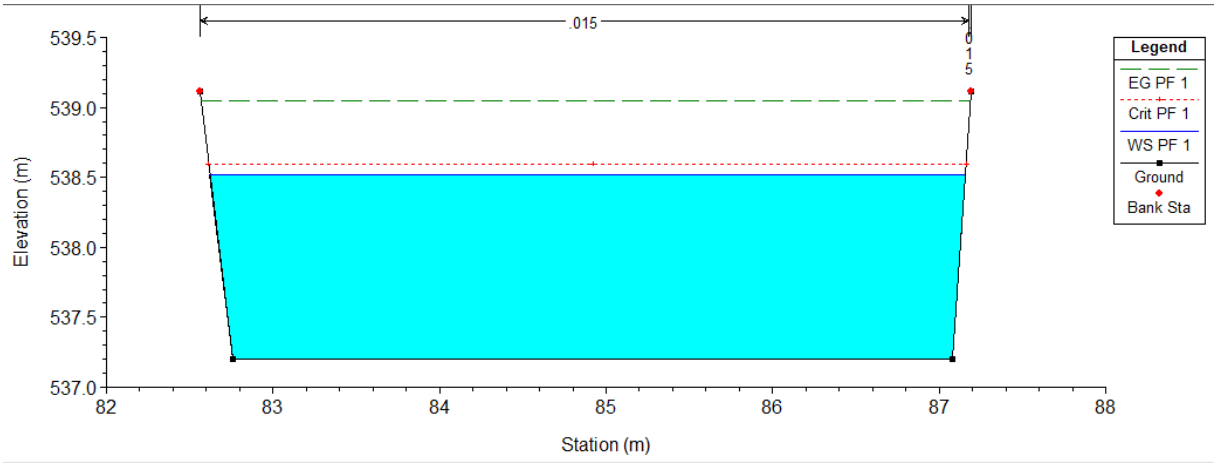


Figure IV.09 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon aval d'oued Maoussa (station 64).

IV.3.1.1 : Évaluation du coût de la variante : Il est estimé que l'épaisseur du revêtement en béton des parois du coursier canal trapézoïdal varie de 0,15 à 0,4 mètres. Le radier du cheval an une épaisseur estimée de 0,2 à 0,5 m (M. HASSANE, 2015, Blida).

Et on doit vérifier que :

- Les parois du canal en béton armé ont une épaisseur de 0.15 m.
- Le radier en béton armé mesure 0.3m d'épaisseur.
- Une épaisseur de 0.15 m est suggérée pour le béton de propreté.
- Le coût de la variante du canal en béton armé est estimé en se basant sur les quantités de terrassements et les volumes de remblai et de déblai, déterminés par les simulations effectuées avec HEC-RAS.

Tableau IV.8 : Devis pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé en amont de l'Oued Maoussa.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Terrassement	Déblais	m3	5 402	350	1 890 700
	Remblais	m3	13 553	700	9 487 100
Béton de propreté		m3	9 660	8 000	77 280 000
Béton dosé à 350 Kg/m3		m3	14 490	32 000	463 680 000
Montant total					**552 337 800**

Tableau IV.10 : Devis pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé en aval de l'Oued Maoussa .

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Terrassement	Déblais	m3	6 773	350	23 712 273
	Remblais	m3	14 036	700	9 825 200
Béton de propreté		m3	9 438	8 000	75 504 000
Béton dosé à 350 Kg/m3		m3	14 157	32 000	453 024 000
Montant total					**562 065 473**

Tableau IV.11 : Devis total pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé de l'Oued Maoussa

	Tronçons	
	Amont	Aval
Montant (DA)	**552 337 800**	**562 065 473**
Montant Totale (DA)	**1 114 403 273**	
TVA 19%	**211 736 625**	
Total TTC	**1 326 139 898**	

- **D'après les résultats obtenus :**

Selon les résultats obtenus, le béton se révèle être un choix approprié pour la gestion des crues centennales. Les canaux en béton présentent une durabilité remarquable, résistant aux intempéries et à l'usure, tout en ayant une longue durée de vie et nécessitant peu d'entretien. Leur faible rugosité et leur étanchéité améliorent l'efficacité hydraulique en minimisant les pertes d'eau. En outre, ces canaux sont adaptables à différentes formes et tailles, faciles à réparer, et leur robustesse structurelle assure une grande stabilité et une sécurité accrue.

IV.3.2 Canal en enrochement

L'enrochement est une méthode couramment utilisée pour stabiliser les berges et le lit des cours d'eau, en s'appuyant sur des roches extraites de carrières. Cette technique consiste à disposer les roches en couches avec une inclinaison modérée des talus, généralement entre 3/2 et 2/1, sans recourir au béton. Pour l'aménagement de l'Oued Maoussa , qui vise à protéger la ville de Mascara contre les crues, le tonnage requis pour l'enrochement est estimé entre 1 et 1,5 tonne, avec un diamètre médian des roches (D50) d'environ 500 cm. Cette approche garantit une structure à la fois durable et robuste, capable de stabiliser efficacement les berges tout en s'intégrant harmonieusement dans le milieu naturel environnant.

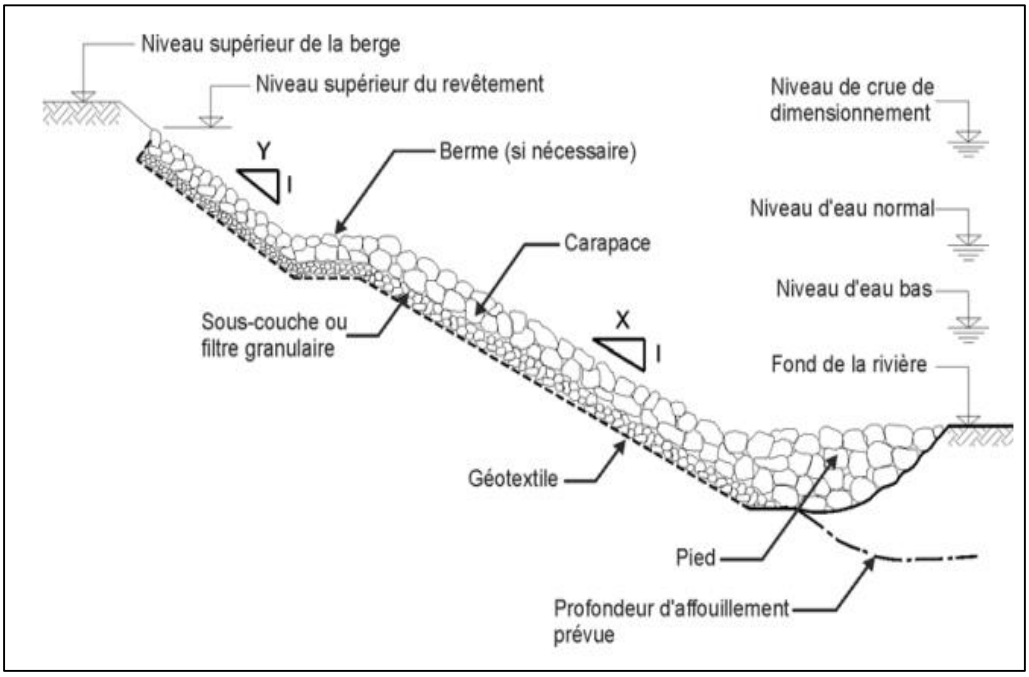


Figure IV.11 Les éléments constructifs d'un canal en enrochement.

- **Dimensionnement**

La deuxième variante proposée concerne la conception d'un canal en enrochement de forme trapézoïdale, s'étendant sur une longueur totale de 4720 mètres (4.720km). Ce canal est divisé en 02 tronçons distincts, traversant le centre-ville et séparant ainsi la ville en deux parties. Il est conçu pour gérer un débit de 146 m^3/s.

- **Variante 02 (Tronçon Amont)**

Voici les résultats du calcul hydraulique pour le tronçon amont du canal trapézoïdal en enrochement.

Les dimensions du canal amont sont illustrées dans la figure ci-dessous :

Canal en enrochement amont Oued Maoussa

Project Description	
Friction Method	Manning Formula
Solve For	Discharge

Input Data	
Roughness Coefficient	0.035
Channel Slope	0.004
Normal Depth	3.0
Left Side Slope	1.000
Right Side Slope	1.000
Bottom Width	13.00
Discharge	148.23

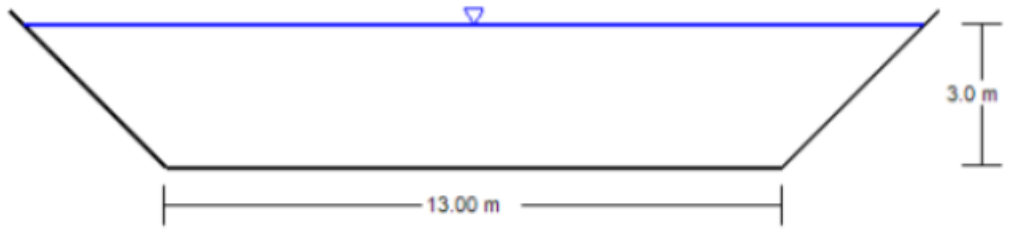


Figure IV.12 Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement cote amont d'oued Maoussa

- **Paramètre d'écoulement**

Les résultats des simulations sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau IV.12 Dimensions de l'aménagement en enrochement pour le tronçon amont de l'Oued Maoussa.

Tronçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal	La rugosité
Amont	1882	979	2300	0.004	2	13	25	3	0.035

- **Variante 02 (Tronçon Aval)**

Voici les résultats du calcul hydraulique pour le tronçon aval du canal trapézoïdal en enrochement.

Les dimensions du canal intermédiaire sont illustrées dans la figure ci-dessous :

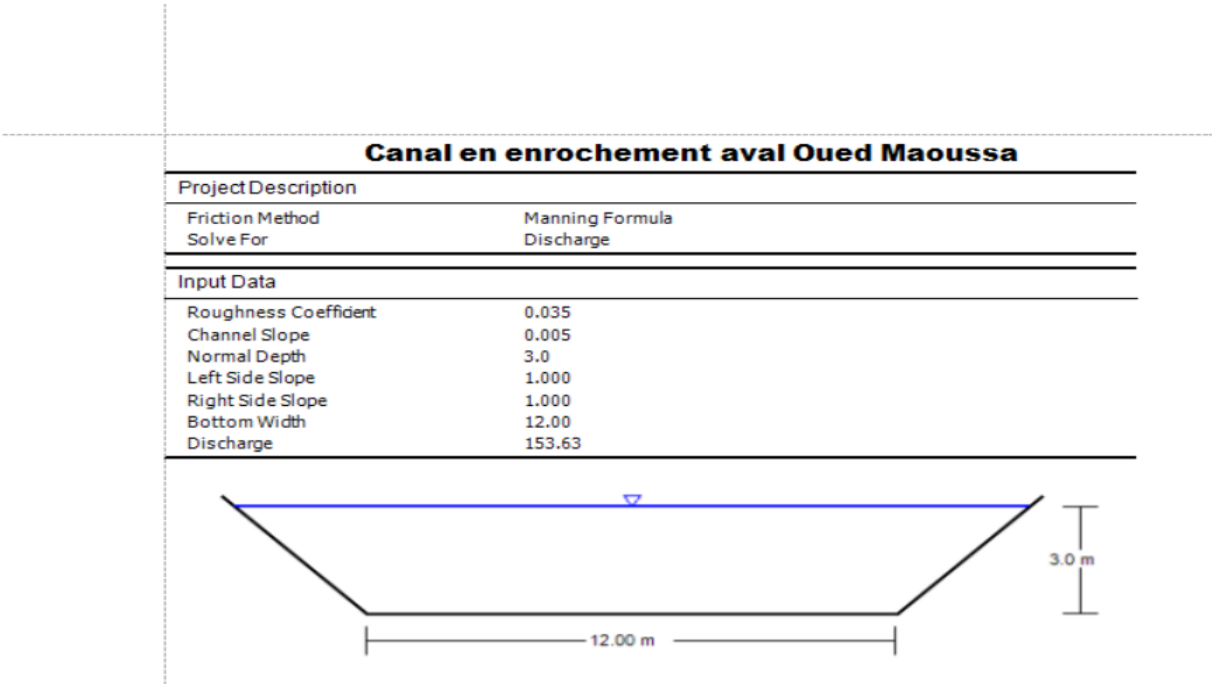


Figure IV.13 Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement en aval d'oued Maoussa .

- **Paramètre d'écoulement**

Les résultats des simulations sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau IV.13 Dimensions de l'aménagement en enrochement pour le tronçon aval de l'Oued Maoussa

Tronçon	**Section de départ**	**Section D'arrivé**	**Longueur (m)**	**Pente du projet (%)**	**Fruit de talus**	**Largeur du fond (m)**	**La largeur au miroir (m)**	**Hauteur du canal (m)**	**La rugosité**
Aval	979	64	2420	0.005	2	12	24	3	0.035

Tableau IV.14 : Résultats de la simulation de l'écoulement pour le canal en enrochement de l'oued Maoussa (Source : HEC-RAS)

	Min Ch El (m)	W.S Elev (m)	Crit W.S (m)	E.G Elev (m)	E.G Slop (m/m)	Vel Chnl(m/s)	Flow Area (m2)	Top Width(m)	Froud# Chl
1882	555.89	559.54	556.63	556.37	0.005003	2.54	20.33	22.81	1.28
1683	555.91	558.79	557.80	526.27	0.009520	2.73	20.19	19.23	1.27
1484	551.21	552.15	555.91	523.25	0.01153	2.66	18.08	17.14	2.01
1307	550.64	550.41	543.25	557.06	0.028732	3.83	29.44	20.88	1.47
1095	548.33	548.26	541.33	549.96	0.004287	2.87	23.23	21.54	1.01
979	545.74	547.40	539.25	544.74	0.016952	2.73	24.56	23.90	1.51
872	544.12	550.03	544.90	543.70	0.000365	2.66	19.40	20.11	1.99
649	544.20	555.13	546.04	545.43	0.003442	2.54	23.86	28.92	1
492	540.91	547.19	542.13	544.84	0.000598	3.18	18.19	22.57	2.12
306	540.57	543.83	549.37	548.33	0.005325	2.84	24.41	25.53	1.45
168	537.07	542.35	535.85	549.55	0.08958	2.62	17.50	19.88	1.82
64	536.85	532.72	533.89	530.96	0.006788	2.72	18.11	20.22	1.26

- **Interprétation**
- **Selon le nombre de Froude :** Les valeurs du nombre de Froude indiquent un régime d'écoulement torrentiel lorsque Fr > 1. Cette observation est clairement confirmée par les résultats, attestant de ce type d'écoulement.

- **Selon la vitesse :** La vitesse d'écoulement, variant entre 2 et 4 m/s, est conforme aux vitesses admissibles. Cela suggère qu'il n'y aura ni envasement ni érosion du canal.

D'un point de vue technique, le canal trapézoïdal en enrochement répond aux critères admissibles et fournit une protection efficace.

IV.3.2.1 Les sections en travers

Les sections transversales de l'Oued Maoussa après la simulation sont montrées dans la figure ci-dessous :

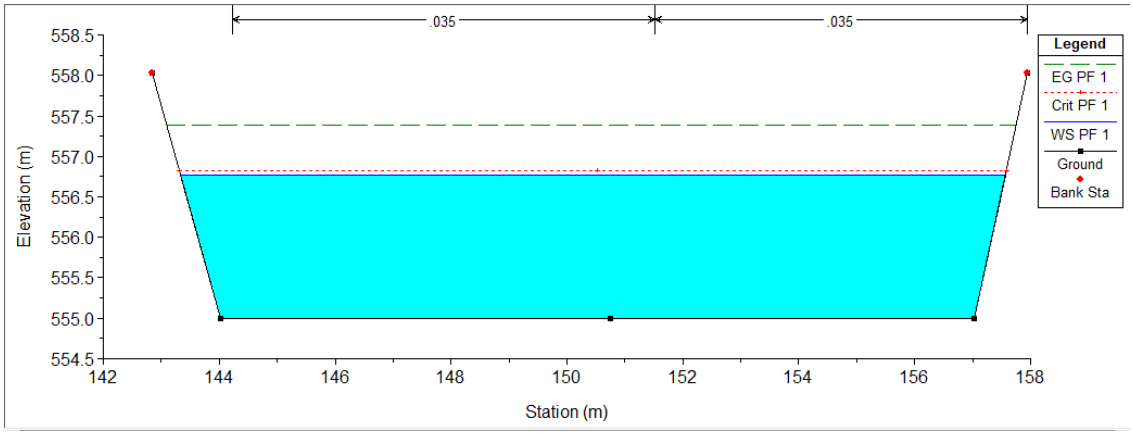


Figure IV.14 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue de 100 ans sur le tronçon Amont d'oued Maoussa (station 1882).

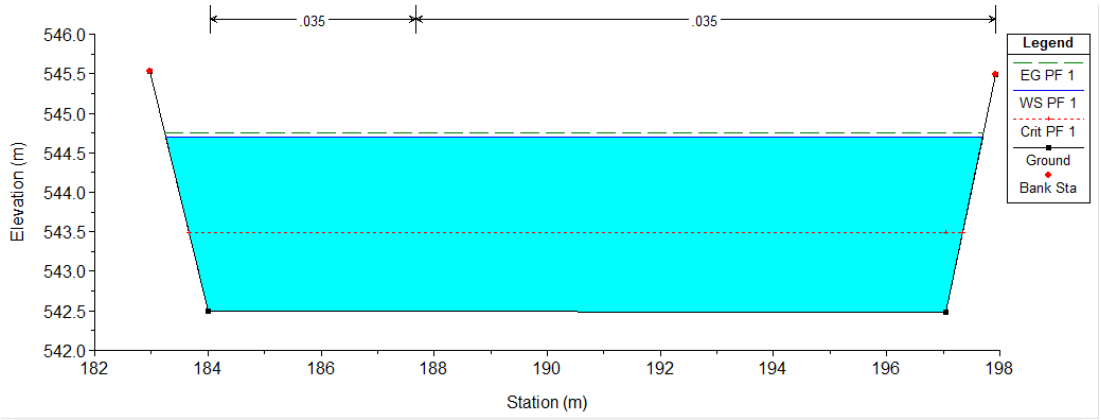


Figure IV.15: Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon du milieu d'oued Maoussa (station 872)

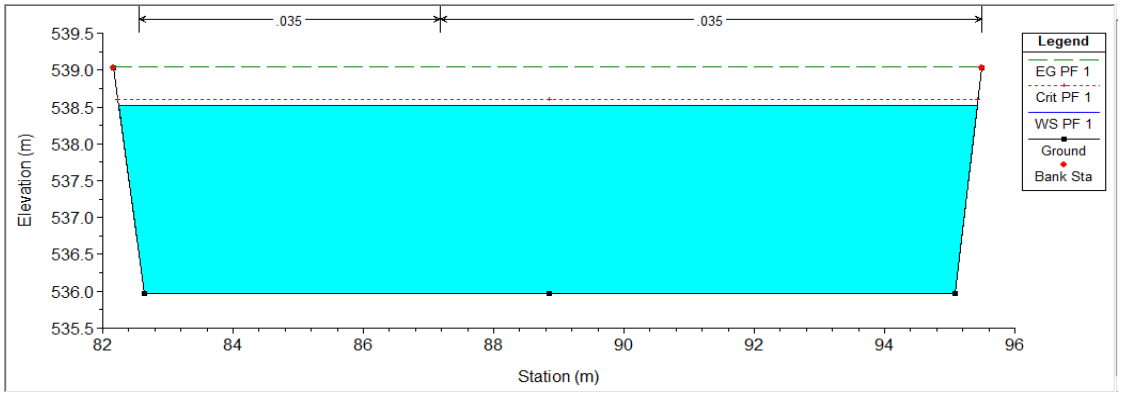


Figure IV.16 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon aval d'oued Maoussa (station 64).

- **La conception des mesures de protection des roches et du canal en enrochement.**

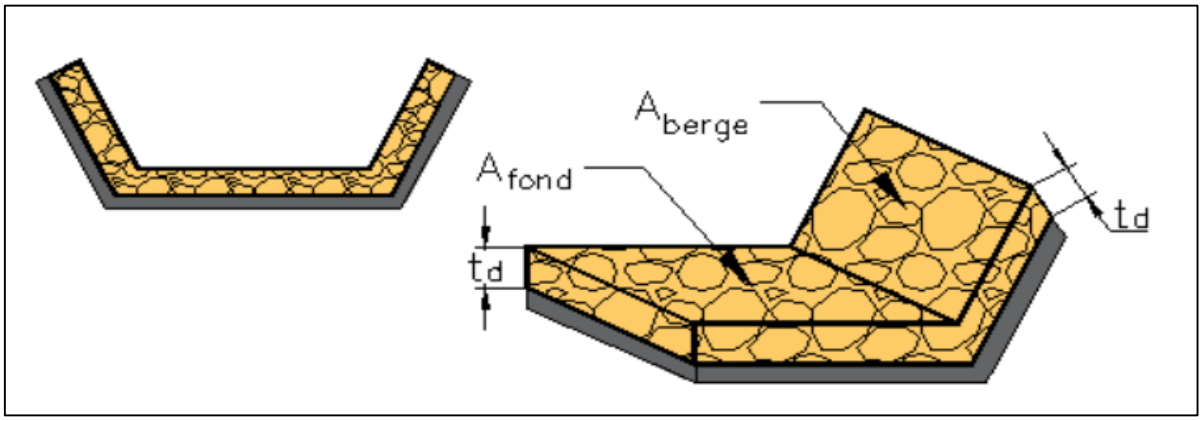


Figure IV.18 : Section d'un canal en enrochement.

- **Epaisseur orthogonale théorique td (m) :**

$$td = n \times D50 \qquad \text{(IV.11)}$$

Avec :

n : nombre de couche n = 1

D50 : Diamètre médian D50 = 0.5m.

- **Les sections d'enrochement :**

$$l_{talus} = h\sqrt{1+m^2} \quad \text{(IV.12)}$$

On trouve que :

$$A = L \times lalus \quad \text{(IV.13)}$$

Avec :

L : Longueur de tronçon.

m : Fruit de talus = 2

h :la hauteur de tronçon

Tableau IV.15 Calcul Les Sections d'enrochement.

		L(m)	l (m)	A (m^2)
Amont	Fond	2300	13	29 900
	Talus gauche	2300	6.71	15 433
	Talus droite	2300	6.71	15 433
Aval	Fond	2420	12	29 040
	Talus gauche	2420	6.71	16 239
	Talus droite	2420	6.71	16 239

- **Volume globale de dimensionnement**

$$\vartheta_{b.d} = A \times td \quad \text{(IV.14)}$$

Tableau IV.16 Calcul Volumes d'enrochement.

		N	D50 (m)	td(m)	A(m^2)	V(m^3)
Amont	**Fond**	1	0,5	0.5	29 900	14 950
	Talus gauche	1	0,5	0.5	15 433	7716.5
	Talus droite	1	0,5	0.5	15 433	7716.5
Aval	**Fond**	1	0,5	0.5	29 040	14 520
	Talus gauche	1	0,5	0.5	16 239	8119.5
	Talus droite	1	0,5	0.5	16 239	8119.5
Volume totale						**61 142**

Tableau IV.17 Sections du géotextile.

		A(m^2)
Amont	**Fond**	29 900
	Talus gauche	15 433
	Talus droite	15 433
Aval	**Fond**	29 040
	Talus gauche	16 239
	Talus droite	16 239
Surface	**Totale (m^2)**	122 276

Parmi les matériaux disponibles localement, le sable et les galets sont particulièrement adaptés pour la réalisation des filtres et des sous-couches. L'utilisation de filtres géotextiles peut également être envisagée comme alternative aux filtres granulaires. Dans certains cas, une combinaison d'enrochements et de végétation peut offrir une protection efficace contre l'érosion, bien que les géotextiles soient souvent privilégiés pour leur fonction de filtration.

IV.3.2.2 Évaluation du coût de la variante

Illustrés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau IV.18 Estimation pour la variante du canal en enrochement de l'oued Maoussa

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Terrassement	Déblais	m3	10 473	350	3 665 550
	Remblais	m3	51 741	700	36 218 700
Enrochement		m3	61 142	15 000	917 130 000
Géotextile		m2	122 276	5000	611 380 000
Montant total					1 568 394 250
TVA 19%					297 994 907
Total TTC					1 866 389 158

D'après les résultats obtenus :

L'enrochement est une solution fréquemment employée pour protéger le lit et les berges des chenaux à surface libre contre l'érosion, en raison de ses avantages environnementaux et

hydrauliques. Cette méthode présente une apparence naturelle et favorise une colonisation rapide par la végétation. Cependant, sa mise en œuvre peut s'avérer coûteuse en raison du prix des roches, des frais de transport et de la main-d'œuvre spécialisée nécessaire. De plus, les canaux enrochement occupent généralement plus d'espace que d'autres types de canaux, ce qui peut poser des défis dans les zones à espace limité. Les roches peuvent également se déplacer ou s'éroder, ce qui nécessite un entretien régulier pour maintenir leur efficacité.

IV.3.3 Canal en gabion :

Un gabion est une structure constituée de casiers métalliques ou de cages en treillis, remplis de pierres ou de graviers, utilisée dans divers projets de construction pour stabiliser les sols, protéger contre l'érosion, construire des murs de soutènement et revêtir des canaux. Les matelas en gabions, disponibles en plusieurs dimensions, telles que 2,0 × 1,0 × 0,5 m et 2,0 × 1,0 × 1,0 m, sont particulièrement utilisés pour le revêtement et la protection contre les affouillements. Lors de leur installation, les sacs sont disposés en escalier, ce qui garantit la stabilité des berges.

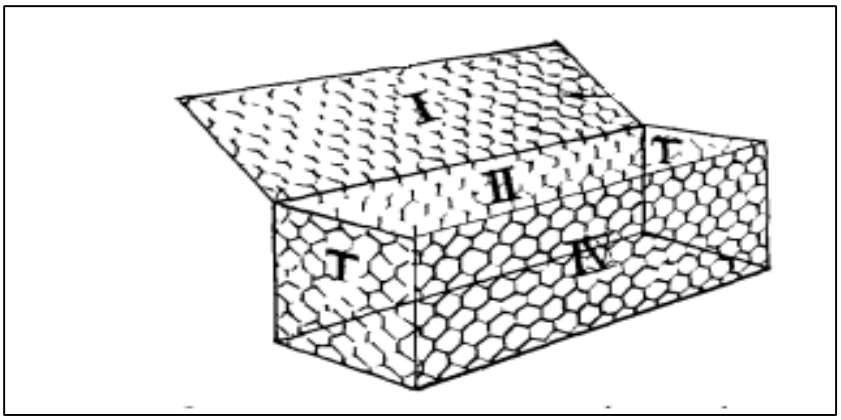


Figure IV.19 Cage de gabion.

La troisième variante propose la réalisation d'un canal en gabion de forme trapézoïdale, s'étendant sur 4720 mètres. Ce canal, divisé en 02 tronçons , traverse le centre-ville, divisant ainsi la ville en deux. Il est dimensionné pour supporter un débit de 146 m³/s.

- **Les propriétés d'une section en gabion sont les suivantes**

- Section S_m :

$$S_m = 0.5k\,(k-1) + bk \qquad \text{(IV.15)}$$

- Périmètre P_m (m) :

$$P_m = b + 3k - 1 \quad \text{(IV.16)}$$

- Rayon hydraulique R_h (m) :

$$R_h = \frac{0.5k(k-1)+bk}{b+3k-1} \quad \text{(IV.17)}$$

Avec :

K : le nombre d'étages.

b : largeur du canal.

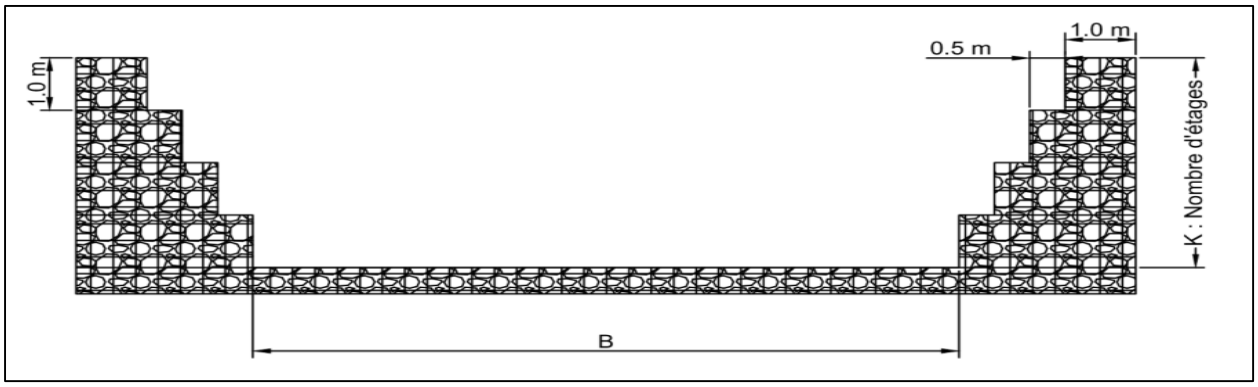


Figure IV.20 Schéma de canal en gabion

- **Variante 03 (Tronçon Amont)**

Tableau IV.19 Dimensions de canal de l'aménagement en gabion de l'Oued Maoussa (Amont).

Tronçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Largeur du fond (m)	Hauteur du canal (m)	La rugosité
Amont	1882	979	2300	0.004	8	5	0.035

Tableau IV.20 Résultats des calculs du nombre de caisses nécessaires pour le canal en gabions en amont de l'oued Maoussa

k(caisses)	Q	S	P	R
10	542.917	130	37	3.514
9	421.712	108	34	3.176
8	343.321	92	31	2.968
7	273.112	77	28	2.750
6	210.816	63	25	2.520
5	156.182	50	22	2.273

- **Variante 03 (Tronçon Aval) :**

Tableau IV.21 Dimensions de canal de l'aménagement en gabion de l'Oued Maoussa (Aval).

Tronçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Largeur du fond (m)	Hauteur du canal (m)	La rugosité
Aval	979	64	2420	0.005	8	5	0.035

Tableau IV.22 Résultats des calculs du nombre de caisses nécessaires pour le canal en gabions en aval de l'oued Maoussa.

k(caisses)	Q	S	P	R
10	542.917	130	37	3.514
9	421.712	108	34	3.176
8	343.321	92	31	2.968
7	273.112	77	28	2.750
6	210.816	63	25	2.520
5	156.182	50	22	2.273

- D'après les calculs de nombre de caisse, nous pouvons utiliser un canal composé de 5 caisses, garantissant un débit de 146 m³/s avec une marge de sécurité de 1 m sur toute la longueur des trois tronçons du canal. La largeur du canal est 08 mètres.
- **Paramètre d'écoulement**

Les résultats de la simulation sont affichés dans le tableau ci-dessus

Tableau IV.23 Résultats de la simulation de l'écoulement dans un canal en gabions de l'Oued Maoussa (Source : HEC-RAS).

	Min Ch El (m)	W.S Elev (m)	Crit W.S (m)	E.G Elev (m)	E.G Slop (m/m)	Vel Chnl(m/s)	Flow Area (m2)	Top Width(m)	Froud# Chl
1882	554.99	558.78	555.64	559.37	0.004003	3.50	20.33	15.35	1.32
1683	554.09	556.69	557.82	528.20	0.008520	3.93	20.19	16.94	1.26
1484	548.61	550.99	551.92	524.23	0.02153	4.01	18.08	14.65	1.76
1307	547.24	549.27	546.29	555.03	0.018732	3.83	29.44	13.25	2.40
1095	546.03	546.48	548.36	548.90	0.004387	2.95	23.23	11.06	1.41
979	544.84	547.55	536.28	548.77	0.014952	2.21	24.56	15.39	1.68
872	545.11	550.08	545.94	545.76	0.000356	3.05	19.40	14.10	1.10
649	551.40	554.51	545.04	547.45	0.003456	2.94	23.86	13.95	1.69
492	550.9	548.91	543.13	548.86	0.000562	3.14	18.19	14.89	2.09
306	551.7	545.80	541.31	546.32	0.005395	2.54	24.41	10.67	1.41
168	537.70	542.35	534.84	544.53	0.08965	2.73	17.50	15.38	1.89
64	536.67	539.67	536.80	530.98	0.006758	2.66	18.11	13.64	1.00

- **Interprétation**
- **Selon le nombre de Froude :** Les valeurs du nombre de Froude indiquent un régime d'écoulement torrentiel lorsque Fr > 1. Cette observation est clairement confirmée par les résultats, attestant de ce type d'écoulement.

- **Selon la vitesse :** La vitesse d'écoulement, variant entre 3 et 4 m/s, est conforme aux vitesses admissibles. Cela suggère qu'il n'y aura ni envasement ni érosion du canal.

Sur le plan technique, le canal trapézoïdal en gabions respecte les critères requis et offre une protection efficace.

IV3.3.1 Les sections en travers

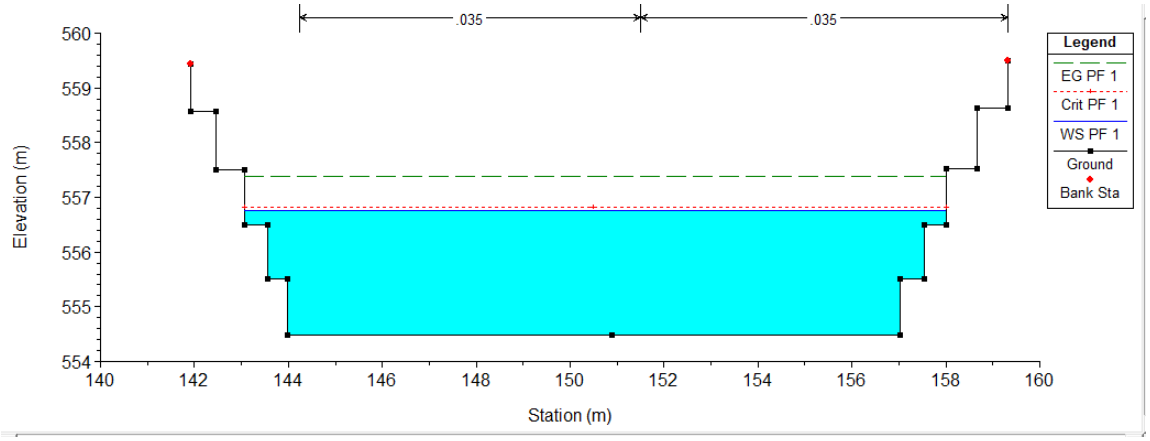


Figure IV.21 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon d'oued amont Maoussa (station 1882).

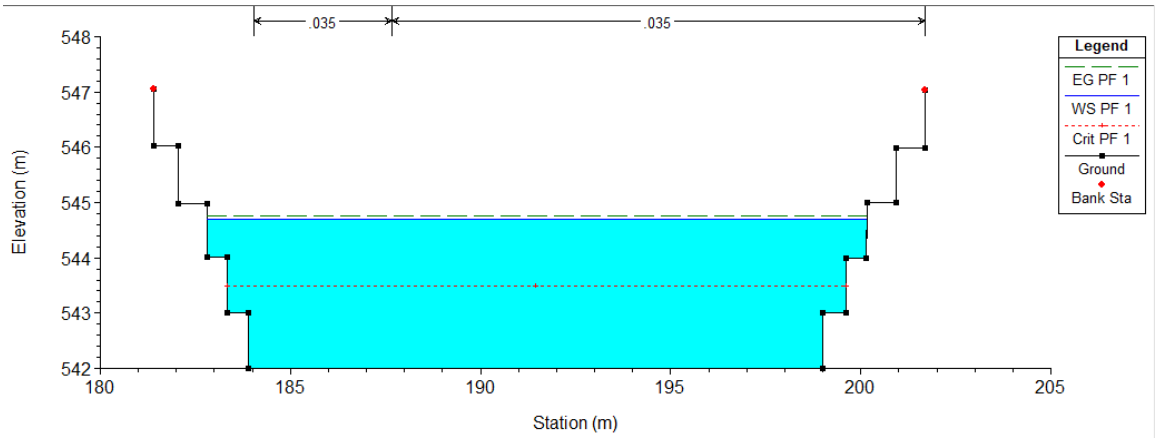


Figure IV.22 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon amont d'oued Maoussa (station 872).

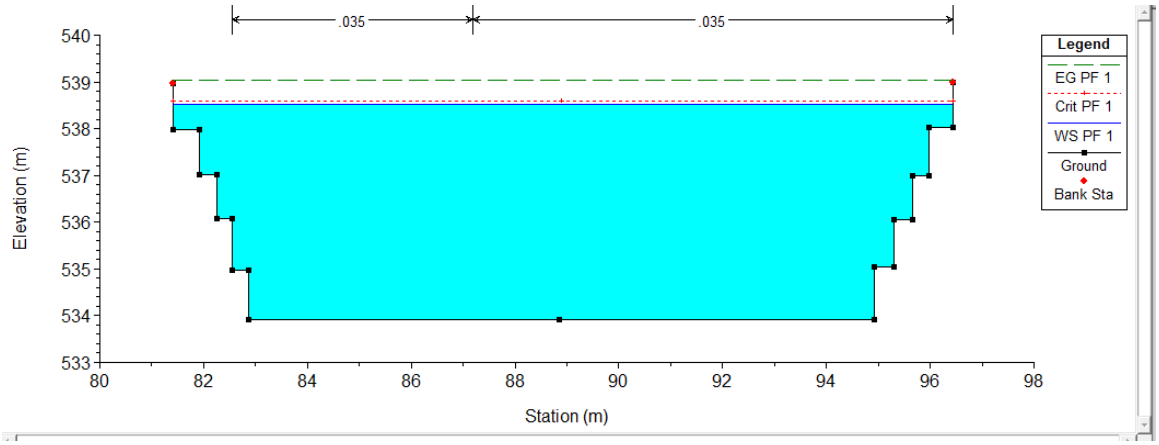


Figure IV.23 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon du milieu d'oued Maoussa (station 64)

IV.3.3.2 Évaluation du coût de la variante

Tableau IV.24 Devis de la variante canal en gabion en amont et en aval d'oued Maoussa.

Désignations des travaux		**Unité**	**Quantité**	**Prix unitaire (DA)**	**Montant (DA/mL)**
Terrassement	Déblais	m3	118 802	350	41 580 700
	Remblais	m3	5557	700	3 889 900
Gabion		m3	42 799	5000	213 995 000
Géotextile		m2	64 198	5000	320 992 500
Montant total					580 458 100
TVA 19%					110 287 039
Total TTC					690 745 139

D'après les résultats obtenus

Cette variante propose une solution efficace pour la protection hydraulique grâce à la flexibilité des gabions, qui leur permet de s'adapter aux déformations naturelles du terrain. Bien que leur installation puisse être complexe et requière une expertise spécifique, leur mise en œuvre reste relativement simple, avec la possibilité de surélever les structures si nécessaire. Cependant, des inconvénients tels que la corrosion des cages métalliques, le déplacement des pierres et la perméabilité entraînant des fuites peuvent affecter leur durabilité et nécessiter un entretien régulier. Malgré ces défis, les gabions constituent une option économique par rapport aux structures en béton pour des ouvrages entièrement déversants.

Tableau IV.27 Les critères de choix de la variante adéquate pour l'aménagement de l'oued Maoussa

Critère / La variante	Efficacité Hydraulique	Durabilité	Facilité de réalisation	Entretien	Coût
Béton	3	1	2	1	1
Enrochement	3	2	3	2	2
Gabion	3	3	2	2	3

IV.4.1 Proposition

Dans le cadre de la protection de la ville de Mascara contre les crues centennales, l'installation d'un barrage de rétention constitue une solution stratégique. Ces barrages jouent un rôle crucial dans la régulation des débits des cours d'eau, notamment lors de fortes pluies ou de la fonte des neiges. En stockant temporairement les eaux excédentaires, ils contribuent à réduire les risques d'inondation en aval en libérant l'eau de manière contrôlée une fois le danger écarté. Cette approche permet une gestion sécurisée et prévisible des flux d'eau, protégeant ainsi les zones riveraines des dommages liés aux inondations.

Les bassins de rétention sont des infrastructures hydrauliques essentielles, conçues pour emmagasiner temporairement les eaux de crue. Leur fonction principale est de réguler les débits en aval en restituant progressivement l'eau après la crue. Ce mécanisme atténue les risques d'inondation, notamment en réduisant les pics de crue. De plus, ces infrastructures jouent un rôle vital en période de sécheresse en maintenant des niveaux d'eau stables dans les cours d'eau grâce à une libération contrôlée.

Conclusion

Le dimensionnement du projet d'aménagement de l'Oued Maoussa s'appuie sur une évaluation minutieuse des débits d'écoulement, réalisée à l'aide de méthodes hydrologiques sophistiquées. Cette analyse permet de déterminer les solutions de conception les plus appropriées pour garantir la protection des berges. Pour les sections amont et intermédiaires en aval, l'installation de canaux en gabion est préconisée. Cette option est particulièrement adaptée en raison des méandres présents dans ces zones. Les canaux en gabion contribueront à réduire l'érosion des rives extérieures tout en minimisant les dépôts de sédiments sur les rives intérieures, ce qui aidera à stabiliser les méandres et à réguler leur évolution au fil du temps. De plus, cette solution présente des avantages économiques, étant à la fois rentable et efficace. La protection des

berges sera assurée par un revêtement en gabion, répondant ainsi aux exigences esthétiques de la ville tout en combattant la dégradation observée dans cette région. Ce revêtement se distingue également par son coût abordable.

Enfin, pour l'ensemble du projet d'aménagement, une marge supplémentaire de 0,9 m sera ajoutée au tirant d'eau afin de compenser les perturbations de surface et d'éviter toute submersion des berges. Cette mesure garantit une gestion adéquate des flux d'eau et renforce la protection des berges contre les risques d'inondation

Chapitre VI

Organisation de chantier

Introduction

L'organisation d'un chantier est un processus essentiel qui vise à garantir l'efficacité et l'économie dans la réalisation d'un projet de construction. Elle englobe toutes les dispositions et stratégies mises en place pour coordonner les ressources humaines et matérielles, tout en respectant les directives générales établies par le maître d'ouvrage. Ces directives se concentrent principalement sur trois axes fondamentaux : la qualité, le coût et la rapidité d'exécution.

Une analyse approfondie du site est cruciale pour élaborer un plan technologique optimisé, permettant une utilisation rationnelle des équipements à chaque phase du projet. Cela implique non seulement de définir précisément les méthodes d'exécution et les procédures opérationnelles, mais aussi d'organiser adéquatement les postes de travail pour favoriser une mécanisation avancée et une répartition efficace des tâches.

L'objectif principal est de minimiser les coûts tout en respectant les délais impartis et en garantissant la sécurité sur le chantier. Pour y parvenir, il est essentiel de sélectionner et de coordonner une main-d'œuvre qualifiée, tout en veillant à ce que la qualité des travaux soit conforme aux exigences techniques et normatives. Une gestion rigoureuse des ressources humaines, tant en termes de quantité que de qualité du personnel, est indispensable pour optimiser le coût de revient du projet.

En résumé, une organisation de chantier bien pensée et exécutée permet non seulement de répondre aux contraintes d'espace et de temps imposées par le marché, mais aussi de réaliser le projet conformément aux plans établis, tout en garantissant une qualité supérieure, des délais réduits, des coûts maîtrisés et une sécurité optimale pour tous les intervenants.

V.1 Généralité

V.1.1 Rôles et responsabilités des participants au chantier

Avant de plonger dans les détails spécifiques d'un projet, il est essentiel de clarifier les rôles et responsabilités des différents acteurs impliqués dans le processus de construction. Sur un chantier, chaque intervenant joue un rôle crucial pour garantir le bon déroulement du projet. Les principaux acteurs, chacun ayant des missions clairement définies, collaborent afin de s'assurer que le projet respecte les exigences en matière de qualité, de sécurité et de délais. Cette coordination soigneuse entre les différentes parties prenantes est fondamentale pour le succès du chantier, que ce soit durant la phase de conception, de planification ou d'exécution

V.1.1.1 Maître d’ouvrage

Le Maître d'ouvrage (MOA), qu'il s'agisse d'une personne physique ou morale (entreprise, institution, particulier, etc.), est l'entité pour laquelle les travaux de construction ou de rénovation sont effectués. Il joue un rôle clé dans la définition des objectifs du projet, l'organisation du financement et la passation des marchés. La mission du Maître d'ouvrage débute par l'établissement d'un plan de financement basé sur les estimations fournies par le Maître d'œuvre, ce qui garantit le paiement de l'entreprise chargée de réaliser les travaux. Il est également responsable de la gestion globale du projet, de la coordination des différents acteurs impliqués et de la communication des informations pertinentes tout au long du processus.

Le Maître d'ouvrage a plusieurs responsabilités clés :

- **Gestion du projet :** Il supervise la réalisation du projet selon les objectifs définis.
- **Communication :** Il transmet les informations essentielles sur le projet aux parties prenantes.
- **Respect des engagements :** Il veille au respect des termes contractuels et des obligations financières.
- **Coordination :** Il assure la cohésion de l'équipe de projet et la bonne exécution des contrats.
- **Acquisition et gestion :** Il devient propriétaire des ouvrages après leur réception et peut également en assurer la gestion.

V.1.1.2 Maître d'œuvre

Le Maître d'œuvre (MOE) est une personne physique ou morale désignée par le chef de projet pour concevoir, superviser et garantir l'exécution des travaux sur un chantier. Sa mission débute par l'établissement d'un planning détaillé basé sur le délai contractuel et le calendrier prévisionnel, incluant le planning des études et la présentation des échantillons. Le Maître d'œuvre reçoit un ordre de service, un document écrit (signé et daté) qui autorise le début des travaux à une date précise, marquant ainsi le point de départ du délai d'exécution.

Le Maître d'œuvre joue un rôle clé dans :

- **La Conception et Supervision :** Il est responsable de transformer les exigences du propriétaire en plans détaillés et spécifications, supervisant l'exécution des travaux pour garantir le respect des objectifs budgétaires et des normes de qualité.

- **Gestion du Planning :** Il établit et ajuste le planning des travaux en fonction des délais contractuels, des décalages éventuels, et des besoins du chantier.
- **Coordination et Communication :** Il assure la coordination entre les différents corps d'état, propose des mesures correctives en cas de problèmes, et participe aux réunions hebdomadaires de chantier.
- **Contrôle et Documentation :** Il prépare les annexes de suivi, enregistre les décalages, établit les ordres de service, et s'occupe des attachements de travaux. Il est également chargé de la réception des ouvrages, de l'élaboration du dossier de consultation des entreprises, et de l'assistance au maître d'ouvrage pour l'évaluation des offres.
- **Responsabilité :** Il détient une autorité effective sur le chantier et est responsable de la bonne exécution des travaux, y compris la proposition de la réception des ouvrages et le règlement des paiements.

V.1.1.3 Entreprise

Entreprise de construction est une entité, qu'elle soit physique ou morale, engagée par le maître d'ouvrage pour mener à bien un projet spécifique. Ses responsabilités principales incluent :

- **Assurance Qualité :** Garantir que les travaux respectent les normes de qualité définies dans le manuel qualité de l'entreprise et le plan assurance qualité spécifique au chantier.

- **Gestion des Ressources :** Planifier et gérer les coûts, ainsi que coordonner le personnel, les matériaux, et les équipements nécessaires pour le projet.

- **Exécution des Travaux :** Réaliser les travaux conformément aux documents contractuels, en respectant le calendrier d'exécution et en évitant les temps morts.

- **Conformité Contractuelle :** S'assurer que toutes les exigences du contrat sont respectées et que les objectifs du projet sont atteints.

- **Responsabilité du Chantier :** Superviser l'ensemble des opérations jusqu'à la réception finale de l'ouvrage.

V.1.1.4 Entrepreneur

Il est responsable de la réalisation et, dans certains cas, de la conception détaillée des travaux jusqu'à la réception finale de l'ouvrage. Sur le chantier, le conducteur de travaux ou contremaître représente l'entrepreneur et gère les aspects techniques, administratifs et financiers, y compris la gestion des matériaux, de la main-d'œuvre et des relations avec les fournisseurs. En résumé, l'entrepreneur supervise globalement le projet, tandis que le contremaître s'occupe des opérations quotidiennes et des aspects financiers du chantier.

V.2 Devis quantitatif et estimatif du projet

L'estimation des coûts s'appuie sur divers outils informatiques pour optimiser la précision et l'efficacité du processus. Les logiciels de gestion de projet, les tableurs avancés, ainsi que les outils de simulation et d'analyse statistique jouent un rôle essentiel dans cette démarche. Ces outils permettent non seulement de simplifier l'application des différentes méthodes d'estimation, mais aussi d'explorer rapidement diverses solutions économiques, facilitant ainsi une prise de décision éclairée et précise pour la gestion financière du projet.

Les estimations des coûts déterminent les prix des travaux, aménagements et ouvrages proposés, notamment :

Le coût unitaire des travaux de terrassement.

Le coût unitaire pour la fourniture et la pose de gabions et de géotextiles.

Le tableau ci-dessous présente les montants associés à la réalisation de la variante sélectionnée.

Tableau V.1 Devis global pour la variante du canal trapézoïdal en gabion pour l'oued Maoussa.

	Tronçons	
	Amont	**Aval**
Montant Totale (DA)	208 595 600	
TVA 19%	9 570 482	
Total TTC	**218 166 082**	

- Le devis pour l'aménagement de l'oued Maoussa, relatif à la variante du canal trapézoïdal en gabion, est de : **Vingt et un miliards et huit cents soixante six millions centimes algériens.**

V.3 Généralité sur les plannings

V.3.1 Définition de planification des travaux

La planification d'un projet englobe l'identification, l'organisation et la programmation des diverses tâches nécessaires à sa réalisation, tout en définissant les compétences requises pour leur exécution. Cet outil essentiel pour le chef de projet vise à optimiser l'efficacité opérationnelle et à garantir une gestion efficace des ressources. Les objectifs principaux de la planification comprennent :

Organisation des postes de travail : Définir clairement les responsabilités et les tâches attribuées à chaque poste.

- **Surveillance en temps réel :** Suivre le progrès des opérations pour assurer le respect des délais établis.
- **Analyse des tâches :** Évaluer les différentes activités nécessaires pour le succès du projet.
- **Évaluation des délais :** Mesurer le temps nécessaire pour chaque tâche et ajuster les plannings en conséquence.
- **Amélioration des méthodes de travail :** Identifier et mettre en œuvre des solutions pour simplifier et optimiser les processus.

Le planning constitue un tableau crucial comportant des données importantes, qui peuvent être fixes ou évolutives, adaptées à divers usages. En tant que fonction d'ordonnancement, le planning a pour missions de préparer, organiser, programmer et lancer les travaux. Il est un document central sur le chantier, engageant toutes les parties prenantes, du client aux divers niveaux de responsabilité au sein de l'entreprise.

V.3.2 Plannings généraux de gestion de l'entreprise

Bien que ces aspects ne soient pas couverts en détail dans ce cours, il est pertinent de mentionner les principaux types de plannings utilisés pour la gestion de l'entreprise :

- **Planning Général de Financement :** Suivi des financements alloués aux différents chantiers de l'entreprise.
- **Planning d'Avancement des Chantiers :** Suivi de l'évolution et de l'avancement des divers chantiers en cours.
- **Planning de Rotation et d'Entretien du Gros Matériel :** Organisation de la rotation du matériel lourd et de son entretien préventif et correctif.
- **Planning Général de la Main d'Œuvre :** Coordination et gestion des ressources humaines au siège et sur les chantiers.

V.3.3 Phases de planification

La planification est un processus stratégique essentiel pour guider l'exécution des travaux. Elle se compose des étapes suivantes :

- **Collecte d'Informations :** Cette phase implique la synthèse et l'analyse des données issues d'études comparatives, afin d'optimiser le plan de réalisation du projet.
- **Décomposition du Projet :** Le projet est divisé en tâches spécifiques, chacune attribuée à un responsable désigné. Chaque tâche est associée aux besoins en matériel et à une durée de réalisation, basée sur le rythme de travail des équipes ou des machines impliquées.
- **Relations Entre les Tâches :** Deux types de relations entre les tâches doivent être considérés :

    - Logique Séquentielle : Une tâche doit être achevée avant que la suivante puisse commencer.
    - Relations Préférentielles : Certaines tâches peuvent être réalisées en parallèle ou selon un ordre spécifique.

- **Choix de la Méthode de Calcul :** La sélection de la méthode de calcul dépend du type d'ouvrage à réaliser. Pour les projets où les opérations se succèdent de manière linéaire, comme dans notre cas, la méthode du chemin critique (CPM) est généralement la plus appropriée.

V.3.4 Planification des travaux

On distingue trois types de planification pour les travaux :

- **Planification au Plus Tôt :** Toutes les tâches commencent à la date la plus anticipée possible. Cette approche est adoptée lorsque les ressources sont abondantes et que l'entreprise est impliquée dans plusieurs projets simultanément, permettant ainsi une exécution rapide des travaux.
- **Planification au Plus Tard :** Les tâches débutent à la date la plus tardive permise. Ce plan est préféré lorsque les ressources sont limitées, car il permet une gestion plus économique en évitant des dépenses et des retards non nécessaires.
- **Planification Intermédiaire :** Les opérations commencent à une date intermédiaire, entre les dates au plus tôt et au plus tard. Ce type de plan est choisi lorsque les ressources sont suffisantes et que l'entreprise se concentre sur un seul projet, facilitant ainsi une gestion efficace des ressources.

V.3.5 Méthode de présentations les plannings

Il existe deux méthodes de planification principales :

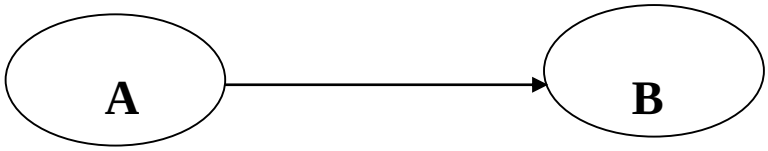
- Méthode basée sur le réseau.
- Méthode basée sur le graphique.

V.3.5.1 Méthode basée sur le réseau

La représentation graphique d'un projet, appelée réseau, permet de visualiser les relations entre les différentes opérations, qu'elles soient successives, simultanées ou convergentes, ainsi que leur durée de réalisation. Deux types de réseaux sont principalement utilisés dans les méthodes de planification : la méthode du chemin critique (CPM) et la technique d'évaluation et de revue de programme (PERT). Ces méthodes se concentrent sur la modélisation des tâches et des événements pour gérer les projets, en identifiant les séquences critiques qui influencent la durée totale du projet. En résumé, le réseau est une représentation visuelle qui illustre les relations entre les différentes opérations et leurs durées. On distingue principalement deux types de réseaux :

- **Réseau à nœuds**

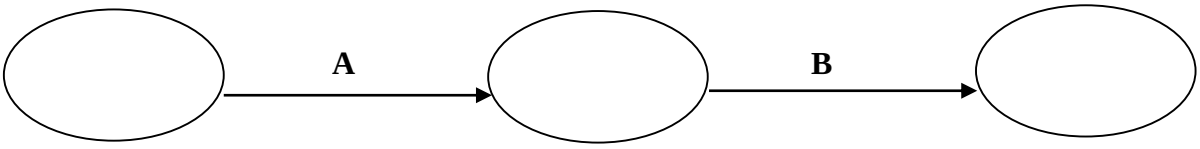
Dans un réseau à nœuds, chaque nœud représente une opération ou une étape spécifique du processus, tandis que les flèches indiquent la séquence ou le flux d'exécution entre ces opérations. Ces flèches, généralement directionnelles, précisent l'ordre dans lequel les opérations doivent être effectuées. Ce système permet de visualiser clairement les interactions entre les différentes étapes d'un projet. Ainsi, les nœuds symbolisent les opérations et les flèches illustrent leur enchaînement logique, offrant ainsi une compréhension globale du déroulement du processus.



- L'opération (B) ne peut débuter qu'une fois l'opération (A) entièrement achevée.

- **Réseau à flèche**

Dans un réseau à flèches, chaque flèche représente une opération, tandis que les nœuds symbolisent la succession des opérations, indiquant l'ordre et la progression du projet.



- L'opération A précède l'opération B.
- Il est important de noter que le graphique ne peut être créé sans le réseau, qui constitue un outil de calcul essentiel pour répondre à des questions spécifiques. Le graphique, en revanche, permet d'interpréter et de clarifier les données issues du réseau, rendant ainsi ces informations plus accessibles et compréhensibles.

Construction d'un réseau

Pour construire un réseau, il convient de respecter six étapes clés, alignées avec les principes de la gestion de projet.

Élaboration de la liste des tâches **:** Créer une liste détaillée de toutes les activités nécessaires pour compléter le projet, incluant la durée estimée, les ressources nécessaires, et les interdépendances.

Identification des interdépendances **:** Déterminer les relations entre les tâches pour établir un ordre logique d'exécution.

Construction des graphes partiels **:** Créer des diagrammes de réseau, tels que les diagrammes PERT ou Gantt, pour représenter visuellement les relations entre les tâches.

Regroupement des graphes partiels **:** Si le projet comporte plusieurs sous-projets, regrouper les graphes partiels pour former un plan global.

Identification des tâches de début et de fin : Définir les tâches marquant le début et la fin du projet, souvent considérées comme des jalons importants.

Création du réseau final : Assembler l'ensemble des informations pour constituer le réseau complet, prêt pour l'analyse et l'interprétation.

VI.3.6 Différentes méthodes basées sur le réseau

VI.3.6.1 Méthode C.P.M (Critical Path Method)

La Méthode C.P.M (Critical Path Method) vise à optimiser les délais de réalisation d'un projet en suivant trois phases essentielles :

Évaluation des Ressources : Identifier et déterminer le personnel nécessaire pour l'accomplissement des tâches spécifiques au projet.

Analyse Détaillée du Réseau : Réaliser une analyse minutieuse du réseau des tâches, en décomposant les activités heure par heure et jour par jour, en fonction de l'unité de temps définie.

Ajustement aux Contraintes : Adapter le réseau en fonction des contraintes et des conditions imposées par l'entreprise, afin d'assurer une gestion efficace des ressources et des délais (Benlaoukli, 2004).

V.3.6.2 Méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technique)

La méthode PERT, développée par la Marine américaine en 1956 pour le programme de missiles Polaris, est une technique avancée de gestion et d'ordonnancement des projets. Elle se distingue par sa capacité à représenter graphiquement les tâches et leurs interrelations sous forme de réseau, ce qui facilite l'analyse et le contrôle du projet.

- **Objectifs de la méthode PERT :**

Détermination des délais : Évaluer le délai total nécessaire pour achever le projet et identifier des moyens pour le réduire.

Impact des modifications : Comprendre les conséquences des changements dans la durée des tâches sur le projet global.

Optimisation des ressources : Évaluer les ressources nécessaires et planifier efficacement.

Relation délais-coûts : Analyser le lien entre les délais de réalisation et les coûts associés.

Visualisation et Coordination : Le réseau PERT fournit une représentation visuelle de l'enchaînement logique des tâches, facilitant ainsi leur coordination et leur contrôle. Cette visualisation améliore les prévisions concernant la durée et les coûts du projet.

Identification du chemin critique : Le tracé du réseau permet de déterminer le chemin critique, c'est-à-dire la séquence la plus longue de tâches depuis le début jusqu'à la fin du projet. Cela permet de :

- Calculer la durée totale du projet.
- Identifier les tâches dont les retards entraînent un allongement du projet.

V.3.7 Méthode de calcul PERT

V.3.7.1 Les paramètres de la méthode PERT

Lors de l'application de la méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique), il est crucial de considérer les paramètres suivants :

- **DCP (Date de Début au Plus Tôt) :** La date la plus anticipée à laquelle une tâche peut débuter, en tenant compte des dépendances et contraintes du projet.

- **Tr (Temps de Réalisation) :** Le temps estimé nécessaire pour compléter une tâche spécifique.
- **DFP (Date de Fin au Plus Tôt) :** La date la plus précoce à laquelle une tâche peut se terminer, en fonction des contraintes du projet.
- **DCPP (Date de Début au Plus Tard) :** La date la plus tardive à laquelle une tâche peut commencer sans impacter le calendrier global du projet.
- **DFPP (Date de Fin au Plus Tard) :** La date la plus tardive à laquelle une tâche peut être achevée sans perturber le planning global du projet.

V.3.7 Méthodes basées sur le graphique

Parmi ces méthodes, le diagramme de Gantt est un outil clé qui utilise des graphiques pour représenter visuellement les tâches d'un projet et leur séquence dans le temps. Bien que les diagrammes de Gantt soient particulièrement efficaces pour suivre l'avancement du projet au fil du temps, ils offrent moins de détails sur les relations entre les différentes tâches par rapport aux méthodes basées sur le réseau.

Méthode linéaire (Technique de la ligne d'équilibre) : Conçue pour la planification de projets de construction comportant des tâches répétitives, cette méthode est particulièrement adaptée aux projets où des opérations similaires sont effectuées plusieurs fois. Elle s'avère efficace pour des chantiers de grande envergure, tels que la construction de bâtiments identiques ou de structures linéaires comme les routes et les voies ferrées.

Méthode à barres : Cette technique consiste à créer deux réseaux et un diagramme à barres (planning). Elle offre une représentation claire des interdépendances entre les tâches et de leur séquence d'exécution, facilitant ainsi la gestion du projet en fournissant une vue d'ensemble des activités et de leur chronologie.

Choix de la méthode de calcul : La sélection de la méthode de calcul dépend du type de projet en cours. Pour des opérations suivant une séquence spécifique, comme dans notre cas, la méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique) est recommandée (Benlaoukli, 2004).

VI.3.8 Méthode de calcul PERT

VI.3.8.1 Les paramètres de la méthode PERT

Lors de l'application de la méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique), il est crucial de considérer les paramètres suivants :

- **DCP (Date de Début au Plus Tôt) :** La date la plus anticipée à laquelle une tâche peut débuter, en tenant compte des dépendances et contraintes du projet.

- **Tr (Temps de Réalisation) :** Le temps estimé nécessaire pour compléter une tâche spécifique.
- **DFP (Date de Fin au Plus Tôt) :** La date la plus précoce à laquelle une tâche peut se terminer, en fonction des contraintes du projet.
- **DCPP (Date de Début au Plus Tard) :** La date la plus tardive à laquelle une tâche peut commencer sans impacter le calendrier global du projet.
- **DFPP (Date de Fin au Plus Tard) :** La date la plus tardive à laquelle une tâche peut être achevée sans perturber le planning global du projet.
- **MT (Marge Totale) :** La marge totale représente le temps supplémentaire disponible pour une tâche sans affecter le chemin critique du projet. Elle est calculée comme la différence entre la date de début au plus tôt (DCP) et la date de début au plus tard (DCPP), ou entre la date de fin au plus tôt (DFP) et la date de fin au plus tard (DFPP).

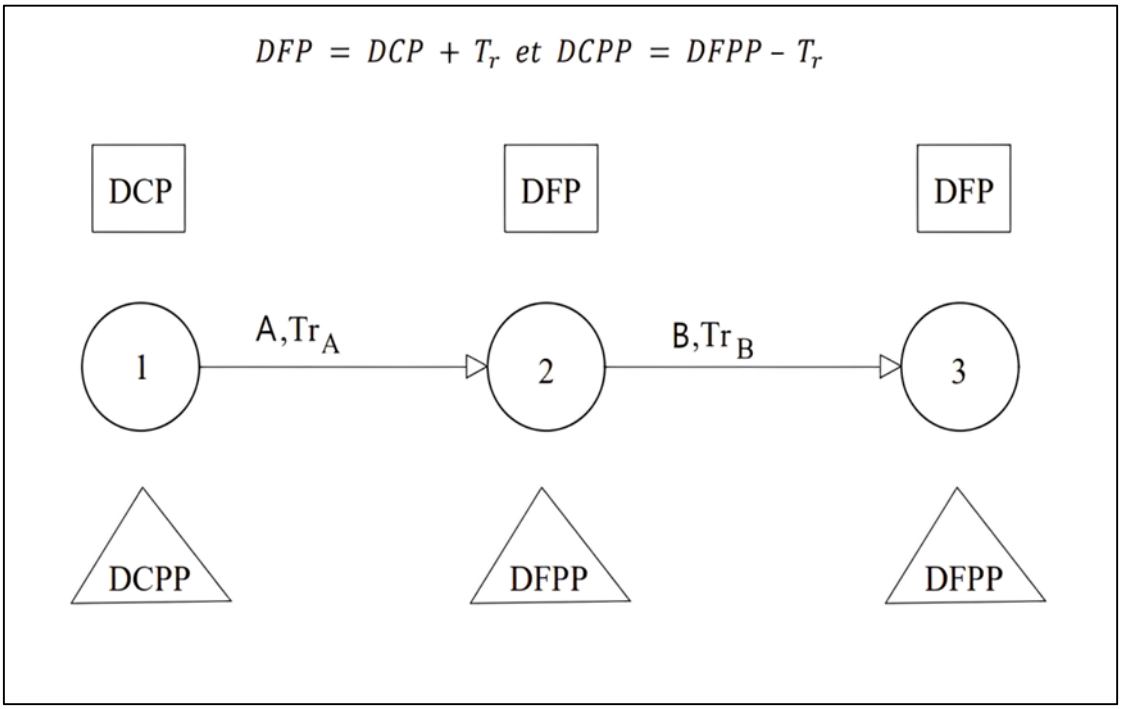


Figure V.1 Diagramme illustratif de la méthode PERT.

V.3.8.2 Chemin critique

Le chemin critique est la séquence de tâches qui détermine la durée totale du projet, où chaque tâche présente une marge totale nulle (MT = 0). Tout retard sur une tâche critique entraîne un retard dans la date de fin du projet. Pour identifier le chemin critique, il est nécessaire de vérifier que chaque tâche a une marge nulle et que la somme des durées des tâches sur ce chemin correspond à la durée totale du projet.

Le tracé du réseau PERT permet de déterminer le chemin critique, c'est-à-dire le parcours le plus long entre le début et la fin du projet. Cela permet de :

Déterminer la durée totale du projet.

Identifier les tâches pour lesquelles tout retard entraîne un allongement du projet.

Les tâches non critiques, qui se situent en dehors du chemin critique, peuvent être réalisées avec des délais supplémentaires sans affecter les délais globaux du projet. Le chemin critique est essentiel pour respecter les délais contractuels, et les méthodes modernes, comme la méthode des potentiels, offrent une meilleure représentation des interdépendances et des marges.

V.3.9 Diagramme de Gantt

Le diagramme de Gantt est un outil de gestion de projet développé par (Henry L. Gantt en1917). Il est largement utilisé pour planifier et suivre l'avancement des projets en offrant une représentation visuelle claire des tâches et de leur chronologie.

VI.3.9.1 Objectif de diagramme de Gantt

- **Visualisation des Tâches** : Permet de voir les tâches à réaliser et d'identifier les éventuels dépassements de délais.
- **Gestion des Responsabilités** : Clarifie qui est responsable de chaque tâche et à quel moment.
- **Suivi de l'Avancement** : Facilite la comparaison entre les dates planifiées et les dates réelles pour évaluer le progrès du projet.
- **Planification des Interdépendances** : Montre comment les tâches se succèdent ou se réalisent en parallèle, et leur relation dans le temps.

V.3.9.2 Structure de diagramme de Gantt

- **Axes** :

  - Abscisse : Unités de temps (jours, semaines, mois).
  - Ordonnée : Liste des tâches ou postes de travail.

- **Barres Horizontales** :

Représentent les tâches avec la longueur proportionnelle à leur durée estimée. Leur position sur l'axe des temps montre les dates de début et de fin des tâches.

V.3.9.3 Démarche de réalisation

- **Choix de l'Outil** : Sélectionner un logiciel ou une méthode appropriée pour créer le diagramme.

- **Positionnement des Tâches** : Inscrire toutes les tâches à réaliser en tenant compte des contraintes d'enchaînement et de simultanéité.

- **Définition des Ressources** : Inclure les ressources nécessaires pour chaque tâche ainsi que le temps total d'intervention.

- **Actualisation Continue** : Mettre à jour le diagramme en fonction des événements et des retards pour refléter l'état actuel du projet.

V.3.9.4 Avantage de Gantt

- **Vue d'Ensemble** : Offre une vue d'ensemble complète de la planification du projet.

- **Gestion des Délais** : Permet de suivre le respect des délais et d'identifier rapidement les retards.
- **Coordination** : Aide à coordonner les tâches et les ressources en fournissant une vision claire de la progression.

Tableau V.2 Liste des opérations et leurs durées pour la construction d'un canal en Gabion.

Tâche	Symbole	Durée en jours
Installation du chantier	A	15
Travaux de terrassement du traçon amont	B	40
Compactage du traçon amont	C	27
Pose de géotextile traçon amont	D	60
Pose de gabion traçon amont	E	230
Travaux de terrassement du traçon aval	F	57
Compactage du traçon aval	G	39
Pose de géotextile traçon aval	H	86
Pose de gabion traçon aval	I	242
Entretien des traçons	J	22
Déménagement du chantier	K	15

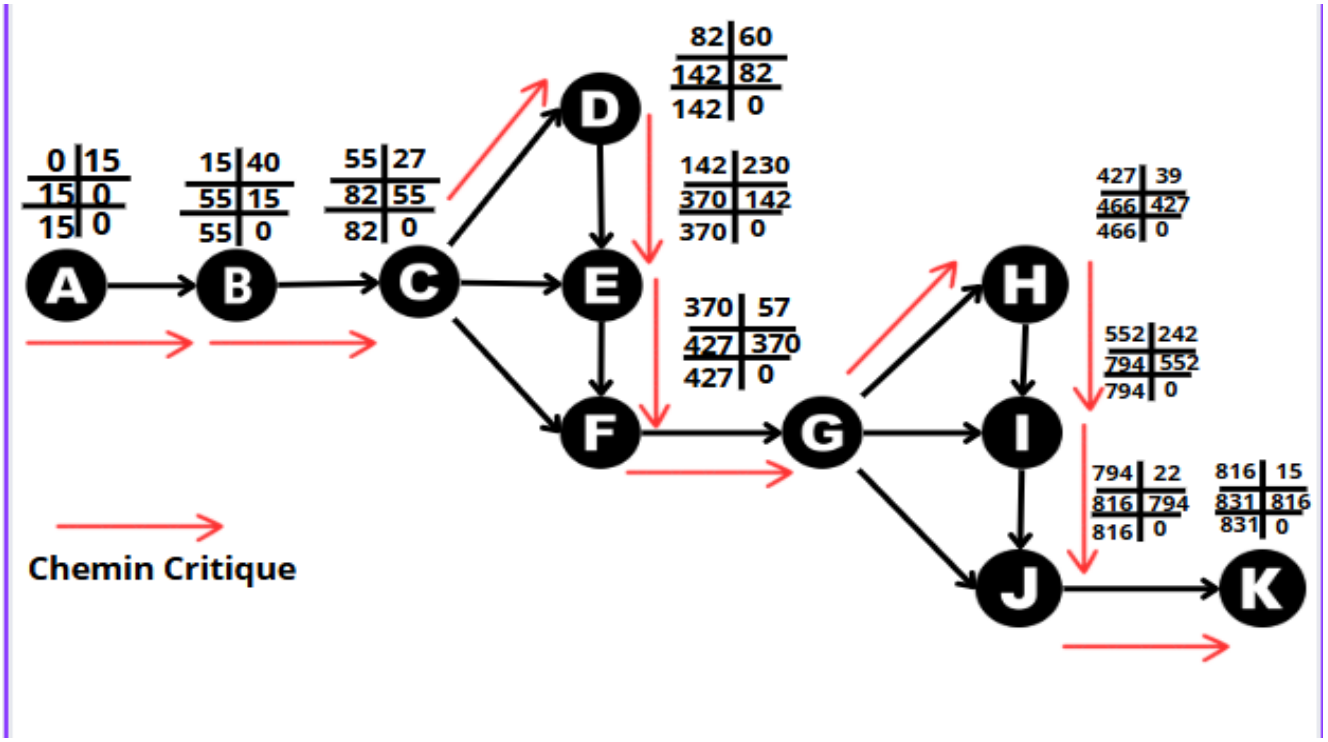


Figure V.2 Réseau de planification des taches par la méthode CPM.

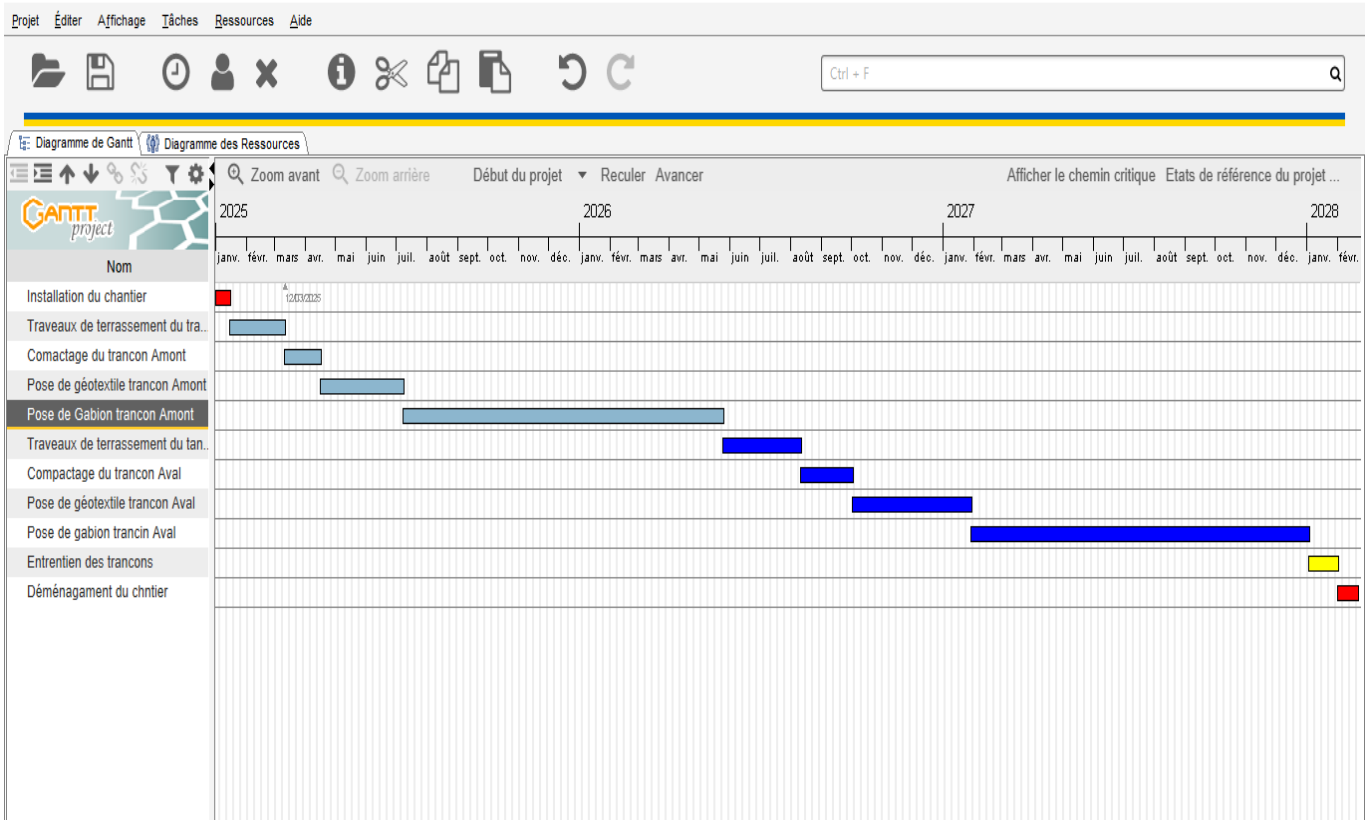


Figure V.3 Chronogramme du Projet pour la Variante de Gabionnage avec le Logiciel Gantt Project.

Conclusion

Pour conclure ce chapitre sur l'organisation du chantier, il est clair que le succès d'un projet dépend d'une gestion rigoureuse du temps ainsi que d'une coordination efficace des ressources humaines, techniques et matérielles. Le respect des délais et du budget exige une planification minutieuse. Le projet d'aménagement de l'Oued Maoussa à Mascara, qui s'étend sur 4720 mètres avec un coût estimé à 218 166 082 DA et une durée de 28 mois, illustre parfaitement cette nécessité. Une organisation structurée des ressources est donc cruciale pour garantir une livraison dans les délais impartis sans dépassement de coûts.

Conclusion générale

L'Algérie a connu de nombreux épisodes d'inondations dévastatrices, entraînant des pertes humaines et matérielles significatives. Face à ces défis récurrents, notre étude se concentre sur une analyse approfondie et une gestion proactive des risques d'inondation. Le retour d'expérience est essentiel dans cette démarche, car il permet de mieux appréhender les mécanismes des inondations et d'améliorer les stratégies de prévention et de gestion, même si une maîtrise totale de ces phénomènes n'est pas toujours réalisable. L'examen des crues met en évidence l'importance de la prévision et d'une gestion proactive des risques d'inondation. Les événements météorologiques complexes nécessitent l'utilisation de simulations numériques pour modéliser et comprendre ces phénomènes, facilitant ainsi l'élaboration de stratégies de gestion plus efficaces. La mise en place de systèmes d'alerte avancés et de plans d'intervention bien conçus est cruciale pour protéger les populations et les infrastructures.

Notre analyse se concentre sur le bassin versant de l'Oued Maoussa, qui fait régulièrement face à des événements pluviométriques majeurs, provoquant des crues catastrophiques dans la ville de Mascara et ses environs. Nous avons commencé par un examen détaillé de l'historique des inondations à Mascara, mettant en lumière l'impact de la forte densité de population sur la vulnérabilité de la ville. Une évaluation géologique et géotechnique a été réalisée pour analyser les caractéristiques du sol, essentielles pour la conception des aménagements. Les résultats ont mis en évidence des zones sensibles et des facteurs clés contribuant aux inondations, soulignant l'influence des caractéristiques géographiques et des changements climatiques sur la région.

Après une étude hydrologique approfondie, nous avons effectué une analyse hydromorphologique du bassin versant de l'Oued Maoussa. Cette analyse révèle que le bassin présente une forme allongée avec un relief accentué, entraînant un temps de concentration

relativement court et augmentant le risque de crues. L'examen du réseau hydrographique indique qu'il est organisé en cinq ordres. Pour estimer le débit de crue, nous avons utilisé les données hydrométriques de la station de Ghriss, ajustées selon la loi de Gumbel. En appliquant la méthode GRADEX, nous avons déterminé le débit centennal à 146 m^3/s pour une période de retour de 100 ans.

Suite à cette étude approfondie du bassin versant, nous avons réalisé une analyse hydraulique détaillée à l'aide du logiciel HEC-RAS et de son outil RAS-Mapper. Cette analyse a permis de modéliser les profils d'eau et d'évaluer les hauteurs d'eau pour divers débits de crue. En simulant différents scénarios, nous avons examiné les paramètres hydrauliques et les régimes d'écoulement en utilisant des données topographiques précises pour définir la géométrie de l'oued. Les résultats ont révélé un risque significatif de débordement, notamment pour le débit centennal maximum, entraînant des inondations le long du tronçon étudié. Ces résultats sont clairement illustrés sur la carte des profondeurs, montrant ainsi l'ampleur des impacts potentiels.

Dans l'avant-dernière étape, après avoir identifié les zones à risque, nous avons exploré trois options d'aménagement pour gérer les inondations en tenant compte des aspects techniques et économiques. La solution retenue est la construction d'un canal en gabion, avec une forme trapézoïdale, s'étendant sur toute la longueur de l'Oued Maoussa. Cette option a été privilégiée pour sa rentabilité, ses avantages esthétiques et son coût économique compétitif, bien que d'autres alternatives telles que les canaux enrochement et en béton armé aient également été examinées.

Le choix des variantes d'aménagement a été guidé par une analyse technico-économique approfondie. Pour l'Oued Maoussa, nous avons opté pour la construction d'un canal en gabion dont le coût estimé s'élève à 218 166 082 DA, avec une durée prévue de 28 mois. Cette solution a été choisie non seulement pour sa viabilité économique mais aussi pour ses avantages esthétiques et fonctionnels. Toutefois, la construction du canal en gabion nécessitera une attention continue pour maintenir son efficacité. Il est crucial de sensibiliser les communautés locales à l'importance d'une réaction rapide aux alertes d'inondation. Pour garantir une réponse efficace en cas de crue, il est recommandé d'établir un plan de gestion des urgences qui inclut des procédures d'évacuation, identifiant les zones à évacuer et localisant des refuges sûrs pour protéger les populations contre les risques d'inondation.

Référence

Élément descriptif de la crue

Disponible sur :

http://www.connectedwater.gov.au/framework/baseflow_separation.php

(Degoutte, 2012). Diagnostic, aménagement et gestion des rivières

Disponible sur : https://www.lavoisier.fr/livre/environnement/diagnostic-amenagement-et gestion-des-rivieres-2-ed/dégoutte/descriptif-9782743014698

MINISTERE DE L'AMENAGENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRENNEMENT : l'inondation et les types d'inondations

Disponible sur : http://www.waternunc.com/fr/mate36.htm

Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD) :« *Aléas, vulnérabilités* et gestion des risques naturels »,

Disponible sur :
https://hal.science/hal03279213/file/Aleas_Naturels_Et_Gestion_Des_Risques_2010_PUF_Leone_Vinet_MeschinetDeRichemond_Complet_leger.pdf

Lencastre, 2008, Hydraulique générale.

Disponible sur :

Disponible sur : https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/hydraulique-generale-9782212018943/

Dr. TOUMI Abdelouaheb Hydraulique à surface libre Cours & Exercices 197pages
Disponible sur :

https://dspace.univguelma.dz/jspui/bitstream/123456789/601/1/H.S.L%28Cours%20%26%20Exercices%29-01.pdf

Touaibia, bénina. (2015).

Manuel pratique d'hydrologie (2ème Edition).

Ledoux,2000

Aléas, vulnérabilités et gestion des risques naturels

BENMANSOUR Nadir

Etude de crues et localisation des zones inondables 08 juillet 2009

Azzedine Mebarki (1982) : Le bassin du kébir-Rhumel (Algérie) : Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau.

https://www.researchgate.net/publication/352247248_Le_bassin_du_Kebir-Rhumel_Algerie_hydrologie_de_surface_et_amenagement_des_ressources_en_eau

Yahyaoui, 2012 : Inondations torrentielles. Cartographie des zones vulnérables en Algérie du Nord (cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès)

Disponible sur :
https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=fr&user=Z4ijwC4AAAAJ&citation_for_view=Z4ijwC4AAAAJ : yxmsSjX2EkcC

U.S. Army Corps of Engineers, 2016. HEC-RAS River Analysis System – User's Manual, Hydrologic Engineering Center, CPD-68, Version 5.0. 960p.

Disponible sur :

http://www.hec.usace.army.mil/software/

Medjber Abdellah (2008) : Etude hydrologique du bassin versant de l'oued Mekerra et les moyens de protection contre les crues : Wilaya de Sidi Bel Abbés.

OULHACI Dalila

RUISSELLEMENT INTER-ANNUEL EN ALGERIE SEPTENTRIONALE (Relation entre, Ruissellement Pluie et Evaporation) 2015-2016.

M.Yahiaoui Abdelhalim

Inondations Torrentielles Cartographie des Zones Vulnérable sen Algérie du Nord (Cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbes)

N. BENMANSOUR & D. HADDOUCHE

Modélisation déterministe de l'oued Mekerra pour l'identification de la zone inondable de Sidi Bel-Abbès (Nord-Ouest algérien)

Garavaglia, F. (2011). Méthode SCHADEX de prédétermination des crues extrêmes : Méthodologie, applications, études de sensibilité.

Disponible sur :

https://theses.hal.science/tel-00579507

(Guillot et Duband, 1967) : La méthode du Gradex a été développée par EDF dans les années 1960.

Disponible sur :

http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Gradex_(m%C3%A9thode_du)_(HU).

CALCUL DES CONDUITES ET CANAUX ECOULEMENT UNIFORME

Disponible sur :

https://elearningdeprecated.univannaba.dz/pluginfile.php/5573/mod_resource/content/1/Chapitre%20II%20%20Calcul%20des%20Conduites%20et%20Canaux%20-%20Ecoulement%20Uniforme.pdf

TACHI AMINA & BENTRAD MERIEM (2018) : Prédiction De Débit Solide Dans La Période De Crue Par l'Utilisation Des Réseaux De Neurones Artificiels : Étude De Cas De l'Oued Mekerra - Sidi Bel Abbes - Algérie.

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

M. OTMANE Abdelkader : Prédétermination des valeurs de pluies et crues extrêmes dans le bassin versant de l'Oued Mekerra.

Tria Chihab Eddine (2022) : Dimensionnement d'un deuxième évacuateur de crue Cas du barrage Cheurfas II.

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

HAMITOUCHE Yasmine (2020) : Etude d'aménagement hydraulique d'Oued Allala pour la protection de la ville de Ténès contre les inondations (W. CHLEF).

ZEROUAL, Ayoub, ASSANI, Ali.A., MEDDI, M. et al., 2019. Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. Clim Dyn 52, 227–243 (2019).

Disponible sur :

https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0.

LABDI Amar (2024) : PROTECTION DE LA VILLE OUED RIHANE OUEST LA VILLE DE KHEMIS MILIANA ET L'USINE DES MATERIAUX EXPLOSIVES ONEX CONTRE LES INONDATIONS (OUED RIHANE).

Dr. ATHAMINA Brahim, Université Larbi Tébessi -Tébessa Polycopie de cours : Organisation des chantiers (2019).

Disponible sur :

https://www.academia.edu/121837964/POLYCOPIE_DE_COURS_ORGANISATION_DES_CHANTIERS

Dr. MADI Rafik (2014)

COURS ORGANISATION DES CHANTIERS.

Dr. ATHAMNIA Brahim (2019- 2020)

ORGANISATION DES CHANTIERS.

Benlaoukli, Bachir. (2004). Organisation de chantier, la planification des travaux les M.M. O[WorkingPaper].

Disponible sur :

http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/108