الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR HYDRAULICS
"The MujahidAbdellah ARBAOUI"

المدرسة الوطنية العليا للري
"المجاهد عبد الله عرباوي"
ⴰⵢⵙⵙⴰⵏ ⴰⵢⵏⵍⴰⵍ ⵉⵎⵉⵙⵙⵉⵡⵏ ⵏ ⵜⵓⵙⵉⵢⵜ

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option: CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUES

THEME :

Etude de protection de la ville de AIN BOUYAHIA ; à l'ouest de la wilaya de AIN DEFLA contre les inondations (OUED KHOUDJA, côté ouest)

Présenté par :
BENALI Abdelhakim

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
ZEROUAL Ayoub	Professeur	Président
BENSALAH Mohamed Draidi	M.C.B	Examinateur
BOURI Djamel Eddine	M.C.A	Examinateur
HADJ SADOK Ahmed	Professeur	Promoteur

Session : septembre 2025

Dédicace

Ce travail est dédié, avec un profond respect et une sincère reconnaissance, à toutes celles et ceux qui ont contribué, par leur soutien moral, intellectuel ou matériel, à son aboutissement.

À mes chers parents :

Billal et **Wahiba** Pour votre soutien constant, votre patience sans limite, et vos sacrifices répétés tout au long de mes études et au cours de ce projet, Vous avez toujours été ma force, mon refuge et ma source d'inspiration. Ce que je suis aujourd'hui, et ce que j'aspire à devenir demain, je vous le dois. Je m'efforcerai chaque jour d'être digne de votre amour, de votre confiance, et de vous rendre fiers. Qu'Allah, dans Sa miséricorde infinie, vous accorde santé, sérénité et protection.

À mes chers frères , sœurs et mazouza :

Fatima , Adem , Abderrahman , Abdellah et Misk , Thiziri

À mes chers amis :

Ryane , Dahmane , Obayda , Rahim , Nadjib , Ayemn , Mohammed , Ali , Akram , Chamssou , Sohaib , Hamid , Aissa , Djasser , Madjid , Haythem , Abderrahman

Je tiens à exprimer ma plus sincère gratitude à toutes celles et ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à mon parcours. Votre soutien constant, vos encouragements précieux et votre bienveillance m'ont été d'un appui inestimable tout au long de cette aventure.Soyez assurés de ma reconnaissance profonde et durable.

Remerciement

Avec une profonde gratitude, je rends grâce au Tout-Puissant, dont la bienveillance m'a accordé la santé, la force et la persévérance nécessaires à l'aboutissement de ce mémoire.
Que Sa guidance continue d'éclairer mon chemin.

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadrant, le Professeur **Mr. HADJ Sadok Ahmed**, pour son accompagnement précieux tout au long de ce travail. Son soutien constant, la pertinence de ses conseils et la rigueur de ses remarques ont grandement contribué à la qualité et à l'enrichissement de ce mémoire.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury pour le temps qu'ils ont généreusement consacré à l'évaluation de ce mémoire, ainsi que pour la richesse de leur expertise. Leur engagement en faveur de l'excellence académique constitue pour moi une véritable source d'inspiration.

Je tiens à adresser une mention particulière au corps enseignant et à l'ensemble du personnel de l'École Nationale Supérieure de l'Hydraulique (ENSH). Leur engagement, leur disponibilité et leur dévouement envers la transmission du savoir ont grandement contribué à mon développement académique et personnel tout au long de mon cursus.

Enfin, je tiens à adresser un mot de reconnaissance à moi-même.

Les défis rencontrés au cours de ce projet ont exigé une résilience, une persévérance et une force intérieure que je ne soupçonnais pas. Les surmonter a non seulement renforcé ma confiance personnelle, mais m'a également permis de grandir, tant sur le plan académique qu'humain. J'éprouve une fierté sincère d'avoir tenu le cap, et la conviction que chaque épreuve franchie a contribué à forger la personne que je suis aujourd'hui mieux préparée à affronter les défis de demain avec lucidité et assurance.
Que chacun trouve ici l'expression de ma profonde et sincère gratitude.

SOMMAIRE

CHAPITRE I : Généralité sur les inondations..... 1

Introduction :..... 2

I.1 Aléa, enjeu et vulnérabilité :..... 2

I.1.2 Enjeux :..... 2

I.1.3. Vulnérabilité :..... 3

I.1.4 Le risque :..... 3

I.2 Les inondations :..... 4

I.3 La crue :..... 4

I.3.1. Paramètres d'une crue :..... 4

I.4 Analyse du risque d'inondation :..... 5

I.5 Mécanismes des inondations :..... 6

I.6 Structure et composantes d'un cours d'eau :..... 6

I.7 Les différents types d'inondations :..... 7

I.7.1 Les inondations de plaine :..... 7

I.7.2 Les inondations par remontée de nappe :..... 8

I.7.3 Les crues torrentielles :..... 8

I.7.4 Les inondations par ruissellement :..... 8

I.7.5 Les inondations liées à une rupture de digue :..... 8

I.7.6 Les inondations marines :..... 9

I.8 Les causes des inondations..... 9

I.9 Les conséquences des inondations..... 10

I.10 Les inondations en Algérie..... 10

I.11 Historique des inondations en Algérie..... 10

Conclusion:..... 13

CHAPITRE II : Présentation de la zone d'étude..... 14

Introduction :..... 15

II.1 Présentation de la zone :..... 15

II.2 Climatologie..... 16

II.2.1 Température : 17
II.2.2. Vent : 18
II.2.3.Précipitations : 19
II.3. Sismicité : 20
Conclusion : 21
CHAPITRE III : ETUDE hydrologique 22
Introduction : 23
III.1 Bassin versant: 23
III.1.1 Caractéristiques principales du Bassin versant : 23
III.1.2 Caractéristique hydrographique : 29
III.1.3 Etude de réseau hydrographique : 38
III.2 Etude des crues : 47
III.2.1 La série d'observation de la station hydrométrique : 47
III.2.2 Présentation de la station hydrométrique dans la zone d'étude : 47
III.2. 3 Ajustement de la série des débits et pluies maximales journalières : 49
III.2.4 Choix de la Loi d'ajustement : 54
III.2.5 Estimation des débits maximums fréquentiels par la méthode GRADEX : 55
III.2.6 Hydrogramme de crue : 62
III.2.7 Sélection du débit de crue pour le projet : 65
Conclusion : 66
CHAPITRE IV : Simulation des écoulements Hydrauliques et cartographie des zones inondables au risque. 67
Introduction : 68
IV.1 Caractéristiques des canaux : 68
IV.1.2 Les paramètres géométriques : 70
IV.2 Cours d'eau : 73
IV.2.1 Les canaux Naturels : 73
IV.2.2 Les canaux Artificiels : 74
IV.3 Types d'écoulements : 75
IV.3.1 Variables dans le temps : 75
IV.3.2 Variable dans l'espace : 76
IV.4 Régimes d'écoulements : 77
IV.5 Diagnostique et simulation du cours d'eau non aménagé : 79

IV.5.2 Application d'HEC-RAS sur Oued KHOUDJA côté Ouest : 81
IV.6 Cartographie du risque de l'inondation : 93
IV.6.1 Carte des profondeurs : 94
IV.6.2 Cartes des vitesses : 95
IV.6.3 Cartes d'aléa 96
Conclusion : 98
CHAPITRE V : Études des variantes d'Aménagement. 99
Introduction : 100
V.1 Présentation des principales orientations : 100
V.1.1 Protection contre les crues : 100
V.1.2 Protection contre l'érosion : 101
V.2 Calcul hydraulique des canaux : 103
V.2.1 Conditions de l'écoulement uniforme : 103
V.2.2 Formules de calcul : 103
divers types de canaux, leurs caractéristiques géométriques et les formules associées pour leurs sections transversales : 105
V.2.3 Choix des paramètres de dimensionnement : 105
V.3 Étude des Variantes : 107
V.3.1 Canal en béton : 108
V.3.2 Canal en enrochement : 114
V.3.3 Canal en gabion : 122
V.4 Choix de la variante d'aménagement : 128
V.4.1 Recommandation : 129
V.4.2 Vue en 3D des tronçons d'oued Soufay après l'aménagement : 129
V.4.3 Cartes de profondeur d'eau après aménagement : 129
Conclusion : 130
CHAPITRE VI : Organisation de chantier. 131
Introduction : 132
VI.1 Généralités : 132
VI.1.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur un chantier : 132
VI.2 Devis quantitatif et estimatif du projet : 135
VI.3 Planification des travaux: 135
VII.3.1 Définition : 135
VI.3.2 Étapes de la planification : 136

VI.3.3 Plannings des travaux : 136
VI.3.4 Techniques de planification : 137
VI.3.5 Différentes méthodes basées sur le réseau :..... 139
VI.3.6 Méthode de calcul PERT : 140
VI.3.7 Diagramme de Gantt :..... 142
Conclusion : 146

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Généralité sur les inondations

Figure I.1 : combinaisons du risque.
Figure I.2 : Hyétogramme et hydrogramme resultant d'un evénement pluie-debit.
Figure I.3 : les inondations de Beb l'oued 10 novembre 2001.
Figure I.4 : Les inondations de GHARDAIA (2008 et 2015)
Figure I.5 : les inondations d'ELBAYADH .

CHAPITRE II : Présentation de la zone d'étude

Figure II.1:localisation de De ain bouyahia
Figure II.2 :Une image satéllitaire de oued khoudja
Figure II.3: Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales.
Figure II.4 : Distribution des vitesses du vent.
Figure II.5 : Evolution de la pluviométrie mensuelle interannuelles.
Figure II.6 : Les zones sismiques d'Algérie

CHAPITRE III : ETUDE hydrologique

Figure III.1: Bassin versant oued Khoudja côté ouest
Figure III.2 : Différents types des bassins versant selon le coefficient de gravelius K_G
FigureIII.3: Carte hypsométrique de bassin versant d'Oued Khoudja côté Ouest
FigureIII.4 : courbe hypsométrique du bassin versant oued khoudja
Figure III.5 : Carte des pentes du bassin versant d'Oued Khoudja
Figure III.6 : Carte des courbes des niveaux du bassin versant d'Oued Khoudja
Figure III.7 : Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Khoudja côté Ouest
Figure III.8: Localisation de la station hydrométrique d' EL-ABABSA (Source : ANRH-Blida).
Figure III.9 : graphe d'ajustement par la loi de Gumbel de la station 011705
Figure III.10 : graphe d'ajustement par la loi de Log Normal de la station 011705.
Figure III.11 : comparaison entre les Lois ajustement utilisées de la station 011701.
Figure III.12: Graphique d'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits.
Figure III.13 : Hydrogramme de crue avec une période de retour de 100 ans pour les différentes stations.
Figure III.14 : Hydrogramme de crue du projet de la station pluviometrique de ABADIA 012001.

CHAPITRE IV : Simulation des écoulements Hydrauliques et cartographie des zones inondables au risque.

Figure IV.1: schéma simplifie représente la pente.
Figure IV.2: schéma représente la hauteur normale de canal
Figure IV.3: Schéma représente Largueur au miroir.
Figure IV.4: Schéma représente le périmètre mouille dans un canal rectangulaire.
Figure IV.5: Schéma représente la surface mouillée d'un canal Rectangulaire.
Figure IV.6: Li mineur, Lit intermédiaire et Lit majeur.
Figure IV.7 : schéma représente un canal Naturel.
Figure IV.8: types des Canaux Artificiels (Source : TOUMI Abdelouaheb,2016).
Figure IV.9 : diagramme représente l'Ecoulement permanent.
Figure IV.10 : diagramme représente l'Ecoulement non permanent.
Figure IV.11 : Diagramme représentant les divers types d'écoulements.
Figure IV.12: Diagramme montrant les différents types de régimes d'écoulement
Figure IV.13 : Interface utilisateur du logiciel HEC-RAS (6.3.1).
Figure IV.14: TIN (réseau irrégulier triangule) de la zone d'étude.
Figure IV.15: Insertion le fichier de projection.
Figure IV.16: Insertion les données du terrain.
Figure IV.17: Définition du tracé d'Oued KHOUDJA côté Ouest et des sections en travers de l'oued.
Figure IV.18: Insertion des valeurs de Manning (terrain naturel).
Figure IV.19: Insertion les données hydrauliques d'Oued KHOUDJA côté Ouest.
Figure IV.20: Définition des conditions aux limites.
Figure IV.21: Profil en Long du cours d'eau lors d'une crue centennale a l'état naturel.
Figure IV.22: Représentation en 3D d'OUED KHOUDJA côté Ouest.
Figure IV.23 : Courbe de tarage du tronçon modélisé d'oued KHOUDJA.
Figure IV.24: profil en travers de la section 1091
Figure IV.25: profil en travers de la section 654.
Figure IV.26: profil en travers de la section 312.
Figure IV.27: profil en travers de la section 79.
Figure IV.28: Variation du nombre de Froude en fonction de la distance91

Figure IV.29: variation de la vitesse en fonction de la distance.
Figure IV.30: carte des profondeurs d'eau pour une crue centennale.
Figure IV.31: carte des vitesses d'eau pour une crue centennale.
Figure IV.32: Carte d'alea d'oued khoudja pour la crue centennale.

CHAPITRE V : Études des variantes d'Aménagement

Figure V.1: Caractéristiques géométriques des diverses sections de canaux ouverts

Figure V.2: canal trapézoïdale en béton armé.
Figure V.4 : Profil transversal n°1091 d'un canal trapézoïdal en béton pour une crue centennale.
Figure V.5 : Profil transversal n°654 d'un canal trapézoïdal en béton pour une crue centennale.
Figure V.6 : Profil transversal n°312 d'un canal trapézoïdal en béton pour une crue centennale.
Figure V.7 : Profil transversal n°79 d'un canal trapézoïdal en béton pour une crue centennale.
Figure V.8: Les composants structurels d'un canal en enrochement.
Figure V.9: Dimensions du canal trapézoïdal en Enrochement d'oued Khoudja

Figure V.10 : Profil transversal n°1091 d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue centennale**.**
Figure V.11 : Profil transversal n°654 d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue centennale**.**
Figure V.12 : Profil transversal n°312 d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue centennale**.**
Figure V.13 : Profil transversal n°79 d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue centennale**.**
Figure V.14 : Canal en enrochement.
Figure V.15 : cage métallique du gabion.
Figure V.16: schéma représente un canal trapézoïdal en gabion.
Figure V.17 : Profil transversal n°1091 d'un canal en gabion pour une crue centennale.
Figure V.18: Profil transversal n°654 d'un canal en gabion pour une crue centennale
Figure V.19: Profil transversal n°312 d'un canal en gabion pour une crue centennale.
Figure V.20: Profil transversal n°79 d'un canal en gabion pour une crue centennale.
Figure V.21: Vue en 3D au cours d'oued Khoudja
Figure V.22: Carte de profondeur d'eau après aménagement pour T = 100 ans.

CHAPITRE VI : Organisation de chantier.

Figure VI.1 : Interactions entre les acteurs du chantier (Ghomari, 2013).
Figure VI.2: Schéma représentatif de la méthode de PERT.
Figure VI.3: Réseau de planification des taches par la méthode CPM.
Figure VI.4 : Chronogramme du Projet pour la Variante de Gabionnage avec le Logiciel Gantt Project.

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II : Présentation de la zone d'étude

Tableau II.1 : Températures mensuelle enregistrées à la station.
Tableau II.2 : Moyennes mensuelles de la vitesse de vent enregistrées à la station
Tableau II.3 : Répartition des pluies mensuelles interannuelles de la station pluviométrique 012001.

CHAPITRE III : ETUDE hydrologique

Tableau III.1 : Les paramètres hydro morpho métriques du bassin versant d'Oued Khoudja côté ouest
Tableau III.2 : Paramètres Hypsométriques du bassin versant d'Oued Khoudja côté ouest :
Tableau III.3 : caractéristiques altimétriques du bassin versant d'Oued Khoudja côté ouest
Tableau III.4 : Pente moyenne du bassin versant d'Oued Khoudja côté Ouest
Tableau III.5: Classification O.R.S.T.O.M du relief à partir l'indice de pente global.
Tableau III.7 :Résultats des calculs des pentes et du dénivelé spécifique du bassin versant de l'Oued Khoudja côté ouest
Tableau III.8 : résultats du calcule de temps de concentration
Tableau III.9 : résultats de calculs de temps de concentration.
Tableau III.10 : résultat paramètres hydrographiques d'oued Khoudja côté ouest.
Tableau III.11 : Géomorphologie du bassin versant de l'Oued Khoudja côté ouest.
Tableau III.12 : caractéristiques de la station hydrométrique (EL Ababsa) (source : ANRH).
Tableau III.13 : caractéristiques des stations pluviométriques (source : ANRH).
Tableau III.14 : Série des débits maximales annuels de la station 011705 (source : ANRH).
Tableau III.16 : Résultat d'ajustement par la loi de Gumbel.
Tableau III.17 : comparaison entre la loi de GUMBEL et l'échantillon.
Tableau III.18 : Résultats d'ajustement par la lo de Log Normal.
Tableau III.19 : comparaison entre la loi de Log Normal et l'échantillon
Tableau III.20 : résultats du test du χ^2.
Tableau III. 21 : caractéristiques des stations pluviométriques (source : ANRH).
Tableau III.22 : Précipitations maximales journalières de la station pluviométrique de EL-ABADIA [012001] (Source : ANRH).
Tableau III.23 : Résultats de l'ajustement des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de EL-ABADIA 012001 selon la loi de Gumbel.
Tableau III.24 : Résultats des calculs pour la station de Abadia, selon les différentes périodes de retour.
Tableau III.25 : Résultats de l'ajustement des stations prises.

Tableau III.26 : Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue (δ).
Tableau III.27: Débits centennaux en fonction du temps pour la zone d'étude.

CHAPITRE IV : Simulation des écoulements Hydrauliques et cartographie des zones inondables au risque.

Tableau IV.1 : La valeur de la rugosité (n) (Chen et Cotton, 1986).
Tableau IV.2 : Les principaux éléments Hydrauliques pour toutes les sections (source : Logiciel HEC-RAS).
Tableau IV.3 : Critères d'évaluation de l'intensité d'aléa inondation (DDT,2012).

CHAPITRE V : Études des variantes d'Aménagement

Tableau V.1 : Valeurs du coefficient de rugosité (Chen et Cotton, 1986).
Tableau V.2 : La Revanche utilisée en fonction du débit (Degoutte,2012).
Tableau V.3 : Les intervalles des vitesses pour éviter l'érosion du lit.
Tableau V.4 : Dimensions de l'aménagement en béton armé pour oued Khoudja.
Tableau V.5 : Les résultats de la simulation d'écoulement du canal en béton d'oued Khoudja (Source : HEC-RAS).
Tableau V.6 : Devis total pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé d'oued Khoudja.
Tableau V.7 : Dimensions de l'aménagement en enrochement pour oued Khoudja.
Tableau V.8 : Les résultats de la simulation d'écoulement du canal en Enrochement d'oued Khoudja (Source : HEC-RAS).
Tableau V.9 : Calcul les sections de la variante d'enrochement.
Tableau V.10 : Calcul le volume d'enrochement.
Tableau V.11 : section du géotextile.
Tableau V.12 : Estimation du cout pour la variante d'enrochement d'oued Khoudja.
Tableau V.13 : dimensions de canal d'aménagement en gabion d'oued Khoudja.
Tableau V.14 : Résultats des calculs des paramètres pour le canal de Gabion d'oued Khoudja.
Tableau V.15 : Les résultats de la simulation d'écoulement du canal en Gabion d'oued Khoudja
Tableau V.16 : Estimation du cout pour la variante de gabion d'oued Khoudja

CHAPITRE VI : Organisation de chantier.

Tableau VI.1 : Devis de la variante canal trapézoïdale en Gabion Totale d'oued Khoudja.
Tableau VI.2 : Liste des opérations et leurs durées pour la construction d'un canal en Gabion.

ملخص :

يهدف هذا البحث إلى وضع نهج متكامل لإدارة وادي خوجة، الذي يعبر الجهة الغربية من بلدية عين بويحيى، على مسافة تقدّر بـ 1.095 كيلومتر. يتمثل الهدف الرئيسي في ضمان تصريف آمن لمياه الفيضانات، مع حماية السكان، والممتلكات، والبنى التحتية المعرضة للخطر.تم في البداية إجراء توصيف دقيق لمنطقة الدراسة، مما سمح بتحديد العوامل المسببة للفيضانات، إلى جانب أشكالها وتكرارها. وتواصل التحليل من خلال دراسة مورفولوجية وهيدرولوجية لحوض التصريف المغذي للوادي، من أجل تقدير التصريفات القصوى. استنادًا إلى هذه المعطيات، تم إجراء نمذجة رقمية باستعمال برنامجي HEC-RASوArcGIS، بهدف رسم خرائط للمناطق المعرضة للخطر وتقدير سلوك الجريان أثناء الفيضانات. وقد مكّنت هذه المحاكاة من تحديد المقاطع الحرجة التي تستدعي تدخلات فنية مدروسة.

بعد دراسة مقارنة لعدة حلول تقنية، تم اختيار إنجاز قناة مكسوة بالجابيون كخيار أمثل، نظراً لفعاليتها من حيث التكلفة، ومتانتها، وقدرتها على الاندماج في المحيط الحضري. ويأتي هذا الاختيار ضمن رؤية استباقية تهدف إلى إدارة مستدامة وفعالة لمخاطر الفيضانات.

الكلمات المفتاحية :وادي خوجة، عين بويحيى، إدارة متكاملة، الفيضانات، النمذجة الهيدروليكية، HEC-RAS، ArcGIS، قناة جابيون، مخاطر طبيعية

Résume :

Cette étude vise à développer une approche intégrée de gestion de l’Oued Khoudja, qui traverse la partie Ouest de la commune de Aïn Bouyahia, sur un linéaire de 1.095 km. L’objectif principal est d’assurer un écoulement maîtrisé des eaux de crue tout en protégeant les personnes, les biens et les infrastructures exposés. Dans un premier temps, une caractérisation précise de la zone d’étude a été effectuée, permettant d’identifier les facteurs déclencheurs des inondations, ainsi que leurs formes et fréquences. L’analyse s’est poursuivie par une étude morphologique et hydrologique du bassin versant alimentant l’oued, afin d’estimer les débits de pointe. En s’appuyant sur ces données, des simulations numériques ont été menées à l’aide des outils HEC-RAS et ArcGIS pour cartographier les zones vulnérables et estimer l’ampleur des écoulements en période de crue. Ces simulations ont permis d’identifier les tronçons critiques nécessitant des interventions d’aménagement. Après une analyse comparative de plusieurs scénarios d’aménagement, la construction d’un canal en gabions a été retenue comme solution optimale, en raison de sa rentabilité, de sa durabilité et de son intégration dans le paysage local. Cette solution s’inscrit dans une logique de prévention des risques et de gestion durable des crues.

Mots-clés : Oued Khoudja, Aïn Bouyahia, gestion intégrée, crues, modélisation hydraulique, HEC-RAS, ArcGIS, canal en gabions, risques d’inondation.

Abstract :

This study aims to develop an integrated management approach for Oued Khoudja, which crosses the western part of the municipality of Aïn Bouyahia, over a distance of 1.095 km. The main objective is to ensure the safe discharge of floodwaters while protecting residents, properties, and local infrastructure. The first step involved a detailed assessment of the study area, identifying the causes, types, and frequency of flooding events. This was followed by a morphological and hydrological analysis of the watershed feeding the oued, to estimate peak discharge values. Based on these findings, numerical simulations were conducted using HEC-RAS and ArcGIS software to map high-risk zones and evaluate flood behavior across the critical section. These simulations highlighted the areas requiring targeted mitigation measures.

After a comparative evaluation of several design alternatives, the construction of a trapezoidal gabion-lined channel was selected as the most suitable solution due to its cost-effectiveness, durability, and seamless integration into the urban landscape. This choice reflects a proactive and sustainable flood risk management strategy.

Keywords: Oued Khoudja, Aïn Bouyahia, integrated management, floods, hydraulic modeling, HEC-RAS, ArcGIS, gabion channel, flood risk.

Introduction générale :

Les inondations comptent parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes à l'échelle mondiale et figurent aussi parmi les plus coûteuses en termes de pertes humaines et de dégâts matériels . Leur intensité et leur fréquence se sont nettement accrues au cours des trois dernières décennies, en particulier dans les pays méditerranéens . Ces événements surviennent généralement à la suite de pluies courtes, intenses et localisées sur de petits bassins versants, provoquant une montée rapide du niveau des eaux .

De nombreuses recherches lient cette recrudescence d'événements extrêmes aux effets du changement climatique , particulièrement marqué dans le bassin méditerranéen . Dans cette région, les inondations se multiplient et entraînent régulièrement des catastrophes majeures. La topographie spécifique du littoral méditerranéen, caractérisée par des reliefs abrupts, accentue la probabilité de crues soudaines , qui touchent principalement les zones côtières densément peuplées et concentrent ainsi leurs impacts sur les infrastructures et les activités humaines .

L'Afrique du Nord est particulièrement vulnérable face à ce phénomène. Les pays du Maghreb, tels que l'Algérie, le Maroc et la Tunisie, connaissent une fréquence d'inondations presque deux fois supérieure à celle de l'Espagne, du Portugal ou de l'Italie . Cette fragilité s'explique par des conditions climatiques défavorables, une urbanisation souvent mal planifiée, ainsi que par un manque de données hydrométéorologiques fiables. Ces limites compliquent l'évaluation du risque et rendent nécessaire le développement de méthodes robustes pour estimer la fréquence des crues, y compris dans les sites non jaugés. De telles estimations sont cruciales pour la conception et la protection des infrastructures (barrages, ponts, réseaux urbains) mais aussi pour la sécurité des populations, comme l'ont tristement illustré les inondations meurtrières de Tlemcen et El Bayadh.

Plus largement, la région méditerranéenne dont l'Algérie est considérée par le GIEC comme l'une des zones les plus vulnérables aux changements climatiques à l'échelle mondiale, en raison de la combinaison entre inondations, sécheresses et incendies de forêt . Cette vulnérabilité est d'autant plus marquée dans le nord de l'Algérie, soumis à un climat semi-aride et à des conditions topographiques contraignantes, aggravées par des infrastructures d'assainissement insuffisantes.

La ville d'Aïn Bouyahiya illustre parfaitement cette situation. Traversée par l'oued Khoudja, elle subit régulièrement des crues torrentielles menaçant à la fois les infrastructures, les équipements et les habitations, et mettant directement en péril la sécurité des habitants. La densité urbaine, l'occupation illégale du sol et les conditions locales difficiles compliquent par ailleurs les opérations de secours, accentuant les pertes humaines et matérielles lors de ces épisodes.

Dans ce contexte, la mise en œuvre d'une gestion efficace du risque d'inondation apparaît comme une nécessité. Au-delà des mesures structurelles classiques, les solutions fondées sur la nature (Nature-Based Solutions, NbS) sont de plus en plus mises en avant pour renforcer la résilience des territoires et protéger durablement les populations .

Cette étude se propose d'analyser et de proposer des solutions de protection contre les crues de l'oued Khoudja. Elle s'appuie sur une modélisation hydrologique et hydraulique (HEC-HMS, HYFRAN, FLOWMASTER) intégrant des outils géomorphologiques et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour simuler des scénarios de crue de différentes périodes de retour (25, 50 et 100 ans). L'objectif principal est double : anticiper les impacts de ces crues

CHAPITRE I :
Généralité sur les inondations

Introduction :

En Algérie, les inondations représentent l'un des aléas naturels les plus fréquents et les plus destructeurs. Elles sont généralement causées par des pluies intenses et le débordement des oueds, mais leur ampleur est aggravée par des facteurs liés à l'activité humaine tels que l'urbanisation désordonnée, le manque d'entretien des réseaux d'assainissement et la déforestation. Le changement climatique, en renforçant la fréquence et l'intensité de ces épisodes, accentue encore leurs impacts. Les conséquences sont souvent dramatiques : pertes humaines, destructions d'infrastructures, dégâts considérables sur les routes, les habitations et les terres agricoles, ainsi que la propagation de maladies liées aux eaux contaminées. Les récentes inondations survenues dans différentes wilayas (Djelfa, Tipaza, Biskra, Ouled Djellal, etc.) illustrent la vulnérabilité croissante du pays face à ce phénomène, malgré les efforts de prévention déployés par les autorités.

I.1 Aléa, enjeu et vulnérabilité :

I.1.1 Aléa :

Un aléa désigne un phénomène naturel ou physique dont l'occurrence et l'intensité échappent largement au contrôle de l'homme, comme une inondation, un cyclone, un glissement de terrain, une éruption volcanique, un séisme ou encore un tsunami. Toutefois, ce phénomène ne devient un risque que lorsqu'il touche des zones habitées, économiques ou environnementales sensibles. Par exemple, un typhon se produisant au milieu du Pacifique ne constitue pas un risque, contrairement à un cyclone frappant une région densément peuplée, telle que l'île de La Réunion. Selon plusieurs auteurs (MEDD, 2004 ; MEEDDAT, 2008 ; Lacina, 2012), un aléa se caractérise par son imprévisibilité, son caractère aléatoire et la variabilité de son intensité (pluies intenses, séismes, cyclones, inondations, etc.). Pour un territoire donné, il reste difficile d'anticiper avec précision son déclenchement, ses modalités et son ampleur. L'analyse scientifique permet seulement d'évaluer la probabilité de survenue de certains phénomènes en se basant sur l'étude des cycles climatiques et des modèles météorologiques. Cependant, malgré ces prévisions, l'apparition des aléas reste marquée par une grande incertitude

I.1.2 Enjeux :

Les enjeux correspondent à l'ensemble des personnes, des biens et des infrastructures susceptibles d'être affectés par un aléa naturel. Ils regroupent les populations, les activités économiques, les équipements et les zones à forte valeur patrimoniale ou environnementale. Lorsqu'un aléa survient dans un territoire densément peuplé ou économiquement stratégique, ses conséquences sont particulièrement lourdes. Ainsi, un phénomène naturel n'acquiert le statut de risque que lorsqu'il menace directement des éléments essentiels pour la société. L'intensité du risque dépend donc à la fois de l'aléa en lui-même et du degré de vulnérabilité des enjeux exposés, c'est-à-dire leur sensibilité face à l'impact potentiel du phénomène (Direction Départementale des Territoires et de la Mer Nord, 2011).

I.1.3. Vulnérabilité :

La vulnérabilité désigne la sensibilité des populations, des infrastructures et des activités lorsqu'elles se trouvent dans une zone exposée à un aléa (Lacina, 2012). Elle permet d'évaluer et de mesurer l'ampleur des conséquences possibles qu'un phénomène naturel peut engendrer sur les enjeux, qu'il s'agisse de dégâts matériels, de pertes humaines ou de l'interruption d'un service (PPRNi de l'Yzeron, 2012). En d'autres termes, la vulnérabilité sert à déterminer dans quelle mesure un système socio-spatial peut être affecté par un aléa et à estimer ce qui risque d'être perdu.

I.1.4 Le risque :

Le risque se définit comme la combinaison de deux éléments : la probabilité de survenue d'un événement, appelé aléa, et l'importance des pertes potentielles qu'il peut provoquer sur les enjeux (Dauphiné, 2001 ; Léone et al., 2010 ; Cariolet et al., 2012). En d'autres termes, il résulte de l'association entre la fréquence d'un phénomène et la gravité de ses conséquences (USGS). Selon Luhmann (1993), il est important de différencier le risque du danger : le danger existe en soi, tandis que le risque suppose une prise de décision et donc une part de responsabilité assumée ou non par la société.

L'Institut Français de l'Environnement (IFEN, 2002) précise que le risque découle d'un aléa naturel ou anthropique, dont les effets prévisibles peuvent concerner un grand nombre de personnes, causer des dommages importants et dépasser les capacités de réaction des acteurs concernés. On parle de risque « naturel » lorsque l'aléa est d'origine naturelle (Pigeon et al., 2002). Cependant, il faut garder à l'esprit que la vulnérabilité face aux risques dits « naturels » est en grande partie une construction sociale, car elle dépend des choix d'aménagement, de l'organisation des sociétés et de leur préparation face aux aléas.

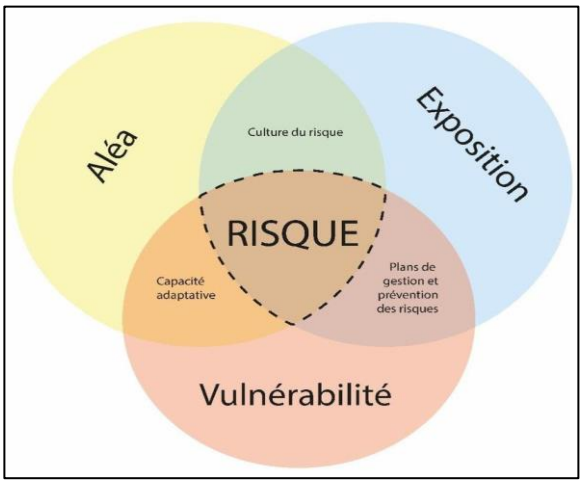


Figure I.1 : combinaisons du risque.

I.2 Les inondations :

L'inondation est l'un des principaux risques naturels. Elle se produit lorsqu'une zone habituellement hors d'eau est recouverte, de façon soudaine ou progressive, à cause d'une augmentation du niveau des eaux et de la vitesse du courant.

Selon Xavier L. et Jean P., une inondation correspond à l'envahissement (rapide ou lent) d'un espace, parfois occupé par l'homme, dû au débordement d'un cours d'eau pendant une crue. La crue désigne une élévation importante et temporaire du débit d'une rivière par rapport à son débit moyen, entraînant ainsi une montée des eaux.

L'intensité d'une inondation dans un lieu donné se mesure à travers trois critères

- Hauteur de l'eau,
- Durée de submersion,
- Vitesse du courant.

Le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (2004) explique que le risque d'inondation provient à la fois de l'eau qui sort de son lit naturel et de l'homme qui s'installe dans des zones inondables en y construisant des infrastructures, logements et activités. Plus les enjeux humains et économiques sont grands, plus le niveau de risque augmente.

I.3 La crue :

Une crue est une augmentation temporaire et rapide du débit d'un cours d'eau. Elle se caractérise par quatre paramètres :

- Débit.
- Hauteur d'eau.
- Vitesse d'écoulement.
- Durée.

I.3.1. Paramètres d'une crue :

Une crue se définit généralement par quatre paramètres principaux :

- **Temps de concentration** : c'est la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau tombée au point le plus éloigné du bassin versant rejoigne l'exutoire.
- **Pointe de crue** : elle correspond au débit maximum atteint durant l'épisode de crue, associé à la durée de la phase critique.
- **Courbe de tarissement** : elle traduit la phase de décroissance, durant laquelle le cours d'eau retrouve progressivement son niveau normal après l'événement.

- **Période de retour** : elle indique la probabilité qu'une crue d'une intensité donnée survienne au cours d'une année. Ainsi, une crue centennale présente une probabilité de 1 % de se produire chaque année

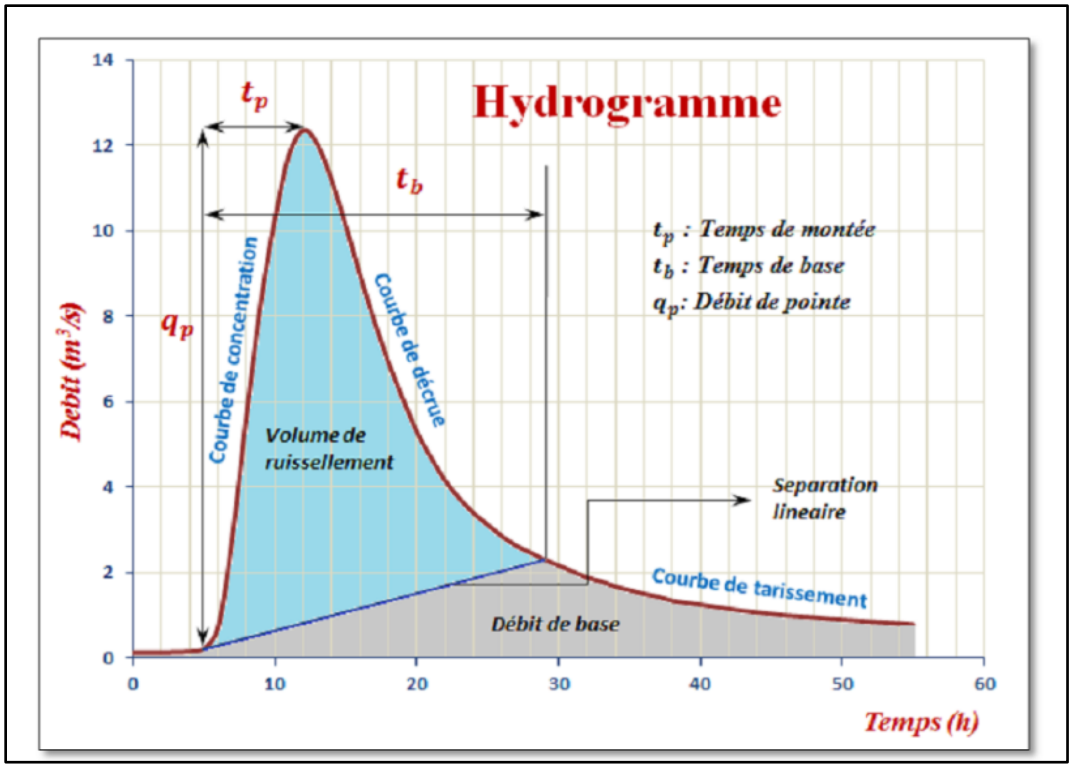


Figure I.2 : Hyétogramme et hydrogramme resultant d'un evénement pluie-debit

I.4 Analyse du risque d'inondation : paramètres et facteurs déterminant

L'évaluation du risque d'inondation repose sur plusieurs indicateurs hydrologiques essentiels :

- La période de retour : qui exprime la probabilité qu'une crue d'intensité donnée se produise.
- Les caractéristiques hydrauliques : hauteur, durée et vitesse d'écoulement.
- La torrentialité : liée à l'intensité et à la concentration des précipitations sur le bassin versant.

Les conditions favorisant l'apparition des crues tiennent également compte de :

- La variabilité spatio-temporelle des pluies ;
- Les processus d'évapotranspiration ;
- La capacité d'infiltration des sols ;

- La dynamique des écoulements de surface et souterrains.

Les dommages peuvent être aggravés par :

- L'ampleur et la durée de l'inondation .
- La force des écoulements (vitesse) .
- La quantité de matériaux solides transportés .
- La dégradation des berges.

I.5 Mécanismes des inondations :

Les inondations sont influencées par divers **facteurs physiques**, tels que :

- **Le régime des précipitations** : répartition spatiale, fréquence et intensité des pluies ;
- **Le relief** : qui conditionne la morphologie et la pente du bassin versant ;
- **La taille du bassin versant :** correspondant à la surface de collecte des eaux
- **L'état des sols** : lié à leur perméabilité, leur capacité d'infiltration et leur taux d'humidité.
- À ces facteurs naturels s'ajoutent des **facteurs aggravants** d'origine humaine, notamment :**L'occupation et l'usage des sols** : avec l'urbanisation et la construction d'infrastructures en zones inondables ;
- **Les aménagements du territoire** : qui perturbent les dynamiques naturelles des écoulements ;
- **Le manque d'entretien des cours d'eau** : entraînant une accumulation de dépôts et une réduction de leur capacité d'écoulement.

I.6 Structure et composantes d'un cours d'eau :

Un cours d'eau est organisé naturellement en trois zones principales, définies par son régime hydrologique :

1. Le lit mineur

- C'est le chenal principal, emprunté par les écoulements habituels.
- Il correspond aux débits ordinaires comme aux crues fréquentes.

2. Le lit moyen

- Zone de transition comprenant la végétation riveraine (ripisylve).
- Peut s'étendre sur plusieurs centaines de mètres en forêt alluviale.
- Joue le rôle d'espace tampon entre lit mineur et lit majeur.

3. Le lit majeur

- Grande plaine inondable, recouverte uniquement lors des crues exceptionnelles.
- Inclut deux sous-zones en période d'inondation :

    - Zone d'écoulement : eaux à courant rapide, proches du lit mineur.
    - Zone de stockage : (accumulation des eaux à faibles vitesses
- Toute occupation humaine dans cette zone correspond à une emprise sur l'espace fluvial.

Éléments caractéristiques :

- **Berges :** talus séparant le lit mineur du lit majeur.
- **Rives :** interface terre-eau, soumise aux dynamiques fluviales.
- **Ripisylve :** écosystème riverain essentiel qui assure
    - la régulation naturelle des crues,
    - un rôle écologique fondamental,
    - la protection des berges contre l'érosion.

I.7 Les différents types d'inondations :

Les inondations se classent selon leur origine ou leur déclencheur. Les principales sont :

- Les inondations de plaine ;
- Les inondations dues à la remontée de nappe ;
- Les crues torrentielles ;
- Le ruissellement en zones urbaines ou rurales ;
- Les inondations provoquées par une rupture de digue ;
- Les inondations marines.

Causes et dynamiques :

Dans les quatre premiers cas, la pluie est le facteur principal. Les débordements proviennent généralement des cours d'eau (fleuves, rivières).

Deux types de cinématique se distinguent :

Inondations à dynamique lente : hausse progressive du niveau d'eau (ex. inondations de plaine ou par remontée de nappe).

Inondations à dynamique rapide : crues soudaines et violentes (ex. crues torrentielles, ruissellements intenses).

I.7.1 Les inondations de plaine :

Les inondations de plaine apparaissent le plus souvent à la suite de précipitations océaniques prolongées, d'intensité modérée, affectant des bassins versants de moyenne ou grande taille (> 500 km²) caractérisés par une faible réactivité hydrologique des sols. Elles se traduisent par un débordement progressif du cours d'eau de son lit mineur vers le lit majeur, engendrant une submersion durable des zones inondables, en particulier dans les terrains mal drainés. Leur

évolution lente peut s'étaler sur plusieurs semaines, et leurs conséquences dépendent principalement de la hauteur et de la durée de l'inondation.

I.7.2 Les inondations par remontée de nappe :

Ce type d'inondation survient lorsque la nappe phréatique affleure en surface ou lorsque l'eau s'infiltre dans les réseaux d'assainissement (Merabet, 2006). Il entraîne divers désordres : infiltration d'eau sous les bâtiments, ennoyage d'ouvrages souterrains, tassements de remblais, glissements de terrain, perturbations des réseaux publics ainsi que pressions exercées sous les constructions (Boubchir, 2007).

I.7.3 Les crues torrentielles :

Les crues torrentielles correspondent à des phénomènes soudains et violents, déclenchés par des pluies intenses et localisées. Elles se produisent principalement dans les zones montagneuses et méditerranéennes, au niveau de petits bassins versants à fortes pentes. Leur dynamique rapide favorise un transport massif de matériaux solides et modifie de manière importante le lit fluvial. Les dégâts résultent surtout de la vitesse des écoulements, aggravée par la présence des sédiments transportés (Ledoux, 2006).

I.7.4 Les inondations par ruissellement :

Les inondations par ruissellement se manifestent différemment selon le contexte spatial (rural, périurbain ou urbain), mais présentent des caractéristiques communes : apparition soudaine, durée courte et imprévisibilité, ce qui rend leur gestion particulièrement complexe. Elles concernent généralement de petits bassins versants (Ledoux, 2006).
En milieu urbain, le ruissellement pluvial constitue une cause majeure d'inondations, favorisée par l'imperméabilisation des sols, la diminution du couvert végétal, l'accentuation des pentes et l'intensité des précipitations. Bien que ce phénomène naturel soit difficilement évitable, il est souvent amplifié par les aménagements humains, ce qui accroît les risques et les dommages potentiels (Merabet, 2006).

I.7.5 Les inondations liées à une rupture de digue :

Dans les cours d'eau endigués, les inondations surviennent généralement soit par débordement, soit par rupture de digue, mettant fortement en danger les zones situées à proximité immédiate des ouvrages. Lorsque le débit excède la capacité de rétention, le cours d'eau peut à nouveau occuper sa plaine alluviale comme s'il n'existait aucune protection. L'accumulation de végétaux arrachés accentue les risques en obstruant les ouvrages de franchissement, tandis que la rupture d'embâcles peut générer une onde de submersion en aval. Les digues et ponts dotés de piles étroites se révèlent particulièrement vulnérables, ce qui peut entraîner leur submersion, des dommages structurels majeurs, voire leur

I.7.6 Les inondations marines :

Les inondations marines correspondent à des submersions temporaires de zones littorales, généralement provoquées par des conditions météorologiques extrêmes, telles que de fortes dépressions atmosphériques ou des vents violents en provenance de la mer. Elles se traduisent par l'intrusion d'eau salée, dont le caractère corrosif accentue les dégâts matériels. Ces phénomènes peuvent être liés à des raz-de-marée ou à des tsunamis rares mais particulièrement destructeurs , à des tempêtes accompagnées de vents et de précipitations intenses, ou encore à la défaillance d'ouvrages de protection littorale. Les zones les plus vulnérables sont en général les secteurs bas et dépressionnaires situés en bordure de côte.

I.8 Les causes des inondations

Causes naturelles :

- Des précipitations exceptionnelles, à la fois intenses et prolongées.
- La fonte rapide des neiges ou des glaciers, générant un apport massif d'eau.
- Le débordement des cours d'eau lorsque leur capacité d'écoulement est dépassée.
- La submersion marine provoquée par des tempêtes, des raz-de-marée ou des tsunamis.
- La saturation des sols en eau, réduisant fortement leur capacité d'infiltration.

Causes anthropiques directes :

- L'urbanisation en zones inondables et l'étalement urbain non planifié.
- L'imperméabilisation croissante des sols liée aux infrastructures routières, aux parkings et aux surfaces bétonnées.
- Les interventions sur les cours d'eau telles que leur rectification, recalibrage ou endiguement.
- La construction d'ouvrages hydrauliques, ainsi que les pratiques de drainage et d'irrigation intensives.
- La déforestation et la disparition des zones humides, qui jouaient un rôle essentiel dans la régulation naturelle des crues.
- Le mauvais entretien ou l'insuffisance des réseaux d'évacuation des eaux pluviales, en particulier en milieu urbain.

Causes anthropiques indirectes :

- La pollution atmosphérique, qui accentue le dérèglement climatique.
- Le réchauffement climatique, à l'origine de :
    - La fonte des glaciers polaires,

- L'élévation du niveau des mers et des cours d'eau,
- L'aggravation des phénomènes météorologiques extrêmes (cyclones, tempêtes, précipitations intenses).

I.9 Les conséquences des inondations

Les inondations constituent un aléa qui affecte presque tous les pays du monde, avec des répercussions variables selon les contextes géographiques et socio-économiques. Leurs impacts se déclinent dans plusieurs domaines :

- **Santé et vie humaine :** elles peuvent provoquer des pertes humaines, favoriser l'apparition de maladies hydriques et perturber le fonctionnement des systèmes de santé.
- **Secteur socio-économique :** elles causent la destruction d'infrastructures, des pertes matérielles importantes, l'arrêt ou le ralentissement des activités économiques, ainsi que des coûts élevés liés aux opérations de réparation et de reconstruction.
- **Environnement :** elles contribuent à l'érosion des sols, à la dégradation des écosystèmes et à la pollution des eaux et des sols.

I.10 Les inondations en Algérie

L'Algérie, à l'instar de nombreux pays dans le monde, est régulièrement exposée à des crues et des inondations dont les effets peuvent être particulièrement destructeurs. Ces phénomènes constituent une contrainte majeure pour les activités humaines et représentent un frein significatif au développement économique et social. Plusieurs régions du pays restent fortement vulnérables à ces aléas naturels, dont les impacts sont souvent amplifiés par divers facteurs aggravants. Ces événements provoquent fréquemment d'importants dommages humains et matériels, sans être toujours liés à des conditions météorologiques exceptionnelles. En effet, certaines inondations surviennent à la suite de simples épisodes pluvieux saisonniers, parfois ordinaires, mais suffisants pour engendrer des conséquences dévastatrices.

I.11 Historique des inondations en Algérie

L'Algérie a connu, au cours des dernières décennies, plusieurs inondations marquantes, résultant de la combinaison de facteurs naturels et anthropiques.

- **Inondations de Bab El Oued (Alger, 2001) :**

Cet épisode dramatique a causé la mort de plus de 700 personnes. Il a été déclenché par des précipitations intenses survenues en l'espace de quelques heures. La catastrophe a été aggravée par l'urbanisation anarchique dans les lits d'oueds, l'insuffisance des réseaux d'évacuation des

eaux et la présence d'habitations précaires construites en zones à risque (ONM, 2002 ; Boudjemaa, 2005).



Figure I.3 : les inondations de Beb l'oued 10 novembre 2001.

- **Inondations de Ghardaïa (2008 et 2015) :**

Dans cette région saharienne, les crues rapides de l'oued M'zab sont provoquées par des pluies diluviennes sur un milieu aride caractérisé par une faible capacité d'absorption. L'occupation du lit majeur par les constructions, combinée à l'urbanisation accélérée, a fortement accentué les pertes humaines et matérielles (Benmohammadi et al., 2016).



Figure I.4 : Les inondations de GHARDAIA (2008 et 2015)

- **Inondations de El Bayadh (2008) :**
  Des pluies intenses ont provoqué l'inondation de plusieurs quartiers, occasionnant des pertes humaines et d'importants dommages matériels. L'inefficacité des réseaux de drainage et l'absence de dispositifs de protection adaptés expliquent en grande partie la gravité des impacts enregistrés (DPC, 2009).



Figure I.5 : les inondations d'ELBAYADH .

- **Inondations de Tizi Ouzou (2012) :**
  Cet épisode démontre l'influence des pentes montagneuses et de l'érosion des sols. Les fortes pluies ont provoqué des glissements de terrain et des coulées de boue, accentués par la déforestation et la dégradation des terres agricoles (Cherif et al., 2013).

- **Inondations de Jijel et Skikda (2019) :**
  Ces crues, déclenchées par des pluies violentes dans des zones fortement urbanisées, ont été aggravées par l'occupation des berges des oueds et par un réseau de drainage saturé, ce qui a entraîné l'inondation rapide de nombreux quartiers (APS, 2019).
- **Inondations de Béchar (2020) :**
  Dans cette wilaya saharienne, les crues ont résulté d'orages soudains, accentuées par l'imperméabilisation des sols urbains et par l'absence de barrages de rétention adaptés aux conditions arides (ANRH, 2021).

Conclusion:

Une crue correspond à une augmentation inhabituelle et rapide du niveau des eaux d'un cours d'eau, dont la gravité dépend à la fois des caractéristiques locales (relief, nature desols, état de la végétation, aménagements existants) et de la durée de l'événement. Dans un milieu naturel, les effets de ce phénomène restent souvent limités, car les sols et les écosystèmes jouent un rôle d'amortisseur en absorbant et en régulant une partie des excédents d'eau. En revanche, dans les espaces urbanisés, la situation devient beaucoup plus critique : l'imperméabilisation des sols, la densité des constructions et la concentration de la population rendent les crues imprévisibles et leurs impacts particulièrement destructeurs, tant sur le plan humain que matériel.

Cette réalité souligne la complexité de la gestion des inondations, qui ne peut se réduire à une simple réponse ponctuelle face à l'urgence. Elle nécessite une approche globale et coordonnée, mobilisant plusieurs secteurs (urbanisme, environnement, hydraulique, protection civile, etc.) afin d'identifier les facteurs déclencheurs, d'évaluer avec précision les niveaux de risque et de concevoir des stratégies de prévention et d'atténuation adaptées. Seule une telle démarche intégrée permet de réduire la vulnérabilité des territoires exposés et de renforcer leur capacité de résilience face à la récurrence croissante de ces événements.

CHAPITRE II :
Présentation de la zone d'étude.

Introduction :

La mise en place d'un système de protection contre les inondations suppose, en amont, une analyse rigoureuse du risque reposant sur des paramètres essentiels tels que la localisation géographique, les conditions climatiques, la topographie et la densité de population. À partir de ce diagnostic préliminaire, ce chapitre s'attache à présenter la caractérisation générale du bassin versant étudié. L'examen approfondi de ses caractéristiques géographiques et physiographiques incluant l'altitude, la pente, la morphologie et la nature lithologique permet non seulement de comprendre les processus hydrologiques qui s'y déroulent, mais aussi d'évaluer la vulnérabilité du bassin face aux phénomènes de crues.

II.1 Présentation de la zone :

La commune d'Aïn Bouyahia est localisée à environ 18,4 km à l'ouest du chef-lieu de la wilaya d'Aïn Defla. Elle se caractérise par un relief de collines faiblement accidentées, marquant la transition avec les contreforts du Djebel Zaccar. Sa superficie totale est de 126,7 km², comprenant à la fois des zones urbanisées et des massifs forestiers.

Sur le plan administratif, elle est bordée au nord par les communes d'El Hamamda et de Tacheta, à l'ouest par El Abadia, au sud par El Attaf et Rouina, et à l'est par El Amra. Ces éléments géographiques et territoriaux définissent le périmètre de la présente étude, centrée sur l'élaboration de dispositifs de protection contre les inondations dans cette commune.



Figure II.1: Localisation de Ain Bouyahia



Figure II.2 : Une image satéllitaire de oued khoudja côté ouest

II.2 Climatologie

La climatologie joue un rôle essentiel dans l'étude des processus hydrologiques, car elle met en évidence les interactions entre les conditions atmosphériques et la dynamique des écoulements. L'analyse des paramètres météorologiques, notamment les précipitations, les températures, la circulation des vents ainsi que certains phénomènes extrêmes tels que le sirocco (vent chaud et sec) ou les épisodes de gel, s'avère indispensable pour évaluer la vulnérabilité d'un territoire face aux aléas hydrologiques.

Dans le cadre de ce travail, les données climatologiques utilisées proviennent d'organismes institutionnels spécialisés. L'Office National de la Météorologie (ONM) fournit les relevés relatifs aux températures, à la vitesse du vent et à l'évaporation, tandis que l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) se charge de la collecte des données pluviométriques à l'échelle régionale. La mise en relation de ces informations permet d'analyser les variations saisonnières, de déterminer la fréquence des pluies intenses et d'apprécier leur incidence sur le fonctionnement du réseau hydrographique d'Aïn Bouyahia. L'objectif de cette section est donc de souligner l'impact des facteurs climatiques sur la formation et l'aggravation du risque d'inondation.

II.2.1 Température :

Les informations relatives aux températures dans le bassin versant restent limitées, mais certaines observations peuvent être dégagées, en particulier durant la saison sèche. Celle-ci joue un rôle déterminant dans l'augmentation de l'évapotranspiration et contribue fortement au déficit d'écoulement. Sa prolongation fragilise les sols, favorisant la désagrégation des couches superficielles et accentuant ainsi leur sensibilité à l'érosion.

En raison de l'insuffisance des données issues des stations locales, l'étude repose sur les enregistrements fournis par la station météorologique la plus proche. Le tableau suivant, qui présente les températures minimales, moyennes et maximales mensuelles sur une période de 36 ans (1986-2022), offre une vision globale des variations thermiques et permet de mettre en évidence les principales tendances climatiques régionales.

Tableau II.1 : Températures mensuelle enregistrées à la station.

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Tmin (C°)	11	7.6	5.6	22	12.4	12	11.5	4.4	9.6	16.4	19	17
Tmoy (C°)	30.9	19.4	13.1	12.2	10	12.4	14.6	16	23.3	30	32.3	29.7
Tmax (C°)	44	33.6	28.4	24	23.6	26	27.4	31.2	39.6	45	49	43.6

Avec :

Tmin : Température minimale mensuelle (C°).

Tmoy : Température moyenne mensuelle (C°).

Tmax : Température maximale mensuelle (C°).

Entre 1986 et 2022, le climat se distingue par de forts contrastes saisonniers. Les températures minimales descendent jusqu'à 2,4 °C en février, tandis que les maximales estivales atteignent près de 49 °C en juillet et août. La moyenne annuelle, qui traduit cette variabilité thermique, s'établit à 20,3 °C.

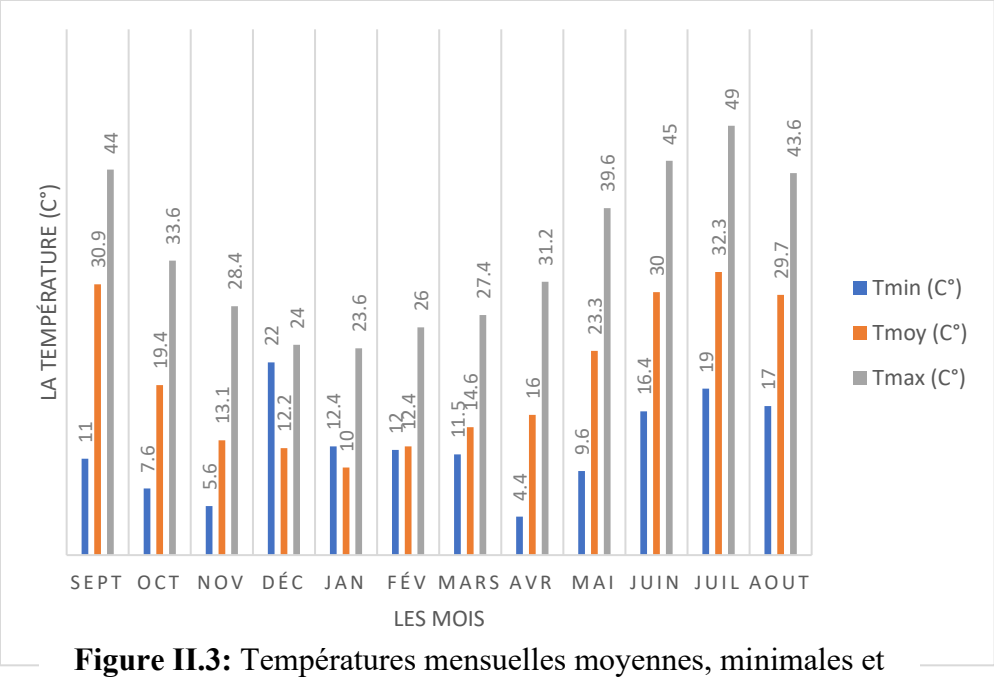


Figure II.3: Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales.

II.2.2. Vent :

La description du régime des vents, incluant la répartition mensuelle de leur vitesse, de leur fréquence et de leur direction, représente un élément déterminant tant pour la conception des infrastructures que pour les simulations hydrauliques. Les données disponibles, couvrant la période 1986-2022, sont résumées dans le tableau ci-après, lequel présente les vitesses moyennes enregistrées à la station de référence.

Tableau II.2 : Moyennes mensuelles de la vitesse de vent enregistrées à la station

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Vent moy (m/s)	2.96	3.22	3.15	2.65	1.63	2.68	4.2	3.00	2.32	2.92	3.36	4.68

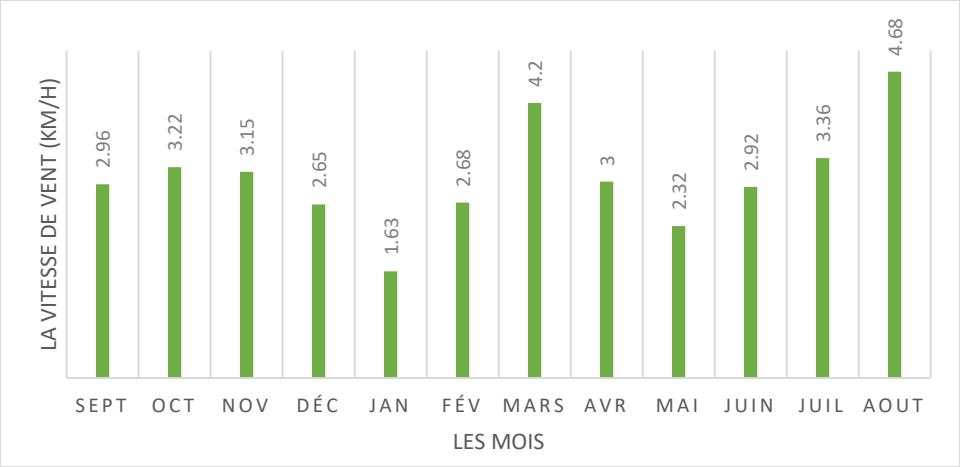


Figure II.4 : Distribution des vitesses du vent.

II.2.3.Précipitations :

Les précipitations représentent l'ensemble des apports en eau d'origine atmosphérique reçus par un bassin versant ou une surface donnée. La hauteur de pluie correspond à l'épaisseur de la lame d'eau qui se constituerait sur une surface horizontale si la totalité de ces apports se déposait sous forme liquide.

Le tableau ci-après présente les données pluviométriques enregistrées à la station d'El Abadia sur une période de 40 ans.

Tableau II.3 : Répartition des pluies mensuelles interannuelles de la station pluviométrique 012001.

Mois	**Sept**	**Oct**	**Nov**	**Déc**	**Jan**	**Fév**	**Mars**	**Avr**	**Mai**	**Juin**	**Juil**	**Aout**
Pv (mm)	19.4	28.1	51.6	47.9	50.6	54.8	44.3	36.1	25.9	9.9	2.6	4.7

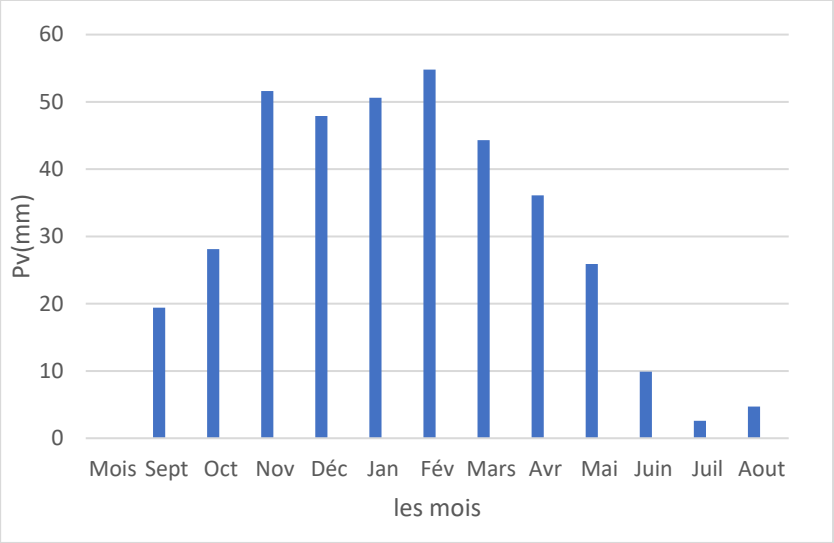


Figure II.5 : Evolution de la pluviométrie mensuelle interannuelles.

II.3. Sismicité :

La sismicité en Algérie, résultant de la convergence entre les plaques africaine et eurasienne, se révèle particulièrement marquée. L'historique du pays témoigne de plusieurs séismes majeurs ayant entraîné des dégâts considérables. Une cartographie réglementaire établit la répartition de l'aléa sismique en cinq zones, classées selon un degré de danger croissant

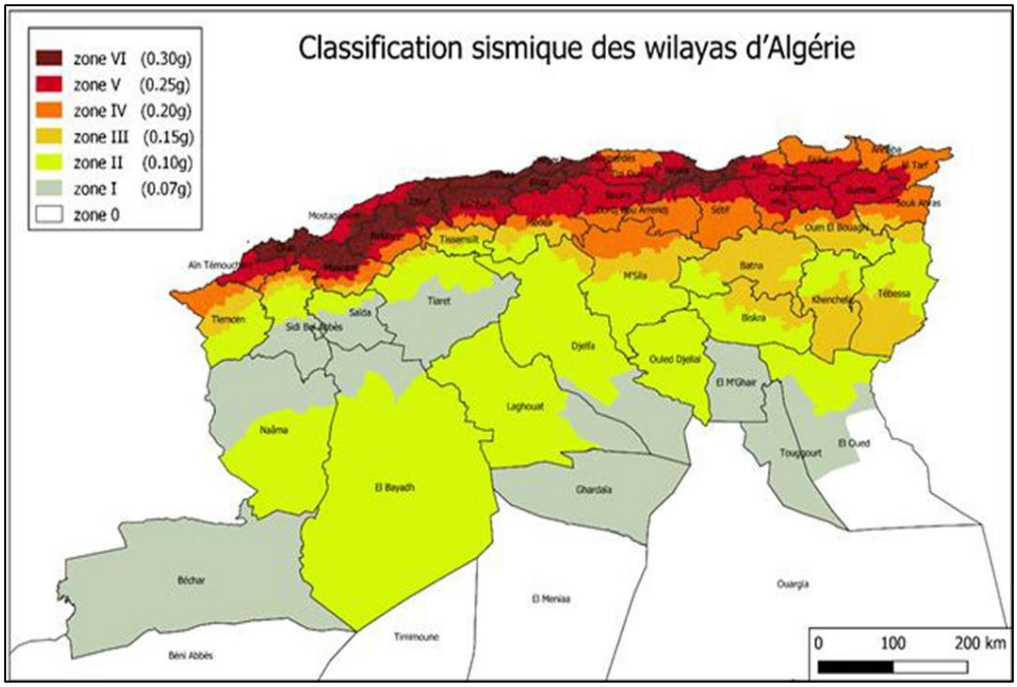


Figure II.6 : Les zones sismiques d'Algérie

• Zone 01 : risque quasi inexistant.

• Zone 02 : risque faible.

• Zones 03 et 04 : risque modéré.

• Zone 05 : risque significatif.

• Zone 06 : risque eleveé

Le zonage sismique illustré dans la figure précédente place la région d'Aïn Bouyahia en zone 06, correspondant à un niveau d'aléa sismique eleveé.

Conclusion :

Ce chapitre introductif a permis de présenter de manière globale la zone d'étude dans ses différentes composantes, notamment climatiques et topographiques. Cette caractérisation constitue une étape fondamentale pour comprendre l'origine des inondations, qu'elles soient liées aux oueds, aux plaines ou à l'interaction des deux. Elle offre également des éléments essentiels pour anticiper la dynamique des crues et en évaluer les effets potentiels, constituant ainsi un socle indispensable à la préparation d'études hydrologiques et hydrauliques plus approfondies.

CHAPITRE III :
ETUDE hydrologique

Introduction :

L'hydrologie est une discipline des sciences de la Terre qui s'intéresse à l'analyse de la distribution de l'eau à la surface du sol et en profondeur, ainsi qu'à l'étude de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. En tant que science interdisciplinaire, elle mobilise plusieurs domaines pour répondre aux enjeux liés à la gestion et à l'exploitation des ressources en eau.

Les investigations hydrologiques jouent un rôle crucial dans le développement des ouvrages hydrauliques. Elles visent notamment à déterminer les débits extrêmes correspondant à différentes périodes de retour (10, 20, 50 ans, etc.), éléments essentiels pour l'évaluation du risque d'inondation.

Ce travail a pour but de caractériser les paramètres hydrologiques du bassin versant de "Oued KHOUDJA ", situé à l'ouest de la ville d'AIN BOUYAHIA. À partir de la délimitation du bassin réalisée avec le logiciel ArcGIS, diverses caractéristiques seront extraites. L'étude comprendra également l'estimation des périodes de retour et le calcul des débits de crue nécessaires à la conception d'un aménagement hydraulique visant à protéger la région contre les crues et les inondations.

III.1 Bassin versant:

III.1.1 Caractéristiques principales du Bassin versant :

Un bassin versant, également appelé bassin d'alimentation, correspond à l'ensemble de la surface topographique dont les eaux de ruissellement sont drainées par un cours d'eau principal et ses affluents, jusqu'à une section donnée. Tous les écoulements générés à l'intérieur de cette zone convergent naturellement vers cette section de mesure avant de poursuivre leur chemin vers l'aval.

Les différents bassins versants sont délimités entre eux par ce qu'on appelle une ligne de partage des eaux, qui constitue la frontière naturelle entre deux zones de drainage. Cette limite est généralement identifiée à l'aide d'une carte topographique. Pour la tracer, on commence à partir de l'exutoire, puis on dessine à main levée des segments perpendiculaires aux courbes de niveau en suivant les lignes de crête, jusqu'à former une boucle qui revient à l'exutoire (Touaibia,2015).

III.1.1.1 Les caractéristiques géographiques :

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

Longitude : 1.752 °.

Latitude : 36.272 °.

L'altitude : 213m

III.1.1.2 Les caractéristiques morphologiques :

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant ont une influence déterminante sur sa réponse hydrologique, en particulier lors des épisodes de crue ou en période d'étiage. Parmi les indicateurs essentiels, le temps de concentration (Tc) permet d'évaluer la rapidité et l'intensité avec lesquelles le bassin réagit aux précipitations. Ce paramètre dépend de plusieurs éléments morphologiques, notamment la superficie du bassin, sa forme générale, son altitude moyenne, la pente du terrain, ainsi que son orientation.

À ces facteurs s'ajoutent d'autres paramètres tout aussi importants, tels que la nature des sols, le type de couverture végétale, ou encore la structure du réseau hydrographique. L'ensemble de ces éléments, qu'ils soient géométriques ou physiques, peuvent être déterminés à partir de cartes topographiques ou de données issues de modélisations numériques et d'outils d'analyse géospatiale.

- **La surface :**

La superficie d'un bassin versant représente l'étendue géographique délimitée par la ligne de partage des eaux qui en définit les contours. Elle correspond à la surface totale sur laquelle les précipitations sont collectées et dirigées vers l'exutoire du bassin. Cette surface peut être déterminée à l'aide de différents outils, tels qu'un planimètre ou par la méthode des petits carrés, en exploitant des cartes topographiques. La superficie est habituellement exprimée en kilomètres carrés (km^2), ce qui permet d'apprécier l'ampleur du bassin étudié.

Le bassin versant d'OUED KHOUDJA a une superficiel de **S= 2,548 Km^2**

- **Le Périmètre :**

Le périmètre d'un bassin versant désigne la limite externe qui en détermine la frontière topographique. La manière dont un bassin réagit aux précipitations dépend de plusieurs facteurs, notamment des conditions climatiques qui le caractérisent et de ses propriétés physiques spécifiques. Ainsi, chaque bassin présente une réponse hydrologique unique, directement liée à la configuration de son territoire**.**

Le périmètre du bassin versant d'OUED KHOUDJA est : **P= 10,439 Km**

• La longueur du thalweg (cours d'eau principal) :

Un talweg correspond à la ligne reliant les points les plus bas d'un relief, que ce soit au creux d'une vallée ou dans le lit d'un cours d'eau.

La longueur du cours d'eau principal est : **L_{cp}= 4,24 Km**

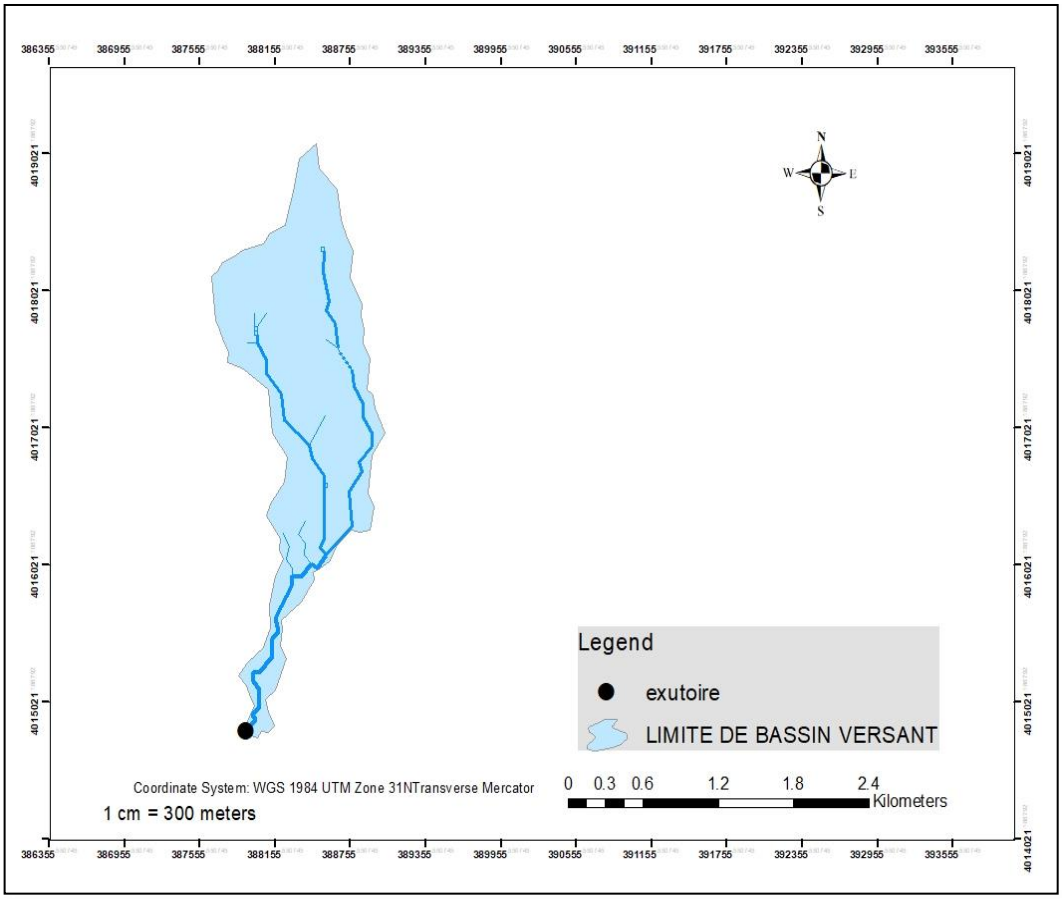


Figure III.1: Bassin versant oued Khoudja côté ouest

III.1.1.3 Les caractéristiques géométriques :

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

L'indice de compacité de Horton est déterminé en calculant le rapport entre la largeur moyenne du bassin versant et la longueur du cours d'eau principal. Ce rapport est obtenu à partir de la formule suivante :

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

Avec :

K_h : indice de compacité de HORTON.

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

L_{cp} : longueur de cours d'eau principale (Km).

Pour :

$K_h > 1$ …… Bassin ramassée.

$K_h < 1$ …… Bassin allongée

➢ Indice de compacité de Gravélius :

L'indice de Gravelius constitue un paramètre clé pour l'évaluation de la compacité des bassins versants. Il permet d'analyser dans quelle mesure la forme d'un bassin influence la concentration des écoulements et la rapidité de la réponse hydrologique, notamment lors des crues (Chow, Maidment et Mays, 1988).

Selon Perry (1995), cet indice, également appelé indice de forme (KG), est utilisé pour comparer la morphologie des bassins versants. Une valeur élevée de KG traduit une forme allongée du bassin, généralement associée à une réponse hydrologique plus lente face aux précipitations, contrairement aux bassins plus compacts. L'indice est calculé en rapportant le périmètre du bassin (P), exprimé en kilomètres, au périmètre d'un cercle de même superficie (A, en km²), ce qui permet de standardiser la comparaison entre bassins de différentes tailles.

Il est exprimé par la relation suivante :

$$K_G = \frac{p}{2\sqrt{\pi \times S}} = 0.282 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \qquad \text{(III.2)}$$

Avec :

K_G : Indice de compacte de gravelius.

P : Périmètre de bassin versant (km).

S : Surface du bassin versant (km2).

Pour :

- K_G=1 : Bassin compacte.
- 1< K_G< 1.3 : Bassin moins compacte.
- K_G> 1.3 : Bassin allongée.

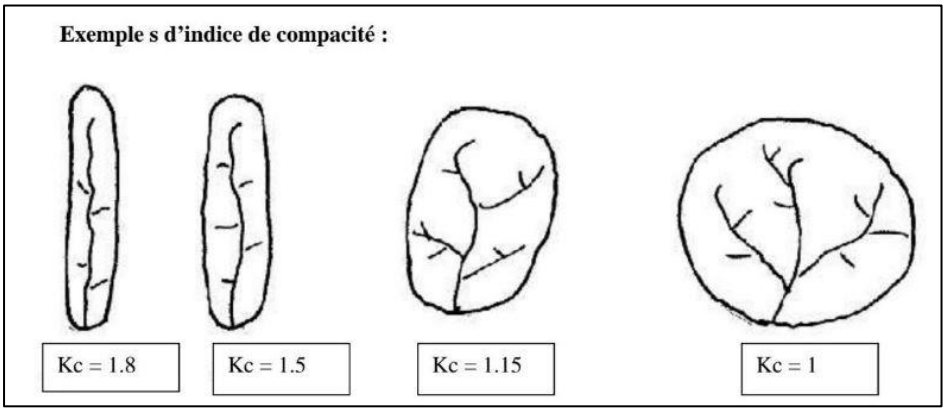


Figure III.2 : Différents types des bassins versant selon le coefficient de gravelius K_G

Plus la valeur du coefficient de compacité (KG) est élevée, plus le bassin versant présente une forme allongée. Cela implique qu'une goutte d'eau tombant au point le plus éloigné mettra plus de temps à atteindre l'exutoire. En conséquence, la crue sera moins brutale. Ainsi, l'indice de compacité est directement proportionnel au temps de concentration (Tc)..

- **Coefficient d'allongement :**

En hydrologie, le coefficient d'allongement (Ca) est un paramètre morphométrique utilisé pour caractériser la forme des bassins versants. Il est calculé en rapportant la longueur du bassin au diamètre d'un cercle ayant la même superficie. Cet indice permet d'estimer la réponse hydrologique d'un bassin face à des épisodes de précipitations (Gregory et Walling, 1973).

Il est exprimé par la relation suivante :

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

Avec :

C_a : Coefficient d'allongement.

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

Un coefficient d'allongement élevé traduit un bassin versant plus étiré, ce qui peut favoriser un écoulement plus rapide des eaux vers l'exutoire. Cela entraîne une réponse hydrologique plus rapide aux précipitations, augmentant ainsi le risque de crues soudaines.

- **Rectangle équivalent :**

Le rectangle de Gravélius est un concept utilisé en hydrologie et en géomorphologie pour simplifier la représentation d'un bassin versant en le modélisant sous la forme d'un rectangle de superficie équivalente. Cette approche permet de faciliter les calculs et les comparaisons, notamment en ce qui concerne les flux d'eau entre différents bassins. En standardisant la forme des bassins versants, cette méthode permet aux chercheurs d'appliquer des outils d'analyse plus simples pour étudier leurs caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques.

Le périmètre et la superficie du rectangle se présentent comme suit :

$$\mathbf{P=2\times (Lr + lr)} \qquad \text{(III.4)}$$

$$\mathbf{A= Lr \times lr} \qquad \text{(III.5)}$$

Avec :

P : Le Périmètre du rectangle équivalent (Km).

A : La Superficie du Rectangle équivalent (Km^2).

Lr : La Longueur de rectangle équivalent (Km).

Lr : La Largeur de rectangle équivalent (Km).

La longueur Lr et la largeur lr en unité de (km) sont données par la résolution de P et A :

$$K_G= 0.282 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \qquad \text{(III.6)}$$

De (III.4) et (III.5) on obtient une équation de 2éme degré admet deux solutions Lr et lr :

$$L_r = \frac{KG\times\sqrt{A}}{1,12}\times\left\{1+\sqrt{1-\left(\frac{1,12}{KG}\right)^2}\right\} \qquad \text{(III.7)} \qquad \text{et} \qquad l_r = \frac{KG\times\sqrt{A}}{1,12}\times\left\{1-\sqrt{1-\left(\frac{1,12}{KG}\right)^2}\right\} \qquad \text{(III.8)}$$

Avec :

L_r : La Longueur de rectangle équivalent (Km).

l_r : La Largeur de rectangle équivalent (Km).

K_G : Indice de compacité de Gravélius.

A : La Superficie du Rectangle équivalent (Km^2).

Les paramètres géomorphologiques du bassin versant d'Oued KHOUDJA sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Les paramètres hydro morpho métriques du bassin versant d'Oued Khoudja côté ouest

Désignation	Unité	Valeur	Interprétation
Superficie (S)	Km^2	2,548	-
Périmètre (P)	Km	10,439	-
Longueur du cours d'eau principal (Lcp)	Km	4,24	-
Indice de Horton (Kh)	-	≈ 0,142	Bassin allongé
Indice de Gravélius (KG)	-	≈ 1,844	Bassin très allongé
Coefficient d'allongement (Ca)	-	≈ 7,05	Forme très étirée
Longueur du rectangle équivalent (Lr)	Km	≈ 4,716	-
Largeur du rectangle équivalent (lr)	Km	≈ 0,54	-

.

III.1.2 Caractéristique hydrographique :

III.1.2.1 Etude du Relief :

Le relief exerce une influence déterminante sur l'écoulement, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques, tels que les précipitations et les températures, varient en fonction de l'altitude et de la morphologie du bassin versant. Par ailleurs, la pente constitue un facteur clé dans la détermination de la vitesse de l'écoulement. Le relief peut également être caractérisé à l'aide de divers indices et paramètres spécifiques

- La courbe hypsométrique.
- L'altitude moyenne.
- L'indice de pente globale I_g.
- L'indice de pente roche I_p..
- La densité de drainage D_g.

.

III.1.2.2 La courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique représente graphiquement la distribution des altitudes au sein d'un bassin versant, en indiquant la proportion de surface située à chaque tranche d'altitude. Cet outil s'avère particulièrement pertinent pour analyser les processus de formation du relief et évaluer l'équilibre entre érosion et sédimentation (Chorley, Schumm et Sugden, 1984).

Elle joue un rôle fondamental pour plusieurs raisons. D'une part, elle fournit une vision globale de la morphologie du terrain, permettant une analyse fine de la répartition altitudinale, de la pente moyenne et du profil général du bassin. En visualisant la manière dont les surfaces se distribuent selon l'altitude, la courbe hypsométrique permet d'anticiper le comportement des crues et d'estimer les temps de concentration des eaux.

D'autre part, elle constitue un outil de comparaison efficace entre différents bassins versants, en mettant en évidence leurs caractéristiques topographiques, telles que la pente moyenne et la configuration altimétrique.

Enfin, cette courbe est précieuse pour la gestion des ressources en eau et l'aménagement du territoire. Elle fournit des données essentielles pour la planification, la prévention des risques naturels et l'élaboration de stratégies d'intervention adaptées

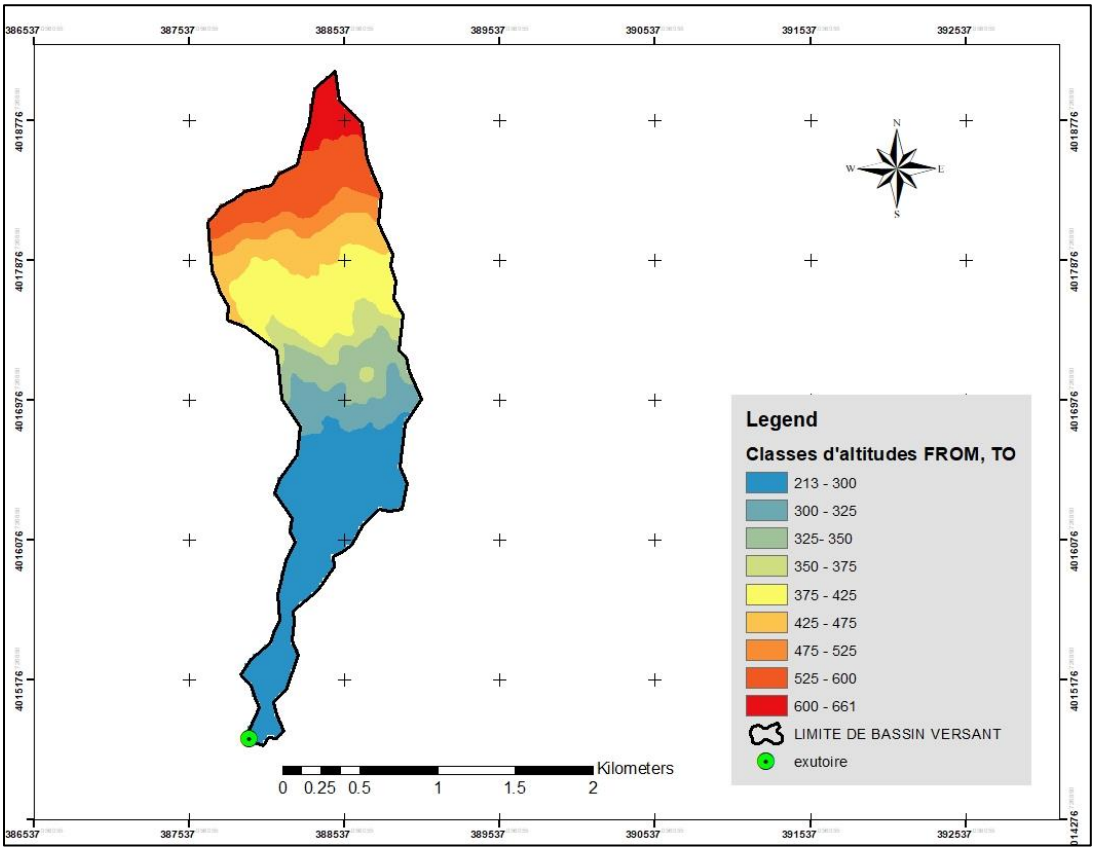
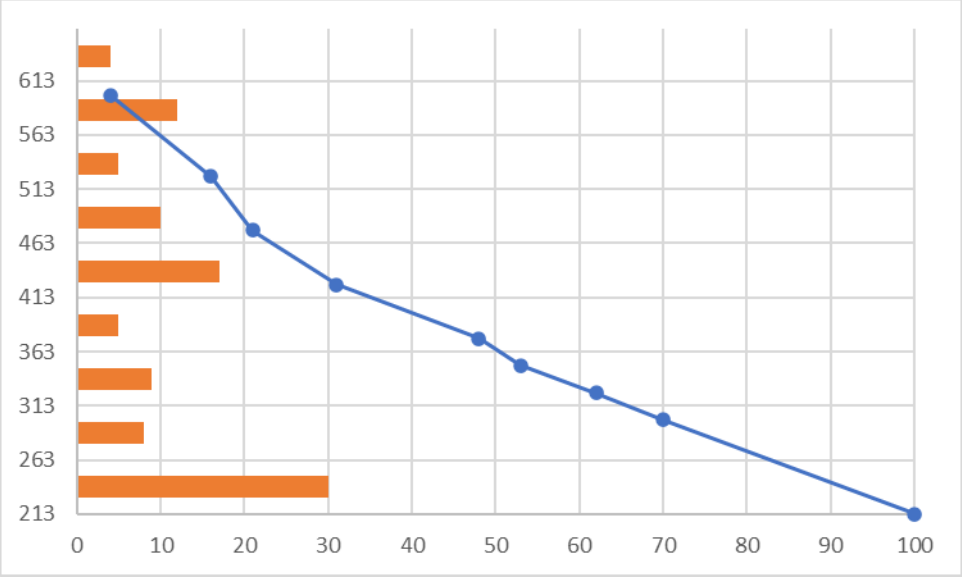


Figure III.3: Carte hypsométrique de bassin versant d'Oued Khoudja côté Ouest

À l'aide du logiciel ArcGIS, les surfaces élémentaires et leurs cumuls ont été calculés en fonction des classes d'altitude. Les résultats de cette analyse sont synthétisés dans le tableau, accompagnés de la courbe hypsométrique représentant la répartition altitudinale du bassin.

Tableau III.2 : Paramètres Hypsométriques du bassin versant d'Oued Khoudja côté ouest :

Altitudes(m)	Hi (m)	Superficie partielle (km^2)	Superficie partielles (%)	Superficie Partielles cumulées (km^2)	Superficie cumulées (%)
213-300	256.5	0.774948	30	0.774948	30
300-325	312.5	0.197025	8	0.971973	38
325-350	337.5	0.217477	9	1.18945	47
350-375	362.5	0.126322	5	1.315772	52
375-425	400	0.432922	17	1.748694	69
425-475	450	0.249427	10	1.998121	79
475-525	500	0.13668	5	2.134801	84
525-600	562.5	0.30966	12	2.444461	96
600-661	630.5	0.103539	4	2.548	100



FigureIII.4 : Courbe hypsométrique du bassin versant oued khoudja

Les principales caractéristiques topographiques en lien avec l'altitude sont les suivantes :

- **Altitude maximale et minimale (H_{max}-H_{min})** : Ces valeurs sont directement obtenues à partir des cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin versant, tandis que l'altitude minimale correspond généralement au point le plus bas, souvent situé à l'exutoire. Ces données sont particulièrement utiles pour analyser les relations avec des paramètres climatiques tels que la température ou les précipitations.
- **Altitude moyenne (H_{moy})** : Il s'agit d'un indicateur clé qui exprime l'effet de la zonation climatique en fonction de l'altitude. Elle est calculée en effectuant la somme des produits entre les surfaces partielles S_i, délimitées par les courbes de niveau, et leurs altitudes moyennes respectives H_i . Cette altitude moyenne se détermine selon la formule suivante:

Il est exprimé par la relation suivante :

$$H_{moy}=\sum \frac{Si \times Hi}{S} \quad \text{(III.9)}$$

Avec :
S : Superficie totale du bassin versant (km²).
Si : Surface partielle située entre deux courbes de niveau (km²).
Hi : Différence d'altitude moyenne entre deux courbes de niveau consécutives (m).

- **Altitude H5%** : Il s'agit de la projection sur la courbe hypsométrique du point correspondant à 5% de la surface cumulée.
- **Altitude médiane H50%** : Il s'agit de la projection sur la courbe hypsométrique du point correspondant à 50% de la surface cumulée.
- **Altitude H95%** : Il s'agit de la projection sur la courbe hypsométrique du point correspondant à 95% de la surface cumulée.

Les résultats des calculs sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III.3 : Caractéristiques altimétriques du bassin versant d'Oued Khoudja côté ouest

Altitudes	**H_{min}**	**H_{max}**	**H_{moy}**	**$H_{5\%}$**	**$H_{50\%}$**	**$H_{95\%}$**
BV Oued Khoudja	213	661	381.77	593.75	365	227.5

III.1.2.3 Indice de pente :

L'objectif de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant afin de faciliter leur comparaison et leur classification. Ces indices ont également une influence directe sur le débit de pointe lors d'un épisode pluvieux, en déterminant la vitesse d'écoulement des eaux. La carte des pentes donne un aperçu de la topographie générale de la région : elle montre que la majeure partie du bassin est constituée de pentes raides, tandis qu'à proximité de l'exutoire, les pentes deviennent très faibles, indiquant un relief plus plat.

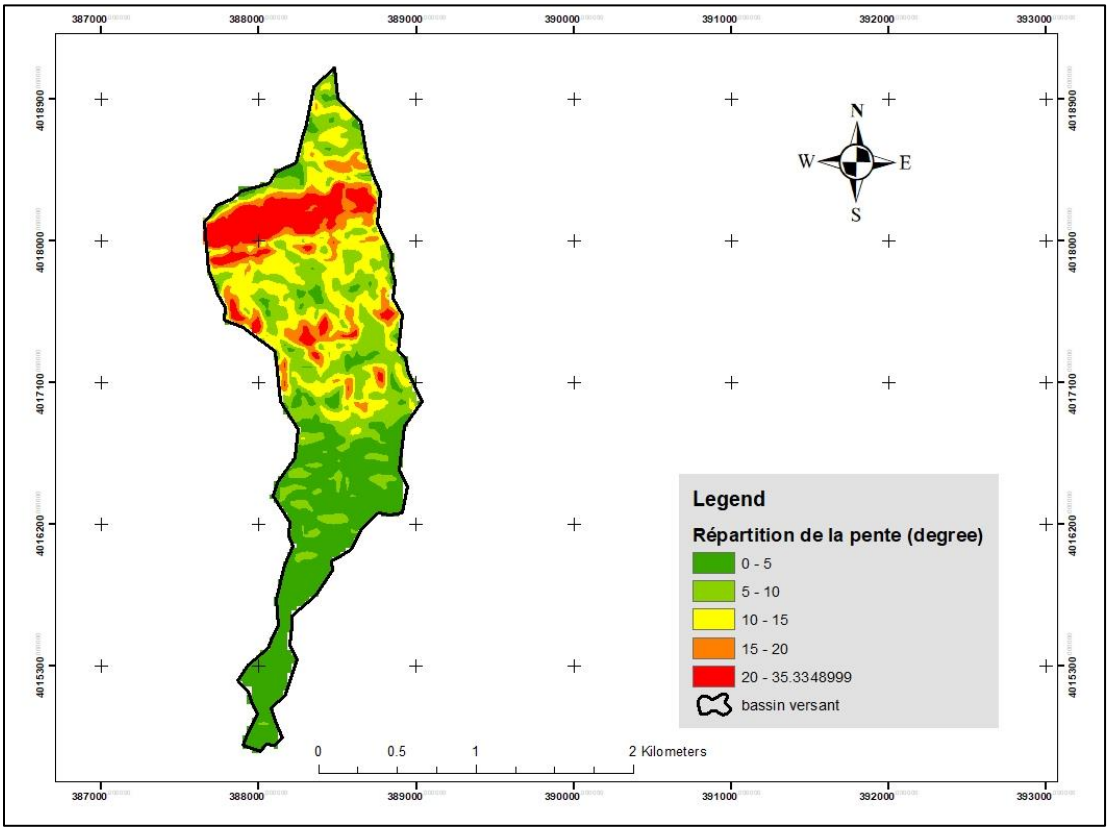


Figure III.5 : Carte des pentes du bassin versant d'Oued Khoudja côté ouest

Par ailleurs, la carte en courbes de niveau est une représentation topographique du terrain, utilisant un ensemble de lignes isohypses espacées de manière régulière pour illustrer les variations d'altitude. Elle permet de visualiser la forme et le relief du paysage. Un exemple de cette carte est présenté dans la figure suivante :

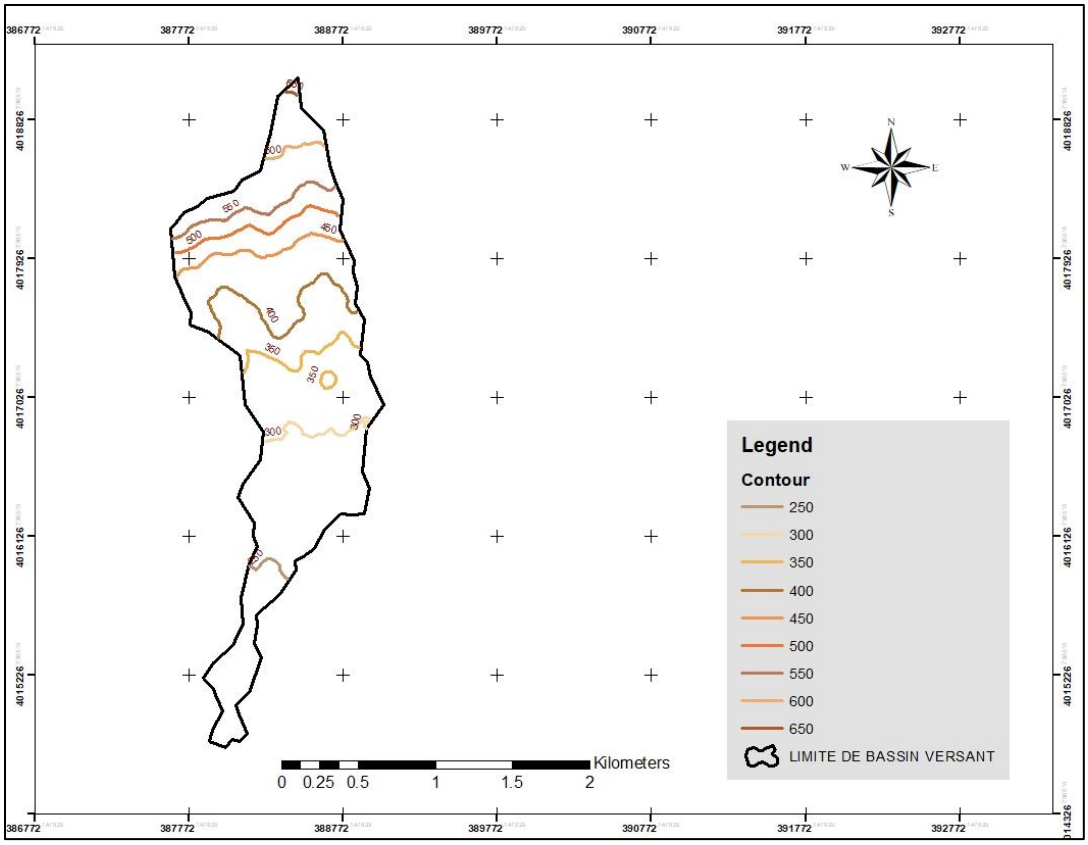


Figure III.6 : Carte des courbes des niveaux du bassin versant d'Oued Khoudja côté ouest

1) Pente du bassin versant I_{bv} :

Elle est définie par la relation suivante :

$$I_{bv} = \frac{Hmax - Hmin}{Lcp} \qquad \text{(III.10)}$$

Avec :
Hmax-Hmin : Altitudes correspondant aux points situés à 5% et 95% de la surface totale, en termes de fréquence

Lcp : Longueur du talweg principal (Km).

2) Pente moyenne du bassin versant I_{mbv} :

La pente moyenne constitue un indicateur clé de la topographie d'un bassin versant. En tant que variable indépendante, elle joue un rôle déterminant dans l'estimation du temps de parcours du ruissellement direct, influençant ainsi le temps de concentration (Tc). Par ailleurs, elle exerce une influence directe sur le débit de pointe en cas d'averse (Touaibia, 2004).

La pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{I_{mbv}}=\frac{\Delta H\{0.5L1+L2+\ldots+0.5Ln\}}{S} \quad \text{(III.11)}$$

Avec :
ΔH : Dénivelés entre deux courbes de niveaux successives (m).
L1, L2…, Ln : Les longueurs des courbes de niveaux (Km).
S : Surface du bassin versant (Km^2).

Tableau III.4 : Pente moyenne du bassin versant d'Oued Khoudja côté Ouest

Courbes de niveaux	Longueur Km	ΔH	Surface BV (Km^2)	I_{mbv} (m/Km)
250	0.368	50	2.548	171.37
300	0.968			
350	1.56			
400	1.895			
450	1.208			
500	1.192			
550	1.237			
600	0.449			
650	0.08			

3) Indice de pente M. ROCHE I_p :

L'indice de pente de Roche (IR) est un paramètre couramment utilisé pour caractériser l'inclinaison d'un terrain. Il permet de quantifier la pente d'une surface en établissant un rapport entre la variation altimétrique et la distance horizontale, offrant ainsi une évaluation précise de la topographie. Cet indice est particulièrement utile dans les études géomorphologiques et hydrologiques, notamment pour analyser les mécanismes d'érosion, de ruissellement et d'autres processus influencés par le relief.

Par ailleurs, l'indice de pente I_p correspond à la moyenne pondérée des racines carrées des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, en tenant compte des surfaces comprises entre deux courbes de niveau successives H_i et H_{i-1}. Il est déterminé selon la formule suivante :

$$\mathbf{Ip}=\frac{\mathbf{1}}{\sqrt{L}}\sum_{i}^{n}\sqrt{Si(Hi-Hi-1)} \quad \text{(III.12)}$$

Avec :

L : longueur de rectangle équivalent (m).

Si : Surface partielle (%) située entre deux courbes de niveau successives

Hi et Hi-1 : la distance entre les courbes de niveau successives.

4) Indice de pente globale I_g :

Cet indice permet de caractériser la morphologie du relief à partir de la classification proposée par l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), devenu en 1998 l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Il est défini comme le rapport entre l'écart d'altitude correspondant aux 5 % et 95 % de la surface du bassin versant, et la longueur du rectangle équivalent. Pour le calcul, on identifie deux points, **S1** et **S2**, situés sur l'axe des abscisses, de manière à ce que 95 % de la surface totale du bassin se situe entre ces deux valeurs 5 % de la surface est inférieure à **S1**, et 5 % supérieure à **S2** (Touaibia, 2015). L'indice est exprimé à l'aide de la formule suivante :

$$\mathbf{I_g}=\frac{D}{L}=\frac{(H5\%-H95\%)}{L} \quad \text{(III.13)}$$

Avec :

D : Dénivelée entre H5% et H95% (m).

L : Longueur de rectangle équivalent (m).

H5% et H95% représentent respectivement les altitudes correspondant à S5%et S95% (m).

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

Plage de valeurs de l'indice Ig	Catégorie de relief
Ig <0.002	**Relief très faible**
0.002<Ig <0.005	**Relief faible**
0005<Ig <0.01	**Relief assez faible**
0.01<Ig <0.02	**Relief modéré**
0.02<Ig <0.05	**Relief assez fort**
0.05<Ig <0.1	**Relief fort**
0.1<Ig	**Relief très fort**

5) Indice de pente moyenne Ipm :

La pente moyenne d'un cours d'eau constitue un paramètre fondamental dans l'analyse hydrologique, car elle conditionne à la fois la vitesse d'écoulement des eaux vers l'exutoire et le temps de concentration du bassin versant. Pour la déterminer, on utilise généralement le **profil longitudinal** du cours d'eau principal ainsi que ceux de ses affluents. La méthode la plus courante consiste à rapporter la différence d'altitude entre l'amont et l'aval du cours d'eau à sa longueur totale. L'indice de pente moyenne, noté Ipm s'exprime par la formule :

$$\mathbf{I_{pm}}=\frac{\boldsymbol{Hmax-Hmin}}{\boldsymbol{Lr}} \qquad \text{(III.14)}$$

Avec :
Lr : Longueur de rectangle équivalent (Km).
Hmax – Hmin : altitudes correspondant aux points ou se trouvent 5% et 95% de la surface totale (m).

6) Dénivelée spécifique D_s :

La dénivelée spécifique (DS) repose sur la classification établie par l'O.R.S.T.O.M. pour caractériser les types de relief des bassins versants, quelle que soit leur taille. Cet indicateur permet d'évaluer avec précision les propriétés topographiques d'un territoire, facilitant ainsi l'analyse de sa morphologie et des variations du terrain. La dénivelée spécifique se définit comme suit :

$$\mathbf{Ds}=\mathbf{Ig}\sqrt{\boldsymbol{S}}=\boldsymbol{D}\sqrt{\frac{\boldsymbol{I}}{\boldsymbol{Lr}}} \qquad \text{(III.15)}$$

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

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

Tableau III.7 : Résultats des calculs des pentes et du dénivelé spécifique du bassin versant de l'Oued Khoudja côtéc ouest

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Pente du bassin versant	I_{bv}	m/Km	105.6604
Pente moyenne de bassins versant	I_m	m/Km	171.37
Indice de pente globale I_g	I_g	m/Km	77.661
Indice de pente moyenne Ipm	I_{pm}	m/Km	95
Indice de pente de Roche (Ip)	I_p	%	2.98
Dénivelée spécifique Ds	Ds	m	123.966
Relief	/	/	Relief assez fort.

Cela concerne uniquement le relief du bassin versant ; un relief considéré comme marqué lorsque 100< Ds <250 m. implique **un Relief assez fort.** selon (O.R.S.T.O.M).

III.1.3 Etude de réseau hydrographique :

III.1.3.1 Caractéristiques du réseau hydrographique :

L'axe fluvial central capte les apports en eau de différents réseaux secondaires, eux-mêmes nourris par une multitude de filets d'eau provenant des zones amont du territoire drainé. Ce maillage complexe, caractéristique de l'organisation hydrologique d'un bassin, nécessite l'évaluation de nombreux indicateurs pour en permettre une analyse complète et rigoureuse.

- **Hiérarchisation du réseau :**

L'organisation des tracés fluviaux s'appuie sur un système de numérotation qui attribue à chaque segment un niveau selon sa position dans l'ensemble du maillage.une branchesans aucune confluence amont reçoit le niveau initial.

Lorsque deux ramifications de même niveau se rejoignent, le tronçon issu de leur jonction passe au niveau supérieur. En cas de rencontre entre lignes d'écoulement de niveaux différents, c'est la valeur la plus élevée qui est conservée.

Ce procédé, proposé en 1952 par un chercheur américain, vise à quantifier la complexité morphologique des systèmes de drainage. Le niveau le plus élevé se retrouve à l'extrémité de la structure, là où les eaux convergent vers l'extérieur du territoire étudié, ce qui permet de saisir l'organisation générale du système aquatique.

Ce référentiel est aujourd'hui un outil central dans l'analyse des structures fluviales, notamment pour évaluer la répartition des flux hydriques et les mécanismes liés à l'érosion des sols (Strahler, 1952 ; Leopold et al., 1964).

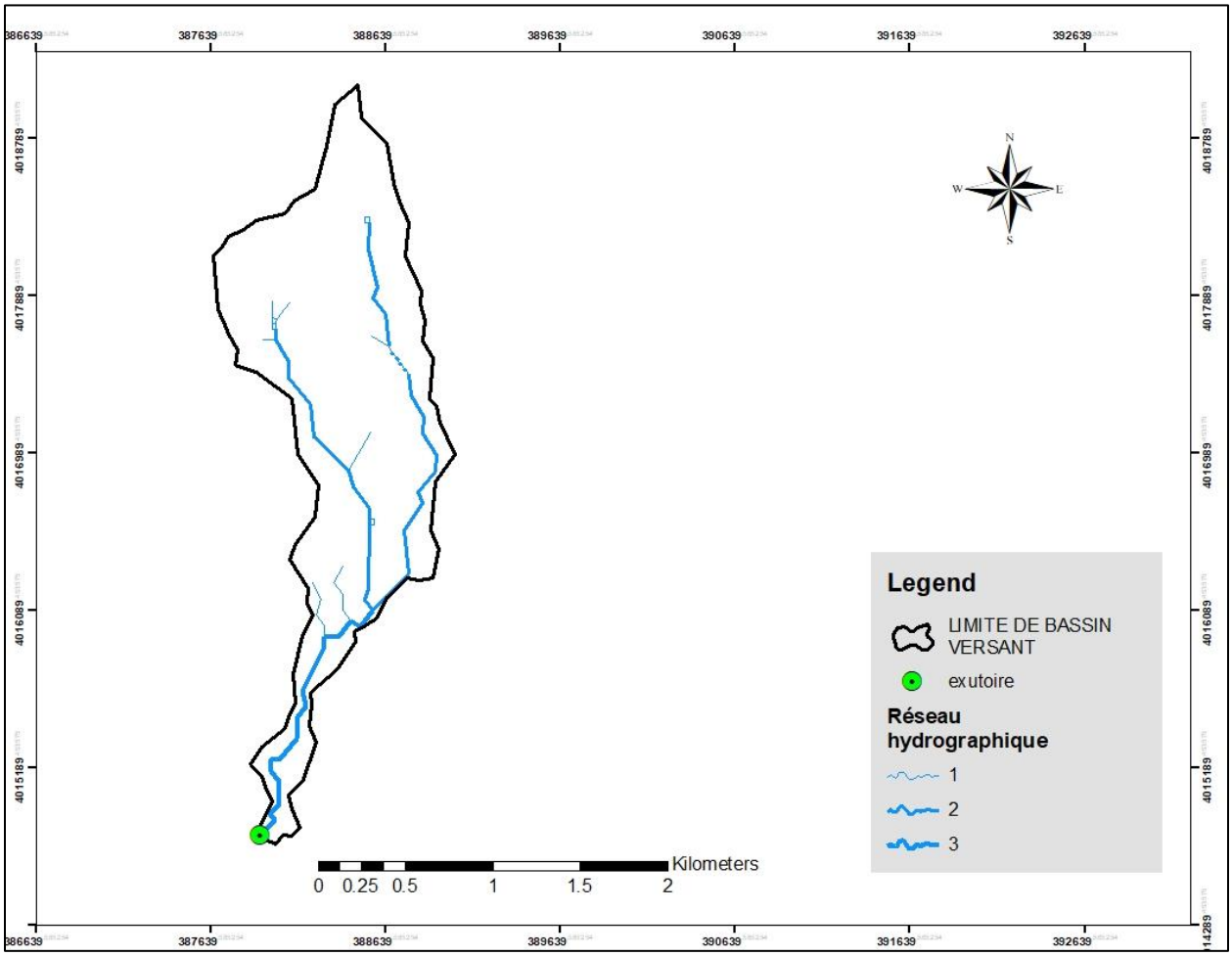


Figure III.7 : Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Khoudja côté ouest

III.1.3.2 Paramétres hydrographiques :

1) Densité de drainage D_d :

Le degré de fragmentation du réseau d'écoulement constitue un indicateur clé pour caractériser le temps de séjour des eaux souterraines dans un territoire donné. Introduit par Horton en 1945 (cité par Coulon, 2015), cet indice correspond au quotient entre la somme des longueurs de l'ensemble des tracés d'écoulement et la superficie du territoire drainé.

Cette notion, développée pour évaluer le rendement du système d'écoulement en lien avec la configuration du relief, permet de mieux comprendre les mécanismes de transfert de l'eau à l'échelle d'une unité hydrogéographique. Horton soulignait déjà l'importance de cette mesure pour appréhender la rapidité avec laquelle l'eau transite à travers un espace drainant.

Des travaux postérieurs, notamment ceux de Leopold et Maddock (1953), ont enrichi cette approche en démontrant que plus cet indice est élevé, plus la durée pendant laquelle l'eau circule dans les zones saturées tend à diminuer. Cela présente des enjeux majeurs pour la compréhension du fonctionnement hydrologique et la mise en œuvre de politiques de gestion intégrée des milieux aquatiques.

La formulation mathématique de cet indicateur est la suivante :

$$\mathbf{Dd}=\frac{\sum_{i=1}^{n} Li}{S} \qquad \text{(III.16)}$$

Avec :

$\sum li$: 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.

2) La densité hydrographique des thalwegs élémentaires F :

$$\mathbf{F}=\frac{\sum N1}{S} \qquad \text{(III.17)}$$

Avec :

N1 : Nombre des cours d'eaux d'ordre 1.
S : Superficie de bassin versant (Km^2).
F : Densité hydrographique (Km^{-2}).

3) Coefficient de torrentialité Ct :

L'indice de torrentialité est obtenu en combinant la densité linéique des écoulements avec le nombre de lignes de talweg par unité de surface. Ce paramètre se calcule selon la relation suivante :

$$\mathbf{C_t = D_d \times F} \qquad \text{(III.18)}$$

Avec :

D_d : Densité de drainage (Km/Km^2).
F : Densité hydrographique (Km^{-2}).

4) Temps de concentration :

Le délai de concentration hydraulique (Tc) d'une unité de drainage représente le laps de temps maximal requis pour qu'une goutte d'eau atteigne l'exutoire en partant du point le plus éloigné du réseau de collecte. L'évaluation de ce paramètre s'avère délicate, en raison de la multitude de facteurs qui influencent l'écoulement, tels que le relief, la nature du couvert végétal et les propriétés du sol.

Diverses expressions empiriques ont été proposées pour estimer cette durée, certaines remontant à plusieurs décennies. Parmi les plus utilisées figure celle de Kirpich (1940), mise au point à la suite des crues catastrophiques de 1936 dans le nord-est des États-Unis. Malgré son ancienneté, cette formule demeure une référence pour sa simplicité d'application et son efficacité relative (Folmar et al., 2007). Toutefois, plusieurs auteurs, dont McCuen (2009), ont remis en question la validité de ces approches généralistes, soulignant qu'une simplification excessive peut conduire à des estimations peu fiables si les spécificités locales du territoire ne sont pas prises en compte.

Il est donc essentiel de sélectionner l'expression empirique la mieux adaptée au contexte morphoclimatique du site étudié. Dans le cas du nord de l'Algérie, il est préférable de privilégier des formules développées dans des environnements géographiques comparables, afin d'optimiser la précision des estimations.

Le calcul du temps de concentration s'appuie ainsi sur les relations empiriques suivantes :

- **Formule de GIANDOTTI (Italie 1937) :**

Donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{Tc} = \frac{(4\sqrt{S}) + (1.5 \times Lcp)}{(0.8 \times \sqrt{Hmoy - Hmin})} \qquad \text{(III.19)}$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).
Hmoy : Altitude moyenne du bassin versant (m).
Hmin : Altitude minimale du bassin versant (m).
S : Superficie du bassin versant (Km^2).
Lcp : Longueur de cours d'eau principal (Km).

- **Formule de SOLOVSKY :**

Donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{Tc}= 4\times\left(\frac{S\times Lcp^{0,333}}{\sqrt{Ibv}}\right)^{0,75} \quad \text{(III.20)}$$

Avec :
Tc : Temps de concentration (h).
S : Superficie du bassin versant (Km^2).
Lcp : Longueur de cours d'eau principale (km).
Ibv : Pente de bassin versant (m/Km).

- **Formule de SCS :**

Donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{Tc}=\left(\frac{0,83\times Lcp^3}{Hmoy-Hmin}\right)^{0,385} \quad \text{(III.21)}$$

Avec :
Tc : Temps de concentration (h).
Lcp : Longueur de thalweg principal (Km).
Hmoy-Hmin : Les altitudes moyenne et minimale du bassin versant (m).

- **Formule de TURAZA :**

Donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{Tc}=\frac{0,108\times\sqrt[3]{S\times Lcp}}{\sqrt{Ipm}} \quad \text{(III.22)}$$

Avec :
Tc : Temps de concentration (h).
S : Surface du bassin versant (Km^2).
Lcp : Longueur de cours d'eau principale (Km).
Ipm : pente moyenne du bassin versant(m/m).

- **Formule de VENTURA :**

Donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{Tc=0,1275}\frac{\sqrt{S}}{\sqrt{Ibv}} \qquad \text{(III.23)}$$

Avec :
Tc : Temps de concentration (h).
Ibv : Indice de pente du bassin versant (m/m).
S : superficie du bassin versant (Km^2).

- **Formule d'ANRH :**

$$\mathbf{Tc} = \mathbf{1.7} \times \left(\frac{SL}{\sqrt{Ic}}\right)^{\mathbf{0.19}} \qquad \text{(III.24)}$$

Avec :

Tc: Temps de concentration en h ;

L : longueur du cours d'eau le plus long en km ;

I : Pente des cours d'eau en (%) ;

S : Surface du BV en Km^2.

- **Choix le temps de concentration :**

Les équations retenues sont particulièrement adaptées aux conditions hydrologiques du nord de l'Algérie. Étant donné la variabilité des résultats obtenus selon les formules utilisées, la valeur minimale parmi les estimations proches a été privilégiée. Les estimations considérées comme extrêmes qu'il s'agisse de durées excessivement longues ou anormalement courtes ont été écartées, de manière à ne conserver que les valeurs représentatives du comportement moyen du bassin étudié.

Les méthodes adoptées sont :

Tableau III.9 : résultats de calculs de temps de concentration.

Formules utilisées	Temps de concentration (h)
Formule de SCS	0.698
Formule de TURUZZA	0.735
Formule de VENTURA	0.626

Nous avons opté pour le résultat fourni par la **formule de VENTURA**, car elle nous offre le temps de concentration le plus optimal.

5) Vitesse de ruissellement Vr :

Le ruissellement désigne l'écoulement des eaux de pluie à la surface du sol sous l'effet de la gravité, lorsqu'elles ne sont ni infiltrées, ni évaporées, ni retenues. Ce phénomène suit généralement la pente naturelle du terrain. En Algérie, on utilise fréquemment la méthode de Kirpich pour estimer la vitesse de ruissellement, en se basant sur le temps de concentration. Cette vitesse est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$v_r = \frac{Lcp}{Tc} \qquad \text{(III.25)}$$

Avec :
Vr : Vitesse de ruissellement (m/s).
Lcp : Longueur du cours d'eau principal (Km).

Tc : Temps de concentration (h).

Les résultats des calculs des paramètres hydrographiques sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.10 : Résultat paramètres hydrographiques d'oued Khoudja côté ouest.

Termes	Symboles	Unités	Valeurs
Densité de drainage	Dd	Km/Km^2	3.047
Densité hydrographique	F	Km^{-2}	7.85
Coefficient de torrentialité	Ct	-	23.919
Temps de concentration	Tc	h	0.626
Vitesse de ruissellement	Vr	Km/h	6.774

Le tableau suivant présente un résumé des caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued Khoudja côté ouest.

Tableau III.11 : Géomorphologie du bassin versant de l'Oued Khoudja côté ouest.

Désignation		Symbole	Unités	Valeur
Superficie		S	Km^2	2.548
Périmètre		P	Km	10,439
Longueur du talweg principal		Lcp	Km	4.24
Indice de compacité de Gravélius		KG	/	1.844
Indice de compacité de Horton		Kh	/	0,142
Coefficient d'allongement		Ca	/	7.05
Rectangle équivalent	**Longueur**	Lr	Km	4.716
	Largeur	Lr	Km	0.54
Altitudes	**Maximale**	Hmax	m	661
	Moyenne	Hmoy	m	381.77
	Minimale	Hmin	m	213
	Médiane 5%	H5%	m	593.75
	Médiane 50%	H50%	m	365
	Médiane 95%	H95%	m	227.5
Pente du bassin versant		Ibv	m/Km	105.6604
Pente moyenne du bassin versant		Imbv	m/Km	171.37
Indice de pente de Roche		Ip	%	2.98
Indice de pente moyenne		Ipm	m/Km	95
Indice de pente globale		Ig	m/Km	77.661
Dénivelée spécifique		Ds	m	123.966
Somme des longueurs des cours d'eau		∑Li	Km	7.7635
Nombre des talwegs d'ordre 1		∑N1	/	20
Densité de drainage		Dd	Km/Km^2	3,047
Densité hydrographique		F	Km^{-2}	7.85
Coefficient de torrentialité		Ct	/	23.919
Temps de concentration		Tc	Heures	0.626
Vitesse de ruissellement		Vr	Km/h	6.774

III.2 Etude des crues :

Dans le cadre d'un projet visant à prévenir les inondations, l'estimation du débit maximal constitue une étape clé. Elle permet de sélectionner les aménagements les plus appropriés et de repérer les zones potentiellement exposées aux inondations. Après avoir identifié les bassins versants concernés et caractérisé leurs spécificités, l'objectif est d'évaluer les débits de crue correspondant à des périodes de retour comprises entre 10 et 100 ans. Cette estimation du débit de crue fréquentielle s'appuie sur deux méthodes principales :

- La série d'observation des stations hydrométriques et pluviométriques.
- Méthode de GRADEX.

III.2.1 La série d'observation de la station hydrométrique :

L'estimation du temps de retour d'une valeur donnée repose sur une analyse fréquentielle d'une série longue de débits maximaux. Cette méthode consiste à élaborer et appliquer un modèle fréquentiel, c'est-à-dire une formule mathématique qui reproduit le comportement statistique du phénomène étudié. Ces modèles permettent d'évaluer la probabilité d'occurrence d'un événement d'une certaine intensité. La fiabilité des estimations dépend fortement du modèle choisi. Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu une loi statistique d'ajustement largement utilisée pour représenter les séries de précipitations extrêmes ainsi que les débits qui en résultent.

III.2.2 Présentation de la station hydrométrique dans la zone d'étude :

Pour étudier les inondations, il est nécessaire de collecter des données hydrologiques et météorologiques à partir de différentes stations de mesure. L'analyse des précipitations maximales annuelles est cruciale pour planifier des aménagements et identifier les événements de pluie extrême pour différentes périodes de retour. Cela nécessite l'accès à une série chronologique étendue des précipitations maximales. Cependant, dans notre zone d'étude, il n'y a pas de station hydrométrique disponible. Par conséquent, nous avons utilisé les données de la station d'EL-ABABSA, située dans le bassin versant N°01, sous-bassin N°17.

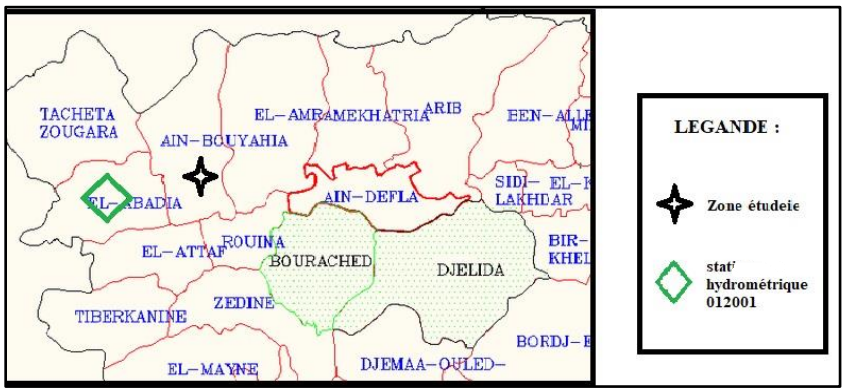


Figure III.8: Localisation de la station hydrométrique d' EL-ABABSA .

Les caractéristiques de la station sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.12 : caractéristiques de la station hydrométrique (EL Ababsa) .

Station	Codes	Coordonnées			Période d'observation
		X (m)	Y (m)	Z (m)	
EL Ababsa	011715	439.65	335.55	320	1992-2013

Tableau III.13 : caractéristiques des stations pluviométriques .

Code de la station	Nom de la station	Type de la station	Les coordonnées			Période d'observation
			X (m)	Y (m)	Z (m)	
012001	EL - ABABSA	Pluviométrique	407.85	327.3	162	1974-2021
012004	TIKEZAL	Pluviométrique	414.35	321.7	320	1973-2021
011904	ROUINA MAIRIE	Pluviométrique	419.8	327.3	190	1970-2021

Le tableau ci-dessous présente la répartition des débits maximaux annuels enregistrés à la station sur une période de 22 ans.

Tableau III.14 : Série des débits maximales annuels de la station 011705 .

Années	Qmax (m³/s)	Années	Qmax (m³/s)
1992	19	2003	27.78
1993	5.4	2004	10.6
1994	8.95	2005	12.44
1995	62.5	2006	8.93
1996	48	2007	31
1997	43.2	2008	51.9
1998	48	2009	49.2
1999	14	2010	30.05
2000	22.8	2011	22.67
2001	38.6	2012	38.4
2002	28	2013	29.59

III.2. 3 Ajustement de la série des débits et pluies maximales journalières :

La précision des résultats d'une analyse fréquentielle dépend en grande partie du choix du modèle statistique utilisé, notamment de la nature de la loi adoptée. Bien que plusieurs critères puissent guider cette sélection, aucune méthode universelle ne garantit une solution optimale. À partir d'un échantillon de n observations, on construit un histogramme des fréquences d'apparition ainsi qu'une courbe de fréquence cumulée de non-dépassement. Lorsque la taille de l'échantillon augmente, l'enjeu consiste à déterminer la loi de probabilité qui régit les données, en passant progressivement d'une simple fréquence observée à une densité de probabilité théorique.

Lois	Variables
Normale	Précipitations annuelles, débits, volumes de stockage des réservoirs
Log Normale	Débits maximaux annuels, précipitations quotidiennes, précipitations annuelles, volume du ruissellement mensuel, volume du ruissellement annuel
Pearson type II (Gamma)	Débits maximaux annuels, précipitations quotidiennes, précipitations annuelles, volume de ruissellement mensuel, volume de ruissellement annuel
Loi de Gumbel et Frechet	Débit maximal annuels
Loi exponentielle	Précipitations quotidiennes, durée entre deux événements
Loi de Goodrich	Valeurs moyennes annuelles (débits, précipitations, etc.)

- ✓ **Logiciel HYFRAN-PLUS :** Est un logiciel permettant d'ajuster différentes distributions statistiques à une série de données, à condition que celles-ci soient indépendantes, homogènes et stationnaires (comme précisé dans les publications relatives au Système d'Aide à la Décision, ou SAD). Un module spécifique du SAD a été développé afin de faciliter le choix de la distribution la mieux adaptée pour estimer les quantiles correspondant à de fortes périodes de retour.

1) Ajustement de la série par la loi de GUMBEL :

La loi de Gumbel, largement utilisée et reconnue pour son aptitude à modéliser les valeurs extrêmes, appartient à la famille des distributions doublement exponentielles. Elle représente la distribution limite des maxima dans un échantillon de n observations. Ainsi, lorsqu'on s'intéresse aux maxima annuels d'une variable par exemple, le maximum quotidien sur 365 jours la loi de Gumbel s'avère particulièrement bien adaptée. L'ajustement des données à cette distribution a été effectué à l'aide du logiciel HYFRAN-PLUS, et les résultats correspondants sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.16 : Résultat d'ajustement par la loi de Gumbel.

Période de retour	Probabilité de fréquence	Débit max jour	Écart type	Intervalle de confiance
1000	0,9990	100	20	70.5 - 149
100	0,9900	80.5	13.6	53.9 - 107
50	0,9800	71.7	11.7	48.8 - 94.5
20	0,9500	59.9	9.13	42.0 - 77.8
10	0,9000	50.8	7.23	36.6 - 64.9
5	0.8000	41.3	5.35	30.8 - 51.8
2	0,5000	26.9	3.18	20.7 - 33.2

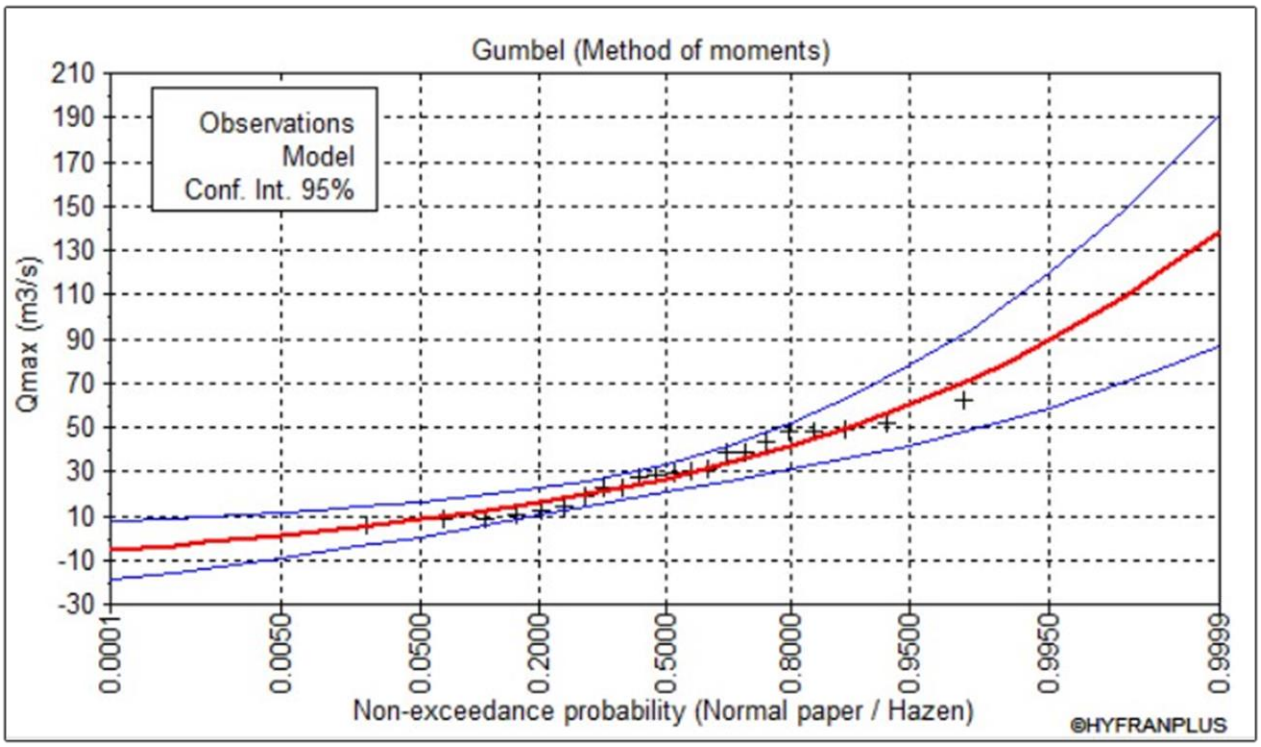


Figure III.9 : graphe d'ajustement par la loi de Gumbel de la station 011705

Le tableau suivant compare les caractéristiques de la loi de Gumbel avec celles de l'échantillon.

Tableau III.17 : comparaison entre la loi de GUMBEL et l'échantillon.

Paramètres	**Caractéristiques de la loi**	**Caractéristiques de l'échantillon**
Minimum	aucun	5.40
Maximum	aucun	62.5
Moyen	29.6	29.6
Écart type	16.2	16.2
Médian	26.9	28.8
Coefficient de variation Cv	0.549	0.549
Coefficient d'asymétrie Cs	1.14	0.262
Coefficient d'aplatissement Ck	2.4	1.86

2) Ajustement par la loi Log Normal (Loi de Galton) :

Une variable aléatoire x suit une distribution log-normale si son logarithme naturel V=ln(X) suit une loi normale. La loi de Galton, issue d'une transformation de la loi normale, constitue une forme asymétrique de celle-ci. Dans ce cadre, l'ajustement des données à la loi log-normale a été réalisé à l'aide du logiciel HYFRAN. Les résultats de cet ajustement sont synthétisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.18 : Résultats d'ajustement par la lo de Log Normal.

Période de retour	Probabilité de fréquence	Débit max jour	Écart type	Intervalle de confiance
1000	0.9990	199	70.2	61.1 - 336
100	0.9900	119	33.5	52.9 - 184
50	0.9800	98.6	25.5	48.7 - 149
20	0.9500	74.8	16.8	41.9 - 108
10	0.9000	58.5	11.5	35.9 - 81.0
5	0.8000	43.4	7.33	29.1 - 57.8
2	0.5000	24.6	3.54	17.6 - 31.5

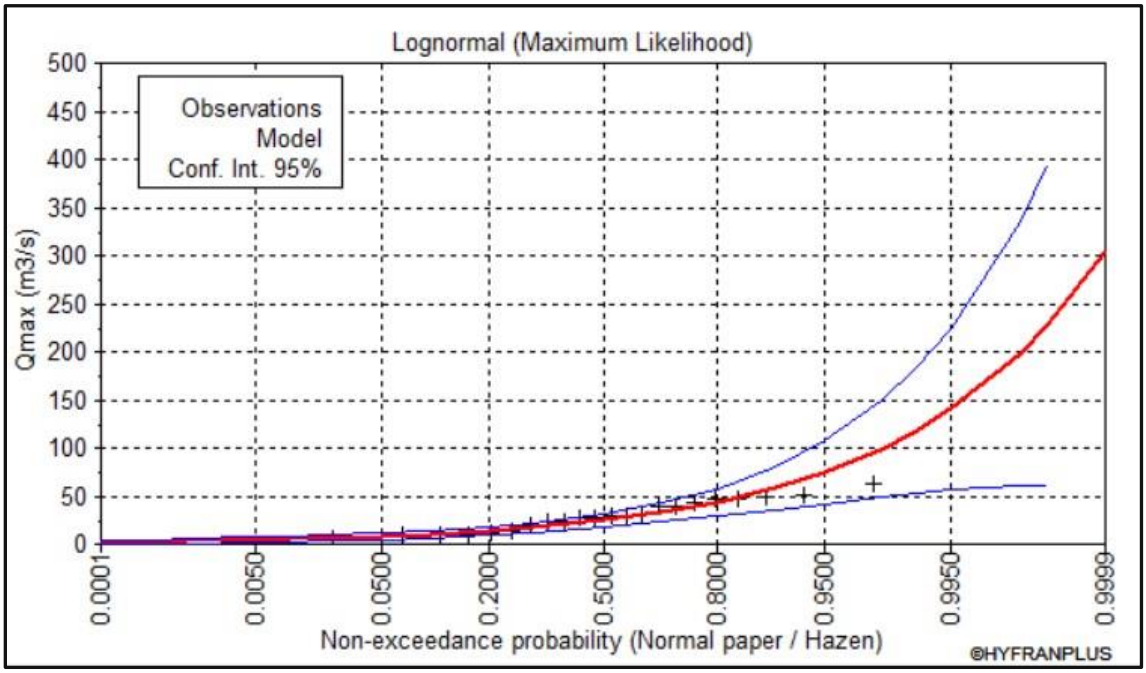


Figure III.10 : Graphe d'ajustement par la loi de Log Normal de la station 011705.

Le tableau suivant compare les caractéristiques de la loi de Log Normal avec celles de l'échantillon.

Tableau III.19 : comparaison entre la loi de Log Normal et l'échantillon

Paramètres	Caractéristiques de l'échantillon	Caractéristiques de la loi
Minimum	5.40	0
Maximum	62.5	aucun
Moyen	29.6	30.9
Écart type	16.2	23.5
Médian	28.8	24.6
Coefficient de variation Cv	0.549	0.761
Coefficient d'asymétrie Cs	0.262	2.72
Coefficient d'aplatissement Ck	1.86	18.6

- **Comparaison entre les deux lois d'ajustement :**

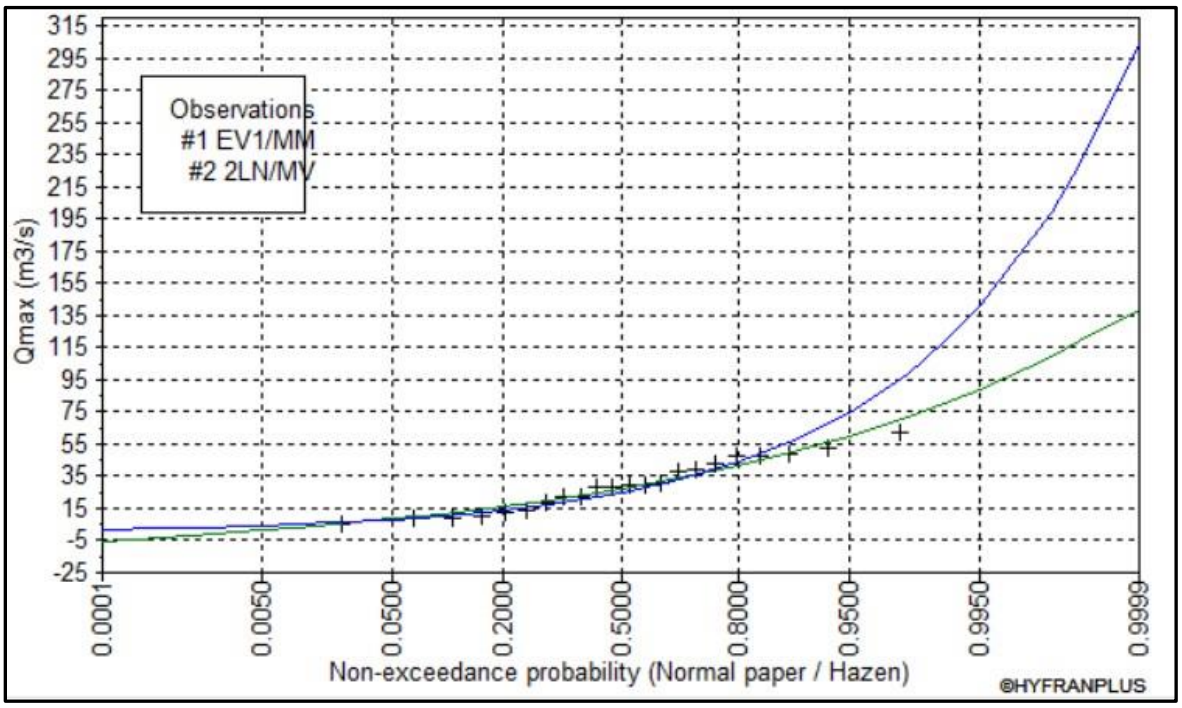


Figure III.11 : Comparaison entre les Lois ajustement utilisées de la station 011701.

III.2.4 Choix de la Loi d'ajustement :

Des écarts entre les fréquences observées et celles prévues par une distribution théorique sont inévitables. Si l'ajustement graphique constitue une étape préliminaire importante pour évaluer la pertinence d'un modèle, il demeure insuffisant pour valider définitivement le choix d'une loi. Il est donc nécessaire de recourir à un test statistique d'adéquation afin de quantifier la qualité de l'ajustement et de comparer différentes distributions. Parmi les tests les plus couramment utilisés à cette fin figure le test du chi carré (χ^2).

- ✓ **Test d'adéquation de χ2 :**

Le test d'adéquation, également appelé test d'ajustement, vise à vérifier si le modèle statistique choisi est compatible avec les données observées. Plus précisément, il permet de tester l'hypothèse selon laquelle les observations suivent une loi de probabilité donnée. Le test du chi-carré (χ^2) est l'un des outils les plus couramment utilisés dans ce contexte.

Pour identifier la loi la plus appropriée, on compare la valeur du χ^2 calculé à la valeur critique issue des tables du χ^2, à un niveau de signification de 5 %, correspondant à un intervalle de confiance de 95 %. Cette comparaison permet de déterminer si les écarts entre les fréquences observées et théoriques sont statistiquement significatifs.

La valeur critique du χ^2 dépend du degré de liberté γ et du seuil de signification α Selon Touaibia (2015), la règle de décision est la suivante :

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

Les résultats du test du chi-carré ont été obtenus à l'aide du logiciel HYFRAN-PLUS et sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.20 : résultats du test du χ^2.

Loi de la distribution	Degré de liberté	Nombre de classe	χ^2 calculée	χ^2 théorique (Tabulé)
Gumbel	3	6	5.27	7.81
Log Normale	3	6	3.64	7.81

Selon les résultats du test du chi-carré et du test d'ajustement, il semble que la série des débits maximaux annuels s'ajuste convenablement à la loi Log Normale.

III.2.5 Estimation des débits maximums fréquentiels par la méthode GRADEX :

La méthode Gradex, élaborée par Guillot et Durand en 1969, constitue une approche probabiliste hydro-pluviométrique destinée à estimer les débits de crue pour des périodes de retour élevées, généralement comprises entre 100 et 10 000 ans. Fondée sur l'exploitation des données pluviométriques, cette méthode marque une avancée significative par rapport aux approches traditionnelles de prédétermination des crues, qui reposent uniquement sur l'analyse statistique des débits observés (Garavaglia, 2011).

1) Hypothèses de la méthode :

La méthode Gradex repose sur le principe qu'il existe une relation directe entre la distribution statistique des débits de crue et celle des précipitations extrêmes qui les génèrent. Son application se fonde sur trois hypothèses principales, telles que formulées par Meddi et Zeroual (2018) :

- **Hypothèse n°1** : La distribution des précipitations sur un bassin versant peut être représentée, de façon asymptotique, par une loi de Gumbel ou une loi exponentielle, selon la méthode d'échantillonnage utilisée. Le Gradex correspond à la pente de la courbe reliant les précipitations extrêmes au logarithme de la période de retour sur un graphique semi-logarithmique.
- **Hypothèse n°2** : Le déficit d'écoulement soit la différence entre le volume de précipitations et le volume d'eau écoulé à l'exutoire atteint une limite au-delà d'un certain seuil de pluie. Une fois le bassin saturé, ce déficit devient indépendant de la quantité de précipitations. Cette hypothèse se traduit graphiquement par un parallélisme entre les fonctions de répartition des précipitations et des débits, à partir d'un point pivot situé généralement entre 10 et 50 ans, en fonction du bassin étudié.
- **Hypothèse n°3** : Pour toute période de retour, le débit de crue maximal (ou pic de crue) peut être estimé à partir du volume écoulé, en appliquant un coefficient multiplicatif spécifique au bassin. Ce coefficient de forme ou coefficient d'affinité est déterminé à partir de l'analyse des hydrogrammes des crues observées.

III.2.5.1 Les étapes de la méthode de Gradex :

- Ajuster les pluies maximales journalières selon la loi de Gumbel.
- Calculer le Gradex des précipitations, c'est-à-dire la pente de la droite de Gumbel

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

- Ajuster les débits observés à la loi de Gumbel afin de déterminer le débit décennal, qui sert de point pivot pour l'extrapolation des débits. Le débit décennal est ensuite exprimé en termes de lame d'eau équivalente à l'aide de la formule suivante :

$$R(mm)=\frac{Q(\frac{m^3}{S})\times 3.6\times n(h)}{S(Km^2)} \quad \text{(III.26)}$$

- L'extrapolation de la distribution des débits au-delà du quantile 0,9 (correspondant à une période de retour de 10 ans) sera réalisée à l'aide d'une droite de pente égale au Gradex des précipitations.

$$Q(\mu\%)= a\times\mu+b' \quad \text{(III.27)}$$

Avec:
a : Gradex de la pluie.
μ : Variable réduite de Gumbel.

D'autre part :

$$\mu= -\ln(-\ln(F)) \quad \text{(III.28)}$$

Avec:

$$F= 1 - \frac{1}{T} \quad \text{(III.29)}$$

Pour une période de retour de 10ans (T=10ans) :

$$b'=Q_{10ans} - a\ \mu \quad \text{(III.30)}$$

Tracer la droite correspondant à l'équation 3.11 sur le même graphique que celui de l'ajustement de Pj_max. Ensuite, estimer les valeurs de Q (en mm) pour chaque période de retour. Finalement, convertir ces débits en m3/s à l'aide de la formule suivante :

$$Q = \frac{S(km^2)\times Q(mm)}{3.6} \quad \text{(III.31)}$$

- On calcule le coefficient de pointe :

$$Cp=\frac{Qmax}{Qmoy} \quad \text{(III.32)}$$

- Calcul du débit de pointe :

$$Qp = Cp \times Q \qquad \text{(III.33)}$$

Choisir une durée de pas de temps n (en heures), généralement fondée sur la moyenne des intervalles de temps observés dans les hydrogrammes de crue disponibles. Par souci de simplicité, on privilégie des valeurs arrondies telles que 1,2, 4, 6, jusqu'à 48 heures. Les débits de pointe calculés sont peu sensibles à la valeur exacte de n, à condition que son ordre de grandeur soit approprié.

▪Remarque :

Si on n'a pas d'enregistrements des crues dans le bassin étudié, on estime par analogie avec d'autre bassins voisins et de même grandeur le temps de base et le débit décennal

III.2.5.2 Application de la méthode de GRADEX :

Deux stations pluviométriques ont été utilisées pour observer les séries de pluies maximales journalières.

Tableau III. 21 : caractéristiques des stations pluviométriques .

Code de la station	Nom de la station	Type de la station	Les coordonnées			Nombre d'années
			X (m)	Y (m)	Z (m)	
012001	EL - ABADIA	Pluviométrique	407.85	327.3	162	48
012004	TIKEZAL	Pluviométrique	414.35	321.7	320	49
011904	ROUINA MAIRIE	Pluviométrique	419.8	327.3	190	52

Tableau III.22 : Précipitations maximales journalières de la station pluviométrique de EL-ABADIA [012001]

Année	Pjmax (mm)	Année	Pjmax (mm)
1974	29.2	2002	30.2
1975	49.8	2003	29.9
1976	53.8	2004	24.9
1977	22.8	2005	21
1978	37.1	2006	21
1979	31.3	2007	48.5
1980	37.3	2008	28
1981	33.5	2009	35.5
1982	25.8	2010	42.2
1983	24.3	2011	34.5
1984	25.5	2012	32.3
1985	47.8	2013	21.5
1986	35.4	2014	32.5
1987	20.7	2015	39.7
1988	34	2016	34.3
1989	39.8	2017	59.9
1990	17.5	2018	26.4
1991	28.1	2019	22.2
1992	21.2	2020	19.1
1993	27.4	2021	55.9
1994	28.7		
1995	92		
1996	42		
1997	33.2		
1998	38.5		
1999	24		
2000	40.6		
2001	31		

- Nombre heurs : n = 1h

- Ajustement des pluies maximales journalières de la station pluviométrique EL-ABADIA 012001 selon la loi de Gumbel.

Tableau III.23 : Résultats de l'ajustement des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de EL-ABADIA 012001 selon la loi de Gumbel.

Période de retour	Probabilité de fréquence	Débit max jour	Écart type	Intervalle de confiance
1000	0,9990	98.9	11	77.4-120
100	0,9900	75.3	7.45	60.6-89,9
50	0,9800	68.1	6.39	55.6-80.6
20	0,9500	58.5	5.01	48.7-68.4
10	0,9000	51.2	3.96	43.4-58.9
5	0.8000	43.5	2.93	37,7-49.2
2	0,5000	37.3	1,74	28.4-35,3

- L'équation de la droite de Gumbel pour la station pluviométrique Abadia, obtenue à l'aide du logiciel Hyfran-Plus, est présentée ci-dessous :

$$P(mm) = 10.25\mu + 28.1 \qquad \text{(III.34)}$$

Avec :
Le Gradex (a) : a = 10.3
b = 28.1

- On n'avait pas d'enregistrements des crues dans la zone étudiée, alors on estime par analogie avec le bassin versant d'Oued Harreza, de même grandeur le temps de base et le débit décennal, tel que

$$\frac{Q}{S} = \frac{Q'}{S'}$$

$Q'_{10ans} = 58.5\ m^3/s$;
$S' = 102\ km^2$

$$\frac{Q}{2.548} = \frac{58.5}{102}$$

Donc : $\mathbf{Q_{10ans} = 1.5\ m^3/s}$

- Le débit décennal est exprimé en lame d'eau équivalente.

$$R(mm) = \frac{Q(\frac{m^3}{S})\times 3.6\times n(h)}{S(Km^2)} \quad \text{(III.35)}$$

R(mm) = 2.1 mm/24h

- Prolonger la distribution des débits au-delà de 0,9 (T = 10 ans) en utilisant une droite avec une pente correspondant au Gradex de la pluie.

$Q_{10ans} = \alpha * \mu + b' \longrightarrow b' = Q_{10ans} - \alpha * \mu$ (III.36)

$\mu_{10} = -\ln(-\ln(F)) = -\ln(-\ln(0.9)) = 2.25 \longrightarrow \mu_{10\ ans} = 2.25$

$$F = 1 - \frac{1}{T} \quad \text{(III.37)}$$

Alors :

$$b' = -18.92$$

Donc :

$$\mathbf{Q_{\mu\%}} = 10.25\ \mu - 18.92 \quad \text{(III.38)}$$

- La droite des débits est tracée sur le même graphique que l'ajustement des pluies maximales journalières.

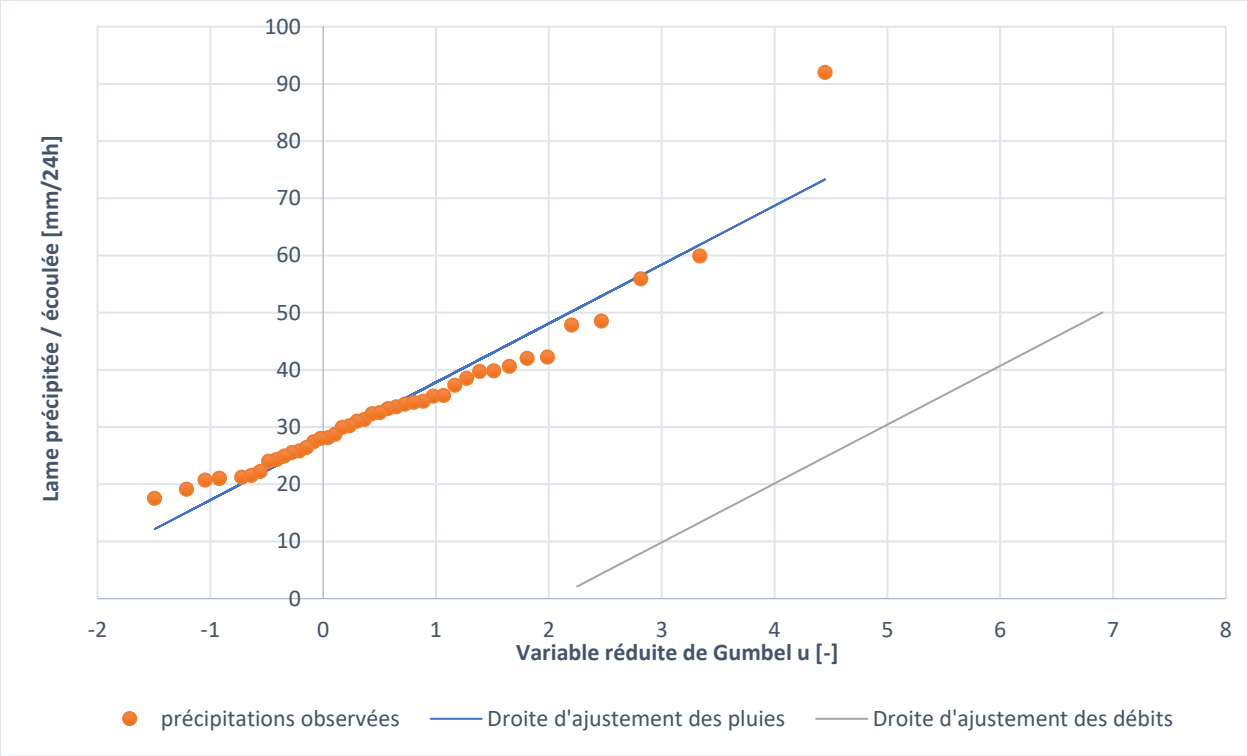


Figure III.12: Graphique d'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits.

- Les débits de pointe sont calculés pour les différentes périodes de retour, en utilisant un coefficient de pointe de Cp = 2

Avec :

$$Cp = \frac{Qmax}{Qmoy} \qquad \text{(III.39)}$$

Tableau III.24 : Résultats des calculs pour la station de Abadia, selon 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	0,9000	2,25	50.7	2.1	2	4
20	0,9500	2,97	58.1	9.5	7	13
50	0,9800	3,9	67.7	19.1	14	27
100	**0,9900**	**4,6**	**74.9**	**26.3**	**19**	**38**
1000	0,9990	6,61	98.6	50	35	71

- Les mêmes étapes de la méthode de GRADEX sont appliquées aux autres stations.

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

Périodes de retour (Ans)	**Les station pluviométriques**		
	ROUINA MAIRIE	**TIKZAL**	**Abadia**
10	29	3	4
20	32	11	13
50	36	22	27
100	**37**	**31**	**38**
1000	48	58	71

- ✓ La station pluviométrique de EL Abadia enregistre le débit le plus élevé, soit **38 m³/s**, et est donc retenue comme débit de référence pour le projet.

III.2.6 Hydrogramme de crue :

L'hydrogramme est une courbe représentant l'évolution des débits au cours du temps lors d'un événement de crue. Il permet d'estimer plusieurs paramètres caractéristiques de la crue, tels que sa forme, son volume, le temps de montée et le temps de base. Pour sa construction, nous appliquons la méthode de Sokolovsky (Touaibia, 2015), qui repose sur l'utilisation de deux courbes paraboliques : l'une modélisant la montée des eaux, l'autre la décrue.

- **Branche de montée (crue) :**

$$\mathbf{Q(t)} = Q_{max} \times \left(\frac{t}{Tc}\right)^n \quad \text{(III.40)}$$

Pour les petits bassins versant en prend : Tc = Tm

Avec :
Tc : temps de concentration (h).
Qmax : débit maximal de crue (m^3/s).
Q(T) : débit instantané (m^3/s).

- **Branche de descente (decrue) :**

$$\mathbf{Q(t)} = Q_{max} \times \left(\frac{Tb - t}{Td}\right)^m \quad \text{(III.41)}$$

Avec :
Qmax : débit maximal de crue (m^3/s).
Q(T) : débit instantané (m^3/s).
Tm : temps de montee (h).

$$\mathbf{Tm = Tc}$$

Td : temps de decrue (h).

$$\mathbf{Td = \delta \times Tm} \quad \text{(III.42)}$$

Tb : temps de base (h).

$$\mathbf{Tb = Tm + Td} \quad \text{(III.43)}$$

n et m : puissances des paraboles n=2 et m=3

Tableau III.26 : Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue (δ).

Typologie du cours d'eau	Valeur de "δ"
Ruisselets et incisions hydriques localisés dans des bassins versants dépourvus de couvert végétal, à sols faiblement perméables	2,0 – 2,5
Cours d'eau mineurs et talwegs discontinus, présents dans des bassins versants fragmentés ou à forte infiltration, ainsi que chenaux intermédiaires accompagnés de terrasses alluviales bien développées	3,0 – 4,0
Rivières de gabarit moyen à important, associées à des plaines inondables larges et actives	4,0 – 7,0

Le tableau ci-dessous montre l'hydrogramme de crue pour une période de retour de 100 ans pour les différentes stations :

Tableau III.27: Débits centennaux en fonction du temps pour la zone d'étude.

Temps (min)	Période de retour 100 ans		
	Station de ABADIA	**Station de TIKZAL**	**Station de ROUINA MAIRIE**
0	0	0	0
5	0.673398955	0.549351779	0.65567793
10	2.69359582	2.197407116	2.622711719
15	6.060590595	4.944166012	5.901101369
20	10.77438328	8.789628465	10.49084688
25	16.83497387	13.73379448	16.39194825
30	24.24236238	19.77666405	23.60440548
35	32.99654879	26.91823717	32.12821856
37.56	**38**	**31**	**37**
40	35.11400858	28.64563858	34.18995573
45	29.66419132	24.19973502	28.8835547
50	24.8096157	20.23942333	24.15673107
55	20.51585878	16.73662163	19.97596776
60	16.7484976	13.66324804	16.30774767
65	13.47310923	10.99122069	13.11855372
70	10.6552707	8.692457677	10.37486884
75	8.260559072	6.738877138	8.043175939
80	6.254551393	5.102397189	6.089957936
85	4.602824713	3.75493595	4.481697747
90	3.270956082	2.668411541	3.184878291
100	1.42910117	1.165845691	1.391493244
105	0.850268988	0.69364049	0.827893489
110	0.453603057	0.370044599	0.441666134
115	0.204680426	0.166976137	0.199294099
120	0.069078146	0.056353224	0.0672603
125	0.012373267	0.010093981	0.012047654
130	0.000142839	0.000116526	0.00013908
131.46	0	0	0

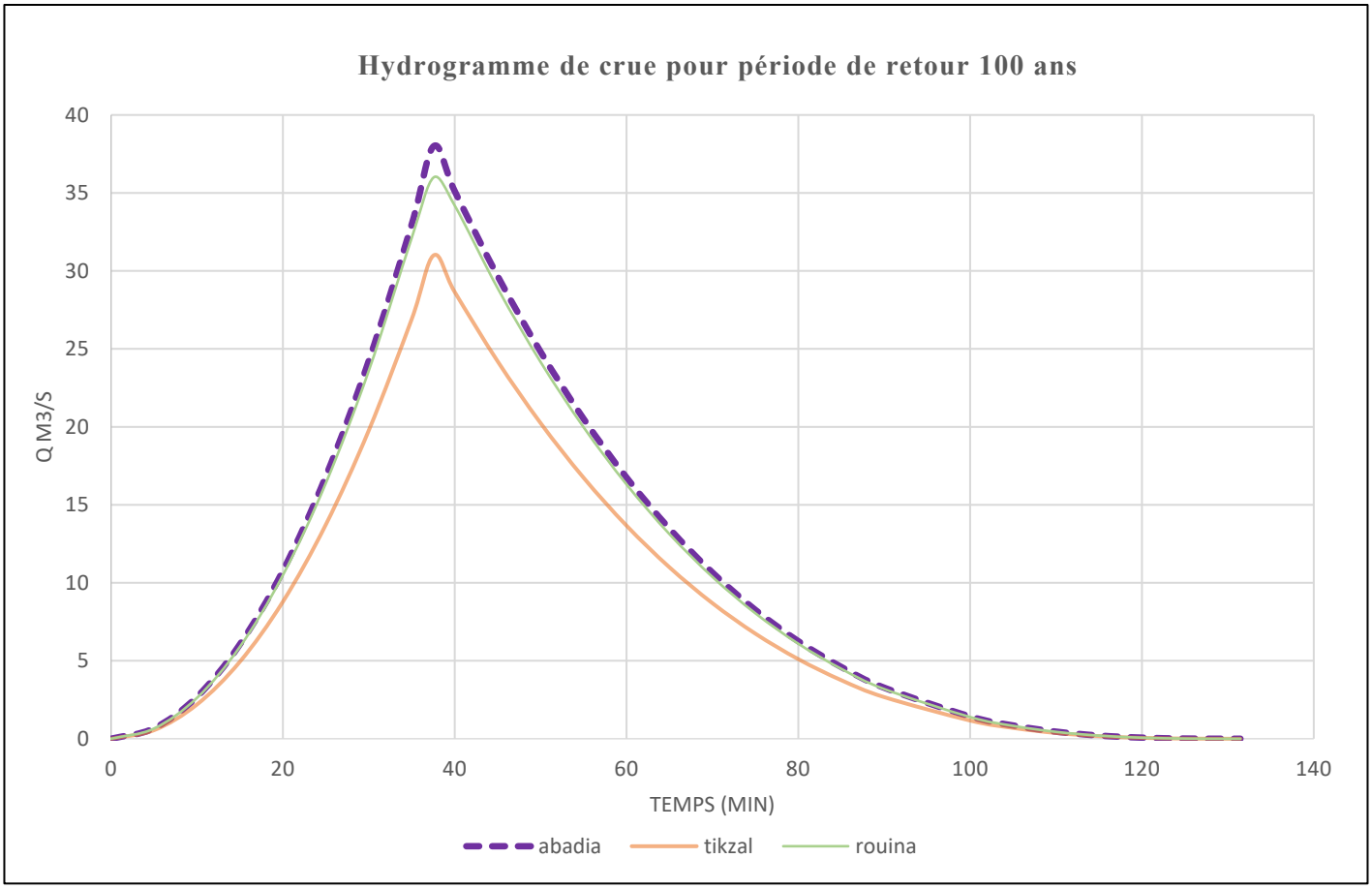


Figure III.13 : Hydrogramme de crue avec une période de retour de 100 ans pour les différentes stations.

III.2.7 Sélection du débit de crue pour le projet :

La crue de conception" est définie comme l'événement hydrologique le plus significatif que l'ouvrage doit être en mesure de supporter, selon une probabilité de dépassement donnée. Le choix de cette crue repose sur l'importance de l'infrastructure à réaliser, les conséquences potentielles en aval, ainsi que sur les contraintes techniques, économiques et environnementales. Dans le cadre de cette initiative de gestion des inondations, une période de retour de 100 ans a été retenue. Ce débit de crue a été déterminé à partir des valeurs calculées aux différentes stations
(Tikzel = 31 m^3 /s , Rouina mairie = 37 m^3/s , Aabdia = 38 m^3/s) la station pluviométrique de Abadia 012001 fournit le débit le plus élevé. Par conséquent, nous avons opté pour un débit de conception de 38 m^3/s.

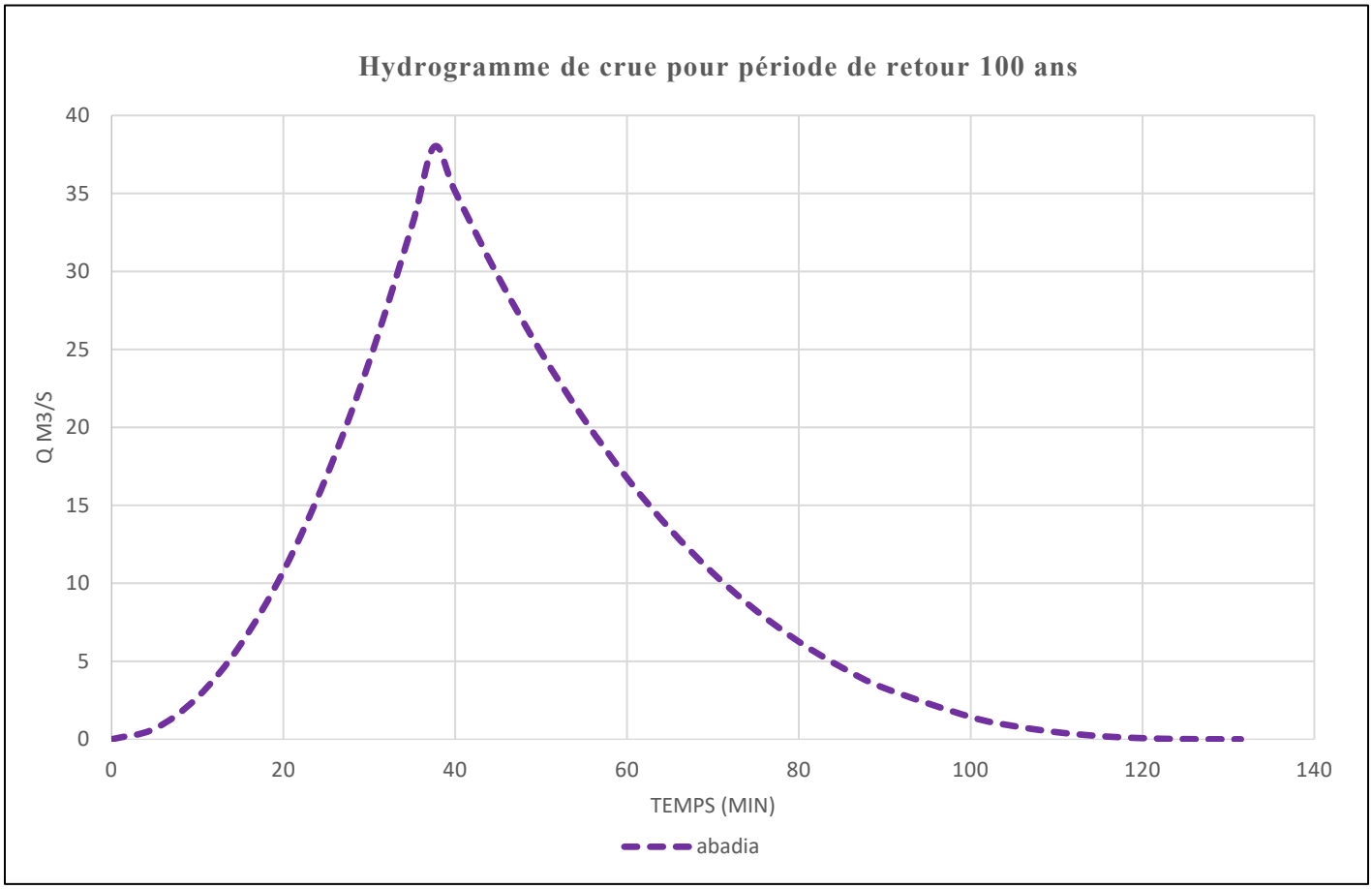


Figure III.14 : Hydrogramme de crue du projet de la station pluviometrique de ABADIA 012001.

Conclusion :

L'objectif de ce chapitre est d'identifier les paramètres hydrologiques essentiels à l'aménagement de l'Oued Khoudja côté ouest, en vue de protéger les localités riveraines contre les crues de période de retour centennale. Pour ce faire, les données issues des stations hydrométriques et pluviométriques implantées sur le bassin versant de l'Oued Khoudja côté ouest ont été exploitées. L'application de la méthode GRADEX a permis d'estimer le débit centennal de crue. À l'issue de cette analyse, un débit de conception de 38 m^3/s a été retenu.

CHAPITRE IV :

Simulation des écoulements Hydrauliques et cartographie des zones inondables au risque.

Introduction :

Dans le but de prémunir la Wilaya de Aïn Defla contre les aléas liés aux inondations et les dégâts engendrés par les crues de l'Oued Khoudja côté ouest, il est impératif de réaliser une analyse hydraulique après l'établissement du diagnostic hydrologique et la détermination du débit de référence. Cette démarche permettra d'évaluer avec précision les besoins en matière d'aménagement et de définir les dimensions adéquates des ouvrages de régulation et de protection.

Ce chapitre, dédié à l'analyse hydraulique, expose les fondements essentiels de la discipline. Il présente les concepts clés, les lois physiques et les équations indispensables à la détermination des caractéristiques hydrauliques et géométriques des aménagements projetés. Les calculs reposent sur l'approche des scénarios extrêmes, prenant en compte les valeurs maximales de débit et de vitesse d'écoulement, afin d'assurer un écoulement efficace et continu des eaux pluviales.

Une attention particulière est portée à l'état actuel du tronçon de l'Oued Khoudja traversant la zone orientale de la ville de Ain Bouyahia, dans le but de modéliser un écoulement réel à surface libre. Il convient de souligner que la conception des ouvrages de protection contre les crues s'articule principalement autour du contrôle des hauteurs d'eau, souvent au détriment des phénomènes d'érosion qui doivent pourtant être intégrés à l'analyse.

L'objectif principal est d'évaluer les hauteurs d'eau en fonction des débits afin de produire des cartes de profondeur et de localiser les zones exposées aux inondations. Cette étude contribuera à une meilleure évaluation du risque, à la conception de dispositifs de protection adaptés, et à la compréhension de la dynamique des crues : extension des zones inondées, durée de submersion et vitesse de propagation des eaux, à partir de modèles simplifiés représentant le fonctionnement du système hydraulique réel.

IV.1 Caractéristiques des canaux :

- **Débit (Q) :** Le débit représente la quantité d'eau traversant une section donnée d'un canal ou d'un cours d'eau pendant une unité de temps. Il constitue un paramètre fondamental dans l'analyse des systèmes hydrauliques, permettant d'évaluer la capacité d'évacuation ou d'alimentation en eau. Le débit est généralement exprimé en mètres cubes par seconde (m^3/s) ou en litres par seconde (l/s).

- **Vitesse d'écoulement (V) :** La vitesse d'écoulement correspond à la rapidité avec laquelle l'eau se déplace à travers une conduite ou à la surface d'un lit naturel. Cette grandeur dépend de plusieurs facteurs, notamment la pente du terrain, la rugosité des parois, et les caractéristiques physiques du fluide. Exprimée en mètres par seconde (m/s), la vitesse d'écoulement est déterminante pour l'étude du transport solide, la dispersion des polluants, ainsi que la dynamique des crues.

- **Pente hydraulique (I) :** La pente hydraulique désigne l'inclinaison du lit d'écoulement ou de l'ouvrage hydraulique par rapport à l'horizontale. Elle influence directement la vitesse d'écoulement de l'eau. Exprimée généralement en pourcentage (%), cette pente est un paramètre clé dans l'évaluation de la capacité d'écoulement, la stabilité du lit, et l'efficacité hydraulique des ouvrages.

La pente est calculée à l'aide de la relation suivante :

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

Avec :

ΔZ : la différence de niveau entre les altitudes Z_1-Z_2.
L : la longueur.

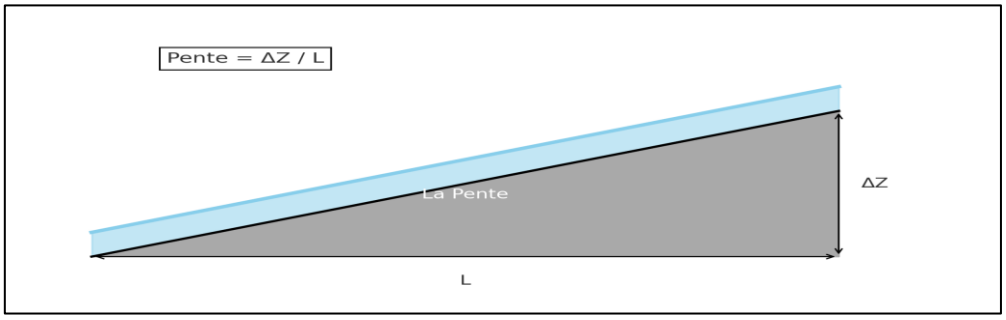


Figure IV.1: schéma simplifie représente la pente.

- **Coefficient de Manning (n) :** Le coefficient de Manning (n) constitue un paramètre empirique essentiel dans la modélisation de l'hydraulique à surface libre. Il exprime la dissipation d'énergie mécanique liée aux interactions entre l'écoulement et les caractéristiques géométriques et texturales du lit d'écoulement. Sa valeur, intrinsèquement liée à la rugosité hydraulique du conduit ou du chenal, régule l'intensité du frottement opposé au déplacement fluide. Une valeur élevée du coefficient traduit une structure canaliforme plus hétérogène ou irrégulière, induisant un ralentissement cinématique du flux. À l'inverse, une valeur faible signale une interface d'écoulement plus homogène, favorisant un transfert hydraulique plus efficient. Ce coefficient intègre ainsi les effets combinés de la morphologie du canal, de la granulométrie des matériaux en place et des discontinuités géométriques affectant le régime de l'écoulement

Tableau IV.1 : La valeur de la rugosité (n).

Caractéristiques du lit ou du revêtement	La valeur de la rugosité (n)
Canal revêtu de béton	0.015
Canal en terre	0.022
Canal en enrochement	0.025
Canal en Gabion	0.030

- **La pression :** Il s'agit de l'effort mécanique que l'eau applique sur une aire spécifique, mesuré couramment en Pascal (Pa) ou en bar. À la surface libre d'un cours d'eau, cette contrainte est équivalente à la pression de l'air ambiant, soit approximativement 1 bar.

- **Poids volumique (ɣw) :** Cela désigne la charge gravitationnelle exercée par l'eau pour chaque unité de volume, exprimée en newtons par mètre cube (N/m^3). Dans des conditions standards de température et de pression, cette valeur avoisine en général 9,81 kN/m^3.

Ce paramètre est utilisé pour désigner le poids volumique de l'eau :

$$\gamma_w = g \cdot \rho w \qquad \text{(IV.2)}$$

Avec :

ρw : La densité d'eau 1000kg/m^3.

g : représente l'accélération due à la gravité, dont la valeur est de 9,81 m/s^2.

IV.1.2 Les paramètres géométriques :

- **Hauteur normale (H_n) :** Il s'agit de la hauteur d'eau mesurée dans un canal lorsque l'écoulement reste constant dans le temps et uniforme le long du profil. Cette profondeur est fonction du débit (Q), des caractéristiques de rugosité (K) et de l'inclinaison moyenne du fond du canal.

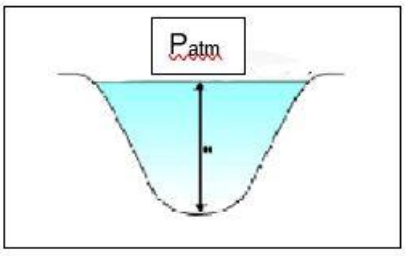


Figure IV.2: schéma représente la hauteur normale de canal

- **Largeur au miroir (B) :** La largeur au miroir d'un canal désigne la distance horizontale entre les rives mesurée à la surface libre de l'eau, là où la pression est égale à la pression atmosphérique.

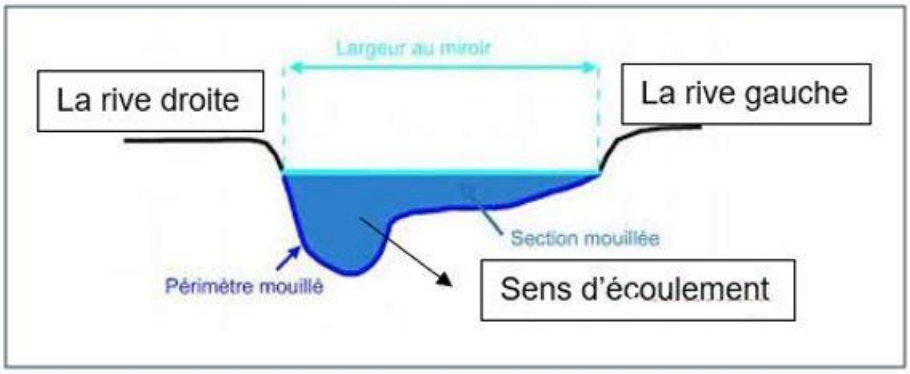


Figure IV.3: Schéma représente Largeur au miroir.

- **Périmètre mouille (P) :** Le périmètre mouillé correspond à la longueur du contour de la section transversale d'un canal ou d'un conduit qui est en contact avec l'eau

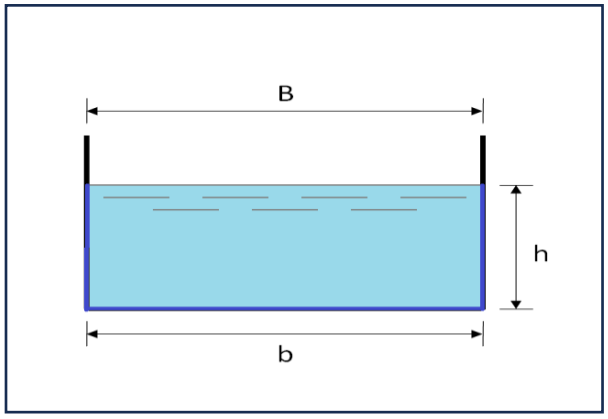


Figure IV.4: Schéma représente le périmètre mouille dans un canal rectangulaire.

- **La Surface mouillée transversal (S) :** La section de l'eau en contact avec les parois d'un canal ou d'un conduit est appelée section mouillée. Elle joue un rôle essentiel dans les calculs hydrauliques, car elle influence à la fois la capacité d'écoulement et la vitesse de l'eau. Cette grandeur est généralement exprimée en mètres carrés (m^2).

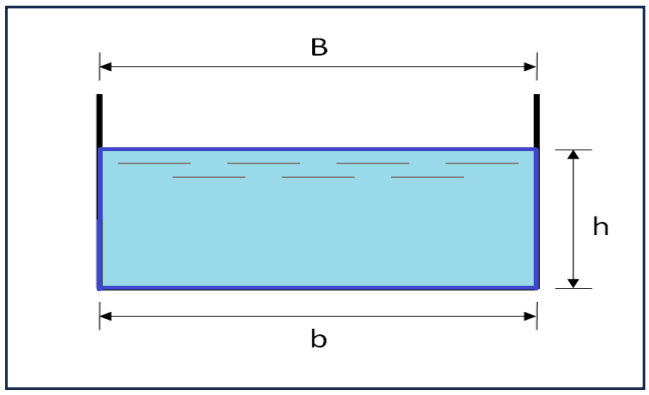


Figure IV.5: Schéma représente la surface mouillée d'un canal Rectangulaire.

- **Rayon Hydraulique (Rh) :** est un paramètre fondamental en hydraulique. Il permet d'évaluer l'efficacité de l'écoulement dans un conduit ou un cours d'eau en estimant la résistance au frottement et la vitesse du fluide. Plus le rayon hydraulique est grand, plus la section transversale est efficace pour le transport de l'eau. Il se calcule selon la formule suivante :

$$R_H = \frac{Sm}{Pm} \qquad \text{(IV.3)}$$

Avec :

Pm : Périmètre mouille (m).
Sm : Surface mouille (m^2).

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

- **Pente Longitudinale (i) :** Correspond à l'inclinaison du fond d'un canal ou d'un conduit dans le sens de l'écoulement. Elle est définie comme le rapport entre la variation d'altitude et la distance horizontale parcourue sur la longueur du canal.

- **Lit mineur :** Désigne la zone habituellement occupée par l'eau dans un cours d'eau en période de faible débit. Il s'agit de la partie inférieure du lit, délimitée par les rives principales, et généralement en contact direct avec le fond du cours d'eau.

- **Lit Majeur :** Est la zone qu'un cours d'eau peut envahir lors de crues importantes. Il est délimité à partir des crues historiques les plus significatives et comprend les plaines inondables. Contrairement au lit mineur, occupé en conditions normales, le lit majeur agit comme un réservoir temporaire pour les eaux en débordement.

- **Le lit intermédiaire :** Désigne la zone intermédiaire située entre le lit mineur, occupé par l'eau en conditions normales, et le lit majeur, envahi lors des crues importantes. Cette zone peut être submergée lors de crues modérées, mais reste généralement sèche ou peu profonde en dehors de ces épisodes.

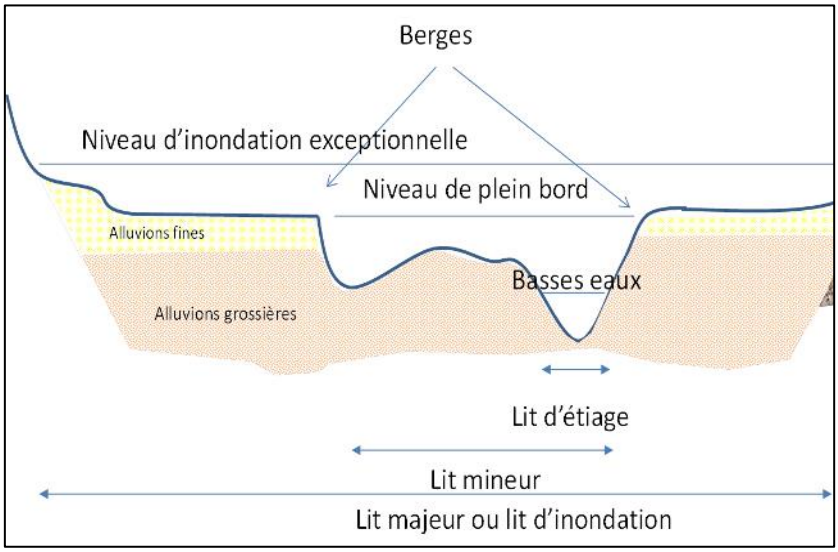


Figure IV.6: Lit mineur, Lit intermédiaire et Lit majeur.

- **Tirant d'eau :** Le tirant d'eau d'un canal à surface libre est la profondeur verticale de l'eau, mesurée du fond du canal jusqu'à la surface de l'eau.

IV.2 Cours d'eau :

Un cours d'eau est un écoulement d'eau courante dans un lit naturel, alimenté par une source, et dont le débit est suffisant pendant une grande partie de l'année. Toutefois, en fonction des conditions hydrologiques et géologiques locales, cet écoulement peut être temporaire (source : article L.215-7-1 du Code de l'environnement – gestion des cours d'eau en France).

Dans les oueds et les rivières, l'eau s'écoule généralement à ciel ouvert, en surface. Le régime de cet écoulement est influencé par plusieurs facteurs, tels que la pente, la forme du lit et la rugosité du fond. Selon leur niveau d'aménagement, on distingue généralement deux types :

IV.2.1 Les canaux Naturels :

Les canaux naturels sont des cours d'eau qui se forment spontanément à la surface ou en sous-sol, sans intervention humaine. Ils regroupent des formes variées telles que les ruisseaux, torrents, rivières, fleuves et estuaires.

Ces canaux présentent une grande diversité de caractéristiques géométriques et hydrauliques, souvent marquées par des irrégularités. Cette variabilité résulte des processus naturels d'érosion, de sédimentation et d'écoulement, qui modèlent en permanence leur morphologie et leur dynamique.

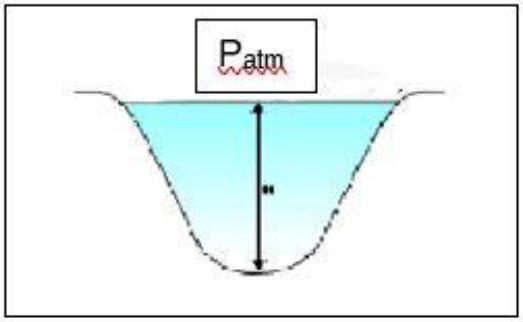


Figure IV.7 : Schéma représentant un canal Naturel.

IV.2.2 Les canaux Artificiels :

Les canaux artificiels, regroupés sous le terme d'infrastructures hydrauliques, sont des ouvrages conçus par l'être humain pour maîtriser l'écoulement de l'eau. Ils incluent aussi bien les canaux découverts, aménagés en surface pour des usages variés comme la navigation, l'irrigation, le drainage ou l'approvisionnement en eau, que les conduits couverts tels que les tunnels hydrauliques, aqueducs, drains et égouts, dans lesquels l'écoulement est généralement à surface libre partiellement remplie. Ces infrastructures se caractérisent par une géométrie souvent régulière, ce qui facilite l'application des lois de l'hydraulique pour l'analyse et la gestion des écoulements.

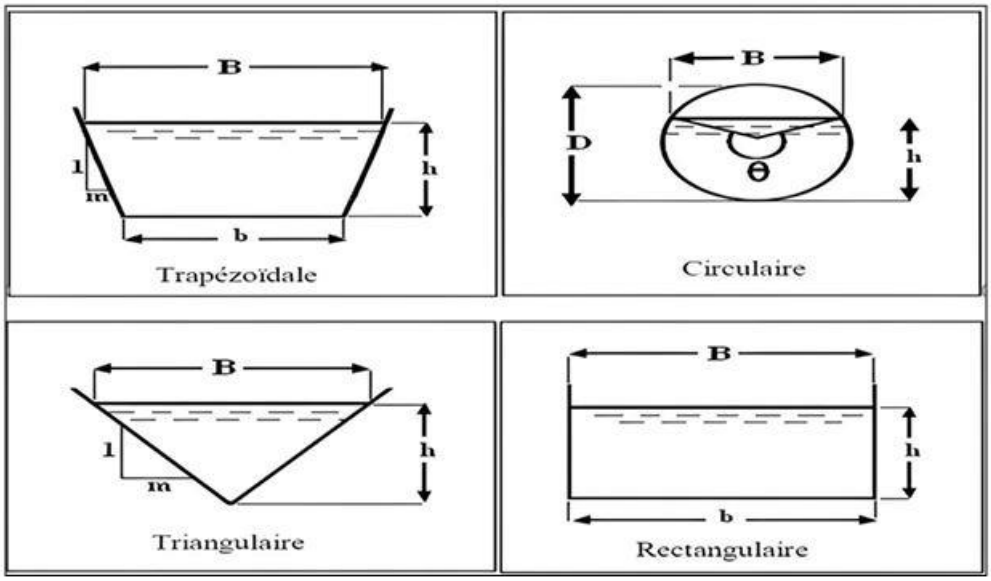


Figure IV.8: types des Canaux Artificiels .

IV.3 Types d'écoulements :

IV.3.1 Variables dans le temps :

- **Ecoulement permanent (stationnaire) :**

Un écoulement est dit permanent lorsque la vitesse de l'eau et sa profondeur restent les mêmes au cours du temps, en tout point du canal. Cela signifie que l'écoulement ne change pas avec le temps.

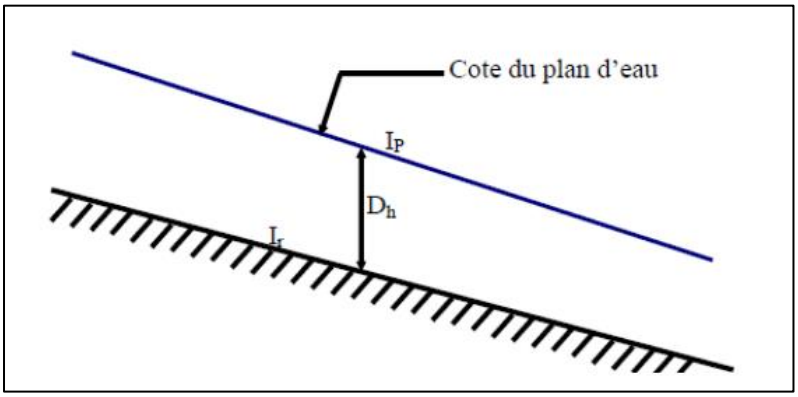


Figure IV.9 : diagramme représente l'Ecoulement permanent

Depuis l'espace, le flux s'étend uniformément dans toutes les directions. Par conséquent, le débit demeure constant entre les différentes sections du canal, en l'absence d'apport latéral.

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

Un écoulement est dit non permanent lorsque la profondeur de l'eau (dh), ainsi que d'autres paramètres comme les vitesses moyenne (V) et locale (U), varient au cours du temps. Cela entraîne des fluctuations du débit, qui n'est alors plus constant mais évolue avec le temps.

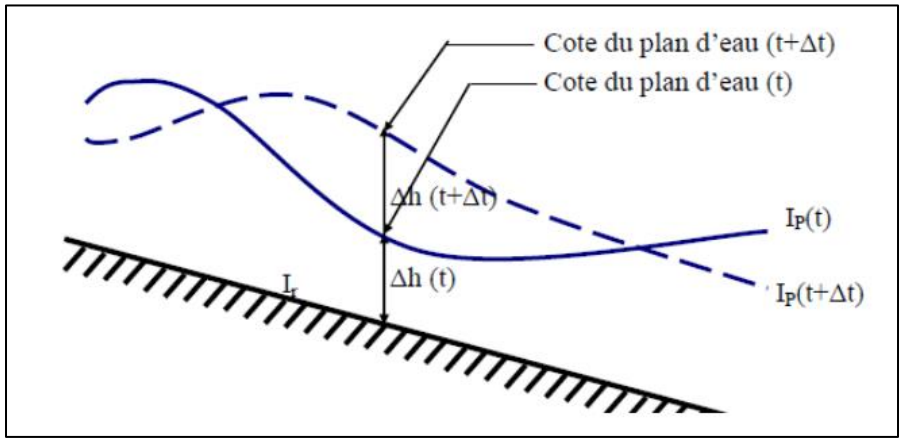


Figure IV.10 : diagramme représente l'Ecoulement non permanent

IV.3.2 Variable dans l'espace :

- **L'écoulement uniforme :** Est qualifié d'uniforme lorsqu'il remplit deux conditions essentielles : la permanence et la régularité spatiale. Autrement dit, la profondeur, la pente, la vitesse ainsi que la section transversale du canal restent constantes sur une portion donnée du cours d'eau.

- **L'écoulement non uniforme :** Un écoulement est dit non uniforme lorsque la vitesse et la profondeur du fluide varient le long du cours d'eau.

- Dans le cas d'un écoulement non uniforme à variations graduelles, les changements de profondeur et de vitesse s'effectuent lentement et de façon progressive tout au long du canal.
- En revanche, dans un écoulement non uniforme à variations rapides, ces modifications se produisent de manière soudaine et sur une courte distance.

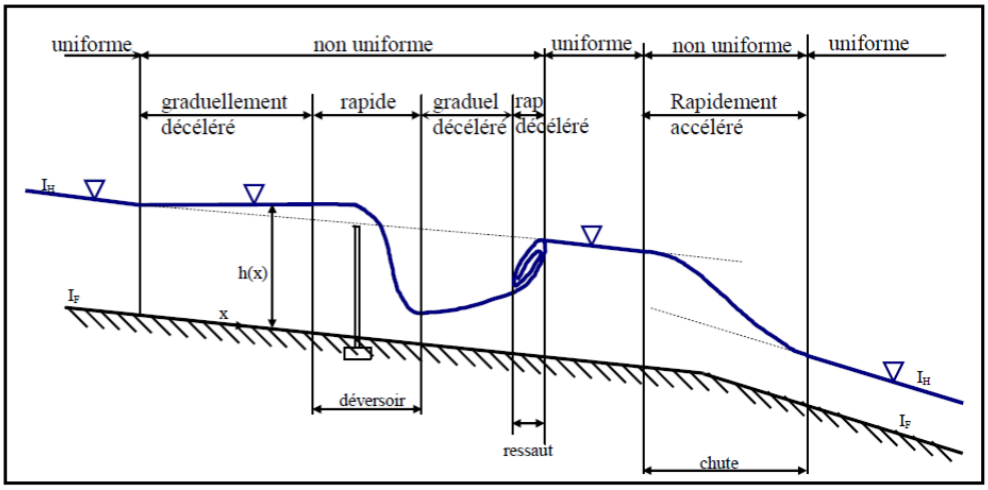


Figure IV.11 : Diagramme représentant les divers types d'écoulements

IV.4 Régimes d'écoulements :

Le régime d'écoulement d'un fluide peut être classé à l'aide du nombre de Froude, un paramètre fondamental en dynamique des fluides. Ce nombre exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces gravitationnelles agissant sur le fluide, offrant ainsi un indicateur clé du comportement de l'écoulement (Lancastre, 1996).

Lorsque le nombre de Froude est inférieur à 1, l'écoulement est dit subcritique : les forces gravitationnelles prédominent et régulent le mouvement du fluide. À l'inverse, un nombre de Froude supérieur à 1 indique un écoulement supercritique, dominé par les forces d'inertie. Ces distinctions sont particulièrement importantes dans l'étude des écoulements en canaux ouverts et en rivières, notamment pour le dimensionnement et la conception des ouvrages hydrauliques (Chanson, 2004 ; Leopold & Maddock, 1953).

Par ailleurs, les travaux de Chow (1959) démontrent que le nombre de Froude influence directement la stabilité des structures hydrauliques, ainsi que la nature laminaire ou turbulente des écoulements. Son calcul s'avère donc indispensable en ingénierie hydraulique.

Le nombre de Froude se définit de la manière suivante :

$$\mathbf{F_r} = \frac{\upsilon}{\sqrt{g.h}} \qquad \text{(IV.4)}$$

Avec :
υ : La vitesse moyenne d'écoulement (m/s).
h : profondeur Hydraulique (m).
g : l'accélération due à la gravité, dont la valeur est de 9,81 m/s².

Le nombre de Froude permet de distinguer les types d'écoulement de la façon suivante :

- Fr < 1 Ecoulement Fluvial.
- Fr = 1 Ecoulement Critique.
- Fr > 1 Ecoulement Torrentiel.

La classification des régimes fluvial, torrentiel ou critique s'applique spécifiquement aux écoulements **uniformes**. On distingue ainsi trois types de régimes :

- Lorsque Yn < Yc : écoulement uniforme de type torrentiel.
- Lorsque Yn > Yc : écoulement uniforme de type fluvial.

De plus, en tenant compte à la fois du nombre de Reynolds (Re) et du nombre de Froude (Fr), il est possible de définir quatre régimes d'écoulement distincts.

Le nombre de Reynolds permet de classer les types d'écoulements comme suit :

- Re < 500 : écoulement laminaire.
- Re > 2000 : écoulement turbulent.
- 500 < Re < 2000 : écoulement en transition.

Ainsi, la combinaison des nombres de Reynolds et de Froude permet de définir les classifications suivantes :

- 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.

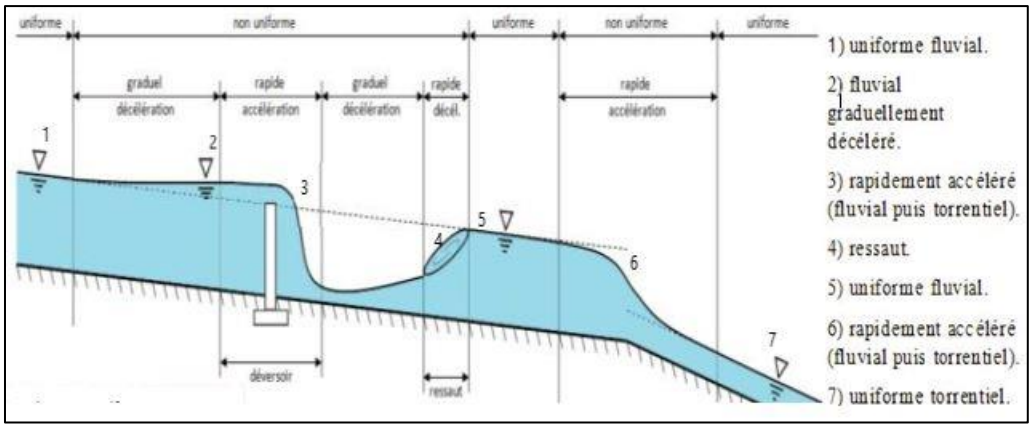


Figure IV.12: Diagramme montrant les différents types de régimes d'écoulement

IV.5 Diagnostique et simulation du cours d'eau non aménagé :

IV.5.1.1 Choix du type de modèle hydraulique :

Pour simuler l'écoulement dans les cours d'eau, le logiciel HEC-RAS (version 6.3.1) a été sélectionné en raison de ses nombreux avantages, notamment :

- **Accessibilité** : Le logiciel est disponible en téléchargement gratuit en ligne.
- **Analyse de l'impact des infrastructures** : Il permet d'évaluer les effets de la construction d'ouvrages tels que les ponts, seuils ou épis sur l'écoulement.
- **Études d'inondation** : Il offre des outils pour analyser les zones potentiellement inondables.
- **Modélisation flexible** : Il prend en charge des modélisations en une ou deux dimensions (1D/2D), adaptées aux rivières et aux plaines d'inondation.
- **Simulation des régimes d'écoulement** : Le logiciel gère les régimes subcritique, critique (de transition) et supercritique, tout en intégrant les effets des ouvrages hydrauliques.
- **Exploitation des résultats cartographiques** : Les résultats peuvent être utilisés pour localiser les zones à risque et élaborer des stratégies de gestion adaptées.

IV.5.1.2 Présentation du logiciel de simulation HEC-RAS :

Développé et mis gratuitement à disposition par le Centre d'Ingénierie Hydrologique du Corps des Ingénieurs de l'Armée américaine, HEC-RAS est un logiciel dédié à la simulation des écoulements dans les cours d'eau et les canaux.

Jusqu'à sa version 5.0, HEC-RAS offrait principalement des fonctionnalités unidimensionnelles, limitant sa capacité à représenter avec précision les variations hydrauliques liées aux changements de géométrie des sections transversales, aux courbures du tracé ou à d'autres effets tridimensionnels. Depuis la version 5.0, le logiciel intègre la modélisation en une et deux dimensions (1D/2D), permettant une meilleure représentation des écoulements en rivières et en zones inondables (Cheloufi & Foual, 2018).

HEC-RAS prend en charge un large éventail d'analyses hydrologiques et hydrauliques, notamment :

- le ruissellement des précipitations,
- l'hydraulique des cours d'eau,
- l'évaluation des impacts des inondations,
- la simulation des écoulements permanents et non permanents,
- le transport des sédiments,
- l'analyse de la qualité de l'eau,

- ainsi que des outils pour la conception et l'analyse d'ouvrages hydrauliques (Cheloufi & Foual, 2018).

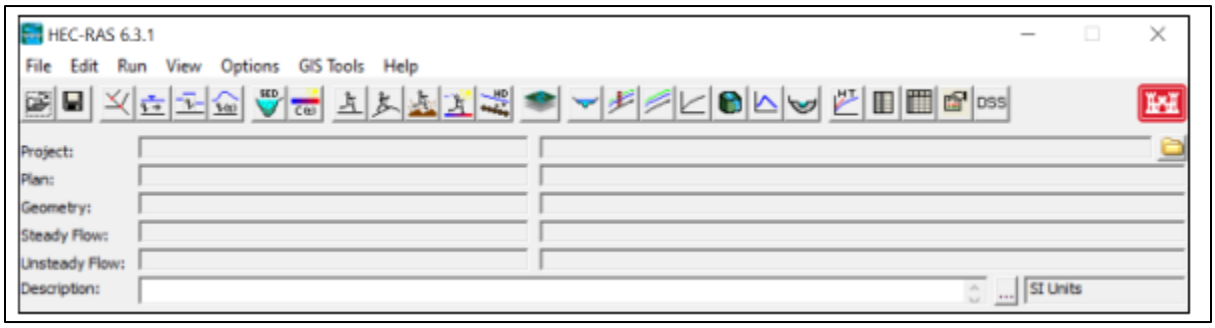


Figure IV.13 : Interface utilisateur du logiciel HEC-RAS (6.3.1).

IV.5.1.3 Objectif du logiciel HEC-RAS :

Le principal objectif de HEC-RAS est de réaliser des calculs hydrauliques unidimensionnels pour différents réseaux de canaux, qu'ils soient naturels ou artificiels. Il permet de déterminer les hauteurs de surface libre pour chaque section étudiée à partir de données d'écoulement en régime permanent, et de simuler les crues en régime non permanent à l'aide d'hydrographes représentant la propagation des crues.

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. Pour les écoulements graduellement variés, il résout l'équation de l'énergie, en intégrant les pertes de charge dues au frottement (formule de Manning-Strickler) ainsi que les effets de contraction et d'expansion de l'écoulement.

Lorsque des variations rapides surviennent comme dans le cas de ressauts hydrauliques, à proximité de ponts, ou encore aux confluences de rivières le programme utilise alors l'équation de la quantité de mouvement pour obtenir des résultats plus précis (Cheloufi & Foual, 2018).

IV.5.1.4 Fonctionnement du logiciel HEC-RAS :

HEC-RAS est conçu pour modéliser avec précision une large gamme de conditions d'écoulement. Son centre de contrôle, véritable noyau du logiciel, permet de gérer et de combiner efficacement différents types de données nécessaires à la simulation, notamment :

- La géométrie du canal,
- Les débits et les conditions aux limites,
- Les paramètres de calcul,
- Les résultats de simulation (Idrici, 2017).

IV.5.2 Application d'HEC-RAS sur Oued KHOUDJA côté Ouest :

IV.5.2.1 Données nécessaires pour l'application du modèle HEC-RAS :

Pour utiliser efficacement le modèle HEC-RAS, il est essentiel de disposer de données spécifiques relatives à la zone d'étude. Les principales informations requises comprennent :

- Une série de mesures distance-altitude pour chaque section transversale du cours d'eau,
- La distance entre les sections successives, incluant les rives et l'axe du canal,
- Les coefficients de contraction et d'expansion de l'écoulement,
- Les données d'écoulement ainsi que les conditions aux limites nécessaires à la simulation (Jabbour, 2006).

IV.5.2.2 Les données géométriques :

Les données géométriques nécessaires comprennent la création d'une connexion entre les différentes informations sur le système fluvial, comme le schéma du réseau fluvial. Cela inclut les données sur les sections transversales ainsi que sur les ouvrages hydrauliques existants ou projetés, tels que les ponts, les levées, les structures latérales et les déversoirs (Idrici, 2017).

- **Construction du TIN (Triangular Irregular Network)** :

Le logiciel ArcGIS est utilisé pour générer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à partir d'un échantillonnage semi-dirigé irrégulier. Ce modèle est représenté sous la forme d'un réseau triangulaire irrégulier, appelé TIN (Triangular Irregular Network).
Ce TIN permet de visualiser le comportement des écoulements dans RAS Mapper, et de produire des cartes détaillées illustrant notamment :

- La profondeur de l'eau,
- La vitesse du courant,
- Et d'autres paramètres hydrauliques essentiels.

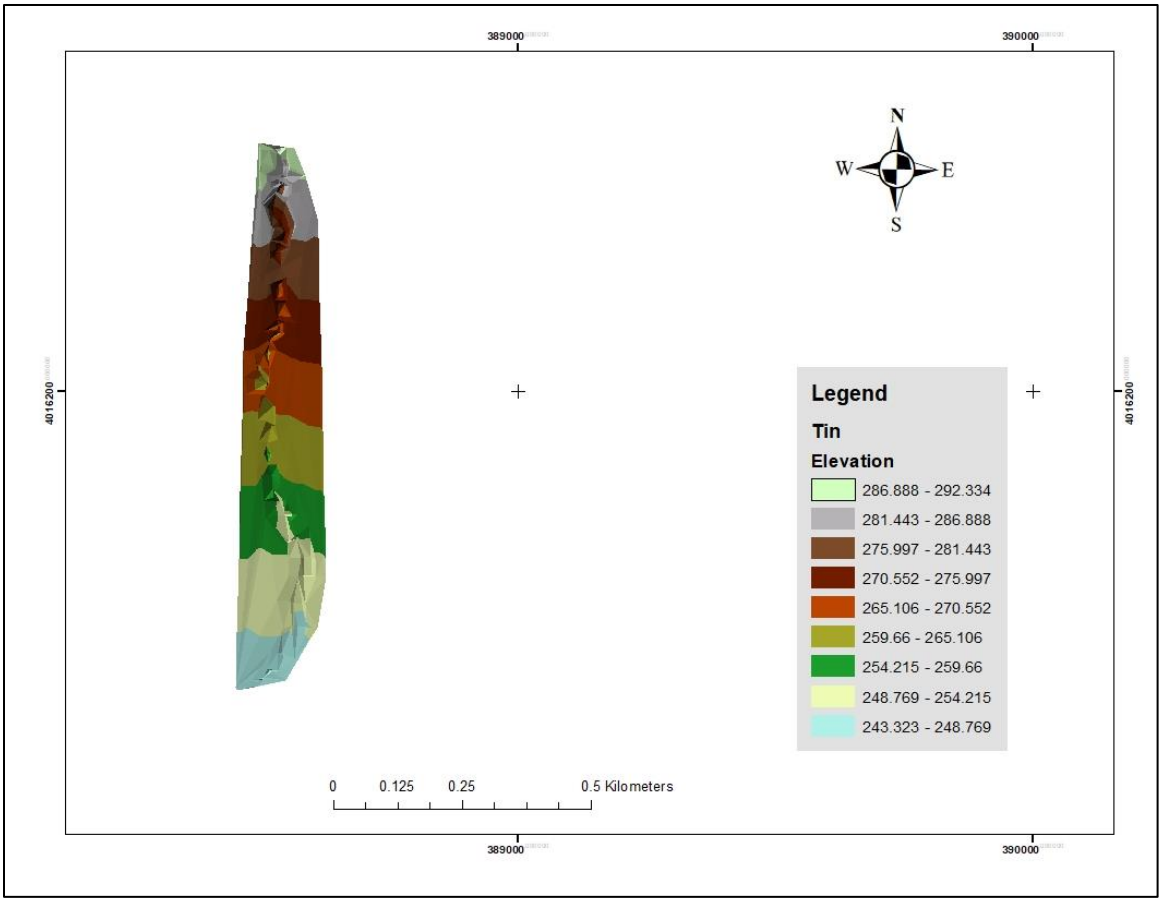


Figure IV.14: TIN (réseau irrégulier triangule) de la zone d'étude.

Après la création du Triangular Irregular Network (TIN), celui-ci est exporté avec un fichier de projection au format ESRI (.prj), contenant les informations relatives au système de coordonnées géographiques spécifique à la zone d'étude, obtenu via le site "Spatial Reference". Ce fichier de projection garantit la compatibilité spatiale lors de l'intégration dans HEC-RAS. Le TIN est ensuite importé dans RAS Mapper, où il peut être correctement interprété et simulé. Cette importation s'appuie sur le fichier image associé, servant de référence visuelle au modèle.

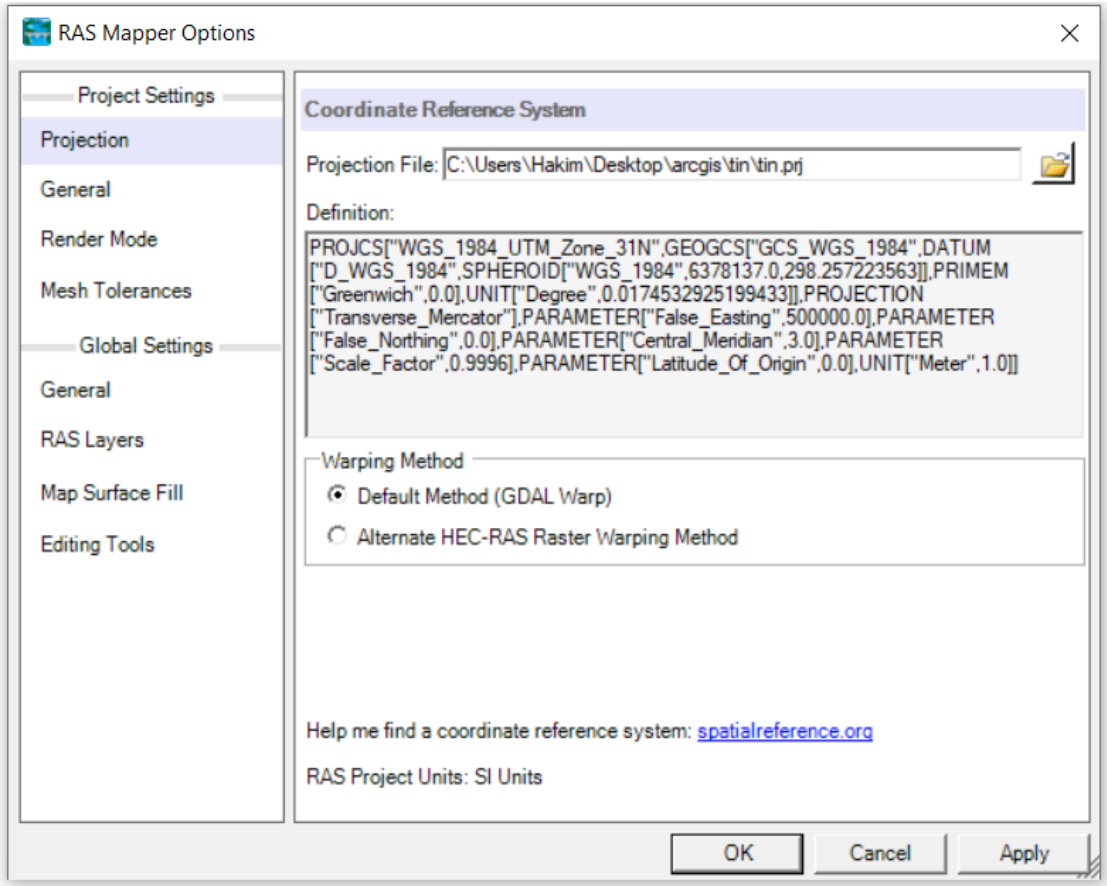


Figure IV.15: Insertion le fichier de projection.

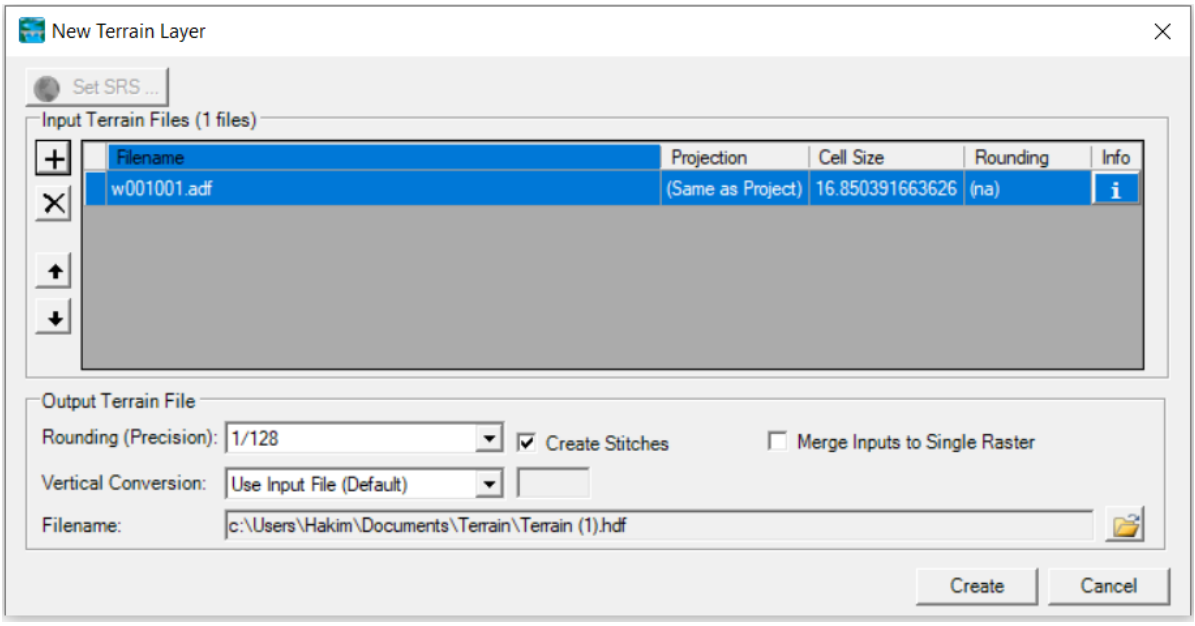


Figure IV.16: Insertion les données du terrain.

- Après avoir importé avec succès les données dans HEC-RAS, la première étape consiste à définir l'axe de la rivière, le lit mineur, le lit majeur ainsi que les sections transversales. Toutefois, les profils générés initialement ne présentent pas les profondeurs attendues. Il est donc nécessaire de modifier la géométrie des sections afin de les adapter correctement. Cette étape permet d'obtenir des coupes transversales représentatives de la morphologie réelle de la rivière et de son lit.

Les sections transversales générées à partir du RAS Mapper sont illustrées dans la figure suivante :

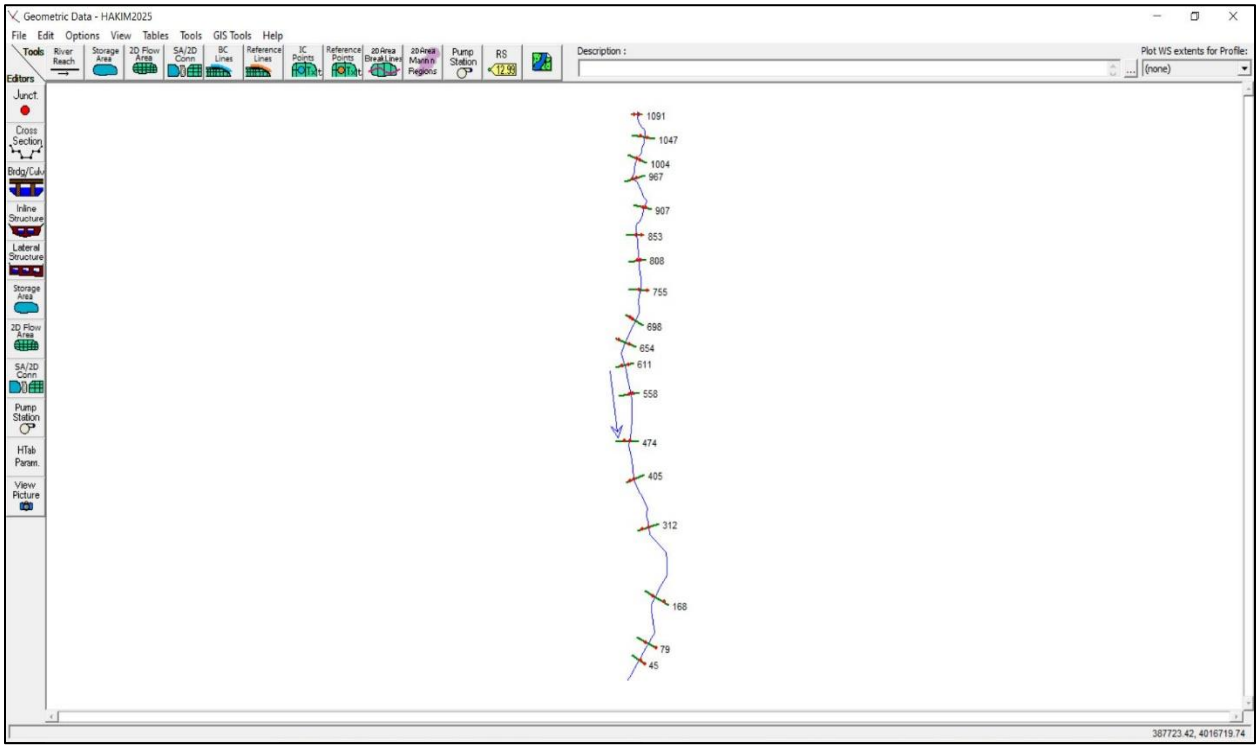
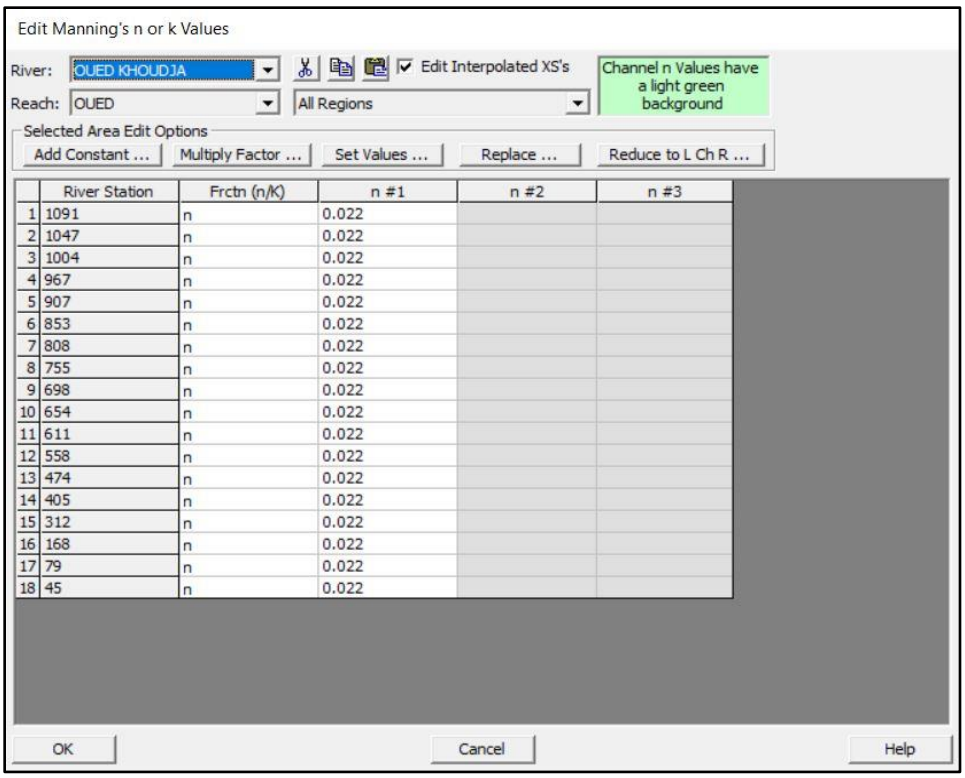


Figure IV.17: Définition du tracé d'Oued Khoudja côté Ouest et des sections en travers de l'oued.



	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	1091	n	0.022		
2	1047	n	0.022		
3	1004	n	0.022		
4	967	n	0.022		
5	907	n	0.022		
6	853	n	0.022		
7	808	n	0.022		
8	755	n	0.022		
9	698	n	0.022		
10	654	n	0.022		
11	611	n	0.022		
12	558	n	0.022		
13	474	n	0.022		
14	405	n	0.022		
15	312	n	0.022		
16	168	n	0.022		
17	79	n	0.022		
18	45	n	0.022		

Figure IV.18: Insertion des valeurs de Manning (terrain naturel).

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

Une fois les données géométriques des sections transversales saisies, l'étape suivante de la modélisation hydraulique avec HEC-RAS consiste à définir les débits d'entrée et les conditions aux limites nécessaires pour le calcul des profils de la surface libre dans chaque section du réseau fluvial.

Les conditions aux limites jouent un rôle fondamental dans la simulation hydraulique. Pour modéliser un écoulement permanent, il est indispensable de fixer ces conditions à l'amont, à l'aval, ou aux deux extrémités du tronçon étudié. Ces conditions permettent à HEC-RAS de déterminer l'altitude de la ligne d'eau et de réaliser les calculs hydrauliques correspondants.

Dans notre cas, étant donné la présence d'un écoulement en régime mixte (fluvial et torrentiel), nous avons imposé des conditions aux limites à la fois en amont et en aval du tronçon. Nous avons choisi d'appliquer une profondeur normale comme condition aux limites. Cela revient à spécifier une pente d'énergie, que HEC-RAS utilise ensuite pour calculer la profondeur en s'appuyant sur l'équation de Manning**.**

Pour estimer cette pente d'énergie, nous avons mesuré la pente naturelle du lit de la rivière sur un tronçon situé en aval de la zone modélisée.

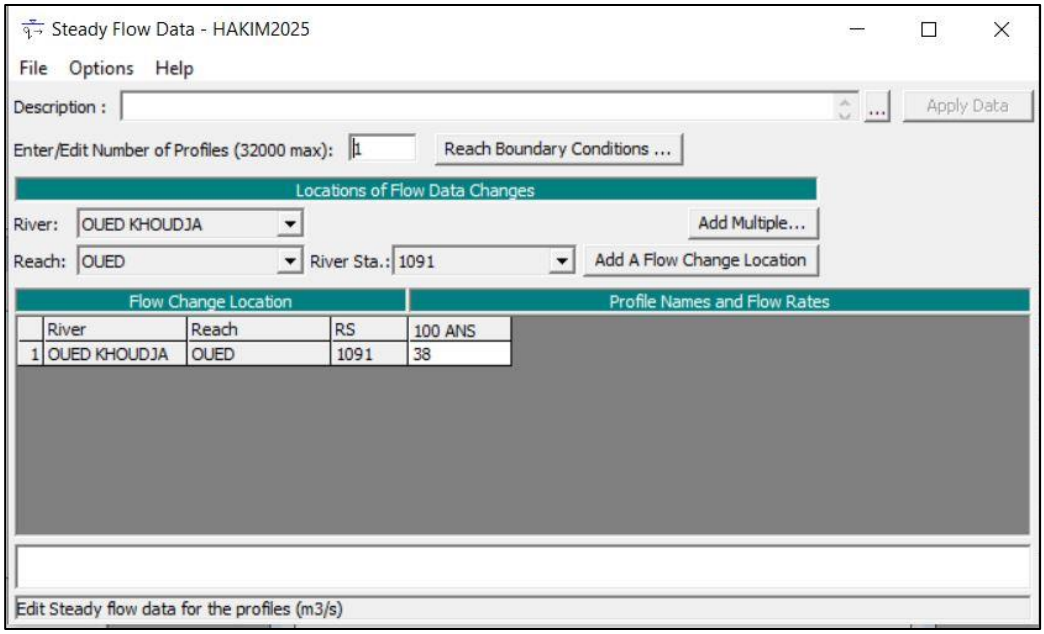


Figure IV.19: Insertion les données hydrauliques d'Oued Khoudja côté Ouest.

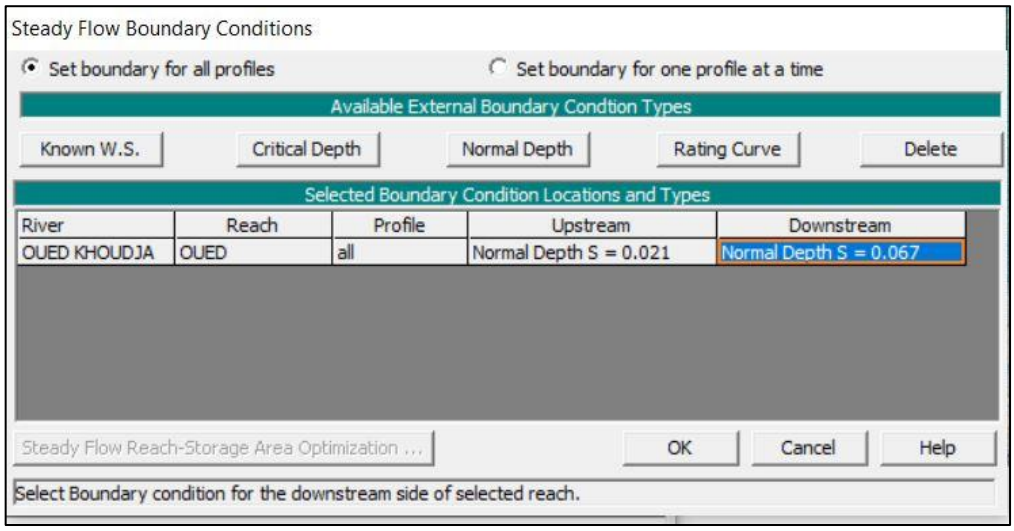


Figure IV.20: Définition des conditions aux limites.

- ✓ **Simulation :**
  - ➢ Une fois les données géométriques et hydrométriques renseignées, ainsi que les conditions aux limites définies, il est essentiel de sélectionner le régime d'écoulement approprié fluvial, torrentiel ou mixte avant de lancer les calculs hydrauliques.

- Dans notre cas, nous avons choisi d'opter pour un régime d'écoulement mixte avant de lancer la simulation hydraulique.
- Le débit centennal, calculé dans la partie hydrologique, est de **38 m³/s**.

IV.5.2.3 Résultats de la simulation :

Les résultats obtenus à l'issue de la simulation sous HEC-RAS fournissent une analyse précieuse de l'écoulement permanent dans un système fluvial ou hydraulique. Cette simulation permet d'examiner en détail la distribution des vitesses, les niveaux d'eau ainsi que les débits tout au long du réseau hydrographique, contribuant ainsi à une meilleure évaluation des risques d'inondation et à la prise de décisions en matière de gestion hydraulique.

❖ **Profil en Long :**

La ligne d'eau présente une coupe transversale du tronçon étudié, indiquant le niveau de la surface de l'Oued ainsi que le niveau d'eau associé à une période de retour de 100 ans.

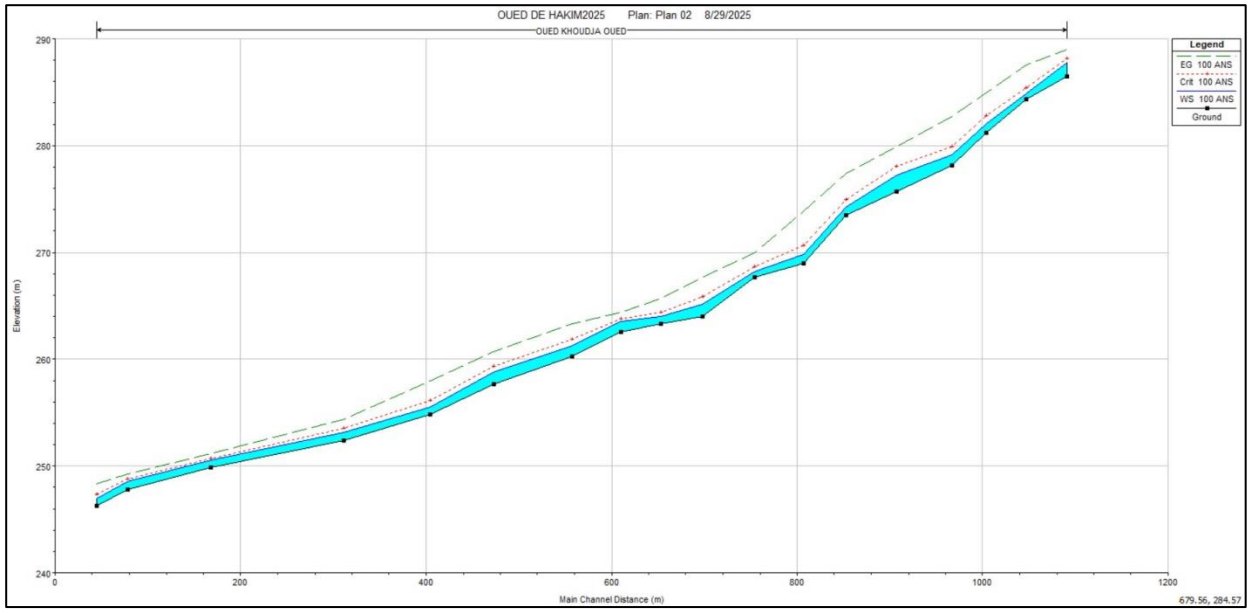


Figure IV.21: Profil en Long du cours d'eau lors d'une crue centennale a l'état naturel.

❖ **Vue en 3D :**

HEC-RAS propose une visualisation en 3D, facilitant l'observation du comportement des crues pour diverses périodes de retour.

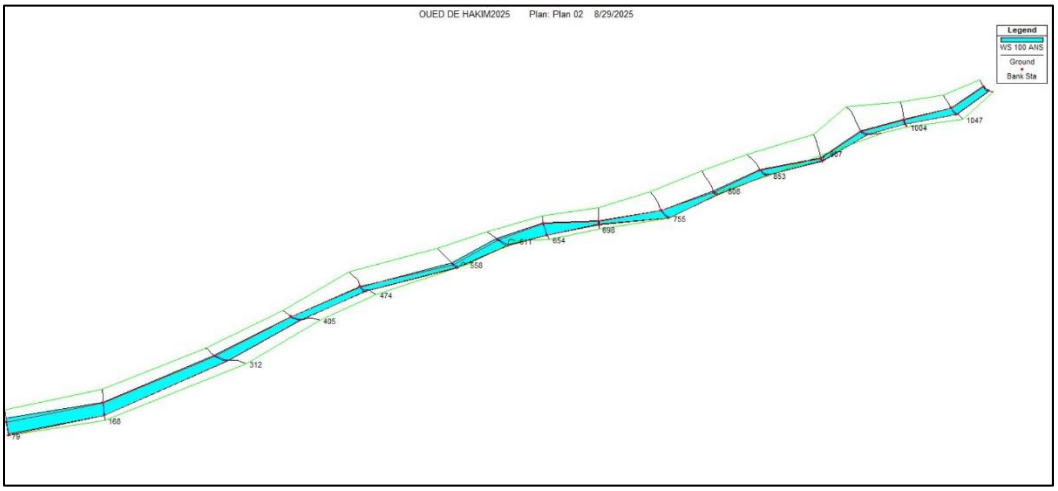


Figure IV.22: Représentation en 3D d'OUED Khoudja côté Ouest.

❖ **Restitution de la courbe de tarage :**

À l'aide de HEC-RAS, nous avons produit un graphique montrant l'évolution de la hauteur d'eau en fonction du débit (en m³/s).

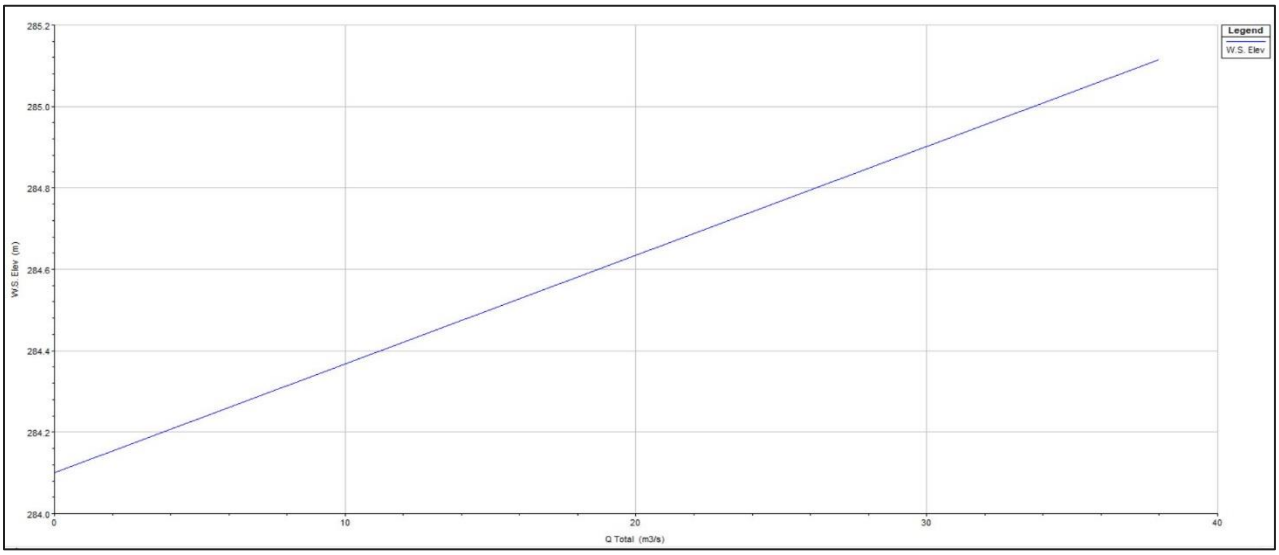


Figure IV.23 : Courbe de tarage du tronçon modélisé d'oued Khoudja côté Ouest.

❖ **Les profils en travers :**

L'affichage des résultats par profil transversal nous a permis d'obtenir des données précises à chaque point du cours d'eau, mettant en évidence une exposition généralisée au risque de submersion

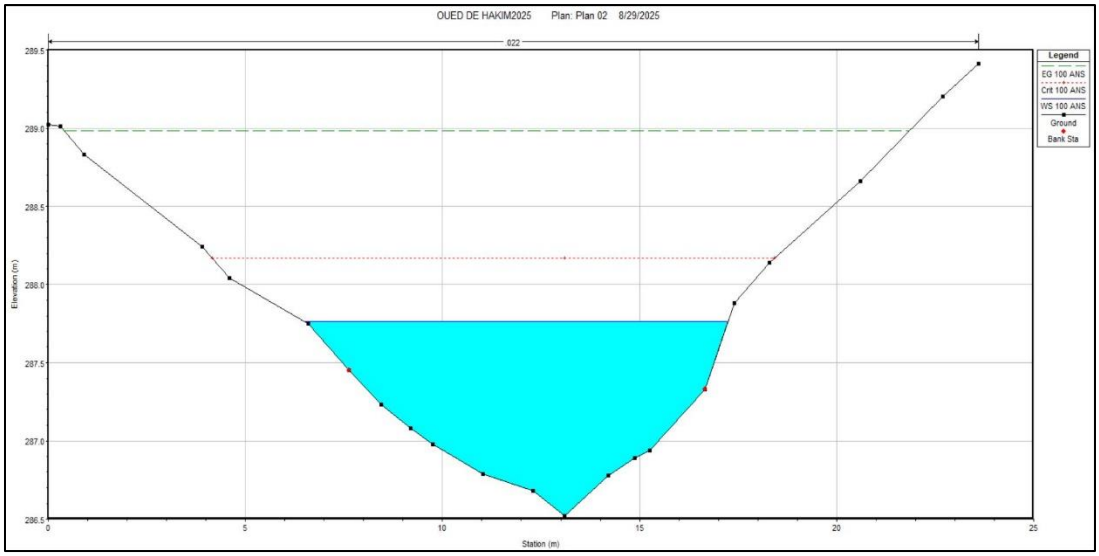


Figure IV.24: profil en travers de la section 1091

.

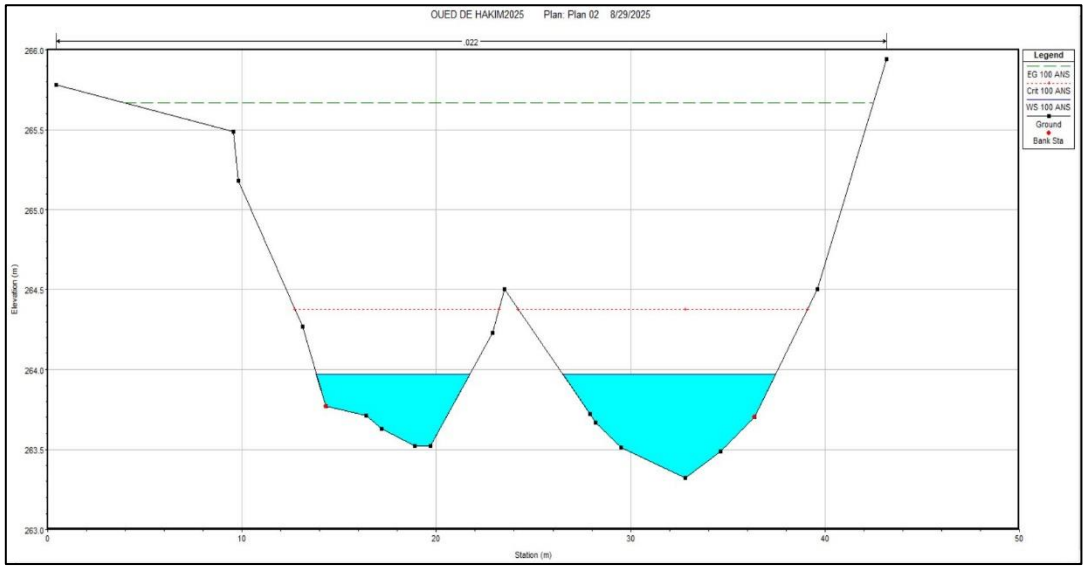


Figure IV.25: profil en travers de la section 654.

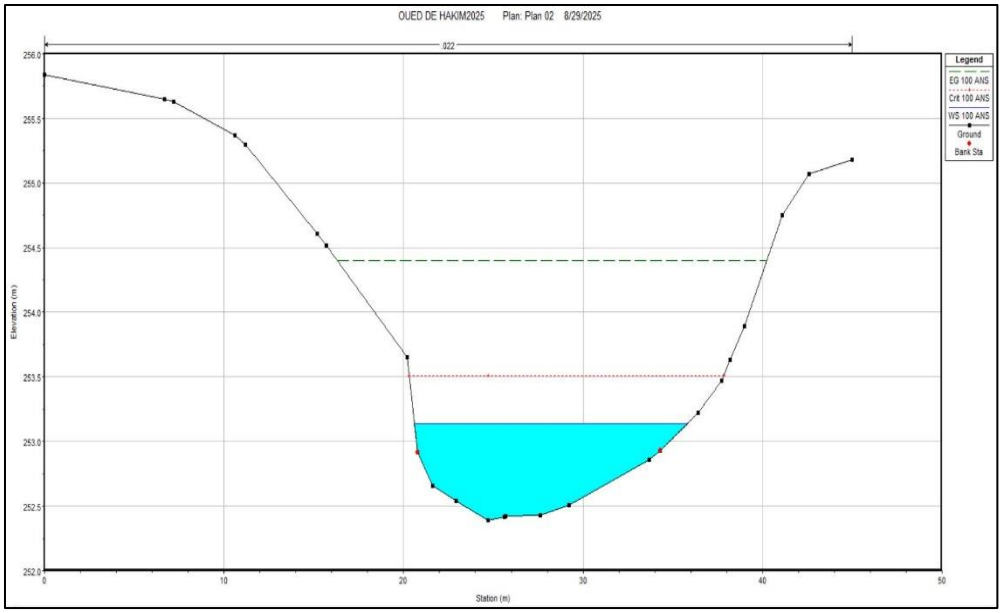


Figure IV.26: profil en travers de la section 312.

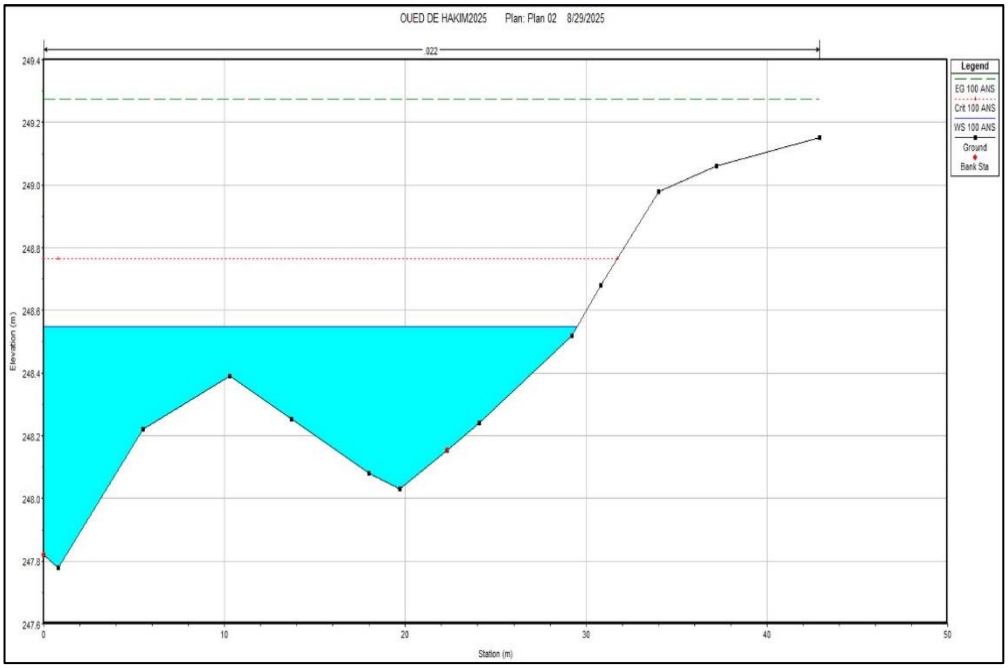


Figure IV.27: profil en travers de la section 79.

❖ **Variation de nombre de Froude :**

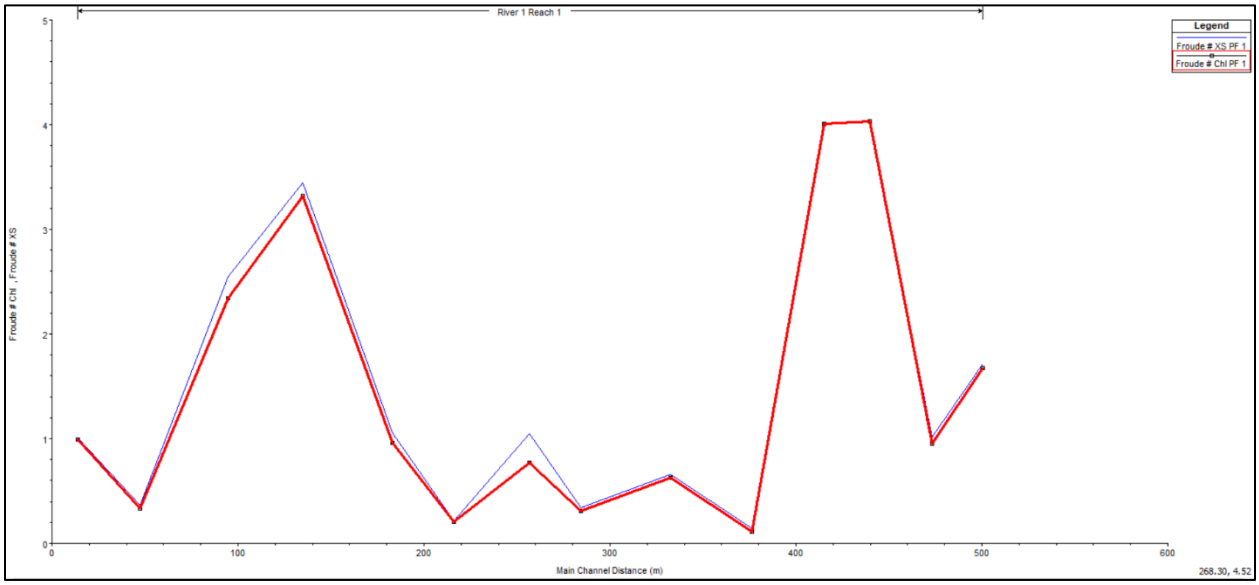


Figure IV.28: Variation du nombre de Froude en fonction de la distance.

❖ **Variation de la vitesse :**

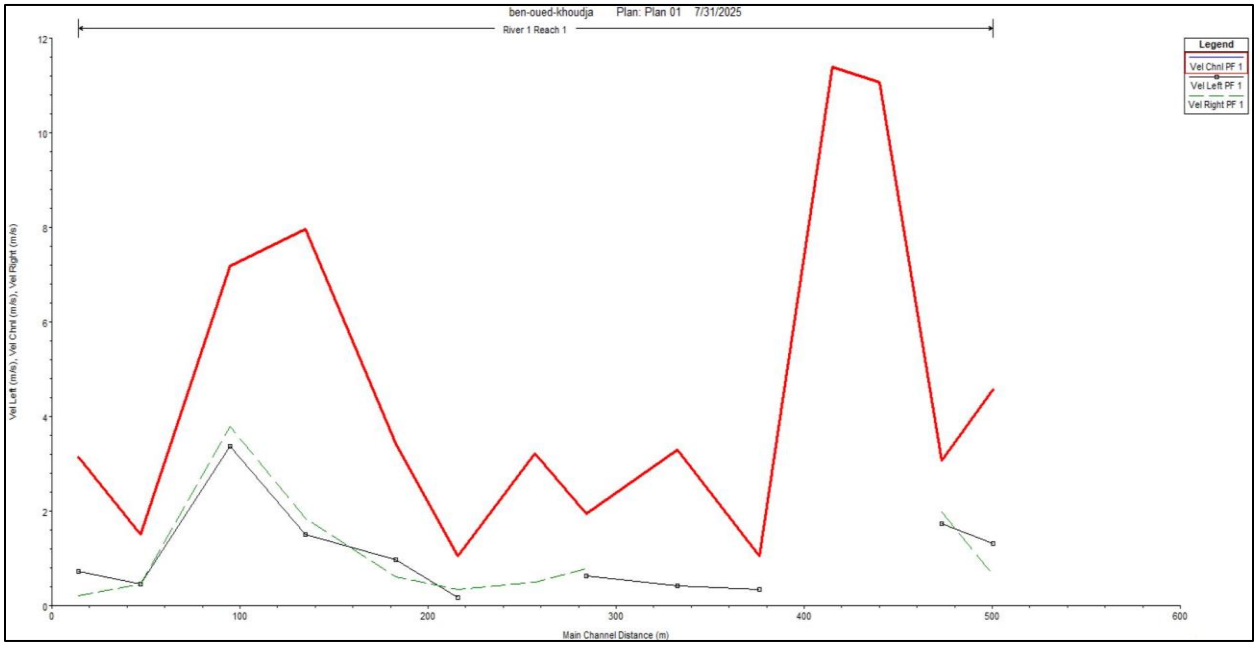


Figure IV.29: variation de la vitesse en fonction de la distance.

- Le logiciel offre la possibilité de générer des tableaux récapitulatifs des paramètres hydrauliques relatifs à diverses structures, telles que les barrages ou autres ouvrages, ainsi qu'à des zones de stockage spécifiques. Ces tableaux peuvent être établis soit pour chaque station (profil en travers) de manière individuelle, soit de façon globale pour l'ensemble des stations.

Tableau IV.2 : Les principaux éléments Hydrauliques pour toutes les sections .

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	
1091	286.52	287.76	288.16	288.98	0.015024	4.92	7.93	10.74	1.71
1047	284.32	284.88	285.44	287.54	0.078908	7.25	5.31	13.22	3.53
1004	281.17	282.04	282.81	284.96	0.046577	7.66	5.18	8.74	2.91
967	278.13	279.15	279.93	282.77	0.071014	8.43	4.53	7.96	3.47
907	275.34	276.35	276.99	278.98	0.049418	7.19	5.29	8.35	2.88
853	273.50	274.38	274.91	276.38	0.039897	6.28	6.13	11.26	2.62
808	268.94	269.84	270.69	273.86	0.068057	8.93	4.36	7.11	3.44
755	267.64	268.23	268.66	269.97	0.053952	5.84	6.50	15.71	2.90
698	264.16	265.23	265.92	267.76	0.027770	7.15	5.58	6.80	2.36
654	263.32	263.96	264.37	265.74	0.065716	5.94	6.49	18.70	3.13
611	262.59	263.56	263.81	264.41	0.012582	4.11	9.56	14.90	1.53
558	260.24	261.28	261.86	263.32	0.029229	6.51	6.27	9.78	2.35
474	257.67	258.82	259.33	260.69	0.032243	6.06	6.27	9.51	2.38
405	254.84	255.54	256.15	257.95	0.047874	6.88	5.59	10.44	2.87
312	252.39	253.14	253.51	254.40	0.026233	4.98	7.75	15.22	2.13
168	249.86	250.53	250.72	251.17	0.017434	3.56	10.70	23.88	1.68
79	247.78	248.55	248.76	249.27	0.026350	3.88	10.29	29.49	1.97
45	246.27	246.97	247.36	248.30	0.027892	5.31	7.65	14.75	2.17

Avec :

Min $_{Ch\ El}$: Altitude du radier du canal.

W.S $_{Elev}$: Altitude du plan d'eau calcule.

E.G $_{Elev}$: Altitude de la ligne d'Energie.

E.G $_{Slope}$: Pente de la ligne d'Energie.

Vel $_{chnl}$: Vitesse d'écoulement.

Flow $_{area}$: Section mouillée.

Top $_{width}$: Largueur du miroir.

Froude $_{chl}$: Nombre de Froude.

IV.5.2.4 Interprétation des résultats :

L'analyse des niveaux d'eau dans les différentes sections transversales de l'oued révèle une inondation généralisée sur l'ensemble du cours d'eau. Les résultats obtenus mettent en évidence les caractéristiques suivantes :

- Le régime d'écoulement varie le long de l'oued, comme en témoignent les valeurs du nombre de Froude, qui se situent entre **1.53** et **3.53**.

- La vitesse d'écoulement oscille entre **3.56 m/s** et **8.93 m/s**.

IV.6 Cartographie du risque de l'inondation :

Après la génération des profils d'inondation à l'aide du logiciel HEC-RAS, l'étape suivante a consisté à localiser et cartographier les zones à risque. Cela implique la mesure des hauteurs d'eau au sein de différentes sections des oueds.

Pour identifier les points de débordement et les zones exposées, nous avons utilisé l'outil intégré RAS-MAPPER pour simuler le comportement du cours d'eau lors d'une crue centennale. Cette approche a permis de produire des cartes précises, qui serviront de support à l'analyse détaillée dans la suite de notre étude.

L'élaboration de ces cartes de risques vise à mettre en évidence les principaux dangers, en prenant en compte plusieurs critères : l'impact potentiel, la probabilité d'occurrence et les mesures de contrôle existantes. Cette démarche poursuit plusieurs objectifs, notamment :

- ❖ Mettre en place un système de gestion ou de contrôle des risques adapté.
- ❖ Aider la direction dans l'élaboration de stratégies et la prise de décisions.

- ❖ Orienter la planification des audits internes en priorisant les processus ou activités les plus exposés aux risques.

La gestion des risques repose sur une organisation efficace et des ressources adaptées permettant d'anticiper les crises et d'y répondre de manière appropriée, facilitant ainsi la prise de décision. Cette démarche s'articule autour de trois étapes clés :

- **Anticipation :** mise en œuvre de mesures visant à prévoir les événements imprévus afin d'en améliorer la gestion.
- **Prévention et protection :** réduction de l'impact potentiel d'un risque par des actions préventives et protectrices, et limitation de la probabilité que ce risque dépasse le seuil d'acceptabilité défini par les autorités compétentes.
- **Communication :** diffusion d'informations pertinentes auprès de l'ensemble des acteurs concernés, depuis les citoyens jusqu'aux instances décisionnelles, afin d'assurer une gestion coordonnée et efficace des risques.

IV.6.1 Carte des profondeurs :

En situation d'inondation, la submersion se caractérise principalement par son étendue et sa profondeur, ce qui requiert l'utilisation de modèles hydrauliques ou de simulations numériques basées sur la topographie des lits mineurs et majeurs des cours d'eau .
Trois niveaux de submersion sont généralement distingués en fonction de la profondeur :

- ✓ **Submersion légère** : profondeur inférieure à 0,5 mètre ;
- ✓ **Submersion modérée :** profondeur comprise entre 0,5 et 1 mètre ;
- ✓ **Submersion importante :** profondeur supérieure à 1 mètre .



Figure IV.30: carte des profondeurs d'eau pour une crue centennale.

- ✓ D'après la carte des hauteurs d'eau, la profondeur varie entre 0,002 mètre et 7.41 mètres. Les zones les plus exposées au risque de submersion sont localisées à proximité du centre-ville d'Oued Khoudja. La concentration des zones à risque autour de la confluence met en évidence la nécessité d'une planification urbaine résiliente et de stratégies d'adaptation efficaces pour atténuer les impacts potentiels des inondations. une telle approche est indispensable pour orienter l'élaboration de politiques publiques assurant la sécurité des populations riveraines et promouvant un développement durable au sein de la région.

IV.6.2 Cartes des vitesses :

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

Faible vitesse	Vitesse modérée	Forte vitesse
V< 0.2 m/s	0.2<V<0.5	V> 0.5



Figure IV.31: Carte des vitesses d'eau pour une crue centennale.

IV.6.3 Cartes d'aléa

L'évaluation des aléas liés aux inondations repose sur la combinaison de deux paramètres essentiels : la vitesse d'écoulement et la hauteur de submersion. Cette approche permet de délimiter quatre zones de danger distinctes, chacune représentée par une couleur spécifique, conformément aux critères d'évaluation présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.3 : Critères d'évaluation de l'intensité d'aléa inondation .

Hauteur d'eau (H)	**Vitesse faible V < 0,2 m/s**	**Vitesse modérée 0,2 m/s < V < 0,5 m/s**	**Vitesse forte V > 0,5 m/s**
< 0,5 m	Faible	Modéré	Fort
0,5 m – 1,0 m	Modéré	Modéré	Fort
1,0 m – 2,0 m	Fort	Fort	Fort
> 2,0 m	Très Fort	Très Fort	Très Fort

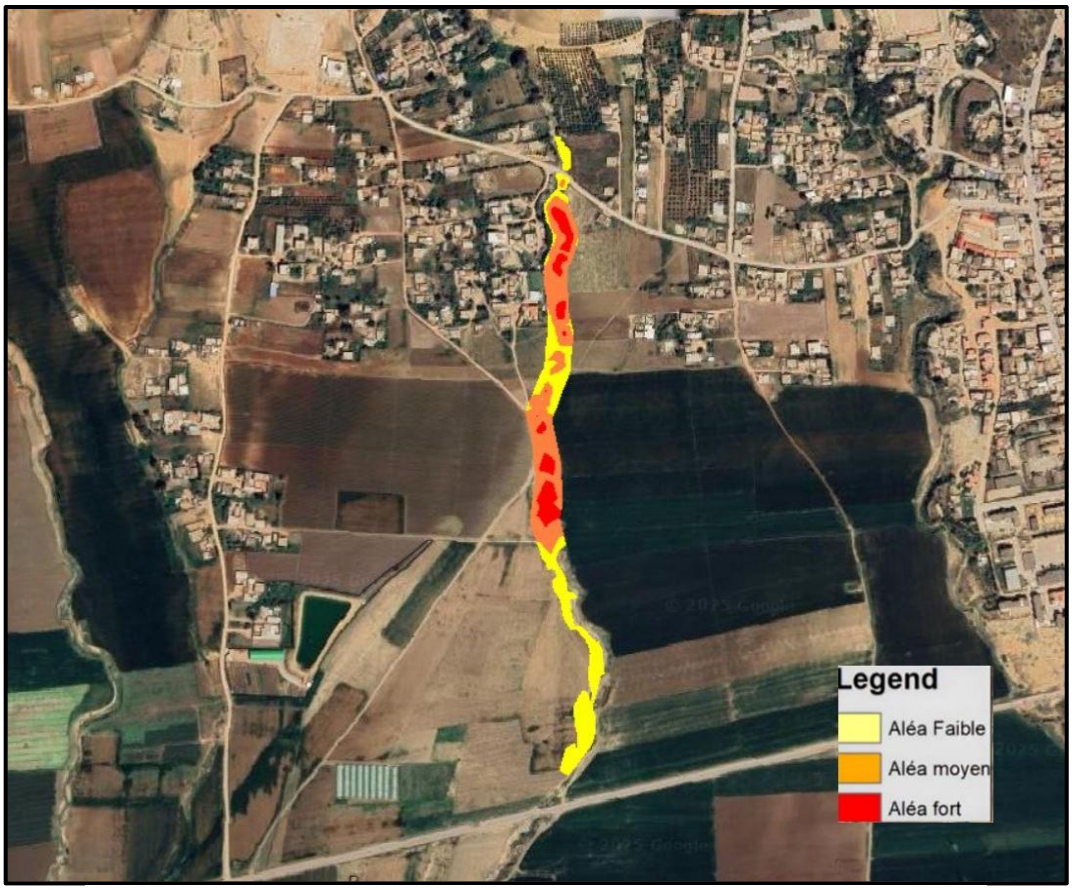


Figure IV.32: Carte d'alea d'oued khoudja côté ouest pour la crue centennale.

Les zones à risque élevé se concentrent principalement le long du cours d'eau, en particulier dans les environs de l'ouest de la ville d'Oued Khoudja. Comme le montre la carte des profondeurs, ces secteurs à fort potentiel de submersion correspondent souvent à des portions du lit présentant des pentes accentuées, ce qui accroît la probabilité d'inondation en cas de crue majeure.

Cette observation est renforcée par la carte des vitesses d'écoulement, où l'on constate une superposition nette entre les zones de haute vitesse et celles à risque élevé. Cette convergence entre intensité hydrologique et dynamique d'écoulement souligne la nécessité d'une surveillance renforcée et de mesures de prévention adaptées dans ces secteurs critiques.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons analysé la réponse de notre zone d'étude face à une crue centennale, en nous appuyant sur les capacités de modélisation du logiciel HEC-RAS. Cette approche nous a permis d'identifier avec précision les zones inondables et de générer une carte des profondeurs, indiquant la hauteur d'eau aux points stratégiques du territoire.

L'évaluation détaillée des zones vulnérables fournit une base solide pour la mise en œuvre de mesures de prévention adaptées. Les résultats obtenus orientent les prochaines phases du projet, qui consisteront à étudier diverses alternatives de protection contre les inondations. L'objectif sera de concevoir des solutions durables et innovantes, tenant compte des spécificités locales, afin de renforcer la résilience des infrastructures et des populations face aux événements extrêmes à venir.

CHAPITRE V :
Études des variantes d'Aménagement.

Introduction :

Cette étude vise à assurer une protection efficace de la partie est de la ville de Ain Bouyahia contre les inondations, notamment en cas de crues centennales. L'objectif est d'identifier et de proposer des solutions d'aménagement adaptées aux conditions naturelles locales, en veillant à ce qu'elles soient techniquement réalisables, économiquement viables et parfaitement ajustées aux spécificités du terrain.

Le choix des alternatives repose sur les résultats issus des chapitres précédents, en tenant compte des caractéristiques physiques de la zone d'étude. L'enjeu principal est d'assurer une évacuation optimale des eaux de crue vers l'exutoire, tout en préservant les conditions d'écoulement et en garantissant la stabilité des berges.

Par ailleurs, une attention particulière est portée à l'impact environnemental des aménagements envisagés, afin de réduire les perturbations écologiques. Le processus de sélection des variantes s'appuiera sur une démarche méthodique, intégrant plusieurs critères d'évaluation, dans le but d'aboutir à la solution globale la plus pertinente.

V.1 Présentation des principales orientations :

V.1.1 Protection contre les crues :

Les stratégies pour réduire le risque d'inondation dans les zones vulnérables peuvent être classées en deux grandes catégories :

V.1.1.1 Protection directe (ou rapprochée) :

La protection directe consiste à intervenir directement sur les sites menacés en mettant en œuvre les actions suivantes :

- **Curage et débroussaillage :** Le curage permet d'optimiser les conditions d'écoulement en éliminant les dépôts, obstacles ou sédiments qui entravent le flux des eaux. Le débroussaillage, quant à lui, est indispensable, notamment dans les zones urbanisées, pour des raisons sanitaires, et dans les sections naturelles, afin de réduire la rugosité et d'accroître la capacité d'évacuation du lit.
- **Réalisation de canaux :** Cette intervention vise à restaurer le tracé initial de l'oued, en particulier dans les zones où le lit naturel et l'espace hydraulique ont été empiétés par des constructions ou des infrastructures routières, compromettant ainsi l'écoulement naturel.
- **Recalibrage des sections :** Cette opération consiste à élargir et approfondir les sections du cours d'eau pour augmenter sa capacité hydraulique. L'objectif est d'assurer une section mouillée conforme aux normes de protection contre les crues.
- **Protection et stabilisation des berges :** Cette mesure comprend la mise en place d'ouvrages de protection visant à limiter l'érosion des berges due à l'action des crues ou aux glissements de terrain provoqués par l'infiltration d'eau. Une attention particulière doit

être portée aux zones situées à proximité d'infrastructures sensibles, telles que les ponts, où un renforcement des berges est indispensable.

- **Endiguement des oueds** : Cette mesure consiste à construire des digues le long des deux rives du cours d'eau, afin de contenir les crues et de protéger les zones riveraines. Elle peut être mise en œuvre progressivement, en priorisant les secteurs les plus vulnérables, notamment ceux à forte densité de population ou à haute valeur économique. Souvent réalisable avec des ressources locales en main-d'œuvre et en matériaux, l'endiguement constitue une solution efficace contre une large gamme de crues. Toutefois, cette approche peut engendrer des effets secondaires indésirables, notamment une élévation du niveau d'eau en période de crue et une difficulté accrue pour le drainage des zones basses, ce qui nécessite une étude hydraulique approfondie avant sa mise en œuvre.

V.1.1.2 Protection indirecte (éloignée) :

Cette approche consiste à intervenir en amont ou à distance des zones à risque, c'est-à-dire en dehors du périmètre immédiat d'aménagement urbain. Elle repose sur l'installation d'infrastructures hydrauliques sur les cours d'eau à l'origine des inondations, dans le but de réduire l'intensité des crues avant qu'elles n'atteignent les zones sensibles. Plusieurs actions peuvent être mises en œuvre dans ce cadre, notamment :

- **Création de canaux périphériques :** Cette mesure vise à détourner une partie ou la totalité du débit d'un cours d'eau vers un autre exutoire, permettant ainsi de rediriger les eaux vers des zones non urbanisées ou moins vulnérables. Elle permet d'éviter la concentration des flux dans les secteurs à protéger.
- **Aménagement des bassins versants :** L'objectif est de réduire l'érosion et de ralentir les écoulements en amont, à travers des techniques biologiques (reboisement, végétalisation) et/ou la mise en place d'ouvrages de ralentissement tels que les seuils en gabions. Ces aménagements favorisent également le piégeage des sédiments, limitant ainsi l'envasement des lits en aval et les risques d'inondation.
- **Construction de barrages** : Cette solution consiste à stocker temporairement les eaux de crue en amont des zones à protéger. Les barrages permettent de réguler les débits de pointe et de diminuer la pression sur les infrastructures aval. Leur conception doit garantir une capacité de rétention suffisante et une gestion efficace des volumes d'eau pour assurer une protection optimale contre les événements extrêmes.

V.1.2 Protection contre l'érosion :

À l'instar du risque d'inondation, le risque d'érosion résulte de l'interaction entre un aléa naturel en l'occurrence l'érosion et les enjeux humains ou matériels présents dans la zone exposée. Ce phénomène se manifeste fréquemment dans les zones non urbanisées, en particulier lorsque des infrastructures routières longent un cours d'eau sans être protégées par une berge naturelle ou un aménagement de séparation, les rendant ainsi plus vulnérables aux processus d'érosion.

V.1.2.1 Érosion du lit :

L'érosion du lit peut avoir plusieurs causes :

- **Causes naturelles :** Le lit du cours d'eau s'adapte en permanence aux nouvelles conditions hydrologiques et à la dynamique du transport sédimentaire. Cette réajustement se traduit souvent par une réduction progressive de la pente du lit, influençant la vitesse d'écoulement et les processus d'érosion ou de dépôt.
- **Exploitation du lit :** Les extractions de matériaux (sables, graviers) dans le lit du cours d'eau engendrent des déséquilibres morphologiques. Ces interventions provoquent une érosion régressive vers l'amont et, dans certains cas, une érosion progressive vers l'aval, modifiant la stabilité de l'ensemble du profil en long.
- **Présence d'infrastructures** : La construction d'ouvrages tels que digues, remblais ou autres structures de protection limite l'expansion naturelle des zones inondables. Cependant, ces aménagements peuvent perturber les dynamiques fluviales, en particulier en modifiant le régime d'écoulement et en accentuant l'érosion du lit dans certaines zones.

V.1.2.2 Érosion des berges :

L'érosion des berges survient lorsque le courant fluvial entraîne les particules de sol constituant la rive. Ce phénomène devient significatif lorsque la vitesse et la turbulence de l'écoulement dépassent la résistance mécanique des matériaux, notamment leur cohésion et leur poids propre. L'érosion est généralement accentuée lorsque le courant impacte la berge avec un angle oblique, ce qui augmente l'intensité des forces exercées localement sur le sol.

- **Éboulement :** Ce phénomène se produit lorsqu'une portion en surplomb de la berge s'effondre brutalement. Il résulte généralement d'une érosion à la base de la berge, qui affaiblit sa stabilité jusqu'au point de rupture.
- **Affouillement :** Il s'agit d'une érosion localisée qui affecte principalement la base des berges ou des ouvrages riverains (ponts, digues, piles). L'affouillement est causé par l'action mécanique du courant, souvent intensifiée par des vitesses élevées ou des turbulences concentrées.

Les techniques de protection des berges se divisent en deux approches :

- **Protection linéaire par revêtement :** Cette méthode consiste à stabiliser la berge en la recouvrant de matériaux résistants à l'érosion, tels que des enduits spécifiques, des géotextiles ou des enrochements. Elle permet de renforcer les sols fragiles et de limiter l'action directe du courant sur la rive.
- **Protection par épis :** Les épis sont des structures transversales implantées perpendiculairement au cours d'eau. Ils ont pour fonction de rétrécir temporairement le lit mineur en période de faible débit et de rediriger les courants rapides vers le centre du chenal, protégeant ainsi les berges contre l'érosion. De plus, ces ouvrages peuvent favoriser la sédimentation en bordure et améliorer la navigabilité du cours d'eau.

Ces deux méthodes sont couramment utilisées pour limiter l'impact de l'érosion fluviale et stabiliser les berges des cours d'eau.

V.2 Calcul hydraulique des canaux :

Dans le cas d'un écoulement à variation lente (régime permanent graduellement varié), on peut admettre que la pente de la ligne de charge au droit de chaque section est équivalente à celle d'un écoulement uniforme.

V.2.1 Conditions de l'écoulement uniforme :

- Le débit est constant dans chaque section étudiée ;
- La profondeur du courant reste uniforme sur l'ensemble du tronçon ;
- La rugosité des parois est homogène ;
- Le canal est prismatique, c'est-à-dire de forme et de dimensions constantes ;
- La pente est constante dans chaque section ;
- Aucune résistance locale (obstacle, contraction, élargissement, etc.) n'est présente.

V.2.2 Formules de calcul :

Pour calculer un écoulement uniforme permanent, la formule de Chézy est couramment utilisée.

La vitesse moyenne de l'écoulement s'exprime ainsi :

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

Le débit volumique est alors donné par :

$$Q = V \times S \qquad (V.2)$$

D'où :

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

Avec :

Rh : Rayon hydraulique, soit le rapport entre la surface mouillée Sm et le périmètre mouillé Pm.

n : Coefficient de rugosité ;

I : Pente du fond du canal (radier).

C : Coefficient de Chézy (m^0.5/s) ;

Détermination du coefficient de Chézy

Le coefficient de Chézy peut être déterminé à l'aide de diverses formules empiriques, comme suit :

1. **Formule de PAVLOVSKY :**

$$C = \frac{1}{n} + Rh^{\frac{1}{y}} \quad (V.4)$$

où y est un exposant déterminé selon la relation suivante :

$$M = 2.5 \times \sqrt{n} - 0.13 - 0.75 \times \sqrt{Rh} \times (\sqrt{n} - 0.1) \quad (V.5)$$

2. **Formule d'AGROSKINE :**

$$C = \frac{1}{n} + 17.72\log(Rh) \quad (V.6)$$

Avec :

C : Coefficient de Chézy (m0.5/s).

Rh : Rayon hydraulique.

n : Coefficient de rugosité.

3. **Formule de Manning-Strickler :**

$$C = \frac{1}{n} \times Rh^{\frac{1}{6}} \quad (V.7)$$

Cette formule permet de reformuler l'équation de Chézy ainsi :

$$V = Ks \times Rh^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{I} \quad (V.8)$$

où :

Ks : Coefficient de rugosité de Strickler (m1/3/s).

Elle est couramment utilisée pour le dimensionnement des sections de canaux ouverts, et le débit est donné par :

$$Q = Rh^{\frac{2}{3}} \times Sm \times \sqrt{I} \quad (V.9)$$

Avec :

Q : Débit de dimensionnement (m^3/s)

n : Coefficient de rugosité

Sm : Section mouillée (m^2)

I : Pente du canal (m/m)

Rh : Rayon hydraulique (m)

4. Formule de BAZIN :

$$C = \frac{87}{1 + \frac{mb}{\sqrt{Rh}}} \qquad (V.10)$$

Où

mb : est le coefficient de Bazin, généralement compris entre 0,06 et 1,75 $m^{0.75}$.

divers types de canaux, leurs caractéristiques géométriques et les formules associées pour leurs sections transversales :

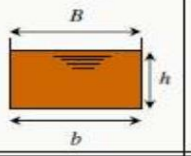
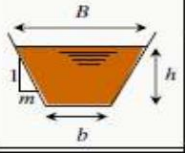
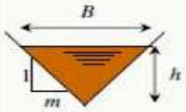
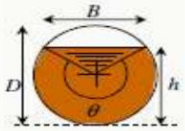
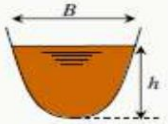
	rectangular	*trapezoidal*	*triangular*	*circular*	*parabolic*
					
flow area A	bh	$(b+mh)h$	mh^2	$\frac{1}{8}(\theta-\sin\theta)D^2$	$\frac{2}{3}Bh$
wetted perimeter P	$b+2h$	$b+2h\sqrt{1+m^2}$	$2h\sqrt{1+m^2}$	$\frac{1}{2}\theta D$	$B+\frac{8}{3}\frac{h^2}{B}$ *
hydraulic radius R_h	$\frac{bh}{b+2h}$	$\frac{(b+mh)h}{b+2h\sqrt{1+m^2}}$	$\frac{mh}{2\sqrt{1+m^2}}$	$\frac{1}{4}\left[1-\frac{\sin\theta}{\theta}\right]D$	$\frac{2B^2h}{3B^2+8h^2}$ *
top width B	b	$b+2mh$	$2mh$	$(\sin\theta/2)D$ or $2\sqrt{h(D-h)}$	$\frac{3}{2}Ah$
hydraulic depth D_h	h	$\frac{(b+mh)h}{b+2mh}$	$\frac{1}{2}h$	$\left[\frac{\theta-\sin\theta}{\sin\theta/2}\right]\frac{D}{8}$	$\frac{2}{3}h$

Figure V.1: Caractéristiques géométriques des diverses sections de canaux ouverts

V.2.3 Choix des paramètres de dimensionnement :

Lors de l'aménagement d'un cours d'eau, il est essentiel de respecter les principes directeurs et les normes en vigueur. Dans le cadre de l'étude relative à l'aménagement de l'oued Khoudja, il convient de prendre en compte des paramètres hydrauliques clés tels que le débit de dimensionnement (Q aménagé), la pente longitudinale, ainsi que la rugosité du lit. Ces éléments doivent être intégrés tout en respectant les exigences de sécurité et en prévoyant une marge de sécurité suffisante face aux incertitudes.

Pour assurer une protection efficace de la partie est de la ville de Ain Bouyahia, une connaissance approfondie du site est indispensable afin de concevoir des solutions techniques adaptées, à la fois efficaces et durables.

V.2.3.1 Sélection de la pente appropriée pour le projet :

Dans le cadre de l'aménagement d'un oued, le choix de la pente des tronçons constitue un paramètre essentiel pour garantir un écoulement optimal, limiter les risques d'érosion et d'inondation, et assurer une efficacité hydraulique maximale. Dans cette perspective, deux pentes uniformes ont été retenues, chacune adaptée aux caractéristiques spécifiques des tronçons concernés. Ce choix vise à maîtriser les débits de manière efficace tout en réduisant les impacts environnementaux liés aux aménagements hydrauliques.

V.2.3.2 Coefficient de rugosité :

Le coefficient de rugosité représente la résistance à l'écoulement générée par les irrégularités du revêtement du canal. Il influence directement la vitesse et le débit de l'eau en modifiant les conditions d'écoulement. Les valeurs typiques de rugosité (souvent exprimées selon le coefficient de Manning) varient en fonction du type de revêtement et sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.1 : Valeurs du coefficient de rugosité .

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

V.2.3.3 Marge de sécurité dans les canaux :

Dans les canaux à surface libre, des pertes de charge non prévues peuvent provoquer une élévation du niveau de la ligne d'eau, augmentant ainsi le risque de débordement. Il est donc indispensable d'intégrer une marge de sécurité au-dessus du niveau d'eau calculé, afin de tenir compte de facteurs perturbateurs tels que l'accumulation de sédiments, la végétation aquatique, ou encore les vagues induites par le vent.

Selon les recommandations techniques (Lencastre, 2008), cette marge de sécurité varie généralement de 0,30 m pour les petits canaux, jusqu'à 0,60 à 1,20 m pour les grands canaux, en fonction des conditions d'exploitation et des risques identifiés. Il convient d'évaluer avec précision l'ensemble des circonstances locales susceptibles d'influencer cette hauteur de sécurité.

Tableau V.2 : La Revanche utilisée en fonction du débit.

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

V.2.3.4 Vitesse d'érosion :

Afin de prévenir les dégradations du fond et des berges des canaux provoquées par l'action dynamique de l'eau, il est essentiel de veiller à ce que la vitesse d'écoulement reste inférieure à la vitesse limite d'érosion. Cette vitesse critique dépend du type de revêtement du lit et de sa résistance à l'arrachement. Les valeurs seuils de la vitesse d'érosion en fonction des matériaux de revêtement sont présentées dans le tableau ci-dessous, conformément aux données de Degoutte (2012).

Tableau V.3 : Les intervalles des vitesses pour éviter l'érosion du lit.

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	10.0

V.3 Étude des Variantes :

Dans le cadre de cette étude, trois variantes d'aménagement de l'oued sont proposées, dans le but de protéger la partie est de la ville d'Ain Bouyahia contre les effets des crues centennales. Chaque solution a été conçue pour permettre l'évacuation d'un débit de projet de 38 m^3/s, tout en prenant en compte les contraintes techniques, environnementales et urbaines de la zone.

Les variantes envisagées sont les suivantes :

1) Canal trapézoïdal en béton armé.
2) Canal trapézoïdal en enrochement.
3) Canal trapézoïdal en gabion.

Pour chacune des variantes proposées, des calculs hydrauliques seront réalisés à l'aide de simulations numériques sous HEC-RAS, afin d'évaluer précisément les conditions d'écoulement dans les différents tronçons du cours d'eau. Une analyse comparative détaillée permettra d'identifier la solution la plus appropriée, en tenant compte de sa performance technique et de sa faisabilité économique.

Par ailleurs, pour renforcer la sécurité civile face aux risques d'inondation et réduire la vulnérabilité des populations, il est essentiel de mettre en œuvre des plans d'action opérationnels, incluant des systèmes d'alerte précoce, la sensibilisation des habitants et la préparation de scénarios de gestion de crise. Une attention particulière doit être portée à la surveillance des digues, afin de prévenir la formation de vagues ou les ruptures localisées.Il convient également de prévoir des mesures d'intervention rapide et de protection des infrastructures sensibles lors des événements extrêmes.

V.3.1 Canal en béton :

La première solution consiste en la réalisation d'un canal trapézoïdal en béton armé, retenu pour ses nombreux avantages techniques et fonctionnels. Ce type de canal permet une gestion efficace des débits projetés, tout en limitant considérablement les risques d'obstruction grâce à ses parois lisses et régulières. Il présente également une grande stabilité structurelle face aux forces hydrauliques, réduisant ainsi les risques d'érosion du lit et des berges. Le choix du béton armé offre une durabilité élevée et une longue durée de vie, même sous des conditions de sollicitations hydrauliques intenses. La pente des talus, définie par un coefficient m = 1 (soit un angle de 45°), facilite à la fois la construction et l'adaptation au relief existant. De plus, ce canal est rapide à mettre en œuvre, requiert une maintenance réduite et s'intègre efficacement dans un contexte urbain, tout en assurant une protection optimale contre l'érosion.

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

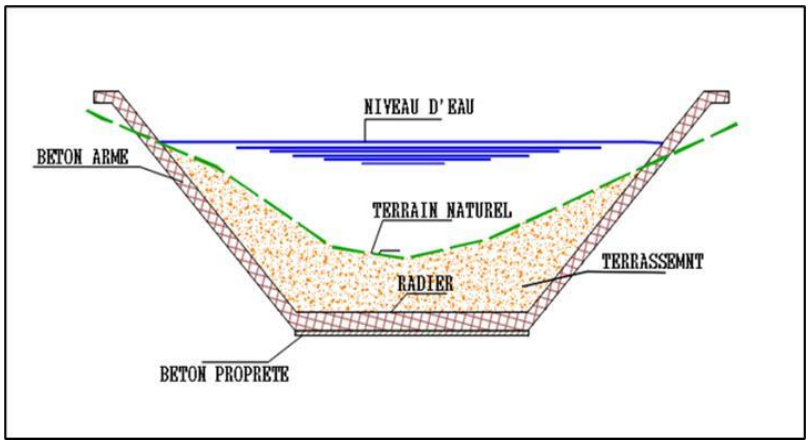


Figure V.2: canal trapézoïdale en béton armé.

- **Dimensionnement :**

Les caractéristiques du canal ont été déterminées à l'aide du logiciel FLOW MASTER.

La première option proposée est un canal trapézoïdal en béton armé. Conformément au plan, la profondeur normale de cette section est de 6.12 m, et le canal s'étend sur 537 mètres en traversant la ville de Ain Bouyahia Côté ouest. Ce canal est conçu pour gérer un débit de 38 m³/s.

Tableau V.4 : Dimensions de l'aménagement en béton armé pour oued Khoudja.

Tronçon	Section de départ	Section Darrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal (m)	La rugosité
Complet	1091	45	1095	0.004	1	4	6.25	1.5	0.013

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

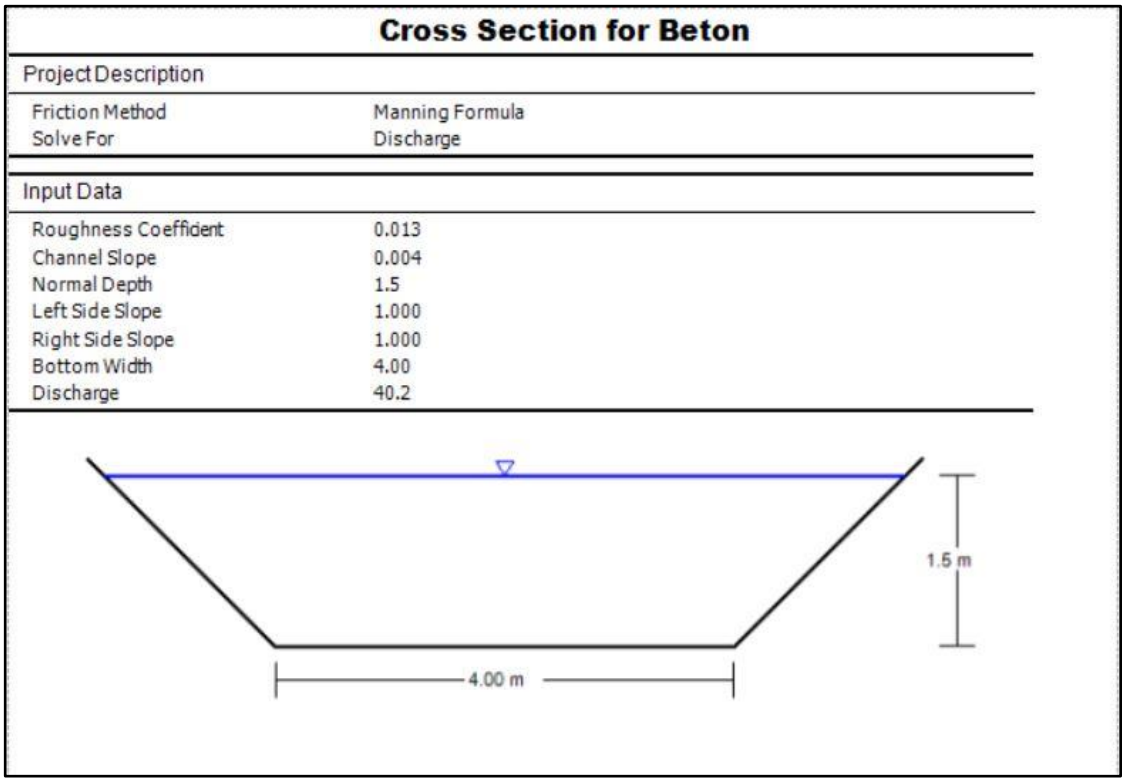


Figure V.3: dimensions du canal trapézoïdal en béton armé d'oued Khoudja.

- **Paramètres d'écoulement :**

Tableau V.5 : Les résultats de la simulation d'écoulement du canal en béton d'oued Khoudja .

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	
1091	285.60	286.60	287.36	289.57	0.015020	7.13	7.47	4.99	1.86
1047	283.00	283.82	284.76	288.50	0.028879	7.24	6.47	4.65	1.96
1004	280.25	280.99	282.00	286.91	0.040749	6.97	6.3	4.59	1.9
967	277.50	278.20	279.27	285.11	0.051220	6.91	5.7	4.36	1.93
907	274.40	275.09	276.16	282.05	0.051689	7.16	5.73	4.38	2.00
853	272.40	273.13	274.16	279.25	0.042724	6.48	5.96	4.46	1.79
808	268.28	268.94	270.04	276.76	0.061531	6.83	5.56	4.31	1.92
755	266.30	267.01	268.06	273.54	0.047022	8.29	5.86	4.42	2.30
698	263.70	264.42	265.46	270.87	0.046231	6.86	5.88	4.43	1.9
654	262.30	263.05	264.06	268.79	0.038915	6.84	6.08	4.51	1.88
611	261.30	262.10	263.06	267.04	0.031282	6.44	6.36	4.61	1.75
558	259.30	260.09	261.06	265.30	0.033839	7.11	6.26	4.57	1.94
474	256.90	257.72	258.67	262.50	0.029833	6.82	6.42	4.63	1.85
405	253.50	254.25	255.27	260.04	0.039407	6.95	6.07	4.5	1.91
312	251.10	251.92	252.86	256.60	0.028872	6.61	6.47	4.65	1.79
168	248.50	249.43	250.26	252.93	0.018925	7.15	7.09	4.86	1.89
79	246.70	247.62	248.46	251.20	0.019580	7.52	7.04	4.84	1.99
45	244.90	245.73	246.67	250.32	0.028066	6.81	6.51	4.66	1.84

• Les sections en travers :

Les sections transversales de l'Oued Khoudja, après simulation, sont illustrées dans la figure ci-dessous :

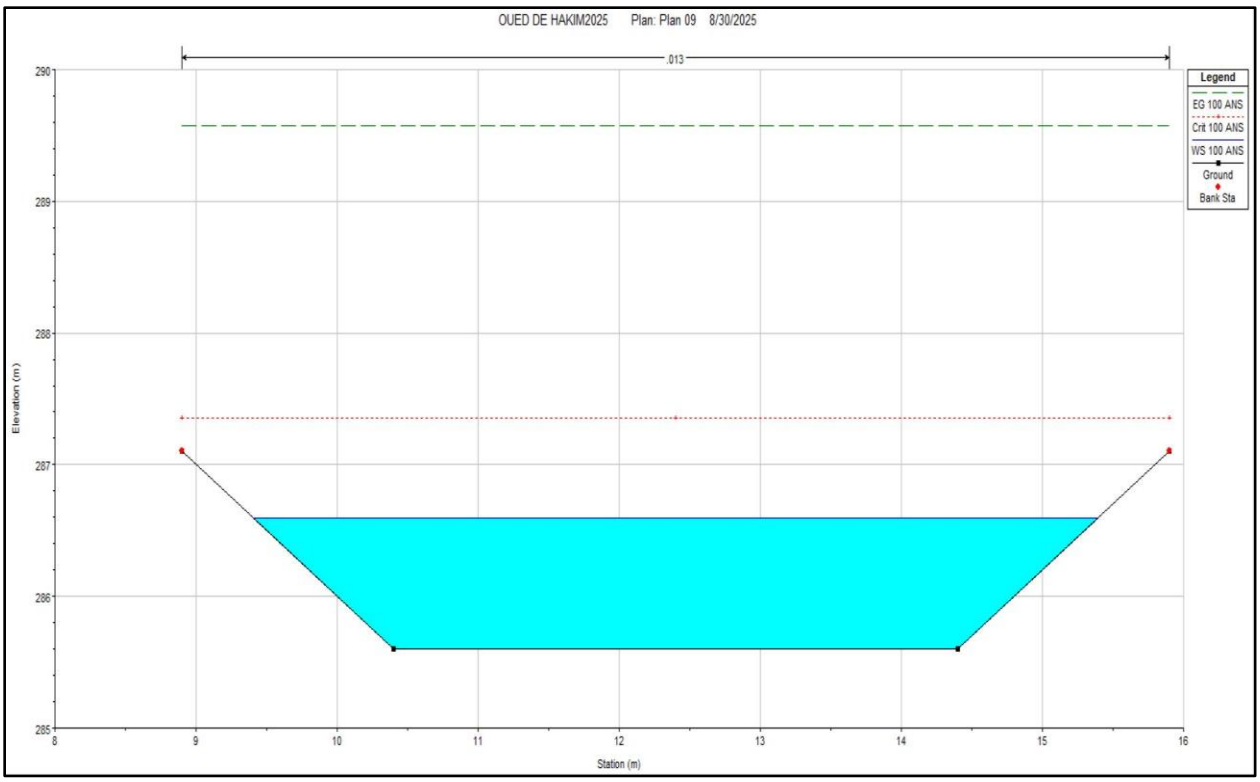


Figure V.4 : Profil transversal n°1091 d'un canal trapézoïdal en béton pour une crue centennale.

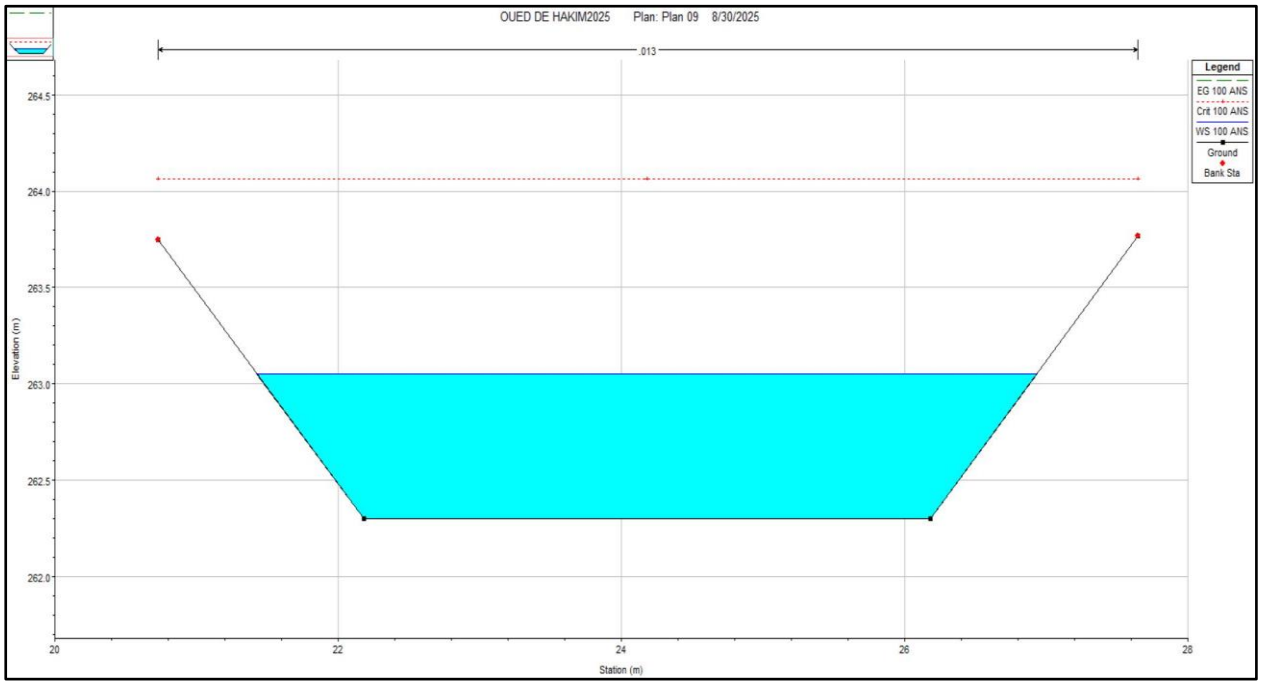


Figure V.5 : Profil transversal n°654 d'un canal trapézoïdal en béton pour une crue centennale.

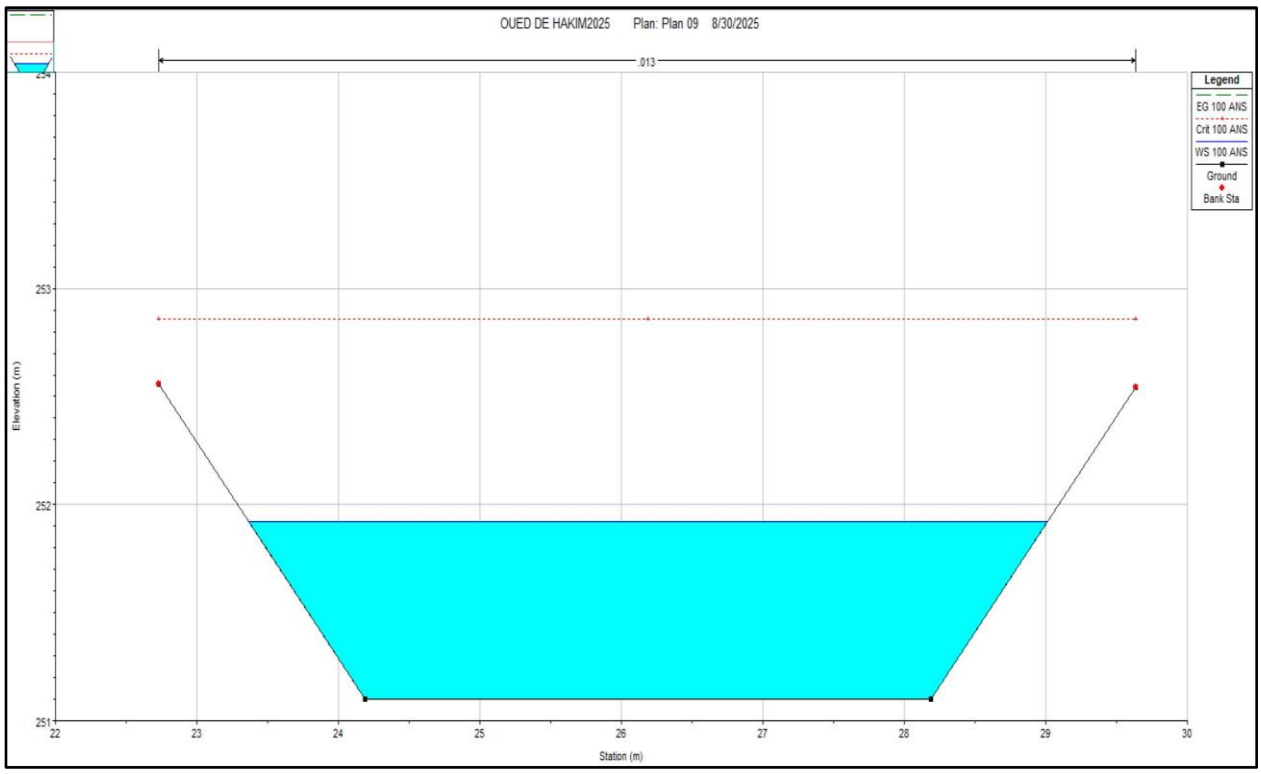


Figure V.6 : Profil transversal n°312 d'un canal trapézoïdal en béton pour une crue centennale.

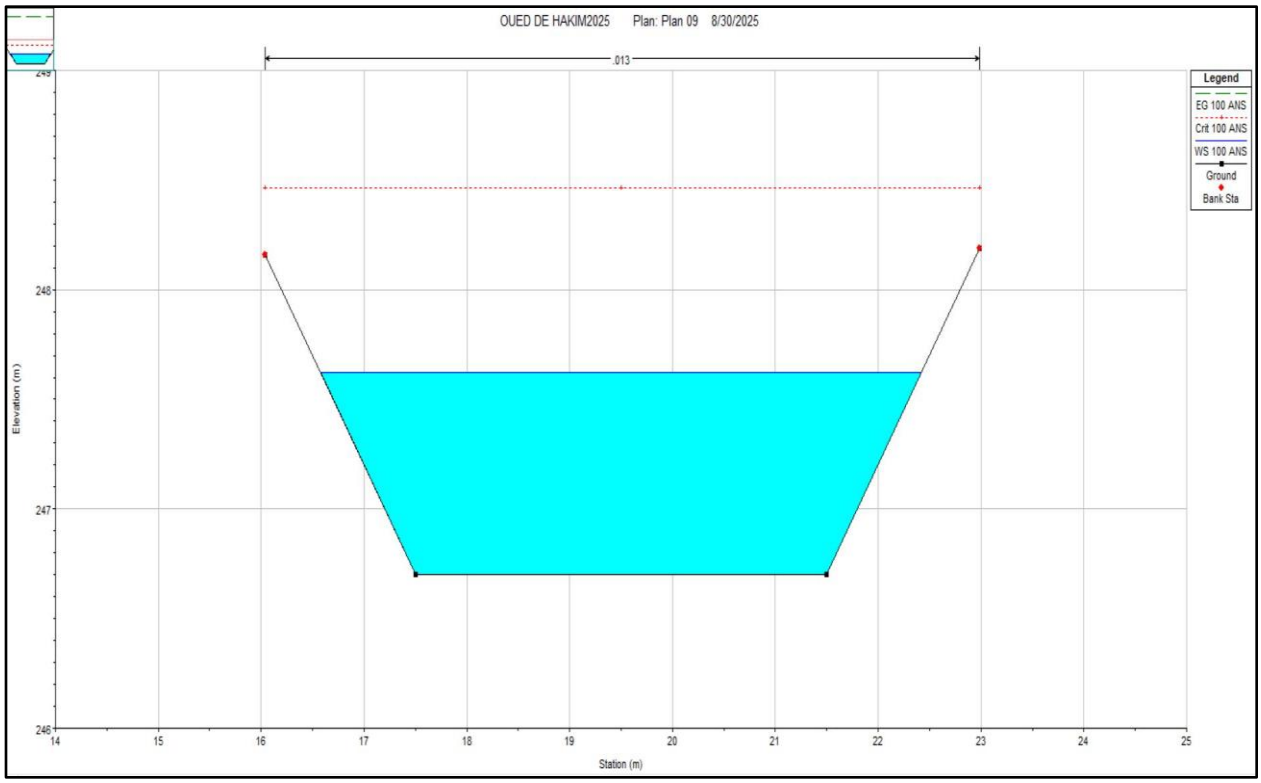


Figure V.7 : Profil transversal n°79 d'un canal trapézoïdal en béton pour une crue centennale.

• Estimation du coût de la variante :

L'épaisseur du revêtement en béton des parois d'un canal trapézoïdal se situe habituellement entre 0,15 m et 0,40 m, tandis que celle du radier varie de 0,20 m à 0,50 m (M. HASSANE, 2015, Blida).

Pour le projet étudié, les dispositions suivantes ont été adoptées :

- Les parois latérales en béton armé présentent une épaisseur de 15 cm.
- Le radier en béton armé est dimensionné avec une épaisseur de 30 cm.
- Une couche de béton de propreté de 15 cm est également prévue.

L'évaluation économique de la variante en béton armé est réalisée en fonction des volumes de terrassement ainsi que des quantités de remblai et de déblai, déterminés à l'aide du logiciel HEC-RAS.

Tableau V.6 : Devis total pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé d'oued Khoudja.

Désignations des travaux		**Unité**	**Quantité**	**Prix unitaire (Da)**	**Montant (Da)**
Terrassement	**Déblais**	m^3	10975	250	**2 743 750**
	remblais	m^3	0	700	**0**
Béton de propreté		m^3	657	13000	**8 541 000**
Béton dose a 350kg/m^3		m^3	1806.75	40000	**72 270 000**
Montant Total					**83 554 750**

Le canal en béton armé constitue une solution efficace pour l'évacuation des crues centennales, grâce à sa durabilité, sa faible rugosité de Manning qui limite les pertes hydrauliques, ainsi que son étanchéité. Sa résistance mécanique assure la stabilité structurelle, tandis que sa modularité géométrique et sa réparabilité en font un ouvrage fiable et durable avec un entretien réduit.

V.3.2 Canal en enrochement :

L'enrochement constitue une technique largement employée pour la protection et la stabilisation des berges et du lit des cours d'eau, en utilisant des blocs rocheux issus de carrières. Il consiste à disposer les matériaux en couches successives sur des talus inclinés, généralement compris entre 3/2 et 2/1, sans recours au béton.

Dans le cadre de l'aménagement de l'Oued Khoudja, destiné à protéger la partie ouest de Ain Bouyahia contre les crues, l'enrochement prévu présente un tonnage unitaire de 1 à 1,5 tonne et un diamètre médian (D50) d'environ 500 mm. Cette solution assure une stabilité mécanique durable des berges et offre une intégration harmonieuse dans le milieu naturel.

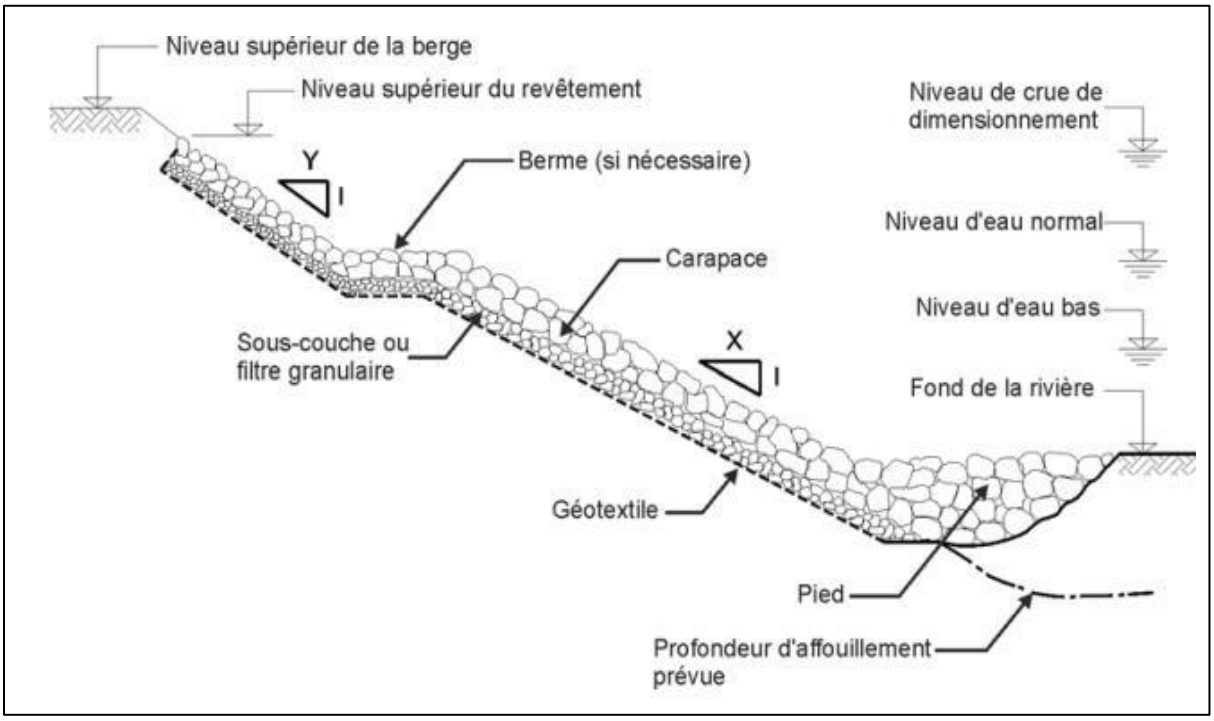


Figure V.8: Les composants structurels d'un canal en enrochement.

- **Dimensionnement :**

La seconde alternative consiste en la réalisation d'un canal trapézoïdal en enrochement d'une longueur de 1 095 m, dimensionné pour un débit de pointe de 38 m³/s. L'utilisation de blocs rocheux de carrière confère à l'ouvrage une robustesse et une durabilité accrues, assurant une protection efficace contre les crues. La géométrie adoptée favorise un écoulement fluide et contribue à la réduction des risques d'inondation.

Tableau V.7 : Dimensions de l'aménagement en enrochement pour oued Khoudja.

Tronçon	Section de départ	Section Darrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal (m)	La rugosité
Complet	1091	45	1095	0.004	2	5	6.25	2	0.035

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

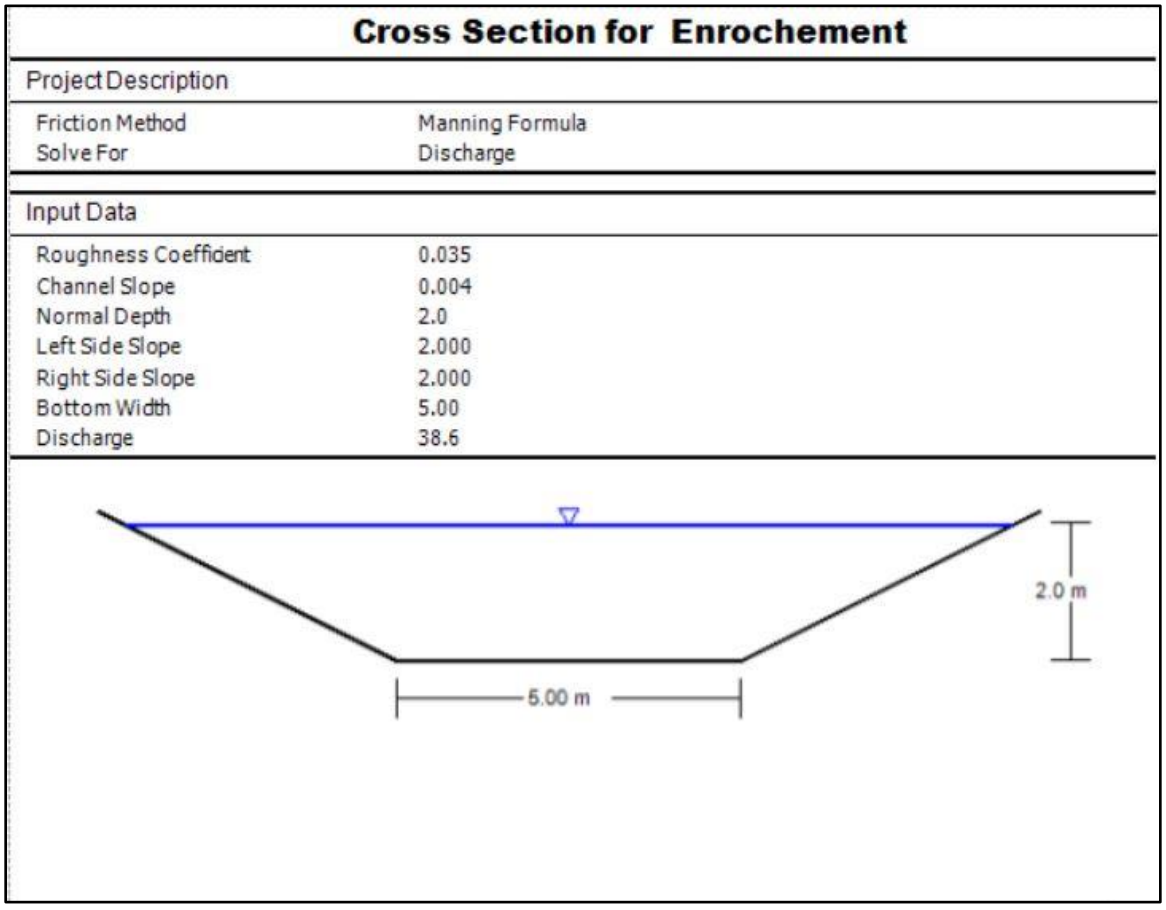


Figure V.9: Dimensions du canal trapézoïdal en Enrochement d'oued Khoudja

Tableau V.8 : Les résultats de la simulation d'écoulement du canal en Enrochement d'oued Khoudja (Source : HEC-RAS).

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	
1091	286.00	287.41	287.47	288.02	0.015005	3.44	11.04	10.64	1.08
1047	282.80	283.59	284.27	286.33	0.127875	4.84	5.18	8.15	1.94
1004	281.00	282.13	282.47	283.24	0.035166	4.67	8.14	9.46	1.61
967	277.80	278.63	279.27	281.01	0.104174	3.25	5.56	8.34	1.27
907	275.33	276.49	276.80	277.51	0.031102	3.29	8.51	9.65	1.12
853	272.80	273.81	274.27	275.29	0.052918	2.9	7.05	9.01	1.05
808	268.94	269.79	270.41	272.04	0.096267	4.05	5.72	8.41	1.57
755	266.00	267.05	267.47	268.39	0.045463	5.12	7.43	9.14	1.81
698	264.15	265.35	265.62	266.28	0.027608	4.28	8.88	9.80	1.44
654	261.60	262.53	263.07	264.35	0.071365	3.32	6.35	8.71	1.24
611	261.30	262.77	262.77	263.31	0.012912	3.26	11.65	10.87	1.01
558	259.60	260.63	261.07	262.03	0.048900	5.24	7.25	9.11	1.88
474	257.60	258.99	259.07	259.62	0.015979	3.52	10.79	10.55	1.11
405	253.90	254.73	255.37	257.14	0.106510	3.82	5.52	8.32	1.50
312	250.90	252.20	252.37	252.96	0.020726	3.87	9.83	10.18	1.26
168	248.10	249.44	249.57	250.14	0.018456	3.71	10.25	10.35	1.19
79	246.30	247.59	247.77	248.36	0.021201	3.90	9.75	10.15	1.27
45	244.70	245.70	246.17	247.21	0.054635	5.44	6.98	9.02	1.98

- **Interprétation**

- **Nombre de Froude (Fr) :** Les résultats indiquent un régime torrentiel (Fr > 1), ce qui confirme la nature rapide de l'écoulement dans le canal.
- **Vitesse d'écoulement :** Avec des valeurs comprises entre 2 et 4 m/s, la vitesse reste dans la plage techniquement admissible, garantissant l'absence de dépôts sédimentaires et limitant les risques d'érosion.

En conclusion, le canal trapézoïdal en enrochement satisfait les exigences hydrauliques et structurelles, et offre une protection efficace contre les crues.

- **Les sections en travers :**

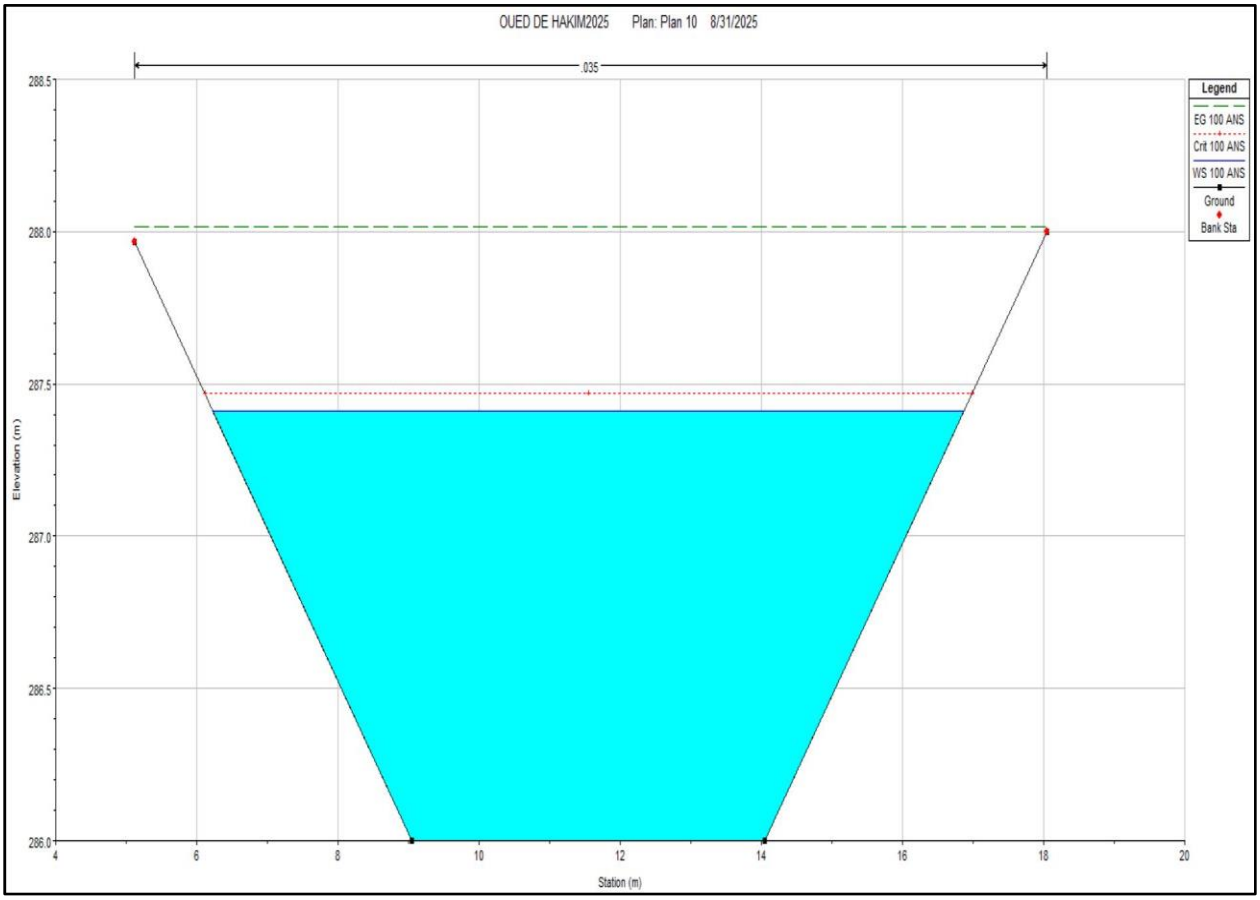


Figure V.10 : Profil transversal n°1091 d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue

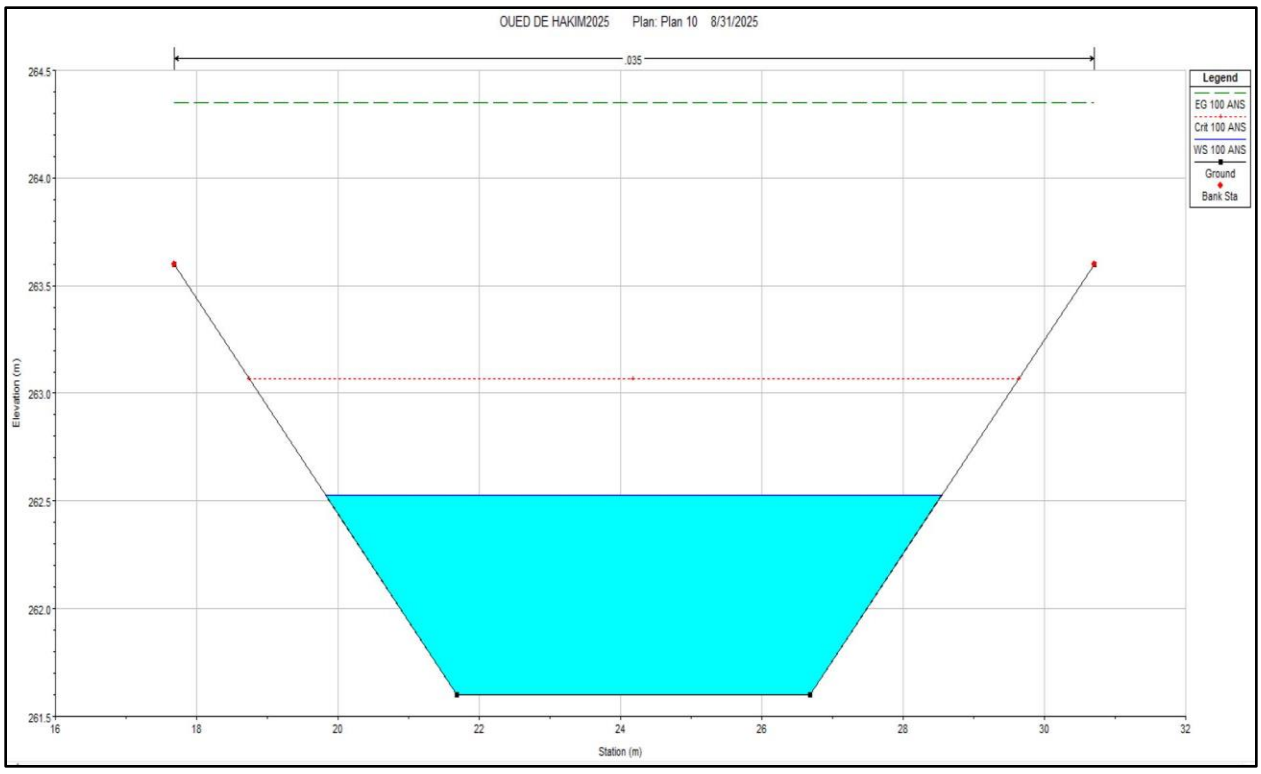


Figure V.11 : Profil transversal n°654 d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue

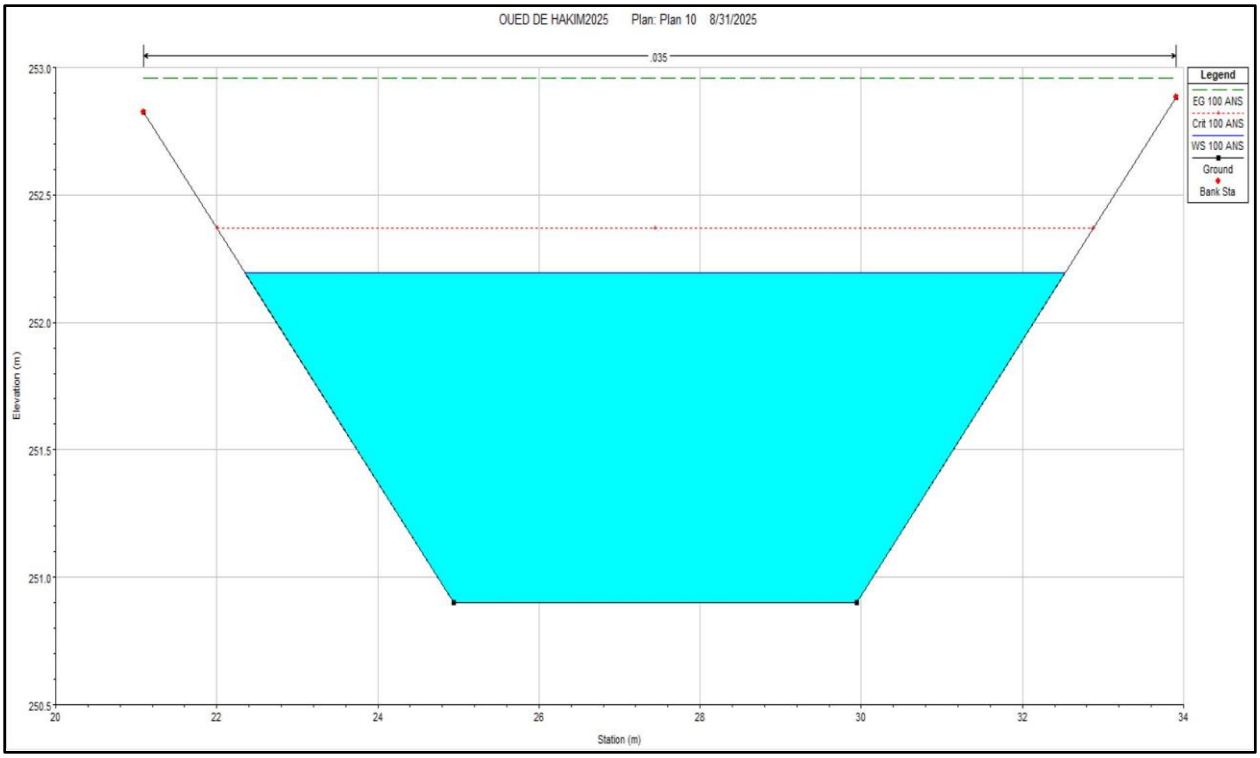


Figure V.12 : Profil transversal n°312 d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue

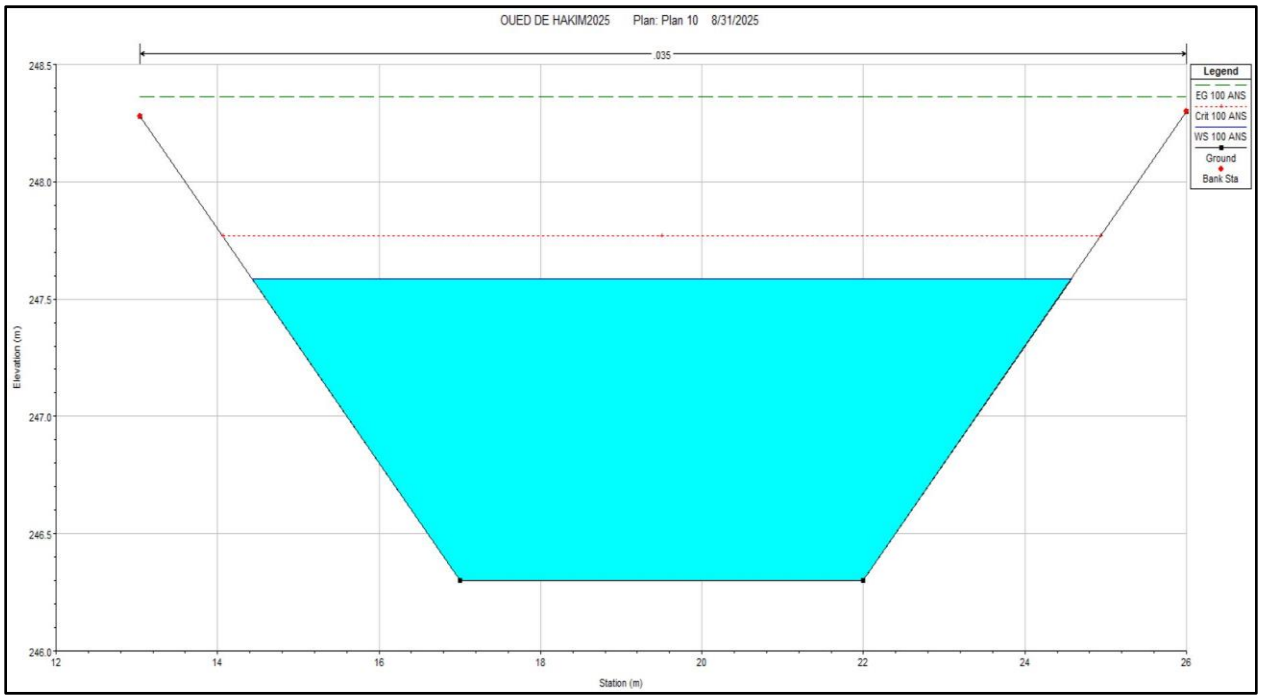


Figure V.13 : Profil transversal n°79 d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue

- **Conception du canal en enrochement :**

L'enrochement constitue une technique couramment appliquée pour la stabilisation des berges et du lit des cours d'eau**.** Elle consiste à disposer des blocs rocheux de carrière en couches successives, sur des talus inclinés généralement compris entre 3/2 et 2/1, sans recours à des liants en béton.

Dans le cadre de l'aménagement de l'Oued Khoudja, destiné à protéger la ville contre les crues, l'enrochement prévu présente un tonnage unitaire compris entre 1 et 1,5 tonne, avec un diamètre médian (D50) d'environ 500 mm**.**

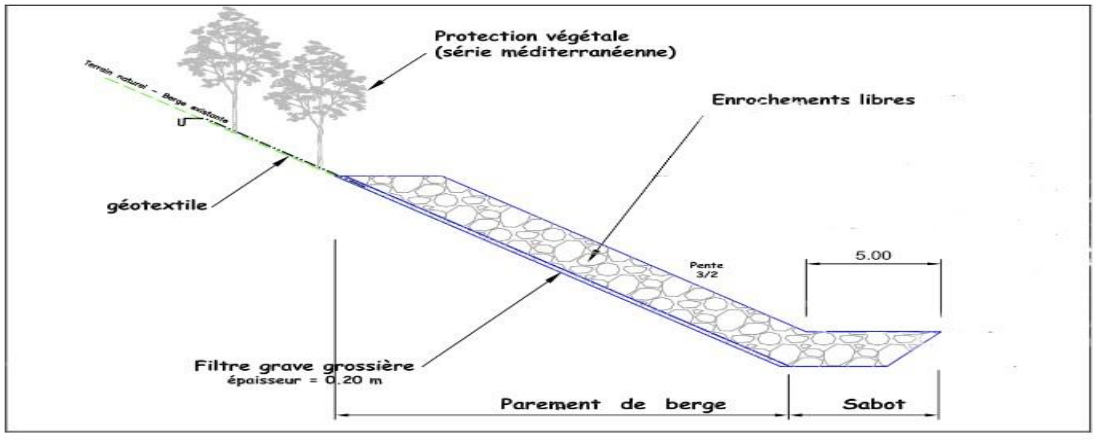


Figure V.14 : Canal en enrochement.

- **Epaisseur orthogonale théorique td :**

$$td = n \times D50 \quad (V.11)$$

Avec :

D50: diamètre median (d50=0.5m).

n: nombre de couche.

td : épaisseur orthogonale théorique (m).

- **Les sections d'enrochement :**

$$L_{talus} = h\sqrt{1 + m^2} \quad (V.12)$$

D'où :

$$S = L \times L_{talus} \quad (V.13)$$

Avec:

L: Longueur de tronçon.

h: Hauteur du tronçon.

m : fruit de talus (dans le cas d'enrochement m=2).

Tableau V.9 : Calcul les sections de la variante d'enrochement.

	Longueur (m)	**Largeur (m)**	**Surface (m^2)**
La base	1095	2.5	2737.5
Talus droite	1095	4.47	4894.65
Talus Gauche	1095	4.47	4894.65

- **Volume globale de dimensionnement :**

$$V = S \times td \quad (V.14)$$

Avec :

S : surface d'enrochement (m2).

td : épaisseur orthogonale théorique (m).

Tableau V.10 : Calcul le volume d'enrochement.

	Nombre de couche	D50 (m)	td(m)	S (m^2)	V (m^3)
Fond	1	0.5	0.5	2737.5	1368.75
Talus Gauche	1	0.5	0.5	4894.65	2447.33
Talus Droite	1	0.5	0.5	4894.65	2447.33
Volume Total					6263.41

Tableau V.11 : section du géotextile.

	S (m^2)
Fond	2737.5
Talus Gauche	4894.65
Talus Droite	4894.65
Surface Totale	12526.8

Parmi les matériaux disponibles sur site, le sable et les galets présentent des propriétés drainantes adaptées à la réalisation de filtres et de couches de fondation. L'utilisation de géotextiles filtrants constitue une alternative performante aux filtres granulaires classiques, en offrant une meilleure durabilité et une efficacité accrue en termes de séparation et de filtration. Dans certains aménagements, la combinaison de blocs d'enrochement et de végétation peut contribuer à la stabilisation des berges et à la protection contre l'érosion. Toutefois, les géotextiles sont souvent privilégiés en raison de leur capacité à assurer simultanément la filtration et la stabilité mécanique de l'ouvrage

- **Évaluation du coût de la variante :**

Présentés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau V.12 : Estimation du cout pour la variante d'enrochement d'oued Khoudja.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (Da)	Montant (Da)
Terrassement	**Déblais**	m3	11483	250	**2 870 750**
	Remblais	m3	0	700	**0**
Enrochement		m3	6263.41	15000	**93 951 150**
Géotextile		m2	12526.8	3000	**37 580 400**
Montant total					**134 402 300**

L'enrochement est une technique couramment utilisée pour la protection du lit et des berges des chenaux à surface libre contre l'érosion, présentant à la fois des avantages hydrauliques et environnementaux. Sa structure, constituée de blocs rocheux, s'intègre naturellement dans le paysage et favorise rapidement le développement de la végétation, renforçant ainsi la stabilité écologique des berges. Cependant, cette solution comporte certaines limites. Son coût élevé est lié au prix des matériaux, aux frais de transport et à la nécessité d'une main-d'œuvre spécialisée pour la mise en place. De plus, les canaux en enrochement exigent un emprise plus importante que d'autres types d'ouvrages, ce qui peut représenter une contrainte dans les zones urbaines ou à espace restreint. Enfin, bien que les blocs assurent une résistance efficace à l'érosion, leur mobilité au fil du temps impose des contrôles périodiques et un entretien régulier afin de garantir la pérennité de l'ouvrage..

V.3.3 Canal en gabion :

Le gabion est une structure composée de casiers en treillis métallique remplis de blocs pierreux ou de graviers, largement employée dans les travaux de stabilisation des sols, de protection contre l'érosion, de construction de murs de soutènement et de revêtement de canaux. Les matelas en gabion, disponibles en différentes dimensions (par exemple 2,0 × 1,0 × 0,5 m ou 2,0 × 1,0 × 1,0 m), sont particulièrement utilisés pour la protection des berges contre les affouillements et pour assurer leur stabilité. Lors de la mise en place, les gabions sont généralement posés en disposition étagée (escalier), ce qui améliore leur résistance mécanique et leur durabilité dans le temps.

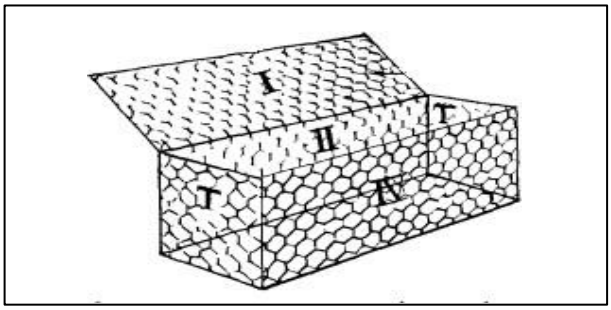


Figure V.15 : Cage métallique du gabion.

- **Dimensionnement :**

La troisième variante consiste en la réalisation d'un canal trapézoïdal en gabion sur une longueur de 1 095 m. Ce canal traverse la partie est du centre-ville, créant une séparation entre les deux rives urbaines, et est dimensionné pour un débit de projet de 38 m³/s.

Les caractéristiques géométriques et hydrauliques d'une section en gabion sont déterminées à partir des relations de dimensionnement suivantes :

- **Surface de la section Sm (m²) :**

$$Sm = 0.5k\,(k-1) + b \times k \qquad (V.15)$$

- **Périmètre mouillé Pm (m) :**

$$Pm = b + 3k - 1 \qquad (V.16)$$

- **Rayon hydraulique Rh (m) :**

$$Rh = \frac{0.5k(k-1)+bk}{b+3k-1} \qquad (V.17)$$

Avec :

k: le nombre d'étages.

b : la largeur du canal (m).

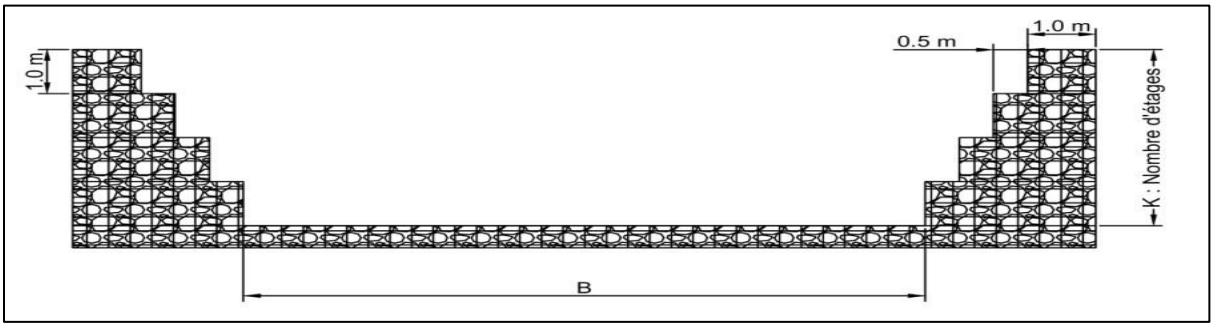


Figure V.16: schéma représente un canal trapézoïdal en gabion.

Tronçon	Section de départ	Section Darrivé	Longueur (m)	Pente du projet	Largeur du fond (m)	Hauteur du canal (m)	La rugosité
Complet	1091	45	1095	0.004	4	4	0.035

Tableau V.13 : dimensions de canal d'aménagement en gabion d'oued Khoudja.

Tableau V.14 : Résultats des calculs des paramètres pour le canal de Gabion d'oued Khoudja.

k(caisses)	Q (m^3/s)	S (m^2)	P (m)	R
10	370.371	90	33	2.727
9	272.092	72	30	2.400
8	215.403	60	27	2.222
7	166.250	49	24	2.042
6	124.223	39	21	1.857
5	88.906	30	18	1.667
4	**59.871**	**22**	**15**	**1.467**
3	36.695	15	12	1.250
2	18.974	9	9	1.000
1	6.435	4	6	0.667
0	0.000	0	3	0.000

- D'après les calculs effectués, un canal trapézoïdal en gabion composé de 4 caissons est dimensionné pour évacuer un débit de 38 m^3/s, tout en intégrant une marge de sécurité d'1 m sur l'ensemble de sa longueur. La largeur totale du canal est fixée à 4 m, garantissant ainsi une capacité hydraulique suffisante et une stabilité structurelle adaptée aux contraintes de crue.

- **Paramètres d'écoulements :**

Tableau V.15 : Les résultats de la simulation d'écoulement du canal en Gabion d'oued Khoudja

River Sta	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m^2)	(m)	
1091	283.20	285.29	285.29	286.10	0.021149	3.98	9.55	6.00	1.01
1047	280.50	281.80	282.59	284.23	0.090044	6.91	5.50	5.00	2.10
1004	277.70	279.18	279.79	280.98	0.057849	5.94	6.40	5.00	1.68
967	275.00	276.37	277.09	278.51	0.074482	6.48	5.87	5.00	1.91
907	272.10	273.76	274.19	275.14	0.039477	5.20	7.30	5.00	1.37
853	270.00	271.68	272.09	273.03	0.038063	5.14	7.40	5.00	1.35
808	265.80	266.99	267.89	270.01	0.123769	4.57	4.94	5.00	1.47

755	263.80	265.66	265.89	266.73	0.027498	4.58	8.29	5.00	1.14
698	261.50	263.06	263.59	264.65	0.048108	5.57	6.82	5.00	1.52
654	259.80	261.54	261.89	262.78	0.033943	4.94	7.70	5.00	1.27
611	258.80	260.89	260.89	261.70	0.021144	3.98	9.55	6.00	1.01
558	256.90	258.48	258.99	260.03	0.046659	5.52	6.89	5.00	1.50
474	254.50	256.59	256.59	257.40	0.021145	3.98	9.55	6.00	1.01
405	251.10	252.44	253.19	254.70	0.080510	4.31	5.71	5.00	1.29
312	248.70	250.96	250.79	251.62	0.015822	4.01	10.55	6.00	0.97
168	246.10	248.19	248.19	249.00	0.021145	3.98	9.55	6.00	1.01
79	244.20	246.29	246.29	247.10	0.021389	4.00	9.51	6.00	1.01
45	242.40	243.82	244.49	245.81	0.067089	6.25	6.08	5.00	1.81

- **Interprétation :**

  - **le nombre de Froude :** Les valeurs du nombre de Froude montrent un régime d'écoulement torrentiel lorsque Fr > 1. Les résultats confirment clairement cette observation, indiquant un tel régime d'écoulement.
  - **Vitesse d'écoulement** : Avec des vitesses comprises entre 3,98 et 6,91 m/**s**, les résultats restent dans la plage des vitesses admissibles, excluant ainsi les risques d'envasement et d'érosion du canal.

Sur le plan technique, le canal trapézoïdal en gabions satisfait aux critères de dimensionnement et garantit une protection hydraulique fiable et durable.

- **Les sections en travers :**

Les profils transversaux de l'Oued Khoudja après la simulation sont illustrés dans la figure ci-dessous :

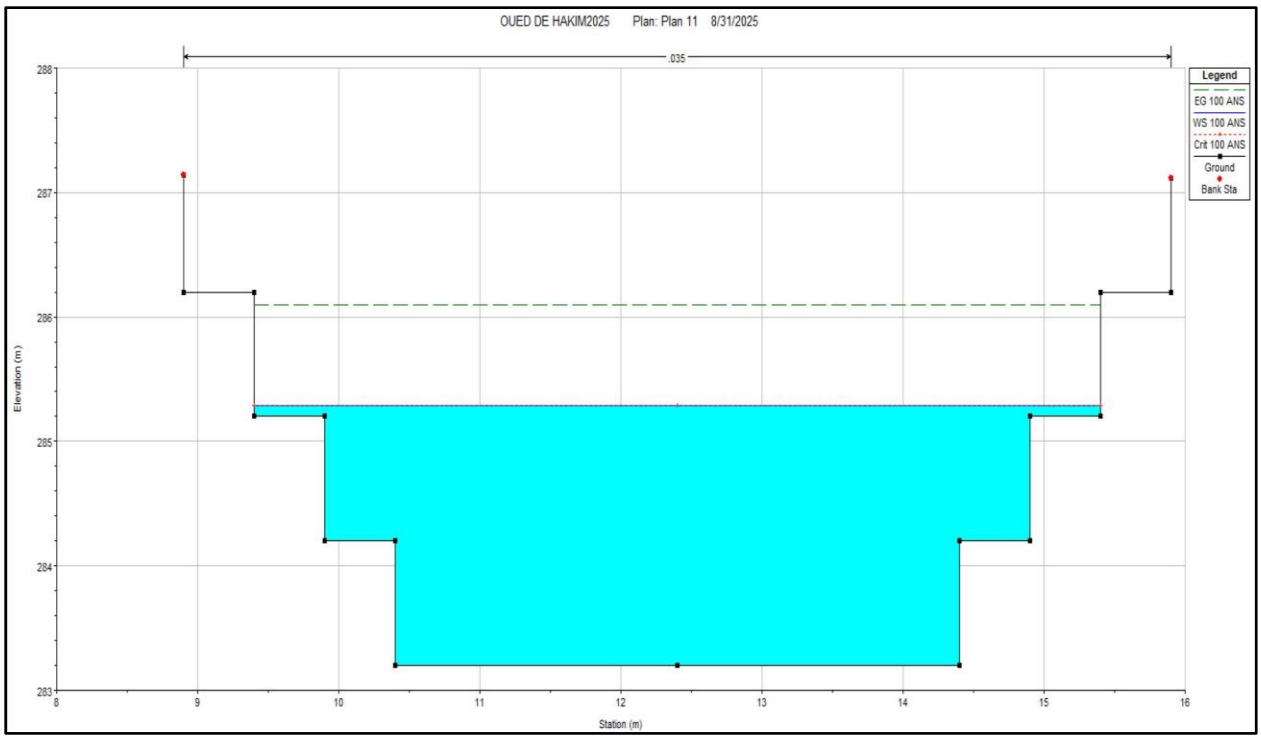


Figure V.17 : Profil transversal n°1091 d'un canal en gabion pour une crue centennale.

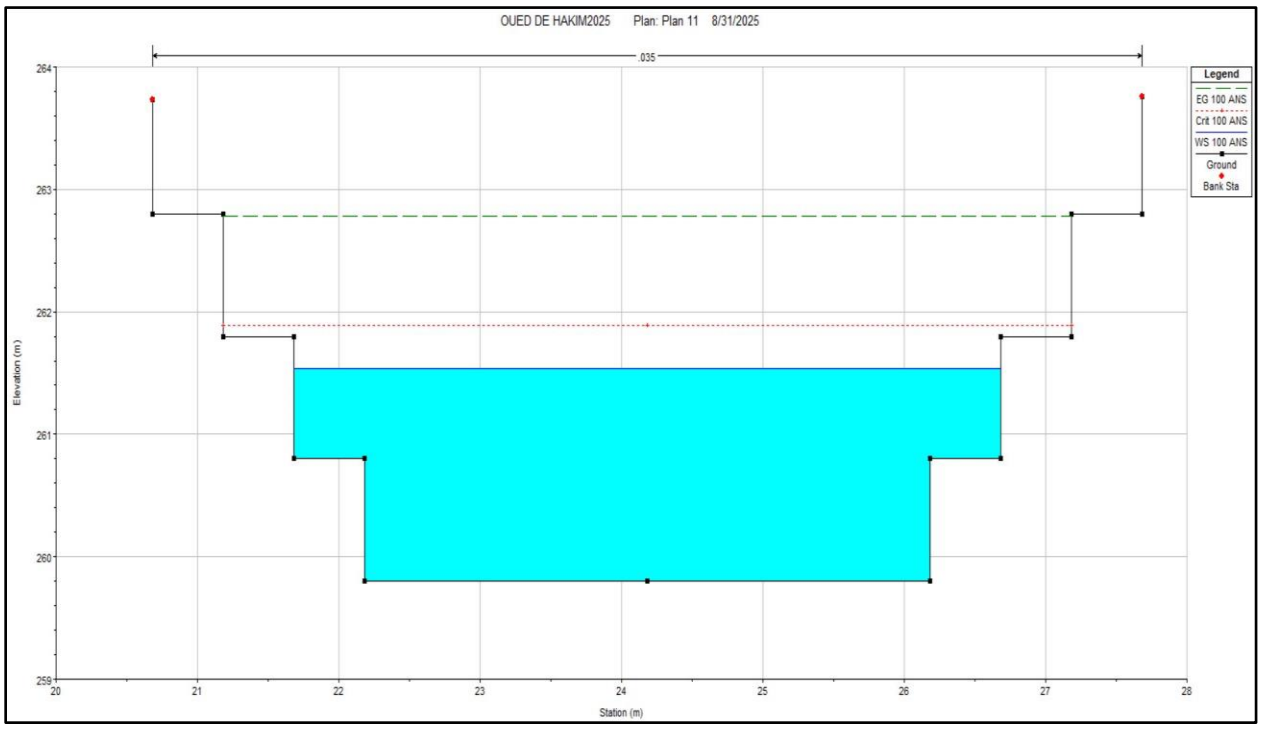


Figure V.18: Profil transversal n°654 d'un canal en gabion pour une crue centennale

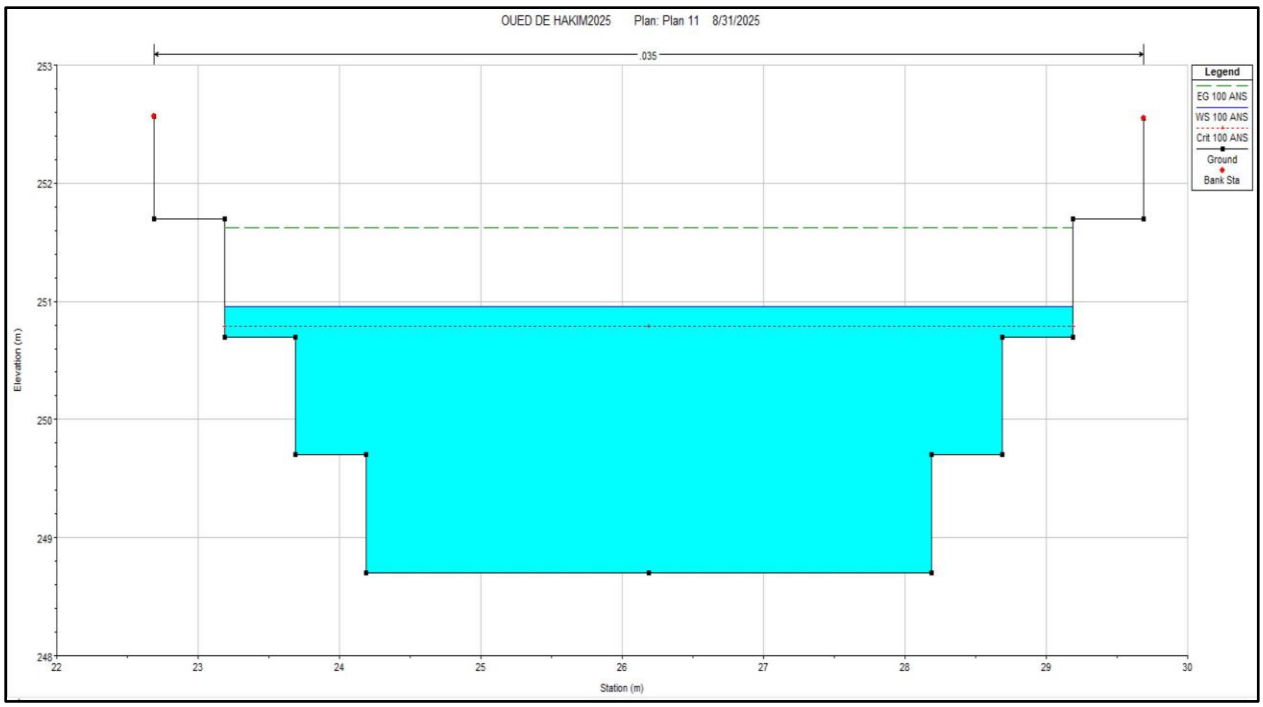


Figure V.19: Profil transversal n°312 d'un canal en gabion pour une crue centennale.

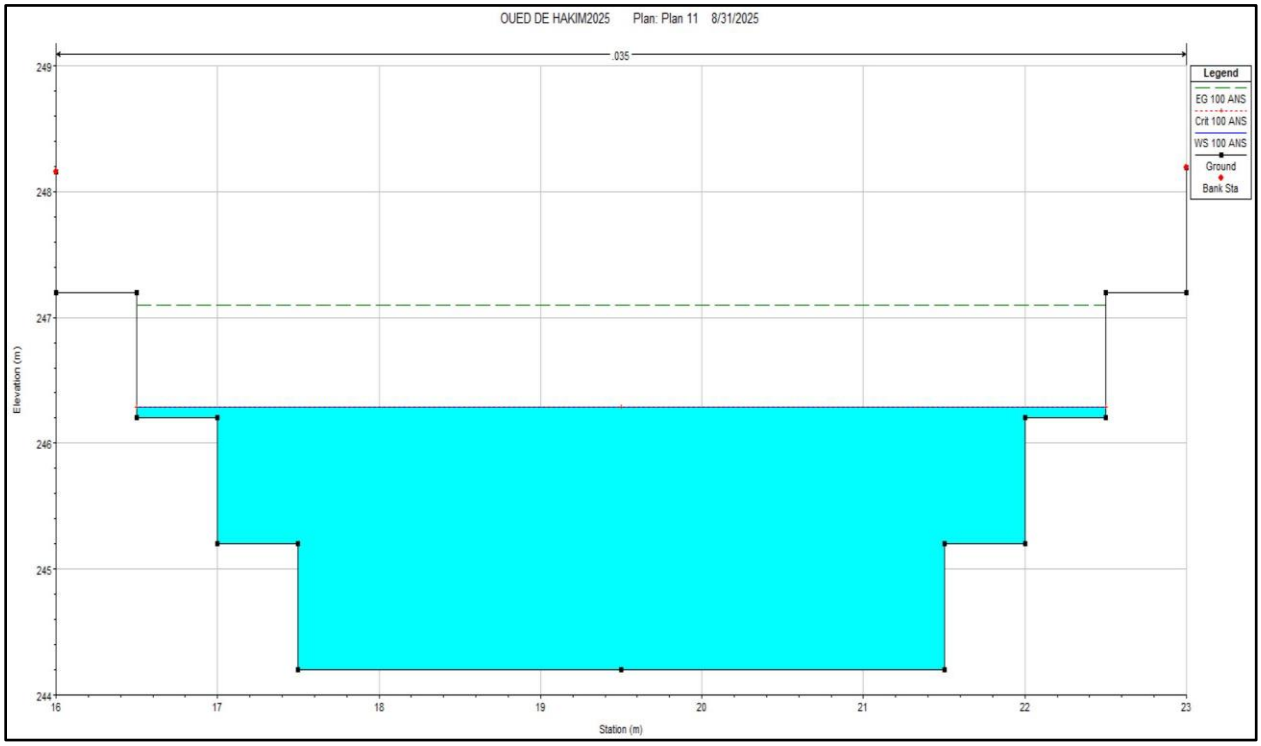


Figure V.20: Profil transversal n°79 d'un canal en gabion pour une crue centennale.

- **Evaluation du cout de la variante :**

Tableau V.16 : Estimation du cout pour la variante de gabion d'oued Khoudja

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (Da)	Montant (Da)
Terrassement	**Déblais**	m^3	20812	250	**5 203 000**
	Remblais	m^3	624.36	700	**437 052**
Gabion		m^3	8760	5000	**43 800 000**
Géotextile		m^2	10950	3000	**32 850 000**
Montant total					**82 290 052**

D'après les résultats obtenus, cette variante représente une solution efficace de protection hydraulique, principalement grâce à la flexibilité des gabions, qui leur permet de s'adapter aux déformations naturelles du terrain. Leur installation, bien qu'exigeant une certaine expertise technique, reste relativement simple et offre la possibilité d'augmenter la hauteur des structures en fonction des besoins. Cependant, cette technique présente quelques limites : la corrosion des cages métalliques, le déplacement éventuel des pierres et la perméabilité pouvant engendrer des fuites affectent la durabilité de l'ouvrage, rendant nécessaire un entretien périodique. Malgré ces contraintes, les gabions demeurent une alternative économique par rapport aux structures en béton, en particulier pour les ouvrages à écoulement déversant.

V.4 Choix de la variante d'aménagement :

Les trois variantes étudiées présentent une capacité suffisante pour évacuer le débit de crue sans risque de débordement. Le choix de la solution d'aménagement repose donc sur des critères technico-économiques, intégrant des considérations liées à la sécurité des investissements, à la protection de l'environnement, à la prévention de l'érosion des berges ainsi qu'à l'amélioration de l'esthétique urbaine. Ce choix prend également en compte les priorités locales, les spécificités environnementales et la géomorphologie du cours d'eau.

Dans le cas de l'Oued Khoudja, qui traverse la partie est de la ville de Ain Bouyahia , la solution retenue vise à concilier protection hydraulique et intégration paysagère. Ainsi, l'aménagement du tronçon a été conçu sous la forme d'un canal trapézoïdal en gabion, offrant à la fois une efficacité hydraulique élevée et une harmonie avec l'environnement urbain. En conséquence, la variante en gabion a été sélectionnée comme option principale pour l'aménagement de l'Oued Khoudja.

V.4.1 Recommandation :

Dans le cadre de la protection de la ville d'Aïn Bouyahia contre les crues centennales, la mise en place de bassins de rétention constitue une solution hydraulique stratégique. Ces ouvrages sont conçus pour stocker temporairement les volumes excédentaires générés lors des épisodes de crue, afin de limiter les apports instantanés en aval. Le principe de fonctionnement repose sur une régulation contrôlée des débits sortants grâce à des dispositifs de vidange calibrés, permettant ainsi d'atténuer les hydrogrammes de pointe et de réduire significativement le risque d'inondation.

En complément de leur rôle de protection contre les crues, ces infrastructures participent à une gestion intégrée et durable de la ressource en eau. En période de sécheresse, la restitution maîtrisée des volumes stockés contribue au maintien d'un écoulement de soutien, stabilisant les débits de base et améliorant la résilience du système hydrologique local.

V.4.2 Vue en 3D des tronçons d'oued Khoudja après l'aménagement :

Les vues en trois dimensions des tronçons aménagés de l'Oued Khoudja sont présentées dans les figures ci-dessous. Ces illustrations montrent les sections du cours d'eau après aménagement, conformément à la variante combinée retenue, utilisant des gabions

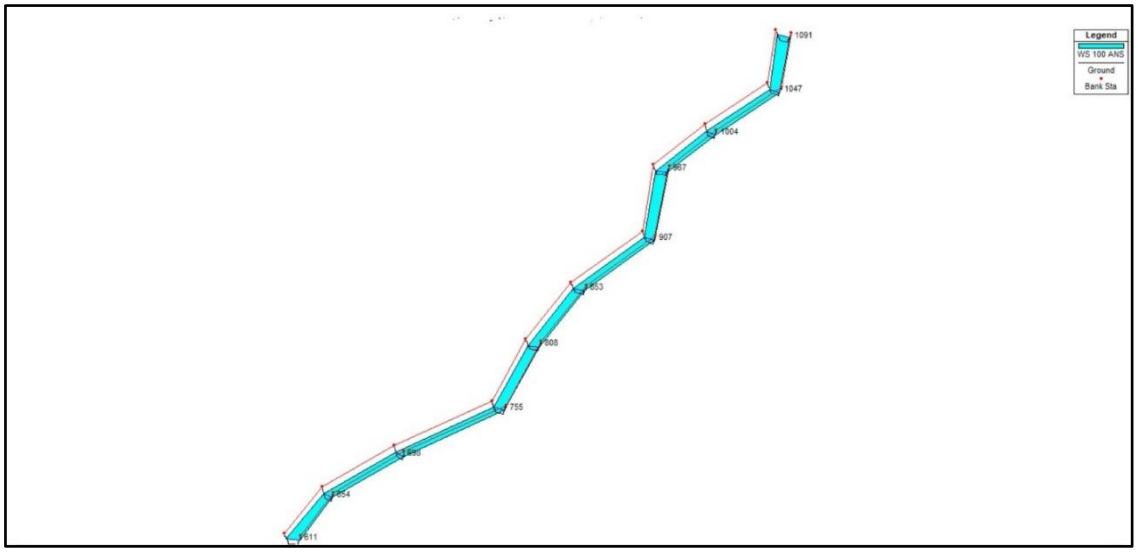


Figure V.21: Vue en 3D au cours d'oued Khoudja

V.4.3 Cartes de profondeur d'eau après aménagement :

La carte de profondeur d'eau extrait du RAS-Mapper est illustrée dans la figure suivante :



Figure V.22: Carte de profondeur d'eau après aménagement pour T = 100 ans.

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

Conclusion :

Le dimensionnement du projet d'aménagement de l'Oued Khoudja repose sur une analyse approfondie des débits d'écoulement, réalisée à l'aide de méthodes hydrologiques avancées. Cette évaluation précise a permis d'identifier les solutions de conception les plus adaptées pour assurer une protection efficace des berges. Pour l'ensemble du linéaire étudié, la solution retenue est l'aménagement de canaux trapézoïdaux en gabion, particulièrement appropriés aux sections présentant des méandres. Cette option permet en effet de limiter l'érosion sur les berges convexes et de réduire les dépôts sédimentaires sur les berges concaves, contribuant ainsi à la stabilisation et à la régulation morphologique du cours d'eau.

Par ailleurs, les revêtements en gabion offrent des avantages économiques notables, puisqu'ils constituent une solution durable, rentable et facile à entretenir, tout en répondant aux exigences esthétiques du milieu urbain. Outre leur rôle dans la protection contre la dégradation des berges, ils favorisent une intégration paysagère harmonieuse.

Afin de renforcer la sécurité hydraulique, une marge libre supplémentaire de 0,9 m a été prévue par rapport au tirant d'eau calculé. Cette surélévation permet de compenser les fluctuations de la surface libre et d'éviter tout risque de submersion des berges, assurant ainsi une résilience accrue de l'ouvrage face aux crues extrêmes.

CHAPITRE VI :
Organisation de chantier.

Introduction :

L'organisation d'un chantier repose sur la mise en place de mesures destinées à optimiser les conditions de travail, permettant ainsi une réduction notable des coûts de production. Elle crée un cadre favorable aussi bien pour les opérateurs que pour les équipements, ce qui se traduit par une hausse de productivité. Une analyse préalable et détaillée du site constitue une étape essentielle pour l'élaboration d'un planning technique rigoureux et pour une utilisation rationnelle des ressources et des engins à chaque phase du projet, tout en tenant compte des contraintes spatiales et temporelles. En définitive, une organisation efficace du chantier contribue directement à la maîtrise des coûts, en évitant les dépassements budgétaires susceptibles de compromettre la viabilité économique de l'opération.

Face aux défis inhérents à la gestion de grands projets de construction, une maîtrise approfondie de l'organisation du chantier s'avère indispensable pour garantir la réussite des travaux. Pour atteindre cet objectif, plusieurs actions stratégiques doivent être mises en œuvre :

- Définir précisément les méthodes d'exécution et les modes opératoires, en intégrant des techniques modernes de construction à haute performance.
- Assurer une coordination optimale et une répartition claire des tâches, en mobilisant une main-d'œuvre qualifiée et spécialisée.
- Structurer efficacement les postes de travail en favorisant une mécanisation progressive, afin d'accroître la productivité et de réduire les délais.
- Évaluer rigoureusement la quantité et la qualité de la main-d'œuvre nécessaire, sachant que le coût du personnel constitue un facteur déterminant du prix final du projet.

VI.1 Généralités :

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

Sur un chantier de construction, la réussite du projet repose sur la coordination et l'implication de plusieurs acteurs, chacun assumant des responsabilités spécifiques. Les principaux intervenants sont :

VI.1.1.1 Maître d'ouvrage :

Le maître d'ouvrage est une personne physique ou morale (particulier, entreprise, collectivité publique, institution) qui initie, définit et finance un projet de construction ou de réhabilitation. Il est considéré comme le décideur principal et porte la responsabilité globale du projet.

Ses principales missions sont :

- **Définition et pilotage du projet :** établir les besoins, fixer les objectifs et s'assurer du respect des délais, du budget et de la qualité.
- **Mise à disposition des données :** fournir aux prestataires toutes les informations techniques, administratives et réglementaires nécessaires à la bonne exécution du projet.
- **Respect des engagements contractuels :** veiller à ce que les accords signés avec le maître d'œuvre, les entreprises et les fournisseurs soient honorés.
- **Coordination et communication :** animer et superviser l'équipe projet afin d'assurer la cohésion entre les différents intervenants.
- **Validation des étapes clés :** approuver les choix techniques, les modifications éventuelles et la réception des travaux.

VI.1.1.2 Maître d'œuvre :

Le maître d'œuvre est désigné par le maître d'ouvrage pour assurer la conception, la direction et la supervision du projet. Il occupe un rôle central dans le suivi technique et organisationnel, en garantissant que l'ouvrage soit réalisé conformément aux attentes et dans les meilleures conditions.

Ses missions principales sont :

- **Conception technique :** élaborer les plans de construction, établir les choix techniques et veiller à la conformité avec les normes en vigueur.
- **Supervision de l'exécution :** contrôler la bonne réalisation des travaux dans les règles de l'art et s'assurer du respect des prescriptions techniques et contractuelles.
- **Gestion du chantier :** organiser, planifier et coordonner les différentes équipes présentes sur site.
- **Suivi des délais et de la qualité :** veiller au respect du calendrier prévu tout en garantissant la qualité des ouvrages réalisés.
- **Intermédiaire avec le maître d'ouvrage :** rendre compte régulièrement de l'avancement du chantier et proposer des ajustements en cas d'imprévus.

En résumé, le maître d'œuvre est le garant technique et organisationnel du projet. Une bonne coordination entre le MOA et le MOE assure la réussite, la rentabilité et la durabilité de l'ouvrage.

VI.1.1.3 L'entreprise :

L'entreprise, qu'elle soit une personne morale (société) ou physique (artisan, entrepreneur), est le prestataire ayant obtenu le contrat avec le maître d'ouvrage pour exécuter les travaux. Elle constitue l'acteur opérationnel central sur le chantier et engage sa responsabilité dans la qualité et la conformité de l'ouvrage.

Ses principales responsabilités sont :

- **Assurer la qualité** : mettre en œuvre les moyens techniques et humains nécessaires afin de livrer un ouvrage conforme aux standards et aux règles de l'art.
- **Maîtriser les coûts et les ressources :** gérer de manière optimale les matériaux, la main-d'œuvre et l'équipement pour respecter les limites budgétaires fixées.
- **Respecter le planning :** élaborer et suivre un calendrier d'exécution rigoureux pour garantir la livraison dans les délais impartis.
- **Se conformer aux obligations contractuelles :** exécuter les travaux conformément aux prescriptions techniques et administratives du contrat.
- **Exécuter les travaux :** réaliser concrètement l'ouvrage en accord avec les spécifications définies par le maître d'œuvre et validées par le maître d'ouvrage.

VI.1.1.4 L'entrepreneur :

L'entrepreneur, qu'il s'agisse d'une personne physique ou d'une société, est le principal responsable de l'exécution des travaux sur le chantier. Selon le contrat, il peut également intervenir dans la conception détaillée des ouvrages en collaboration avec le maître d'œuvre.

Ses responsabilités couvrent l'ensemble de la durée du chantier, jusqu'à la réception finale, et incluent :

- **La bonne réalisation des travaux :** conformément aux plans, aux spécifications et aux normes en vigueur.
- **La gestion de la sécurité :** en veillant à protéger les travailleurs, les équipements et l'environnement du site.
- **Le respect de la qualité :** en garantissant que l'ouvrage livré est conforme aux attentes du maître d'ouvrage et aux standards techniques.

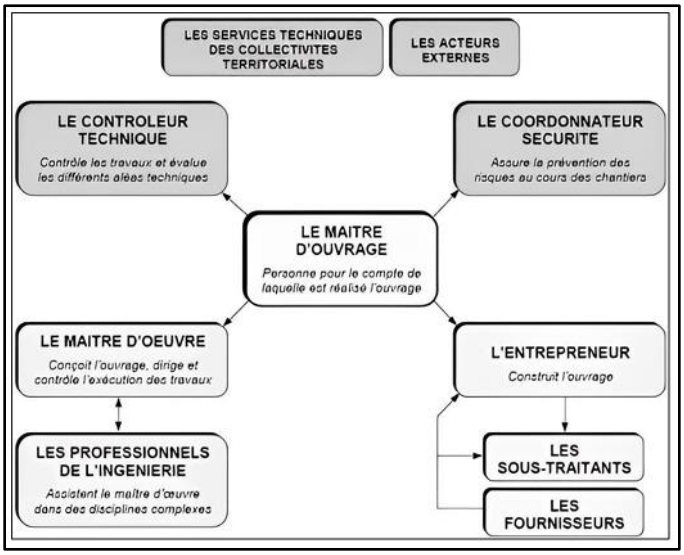


Figure VI.1 : Interactions entre les acteurs du chantier (Ghomari, 2013).

VI.2 Devis quantitatif et estimatif du projet :

L'évaluation des coûts des travaux et aménagements constitue une étape déterminante pour assurer le bon déroulement et la viabilité économique du projet. Cette estimation repose sur une analyse détaillée des différentes composantes, parmi lesquelles :

- **Coût des travaux de terrassement :** calculé à partir du volume de terrain à déplacer, exprimé en unités d'œuvre, en intégrant les contraintes spécifiques du site (nature du sol, accessibilité, conditions géotechniques, etc.).
- **Coût unitaire de la fourniture et de la pose des gabions :** déterminé en fonction du type de gabion choisi, des matériaux de remplissage, ainsi que des exigences techniques liées à leur mise en place.

Les montants estimés pour la réalisation de la variante retenue sont synthétisés dans le tableau ci-après. Ils traduisent une analyse rigoureuse visant à optimiser l'investissement, tout en garantissant la qualité et la durabilité des aménagements projetés.

Tableau VI.1 : Devis de la variante canal trapézoïdale en Gabion Totale d'oued Khoudja.

	Tronçons
Montant Totale (DA)	82,290,052
TVA 19%	15,635,110
Total TTC (DA)	97,925,165

VI.3 Planification des travaux:

VII.3.1 Définition :

La planification consiste à identifier, organiser et programmer l'ensemble des tâches d'un projet, tout en précisant les compétences et ressources nécessaires à leur réalisation. Elle représente un outil stratégique pour le chef de projet, en lui permettant d'optimiser l'efficacité et la coordination des opérations.

Les principaux objectifs de la planification sont :

- Organiser efficacement les postes de travail afin d'éviter les pertes de temps et d'améliorer la répartition des ressources.
- Assurer un suivi en temps réel des opérations pour anticiper les écarts et corriger rapidement les retards éventuels.
- Analyser en détail chaque tâche afin de définir les priorités et les interdépendances.
- Évaluer la durée nécessaire à la réalisation de chaque tâche par des méthodes de chronométrage et d'estimation.
- Simplifier et rationaliser les méthodes de travail dans le but d'accroître la productivité et de réduire les coûts.

VI.3.2 Étapes de la planification :

La planification constitue un processus méthodique qui guide l'exécution du projet à travers plusieurs étapes clés :

- **Collecte des informations :** Elle consiste à regrouper et analyser l'ensemble des données disponibles, notamment celles issues d'études comparatives, afin de disposer d'une base solide pour élaborer un plan de réalisation optimisé.
- **Décomposition du projet :** Le projet est découpé en tâches élémentaires, chacune étant confiée à un responsable défini. Pour chaque tâche, les besoins en matériel, en main-d'œuvre et la durée d'exécution sont estimés selon les cadences de travail des équipes et des équipements.
- **Gestion des relations entre les tâches :** Deux logiques d'enchaînement sont prises en compte :

    1. La séquence stricte, où l'achèvement d'une tâche conditionne le démarrage de la suivante.
    2. Les parallélismes ou préférences, permettant l'exécution simultanée de certaines tâches ou leur ordonnancement selon des contraintes spécifiques.

- **Choix de la méthode de calcul :** La méthode retenue dépend de la nature et de la complexité du projet. Dans le cas présent, où les tâches s'enchaînent selon une logique stricte, la méthode du chemin critique (Critical Path Method – CPM) s'avère la plus adaptée pour déterminer la durée minimale du projet et identifier les tâches critiques.

VI.3.3 Plannings des travaux :

Dans le cadre de la gestion de projet, la planification peut être abordée selon trois stratégies principales :

- **Planification au plus tôt :** Chaque tâche débute dès que les conditions techniques et organisationnelles le permettent. Cette approche est privilégiée par les entreprises disposant de ressources importantes et opérant simultanément sur plusieurs projets. Elle permet de réduire au minimum la durée totale du chantier.
- **Planification au plus tard :** Les tâches commencent à la date la plus tardive possible, tout en évitant tout retard dans le projet. Ce mode de planification, plus économique, est généralement choisi lorsque les ressources (main-d'œuvre, matériel) sont limitées et doivent être utilisées de manière optimale.
- **Planification intermédiaire :** Ce type combine les deux approches précédentes. Les tâches démarrent à une date située entre le plus tôt et le plus tard, ce qui permet d'assurer un équilibre entre efficacité et gestion des ressources. Il est particulièrement adapté aux entreprises travaillant sur un projet unique, avec des moyens disponibles mais devant rester maîtrisés.

VI.3.4 Techniques de planification :

Deux grandes familles de méthodes sont couramment utilisées pour planifier et suivre l'avancement d'un projet de construction :

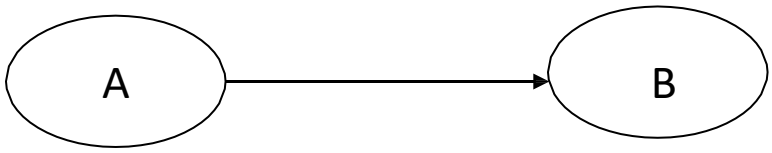
- **Méthodes basées sur le réseau :** Elles reposent sur la modélisation des tâches et événements sous forme de réseaux logiques. Parmi elles, la méthode du chemin critique (CPM) et la technique PERT (Program Evaluation and Review Technique) sont les plus répandues. Elles permettent d'identifier les séquences critiques de tâches qui conditionnent la durée globale du projet, et offrent une vision détaillée des interdépendances entre activités.
- **Méthodes basées sur le graphique :** La plus connue est le diagramme de Gantt, qui illustre visuellement la chronologie des tâches et leur avancement. Cette approche est simple, intuitive et très utilisée en gestion de projet. Toutefois, elle fournit moins d'informations sur les dépendances entre tâches par rapport aux méthodes basées sur le réseau.

Cette approche structurée favorise une gestion optimale du projet en veillant à ce que chaque tâche soit réalisée de façon ordonnée et dans les délais impartis. Elle permet également d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles tout en réduisant les risques de retard.

VI.3.4.1 Méthodes basées sur le réseau :

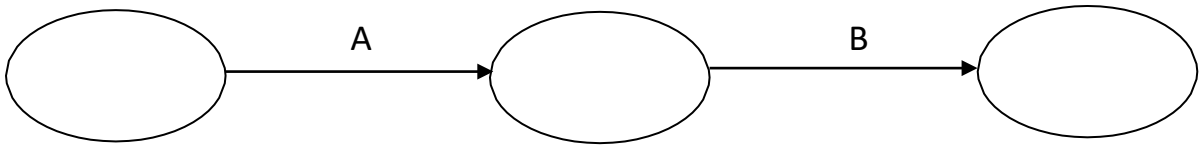
Le réseau constitue une représentation graphique du projet, mettant en évidence les relations entre les différentes tâches, qu'elles soient exécutées de manière séquentielle, parallèle ou convergente, ainsi que leur durée d'exécution. On distingue principalement deux catégories de réseaux :

- **Réseau à nœuds (Activity on Node – AON) :** Dans ce type de réseau, chaque nœud symbolise une tâche ou une activité du projet, tandis que les flèches indiquent les liens de dépendance entre elles. Ces relations traduisent l'ordre logique d'exécution et facilitent la visualisation des interactions entre les étapes.



  - Par exemple, l'opération (B) ne peut démarrer que lorsque l'opération (A) est complètement achevée.

- **Réseau à flèches (Activity on Arrow – AOA)** : Ici, ce sont les flèches qui représentent les tâches, tandis que les nœuds traduisent les événements (début ou fin d'une tâche). Ce modèle, plus ancien, est particulièrement utilisé dans la méthode PERT.



  - ✓ l'opération (A) doit précéder l'opération (B).

Il convient de souligner que le réseau constitue avant tout un outil de calcul rigoureux, permettant de déterminer avec précision les délais, les interdépendances et la séquence logique des tâches. En complément, le graphique joue un rôle d'interprétation et de vulgarisation : il traduit les données issues du réseau sous une forme visuelle plus lisible, facilitant ainsi la compréhension et la communication des informations auprès de l'ensemble des intervenants du projet.

- **Construction du réseau :**

La construction d'un réseau nécessite de suivre six étapes clés :

1. **Élaboration de la liste des tâches :** Créer une liste détaillée de toutes les activités nécessaires à la réalisation du projet. Chaque tâche doit inclure des informations comme sa durée estimée, les ressources requises, les interdépendances et les responsables.
2. **Identification des tâches préalables :** Déterminer quelles tâches doivent être terminées avant de commencer les suivantes. Cela établit l'ordre logique de leur exécution.

3. **Construction des graphes partiels :** Créer des diagrammes de réseau pour représenter visuellement les relations entre les tâches. Les diagrammes PERT et les diagrammes de Gantt sont les plus couramment utilisés.
4. **Regroupement des graphes partiels :** Si le projet comporte plusieurs sous-projets ou domaines distincts, regrouper ces graphes pour obtenir une vue d'ensemble du projet.
5. **Identification des tâches de début et de fin :** Déterminer les tâches marquant le début ("tâche initiale") et la fin ("tâche finale") du projet. Ces jalons sont essentiels pour suivre l'avancement global.
6. **Vérification et validation du réseau :** Contrôler la cohérence du réseau afin de s'assurer que toutes les tâches sont correctement reliées, que les dépendances sont respectées et qu'aucune activité n'a été oubliée. Cette étape garantit la fiabilité du planning et prépare le calcul des délais (dates au plus tôt, au plus tard, marges et chemin critique).

Cette méthodologie permet d'organiser efficacement les travaux et d'assurer une meilleure gestion du temps et des ressources.

VI.3.5 Différentes méthodes basées sur le réseau :

VI.3.5.1 Méthode C.P.M (Critical Path Method) :

La méthode du chemin critique (CPM) est une technique de planification qui a pour objectif principal de réduire au minimum la durée totale d'un projet. Elle repose sur trois phases essentielles :

1. **Identification des ressources :** Déterminer le personnel, les équipements et les matériaux nécessaires à l'accomplissement de chaque tâche du projet.
2. **Analyse du réseau d'activités :** Étudier de manière systématique l'enchaînement des tâches en fonction de l'unité de temps choisie (jour, semaine, heure), afin de mettre en évidence les séquences critiques qui influencent directement la durée globale du projet.
3. **Ajustement du réseau :** Réorganiser ou modifier le planning en tenant compte des contraintes internes (ressources limitées, organisation de l'entreprise) ou externes (conditions techniques, réglementations, environnement), afin d'optimiser la réalisation du projet. (Benlaoukli, 2004)

VI.3.5.2 Méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technique) :

La méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique) est une technique de planification et de gestion de projet qui consiste à organiser les tâches sous forme de réseau d'activités. Ce réseau met en évidence :

- La séquence logique des opérations à réaliser.
- Les interdépendances entre les différentes tâches.
- Les délais estimés pour chaque activité.

Cette approche permet d'identifier les enchaînements critiques et d'optimiser l'utilisation des ressources, tout en facilitant le suivi et le contrôle du projet. L'objectif final est d'assurer l'achèvement du projet dans les délais prévus et conformément aux objectifs fixés.

VI.3.5.3 Méthodes basées sur le graphique :

- **Méthode linéaire (ou technique de la ligne d'équilibre) :** Particulièrement adaptée aux projets présentant des tâches répétitives, cette méthode est souvent utilisée dans les grands chantiers de construction, tels que les immeubles à plusieurs étages ou les infrastructures linéaires (routes, voies ferrées, canaux). Elle permet de coordonner efficacement la progression parallèle des différentes équipes sur plusieurs unités similaires.
- **Méthode à barres :** Basée sur la combinaison de deux réseaux et d'un diagramme de Gantt, cette approche facilite la visualisation des interdépendances entre les tâches et de leur chronologie. Elle offre un outil clair de suivi et de contrôle, notamment pour les chefs de projet souhaitant disposer d'une vision synthétique de l'avancement.
- **Choix de la méthode de calcul :** Le choix de la méthode doit être aligné sur la nature du projet. Lorsque les tâches suivent une séquence logique et contrainte, comme dans notre cas, la méthode PERT s'avère la plus appropriée (Benlaoukli, 2004).

VI.3.6 Méthode de calcul PERT :

VI.3.6.1 Paramètres de la méthode PERT :

Lors de l'application de la méthode PERT, plusieurs éléments doivent être pris en compte pour analyser et planifier correctement les tâches d'un projet :

- **DCP (Date de début au plus tôt – Early Start) :** Représente la date la plus précoce à laquelle une tâche peut commencer, en tenant compte des dépendances et contraintes liées aux autres activités.
- **Tr (Temps de réalisation) :** Durée estimée nécessaire pour exécuter une tâche donnée.
- **DFP (Date de fin au plus tôt – Early Finish) :** Correspond à la date la plus précoce à laquelle une tâche peut être achevée, selon son temps de réalisation et ses contraintes.
- **DCPP (Date de début au plus tard – Late Start) :**Date limite à laquelle une tâche peut débuter sans entraîner de retard sur l'ensemble du projet.
- **DFPP (Date de fin au plus tard – Late Finish) :**Date maximale à laquelle une tâche peut être terminée sans décaler le calendrier global.

- **MT (Marge Totale) :**Temps supplémentaire disponible pour une tâche sans affecter la durée totale du projet. Elle se calcule comme :

$$MT=DCPP-DCP=DFPP-DFP \quad (VI.1)$$

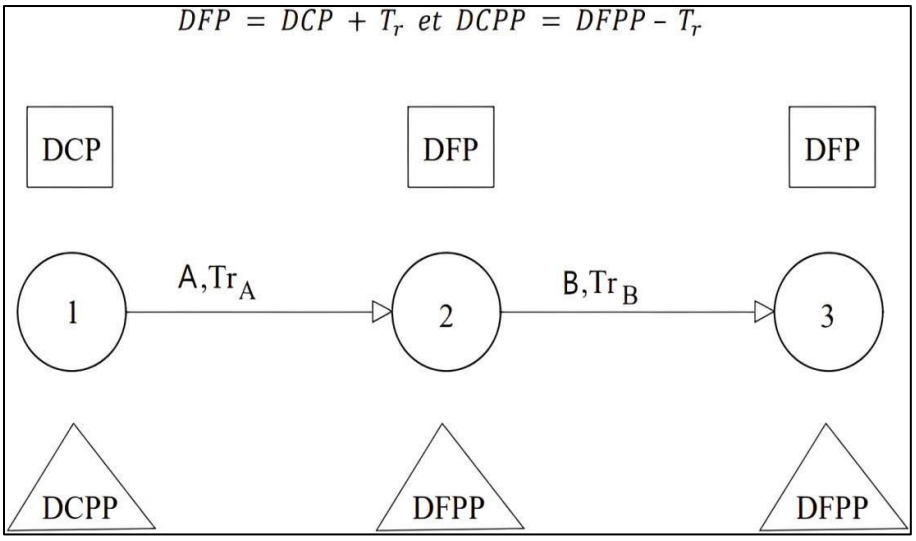


Figure VI.2: Schéma représentatif de la méthode de PERT.

VI.3.6.2 Chemin critique (C.C) :

Le chemin critique est la suite d'opérations qui fixe la durée totale du projet (DTP). Les tâches qui le composent présentent une caractéristique fondamentale : aucune flexibilité dans leur exécution.

Deux conditions permettent de l'identifier :

1. **Marge totale (MT) = 0 :** Toutes les opérations appartenant au chemin critique ne disposent d'aucun délai supplémentaire.
2. **Somme des durées = DTP :** La somme des temps d'exécution des tâches de ce chemin est égale à la durée totale du projet.

VI.3.7 Diagramme de Gantt :

Le diagramme de Gantt est un outil fondamental en gestion de projet, offrant une représentation visuelle claire de l'avancement des tâches.

- Sur la colonne de gauche, sont listées toutes les tâches à réaliser.
- L'en-tête représente les unités de temps pertinentes (jours, semaines, mois).
- Chaque tâche est représentée par une barre horizontale, dont la position et la longueur indiquent la date de début, la durée et la date de fin.

Ce diagramme permet de visualiser :

- La séquence et les interdépendances des tâches.
- Les dates prévues de début et de fin.
- La durée de chaque activité.
- Les chevauchements ou écarts entre les tâches.
- L'avancement réel par rapport aux prévisions.

Ainsi, le diagramme de Gantt fournit une vue globale du projet, facilitant la planification, la gestion et le suivi de son évolution.

Par ailleurs, la méthode PERT complète cette approche en permettant d'optimiser la durée et les coûts du projet, tout en augmentant son efficacité. Pour construire un réseau PERT, il convient de commencer par identifier toutes les tâches nécessaires et estimer leur durée d'exécution, afin de mettre en évidence les séquences critiques et les marges disponibles.

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

Opérations	Code	Durée (jours)
Installation du chantier	A	16
Etude topographique	B	20
Travaux de terrassements	C	35
Compactage	D	25
Pose de Geotextile	E	27
Pose de gabion	F	230
Travaux de finition et Réaménagement des berges	G	24
Déménagement du chantier	H	16

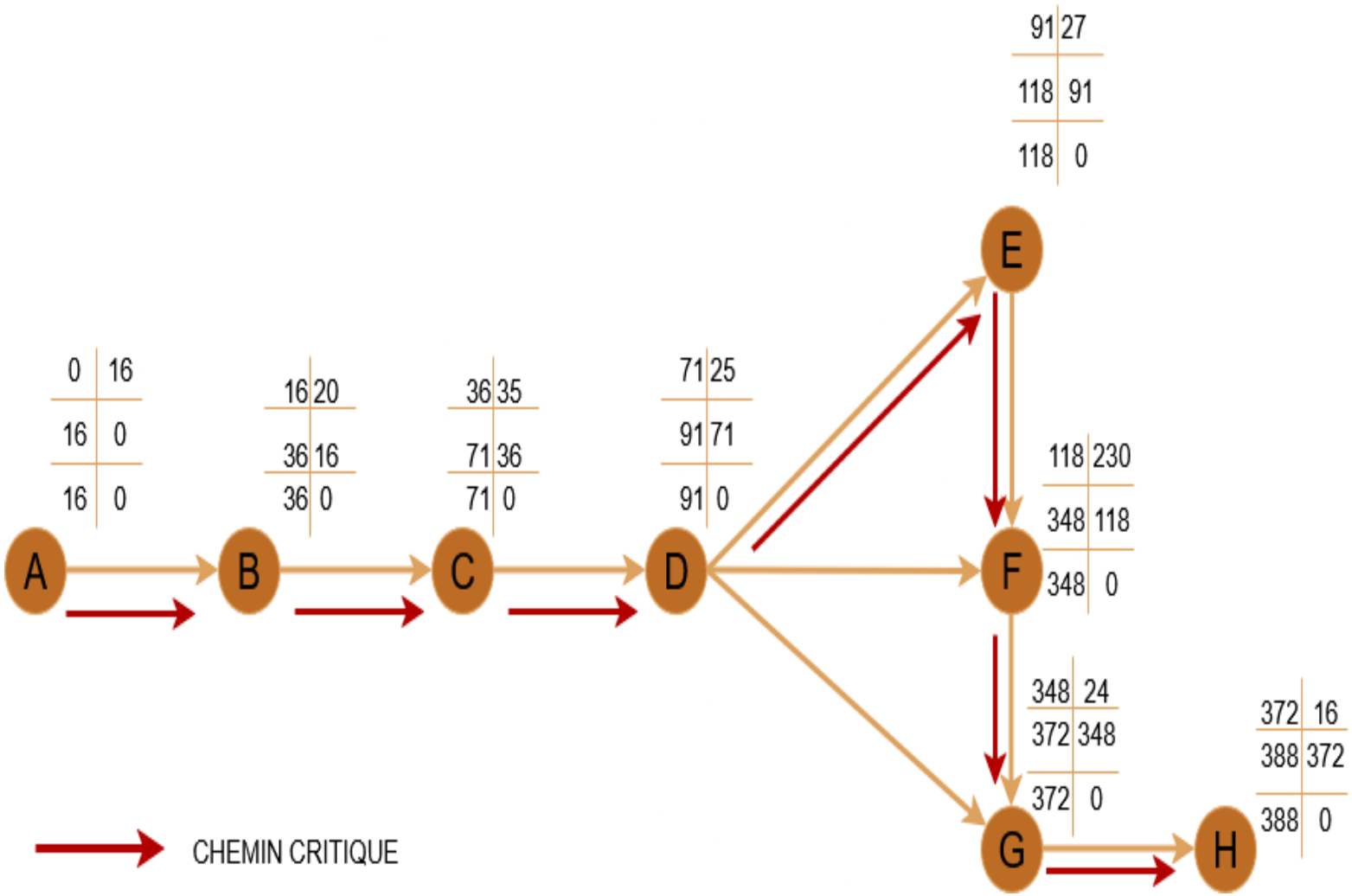


Figure VI.3: Réseau de planification des taches par la méthode CPM.

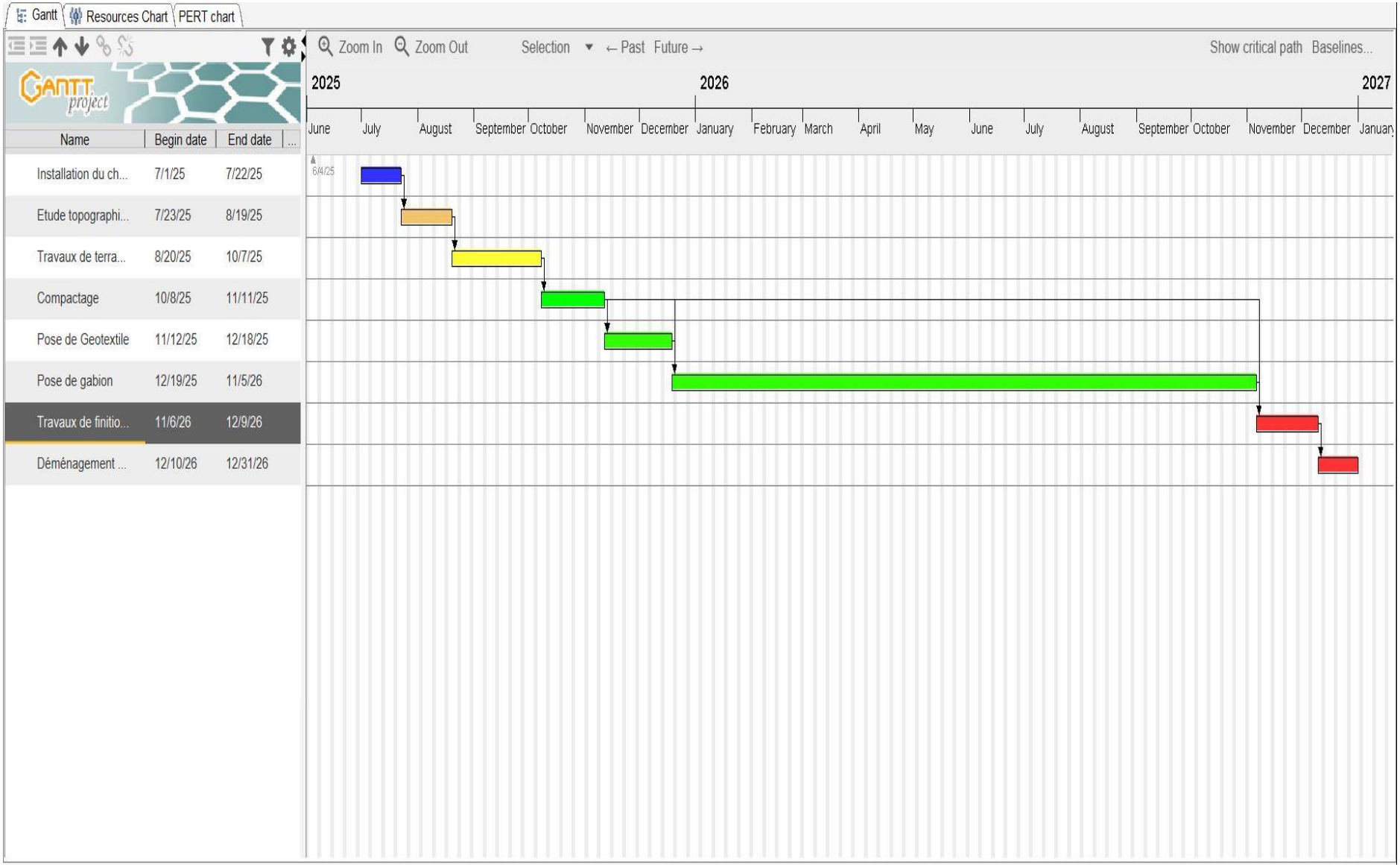


Figure VI.4 : Chronogramme du Projet pour la Variante de Gabionnage avec le Logiciel Gantt Project.

Conclusion :

En conclusion de ce chapitre relatif à l'organisation du chantier, il convient de souligner que la performance d'un projet d'infrastructure repose fondamentalement sur une maîtrise rigoureuse du phasage temporel et une coordination optimale des ressources humaines, matérielles et technico-opérationnelles. Le respect des délais contractuels et la maîtrise des enveloppes budgétaires imposent une planification stratégique, intégrant des outils de gestion prévisionnelle et de suivi en temps réel. À titre illustratif, le projet d'aménagement de l'Oued Khoudja à Ain Bouyahia, dont le linéaire atteint 1095 mètres pour un coût estimé à 97.925.165,00 Da et une durée d'exécution de 13 mois, démontre l'importance d'une organisation rationalisée des moyens. La réussite de ce type d'opération dépend notamment d'une structuration rigoureuse des activités, d'une anticipation des aléas techniques et climatiques, ainsi que d'une gestion proactive des imprévus. Cette approche méthodologique constitue un levier essentiel pour garantir la conformité du projet en termes de délais, de coûts et de qualité.

Conclusion Générale

L'analyse des crues au niveau de l'Oued Khoudja met en évidence la nécessité d'une approche anticipative et intégrée en matière de prévision et de gestion des risques hydrologiques. Dans un contexte marqué par une intensification des événements météorologiques extrêmes, les outils de simulation numérique s'imposent comme des instruments essentiels pour modéliser les scénarios de crue, identifier les zones vulnérables, et élaborer des stratégies de mitigation efficaces. La préservation de la sécurité des biens, des personnes et des infrastructures requiert la mise en œuvre de dispositifs d'alerte précoce, associés à des plans d'intervention d'urgence structurés et coordonnés. Une gestion proactive des risques hydrauliques contribue ainsi à renforcer la résilience des territoires exposés.

L'étude a été initiée par une revue générale des phénomènes d'inondation, suivie d'une caractérisation de la zone d'étude, mettant en exergue l'impact de la forte densité urbaine sur l'amplification de la vulnérabilité. Une analyse géologique et météorologique a permis de déterminer les paramètres physiques et climatiques du site, conditions préalables à la conception d'infrastructures adaptées. L'identification des zones à haut risque et l'analyse des principaux facteurs contributifs aux inondations ont mis en lumière le rôle prépondérant des configurations topographiques et de l'évolution climatique régionale.

Une étude hydrologique détaillée a été menée, complétée par une analyse hydromorphologique du bassin versant de l'Oued Khoudja. Il ressort de cette analyse que la morphologie allongée du bassin et son relief marqué induisent un temps de concentration réduit, favorisant une réponse hydrologique rapide et accentuant le risque de crue. Le réseau hydrographique, classé selon une hiérarchisation en cinq ordres, a été modélisé pour estimer le débit de crue. Les données hydrométriques issues de la station d'Ababsa ont été traitées par la loi de Gumbel, et la méthode GRADEX a permis d'estimer un débit centennal de l'ordre de 38 m^3/s pour une période de retour de 100 ans.

L'étude hydraulique a été réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS, couplé à l'outil de visualisation RAS-Mapper. Cette modélisation hydraulique a permis de simuler les hauteurs d'eau en fonction des débits projetés et de cartographier avec précision les zones d'inondation potentielle. Les données topographiques ont permis de reconstituer la géométrie du cours d'eau : profil en long, sections transversales, berges, ainsi que les conditions hydrauliques en entrée et en sortie.

Sur la base de l'analyse des zones à risque, trois solutions d'aménagement ont été soumises à une évaluation technico-économique : un canal en gabion, un canal en enrochement et un canal en béton armé. Le canal en gabion de section trapézoïdale a été retenu comme option optimale, couvrant l'ensemble du linéaire de l'Oued Khoudja. Ce choix repose sur sa compétitivité économique, sa capacité hydraulique, ainsi que son intégration visuelle dans le tissu urbain

environnant. Bien que d'autres options aient été techniquement viables, le rapport coût-efficacité du canal en gabion s’est avéré le plus favorable.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

ATHAMINA Brahim, Université Larbi Tébessi -Tébessa. *Polycopie de cours : Organisation des chantiers* (2019).

Azzedine Mebarki (1982) : *Le bassin du Kébir-Rhumel (Algérie) : Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau*.

Benlaoukli, Bachir. (2004) : *Organisation de chantier, la planification des travaux les M.M. O [Working Paper]*.

BENMANSOUR Nadir : *Etude de crues et localisation des zones inondables* (08 juillet 2009).

Degoutte (2012) : *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières*.

Garavaglia, F. (2011) :*Méthode SCHADEX de prédétermination des crues extrêmes : Méthodologie, applications, études de sensibilité*.

Guillot et Duband (1967) : *La méthode du Gradex a été développée par EDF dans les années 1960.*

HAMITOUCHE Yasmine (2020) : *Etude d'aménagement hydraulique d'Oued Allala pour la protection de la ville de Ténès contre les inondations (W. CHLEF)*.

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

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)*.

LABDI Amar (2024) : *Protection de la ville Oued Rihane Ouest, la ville de Khemis Miliana et l'usine des matériaux explosifs ONEX contre les inondations (Oued Rihane)*.

Ledoux (2000) : *Aléas, vulnérabilités et gestion des risques naturels*.

Lencastre (2008) : *Hydraulique générale*.

MADI Rafik (2014) : *OURS ORGANISATION DES CHANTIERS.*

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*.

Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDDI) : *« Aléas, vulnérabilités et gestion des risques naturels »*.

M.Yahiaoui Abdelhalim : *Inondations Torrentielles, Cartographie des Zones Vulnérables en Algérie du Nord*.

ORGANISATION DES CHANTIERS : *(sans autre précision)*

OULHACI Dalila : *RUISSELLEMENT INTER-ANNUEL EN ALGÉRIE SEPTENTRIONALE (Relation entre Ruissellement, Pluie et Évaporation) 2015 -2016*.

Roche, M. (1963) : *Hydrologie de surface*. Paris : Édition Gauthier-Villars et ORSTOM RIG, vol. 32.

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 Soufay – Khemis Miliana - Algérie*.

TOUMI Abdelouaheb : *Hydraulique à surface libre. Cours & Exercices, 197 pages*.

Touaibia, Bénina : (2015). *Manuel pratique d'hydrologie* (2ème Édition).

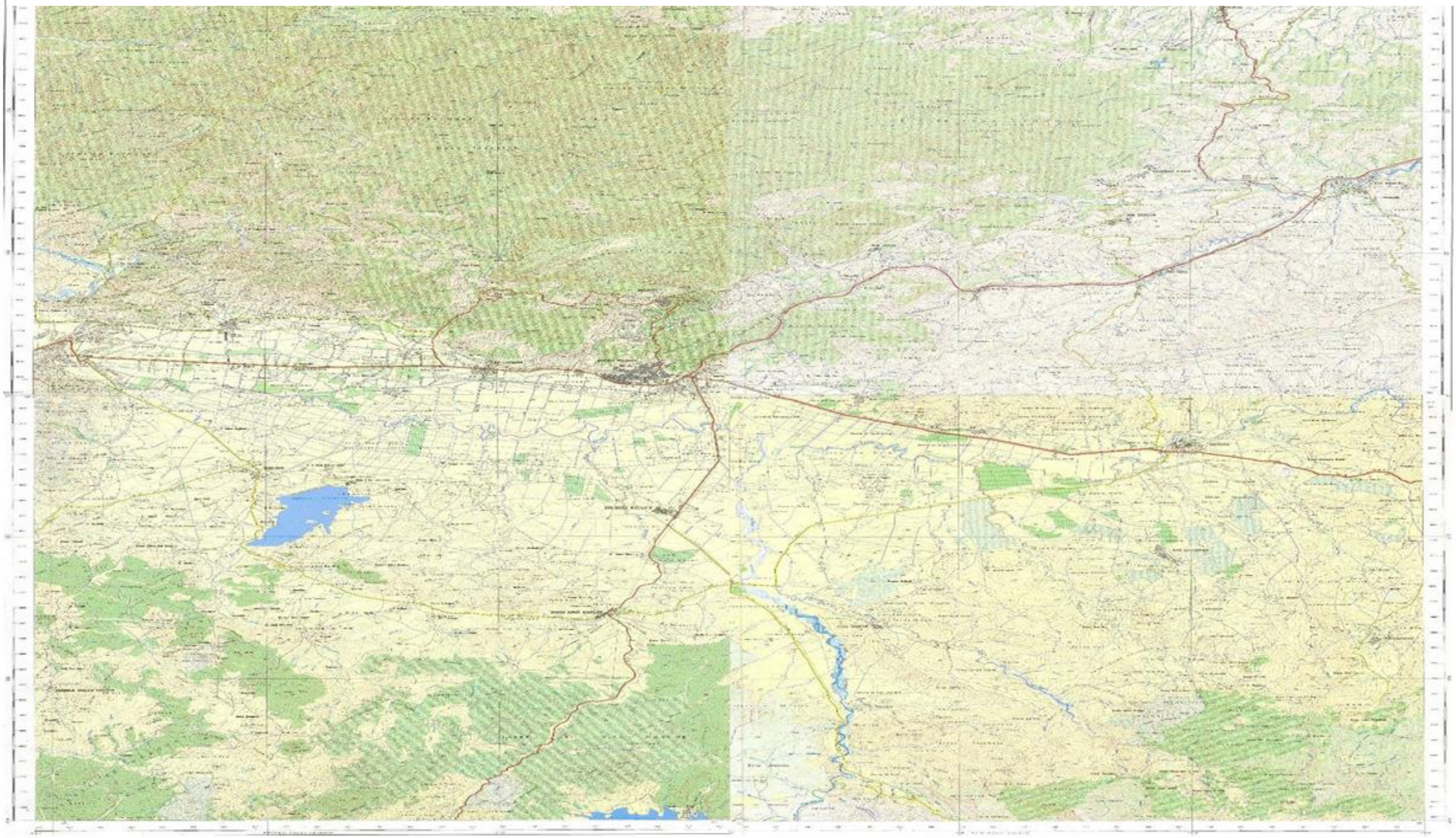
Tria Chihab Eddine (2022) : *Dimensionnement d'un deuxième évacuateur de crue. Cas du barrage Cheurfas II*.

U.S. Army Corps of Engineers (2016): *HEC-RAS River Analysis System – User's Manual, Hydrologic Engineering Center, CPD-68, Version*.

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).

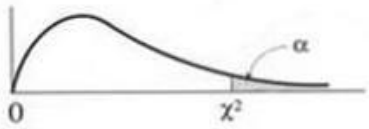
Annexes

Annexe n°01 : Carte topographique de la zone de Ain Defla.



Annexe n° 02 : Tableau des valeurs de χ^2.

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



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

Annexe n° 03 : Coefficient de rugosité de Manning.

Valeurs du coefficient n de Manning

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