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'État en Hydraulique

Option : CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUE

THEME :

Étude d'aménagement du cours d'eau de Oued El Kerma De la Wilaya d'Alger

Présenté par :
ZENATI Anfal Yasmine.

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
A. HADJ SADOK	Professeur	Président
I. ZAIBAK	M.C.B	Examinateur
M. BOUZIANE	M.A.A	Examinateur
B. BENLOUAKLI	Professeur	Promoteur

Session : Novembre 2024

DÉDICACE

“ ***À ma mère,*** *pour sa sagesse et son amour, qui ont éclairé chaque étape de mon parcours. Tu es ma force, mon inspiration, et la raison de tout ce que j’accomplis.*

À mon père, *pour son soutien constant, ses encouragements et ses conseils précieux. Ta présence a toujours été une source de motivation et de sécurité tout au long de ma vie.*

À mes frères, *véritables piliers de mon courage et précieux compagnons de vie, dont le soutien indéfectible et l’amitié sincère ont été des sources inestimables de ma force,*

Que ce travail soit un modeste témoignage de l’importance de votre soutien et de votre présence à mes côtés.”

Anfal Yasmine ZENATI

REMERCIEMENT

En préambule à ce projet de fin d'études, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce mémoire.

Je remercie profondément mon professeur **HADJ SADOK** pour avoir accepté de présider le jury de cette soutenance.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur, **M. BENLOUAKLI**, pour son aide précieuse, ses conseils avisés, et l'attention soutenue qu'il a portée à mon travail.

Je remercie particulièrement Monsieur **ZAIBAK** et Monsieur **BOUZIANE**, qui ont eu l'honneur d'examiner ce travail.

Je souhaite également exprimer toute ma reconnaissance à **M. BELKEBIR**, chef du bureau d'études BEHG, pour son aide et pour avoir mis à notre disposition les moyens nécessaires à l'accomplissement de ce projet.

Je tiens à témoigner ma gratitude à **M. BELKEBIR Nassim** pour son soutien et l'aide précieuse qu'il m'a apportée.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs qui m'ont accompagné tout au long de ma formation universitaire, en particulier **M. ZEROUAL** et **M. ZAIBAK** . Par leurs paroles, leurs gestes, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques, ils ont guidé mes réflexions et répondu avec bienveillance à mes questions durant mes recherches.

Enfin, je remercie chaleureusement ma famille, mes amis, ainsi que toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Anfal Yasmine ZENATI

ملخص

تتناول هذه الدراسة الهيدرولوجية والتحليل الهيدروليكي لوادي الكرمة شمال مدينة الجزائر، حيث يتم استكشاف المخاطر المتعلقة بالفيضانات في هذه المنطقة الحضرية المتنامية.

من خلال التحليل الشامل للخصائص الجغرافية والمناخية والجيولوجية للمنطقة، واقتراح مخطط إعادة تهيئتها في هذا السياق، متبوًعا بمحاكاة هيدروديناميكية باستخدام برنامج HEC-RAS، وإنشاء خريطة لمناطق الفيضانات في القطاع. واستنادا إلى دراسة تقنية اقتصادية وبيئية، قدمنا مخطط تهيئة الوادي ثم قمنا بتحديد مدة وتكلفة إنجاز هذا المشروع.

الكلمات المفتاحية: الهيدرولوجيا، الفيضانات، وادي الكرمة، القنوات الخرسانية، إدارة المخاطر، التحليل الهيدروليكي، الجزائر.

Résumé`

Cette étude traite de l'étude hydrologique et de l'analyse hydraulique de l'oued Karma dans le nord de l'Algérie, explorant les risques liés aux inondations dans cette zone urbaine en pleine expansion. À travers une analyse complète des caractéristiques géographiques, climatiques et géologiques de la zone, et en proposant un schéma de réhabilitation dans ce contexte, suivie d'une simulation hydrodynamique utilisant le logiciel HEC-RAS, et la création d'une carte des zones inondables. Sur la base d'une étude technico-économique et environnementale, nous avons présenté un diagrame de réhabilitation de la vallée et déterminé la durée et le coût du projet.

Mots Clés : Hydrologie, inondations, oued El Kerma, canaux en béton, gestion des risques, analyse hydraulique, Algérie.

Abstract

This study deals with the hydrological study and hydraulic analysis of the Wadi Karma in northern Algeria, exploring the flood-related risks in this growing urban area. After a comprehensive analysis of the geographical, climatic and geological characteristics of the area, a rehabilitation scheme was proposed, followed by a hydrodynamic simulation using HEC-RAS software, and the creation of a map of the flood zones in the sector. Based on a technical-economic and environmental study, we presented a rehabilitation diagram for the valley and determined the duration and cost of this project.

Keywords: Tertiary treatment, Sand filter, Water reuse, Wastewater treatment plant, Water quality

TABLE DES MATIÈRES

1 Description de la zone d'étude **2**
1.1 Introduction . . . 2
1.2 Description de la zone d'étude . . . 2
1.3 Le bassin versant de l'oued EL Kerma . . . 2
1.3.1 Situation géographique . . . 2
1.3.2 La Géologie . . . 3
1.3.3 Occupation du sol . . . 4
1.4 La Sismicité . . . 4
1.5 Situation climatique . . . 5
1.5.1 La température . . . 5
1.5.2 Vitesse Du Vent . . . 6
1.5.3 Les précipitations . . . 7
1.6 Conclusion . . . 8

2 Étude hydrologique **9**
2.1 Introduction . . . 9
2.2 Caractéristiques principale du bassin versant . . . 9
2.2.1 Caractéristiques géographiques . . . 9
2.2.2 Caractéristiques morphologiques . . . 9
2.2.3 Caractéristiques géométriques . . . 10
2.2.4 Étude de relief . . . 12
2.2.5 Étude du réseau hydrographique . . . 18
2.3 Étude de crues . . . 24
2.3.1 Études fréquentielles des pluies . . . 24
2.3.2 Détermination du débit de crue par les formules empiriques . . . 32
2.3.3 Construction de l'hydrogramme de crues . . . 35
2.4 Étude du transport solide . . . 38
2.4.1 Méthode de TIXERONT . . . 38
2.4.2 Méthode d'estimation au Nord algérien . . . 39
2.5 Conclusion . . . 40

3 Étude hydraulique **41**
3.1 Introduction . . . 41
3.2 Généralités et définitions . . . 42
3.2.1 Rappel de quelques notions hydraulique . . . 42
3.2.2 Type d'écoulement . . . 43
3.2.3 Régime d'écoulement . . . 44
3.3 Canaux à ciel ouvert . . . 46
3.3.1 Type des canaux . . . 46
3.3.2 Propriétés des canaux . . . 46
3.3.3 Dimensionnement des canaux . . . 48

3.4 Choix des variantes d'aménagement . . . 50
3.4.1 Le coefficient de rugosité . . . 50
3.5 Modélisation du cours d'eau non aménagé . . . 52
3.5.1 Choix du type de modèle hydraulique . . . 52
3.5.2 Présentation du logiciel HEC-RAS . . . 52
3.5.3 Application d'HEC-RAS sur Oued EL Kerma . . . 53
3.5.4 La Délimitation Des Zones Inondables . . . 60
3.5.5 Conclusion . . . 61

4 Études des variantes d'aménagement 62
4.1 Introduction . . . 62
4.2 Présentation des grandes orientations . . . 62
4.2.1 Protection contre l'érosion . . . 62
4.2.2 La Protection Contre les Inondations . . . 63
4.3 Aménagement proposé sur le tronçon de l'oued EL Kerma . . . 65
4.3.1 Première variante : Canal en béton armé . . . 65
4.3.2 Canal en gabion . . . 68
4.3.3 Canal en enrochement . . . 73
4.3.4 Choix de la variante d'aménagement . . . 77
4.4 CONCLUSION . . . 78

5 Étude détaillée de la variante d'aménagement adoptée 79
5.1 Introduction . . . 79
5.2 Détails de variante adoptée . . . 79
5.2.1 Détails de conception . . . 79
5.2.2 Étude de stabilité des talus . . . 81

6 Organisation du chantier 86
6.1 Introduction . . . 86
6.2 Rôles et responsabilités des intervenants sur chantier (KAHLERRAS,2018) . . . 86
6.2.1 Le maître de l'ouvrage . . . 87
6.2.2 Le maître d'œuvre . . . 87
6.2.3 L'entrepreneur . . . 87
6.3 Définitions des engins utilisés . . . 87
6.4 Devis quantitatif et estimatif du projet . . . 88
6.5 La planification . . . 88
6.5.1 Définition . . . 88
6.5.2 Techniques de Planification . . . 88
6.5.3 Différentes Méthodes Fondées sur les Réseaux (BENLAOUKLI, 2004) . . . 89
6.5.4 Les Étapes de la Planification . . . 90
6.5.5 Diagramme de Gantt . . . 90
6.6 Conclusion : . . . 93

TABLE DES FIGURES

1.1 La situation de la zone d'étude au sein des wilayas et des communes 3
1.2 Classification sismique des wilayas d'Algérie (Addenda, 2003). 5
1.3 Courbes de répartition mensuelle des températures (1981-2022). 6
1.4 Répartition des vitesses des vents en km/h (1981-2022). 6
1.5 Évolution de la pluviométrie mensuelle interannuelles (1981-2022). 7

2.1 Carte hypsométrique de la zone d'étude 13
2.2 Répartition des surfaces et courbe hypsométrique de la zone d'étude. 14
2.3 Carte des pentes pour la zone d'étude 15
2.4 Carte des courbes de niveaux de la zone d'étude 16
2.5 Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued EL Kerma 19
2.6 Situation de la station pluviométrique de BIRMANDREIS sur la carte des BVs. 24
2.7 Représentation graphique de la loi de GUMBEL de la station 020509. 26
2.8 Représentation graphique de la loi de Galton de la station 020509. 27
2.9 Graphe comparatif des résultats d'ajustement obtenus par les méthodes de Gumbel et Galton. 28
2.10 Les courbes pluies-durées-fréquences 30
2.11 Les courbes Intensité-durées-fréquences 31
2.12 Carte de localisation des bassins hydrographiques de l'Algérie «ANRH» 34
2.13 Hydrogramme de crue pour différentes périodes de retour. 37

3.1 Coupe transversale d'un canal naturel. 43
3.2 Variabilité des écoulements dans l'espace. 44
3.3 Schéma représentant les différents régimes d'écoulement. 45
3.4 Canaux artificiels (Source : TOUMI Abdelouaheb, 2016). 46
3.5 Forces appliquées par l'eau sur les parois (l'une perpendiculaire, l'autre tangentielle) 48
3.6 Eléments géométriques pour des sections ouvertes diverses (Graf, 2000). 50
3.7 TIN (réseau irrégulier triangulé) de l'Oued EL Kerma 54
3.8 : Insertion fichier de projection. 54
3.9 Définition du tracé de l'oued Agrioune et des sections en travers de l'oued. . . . 55
3.10 Profil en long du cours d'eau à l'état naturel pour une crue centennale. 56
3.11 Vue en Plan en 3D d'Oued El Kerma. 56
3.12 Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued El Kerma. 57
3.13 Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued EL Kerma. 57
3.14 Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance dans l'Oued El Kerma. 58
3.15 Évolution du nombre de Froude en fonction de la distance dans l'Oued El Kerma. 58
3.16 la carte des zones inondables (Source : RAS-MAPPER). 60

4.1 Dimensions d'Aménagement d'Oued EL Kerma pour un canal en béton armé(Source FLOWMASTER). 66

4.2 Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued EL Kerma. 68
4.3 Coupe en travers d'un canal en gabion (Source : Autodesk.zenati). 69
4.4 Dimensions d'Aménagement d'Oued EL Kerma pour un canal en gabion (Source HEC-RAS). 70
4.5 Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued EL Kerma. 72
4.6 Dimensions d'Aménagement Oued EL Kerma pour un canal en enrochement(Source :FLOW-MASTER). 74
4.7 Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued EL Kerma. 76
4.8 histogramme présentant les coûts des variantes. 77

5.1 Détails des caractéristiques des gabions. 80
5.2 Vue 3D Oued EL Kerma après l'aménagement (Source :HEC-RAS). 81
5.3 Géométrie du talus (Source :GEOSLOPE). 83
5.4 Application des charges des roches (Source :GEOSLOPE). 83
5.5 Dessin de la ligne piézométrique (Source :GEOSLOPE). 84
5.6 Résultats de calcul (Source :GEOSLOPE). 84

6.1 Exemple de réseau à flèches 89
6.2 Exemple de réseau à nœuds 89
6.3 Diagramme de Gantt pour la variante du gabionnage(Source :GanttProject). . . 92

LISTE DES TABLEAUX

1.1 La répartition mensuelle des températures (1981-2022) (Source : Nasa power satellite). 5
1.2 La répartition des vitesses des vents en km/h (1981-2022) (Source : Nasa Power Satellite). 6
1.3 La répartition des pluies mensuelles interannuelles de la station pluviométrique 020509 (1981-2022). 7

2.1 Les paramètres hydro-morphométriques du bassin d'Oued EL kerma 12
2.2 Les paramètres Hypsométriques de la zone d'étude. 13
2.3 Les caractéristiques altimétriques du bassin versant. 14
2.4 Pente moyenne du bassin versant d'Oued El Kerma 16
2.5 Indice de pente global pour le bassin d'Oued EL Kerma 17
2.6 Classification des reliefs d'après ORSTOM,1963. 18
2.7 Résultats de calcul des pentes et la dénivelée spécifique (bassin d'Oued EL Kerma) 18
2.8 La densité de drainage, hydrographique et le coefficient de torrentialité pour le bassin d'Oued EL Kerma 20
2.9 Résultats de calculs de temps de concentration 22
2.10 Paramètres hydrographiques d'Oued EL Kerma. 22
2.11 Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued EL Kerma. 23
2.12 Identification de la station pluviométrique. 24
2.13 La série des pluies journalières maximales. 25
2.14 les paramètres statistiques de la série 25
2.15 Résultats d'ajustement à la loi de GUMBEL de la station 020509 26
2.16 Comparaison des caractéristiques de la loi de GUMBEL et de l'échantillon. . . . 27
2.17 Résultats d'ajustement à la loi de Galton de la station 020509 27
2.18 Comparaison des caractéristiques de la loi de Galton et de l'échantillon. 28
2.19 Résultat de Test χ^2 29
2.20 Pluies et intensités de courtes durées pour des différentes périodes de retour . . 30
2.21 Valeurs du coefficient de ruissellement C 32
2.22 Valeurs du paramètre P_0 (Source :Boutoutaou D. 2008) 34
2.23 Valeurs des coefficients A, B et n. 35
2.24 Débits de crue du BV Oued EL Kerma par les formules empiriques (m^3/s) . . . 35
2.25 Valeurs retenus du débits de crue du BV Oued EL Kerma (m^3/s) 35
2.26 Coefficients de forme de l'hydrogramme de crue δ. 36
2.27 les valeurs du temps de base, montée et décrue. 36
2.28 Les valeurs des débits pour différentes périodes de retour en fonction du temps. . 36
2.29 Évaluation du coefficient de perméabilité. 38

3.1 Les valeurs du coefficient de rugosité 'n', (Chen et Cotton, 1986) 50
3.2 Revanches utilisées (Degoutte, 2012) 51

3.3 Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés (Degoutte, 2012). 51
3.4 Principaux paramètres hydrauliques pour l'ensemble des stations d'Oued EL Kerma (Source :Logiciel HEC-RAS). 58

4.1 Dimensions de l'aménagement d'oued EL Kerma (canal en béton) 65
4.2 Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en béton d'Oued EL Kerma (Source :Logiciel HEC-RAS). 66
4.3 Devis de la variante canal en béton armé. 68
4.4 Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné d'Oued EL Kerma. 70
4.5 Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en gabion d'Oued EL Kerma (Source :Logiciel HEC-RAS). 71
4.6 Devis de la variante canal en gabion. 73
4.7 Dimensions de l'aménagement d'oued EL Kerma (canal en enrochement) 74
4.8 Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en enrochement d'Oued EL Kerma (Source :Logiciel HEC-RAS). 74
4.9 Devis de la variante canal en enrochement. 76

5.1 Détails de la variante adoptée 79

6.1 Engins utilisés. 88
6.2 Devis de la variante canal en gabion. 88
6.3 Liste des opérations avec leurs durées pour la réalisation des endiguements . . . 91

LISTE DES ABRÉVIATIONS :

— **S :** Surface (m^2) ;
— **ANRH :** Agence National des Ressources Hydriques ;
— **BV :** Bassin Versant ;
— *Ca :* Coefficient d'allongement ;
— **Cp :** Coefficient de pointe ;
— **Ct :** Coefficient de torrentialité ;
— **DCP :** date de commencement au plus tôt ;
— **DCPP :** date de commencement au plus tard.
— **DFP :** date de finition au plus tôt ;
— **Dd :** Densité de drainage Km/Km^2 ;
— **DFPP :** date de finition au plus tard ;
— **Ds :** le transport solide en ($t/Km^2/an$) ;
— **F :** Nombre de Froude ;
— **g :** Accélération due à la gravité (m/s^2)
— **HEC-RAS :** Hydrologic Engineering Center's River Analysis System ;
— **Ic :** Pente du talweg principale (%) ;
— **Im :** Pente moyenne du bassin versant m/Km ;
— **Imoy :** Pente moyenne du cours d'eau m/Km ;
— **Ip :** Indice de pente de Roche % ;
— **Kc :** Indice de compacité ;
— **Le :** Lamme d'eau écoulée (mm)
— **MNT :** Modèle Numérique de Terrain ;
— **n :** Coefficient de rugosité de Manning ;
— **O.R.S.T.O.M :** Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer ;
— **P :** Périmètre (Km) ;
— **P.E.R.T :** Program Evaluation and Review Technical ;
— **Pj.max :** Pluie maximal journalière (mm) ;
— **Qmax :** Débit maximal de la crues (m3/s) ;
— **Qmoy :** Débit moyen de la crues (m3/s) ;
— **Qt :** Débit à l'instant t (m^3/s) ;
— **R :** Rayon hydraulique (m)
— **SIG :** Système d'Information Géographique ;
— **Sm :** Surface mouillée (Km^2)

— **Ta :** désigne la dégradation spécifique en $(T/Km^2/an)$;
— **Tb :** Temps de base $(heures)$;
— **Tc :** Temps de concentration $(heures)$;
— **Td :** Temps de décrue $(heures)$;
— **Tm :** Temps de montée de la crue $(heures)$;
— **TIN :** Triangulated Irregular Network
— **Tr :** temps de réalisation ;
— **Vr :** Vitesse de ruissellèment m^2/s ;
— **1D :** Unidimensionnel ;
— **2D :** Bidimensionnel ;

OUTILS DE TRAVAIL

ArcGIS :

ArcGIS est une suite complète de logiciels de systèmes d'information géographique (SIG) développée par la société américaine ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.). Il comprend trois composants principaux :

- **ArcMap :**Utilisé pour éditer des fichiers au format géodatabase.
- **ArcCatalog :**Facilite la gestion des données en fournissant des informations détaillées sur les objets en cours d'édition. Il sert de système de gestion de base de données (SGBD).
- **ArcToolbox :** Contient un ensemble d'outils pour la transformation des données.

HEC-GeoRAS :

HEC-GeoRAS est une extension pour ArcGIS développée par le Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis. Elle permet de préparer et d'analyser des données géospatiales pour les simulations hydrauliques réalisées dans le logiciel HEC-RAS. Plus précisément, HEC-GeoRAS facilite la création des géométries de modèles hydrauliques (comme les lignes de centre de cours d'eau, les coupes transversales et les zones inondables) ainsi que l'interprétation des résultats dans un environnement SIG, améliorant ainsi la précision des analyses hydrauliques et hydrologiques.

AutoCAD :

AutoCAD est un logiciel de dessin assisté par ordinateur (CAO) développé par Autodesk, largement utilisé pour créer des dessins 2D et 3D précis.

HEC-RAS :

HEC-RAS est un logiciel d'analyse hydraulique conçu pour modéliser les écoulements à surface libre dans les canaux naturels et artificiels, en tenant compte des structures de franchissement. Il simule des écoulements graduellement variables dans des conditions transitoires et calcule les profils dynamiques de la surface de l'eau en tenant compte de divers obstacles le long du cours d'eau (HEC-RAS, 2019).

RAS Mapper :

RAS Mapper est un module intégré au logiciel HEC-RAS, conçu pour la gestion et la visualisation des données géospatiales associées aux modèles hydrauliques. Il permet de créer, analyser et afficher des cartes des résultats de simulation, telles que les limites d'inondation, les profondeurs d'eau, et les vitesses de courant. RAS Mapper utilise des données SIG pour générer des géométries de modèles hydrauliques et afficher des simulations en 2D ou en 3D, facilitant ainsi l'interprétation visuelle des résultats et la prise de décisions dans les études hydrauliques.

HYFRAN :

Le logiciel HYFRAN, développé par l'Institut national de la recherche scientifique - Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE) (Bobée et al., 1999), est conçu pour analyser les données hydrologiques à travers l'ajustement de fonctions de distribution. Il permet de modéliser des événements extrêmes, tels que les crues, en ajustant différentes distributions statistiques aux données observées. Le logiciel utilise le critère d'information bayésien (CIB) pour sélectionner la distribution la plus adaptée. Ce critère évalue la qualité de l'ajustement en tenant compte à la fois de la vraisemblance des données et de la complexité du modèle, favorisant ainsi un compromis optimal entre précision et simplicité.

GanttProject :

GanttProject est un logiciel open source de gestion de projet qui permet de créer des diagrammes de Gantt pour planifier, gérer et suivre des projets. Il aide à visualiser la répartition des tâches, les dépendances entre elles, et les échéances. Avec GanttProject, il est possible de définir des jalons, d'assigner des ressources aux tâches et d'exporter des rapports sous divers formats, tels que PDF ou MS Project. Simple et intuitif, il est utilisé pour une gestion efficace des projets tout en étant accessible gratuitement.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'urbanisation croissante, combinée aux changements climatiques, a exacerbé les risques d'inondations dans de nombreuses régions du monde. En Algérie, la gestion des eaux de ruissellement et des bassins versants est devenue une priorité pour réduire les impacts dévastateurs des crues et protéger les infrastructures ainsi que les populations. Le bassin versant de l'oued El Kerma, situé au nord d'Alger, est une zone particulièrement vulnérable aux inondations en raison de sa topographie, de son climat méditerranéen et de la forte densité urbaine environnante. Ce mémoire s'inscrit dans une démarche visant à analyser en profondeur la situation hydrologique de cette région et à proposer des aménagements adaptés pour minimiser les risques d'inondations.

La première partie de ce travail se concentre sur la description détaillée de la zone d'étude, mettant en avant les caractéristiques géographiques, géologiques et climatiques du bassin versant de l'oued El Kerma. Cette analyse est essentielle pour comprendre les mécanismes hydrologiques spécifiques à cette région, et notamment la manière dont les eaux de ruissellement sont influencées par les reliefs et les conditions météorologiques. Une attention particulière est accordée à la sismicité de la zone et à son occupation du sol, des facteurs qui amplifient la vulnérabilité aux inondations.

La seconde partie de l'étude porte sur l'analyse hydrologique et hydraulique du bassin versant. À travers diverses méthodes de modélisation et de simulation, le comportement des écoulements d'eau est étudié pour différents scénarios climatiques, permettant de cartographier les zones à risque et de déterminer les débits de crue potentiels. Les simulations sont réalisées en utilisant des outils tels que HEC-RAS, qui permettent de visualiser en 2D et 3D les dynamiques des eaux de surface et de mieux anticiper les zones inondables.

Enfin, plusieurs variantes d'aménagement sont proposées dans le but de protéger la région contre les inondations. Ces propositions incluent l'aménagement de canaux en béton, en gabion ou en enrochement, chacun ayant des avantages spécifiques en termes de coût, d'efficacité et de durabilité. Une évaluation détaillée des impacts de ces infrastructures est réalisée, afin de choisir la solution la plus adaptée aux besoins locaux.

Chapitre 1

DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

1.1 Introduction

Le premier chapitre de cette étude donne une vue d'ensemble du bassin versant de la zone d'étude, offrant des indications géographiques et physiographiques fondamentales pour la compréhension des mécanismes hydrologiques sous-jacents. En effet, des paramètres tels que l'altitude, la pente et la forme du bassin versant, combinés à la lithologie, fournissent des informations sur le type de réponse hydrologique. Cette analyse approfondie de la configuration géographique et des caractéristiques physiques du bassin versant nous permettra de mieux comprendre les processus hydrologiques en jeu.

1.2 Description De La Zone D'étude

L'aire d'étude est définie par le bassin de l'oued Karma, qui est une région caractérisée par une succession de zones rurales à faible densité, et des zones urbaines fortement habitées. Le bassin occupe les hauts quartiers résidentiels d'Alger (Ben Aknoun et El Achour) au Nord et les quartiers populaires de Tixeraine et d'Oued Belhadj au Sud.

1.3 Le Bassin Versant De L'oued EL Kerma

1.3.1 Situation Géographique

Le bassin de l'oued Karma est situé au Nord d'Alger, et fait partie du bassin versant Côtier Algérois codé 02 par l'ANRH. Le bassin de l'oued Karma est limité :

- Au Nord : par les communes Bouzareah et de Beni Messous ;
- À l'Ouest : par les communes de Ouled Fayet, Souidania et Rahmania ;
- À l'Est : le bassin est limité par les communes de Hydra et Birkhadem, et Gué de Constantine ;
- Au Sud : par les communes de Birtouta et Baba Ali. Dans certaines communes, on assiste à une forte urbanisation et à un développement de constructions telles que les communes de Saoula et El Achour.

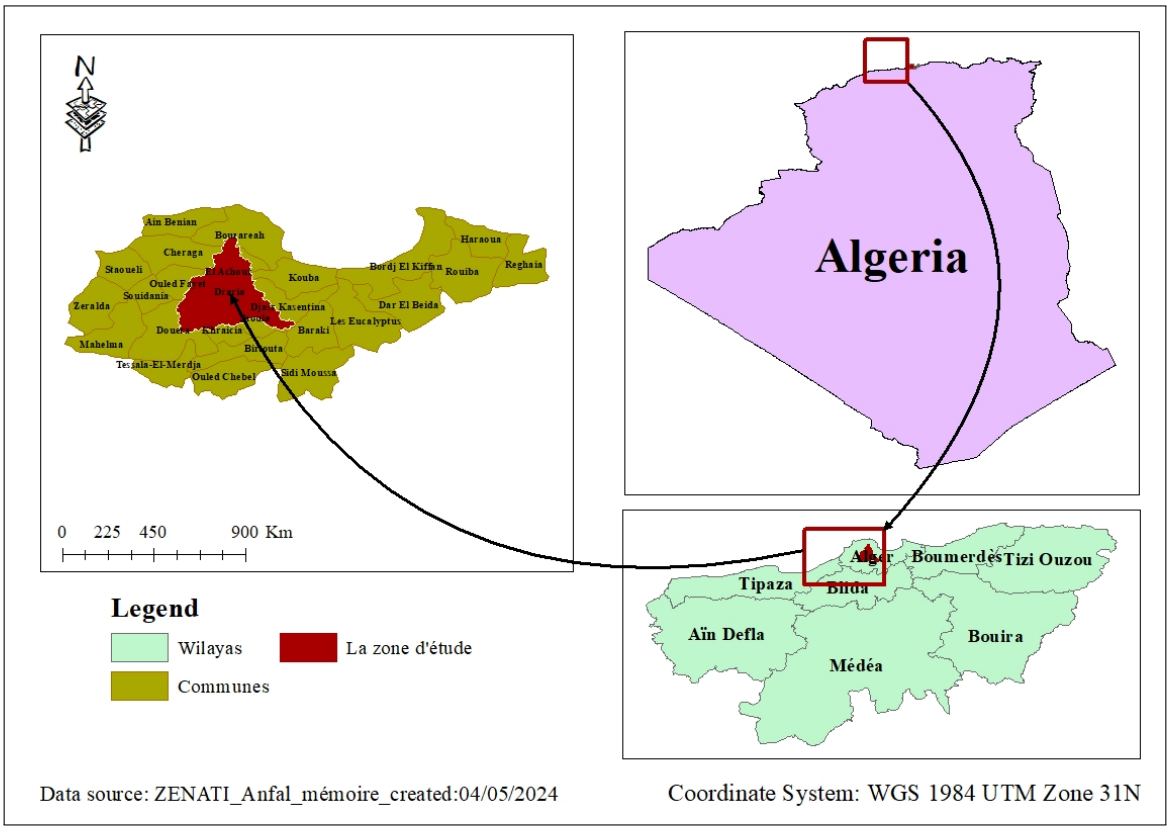


FIGURE 1.1 – La situation de la zone d'étude au sein des wilayas et des communes

1.3.2 La Géologie

Géologie Régionale

La zone d'étude est située dans le bassin de l'Algérois, cette région fait partie de la zone côtière constituée généralement de quaternaire récente et d'alluvions. Elle est comprise dans le grand ensemble géologique de l'Algérie du Nord avec au centre la plaine de Mitidja. On distingue ainsi deux entités géologiques :

- Au Nord le Sahel d'Alger qui s'étend sur le massif de Bouzareah constitué essentiellement par des roches sédimentaires métamorphisées au cours de l'ère primaire, et la rive gauche d'El Harrach, cette région est constituée essentiellement de calcaires gréseux et de marnes jaunes d'Age Plaisancien
- Vers le Sud, la région fait partie de l'Atlas Blidéen, qui est un vaste massif d'age crétacé, ou il y a alternance d'argile et de graviers.

Géologie Du Bassin De L'oued Karma

Les variations verticales de faciès de la base vers le sommet se présentent comme suit :

- **Les miocènes et roches plus anciennes** :Ces formations géologiques se trouvent principalement au cœur de l'anticlinal du Sahel, sous le bassin de la Mitidja, et affleurent parfois dans l'Atlas, sur la bordure sud du bassin. Le Miocène est caractérisé par des marnes contenant des lentilles de calcaire d'une épaisseur variant de 40 à 50 mètres, appartenant au Vindobonien.
- **Le Plaisancien** : Cet étage est dominé par des marnes bleues, avec des bancs de grés présents localement. Sous le Sahel et au nord de la Mitidja, il peut atteindre une épaisseur

considérable, estimée à environ 100 mètres. Cependant, cette épaisseur diminue rapidement en direction du sud. Les affleurements de marnes à la surface sont principalement visibles dans les collines du Sahel.

- **Villafranchien (Calabrien)** : La formation d'El-Harrach se compose d'une séquence relativement homogène d'argiles plastiques jaunes ou grises, parfois légèrement caillouteuses, et contenant de rares lentilles de graviers d'une épaisseur de 2 à 6 mètres. En raison de la présence de ces graviers, la formation d'El-Harrach a parfois été confondue avec la formation alluviale sus-jacente, qui est principalement caillouteuse.
- **Dépôts récents** :Ces dépôts constituent une partie relativement mineure du remplissage du bassin de la Mitidja. Ils incluent les sables dunaires, les dépôts du piémont de l'Atlas, ainsi que les sables et graviers provenant des lits des oueds. Cette formation est composée de sables éoliens meubles ou de sables dunaires d'une épaisseur de 20 à 40 mètres, associés à des graviers et des couches fossilifères consolidées ou cimentées. Le piémont de l'Atlas est couvert de débris composés de gros éléments anguleux dans une matrice de limons argileux.

1.3.3 Occupation Du Sol

L'étude des plans d'occupation des sols permet d'apprécier les différentes zones aptes à l'urbanisation et les espaces à l'extension urbanistique.
L'exploitation des POS a montré que notre zone d'étude englobe les POS suivants :

1- UF2 : Zone Draria et Saoula ;

2- UF3 : plan d'occupation des sols en amont de Ben Aknoun ;

3- UF4 : zone de Tixeraine ;

4- UF5 : Zone El achour et Draria ;

Ainsi les terrains qui longent l'oued karma sont de trois types :

- Terrain privé : sont des terrains situés en particulier à Tixeraine ;
- Terrain étatique ;
- EAC : les terrains agricoles qu'on trouve à Saoula rive droite de l'oued karma ;
- Domaine public hydraulique : sont des servitudes de l'oued qui sont situées à proximité de l'oued mais parfois mal définis.

1.4 La Sismicité

En ce qui concerne la sismicité, l'Algérie, étant située dans une zone de convergence de plaques, est caractérisée par une forte activité sismique. Au fil de son histoire, le pays a connu de nombreux séismes destructeurs. Le territoire national est divisé en cinq zones de sismicité, allant de la moins à la plus intense, comme décrit ci-dessous :

Zone 0 :sismicité négligeable ;

Zone I :sismicité faible ;

Zone II.a et II.b :sismicité moyenne ;

Zone III :sismicité élevée.

La région d'Alger présente une sismicité modérée, mais l'intensité reste significative, comme indiqué en rouge dans la figure présentée, étant classée en Zone III.

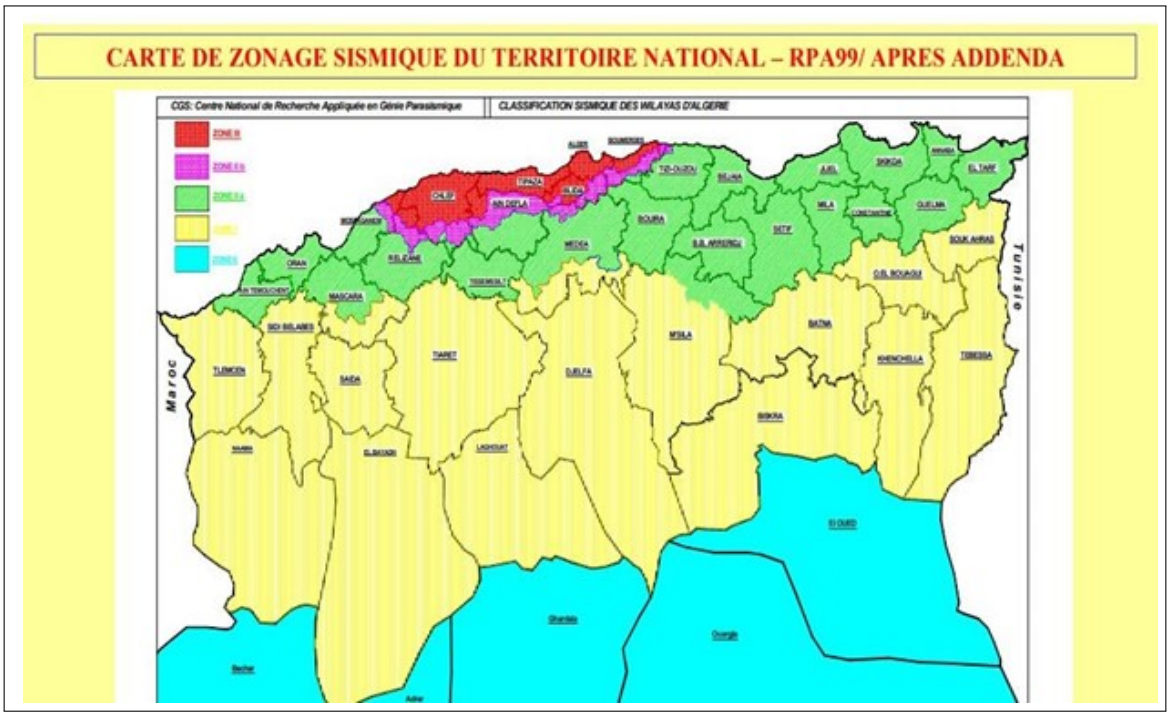


FIGURE 1.2 – Classification sismique des wilayas d'Algérie (Addenda, 2003).

1.5 Situation Climatique

Le bassin de l'oued Karma, est caractérisé par un climat méditerranéen semi-aride à subhumide.

1.5.1 La Température

La température moyenne annuelle au bassin d'oued el kerma est de 17.43 °C, Les températures extrêmes enregistrées sont 6°c et 30°c localisées en février et en mois d'aout atteintes.

TABLE 1.1 – La répartition mensuelle des températures (1981-2022) (Source : Nasa power satellite).

Mois	**sept**	**oct**	**nov**	**dec**	**janv**	**fév**	**mars**	**avril**	**mai**	**juin**	**juil.**	**aout**
Tmin (C°)	21.05	16.48	12.03	8.70	6.92	6.17	9.83	12.51	15.55	19.64	24.06	25.17
Tmoy (C°)	23.49	19.15	13.86	10.58	9.16	9.82	12.03	14.62	18.63	23.39	27.09	27.31
Tmax (C°)	26.14	22.06	16.15	14.12	11.48	12.70	15.23	16.62	21.09	26.18	29.18	30.11

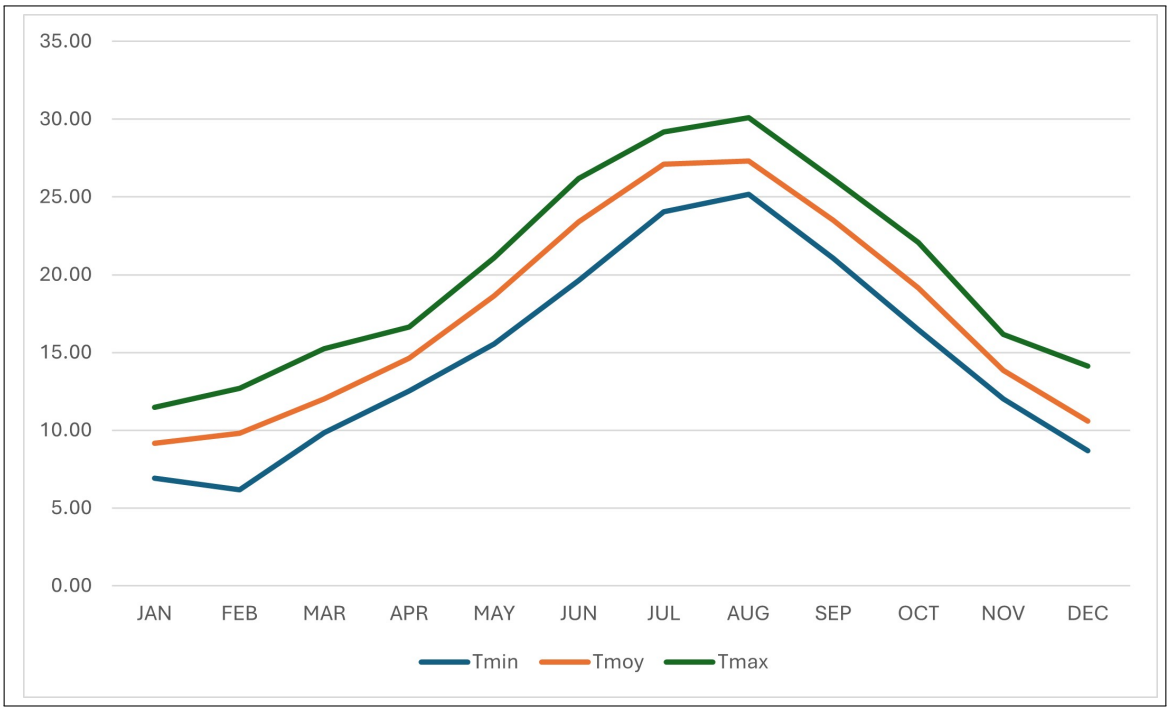


FIGURE 1.3 – Courbes de répartition mensuelle des températures (1981-2022).

1.5.2 Vitesse Du Vent

La vitesse horaire moyenne du vent au bassin d'oued el kerma connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année,d'après les mesures de Nasa power satellite pour la période (1981-2022) qui sont représentées ci-dessous :

TABLE 1.2 – La répartition des vitesses des vents en km/h (1981-2022) (Source : Nasa Power Satellite).

Mois	**sept**	**oct**	**nov**	**dec**	**janv**	**fév**	**mars**	**avril**	**mai**	**juin**	**juil.**	**aout**
Vmin (km/h)	4.46	4.21	5.25	4.20	4.95	4.40	5.05	5.13	4.85	4.33	4.34	4.59
Vmoy (km/h)	6.28	6.78	7.43	7.49	7.49	7.46	7.15	6.99	6.47	5.67	5.55	5.58
Vmax (km/h)	8.45	10.03	10.08	10.01	11.30	10.08	10.24	8.95	9.04	7.58	8.33	7.16

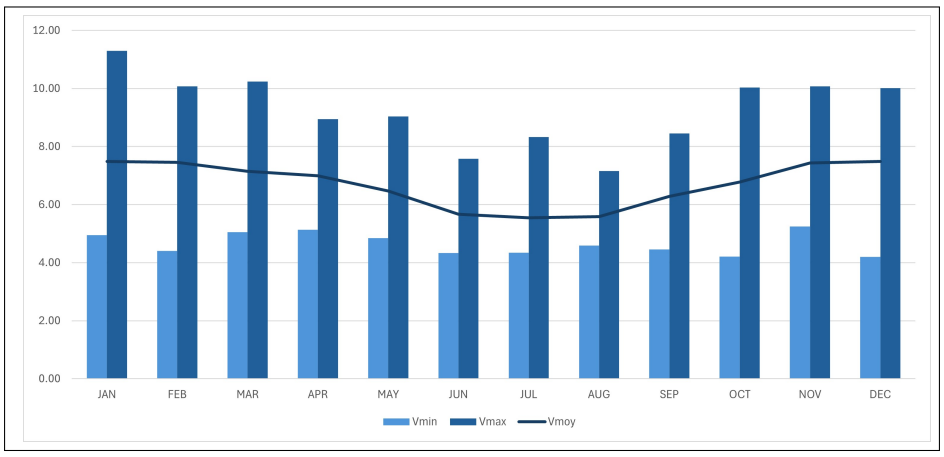


FIGURE 1.4 – Répartition des vitesses des vents en km/h (1981-2022).

1.5.3 Les Précipitations

Les précipitations peuvent être décrites comme l'ensemble des eaux météorologiques captées par un bassin versant ou une surface délimitée. La hauteur de précipitation représente l'épaisseur de la couche d'eau qui se formerait sur une surface plane si toutes les précipitations restaient à l'état liquide (Touaibia, 2015).

Nous avons pris la station pluviométrique BIRMANDREIS « 020509 », dont les données sont récupérées de l'ANRH-Alger.

TABLE 1.3 – La répartition des pluies mensuelles interannuelles de la station pluviométrique 020509 (1981-2022).

Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	annuel
Pmoy(mm)	21.88	32.94	37.14	32.29	29.16	22.21	22.48	24.35	14.56	8.69	2.2	4.87	252.78
Pmoy(%)	8.66	13.03	14.69	12.78	11.54	8.78	8.89	9.63	5.76	3.44	0.87	1.93	100

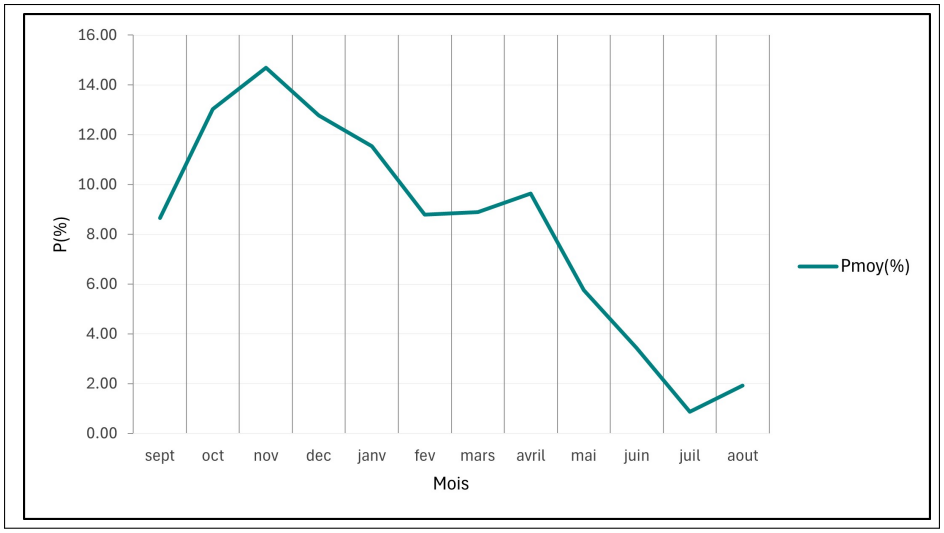


FIGURE 1.5 – Évolution de la pluviométrie mensuelle interannuelles (1981-2022).

1.6 Conclusion

Ce chapitre introductif sur la zone d'étude Oued EL Kerma fournit une compréhension complète de la région sous tous ses aspects, y compris le climat, la topographie et d'autres facteurs pertinents. Ces connaissances fondamentales permettent d'identifier les causes sous-jacentes des inondations, qu'elles proviennent des oueds, des plaines ou de leurs interactions. Pendant les inondations, cette analyse devient essentielle pour prédire le comportement de la région et aider à anticiper les risques potentiels. En outre, elle permet d'évaluer les dommages et offre un aperçu préliminaire des actions à envisager avant d'entamer des études hydrologiques et hydrauliques détaillées.

Chapitre 2

ÉTUDE HYDROLOGIQUE

2.1 Introduction

L'hydrologie est l'étude scientifique du cycle de l'eau et des processus d'échange entre l'atmosphère et les autres systèmes environnementaux. L'atmosphère, la surface de la Terre et son sous-sol sont tous soumis aux mêmes processus.

L'objectif de l'étude hydrologique est d'analyser les mécanismes de formation du ruissellement, de l'écoulement de surface et des inondations. L'étude des écoulements de surface et des inondations repose sur deux facteurs clés : le climat et la géomorphologie. La prise en compte des caractéristiques géomorphologiques du bassin versant permet de déterminer les débits de crue pour différentes périodes de retour.

2.2 Caractéristiques Principale Du Bassin Versant

Le bassin versant est défini par un ensemble de paramètres morphométriques. Les combinaisons les plus courantes sont la surface, le périmètre, la forme, la pente et le relief. L'ensemble de ces facteurs a un impact sur les schémas d'écoulement et influe sur la réponse hydrologique.

2.2.1 Caractéristiques Géographiques

Les coordonnées géographiques en coordonnés Lambert de l'exutoire sont les suivantes :

- Longitude :X= 507.116 Km ;
- Latitude : Y = 4059.106 Km ;
- L'altitude : Z = 9 m.

2.2.2 Caractéristiques Morphologiques

L'étude des caractéristiques morphologiques des rivières et des canaux est d'une importance capitale pour la prévision du comportement hydraulique, la conception d'ouvrages efficaces, la gestion des risques d'inondation et la protection de l'environnement. Ces analyses permettent d'assurer la stabilité des infrastructures, d'anticiper les impacts du changement climatique et de maintenir un équilibre entre le développement humain et la conservation des écosystèmes.

La Surface Et Le Périmètre

La surface et le périmètre d'un bassin versant sont d'une grande importance dans le contexte de l'étude des bassins versants. Les bassins versants servent de zone de captage pour les précipitations et l'approvisionnement en eau. La longueur curviligne du bassin versant est un paramètre clé dans cette analyse.

Le bassin d'Oued El Kerma s'étend sur une superficie de **77.38 Km²** délimitée par une ligne de partage des eaux représentant son périmètre qui est évalué à **54.73 Km**. (déterminer en utilisant le logiciel ArcGIS)

La Longueur Du Thalweg Principal

La longueur du thalweg principal à pour valeur : L_{cp}= **14.13** Km

2.2.3 Caractéristiques Géométriques

L'indice De Compacité De Gravelius (K_G) :

La forme du bassin est caractérisée par l'indice de compacité ou indice de Gravelius Il représente le rapport du périmètre du bassin considéré sur celui du cercle de surface équivalent, la formule qui caractérise l'indice de compacité défini par la formule : (Wisler, C. 1959)

$$K_G = \frac{p}{2\pi\sqrt{\frac{s}{\pi}}} = 0.28 \times \frac{p}{\sqrt{\mathrm{S}}} \tag{2.1}$$

Avec :

- K_G : Indice de compacité de Gravelius
- P : le périmètre du BV (Km)
- S : la surface du BV (Km^2)

Pour :

- $K_G = 1.3 \rightarrow$ bassin est compact.
- $1 < K_G < 1.3 \rightarrow$ bassin est moins compact.
- $K_G > 1.3 \rightarrow$ bassin est allongé

Plus la valeur de K_G est élevée, plus le bassin versant est étendu, ce qui se traduit par un temps de parcours plus long pour une goutte d'eau tombant sur le point le plus en amont du bassin versant pour atteindre l'exutoire. Cela conduit en fin de compte à une inondation moins violente. En conséquence, l'indice de compacité est inversement proportionnel au temps de concentration (T_c).

Dans notre cas le bassin versant est caractérisé par un K_G = **1.76** > 1.3 alors il est de forme relativement allongée.

Le Rectangle équivalent Ou Rectangle De Gravelius

Le concept de rectangle équivalent a été développé pour l'analyse géomorphologique des bassins. Il permet de comparer différents bassins en termes d'influence de leur forme sur l'écoulement en attribuant à chaque bassin un rectangle ayant la même surface et le même

périmètre que le bassin étudié. Le rectangle ainsi attribué a le même indice de compacité que le bassin d'origine.

Le périmètre et l'aire du rectangle sont, respectivement, les suivants :

$$P = 2 \times (L_r + l_r) \tag{2.2}$$

$$Et \quad S = L_r \times l_r \tag{2.3}$$

La longueur L_r et la largeur l_r en kilomètres sont obtenues en résolvant les équations du périmètre P et de la surface S :

$$K_G = 0.28 \times \frac{p}{\sqrt{S}} \tag{2.4}$$

À partir des relations (2.2), (2.3) et (2.4), on obtient une équation du second degré qui possède deux solutions L_r et l_r :

$$L_r = \frac{K_G\sqrt{S}}{1.128}\left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G}\right)^2}\right) \tag{2.5}$$

$$l_r = \frac{K_G\sqrt{S}}{1.128}\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G}\right)^2}\right) \tag{2.6}$$

Avec :

- L_r et l_r : la longueur la largeur du rectangle (km)
- K_G : Indice de compacité de Gravelius
- S : la surface du BV (Km^2)

Coefficient D'allongement C_a :

Il est donné par la formule suivante :

$$C_a = \frac{{L_{cp}}^2}{S} \tag{2.7}$$

Avec :

- L_{cp} : longueur du talweg principal
- S : la surface du BV (Km^2)

Ce coefficient fournit des informations sur le comportement hydrologique de la zone étudiée. Un coefficient d'allongement élevé indique un bassin versant plus allongé, ce qui peut influencer la manière dont l'eau s'écoule dans le réseau hydrographique. Il peut en résulter un temps de concentration plus court, mais aussi une réaction plus rapide aux précipitations, ce qui se traduit par des inondations plus rapides.
Les paramètres hydro-morphométriques du bassin versant sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 2.1 – Les paramètres hydro-morphométriques du bassin d'Oued EL kerma

Désignation		Unité	Symbole	Valeur
Superficie		Km^2	S	77.38
Périmètre		Km	P	54.73
Indice de campacité de Gravilus		/	K_G	1.76
				BV est allongé
Longueur de Talweg principale		Km	L_{cp}	14.13
Coefficient d'allongement		/	C_a	2.58
Rectangle équivalent	Longueur	Km	L_r	24.17
	Largeur		l_r	3.20

2.2.4 Étude De Relief

L'impact du relief sur l'écoulement est évident, car de nombreuses variables hydrométéorologiques, dont les précipitations et la température, fluctuent en fonction de l'altitude et de la morphologie du bassin. De plus, la pente exerce une influence déterminante sur la modification de la vitesse d'écoulement.Le relief se détermine-lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants :

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

Courbe Hypsométrique

La carte hypsométrique, générée à partir du modèle numérique de terrain (MNT), révèle que le terrain est principalement bas, avec des élévations atteignant environ **9 mètres** à l'embouchure. En s'éloignant de ce point, les altitudes augmentent progressivement pour atteindre un maximum de **313 mètres**.

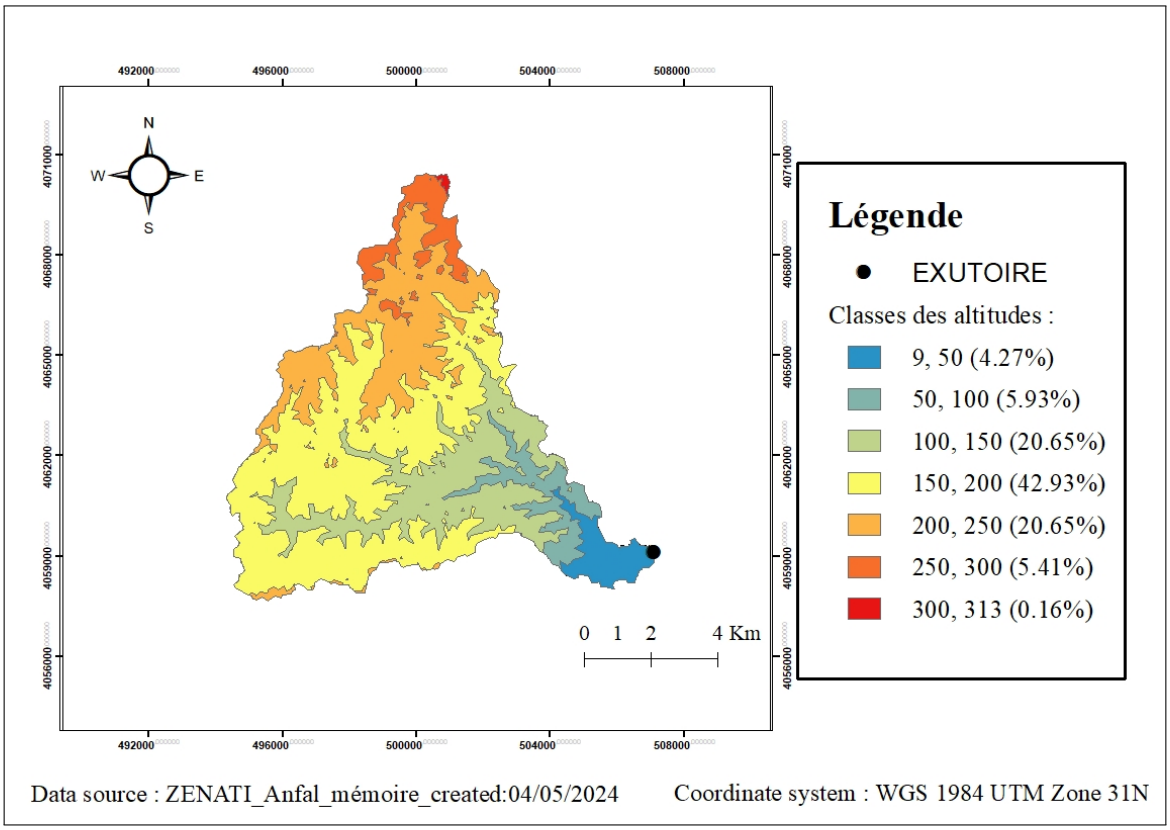


FIGURE 2.1 – Carte hypsométrique de la zone d'étude

La distribution des surfaces élémentaires et leur accumulation en fonction de l'altitude ont été obtenues à l'aide du logiciel ArcGIS et présentées sous forme de tableaux. La distribution de ces surfaces et la courbe hypsométrique sont illustrées dans ce qui suit :

TABLE 2.2 – Les paramètres Hypsométriques de la zone d'étude.

Altitude	**Élévation (m)**	**Surface partielle (km2)**	**Surface partielle (%)**	**Surface cumulées (%)**
9-50	29.5	3.31	4.27	100.00
50-100	75	4.59	5.93	95.73
100-150	125	15.97	20.65	89.79
150-200	175	33.21	42.93	69.15
200-250	225	15.98	20.65	26.22
250-300	275	4.19	5.41	5.57
300-313	306.5	0.12	0.16	0.16

La répartition des surfaces et la courbe hypsométrique sont représentés par le graphe suivant :

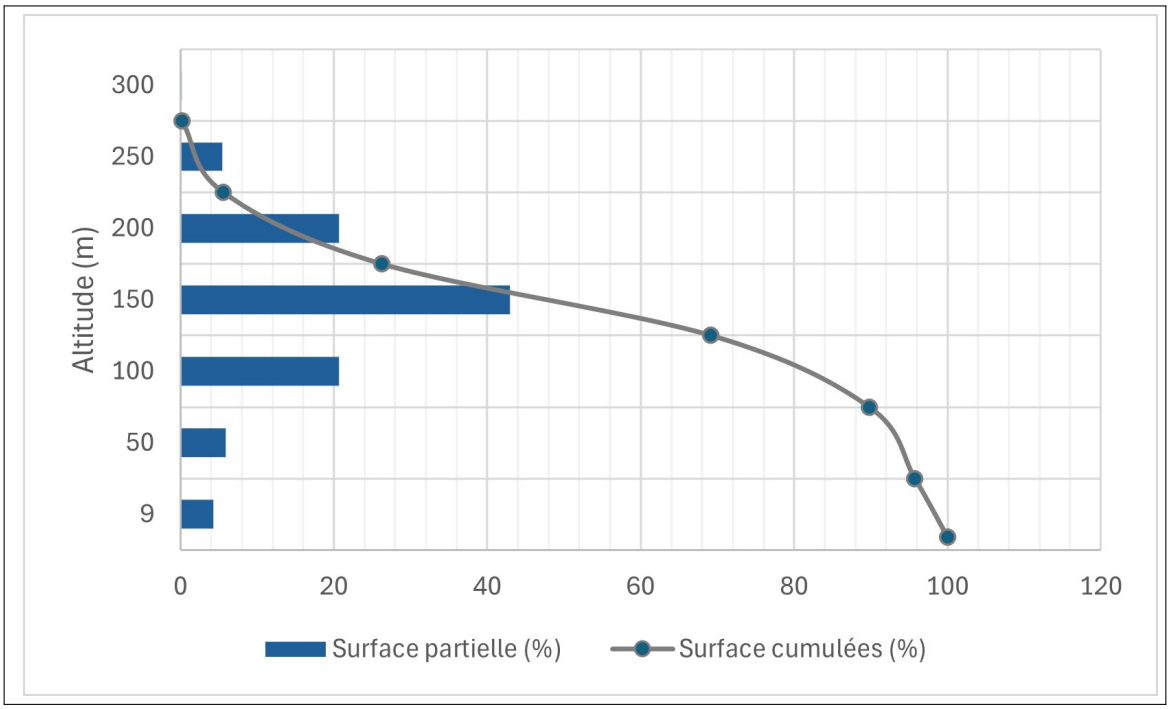


FIGURE 2.2 – Répartition des surfaces et courbe hypsométrique de la zone d'étude.

Détermination Des Altitudes

- **L'altitude maximale :**
  C'est l'altitude la plus forte relevée au cours de la limitation du bassin : Hmax
- **L'altitude minimale :**
  Se situe à l'exutoire du bassin qui représente son point de contrôle : Hmin.
- **L'altitude moyenne :** L'altitude moyenne du bassin est un indicateur significatif qui démontre l'impact de la zonation climatique verticale. Elle est calculée en additionnant le produit des surfaces partielles S_i situées entre les courbes de niveau, et les altitudes moyennes correspondantes H_i.

$$H_{moy} = \sum \frac{S_1 \times H_i}{S} \tag{2.8}$$

  Avec :
  - S_i : surface partielle entre deux courbes de niveau (Km^2) ;
  - H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau consécutives n-1 et n en (m) ;
  - S : Superficie du bassin versant (Km^2).
- **L'altitude médiane « $H_{5\%}$» :** C'est la projection du point correspondant à 5% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.
- **L'altitude médiane « $H_{50\%}$» :** C'est la projection du point correspondant à 50% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.
- **L'altitude médiane « $H_{95\%}$» :** C'est la projection du point correspondant à 95% de la surface cumulée sur la courbe hypsométrique.

Le tableau ci-dessous présente les résultats :

TABLE 2.3 – Les caractéristiques altimétriques du bassin versant.

Altitude(m)	**Hmin**	**Hmoy**	**Hmax**	**H5%**	**H50%**	**H95%**
	9	168.46	313	287.61	184.93	82.26

Les Indices De Pente

- Ces indices visent à décrire les pentes d'un bassin versant, facilitant ainsi les comparaisons et les classifications.
- La pente d'un bassin versant a une influence directe sur le débit de pointe lors d'une tempête de pluie.
- La carte des pentes illustre la topographie générale de la région, où la majorité de la zone est dominée par des pentes raides. Près de l'exutoire, les pentes deviennent très douces, créant un relief plat (Figure 2.3).
- En revanche, la carte des courbes de niveau représente le relief d'un bassin versant sous la forme d'un système de courbes de niveau équidistantes (Figure 2.4).

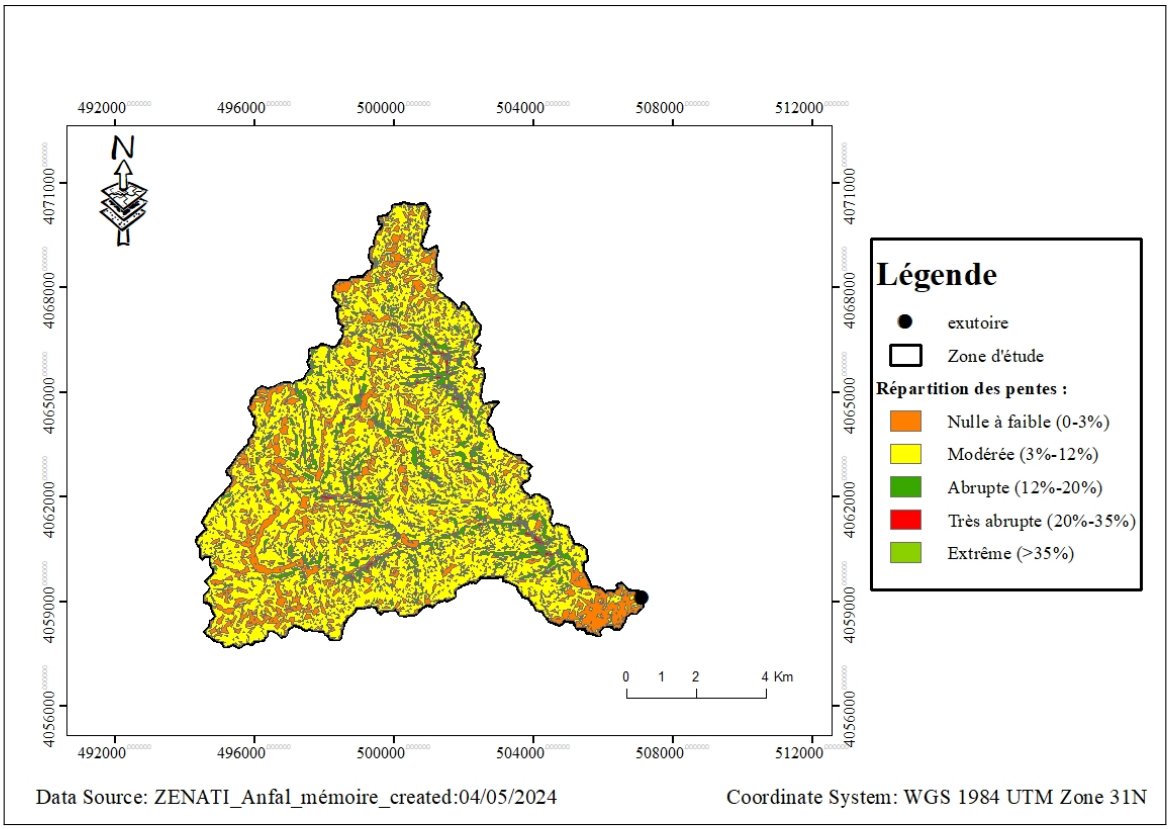


FIGURE 2.3 – Carte des pentes pour la zone d'étude

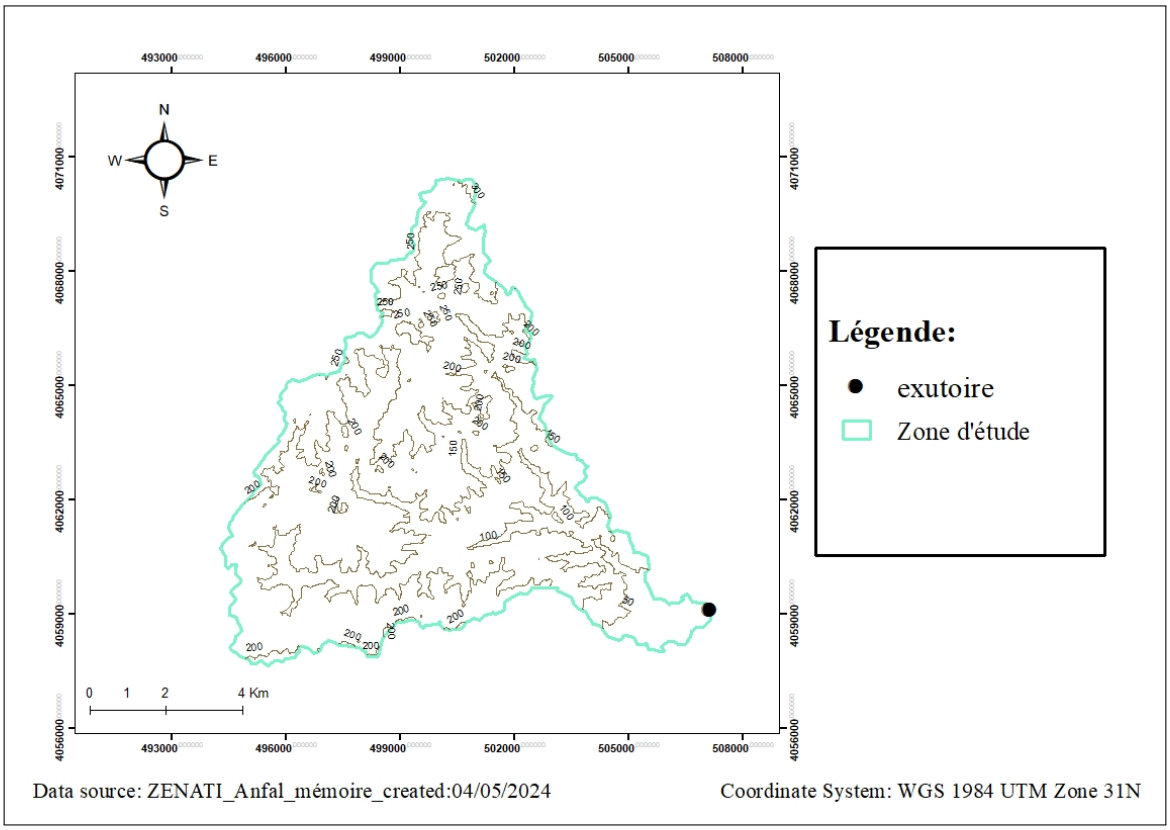


FIGURE 2.4 – Carte des courbes de niveaux de la zone d'étude

1. **La pente du bassin versant «I_{BV}» :**

$$I_{BV} = \frac{(H_{max} - H_{\min})}{L_{cp}} \tag{2.9}$$

Avec :

- L_{cp} : longueur du cours d'eau principal(km).
- H_{max} et H_{min} : Altitudes maximale et minimale (m).

2. **La pente moyenne du bassin versant «I_{mBV}» :**

$$I_{mBV} = \frac{\Delta H\,(0.5\ L_r + L_2 + L_3 \ldots\ldots + 0.5\ L_n)}{S} \tag{2.10}$$

Avec :

- ΔH : Dénivelés entre deux courbes de niveaux successives (m).
- L_1, L_2, …, L_n : Les longueurs des courbes de niveaux (Km).
- S : Superficie du bassin versant (Km^2).

TABLE 2.4 – Pente moyenne du bassin versant d'Oued El Kerma

Courbes de niveaux	**Longueur** (Km)	**ΔH**	**surface**	I_{mBV}
50	7.17	50	77.38	118.70
100	27.12			
150	66.67			
200	62.27			
250	23.45			
300	1.20			

3. **Indice de pente M. ROCHE «I_p» :** Ip correspond à la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, pondérée par les surfaces comprises entre deux courbes de niveau, Hi et Hi-1. Elle est exprimée par la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L_r}} \sum_{i}^{n} \sqrt{a_i \left(H_i - H_{i-1}\right)} \tag{2.11}$$

Avec :

- L_r : longueur de rectangle équivalent (m) ;
- a_i : représente la fraction de la surface totale S du bassin versant comprise entre 2 courbes de niveau consécutives ;
- H_i et H_{i-1} : la distance entre les courbes de niveau appelée aussi dénivelée.

4. **Indice de pente globale «I_g» :** Cet indice exprime le rapport de la différence des altitudes de fréquence 5% et 95% par la longueur du rectangle équivalent du bassin (Dubreuil. 1965).Il est donné par la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L_r} = \frac{(H_{5\%} - H_{95\%})}{L_r} \tag{2.12}$$

Avec :

- D : Dénivelée entre H5% et H95% en (m) ;
- L_r : Longueur du rectangle équivalent en (m) ;
- $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ sont respectivement les altitudes correspondantes à $S_{5\%}$ et $S_{95\%}$(m)

Cet indice de pente global est utilisé pour classer le relief d'un bassin. Cependant, pour une comparaison plus approfondie et précise du bassin, en termes de relief, il est nécessaire de calculer la dénivelée spécifique.
La classification des reliefs est faite selon le tableau **2.5** :

TABLE 2.5 – Indice de pente global pour le bassin d'Oued EL Kerma

Bassin Versant	H5% (m)	H95% (m)	L (m)	Ig (m/m)
Oued EL Kerma	287.61	82.26	24172	**0.0085**

5. **La dénivelée spécifique «D_s» :** est utilisé pour mettre en œuvre la classification O.R.S.T.O.M. tableau **2.7**, qui délimite les diverses typologies de relief observées dans les bassins versants de différentes étendues. Le gradient spécifique offre une représentation complète du relief du bassin et est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$D_s = I_g \sqrt{S} = D \sqrt{\frac{1}{L}} \tag{2.13}$$

Avec :

- D_s : Dénivelée spécifique (m) ;
- I_g : Indice de pente globale (m/km) ;
- S : Superficie du bassin versant (Km^2).

Table 2.6 – Classification des reliefs d'après ORSTOM,1963.

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.

Les résultats du calcul des indices de pente sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Table 2.7 – Résultats de calcul des pentes et la dénivelée spécifique (bassin d'Oued EL Kerma)

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Pente du bassin versant	I_{BV}	m/Km	**21.51**
Pente moyenne du bassin versant	I_{mBV}	m/Km	**118.70**
Indice de pente globale	I_g	m/m	**0.0085**
Indice de pente de Roche	I_p	%	**10.22**
Dénivelée spécifique	D_s	m	**74.8**
Relief	/	/	**Relief modéré.**

2.2.5 Étude Du Réseau Hydrographique

Le terme « réseau hydrographique » est défini comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, y compris les éléments permanents et temporaires, qui contribuent à l'écoulement de l'eau. On peut affirmer que le réseau hydrographique est l'une des caractéristiques les plus importantes d'un bassin. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes.
Afin de calculer les caractéristiques d'un réseau hydrographique, les talweges sont classés et numérotés selon la méthode de Strahler (1957).

Hiérarchisation Du Réseau

1. **Classification de STRAHLER (1957) :** Cette classification offre une description claire et concise de la progression du réseau hydrographique d'un bassin, en délimitant son évolution d'amont en aval. Les règles suivantes doivent être respectées :
   La classification d'un cours d'eau est basée sur les règles suivantes :
   - Un cours d'eau sans affluents est classé dans l'ordre 1.
   - L'ordre d'un cours d'eau résultant de la confluence de deux cours d'eau d'ordres distincts correspond à l'ordre le plus élevé des deux.
   - lorsque deux cours d'eau du même ordre se rejoignent, l'ordre du cours d'eau formé est augmenté de 1.

   e réseau hydrographique des sous-bassins versants est illustré dans la Figure (2.5).

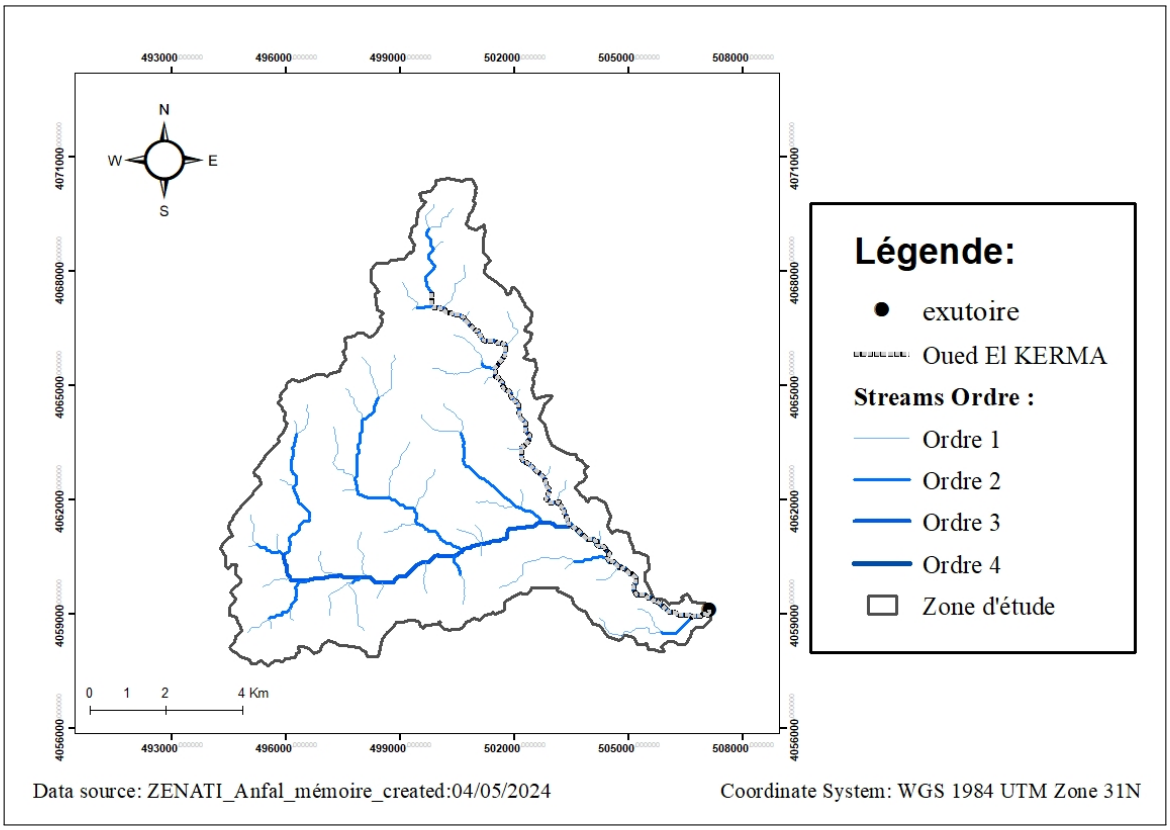


FIGURE 2.5 – Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued EL Kerma

La Densité De Drainage «D_d»

La densité de drainage est définie comme le rapport entre la longueur totale de tous les cours d'eau et la surface du bassin versant. Elle donne une indication sur la dynamique du bassin. Une valeur élevée de cette densité signifie que le réseau hydrographique est relativement dense et que le bassin réagit rapidement à tout événement pluvieux. Cette valeur est exprimée en (km/km^2) et se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^{n} L_i}{S} \tag{2.14}$$

Avec :

- D_d : Densité de drainage en km/km^2 ;
- $\sum_{L_i}$: La somme des longueurs de tous les cours d'eau considérés pour le bassin versant ;
- n : L'ordre le plus élevé dans la classification.
- S : Superficie du bassin versant (Km^2).

La Densité Hydrographique Des Thalwegs élémentaires «F_1» :

La densité hydrographique est définie comme le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface. Elle peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$F_1 = \frac{\sum N_1}{S} \tag{2.15}$$

Avec :

- F_1 : Densité hydrographique km^{-2} ;
- N_1 : Nombre de cours d'eau d'ordre 1 ;
- S : Superficie du bassin versant (Km^2).

Le Coefficient De Torrentialité «C_t»

Le coefficient de torrentialité est défini comme le produit de la densité de drainage et de la fréquence des talwegs élémentaires. Il peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$C_t = D_d \times F_1 \tag{2.16}$$

Avec :

- F_1 : Densité hydrographique km^{-2} ;
- D_d : Densité de drainage en km/km^2 ;

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau suivant :

TABLE 2.8 – La densité de drainage, hydrographique et le coefficient de torrentialité pour le bassin d'Oued EL Kerma

L'ordre le plus élevé n	**S (Km2)**	**$\sum$ Li (Km)**	**Dd**	**F1**	**Ct**
4	77.38	92.42	1.20	1.34	1.61

Temps De Concentration «T_c»

Le temps de concentration (Tc)est défini comme la période écoulée entre le début des précipitations et l'atteinte du débit maximal à l'exutoire du bassin versant. Il correspond au temps nécessaire pour que l'eau s'écoule du point le plus éloigné jusqu'à l'exutoire (Nicolas, 2007).
Il est composé de trois termes différents :

- Th :Temps d'humectation, c'est le temps nécessaire à l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne ruisselle ;
- Tr :Temps de ruissellement, ou d'écoulement, c'est la durée nécessaire à l'eau pour s'écouler à la surface ou dans les premiers horizons du sol jusqu'à un système de collecte (cours d'eau naturel, collecteur) ;
- Ta :Temps d'acheminement,c'est le temps mis par l'eau pour se déplacer dans le système de collecte jusqu'à l'exutoire. Tel que :

$$T_c = \max(\sum(T_n + T_s + T_a))$$

Dans la pratique, le temps de concentration peut être dérivé de mesures sur le terrain ou estimé à l'aide de formules empiriques. En l'absence de formule spécifique pour la région,l'estimation du temps de concentration est obtenue grâce à des formules empiriques suivantes :

Formule De GIANDOTTI

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5 \times L_{cd}}{0.8 \times \sqrt{H_{max} - H_{min}}} \tag{2.17}$$

Avec :

- T_c : Temps de concentration en h ;
- S : Surface du BV en Km^2 ;
- L_{cd} : longueur du cours d'eau principale en Km ;

- H_{max} : Altitude maximale du BV en m ;
- H_{min} : Altitude minimale (exutoire) en m.

Champ d'application : Dans les bassins versants de taille moyenne à grande, où les conditions hydrologiques et topographiques sont variées.

Formule De VENTURA

$$T_c = 0.1275 \times \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{I_{BV}}} \tag{2.18}$$

Avec :

- T_c : Temps de concentration en h ;
- S : Surface du BV en Km^2 ;
- I_{BV} :Pente du bassin versant en m/m ;

Champ d'application : Dans des bassins versants naturels ou légèrement modifiés

Formule De SCS (Soil Conservation Service, USA)

$$T_c = \left(\frac{0.87 \times {L_{cp}}^3}{H_{moy} - H_{min}} \right)^{0.385} \tag{2.19}$$

Avec :

- T_c : Temps de concentration en h ;
- L_{cd} : longueur du cours d'eau principale en Km ;
- H_{max} : Altitude maximale du BV en m ;
- H_{min} : Altitude minimale (exutoire) en m.

Champ d'application : Dans les bassins versants naturels ou peu modifiés de taille petite à moyenne, avec des conditions de relief modéré.

Formule D'ANRH

Pour les conditions physiographique des bassins versants de l'Algérie la Formule du temps de concentration développé par L'ANRH est la suivante : (D.Boutoutaou 2014)

$$T_c = 1.7 \left(\frac{S \times L_{cp}}{\sqrt{I}} \right)^{0.19} \tag{2.20}$$

Avec :

- T_c : Temps de concentration en h ;
- L_{cp} : longueur du cours d'eau principale en Km ;
- S : Surface du BV en Km^2 ;
- I : Pente des cours d'eau en (%) ; $I = \Delta H_{max}/L_{cp}$

Les résultats des calculs du temps de concentration pour les différentes formules sont présentés dans le tableau suivant :

TABLE 2.9 – Résultats de calculs de temps de concentration

Formules utilisées	**Temps de concentration en heures**
Formule de GIANDOTTI	4.04
Formule de VENTURA	7.65
Formule de SCS	2.86
Formule de ANRH	3.59

Les formules utilisées sont celles préconisées pour le nord de l'Algérie, qui donnent des résultats disparates. La valeur du temps de concentration retenue est la valeur minimale des valeurs proches. Les valeurs extrêmes, qu'elles soient nettement grandes ou petites, ont été exclues, ne laissant subsister que les valeurs centrales.

Donc on préfère choisir la valeur qui est estimé par la formule d'**ANRH** qui est recommandée pour les bassins versants de l'Algérie. T_c **= 3.59 heures**

Vitesse De Ruissellement «V_r»

Le ruissellement est défini comme l'écoulement de l'eau météorologique qui a échappé à l'infiltration, à l'évaporation et au stockage de surface par gravité à la surface du sol, en suivant la pente du terrain et dans le réseau micro-hydrographique. En d'autres termes, il s'agit du rapport entre la longueur couverte et le temps de concentration.

$$V_r = \frac{L_{cp}}{T_c} \tag{2.21}$$

- V_r : Vitesse de ruissellement en Km/h ;
- L_{cp} : longueur du cours d'eau principale en Km ;
- T_c : Temps de concentration en h .

Les résultats des paramètres hydrographiques sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 2.10 – Paramètres hydrographiques d'Oued EL Kerma.

Paramètre	**Symbole**	**Unités**	**Valeurs**
Densité de drainage	D_d	Km/km^2	1.20
Densité hydrographique	F_1	km^{-2}	1.34
Coefficient de torrentialité	C_t	/	1.60
Temps de concentratio	T_c	$heures$	3.59
Vitesse de ruissellement	V_r	Km/h	3.49

Ci-dessus le tableau 2.11 qui résume les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued EL Kerma :

TABLE 2.11 – Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued EL Kerma.

Paramètre		**Symbole**	**Unités**	**Valeurs**
Surface		S	Km^2	77.38
Périmètre		P	Km	54.73
Longueur du thalweg principal		L_{cp}	Km	14.13
Indice de compacité		K_G	/	1.76
Coefficient d'allongement		C_a	/	2.58
Rectangle équivalent	Longueur	L_r	Km	24.17
	Largeur	l_r		3.20
Altitude	Maximale	H_{max}	m	313
	Moyenne	H_{moy}		168.46
	Minimale	H_{min}		9
	Médiane	$H_{5\%}$		287.61
		$H_{50\%}$		184.93
		$H_{95\%}$		82.26
Pente du bassin versant		I_{BV}	m/Km	21.51
Pente moyenne de bassins versant		I_{mBV}	m/Km	118.70
Indice de pente globale		I_g	m/m	0.0085
Indice de pente de Roche		I_p	%	10.22
Dénivelée spécifique		D_s	m	74.73
Densité de drainage		D_d	Km/km^2	1.20
Densité hydrographique		F_1	Km^{-2}	1.34
Coefficient de torrentialité		C_t	/	1.60
Temps de concentration		T_c	$heures$	3.59
Vitesse de ruissellement		V_r	Km/h	3.49

2.3 Étude De Crues

Dans le cadre des projets de protection contre les inondations, la détermination du débit de pointe représente une étape cruciale dans la sélection d'un tracé approprié et la délimitation des zones inondables. Après la délimitation des bassins versants dans la zone d'étude et la caractérisation de leurs attributs, l'objectif de cette étape est d'évaluer les débits de crue pour des périodes de retour allant de 10 à 100 ans.

2.3.1 Études Fréquentielles Des Pluies

Une étude fréquentielle des précipitations implique l'identification d'un modèle fréquentiel qui représente fidèlement le comportement statistique des valeurs extrêmes. Dans cette étude, nous avons choisi la loi d'ajustement statistique, qui est fréquemment utilisée pour ajuster les séries de précipitations maximales et les débits correspondants.

L'analyse Fréquentielles Des Pluies Des Crues Maximale Annuelle Avec La Station Pluviomètrique BIRMANDREIS

Dans cette partie on s'appuie sur les observations de la station fournie par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques **ANRH**, on prend comme base de calcul la station pluviométrique de « BIRMANDREIS » avec une période de 16 années d'observation (1984-1999) .

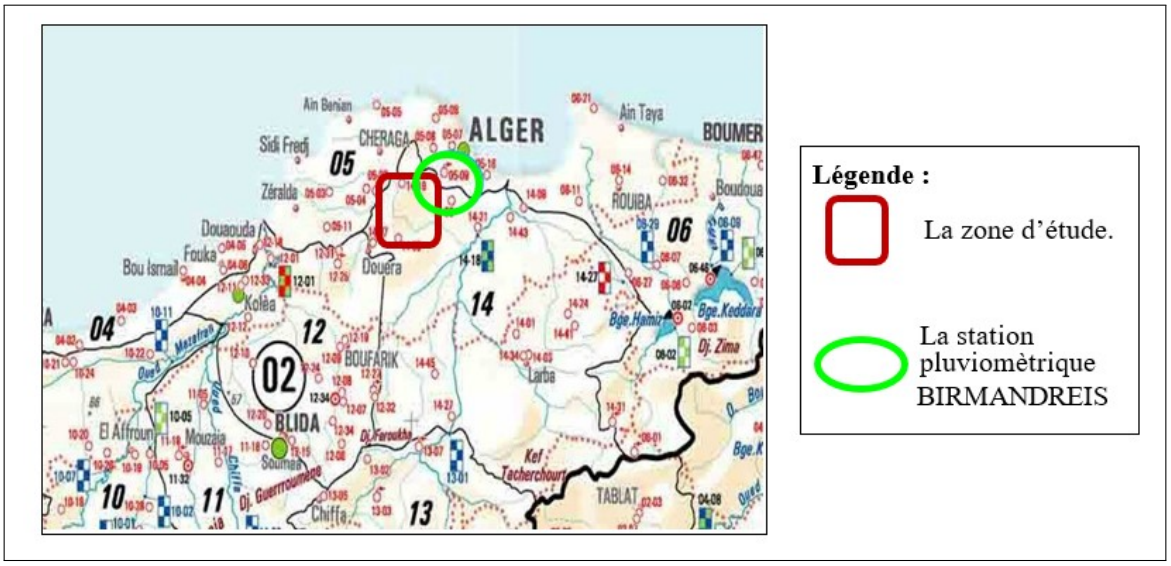


Figure 2.6 – Situation de la station pluviométrique de BIRMANDREIS sur la carte des BVs.

Les caractéristiques de la station sont présentées dans le tableau 2.12 :

Table 2.12 – Identification de la station pluviométrique.

Nom de la station	Code	Organisme	Coordonnées (m)	Altitude (m)	Période
BIRMANDREIS	02-05-09	ANRH	X=531100 Y=382800	140	1984-1999

Le tableau 2.14 représente La série des pluies journalières maximales enregistrées par la station :

TABLE 2.13 – La série des pluies journalières maximales.

Années	**Pjmax(mm)**	**Années**	**Pjmax(mm)**
1984	115	1992	69.4
1985	38.1	1993	69
1986	64	1994	45.4
1987	45.2	1995	75.3
1988	75	1996	57.2
1989	58	1997	58.7
1990	30.5	1998	38.6
1991	55.4	1999	64.5

Et voici Les résultats des paramètres statistiques de la série étudié :

TABLE 2.14 – les paramètres statistiques de la série .

Nombre d'observations	16
Minium	30.5
Maximum	115
Moyenne	60
Ecart-type	19.9
Médiane	58.4

Ajustement De La Série Des Pluies Maximales Journalières

Comme il existe plusieurs méthodes d'ajustement des séries pluviométriques ainsi que celles des débits, l'efficacité d'une méthode d'estimation dépend de :

- La loi de probabilité ;
- La taille de l'échantillon ;
- Certaines caractéristiques de l'échantillon.

Cependant, de nombreuses études comparatives, tant empiriques que théoriques, ont été réalisées pour déterminer dans quelles circonstances une méthode d'estimation est la plus efficace pour une loi donnée.

Les lois d'ajustement choisies sont :

- La loi de GUMBEL (droite de HENRY). ;
- La loi de log-normale (droite de GALTON).

1. **Ajustement de la série à la loi de GUMBEL :**
   La loi de Gumbel est un modèle statistique largement utilisé pour caractériser la distribution des valeurs extrêmes.
   La fonction de répartition de la loi de Gumbel est :

$$F(x) = \exp^{-\exp\left(\frac{(x-x_0}{a}\right)} \tag{2.22}$$

   Avec :
   - a : est le Gradex, qui signifie le gradient de l'exponentiel (paramètre d'échelle) ;

- x_0 : est le paramètre de position (le mode) ;
- a et x_0 ont la même dimension que la variable ;

$$U = -\ln(-\ln(F(x))) = \frac{x - x_0}{a} \tag{2.23}$$

- U : est appelée variable réduite de Gumbel.

Pour ajuster les séries à la loi de Gumbel, le logiciel HYFRANPlus a été utilisé, et les données résultantes sont présentées dans le tableau suivant :

TABLE 2.15 – Résultats d'ajustement à la loi de GUMBEL de la station 020509 .

Periode de Retour	Probabilité de fréquence (q)	Pj max (mm)	Ecart type	Intervalle de confiance 95%
100	0.99	123	19.6	84.2 - 161
50	0.98	112	16.8	78.7 - 145
20	0.95	97.2	13.1	71.4 - 123
10	0.9	86	10.4	65.6 - 106
5	0.8	74.3	7.71	59.2 - 89.4

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

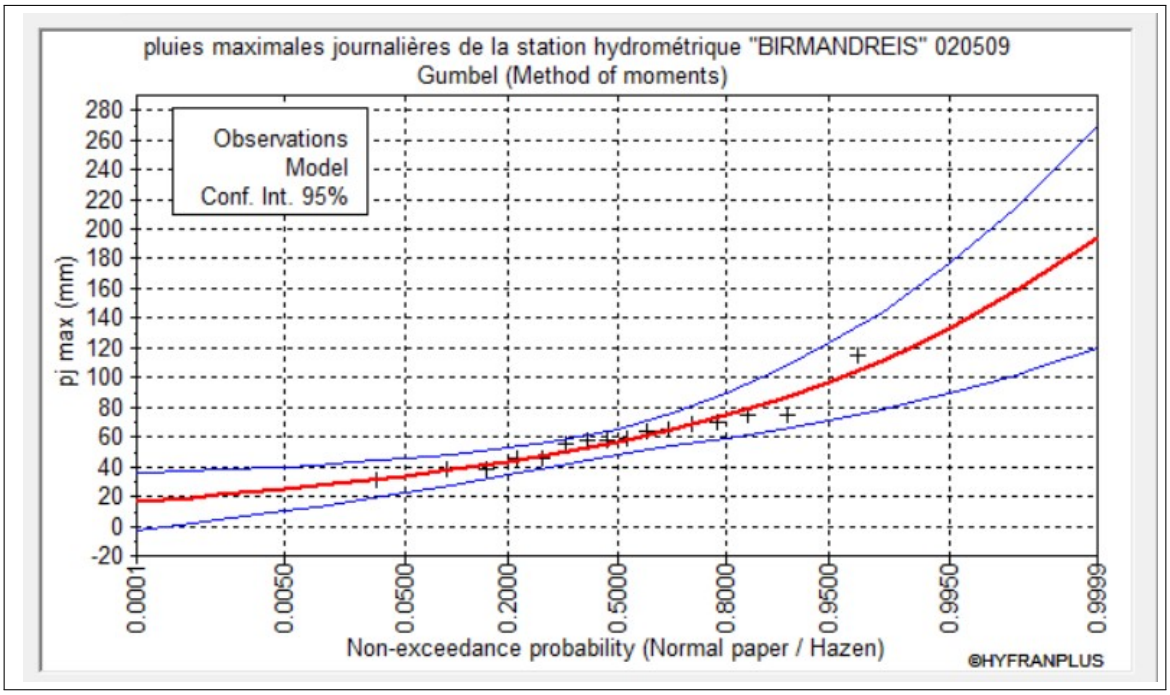


FIGURE 2.7 – Représentation graphique de la loi de GUMBEL de la station 020509.

Nous avons une comparaison des caractéristiques de la loi de GUMBEL et de l'échantillon, dont les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

TABLE 2.16 – Comparaison des caractéristiques de la loi de GUMBEL et de l'échantillon.

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	Aucun	30.5
Maximum	Aucun	115
Moyen	60	60
Écart type	19.9	19.9
Médiane	56.7	58.4
Coefficient de variation Cv	0.333	0.333
Coefficient d'asymétrie Cs	1.14	1.19
Coefficient d'aplatissement Ck	2.40	4.18

2. **Ajustement de la série à la loi Log Normale (Loi de Galton) :**
On dit qu'une variable aléatoire X a une distribution lognormale lorsque : $v = \ln x$ est normalement distribuée. La loi de Galton est dérivée de la loi normale mais est rendue asymétrique par un changement de variable.
En outre, la série a été ajustée à la distribution log-normale à l'aide du logiciel HYFRAN-Plus, et les données résultantes sont présentées dans le tableau 2.17.

TABLE 2.17 – Résultats d'ajustement à la loi de Galton de la station 020509 .

Periode de Retour	Probabilité de fréquence q	Pj max (mm)	Ecart type	Intervalle de confiance 95%
100	0.99	121	19.2	83.3 - 159
50	0.98	111	16.1	79.2 - 142
20	0.95	97.1	12.2	73.1 - 121
10	0.9	86.3	9.54	67.6 - 105
5	0.8	74.9	7.09	61.0 - 88.8

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

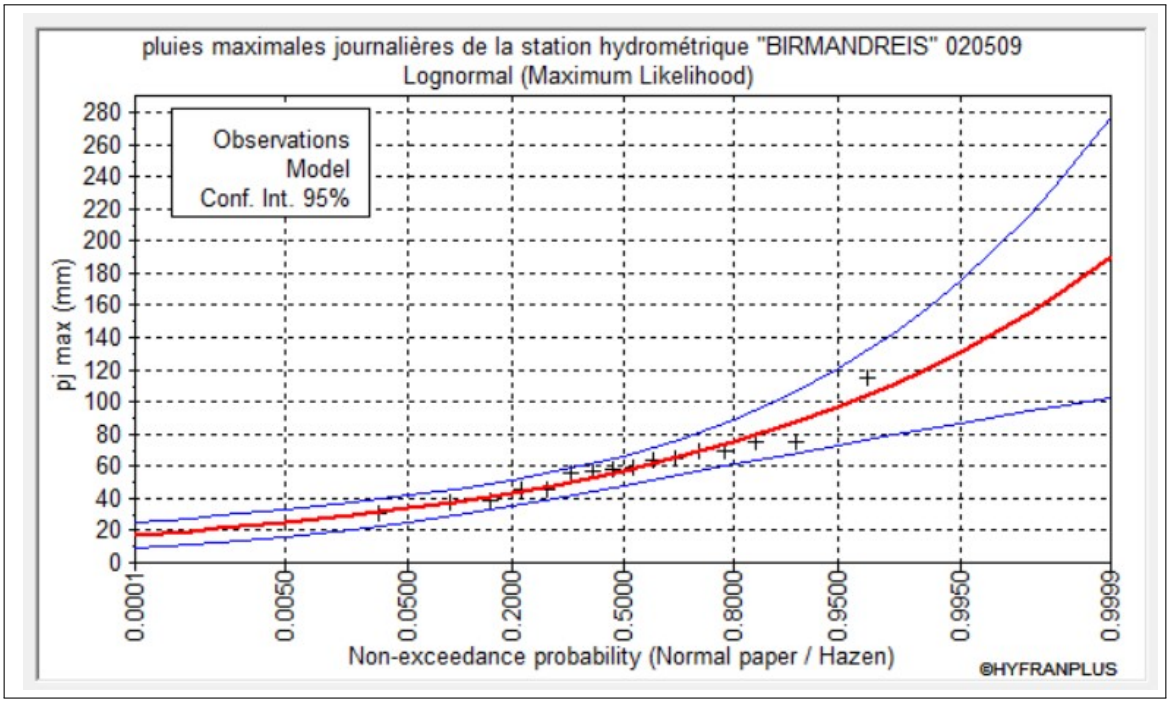


FIGURE 2.8 – Représentation graphique de la loi de Galton de la station 020509.

La comparaison entre les caractéristiques de la loi de Log Normal et de l'échantillon, est montrée dans le tableau suivant :

TABLE 2.18 – Comparaison des caractéristiques de la loi de Galton et de l'échantillon.

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	0	30.5
Maximum	Aucun	115
Moyen	60.1	60
Écart type	19.9	19.9
Médiane	57.1	58.4
Coefficient de variation Cv	0.331	0.333
Coefficient d'asymétrie Cs	1.03	1.19
Coefficient d'aplatissement Ck	4.94	4.18

Choix De La Loi D'ajustement

Il est inévitable que des divergences se produisent entre les fréquences expérimentales des valeurs observées et les fréquences des mêmes valeurs calculées à partir de toute fonction de distribution. Si l'ajustement graphique constitue une étape préliminaire, il ne s'agit pas d'un moyen définitif de sélectionner une distribution théorique. Le test d'adéquation statistique implique une comparaison de l'adéquation de plusieurs lois dans le but d'identifier l'adéquation optimale.
Le test les plus couramment utilisés sont le test du χ^2.

1. **Ajustement graphique visuelle (la méthode visuelle) :**
   LLes figures (2.7) et (2.8) présentent les probabilités empiriques et théoriques des distributions de Gumbel et lognormale, calculées à l'aide du logiciel HYFRANPlus. Une évaluation visuelle des données révèle qu'aucune distribution ne fournit l'ajustement optimal. Par conséquent, nous procédons à une analyse statistique.

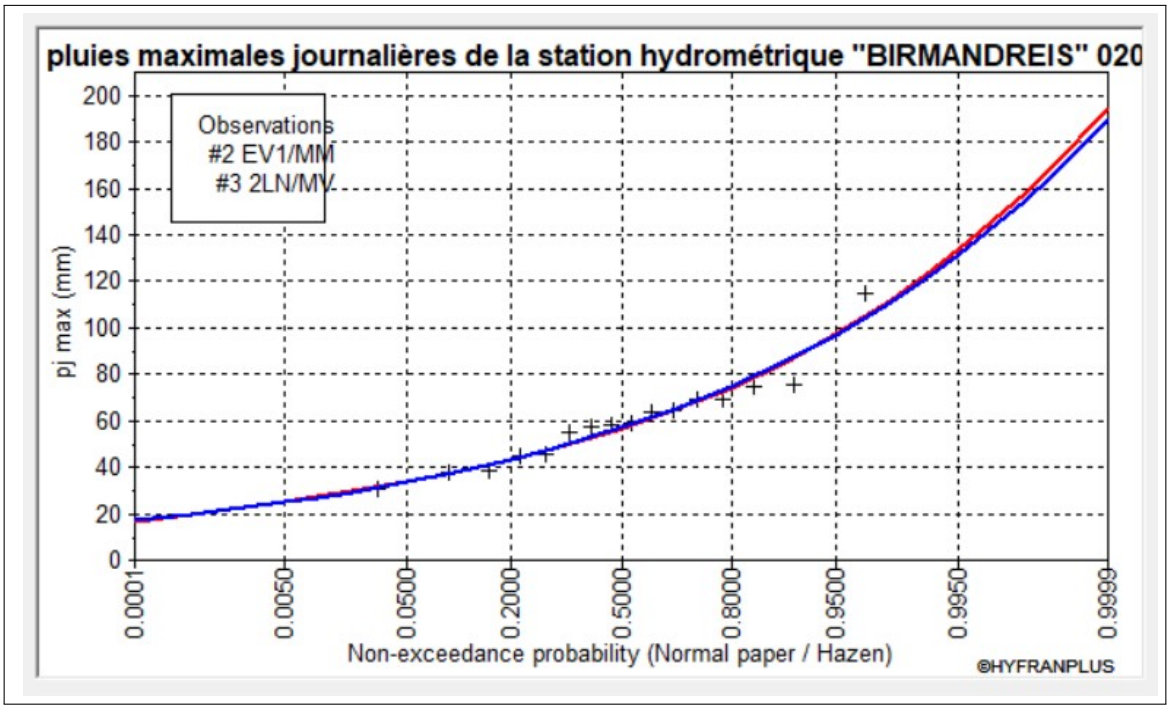


FIGURE 2.9 – Graphe comparatif des résultats d'ajustement obtenus par les méthodes de Gumbel et Galton.

2. **Le test d'adéquation de χ^2 :** Le but d'un test d'adéquation (ou d'ajustement) est de vérifier si le modèle choisi est compatible avec les données. Plus précisément, nous allons élaborer une procédure de test pour déterminer si l'hypothèse selon laquelle les observations proviennent d'une loi de probabilité donnée est valide. Le test le plus couramment utilisé à cet effet est le test du χ^2.

   Alors, afin de trancher sur la loi à choisir on va comparer les variables, ${\chi_{calculé}}^2$ et ${\chi_{théorique}}^2$ (tabulé) à un risque de 5% autrement dit à un seuil de signification de 95%.

   Les résultats obtenus par le test de χ^2 ont été faits par logiciel HYFRANPlus et sont représentés dans le tableau ci-dessus :

TABLE 2.19 – Résultat de Test χ^2

Loi de distribution	Degré de liberté	Nombre de classe	${\chi_{calculé}}^2$	${\chi_{théorique}}^2$
Gumbel	3	6	5.07	5
Log Normale	3	6	4.86	5

   A partir des résultats obtenus du test χ^2 et d'ajustement, la série présente un ajustement adéquat à la **loi Log Normale.**

Pluie De Courte Durée

Pour une période donnée le passage des pluies journalières maximales aux pluies de courtes durées est effectué au moyen de la formule (K. Body, ANRH 1981)

$$P_{cd} = P_{j.max\%} \left(\frac{t}{24}\right)^b \tag{2.24}$$

Avec :

- V_r : Vitesse de ruissellement en Km/h ;
- L_{cp} : longueur du cours d'eau principale en Km ;
- T_c : Temps de concentration en h .

Les intensités maximales en fonction des durées (h) et période de retour T (ans) sont calculées à l'aide de la relation suivante :

$$I_t = \frac{P_{cd}}{t} \tag{2.25}$$

Les résultats de calcul des précipitations et des intensités maximales de différentes durées sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 2.20 – Pluies et intensités de courtes durées pour des différentes périodes de retour

T	100		50		20		10		5	
Durée (h)	Pct (mm)	It (mm/h)	Pct (mm)	It (mm/h)	Pct (mm)	It (mm/h)	Pct (mm)	It (mm/h)	Pct (mm)	It (mm/h)
0.25	20.741	82.96	18.89	75.54	16.39	65.56	14.50	58.01	12.53	50.11
1	35.614	35.61	32.43	32.43	28.14	28.14	24.90	24.90	21.51	21.51
2	46.669	23.33	42.49	21.25	36.88	18.44	32.63	16.32	28.19	14.10
3	54.664	18.22	49.78	16.59	43.20	14.40	38.22	12.74	33.02	11.01
3.59	58.629	16.33	53.39	14.87	46.33	12.91	40.99	11.42	35.42	9.87
4	61.154	15.29	55.69	13.92	48.33	12.08	42.76	10.69	36.94	9.24
5	66.715	13.34	60.75	12.15	52.72	10.54	46.65	9.33	40.30	8.06
6	71.631	11.94	65.23	10.87	56.61	9.43	50.08	8.35	43.27	7.21
7	76.070	10.87	69.27	9.90	60.11	8.59	53.19	7.60	45.95	6.56
8	80.136	10.02	72.97	9.12	63.33	7.92	56.03	7.00	48.41	6.05
9	83.903	9.32	76.40	8.49	66.30	7.37	58.66	6.52	50.68	5.63
10	87.422	8.74	79.60	7.96	69.09	6.91	61.12	6.11	52.81	5.28
11	90.733	8.25	82.62	7.51	71.70	6.52	63.44	5.77	54.81	4.98
12	93.865	7.82	85.47	7.12	74.18	6.18	65.63	5.47	56.70	4.73
13	96.841	7.45	88.18	6.78	76.53	5.89	67.71	5.21	58.50	4.50
14	99.681	7.12	90.77	6.48	78.77	5.63	69.70	4.98	60.21	4.30
15	102.400	6.83	93.24	6.22	80.92	5.39	71.60	4.77	61.86	4.12
16	105.010	6.56	95.62	5.98	82.98	5.19	73.42	4.59	63.43	3.96
17	107.522	6.32	97.91	5.76	84.97	5.00	75.18	4.42	64.95	3.82
18	109.946	6.11	100.11	5.56	86.88	4.83	76.87	4.27	66.41	3.69
19	112.289	5.91	102.25	5.38	88.74	4.67	78.51	4.13	67.83	3.57
20	114.558	5.73	104.31	5.22	90.53	4.53	80.10	4.00	69.20	3.46
21	116.758	5.56	106.32	5.06	92.27	4.39	81.64	3.89	70.53	3.36
22	118.896	5.40	108.26	4.92	93.96	4.27	83.13	3.78	71.82	3.26
23	120.975	5.26	110.16	4.79	95.60	4.16	84.58	3.68	73.08	3.18
24	123.000	5.13	112.00	4.67	97.20	4.05	86.00	3.58	74.30	3.10

Les courbes pluies -durées-fréquences pour les temps de retour 5, 10, 20, 50 et 100 ans, Sont représentés dans la figure suivante :

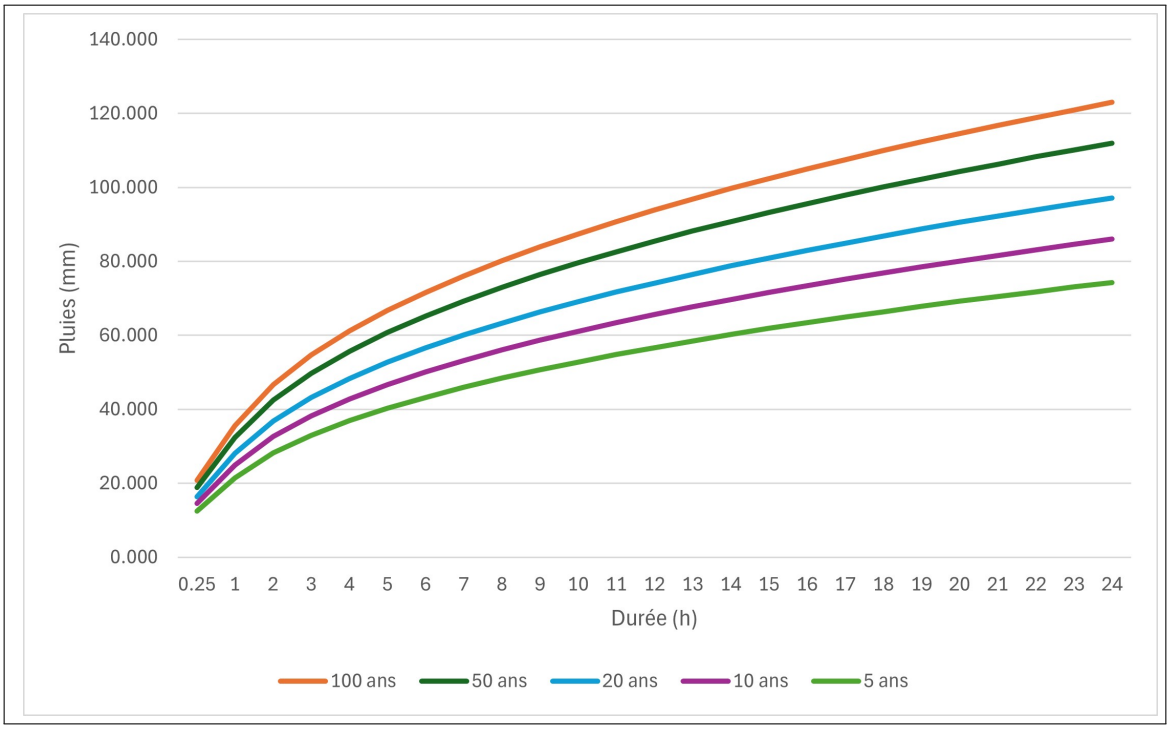


FIGURE 2.10 – Les courbes pluies-durées-fréquences

Les courbes IDF « intensités -durées-fréquences » pour les temps de retour 5, 10, 20, 50 et 100 ans, Sont représentés dans la figure suivante :

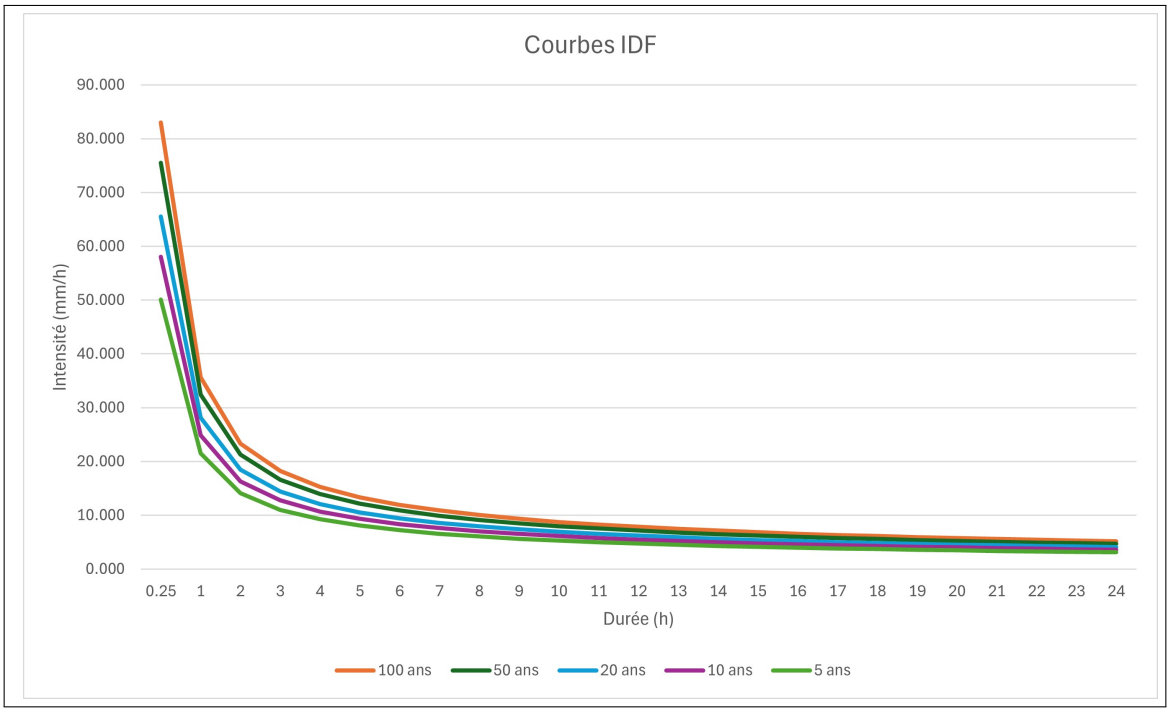


FIGURE 2.11 – Les courbes Intensité-durées-fréquences

2.3.2 Détermination Du Débit De Crue Par Les Formules Empiriques

L'étude de la protection contre les inondations nécessite la détermination préalable de la crue et de l'hydrogramme de crue. En l'absence de données de mesure et de stations hydrométriques régulant nos oueds, nous avons l'intention d'utiliser une approche basée sur des formules empiriques. Cette approche est fondée sur des relations établies entre le débit et la superficie du bassin versant, la pluviométrie et la période de retour, telles que les formules de MALLET-GAUTHIER, GIANDOTTI, TURAZZA et SOKOLOVSKY, entre autres.

Formule De MALLET-GAUTHIER

L'énoncé de la formule de Maillet et Gauthier pour l'estimation de la crue de période de retour T est : (Coutagne, 1951)

$$Q_{max.p\%} = 2K \log\left(1 + AP_{moy}\right) \frac{S}{\sqrt{L}} \sqrt{1 + 4\log T - \log S} \tag{2.26}$$

Avec :

- K : constante comprise entre (1-3) on prend $K = 2$;
- P_{moy} : Précipitation moyenne annuelle en m ;
- S : Surface du bassin versant en Km^2 ;
- L : Longueur du talweg principale en Km ;
- T : Période de retour ;
- A : Paramètre du bassin versant qui varie entre 20 et 30 selon la région géographique pour notre région on pendra $A = 20$.

Formule De TURAZZA

Cette formule est particulièrement pertinente pour les petits bassins, car elle intègre le temps de concentration (tc) en se basant sur l'intensité moyenne maximale des précipitations mesurée sur un intervalle de référence équivalent à ce temps de concentration du bassin versant (EMI, 1999) :

$$Q_{max.p\%} = \frac{C \times S \times I_{tc}}{3.6} \tag{2.27}$$

Avec :

- C : coefficient de ruissellement de la crue considérée pour une probabilité P% ;
- S : Surface du bassin versant en Km^2 ;
- I_{tc} : Intensité moyenne maximale pendant une durée égale au temps de concentration en mm/h calculé dans le Tableau 2.20.

Table 2.21 – Valeurs du coefficient de ruissellement C

Fréquence %	1	2	5	10	20
Période de retour	100	50	20	10	5
C	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65

Formule De SOKOLOVSKY

Selon SOKOLOVSKY, la crue est considérée comme un débit max généré par une averse de courte durée correspondant au temps de concentration. Le temps de montée de la crue est donc pris égal au temps de concentration (Bennis, 2007).

Le débit maximum est donné par la formule suivante :

$$Q_{max.p\%} = \frac{0.28 \times (P_{ct} - H_0) \times \alpha \times f \times S}{T_C} \tag{2.28}$$

Avec :

- S : Surface du bassin versant en Km^2 ;
- T_c : Temps de concentration en h ;
- P_{ct} : pluie fréquentielle de courte durée correspondant au temps de concentration.
- H_0 : C'est la perte d'eau initiale. Au nord de l'Algérie $H_0 = 7mm$;
- α : Coefficient de ruissellement de la crue pour une période donnée ;
- f : Coefficient de forme de la crue ;
- 0.28 : coefficient de changement d'unité.

Le coefficient de forme de la crue est calculé par la formule :

$$f = \frac{12}{4 + 3\gamma} \tag{2.29}$$

- Pour $S < 50Km^2$ on a $\gamma = 2$;
- Pour des petits bassins non boisé, sol peu perméable, on a $\gamma = 2 \div 2.5$
- PPour bassin boisé, sol perméable on $\gamma = 3 \div 4$

Formule ANRH 2014

La formule propose une méthodologie de calcul des crues et des hydrogrammes de crue pour les cours d'eau et les oueds non jaugés du territoire algérien. Elle est basée sur les données pluviométriques (pluies maximales journalières) de plus de 400 stations pluviométriques et les données hydrométriques (débits de pointe) de 53 stations hydrométriques réparties de façon homogène sur les principaux bassins versants définis par l'ANRH.(Boutoutaou, 2014)

$$Q_{max.p\%} = \frac{16.7 \times [A + B\log(T)] \times \alpha_t \times \lambda \times S}{(T_c + 1)^n} \tag{2.30}$$

- A, B : paramètres géographiques caractérisant l'intensité maximale pluviale annuelle A et sa variation interannuelle B ;
- T : période de retour ;
- α_t : Le coefficient du ruissellement ;
- λ : Le coefficient de réduction du débit ;
- S : Surface du bassin versant en Km^2 ;
- T_c : temps de concentration en min ;
- n : coefficient de réduction de la pluie en fonction de croissance de sa durée.

Le coefficient du ruissellement α_t a été déterminé à partir des données des plus grandes crues (crues de faibles fréquences), enregistrées dans des cours d'eau de différentes régions :

$$\alpha_t = 1 - \exp\left(-\frac{P_{maxjT}}{P_0}\right) \tag{2.31}$$

Avec :

- P_{maxjT} : pluie maximale journalière en mm de période de retour T ;
- P_0 : Pertes maximales possible en mm (infiltration, rétention dans les dépressions et évaporation) ;

Ce paramètre est tabulé en fonction des zones géographiques figure 2.12 des grands bassins versants de l'Algérie tableau 2.22.

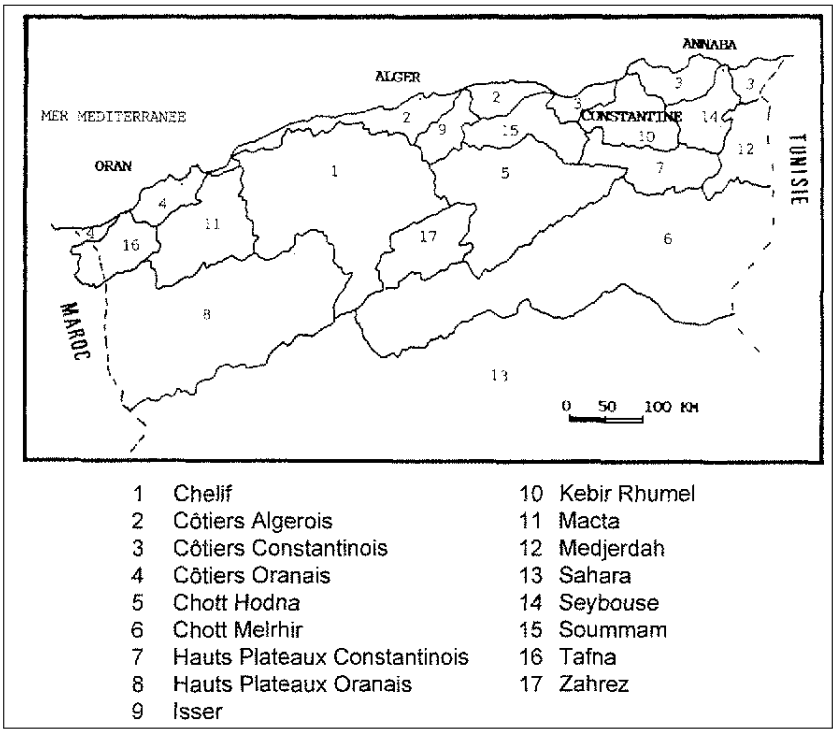


FIGURE 2.12 – Carte de localisation des bassins hydrographiques de l'Algérie «ANRH»

TABLE 2.22 – Valeurs du paramètre P_0 (Source :Boutoutaou D. 2008)

Bassins versants	01-02-11-04-09	05-06-07-08	10-12-14-15-03	16	13
$P_0(mm)$	100	90	120	115	60

Le coefficient de réduction du débit λ est déterminé par formule suivante :

— $S > 600Km^2$:

$$\lambda = \frac{9.4}{(S+1)^{0.39}} \tag{2.32}$$

— $S < 600Km^2 : \lambda = 1$

Les valeurs des coefficients A, B et n sont déterminées pour l'ensemble du territoire algérien en fonction des zones géographiques et de la pluviométrie moyenne annuelle. Dans ce cas, la wilaya d'Alger est située dans le bassin hydrographique n° 02. Les valeurs sont illustrées dans le tableau suivant :

Table 2.23 – Valeurs des coefficients A, B et n.

Bassins versants	coefficients	Pluies moyennes annuelles Pmoy «mm »		
		P <400	P [400-900]	P >900
02-03-09-15	A	4.00	3.50	-
	B	3.50	2.80	2.70
	n	0.69	0.69	0.52

Les débits de crues calculés par les différentes formules sont représentés dans le tableau suivants :

Table 2.24 – Débits de crue du BV Oued EL Kerma par les formules empiriques (m^3/s)

période T (ans)	**100**	**50**	**20**	**10**	**5**
Formule de Mallet-Gauthier	171.74	156.53	133.79	113.60	88.94
Formule de SOKOLOVSKY	277.11	272.37	221.60	183.00	146.81
Formule de Turazza	332.89	285.29	232.12	191.68	153.77
Formule ANRH 2014	246.372	212.075	168.289	136.918	106.968

Choix De La Crue De Projet

Les formules empiriques sont basées sur des données et des hypothèses spécifiques, ce qui peut entraîner des variations dans les résultats. En faisant la moyenne des débits calculés à partir de plusieurs méthodes, on obtient une estimation plus fiable et plus équilibrée des débits de crue, qui tient compte des différentes approches.
La valeur obtenue par l'équation de Mallet-Gauthier étant relativement éloignée de la tendance générale, elle a été ignorée lors du choix des valeurs moyennes.
Le tableau suivant donne les valeurs du Débits de crue retenus :

Table 2.25 – Valeurs retenus du débits de crue du BV Oued EL Kerma (m^3/s)

période T (ans)	**100**	**50**	**20**	**10**	**5**
Formule de SOKOLOVSKY	277.11	272.37	221.60	183.00	146.81
Formule de Turazza	332.89	285.29	232.12	191.68	153.77
Formule ANRH 2014	246.372	212.075	168.289	136.918	106.968
Valeurs retenues moyennes	285.46	256.58	207.34	170.53	135.85

Et donc notre débit de projet est **285.46** m^3/s

2.3.3 Construction De L'hydrogramme De Crues

L'hydrogramme de crue représente la variation du débit d'un cours d'eau en fonction du temps et est utilisé pour déterminer les caractéristiques de la crue, notamment sa forme, son volume, son temps de montée et son temps de descente. La forme de l'hydrogramme de crue est déterminée à l'aide de la méthode de SOKOLOVSKY, qui assimile l'hydrogramme à deux équations paraboliques.

La Montée De La Crue

$$Q_t = Q_{max} \times \left(\frac{t}{T_m}\right)^n \tag{2.33}$$

La Décrue

$$Q_t = Q_{max} \times \left(\frac{T_b - t}{T_d}\right)^m \tag{2.34}$$

Avec :

- Q_t : Débit à l'instant t (m^3/s) ;
- Q_{max} : Débit maximal de la crues (m^3/s) ;
- $T_m = T_c$: Temps de montée de la crue ;
- T_b : Temps de base, $T_b = T_m + T_d$;
- m, n : puissance des paraboles $(m = 3, n = 2)$

  En ce qui concerne les crues d'averses, c'est-à-dire celles provoquées par les précipitations, cette méthode considère :

$$t_d = \delta t_m$$

δ : coefficient de forme de l'hydrogramme de crue.

TABLE 2.26 – Coefficients de forme de l'hydrogramme de crue δ.

Description du cours d'eau	Valeur de "δ"
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants dénudés et faiblement perméables.	2,0 – 2,5
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants brisés ou perméables, moyens cours d'eau avec terrasses de lit majeur normales.	3,0 – 4,0
Grands et moyens cours d'eau avec des terrasses de débordements étendues.	4,0 – 7,0

On prend $\delta = \mathbf{2.5}$

Les valeurs sont montrées dans le tableau suivant :

TABLE 2.27 – les valeurs du temps de base, montée et décrue.

Temps de montée (h)	Temps de décrue (h)	Temps de base (h)
3.59	8.96	12.55

Les valeurs des débits pour différentes périodes de retour en fonction du temps sont montrées dans le tableau ci-dessous :

TABLE 2.28 – Les valeurs des débits pour différentes périodes de retour en fonction du temps.

Temps	Periode de retour				
	100	50	20	10	5
0	0	0	0	0	0
0.5	5.55	4.99	4.03	3.32	2.64
1	22.20	19.95	16.12	13.26	10.57
1.5	49.95	44.90	36.28	29.84	23.77
2	88.80	79.82	64.50	53.05	42.26
2.5	138.75	124.71	100.78	82.89	66.03
3.00	199.80	179.59	145.12	119.36	95.09
3.59	285.46	256.58	207.34	170.53	135.85
4	247.70	222.64	179.91	147.97	117.88
4.5	206.74	185.82	150.16	123.50	98.39
5	170.56	153.30	123.88	101.89	81.17

5.5	138.87	124.82	100.86	82.96	66.09
6	111.37	100.10	80.89	66.53	53.00
6.5	87.76	78.89	63.75	52.43	41.77
7	67.76	60.90	49.21	40.48	32.24
7.5	51.04	45.88	37.07	30.49	24.29
8	37.34	33.56	27.12	22.30	17.77
8.5	26.33	23.67	19.13	15.73	12.53
9	17.73	15.94	12.88	10.59	8.44
9.5	11.25	10.11	8.17	6.72	5.35
10.00	6.57	5.91	4.77	3.93	3.13
10.5	3.42	3.07	2.48	2.04	1.63
11	1.48	1.33	1.07	0.88	0.70
11.5	0.46	0.41	0.33	0.27	0.22
12	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03
12.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

L'hydrogramme de crues est représenté dans la figure :

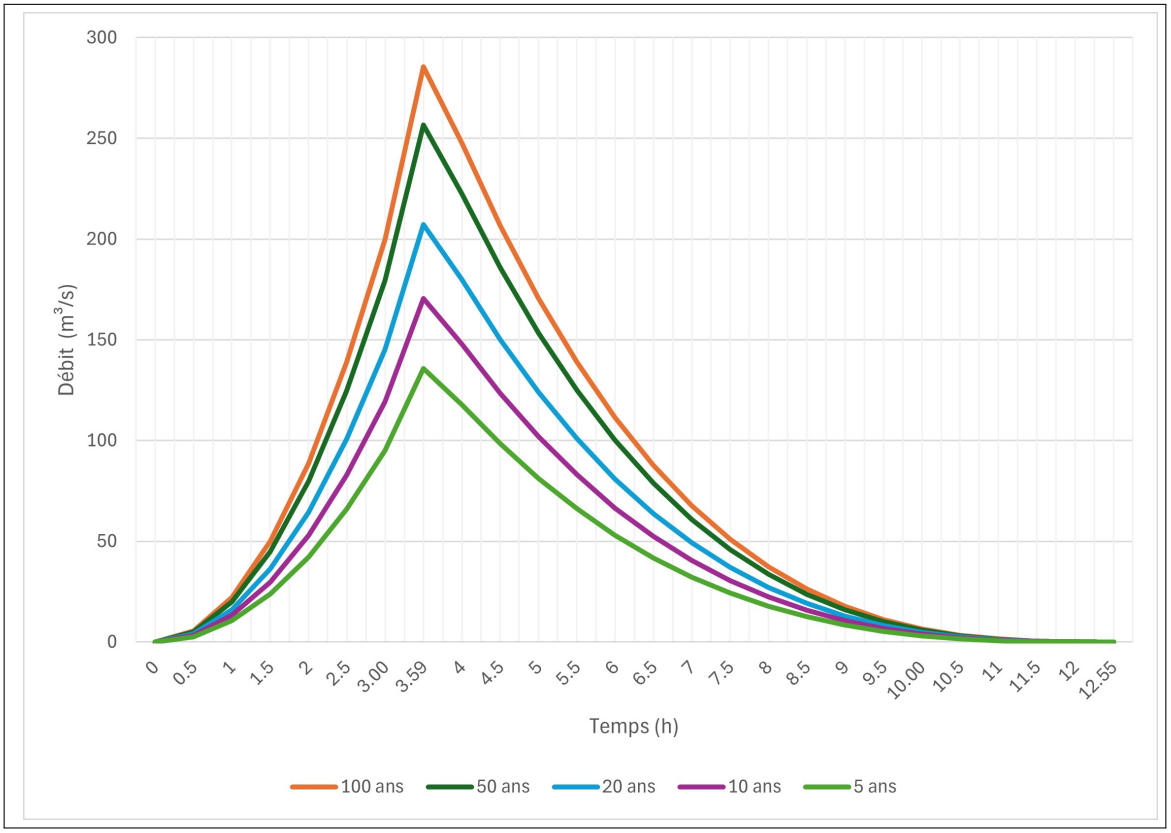


FIGURE 2.13 – Hydrogramme de crue pour différentes périodes de retour.

2.4 Étude Du Transport Solide

La quantité et la qualité des apports dépendent des dimensions et de la topographie du bassin versant, ainsi que de la sensibilité du sol à l'érosion. Cette susceptibilité est influencée par trois facteurs principaux :

— La couverture végétale ;

— La composition géologique de la roche sous-jacente ;

— Le régime des précipitations et des températures En Algérie.

Le transport de matériaux solides dans les cours d'eau est considérable. Cependant, ce phénomène n'est pas bien quantifié dans certains oueds en raison de l'absence de données, notamment sur la concentration des particules fines, et de l'absence de stations de jaugeage. Ainsi, l'estimation du transport solide a été effectuée en s'appuyant sur les formules empiriques les plus couramment utilisées, à savoir :

— **La formule de Tixéront (1960) ;**

— **Formule de SOGREAH (1969) ;**

— **Formule de Touaïbia et Achite (2003) ;**

— **Formules de Meddi (2015).**

2.4.1 Méthode De TIXERONT

Elle s'exprime par la formule suivante :

$$T_a = \alpha L_e^{0.15} \tag{2.35}$$

Avec :

- T_a : désigne la dégradation spécifique en $(T/Km^2/an)$.
- L_e : désigne le ruissellement moyen en (m).
- α : désigne le coefficient de perméabilité fixé comme suit :

Table 2.29 – Évaluation du coefficient de perméabilité.

Perméabilité du bassin versant	Valeur de α
Perméabilité élevée	8.5
Moyenne à élevée	75
Faible à moyenne	350
Faible	1400
Imperméable	3200

Avec L_e se calcule par la formule empirique :

La Formule De Samie

$$L_e = P^2(293 - 2.2 \times \sqrt{S}) \tag{2.36}$$

Avec :

- P : Pluie moyenne annuelle (m),telle que $P_{moy} = 253$ mm ;
- S : Surface du bassin versant (Km^2) ;
- L_e : Lamme d'eau écoulée (mm) ;

Donc : $L_e = 17.49\ mm$;
avec $\alpha = 75$;
ça donne : $T_a = 115.20\ T/km^2/an$

2.4.2 Méthode D'estimation Au Nord Algérien

$$T_a = 328,624 \times Q^{-0.234} \times S^{-0.197} \tag{2.37}$$

- P : Pluie moyenne annuelle (m),telle que $P_{moy} = 253$ mm ;
- Q : Débit maximum (m^3/s) ;
- S : Surface du bassin versant (Km^2) ;

ça donne : $T_a = 37.16\ T/km^2/an$

2.5 Conclusion

L'étude hydrologique représente la phase la plus complexe d'une étude de protection contre les inondations. Le choix du débit de pointe constitue un élément central de toute modélisation hydraulique du cours d'eau, permettant ainsi de prévoir les inondations et de déterminer les mesures de protection nécessaires, ainsi que l'estimation des coûts liés à leur mise en œuvre. De ce chapitre, nous pouvons conclure que :

- L'étude hydromorphologique de la zone d'étude révèle que le bassin versant d'Oued El Kerma présente une forme allongée, caractérisée par un relief modérément faible et un temps de concentration très court, ce qui favorise l'apparition de crues.
- La pluie moyenne annuelle dans la région est de $P_{moy} = 253mm$
- Le débit max de fréquence centennale est de : $Q_{max} = 285.46m^3/s$;
- Le transport solide est estimé à $T_a = 115.20\ T/km^2/an$.

Chapitre 3

ÉTUDE HYDRAULIQUE

3.1 Introduction

La question de la protection contre les inondations est intrinsèquement liée à l'apparition de niveaux d'eau élevés et, dans certains cas, de vitesses d'écoulement élevées. La conception des structures de protection contre les inondations est généralement basée sur le niveau d'eau prévu, plutôt que sur des considérations liées à l'érosion.

Comme c'est le cas pour toutes les structures fluviales, le concepteur doit nécessairement prendre en compte la nécessité pour la structure de résister aux forces érosives. Cependant, ce n'est pas la fonction première des structures de protection contre les inondations. L'onde de crue qui se déplace vers l'aval a besoin de suffisamment d'espace pour se disperser, ce qui entraîne une augmentation du niveau de l'eau et l'inondation des zones adjacentes.

Un modèle hydraulique de l'oued Agrioun a été construit. Le modèle a des objectifs multiples. Les objectifs suivants ont été fixés :

— Vérifier la cohérence des débits de crue calculés par le modèle hydrologique avec les observations de terrain (hauteurs d'eau, étendue des zones inondables, etc.) conformément à l'étude hydrologique réalisée.

— Simuler les crues de projet pour déterminer les conditions d'écoulement (hauteurs d'eau, vitesses, etc.) sur l'ensemble du cours de l'Agrioun.

— Cartographier les zones inondables et les risques d'inondation dans la zone d'étude, sur la base des résultats des simulations.

3.2 Généralités Et Définitions

La distinction entre l'hydraulique à surface libre et l'hydraulique à écoulement sous pression réside dans la présence d'une surface libre, où l'écoulement est directement exposé à l'atmosphère. Dans des conditions de surface libre, le gradient de pression n'est plus la force motrice ; c'est la gravité qui prend le relais. L'hydraulique fluviale se concentre principalement sur l'étude des écoulements au sein de deux catégories clés :

— Les cours d'eau naturels, y compris les rivières, les ruisseaux et les plans d'eau similaires.

— Les systèmes de drainage techniques, qui comprennent les réseaux d'eaux pluviales, les installations de rétention d'eau, les centrales électriques, les ports et d'autres structures connexes.

Ces écoulements sont généralement caractérisés par une profondeur d'écoulement relativement faible par rapport à la longueur de l'écoulement, appelé écoulement linéaire ou unidimensionnel (x, t).

3.2.1 Rappel De Quelques Notions Hydraulique

1. **Bief :**est un segment uniforme en termes de pente et de sections d'écoulement.
2. **Type de cours d'eau :**on distingue des cours d'eau en fonction de la pente I, celle-ci varie entre 3 et 6.
3. **Section d'écoulement (ou section mouillée)**S **:**il s'agit de la partie de la section du canal délimitée par les parois et la surface libre ;
4. **Périmètre mouillé** P **:** représente la longueur de la surface d'écoulement en contact avec le lit, incluant le fond et les berges. Il est calculé en soustrayant la largeur de la surface libre du périmètre de la section d'écoulement ;
5. **Largeur au miroir** B **:**Largeur de la section d'écoulement à la surface libre, où la pression du fluide est égale à la pression atmosphérique
6. **Hauteur d'écoulement** h **:** hauteur moyenne d'eau, par définition : $h = \frac{S}{B}$
7. **Hauteur normale** h_n **:**c'est la hauteur d'un écoulement régulier et uniforme dans un tronçon, appelée hauteur de chute normale, est déterminée par le débit (Q), la rugosité (K) et la pente moyenne (I).
8. **Rayon hydraulique** R **:**c'est la longueur caractéristique $R = \frac{S}{P}$
9. **Débit** Q **:** flux d'eau par unité de temps à travers la surface d'écoulement ;
10. **Vitesse moyenne** V **:** $V = F\frac{Q}{S}$;
11. **Coefficient de rugosité :**Coefficient traduisant la rugosité des parois (coefficient de Chézy noté C ou de Manning-Strickler noté K) ;
12. **Lit mineur :**un terme utilisé pour décrire un cours d'eau qui n'est pas le lit majeur. Ce dernier terme désigne la largeur historique maximale d'un cours d'eau ou de la plaine d'inondation. Le niveau des plus hautes eaux (PHE) est également utilisé pour désigner l'élévation maximale atteinte par la surface libre d'un cours d'eau.
13. **Lit majeur :** la zone occupée par un cours d'eau en période d'inondation, y compris les zones inondées. Le lit d'étiage ou le chenal d'étiage représente une partie du cours d'eau qui est occupée en période d'étiage.
14. **La berge ou rive :**il s'agit du talus qui sépare le lit mineur du lit majeur ;
15. **L'étiage :**est utilisé pour décrire le niveau d'eau le plus bas dans une rivière, qui est généralement observé pendant les mois d'été. Par conséquent, le débit d'étiage représente

le débit minimum observé dans une rivière. Le débit de pointe est défini comme le débit maximal atteint lorsque la rivière sort de son lit mineur. Dans le cadre d'une inondation, le débit de pointe représente le débit maximal atteint.

16. **Tirant d'eau :**profondeur maximale d'une section d'écoulement.

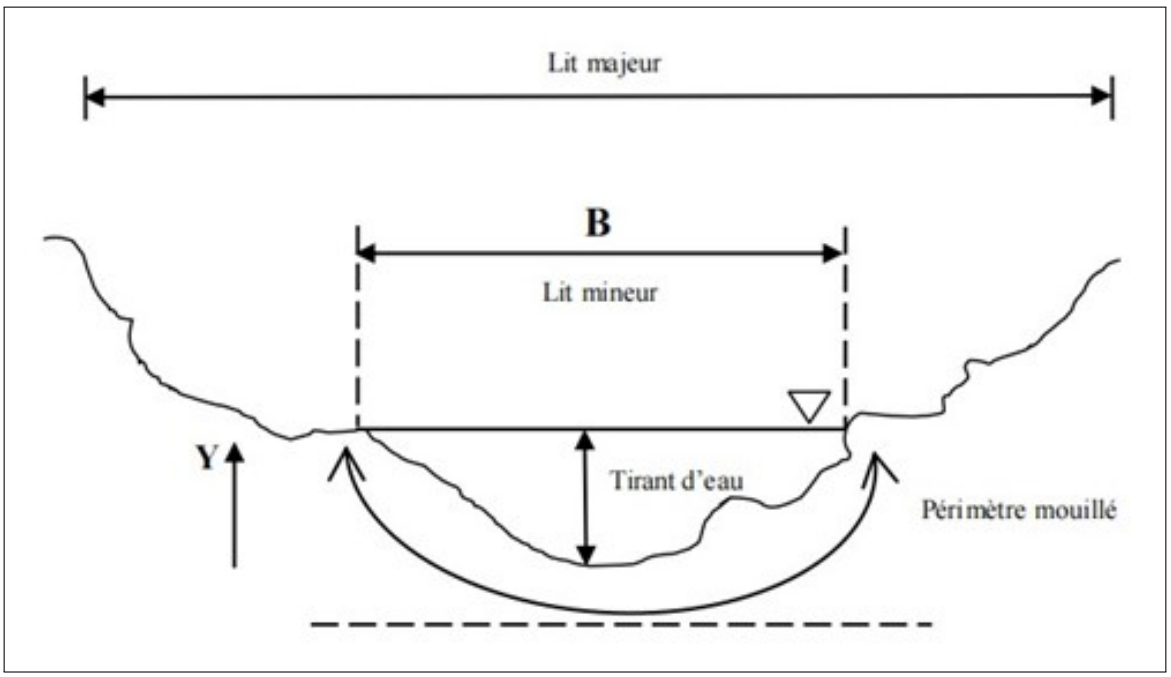


FIGURE 3.1 – Coupe transversale d'un canal naturel.

3.2.2 Type D'écoulement

Une classification des écoulements peut se faire selon la variation de la profondeur, h ou dh, en fonction du temps et de l'espace : $dh = f(t, x)$

Variables Dans Le Temps

1. **Écoulement stationnaire (permanent) :**
   Un écoulement est considéré comme permanent lorsque les vitesses moyennes et ponctuelles (V et U) ainsi que la profondeur (h ou dh) demeurent constantes dans le temps à tous les points de l'espace, quelle que soit la direction. Cela implique que l'écoulement est cohérent entre les différentes sections du canal, sans apport latéral.
2. **Écoulement non stationnaire (non permanent) :**
   En cas de fluctuations de la profondeur de l'eau (dH) et d'autres paramètres (V et U) dans le temps, le débit n'est pas une valeur constante.

Variabilité Dans L'espace

1. **Écoulement uniforme :**
   si la profondeur, $dh(x)$, ainsi que les autres paramètres, restent invariables dans les diverses sections du canal. La ligne de la pente de fond est donc parallèle à la ligne de la surface libre et l'on a $i = J$.
2. **Écoulement non uniforme :**
   si la profondeur, $dh(x)$, ainsi que les autres paramètres, changent d'une section à l'autre. La pente de fond diffère alors de celle de la surface libre, $i \neq J$.L'écoulement non uniforme peut être permanent ou non permanent.

— **Écoulement non uniforme graduellement varié :**Lorsque le mouvement est graduellement varié, la profondeur, $dh(x) = dh$, ainsi que les autres paramètres, ne changent que très lentement d'une section à l'autre.

— **Écoulement non uniforme rapidement varié :** Lorsque le mouvement est rapidement varié, la profondeur $dh(x)$, ainsi que les autres paramètres changent brusquement, parfois avec des discontinuités. Cela se manifeste en général au voisinage d'une singularité, telle qu'un déversoir, un rétrécissement, un ressaut hydraulique ou une chute brusque.

Le schéma suivant résume les variabilités des écoulements dans l'espace :

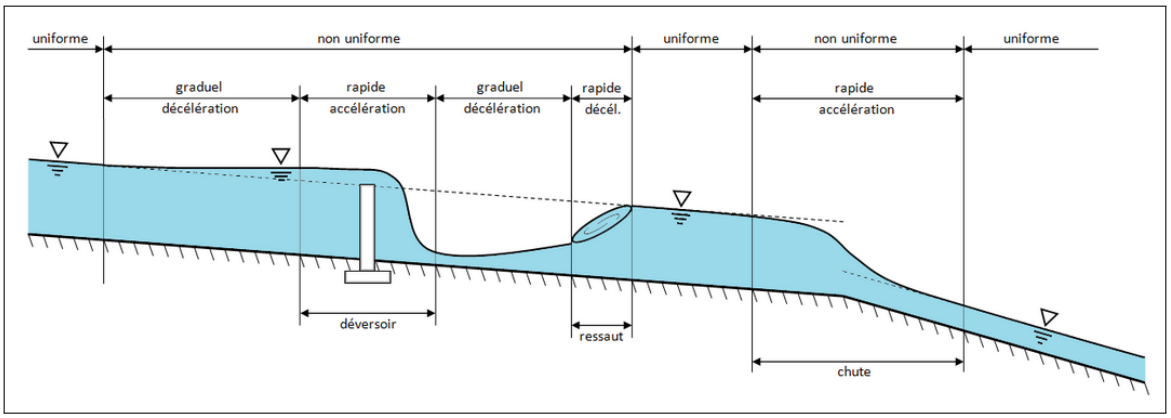


FIGURE 3.2 – Variabilité des écoulements dans l'espace.

3.2.3 Régime D'écoulement

Le phénomène d'écoulement à surface libre décrit le mouvement d'un liquide dont la surface supérieure est en contact avec l'atmosphère, créant ainsi une frontière ouverte. Dans ce type d'écoulement, la pression atmosphérique est généralement présente à la frontière libre. La pente du canal fait que la gravité propulse l'écoulement en raison des variations vers le bas de la densité de la surface. Parfois, des courants rapides se forment et se séparent de manière quelque peu erratique, tandis que des ondes stationnaires se gravent progressivement à la surface du fluide.

Le Nombre De Reynolds

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces de frottement. Dans le cadre de l'étude hydraulique des canaux, on définit généralement les nombres adimensionnels suivants :

$$R_e = \frac{V \times D}{\mu} \tag{3.1}$$

Avec :

- V : la Vitesse moyenne de l'écoulement ;
- D : le diamètre hydraulique égal à $4R$;
- R : étant le rayon hydraulique ;
- μ le coefficient de viscosité cinématique ; Pour des canaux de largeur infinie, on aura $R = h$;
- h étant le tirant d'eau.

Le rôle du nombre de Reynolds est de permettre la distinction entre les écoulements comme suit :

— Écoulement laminaire $R_e < 580$;

— Écoulement turbulent $R_e > 2320$;

— Écoulement transitoire $580 < R_e < 2000$;

Le Nombre De Froude

Le nombre de Froude, applicable aux écoulements à surface libre, s'exprime par la formule suivante :

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \times H}} \tag{3.2}$$

Avec :

- v : la Vitesse moyenne de l'écoulement ;
- H : Profondeur hydraulique ;
- g : Accélération gravitationnelle.

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

— Écoulement fluvial $F_r < 1$;

— Écoulement torrentiel $F_r > 1$;

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

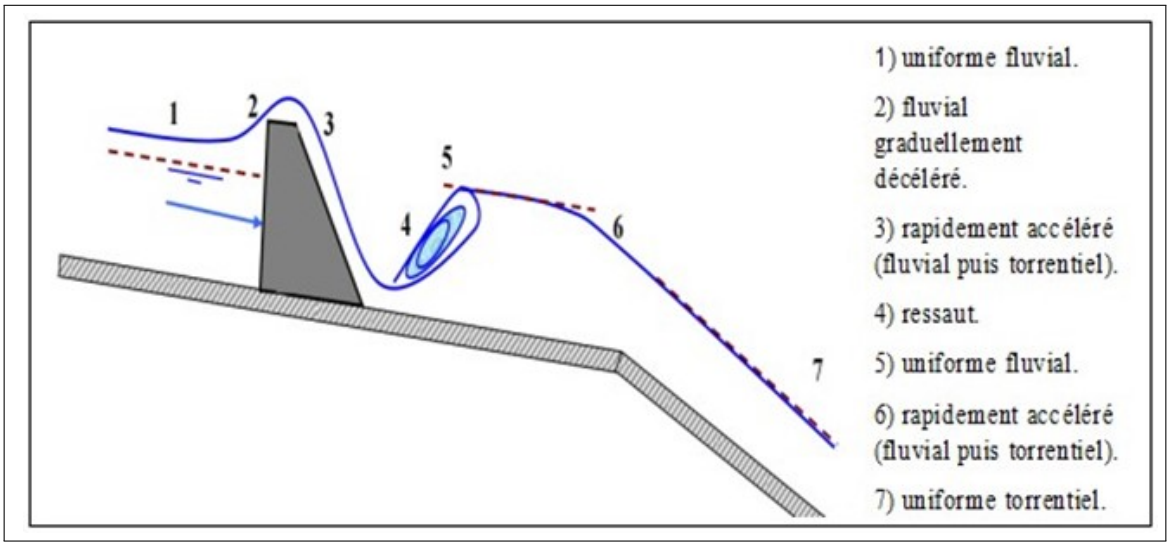


FIGURE 3.3 – Schéma représentant les différents régimes d'écoulement.

3.3 Canaux à Ciel Ouvert

Un canal est défini comme un système de transport dans lequel un liquide s'écoule, avec une surface libre soumise à la pression atmosphérique.

3.3.1 Type Des Canaux

on distingue deux types de canaux :

Les Canaux Naturels

Les canaux naturels sont définis comme un cours d'eau qui existe à l'état naturel sur ou sous la terre. Les ruisseaux, les torrents, les rivières et les estuaires sont des exemples de ces cours d'eau.
Leurs propriétés géométriques et hydrauliques sont généralement assez irrégulières.

Les Canaux Artificiels

Les cours d'eau artificiels peuvent être classés en deux catégories principales :

— Les canaux ouverts sont construits au niveau du sol et sont subdivisés en canaux de navigation, canaux d'approvisionnement et d'évacuation, canaux d'irrigation et de drainage, entre autres.

— Les canaux couverts, quant à eux, se caractérisent par une section transversale qui n'est pas entièrement remplie de liquide. Ils comprennent les tunnels hydrauliques, les aqueducs, les drains et les égouts.

Les propriétés hydrauliques de ces structures sont généralement cohérentes et prévisibles.

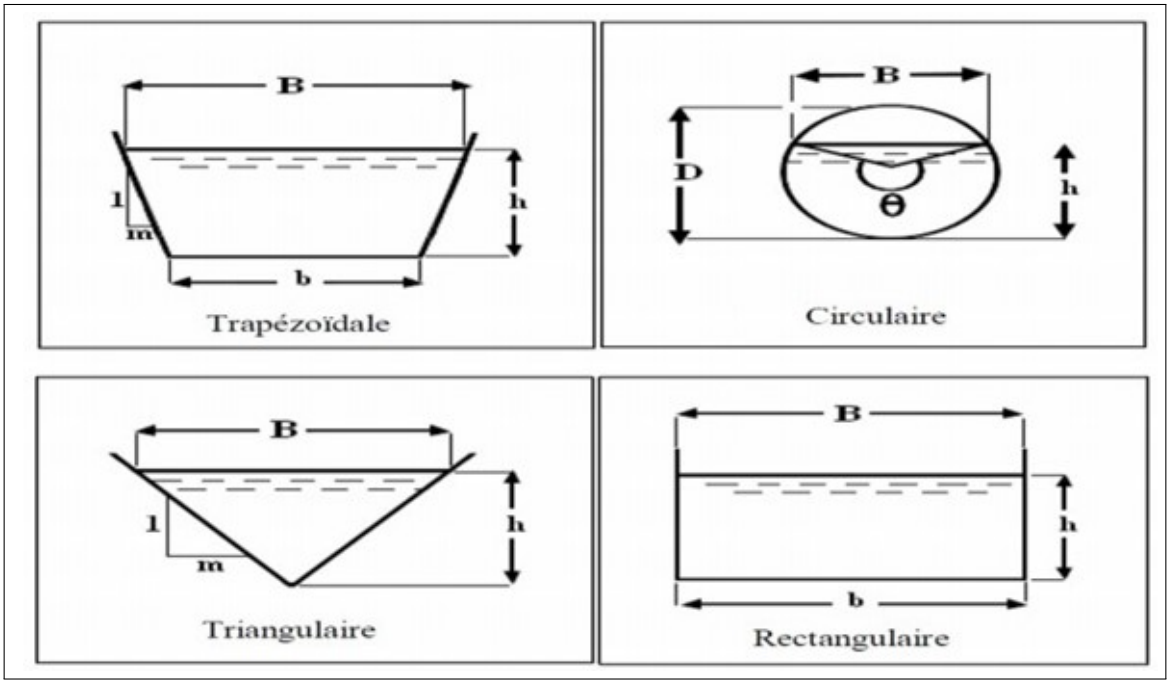


FIGURE 3.4 – Canaux artificiels (Source : TOUMI Abdelouaheb, 2016).

3.3.2 Propriétés Des Canaux

Les Propriétés Géométriques

1. La section transversale A ;

2. La section mouillée S_m ;
3. Le périmètre mouillé P_m ;
4. Le rayon hydraulique R_h est le rapport de la section mouillée et du périmètre mouillé ;
5. La largeur en surface du canal b est la distance séparant les berges opposées ;
6. La profondeur hydraulique de la section mouillée S_m, telle que $D_h = \frac{S_m}{b}$;
7. La pente de la surface libre S_w ;
8. La profondeur H (tirant d'eau) ;
9. La pente du fond S_0.

Propriétés Hydrauliques (Degoutte,2012)

1. **Masse volumique :**
   La masse volumique de l'eau est notée ρ_w et vaut 1000 kg/m^3 dans le cas de l'eau sans matières en suspension.
2. **Poids volumique :**
   Le poids volumique de l'eau est noté $\gamma_w = g \times \rho_w$ et vaut 9,81 kN/m^3 pour de l'eau sans matières en suspension. g désigne l'accélération de la pesanteur et vaut 9,81 m/s^2 Il ne doit pas être confondu avec la masse volumique définie plus haut ou avec la densité qui est un nombre sans dimension.
3. **Débit :**
   Le débit (Q) est le volume d'eau qui traverse une section perpendiculaire à l'axe du chenal par unité de temps.
4. **Vitesse en un point de l'écoulement :**
   Par définition, la vitesse (V) en un point de l'écoulement est celle de la particule qui passe en ce point au moment considéré.
5. **Vitesse moyenne :**
   La vitesse moyenne est par définition $V = Q/S$, c'est à dire $V = \frac{\iint v.ds}{S}$
   - ds désignant un élément de surface ($S = \iint ds$)
6. **Charge hydraulique en un point d'un liquide en mouvement :**
   L'appellation charge hydraulique désigne une énergie par unité de poids de liquide. L a charge en un point p d'une ligne de courant est la valeur :

$$H_p = Z_p + \frac{P}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g}$$

   Avec :
   - Z_p : est la cote du point ;
   - P : la pression en ce point ;
   - V : la vitesse au point p.
7. **Poussée sur une paroi du canal :**
   L'eau exerce sur les parois du chenal une pression équivalente à celle qui serait présente si l'eau était au repos. Pour un élément de paroi de section ds, la pression est : $dP = p.dS$ avec : $p = \gamma_w.y$
8. **Frottement sur une paroi du canal :**
   L'eau étant en mouvement, exerce aussi sur un élément de paroi de section ds, une force de frottement habituellement notée : $dF = \tau_0.ds$. Avec :
   — τ_0 est la force de frottement par unité de surface ou contrainte tangentielle à la paroi.

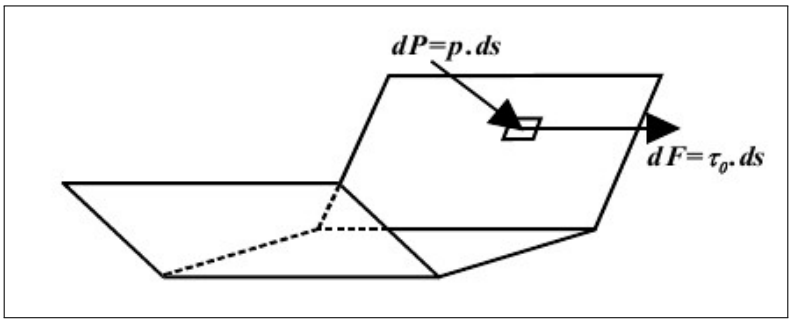


FIGURE 3.5 – Forces appliquées par l'eau sur les parois (l'une perpendiculaire, l'autre tangentielle)

3.3.3 Dimensionnement Des Canaux

Pour un écoulement lentement variable, on peut admettre qu'en toute section la pente de la ligne de charge est celle d'un régime uniforme.

Conditions De L'Écoulement Uniforme

Les conditions suivantes sont supposées prévaloir dans le régime d'écoulement uniforme :

— Le débit d'eau dans chaque section des tronçons proposés est constant ;

— Le canal est prismatique ;

— La profondeur h du courant est constante sur toute sa longueur ;

— La pente de chaque section est constante ;

— La rugosité des parois est constante ;

— Les résistances locales sont absentes.

Formules De Calcul

La formule de calcul principale pour un écoulement permanent uniforme est la formule de Chézy. La vitesse moyenne du courant est sous la forme suivante :

$$V = C \times \sqrt{RI} \tag{3.3}$$

En utilisant le produit suivant :

$$Q = V \times S \tag{3.4}$$

On obtient :

$$Q = C \times S \times \sqrt{RI} \tag{3.5}$$

Avec :

- C : Coefficient de Chézy en $m^{1/2}/s$;
- R_h : Rayon hydraulique étant la surface mouillée S_m sur le périmètre mouillé P_m en m ;
- I : Pente de fond du canal (radier) en m/m .

Détermination De Coefficient De Chézy

En utilisant les formules empiriques pour la détermination du coefficient de Chézy :

1. **Formule d'AGROSKINE :**
   La formule d'Agroskine qui calcule le coefficient de Chézy est la suivante :

$$C = 4\sqrt{2 \times g \times (K + \log(R_H))} \tag{3.6}$$

   Où k : est le paramètre de Poli.

   Compte tenu du caractère semi-empirique de la formule d'Agroskine et du fait que les quantités incluses dans le deuxième terme sont exprimées uniquement en unités de longueur (mètres), il est recommandé d'utiliser la formule suivante :

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \times \log(R_h) \tag{3.7}$$

   Avec :

   - C : Coefficient de Chézy en $m^{1/2}/s$;
   - R_h : Rayon hydraulique en m ;
   - n : Coefficient de rugosité.

2. **Formule de MANING-STRICKLER (1891) :**

$$C = \frac{1}{n} \times {R_h}^{\frac{1}{6}} \tag{3.8}$$

   La formule de MANING-STRICKLER permet de transformer la formule de Chézy pour obtenir :

$$V = K_s \times {R_h}^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{I} \tag{3.9}$$

   Avec :

   - K_s : coefficient de rugosité de STRICKLER ($m^{1/3}/s$).

   Cette formule est la plus utilisée pour le dimensionnement , pour toutes les formes géométriques pour des sections ouvertes diverses. Elle est donnée par la relation suivante :

$$Q = \frac{1}{n} \times {R_h}^{\frac{2}{3}} \times S_m \times \sqrt{I} \tag{3.10}$$

   Avec :

   - Q : débit de dimensionnement (m^3/s) ;
   - n : Coefficient de rugosité ;
   - R_h : Rayon hydraulique (m) ;
   - S_m : section mouillée du canal (m^2) ;
   - I : pente du tronçon de cours d'eau (m/m)

3. **Formule de BAZIN (1897) :**
   Bazin suppose que la valeur du coefficient de Chézy C dépend du rayon hydraulique, $R - h$, mais est indépendante de la pente, I, du chenal.
   Le coefficient C peut donc être déterminé par l'expression suivante :

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R_h}}} \tag{3.11}$$

   Avec :

   - m :est le coefficient de rugosité dépendant de la nature du matériau constituant le canal considéré (Toumi, 2016).

4. **Formule de PAVLOVSKY (1940) :**

$$C = \frac{1}{n} \times {R_h}^{\frac{1}{y}} \tag{3.12}$$

Avec :

- y :est l'exposant déterminé soit d'après la relation complète :

$$y = 2.5 \times \sqrt{n} - 0.13 - 0.75 \times \sqrt{R_h} \times (\sqrt{n} - 0.1) \tag{3.13}$$

La figure suivant donne les formules des éléments géométriques pour cinq différents types de section de canaux :

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

FIGURE 3.6 – Eléments géométriques pour des sections ouvertes diverses (Graf, 2000).

3.4 Choix Des Variantes D'aménagement

Pente du projet : La sélection de la pente appropriée au projet est cruciale avant d'effectuer les calculs hydrauliques. Dans notre cas, nous avons opté pour une pente uniforme sur toutes les sections.

3.4.1 Le Coefficient De Rugosité

La rugosité du canal étant influencée par le type de revêtement de surface, les valeurs de rugosité pour différents revêtements sont indiquées dans le tableau suivant ;

TABLE 3.1 – Les valeurs du coefficient de rugosité 'n', (Chen et Cotton, 1986)

Caractéristiques du lit ou du revêtement	Valeur de la rugosité n
Pavage de pierre à une couche	0.013
Gabions	0.022
Revêtement en béton	0.025
Canal en Gabion.	0.03

Marge De Sécurité Dans Les Canaux (Revanche)

Dans les canaux à surface libre, une perte de charge inattendue peut entraîner une élévation de la surface de l'eau, augmentant ainsi le risque de débordement. Pour éviter cela, il est nécessaire de prévoir une marge de sécurité au-dessus de la ligne d'eau calculée. Cette marge tient compte de facteurs tels que les dépôts solides, la croissance de la végétation et les vagues provoquées par le vent.

En règle générale, la marge de sécurité varie de 0,30 mètre pour les petits canaux à 0,60 à 1,20 mètre pour les canaux plus importants. Il est essentiel de prendre en compte toutes les circonstances susceptibles de modifier ces recommandations (Lencastre, 2008).

TABLE 3.2 – Revanches utilisées (Degoutte, 2012)

Débit (m^3/s)	Q <0.75	0.75 <Q <1.5	1.5 <Q <1.8	Q <8.5
Revanche (m)	0.45	0.6	0.75	0.9

Vitesse D'érosion

Pour éviter que l'action dynamique de l'écoulement de l'eau n'endommage le lit et les berges du canal, la vitesse de l'eau ne doit pas dépasser la vitesse maximale admissible. Les vitesses moyennes d'érosion pour les lits consolidés sont indiquées dans le tableau ci-dessous (Degoutte, 2012).

TABLE 3.3 – Valeurs de vitesse moyenne limite d'érosion pour les lits consolidés (Degoutte, 2012).

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

3.5 Modélisation Du Cours D'eau Non Aménagé

3.5.1 Choix Du Type De Modèle Hydraulique

Le choix de HEC-RAS (version 6.4.1) repose sur plusieurs avantages essentiels :

— Il permet de modéliser des écoulements à surface libre stables et instables, ce qui est particulièrement utile pour simuler les débordements de canaux dans des plaines d'inondation actives.

— Il est librement accessible et téléchargeable, ce qui en fait une solution rentable.

— Le logiciel permet l'intégration de divers ouvrages hydrauliques, tels que des digues, des ponts et des vannes, ce qui améliore la précision des simulations.

— Il fournit des résultats cartographiques qui aident à identifier les zones à risque d'inondation, facilitant ainsi la mise en place de stratégies efficaces de gestion des inondations.

3.5.2 Présentation Du Logiciel HEC-RAS

HEC-RAS est un logiciel d'analyse hydraulique développé par l'U.S. Army Corps of Engineers pour simuler les écoulements à surface libre. Il est doté d'une interface graphique permettant d'éditer et de visualiser les données et les résultats, et s'appuie sur le modèle précédent HEC-2. Largement utilisé par les bureaux d'études et les agences gouvernementales, HEC-RAS prend en charge diverses fonctions telles que l'analyse des précipitations et du ruissellement, l'hydraulique fluviale, l'évaluation des dommages causés par les inondations, le transport des sédiments, l'analyse de la qualité de l'eau et la conception d'ouvrages hydrauliques.

Objectif Du Logiciel

L'objectif de HEC-RAS est de fournir un outil polyvalent et intégré pour la modélisation hydraulique et hydrologique. Il vise à simuler les écoulements à surface libre dans les canaux naturels et aménagés, permettant aux utilisateurs d'analyser et de prévoir l'hydraulique fluviale, le comportement des plaines d'inondation et l'impact des structures hydrauliques. Le logiciel prend en charge diverses applications, notamment l'évaluation des risques d'inondation, l'analyse du transport des sédiments et l'évaluation de la qualité de l'eau, tout en facilitant la conception et l'évaluation des infrastructures hydrauliques.

Fonctionnement De HEC-RAS

HEC-RAS est capable de modéliser une large gamme de conditions d'écoulement avec une précision détaillée. Le centre de contrôle, le composant central de HEC-RAS, intègre et gère différents types de données :

— Géométrie : informations sur les sections transversales de la rivière ou du canal, les limites et les structures hydrauliques.

— Débit et conditions aux limites : données sur le débit entrant, le débit sortant et d'autres facteurs affectant les conditions de débit.

— Conditions de calcul : Paramètres pour les simulations, y compris les types d'écoulement (régulier ou instable) et les conditions dépendant du temps.

— Résultats : résultats des simulations tels que les profils de surface de l'eau, les vitesses d'écoulement et les cartes des plaines inondables.

—

3.5.3 Application D'HEC-RAS Sur Oued EL Kerma

Banque De Données Nécessaires à L'application Du Modèle HECRAS

L'application du modèle HEC-RAS nécessite une banque de données concernant le site étudié :

- La section en travers, définie par une série de couples distance -altitude ;
- La distance à la section suivante (Rives et axe canal) ;
- Les coefficients de contraction et d'expansion ;
- Les données de l'écoulement et les conditions aux limites ;

Les Données Géométriques

Les données géométriques nécessaires consistent à établir la connectivité de l'information pour le système de rivière (schéma de système de rivière), les données des sections transversales, et les données d'ouvrages hydrauliques existants ou projetés (ponts, levées, structures latérales, déversoirs, etc.).

Nous avons construit les profiles en travers en suivant les étapes qui seront présentées prochainnement.

Construction Du TIN (Terrain Irreguler Network)

Le TIN (Triangulated Irregular Network) représente avec précision le terrain extérieur et peut être facilement adapté à différents niveaux de complexité du terrain.

Nous créons un TIN à l'aide du logiciel ArcGIS pour visualiser les données d'écoulement dans RAS Mapper, ce qui nous permet de générer des cartes de profondeur, des cartes de vitesse et d'autres analyses essentielles.
La figure3.7 montre le TIN établi :

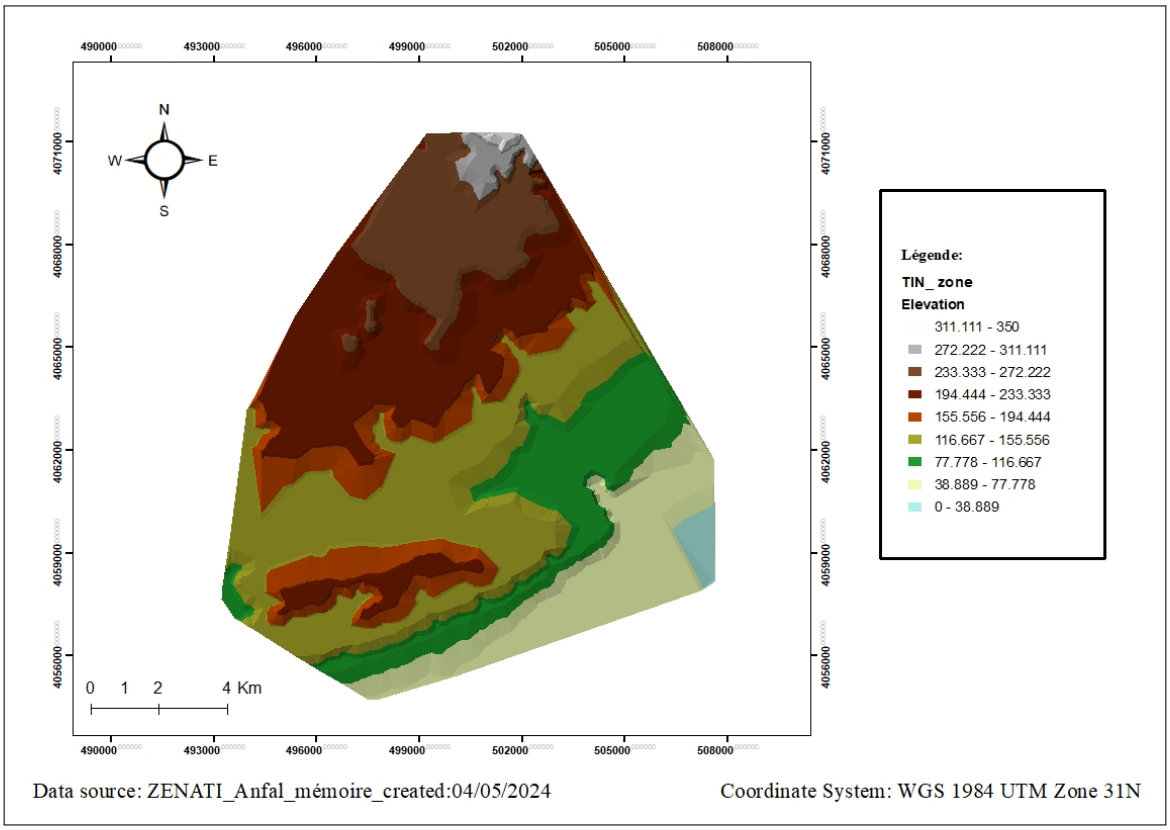


FIGURE 3.7 – TIN (réseau irrégulier triangulé) de l'Oued EL Kerma

Une fois que nous avons créé notre Triangular Irregular Network (TIN), nous l'exportons avec un fichier de projection ESRI (.prj). Ce fichier contient des informations sur le système de coordonnées spécifique adapté à notre zone d'étude, que nous avons obtenues à partir du site web "Spatial Reference". Ensuite, nous importons ce TIN dans le logiciel HEC-RAS afin que RAS-MAPPER puisse le simuler avec précision. L'importation du TIN en image vers RAS MAPPER.

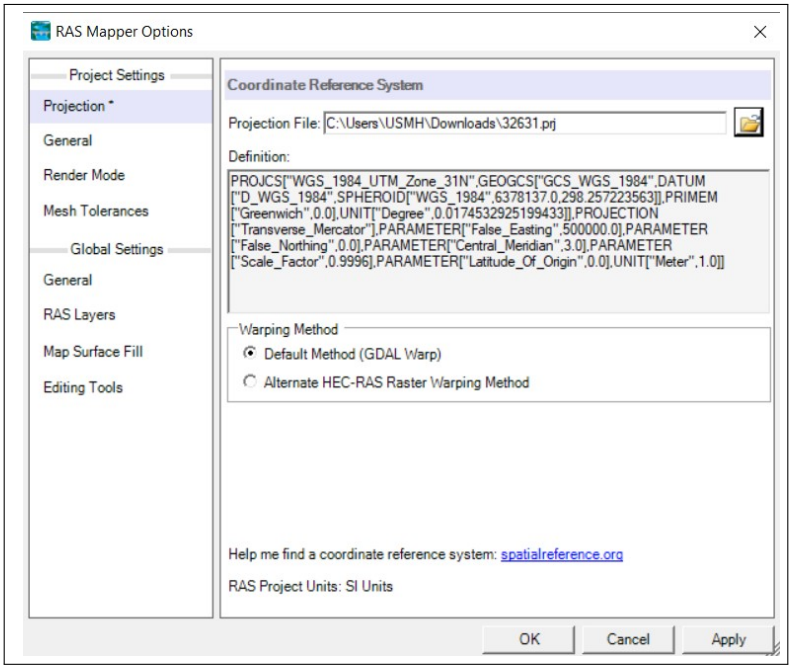


FIGURE 3.8 – : Insertion fichier de projection.

Les sections transversales tirées à partir du RAS MAPPER sont représentées dans la figure ci-dessous :

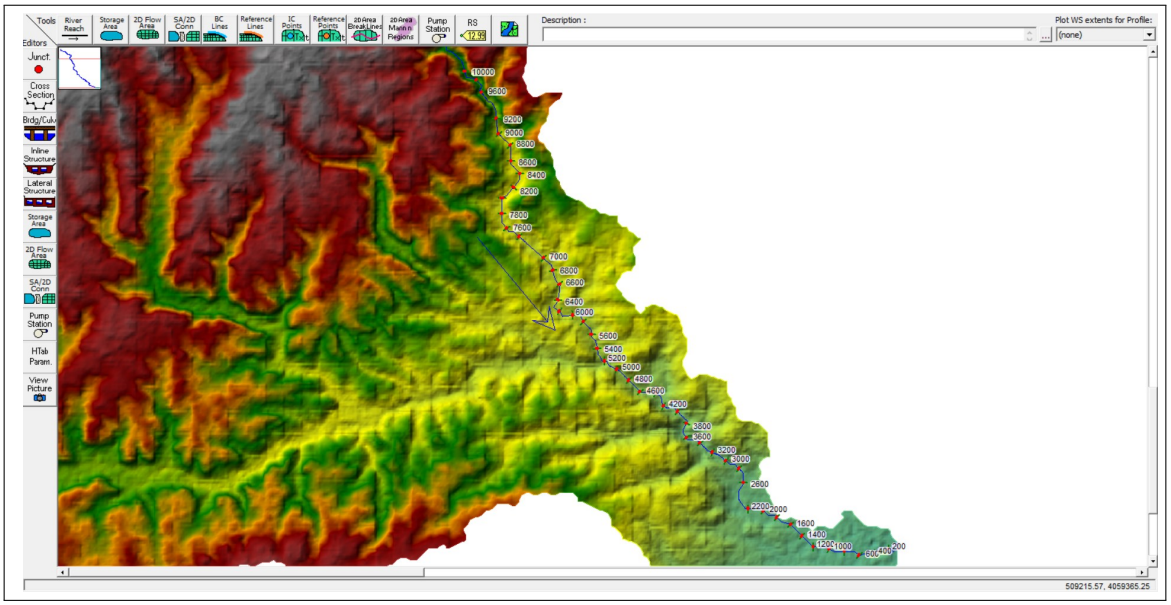


FIGURE 3.9 – Définition du tracé de l'oued Agrioune et des sections en travers de l'oued.

Simulation

Après avoir introduit les données géométriques, hydrométriques et les conditions aux limites, nous devons choisir un régime fluvial, torrentiel ou mixte pour effectuer le calcul. Dans notre cas, nous supposons un régime mixte et lançons la simulation.

— Le débit centennale calculé dans la partie hydrologique qui est de 1500m3/s ;

— Le coéfficient de frottement (coéfficient de Maning) : $n = 0.032$

Résultat De La Simulation

Les données géométriques, y compris les profils en travers, les débits de pointe pour diverses périodes de retour et les conditions limites, ont été introduites dans le logiciel HEC-RAS. Cela a permis d'effectuer des calculs et d'extraire des résultats, tels que des vues de profil des sections simulées, des niveaux d'eau pour chaque période de retour le long des profils, des vues tridimensionnelles des niveaux d'eau dans la zone d'étude, des tableaux descriptifs et la courbe de tarification.

1. **Le profil en long :**
   La ligne d'eau représente une vue de profil de la section étudiée, montrant la surface de l'eau de l'oued EL Kerma et le niveau d'eau correspondant à la période de retour de 100 ans.

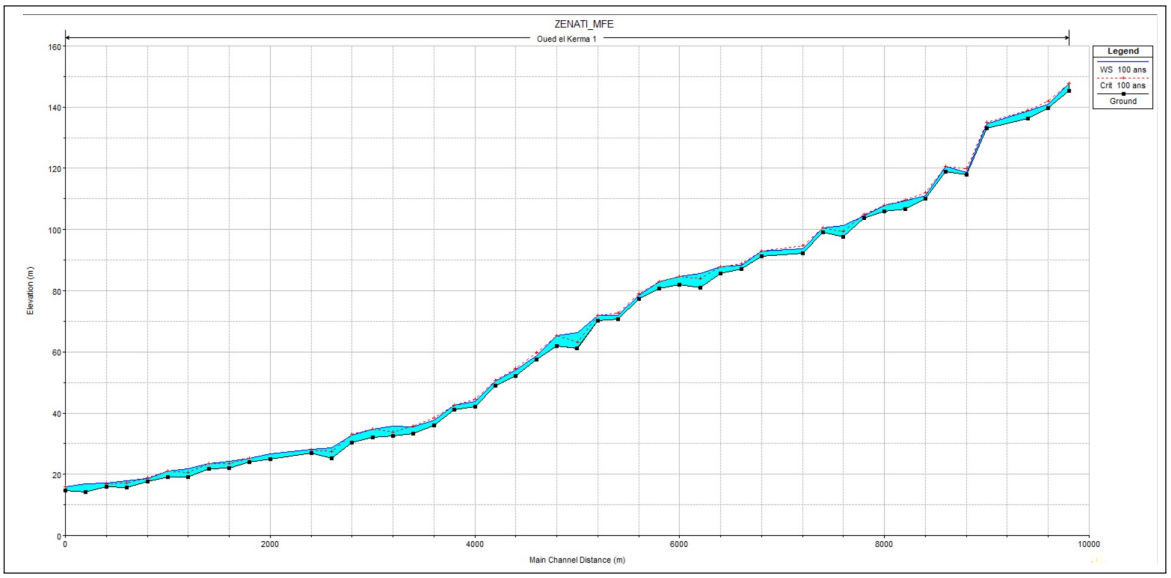


FIGURE 3.10 – Profil en long du cours d'eau à l'état naturel pour une crue centennale.

2. **Vue en trois dimensions du tronçon modélisé :**
   HEC-RAS offre une vue tridimensionnelle qui facilite le suivi du comportement des eaux de crue à travers différentes périodes de retour, fournissant une visualisation plus claire des niveaux d'eau, des schémas d'écoulement et des impacts potentiels des inondations dans la section modélisée.

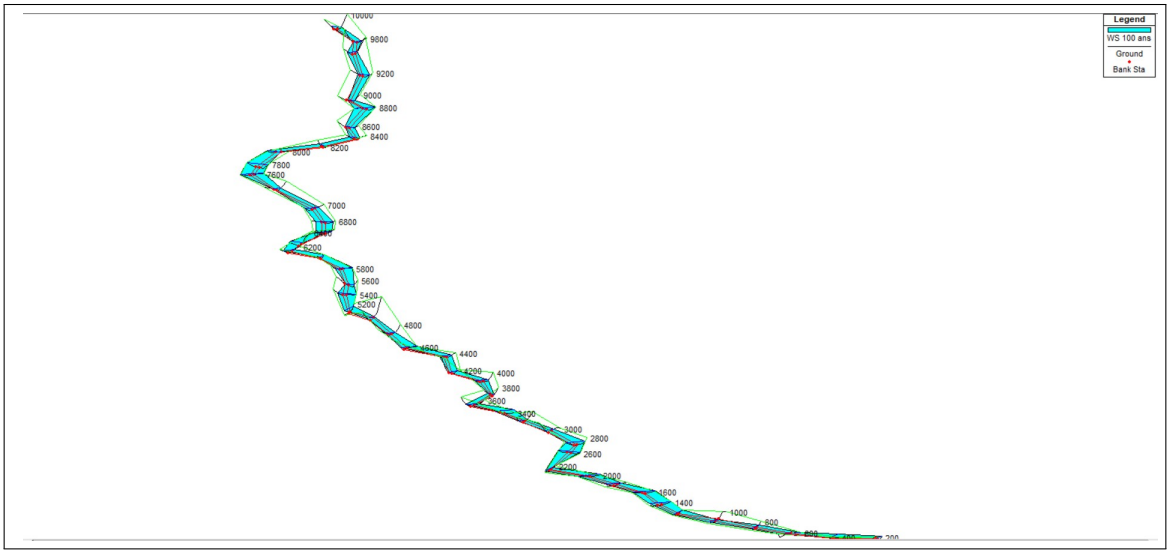


FIGURE 3.11 – Vue en Plan en 3D d'Oued El Kerma.

3. **Restitution de la courbe de tarage :**
   HEC-RAS a permis de fournir une représentation de la variation de la hauteur d'eau en (m) en fonction de débit en m^3/s.

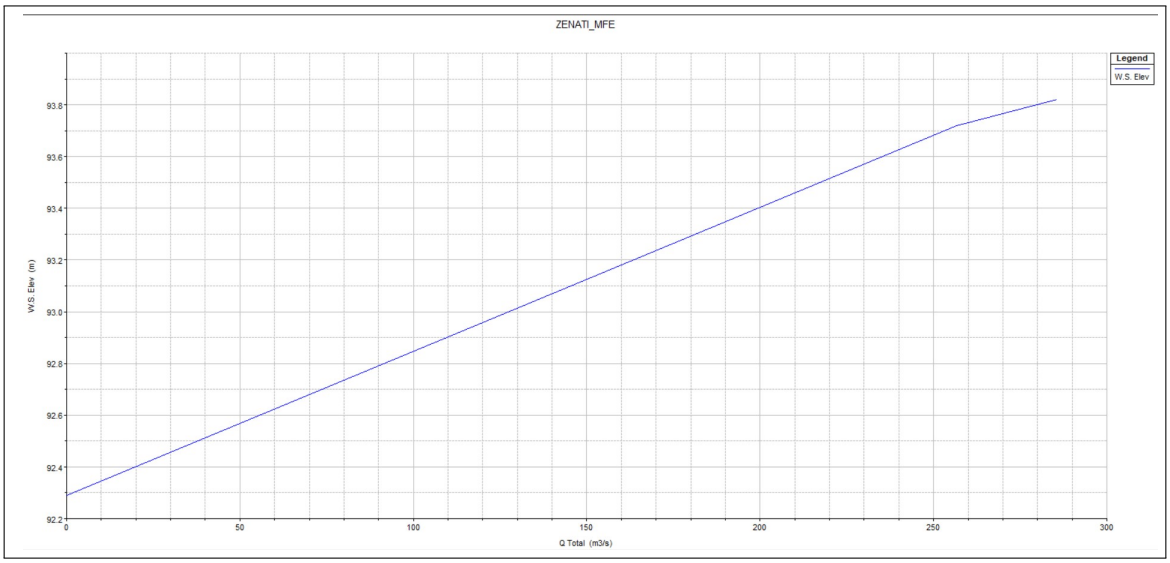
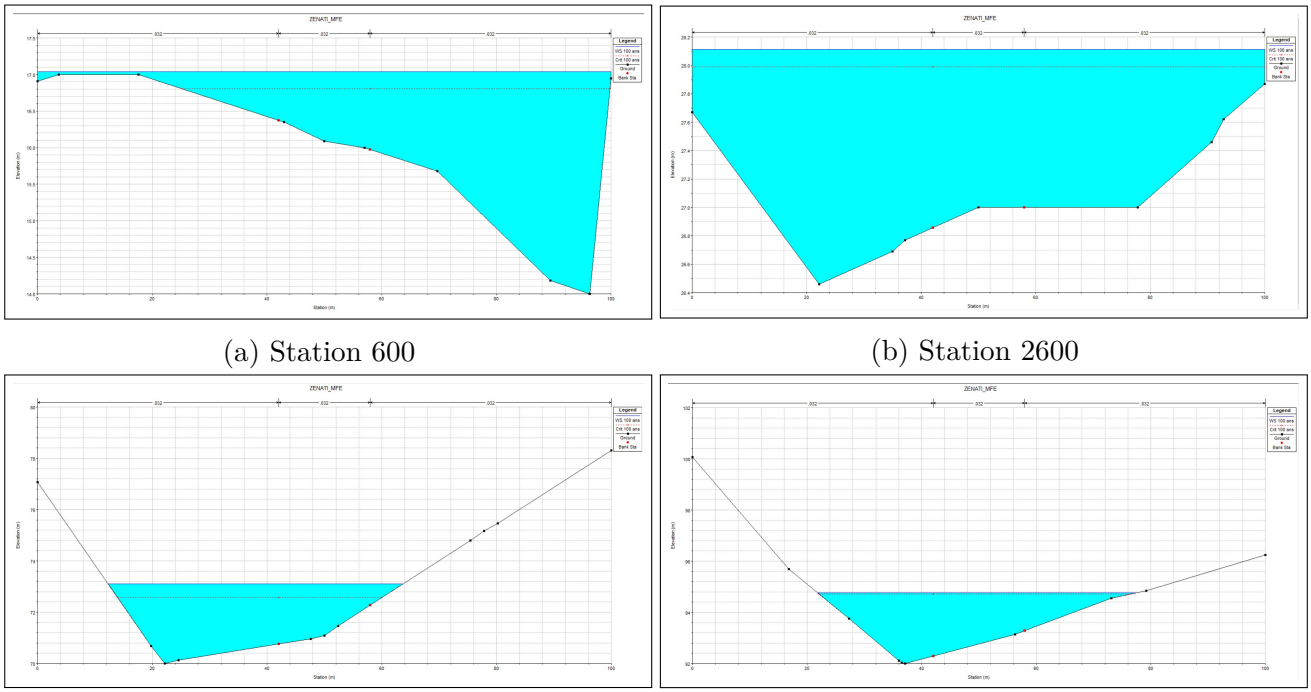


FIGURE 3.12 – Courbe de tarage du tronçon modélisé d'Oued El Kerma.

4. **Les profils en travers :**
   Cette option de présentation des résultats par profil transversal nous a permis d'obtenir un maximum de détails à chaque point sélectionné le long du cours de la rivière, où pas mal des sections sont soumises à la submersion.



(a) Station 600 (b) Station 2600

(c) Station 5600 (d) Station 7400

FIGURE 3.13 – Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued EL Kerma.

5. **Variation de la Vitesse d'Écoulement :** La variation de la vitesse d'écoulement de l'eau en fonction de la distance par rapport à l'exutoire pour chaque période de retour de 50 et 100 ans pour chaque section est illustrée dans les figures suivantes. Cette figure fournit une analyse comparative de la façon dont les vitesses d'écoulement changent à travers les différentes sections de la rivière au fil du temps et dans des conditions d'inondation variées.

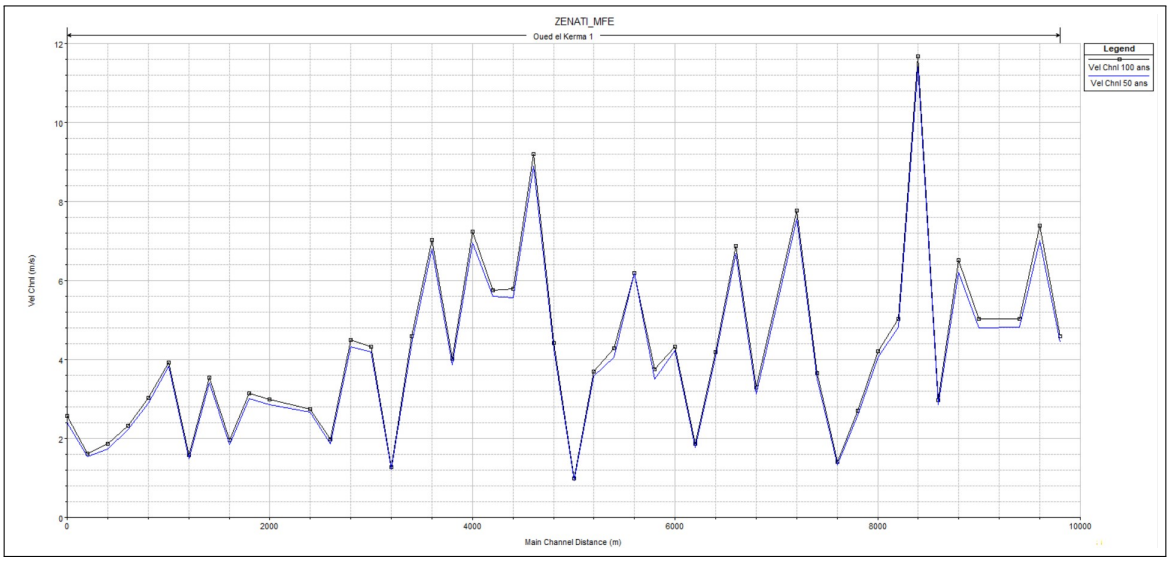


FIGURE 3.14 – Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance dans l'Oued El Kerma.

6. **Évolution du Nombre de Froude :** La variation du nombre de Froude est représentée en fonction de la distance pour chaque période de retour 50 et 100 ans.

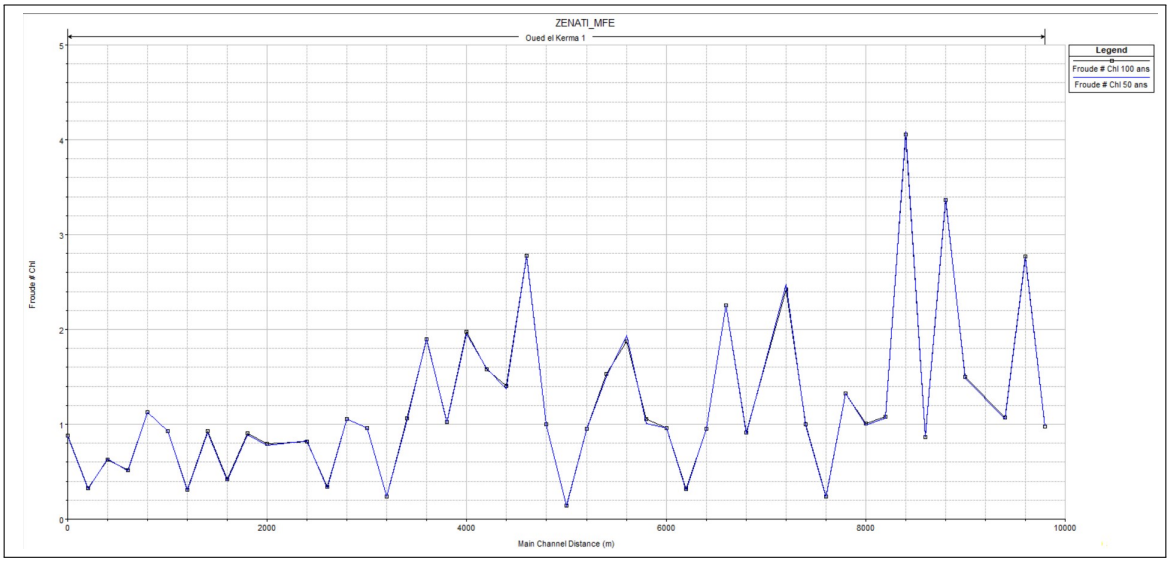


FIGURE 3.15 – Évolution du nombre de Froude en fonction de la distance dans l'Oued El Kerma.

7. **Paramètres Hydrauliques pour l'Ensemble des Stations :**
   Le Tableau **??** récapitule l'ensemble des paramètres hydrauliques pour l'ensemble des stations à la fois.

TABLE 3.4 – Principaux paramètres hydrauliques pour l'ensemble des stations d'Oued EL Kerma (Source :Logiciel 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)	
10000	145.39	147.69	147.69	148.54	0.007324	4.59	72.99	43.34	0.98
9800	139.67	140.95	141.88	144.80	0.085995	7.38	33.35	38.22	2.77

9600	136.33	138.84	138.99	139.87	0.008905	5.02	67.21	42.06	1.07
6400	133.01	134.56	134.98	135.93	0.021539	5.03	56.07	50.43	1.50
9200	117.90	118.67	119.97	126.49	0.157303	6.52	24.17	29.18	3.37
9000	118.86	120.61	120.61	121.19	0.007168	2.97	89.33	88.56	0.87
8800	110.00	111.02	112.02	116.58	0.175238	11.68	28.60	46.87	4.06
8600	106.76	109.39	109.58	110.37	0.009128	5.02	70.89	51.40	1.08
8400	106.00	107.89	107.91	108.53	0.008331	4.21	84.87	69.80	1.00
8200	103.62	104.48	104.90	105.80	0.023444	2.70	58.86	64.36	1.32
8000	97.56	101.28	99.30	101.35	0.000376	1.42	245.92	96.31	0.24
7800	99.14	100.64	100.64	101.11	0.009092	3.65	96.75	100.00	1.00
7600	92.29	93.82	94.72	97.11	0.057907	7.76	36.38	37.36	2.42
7400	91.18	92.85	92.85	93.51	0.007587	3.29	82.76	64.29	0.91
7200	87.04	88.27	88.81	90.21	0.051930	6.88	48.62	73.28	2.25
7000	85.63	87.71	87.71	88.34	0.007295	4.20	86.79	68.58	0.95
6800	81.00	85.53	83.98	85.67	0.000671	1.87	175.17	61.98	0.31
6600	82.00	84.54	84.54	85.28	0.007247	4.33	79.34	55.51	0.96
6400	80.84	82.85	82.93	83.59	0.010232	3.76	75.95	62.08	1.05
6200	77.39	78.60	79.01	79.96	0.034141	6.19	57.62	75.20	1.88
6000	70.76	71.97	72.56	73.83	0.025604	4.28	48.72	40.07	1.53
5800	70.17	72.04	72.04	72.58	0.007973	3.70	90.94	80.50	0.96
5600	61.15	66.31	63.11	66.35	0.000119	0.98	341.29	88.55	0.14
5400	61.97	65.25	65.25	66.18	0.008202	4.42	67.01	37.41	1.00
5200	57.50	58.76	59.62	62.24	0.075012	9.19	36.40	45.56	2.78
5000	52.07	54.16	54.56	55.48	0.016474	5.79	63.73	72.90	1.40
4800	49.00	50.36	50.75	51.62	0.022725	5.75	59.27	59.43	1.58
4600	42.00	43.82	44.51	45.94	0.035436	7.24	46.17	46.34	1.97
4400	41.00	42.58	42.58	43.24	0.008976	4.02	80.56	62.44	1.02
4200	36.08	37.79	38.47	39.97	0.032512	7.02	45.82	43.29	1.90
4000	33.26	35.56	35.68	36.43	0.009149	4.59	72.43	53.31	1.06
3800	32.48	35.72	33.86	35.81	0.000413	1.28	228.33	86.52	0.24
3600	32.13	34.77	34.77	35.53	0.007294	4.32	77.36	51.91	0.96
3400	30.42	32.89	33.01	33.88	0.009225	4.49	66.43	42.05	1.06
3200	25.11	28.71	27.39	28.84	0.000766	1.98	187.46	85.21	0.34
3000	26.86	28.11	27.99	28.48	0.006380	2.74	107.87	100.00	0.82
2800	25.00	26.57		27.03	0.005579	3.00	97.73	74.05	0.79
2600	23.90	25.26	25.26	25.74	0.007643	3.15	98.73	100.00	0.90
2200	22.00	24.33	23.38	24.52	0.001385	1.96	152.17	76.56	0.42
2000	21.75	23.48	23.48	23.95	0.007597	3.54	99.51	100.00	0.93
1800	19.00	21.78	20.49	21.89	0.000700	1.57	205.67	100.00	0.31
1600	19.00	21.01	21.01	21.52	0.007066	3.93	99.17	94.75	0.93
1400	17.61	18.58	18.79	19.56	0.014262	3.03	66.46	54.09	1.13
1200	15.61	17.81	17.14	18.05	0.002122	2.32	134.54	79.65	0.52
1000	15.97	17.04	16.80	17.48	0.004139	1.87	105.51	100.00	0.63
800	14.30	16.96		17.09	0.000760	1.61	191.65	88.18	0.32
600	14.74	16.01	16.01	16.68	0.008112	2.58	80.67	59.92	0.88
400	8.80	12.85	11.37	13.22	0.002031	2.71	105.45	32.13	0.48
200	8.70	11.27	11.27	12.38	0.009921	4.66	61.28	27.71	1.00

Avec :

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

Interprétation Des Résultats

Vue le niveau d'eau dans toutes les sections en travers de l'oued, nous remarquons que ce dernier est inondé sur la majorité de sa longueur, selon les paramètres suivants :

— La vitesse d'écoulement varie entre 0.98 m/s et 11.68 m/s ;
— La variation du régime d'écoulement le long de l'Oued.Cette constatation est confirmée par les valeurs dunombre de Froude qui variant entre 0.24 et 4.06 .

3.5.4 La Délimitation Des Zones Inondables

Notre objectif dans ce chapitre est la délimitation des zones inondables et sur la base des résultats de la simulation précédente et en utilisant l'application RAS-Mapper intégré dans HEC-RAS version 6.4.1, on a créé une carte des zones inondables de la commune de Staoueli pour un débit de Crue centennale comme le montre la figure suivante :



FIGURE 3.16 – la carte des zones inondables (Source : RAS-MAPPER).

Cette carte peut être dynamique, intégrant d'autres débits de crues et permet aussi d'ajouter d'autres ouvrages en travers du cheminement des Oueds, ceci un outil majeur dans l'aménagement urbain.

3.5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé la réponse de la zone d'étude à une crue centennale à l'aide du logiciel HEC-RAS. Cette analyse a consisté à identifier les zones inondables et à créer une carte de profondeur pour déterminer la profondeur de l'eau à différents endroits.

L'examen détaillé de ces zones sensibles constitue une base solide pour la planification de mesures préventives ciblées. Ces résultats nous guideront dans la phase suivante du projet, au cours de laquelle nous évaluerons en détail diverses alternatives. L'objectif est d'explorer des solutions innovantes et durables pour améliorer la protection contre les inondations, en tenant compte des caractéristiques uniques des zones à risque.

Chapitre 4

ÉTUDES DES VARIANTES D'AMÉNAGEMENT

4.1 Introduction

L'objectif de cette étude est d'assurer un niveau adéquat de protection contre les inondations pour les villes situées le long de l'Oued El Kerma.Cette protection passe par la sélection des solutions d'aménagement les plus adaptées, sur la base des différentes options proposées dans les chapitres précédents, en tenant compte des caractéristiques naturelles de la zone d'étude. L'objectif est de sélectionner les options les plus appropriées dans le but de protéger l'ensemble de la ville le long de l'Oued EL Kerma contre les inondations.

Cet objectif sera atteint en facilitant l'évacuation des eaux de crue vers l'exutoire, tout en respectant toutes les exigences pertinentes relatives à l'écoulement, à la stabilité des berges et à l'impact environnemental de ces aménagements. Le processus de sélection se déroulera donc en plusieurs étapes distinctes.

4.2 Présentation Des Grandes Orientations

4.2.1 Protection Contre L'érosion

Deux types d'érosion sont considérés :

— L'érosion des berges .

— L'érosion du fond de lit.

Érosion Des Berges

Les stratégies de protection des berges sont basées sur deux cadres conceptuels distincts :

— La protection linéaire ;

— La protection par épis.

Dans la plupart des cas, la protection linéaire est la solution privilégiée. Toutefois, son efficacité peut être limitée dans les zones présentant des anses d'érosion à rayon étroit ou des méandres fluviaux prononcés. Dans ces situations, l'utilisation d'une protection en épi doit être envisagée.

Pour les rivières dont le charriage est important, il existe un risque de déstabilisation de la tête de l'épi, pouvant conduire à sa destruction partielle ou complète.La conception et le dimensionnement des épis ne sont pas encore parfaitement connus et une surveillance fréquente est nécessaire.

Trois techniques sont disponibles pour ces systèmes de protection :

1. Protection par enrochement ;
2. Protection par gabions et enrochements ;
3. Protection par matelas Reno.

Érosion Du Lit

Le processus d'érosion du lit peut être attribué à plusieurs facteurs :

— **Causes naturelles :** Le lit de la rivière ajuste sa pente pour s'adapter aux nouvelles conditions hydrologiques et à la dynamique du transport des sédiments.

— **Extraction des matériaux du lit :** L'extraction des matériaux du lit entraîne une érosion régressive en amont et parfois une érosion progressive en aval.

— Les constructions qui limitent la plaine inondable de l'oued, telles que les digues et les remblais, peuvent exacerber l'érosion.

Les deux premiers facteurs sont particulièrement importants pour l'oued EL Kerma .

L'enfoncement du lit de la rivière affecte directement la stabilité des berges en affaiblissant leur base.

4.2.2 La Protection Contre Les Inondations

Les solutions pour réduire le risque d'inondations sur les zones à enjeux actuellement inondables sont de deux types :

Protection Directe (Rapprochées)

La protection directe consiste à intervenir directement sur le site menacé par la mise en œuvre des actions suivantes :

1. **Curage :** Permet une nette amélioration des conditions d'écoulement en éliminant tous les obstacles et les dépôts qui entravent l'écoulement des eaux dans le cours d'eau. Le débroussaillage est également nécessaire à la traversée des agglomérations pour des raisons sanitaires et en sections courantes pour diminuer la rugosité et accroître la débitance.
2. **Recalibrage :** Consiste à élargir et approfondir les sections des cours d'eau pour augmenter leur capacité d'évacuation des eaux et assurer une section mouillée répondant aux critères de protection désirés.
3. **Réalisation de Canaux :** Permet de régénérer le couloir initial de l'oued. Cette solution est indispensable dans le cas où le lit de l'oued et son domaine hydraulique ont été complètement occupés par des bâtiments ou par la voirie.

4. **Protection des Berges :** Comprend tout ouvrage visant à maintenir la stabilité des terres en dépit de l'action de l'eau. Les berges sont en effet attaquées par des courants perturbateurs générés par les crues. De même, les terres glissent par suite de l'infiltration de l'eau après le retrait de la crue. La protection des berges est également nécessaire au voisinage de certains ouvrages tels que les ponts.
5. **Endiguement des Oueds :** Par la réalisation de digues qui longent le cours d'eau sur ses deux berges. Cette opération est aisément réalisable par les ressources locales en main d'œuvre et en matériaux. Par ailleurs, ce type de protection permet en outre de réaliser une protection sélective. Il peut en effet être établi graduellement en commençant par mettre à l'abri, de la plupart des crues, la partie la plus riche et la plus peuplée des zones exposées. En contrepartie, on notera que ce procédé de protection présente l'inconvénient de provoquer une surélévation souvent notable du niveau des eaux et rend en outre plus difficile le drainage des terrains bas (Nedelec et al., 2004).
6. **Lit Artificiel « Canal Bétonné – Enrochement – Gabionnage - Matelas Reno » :** C'est la protection des berges et le lit de l'oued quel que soit en béton armé ou en blocs de roches ou Gabion. Ces méthodes sont les plus coûteuses et très fréquentes dans les zones urbaines selon l'adaptabilité aux conditions du terrain aussi bien topographique que géologique.

Protection Indirecte (Éloignées)

La protection indirecte, par contre, consiste à intervenir plus loin des sites menacés, à l'extérieur du périmètre d'aménagement, en réalisant des ouvrages sur les oueds responsables des inondations :

1. **Création de Canaux Périphériques :** Dérivation des eaux vers les oueds permettant de les restituer vers des zones situées en dehors des aires à protéger. Cette déviation pourrait concerner une partie ou la totalité des eaux d'un oued vers un autre.
2. **Réalisation de Seuils :** Pour stockage et laminage des crues à l'amont des zones menacées. Le volume et la capacité de laminage du barrage devront être optimisés de manière à répondre au mieux à la protection envisagée.
3. **Aménagement des Bassins Versants :** Aménagement contre l'érosion par des méthodes biologiques et/ou par la construction de seuils en gabions qui permettent la réduction des vitesses d'écoulement et le dépôt des sédiments en amont (Nedelec et al., 2004).

4.3 Aménagement Proposé Sur Le Tronçon De L'oued EL Kerma

4.3.1 Première Variante : Canal En Béton Armé

La première variante proposée consiste à concevoir un canal trapézoïdal en béton armé avec des pentes de remblai de m = 0,577, connues sous le nom de « section la plus efficace », et un angle de 60° pour faciliter la construction sur le site.

La simulation de ces canaux se fait à l'aide du logiciel FLOW MASTER dont à travers ce dernier nous déterminons les caractéristiques de notre canal ; puis on le simule sur HECRAS.

Les Avantages

- Longue durée de vie.
- Facile à nettoyer et à entretenir.
- Matériaux de construction facilement disponibles.
- Conception adaptée aux environnements urbains.

Inconvénients

- Coûts de génie civil élevés.
- Adaptation limitée aux zones présentant des vitesses d'écoulement élevées et des pentes raides.
- Faible rugosité de la surface.
- Réduction de la diversité écologique et de la capacité d'auto-épuration du cours d'eau.
- Restreint l'interaction et l'échange entre les eaux souterraines et le cours d'eau.

Dimensionnement

Le calcul des caractéristiques du canal est fait à l'aide du logiciel FLOW MASTER,

Les résultats du calcul hydraulique du canal trapézoïdal sont présentés ci-dessous :

Table 4.1 – Dimensions de l'aménagement d'oued EL Kerma (canal en béton)

Tronçon	Section de départ	Section d'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal (m)
Oued EL Kerma	10000	200	9800	0.001	1	20	25.79	2.9

Les dimensions du canal sont représentés par la figure 4.2 :

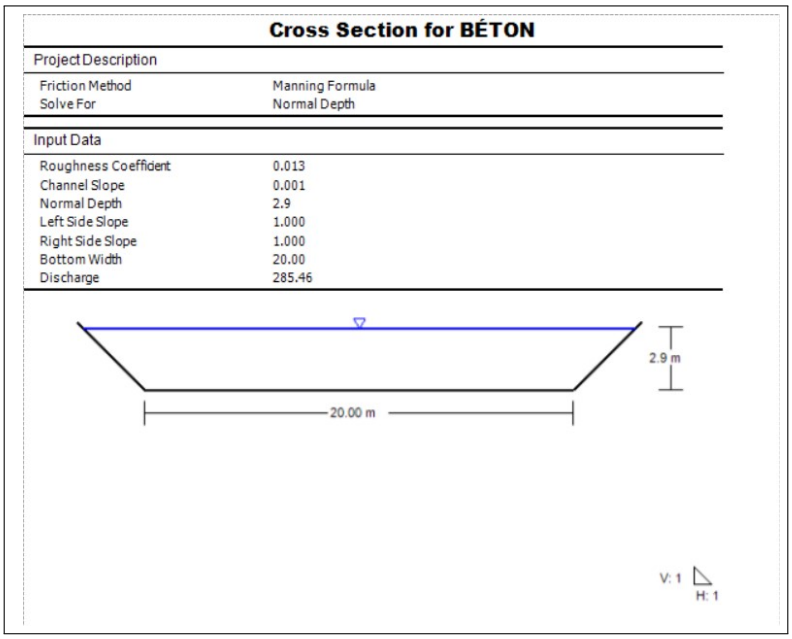


FIGURE 4.1 – Dimensions d'Aménagement d'Oued EL Kerma pour un canal en béton armé(Source FLOWMASTER).

Paramètres D'écoulement

les paramètres d'écoulement sont résumés dans le tableau ci-dessous :

TABLE 4.2 – Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en béton d'Oued EL Kerma (Source :Logiciel 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)	
10000	140.89	143.51	143.51	144.69	0.001398	4.81	59.32	25.24	1.00
9800	137.17	138.50	139.79	143.66	0.013503	10.06	28.37	22.66	2.87
9600	132.83	134.04	135.45	140.38	0.018685	11.16	25.59	22.41	3.33
9200	128.51	129.95	131.13	134.32	0.010430	9.26	30.82	22.87	2.55
8800	112.36	113.53	114.98	120.26	0.020472	11.48	24.86	22.35	3.48
8400	103.26	104.48	105.88	110.67	0.017938	11.01	25.92	22.44	3.27
8200	101.50	102.92	104.12	107.41	0.010864	9.39	30.42	22.84	2.60
8000	99.82	101.33	102.44	105.29	0.008930	8.81	32.39	23.01	2.37
7800	95.06	96.27	97.76	102.57	0.018460	11.11	25.69	22.42	3.32
7600	93.64	95.10	96.26	99.31	0.009826	9.09	31.41	22.93	2.48
7400	89.79	91.06	92.41	96.73	0.015615	10.54	27.09	22.55	3.07
7000	86.68	88.25	89.30	91.85	0.007705	8.41	33.96	23.15	2.22
6800	82.54	83.81	85.16	89.51	0.015774	10.57	27.00	22.54	3.08
6600	81.13	82.62	83.75	86.65	0.009160	8.89	32.13	22.99	2.40
6400	78.50	79.90	81.12	84.55	0.011463	9.55	29.90	22.79	2.66
6200	78.00	79.79	80.62	82.52	0.005004	7.31	39.04	23.58	1.81
6000	76.84	78.59	79.46	81.46	0.005419	7.50	38.05	23.50	1.88
5800	72.89	74.20	75.51	79.55	0.014304	10.25	27.86	22.61	2.95
5600	67.26	68.38	69.88	75.74	0.023575	12.01	23.77	22.25	3.71
5400	65.67	67.06	68.29	71.73	0.011556	9.57	29.82	22.79	2.67
5000	56.47	57.84	59.08	62.67	0.012197	9.74	29.31	22.74	2.74

4800	53.00	54.28	55.62	59.87	0.015323	10.47	27.25	22.56	3.04
4600	47.57	48.70	50.19	55.98	0.023193	11.95	23.89	22.26	3.68
4400	44.50	45.75	47.12	51.66	0.016701	10.77	26.52	22.50	3.17
4000	36.50	37.91	39.12	42.45	0.011044	9.43	30.26	22.83	2.62
3800	31.58	32.76	34.20	39.35	0.019813	11.37	25.12	22.37	3.43
3600	28.76	30.05	31.38	35.59	0.015106	10.43	27.38	22.57	3.02
3400	27.98	29.61	30.60	32.97	0.006902	8.11	35.19	23.25	2.11
3200	27.63	29.71	30.25	31.67	0.003017	6.20	46.04	24.17	1.43
3000	25.92	27.61	28.54	30.72	0.006162	7.82	36.50	23.37	2.00
2800	21.61	22.88	24.23	28.59	0.015853	10.59	26.96	22.54	3.09
2600	21.36	23.09	23.97	26.00	0.005534	7.55	37.79	23.48	1.90
2200	20.50	22.87	23.12	24.35	0.001950	5.37	53.14	24.75	1.17
2000	19.40	21.29	22.02	23.71	0.004147	6.88	41.50	23.79	1.66
1800	17.50	19.11	20.12	22.54	0.007126	8.20	34.83	23.22	2.14
1600	17.25	19.40	19.87	21.23	0.002713	5.99	47.67	24.30	1.37
1400	14.50	15.98	17.12	20.08	0.009430	8.97	31.83	22.96	2.43
1200	14.50	16.65	17.12	18.48	0.002722	5.99	47.62	24.30	1.37
1000	13.11	14.89	15.73	17.66	0.005134	7.37	38.72	23.56	1.84
800	11.11	12.68	13.73	16.32	0.007844	8.45	33.77	23.13	2.23
600	11.07	13.37	13.69	14.95	0.002175	5.57	51.26	24.60	1.23
400	9.80	11.63	12.42	14.24	0.004678	7.15	39.91	23.66	1.76
200	9.70	12.32	12.32	13.50	0.001406	4.82	59.22	25.24	1.00

Avec :

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

Interprétation

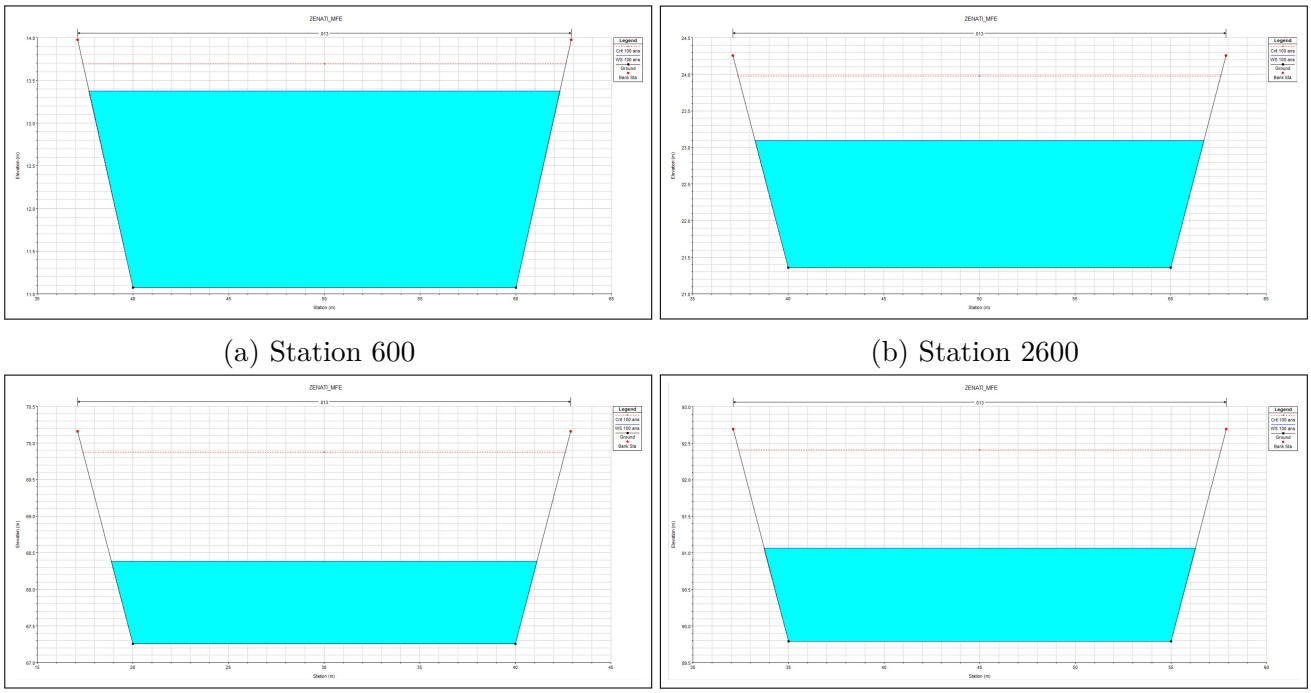
En se basant sur les résultats du tableau, on remarque que :

— Selon les valeurs du nombre de Froude, il est notable que le régime d'écoulement est en mode torrentiel Fr > 1.
— La vitesse d'écoulement dépasse 10 m/s, ce qui n'élimine pas le risque d'érosion du béton.

Sur le plan technique, le canal en béton armé de forme trapézoïdale offre une protection satisfaisante mais toujours un problème d'érosion.

Les Sections En Travers

Pour une crue centennale de 285.46 m3/s, nous remarquons que notre canal assure une protection et que l'eau ne déborde pas.



(a) Station 600

(b) Station 2600

(c) Station 5600

(d) Station 7400

FIGURE 4.2 – Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued EL Kerma.

Estimation Du Coût De La Variante

Devis de la variante canal en béton armé est déterminé à partir des quantités des terrassements et des volumes de remblai et le déblai calculés par HEC-RAS et une épaisseur de 15 cm pour le béton Armé. Pour le béton de propreté on prend une épaisseur de 5 cm.

TABLE 4.3 – Devis de la variante canal en béton armé.

Désignations des travaux		**Quantité**	**Unité**	**Prix unitaire (DA)**	**Montant (DA/mL)**
Terrassement	**Déblais**	37191	m3	250,00	9.297.750,00
	Remblais	0	m3	700,00	0,00
Béton de propreté		11410	m3	13.000,00	148.330.000,00
Béton dosé à 350 Kg/m4		2671	m3	40.000,00	106.840.000,00
				HT (DA)	264.467.750,00
				TVA (%)	19
				TTC (DA)	314.716.622,50

4.3.2 Canal En Gabion

Les matelas de gabions sont principalement utilisés pour le revêtement des canaux et la protection contre l'affouillement. Ils sont disponibles en différentes tailles, les plus courantes étant 2,0×1,0×0,5 mètres et 2,0×1,0×1,0 mètres. La construction des canaux en gabion suit une méthode spécifique : les sacs de gabion sont placés en gradins pour améliorer la stabilité des berges.

L'aménagement des canaux en Gabion est caractérisé par :

Les Avantages

- Le temps de construction est court en raison de la simplicité du processus et de l'indépendance de la construction.
- Les gabions sont rentables, en particulier lorsque des pierres locales sont disponibles.
- Leur perméabilité permet de réduire la vitesse d'écoulement de l'eau.
- Meilleure intégration à l'environnement et à l'écologie locale.
- Ils s'adaptent très bien aux zones d'écoulement rapide et aux pentes raides.
- Souplesse, permettant à la structure de se contracter et de se dilater en fonction des changements environnementaux.

Les Inconvénients

- Difficulté de nettoyage et d'entretien de la structure.
- Nécessite une main d'œuvre qualifiée pour une installation correcte.
- Vulnérable aux extrémités de la structure, où l'eau peut s'écouler derrière les blocs, ce qui peut compromettre la stabilité et favoriser l'érosion.

La figure suivante représente une coupe en travers d'un canal en gabion :

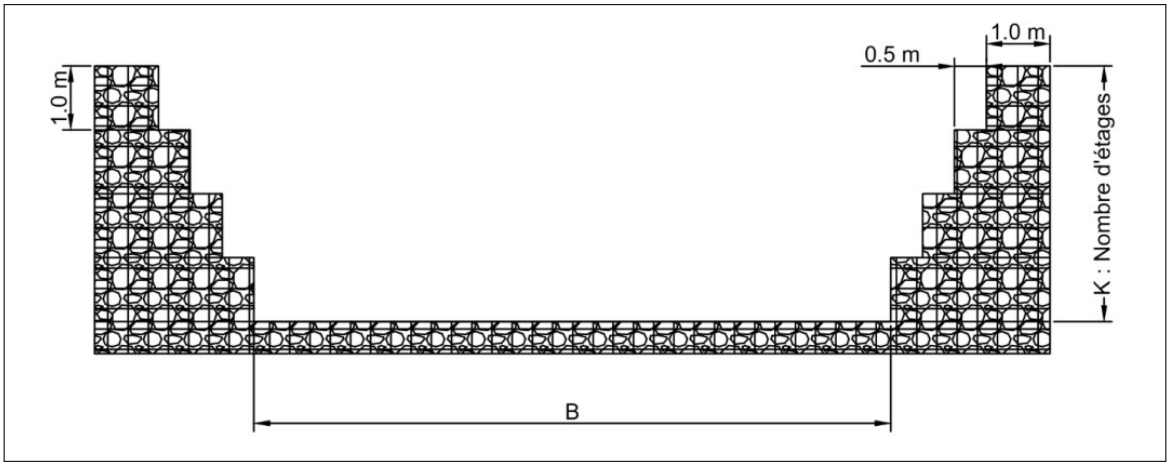


FIGURE 4.3 – Coupe en travers d'un canal en gabion (Source : Autodesk.zenati).

les caractéristiques d'une section gabionnée sont les suivantes :

1. **Section** S_m (m^2) **:**
$$S_m = 0.5k \times (k-1) + b \times k$$
2. **Périmètre** P_m (m^2) **:**
$$P_m = b + 3k - 1$$
3. **Rayon hydraulique** R_h (m) **:**
$$R_h = \frac{0.5k \times (k-1) + b \times k}{b + 3k - 1}$$

Avec K est le nombre d'étages.
On fixe la largeur de la base puis on calcule le nombre d'étage qui peut évacuer le débit de crue.

Dimensionnement

Pour concevoir le canal, nous avons supposé une largeur de canal de $b = 24m$, un coefficient de rugosité de Manning de $n = 0,03$ pour les gabions, et une pente du canal de $I = 0,003$. Sur la base de ces paramètres, nous avons calculé le nombre de caisses K nécessaires pour accueillir un débit centennal de $Q = 285.46m^3/s$

Le tableau 5.8 présente un résumé des résultats des calculs pour différents scénarios :

TABLE 4.4 – Résultats de calcul des nombres de caisses pour le canal gabionné d'Oued EL Kerma.

K (caisses)	Q (m^3/s)	S (m^2)	P (m)	Rh (m)
0	0	0	24	0
1	35,61	24	26	0,92
2	108,78	49	29	1,69
3	207,09	75	32	2,34
4	325,67	102	35	2,91
5	461,89	130	38	3,42

Pour notre cas, on peut prendre un canal de 3 caisses qui nous assure un débit de 285.46 m^3/s avec une revanche de 1 m, ou bien prendre un canal de 4 caisses qui nous assure un débit supérieur au débit de dimensionnement.

Les dimensions du canal sont représentées par la figure ci-dessous :

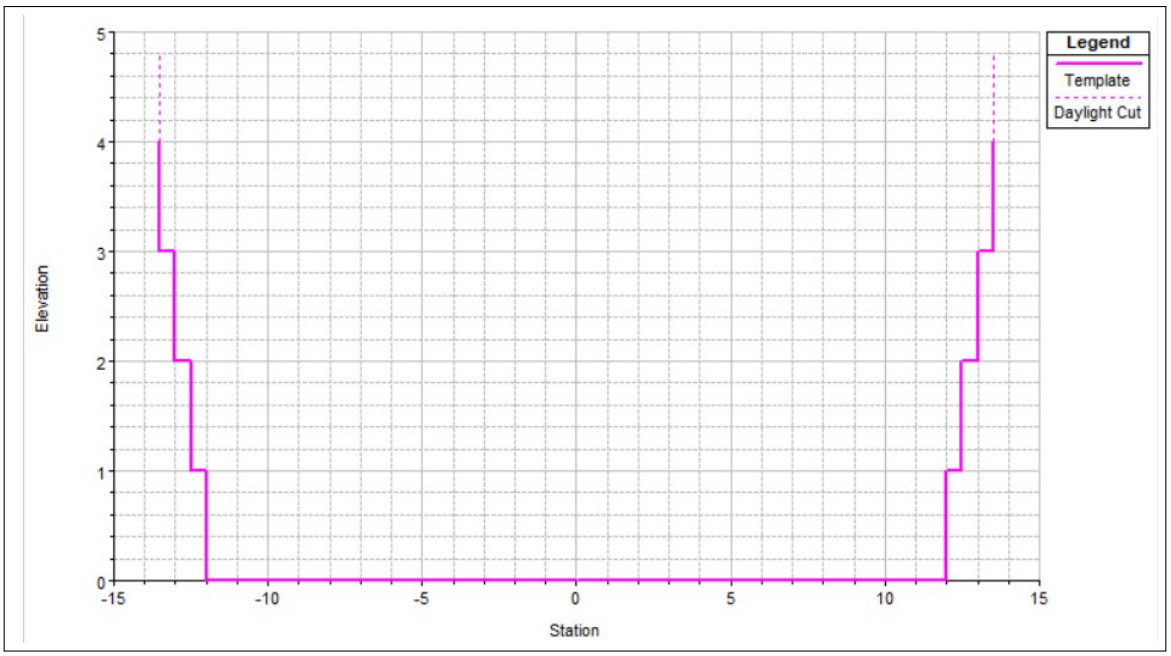


FIGURE 4.4 – Dimensions d'Aménagement d'Oued EL Kerma pour un canal en gabion (Source HEC-RAS).

Paramètres D'écoulement

les paramètres d'écoulement sont résumés dans le tableau ci-dessous :

TABLE 4.5 – Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en gabion d'Oued EL Kerma (Source :Logiciel 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)	
10000	141.39	143.81	143.81	144.97	0.009567	4.76	59.96	26.00	1.00
9600	132.33	134.69	134.75	135.91	0.010363	4.88	58.45	26.00	1.04
9200	128.01	130.32	130.43	131.60	0.011197	5.01	57.03	26.00	1.08
9000	112.90	117.73	115.32	118.00	0.001055	2.29	124.51	27.00	0.34
8800	102.76	104.93	105.18	106.38	0.013666	5.33	53.53	26.00	1.19
8400	102.76	104.93	105.18	106.38	0.013666	5.33	53.53	26.00	1.19
8200	101.00	103.61	103.42	104.60	0.007473	4.40	64.89	26.00	0.89
8000	99.32	101.74	101.74	102.90	0.009559	4.76	59.97	26.00	1.00
7800	92.56	97.96	94.98	98.17	0.000722	2.02	145.91	43.17	0.28
7600	94.14	96.56	96.56	97.72	0.009555	4.76	59.98	26.00	1.00
7400	90.29	91.97	92.71	94.44	0.030393	6.96	40.99	25.00	1.74
7000	86.18	88.60	88.60	89.76	0.009566	4.76	59.96	26.00	1.00
6600	80.63	83.05	83.05	84.21	0.009566	4.76	59.96	26.00	1.00
6400	78.00	81.49	80.42	82.02	0.003008	3.24	88.19	27.00	0.57
6200	77.50	80.55		81.26	0.004706	3.74	76.30	27.00	0.71
6000	76.34	78.76	78.76	79.92	0.009566	4.76	59.96	26.00	1.00
5600	66.76	68.52	69.18	70.76	0.026043	6.63	43.03	25.00	1.61
5400	65.17	67.59	67.59	68.75	0.009567	4.76	59.96	26.00	1.00
5000	55.97	58.39	58.39	59.54	0.009567	4.76	59.96	26.00	1.00
4400	44.00	46.36	46.42	47.58	0.010462	4.90	58.27	26.00	1.04
4000	36.00	38.42	38.42	39.58	0.009567	4.76	59.96	26.00	1.00
3600	28.26	31.65	30.68	32.22	0.003294	3.33	85.63	27.00	0.60
3400	27.49	31.12		25.62	0.004680	3.73	76.44	27.00	0.71
3200	27.13	29.72	29.55	30.72	0.007680	4.44	64.32	26.00	0.90
3000	25.42	27.84	27.84	29.00	0.009567	4.76	59.96	26.00	1.00
2800	20.11	25.75	22.53	25.95	0.000650	1.95	146.43	28.34	0.27
2600	21.86	24.91		25.62	0.004680	3.73	76.44	27.00	0.71
2200	20.00	23.09	22.42	23.78	0.004482	3.68	77.51	27.00	0.69
2000	18.90	21.32	21.32	22.48	0.009568	4.76	59.96	26.00	1.00
1800	17.00	20.78	19.42	21.23	0.002315	2.97	96.04	27.00	0.50
1600	16.75	19.17	19.17	20.33	0.009569	4.76	59.95	26.00	1.00
1400	14.00	17.93	16.42	18.35	0.002036	2.85	100.16	27.00	0.47
1200	14.00	16.84	16.42	17.67	0.005675	4.03	70.89	26.00	0.78
1000	12.61	15.03	15.03	16.19	0.009573	4.76	59.95	26.00	1.00
800	10.61	14.54	13.03	14.96	0.002038	2.85	100.14	27.00	0.47
600	10.58	13.60		14.32	0.004837	3.77	75.63	27.00	0.72
400	9.30	13.21	11.72	13.63	0.002081	2.87	99.45	27.00	0.48
200	9.20	11.62	11.62	12.78	0.009582	4.76	59.93	26.00	1.00

Avec :

— **Min Ch. El :** Altitude du radier du canal ;

— **W.S Elev :** Altitude du plan d'eau calculé ;

— **E.G Elev :** Altitudes de la ligne d'énergie ;

— **E.G slope :** Pente de la ligne d'énergie.

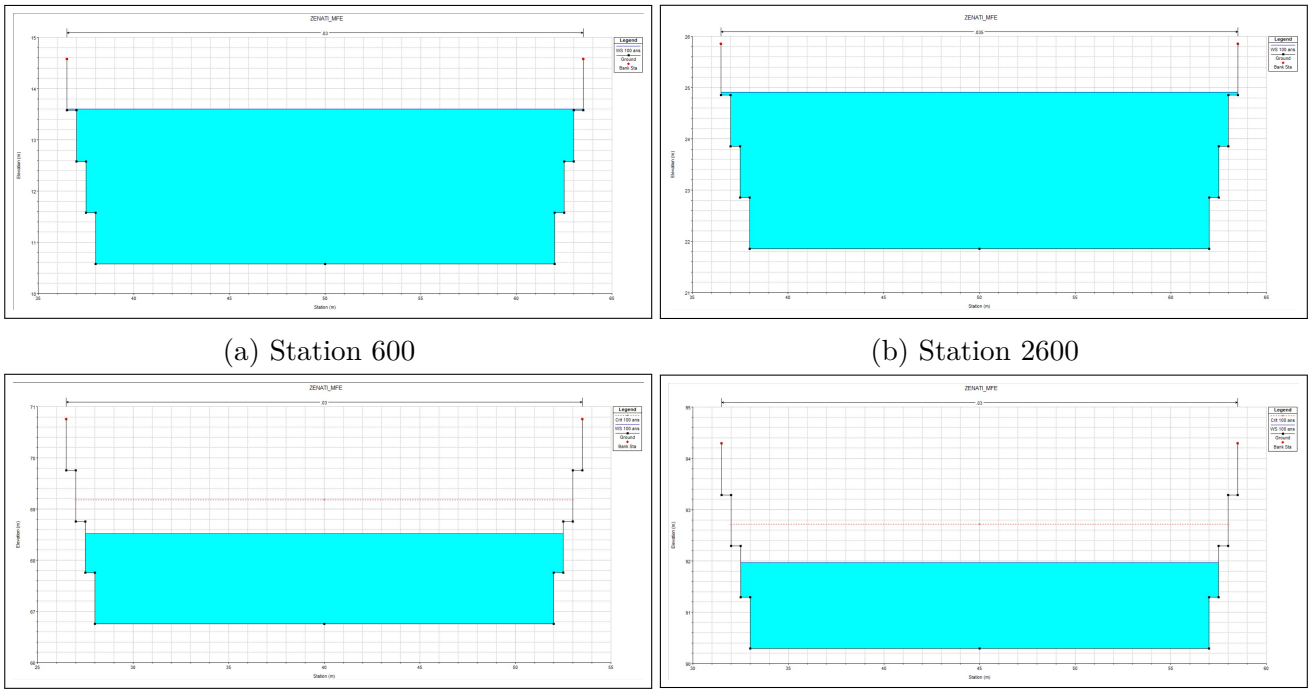
— **Vel chnl :** Vitesse d'écoulement ;
— **Flow Area :** Section mouillée ;
— **Top Width :** Largeur au miroir ;
— **Froude chl :** Nombre de Froude ;

Interprétation

En se basant sur le nombre de Froude, le régime d'écoulement peut être classé comme fluvial ou torrentiel. La vitesse de l'écoulement, qui ne dépasse généralement pas 6 m/s, à l'exception de quelques stations, demeure dans les limites tolérées pour l'utilisation des gabions. Le périmètre mouillé maximal atteint 35 mètres. D'un point de vue technique, le canal renforcé par des gabions constitue une solution robuste et efficace.

Les Sections En Travers

Pour une crue centennale de 285.46 m3/s, nous remarquons que notre canal assure une protection et que l'eau ne déborde pas.



(a) Station 600 (b) Station 2600

(c) Station 5600 (d) Station 7400

FIGURE 4.5 – Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued EL Kerma.

Estimation du coût de la variante :

TABLE 4.6 – Devis de la variante canal en gabion.

Désignations des travaux		Quantité	Unité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	**Déblais**	153132	m3	250,00	38.283.000,00
	Remblais	0	m3	700,00	0,00
geotextile		34300	mL	2.500,00	85.750.000,00
Gabions		10453	m3	4.500,00	47.038.500,00
				HT (DA)	171.071.500,00
				TVA (%)	19
				TTC (DA)	203.575.085,00

4.3.3 Canal En Enrochement

Un canal en enrochement est un cours d'eau construit avec des matériaux tels que des pierres, des cailloux ou des blocs. Ces matériaux renforcent les berges, stabilisent le lit de la rivière et contrôlent l'érosion causée par l'écoulement de l'eau. L'enrochement constitue une structure robuste et durable tout en permettant un écoulement contrôlé. Conçus pour résister aux forces hydrauliques, ces canaux conservent leur intégrité structurelle au fil du temps et s'intègrent parfaitement à l'environnement naturel, ce qui en fait une solution efficace qui répond à la fois à des considérations esthétiques et écologiques.

Les Avantages

- Résistant à l'érosion et durable, même en cas de débit élevé.
- Stabilise efficacement les berges et prévient l'érosion.
- Permet une certaine infiltration de l'eau, ce qui réduit la vitesse d'écoulement et favorise la recharge des nappes phréatiques.
- S'intègre bien dans le paysage environnant et offre un attrait esthétique.
- Nécessite un entretien minimal une fois construit.
- Fournit un habitat pour les organismes aquatiques et favorise la biodiversité.

Les Inconvénients

- La mise en place de gros rochers nécessite des machines spécialisées.
- Peut ne pas convenir aux pentes très raides ou aux zones à forte charge sédimentaire.
- La construction nécessite un espace suffisant, ce qui limite son utilisation dans les zones urbaines exiguës.
- Difficile à modifier une fois construit.
- Les rochers peuvent obstruer l'écoulement de l'eau, augmentant parfois le risque d'inondation en amont.

Dimensionnement

Les caractéristiques du canal ont été déterminées à l'aide du logiciel Flow-Master. Les résultats des calculs hydrauliques pour le canal trapézoïdal sont présentés ci-dessous :

TABLE 4.7 – Dimensions de l'aménagement d'oued EL Kerma (canal en enrochement)

Tronçon	Section de départ	Section d'arrivé	Longueur (m)	Pente du projet (%)	Fruit de talus	Largeur du fond (m)	La largeur au miroir (m)	Hauteur du canal (m)
Oued EL Kerma	10000	200	9800	0.001	1.5	20	35.55	4.9

Les dimensions du canal sont représentés par la figure 4.8 :

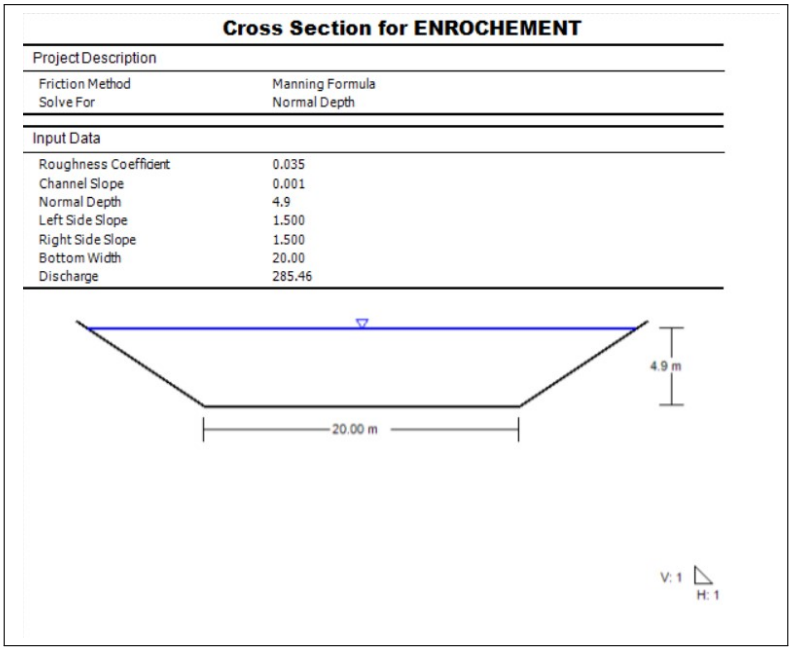


FIGURE 4.6 – Dimensions d'Aménagement Oued EL Kerma pour un canal en enrochement(Source :FLOWMASTER).

TABLE 4.8 – Résultats de la simulation d'écoulement d'un canal en enrochement d'Oued EL Kerma (Source :Logiciel 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)	
10000	139.89	142.46	142.46	143.57	0.009945	4.66	61.23	27.70	1.00
9800	136.17	138.05	138.73	140.30	0.028745	6.64	42.99	25.65	1.64
9600	131.83	133.99	134.40	135.64	0.017928	5.68	50.27	26.49	1.32
9200	127.51	130.08	130.08	131.19	0.009945	4.66	61.23	27.70	1.00
8800	111.36	113.77	113.93	115.05	0.012367	5.02	56.91	27.23	1.11
8400	102.26	104.85	104.83	105.94	0.009692	4.62	61.77	27.76	0.99
8200	100.50	103.31	103.07	104.21	0.007276	4.20	68.05	28.43	0.87
8000	98.82	101.39	101.39	102.50	0.009944	4.66	61.23	27.70	1.00
7800	94.06	95.73	96.63	98.67	0.043376	7.60	37.56	25.01	1.98
7600	92.64	95.21	95.21	96.32	0.009945	4.66	61.23	27.70	1.00
7400	88.79	90.64	91.36	92.97	0.030365	6.76	42.22	25.56	1.68
7000	85.68	88.25	88.25	89.35	0.009945	4.66	61.23	27.70	1.00
6800	81.54	83.33	84.11	85.85	0.034249	7.03	40.58	25.37	1.78
6600	80.13	82.70	82.70	83.81	0.009945	4.66	61.23	27.70	1.00
6400	77.50	81.12	80.07	81.61	0.002993	3.10	92.20	30.87	0.57

6200	77.00	80.21		80.86	0.004595	3.59	79.57	29.62	0.70
6000	75.84	78.41	78.41	79.52	0.009945	4.66	61.23	27.70	1.00
5800	71.89	73.72	74.46	76.12	0.031701	6.86	41.63	25.49	1.71
5600	66.26	68.20	68.83	70.30	0.025997	6.42	44.44	25.82	1.56
5400	64.67	67.24	67.24	68.34	0.009945	4.66	61.23	27.70	1.00
5000	55.47	58.03	58.03	59.14	0.009944	4.66	61.23	27.70	1.00
4800	52.00	53.95	54.57	56.03	0.025522	6.38	44.71	25.85	1.55
4600	46.57	48.47	49.14	50.67	0.027959	6.58	43.39	25.70	1.62
4400	43.50	46.05	46.07	47.18	0.010216	4.70	60.68	27.64	1.01
4200	36.50	37.88	39.07	42.36	0.082775	9.38	30.44	24.14	2.67
4000	35.50	38.07	38.07	39.18	0.009944	4.66	61.23	27.70	1.00
3600	27.76	31.29	30.33	31.81	0.003297	3.20	89.17	30.58	0.60
3400	26.98	30.76		31.20	0.002596	2.95	96.83	31.32	0.54
3200	26.63	29.42	29.20	30.33	0.007476	4.23	67.43	28.36	0.88
3000	24.92	27.49	27.49	28.60	0.009943	4.66	61.23	27.70	1.00
2800	20.61	24.72	23.18	25.08	0.001911	2.65	107.70	32.35	0.46
2600	20.36	24.24		24.66	0.002335	2.84	100.45	31.67	0.51
2200	19.50	22.75	22.07	23.39	0.004379	3.53	80.89	29.75	0.68
2000	18.40	20.97	20.97	22.07	0.009942	4.66	61.24	27.70	1.00
1800	16.50	20.42	19.07	20.83	0.002264	2.81	101.55	31.77	0.50
1600	16.25	18.82	18.82	19.93	0.009941	4.66	61.24	27.70	1.00
1400	13.50	17.58	16.07	17.94	0.001979	2.68	106.39	32.22	0.47
1200	13.50	16.53	16.07	17.28	0.005593	3.84	74.41	29.09	0.77
1000	12.11	14.68	14.68	15.79	0.009935	4.66	61.25	27.70	1.00
800	10.11	14.17	12.68	14.54	0.002008	2.70	105.86	32.17	0.47
600	10.07	13.23		13.91	0.004873	3.66	77.99	29.46	0.72
400	8.80	12.85	11.37	13.22	0.002031	2.71	105.45	32.13	0.48
200	8.70	11.27	11.27	12.38	0.009921	4.66	61.28	27.71	1.00

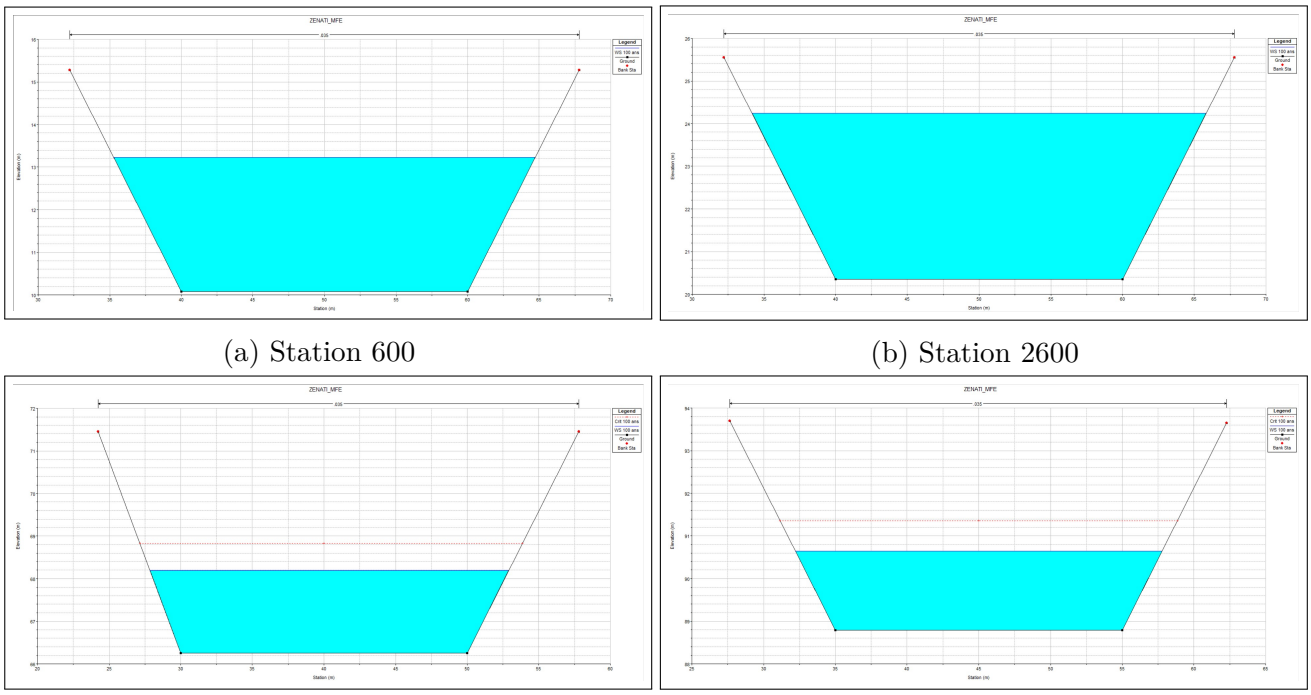
Avec :

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

Interprétation

Selon les valeurs du nombre de Froude, il est notable que le régime d'écoulement est en mode torrentiel Fr > 1. et la vitesse d'écoulement dépasse 2.5 m/s . Sur le plan technique, le canal en enrochement de forme trapézoïdale offre une protection satisfaisante mais toujours un problème d'érosion.

Pour une crue centennale de 285.46 m3/s, nous remarquons que notre canal assure une protection et que l'eau ne déborde pas.



(a) Station 600

(b) Station 2600

(c) Station 5600

(d) Station 7400

FIGURE 4.7 – Les profils en travers de quatre sections choisies de l'oued EL Kerma.

Estimation du coût de la variante :

TABLE 4.9 – Devis de la variante canal en enrochement.

Désignations des travaux		**Quantité**	**Unité**	**Prix unitaire (DA)**	**Montant (DA/mL)**
Terrassement	**Déblais**	153132	m3	250,00	38.283.000,00
	Remblais	0	m3	700,00	0,00
Géotextil		31134	mL	2.500,00	77.835.000,00
Enrochement		15567	m3	5.000,00	77.835.000,00
				HT (DA)	193.953.000,00
				TVA (%)	19
				TTC (DA)	230.804.070,00

4.3.4 Choix De La Variante D'aménagement

Le choix de la variante d'aménagement de l'oued El Had constitue une étape décisive nécessitant une évaluation rigoureuse des caractéristiques de chaque option proposée. Il est essentiel d'effectuer une comparaison approfondie afin de sélectionner la solution la plus adaptée. Ce choix repose sur plusieurs critères, notamment l'objectif principal du projet : concevoir un aménagement efficace pour protéger la wilaya d'Alger contre les crues centennales, tout en limitant au maximum les démolitions ou les déplacements des riverains.

Après une analyse technico-économique et une évaluation des mesures de protection contre les inondations, la variante numéro 3 s'est imposée comme le choix optimal. Cette dernière garantit une meilleure protection des citoyens et une évacuation plus efficace des eaux des bassins versants de la région. De plus, elle se distingue par son caractère économique, offrant un coût inférieur par rapport aux deux premières variantes (variante 1 et variante 2).

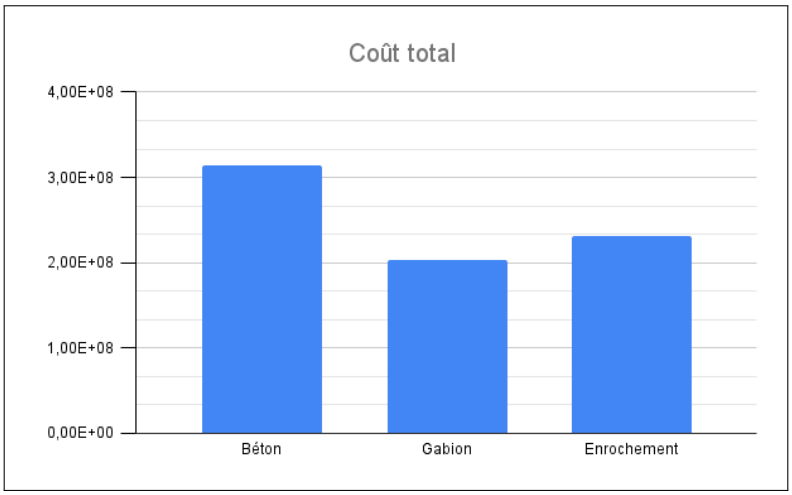


FIGURE 4.8 – histogramme présentant les coûts des variantes.

4.4 CONCLUSION

L'aménagement proposé consiste à concevoir des canaux en gabion, car ils sont bien adaptés et rentables. Ensuite, nous avons effectué une simulation hydraulique à l'aide de HEC-RAS.

Nous avons choisi les structures en gabion parce qu'elles offrent

— Une solution robuste et durable ;

— Une construction simple ;

— Une bonne perméabilité, permettant un drainage naturel adéquat ;

— Une réduction de la vitesse de l'eau et une dissipation de l'énergie ;

— Une intégration esthétique qui s'harmonise avec l'environnement naturel.

Chapitre 5

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA VARIANTE D'AMÉNAGEMENT ADOPTÉE

5.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse détaillée de la solution retenue pour l'aménagement de l'Oued El Kerma, qui consiste en la construction d'un canal en gabion avec un fond en matelas Reno. Cette solution vise principalement à maîtriser les crues centennales afin d'assurer la sécurité des habitants et de protéger leurs biens situés le long de ce cours d'eau, dans la wilaya d'Alger.

5.2 Détails De Variante Adoptée

Ce chapitre est consacré à l'analyse détaillée de la solution retenue pour l'aménagement de l'oued El Kerma, qui consiste en la construction d'un canal en gabion. Cette solution vise principalement à maîtriser les crues centennales afin d'assurer la sécurité des habitants et de protéger leurs biens situés le long de ce cours d'eau, dans la wilaya d'Alger.

5.2.1 Détails De Conception

Table 5.1 – Détails de la variante adoptée

Paramètre	Symbole	Valeur
Type de section	/	Canal en gabion
Largeur au fond	b	24
La pente(La rugosité	n	0.03
Débit(m3/s)	Q	285.46
Nombre d'étages	k	4
Largeur au miroir	B	27
Section (m^2)	S	102
Nombre de Froude	Fr	1.04
Régime d'écoulement	/	Torrentiel

Détails Des Caractéristiques Des Gabions

Voici les dimensionnement sur HEC-RAS

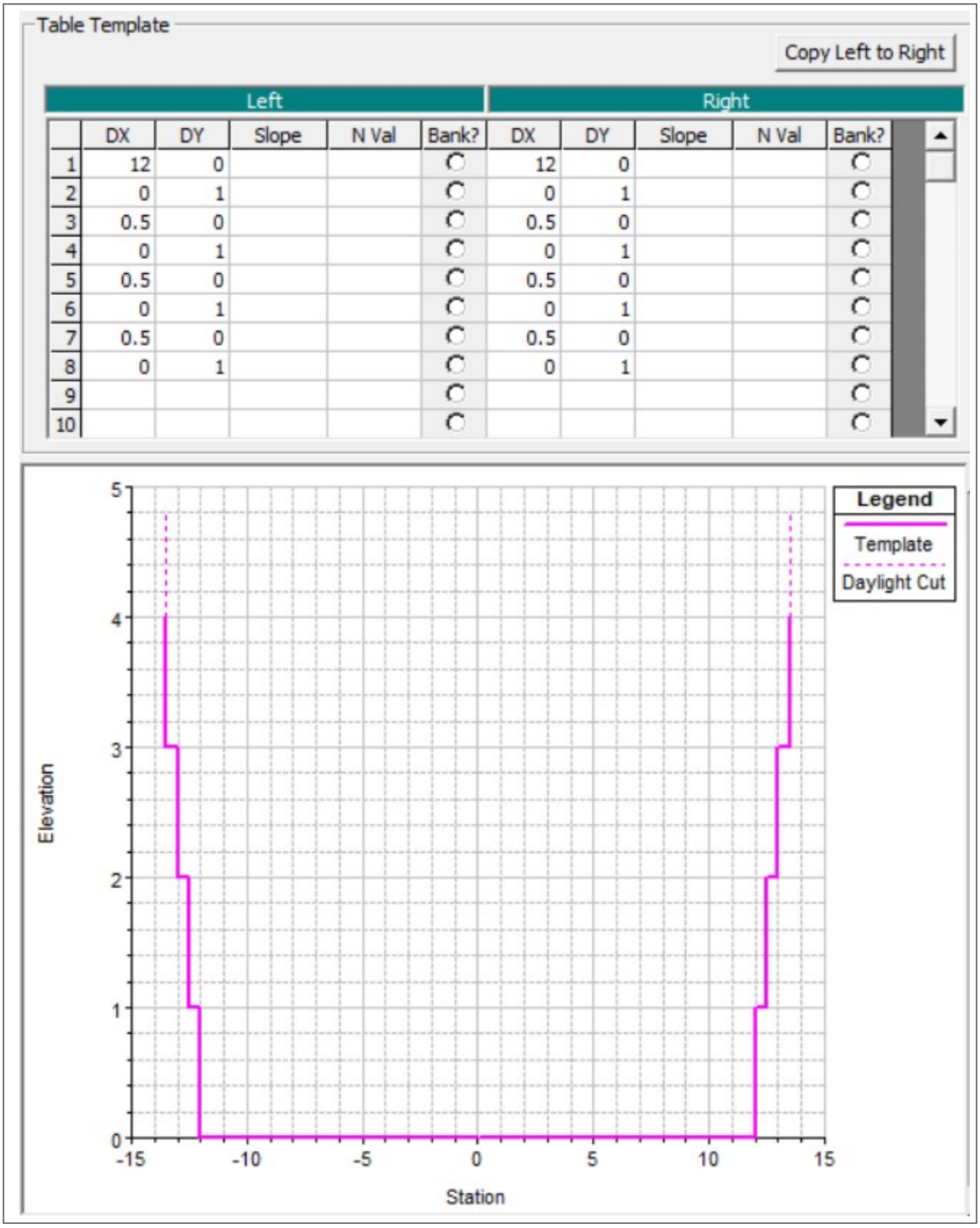


FIGURE 5.1 – Détails des caractéristiques des gabions.

Résultat Des Cartes D'oued EL Kerma Après L'aménagement :

La figures ci-dessous montrent la vue en trois dimensions d'oued EL Kerma après l'aménagement.

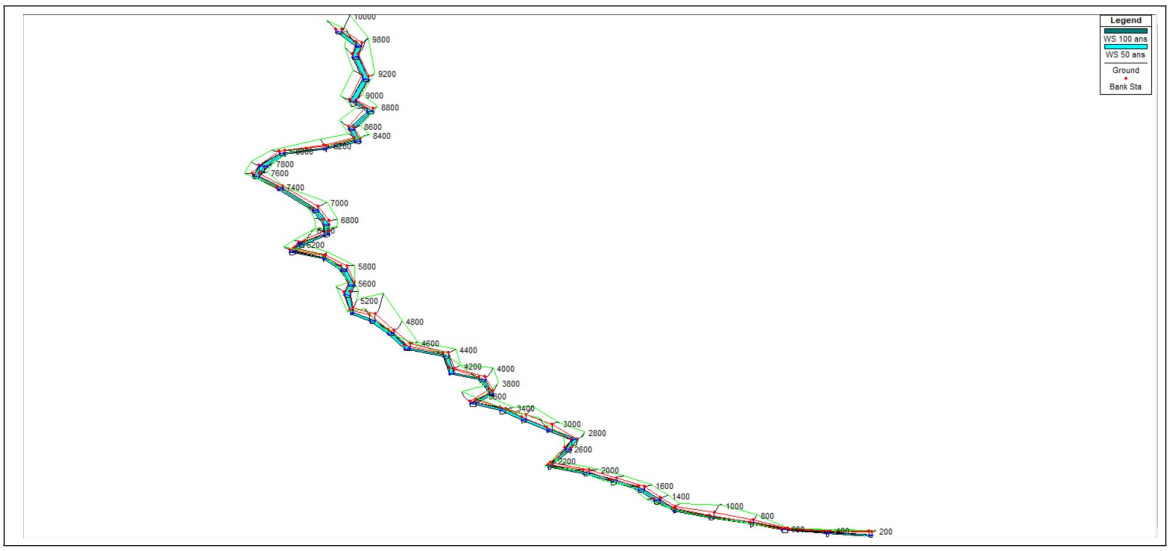


FIGURE 5.2 – Vue 3D Oued EL Kerma après l'aménagement (Source :HEC-RAS).

5.2.2 Étude De Stabilité Des Talus

L'étude de la stabilité des talus constitue une composante essentielle de la géotechnique, visant à évaluer la capacité des pentes à résister aux forces susceptibles de provoquer leur déstabilisation. Cette analyse est cruciale pour assurer la sécurité des infrastructures, des bâtiments et des populations vivant à proximité. Elle repose sur l'examen approfondi des propriétés géologiques et géotechniques du sol. Dans ce cadre, l'évaluation sera réalisée à l'aide du logiciel GeoStudio.

Présentation Du Logiciel GeoStudio

GeoStudio est une suite logicielle avancée spécialement conçue pour l'analyse et la modélisation géotechnique. Développé par Geo-Slope International, cet outil est largement reconnu pour son efficacité dans l'évaluation de la stabilité des sols et des structures, la conception de projets géotechniques, ainsi que la gestion des risques liés aux terrains.

Principales fonctionnalités

1. Modélisation des talus et de la stabilité des pentes
   - **Stabilité des talus :** Évaluation de la stabilité des pentes naturelles ou artificielles afin de garantir leur sécurité.
   - **Analyse des glissements de terrain :** Identification des zones à risque et calcul des facteurs de sécurité pour prévenir les glissements de terrain.
2. Hydro-géotechnique
   - **Analyse de l'écoulement de l'eau dans les sols :** Simulation des interactions entre l'eau et le sol pour évaluer les impacts sur la stabilité et la durabilité des structures géotechniques.
3. Analyses de sécurité
   - **Évaluation des risques :** Analyse des risques associés aux projets géotechniques, avec recommandations pour renforcer la sécurité des structures et des zones étudiées.

Avantages de GeoStudio

- **Interface intuitive :** Un environnement utilisateur convivial facilitant la création et la gestion de modèles géotechniques complexes.
- **Modélisation avancée :** Des outils sophistiqués pour simuler et analyser divers scénarios géotechniques.

— **Rapports et visualisations :** Production de rapports détaillés et de graphiques clairs pour une interprétation optimale des résultats.

— **Intégration des données :** Importation facile des données géologiques et topographiques pour des analyses précises et fiables.

Facteur De Sécurité (FS)

Le facteur de sécurité (FS) est un indicateur clé en géotechnique, permettant d'évaluer la stabilité et la sécurité des structures, telles que les talus, les digues, les fondations et les murs de soutènement.

Définition : Le FS correspond au rapport entre la capacité de résistance d'une structure (sa capacité à supporter les charges) et les forces appliquées sur celle-ci.

Importance : Il permet de déterminer si une structure est stable et sûre dans différentes conditions de charge.

Étapes De L'étude De Stabilité Des Talus Avec SLOPE/W

1. **Préparation des données**
   — **Collecte des données géotechniques :** Réunir les informations sur les propriétés du sol, les conditions de charge et les caractéristiques du talus.
   — **Données topographiques :** Obtenir des relevés ou plans topographiques pour définir la géométrie du talus.
2. **Création du modèle**
   — **Lancement de SLOPE/W :** Ouvrir le logiciel et démarrer un nouveau projet.
   — **Définition de la géométrie :** Dessiner la section du talus en modélisant sa forme et les différentes couches de sol.
3. **Définition des propriétés du sol**
   — **Assignation des propriétés géotechniques :** Intégrer des données telles que la cohésion, l'angle de frottement interne et la densité des sols.
   — **Incorporation des conditions de drainage :** Spécifier les niveaux de la nappe phréatique et les conditions de drainage, si nécessaire.
4. **Configuration des conditions de chargement**
   — **Détermination des charges appliquées :** Ajouter les charges externes (construction, circulation, pressions d'eau, etc.).
   — **Modélisation des contraintes :** Définir les contraintes de bord et les conditions aux limites.
5. **Analyse de stabilité**
   — **Choix de la méthode d'analyse :** Sélectionner une méthode appropriée (ex. : méthode des cercles de rupture ou méthode limite de stabilité).
   — **Exécution de la simulation :** Lancer la simulation pour calculer le facteur de sécurité et évaluer la stabilité du talus.

Étude Et Résultats

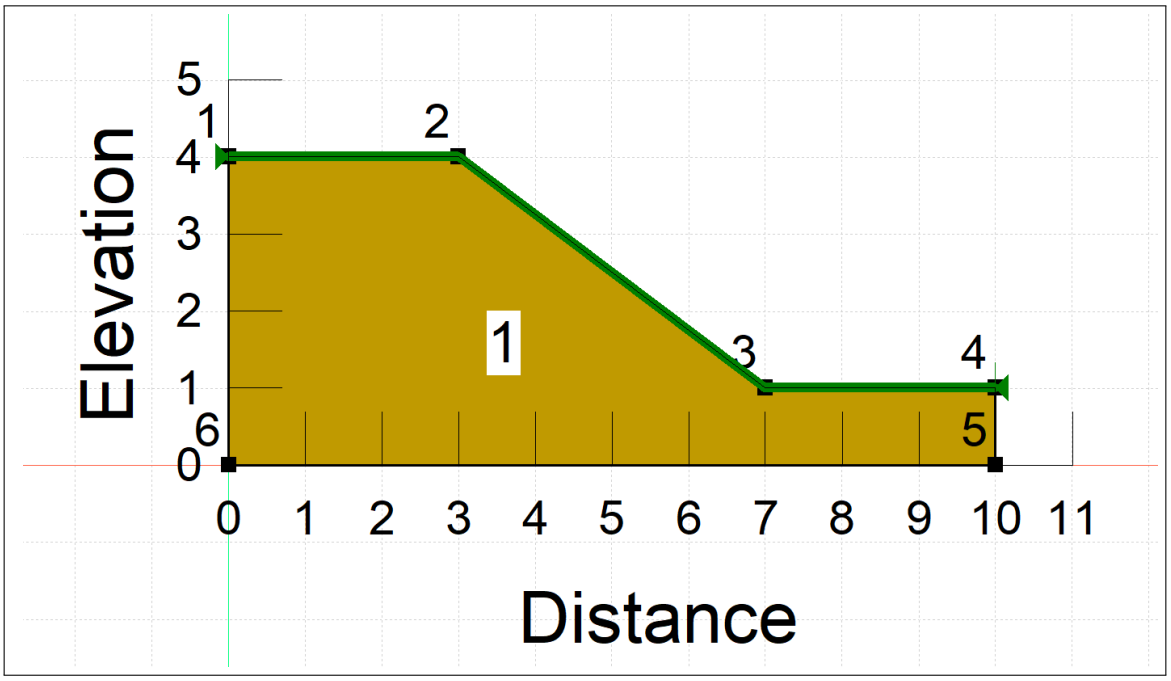


FIGURE 5.3 – Géométrie du talus (Source :GEOSLOPE).

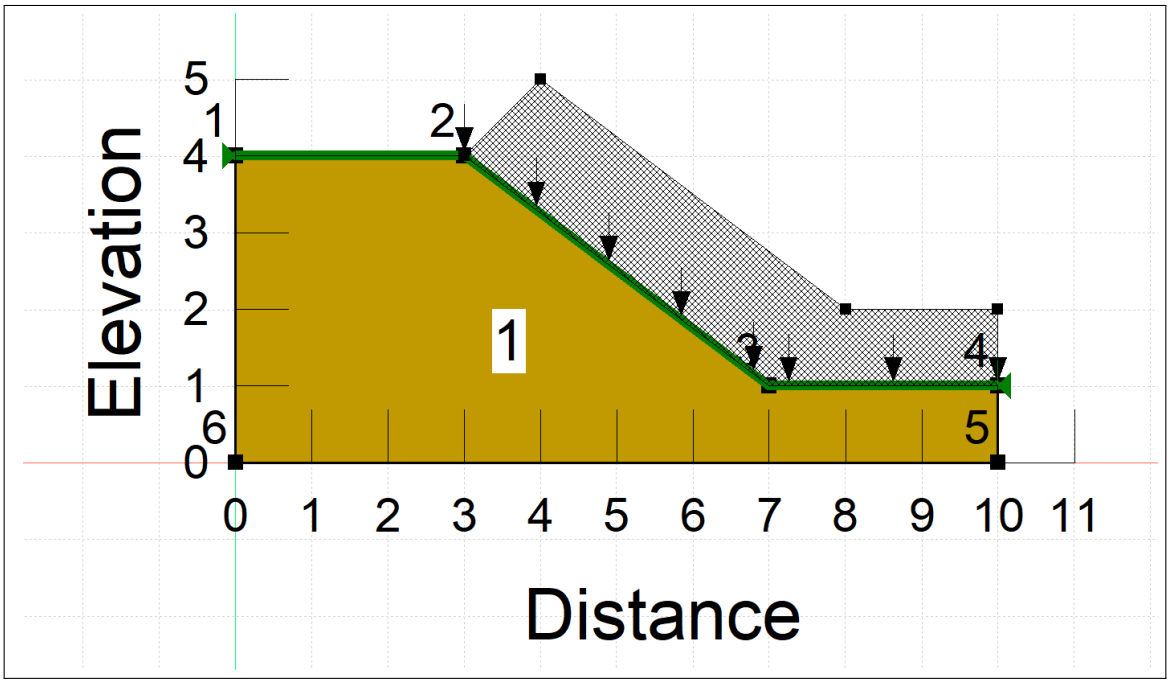


FIGURE 5.4 – Application des charges des roches (Source :GEOSLOPE).

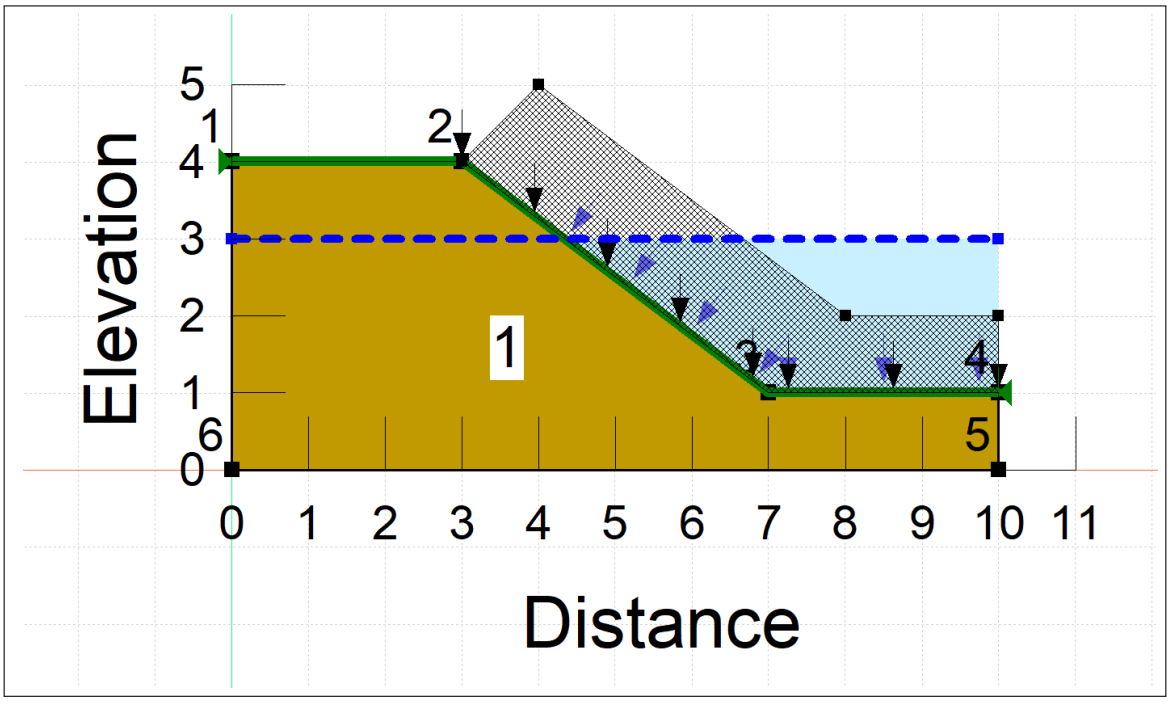


FIGURE 5.5 – Dessin de la ligne piézométrique (Source :GEOSLOPE).

).

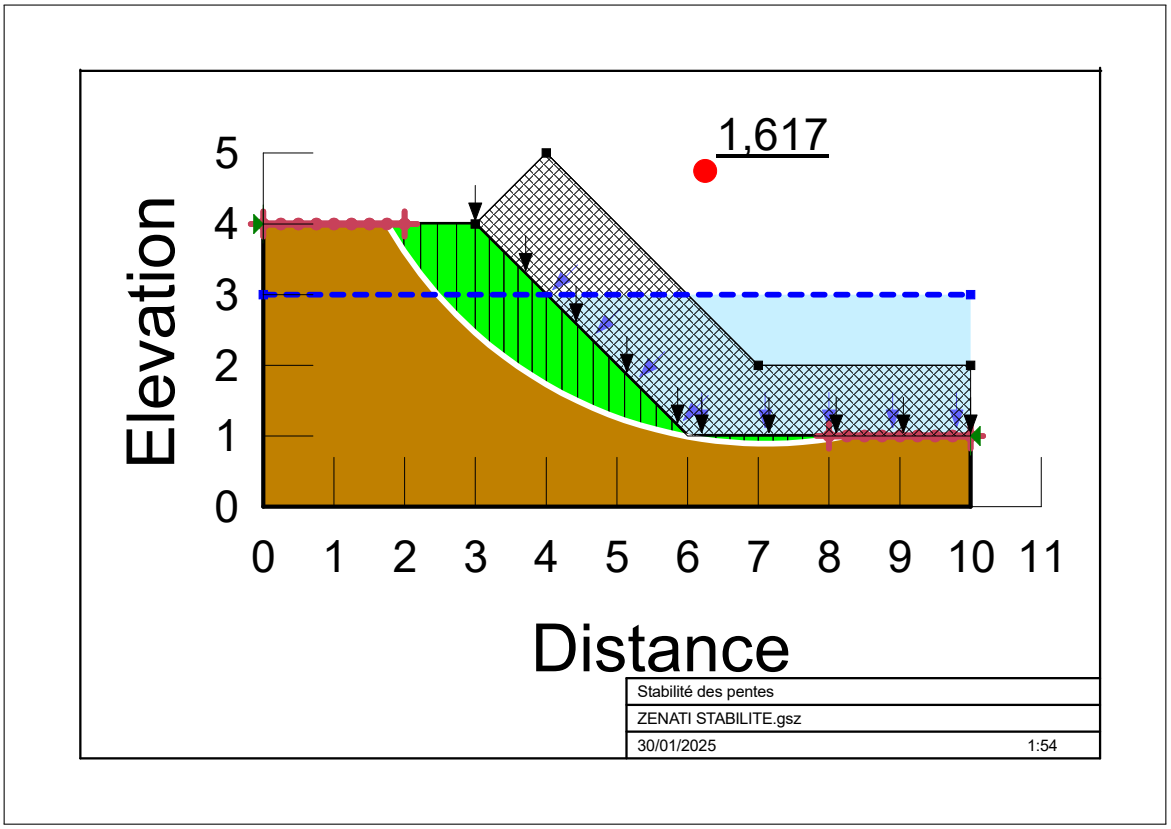


FIGURE 5.6 – Résultats de calcul (Source :GEOSLOPE).

Dans notre projet, l'analyse de la stabilité des talus est réalisée en considérant le scénario le plus défavorable afin d'assurer une évaluation précise des conditions de stabilité.

La figure obtenue à partir du logiciel GeoStudio illustre la stabilité du talus étudié, en mettant en évidence le cercle critique de rupture et les lignes de glissement potentielles. La ligne piézométrique est positionnée à 2 mètres au-dessus du fond du talus, influençant ainsi la répartition des pressions interstitielles et la résistance globale du sol.

L'analyse a permis d'obtenir un facteur de sécurité minimal de 1.617, correspondant au cercle critique identifié. Cette valeur est comparée au facteur de sécurité admissible de 1.5, qui constitue le seuil généralement requis pour garantir la stabilité des pentes en conditions normales d'exploitation.

Avec un FS de 1.617, le talus présente une marge de sécurité satisfaisante, attestant d'un niveau de stabilité adéquat face aux charges appliquées et aux conditions hydrauliques du site. Cette évaluation est essentielle pour assurer la durabilité et la fiabilité de l'ouvrage, réduisant ainsi les risques de glissement ou d'instabilité.

Chapitre 6

ORGANISATION DU CHANTIER

6.1 Introduction

L'organisation d'un chantier est l'ensemble des mesures destinées à faciliter l'exécution d'un travail dans des conditions optimales, dans le but de réduire les coûts de production en fournissant un environnement favorable aux ressources humaines et mécaniques, augmentant ainsi la productivité.

Une compréhension globale du chantier est d'une grande utilité pour la planification technologique des machines et leur déploiement optimal dans les différentes opérations, afin de satisfaire aux contraintes spatiales et temporelles imposées par le marché. On peut raisonnablement en déduire qu'une organisation efficace du chantier joue un rôle important dans la réduction du coût des travaux, évitant ainsi qu'ils ne deviennent prohibitifs.

Ce type de construction présente des défis considérables et il est de la plus haute importance d'avoir une compréhension globale de l'organisation du chantier, quelles que soient les difficultés rencontrées. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de :

- Définir avec précision les méthodes d'exécution et les procédures opérationnelles, afin de faciliter la mise en œuvre des techniques de construction modernes avec un haut niveau d'efficacité ;
- Distribuer et coordonner les tâches en faisant appel à une main-d'œuvre spécialisée ;
- Structurer les postes de travail stabilisés de manière appropriée, en utilisant une mécanisation de plus en plus avancée ;
- Déterminer la quantité et la qualité du personnel à employer, car les coûts de la main-d'œuvre ont un impact significatif sur le prix de revient.

6.2 Rôles Et Responsabilités Des Intervenants Sur Chantier (KAHLERRAS,2018)

Lors de la réalisation d'un projet, plusieurs intervenants peuvent apparaitre, néanmoins, on va citer les principaux d'entre eux, qui se repartissent en général, en trois principaux groupes comme suit :

1. Les clients, ou les commanditaires ; les Maîtres d'ouvrage.
2. Les contrôleurs qui assurent la qualité des travaux, et le respect des délais de réalisation ; Les maitres d'œuvre.
3. Les différents réalisateurs qualifiés ; Les entreprises, ou les entrepreneurs.

6.2.1 Le Maître De L'ouvrage

Le maître de l'ouvrage est une personne physique ou morale pour le compte de qui les travaux, ou les ouvrages sont exécutés ça peut être un particulier, un promoteur, un constructeur, l'état, une collectivité, ou une administration, son rôle est de :

1. Etablir précisément ses besoins de construction,
2. Organiser toutes les opérations d'investissement,
3. Choisir le Maître d'œuvre et les BET,
4. Assurer le suivi et le contrôle des travaux (où faire assurer) ;
5. Financer les travaux réalisés.

6.2.2 Le Maître D'œuvre

Le maître d'œuvre est une personne physique ou morale qui pour sa compétence, est chargé par le maître d'ouvrage de diriger l'exécution du contrat, et de proposer la réception, ainsi que le suivi du règlement des travaux. La mission du maitre d'œuvre, et tous les intervenants désignés par le maitre d'ouvrage est de :

— S'assurer de la faisabilité de l'opération,
— Assurer la sécurité des biens et des personnes.
— Concevoir, décrire, évaluer les ouvrages,
— Etablir les dispositions réglementaires,
— Préparer les marchés, consulter les entreprises,
— Diriger les travaux et garantir sur le plan technique la bonne exécution,
— Assurer le contrôle des travaux pendant leur réalisation,
— Contrôler la conformité de l'ouvrage avec le projet,
— Effectuer tous les essais et les mesures de contrôle,

6.2.3 L'entrepreneur

L'entrepreneur est une personne physique ou morale qui a la charge de réaliser les travaux ou les ouvrages aux conditions définies dans les pièces du contrat.

6.3 Définitions Des Engins Utilisés

L'équipement utilisé est conforme à celui qui est généralement employé sur les chantiers de travaux publics. Le déploiement d'un appareil mécanique important diminuera considérablement les coûts financiers et temporels associés aux travaux de terrassement.

TABLE 6.1 – Engins utilisés.

Tâches	Engins	Actions
Travaux de préparation	Dozers	Enlever les obstacles et les herbes
	Pelles	
	Camions	
	Chargeurs	
Terrassement	Pelles	Donner la forme exacte du canal
	Niveleuse	
	Camions	
	Dozers	
	Chargeurs	
	Dumpers	
Compactage	Compacteurs à pied de mouton	Consolider les berges de l'Oued pour éviter l'affaissement
	Tous types de compacteurs à rouleaux lisses	

6.4 Devis Quantitatif Et Estimatif Du Projet

Estimation des prix des ouvrages et aménagements :

— Prix unitaire des terrassements ;

— Prix unitaire des aménagements.

Le tableau suivant présente les montants associés à la réalisation la variante sélectionnée :

TABLE 6.2 – Devis de la variante canal en gabion.

Désignations des travaux		**Quantité**	**Unité**	**Prix unitaire (DA)**	**Montant (DA/mL)**
Terrassement	**Déblais**	153132	m3	250,00	38.283.000,00
	Remblais	0	m3	700,00	0,00
geotextile		34300	mL	2.500,00	85.750.000,00
Gabions		10453	m3	4.500,00	47.038.500,00
				HT (DA)	171.071.500,00
				TVA (%)	19
				TTC (DA)	203.575.085,00

Le montant total du projet revient à 203.575.085,00 DA ; **Deux cent trois millions cinq cent soixante-quinze mille quatre-vingt-cinq dinars Algérien.**

6.5 La Planification

6.5.1 Définition

La planification des travaux est un moyen qui permet de chercher constamment la meilleure façon d'utiliser avec économie la main d'œuvre, et les autres moyens de mise en œuvre pour assurer l'efficacité de l'action à entreprendre.

Son objectif est de s'assurer que les travaux se font dans un ordre correct c'est- à-dire une bonne succession des travaux, sans retard (a temps), et aussi économique que possible, c'est à dire faire un bénéfice. (BENLAOUKLI,2022)

6.5.2 Techniques De Planification

Il existe deux principales méthodes de planification :

Méthodes Fondées Sur Les Réseaux

Un réseau est une représentation graphique d'un projet qui met en évidence les relations entre les différentes opérations, qu'elles soient successives, simultanées ou convergentes, ainsi que leurs durées de réalisation. On distingue deux types de réseaux :

— **Réseau à Flèches :** Dans ce type de réseau, l'opération est représentée par une flèche, et la succession des opérations est indiquée par des nœuds.



FIGURE 6.1 – Exemple de réseau à flèches

— **Réseau à Nœuds :** Ici, l'opération est représentée par un nœud, et la succession des opérations est indiquée par des flèches.



FIGURE 6.2 – Exemple de réseau à nœuds

L'opération A précède l'opération B. Le graphique ne peut se faire sans le réseau, car le réseau est un outil de calcul permettant d'obtenir des résultats répondant à certaines questions posées. Le graphique est une forme d'interprétation du réseau et de ses résultats, mais il est plus lisible et compréhensible.

Construction Du Réseau

Pour construire un réseau, il convient d'effectuer les six opérations suivantes :

1. **Établissement d'une Liste des Tâches :** Il s'agit dans cette première phase de procéder à un inventaire très précis et détaillé de toutes les opérations indispensables à la réalisation d'un projet.
2. **Détermination des Tâches Précédantes et Succédantes :** Après avoir dressé la liste des tâches à effectuer, il n'est pas toujours facile de construire un réseau car il n'est pas aisé de dire si les tâches antérieures doivent être successives ou convergentes.
3. Construction des Graphes Partiels.
4. Regroupement des Graphes Partiels.
5. Détermination des Tâches de Début de l'Ouvrage et de Fin de l'Ouvrage.
6. Construction du Réseau.

6.5.3 Différentes Méthodes Fondées Sur Les Réseaux (BENLAOUKLI, 2004)

Méthode C.P.M (Méthode Française)

L'objectif de cette méthode est de réduire les temps de réalisation d'un ouvrage en tenant compte de trois phases :

— **1ère Phase :** L'effectif nécessaire pour effectuer le travail considéré.

— **2ème Phase :** Analyser systématiquement le réseau, heure par heure, jour par jour, selon l'unité de temps retenue.

— **3ème Phase :** Adapter le réseau aux conditions ou contraintes fixées par l'entreprise.

Méthode P.E.R.T (Program Evaluation And Review Technical)

C'est-à-dire technique d'ordonnancement des tâches et contrôle des programmes. C'est une méthode consistant à mettre en ordre sous forme de réseau plusieurs tâches qui, grâce à leur chronologie et leur dépendance, concourent toutes à l'obtention d'un produit fini.

Méthodes Fondées Sur Les Graphiques

— **Méthode Linéaire (Ligne of Balance Technic) :** Cette méthode est destinée à la planification des projets de construction dont les travaux sont répétitifs.

— **Méthode à Barres :** Cette technique consiste à déterminer deux réseaux et un diagramme à barres (plan de travail).

6.5.4 Les Étapes De La Planification

La planification est le processus de la ligne de conduite des travaux à réaliser. Elle comprend les étapes suivantes :

Collection Des Informations

L'établissement d'une synthèse d'analyse des informations acquises par des études comparatives permet l'usage correct du plan de réalisation du projet.

Décomposition Du Projet

C'est une partie importante car chaque projet peut être analysé de diverses manières. Nous attribuons à chaque tâche un responsable et ses besoins en matériels.

Relations Entre Les Tâches

Il existe deux relations essentielles entre les tâches lors de la réalisation. L'une porte sur un enchaînement logique et l'autre sur un enchaînement préférentiel.

6.5.5 Diagramme De Gantt

Le diagramme de Gantt est un outil largement utilisé dans la gestion de projet, offrant une représentation visuelle puissante de la progression des tâches qui composent un projet. La colonne de gauche du diagramme énumère toutes les tâches à accomplir, tandis que la ligne d'en-tête représente les unités de temps les mieux adaptées au projet (jours, semaines, mois, etc.). Chaque tâche est représentée par une barre horizontale dont la position et la longueur représentent la date de début, la durée et la date de fin de la tâche. Ce diagramme fournit une représentation concise de :

— Les différentes tâches à envisager.

— La date de début et la date de fin de chaque tâche.

— La durée de chaque tâche.

— Le chevauchement éventuel des tâches, et la durée de ce chevauchement.

— La date de début et la date de fin du projet dans son ensemble.

La liste des taches est présentée ci-dessous :

TABLE 6.3 – Liste des opérations avec leurs durées pour la réalisation des endiguements

Symbole	**Tâche**	**Duree**
A	**Préparation générale :**	
	Délimitation de la zone de travail et sécurisation du périmètre	7
	Prévision d'un accès pour les engins de chantier et les matériaux	8
B	**Terrassement et compactage :**	
	Terrassement	20
	Compactage	20
C	**Pose de géotextile :**	25
D	**Gabionnage**	
	Assemblage des gabions	20
	Pose du fond et premier étage	20
	Pose du deuxième étage	20
	Pose du troisième étage	20
	pose du quatrième étage et finitions	20
E	**Finition et entretien :**	
	Finition et entretien	7
	Clôture	8

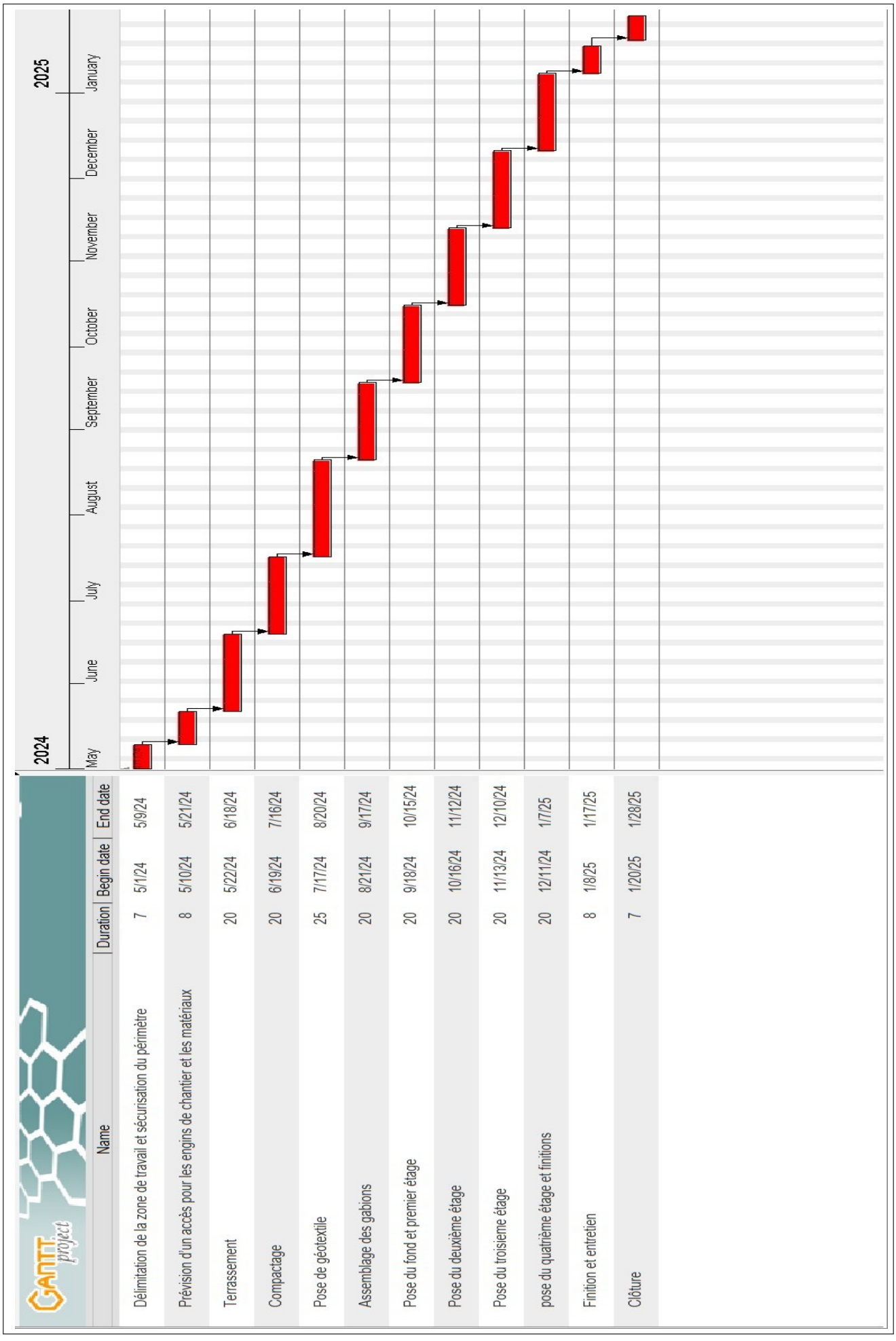


FIGURE 6.3 – Diagramme de Gantt pour la variante du gabionnage(Source :GanttProject).

6.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le devis quantitatif et estimatif et l'organisation de chantier, pour réaliser notre projet d'aménagement d'Oued EL Kerma dans les meilleures conditions de sécurité respectent le délai d'exécution, le cout, et la qualité des travaux. Le montant total du projet a été estime à 2 203.575.085,00 DA da avec un délai d'exécution de 195 jours.

CONCLUSION

L'étude hydrologique et hydraulique menée sur le bassin versant de l'oued El Kerma a permis de mieux comprendre les dynamiques des eaux de surface et les risques d'inondation auxquels cette région est confrontée. À travers une analyse géographique détaillée, nous avons identifié les principales caractéristiques physiques du bassin, telles que la topographie, la pente, et la géologie, qui influencent fortement la réponse hydrologique lors des événements pluvieux. Ces facteurs, associés à une urbanisation croissante et une forte sismicité, accentuent les risques d'inondation dans les zones urbaines et périurbaines.

Les résultats de nos simulations hydrologiques, effectuées à l'aide du logiciel HEC-RAS, ont mis en évidence les zones les plus vulnérables aux crues. En étudiant différents scénarios de retour de crue, nous avons pu déterminer les débits maximaux susceptibles de survenir et les régions à risque élevé d'inondation. Ces simulations ont également permis de cartographier les zones inondables, fournissant ainsi des informations essentielles pour la planification des interventions.

Sur la base de nos analyses, plusieurs solutions d'aménagement ont été proposées pour améliorer la gestion des crues dans cette région. Parmi les variantes étudiées, nous avons évalué trois types de canaux : en béton armé, en gabion et en enrochement. Nos résultats montrent que chaque solution présente des avantages spécifiques, mais que le canal en béton armé se distingue par son efficacité à long terme et sa capacité à gérer des débits élevés, bien que plus coûteux à mettre en œuvre. En parallèle, les solutions en gabion et en enrochement, moins onéreuses, offrent des alternatives viables, notamment pour les sections moins critiques du bassin.

Enfin, l'analyse des coûts et des avantages associés à chaque solution a permis de recommander canal en gabion , tenant compte à la fois des contraintes économiques et des exigences en matière de sécurité hydraulique. La simulation post- ménagement montre une réduction significative des zones à risque d'inondation, validant ainsi l'efficacité des infrastructures proposées.

En conclusion, cette étude a non seulement permis de dresser un diagnostic précis de la situation hydrologique du bassin versant de l'oued El Kerma, mais elle a également abouti à des recommandations concrètes pour la mise en place d'aménagements durables. Ces solutions, si elles sont correctement exécutées et suivies, devraient permettre de limiter les impacts des crues et de protéger les populations locales contre les risques d'inondation à long terme.

RÉFÉRENCES

Abushandi, E. (2011). Rainfall-Runoffff Modeling in Arid Areas. Thèse de doctorat, École des mines de Freiberg, Allemagne.

Aste, J., F. Leone, and E. Leroi (1996). The evaluation of vulnerability to mass movements : towards abetter quantifification of landslide risks. Revue de Géographie Alpine 84 (1), 35–46.

Audrey, B. (2013). Conception de modèles de prévision des crues éclair par apprentissage artifificiel. Thèse de doctorat, l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, France.

Beck, E. (2006). Approche multi-risques en milieu urbain : Le cas des risques sismiques et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin) [PhD Thesis, Strasbourg 1].

Bekhira, A., Habi, M., & Morsli, B. (2019). La gestion des risques d'inondations et aménagement des cours d'eaux dans les zones urbaines : cas de la ville de Bechar. larhyss journal,16(1), 157-174.

Belazreg, N. E. H. (2019). Fonctionnement hydrologique des bassins versants à réseaux hydrographiques différents.

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

Bennis, S. (2004). Hydraulique et hydrologie, 2e édition (2éme).

Bobée, B., et al. (1999). HYFRAN : Logiciel d'analyse hydrologique. Institut national de la recherche scientifique - Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE).

Bouasria, S., M. Khalladi, and A. Khaldi (2010). Ralentissement dynamique des inondations au niveau d'un bassin versant de l'ouest algérien : cas de l'oued mekerra (sidi bel abbes). European Journal of Scientifific Research 43, 172–182.

Dauphiné, A. (2001). Risques et catastrophes, Observer Spatialiser Comprendre Gérer. Paris, France : Armand Colin.

Degoutte, G. (2012). Hydraulic Structures : Design and Construction.

D'Ercole, R. (1994). La vulnérabilité des siciétés et des espace urbanisés : Concepts, typologie, modèles d'analyse. Revue de géographie Alpine 82 (4), 87–96.

Drobot, S. and D. Parker (2007). Advances and challenges in flash flood warnings. Environmental Hazards 7, 173–178.

Eleutério, J. (2012). Flood risk analysis : impact of uncertainty in hazard modelling and vulnerabibility assessments on damage estimations. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, Strasbourg, France.

Eleutério, J. (2012). Flood risk analysis : impact of uncertainty in hazard modelling and vulnerabibility assessments on damage estimations. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, Strasbourg, France.

Fouchier, C. (2010). Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues. Thèse de doctorat, Université Montpellier II Sciences Et Techniques Du Languedoc, France.

GanttProject (2024). GanttProject 3.2

Gheith, H. and M. Sultan (2002). Construction of a hydrologic model for estimating wadi runoff and groundwater recharge in the eastern desert, egypt. Journal of Hydrology 263, 36–55.

GPC (1986). Guide de prévision des crues (Tome 1 ed.). France : Direction de l'Eau et de la prévention des pollutions et des risque.

Green, H., K. Beven, K. Buckley, and P. Young (1994). Mixing and Transport in the Environment.

Hamadache, B., A. Terchi, and O. Brachemi (2002). Study of the meteorological situation which affffected the west and the center of algeria in general and bab-el-oued in particular on 10 november 2001. InProceedings of 4th EGS Plinius Conference on Mediterranean storms.

HAMDANI Aziz (2012), thèse de Magister, Évolution géomorphologique et morphodynamique du bassin versant de Oued Agrioun à l'amont du Barrage de Ighil Emda (Région de Kherrata).

Ikhlef,R (2023). mémoire fin d'étude,Étude de protection contre les inondations par Modélisation des affluents Cas : du centre de Bordj Mira (W.Béjaïa).

INERIS (2003). Evaluation des incertitudes associées aux méthodes géostatistiques. Rapport technique, Laboratoire Central de Survaillance de la Qualité de l'Air.

Izambart, G. (2011). L'apport de la pratique de retour d'expérience pour comprendre la vulnérabilité face aux inondations. Mémoire master 1, Université de Toulouse II, France.

Jonkman, S. and I. Kelman (2005). analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths.Disasters 29, 75–97.

Ketrouci, K. (2014). Application de modèles hydrologiques dans l'estimation des crues extrêmes en Algérie. Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Algérie.

Khelalfa,A (2020) mémoire fin d'étude,Aménagement des Oueds Bridja, Guerguour et Palm beach pour la protection de la Zone Ouest de la commune de Staoueli contre les inondations (W. Alger).

Lahlah, S. (2004, 15/16/décembre 2004). Les inondations en Algérie. In Actes des Journées Techniques/Risques Naturels, Batna, Algérie, pp. 43–57.

Larousse, C. (2012). Le petit Larousse illustré-2012 (1 ed.).

Lencastre, A. (2008). Hydraulics of Open Channels.

Molinari, D. and J. Handmer (2011). A behavioural model for quantifying flflood warning effectiveness. Journal of Flood Risk Management 4, 23–32. **Moulin, L. (2007).** Prévision des crues rapides avec des modèles hydrologiques globaux. Application aux bassins opérationnels de la Loire supérieure : évaluation des modélisations, prise en compte des incertitudes sur les précipitations moyennes spatiales et utilisation de prévisions météorologiques. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Paris, France.

Nedelec, Y., Kao, C., & Chaumont, C. (2004). Réduction des transferts de crues dans les bassins versants agricoles fortement drainés : État des connaissances et des recherches.

Oujbbour, B. (2015). Annonce de crue et la mise en place d'un système d'alarme dans le bassin de guelmim. Mémoire de master sciences et techniques, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Maroc.

Senadi,I(2021). mémoire fin d'étude,PROTECTION DU COULOIR KHERRATA-SOUK EL TENINE CONTRE LES INONDATIONS DE L'OUED AGRIOUNE.

Roche, M. (année). Titre de l'ouvrage ou article. Éditeur/Journal.

Rodier, J. and M. Roche (1978). River flflow in arid regions. Hydrometry : Principles and Practices, Chapter 13, pp. 453–472. John Wiley and Sons.

Tabet-Aoul, M. (2008). Impacts du changement climatique sur les agricultures et les ressources hydriques au Maghreb. CIHEAM, N°4 8, 6.

Takayama, R., Nakamura, R., Esteban, M., Mäll, M., & Ohizumi, K. (2023). Pseudo global warming experiment of flood inundation in the upper White Volta River, Ghana. Journal of Hydrology : Regional Studies, 45, 101297.

Talha, H. (2014, novembre 25). Maroc : Pluies et inondations meurtrières dans le Sud. Le Point.

Thomas, N. (2007). Signalisation de santé et de sécurité au travail Réglementation (p. 68). INRS, Institut National de Recherche et de Sécurité.

Thouret, J.-C., & d'Ercole, R. (1996). Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : Effets, facteurs et réponses sociales. Cahiers des sciences humaines. ORSTOM, 32(2), 407.

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

Toumi, A. (2016). Hydraulique à surface libre (cours & exercices). 197.

UNDRO (1980). Natural disasters and vulnerability analysis. Report of expert group meeting, United Nations Disaster Relief offiche, New-York, USA.

UNESCO (1992). Glossaire international d'hydrologie. Rapport OMM-N° 385, UNESCO, Genève. Glossaire international d'hydrologie. Rapport OMM-N° 385, UNESCO, Genève.

U.S. Army Corps of Engineers (2010). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic reference manual, Hydrologic Engineering Center, CPD-69, Version 4.1.

US Army Corps of Engineers (2011). HEC-GeoRAS, GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS. Hydrologic Engineering Center. Version 10.

US Army Corps of Engineers (2021). HEC-RAS River Analysis System : User's Manual Version 6.0. Hydrologic Engineering Center.

Veyret, Y. (2004). Les risques (comprendre, recherche, s'entraîner). Quercy, Bréal, 17–47.

Vos, F., J. Rodriguez, R. Below, and D. Guha-Sapir (2010). Annual disaster statistical review 2009 : The numbers and trends. Rapport de recherche, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Belgique.

RÉFÉRENCES SITOGRAPHIQUES

https://www.youtube.com/watch?v=cJ8994fHJg8

https://earthexplorer.usgs.gov/

https://www.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=fc92d38533d440078f17678ebc20e8e2

https://www.arcgis.com/home/item.html?id=fc92d38533d440078f17678ebc20e8e2

https://www.adb.org/sites/default/files/project-documents/45206/45206-001-tacr-en.pdf

https://youtu.be/BUjF_MGcxYQ?si=Xlx29AJpDxp4P1k8

https://youtu.be/0kaibqh0Erc?si=d4P25W7w9LSnIZUz