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"
ⴰⵖⵓⵔⴱⴰⵣ ⴰⵖⵓⵍⵏⴰⵡ ⵉⵎⵉⵏⵓⴳ ⵏ ⵜⵎⵓⵙⵡⵉⵜ

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUE

THEME :

Protection de l'ouest de la ville de Miliana, au nord de la wilaya de AIN DEFLA contre les inondations d'oued Errihane.

Présenté par :

BRAHMI Youcef Reyane

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
HEBBOUCHE Abdelhamid	M.C.A	Président
TOUMI Samir	M.C.B	Examinateur
OSMANI El Hadi	M.A.A	Examinateur
BOURI Djamel Eddine	M.C.A	Promoteur

Session septembre 2025

Dédicace

C'est avec une profonde gratitude et une sincérité infinie, je dédie ce travail à ceux qui ont marqué mon chemin et soutenu chacun de mes pas.

À toi, ma chère maman ***SARAH****, symbole d'amour inconditionnel et de dévouement, dont la tendresse et le soutien indéfectible m'ont toujours donné la force d'avancer.*

À toi, mon cher pére ***MOHAMED****, exemple de sagesse, de courage et de persévérance, dont les sacrifices et les conseils éclairés ont guidé mes choix et nourri mes aspirations.*

Ce travail est l'aboutissement de vos efforts, de vos prières et de votre amour. Je vous en suis éternellement reconnaissant. J'espère de tout cœur qu'un jour, je pourrai exprimer ma gratitude envers vous d'une manière significative, ne serait-ce qu'en partie, pour tout ce que vous avez fait pour moi. Que Dieu vous accorde bonheur, santé et une longue vie épanouie.

Je dédie également ce travail à ma sœur ***REWEN****, à mon frère* ***SAMY,*** *ainsi qu'à toute ma famille.*

Un remerciement particulier à mes amies, notamment ***hakim, chems eddine, hamid, obayda, rahime, nadjib, ali, aymen, dahmane, akrem, sohaib, madjid, aissa, djasser, mohamed****, qui m'ont accompagnée avec constance et bienveillance tout au long de ce parcours. Leurs encouragements et leur soutien inestimables m'ont aidée à surmonter chaque étape.*

Enfin, une dédicace toute spéciale à ***Laetitia****, compagne de mes rêves et de mon avenir. Ce travail est aussi le tien, car il porte en lui l'espoir et la promesse de tout ce que nous construirons ensemble.*

À toutes celles et ceux qui me sont chers, je vous adresse mes plus sincères remerciements. Votre présence et votre influence positive ont contribué à l'accomplissement de ce travail, que je suis honoré de partager avec vous

Remerciements

Avec une profonde gratitude, je rends grâce au Tout-Puissant qui, par Sa bienveillance, m'a accordé la santé, la patience et la persévérance nécessaires à l'aboutissement de ce mémoire.

Je tiens, en premier lieu, à exprimer toute ma reconnaissance à mon encadreur, **Dr**. **BOURI Djamel Eddine**, pour son accompagnement constant, ses conseils éclairés et ses critiques constructives, qui ont grandement enrichi ce travail et contribué à sa réalisation.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury, qui ont accepté de consacrer de leur temps précieux à l'évaluation de ce mémoire. Leur expertise et leurs remarques pertinentes constituent pour moi une véritable source d'enrichissement et d'inspiration.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à l'ensemble du corps professoral et du personnel de l'École Nationale Supérieure de l'Hydraulique (ENSH). Leur dévouement à la transmission du savoir et à la formation a marqué de façon significative mon parcours académique et personnel.

Enfin, je tiens à adresser un mot à moi-même. La réalisation de ce mémoire n'a pas été exempte de difficultés, mais chaque défi surmonté m'a permis de développer une force intérieure et une résilience nouvelle. Cette expérience a été une véritable école de patience et de persévérance, renforçant ma confiance pour affronter les défis à venir.

À toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail, je témoigne ici ma sincère gratitude.

ملخص :

تتناول هذه الدراسة تحليل وتطبيق إجراءات الحماية من الفيضانات لمدينة مليانة، بلدية وادي الريحان. وترتكز المنهجية المعتمدة على تقييم خطر الفيضانات، وتحديد الرهانات والهشاشة، ورسم حدود المناطق المعرّضة للغمر باستعمال أدوات المحاكاة الهيدروليكية مثل ArcGIS و HEC-GEO و HEC-RAS. وقد أسفرت الدراسة التقنية–الاقتصادية عن اختيار الحل الأنسب والمتمثل في إنشاء قناة مدعّمة بالـ"غابيونات"، لما توفره من فعالية هيدروليكية وتكلفة مناسبة واندماج بيئي أفضل. وتُعزز هذه المقاربة مرونة المدينة في مواجهة مخاطر الفيضانات، كما تمثل خطوة مهمة نحو إدارة مستدامة لهذه الظواهر.

الكلمات المفتاحية مليانة، وادي الريحان، الحماية، مخاطر الفيضانات، المحاكاة الهيدروليكية، الغابيونات.

Résumé

Cette étude porte sur l'analyse et la mise en place de mesures de protection contre les inondations pour la ville de Miliana, la commune d'Oued Errihane. L'approche méthodologique s'appuie sur l'évaluation de l'aléa de crue, la caractérisation des enjeux et de la vulnérabilité, ainsi que la délimitation des zones inondables à l'aide d'outils de simulation hydraulique tels qu'ArcGIS, HEC-GEO et HEC-RAS. L'analyse technico-économique a conduit au choix d'une variante optimale consistant en l'aménagement d'un canal en gabions, solution qui allie efficacité hydraulique, coût maîtrisé et intégration environnementale. Cette démarche contribue à renforcer la résilience de la ville face aux risques d'inondation et à promouvoir une gestion durable de ces phénomènes.

Mots clés : Miliana, Oued Errihane, protection, risques d'inondation, simulation hydraulique, gabions.

Abstract :

This study focuses on the analysis and implementation of flood protection measures for the city of Miliana, the municipality of Oued Errihane. The adopted methodology is based on flood hazard assessment, identification of exposure and vulnerability, and delineation of flood-prone areas using hydraulic simulation tools such as ArcGIS, HEC-GEO, and HEC-RAS. A techno-economic analysis led to the selection of the most suitable alternative, namely the construction of a gabion-lined canal, which ensures hydraulic efficiency, cost-effectiveness, and environmental integration. This approach enhances the city's resilience to flood risks and contributes to the sustainable management of such hazards.

Keywords : Miliana, Oued Errihane, protection, flood risks, hydraulic simulation, gabions.

Table des matières

Chapitre I : Généralités sur les inondations. 1

Introduction : 2

I.1. Définition des termes essentiels : 2

I.1.1. Aléa : 2

I.1.2. Enjeux : 2

I.1.3. Vulnérabilité : 2

I.1.4. Risque : 2

I.2. Les inondations : 3

I.2.1 Définition des inondations : 3

I.2.2 Les différents types d'inondation : 3

I.3. Causes des inondations : 6

I.4. Conséquences des inondations : 6

I.5. La crue : 6

I.5.1. Les caractéristiques d'une crue : 6

I.6. Paramètres nécessaires à l'évaluation des catastrophes liées aux crues : 8

I.7. Mécanismes des inondations : 8

I.8. Paramètres fondamentaux du cours d'eau : 9

I.8.1. Lits du cours d'eau 9

I.9. L'évènement des inondations : 9

I.9.1 En Algérie : 9

I.9.2 Les causes des inondations en Algérie : 11

I.10 Stratégie nationale de lutte contre les inondations en Algérie : 11

I.10.1 – Le cadre réglementaire : 11

I.10.2 – Les mesures structurelles (protection physique) : 11

I.10.3 – Les mesures opérationnelles 11

I.10.4 – Les mesures préventives : 12

Conclusion : 12

CHAPITRE II : Présentation de la zone d'étude.....13
Introduction : 14
II.1 Situation géographique : 14
II.2. Sismicité 15
II.3. La Climatologie : 16
II.3.1. Température : 17
II.3.2. Vent : 18
II.3.3. Précipitations : 18
Conclusion : 19
CHAPITRE III : Etude hydrologique. 20
Introduction : 21
III.1 Bassin versant : 21
III.1.1 Caractéristiques principales du Bassin versant : 21
III.1.2 Caractéristique hydrographique : 26
III.1.3 Etude de réseau hydrographique : 35
III.2 Etude des crues : 43
III.2.1 L'analyse fréquentielles des pluies des crues maximales annuelles avec la station hydrométrique EL ABABSA : 43
III.2.2 Estimation des débits maximums fréquentiels par la méthode GRADEX : 51
III.2.3 Hydrogramme de crue : 58
III.2.4 Sélection du débit de crue pour le projet : 61
Conclusion : 62
CHAPITRE IV : Simulation des écoulements Hydrauliques Et cartographie des zones inondables au Risque. 63
Introduction : 64
IV.1 Généralités : 64
IV.1.1 Typologie des inondations : 64
IV.1.2 Régimes et types d'écoulement : 64
IV.1.3 Paramètres hydrauliques essentiels : 65
IV.1.4 Méthodes de calcul hydraulique : 66
IV.2 Simulation de l'écoulement du cours d'eau : 68
IV.2.1 Sélection du modèle hydraulique adapté : 68

IV.2.2 Application d'HEC-RAS sur l'Oued : 70
IV.3 La cartographie du risque de l'inondation : 84
IV.3.1 Carte des profondeurs : 85
IV.3.2 Carte des vitesses : 86
IV.3.3 Classes d'aléa : 87
Conclusion : 89
Chapitre V : Études des variantes D'Aménagement. 90
Introduction : 91
V.1 Présentation des grandes orientations : 91
V.1.1 La protection contre l'érosion : 91
V.1.2 La protection contre les crues : 92
V.2 Description des variantes proposées : 93
V.2.1 Canal en béton armé : 93
V.2.2 Canal en gabions : 94
V.2.3 Canal en enrochements : 95
V.2.4 ouvrages de franchissement : 95
V.3 Critères d'évaluation des variantes d'aménagement : 96
V.4 Calcul hydraulique des canaux : 96
V.4.1 Choix des paramètres de dimensionnement : 97
V.4 Aménagement proposé pour oued Errihane ; 99
V.4.1 Première variante : Canal en gabion : 99
V.4.2 Deuxième variante : Canal en enrochement : 107
V.4.3 Troisième variante : : Canal en béton armé 115
V.5 Choix de la variante d'aménagement : 122
V.5.1 Présentation et comparaison des variantes : 122
V.5.2 Justification du choix de la variante : 123
Conclusion : 124
Chapitre VI : organisation du chantier 125
Introduction : 126
VI.1 Généralités : 126
VI.1.1 Rôles et responsabilités des intervenants sur un chantier : 126
VI.1.1.1 Maître d'ouvrage : 126
VI.1.1.2 Le maître d'œuvre : 127

VI.1.1.3 L’entreprise : 127
VI.1.1.4 L’entrepreneur : 128
VI.2 Devis quantitatif et estimatif du projet : 129
VI.3. La Planification : 130
VI.3.1 Définition : 130
VI.3.2 Étapes de la planification : 130
VI.3.3 Plannings des travaux : 131
VI.3.4 Techniques de planification : 131
VI.3.5 Différentes méthodes basées sur le réseau : 133
VI.3.6 Méthode de calcul PERT : 134
VI.3.7 Diagramme de Gantt : 135
Conclusion : 139

Liste des tableaux :

CHAPITRE I : Généralités sur les inondations.

Tableau I.1 : Recensement des inondations catastrophiques en Algérie (1970-2023) (Le CRSTRA, 2004).

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 011718.

CHAPITRE III : Etude hydrologique.

Tableau III.1 : Les paramètres hydro morphométriques du bassin versant d'Oued ERRIHANE.
Tableau III.2 : Paramètres Hypsométriques du bassin versant d'Oued ERRIHANE.
Tableau III.3 : caractéristiques altimétriques du bassin versant d'Oued ERRIHANE.
Tableau III.4 : Pente moyenne du bassin versant d'Oued ERRIHANE.
Tableau III.5: Classification O.R.S.T.O.M du relief à partir l'indice de pente global.
Tableau III.6 : Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M
Tableau III.7 :Résultats des calculs des pentes et du dénivelé spécifique du bassin versant d'Oued ERRIHANE.
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 ERRIHANE.
Tableau III.11 : Géomorphologie du bassin versant de l'Oued ERRIHANE.
Tableau III.12 : caractéristiques de la station hydrométrique (EL-Ababsa) .
Tableau III.13 : Série des débits maximales annuels de la station 011715 (source : ANRH).
Tableau III.14 : Caractéristiques de la série des débits de la station 011715
Tableau III.15 : modèles fréquentiels et leur validité.
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 Herraza [011718] (Source : ANRH).
Tableau III.23 : Résultats de l'ajustement des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de Herraza 011718 selon la loi de Gumbel.
Tableau III.24 : Résultats des calculs pour la station de Herazza, selon les différentes périodes de retour.
Tableau III.25 : Résultats de l'ajustement pour déférentes périodes de retours pour les stations prises.
Tableau III.26 : Résultats de l'ajustement des stations prises.
Tableau III.27 : Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue (δ).
Tableau III.28 : Paramètres de calcul de l'hydrogramme de crue.
Tableau III.29 : Valeurs du débits centennales en fonction du temps.

CHAPITRE IV : Simulation des écoulements Hydrauliques Et cartographie des zones inondables au Risque.

Tableau IV.1 : Résultats de la simulation de l'écoulement pour la période de retour T = 100 ans (HEC-RAS).
Tableau IV.2: Critères de classification de l'intensité de l'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 : Des recommandations plus précises, en fonction du débit.
Tableau V.3 : Les intervalles des vitesses pour éviter l'érosion du lit.
Tableau V.4 : Résultats des calculs du nombre de caisses pour le canal en gabions.
Tableau V.5 : Récapitulatif des paramètres de la variante de gabionnage
Tableau V.6 : Résultats de la simulation d'écoulement dans un canal en gabions du tronçon de l'oued Errihane. (Source : HEC-RAS).
Tableau V.7 : Avantages et inconvénients des différentes solutions proposées (Source : Élaboration personnelle, adapté de Degoutte, 2012)
Tableau V.8 : Résultats de la simulation d'écoulement. (Source : HEC-RAS)
Tableau V.9 : Résultats de la simulation d'écoulement. (Source : HEC-RAS)
Tableau V.10 : Devis de la variante en canal gabionné d'oued Errihane.
Tableau V.11 : Dimensions de l'aménagement d'oued Errihane (canal en enrochement).
Tableau V.12 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdal en enrochement de l'oued Errihane. (Source : HEC-RAS).

Tableau V.13: Résultats de la simulation d'écoulement. (Source : HEC-RAS)
Tableau V.14 : Résultats de la simulation d'écoulement. (Source : HEC-RAS)
Tableau V.15 : Devis de la variante en canal gabionné d'oued Errihane.
Tableau V.16 : Dimensions de l'aménagement d'oued Errihane (canal en béton).
Tableau V.17 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdal en enrochement de l'oued Errihane. (Source : HEC-RAS).
Tableau V.18 : Résultats de la simulation d'écoulement. (Source : HEC-RAS)
Tableau V.19 : Résultats de la simulation d'écoulement. (Source : HEC-RAS)
Tableau V.20 : Devis de la variante en canal gabionné d'oued Errihane.

Chapitre VI : organisation du chantier.

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

Table des figures :

CHAPITRE I : Généralités sur les inondations.

Figure I.1 : Aléas, enjeux et risques : le cas des inondations.
Figure I.2 : Hyétogramme et hydrogramme résultant d'un événement pluie-débit.
(Le CRSTRA, 2004).

CHAPITRE II : présentation de la zone d'étude.

Figure II.1: Localisation de Miliana
Figure II.2 : une image satellitaire d'oued Errihane.
Figure II.3 : Les zones sismiques d'Algérie.
Figure II.4 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales
Figure II.5 : Distribution des vitesses du vent
Figure II.6 : Evolution de la pluviométrie mensuelle interannuelles.

CHAPITRE III : Etude hydrologique.

Figure III.1: Bassin versant d'Oued ERRIHANE.
Figure III.2 Différents types des bassins versant selon le coefficient de gravelius K_G.
Figure III.3: Carte hypsométrique de bassin versant d'Oued ERRIHANE.
Figure III.4 : courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued ERRIHANE.
Figure III.5 : Carte des pentes du bassin versant d'Oued ERRIHANE.
Figure III.6 : Carte des courbes des niveaux du bassin versant d'Oued ERRIHANE.
Figure III.7 : Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued ERRIHANE.
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 011715.
Figure III.10 : graphe d'ajustement par la loi de Log Normal de la station 011715.
Figure III.11 : comparaison entre les Lois ajustement utilisées de la station 011715**.**
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 la crue du projet.

CHAPITRE IV : Simulation des écoulements Hydrauliques Et cartographie des zones inondables au Risque.

Figure IV.1 : Interface du logiciel HEC-RAS (version 6.3.1).
Figure IV.2 : TIN (réseau irrégulier triangulé) d'oued Errihane.
Figure IV.3 : Insertion fichier de projection.
Figure IV.4: Insertion de TIN.
Figure IV.5 : Définition du tracé d'oued Errihane et ces sections en travers.
Figure IV.6 : Définition du tracé d'oued Errihane et ces sections en travers.
Figure IV.7: Insertion des valeurs de Manning (terrain naturel)
Figure IV.8 : Introduction de débit centennale.
Figure IV.9 : Définition des conditions aux limites.
Figure IV.10 : Profil en long du cours d'eau en état naturel lors d'une crue de période centennale.
Figure IV.11 : Vue en trois dimensions d'oued Errihane.
Figure IV.12 : Courbe de tarage du tronçon modélisé d'oued Errihane.
Figure IV.13 : Profils en travers des sections choisies représentatives d'oued Errihane.
Figure IV.14 : Localisation de la route principale sur la rive de l'oued Errihane.
Figure IV.15 : Détails des buses.
Figure IV.16 : Les buses qui assurent l'écoulement de l'eau sous la route secondaire.
Figure IV.17: variation de la vitesse en fonction de la distance.
Figure IV.18 : Evolution du nombre de Froude en fonction de la distance d'oued errihane.
Figure IV.19 : Carte de profondeur d'eau pour la période de retour 100 ans.
Figure IV.20 : Carte des vitesses d'écoulement pour une crue de période de retour centennale (T = 100 ans).
Figure IV.21 : Carte de l'aléa pour la crue centennale.

Chapitre V : Études des variantes D'Aménagement.

Figure V.1: Eléments géométriques pour des sections ouvertes diverses.
Figure V.2 : le profil en long du cours d'eau après aménagement.
Figure V.3 : Vue en plan en 3D de l'oued après l'aménagement.
Figure V.4 : Profils en travers d'un canal en gabions pour une crue centennale d'oued Errihane-.
Figure V.5 : Dimensions des deux dalots (01 et 02).
Figure V.6 : Détails du dalot 01.
Figure V.7 : Détails du dalot 02.
Figure V.8 : Vue en amont du dalot 01.
Figure V.9 : Vue en aval du dalot 01.
Figure V.10 : Vue en amont du dalot 02.

Figure V.11 : Vue en aval du dalot 02.
Figure V.12 : Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement d'oued Errihane.
Figure V.13 : le profil en long du cours d'eau après aménagement.
Figure V.14 : Vue en plan en 3D de l'oued après l'aménagement.
Figure V.15 : Profils en travers d'un canal en enrochement pour une crue centennale d'oued Errihane.
Figure V.16 : Dimensions des deux dalots (01 et 02).
Figure V.17 : Détails du dalot 01.
Figure V.18 : Détails du dalot 02.
Figure V.19 : Vue en amont du dalot 01.
Figure V.20 : Vue en aval du dalot 01.
Figure V.21 : Vue en amont du dalot 02.
Figure V.22 : Vue en aval du dalot 02.
Figure V.23 : Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement d'oued Errihane.
Figure V.24 : le profil en long du cours d'eau après aménagement.
Figure V.25 : Vue en plan en 3D de l'oued après l'aménagement.
Figure V.26 : Profils en travers d'un canal en enrochement pour une crue centennale d'oued Errihane.
Figure V.27 : Dimensions des deux dalots (01 et 02).
Figure V.28 : Détails du dalot 01.
Figure V.29 : Détails du dalot 02.
Figure V.30 : Vue en amont du dalot 01.
Figure V.31 : Vue en aval du dalot 01.
Figure V.32 : Vue en amont du dalot 02.
Figure V.33 : Vue en aval du dalot 02.

Chapitre VI : organisation du 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 ABRÉVIATIONS

UNDRR : United nations office for disaster risk reduction.

USGS : United state geological survey.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

BV : Bassin Versant.

GRADEX : Gradient de l'exponentielle.

HEC-RAS : Hydrologic Engineering Center – River Analysis System.

MNT : Modèle Numérique de Terrain.

O.R.S.T.O.M : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.

ONM : Office National de la Météorologie.

RN : Route Nationale.

Introduction générale :

Les inondations figurent parmi les aléas naturels les plus fréquents et les plus destructeurs à l'échelle mondiale. Selon l'UNISDR (2015), elles représentent près de 43 % des catastrophes naturelles répertoriées entre 1994 et 2013, affectant environ 2,5 milliards de personnes. Leur impact devrait s'intensifier au cours des prochaines décennies sous l'effet combiné du changement climatique, de l'urbanisation et de la croissance démographique, en particulier dans les régions méditerranéennes, identifiées comme zones fortement vulnérables.

En Algérie, le risque d'inondation fait partie des dix risques majeurs recensés par la loi 04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable. Chaque année, une trentaine d'événements sont enregistrés à travers le territoire national, provoquant des pertes humaines et matérielles importantes.

La ville de Miliana, traversée par l'Oued Errihane, est particulièrement exposée à ce phénomène. En période de fortes pluies, les débordements de l'oued génèrent des crues rapides, menaçant les zones urbanisées et les infrastructures essentielles. Cette situation met en évidence l'urgence d'une gestion proactive et d'un aménagement adapté pour atténuer l'aléa hydrologique et réduire la vulnérabilité des populations locales.

L'objectif principal de ce mémoire est de réaliser un diagnostic hydrologique et hydraulique de l'Oued Errihane, puis de proposer une variante d'aménagement capable d'assurer la protection de la ville contre les crues. Pour ce faire, une démarche scientifique et progressive a été adoptée, reposant sur l'utilisation d'outils de simulation et d'analyse modernes, tels que ArcGIS, HEC-GEO, HEC-RAS et HYFRAN. Ces logiciels permettent d'évaluer les débits de crue, de délimiter les zones inondables, de simuler les écoulements et d'étudier le comportement hydraulique du cours d'eau.

Ainsi, ce travail vise à fournir une base méthodologique rigoureuse pour la conception d'un aménagement efficace, conciliant sécurité, durabilité et intégration environnementale, tout en contribuant à la résilience de la ville de Miliana face aux risques d'inondation.

Chapitre I :

Généralités sur les inondations.

Introduction :

Les inondations extrêmes liées aux précipitations sont susceptibles de s'intensifier dans un contexte de changement climatique futur, accroissant ainsi les menaces qu'elles représentent pour les populations, les infrastructures et les activités économiques. Une atmosphère plus chaude est en effet capable de contenir davantage de vapeur d'eau, conformément à l'équation de Clausius-Clapeyron, ce qui augmente la probabilité de précipitations plus abondantes. Si les mécanismes physiques de ce processus sont bien établis, les caractéristiques précises de ces événements dans le cadre du changement climatique demeurent étroitement dépendantes des spécificités régionales et locales.

I.1. Définition des termes essentiels :

I.1.1. Aléa :

L'Aléa est défini comme "un phénomène dangereux, une substance, activité humaine ou condition pouvant causer des pertes de vies humaines, des blessures ou d'autres effets sur la santé, des dommages aux biens, des pertes de moyens de subsistance et des services, des perturbations socio-économiques, ou des dommages à l'environnement."

I.1.2. Enjeux :

Enjeux est définie comme des "Personnes, biens, systèmes, ou autres éléments présents dans les zones de risque et qui sont ainsi soumis à des pertes potentielles". Comme indiqué dans le glossaire du UNDRR, "l'exposition peut inclure le nombre de personnes ou les types de bien dans une région. Elle peut être combinée avec la vulnérabilité spécifique des éléments exposés pour un risque particulier, afin d'estimer le risque associé en cette zone".

I.1.3. Vulnérabilité :

La vulnérabilité est définie comme "les caractéristiques et les circonstances d'une communauté ou d'un système qui le rendent susceptible de subir les effets d'un danger." Comme indiqué par l'UNDRR, Il existe de nombreux aspects de la vulnérabilité, découlant de divers facteurs physiques, sociaux, économiques et environnementaux. Les exemples peuvent inclure une mauvaise conception des bâtiments, une protection insuffisante des actifs, le manque d'information et de sensibilisation, la reconnaissance officielle limitée des risques et des mesures de préparation, et le mépris pour une sage gestion environnementale.

I.1.4. Risque :

Le risque se définit comme la combinaison entre la probabilité de survenue d'un aléa et l'ampleur des pertes potentielles qu'il peut engendrer sur les enjeux exposés. Ainsi, selon l'USGS, « le risque correspond à l'association entre la fréquence (ou probabilité) d'un événement et la gravité (ou importance des enjeux) s'il se produit ». Par ailleurs, Luhmann (1993) distingue le risque du danger en soulignant qu'il suppose une part de choix ou de responsabilité assumée par la société

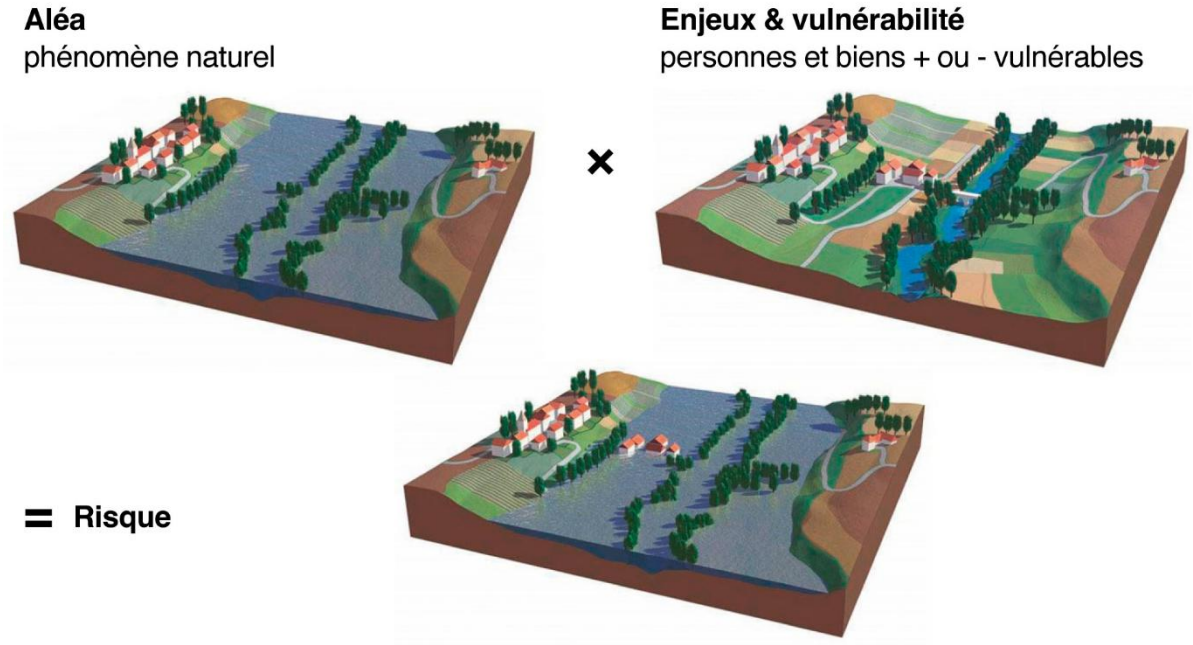


Figure I.1: Aléas, enjeux et risques: le cas des inondations.

I.2. Les inondations :

I.2.1 Définition des inondations :

L'inondation est un phénomène récurrent lié aux variations naturelles entre les périodes de hautes et de basses eaux d'un cours d'eau.

Elle peut s'étendre sur de vastes zones et se définit comme la submersion, rapide ou progressive, d'un espace normalement non recouvert par les eaux. Deux facteurs principaux contribuent à la survenue d'un risque d'inondation :

- Le débordement de l'eau en dehors de son lit d'écoulement habituel,
- L'occupation humaine des zones riveraines.

L'importance d'une inondation est généralement appréciée à travers plusieurs paramètres, à savoir :

- La hauteur atteinte par les eaux.
- La vitesse du courant.
- La durée de la crue.

I.2.2 Les différents types d'inondation :

Il existe différents types d'inondations, classés selon l'événement déclencheur :

- Les inondations de plaine,
- Les inondations par remontée de nappe,
- Les crues torrentielles,

- Le ruissellement en milieu urbain ou rural,
- Les inondations liées à la rupture de digues,
- Et les inondations marines.

Dans les quatre premiers cas, la pluie constitue le facteur principal, et les débordements surviennent généralement à partir des fleuves et rivières. Ces phénomènes se distinguent alors par leur **dynamique** :

- **Les inondations à cinématique lente** : caractérisées par une montée progressive des eaux, comme les inondations de plaine et les remontées de nappe.
- **Les inondations à cinématique rapide** : résultant de crues soudaines et violentes, telles que les crues torrentielles ou le ruissellement.

I.2.2.1 Inondations de plaine :

Les inondations de plaine surviennent généralement à la suite d'épisodes pluvieux océaniques prolongés, d'intensité modérée, tombant sur des sols dont le ruissellement est lent à se déclencher. Elles concernent principalement des bassins versants de taille moyenne à grande (supérieurs à 500 km²). Dans ce cas, le cours d'eau déborde progressivement de son lit mineur pour occuper son lit majeur et submerger la plaine sur une période relativement longue.

Ces phénomènes affectent particulièrement les terrains mal drainés et se caractérisent par une dynamique lente, pouvant perdurer plusieurs semaines.

Les dommages associés sont essentiellement liés à la hauteur et à la durée de la submersion.

I.2.2.2 Inondations par remontée des nappes phréatiques :

Les inondations par remontée de nappe phréatique surviennent lorsque la nappe atteint la surface du sol ou s'infiltre dans les réseaux d'assainissement. Il s'agit d'un phénomène de débordement indirect pouvant provoquer divers désordres, tels que des remontées d'eau sous les bâtiments, l'inondation des infrastructures souterraines, des tassements de remblais, des glissements de terrain, des perturbations des réseaux publics ainsi que des pressions exercées sous les constructions.

I.2.2.3 Inondations par crues torrentielles :

Les crues torrentielles se distinguent par leur caractère soudain et leur forte intensité, conséquence d'épisodes pluvieux intenses et localisés. On les identifie lorsque le temps de concentration, c'est-à-dire le délai nécessaire pour qu'une goutte d'eau parvienne à l'exutoire le plus éloigné du bassin versant, est inférieur à 12 heures (ou 24 heures selon certains critères).

Elles se caractérisent par une réaction très rapide du cours d'eau, fortement influencée par la pente, le nombre de Froude, le transport sédimentaire et les effets morphologiques associés. Ces phénomènes touchent particulièrement les zones montagneuses et les régions méditerranéennes, où les bassins versants sont de petite taille et présentent des pentes marquées.

Les crues torrentielles entraînent un transport massif de matériaux solides et une modification importante du lit fluvial. Les dommages qui en résultent sont principalement liés à la vitesse élevée du courant et à la charge solide transportée.

I.2.2.4. Inondations par ruissellement :

Les inondations par ruissellement se manifestent différemment selon qu'elles surviennent en milieu rural, périurbain ou urbain. Elles se caractérisent par leur soudaineté, leur courte durée et leur caractère difficilement prévisible, ce qui complique leur gestion en situation de crise. Généralement très localisées, elles concernent de petits bassins versants.

En milieu urbain, leur intensité est accentuée par l'imperméabilisation des sols, la diminution de la couverture végétale, la présence de pentes marquées et la survenue de précipitations intenses. Bien qu'ayant une origine naturelle, ces phénomènes peuvent être amplifiés par les activités humaines et l'aménagement du territoire.

I.2.2.5. Inondations par rupture d'ouvrage ou d'embâcle :

Dans le cas des **rivières endiguées**, les inondations peuvent survenir brutalement à la suite d'un débordement ou d'une rupture de digue. Ce phénomène est particulièrement dangereux lorsque les zones habitées ou aménagées se trouvent à proximité immédiate de l'ouvrage. En effet, la rupture ou le dépassement d'une digue compromet la protection assurée par l'aménagement et expose des secteurs habituellement préservés au risque d'inondation. Lorsque le débit excède la capacité de la retenue, le cours d'eau peut alors envahir sa plaine alluviale comme en l'absence de toute infrastructure.

Par ailleurs, l'arrachage de végétaux sur les berges peut obstruer les ponts, aggravant les inondations en amont. La rupture d'un embâcle peut également générer une vague, accroissant le risque en aval. Les ouvrages dont les piles sont insuffisamment dimensionnées pour laisser passer les embâcles se révèlent particulièrement vulnérables, exposés à des phénomènes de contournement ou de submersion susceptibles de provoquer de lourds dégâts, voire la destruction complète du pont et de ses remblais d'accès.

I.2.2.6. Inondations marines :

Les inondations marines correspondent au débordement temporaire de la mer sur les zones côtières, généralement provoqué par des conditions météorologiques extrêmes, telles que de fortes dépressions accompagnées de vents marins violents. Elles se traduisent par une intrusion d'eau salée, particulièrement corrosive et dommageable pour les sols, les infrastructures et les écosystèmes.

Ces phénomènes peuvent résulter de raz-de-marée ou de tsunamis (rares mais dévastateurs), de tempêtes associant vents violents et précipitations intenses, ou encore de la rupture d'ouvrages de protection côtière. Les zones dépressionnaires situées le long du littoral constituent les secteurs les plus exposés à ce type d'inondation.

I.3. Causes des inondations :

Les inondations résultent de plusieurs types de facteurs :

- **Facteurs naturels** : principalement liés aux conditions météorologiques et climatiques, tels que les pluies exceptionnelles, les orages violents, les précipitations torrentielles ou encore la fonte des neiges.
- **Facteurs anthropiques directs** : liés aux modifications apportées aux systèmes fluviaux et aux caractéristiques morphologiques des cours d'eau (largeur, longueur, pente). Ils incluent également la construction d'ouvrages hydrauliques, le drainage, l'irrigation, la dégradation des sols et certaines pratiques agricoles intensives, qui favorisent le ruissellement et réduisent l'infiltration.
- **Facteurs anthropiques indirects** : associés aux impacts de la pollution et du réchauffement climatique. L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre entraîne la fonte des glaciers polaires, l'élévation du niveau des mers et des cours d'eau, ainsi que l'intensification des cyclones.

I.4. Conséquences des inondations :

Les inondations touchent la quasi-totalité des pays du monde, avec des impacts d'intensité variable selon les régions. Elles génèrent des dommages considérables dans plusieurs domaines :

- **Santé et vie humaine** : pertes en vies humaines, propagation de maladies d'origine hydrique et perturbation du fonctionnement des services de santé.
- **Secteur socio-économique** : destruction de biens matériels et d'infrastructures, interruption des activités économiques et coûts importants liés aux réparations et à la reconstruction.
- **Environnement** : érosion des sols, dégradation des habitats naturels et contamination des sols et cours d'eau.

I.5. La crue :

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

- Le débit,
- La hauteur d'eau,
- La vitesse d'écoulement,
- Et la durée de l'événement.

I.5.1. Les caractéristiques d'une crue :

Une crue se définit à travers quatre paramètres fondamentaux :

- **Le temps de concentration** : durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau tombée au point le plus éloigné du bassin versant parvienne à l'exutoire.

- **La pointe de crue** : correspond au débit maximal atteint ainsi qu'à la durée de la phase critique.
- **La courbe de tarissement** : traduit le retour progressif du niveau d'eau de la rivière à son état normal après la crue.
- **La période de retour** : exprime la probabilité annuelle de survenue d'une crue donnée ; par exemple, une crue centennale a une chance sur cent (1/100) de se produire au cours d'une année.

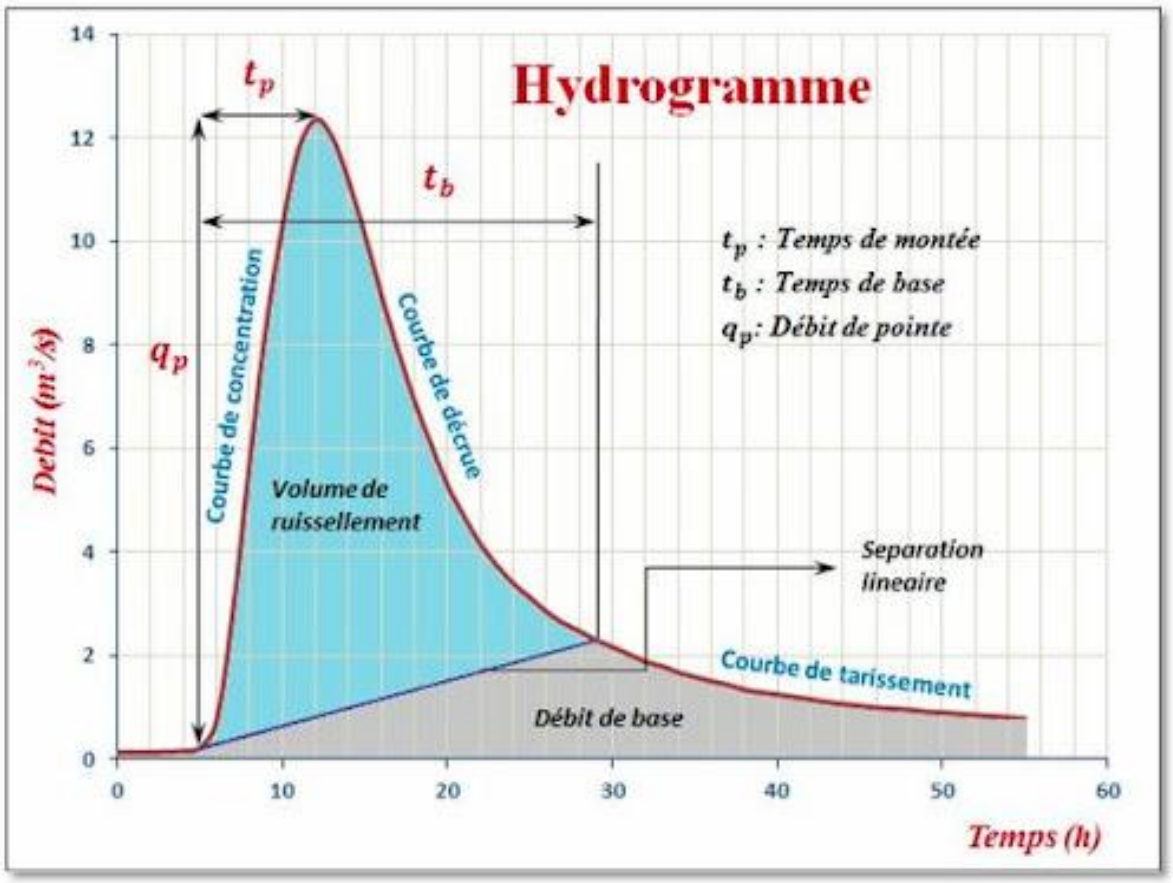


Figure I.2: Hyétogramme et hydrogramme résultant d'un événement pluie-débit.

I.6. Paramètres nécessaires à l'évaluation des catastrophes liées aux crues :

Les crues peuvent être décrites à partir de plusieurs paramètres essentiels :

- **La période de retour** : fréquence à laquelle un événement de crue d'une intensité donnée est susceptible de se reproduire.
- **La hauteur et la durée de submersion** : profondeur maximale atteinte par l'eau et temps pendant lequel ce niveau est maintenu.
- **La vitesse d'écoulement** : rapidité du déplacement de l'eau dans le lit du cours d'eau.
- **La torrentialité** : intensité et concentration des précipitations sur le bassin versant.

La probabilité d'occurrence d'une crue dépend de nombreux facteurs complémentaires, notamment la répartition spatiale et temporelle des pluies sur le bassin, l'évaporation et la consommation d'eau par la végétation, l'infiltration dans le sol et le sous-sol, ainsi que le ruissellement de surface.

Les dommages liés aux inondations sont principalement influencés par :

- La hauteur et la durée de la submersion,
- La vitesse des écoulements,
- Le volume de matériaux solides transportés,
- Et l'érosion des berges.

I.7. Mécanismes des inondations :

Les facteurs physiques qui influencent la survenue des inondations sont notamment :

- **Le régime pluviométrique :** répartition et intensité des précipitations,
- **Le relief :** configuration topographique du bassin versant,
- **La taille du bassin versant :** superficie de la zone de collecte et d'écoulement des eaux,
- **L'état des sols :** caractéristiques telles que la perméabilité et le degré d'humidité.

À ces éléments s'ajoutent des facteurs aggravants du risque d'inondation, liés aux activités humaines :

- **L'usage et l'occupation des sols :** urbanisation, agriculture et autres formes d'exploitation du territoire,
- **Les aménagements du territoire :** infrastructures et modifications du paysage,
- **Le manque d'entretien des cours d'eau :** absence de gestion et de maintenance des rivières et canaux

I.8. Paramètres fondamentaux du cours d'eau :

I.8.1. Lits du cours d'eau

Le lit d'un cours d'eau est façonné par les écoulements qu'il transporte ; ses dimensions dépendent donc directement du régime hydrologique. On distingue généralement trois composantes :

- **Le lit mineur** : espace occupé par le cours d'eau en régime ordinaire, correspondant au débit d'étiage ou aux crues fréquentes.
- **Le lit moyen** : zone intermédiaire, souvent recouverte par la ripisylve, formation végétale naturelle qui peut évoluer en forêt alluviale et s'étendre sur plusieurs dizaines, voire centaines de mètres, de part et d'autre du lit mineur.
- **Le lit majeur** : espace inondable situé de part et d'autre du lit mineur, pouvant s'étendre de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Sa limite est fixée par l'extension des crues exceptionnelles. Il constitue une partie intégrante du cours d'eau : toute occupation humaine dans cette zone revient donc à empiéter sur le domaine naturel de la rivière.

Lors d'une inondation, le lit majeur se divise généralement en deux zones :

- Une zone d'écoulement, proche du lit mineur, caractérisée par des vitesses d'eau plus élevées ;
- Une zone de stockage, où l'écoulement est ralenti, favorisant l'accumulation d'eau.

Par ailleurs, certaines notions sont importantes pour comprendre la dynamique fluviale :

- **La berge** : talus incliné séparant le lit mineur du lit majeur.
- **La rive** : espace situé au sommet de la berge, marquant la transition entre le milieu aquatique et terrestre. Elle se présente comme une surface plus ou moins plane, soumise à l'influence du cours d'eau.
- **La ripisylve** : végétation naturelle qui borde les rives et peut se développer en forêt alluviale. Elle joue un rôle écologique majeur et participe à l'atténuation des crues lorsqu'elle occupe une partie significative du lit majeur.

I.9. L'évènement des inondations :

I.9.1 En Algérie :

Parmi les quatorze risques majeurs identifiés par l'ONU, le risque d'inondation en Algérie figure parmi les dix principaux dangers répertoriés sur le territoire national et est mentionné dans la loi n° 04-20 du 25 décembre 2004, relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.

Les analyses menées sur une période de 163 ans font état de 107 événements recensés, ayant engendré d'importants dégâts. Le bilan cumulé s'élève à 4 211 décès, 529 blessés, 144 disparus et 78 168 sinistrés, tandis que les pertes économiques sont estimées à 32,86 milliards de dinars algériens (soit environ 284 millions d'euros).

Tableau I.1: Recensement des inondations catastrophiques en Algérie (1970-2023) (Le CRSTRA, 2004).

Date de l'événement	Zones touchées	Nombre de victimes
12 Octobre 1971	Azzazga (W Tizi Ouzou)	40 morts
28 au 31 Mars 1974	Alger et Tizi Ouzou	52 morts
01 Septembre 1980	EL Eulma (W.Sétif)	44 morts
22 Août 1983	Birrine (W.Djelfa)	10 morts
03 Février 1984	Jijel, Constantine, Skikda,Guelma, Khenchla et OumEl Bouaghi	23 morts
05 Juillet 1987	Batna	02 morts
01 Septembre 1989	Biskra	02 morts
21 Septembre 1989	Msila	01 mort
15 Octobre 1989	Ain Defla	01 mort
03 Juin 1991	Ghardaia	09 morts
26 - 27 Janvier 1992	Alger, Blida, Tipaza, Chlef,Ain Defla, Medea..	10 morts
20 Octobre 1993	Oued R'hiou (W. Relizane)	22 morts
23 Septembre 1994	Bordj Bou Arréridj, Msila,Djelfa, Medea, Bouira, AinDefla et Tiaret	27 morts
29/09 au 02/10/1994	Ghardaia, Laghouat, Biskra, Mascara, Tissemssilt et Sidi Bel Abbés	21 morts
04 Avril 1996	Annaba et El Tarf	5 morts
14 Janvier 1999	Adrar	12 morts
28 Septembre 2000	Bou Saâda (W. M'Sila)	01 mort
14 Octobre 2000	Ain Temochent	04 morts
23 Octobre 2000	Naama	05 morts
24 Octobre 2000	Sidi Bel Abbes, Tissemsilt, Chlef et Ain Defla	01 mort
10 et 11 Novembre 2001	Bab El Oued (Alger)	800 morts
18 et 19 Avril 2007	Ghardaïa	29 morts
01 Octobre 2008	Ghardaïa	Plus de 33 morts,
01-02 Octobre 2011	El Bayadh	13 morts
29 Aout 2015	Khenchela (communes de Babar et Ouled Rechache).	1personne est disparue
14 septembre 2018	Tébessa	1 mort
12 septembre 2019	Alger, Guelma, Djelfa, Souk-Ahras, Bechar	9 morts
Mai 2021	Médéa	1 mort
20 Octobre 2022	Tiaret	4 morts
Mai 2023	Tipaza	2 morts
Novembre 2023	Béjaia (Bordj Mira)	1 mort et un porté disparu

I.9.2 Les causes des inondations en Algérie :

- Situations météorologiques extrêmes : caractérisées par de fortes précipitations, incluant des pluies intenses et des orages violents.
- Inondations d'origine anthropique : liées notamment à la défaillance des réseaux d'assainissement et de collecte des eaux pluviales, à l'encombrement des oueds par des débris et déchets, ainsi qu'à divers comportements humains aggravant les dommages lors des averses saisonnières.
- Topographie défavorable : qui, combinée à la forte concentration des précipitations et à l'urbanisation croissante, accentue considérablement le risque d'inondation.
- Crues torrentielles (ou crues éclair) : se produisant principalement dans les petits bassins versants, avec une montée rapide et brutale des eaux.
- Crues de grands bassins versants : généralement engendrées par des précipitations intenses et étendues, elles se distinguent par leur longue durée et par l'importance des volumes écoulés.
- Transport solide significatif : observé dans 56 % des cas étudiés, illustrant le rôle majeur de l'érosion et du charriage sédimentaire lors des épisodes de crue.

I.10 Stratégie nationale de lutte contre les inondations en Algérie :

Le Ministère des Ressources en Eau a engagé une politique nationale visant à limiter les impacts des inondations, à travers l'élaboration d'études de protection des agglomérations exposées et la mise en œuvre progressive des mesures recommandées. À ce titre, plusieurs projets intégrés dans les différents programmes de développement ont permis la réalisation de dispositifs concrets de protection des villes contre les inondations.

I.10.1 – Le cadre réglementaire :

La loi n° 04-20 du 25 décembre 2004, relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable, définit dix (10) risques majeurs dont les risques climatiques, subdivisés en six catégories, incluant notamment le risque d'inondation.

I.10.2 – Les mesures structurelles (protection physique) :

Parmi les principales actions figurent la réalisation de digues longitudinales, barrages écrêteurs, bassins de rétention, ainsi que l'aménagement et le recalibrage des oueds, autant de dispositifs destinés à contenir ou à réguler les crues.

I.10.3 – Les mesures opérationnelles

Un dispositif d'intervention est activé à chaque émission de Bulletin Météorologique Spécial (BMS). Celui-ci repose sur la mobilisation des équipes d'exploitation des organismes compétents (ONA-SEAAL, SEOR, SEACO) déployées aux points inondables identifiés, afin de limiter les dégâts potentiels.

I.10.4 – Les mesures préventives :

Des actions préventives sont également mises en place, parmi lesquelles le développement de systèmes pilotes de prévention et d'alerte (cas des projets réalisés sur l'Oued El Harrach et l'Oued Mekkara), ainsi que la modernisation des stations hydrométriques de l'ANRH et la mise en œuvre des PPRI pilotes (Plans de Prévention des Risques d'Inondation).

Conclusion :

Ce premier chapitre a permis d'établir un cadre théorique servant de base de réflexion sur le risque d'inondation. Il a abordé les principaux facteurs qui l'accentuent, les notions de risque et leurs concepts connexes, ainsi que les caractéristiques propres aux inondations et les modes de gestion envisageables.

Le changement climatique, dont la réalité est désormais difficile à contester, engendre des conséquences potentiellement dévastatrices : réchauffement généralisé, élévation du niveau des mers et augmentation de la fréquence des phénomènes extrêmes. Ces transformations amplifient les risques, notamment les inondations, particulièrement marquées dans les zones littorales basses.

La capacité de gestion des inondations varie selon les pays, les régions, les communautés ou encore les catégories de population. Il n'existe pas de solution universelle à ce problème : les conditions locales déterminent les choix à privilégier. Ainsi, chaque zone inondable présente des spécificités nécessitant des réponses adaptées.

De plus, la mise en place de dispositifs de protection contre les inondations requiert des conditions spécifiques qui, dans bien des cas, restreignent l'efficacité des mesures envisagées. Il devient dès lors indispensable d'identifier la solution la plus appropriée au contexte local, tout en prévoyant des marges de sécurité suffisantes, étant donné que les méthodes d'évaluation disponibles ne permettent pas toujours d'atteindre une précision optimale.

CHAPITRE II :

Présentation de la zone d'étude.

Introduction :

La mise en place d'un dispositif efficace de protection contre les inondations exige, en premier lieu, une analyse approfondie du contexte géographique de la zone d'étude, de ses caractéristiques climatiques, de sa configuration topographique. Cette étape constitue un préalable indispensable pour évaluer le degré de vulnérabilité face aux crues et identifier les aménagements hydrauliques les plus adaptés afin d'en réduire les impacts.

Dans cette optique, le deuxième chapitre est consacré à l'étude de l'oued Errihane, situé au lieu-dit Oued Errihane dans la commune de Miliana. L'analyse prend également en compte les zones urbanisées et les localités environnantes, dans le but de délimiter un périmètre d'étude représentatif des enjeux liés au risque d'inondation.

II.1 Situation géographique :

La commune de Miliana, située dans la wilaya d'Aïn Defla, au nord de l'Algérie et à environ 120 km au sud-ouest d'Alger, occupe une position géographique stratégique sur les pentes méridionales du mont Zaccar. Elle s'élève à une altitude moyenne d'environ 700 mètres, ce qui lui permet de dominer la vaste plaine du Chélif.

Elle est délimitée au nord par la commune de Menacer, à l'est par Hammam righa , à l'ouest par El Amera et au sud par Khemis miliana.

Sa localisation, à la transition entre le relief montagneux et la vallée du Chélif, lui confère non seulement un rôle de carrefour géographique, mais l'expose également aux écoulements hydriques provenant du massif du Zaccar, notamment via l'oued ERRIHANE. Cette configuration fait de Miliana un espace à forts enjeux, tant pour l'urbanisation que pour la gestion des risques hydrologiques.

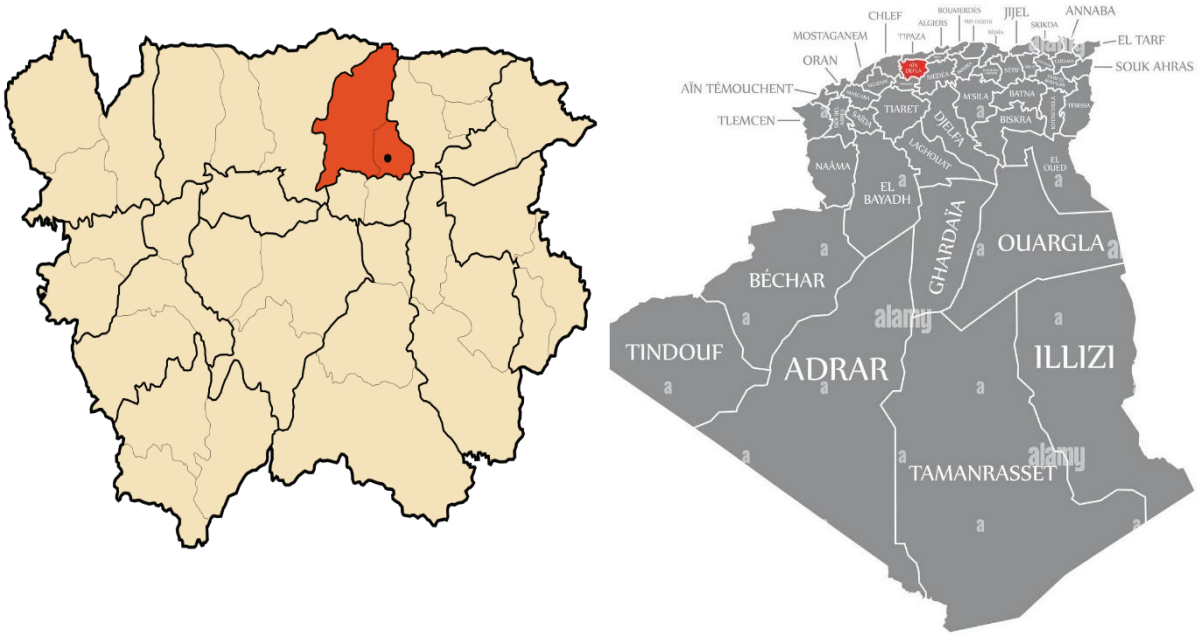


Figure II.1 Localisation de Miliana.

L'oued **Errihane**, situé à l'ouest de la ville de Miliana, traverse le lieu-dit portant le même nom. Son cours coupe la route principale reliant Ben Allal au centre-ville de Miliana. Sur son passage, il longe plusieurs zones d'habitation ainsi que des équipements publics, notamment une école primaire et l'institut des mines, ce qui accentue la vulnérabilité des populations riveraines en cas de crue.



Figure II.2: Une image satellitaire d'oued Errihane.

II.2. Sismicité

L'Algérie, située à la jonction de plusieurs plaques tectoniques, se caractérise par un fort potentiel sismique. Son histoire récente et ancienne témoigne de nombreux séismes destructeurs ayant marqué le territoire. Afin de mieux appréhender ce risque, le pays a été divisé en cinq zones de sismicité croissante, classées selon leur niveau d'exposition et leur intensité potentielle.

- **Zone 00 :** risque quasi inexistant,
- **Zone 01 :** risque faible,
- **Zones 02 et 03 :** risque modéré

Zone 04 : risque significatif.

D'après la figure ci-dessus, il apparaît que notre zone d'étude, Miliana, se situe dans la zone 04, ce qui la classe parmi les régions à sismicité moyenne.

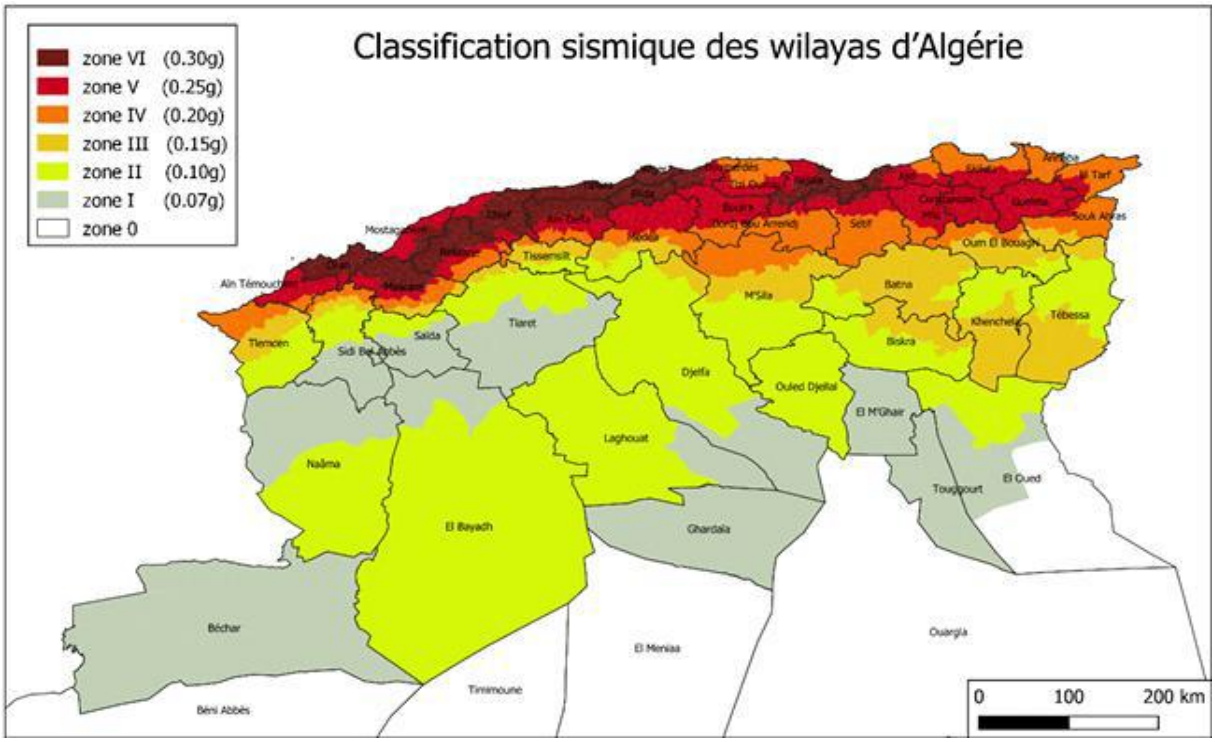


Figure II.3: Les zones sismiques d'Algérie. (RPA)

II.3. La Climatologie :

Le climat de l'Algérie est classé dans le domaine méditerranéen, caractérisé par une saison pluvieuse généralement comprise entre septembre et mai, suivie d'un été sec et chaud. L'Atlas tellien, auquel appartient notre zone d'étude, joue le rôle de barrière orographique favorisant la condensation de la vapeur d'eau transportée par les vents marins et, par conséquent, les précipitations. Par ailleurs, l'altitude engendre une diminution notable des températures, tandis que l'éloignement de l'influence maritime accentue les contrastes thermiques quotidiens et annuels, ce qui impacte directement la dynamique climatique et hydrologique de la région.

Dans le cadre de cette étude, les données climatologiques proviennent d'organismes spécialisés. L'Office National de la Météorologie (ONM) fournit des informations relatives aux températures, à la vitesse du vent, tandis que l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) assure le suivi des relevés pluviométriques dans la région. L'exploitation de ces données permet d'analyser les variations saisonnières, la fréquence des épisodes pluvieux intenses et leurs impacts potentiels sur le réseau hydrographique de Miliana.

En combinant l'étude des séries de données avec l'observation des événements climatiques, cette section vise à mieux cerner leur influence sur le risque d'inondation

II.3.1. Température :

Les relevés de température disponibles dans le bassin versant restent limités ; toutefois, malgré ces insuffisances, certaines observations significatives peuvent être dégagées. L'attention se porte particulièrement sur la saison sèche, qui exerce une influence déterminante en accentuant l'évapotranspiration, phénomène majeur à l'origine du déficit d'écoulement. La durée prolongée de cette saison met en évidence l'exposition des sols aux effets thermiques, lesquels favorisent la désagrégation des formations superficielles et accentuent leur vulnérabilité à l'érosion. En raison de l'absence de séries locales complètes sur la température de l'air, l'analyse repose sur les relevés de la station météorologique la plus proche, choisie comme référence.

L'examen des températures mensuelles sur une période de 36 ans (1986-2022) révèle que le mois de février enregistre des minima pouvant descendre jusqu'à 2,4 °C, tandis que les mois de juillet et août connaissent des maximas atteignant 49 °C. La température moyenne annuelle de la région s'établit, pour sa part, à 20,3 °C, traduisant un climat marqué par de fortes amplitudes thermiques entre saisons.

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

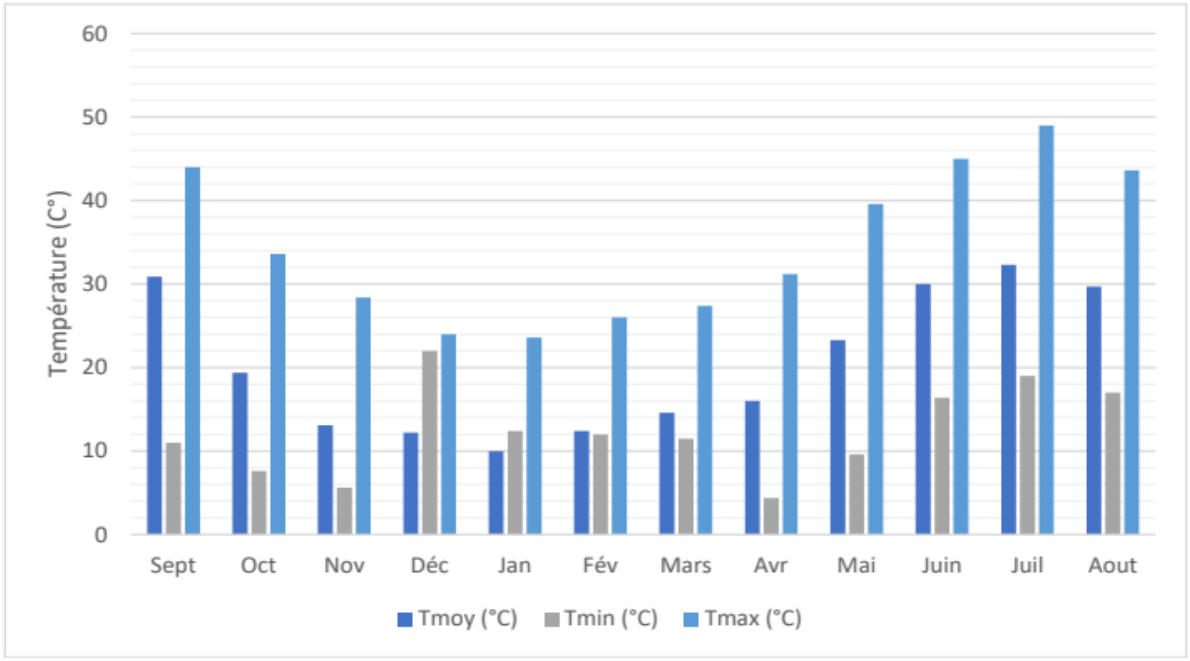


Figure II.4: Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales.

II.3.2. Vent :

L'étude du régime des vents revêt une importance particulière dans la conception des infrastructures et dans les analyses hydrauliques. La connaissance de la répartition mensuelle des vents, tant en termes de vitesse que de fréquence, ainsi que l'examen de leur direction dominante, constituent des paramètres essentiels pour l'évaluation des contraintes climatiques. Le tableau ci-après présente les vitesses moyennes des vents enregistrées à la station de référence au cours de la période 1986-2022.

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 (Km/h)	2.96	3.22	3.15	2.65	1.63	2.68	4.2	3.00	2.32	2.92	3.36	4.68

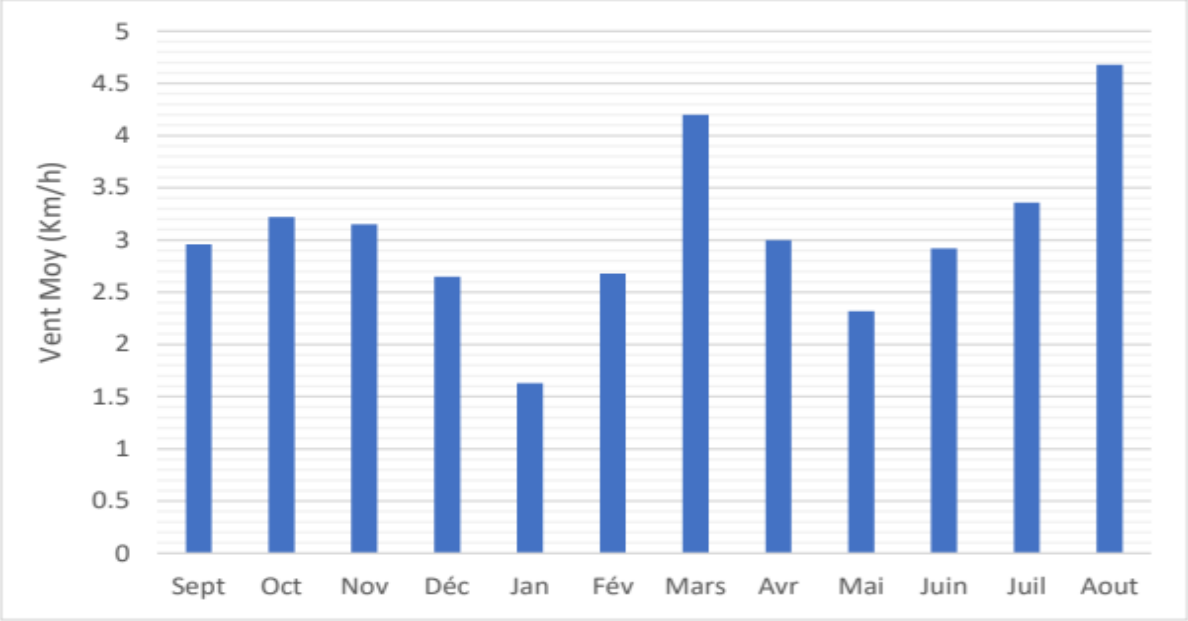


Figure II.5: Distribution des vitesses du vent

II.3.3. Précipitations :

Les précipitations correspondent à l'ensemble des eaux météoriques recueillies sur un bassin versant ou une surface donnée. Elles sont généralement quantifiées par la hauteur de précipitation, définie comme l'épaisseur de la lame d'eau qui s'accumulerait sur une surface horizontale si l'intégralité des précipitations tombait sous forme liquide.

Le tableau ci-dessous présente les précipitations relevées à la station du barrage Herraza sur une période de 36 ans (1986-2022).

Tableau II.3: Répartition des pluies mensuelles interannuelles de la station pluviométrique 011718.

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Pv (mm)	67	83.7	91.1	101.1	137.7	136.2	120	112.6	63.1	17.5	4	24.6

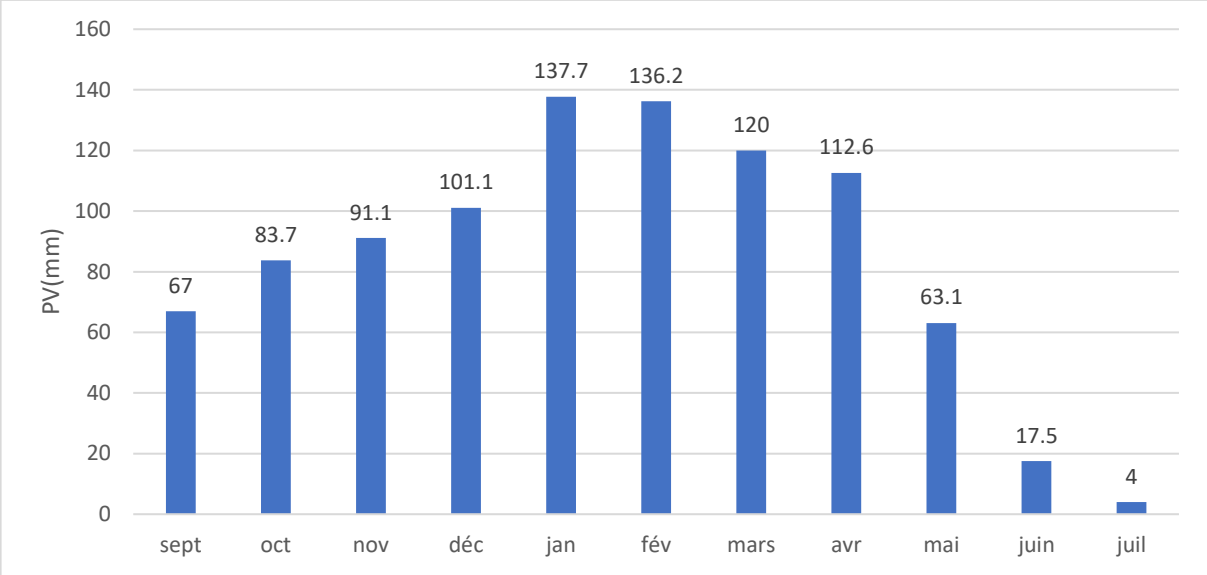


Figure II.6: Evolution de la pluviométrie mensuelle interannuelles.

Conclusion :

L'étude diagnostique constitue une étape fondamentale, car elle permet d'acquérir une connaissance approfondie de la zone d'étude dans ses différentes dimensions (géologique, climatique, etc.). Elle contribue à identifier les véritables causes des inondations, qu'elles soient liées aux oueds, aux chaâbas ou encore à leurs interactions. En période de crue, cette analyse facilite la compréhension du comportement de ces écoulements. Elle offre également la possibilité d'évaluer les dégâts potentiels et de proposer une première orientation des mesures à envisager, avant d'engager des études hydrologiques et hydrauliques plus détaillées.

CHAPITRE III :

Etude hydrologique.

INTRODUCTION :

L'hydrologie est une branche fondamentale des sciences de la Terre, dédiée à l'étude approfondie du cycle de l'eau dans son intégralité. Elle englobe l'analyse des précipitations, du ruissellement, de l'humidité du sol, de l'évapotranspiration et des cours d'eau. Au-delà de sa présence en surface, cette discipline s'intéresse également aux ressources en eau souterraines, ainsi qu'à leurs propriétés chimiques, biologiques et physiques.

Son rôle principal est de comprendre la distribution spatiale et temporelle de l'eau, tout en identifiant les mécanismes complexes qui la régissent, tels que l'érosion, le transport de sédiments et la recharge des nappes phréatiques. Grâce à son approche interdisciplinaire, l'hydrologie est cruciale pour relever les défis liés à la gestion et à l'utilisation durable des ressources en eau.

Ainsi, les études hydrologiques sont indispensables pour le développement et la planification d'infrastructures hydrauliques majeures, comme les barrages et les canaux. Elles permettent notamment d'estimer les débits maximaux pour diverses périodes de retour (par exemple, 10, 20 ou 50 ans), informations vitales pour la prévention des inondations

Ce chapitre se concentre sur la délimitation du bassin versant d'Oued ERRIHANE, (situé à l'ouest de la ville de MILIANA, au nord de la wilaya d'AIN DEFLA.) et l'identification de ses paramètres hydrologiques clés en utilisant le logiciel ArcGIS.

L'objectif est également d'estimer les périodes de retour et de calculer les débits de crue nécessaires à la conception d'un aménagement fluvial visant à protéger la zone contre les inondations.

III.1 BASSIN VERSANT :

III.1.1 Caractéristiques principales du Bassin versant :

Un bassin versant (aussi appelé bassin d'alimentation) est une zone géographique dans laquelle toutes les eaux de pluie ou de ruissellement s'écoulent vers un même point de sortie, appelé exutoire. Ce point est souvent situé à un endroit où l'on mesure le débit d'un cours d'eau. Tous les ruisseaux, rivières et affluents situés en amont de ce point font donc partie du bassin versant.

La limite entre deux bassins versants s'appelle la ligne de partage des eaux. Cette ligne suit les points les plus élevés du relief (les crêtes). Sur une carte topographique, on peut la tracer en commençant par l'exutoire, puis en reliant, à main levée, des points situés perpendiculairement aux courbes de niveau. En suivant les sommets, on forme ainsi un contour fermé qui revient à l'exutoire.

III.1.1.1 Caractéristiques principales du Bassin versant :

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

Longitude : 2.206 °. Latitude : 36.305 °. L'altitude : 656m.

III.1.1.2 Les caractéristiques morphologiques :

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant ont une influence déterminante sur sa réponse hydrologique, en particulier sur le comportement des écoulements lors des crues ou des périodes d'étiage. Le temps de concentration (Tc), qui reflète en partie la rapidité et l'intensité avec lesquelles le bassin réagit aux précipitations, dépend de plusieurs paramètres morphologiques tels que la superficie du bassin, sa configuration, son altitude, sa pente et son orientation. D'autres facteurs comme la nature des sols, la couverture végétale et les propriétés du réseau hydrographique interviennent également. Ces éléments, qu'ils soient d'ordre géométrique ou physique, peuvent être analysés aisément à l'aide de cartes spécialisées ou par le biais de méthodes numériques, notamment à partir de modèles numériques de terrain.

- **La surface :**

La superficie d'un bassin versant représente la zone géographique délimitée par la ligne de partage des eaux ou par les contours du bassin. Pour l'estimer, on peut recourir à des outils tels qu'un planimètre ou utiliser la méthode des petits carrés. Cette surface est habituellement exprimée en kilomètres carrés (km²), ce qui permet de quantifier la dimension du bassin versant.
Le bassin versant d'OUED ERRIHANE a une superficiel de S= 1,44Km²

- **Le Périmètre :**

Le périmètre correspond à la limite extérieure du bassin versant. Chaque bassin réagit de manière distincte aux précipitations qu'il reçoit, et ses caractéristiques hydrologiques sont influencées à la fois par le climat local et par les particularités physiques spécifiques à ce bassin.
Le périmètre du bassin versant d'OUED ERRIHANE est : P=7,10Km

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

Le talweg relie les points les plus bas en altitude dans un relief donné, que ce soit au fond d'une vallée ou le long d'un cours d'eau.
La longueur du cours d'eau principal est : Lcp=2.85Km

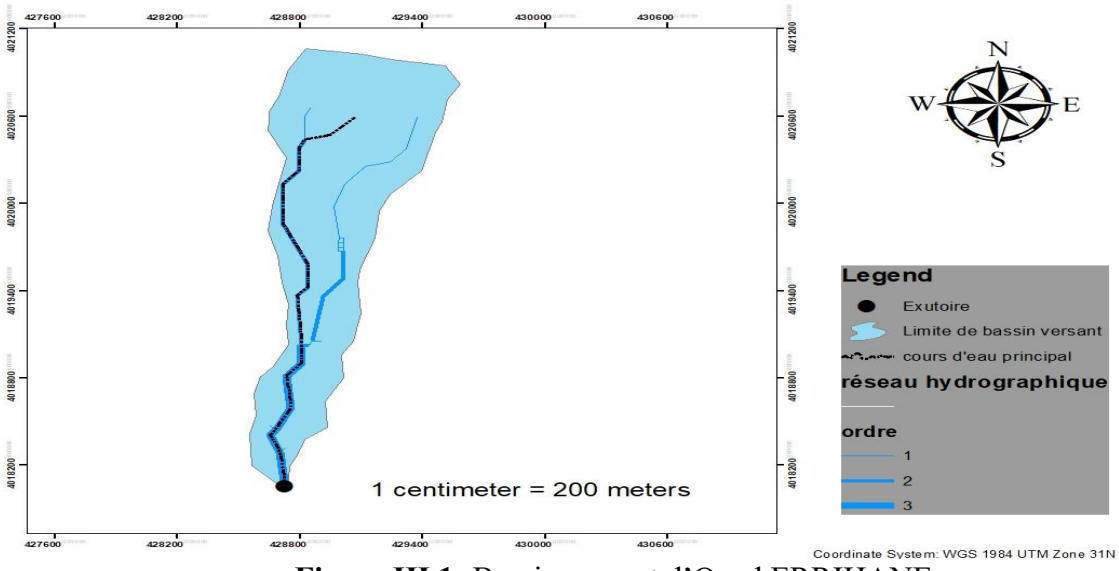


Figure III.1: Bassin versant d'Oued ERRIHANE.

III.1.1.3 Les caractéristiques géométriques :

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

Pour déterminer l'indice de compacité de Horton, on établit le rapport entre la largeur moyenne du bassin versant et la longueur de son cours d'eau principal.

Ce rapport se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$\mathbf{k_h = \frac{S}{L_{cp}^2}} \qquad \textbf{(III.1)}$$

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 évaluer la compacité d'un bassin versant. Il permet d'analyser l'influence de la forme du bassin sur la concentration des écoulements et sur la vitesse de réaction aux précipitations, notamment en ce qui concerne les crues.

Selon M. Perry (1995), cet indice également appelé indice de compacité ou indice de forme (KG) sert à comparer les formes des bassins versants entre eux. Une valeur plus élevée de cet indice indique une forme plus allongée, généralement associée à une réponse hydrologique plus lente qu'un bassin de forme compacte.

L'indice de Gravelius se calcule à partir du rapport entre le périmètre du bassin (P), exprimé en kilomètres, et le périmètre d'un cercle ayant la même superficie (S), exprimée en kilomètres carrés (km^2). La formule utilisée est :

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

Avec :

K_G : Indice de compacte de gravelius.
P : Périmètre de bassin versant (km)
S : Surface du bassin versant (km^2).

Pour :

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

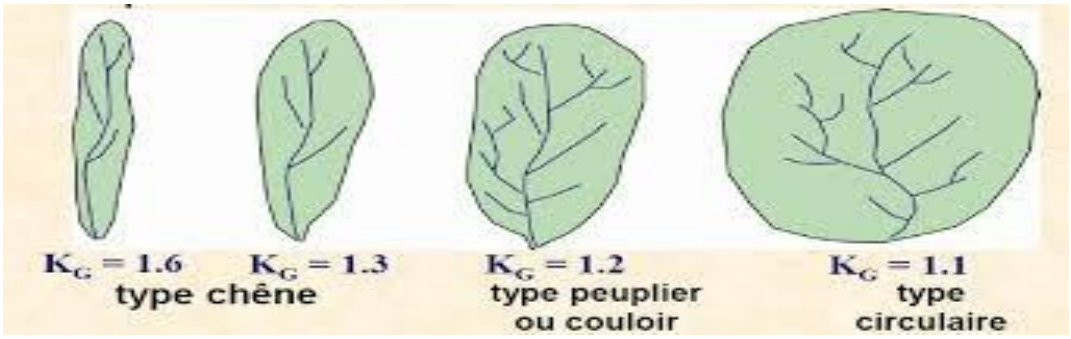


Figure III.2 : Différents types des bassins versant selon le coefficient de gravelius K_G.

Plus l'indice de compacité K_G est élevé, plus le bassin versant présente une forme allongée. Cela signifie qu'une goutte d'eau tombée à l'extrémité amont du bassin mettra plus de temps à atteindre l'exutoire. En conséquence, la montée des eaux sera plus progressive, et la crue moins intense. Ainsi, l'indice de compacité est généralement proportionnel au temps de concentration T_C .

- **Coefficient d'allongement :**

le coefficient d'allongement (C_a) est un paramètre morphométrique utilisé pour comparer la forme des bassins versants. Il est défini comme le rapport entre la longueur du bassin et le diamètre d'un cercle ayant la même superficie. Cet indice permet d'estimer la manière dont un bassin réagit aux précipitations, en particulier en ce qui concerne la concentration et l'écoulement des eaux (Gregory et Walling, 1973).

Il est exprimé par la relation suivante :

$$\mathbf{C_a = \frac{L_{cp}^2}{S}} \qquad \textbf{(III.3)}$$

Avec :

C_a : Coefficient d'allongement.

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

Un coefficient d'allongement élevé indique que le bassin versant est plus étiré, ce qui peut favoriser un regroupement plus rapide des eaux de ruissellement. Cette configuration entraîne

généralement une réponse hydrologique plus rapide aux précipitations, augmentant ainsi le risque de crues soudaines.

- **Rectangle équivalent :**

Le rectangle de Gravélius est un outil conceptuel utilisé en hydrologie et en géomorphologie pour représenter un bassin versant sous la forme d'un rectangle ayant la même superficie que le bassin réel.

Cette représentation simplifiée permet de faciliter les calculs et les comparaisons, notamment en ce qui concerne les écoulements entre différents bassins. En standardisant la forme des bassins versants, les chercheurs peuvent appliquer des méthodes d'analyse plus simples pour évaluer leurs caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques.

Les dimensions de ce rectangle permettent ensuite de déterminer son périmètre et sa superficie à l'aide des formules suivantes :

$$P = 2(L_r . l_r) \quad \textbf{(III.4)}$$

$$A = L_r . l_r \quad \textbf{(III.5)}$$

Avec :

P : Le Périmètre du rectangle équivalent (Km).
A : La Superficie du Rectangle équivalent (Km^2).
L_r : La Longueur de rectangle équivalent (Km).
l_r: La Largueur de rectangle équivalent (Km)

La longueur L_r et la largueur l_r en unité de (km) sont données par la résolution de P et A :

$$K_G = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \textbf{(III.6)}$$

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

$$L_r = \frac{k_G \sqrt{A}}{1,12}\left\{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{k_G}\right)^2}\right\} \quad \textbf{(III.7)} \quad \textbf{et} \quad l_r = \frac{k_G \sqrt{A}}{1,12}\left\{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{k_G}\right)^2}\right\} \quad \textbf{(III.8)}$$

Avec :

L_r : La Longueur de rectangle équivalent (Km).
l_r : La Largueur 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 ERRIHANE sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III.1: Les paramètres hydro morphométriques du bassin versant d'Oued ERRIHANE.

Désignation	Symbol	Unités	Valeur	Interprétation
Superficie	S	Km	1,44	/
Périmètre	P	Km	7.10	/
Longueur de thalweg principal	L_{cp}	Km	2,85	/
Indice de compacité de Horton	K_h	/	0,177	Bassin allongé
Indice de compacité de gravélius	K_G	/	1,668	Bassin allongé
Coefficient d'allongement	C_a	/	5,74	Forme très étirée
Longueur de rectangle équivalent	L_r	Km	3,101	/
Largeur de rectangle équivalent	l_r	Km	0,4632	/

III.1.2 Caractéristique hydrographique :

III.1.2.1 Etude du Relief :

L'influence du relief sur l'écoulement est incontestable, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques, comme les précipitations et les températures, varient en fonction de l'altitude et de la morphologie du bassin. De plus, la pente constitue un facteur déterminant dans la vitesse d'écoulement des eaux. L'analyse du relief se fait également à travers plusieurs indices ou caractéristiques spécifiques, parmi lesquels :

- La courbe hypsométrique.
- L'altitude moyenne.
- L'indice de pente globale Ig
- L'indice de pente roche Ip..
- La densité de drainage Dg.

III.1.2.2 La courbe hypsométrique :

L'hypsométrie désigne la répartition relative des surfaces d'une région en fonction de l'altitude. La courbe hypsométrique, quant à elle, représente la relation entre la superficie cumulée et l'élévation, illustrant ainsi la distribution altimétrique d'un bassin versant (Strahler, 1952).

Pour estimer ces paramètres, il est nécessaire de présenter la répartition hypsométrique, obtenue après la planimétrie des surfaces partielles délimitées entre les courbes de niveau maîtresses et les différentes altitudes.

La carte hypsométrique, élaborée à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT), met en évidence des altitudes relativement faibles à proximité de l'exutoire, avoisinant 656 m. En s'éloignant de ce point, les altitudes augmentent progressivement jusqu'à atteindre un maximum de 1564 m.

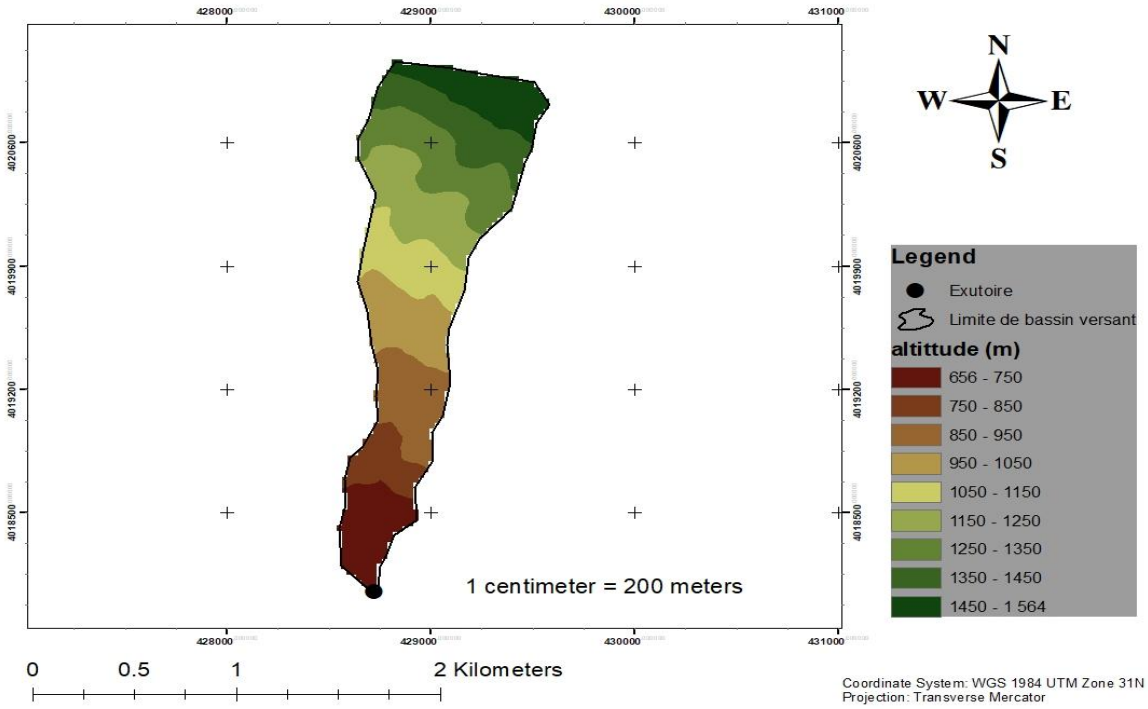
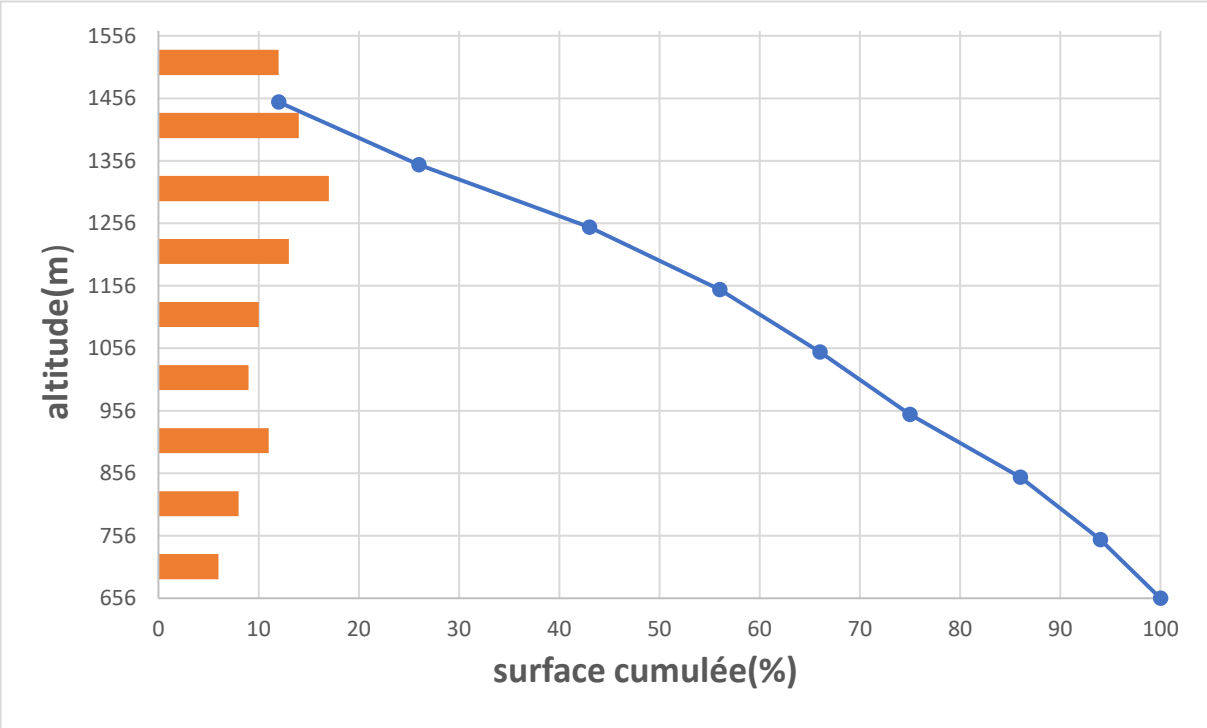


Figure III.3: Carte hypsométrique de bassin versant d'Oued ERRIHANE.

La répartition des surfaces élémentaires en fonction des altitudes, ainsi que leur cumul, ont été obtenus à l'aide du logiciel ArcGIS et présentés sous forme de tableaux. Les répartitions des surfaces, ainsi que les courbes hypsométriques de chaque sous-bassin, sont illustrées ci-dessous.

Tableau III.2 : Paramètres Hypsométriques du bassin versant d'Oued ERRIHANE.

altitude	Hi (m)	Surface partielles (Km^2)	Surfaces partielles cumulées (Km^2)	Surfaces partielles (%)	Surfaces partielles cumulées (%)
656-750	703	0.08104	0.08104	6	6
750-850	800	0.12011	0.20115	8	14
850-950	900	0.158185	0.359335	11	25
950-1050	1000	0.128965	0.4883	9	34
1050-1150	1100	0.147054	0.635354	10	44
1150-1250	1200	0.186334	0.821688	13	57
1250-1350	1300	0.25062	1.072308	17	74
1350-1450	1400	0.206239	1.278547	14	88
1450-1564	1507	0.160887	1.439434	12	100



FigureIII.4: courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued ERRIHANE.

Les caractéristiques topographiques principales en termes d'altitude comprennent :

- **Altitude maximale et minimale (Hmax - Hmin)** : Ces deux 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 localisé à l'exutoire. Ces données sont essentielles pour établir des liens avec certaines variables climatologiques, telles que la température et les précipitations.
- **Altitude moyenne (Hmoy)** : L'altitude moyenne d'un bassin versant est un indicateur clé qui reflète l'influence de la zonation climatique liée à l'altitude. Elle se calcule en faisant la somme des produits des surfaces partielles S_i situées entre les courbes de niveau, par leurs altitudes moyennes correspondantes H_i. Cette valeur est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum s_i H_i}{S} \quad \textbf{(III.9)}$$

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 $H_{5\%}$:** Il s'agit de la projection sur la courbe hypsométrique du point correspondant à 5% de la surface cumulée
- **Altitude médiane $H_{50\%}$:** Il s'agit de la projection sur la courbe hypsométrique du point correspondant à 50% de la surface cumulée.
- **Altitude $H_{95\%}$:** 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 ERRIHANE.

Altitudes	H_{min}	H_{max}	H_{moy}	$H_{5\%}$	$H_{50\%}$	$H_{95\%}$
BV OUED ERRIHANE	656	1564	1157.46	1500	1227.77	734,33

III.1.2.3 Indice de pente :

L'objectif de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant afin de faciliter les comparaisons et les classifications entre différentes zones.

Ils ont un impact direct sur l'hydrologie du bassin, notamment en influençant le débit de pointe lors des épisodes pluvieux. Une carte des pentes permet de visualiser la topographie générale de la région.

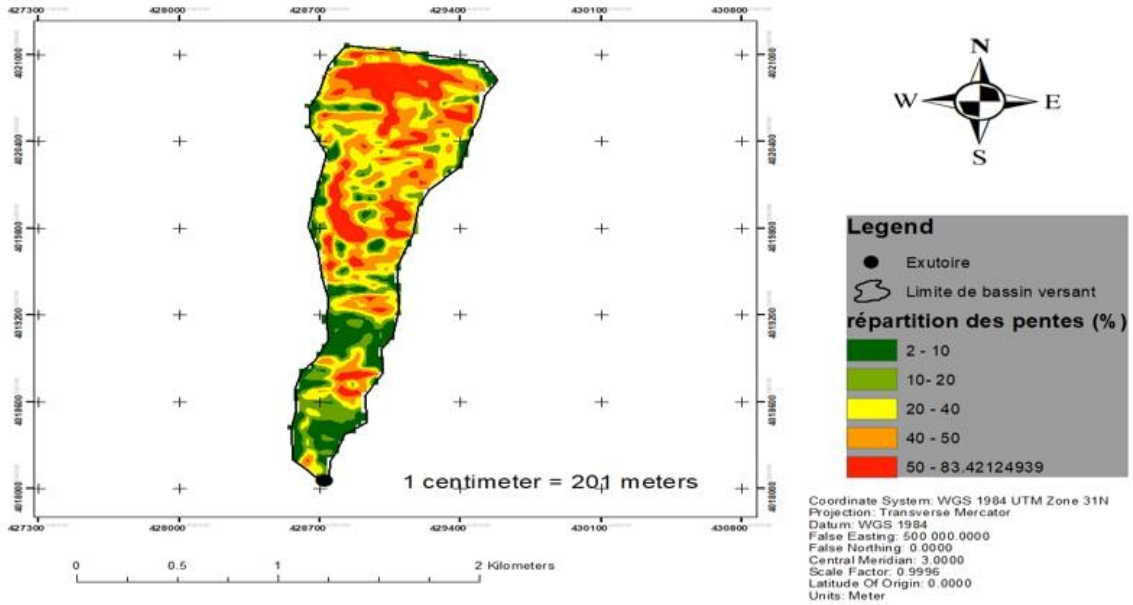


Figure III.5: Carte des pentes du bassin versant d'Oued ERRIHANE.

Par ailleurs, la carte en courbes de niveau est une représentation topographique du terrain utilisant un ensemble de courbes équidistantes pour illustrer les variations d'altitude. Elle permet de visualiser avec précision la morphologie du relief. Cette carte est présentée dans la figure suivante :

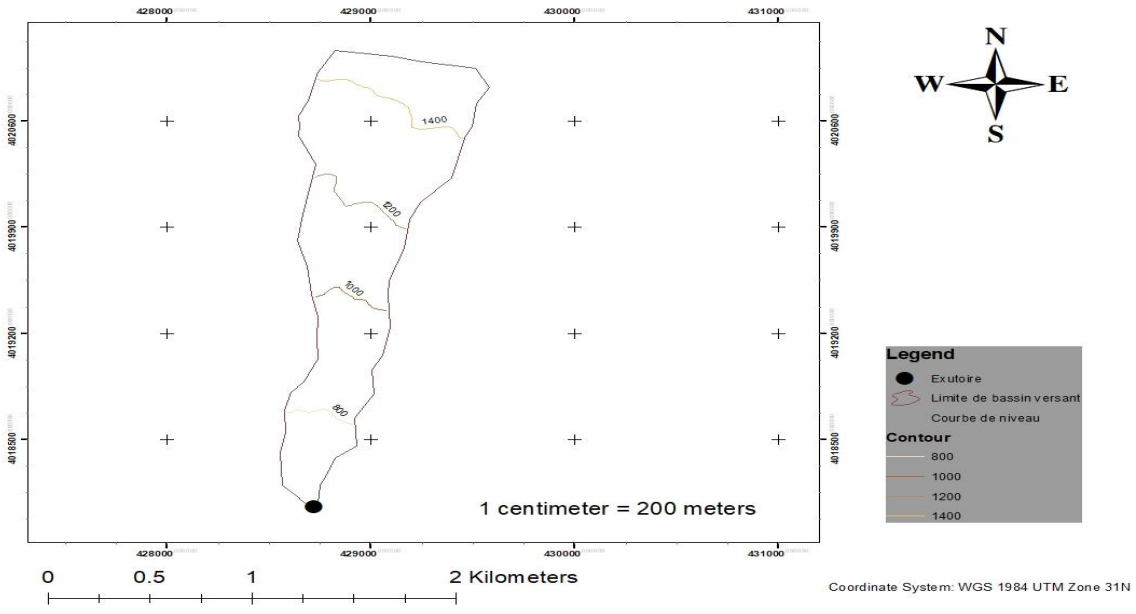


Figure III.6: Carte des courbes des niveaux du bassin versant d'Oued ERRIHANE.

1) Pente du bassin versant I_{bv} :

Elle est définie par la relation suivante :

$$\mathbf{I_{bv}} = \frac{\mathbf{H_{max} - H_{min}}}{\mathbf{L_{cp}}}: \quad \textbf{(III.10)}$$

H_{max} - H_{min} : Altitudes correspondant aux points situés à 5% et 95% de la surface totale, en termes de fréquence.

L_{cp} : Longueur du talweg principal (Km)

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

La pente moyenne constitue un paramètre fondamental pour décrire la topographie d'un bassin versant. En tant que variable indépendante, elle permet d'évaluer le temps de parcours du ruissellement direct, influençant ainsi le temps de concentration (Tc). Elle joue également un rôle déterminant dans la variation du débit de pointe en cas d'averse (Touaibia, 2004).

La pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

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

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 ERRIHANE.

Courbes de niveaux	Longueur Km	ΔH	Surface BV (Km^2)	I_{mbv} (m/Km)
700	0.119161	100	1,44	350.90
800	0.379526			
900	0.538829			
1000	0.435484			
1100	0.596111			
1200	0.710438			
1300	1.079463			
1400	0.944456			
1500	0.618201			

3) Indice de pente M. ROCHE I_p :

L'indice de pente de Roche (IR) est un indicateur couramment utilisé pour caractériser l'inclinaison d'un terrain. Il permet de quantifier la pente en établissant un lien entre l'altitude et la distance horizontale. Cet indice est particulièrement utile dans les études géomorphologiques et hydrologiques, car il contribue à l'analyse des phénomènes liés à la topographie, tels que l'érosion et le ruissellement.

L'indice de pente Ip représente la moyenne pondérée des racines carrées des pentes relevées sur un rectangle équivalent, en tenant compte des surfaces comprises entre deux courbes de niveau successives H_i et H_{i-1}.

Il est déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$\mathbf{I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n \sqrt{S_i (H_i - H_{i-1})}} \qquad \textbf{(III.12)}$$

Avec :

L : longueur de rectangle équivalent (m).

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

H_i et H_{i-1} : la distance entre les courbes de niveau successives.

4) Indice de pente globale Ig :

Cet indice permet de caractériser la nature du relief en s'appuyant sur la classification proposée par l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), devenu l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) en 1998. Il est défini comme le rapport entre la différence d'altitude correspondant aux 5% et 95% de la surface cumulée du bassin versant, et la longueur du rectangle équivalent.

Pour le calcul, on identifie deux points, S1 et S2, sur l'axe des abscisses de la courbe hypsométrique, de manière à ce que 95% de la surface totale du bassin soient comprises entre ces deux bornes : 5 % se situent en dessous de S1 et 5% au-dessus de S2 (Touaibia, 2015).

Cet indice est déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$\mathbf{I_g = \frac{D}{L} = \frac{(H_{5\%} - H_{95\%})}{L_r}} \qquad \textbf{(III.13)}$$

Avec :

D : Dénivelée entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ (m).

L : Longueur de rectangle équivalent (m).

$H_{5\%}$ et $H_{95\%}$: représentent respectivement les altitudes correspondant à $S_{5\%}$ et $S_{95\%}$ (en mètres).

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

	Relief	Valeur de I_g
1	**Relief très faible**	Ig <0.002
2	**Relief faible**	0.002<Ig <0.005
3	**Relief assez faible**	0005<Ig <0.01
4	**Relief modéré**	0.01<Ig <0.02
5	**Relief assez fort**	0.02<Ig <0.05
6	**Relief fort**	0.05<Ig <0.1
7	**Relief très fort**	0.1<Ig

5) Indice de pente moyenne Ipm :

La pente moyenne d'un cours d'eau joue un rôle clé dans la vitesse de l'écoulement de l'eau et le temps nécessaire pour que l'eau atteigne l'exutoire du bassin. Pour calculer cette pente, on se base sur le profil longitudinal du cours d'eau principal ainsi que de ses affluents. La méthode la plus courante consiste à diviser la différence d'altitude entre le point le plus élevé et le point le plus bas du cours d'eau par sa longueur totale. L'indice de pente moyenne, noté Ipm, est calculé selon la formule suivante :

$$I_{pm}=\frac{\mathbf{Hmax-Hmin}}{L_r} \quad \textbf{(III.14)}$$

Avec:

L_r : Longueur de rectangle équivalent (Km).

$H_{max} - H_{min}$: Altitudes correspondant aux points où se trouvent 5% et 95% de la surface totale (m).

6) Dénivelée spécifique Ds :

La dénivelée spécifique, fondée sur la classification de l'O.R.S.T.O.M., sert à caractériser les types de relief des bassins versants sans tenir compte de leur superficie. Elle offre une évaluation fine des propriétés topographiques, ce qui permet de mieux appréhender la morphologie du terrain et ses variations.

Elle se définit comme suit :

$$D_s = I_g\sqrt{S} = D\sqrt{\frac{I}{L_r}} \quad \textbf{(III.15)}$$

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

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

Tableau III.7 :Résultats des calculs des pentes et du dénivelé spécifique du bassin versant d'Oued ERRIHANE.

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Pente du bassin versant	I_{bv}	m/Km	318,60
Pente moyenne de bassins versant	I_{mbv}	m/Km	350,90
Indice de pente globale I_g	I_g	m/km	246,91
Indice de pente moyenne I_{pm}	I_{pm}	m/km	292,81
Indice de pente de Roche (I_p)	I_p	%	4,2
Dénivelée spécifique D_s	Ds	m	296.292
Relief	/	/	Relief fort.

Cela concerne exclusivement le relief du bassin versant. Un relief est considéré comme prononcé lorsque la dénivelée spécifique (Ds) se situe entre 250 m et 500 m, ce qui correspond à **un relief fort** selon la classification de l'O.R.S.T.O.M.

III.1.3 Etude de réseau hydrographique :

III.1.3.1 Caractéristiques du réseau hydrographique :

Le cours principal d'un fleuve est alimenté par ses affluents majeurs, eux-mêmes nourris par des affluents secondaires tels que les ruisseaux et petits cours d'eau situés en amont du bassin. Cet ensemble forme un réseau hydrographique ramifié, appelé chevelu hydrographique du bassin versant, dont la description complète et précise nécessite l'analyse de plusieurs paramètres.

- **Hiérarchisation du réseau :**

La hiérarchisation du réseau hydrographique repose sur l'attribution d'un ordre numérique à chaque segment de cours d'eau, en fonction de son importance relative dans le réseau. Selon cette approche, tout cours d'eau ne recevant aucun affluent est classé comme étant de premier ordre. Lorsque deux cours d'eau de même ordre n confluent, le segment résultant est alors classé à l'ordre n+1.

En revanche, si des cours d'eau de rangs différents se rejoignent, l'ordre le plus élevé des deux est conservé pour le segment issu de leur confluence.

Cette méthode, élaborée par Strahler en 1952, constitue un système de classification visant à analyser la structure des réseaux fluviaux. Le classement attribué reflète la complexité et le poids relatif de chaque segment dans l'ensemble du réseau. L'ordre le plus élevé identifié correspond généralement à celui du cours principal à l'exutoire du bassin, fournissant ainsi une représentation synthétique de l'organisation du réseau hydrographique.

Largement adoptée dans les études hydrologiques, cette méthode est particulièrement utile pour comprendre la répartition des ressources en eau ainsi que les processus liés à l'érosion des sols.

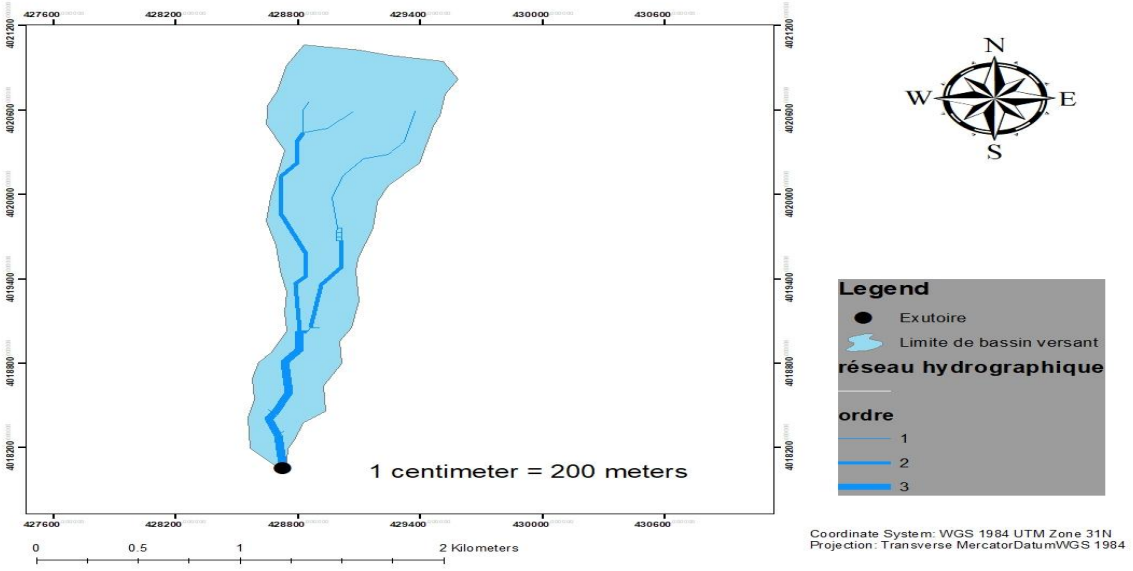


Figure III.7: Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued ERRIHANE.

III.1.3.2 Paramètres hydrographiques :

1) Densité de drainage Dd :

La densité de drainage constitue un indicateur fondamental pour caractériser et estimer le temps de résidence des eaux souterraines. Définie initialement par Horton (1945), et citée dans Coulon (2015), elle correspond au rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique et la superficie du bassin versant qu'il couvre. Cette mesure renseigne de manière essentielle sur l'efficacité avec laquelle l'eau est évacuée du bassin.

Horton a introduit ce concept afin d'évaluer le lien entre l'efficacité du drainage et la topographie du terrain. Sa définition demeure une référence clé pour comprendre comment la configuration du réseau influe sur la dynamique de l'écoulement à l'échelle du bassin. Par la suite, Leopold et Maddock (1953) ont approfondi cette approche en soulignant l'effet de la densité de drainage sur les processus hydrologiques. Leurs travaux ont montré qu'une densité élevée est généralement associée à un temps de résidence plus court pour les eaux souterraines, ce qui a des conséquences importantes en matière d'évaluation hydrologique et de gestion durable des ressources en eau.

La densité de drainage est exprimée à l'aide de la formule suivante :

$$\mathbf{D_d = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_i}{S}} \qquad \textbf{(III.16)}$$

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 :

La densité hydrographique des thalwegs élémentaires permet d'évaluer la concentration des cours d'eau au sein d'un bassin versant en quantifiant le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface. Cet indicateur joue un rôle essentiel dans l'analyse de la structure du réseau hydrographique, en fournissant des informations précieuses sur la manière dont le bassin versant canalise et évacue les eaux de ruissellement.

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

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 C_t :

Le coefficient de torrentialité est obtenu en multipliant la densité de drainage par la fréquence des thalwegs élémentaires. Il est calculé à partir de l'équation suivante :

$$C_t = D_d \,.\, F \qquad \textbf{(III.18)}$$

Avec :

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

4) Temps de concentration :

Le temps de concentration (Tc) dans un bassin versant représente la durée maximale nécessaire pour qu'une goutte d'eau atteigne l'exutoire en suivant le trajet hydrologique depuis n'importe quel point du bassin. Son estimation est souvent complexe, en raison de la multiplicité des facteurs impliqués, notamment la topographie, la végétation, ou encore les propriétés des sols.

Plusieurs formules empiriques sont couramment utilisées pour estimer cette grandeur, certaines datant de plusieurs décennies. Parmi elles, la formule de Kirpich (1940) demeure une référence classique. Développée à la suite des inondations survenues dans le nord-est des États-Unis en 1936, elle est toujours largement utilisée pour sa simplicité et son efficacité (Folmar et al., 2007). Toutefois, des chercheurs comme McCuen (2009) ont critiqué ces approches traditionnelles, jugeant qu'elles simplifient excessivement la réalité hydrologique. Ils insistent sur la nécessité d'adapter les formules aux spécificités locales du bassin pour obtenir des estimations plus fiables.

Ainsi, le choix de la méthode d'estimation du temps de concentration doit tenir compte des particularités de chaque région. Il est conseillé d'opter pour la formule la plus pertinente au regard des conditions locales, notamment celles qui se rapprochent des caractéristiques des bassins versants du nord de l'Algérie. L'estimation du temps de concentration repose généralement sur les formules empiriques suivantes :

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

Formule recommandée pour les bassins de taille moyenne à grande en climat méditerranéen.

Donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{T_c} = \left(\frac{(4\sqrt{S})+(1{,}5\,L_{cp})}{0{,}8\sqrt{H_{moy}-H_{min}}}\right) \qquad \textbf{(III.19)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h).
H_{moy} : Altitude moyenne du bassin versant (m).
H_{min} : Altitude minimale du bassin versant (m).
S : Superficie du bassin versant (Km^2).
L_{cp} : Longueur de cours d'eau principal (Km).

- **Formule de SOLOVSKY :**

Elle est exprimée par la formule suivante :

$$T_c = 4\left(\frac{S\,L_{cp}^{0,333}}{\sqrt{I_{bv}}}\right)^{0,75} \quad \textbf{(III.20)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h).
S : Superficie du bassin versant (Km^2).
L_{cp} : Longueur de cours d'eau principale (km).
I_{bv} : Pente de bassin versant (m/Km).

- **Formule de SCS :**

Développée par le Service de Conservation des Sols des États-Unis (SCS), adaptée aux bassins versants naturels.

Elle est exprimée par la formule suivante :

$$T_c = \left(\frac{0,87\,L_{cp}^{3}}{H_{moy}-H_{min}}\right)^{0,.385} \quad \textbf{(III.21)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h).

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

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

- **Formule de TURAZZA :**

Utilisée dans les zones à fort relief, elle prend en compte la pente du bassin.

Elle est exprimée par la formule suivante :

$$T_c = \frac{0,108\,\sqrt[3]{S\,L_{cp}}}{\sqrt{I_{pm}}} \quad \textbf{(III.22)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h).
S : Surface du bassin versant (Km2).
L_{cp} : Longueur de cours d'eau principale (Km).
I_{pm} : pente moyenne du bassin versant(m/m)

- **Formule de VENTURA :**

Elle est particulièrement adaptée aux bassins de **petite à moyenne taille.**

Elle est exprimée par la formule suivante :

$$\mathbf{T_c = 0,1275\ \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{I_{bv}}}} \qquad \textbf{(III.23)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h).
I_{bv} : Indice de pente du bassin versant (m/m).
S : superficie du bassin versant (Km2).

- **Formule de KIRPICH :**

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

$$\mathbf{T_c = 0,01923\ \frac{L_{cp}^{0,77}}{I_{pm}^{0,385}}} \qquad \textbf{(III.24)}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (h).
L_{cp} : Longueur de cours d'eau principale (Km^2).
I_{pm} : pente moyenne du bassin versant (m/m).

- **Formule d'ANRH :**

$$\mathbf{Tc = 1.7\ \left(\frac{SL}{\sqrt{Ic}}\right)^{0.19}} \qquad \textbf{(III.25)}$$

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 de temp de concentration :**

Les équations utilisées sont spécifiquement recommandées pour les conditions hydrologiques du nord de l'Algérie. Ces formules peuvent générer des résultats variables ; c'est pourquoi la valeur la plus faible parmi les estimations proches est généralement retenue comme

temps de concentration représentatif. Les valeurs extrêmes, qu'elles soient trop élevées ou trop faibles, sont écartées afin de ne conserver que des estimations moyennes et cohérentes, mieux adaptées à l'analyse du bassin versant étudier.

Tableau III.8 : résultats du calcule de temps de concentration.

Les Formules utilisées	Temps du concentration (h)
GIANDOTTI	0,50
SOLOVSKY	0,79
SCS	0,29
TURUZZA	0,32
VENTURA	0,27
KIRPICH	0,0641
ANRH	2,5

Les méthodes adoptées sont :

Tableau III.9 : résultats de calculs de temps de concentration (Les formules qui offrent des valeurs plus cohérentes).

Formules utilisées	Temps de concentration (h)
Formule de VENTURA	0,27
Formule de SCS	0,29
Formule de TURAZZA	0,32

Les résultats obtenus varient considérablement selon la formule utilisée. Afin d'assurer une estimation réaliste et représentative du comportement hydrologique du bassin, les valeurs extrêmes, qu'elles soient très faibles (KIRPICH) ou très élevées (ANRH), ont été écartées.

Les formules restantes (TURAZZA, SCS et VENTURA) offrent des valeurs plus cohérentes avec les caractéristiques physiques du bassin versant étudier. Parmi celles-ci, la formule du VENTURA a été retenue car elle fournit un temps de concentration raisonnable (0,27 h) tout en prenant en compte des paramètres adaptés aux conditions locales (superficie du bassin versant, Indice de pente du bassin versant), ce qui en fait un choix pertinent pour un bassin de **petite à moyenne taille** comme celui de Miliana (OUED ERRIHANE).

Le temps de concentration adopté pour la suite de l'étude est donc de 0,27 heures, tel que déterminé par la méthode **VENTURA**.

5) Vitesse de ruissellement Vr :

Le ruissellement correspond à l'écoulement gravitaire des eaux à la surface du sol, qui se produit lorsque les précipitations excédentaires — non infiltrées, évaporées ou retenues — s'écoulent en suivant la pente naturelle du terrain. En **Algérie**, la **formule de Kirpich** est fréquemment utilisée pour estimer la **vitesse de ce ruissellement**, en la reliant au **temps de concentration** du bassin versant.

La vitesse de ruissellement est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$\mathbf{Vr} = \frac{\mathbf{Lcp}}{\mathbf{Tc}} \qquad \textbf{(III.26)}$$

Avec :

V_r : Vitesse de ruissellement (m/s).

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

T_c : 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 ERRIHANE.

TERMES	Symboles	Unités	Résultats
Densité de drainage	Dd	Km/Km^2	3,622
Densité hydrographique	F	Km^{-2}	10,42
Coefficient de torrentialité	Ct	//	37,73
Temps de concentration	Tc	h	0,27
Vitesse de ruissellement	Vr	Km/h	10,55

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

Tableau III.11 : Géomorphologie du bassin versant de l'Oued ERRIHANE.

Paramétre		Symbole	Unités	Valeur
Surface		S	Km^2	**1,44**
Périmètre		P	Km	**7,10**
longueur du talweg principal		L_{cp}	Km	**2,85**
Indice de compacité de Gravélius		K_G	/	**1,668**
Indice de compacité de Horton		K_h	/	**0,177**
Coefficient d'allongement		C_a	/	**5,74**
Rectangle équivalent	**Longueur**	L_r	Km	**3,101**
	Largeur	L_r	Km	**0,4632**
Les Altitudes	**Maximale**	H_{max}	m	**1564**
	Moyenne	H_{moy}	m	**1157,46**
	Minimale	H_{min}	m	**656**
	Médiane 5%	$H_{5\%}$	m	**1500**
	Médiae 50%	$H_{50\%}$	m	**1227,77**
	Médiane 95%	$H_{95\%}$	m	**734,33**
La pente du bassin versant		I_{bv}	m/Km	**318,60**
La pente moyenne du bassin versant		I_{mbv}	m/Km	**350,90**
L'indice de pente de Roche		I_p	%	**4,2**
L'indice de pente moyenne		I_{pm}	m/Km	**292,82**
L'indice de pente globale		I_g	m/Km	**246,91**
La Dénivelée spécifique		D_s	m	**296,292**
La somme des longueurs des cours d'eau		$\sum Li$	Km	**5.21568**
Le nombre des talwegs d'ordre 1		$\sum N1$	/	**15**
La densité de drainage		D_d	Km/Km^2	**3,622**
La densité hydrographique		F	Km-2	**10,42**
Le Coefficient de torrentialité		C_t	/	**37,73**
Le temps de concentration		T_c	Heures	**0,27**
La vitesse de ruissellement		V_r	Km/h	**10,55**

III.2 Etude des crues :

Dans le cadre d'un projet de prévention des inondations, l'évaluation du débit de crue maximal constitue une étape clé. Elle permet de sélectionner les aménagements les plus appropriés et de repérer les zones exposées au risque d'inondation. Une fois les bassins versants de la zone d'étude identifiés et leurs caractéristiques analysées, l'objectif est d'estimer les débits de crue associés à des périodes de retour allant de 10 et 100 ans. Cette estimation repose sur deux approches principales :

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

III.2.1 L'analyse fréquentielles des pluies des crues maximales annuelles avec la station hydrométrique EL ABABSA :

L'analyse fréquentielle d'une série longue de débits maximaux permet d'estimer la période de retour associée à une valeur donnée. Cette estimation repose sur l'élaboration et l'application d'un modèle fréquentiel, c'est-à-dire une équation statistique décrivant le comportement d'un phénomène aléatoire. Ces modèles permettent d'évaluer la probabilité d'occurrence d'un événement d'intensité donnée. Le choix du modèle fréquentiel, en particulier de son type, conditionne la fiabilité des résultats obtenus (ENAC/ISTE/HYDRAM, 2004). Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu l'utilisation d'une loi d'ajustement statistique, couramment employée pour modéliser les séries de pluies maximales ainsi que les débits correspondants.

III.2.1.1 Présentation de la station hydrométrique :

L'étude des inondations nécessite la collecte de données hydrologiques et météorologiques provenant de diverses stations de mesure. L'analyse des précipitations maximales annuelles joue un rôle essentiel dans la planification des aménagements et l'identification des épisodes de pluie extrême pour différentes périodes de retour. Pour cela, il est indispensable de disposer d'une série chronologique suffisamment longue des précipitations maximales. Toutefois, notre zone d'étude ne dispose pas de station hydrométrique. Nous avons donc exploité les données issues de la station d'El ABABSA située dans le bassin versant n°01, et plus précisément dans le sous-bassin n°17.

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

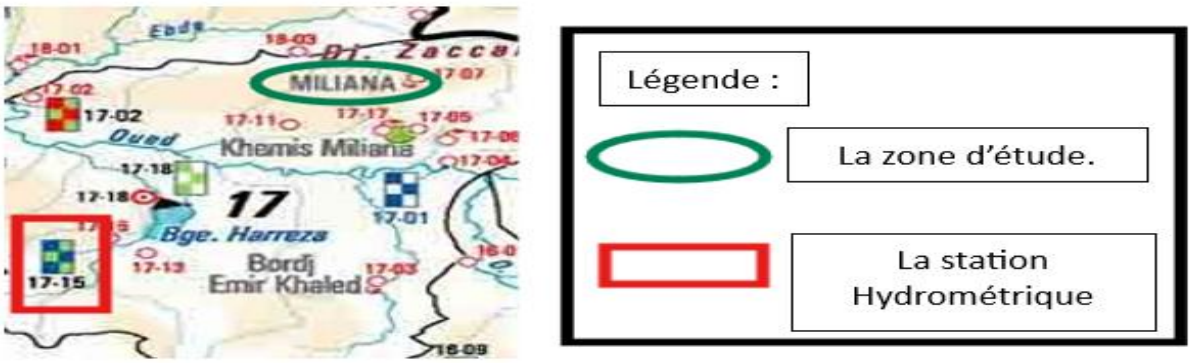


Figure III.8: Localisation de la station hydrométrique d'El-Ababsa (Source : ANRH-Blida).

- La station hydrométrique de EL ABABSA dispose d'une série continue d'observations couvrant une période de vingt-deux (22) années, allant de 1991/1992 à 2012/2013, sans aucune interruption. Les débits instantanés maximums enregistrés à cette station varient entre 5,4 m³/s et 62,5 m³/s.

  - 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
EL Ababsa	011715	X (m)	Y (m)	Z (m)	1991-2013
		443.95	318.05	320	

Le Tableau III.13 représente la répartition des débits maximales annuels de la station prise :

Tableau III.13: Série des débits maximales annuels de la station 011715 (source: ANRH).

Années	**Qmax (m³/s)**	**Années**	**Qmax (m³/s)**
1991	19	2002	27.78
1992	5.4	2003	10.60
1993	8.95	2004	12.44
1994	62.5	2005	8.93
1995	48	2006	31.00
1996	43.2	2007	51.90
1997	48	2008	49.20
1998	14	2009	30.05
1999	22.8	2010	22.67
2000	38.6	2011	38.40
2001	28	2012	29.59

Les caractéristiques de la série pluviométrique sont déterminées à l'aide de logiciel HYFRAN PLUS, représentées dans le Tableau III.14:

Tableau III.14 : Caractéristiques de la série des débits de la station 011715.

Caractéristiques	Valeurs
Moyenne des Qmax en (m3/s)	29.6
Écart type « σx » ; pour n=22ans	16.2
Coefficient de variation « Cv »	0.549

III.2.1.2 Choix du modèle fréquentiel :

- La fiabilité des résultats issus d'une analyse fréquentielle repose en grande partie sur le choix du modèle fréquentiel, notamment sur le type de loi adoptée. Bien que plusieurs approches puissent orienter ce choix, aucune méthode universelle et parfaitement fiable n'existe.

- À partir d'un échantillon de n observations, on élabore l'histogramme des fréquences d'apparition ainsi que la courbe de fréquence cumulée de non-dépassement. Lorsque n devient suffisamment grand, l'analyse tend vers la recherche de la loi de distribution de la population, et la fréquence observée se rapproche alors d'une densité de probabilité.

Tableau III.15 : modèles fréquentiels et leur validité.

Lois	Variables
Normale	Precipitations annuelles, débits, volumes de stockage des reservoirs
Log Normale	Débits maximaux annuels, précipitations journalières,, précipitations annuelles, volume du ruissellement mensuel, volume du ruissellement annuel
Pearson type III(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	Precipitations journalières, durée entre deux événements
Loi de Goodrich	Valeurs moyennes annuelles (débits, précipitations, etc.)

- Les lois d'ajustement choisies sont :

  - La loi de Gumbel (droite de Henry) ;
  - loi de log-normale (droite de Galton).

- La Dans le cadre de notre étude, les étapes suivantes ont été suivies :

  - Classer la série des précipitations par ordre croissant ;
  - Calculer la fréquence expérimentale ;
  - Déterminer les caractéristiques empiriques de la série de données ;
  - Effectuer un ajustement graphique à l'aide de la loi choisie ;
  - Estimer les quantiles ainsi que leurs intervalles de confiance ;
  - Appliquer la loi log-normale à travers la représentation par la droite de Galton.

✓ **Logiciel HYFRAN-PLUS :**

Le logiciel HYFRAN-PLUS permet d'ajuster différentes lois statistiques à une série de données, à condition que celles-ci respectent les critères d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité (conformément aux recommandations du Système d'Aide à la Décision, SAD). Un module spécifique du SAD a d'ailleurs été développé pour aider à identifier la distribution la plus adaptée à l'estimation des quantiles correspondant à des périodes de retour longues.

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

La loi de Gumbel est couramment utilisée et reconnue pour sa capacité à modéliser les événements extrêmes. En tant que distribution double exponentielle, elle représente la distribution asymptotique des maximas d'un échantillon comportant *n* observations. Lorsqu'on considère les maximas annuels d'une variable comme les valeurs maximales parmi 365 observations journalières, la loi de Gumbel s'avère bien adaptée pour modéliser ce type de données.

- L'ajustement des séries de maxima annuels à cette loi a été effectué à l'aide du logiciel HYFRAN-PLUS, et les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

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

Période de retor	Probabilié de fréquene	Débit max jour	Écat 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

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

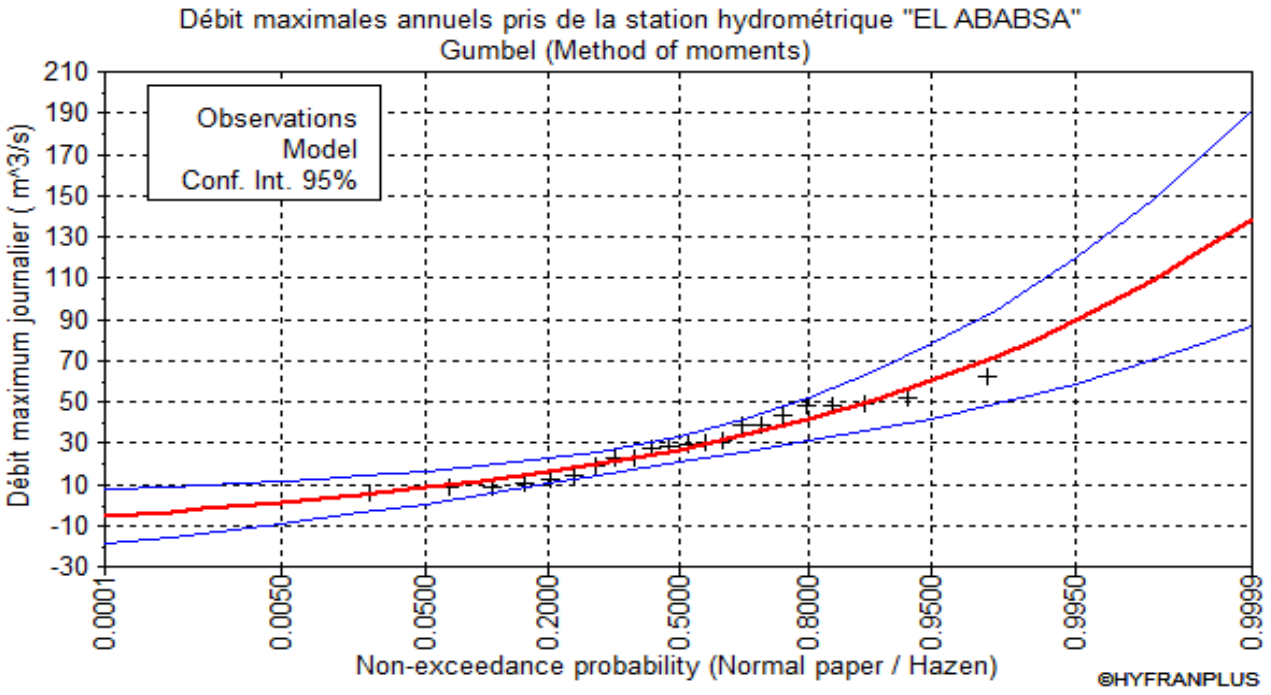


Figure III.9: graphe d'ajustement par la loi de Gumbel de la station 011715.

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	None	5.40
Maximum	None	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 lorsque son logarithme naturel V=ln(X) est distribué selon une loi normale. La loi de Galton constitue une forme asymétrique de la loi normale obtenue par transformation.

L'ajustement des données à la loi log-normale a été réalisé à l'aide du logiciel HYFRAN, et les résultats de cette modélisation sont présentés 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

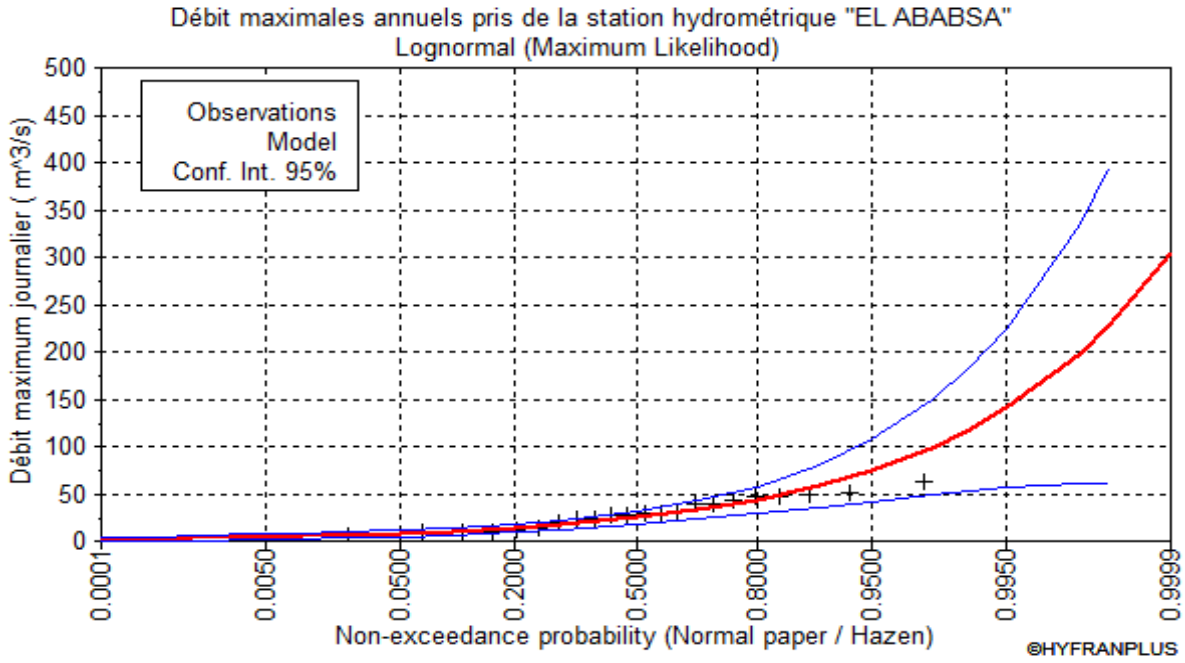


Figure III.10: graphe d'ajustement par la loi de Log Normal de la station 011715.

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	0.00
Maximum	62.5	None
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

III.2.1.4 Choix de la Loi d'ajustement :

Des écarts entre les fréquences observées et celles prévues par une fonction de distribution théorique sont inévitables. Si l'ajustement graphique constitue une première approche importante, il reste insuffisant pour identifier avec certitude la loi théorique la plus appropriée. Il est donc nécessaire de recourir à un test statistique d'adéquation afin d'évaluer et de comparer la qualité de l'ajustement de plusieurs distributions. Parmi les tests les plus utilisés à cet effet figure le test du chi carré (χ^2).

❖ **Ajustement graphique visuelle (la méthode visuelle) :**

- Les figures III.9 et III.10 présentent les graphiques des résultats obtenus, illustrant les probabilités empiriques ainsi que celles théoriques correspondant aux lois de distribution de Gumbel et Log-Normale, générées à l'aide du logiciel Hyfran-Plus.

- Visuellement, il n'est pas possible de déterminer avec certitude quelle loi d'ajustement est la plus appropriée ; c'est pourquoi une analyse statistique complémentaire est nécessaire.

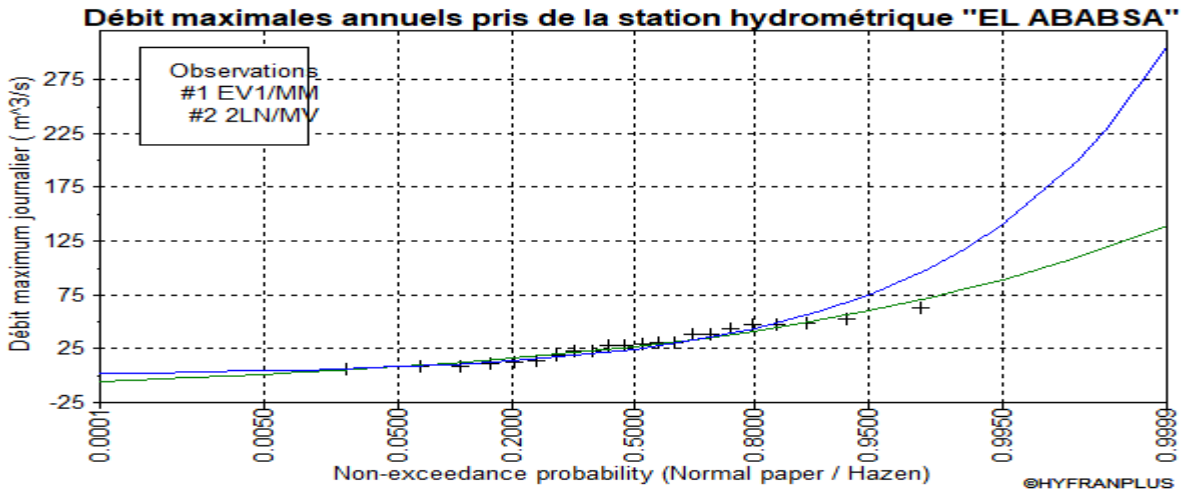


Figure III.11 : comparaison entre les Lois ajustement utilisées de la station 011715**.**

❖ **Test d'adéquation de χ2 :**

Le test d'adéquation, également appelé test d'ajustement, vise à vérifier la compatibilité du modèle choisi avec les données observées. Plus précisément, il permet de tester l'hypothèse selon laquelle les observations suivent une distribution donnée. Le test du chi-carré (χ^2) est l'un des outils les plus fréquemment utilisés à cet effet.

Pour sélectionner la loi la plus appropriée, on compare la valeur de χ^2 calculée à la valeur critique de χ^2 issue des tables statistiques, en se basant sur un niveau de signification de 5 %, correspondant à un intervalle de confiance de 95 %. Cette comparaison permet de juger si les écarts entre les fréquences observées et celles attendues sont statistiquement significatifs. Si la valeur calculée de χ^2 dépasse la valeur théorique, cela indique que l'ajustement du modèle aux données est insuffisant. La valeur critique de χ^2 est déterminée à partir des tables en fonction des paramètres ɣ et α.

Le test du chi-carré (χ^2) est généralement effectué avec un seuil de signification α=5% et un degré de liberté ɣ, comme le décrit Touaibia (2015).

- 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 de ce test, réalisés à l'aide du logiciel HYFRAN-PLUS, 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

D'après les résultats issus du test du chi-carré et du test d'ajustement, la série des débits maximaux annuels présente un ajustement satisfaisant à **la loi log-normale.**

III.2.2 Estimation des débits maximums fréquentiels par la méthode GRADEX :

III.2.2.1 Description de la méthode :

La méthode Gradex, élaborée par Guillot et Durand en 1969, est une approche probabiliste hydro-pluviométrique utilisée pour estimer les débits de crues extrêmes correspondant à des périodes de retour comprises entre 100 et 10 000 ans. Fondée sur l'exploitation des données pluviométriques, cette méthode constitue une avancée significative par rapport aux techniques traditionnelles de prédétermination des crues, qui se basent exclusivement sur l'analyse statistique des débits observés.

III.2.2.2 Hypothèses de la méthode :

La méthode repose sur le principe qu'une relation existe entre la distribution des débits et celle des précipitations qui les génèrent. Elle se fonde sur trois hypothèses essentielles, selon Meddi et Zeroual (2018) :

- **Hypothèse n°1 :**

La distribution des précipitations sur un bassin versant peut, de façon asymptotique, être représentée par une loi de Gumbel ou une loi exponentielle, selon la méthode d'échantillonnage adoptée. Le Gradex correspond alors à la pente de la courbe de distribution tracée sur un graphique représentant les précipitations en fonction du logarithme de la période de retour.

- **Hypothèse n°2 :**

Le déficit d'écoulement défini comme la différence entre le volume de précipitations et le volume d'eau s'écoulant à l'exutoire d'un bassin versant sur une période donnée atteint un seuil au-delà duquel il n'augmente plus, même si les précipitations continuent à croître. Autrement dit, une fois le bassin saturé, le déficit devient indépendant du volume de pluie ou du débit. D'un point de vue graphique, cette hypothèse se manifeste par un parallélisme entre les courbes de distribution des précipitations et des débits, à partir d'un point de pivot généralement situé entre 10 et 50 ans, selon les caractéristiques du bassin versant.

- **Hypothèse n°3 :**

Quelle que soit la fréquence ou la période de retour considérée, le débit de crue maximal (ou pic de crue) peut être estimé à partir du volume d'eau écoulé pendant la période étudiée, en lui appliquant un coefficient multiplicatif spécifique au bassin versant. Ce coefficient, appelé coefficient de forme ou coefficient d'affinité, est déterminé à partir de l'analyse des hydrogrammes des crues observées sur le bassin.

III.2.2.3 Les étapes de la méthode de Gradex :

- Choisir le pas de temps n heures (généralement égale à la moyenne des temps de base des Hydrogrammes de crues disponibles, Pour la commodité des calculs on retiendra une valeur très arrondie, par exemple 2, 4, 6 ... 48 heures.).

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

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

$$\mathbf{P(mm) = a\mu + b} \qquad \textbf{(III.27)}$$

Avec :

μ: Variable réduite de Gumbel.

- Les débits observés sont ajustés à la loi de Gumbel afin de déterminer le débit décennal, utilisé comme point de référence pour l'extrapolation des débits. Ce débit décennal est ensuite converti en lame d'eau équivalente à l'aide de la formule suivante :

$$\mathbf{R(mm) = \frac{Q\left(\frac{m^3}{s}\right) 3{,}6\ n(h)}{s(km^2)}} \qquad \textbf{(III.28)}$$

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

$$\mathbf{Q}(\mu\%) = \mathbf{a}\,\mu + \mathbf{b'} \qquad \textbf{(III.29)}$$

Avec :

a : Gradex de la pluie.

μ : Variable réduite de Gumbel.

$$\mu = -\ln(-\ln(F)) \qquad \textbf{(III.30)}$$

$$\mathbf{F = \frac{1}{1-T}} \qquad \textbf{(III.31)}$$

Pour T=10 ans.

$$\mathbf{b' = Q_{10ans} - a\,\mu} \qquad \textbf{(III.32)}$$

- Tracer la droite correspondant à l'équation Q(μ%)= a * u + b' sur le même graphique que celui représentant l'ajustement de Pjmax .

- Ensuite, extraire les valeurs de Q correspondant à chaque période de retour, exprimées en millimètres (mm).Puis Convertir ces valeurs en débits (m^3/s) à l'aide de la formule suivante :

$$Q = \frac{S(Km^2)\ Q(mm)}{3,6} \quad \textbf{(III.33)}$$

- Le calcul du coefficient de pointe :

$$C_p = \frac{Q_{max}}{Q_{moy}} \quad \textbf{(III.34)}$$

- Le Calcul du débit de pointe :

$$Qp = Cp\ \ Q \quad \textbf{(III.35)}:$$

III.2.2.4 Application de la méthode de GRADEX:

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

Tableau III. 21 : caractéristiques des stations pluviométriques (source : ANRH)

Code de la station	Nom de la station	Les coordonnées			Nombre d'années
		X (m)	Y (m)	Z (m)	
011717	Khemis Miliana	456.2	329	300	44
011718	Herraza	445.35	321.4	312	31
011711	Sidi Lakhder	452	329.65	250	41

Tableau III.22: Précipitations maximales journalières de la station pluviométrique de Herraza [011718] (Source: ANRH).

Année	Pjmax (mm)	Année	Pjmax (mm)
1984	/	2003	22.2
1985	46.8	2004	25.4
1986	28.2	2005	47.1
1987	29.6	2006	23
1988	36.8	2007	40.7
1989	25.5	2008	33
1990	16.7	2009	32
1991	36.3	2010	30.5
1992	18	2011	35.1
1993	/	2012	36.5
1994	59.7	2013	28.6
1995	/	2014	19.4
1996	31.8	2015	27.8
1997	35	2016	34
1998	27.6	2017	38.5
1999	17.5	2018	27.8
2000	30.4		
2001	31.5		
2002	36		

❖ **Ajustement des pluies maximales journalières de la station pluviométrique Harraza 011718 selon la loi de Gumbel.**

Tableau III.23 : Résultats de l'ajustement des pluies maximales journalières de la station pluviométrique de Herraza 011718 selon la loi de Gumbel.

Période de retour	Probabilité de fréquence	Débit max jour	Ecart type	Intervalle de confiance
1000	0,9990	76,6	9,32	58,3-94,8
100	0,9900	60,1	6,33	47,7-72,6
50	0,9800	55,3	5,43	44,5-65,8
20	0,9500	48,6	4,25	40,2-56,9
10	0,9000	43,4	3,37	36,8-50
5	0.8000	38,1	2,49	33,2-43
2	0,5000	30	1,48	27,1-32,9

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

$$\mathbf{P(mm) = 7,1\,\mu + 27,4}$$

Donc le Gradex : a = 7.1

b = 27.4

- En l'absence de données d'observation des crues dans la zone étudiée, une estimation a été réalisée par analogie avec le bassin versant de Herraza.
  Cette approche a permis d'évaluer le débit décennal selon les relations suivantes :

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

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

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

Donc :

Q_{10ans} =0,8258 m^3/s

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

On a estimé le temps de base à n=2h.

$$R(mm) = \frac{Q\left(\frac{m^3}{s}\right) 3,6\ n(h)}{s(km^2)}$$

R(mm)= 2 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.

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

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

Variable réduite de Gumbel :

$$\mu_{10\ ans} = 2.25$$

Alors :

$$b' = -13.975$$

Donc :

$$Q_{\mu\%} = 7.1\ \mu - 13.975$$

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

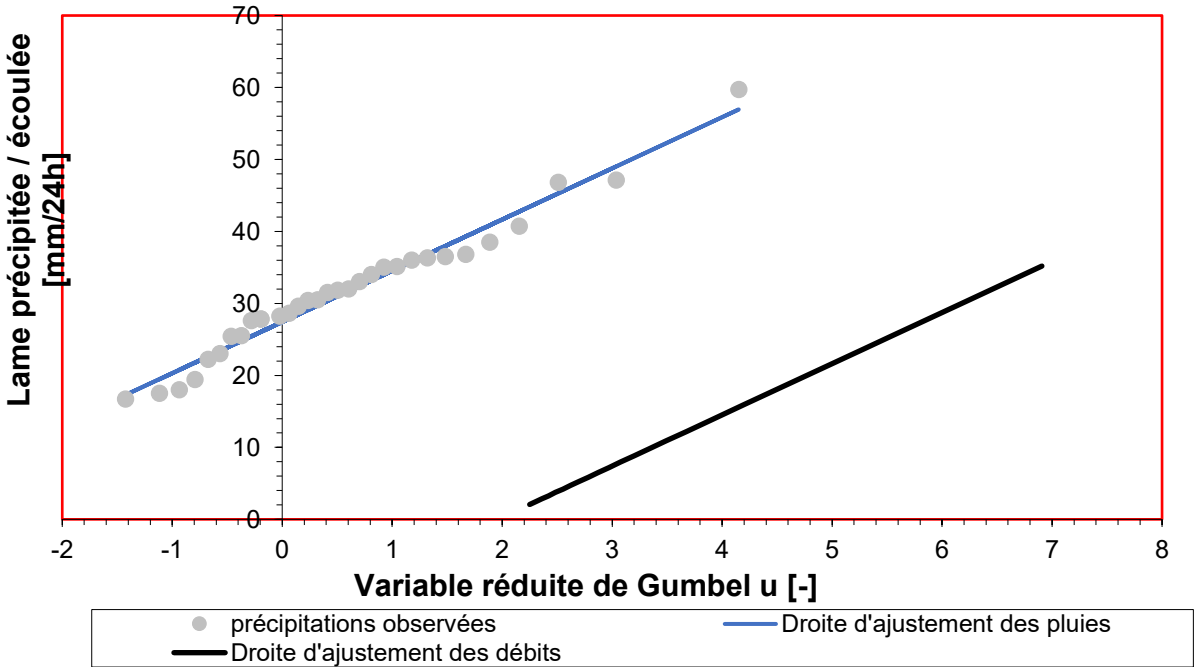


Figure III.12: Graphique d'ajustement des pluies et la droite d'extrapolation des débits.

- Les débits de pointe correspondant aux différentes périodes de retour sont estimés en appliquant un coefficient de pointe Cp=2.

Tableau III.24: Résultats des calculs pour la station de Herazza, selon les différentes périodes de retour.

Temps de retour (ans)	Fréquence empirique selon Hazen	Variable réduite de Gumbel « u »	Précipitation	Débits moyen (mm/24h)	Débits moyen (m3 /s)	Débits de Point
10	0,900	2,25	43.3	2.1	1	2
20	0,950	2,97	48.6	7.2	3	6
50	0,980	3,9	55.2	13.8	6	11
100	**0,990**	**4,6**	**60.1**	**18.8**	**8**	**15**
1000	0,999	6,91	76.6	35.2	14	28

✓ **Les mêmes étapes sont appliquées aux autres stations.**

– R_{10ans} = 2 mm

– Variable réduite de Gumbel " $\mu_{10\ ans}$ " : $\mu_{10\ ans}$ **= 2.25**

❖ **La station de KHEMIS MILIANA:** $Q_{\mu\%} = 10.7\ \mu\% - 22.04$.

Donc le Gradex a=10.7.

❖ **La station de SIDI LAKHDER :** $Q_{\mu\%} = 12.16\ \mu\% - 25.30$.

Donc le Gradex a=12.16.

Tableau III.25 : Résultats de l'ajustement pour déférentes périodes de retours pour les stations prises.

Temps de retour (ans)	Variable réduite de Gumbel « u »	Khemis miliana			Sidi lakhder		
		Débits moyen (mm/24h)	Débits moyen (m3/s)	Débits de Point	Débits moyen (mm/24h)	Débits moyen (m3/s)	Débits de Point
10	2.25	2.1	1	2	2.1	1	2
20	2.97	9.8	4	8	10.8	4	8
50	3.9	19.8	8	16	22.1	9	18
100	4.6	27.2	11	**22**	30.6	12	**25**
1000	6.91	51.9	21	42	58.7	23	47

Tableau III.26 : Résultats de l'ajustement des stations prises.

Périodes de retour (10Ans)	Les stations pluviométriques		
	Débits de Point « Herazza »	**Débits de Point « Khemis Miliana »**	**Débits de Point « Sidi lakhder »**
10	2	2	2
20	6	8	8
50	11	16	18
100	**15**	**22**	**25**
1000	28	42	47

- On observe que le débit enregistré par la station pluviométrique de Sidi lakhder est supérieur à ceux estimés à partir des autres stations pluviométriques. Par conséquent, On opte à prendre ce débit $\mathbf{Q_{projet} = 25\ m^3/s}$

III.2.3 Hydrogramme de crue :

Il s'agit d'une courbe illustrant l'évolution des débits au cours du temps durant une crue. Elle permet d'estimer plusieurs caractéristiques liées à l'événement, telles que la forme de la crue, son volume, le temps de montée ainsi que le temps de base. Pour tracer cet hydrogramme, la méthode de Sokolovsky a été utilisée (Touaibia, 2015).

Cette méthode consiste à représenter l'hydrogramme à l'aide de deux équations paraboliques : l'une modélisant la montée de la crue, l'autre la décrue.

- **Branche de montée (La crue) :**

Le débit à un instant t s'exprime par la relation :

$$\mathbf{Q(t) = Q_{max}\ (\frac{t}{Tc})^n} \qquad \mathbf{(III.36)}$$

Pour les petits bassins versant en prend : Tc = Tm

Avec :
Q(T) : débit instantané (m^3/s).
Q_{max} : débit de pointe (m^3/s).
Tc : temps de concentration (h).

- **Branche de descente (La décrue) :**

$$\mathbf{Q(t) = Q_{max}\ (\frac{Tb - t}{Td})^m} \qquad \mathbf{(III.37)}$$

Avec :
Q(T) : débit instantané (m^3/s).

Q_{max} : débit de pointe (m^3/s).

T_b : temps de base (h). $T_b = T_m + T_d$

T_d : temps de décrue (h) $T_d = \delta\ T_m$

T_m : temps de montée (h). $T_m = T_c$

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

Le coefficient δ reflète les caractéristiques intrinsèques du bassin versant et joue un rôle déterminant dans la configuration de l'hydrogramme. Sa valeur dépend de plusieurs facteurs, notamment la superficie du bassin, la perméabilité des sols et la densité de la couverture végétale. Ces influences sont synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau III.27 : Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue (δ).

Type de cours d'eau et bassin	Valeurs typiques de δ
Petits ruisseaux et vallées peu végétalisés, sols imperméables	2,0 – 2,5
Petits cours d'eau dans des bassins vallonnés ou perméables, rivières moyennes avec terrasses	3,0 – 4,0
Rivières moyennes à grandes avec vastes plaines d'inondation	4,0 – 7,0

Ainsi, le coefficient δ traduit le temps de réponse du bassin lors de la décrue : plus sa valeur est élevée, plus la diminution du débit est progressive et étalée dans le temps.

Les paramètres employés pour le calcul de l'hydrogramme de crue sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.28 : Paramètres de calcul de l'hydrogramme de crue.

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité	Remarques
Débit de pointe	Qmax	25	m^3/s	Selon la période de retour de 100 ans
Temps de concentration	Tc	0.27	heures	Déterminé à partir des caractéristiques du bassin
Temps de montée	Tm	0.27	heures	Tm=Tc
Coefficient de décrue	δ	2	—	Petits ruisseaux et vallées peu végétalisés, sols imperméables
Temps de décrue	Td	0.54	heures	Td=δ Tm
Temps de base	Tb	0.81	heures	Tb=Tm+Td
Exposant montée	n	2	—	Paramètre typique pour la branche de montée (forme parabolique)
Exposant décrue	m	3	—	Paramètre typique pour la branche de décrue (forme parabolique)
Pas de temps utilisé	—	1	Minute	Pour le calcul des valeurs Q(t)

Les valeurs des hydrogrammes de crue, déterminées à l'aide de la méthode de Sokolovski pour une période de retour de 100 ans, sont résumées dans le tableau ci-après :

Tableau III.29 : Valeurs du débits centennales en fonction du temps.

Temps (minute)	**Q_{max} (m3/s) pour période de retour 100 ans**		
	Stations pluviométriques		
	Herraza « 011718»	**Khemis miliana « 011717 »**	**Sidi lakhder « 011711 »**
0	0	0	0
2	0.22862369	0.33531474	0.38103948
4	0.91449474	1.34125895	1.5241579
6	2.05761317	3.01783265	3.42935528
8	3.65797897	5.36503582	6.09663161
10	5.71559214	8.38286847	9.52598689
12	8.23045267	12.0713306	13.7174211
14	11.2025606	16.4304222	18.6709343
16.2	**15**	**22**	**25**
18	18.5185185	27.1604938	30.8641975
20	22.8623685	33.5314739	38.1039476
22	27.6634659	40.5730834	46.1057766
24	32.9218107	48.2853224	54.8696845
26	38.6374028	56.6681908	64.3956714
28	44.8102423	65.7216888	74.6837372
30	51.4403292	75.4458162	85.733882
32	58.5276635	85.8405731	97.5461058
34	1.37250772	2.01301132	2.28751287
36	0.88220165	1.29389575	1.47033608
38	0.52525939	0.77038044	0.87543232
40	0.28051209	0.41141773	0.46752015
42	0.12679089	0.18595997	0.21131814
44	0.04292692	0.06295948	0.07154487
46	0.00775133	0.01136862	0.01291888
48.6	0	0	0

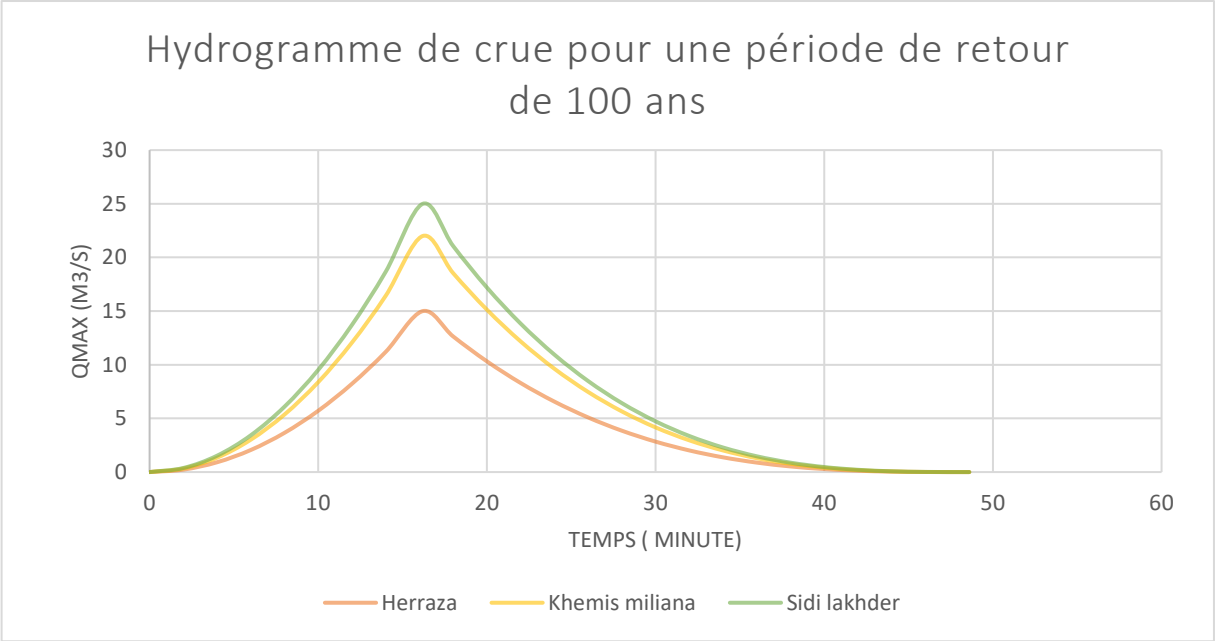


Figure III.13: Hydrogramme de crue avec une période de retour de 100 ans pour les différentes stations.

III.2.4 Sélection du débit de crue pour le projet :

La crue de projet représente le débit maximal que l'ouvrage doit être en mesure d'évacuer pour une probabilité d'occurrence donnée. Son choix dépend essentiellement de l'importance de l'infrastructure à réaliser, des impacts potentiels en aval, ainsi que des contraintes technico-économiques liées à l'aménagement et à l'environnement.

D'aprés les résultats du calcule on observe que le débit enregistré par la station pluviométrique de Sidi lakhder est supérieur à ceux estimés à partir des autres stations pluviométriques.

Par conséquent, Le débit de projet : $\mathbf{Q_{projet} = 25\ m^3/s}$

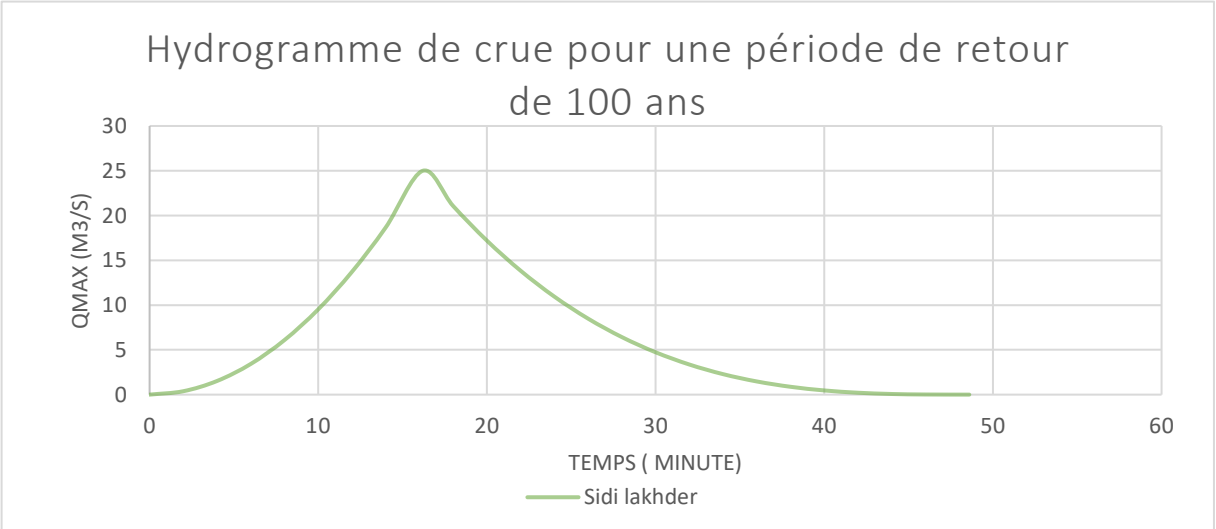


Figure III.14 : Hydrogramme de la crue du projet.

Conclusion :

L'étude hydrologique constitue une phase essentielle et souvent la plus délicate dans le cadre d'un projet de protection contre les inondations. Le choix du débit de pointe revêt une importance capitale, car il conditionne toute la modélisation hydraulique du cours d'eau. Cette étape permet non seulement de prévoir les crues, mais aussi de définir les aménagements nécessaires à la protection contre les inondations, tout en évaluant les coûts liés à leur réalisation. D'après ce chapitre.

On peut conclure que :

L'étude hydromorphologique de la zone montre que le bassin versant de l'oued Errihane présente une forme allongée, un relief fort et un temps de concentration très court, des caractéristiques qui accentuent le risque de crues.

Le débit de crue a été estimé à partir des données de la station hydrométrique voisine « El - Ababsa 011715 », après un ajustement selon la loi de Galton. Cette analyse a permis de déterminer un débit décennal de 58,5 m^3/s. Par analogie entre notre bassin versant et celui de la station de référence, une lame d'eau équivalente de 2 mm a été calculée.

Par la suite, la méthode Gradex a été appliquée aux données de trois stations pluviométriques : « Herraza », « Khemis Miliana » et « Sidi Lakhdar », L'ajustement des données pluviométriques a été effectué à l'aide de la loi de Gumbel.

La méthode Gradex a alors permis d'estimer les débits maximaux pour différentes périodes de retour, et le débit le plus élevé, soit 25 m^3/s, a été retenu.

Ces résultats ont servi à l'élaboration de l'hydrogramme de crue du projet, en considérant une période de retour de 100 ans, conformément aux exigences d'une étude d'aménagement.

CHAPITRE IV :

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

Introduction :

Avant tout projet d'aménagement, la réalisation d'une étude hydraulique constitue une étape essentielle. Elle permet d'analyser le comportement des écoulements dans les canaux naturels ou artificiels, qu'ils soient à surface libre ou en charge.

La prévention des inondations représente un véritable défi, notamment lorsque les niveaux d'eau deviennent élevés et que les vitesses d'écoulement augmentent en fonction des conditions hydrologiques. Traditionnellement, la conception des ouvrages de protection contre les crues se concentre principalement sur la hauteur d'eau, en négligeant parfois les problématiques liées à l'érosion.

La modélisation hydraulique a pour objectif de prévoir numériquement l'évolution spatio-temporelle des paramètres hydrauliques lors d'une crue : débits, vitesses et hauteurs d'eau dans la plaine inondable. Elle permet ainsi d'identifier les zones submergées, d'estimer la durée de l'inondation et de caractériser la dynamique de la montée des eaux. Un modèle hydraulique constitue une représentation schématique et donc simplifiée d'un système réel, destinée à en faciliter la compréhension et la prévision.

IV.1 Généralités :

IV.1.1 Typologie des inondations :

Les inondations peuvent se présenter sous plusieurs formes :

- **Débordement de cours d'eau :** lorsque le débit dépasse la capacité du lit mineur, provoquant la submersion du lit majeur.
- **Ruissellement pluvial :** lié à des précipitations intenses dépassant la capacité d'infiltration du sol et des réseaux de drainage.
- **Remontée de nappe :** lorsque le niveau des nappes phréatiques atteint la surface du sol, entraînant des inondations.
- **Défaillance d'ouvrages :** rupture de digues, barrages ou autres infrastructures hydrauliques pouvant provoquer des crues localisées ou étendues.

IV.1.2 Régimes et types d'écoulement :

Pour comprendre et modéliser un cours d'eau, il est essentiel de connaître le régime hydraulique et le type d'écoulement :

- **Régime d'écoulement :**
  - **Permanent (stationnaire) :** les paramètres hydrauliques ne varient pas dans le temps.
  - **Non permanent (transitoire) :** les paramètres varient dans le temps, typique lors d'événements de crue.

- **Types d'écoulement :**

- **Laminaire :** déplacement des particules d'eau en couches parallèles, peu de mélange (rare dans les rivières naturelles).
- **Turbulent :** mouvement désordonné avec mélange intense, courant dans la plupart des rivières et canaux.
- **Écoulement à surface libre :** l'eau n'est pas confinée (rivières, canaux ouverts).
- **Écoulement en charge :** l'eau est confinée dans un conduit fermé et le niveau est supérieur à l'ouverture (aqueducs, tunnels).

IV.1.3 Paramètres hydrauliques essentiels :

La simulation hydraulique repose sur la connaissance précise de plusieurs paramètres clés, qui déterminent le comportement de l'eau et la propagation des crues. Ces paramètres sont interconnectés et permettent de calculer les hauteurs d'eau, vitesses, débits et étendues inondables.

1) Débit (Q) :

Le débit est le volume d'eau écoulé par unité de temps (m^3/s). Il constitue le paramètre principal pour évaluer la capacité d'un cours d'eau et dimensionner les ouvrages. Il varie selon les crues, les saisons et les conditions climatiques.

2) Vitesse (V) :

La vitesse d'écoulement (m/s) influence la capacité de transport solide, l'érosion des berges et l'énergie cinétique disponible. Elle est essentielle pour prédire les impacts d'une crue sur le milieu environnant.

3) Hauteur d'eau (H) :

Distance verticale entre le fond du lit et la surface libre. Elle sert à calculer le volume d'eau stocké et est déterminante pour la sécurité des zones urbanisées et agricoles.

4) Tirant d'eau (h) :

Profondeur réelle de l'eau à un point précis. Elle permet d'évaluer la pression sur le fond et les berges, de déterminer la submersion des infrastructures et d'anticiper les zones à risque.

5) Section mouillée (A) :

Surface transversale occupée par l'eau dans le lit ou le canal. Elle relie débit et vitesse par la relation $Q=V \cdot A$ et influence directement le rayon hydraulique et les pertes de charge.

6) Pente hydraulique (S) :

Pente moyenne du plan d'eau, qui conditionne la force motrice de l'écoulement. Une pente plus élevée entraîne une vitesse plus grande et une énergie potentielle plus importante pour le transport solide et l'érosion.

7) Rayon hydraulique (R) :

Rapport entre la section mouillée et le périmètre mouillé. Il est utilisé dans les formules de Manning ou Chezy pour calculer les pertes de charge et la vitesse d'écoulement.

8) Coefficient de rugosité (n de Manning) :

Il caractérise la résistance du lit et des berges à l'écoulement et dépend de la nature du sol, de la végétation et des irrégularités du lit. Plus n est élevé, plus l'écoulement est ralenti et la hauteur d'eau augmente.

9) Énergie spécifique :

Paramètre qui exprime l'état énergétique de l'écoulement, permettant de déterminer les variations de hauteur et de vitesse, et de détecter les transitions entre écoulement subcritique et surcritique.

10) Nombre de Froude (Fr) :

Permet de classifier le régime d'écoulement : subcritique ($Fr < 1$), critique ($Fr = 1$), surcritique ($Fr > 1$). Ce paramètre est important pour comprendre les phénomènes de déferlement et de propagation rapide des crues.

11) Côtes du fond et des berges :

Définissent la géométrie du lit et du canal, permettant de calculer les volumes d'eau et la profondeur maximale atteinte lors des crues.

12) Longueur des tronçons et pente locale :

Paramètres géométriques nécessaires pour la discrétisation du modèle et le calcul précis des pertes de charge le long du cours d'eau.

13) Paramètres de pertes de charge localisées :

Ponts, digues, culées et obstacles influencent la distribution de l'eau et la hauteur d'eau en amont et en aval.

IV.1.4 Méthodes de calcul hydraulique :

Avant l'apparition des modèles numériques, l'étude des écoulements et des crues reposait sur des méthodes analytiques et empiriques. Ces méthodes ont longtemps servi à dimensionner les ouvrages hydrauliques et à prévoir les inondations, mais elles présentent des limites lorsqu'il s'agit de scénarios complexes ou de cartographie détaillée.

1) Formule de Chezy :

La formule de Chezy est l'une des premières relations établies pour calculer la vitesse d'écoulement dans un canal ou une rivière :

$$V = C\sqrt{RS} \qquad \textbf{IV.1}$$

Où V est la vitesse moyenne, C le coefficient de Chezy, R le rayon hydraulique et S la pente hydraulique.

- **Avantages :** simplicité de calcul, adaptée aux écoulements uniformes.
- **Limites :** ne tient pas compte des irrégularités du lit et de la végétation, peu adaptée aux écoulements transitoires.

2) Formule de Manning-Strickler :

Cette formule permet également de calculer la vitesse et le débit dans un canal à surface libre :

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \qquad \textbf{IV.2}$$

Où n est le coefficient de rugosité de Manning.

- **Avantages :** largement utilisée en ingénierie hydraulique, permet d'intégrer la rugosité du lit et des berges.
- **Limites :** approximations importantes pour les écoulements très irréguliers ou les crues extrêmes.

3) Méthode rationnelle :

Cette méthode empirique est utilisée pour estimer le débit de pointe d'un bassin versant lors d'une pluie intense :

$$\boldsymbol{Q = C.i.A} \qquad \textbf{IV.3}$$

Où Q_p est le débit de pointe, C le coefficient de ruissellement, i l'intensité de pluie et A la superficie du bassin.

- **Avantages :** simple et rapide, adaptée aux petits bassins urbains.
- **Limites :** ne prend pas en compte la variabilité temporelle des précipitations ni la complexité topographique.

IV.2 Simulation de l'écoulement du cours d'eau :

Pour la simulation de l'écoulement dans les cours d'eau, le logiciel **HEC–RAS (version 6.3.1)** a été retenu pour cette étude en raison des nombreux avantages qu'il offre, parmi lesquels :

- Sa gratuité et sa facilité de téléchargement en ligne.
- La possibilité d'analyser l'impact de la construction d'ouvrages hydrauliques tels que les ponts, seuils et épis.
- La réalisation d'études d'inondation.
- La modélisation en une dimension (1D) ou en deux dimensions (2D) des rivières et des plaines inondables.
- La simulation de différents régimes d'écoulement (subcritique, de transition et supercritique), en intégrant les effets des ouvrages hydrauliques.
- L'exploitation des résultats cartographiques, permettant notamment l'identification et la délimitation des zones à risque.

IV.2.1 Sélection du modèle hydraulique adapté :

Le logiciel HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*) a été développé par le Hydrologic Engineering Center (HEC) du U.S. Army Corps of Engineers. Il constitue aujourd'hui l'un des outils de référence pour la modélisation hydraulique des cours d'eau. Ce programme permet de simuler les écoulements à surface libre en régime permanent ou transitoire, aussi bien en une dimension (1D) qu'en deux dimensions (2D).

HEC-RAS offre un large éventail de fonctionnalités, allant du calcul des profils en long et en travers des rivières à l'évaluation des risques d'inondation, en passant par l'analyse de l'impact des aménagements hydrauliques tels que les ponts, barrages, digues ou seuils. Grâce à son interface conviviale et à son accès libre et gratuit, il est largement utilisé par les ingénieurs et chercheurs dans les domaines de l'hydrologie, de l'hydraulique et de la gestion des risques liés aux crues.

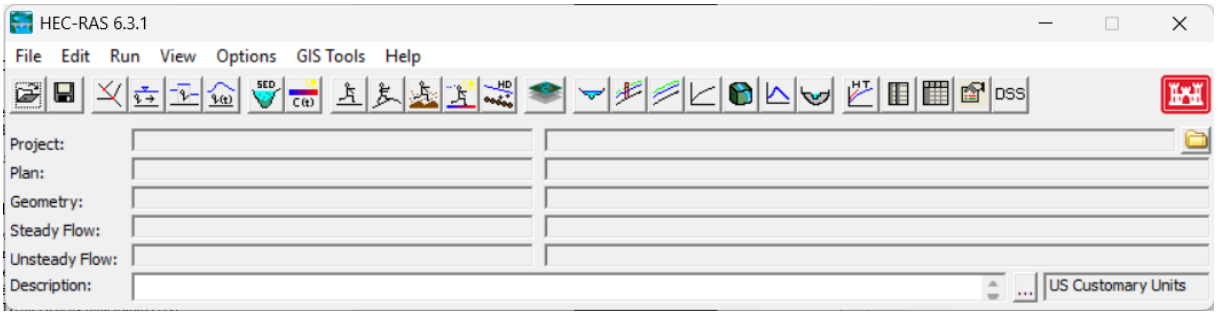


Figure IV.1: Interface du logiciel HEC-RAS (version 6.3.1).

IV.2.1.1 But et utilité du logiciel :

L'objectif principal du logiciel HEC-RAS est de fournir un outil performant pour la modélisation et l'analyse hydraulique des cours d'eau et des plaines inondables. Il permet d'étudier et de simuler le comportement des écoulements à surface libre dans différents contextes hydrologiques et topographiques.
Plus spécifiquement, HEC-RAS vise à :

- Reproduire les conditions réelles d'écoulement afin de prédire l'ampleur et l'évolution des crues ;
- Évaluer l'impact des aménagements hydrauliques (digues, barrages, ponts, seuils, canaux) sur le régime des rivières ;
- Identifier et cartographier les zones exposées aux inondations, facilitant ainsi la prévention et la gestion des risques ;
- Mettre à disposition des gestionnaires et décideurs des outils fiables pour planifier des actions de protection et d'aménagement des territoires.

Ainsi, HEC-RAS constitue un support essentiel pour les études hydrauliques et la gestion intégrée des risques d'inondation.

IV.2.1.2 Principe de fonctionnement de HEC-RAS :

Le logiciel HEC-RAS repose sur la résolution des équations de Saint-Venant, qui décrivent l'écoulement à surface libre dans les rivières et les plaines inondables. Ces équations, prenant en compte la continuité et la quantité de mouvement, permettent de simuler différents régimes d'écoulement (subcritique, supercritique ou mixte).

Le fonctionnement du modèle s'articule autour de plusieurs étapes :

- La définition de la géométrie du cours d'eau (profils en travers, tracé du chenal, ouvrages hydrauliques).
- L'introduction des conditions hydrologiques et hydrauliques (débits, niveaux d'eau, coefficients de rugosité).
- La simulation numérique proprement dite.

Les résultats générés par HEC-RAS sont variés : profils en long, lignes d'eau, vitesses d'écoulement, zones d'inondation ou encore cartes de submersion, permettant ainsi une analyse détaillée du comportement hydraulique d'un cours d'eau et de ses interactions avec l'environnement.

IV.2.2 Application d'HEC-RAS sur l'Oued :

IV.2.2.1 Les données géométriques :

Les données géométriques nécessaires comprennent l'élaboration du schéma de connectivité du système fluvial (schéma du réseau hydrique), la définition des profils en travers du cours d'eau, ainsi que l'intégration des informations relatives aux ouvrages hydrauliques existants ou projetés (tels que les ponts, digues, structures latérales ou déversoirs) (Idrici, 2017).

1) Construction du TIN « Terrain Irregular Network » :

Le relief peut aussi être modélisé à l'aide d'un échantillonnage semi-dirigé et irrégulier, intégrant les principales caractéristiques structurelles du terrain. Cette méthode repose sur un maillage en triangles non réguliers, connu sous le nom de TIN (Triangular Irregular Network).

Dans le cadre de cette étude, le logiciel ArcGIS a été utilisé pour générer un Triangular Irregular Network (TIN), servant de support à la visualisation des écoulements dans RAS Mapper. Ce modèle permet également l'élaboration de différentes cartes thématiques, notamment celles de la profondeur et de la vitesse d'écoulement.

La figure IV.7 illustre le TIN établi.

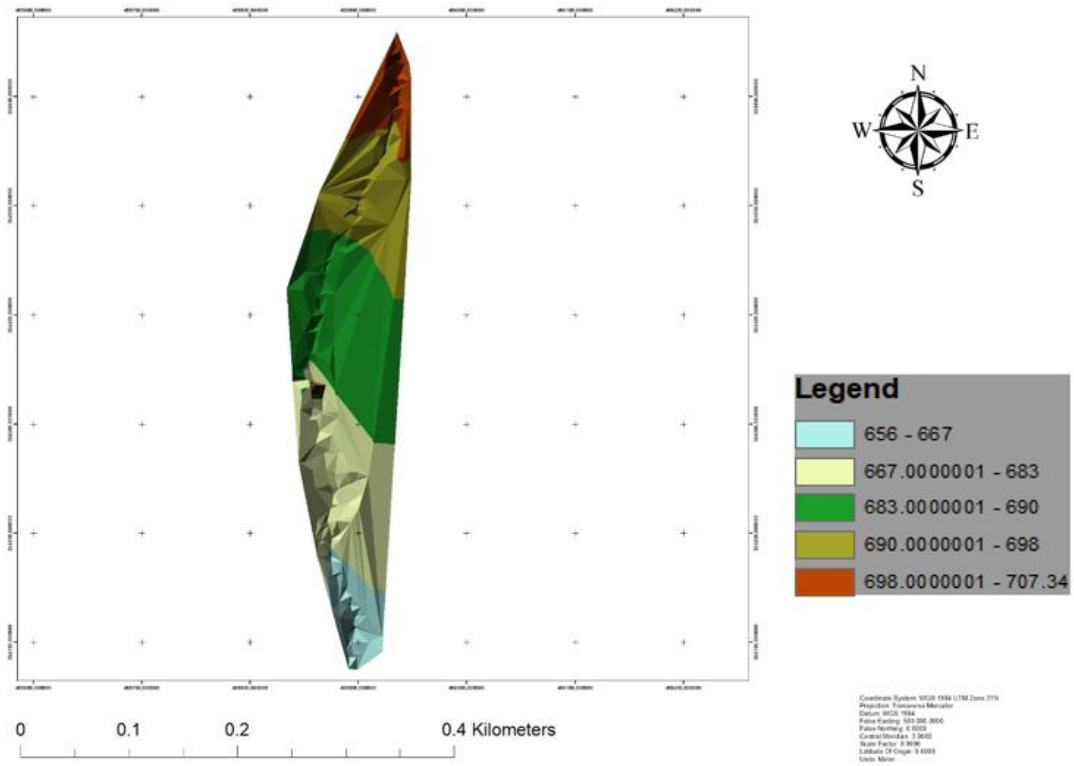


Figure IV.2 : TIN (réseau irrégulier triangulé) d'oued Errihane.

Une fois le TIN construit, nous l'exportons accompagné du fichier de projection ESRI (.prj). Ce fichier contient les informations relatives au système de coordonnées spécifique à notre zone d'étude. Il a été téléchargé depuis le site Spatial Reference, puis intégré dans le logiciel HEC-RAS, afin de permettre à RAS Mapper d'assurer une simulation correcte et adaptée.

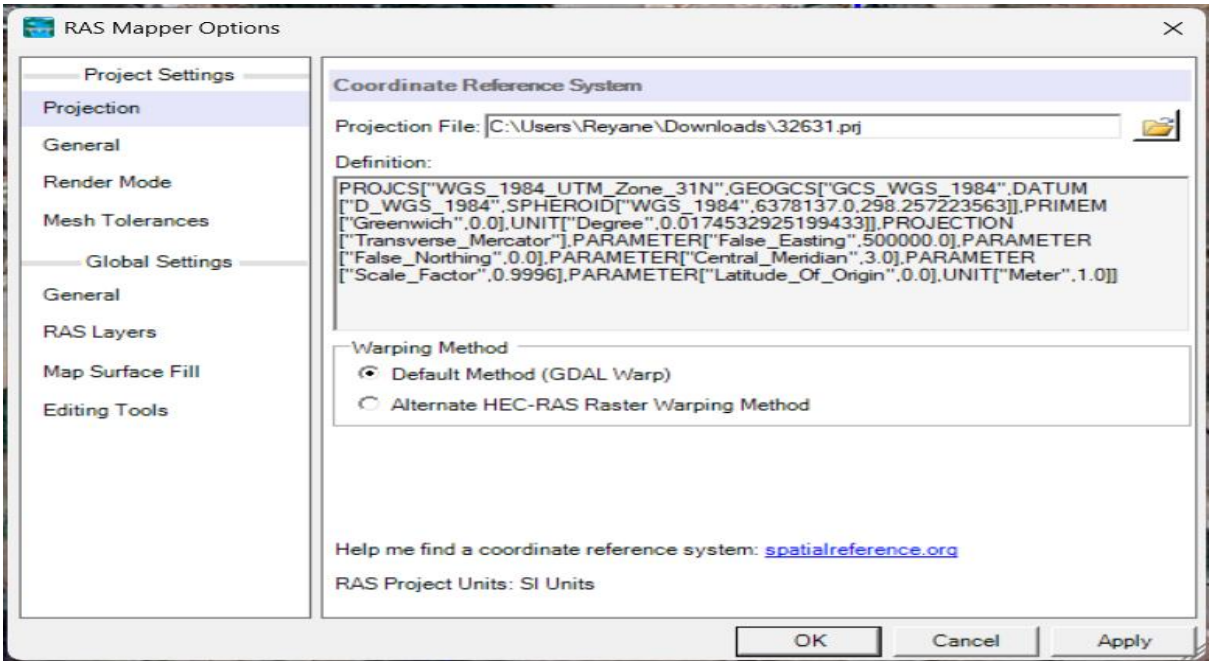


Figure IV.3: Insertion fichier de projection.

L'importation du TIN sous forme d'image dans RAS Mapper est illustrée dans les figures IV.8 et IV.9.

Après l'importation réussie des données dans HEC-RAS, la première étape consiste à tracer

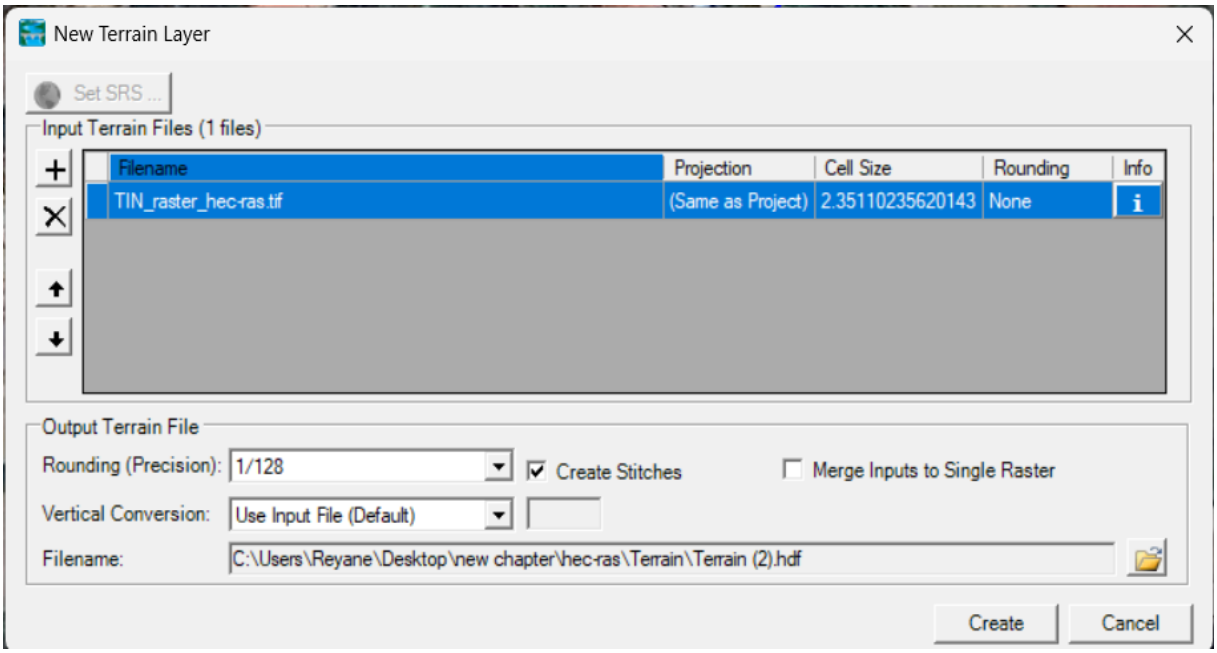


Figure IV.4: Insertion de TIN.

L’axe de la rivière, le lit mineur, le lit majeur ainsi que les différentes sections transversales. Toutefois, les profils générés initialement ne reflètent pas avec précision les profondeurs attendues. Il est donc indispensable de procéder à un ajustement de leur géométrie afin d’obtenir des sections transversales correctement configurées, garantissant ainsi une représentation fidèle du cours d’eau et de son lit.

Les sections transversales obtenues à partir du RAS Mapper sont présentées dans la figure suivante.

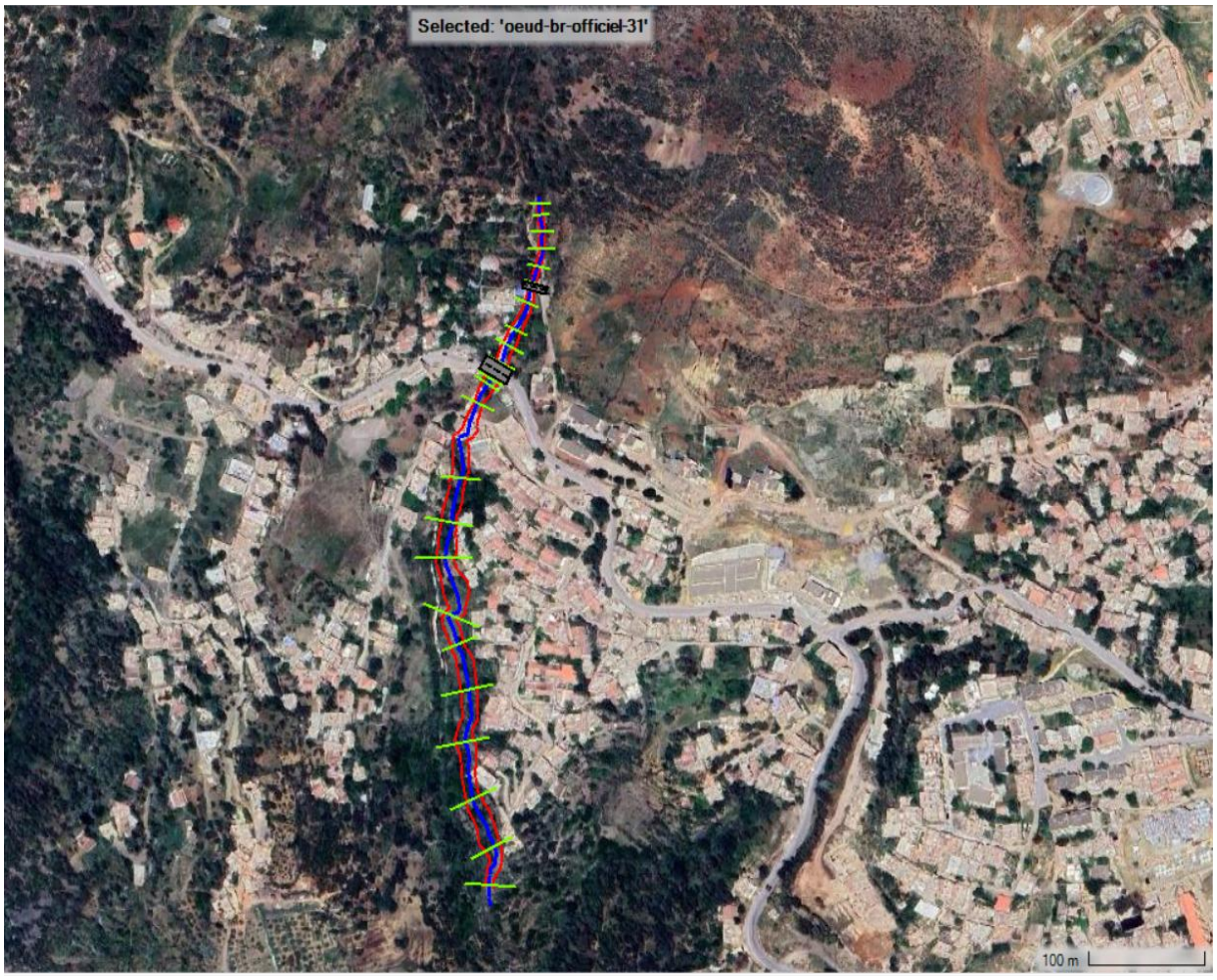


Figure IV.5 : Définition du tracé d’oued Errihane et ces sections en travers.

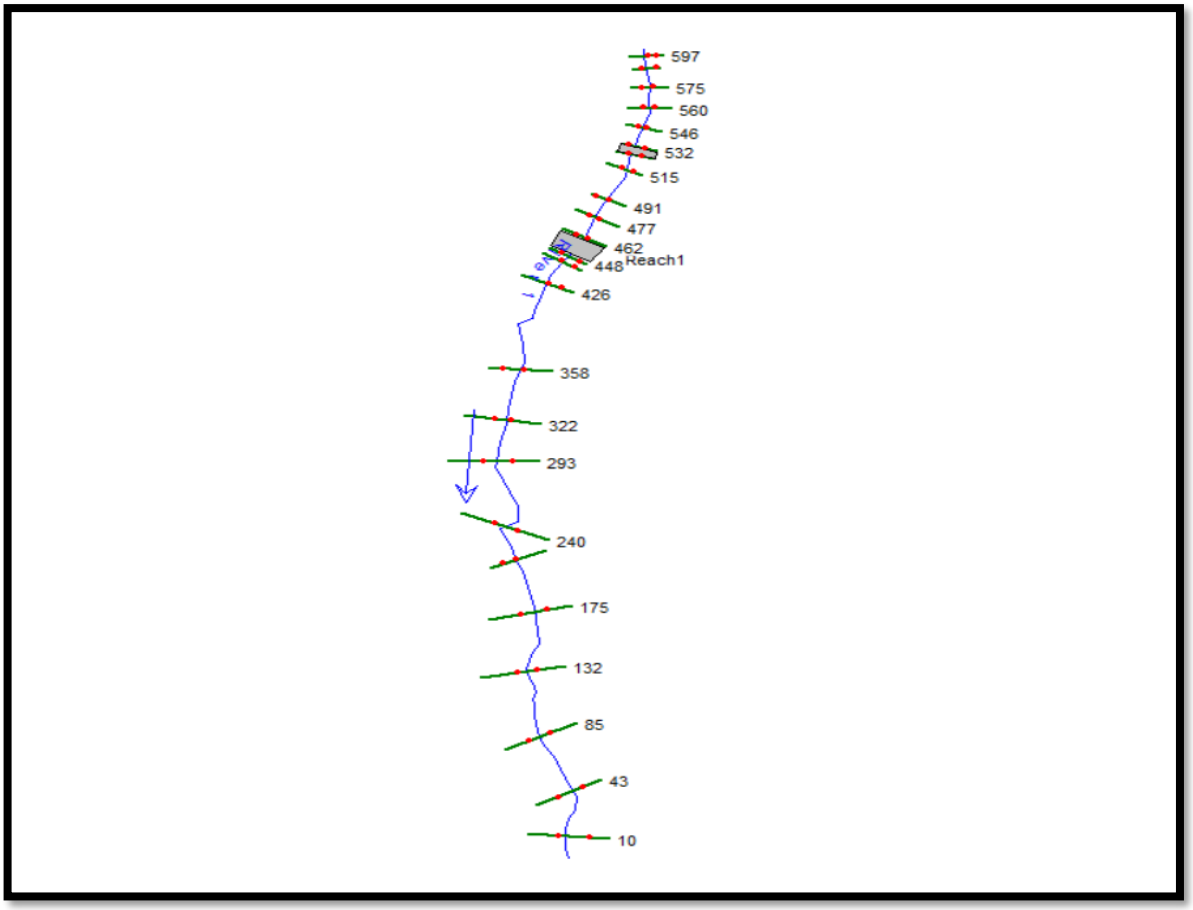


Figure IV.6: Définition du tracé d'oued Errihane et ces sections en travers.

2) Le choix du coefficient de frottement (coefficient de Manning-Strickler)

Le frottement exercé au fond du lit est représenté par le coefficient de rugosité de Manning (n), qui est l'inverse du coefficient de Strickler ($k = 1/n$).

La valeur de ce coefficient dépend directement de la nature du substrat et des caractéristiques morphologiques du lit (granulométrie, présence de végétation, irrégularités, etc.).

Dans le cas du lit mineur, le choix de n se fait en se référant aux valeurs normalisées proposées dans la littérature, et plus précisément à partir du tableau présenté en (**Annexe N° 3)**, qui permet d'adopter un coefficient représentatif des conditions réelles observées sur le terrain

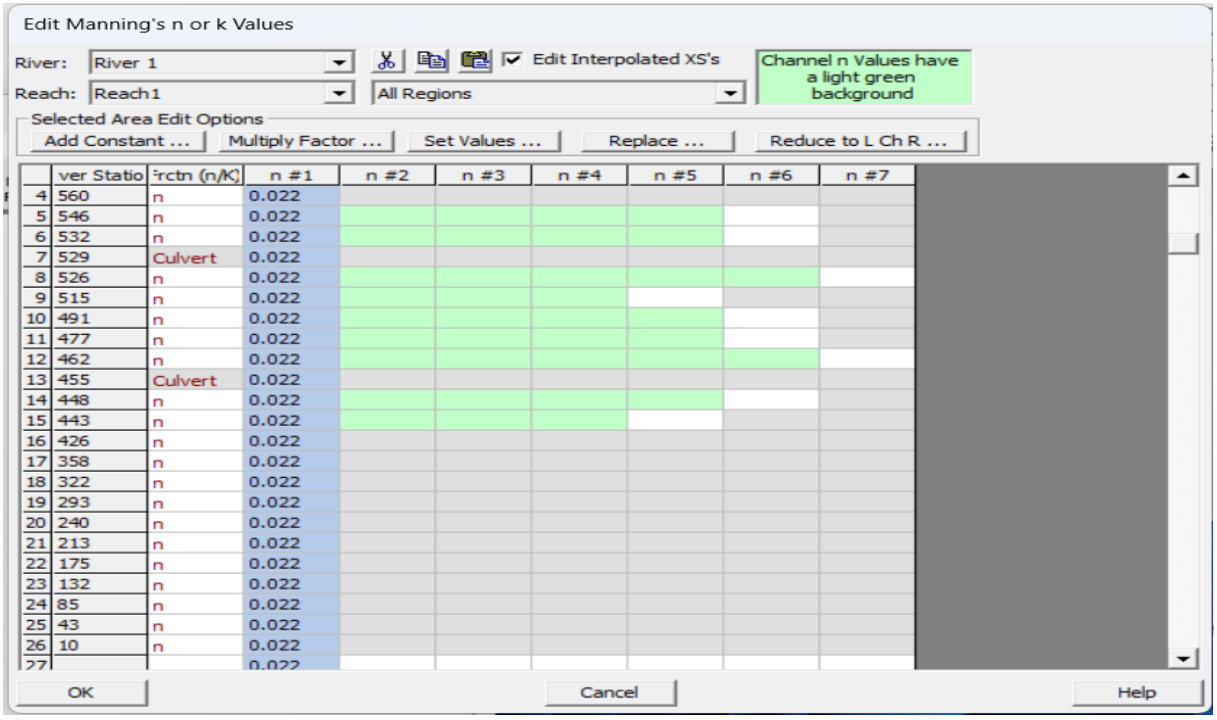


Figure IV.7: Insertion des valeurs de Manning (terrain naturel)

IV.2.2.2 Condition aux limites (Boundary conditions) :

Une fois les données géométriques de chaque section enregistrées, l'étape suivante de la modélisation hydraulique sous HEC-RAS consiste à définir les débits d'entrée ainsi que les conditions aux limites, indispensables pour le calcul des profils de surface libre dans le réseau fluvial.

Ces conditions aux limites jouent un rôle fondamental dans la simulation hydraulique. En effet, pour modéliser un écoulement permanent, il est nécessaire de spécifier des conditions en amont, en aval, ou aux deux extrémités, afin de déterminer l'altitude de la ligne d'eau dans chaque tronçon, c'est sur cette base que HEC-RAS effectue ses calculs.

Dans notre étude, l'écoulement étant en régime mixte, les calculs ont été réalisés en imposant des conditions limites à la fois à l'amont et à l'aval du tronçon étudié. Le choix s'est porté sur la condition de profondeur critique en amont et de profondeur normale en avale, laquelle nécessite la définition d'une pente énergétique. HEC-RAS exploite alors cette valeur pour estimer la profondeur d'écoulement au moyen de l'équation de Manning. Afin de déterminer cette pente énergétique, nous avons mesuré la pente du lit sur le tronçon aval du segment modélisé.

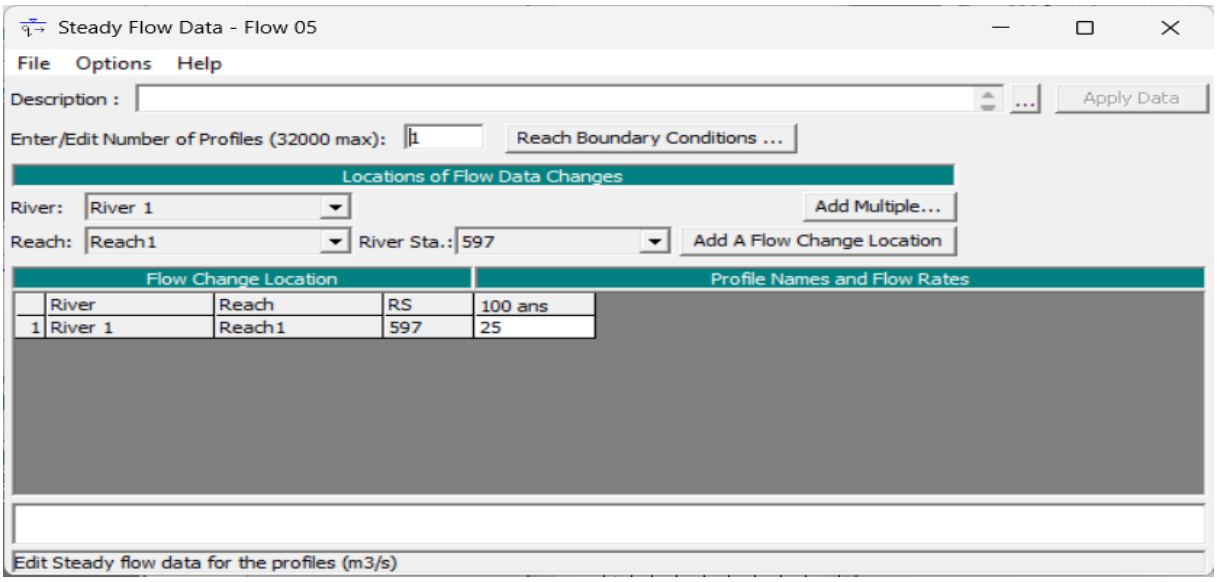


Figure IV.8: Introduction de débit centennale.

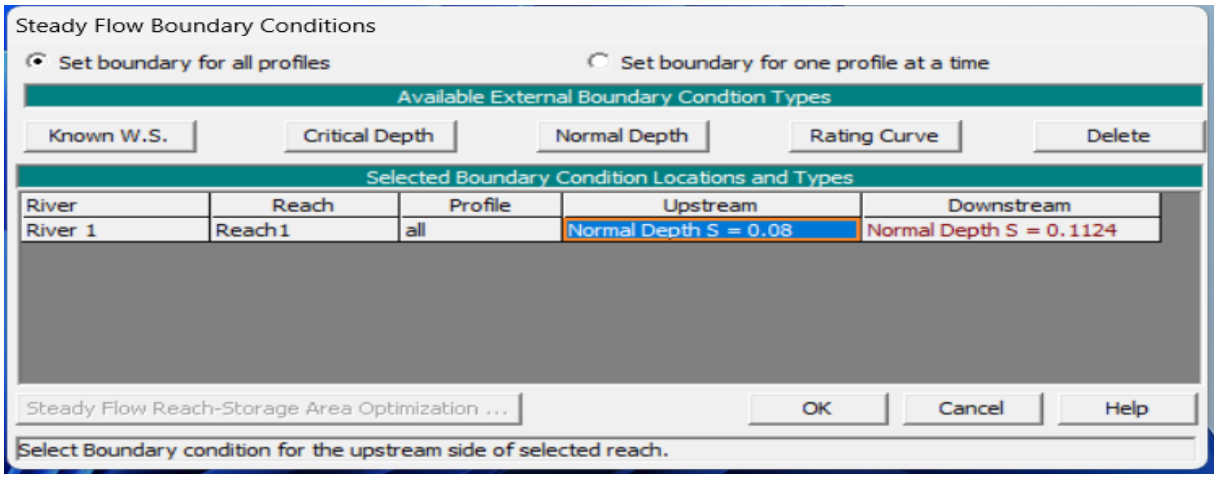


Figure IV.9: Définition des conditions aux limites.

- Après avoir introduit les données géométriques et hydrométriques, ainsi que défini les conditions aux limites, il est nécessaire de choisir le type de régime d'écoulement parmi les options disponibles dans HEC-RAS : régime fluvial, régime torrentiel ou régime mixte, afin de lancer les calculs hydrauliques.

Dans notre cas, nous avons retenu le régime mixte, ce qui nous a permis de procéder à la simulation.

Le débit de projet utilisé correspond au débit centennal calculé dans la partie hydrologique, soit 25 m^3/s.

IV.2.2.3 Résultat de la simulation :

Les résultats issus de la simulation réalisée avec HEC-RAS constituent un outil précieux pour l'analyse de l'écoulement permanent dans un système fluvial ou hydraulique. Cette modélisation permet d'étudier avec précision la répartition des vitesses, les hauteurs de la surface libre ainsi que les débits le long du réseau hydrographique. Elle offre ainsi une vision claire du comportement hydraulique du cours d'eau et contribue à une meilleure évaluation et anticipation des risques d'inondation.

1) Le profil en long :

La ligne d'eau constitue une représentation en coupe longitudinale du tronçon étudié. Elle met en évidence le niveau et la surface libre de l'oued, tout en illustrant le niveau atteint lors d'un débit correspondant à une période de retour centennale.

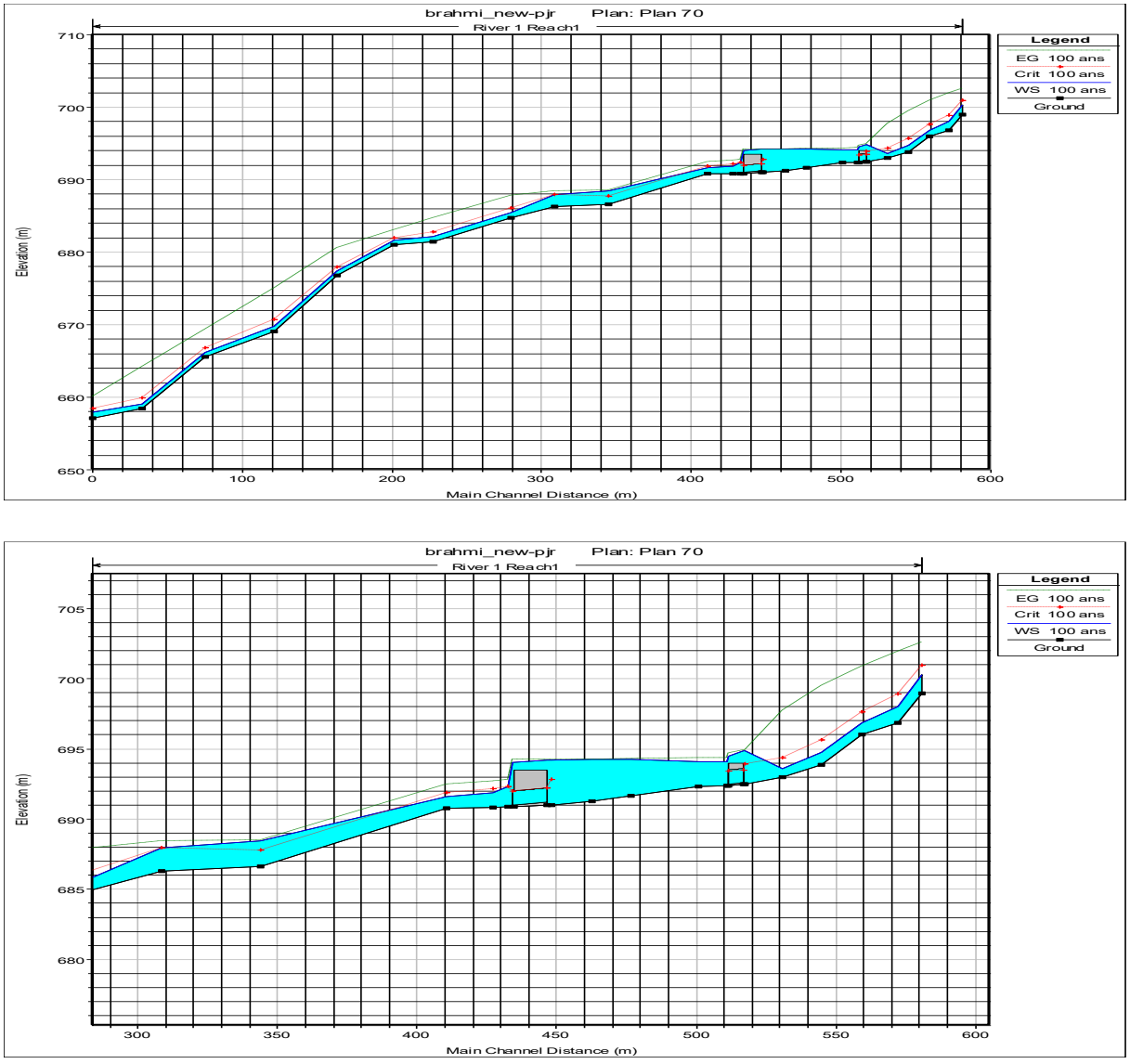
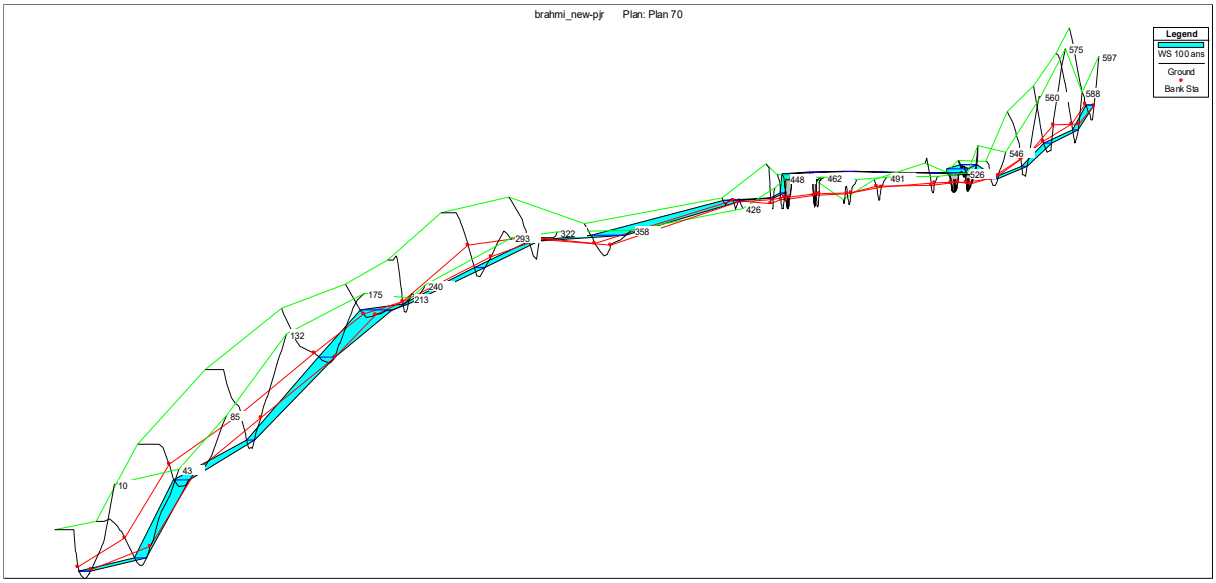


Figure IV.10: Profil en long du cours d'eau en état naturel lors d'une crue de période centennale.

2) Vue en trois dimensions :

Le logiciel HEC-RAS propose une visualisation tridimensionnelle qui facilite l'analyse et le suivi du comportement des eaux de crue en fonction de différentes périodes de retour.



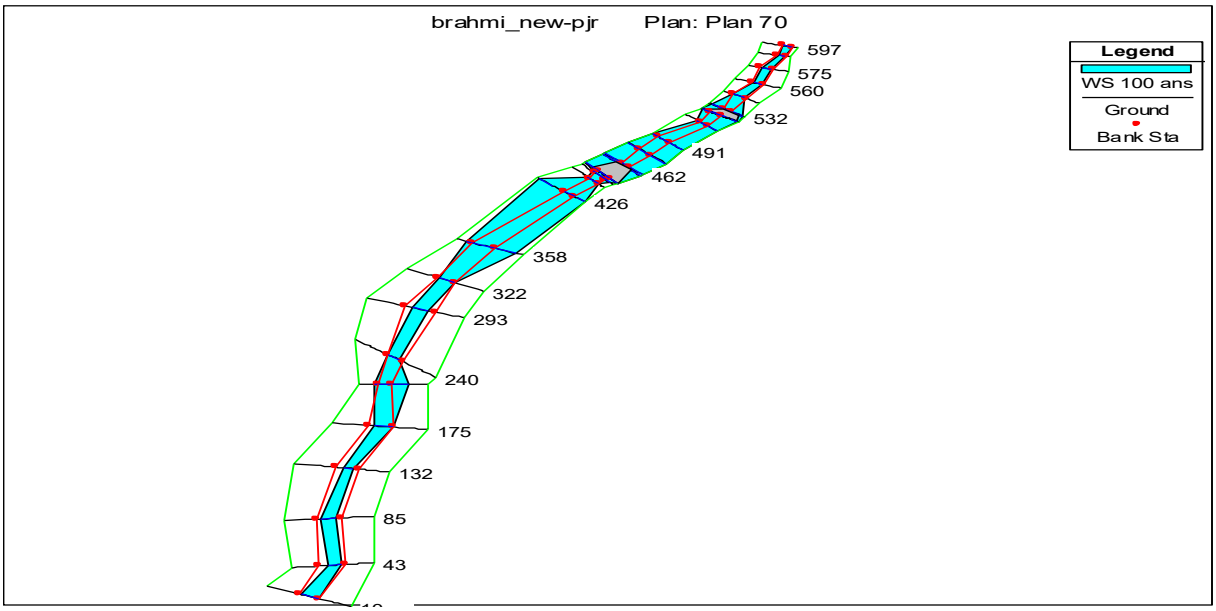


Figure IV.11: Vue en trois dimensions d'oued Errihane.

3) Restitution de la courbe de tarage :

HEC-RAS a permis de produire une courbe illustrant l'évolution de la hauteur d'eau (m) en fonction du débit (m^3/s), mettant ainsi en évidence la relation hydraulique entre ces deux paramètres.

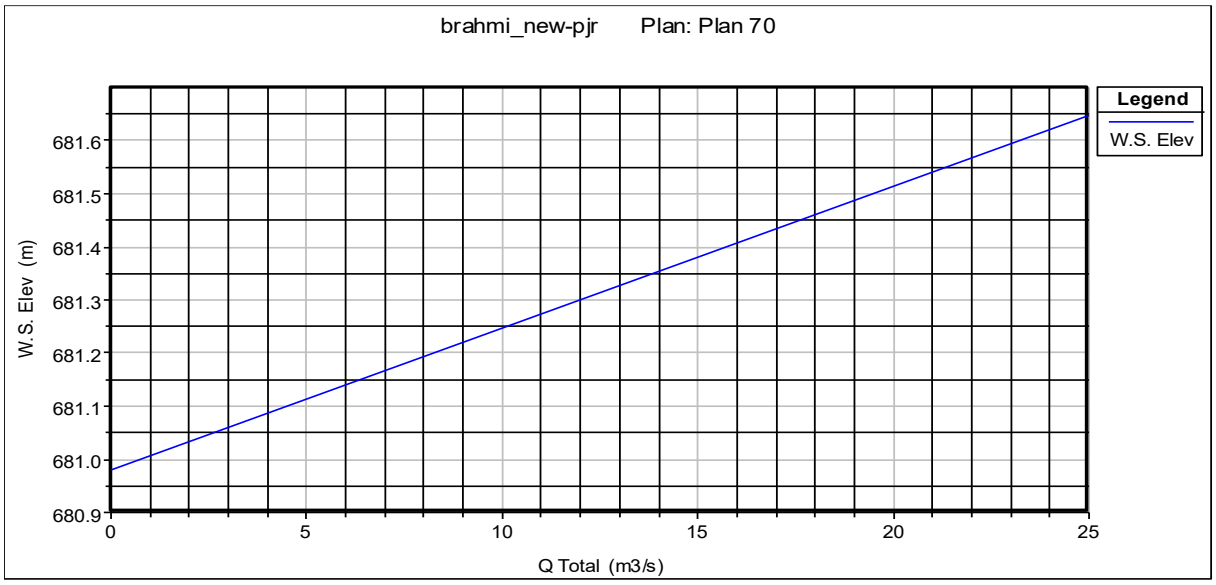
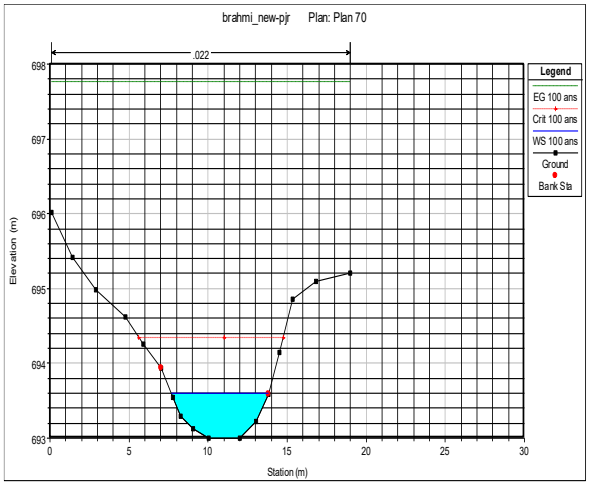


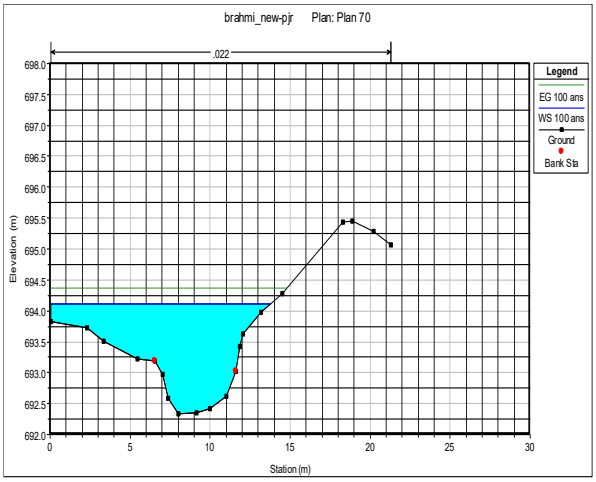
Figure IV.12: Courbe de tarage du tronçon modélisé d'oued Errihane.

4) Les profils en travers :

Grâce à l'option d'affichage des résultats par profil transversal, il a été possible d'obtenir une analyse détaillée de l'écoulement en chaque point du cours d'eau. Les résultats montrent que la majorité des sections étudiées sont exposées à un risque élevé de submersion.



(Section 546)



(Section 515)

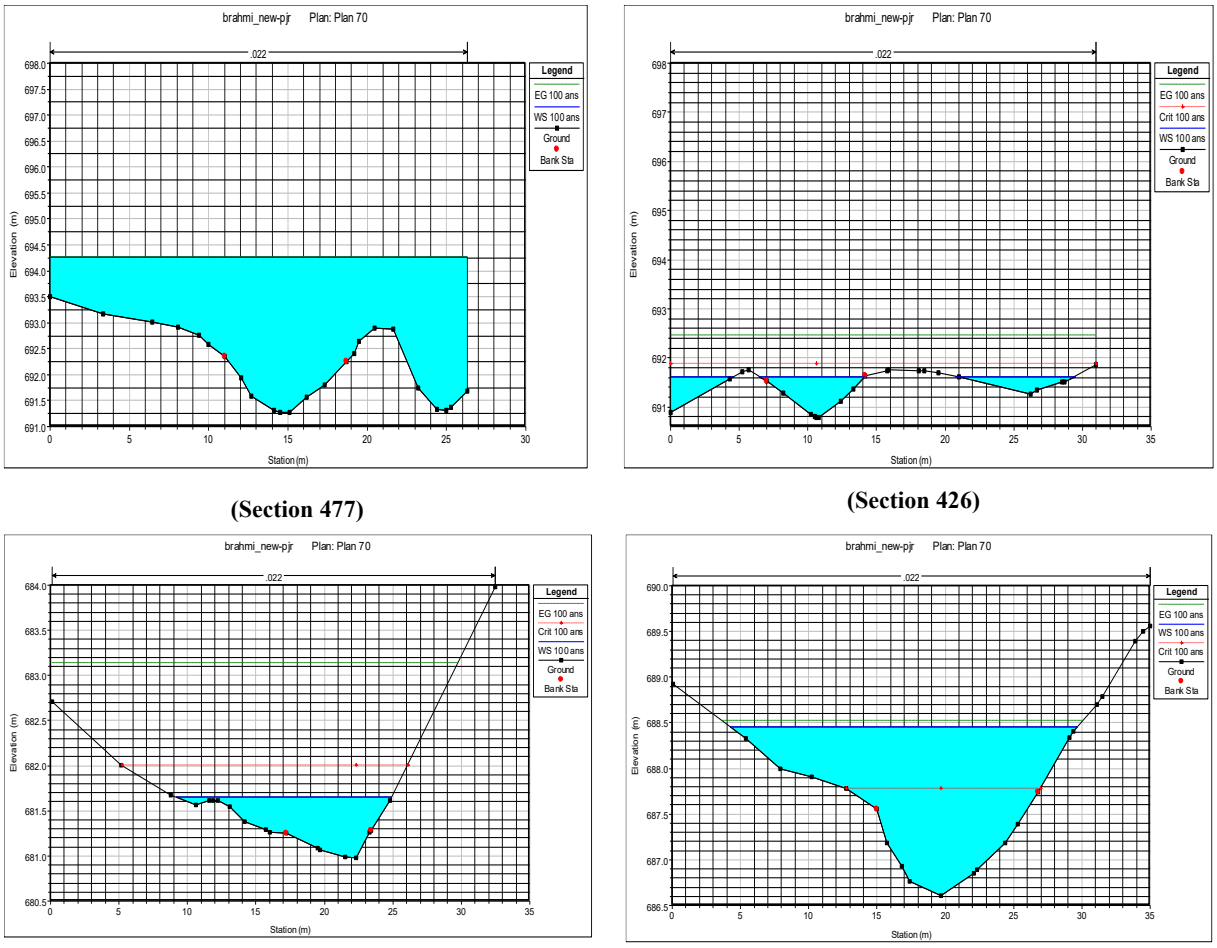


Figure IV.13: Profils en travers des sections choisies représentatives d'oued Errihane.

5) La partie des routes :

- Route principale :



Figure IV.14: Localisation de la route principale sur la rive de l'oued Errihane.

- **Récupératif détails des buses existants :**

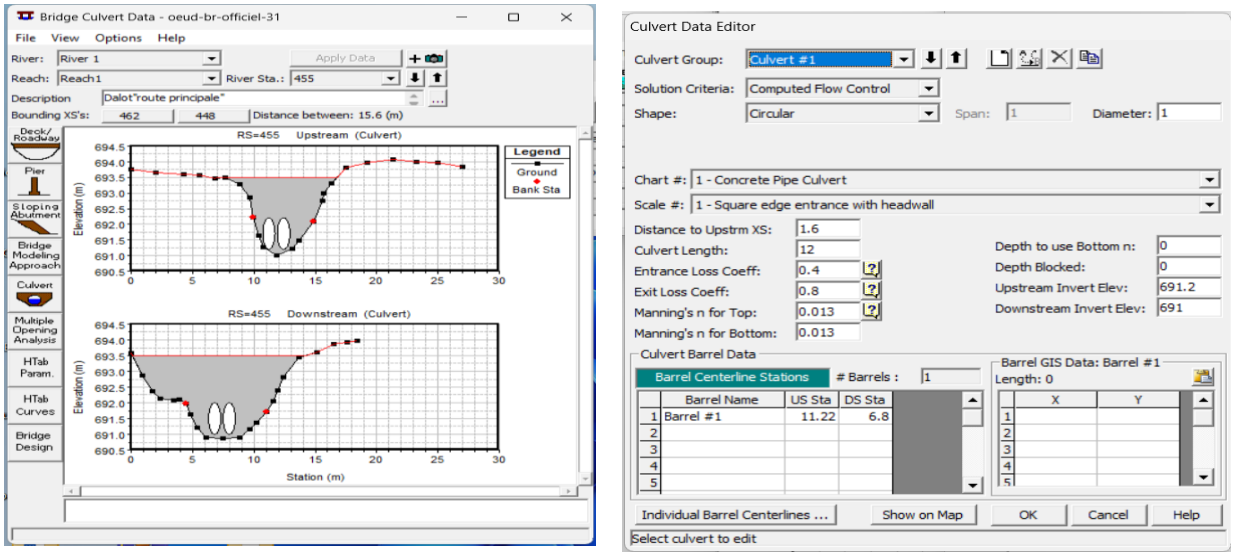
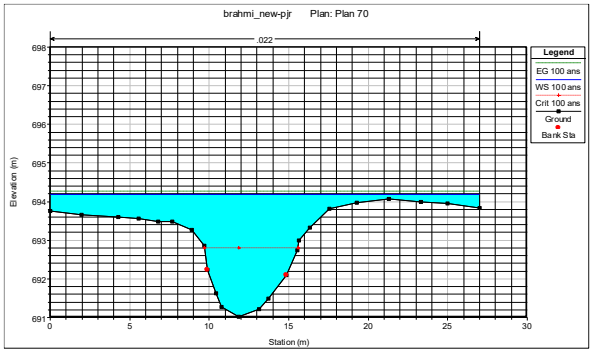


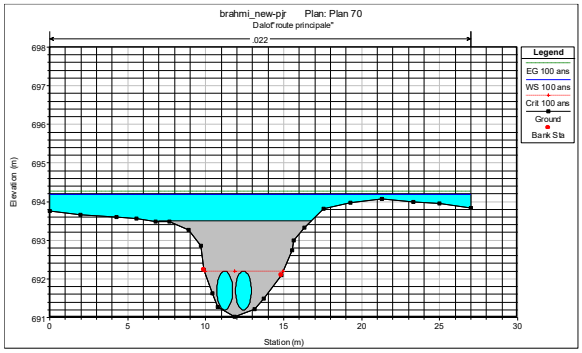
Figure IV.15: Détails des buses.

- **Les profils en travers :**

  – **En Amont :**

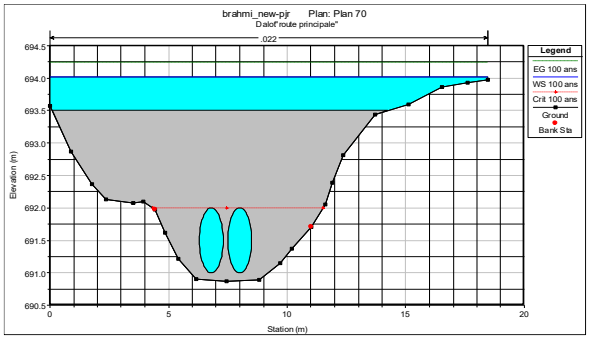


Section en amont de la route (section 462)

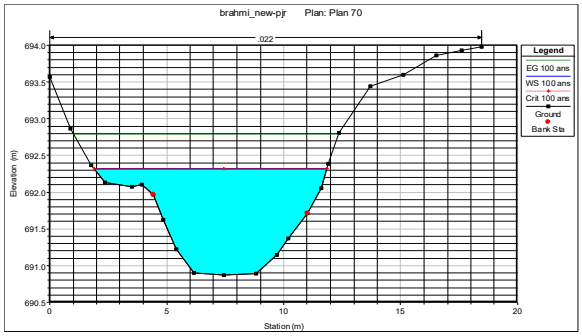


Vue des buses après la simulation

  – **En Aval**



Vue des buses après la simulation



Section en aval de la route (section 448)

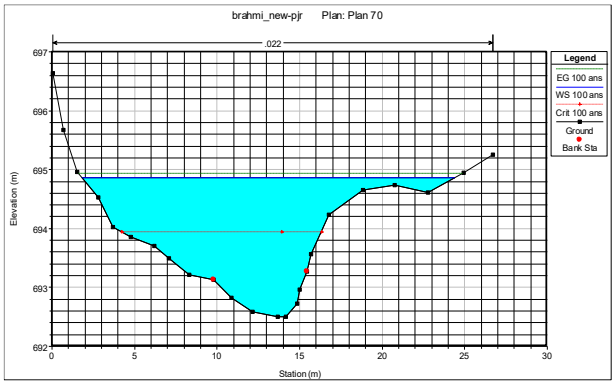
Figure IV.16: Les buses qui assurent l'écoulement de l'eau sous la route principale.

◆ Route secondaire (entré d'un petit patelin) :

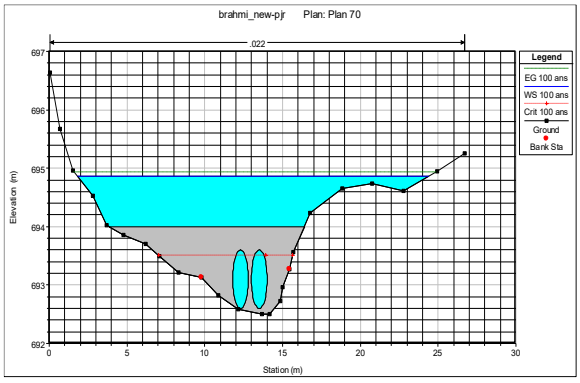


Figure IV.14: Localisation de la route sur la rive de l'oued Errihane.

- **Les profils en travers :**
  - **En Amont :**

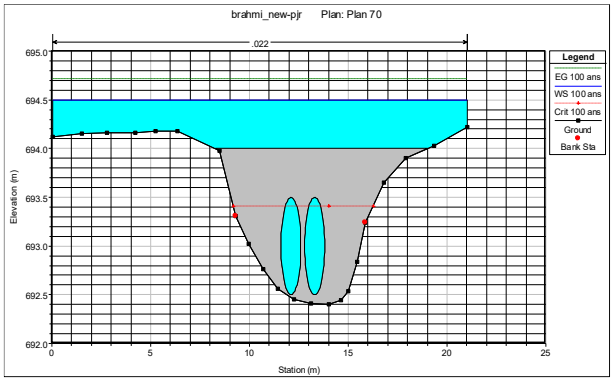


Section en amont de la route (section 532)

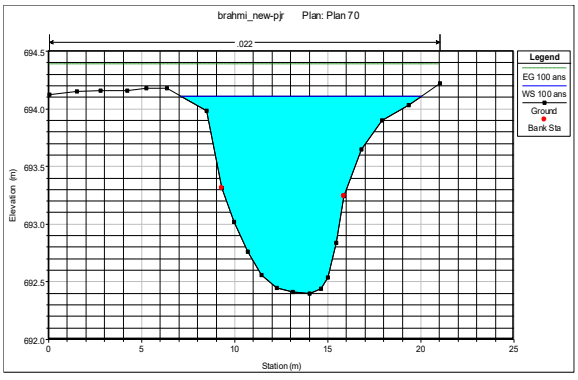


Vue des buses après la simulation

  - **En Aval :**



Vue des buses après la simulation



Section en aval de la route (section 526)

Figure IV.16: Les buses qui assurent l'écoulement de l'eau sous la route secondaire.

6) Variation de la vitesse :



Figure IV.17: variation de la vitesse en fonction de la distance.

7) Evolution du nombre de Froude :

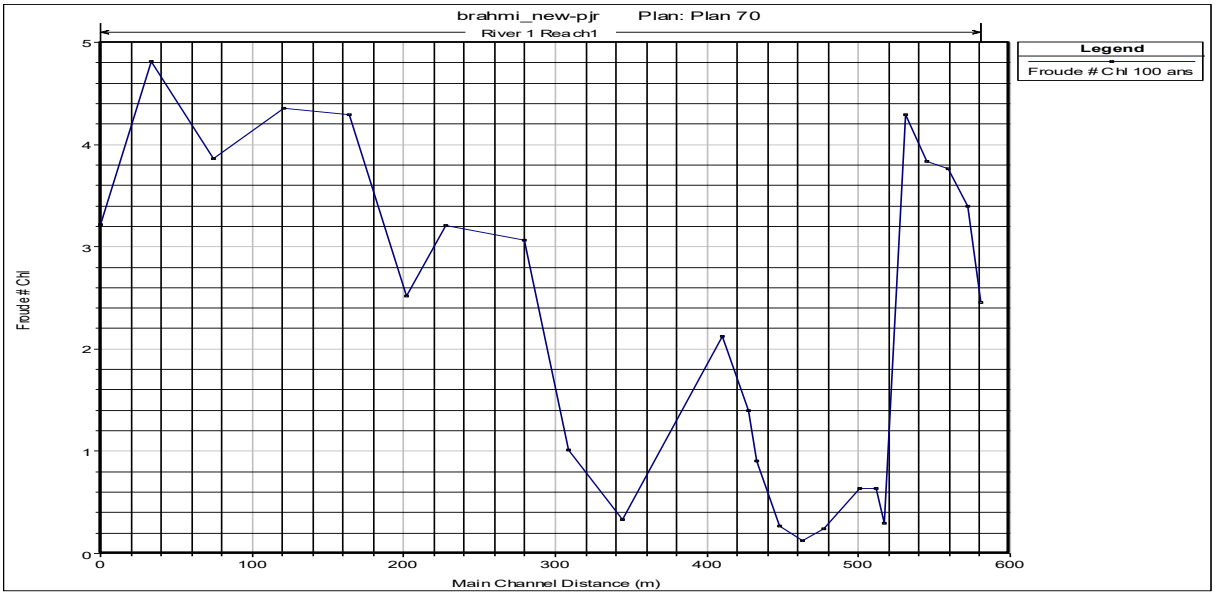


Figure IV.18 : Evolution du nombre de Froude en fonction de la distance d'oued errihane.

8) Paramètres hydrauliques pour l'ensemble des stations :

Le Tableau IV.3 présente les principaux paramètres hydrauliques pour toutes les stations.

Tableau IV.1: Résultats de la simulation de l'écoulement pour la période de retour T = 100 ans (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)	(m2)	(m)	
597	698.94	700.30	700.94	702.61	0.040062	6.73	3.71	4.87	2.45
588	696.83	698.04	698.88	701.97	0.076530	8.78	2.85	4.18	3.40
575	696.02	696.85	697.64	700.89	0.091652	8.90	2.81	4.91	3.76
560	693.85	694.75	695.66	699.48	0.098936	9.63	2.60	4.03	3.83
546	693.00	693.60	694.34	697.76	0.119309	9.03	2.77	6.15	4.29
532	692.50	694.86	693.94	694.93	0.000338	1.34	24.00	22.60	0.29
529	Les buses.								
526	692.40	694.11	694.50	694.39	0.001847	2.42	11.99	16.86	0.64
515	692.33	694.11	694.50	694.37	0.001828	2.46	12.38	13.73	0.63
491	691.66	694.24	694.75	694.29	0.000242	1.09	27.93	20.68	0.24
477	691.27	694.26	694.79	694.27	0.000058	0.63	49.48	26.30	0.13
462	691.01	694.19	692.80	694.27	0.000295	1.41	25.22	27.00	0.27
455	Les buses.								
448	690.87	692.32	692.32	692.79	0.004031	3.09	8.64	9.95	0.91
443	690.85	691.89	692.13	692.73	0.010396	4.13	6.33	8.51	1.40
426	690.78	691.62	691.88	692.46	0.028338	4.56	6.61	20.95	2.12
358	686.61	688.46	687.78	688.53	0.000462	1.24	23.50	25.43	0.33
322	686.28	687.95	687.95	688.45	0.005567	3.11	8.03	8.31	1.01
293	684.70	685.49	686.06	687.89	0.058420	6.85	3.65	7.16	3.06
240	681.47	682.19	682.76	684.69	0.064523	7.00	3.57	7.34	3.20
213	680.98	681.65	682.01	683.14	0.037060	5.86	5.17	15.75	2.52
175	676.83	677.40	677.96	680.61	0.126155	7.94	3.15	9.03	4.29
132	669.03	669.82	670.72	675.08	0.124797	10.16	2.46	4.43	4.35
85	665.57	666.23	666.84	669.37	0.097022	7.85	3.19	7.56	3.86
43	658.41	659.09	659.87	664.18	0.151858	9.99	2.50	5.70	4.81
10	657.14	657.92	658.41	660.10	0.067058	6.55	3.82	9.04	3.22

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

IV.2.2.4 Interprétation des résultats :

L'analyse des variations du niveau d'eau le long des différentes sections transversales de l'oued met en évidence que l'oued Errihane, avant et après la route constitue le tronçon le plus exposé aux inondations (les deux routes : principale et l'entré de petit patelin). Les autres segments du cours d'eau connaissent également des débordements, mais ceux-ci se produisent principalement dans les zones de faible profondeur, conformément aux paramètres hydrauliques relevés.

- Le régime d'écoulement de l'oued présente quand même une variabilité, comme l'indiquent les valeurs du nombre de Froude, comprises entre 0,13 et 4.81.

- Intervalle des vitesses :

Vitesse minimale : 0.63 m/s **Vitesse maximale** : 10.16 m/s

IV.3 La cartographie du risque de l'inondation :

Après avoir généré les profils d'inondation à l'aide du logiciel HEC-RAS, l'étape suivante consiste à localiser et cartographier les zones exposées au risque d'inondation. Cela implique l'analyse des niveaux d'eau dans différentes sections de l'oued.

Pour identifier les points de débordement et délimiter les secteurs vulnérables, nous avons utilisé l'outil RAS-MAPPER intégrer à HEC-RAS, qui permet de simuler l'état du cours d'eau lors d'une crue centennale. Cette approche a permis d'obtenir des cartes précises, constituant une base essentielle pour les analyses approfondies à venir.

La cartographie des risques a pour objectif de mettre en évidence les principaux aléas, en tenant compte de plusieurs critères : l'impact potentiel, la probabilité d'occurrence et le niveau de maîtrise existant. Les objectifs de cette démarche incluent :

- Mettre en place un système efficace de gestion et de contrôle des risques.
- Appuyer la direction dans la définition de stratégies et la prise de décisions.
- Orienter la planification des audits internes en priorisant les processus et activités les plus exposés.

La gestion des risques repose sur la mobilisation d'une organisation et de ressources adaptées, permettant d'anticiper, de prévenir et de réagir efficacement face à une situation de crise. Elle constitue également un appui essentiel à la prise de décision.

Cette démarche se décline généralement en trois étapes principales :

- **Anticipation :** consiste à mettre en place des dispositifs et des mesures permettant de prévoir l'occurrence d'événements imprévus, d'en analyser les conséquences potentielles et d'améliorer les capacités de réponse face à une crise.
- **Protection et prévention :** vise à réduire l'impact potentiel d'un risque à travers des actions de protection adaptées, tout en limitant la probabilité que ce risque dépasse le seuil d'acceptabilité fixé par les autorités compétentes.
- **Communication :** implique la diffusion et le partage d'informations pertinentes auprès de l'ensemble des parties prenantes, allant du citoyen aux autorités, afin de garantir une gestion coordonnée et efficace des risques

IV.3.1 Carte des profondeurs :

Lors d'un épisode d'inondation, la submersion se caractérise essentiellement par son étendue et sa profondeur. Son évaluation requiert l'utilisation de modèles hydrauliques ou de techniques de modélisation numérique permettant de représenter avec précision les topographies des lits mineurs et majeurs des cours d'eau (Graguid, 2011).En règle générale, on distingue trois niveaux de submersion en fonction de la profondeur de l'eau :

- **Submersion légère :** lorsque la profondeur est inférieure à 0,5 mètre ;
- **Submersion modérée :** lorsque la profondeur est comprise entre 0,5 et 1 mètre ;
- **Submersion importante :** lorsque la profondeur est supérieure à 1 mètre (Graguid, 2011).



Figure IV.19: Carte de profondeur d'eau pour la période de retour 100 ans.

➢ D'après la carte des profondeurs d'eau générée par le logiciel RAS Mapper, il ressort que la hauteur de l'eau varie entre 0.57 mètre et 3.18 mètres selon les sections de l'oued.

L'ensemble des zones situées à proximité de l'oued Errihane présentent un risque de submersion relativement homogène. Toutefois, dans le secteur médian, en aval du cours d'eau où se trouve la route secondaire ainsi qu'au niveau de la route principale, ce risque apparaît légèrement plus prononcé, bien que l'écart par rapport aux autres secteurs demeure peu significatif, à l'exception du secteur médian.

La concentration des zones exposées aux risques de submersion à proximité de l'oued met en évidence la nécessité d'une planification urbaine résiliente, accompagnée de stratégies d'adaptation efficaces, afin de réduire les impacts potentiels des inondations. Une telle démarche constitue un levier essentiel pour l'élaboration de politiques publiques visant à protéger les communautés riveraines et à promouvoir un développement durable et sécurisé dans la région.

IV.3.2 Carte des vitesses :

Les vitesses d'écoulement de l'eau peuvent être classées en trois catégories :

- Vitesse faible : inférieure à 0,20 m/s ;
- Vitesse modérée : comprise entre 0,20 m/s et 0,50 m/s ;
- Vitesse forte : supérieure à 0,50 m/s.



Figure IV.20 : Carte des vitesses d'écoulement pour une crue de période de retour centennale (T = 100 ans)

➢ La carte des vitesses d'écoulement constitue un outil essentiel pour comprendre les dynamiques hydrauliques du cours d'eau principal de la région. Les zones caractérisées par des vitesses élevées, sont principalement localisées le long des cours d'eau (représentées en orange et rouge), correspondent à la topographie du lit de la rivière. Cet écoulement rapide est associé à des pentes relativement fortes et à un lit resserré, des conditions morphologiques qui favorisent l'accélération de l'écoulement. Cela met clairement en évidence la relation directe entre la topographie du terrain et le régime d'écoulement.

À l'inverse, les zones figurant en vert et en jaune traduisent des vitesses plus faibles, généralement liées à des tronçons à faible pente et à un élargissement du lit majeur. Ces conditions hydrauliques plus calmes jouent un rôle essentiel dans la gestion des risques : elles réduisent à la fois le potentiel érosif et la probabilité d'inondations en aval.

IV.3.3 Classes d'aléa :

L'évaluation de l'aléa inondation repose sur la combinaison de deux paramètres essentiels :

- **La profondeur de submersion (h)**, qui traduit l'importance de l'inondation ;
- **La vitesse d'écoulement (v)**, qui renseigne sur la dynamique et le potentiel destructeur du flux.

En croisant ces deux paramètres, il est possible de définir quatre classes de danger, chacune associée à une couleur représentative (Graguid, 2011 ; méthodologie couramment adoptée dans les études hydrauliques).

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

Classe	**Critères (Profondeur h / vitesse v)**	**Niveau de danger**	**Code couleur**
Zone de danger faible	h < 0,5 m **et** v < 0,2 m/s	Faible impact	Vert
Zone de danger moyen	0,5 m ≤ h ≤ 1.0 m **où** 0,2 ≤ v ≤ 0,5 m/s	Danger modéré	Jaune
Zone de danger fort	1.0 m< H< 2.0 m **où** 0,5 ≤ v ≤ 1.0 m/s	Fort danger	Orange
Zone de danger très fort	h > 2 m **et** v > 1 m/s	Danger extrême	Rouge

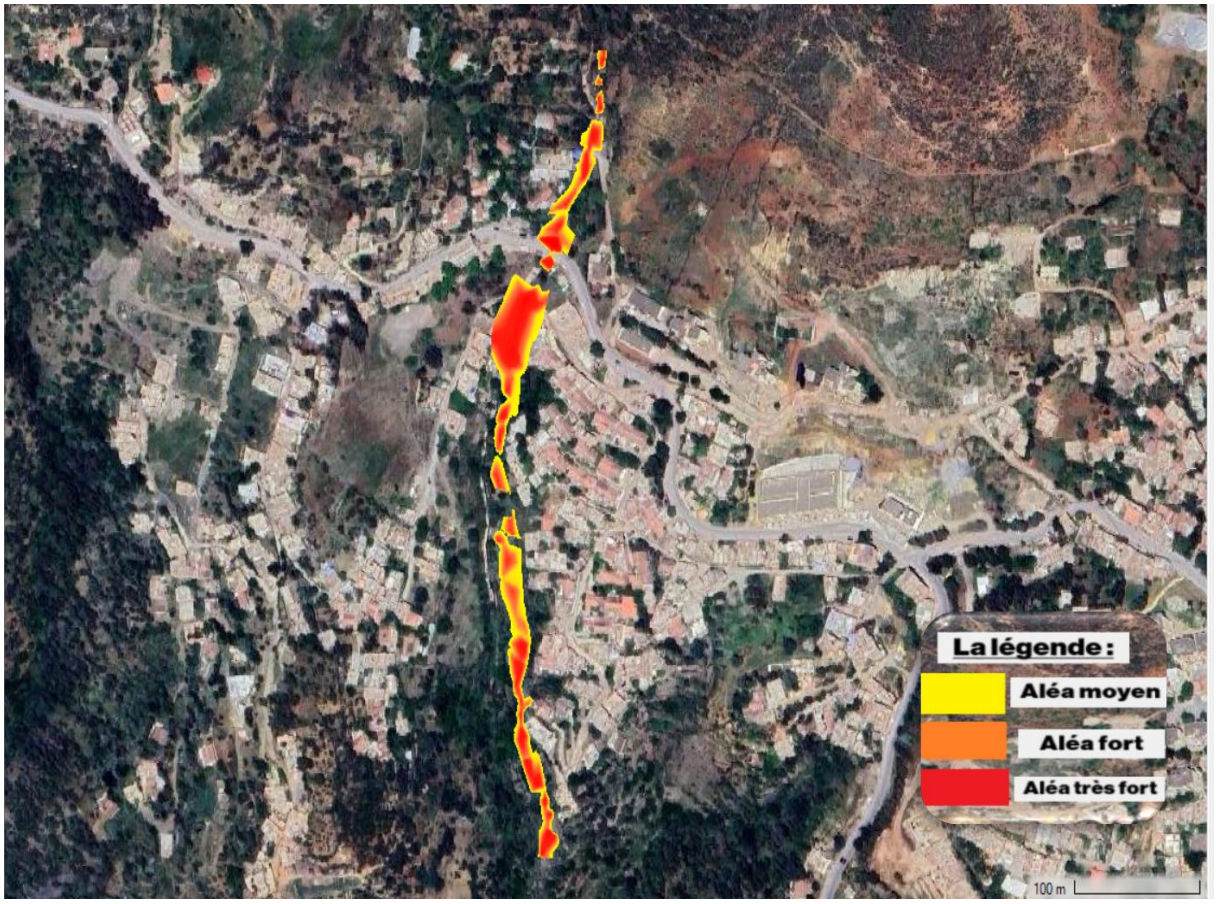


Figure IV.21 : Carte de l'aléa pour la crue centennale.

- Les zones à risque élevé se situent principalement le long des cours d'eau, avec une intensification marquée dans le secteur médian, en aval (au niveau de la route secondaire) ainsi qu'à proximité de la route principale. Cette observation confirme les résultats obtenus à partir de la carte des profondeurs d'eau. Ces zones à haut risque s'expliquent par la combinaison de profondeurs importantes (souvent supérieures à 2 m) et de vitesses d'écoulement élevées (> 0,5 m/s), conformément à la classification proposée par le DDT (2012), ainsi que par la présence de pentes plus prononcées, ce qui accroît la probabilité d'inondations lors des crues majeures. De telles zones sensibles requièrent une attention particulière en matière de prévention et de gestion du risque d'inondation.

Conclusion :

Cette étude détaillée sur la prévention des inondations dans la zone d'étude a permis d'aboutir à des résultats significatifs, fondés sur les simulations hydrauliques réalisées sur les différents cours d'eau.

En intégrant les cartes d'aléas, l'analyse des sections en travers des affluents, les tirants d'eau, le nombre de Froude ainsi que les vitesses d'écoulement, ces simulations ont permis d'identifier avec précision les points sensibles :

- L'urbanisation située sur la rive droite de l'oued Errihane en aval, ainsi que sur la rive gauche en amont, de même qu'au niveau de la route principale et surtout dans le secteur médian où se concentre la majorité des habitations, présente un risque élevé d'inondation lié au débordement du cours d'eau.

Cette cartographie précise des zones sensibles offre une base solide pour la mise en place de mesures de prévention adaptées et ciblées. Les résultats obtenus constituent ainsi une transition vers le chapitre suivant, consacré à l'analyse détaillée de différentes variantes du projet.

L'objectif sera d'explorer des solutions à la fois innovantes et durables, visant à renforcer la protection contre les inondations tout en tenant compte des spécificités propres aux points critiques identifiés.

Chapitre V :

Études des variantes D'Aménagement.

Introduction :

Ce chapitre est consacré à garantir une protection efficace contre les inondations pour la ville située le long de l'Oued Errihane. Cette protection repose sur le choix des solutions d'aménagement les plus adaptées, en s'appuyant sur les résultats obtenus dans les chapitres précédents et en tenant compte des caractéristiques naturelles de la zone d'étude.

Les différentes alternatives proposées viseront à assurer la sécurité de l'ensemble de la ville face aux crues de l'Oued Errihane. Cela passera par l'évacuation des eaux de crue vers l'exutoire, tout en respectant les contraintes liées au débit, à la stabilité des berges et en intégrant l'évaluation de l'impact environnemental des aménagements. Le processus de sélection des options suivra ainsi plusieurs étapes méthodiques et complémentaires.

V.1 Présentation des grandes orientations :

L'étude des variantes d'aménagement repose sur un ensemble de grandes orientations visant à réduire le risque d'inondation et ses impacts sur les zones urbanisées. Ces orientations prennent en compte la protection contre l'érosion ainsi que la maîtrise des crues, deux phénomènes étroitement liés à la dynamique fluviale de l'Oued Agrioune et de ses affluents.

V.1.1 La protection contre l'érosion :

L'érosion constitue un facteur aggravant des inondations puisqu'elle fragilise les berges, modifie : lit du cours d'eau et accroît l'instabilité hydraulique. Elle se manifeste à deux niveaux: l'érosion des berges et l'érosion du lit.

V.1.1.1 L'érosion des berges :

- L'érosion des berges est le détachement progressif des particules de sol sous l'action du courant. Elle se produit lorsque la vitesse et la turbulence du flux dépassent la résistance mécanique des matériaux constituant la berge. L'attaque est particulièrement marquée lorsque l'écoulement frappe la berge avec un angle oblique.
- Les principaux mécanismes sont :
    - **L'éboulement :** rupture brutale d'un volume cohérent de berge en surplomb, souvent liée à un affouillement en pied de berge.
    - **L'affouillement :** érosion localisée à la base d'une berge ou au pied d'un ouvrage, pouvant fragiliser la structure et entraîner des effondrements.

- Les solutions de protection se regroupent en deux catégories :
    - **Protections linéaires (revêtements) :** mise en place de matériaux résistants (enrochements, gabions, géotextiles, béton) destinés à renforcer les berges et à réduire l'érosion.

- **Protections par épis :** ouvrages transversaux implantés dans le lit, qui dévient les courants les plus rapides vers le centre, réduisant ainsi la contrainte exercée sur les berges.

V.1.1.2 L'érosion du lit :

L'érosion du lit du cours d'eau peut avoir plusieurs origines :

- Causes naturelles : ajustement de la pente et du profil du lit en fonction des régimes hydrologiques et du transport solide.
- Causes anthropiques : extractions de matériaux (sables, graviers), provoquant une érosion régressive en amont et progressive en aval.
- Aménagements hydrauliques : digues et remblais qui réduisent la zone inondable et modifient les conditions d'écoulement.

La stabilisation du lit peut être obtenue par la mise en place de seuils de correction, la limitation des extractions et la gestion raisonnée des zones d'expansion de crue.

V.1.2 La protection contre les crues :

La maîtrise des crues est un enjeu majeur de prévention des inondations. Les mesures possibles se classent en deux grandes catégories : la protection directe (rapprochée) et la protection indirecte (éloignée).

V.1.2.1 Protection directe (rapprochée) :

Elle consiste à agir directement sur les zones menacées ou à proximité immédiate du lit du cours d'eau :

- **Curage et débroussaillage :** élimination des dépôts et végétaux obstruant le lit, afin de faciliter l'écoulement et augmenter la capacité hydraulique.
- **Recalibrage du lit :** élargissement et approfondissement des sections pour accroître leur capacité d'évacuation.
- **Réalisation de canaux artificiels :** création de nouveaux chenaux lorsque le lit naturel a été fortement réduit par l'urbanisation.
- **Protection des berges :** consolidation par ouvrages adaptés pour limiter l'instabilité due aux crues.
- **Endiguement :** construction de digues le long des berges pour contenir les crues. Cette méthode permet une protection progressive et sélective, mais peut aussi provoquer une élévation du niveau d'eau et compliquer le drainage des zones basses.

V.1.2.2 Protection indirecte (éloignée) :

Elle consiste à agir en amont ou à distance des zones vulnérables pour réduire l'intensité des crues avant leur arrivée :

- **Création de canaux de dérivation :** transfert d'une partie du débit vers d'autres oueds ou zones moins exposées.
- **Construction de barrages ou seuils de retenue :** stockage et laminage des crues afin de diminuer l'onde de crue en aval.
- **Aménagement des bassins versants :** mise en œuvre de techniques biologiques (reboisement, revégétalisation) ou d'ouvrages légers (seuils en gabions, banquettes) permettant de ralentir les écoulements et de limiter l'érosion.

V.2 Description des variantes proposées :

Afin de protéger la ville Miliana et ses zones vulnérables contre les inondations de l'Oued Errihane, plusieurs options d'aménagement ont été étudiées. Ces variantes visent à améliorer la capacité d'évacuation du cours d'eau, stabiliser les berges et réduire les risques d'érosion et d'affouillement.

- Les solutions envisagées se déclinent en quatre principales propositions :

1. La réalisation d'un canal en béton armé de forme trapézoïdale ;
2. La conception d'un canal en gabions ;
3. La réalisation d'un canal en enrochements ;
4. Le réajustement des ouvrages de franchissement.

Pour chacune de ces variantes, un calcul hydraulique est effectué à l'aide du logiciel HEC-RAS, après dimensionnement préliminaire avec FLOW-MASTER, afin d'évaluer leur performance hydraulique.

Par ailleurs, l'analyse inclut une approche technique et économique permettant d'identifier la solution la plus adaptée. En complément, des mesures organisationnelles et techniques sont proposées, telles que :

- La planification des interventions de sécurité civile en cas d'inondation ;
- L'alerte à la population et la mise en place de scénarios de gestion de crise ;
- Le contrôle de la phase d'immersion des digues afin de prévenir la formation de vagues dangereuses.

V.2.1 Canal en béton armé :

La première solution consiste à réaliser un canal en béton armé trapézoïdal. Ce type d'ouvrage offre :

- Une grande durabilité,

- Une forte résistance aux vitesses d'écoulement,
- Une adaptation aux environnements urbains où l'espace est limité,
- Une meilleure régularité hydraulique.

La pente du talus est adoptée avec un coefficient m = 1 (soit un angle de 45°), ce qui simplifie la mise en œuvre et assure une stabilité suffisante des parois.

❖ **Avantages :**

- Excellente protection contre l'érosion et l'affouillement.
- Longue durée de vie et faible besoin d'entretien.
- Optimisation de la capacité d'évacuation des crues.

❖ **Inconvénients :**

- Coût de construction élevé.
- Impact paysager et environnemental important (aspect artificiel, suppression de l'habitat naturel).

V.2.2 Canal en gabions :

Cette variante consiste à construire un canal à l'aide de gabions métalliques remplis de pierres. Les casiers sont disposés de façon à former une structure en gradins, ce qui améliore la stabilité et favorise le drainage.

❖ **Avantages :**

- Flexibilité structurelle permettant l'adaptation aux mouvements du sol.
- Mise en œuvre relativement simple et rapide.
- Possibilité de surélévation ou d'extension ultérieure.
- Bon comportement hydraulique grâce à la rugosité des surfaces, qui réduit l'énergie de l'écoulement.
- Intégration paysagère satisfaisante.

❖ **Inconvénients :**

- Durabilité limitée par la corrosion du treillis métallique.
- Entretien nécessaire pour maintenir l'efficacité (remplacement de pierres ou des mailles endommagées).
- Moins performant face aux crues de grande ampleur par rapport au béton.

V.2.3 Canal en enrochements :

L'enrochement consiste à aménager les berges à l'aide de blocs rocheux de grande taille. Ce type de canal combine robustesse et intégration paysagère.

❖ **Avantages :**

- Bonne résistance aux vitesses d'écoulement modérées à élevées.
- Faible entretien et grande durabilité.
- Intégration visuelle et écologique plus harmonieuse que le béton.
- Favorise parfois le développement de micro-habitats aquatiques.

❖ **Inconvénients :**

- Coût élevé si les matériaux doivent être transportés sur de longues distances.
- Risque de déchaussement des blocs lors de crues exceptionnelles.
- Nécessite une mise en place rigoureuse pour garantir la stabilité.

V.2.4 ouvrages de franchissement :

❖ La présence d'une route à proximité d'un cours d'eau peut engendrer une double problématique :

- D'une part, la route peut constituer un obstacle au libre écoulement des eaux, provoquant une élévation des niveaux et un risque d'inondation en amont ;
- D'autre part, l'écoulement naturel peut causer des dégradations importantes à l'infrastructure routière.

❖ Afin de réduire ces impacts, les ouvrages hydrauliques de rétablissement des écoulements naturels doivent être soigneusement dimensionnés. Leur conception vise principalement à :

- Limiter les risques d'inondation, de submersion et de dégradation de la route dans des seuils acceptables ;
- Prévenir la rupture ou la défaillance de l'ouvrage routier.

❖ On distingue généralement deux grandes catégories d'ouvrages de franchissement :

- Les buses (de forme circulaire ou ovale) ;

  Les dalots (section rectangulaire ou carré). *(El Harti & Ait Ichou, 2017)*

V.3 Critères d'évaluation des variantes d'aménagement :

Le choix de la variante la plus appropriée repose sur une analyse multicritère. Chaque option proposée est évaluée en fonction des paramètres suivants :

- **Efficacité hydraulique :** mesure la capacité de l'aménagement à améliorer l'écoulement et à réduire le risque d'inondation.
- Complexité de réalisation : apprécie les contraintes techniques et logistiques liées à la mise en œuvre de l'ouvrage.
- **Impacts environnementaux :** prend en considération l'intégration de l'aménagement dans son milieu (zones urbaines, agricoles, naturelles), ainsi que ses effets positifs ou négatifs sur l'environnement.
- **Durabilité :** correspond à la résistance de l'ouvrage dans le temps face aux sollicitations hydrauliques et climatiques.
- **Facilité d'entretien :** concerne la fréquence et le coût des interventions nécessaires pour maintenir l'ouvrage en bon état de fonctionnement.
- **Coût global :** intègre l'investissement initial (travaux de construction) ainsi que les dépenses associées à l'exploitation et à l'entretien.

V.4 Calcul hydraulique des canaux :

La formule adoptée pour le dimensionnement hydraulique est celle de Manning-Strickler, applicable à différentes formes de sections ouvertes. Elle permet de déterminer le débit d'écoulement à travers un canal en prenant en compte les caractéristiques géométriques et les conditions d'écoulement. Elle s'exprime comme suit :

$$Q = \frac{1}{n} S_m R_h^{2/3} \sqrt{I} \qquad \textbf{V.1}$$

Avec :

Q : débit d'écoulement (m3/s)

n : coefficient de rugosité de Manning

S_m : section mouillée (m2)

I : pente du fond du canal (m/m)

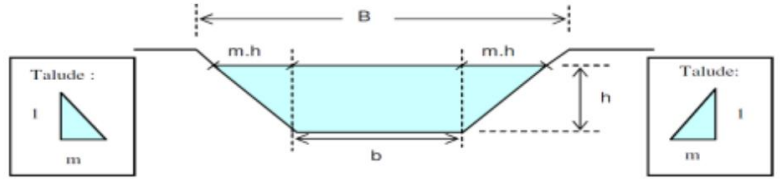
R_h : rayon hydraulique (m), défini par la relation :

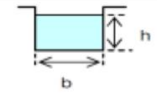
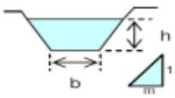
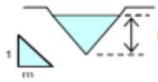
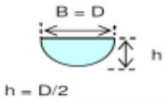
$$R_h = \frac{S_m}{p_m} \qquad \textbf{V.2}$$

Où P_m représente le périmètre mouillé.

Cette équation est utilisée pour le dimensionnement de canaux de différentes géométries. Les éléments géométriques tels que la section mouillée, le périmètre mouillé et le rayon hydraulique varient selon la forme du canal (trapézoïdal, rectangulaire, triangulaire, etc.).

La figure suivante présente les formules nécessaires au calcul de ces paramètres pour cinq types de sections standards utilisées en hydraulique :



Forma da seção	Área (A) (m^2)	Perímetro molhado (P) (m)	Raio hidráulico (R) (m)	Largura do Topo (B) (m)
	$b.h$	$b+2.h$	$\left(\frac{A}{P}\right)=\frac{b.h}{b+2.h}$	b
	$(b+m.h).h$	$b+2.h.\sqrt{1+m^2}$	$\frac{A}{P}$	$b+2.m.h$
	$m.h^2$	$2.h.\sqrt{1+m^2}$	$\frac{A}{P}$	$2.m.h$
	$\frac{1}{8}.(\theta-\operatorname{sen}\theta).D^2$ $\theta = RAD$	$\frac{\theta.D}{2}$	$\frac{1}{4}.\left(1-\frac{\operatorname{sen}\theta}{\theta}\right).D$	$\left(\operatorname{sen}\frac{\theta}{2}\right).D$
	$\frac{\pi.D^2}{8}$	$\frac{\pi.D}{2}$	$\frac{D}{4}=\frac{h}{2}$	$D=2.h$

Obs.: $\theta = 2.\arccos\left(1-2.\frac{h}{D}\right)$, onde θ deve ser calculado em **radianos.**

Figure V.1: Eléments géométriques pour des sections ouvertes diverses.

V.4.1 Choix des paramètres de dimensionnement :

- **Pente du projet :**

La détermination de la pente longitudinale constitue une étape essentielle préalablement à tout calcul hydraulique. En effet, une pente inappropriée peut engendrer des écoulements instables ou peu performants. Dans le cadre de la présente étude, une pente uniforme a été retenue pour chaque tronçon du canal, afin d'assurer la régularité de l'écoulement et de faciliter le dimensionnement.

- **Coefficient de rugosité :**

Le coefficient de rugosité de Manning (n) exprime la résistance à l'écoulement induite par la nature du revêtement du canal. Sa valeur dépend principalement du matériau constituant les parois. Ainsi, un canal en béton présente généralement une rugosité plus faible qu'un canal en terre ou en gabions. Le tableau ci-dessous présente quelques valeurs de référence issues de la littérature.

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

Revêtement du canal n (Manning)	Revêtement du canal n (Manning)
Béton 0.013	Béton 0.013
Terre 0.022	Terre 0.022
Pierre 0.025	Pierre 0.025
Gabion 0.035	Gabion 0.035

- **Marge de sécurité dans les canaux (Revanche) :**

Dans un canal à surface libre, certains aléas tels que les dépôts solides, la croissance de végétation ou encore l'action du vent peuvent provoquer une élévation imprévue de la ligne d'eau. Afin de prévenir tout risque de débordement, il est recommandé de prévoir une *revanche* (marge de sécurité verticale) entre le niveau d'eau calculé et la crête du canal. D'après Lencastre (2008), cette valeur varie généralement de 0,30 m pour les petits canaux à 1,20 m pour les grands ouvrages.

Tableau V.2 : Des recommandations plus précises, en fonction du débit.

Débit Q (m3/s)	< 0.75	0.75 – 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
Revanche (m)	0.45	0.60	0.75	0.90

- **Vitesse d'érosion :**

Afin de prévenir les dégradations du lit et des berges des canaux dues à l'action dynamique du courant, il est nécessaire de maintenir la vitesse d'écoulement en deçà de la vitesse moyenne limite d'érosion. Cette vitesse critique varie selon la nature du revêtement du canal et ses valeurs de référence sont présentées dans le tableau ci-dessous (Degoutte, 2012).

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

Type de revêtement	Vitesse limite (m/s)
Pavage en pierre (1 couche)	2.5 – 4.0
Gabions	4.0 – 6.0
Béton	6.0 – 10.0
Béton améliore	> 10.0

V.4 Aménagement proposé pour oued Errihane ;

V.4.1 Première variante : Canal en gabion :

- **Dimensionnement :**

Pour le dimensionnement de ce canal, on considère une largeur b un coefficient de Manning n=0.035 ainsi qu'une pente longitudinale I. Sur cette base, le calcul permet de déterminer le nombre de gabions nécessaires, noté K, afin d'assurer l'évacuation du débit de crue centennal.

Le tableau V.4 récapitule les résultats des calculs :

Tableau V.4 : Résultats des calculs du nombre de caisses pour le canal en gabions.

Pour I=0.0398				
k(caisses)	Q	S	P	R
5	292.933	35	19	1.842
4	200.155	26	16	1.625
3	124.542	18	13	1.385
2	65.285	11	10	1.100
1	22.252	5	7	0.714
0	0.000	0	4	0.000

Pour I=0.068				
k(caisses)	Q	S	P	R
5	365.088	35	19	1.842
4	243.507	26	16	1.625
3	153.495	18	13	1.385
2	80.034	11	10	1.100
1	24.961	5	7	0.714
0	0.000	0	4	0.000

D'après les calculs réalisés, un canal composé de 2 caissons est en mesure d'assurer l'écoulement d'un débit de 25 m3/s.

Les paramètres relatifs à cette variante sont synthétisés dans le tableau ci-après :

Tableau V.5 : Récapitulatif des paramètres de la variante de gabionnage

Tronçons	1	2
Section de départ	597	448
Section d'arriver	448	10
k(caisses)	2	2
Largeur du fond (m)	5	5
Longueur (m)	149	438
Pente du projet (m/m)	0.0398	0.068
Hauteur du canal(m)	3	3
Rugosité(n)	0.035	0.035

❖ **Paramètres d'écoulement :**

Les paramètres d'écoulement sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.6 : Résultats de la simulation d'écoulement dans un canal en gabions du tronçon de l'oued Errihane. (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)	(m2)	(m)	
597	694.00	695.11	695.37	696.11	0.039825	4.44	5.64	6.00	1.46
588	693.64	694.75	695.02	695.76	0.040122	4.45	5.62	6.00	1.47
575	693.13	694.24	694.50	695.24	0.040065	4.44	5.62	6.00	1.47
560	692.57	693.67	693.94	694.68	0.040066	4.44	5.62	6.00	1.47
546	691.99	693.10	693.36	694.10	0.040065	4.44	5.62	6.00	1.47
532	691.40	693.45	692.82	693.77	0.004951	2.18	11.47	6.00	0.50
529	Dalot 01(entré de petit patelin)								
526	691.21	692.22	692.58	693.46	0.054978	4.93	5.07	6.00	1.71
515	690.79	691.89	692.16	692.90	0.040277	4.45	5.61	6.00	1.47
491	689.83	690.93	691.20	691.94	0.040270	4.45	5.61	6.00	1.47
477	689.28	690.38	690.65	691.39	0.040277	4.45	5.61	6.00	1.47
462	688.60	690.65	690.05	691.00	0.004933	2.18	11.48	6.00	0.50
455	Dalot 02(route national)								
448	688.06	688.92	689.43	690.62	0.073790	5.78	4.33	5.00	1.98
443	687.71	688.58	689.09	690.26	0.072145	5.74	4.36	5.00	1.96
426	686.52	687.40	687.89	689.04	0.069647	5.67	4.41	5.00	1.93
358	681.88	682.76	683.25	684.41	0.070184	5.68	4.40	5.00	1.94
322	679.37	680.25	680.74	681.89	0.069999	5.68	4.40	5.00	1.93
293	677.35	678.23	678.72	679.88	0.069999	5.68	4.40	5.00	1.93
240	673.72	674.60	675.09	676.24	0.069929	5.68	4.40	5.00	1.93
213	671.89	672.77	673.27	674.41	0.069717	5.67	4.41	5.00	1.93
175	669.25	670.13	670.62	671.78	0.070354	5.69	4.39	5.00	1.94
132	666.27	667.15	667.64	668.79	0.069823	5.67	4.41	5.00	1.93
85	663.03	663.91	664.40	665.55	0.069823	5.67	4.41	5.00	1.93
43	660.00	660.87	661.37	662.56	0.073383	5.77	4.33	5.00	1.98
10	657.52	658.38	658.89	660.10	0.075097	5.81	4.30	5.00	1.99

– À partir des résultats présentés dans le tableau, il ressort que :

✓ La vitesse d'écoulement atteint V=5.81 une valeur inférieure au seuil de 6 m/s, ce qui demeure admissible pour un canal en gabions.

✓ Selon les valeurs obtenues du nombre de Froude, l'écoulement est torrentiel (Fr >1).

❖ **Profile en long** :

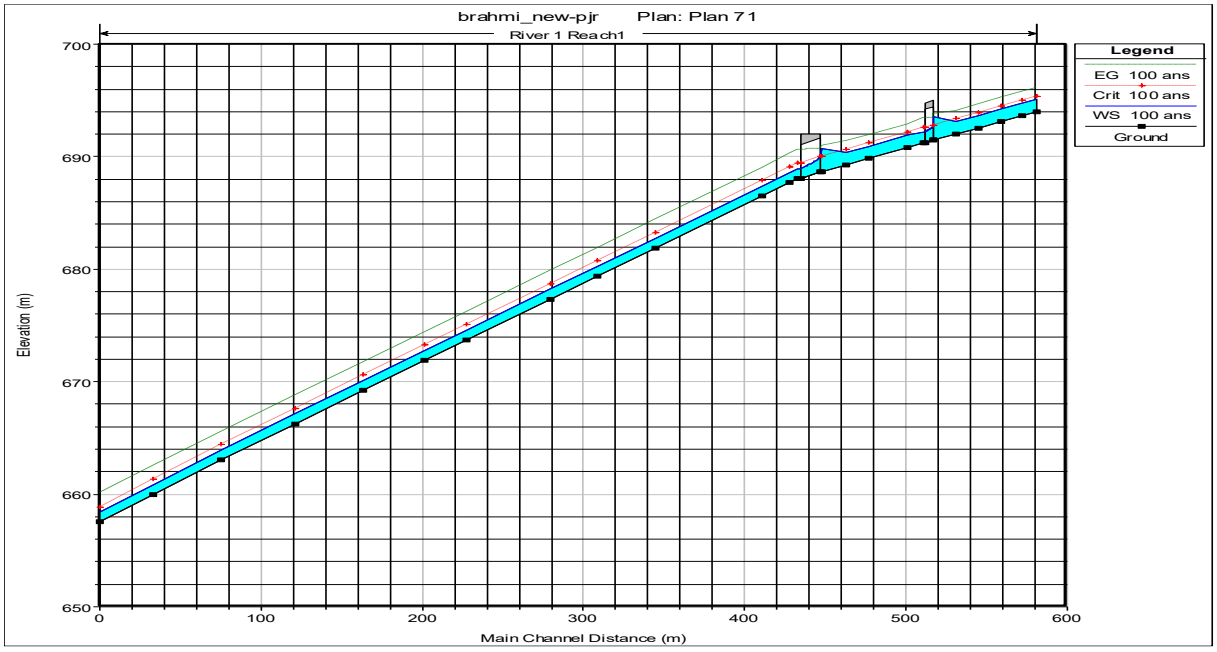


Figure V.2: le profil en long du cours d'eau après aménagement.

❖ **Vue en 3D :**

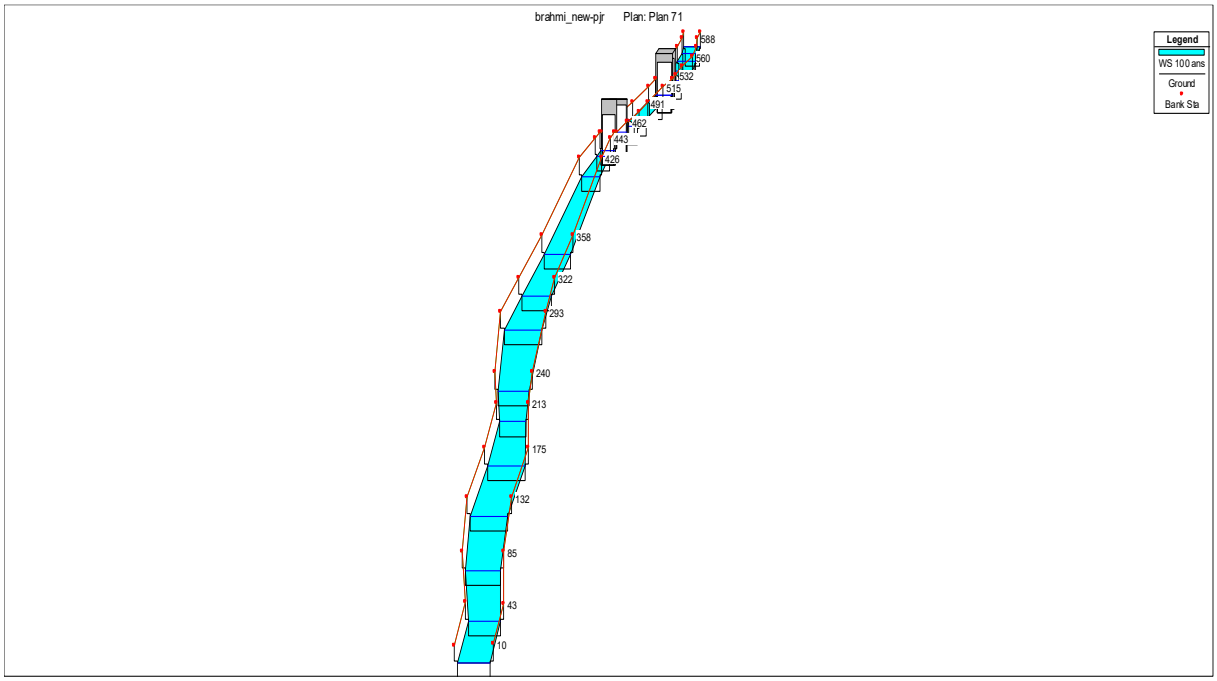
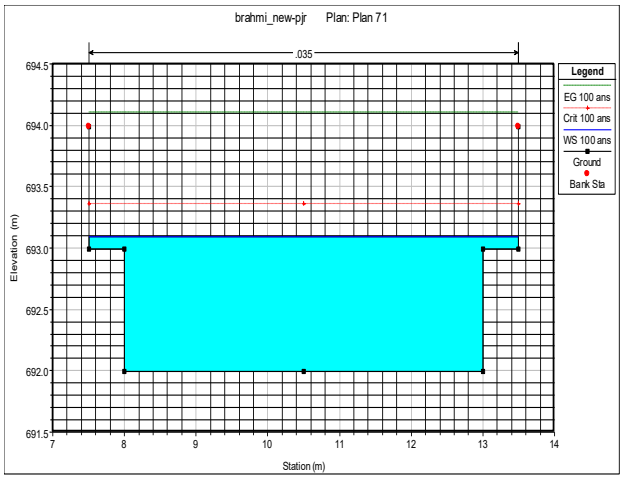
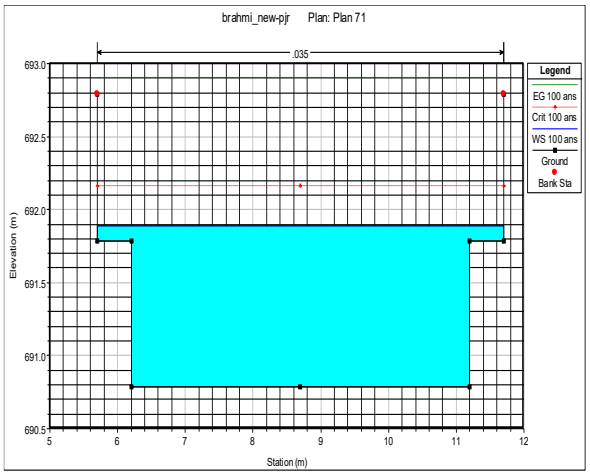


Figure V.3: Vue en plan en 3D de l'oued après l'aménagement.

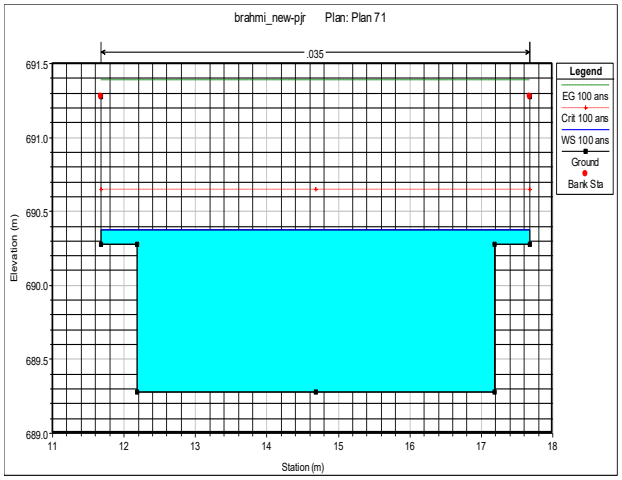
❖ Section en travers :



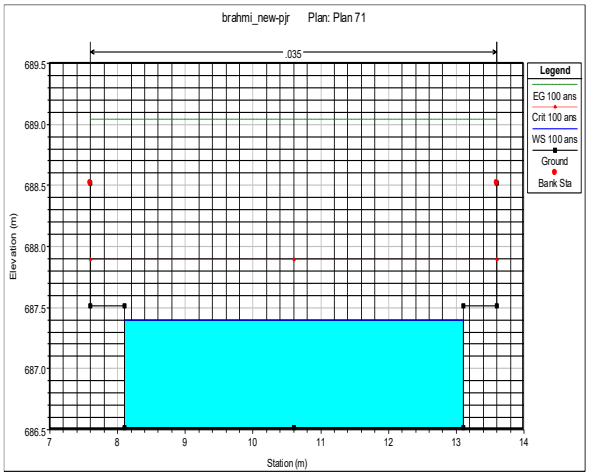
(Section 546)



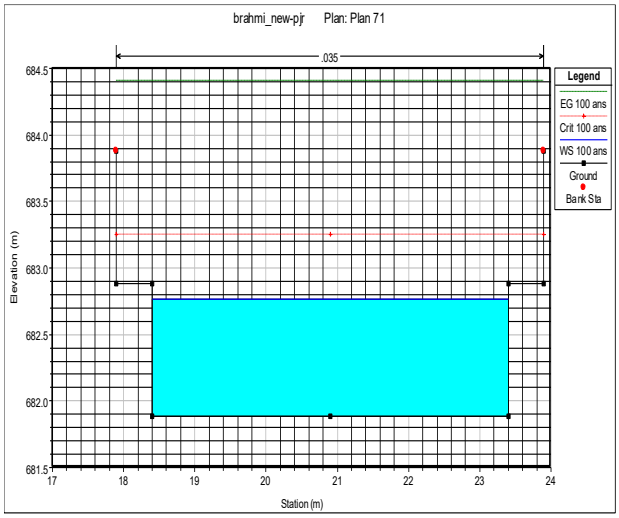
(Section 515)



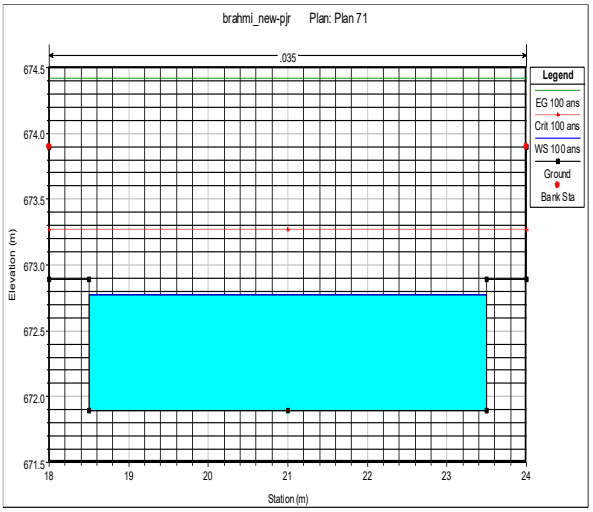
(Section 477)



(Section 426)



(Section 358)



(Section 213)

Figure V.4: Profils en travers d'un canal en gabions pour une crue centennale d'oued Errihane-.

❖ **Ouvrage de franchissement :**

1) Choix d'ouvrage :

Le choix des ouvrages est guidé par plusieurs critères, notamment le débit à évacuer, les charges statiques et dynamiques exercées sur la structure, le coût d'investissement ainsi que la durée de construction.

Tableau V.7 : Avantages et inconvénients des différentes solutions proposées (Source : Élaboration personnelle, adapté de Degoutte, 2012)

Critère	Dalot (cadre en béton armé)	Buses (conduites circulaires)
Capacité hydraulique	Grande capacité, section rectangulaire optimisée pour les forts débits (ex. crue centennale).	Capacité limitée, surtout pour les grands débits.
Adaptabilité	Dimensionnement sur mesure (largeur, hauteur, nombre de cellules).	Limitée aux diamètres standards disponibles.
Entretien et inspection	Accès facile pour curage, désensablement et inspection.	Entretien difficile, accès restreint à cause du diamètre réduit.
Résistance structurelle	Très bonne résistance aux charges (routes, voies ferrées, ouvrages urbains).	Moins résistantes aux charges importantes.
Risque de colmatage	Faible, grâce à une section plus large et régulière.	Plus élevé, risque d'obstruction par embâcles ou dépôts.
Durabilité	Longue durée de vie, faible besoin d'entretien.	Durée de vie plus limitée, entretien fréquent nécessaire.
Coût	Plus élevé (construction, coffrage, béton armé).	Moins coûteux, mise en place plus simple.
Mise en œuvre	Travaux plus lourds et techniques.	Pose rapide et facile.

◆ Étant donné que les débits à évacuer par les ouvrages de franchissement dépassent 25 m^3/s, la solution retenue consiste en l'utilisation de dalots.

2) Dimensionnement des dalots :

Un redimensionnement des ouvrages de franchissement est réalisé afin de garantir leur capacité à assurer l'écoulement de la crue centennale. La vérification de leur capacité hydraulique peut être effectuée à l'aide de logiciel HEC-RAS ou la formule de Delorme.

Pour les dalots : $$Q_{CR} = 1.5 \ L \ H^{\frac{3}{2}}$$ **V.3**

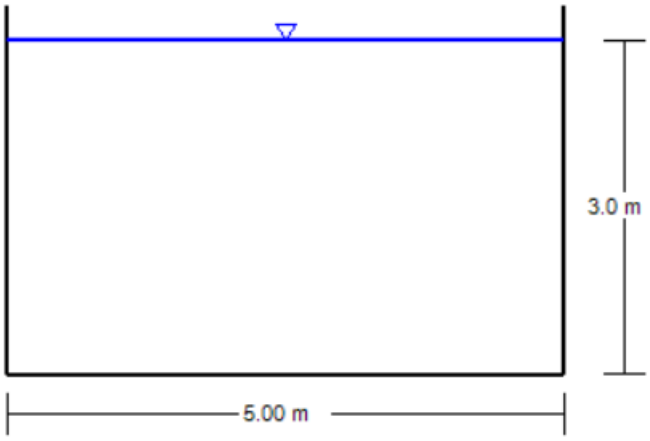


Figure V.5 : Dimensions des deux dalots (01 et 02)

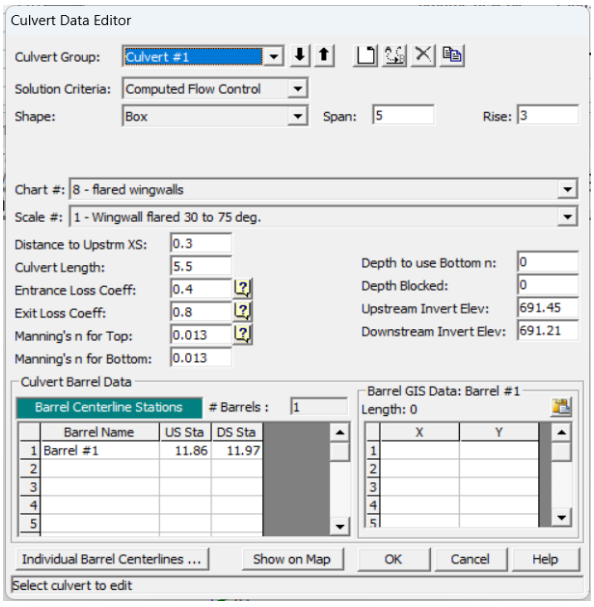


Figure V.6 : Détails du dalot 01

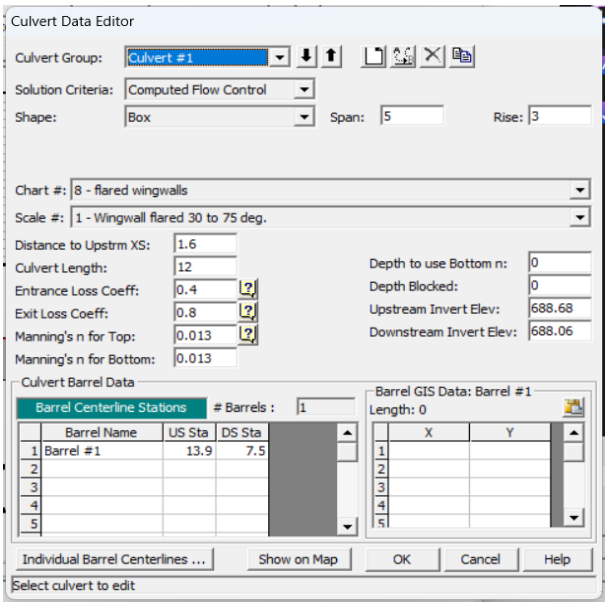


Figure V.7 : Détails du dalot 02

3) Résultats de la simulation de l'ouvrage proposé :

- **Dalot 01 :**

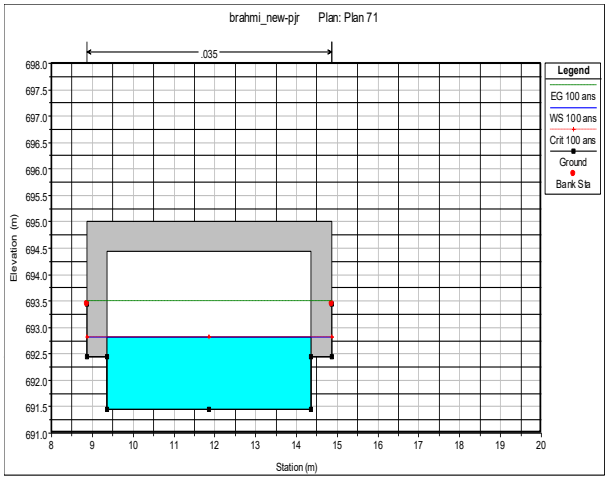


Figure V.8 : Vue en amont du dalot 01

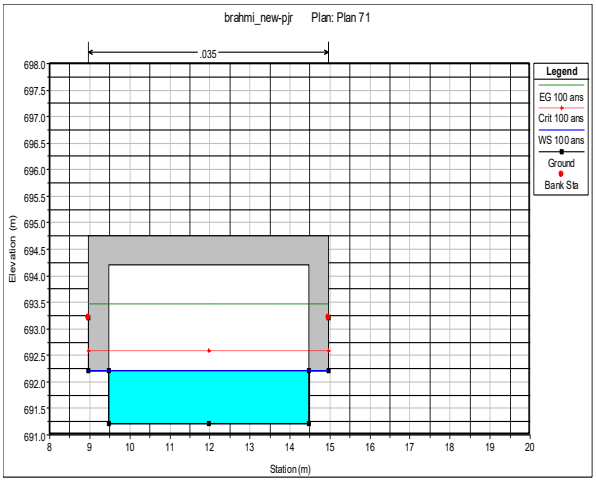


Figure V.9 : Vue en aval du dalot 01

Tableau V.8 : Résultats de la simulation d'écoulement. (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
546	691.99	693.10	693.36	694.10	0.040065	4.44	5.62	6.00	1.47
532	691.45	693.53	692.82	693.77	0.004951	2.18	11.47	6.00	0.50
529	Dalot 01								
526	691.21	692.22	692.58	693.46	0.054978	4.93	5.07	6.00	1.71
515	690.79	691.89	692.16	692.90	0.040277	4.45	5.61	6.00	1.47

- **Dalot 02 :**

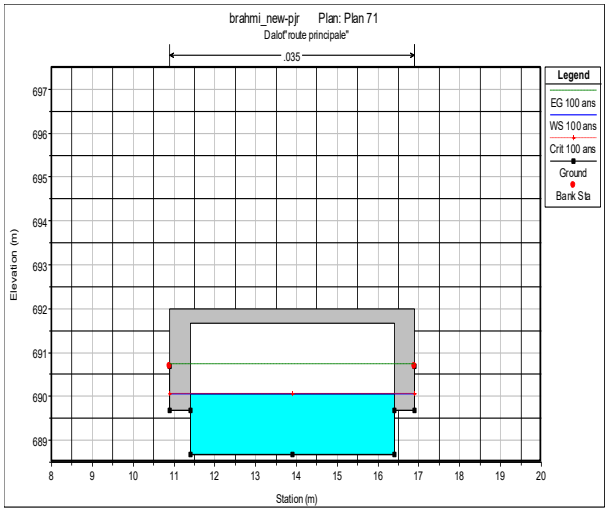


Figure V.10 : Vue en amont du dalot 02.

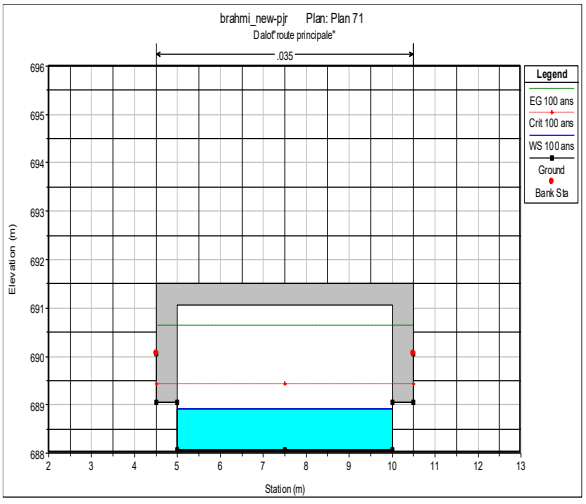


Figure V.11 : Vue en aval du dalot 02.

Tableau V.9 : Résultats de la simulation d'écoulement. (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
477	689.28	690.38	690.65	691.39	0.040277	4.45	5.61	6.00	1.47
462	688.68	690.76	690.05	691.00	0.004933	2.18	11.48	6.00	0.50
455	Dalot 02(route national)								
448	688.06	688.92	689.43	690.62	0.073790	5.78	4.33	5.00	1.98
443	687.71	688.58	689.09	690.26	0.072145	5.74	4.36	5.00	1.96

❖ **Estimation du coût de la variante :**

Le tableau V.10 présente l'estimation du coût de réalisation d'un canal en gabions sur le tronçon de l'oued Errihane.

Tableau V.10: Devis de la variante en canal gabionné d'oued Errihane.

Désignations des travaux	Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement – Déblais	m³	20 060	250	5 015 000
Terrassement – Remblais	m³	853	700	597 100
Géotextile	m^2	6 000	2 500	15 000 000
Gabions	m³	4 200	5 000	21 000 000
Montant Total				**41 612 100 DA**
Montant Total + TVA 19%				**49 518 399 DA**

- À titre d'analyse préliminaire, cette variante se distingue par sa capacité à assurer une protection efficace des berges tout en offrant des performances hydrauliques satisfaisantes. De plus, son coût modéré en fait une solution équilibrée, représentant un compromis pertinent entre efficacité technique, contraintes économiques et intégration environnementale.

V.4.2 Deuxième variante : Canal en enrochement :

- **Dimensionnement :**

Les caractéristiques du canal ont été déterminées à l'aide du logiciel FlowMaster. Les résultats du calcul hydraulique relatifs au canal trapézoïdal sont présentés ci-après :

Tableau V.11: Dimensions de l'aménagement d'oued Errihane (canal en enrochement).

Tronçons	1	2	3
Section de départ	597	546	448
Section d'arriver	546	448	10
Largeur du fond (m)	4	4	4
Longueur (m)	51	98	438
Pente du projet (m/m)	0.04	0.04	0.06
Hauteur du canal(m)	2	3	2
Rugosité(n)	0.035	0.035	0.035

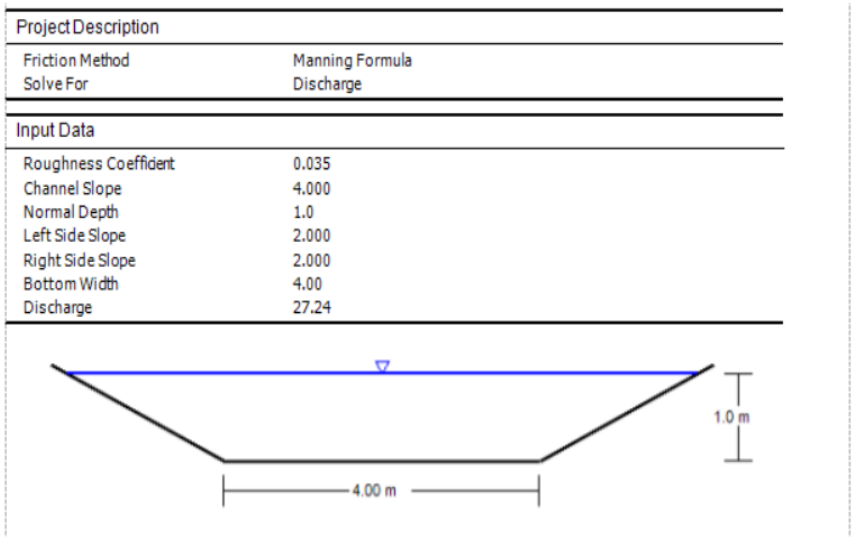


Figure V.12: Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement d'oued Errihane

❖ **Paramètres d'écoulement :**

Les résultats de la simulation sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau V.12 : Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdal en enrochement de l'oued Errihane. (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)	(m2)	(m)	
597	694.00	694.96	695.27	695.96	0.040022	3.95	6.33	7.82	1.40
588	693.64	694.60	694.91	695.60	0.039837	3.94	6.34	7.82	1.39
575	693.13	694.09	694.40	695.09	0.040022	3.95	6.33	7.82	1.40
560	692.57	693.52	693.84	694.52	0.039892	3.94	6.34	7.82	1.39
546	691.99	694.06	693.26	694.18	0.001948	1.48	16.88	12.29	0.40
532	691.45	694.09	692.72	694.14	0.000712	1.02	24.48	14.55	0.25
529	Dalot 01(entré de petit patelin)								
526	691.21	692.48	692.48	692.94	0.013675	3.02	8.29	9.07	1.01
515	690.79	691.78	692.06	692.68	0.034350	3.62	6.9	7.98	1.24
491	689.83	690.77	691.09	691.77	0.040613	3.96	6.31	7.86	1.41
477	689.28	691.20	690.55	691.34	0.002646	1.66	15.09	11.69	0.47
462	688.68	691.24	689.95	691.29	0.000816	1.07	23.28	14.22	0.27
455	Dalot 02(route national)								
448	688.06	689.09	689.32	689.90	0.029906	3.21	7.78	8.13	1.04
443	687.86	688.86	689.13	689.74	0.033264	3.24	7.71	8.01	1.05
426	686.83	687.71	688.10	688.98	0.056134	3.5	7.14	7.49	1.14
358	682.86	683.71	684.13	685.07	0.061828	3.45	7.24	7.40	1.11
322	680.71	681.57	681.98	682.89	0.059241	3.46	7.21	7.44	1.12
293	678.98	679.84	680.25	681.17	0.060062	3.45	7.24	7.42	1.11
240	675.87	676.72	677.13	678.05	0.059926	3.74	6.68	7.42	1.25
213	674.30	675.16	675.57	676.49	0.060060	3.82	6.54	7.42	1.29
175	671.93	672.70	673.09	673.96	0.060129	3.95	6.33	8.08	1.42
132	669.22	670.11	670.50	671.39	0.060849	4.0	6.23	7.89	1.44
85	665.57	666.25	666.72	667.90	0.093138	4.0	6.22	8.04	1.45
43	658.41	658.94	659.56	662.10	0.214969	4.0	6.23	7.37	1.39
10	655.10	655.80	656.26	657.39	0.084912	4.0	6.23	7.80	1.43

– À partir des résultats présentés dans le tableau, il ressort que :

✓ La vitesse d'écoulement atteint V= 4.0 m/s une valeur égale au seuil de 4 m/s, ce qui demeure admissible pour un canal en enrochement.

✓ Selon les valeurs obtenues du nombre de Froude, l'écoulement est torrentiel (Fr >1.0)

.

❖ Profile en long :

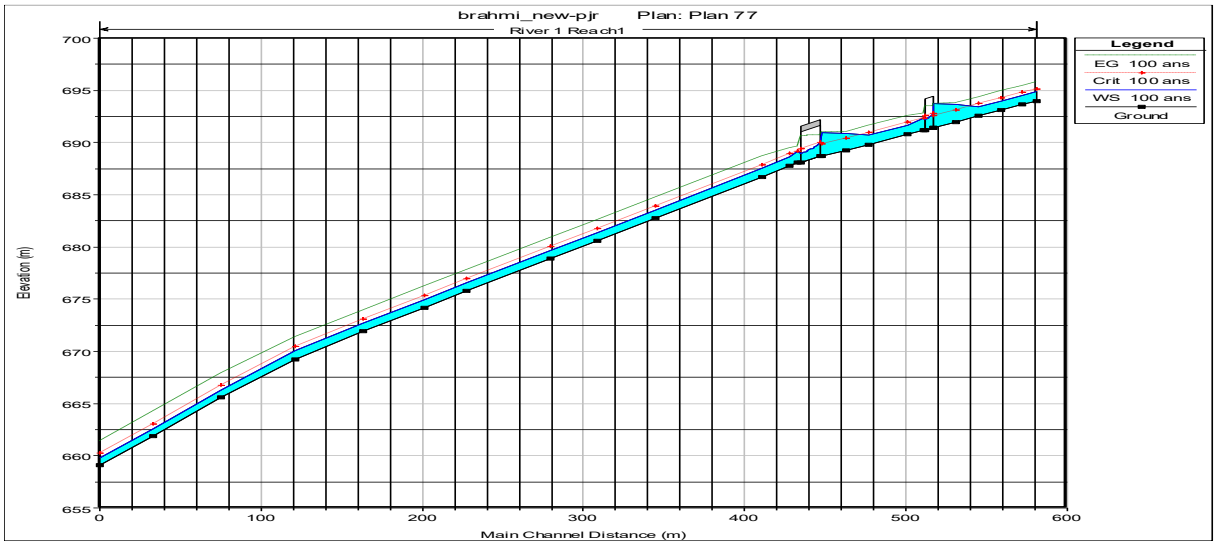


Figure V.13: le profil en long du cours d'eau après aménagement.

❖ Vue en 3D :

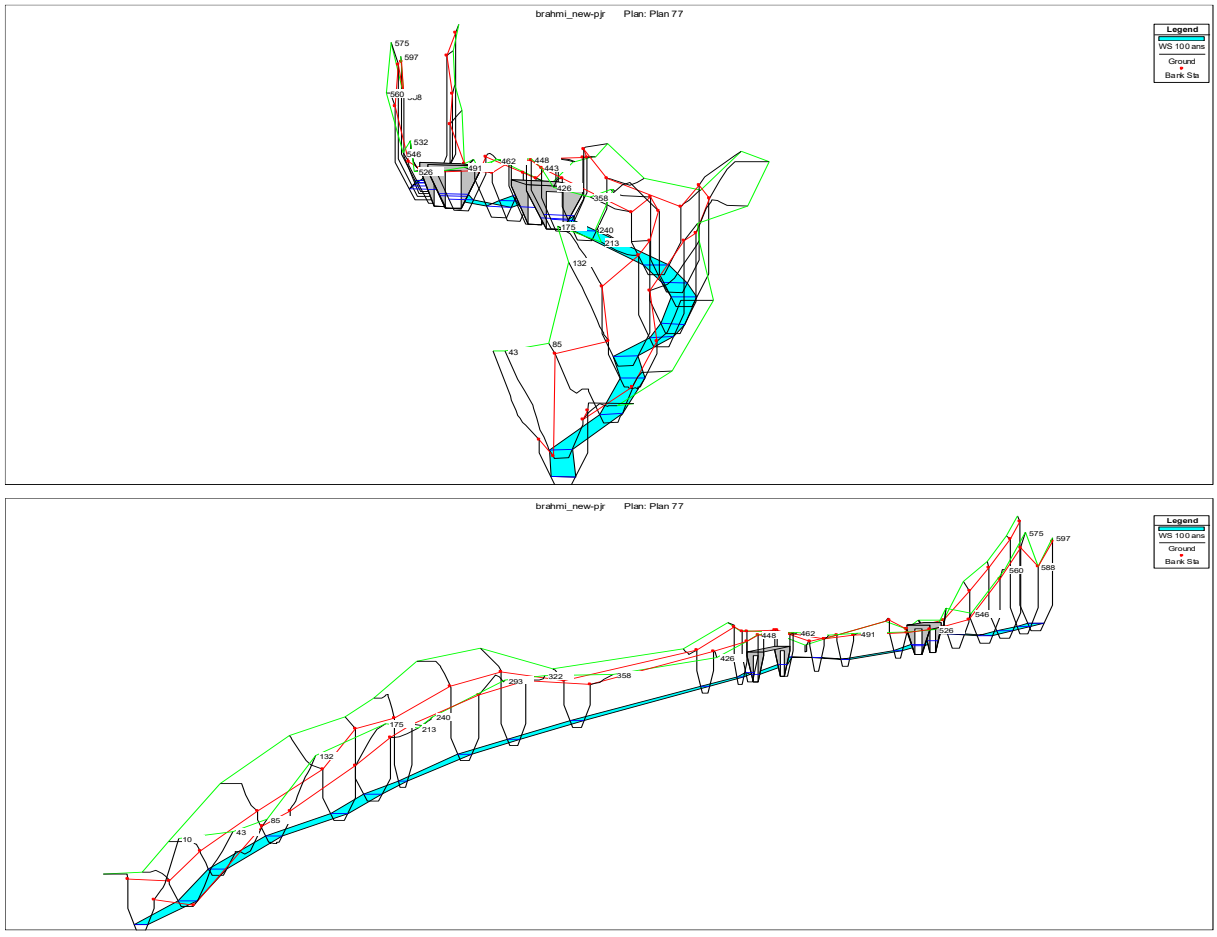
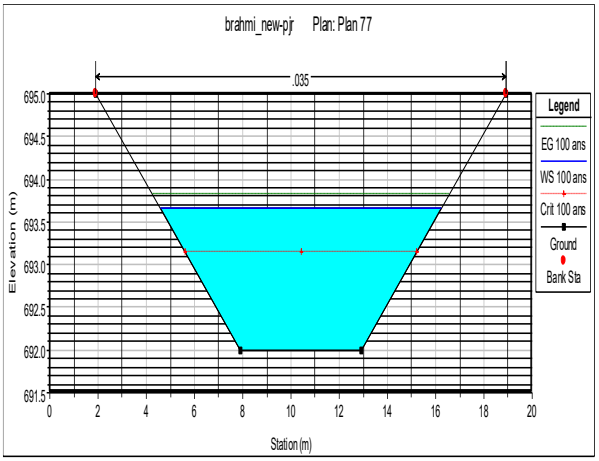
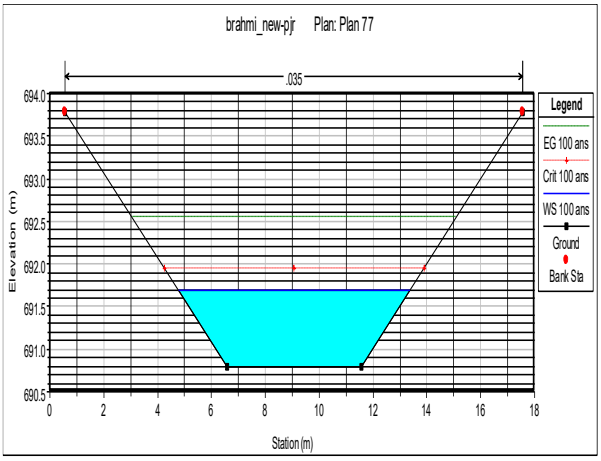


Figure V.14: Vue en plan en 3D de l'oued après l'aménagement.

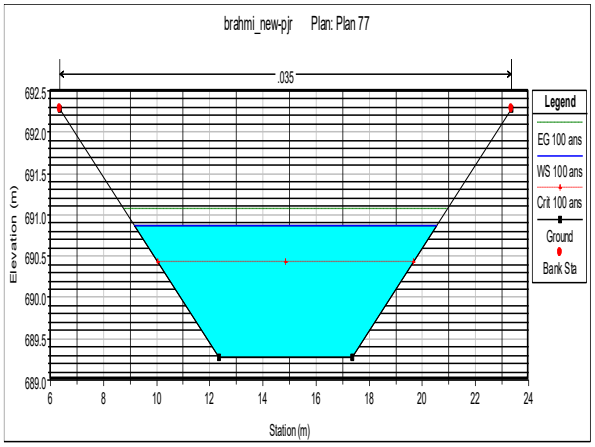
❖ **Section en travers :**



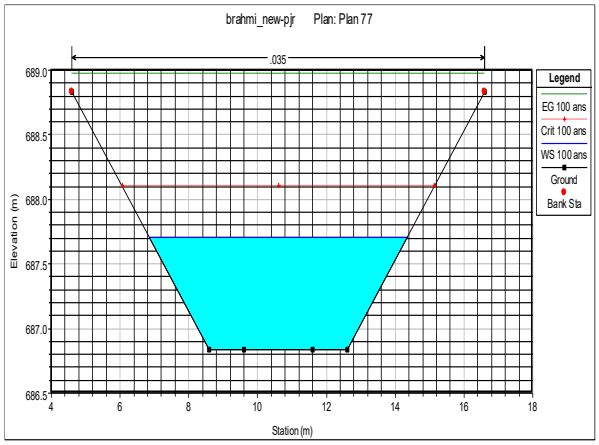
(Section 546)



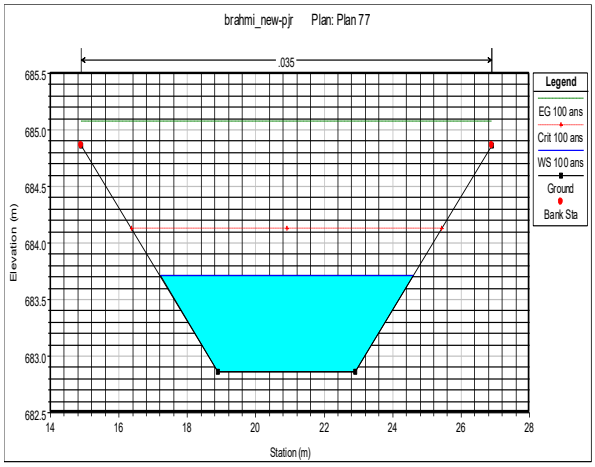
(Section 515)



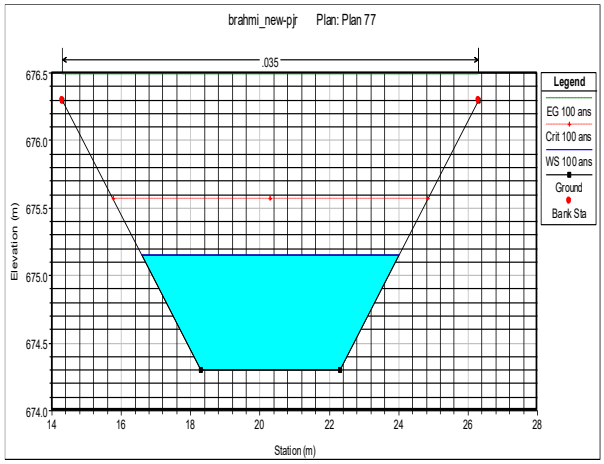
(Section 477)



(Section 426)



(Section 358)



(Section 213)

Figure V.15: Profils en travers d'un canal en enrochement pour une crue centennale d'oued Errihane.

❖ Ouvrage de franchissement :

1) Dimensionnement des dalots :

Les Dimensions des dalots ont été déterminées à l'aide de logiciel HEC-RAS et la formule de Delorme.

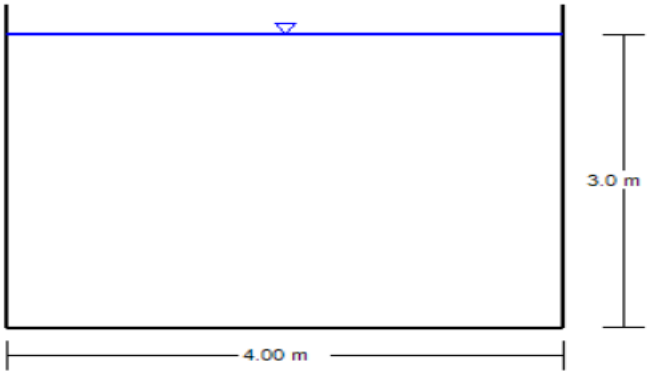


Figure V.16: Dimensions des deux dalots (01 et 02)

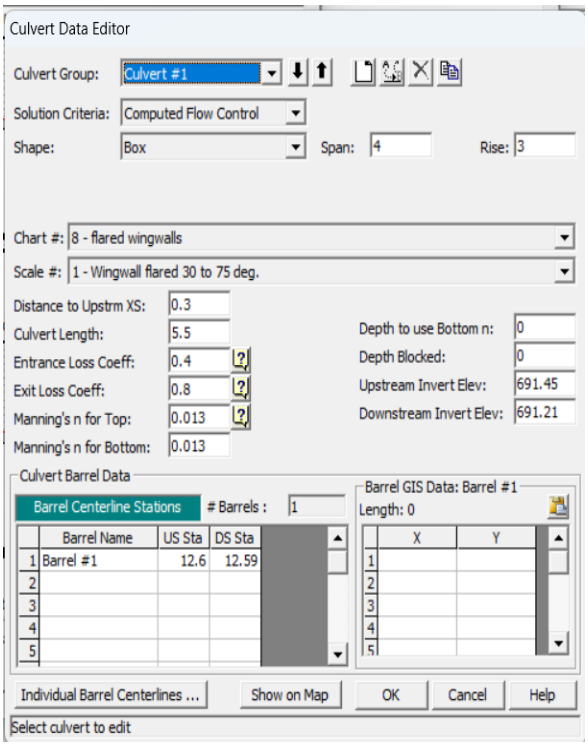


Figure V.17: Détails du dalot 01

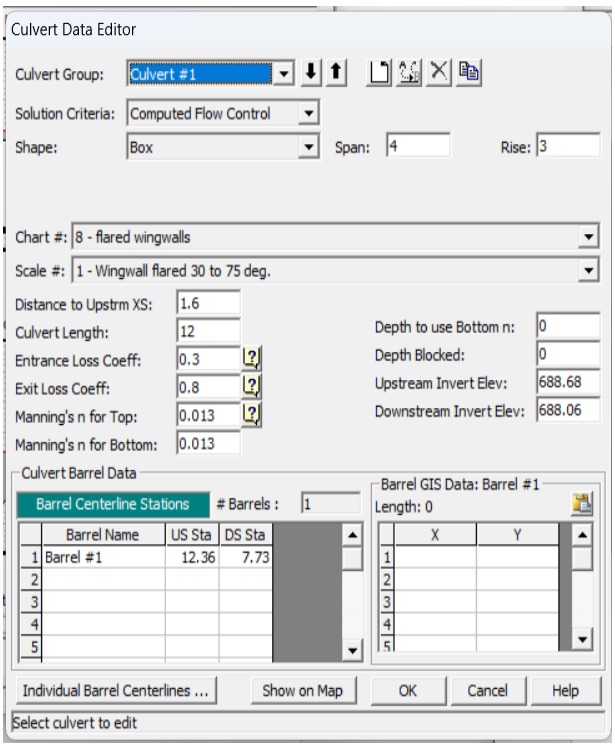


Figure V.18: Détails du dalot 02

3) Résultats de la simulation de l'ouvrage proposé :

- **Dalot 01 :**

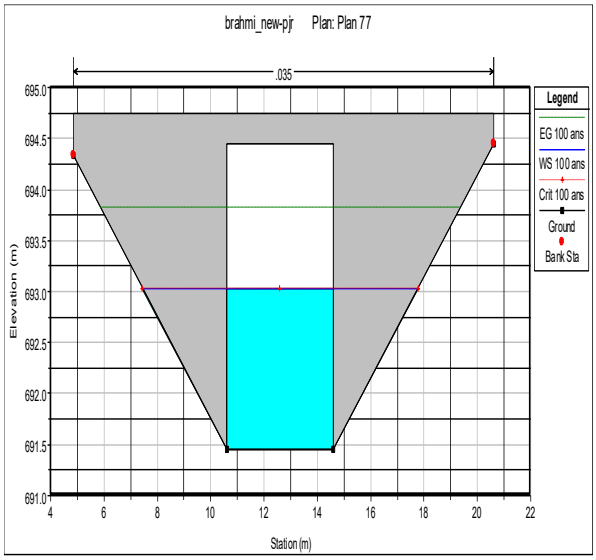


Figure V.19: Vue en amont du dalot 01

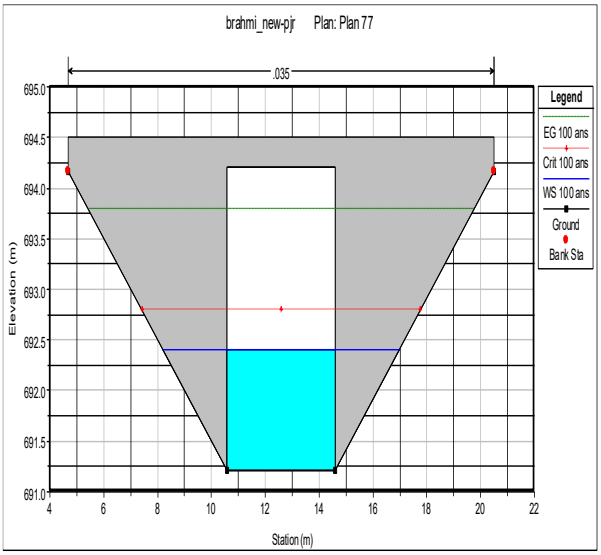


Figure V.20: Vue en aval du dalot 01

Tableau V.13: Résultats de la simulation d'écoulement. (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
546	691.99	694.06	693.26	694.18	0.001948	1.48	16.88	12.29	0.40
532	691.45	694.09	692.72	694.14	0.000712	1.02	24.48	14.55	0.25
529	Dalot 01(entré de petit patelin)								
526	691.21	692.48	692.48	692.94	0.013675	3.02	8.29	9.07	1.01
515	690.79	691.78	692.06	692.68	0.034350	3.62	6.9	7.98	1.24

- **Dalot 02 :**

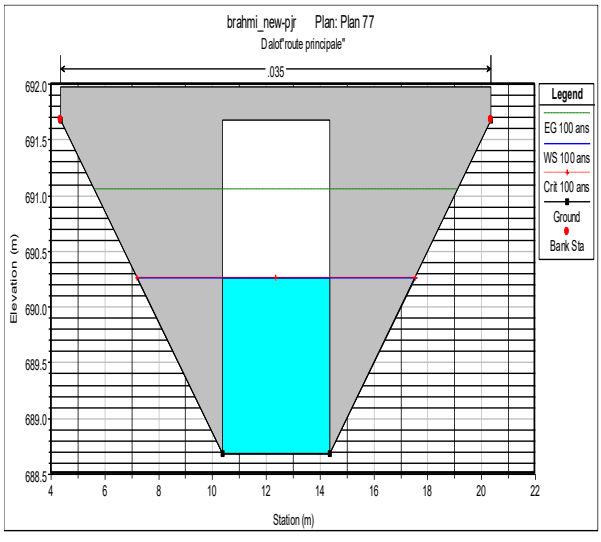


Figure V.21: Vue en amont du dalot 02

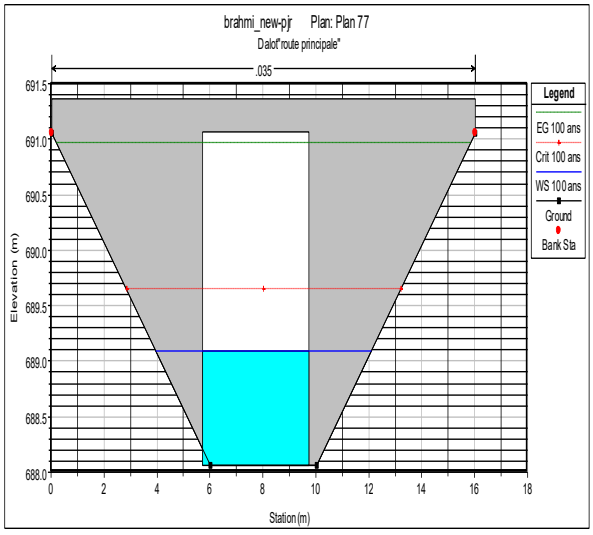


Figure V.22: Vue en aval du dalot 02

Tableau V.14: Résultats de la simulation d'écoulement. (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
477	689.28	691.20	690.55	691.34	0.002646	1.66	15.09	11.69	0.47
462	688.68	691.24	689.95	691.29	0.000816	1.07	23.28	14.22	0.27
455	Dalot 02(route national)								
448	688.06	689.09	689.32	689.90	0.029906	3.21	7.78	8.13	1.04
443	687.86	688.86	689.13	689.74	0.033264	3.24	7.71	8.01	1.05

❖ **Conception du canal en enrochement :**

Dans le cadre de l'**aménagement d'Oued Errihane**, 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.**

- **Epaisseur orthogonale théorique t_d :**

$$td = n\ D50 \qquad \textbf{V.4}$$

Avec :

D_{50}: diamètre median (d50=0.5m).

n: nombre de couche.

t_d : épaisseur orthogonale théorique (m).

- **Les sections d'enrochement :**

$$L_{talus} = h\sqrt{1 + m^2} \quad \text{ET} \quad S = L\ L_{talus} \qquad \textbf{V.5}$$

Avec :

L: Longueur de tronçon.

h: Hauteur du tronçon.

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

- **Volume globale de dimensionnement :**

$$V = S\ td \qquad \textbf{V.6}$$

Avec :

S : surface d'enrochement (m2).

t_d : épaisseur orthogonale théorique (m).

❖ **Estimation du coût de la variante :**

Le tableau V.20 présente l'estimation du coût de réalisation d'un canal en enrochement sur le tronçon de l'oued Errihane.

Tableau V.15 : Devis de la variante en canal gabionné d'oued Errihane.

Désignations des travaux	**Unité**	**Quantité**	**Prix unitaire (DA)**	**Montant (DA/mL)**
Terrassement – Déblais	m^3	25857	250	6 464 250
Terrassement – Remblais	m^3	862	700	603 400
Géotextile	m^2	11 052	2 500	27 630 000
Enrochement	m^3	5 526	5 000	27 630 000
Montant Total				**62 327 650 DA**
Montant Total + TVA 19%				**74 169 903.5 DA**

➢ À titre d'analyse préliminaire, bien que cette variante garantisse une protection efficace et offre des avantages hydrauliques notables, sa mise en œuvre demeure particulièrement onéreuse, tant en matériaux qu'en main-d'œuvre.

V.4.3 Troisième variante : : Canal en béton armé

- **Dimensionnement :**

Les caractéristiques du canal ont été déterminées à l'aide du logiciel FlowMaster. Les résultats du calcul hydraulique relatifs au canal trapézoïdal sont présentés ci-après :

Tableau V.16: Dimensions de l'aménagement d'oued Errihane (canal en béton).

Tronçons	1	2	3
Section de départ	597	546	448
Section d'arriver	546	448	10
Largeur du fond (m)	4	4	4
Longueur (m)	51	98	438
Pente du projet (m/m)	0.06	0.06	0.06
Hauteur du canal(m)	1.5	3	1.5
Rugosité(n)	0.013	0.013	0.013

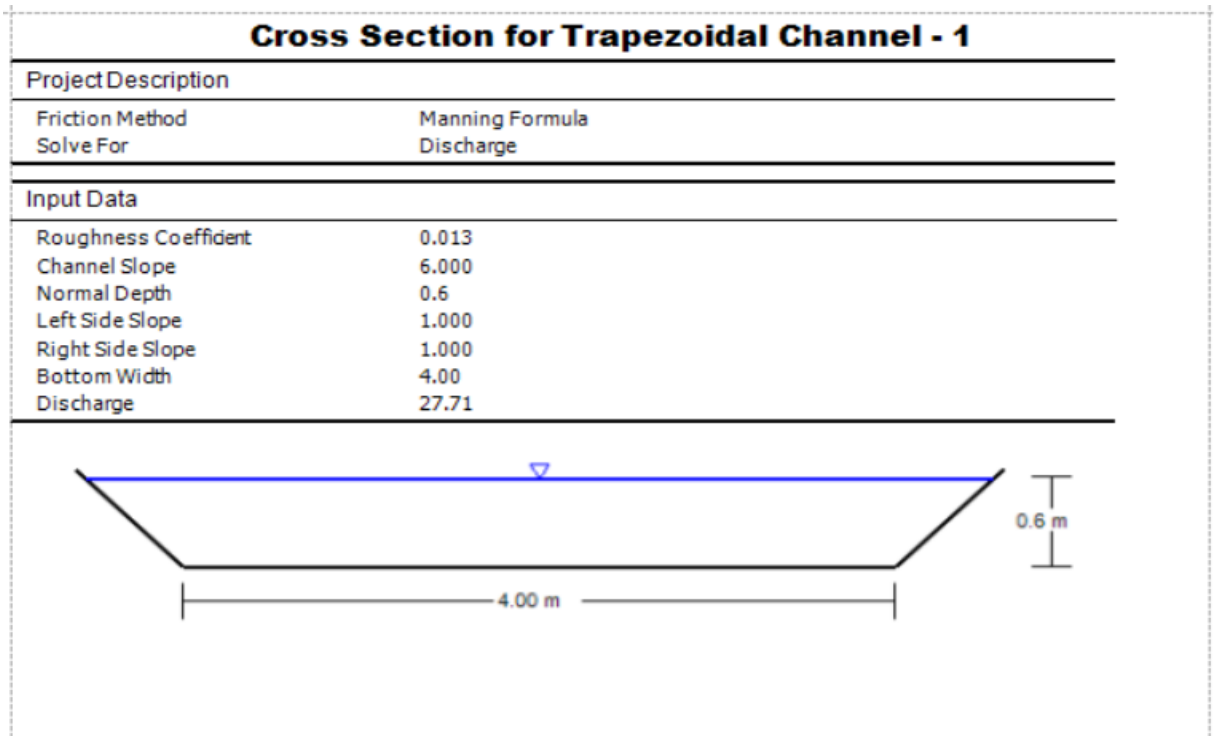


Figure V.23: Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement d'oued Errihane

❖ **Paramètres d'écoulement :**

Les résultats de la simulation sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau V.17: Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal trapézoïdal en enrochement de l'oued Errihane. (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)	(m2)	(m)	
597	694.00	694.52	695.40	700.36	0.060098	10.70	2.34	5.03	5.02
588	693.47	693.98	694.86	699.82	0.060091	10.70	2.34	5.03	5.02
575	692.70	693.22	694.10	699.06	0.060091	10.70	2.34	5.03	5.02
560	691.85	692.37	693.25	698.21	0.060089	10.70	2.34	5.03	5.02
546	690.99	691.51	692.39	697.35	0.060098	10.70	2.34	5.03	5.02
532	690.18	690.70	691.57	696.54	0.060097	10.70	2.34	5.03	5.02
529	Dalot 01(entré de petit patelin)								
526	689.81	691.21	691.21	691.77	0.001999	3.32	7.53	6.79	1.01
515	689.18	690.11	690.58	691.63	0.008228	5.46	4.58	5.86	1.97
491	687.74	688.46	689.14	691.21	0.019597	7.35	3.40	5.44	2.97
477	686.91	687.58	688.31	690.86	0.025322	8.01	3.12	5.34	3.35
462	686.02	688.00	687.42	688.72	0.000215	1.50	16.64	8.00	0.33
455	Dalot 02(route principale)								
448	685.08	686.32	686.48	687.08	0.003094	3.87	6.45	6.47	1.24
443	684.79	685.81	686.19	687.02	0.005893	4.86	5.15	6.05	1.68
426	683.76	684.56	685.16	686.77	0.014199	6.58	3.80	5.58	2.55
358	679.79	680.36	681.19	685.01	0.042616	9.55	2.62	5.15	4.27
322	677.64	678.19	679.03	683.32	0.049448	10.03	2.49	5.10	4.58
293	675.91	676.45	677.31	681.82	0.053023	10.27	2.44	5.07	4.73
240	672.80	673.32	674.19	678.95	0.056814	10.51	2.38	5.05	4.89
213	671.23	671.75	672.63	677.45	0.057853	10.57	2.37	5.05	4.93
175	668.96	669.48	670.36	675.23	0.058669	10.62	2.35	5.04	4.96
132	666.41	666.93	667.81	672.72	0.059313	10.66	2.35	5.04	4.99
85	663.63	664.15	665.03	669.96	0.059655	10.68	2.34	5.04	5.00
43	659.98	660.47	661.38	667.13	0.073317	11.43	2.19	4.97	5.51
10	657.57	658.06	658.97	664.71	0.073102	11.42	2.19	4.98	5.50

– À partir des résultats présentés dans le tableau, il ressort que :

✓ La vitesse d'écoulement atteint 11,43 m/s, une valeur excédant le seuil critique de 10 m/s, ce qui rend son adoption dans un canal en béton inappropriée.

✓ Selon les valeurs obtenues du nombre de Froude, l'écoulement est critique (Fr >1.).

❖ **Profile en long :**

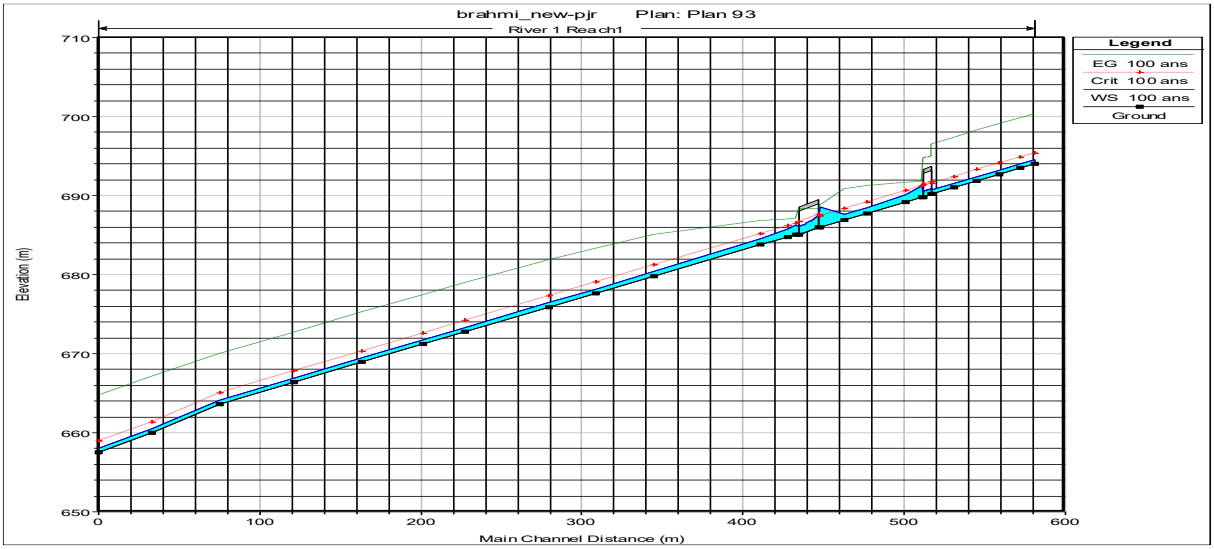


Figure V.24: le profil en long du cours d'eau après aménagement.

❖ **Vue en 3D :**

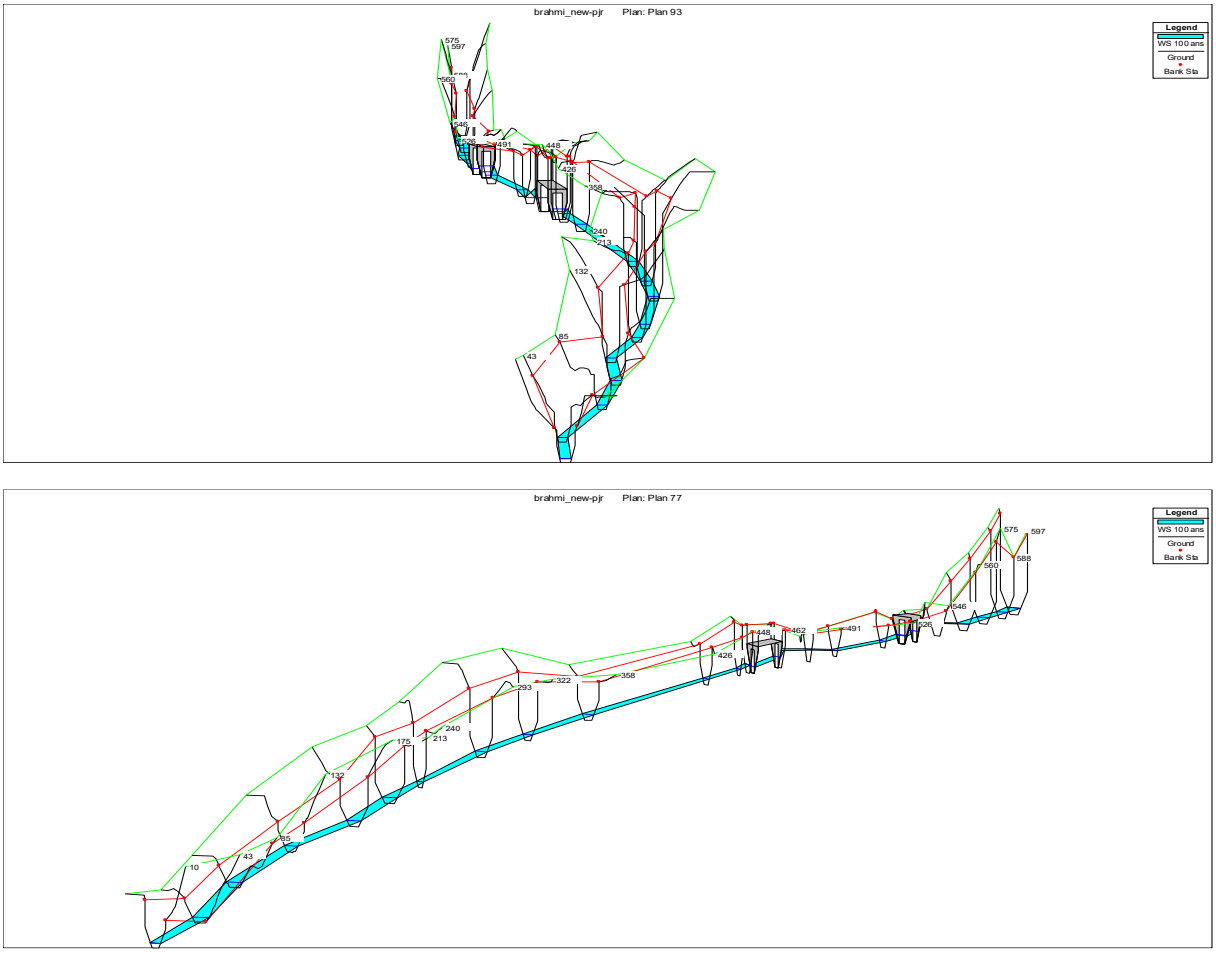
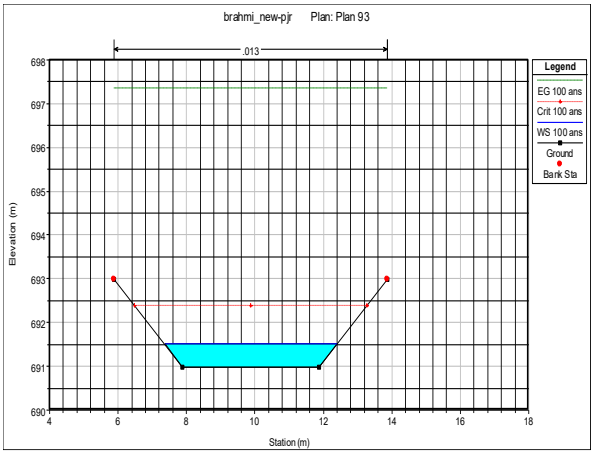
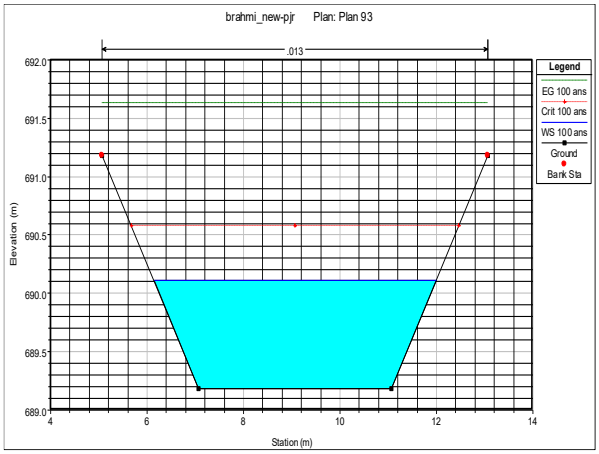


Figure V.25: Vue en plan en 3D de l'oued après l'aménagement.

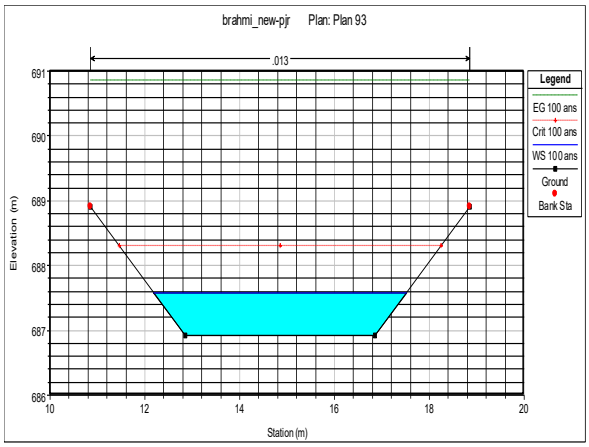
❖ Section en travers :



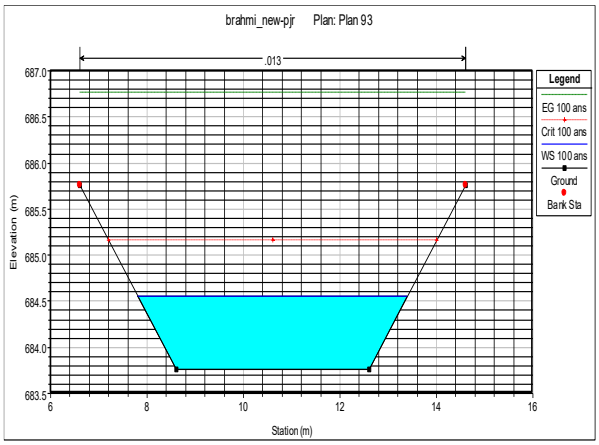
(Section 546)



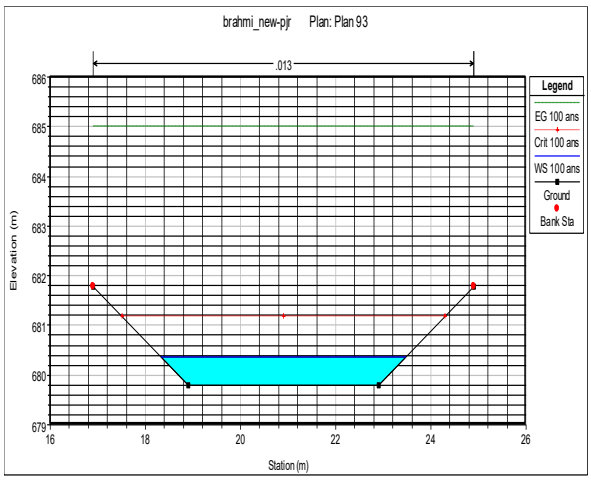
(Section 515)



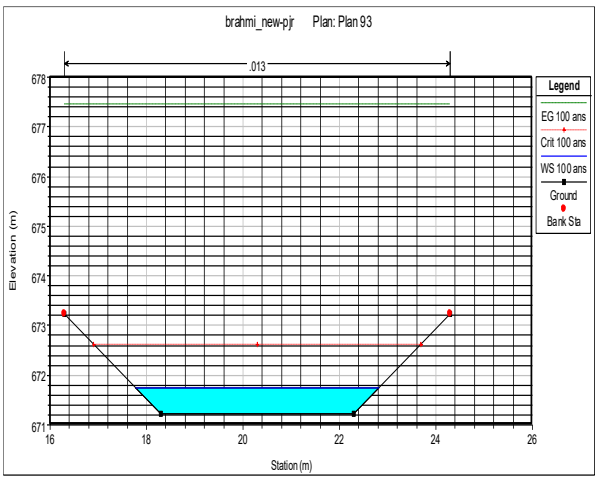
(Section 477)



(Section 426)



(Section 358)



(Section 213)

Figure V.26: Profils en travers d'un canal en enrochement pour une crue centennale d'oued Errihane.

❖ Ouvrage de franchissement :

1) Dimensionnement des dalots :

Les caractéristiques des dalots ont été déterminées à l'aide du logiciel FlowMaster.

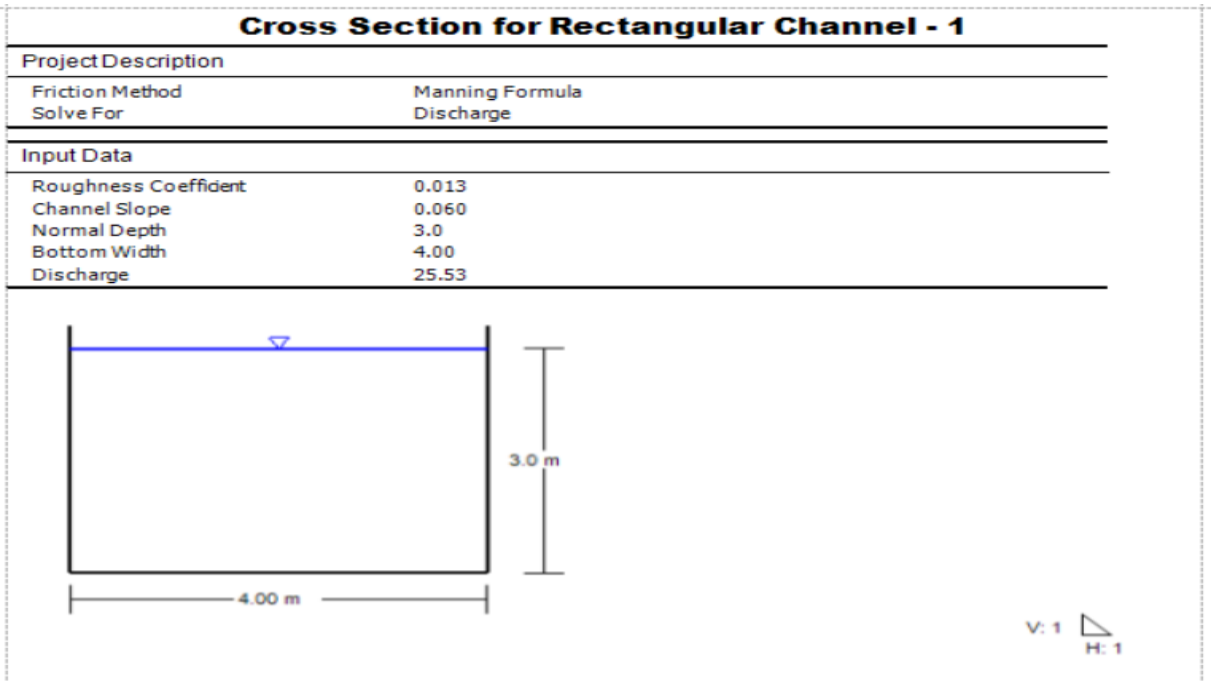


Figure V.27 : Dimensions des deux dalots (01 et 02) (Source : logiciel FlowMaster)

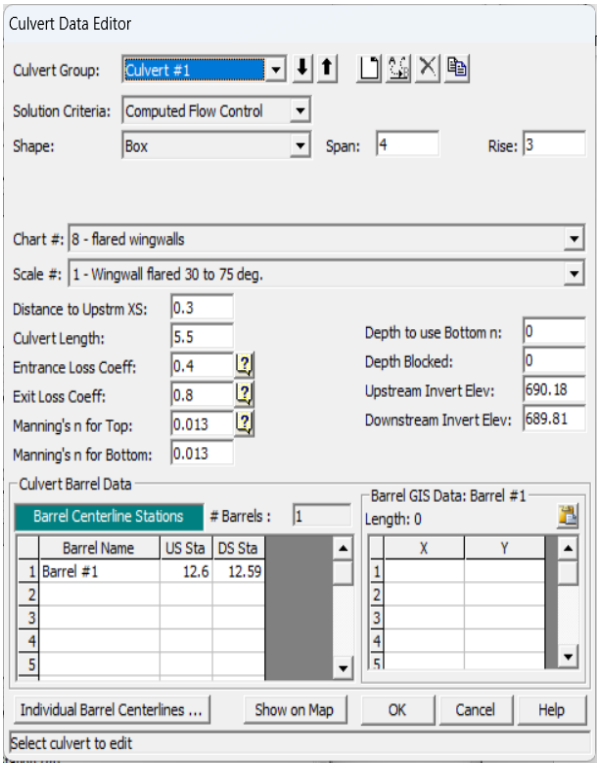


Figure V.28: Détails du dalot 01.

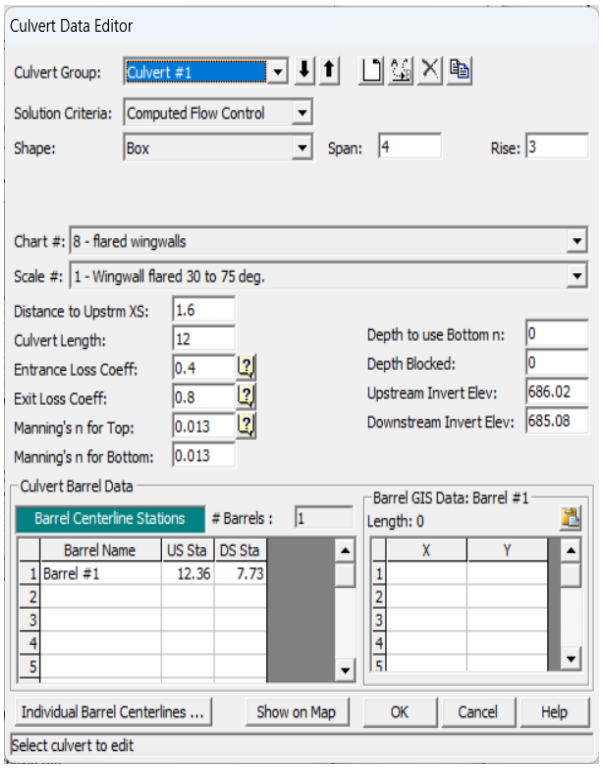


Figure V.29: Détails du dalot 02.

3) Résultats de la simulation de l'ouvrage proposé :

- **Dalot 01 :**

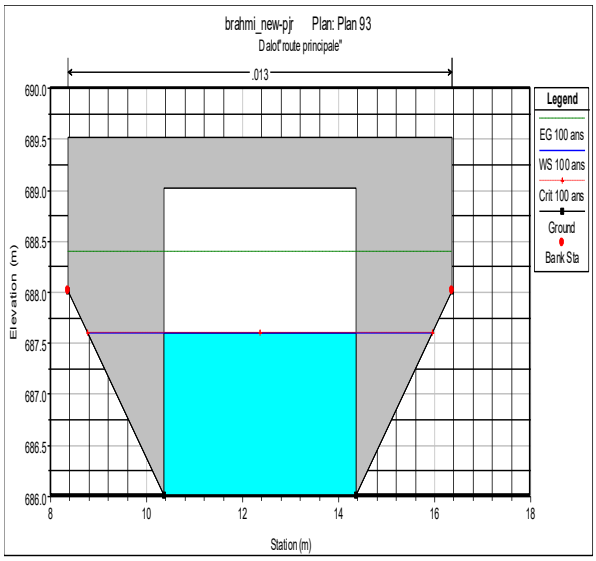


Figure V.30: Vue en amont du dalot 01.

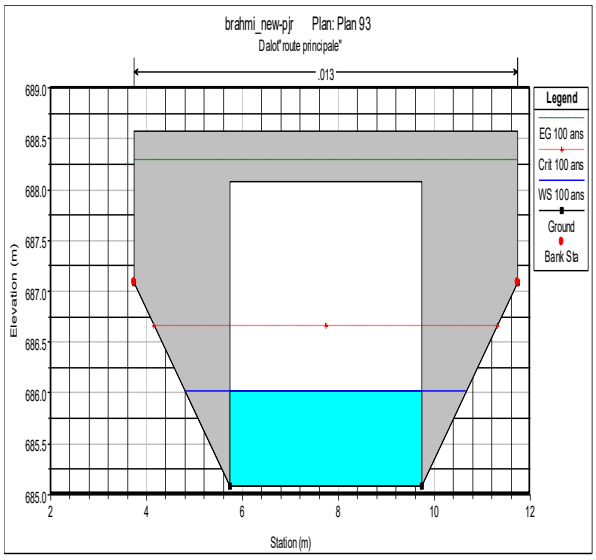


Figure V.31: Vue en aval du dalot 01.

Tableau V.18: Résultats de la simulation d'écoulement. (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
546	690.99	691.51	692.39	697.35	0.060098	10.70	2.34	5.03	5.02
532	690.18	690.70	691.57	696.54	0.060097	10.70	2.34	5.03	5.02
529	Dalot 01(entré de petit patelin)								
526	689.81	691.21	691.21	691.77	0.001999	3.32	7.53	6.79	1.01
515	689.18	690.11	690.58	691.63	0.008228	5.46	4.58	5.86	1.97

- **Dalot 02 :**

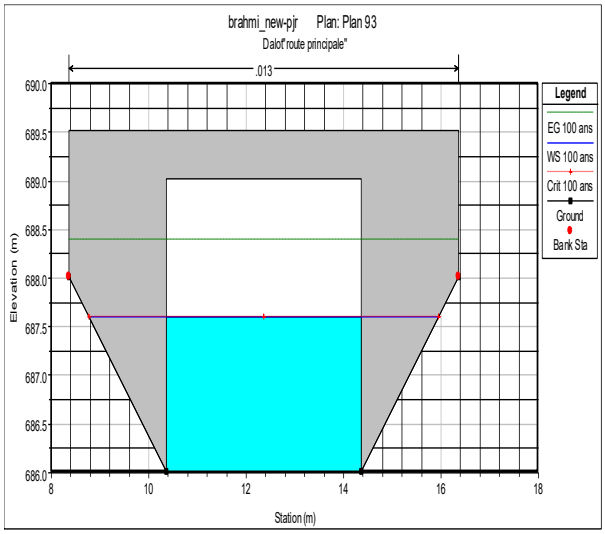


Figure V.32 : Vue en amont du dalot 02.

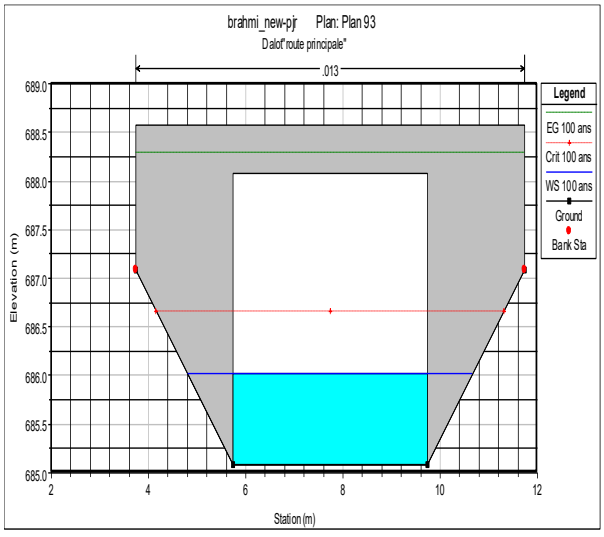


Figure V.33 : Vue en aval du dalot 02.

Tableau V.19 : Résultats de la simulation d'écoulement. (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
477	686.91	687.58	688.31	690.86	0.025322	8.01	3.12	5.34	3.35
462	686.02	688.00	687.42	688.72	0.000215	1.50	16.64	8.00	0.33
455									
448	685.08	686.32	686.48	687.08	0.003094	3.87	6.45	6.47	1.24
443	684.79	685.81	686.19	687.02	0.005893	4.86	5.15	6.05	1.68

❖ **Estimation du coût de la variante :**

Le tableau V.20 présente l'estimation du coût de réalisation d'un canal en enrochement sur le tronçon de l'oued Errihane.

Tableau V.20: Devis de la variante en canal gabionné d'oued Errihane.

Désignations des travaux	Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement – Déblais	m^3	21473	250	5 368 250
Terrassement – Remblais	m^3	0	700	0
Béton de propreté	m^2	580	15 000	8 700 000
Béton dosé à 350 Kg/m3	m^3	1 739	35 000	60 865 000
Montant Total				**74 933 250 DA**
Montant Total + TVA 19%				**89 170 568 DA**

➢ Cette variante se révèle peu adaptée au projet, car elle ne garantit pas une protection efficace des berges et n'apporte pas les performances hydrauliques souhaitées. De surcroît, sa mise en œuvre implique un coût élevé, ce qui la rend économiquement peu viable. Compte tenu de ces limites, elle apparaît moins pertinente que les autres alternatives étudiées pour l'aménagement de l'Oued.

V.5 Choix de la variante d'aménagement :

Dans le cadre de l'aménagement de l'oued Errihane, trois variantes techniques ont été envisagées : l'aménagement en gabions, en enrochement, et en béton. Chaque solution a été analysée selon des critères hydrauliques, techniques et économiques. L'objectif étant de retenir la solution la plus adaptée au contexte du site, tant en matière de performance hydraulique que de viabilité économique et de durabilité.

V.5.1 Présentation et comparaison des variantes :

1) Variante 1 : Gabion :

- **Résultats hydrauliques :** satisfaisants, avec une bonne capacité de régulation des vitesses d'écoulement grâce à la rugosité naturelle des gabions.
- **Stabilité :** bonne résistance à l'érosion et à la poussée de l'eau.
- **Coût :** relativement modéré, ce qui en fait une solution économiquement avantageuse.
- **Autres avantages :** intégration paysagère intéressante, facilité d'exécution, entretien limité.

2) Variante 2 : Enrochement :

- **Résultats hydrauliques :** très bons, bonne dissipation de l'énergie et maîtrise des vitesses.
- **Stabilité :** très bonne, même en cas de fortes crues.
- **Coût :** plus élevé que celui du gabion, bien que restant raisonnable.
- **Autres aspects :** mise en œuvre plus complexe, impact visuel plus important.

3) Variante 3 : Béton :

- **Résultats hydrauliques :** défavorable, notamment en raison :
  - D'une pente raide,
  - Du coefficient de rugosité faible, qui entraîne :
  - Des vitesses élevées,
  - Un nombre de Froude important, donc risque d'écoulements supercritiques.

- **Tentatives d'amélioration :**
  - Réduction de la pente,
  - Découpage en tronçons,

Malgré ces tentatives, les résultats hydrauliques restent insatisfaisants.

- **Solutions envisageables** :
    - Mise en place de seuils, blocs en béton ou saillies,
    - Aménagement en marches d'escalier.

Ces solutions permettraient de réduire les vitesses, mais leur mise en œuvre engendrerait des coûts supplémentaires importants. Or, la variante béton présente déjà un coût initial élevé par rapport aux autres options, ce qui la rend encore moins compétitive lorsque des ouvrages complémentaires comme des bassins de dissipation doivent être ajoutés.

- **Coût :** élevé, et serait encore accru en cas de mise en œuvre de solutions complémentaires (seuils, bassins de dissipation, etc.).

- **Autres inconvénients :** faible intégration paysagère, rigidité de l'aménagement, entretien potentiellement difficile.

V.5.2 Justification du choix de la variante :

Au vu de l'analyse comparative ci-dessus, la variante en gabions s'est révélée être la plus équilibrée en termes de :

- **Performance hydraulique :** contrôle satisfaisant des vitesses, bon comportement en écoulement naturel.
- **Économie de projet :** coût modéré, sans nécessiter d'ouvrages complémentaires.
- **Durabilité et entretien :** bonne résistance mécanique, entretien limité dans le temps.
- **Intégration environnementale :** aspect naturel et écologique.

Par ailleurs, la variante en gabions évite les inconvénients majeurs rencontrés avec la variante béton, tels que :

- L'accélération excessive de l'écoulement,
- La nécessité d'ouvrages coûteux pour atténuer les effets hydrauliques,
- Et le coût global trop élevé pour un bénéfice limité.

Conclusion :

- Le dimensionnement d'un projet d'aménagement repose sur l'évaluation des débits d'écoulement, déterminés à partir de calculs hydrologiques. La présente étude a été réalisée dans le but de définir la conception la plus appropriée des ouvrages, afin d'assurer la protection des berges de l'Oued Errihane. Elle vise plus particulièrement à préserver les enjeux suivants :

    - Les zones urbanisées située sur les deux rives de l'oued Errihane, ainsi que les infrastructures essentielles telles que la route principale et la route secondaire, sans oublier certains sites sensibles comme l'école primaire et l'Institut des Mines.

- La variante d'aménagement en béton armé apparaît peu appropriée, en raison des vitesses d'écoulement excessives qu'elle engendre ainsi que du coût particulièrement élevé associé à ce type de revêtement.

- Le choix de la variante gabion s'impose naturellement comme la solution optimale pour l'aménagement de l'oued. Elle répond efficacement aux exigences techniques et hydrauliques du projet, tout en respectant les contraintes économiques et environnementales. Elle représente donc le meilleur compromis entre performance, coût, durabilité et intégration au site.

Chapitre VI :

Organisation du 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.

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.1.1.2 Le 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.

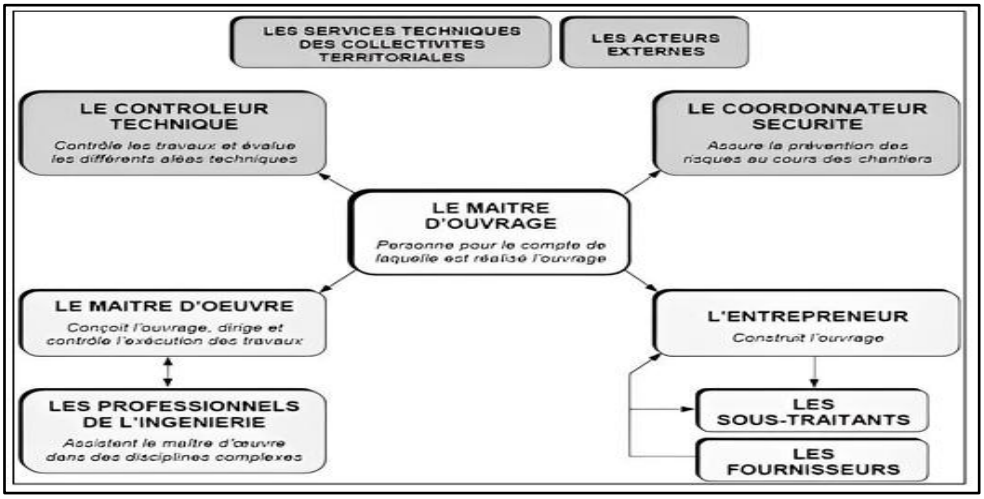


Figure VI.1 : Interactions entre les acteurs du chantier (Ghomari, 2013).

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 Errihane.

Désignations des travaux	**Unité**	**Quantité**	**Prix unitaire (DA)**	**Montant (DA/mL)**
Terrassement – Déblais	m^3	20 060	250	5 015 000
Terrassement – Remblais	m^3	853	700	597 100
Géotextile	m^2	6 000	2 500	15 000 000
Gabions	m^3	4 200	5 000	21 000 000
Montant Total				**41 612 100 DA**
Montant Total + TVA 19%				**49 518 399 DA**

VI.3. La Planification :

VI.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 :

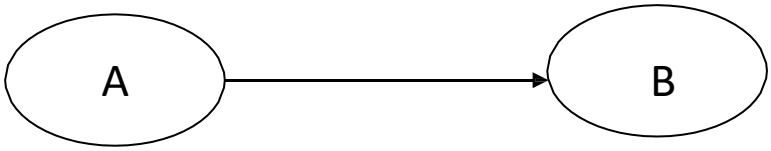
- **Méthodes basées sur le réseau :** Elles reposent sur la modélisation des tâches et événements sous forme de réseaux logiques. Parmi elles, la méthode du chemin critique (CPM) et la technique PERT (Program Evaluation and Review Technique) sont les plus répandues. Elles permettent d'identifier les 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 :

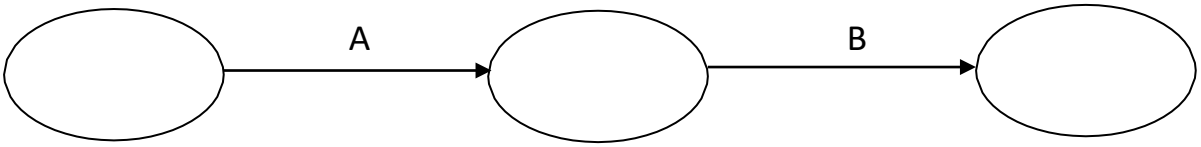
Le réseau constitue une représentation graphique du projet, mettant en évidence les relations entre les différentes tâches, qu'elles soient exécutées de manière séquentielle, parallèle ou convergente, ainsi que leur durée d'exécution. On distingue principalement deux catégories de réseaux :

- **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 .

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 :

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

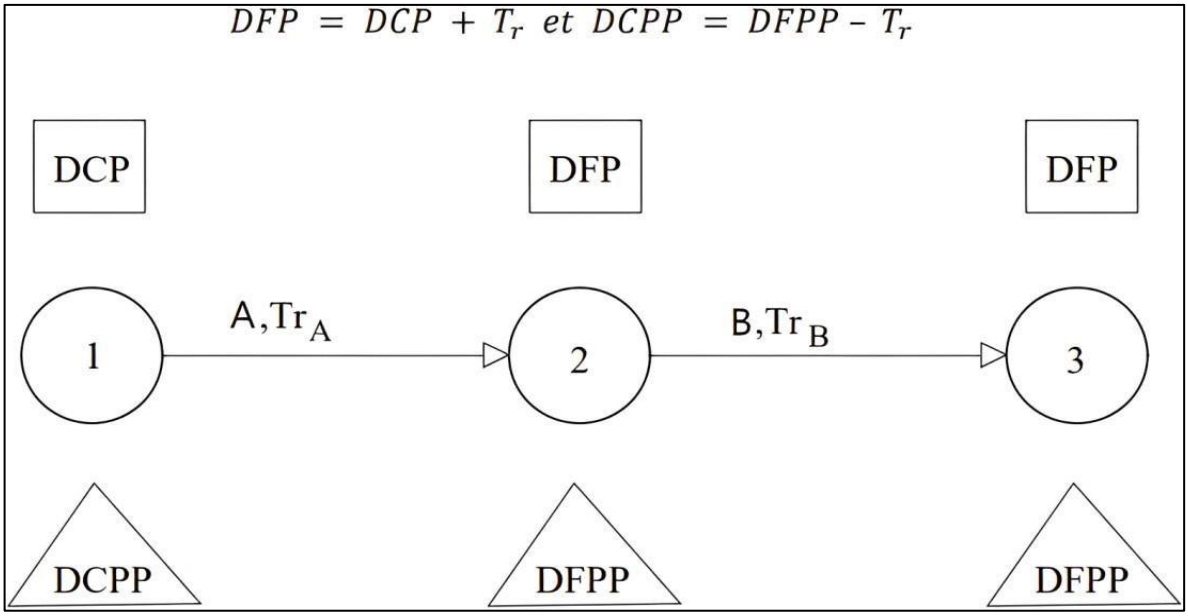


Figure VI.2: Schéma représentatif de la méthode de PERT.

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

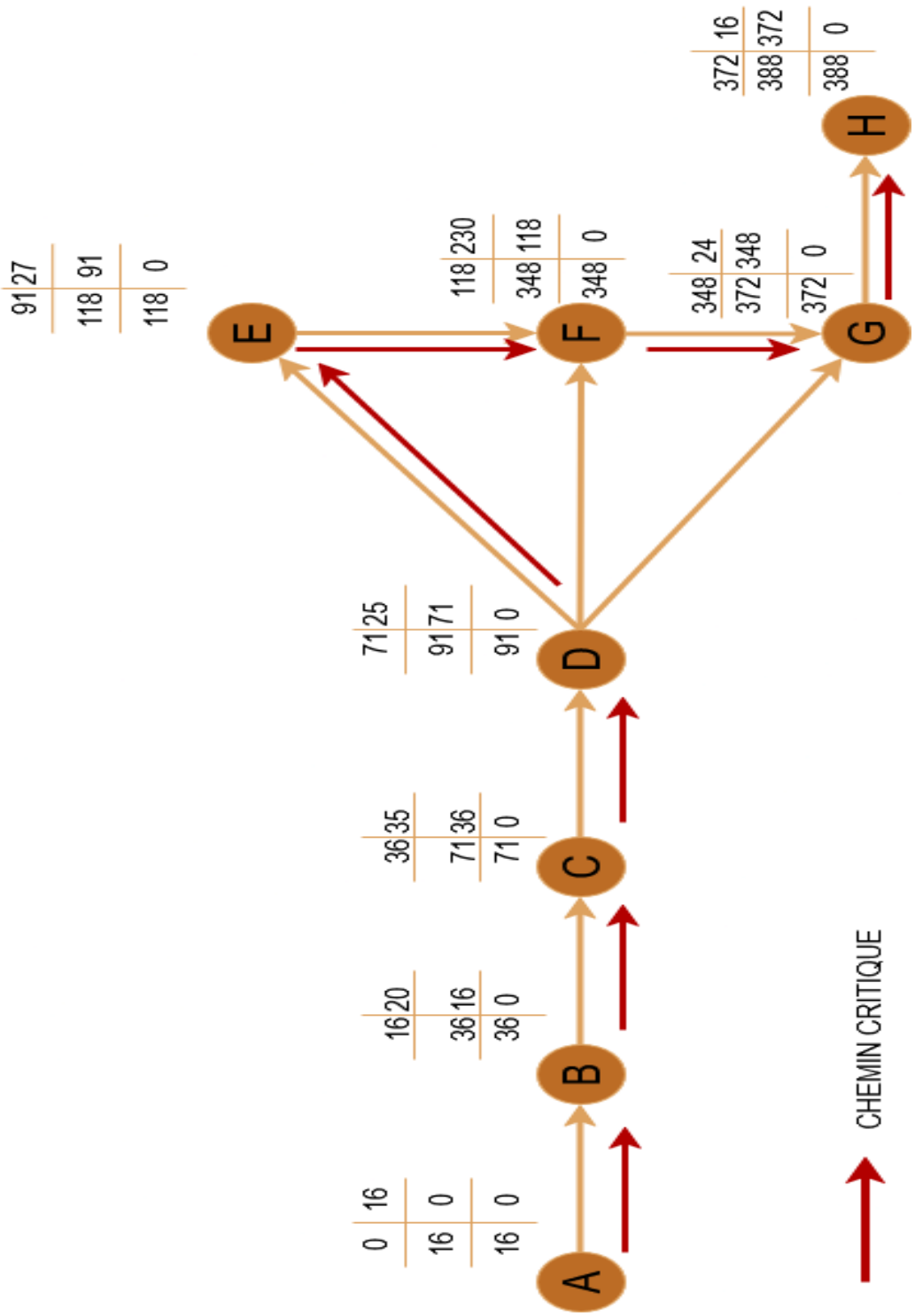


Figure VI.3: Réseau de planification des taches par la méthode CPM.

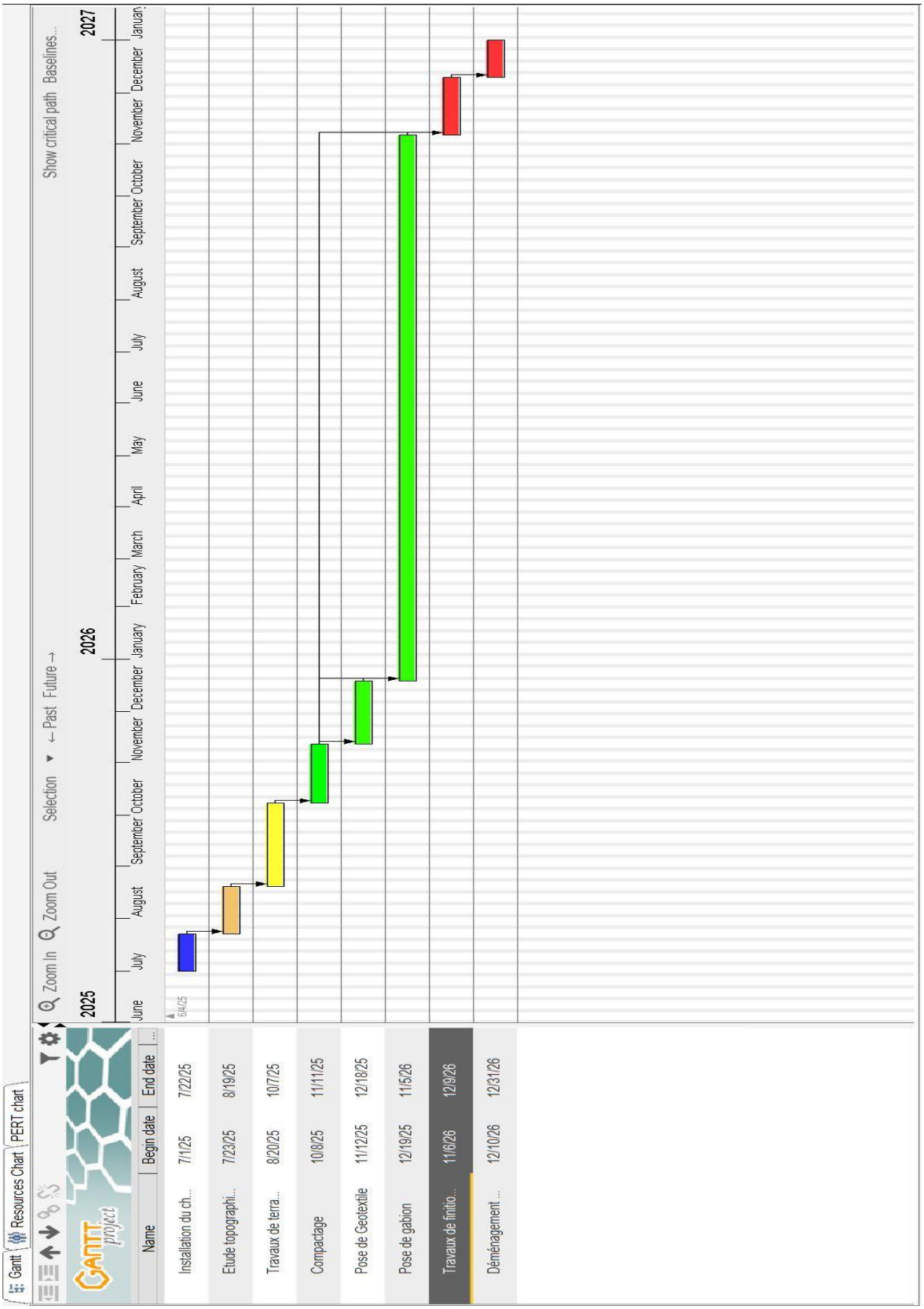


Figure VI.4: Chronogramme du Projet pour la Variante de Gabionnage avec le Logiciel Gantt Project.

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 ERRIHANE, dont le linéaire atteint 600 mètres pour un coût estimé à **49 518 399 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 :

Cette étude a porté sur l'un des risques hydrométéorologiques les plus préoccupants dans le contexte algérien : les crues rapides et destructrices. À travers le cas spécifique de l'Oued Errihane, situé dans la ville de Miliana, elle a mis en évidence la vulnérabilité des zones urbanisées face à des phénomènes hydrologiques dont la fréquence et l'intensité tendent à s'accroître sous l'effet du changement climatique et de l'urbanisation non maîtrisée.

L'approche méthodologique adoptée, combinant une étude hydrologique, des simulations hydrauliques avec le logiciel HEC-RAS, des analyses statistiques avec HYFRAN et une exploitation des données spatiales à travers ArcGIS et HEC-GEO, a permis d'obtenir une vision précise des risques. Les résultats ont montré les zones à forte probabilité d'inondation, les tirants d'eau correspondants aux débits de projet et les secteurs les plus exposés aux débordements.

Sur cette base, plusieurs scénarios d'aménagement ont été étudiés et comparés selon une approche technico-économique. La variante retenue, intégrant un canal en gabions, s'est imposée par son efficacité hydraulique, sa durabilité et son coût maîtrisé. Elle constitue une réponse concrète aux besoins de protection de la population tout en tenant compte des contraintes environnementales et économiques.

Cependant, il convient de rappeler que la construction d'un ouvrage n'est qu'une partie de la solution. Sa pérennité dépendra d'un entretien régulier, d'une sensibilisation continue des habitants et de la mise en place de plans d'urgence et d'alerte efficaces. La gestion intégrée du risque d'inondation doit associer les autorités locales, les ingénieurs, les chercheurs et la société civile afin de renforcer la résilience de la commune d'Oued Errihane et de la ville de Miliana face aux futures crues.

En définitive, ce travail apporte une contribution modeste mais essentielle à la compréhension et à la gestion des risques d'inondation dans cette région. Il ouvre la voie à d'autres recherches et projets d'aménagement hydraulique, dans une perspective de sécurité, de développement durable et d'adaptation au changement climatique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

ATHAMNIA Brahim (2019- 2020)

ORGANISATION DES CHANTIERS.

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

Disponible sur : https://www.academia.edu/121837964/POLYCOPIE_DE_COURS_ORGANISATION_DES_CHANTIERS

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

https://www.researchgate.net/publication/352247248_Le_bassin_du_KebirRhumel_Algerie_hydrologie_de_surface_et_amenagement_des_ressources_en_eau

Benlaoukli, Bachir. (2004). Organisation de c antier, la planification des travaux les M.M. O[Wor ingPaper]. Disponible sur : http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/108

BENMANSOUR Nadir
Etude de crues et localisation des ones inondables 08 juillet 2009
https://elearningdeprecated.univannaba.dz/pluginfile.php/5573/mod_resource/content/1/Chapitre%20II%20%20Calcul%20des%20Conduites%20et%20Canaux%20-%20Ecoulement%20Uniforme.pdf

Benlaoukli, Bachir. (2004). Organisation de c antier, la planification des travaux les M.M. O[Wor ingPaper]. Disponible sur : http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/108

BENMANSOUR Nadir
Etude de crues et localisation des ones inondables 08 juillet 2009
https://elearningdeprecated.univannaba.dz/pluginfile.php/5573/mod_resource/content/1/Chapitre%20II%20%20Calcul%20des%20Conduites%20et%20Canaux%20-%20Ecoulement%20Uniforme.pdf

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

Disponible sur : https://stm.cairn.info/diagnostic-amenagement-et-gestion-des-rivieres--9782743014698?lang=fr

United States Geological Survey
https://www.usgs.gov/faqs/what-does-usgs-united-states-geological-survey-do

United nations office for disaster risk reduction.
https://www.undrr.org/

U.S. Army Corps of Engineers, 2016. HEC-RAS River Analysis System – User's Manual, Hydrologic Engineering Center, CPD-68, Version . .960p.
Disponible sur : http://www.hec.usace.army.mil/software/
Disponible sur :
https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=fr&user=Z4ijwC4AAAAJ&citation_for_view=Z4ijwC4AAAAJ : yxmsSjX2EkcC

Garavaglia, F. (2011). Méthode SCHADEX de prédétermination des crues extrêmes : Méthodologie, applications, études de sensibilité.
Disponible sur : https://theses.hal.science/tel-00579507v1

(Guillot et Duband, 1967) : La méthode du Gradex a été développée par EDF dans les années 1960
Disponible sur :
http://wikhydro.developpementdurable.gouv.fr/index.php/Gradex_(m%C3%A9thode_du)_(HU)

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)

Lencastre, 2008, Hydraulique générale.
Disponible sur :
https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/hydraulique-generale-9782212018943/

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.
Disponible sur : http://www.waternunc.com/fr/mate36.htm

Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD) :« ***Aléas, vulnérabilités et gestion des risques naturels*** »**,**
Disponible sur :
https://hal.science/hal03279213/file/Aleas_Naturels_Et_Gestion_Des_Risques_2010_PUF_Leone_Vinet_MeschinetDeRichemond_Complet_leger.pdf

TOUMI Abdelouaheb Hydraulique à surface libre Cours & Exercices 197pages
Disponible sur :
https://dspace.univguelma.dz/jspui/bitstream/123456789/601/1/H.S.L%28Cours%20%26%20Exercices%29-01.pdf

Élément descriptif de la crue Disponible sur :
http://www.connectedwater.gov.au/framework/baseflow_separation.php

Touaibia, bénina. (2015). Manuel pratique d' hydrologie (2ème Edition).

Yahiaoui Abdelhalim Inondations Torrentielles Cartographie des Zones Vulnérable sen Algérie du Nord
OULHACI Dalila RUISSELLEMENT INTER-ANNUEL EN ALGERIE SEPTENTRIONALE (Relation entre,)
(Ruissellement Pluie et Evaporation) 2015 -2016 .

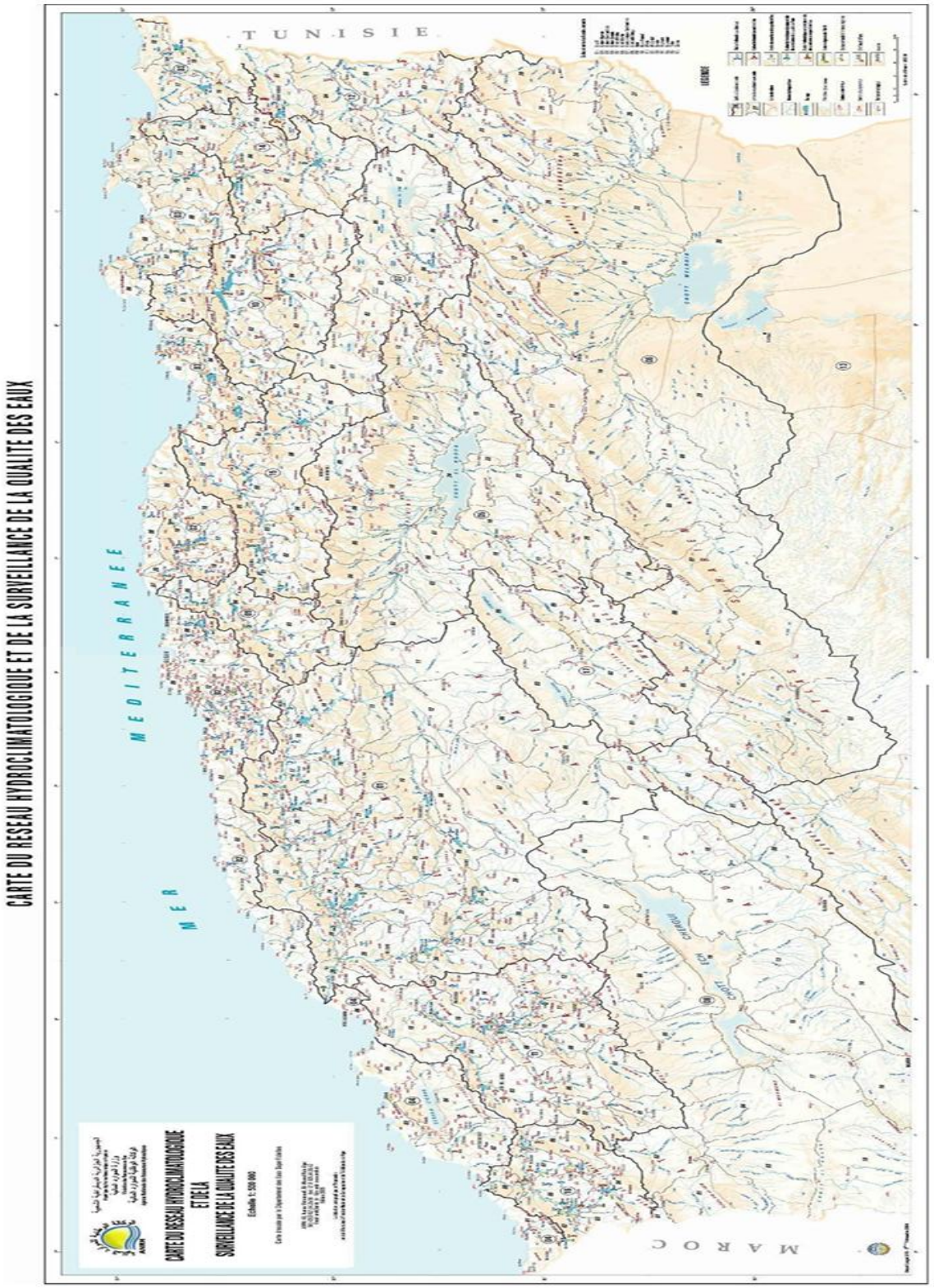
ZEROUAL, Ayoub, ASSANI, Ali. A., MEDDI, M. et al., 2019. Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. Clim Dyn

52, 227– 243 (2019). Disponible sur :

https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-018-4128-0

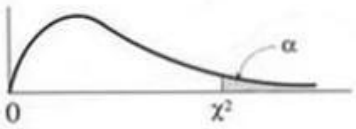
Annexes

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



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