



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUES

THEME :

Étude de protection de la ville de Sidi Bel Abbès contre les inondations de l'Oued Mekerra (Wilaya de Sidi Bel Abbès).

Présenté par :
DALI Ilies

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
HADJ SADOK Ahmed	Professeur	Président
ZAIBAK Issam	MC.B	Examineur
BOUZIANE Mamar	M.A.A	Examineur
BENSALAH Mohamed Draïdi	M.C.B	Promoteur

Session : Septembre 2024

Dédicace

Porté par un profond amour, un respect infini et une immense gratitude, ainsi que toute la reconnaissance qui m'habite, je dédie ce travail :

À mes chers parents :

Djemal El Dine et **Karima**, pour votre soutien indéfectible, votre patience infinie et vos innombrables sacrifices tout au long de mes études et durant la réalisation de ce projet. Vous êtes la source de ma force et la clé de mes réussites. Tout ce que je suis aujourd'hui, et tout ce que je deviendrai demain, je vous le dois entièrement. Je m'efforcerai toujours d'être à la hauteur de votre amour et de votre confiance, et de vous rendre fiers. Que Dieu, le Tout-Puissant, vous accorde santé, bonheur et vous protège de tout mal.

À mes chers frères :

Habib, Rafik, Nadjib et Khalil

À mes chers amis :

Youcef, Dehmane, Mohamed El Amine, Alae Eddin, Omar et Osman, Aymen,
Mehdi

À tous ceux qui ont contribué à mon parcours, je tiens à exprimer ma gratitude la plus sincère. En particulier, je souhaite adresser un profond remerciement à :

Ma Tante SOUAD et à Mon Oncle Ali

Remerciement

Avec une profonde gratitude, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers le Tout-Puissant, qui, par Sa grâce, m'a accordé la santé et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce mémoire.

Je souhaite tout d'abord adresser mes sincères remerciements à mon encadrant, le Professeur **Mr. Bensalah Mohamed Draid**. Son soutien indéfectible, ses conseils éclairés et ses critiques constructives ont grandement contribué à l'enrichissement de ce travail.

Je remercie également les membres du jury pour leur générosité de temps et leur expertise précieuse dans l'évaluation de ce mémoire. Leur engagement envers l'excellence académique représente une véritable source d'inspiration.

Un remerciement particulier s'adresse au personnel et aux enseignants de l'École Nationale Supérieure de l'Hydraulique (ENSH), dont le dévouement à l'éducation et à la formation a joué un rôle déterminant dans mon parcours académique.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers moi-même. Les défis complexes rencontrés au cours de ce projet ont exigé une force intérieure et une détermination qui ont largement dépassé mes attentes. Réussir à surmonter ces obstacles a renforcé ma conviction personnelle et révélé une résilience insoupçonnée. Je ressens une fierté sincère et la conviction que chaque défi surmonté a contribué à forger la personne que je suis devenue, me préparant ainsi à affronter les défis futurs avec confiance.

Que chacun trouve ici l'expression sincère de ma profonde reconnaissance.

ملخص

هدف هذه الدراسة إلى وضع نظام متكامل لتطوير مجرى وادي مكرة الذي يمر عبر مدينة سيدي بلعباس، بهدف تأمين تدفق مياه الفيضانات بشكل آمن وضمان حماية الموارد المادية والبشرية في المدينة. لتحقيق ذلك، قمنا في البداية بوصف شامل لخصائص منطقة الدراسة، مع الإشارة إلى بعض الكوارث التي تعرضت لها المدينة في السابق. تلت ذلك دراسة هيدرولوجية مفصلة للمنطقة، تم فيها تحليل الخصائص المورفولوجية والهيدرولوجية لحوض التصريف الذي يغذي وادي مكرة. بناءً على هذه المعطيات، تم حساب التدفق الأقصى الذي سمح لنا بالانتقال إلى مرحلة المحاكاة هيدروليكية باستخدام برامج متخصصة مثل HEC-RAS. من خلال هذه المحاكاة، تم تحديد المناطق المعرضة لخطر الفيضانات على طول مسار الوادي، الذي يمتد لحوالي 6 كيلومترات داخل المدينة. وبعد استعراض مجموعة من خيارات الحماية، تم اختيار الحل الأمثل من الناحيتين التقنية والاقتصادية. هذا الحل يتمثل في إنشاء قناة "الغايبون" لوادي مكرة، والذي تم اعتماده بعد مقارنة بين عدة سيناريوهات تخطيطية مختلفة. الهدف من هذا النهج الاستباقي هو ضمان الأمان والاستدامة، مما يسهم بشكل فعال في الإدارة المستدامة لمخاطر الفيضانات في المنطقة.

كلمات مفتاحية: نظام متكامل، واد مكرة، محاكاة هيدروليكية، سيناريوهات تخطيطية مخاطر الفيضانات، تطوير مجرى وادي سيدي بلعباس.

Résumé

Cette étude vise à établir un système intégré pour la gestion de l'oued Mekerra, qui traverse Sidi Bel Abbès, afin d'assurer un écoulement sécurisé des eaux de crue et de protéger les ressources de la ville. Nous avons d'abord décrit les caractéristiques de la zone d'étude, y compris les catastrophes passées, puis réalisé une analyse détaillée des aspects morphologiques et hydrologiques du bassin versant. Nous avons calculé le débit maximal et effectué des simulations hydrauliques avec les logiciels HEC-RAS et ArcGIS pour identifier les zones à risque d'inondation le l'oued, qui mesure environ 6 kilomètres dans la ville. Après avoir comparé plusieurs options de protection, nous avons choisi de construire un canal en gabions, une solution optimale en termes technique et économique. Cette approche proactive assure sécurité et durabilité, contribuant ainsi à une gestion efficace des risques d'inondation.

Mots-clés : système intégré, oued Mekerra, simulation hydraulique, scénarios de planification, risques d'inondation, aménagement du cours d'eau, Sidi Bel Abbès.

Abstract

This study aims to develop an integrated system to manage the Oued Mekerra, which runs through Sidi Bel Abbès, ensuring safe floodwater conveyance and protection of the city's resources. We began with a detailed assessment of the study area's characteristics and past disasters. We then analyzed the watershed's morphological and hydrological aspects, calculated the maximum flow, and conducted hydraulic simulations using HEC-RAS and ArcGIS. These simulations identified flood-prone areas along the 6-kilometer stretch of the Oued within the city. After evaluating various protection options, we chose the optimal solution—constructing a gabion channel for Oued Mekerra based on technical and cost considerations. This proactive approach promotes safety and sustainability, contributing significantly to effective flood risk management in the region.

Key words: Integrated system, Oued Mekerra, Hydraulic simulation, Planning scenarios, Flood risks, River course management, Sidi Bel Abbès

Sommaire

Chapitre I Historique Et problématique des inondations en Algérie	1
I .1 Généralités sur les inondations	2
I.1.1 Principes et définitions des notions liées aux risques d'inondation.....	2
I.1.1.1 L'aléa	2
I.1.1.2 Vulnérabilité	3
I.1.1.3 Risque.....	3
I.1.1.4 La gestion du risque d'inondation	4
I.1.2 Inondation	5
I.1.2.1 Types d'inondation.....	6
I.1.2.2 Les causes des inondations	7
I.1.2.3 Impact des activités de l'homme.....	8
I.1.3. Crue.....	8
I.1.3.1 Types de crue	8
I.1.3.2 Les éléments descriptifs d'une crue.....	9
I.1.4 Conséquences engendrées par les inondations	10
I .1.5 Problématique des inondations en Algérie	10
I .1.6 Les inondations qui affectent la zone d'étude.....	10
I .1.6.1 Historique des Événements de Crue de l'Oued Mekerra.....	10
I .1.6.2 Les principales causes des inondations constatées dans le bassin.....	11
Chapitre II Présentation de la zone d'étude.....	16
II.1 Présentation de la zone d'étude.....	17
II.1.1 Situation géographique de bassin versant de Macta	18
II.1.1.1 Situation géographique de bassin versant de l'oued Mekrra.	19
II.1.1.2 Situation géographique de la zone d'étude	20
II.1.2 Climatologie	21
II.1.2.1 Température.....	22
II.1.2.2 Vent	23
II.1.2.3 Humidité.....	24
II.1.2.4 Évaporation.....	25
II.1.2.5 Précipitations	26
II.1.3 Géologie.....	27
II.1.4 Sismicité	29

Chapitre III Etude hydrologique	31
III.1 Bassin Versant	32
III 1.1: Etude géomorphologique	33
III.1.1.1 Caractéristique géométrique :	34
III .1.2 Etude de Relief :	38
III.1.2.1 La courbe hypsométrique :	38
III.1.3 Indice de pente :	41
III.2 Etude de réseau hydrographie :	46
III.2.1 Caractéristiques du réseau hydrographique :	46
III.2.2 Paramètres hydrographiques :	47
III.2.3 Temps de concentration Tc :	48
III.2.4 Vitesse de ruissellement (V_r) :	51
III.3. Etude de crue :	54
III.3.1 La série d'observation de la station hydrométrique :	54
III.3.1.1 Présentation de la station hydrométrique :	54
III.3.2. Ajustement de la série des débits maximales	56
III.3.3 Choix de la loi d'ajustement.....	62
III.3.3.1 Présentation de la Méthode GRADEX	63
III.3.3.2 Principe de la méthode de GRADEX	63
III.3.3.3 Hypothèses de la méthode	64
III.3.3.4 Les étapes de la méthode	65
III.3.3.5 Application de la méthode de GRADEX.....	66
III.3.4 Hydrogramme de crue.....	71
III.3.5 Choix de la crue du projet.....	74
Chapitre IV Evaluation et modélisation Intégrée Des cours d'eau non Aménagés	76
IV.1 Les caractéristiques des canaux	77
IV.1.1 Paramètres Hydraulique.....	77
IV.1.2 Paramètres géométrique :	79
IV.2 Cours d'eau :	81
IV.2.1 Définition d'un canal :	81
IV.2.2 Les flux d'eau dans les canaux :	82
IV.2.3 Types écoulements dans les canaux :	83
IV.2.3.1 Par rapport l'espace :	83
IV.2.3.2 Par rapport le temps :	83
IV.2.4 Régime d'écoulement	84
IV.3 Analyse et modélisation des cours d'eau non aménagés :	86
IV.3.1 Etat de l'oued à la zone d'étude	86

IV.3.2 Modélisation de l'écoulement :	86
IV.3.2.1 logiciel HEC-RAS :	87
IV.3.2.2 Principe de fonctionnement de HEC-RAS :	87
IV.3.2.3 les étapes de simulation avec HEC-RAS :	88
IV.3.3 Résultats de la simulation d'écoulement :	94
IV 3.3.1 Interprétation des résultats :	101
IV.4 La cartographie des risques d'inondation.....	101
IV.4.1 Carte des profondeurs.....	101
IV.4.2 Carte des vitesses d'écoulement :	102
IV.4.3 Classes d'aléa.....	103
IV.4.4 Cartographie de la vulnérabilité.....	104
IV.5 Cartographie des risques	105
Chapitre V Etude des variantes d'aménagement	107
V.1 Les divers types d'aménagements :	108
V.1.1 Protection contre les crues :	108
V.1.1.1 Protection directe (rapprochée) :	108
V.1.1.2 Protection indirect (Eloignées) :	109
V.1.2 Protection contre l'érosion:	109
V.1.2.1 Érosion du lit	110
V.1.2.2 Érosion des berges	110
V.2 Calcul hydraulique des canaux	110
V.2.1 Ecoulement uniforme dans les canaux à ciel ouvert :	110
V.2.1.1 Les caractéristiques de l'écoulement uniforme	110
V.2.2 Les formules générale de l'écoulement :	111
V.2.3 Choix des paramètres de dimensionnement :	114
V.2.3.1 Sélection de la pente appropriée pour le projet.....	115
V.2.3.2 Le coefficient de rugosité.....	115
V.2.3.3 Marge de sécurité dans les canaux (Revanche)	116
V.2.3.4 Vitesse d'érosion	116
V.3 Étude de Variantes	116
V.3.1 Canal en béton.....	117
V.3.1.1 Les Sections en travers	122
V.3.1.2 : Évaluation du coût de la variante :	124
V.3.2 Canal en enrochement	126
V3.2.1 Les sections en travers.....	131
V.3.2.2 Évaluation du coût de la variante	135
V.3.3 Canal en gabion.....	136

V3.3.1 Les sections en travers.....	140
V3.3.2 Évaluation du coût de la variante	142
V4 Choix de la variante d'aménagement :	143
V4.1 Proposition.....	144
V4.2 Vue en 3D des tronçons de l'Oued Mekerra après l'aménagement :	144
Chapitre VI Organisation de chantier.....	149
VI.1 Généralité	150
VI.1.1 Rôles et responsabilités des participants au chantier	150
VI.1.1.1 Maître d'ouvrage.....	150
VI.1.1.2 Maître d'œuvre.....	151
VI.1.1.3 Entreprise	152
VI.1.1.4 Entrepreneur	152
VI.2 Devis quantitatif et estimatif du projet	153
VI.3 Généralité sur les plannings.....	154
VI.3.1 Définition de planification des travaux	154
VI.3.2 Plannings généraux de gestion de l'entreprise	155
VI.3.3 Phases de planification	155
VI.3.4 Planification des travaux.....	156
VI.3.5 Méthode de présentations les plannings.....	156
VI.3.5.1 Méthode basée sur le réseau.....	156
VI.3.6 Différentes méthodes basées sur le réseau	158
VI.3.6.1 Méthode C.P.M (Critical Path Method).....	158
VI.3.6.2 Méthode P.E.R.T (Program Evaluation and Review Technique)	158
VI.3.7 Méthode de calcul PERT.....	159
VI.3.7.1 Les paramètres de la méthode PERT	159
VI.3.8 Méthodes basées sur le graphique	160
VI.3.8.1 Méthodes basées sur le graphique	160
VI.3.9 Chemin critique.....	161
VI.3.10 Diagramme de Gantt	162
VI.3.10.1 Objectif de diagramme de Gantt	162
VI.3.10.2 Structure de diagramme de Gantt.....	162
VI.3.10.3 Démarche de réalisation	162
VI.3.10.4 Avantage de Gantt.....	163

Liste des tableaux

Chapitre I : Historique et problématique des inondations en Algérie

Tableau I.1 : Statistiques des inondations dans la wilaya de Sidi Bel Abbés au cours des vingt dernière années (Borsali et al,2005).

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Tableau II.1 : Les relevés mensuels des températures minimales moyennes et maximales en (C°) pour la période de (1987/2005). (Source : ONM d'après la station météorologique 110304).

Tableau II.2 : Les vitesses maximales du vent(m/s) observées à la station 110304 sur une période de (1987/2005).

Tableau II.3 : Représente les valeurs maximales et minimales d'humidité enregistrées à la station 110304 pour la période de (1990/2005). (Source : ONM).

Tableau II.4 : Représente les valeurs d'évaporation enregistrées à la station 110304 pour la période de (1987/2005). (Source : ONM).

Tableau II.5 : Représente répartition interannuelle des précipitations mensuelles a la station pluviométrique 110304.

Chapitre III : Etude hydrologique

Tableau III.1 : Paramètres hydro morphométriques du bassin versant d'Oued Mekerra.

Tableau III.2 : Paramètre hypsométrique de bassin d'Oued Mekerra.

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

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

Tableau III.5 : Classification du relief selon l'indice de pente global selon ma méthode (O.R.S.T.O.M).

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

Tableau III.7 : Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique du bassin versant de l'Oued Mekerra.

Tableau III.8 : Les résultats de calcul de temps de concentration Tc.

Tableau III.9 : Résultats de calcul de temps de concentration Tc.

Tableau III.10 : Paramètre hydrographiques d'Oued Mekerra.

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

Tableau III.12 : Caractéristique de la station hydrométrique de Sidi Bel Abbés (Source : ANRH-Oran).

Tableau III.13 : Caractéristiques de les deux station pluviométrique (Source : ANRH-Oran).

Tableau III.14 : Série des débits maximales annuels prise de la station 110301 (Source : ANRH-Oran).

Tableau III.15 : Modèles de distribution fréquentielle et leur fiabilité.

Tableau III.16 : Résultats d'ajustement de GUMBEL.

Tableau III.17 : La comparaison entre la loi Gumbel et caractéristiques l'échantillon.

Tableau III.18 : Résultats d'ajustement a Loi de Log Normale.

Tableau III.19 : Comparaison des caractéristiques entre la loi Log Normale et les données de l'échantillon.

Tableau III.20 : Les résultats du texte de khi carré χ^2 .

Tableau III.21 : Détails des stations pluviométriques (Source : ANRH-Oran).

Tableau III.22 : Précipitations maximales journalières enregistrées à la station pluviométrique de Sidi Bel Abbés 110305 (Source : ANRH-Oran).

Tableau III.23 : Résultats de l'ajustement des précipitations maximales journalières a la station pluviométrique de Sidi Bel Abbés 110305 selon la Loi de GUMBEL.

Tableau III.24 : Résultats des calculs pour la station pluviométrique de Sidi Bel Abbés pour les différentes périodes de retour.

Tableau III.25 : Résultats de l'ajustement pour les stations évaluées.

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

Tableau III.27 : Paramètre pour le calcul de l'hydrogramme de crue.

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

Chapitre IV : Evaluation et modélisation intégrée des cours d'eau non aménagés

Tableau IV.1: La valeur de la rugosité (Chen et Cotton,1986).

Tableau IV.2: Principaux paramètres hydrauliques pour tous les stations d'Oued Mekerra (Source : Logiciel HEC-RAS).

Chapitre V : Etude des variants d'aménagement

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

Tableau V.2 : Valeur du coefficient de rugosité (Chen,1986).

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

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

Tableau V.5 : Dimensions de l'aménagement en béton armé pour le traçon amont de l'Oued Mekerra.

Tableau V.6 : Dimensions de l'aménagement en béton armé pour le traçon intermédiaire de l'Oued Mekerra.

Tableau V.7 : Dimensions de l'aménagement en béton armé pour le traçon aval de l'Oued Mekerra.

Tableau V.8 : Résultats de la simulation de l'écoulement pour le canal en béton de l'Oued Mekerra (Source : HEC-RAS).

Tableau V.9 : Devis pour la variante du canal trapézoïdale en béton en amont de l'Oued Mekerra.

Tableau V.10 : Devis pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé du traçon intermédiaire de l'Oued de Mekerra.

Tableau V.11 : Devis pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé en aval de l'Oued Mekerra.

Tableau V.12 : Devis total pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé en l'Oued Mekerra.

Tableau V.13 : Dimensions de l'aménagement en enrochement pour le traçon amont de l'Oued Mekerra.

Tableau V.14 : Dimensions de l'aménagement en enrochement pour le traçon intermédiaire de l'Oued Mekerra.

Tableau V.15 : Dimensions de l'aménagement en enrochement pour le traçon aval de l'Oued Mekerra.

Tableau V.16 : Résultats de la simulation de l'écoulement pour le canal en enrochement de l'Oued Mekerra (Source : HEC-RAS).

Tableau V.17 : Calcul les sections d'enrochement.

Tableau V.18 : Calcul volumes d'enrochement.

Tableau V.19 : Sections du géotextile.

Tableau V.20 : Estimation pour la variante du canal en enrochement de l'Oued Mekerra.

Tableau V.21: Dimensions de canal de l'aménagement en gabion de l'Oued Mekerra tronçon amont.

Tableau V.22: Résultats des calculs du nombre de caisses nécessaires pour le canal en gabion en amont de l'Oued Mekerra.

Tableau V.23: Dimensions de canal de l'aménagement en gabion de l'Oued Mekerra tronçon milieu.

Tableau V.24: Résultats des calculs du nombre de caisses nécessaires pour le canal en gabion en milieu de l'Oued Mekerra.

Tableau V.25 : Dimensions de canal de l'aménagement en gabion de l'Oued Mekerra tronçon aval.

Tableau V.26 : Résultats des calculs du nombre de caisses nécessaires pour le canal en gabion en aval de l'Oued Mekerra.

Tableau V.27: Résultats de la simulation de l'écoulement dans un canal en gabions de l'Oued Mekerra (Source : HEC-RAS).

Tableau V.28: Devis de la variante canal en gabion en amont d'Oued Mekerra.

Tableau V.29: Devis de la variante canal en gabion en milieu d'Oued Mekerra.

Tableau V.30: Devis de la variante canal en gabion en aval d'Oued Mekerra.

Tableau V.31: Devis de la variante canal en gabion totale d'Oued Mekerra.

Chapitre VI : Organisation de chantier

Tableau VI.1: Devis global pour la variante du canal trapézoïdale en gabion pour l'Oued Mekerra.

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

Liste des figures

Chapitre I : Historique et problématique des inondations en Algérie

Figure I.1 : Le risque d'inondation. (Source : Gironde.FR).

Figure I.2 : Représentation du risque acceptable et inacceptable à partir des courbes iso risque. (Source : Pierre Ozer, Université of Liège).

Figure I.3 : Inondation par débordement direct. (Source : Inondation Guide pratique).

Figure I.4 : Inondation par remontées des nappes phréatiques. (Source : Inondation Guide pratique).

Figure I.5 : Inondation par accumulation d'eau ruisselée. (Source : Inondation Guide pratique).

Figure I.6 : Inondation par rupture d'un barrage. (Source : Institut des risques majeurs).

Figure I.7 : Les éléments descriptifs d'une crue. (Source : Sylvie Tika Asakuau Université de Kinshasa).

Figure I.8 : Inondation la ville de Sidi Bel Abbés. (Source : Bureau d'étude, 2007).

Figure I.9 : Inondation la ville de Sidi Bel Abbés. (Source : bureau d'étude, 2012).

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Figure II.1 : Découpage administratif de la Wilaya de Sidi Bel Abbés (Source : Bureau d'étude).

Figure II.2 : Situation du bassin versant de la Macta en Algérie. (Source : Agence de bassin oranien, 2006).

Figure II.3 : Carte des sous-bassins du bassin versant de la Macta. (Source : Agence de bassin oranien, 2006)

Figure II.4 : Localisation et l'intégration d'Oued Mekerra dans la ville de Sidi Bel Abbés. (Source : Google Earth, Dali Ilies).

Figure II.5 : Barres du graphique représente températures moyennes, minimales et maximales mensuelles observées à la station 110304 pendant la période (1987/2005).

Figure II.6 : Barres du graphique représente les vitesses maximales du vent (m/s) observées à la station 110304 sur une période (1987/2005).

Figure II.7 : Barres du graphique représente les valeurs maximales et minimales d'humidité enregistrées à la station 110304 pour la période (1990/2005).

Figure II.8 : Barres du graphique représente les valeurs d'évaporation enregistrées à la station 110304 pour la période (1987/2005).

Figure II.9 : Graphique illustrant l'évolution interannuelle des précipitations mensuelles.

Figure II.10 : Carte géologique de la région entourant la plaine de Mekerra. (Source : *Sourisseau. 1972*).

Figure II.11 : Carte de classification et zonage sismique du territoire national. (Source : *Addenda,2003*).

Chapitre III : Etude hydrologique

Figure III.1 : Représentation du bassin de l'Oued Mekerra.

Figure III.2 : Types de bassin versants selon le coefficient de GRAVELUIS.

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

Figure III.4 : Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Mekerra.

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

Figure III.6 : Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Mekerra.

Figure III.7 : Situation de la Station hydrométrique de Sidi Bel Abbés. (Source : ANRH-Blida).

Figure III.8 : Graphique d'ajustement a Loi de GUMBEL de la station Sidi Bel Abbés 110301.

Figure III.9 : Graphique d'ajustement a Loi Log Normale de la station Sidi Bel Abbés 110301.

Figure III.10 : Graphique de comparaison entre la Loi GUMBEL et la Loi Log Normale de la station Sidi Bel Abbés 110301.

Figure III.11 : Graphe de l'ajustement des précipitations et de la droite d'extrapolations des débits

Figure III.12 : Hydrogramme de crue pour période de retour de 100 ans pour diverses stations.

Figure III.13 : Hydrogramme de crue du projet pour la station pluviométrique Sidi Ali Benyoub 110201.

Chapitre IV : Evaluation et modélisation intégrée des cours d'eau non aménagés

Figure IV.1 : Représente Hauteur normal dans le canal.

Figure IV.2 : Représente surface mouillée dans un canal rectangulaire.

Figure IV.3 : Représente périmètre mouillé dans un canal rectangulaire.

Figure IV.4 : Représente largeur au miroir.

Figure IV.5 : Représente lit mineur et lit majeur. (Source : Wikipédia).

Figure IV.6 : Représente schéma d'un canal naturel.

Figure IV.7 : Canal découvert a surface libre

Figure IV.8 : Schéma illustrant l'écoulement uniforme et non uniforme dans l'espace.
(Source : Dr Habibi Brahim)

Figure IV.9 : L'écoulement stationnaire (permanant). (Source : (M. HASSANE, 2009/2010).

Figure IV.10 : L'écoulement non stationnaire (non permanant). (Source : (M. HASSANE, 2009/2010).

Figure IV.11 : Schéma présentatif de différent type d'écoulement. (Source Wikipédia).

Figure IV.12 : Absence des berges.

Figure IV.13 : Présence de végétations et déchets sur l'oued.

Figure IV.14 : Plate-forme du logiciel HEC-RAS (6.3.1).

Figure IV.15 : Réseaux de terrain irrégulier (TIN).

Figure IV.16 : Intégration du fichier de projection.

Figure IV.17 : Intégration du fichier de projection.

Figure IV.18 : Tracé de l'oued et des sections transversales associées.

Figure IV.19 : Insertions des valeurs de Manning pour le terrain naturel.

Figure IV.20 : Insertion du débit de projet (Débit centennal).

Figure IV.21 : Insertion des conditions aux limites.

Figure IV.22 : Simulation réussie.

Figure IV.23 : Profil en long du cours d'eau a l'état naturel pour une crue centennale.

Figure IV.24 : Vue 3D de L'oued Mekerra.

Figure IV.25 : Courbe de tarage du traçon modélisé de l'oued Mekerra.

Figure IV.26 : Résultat pour la section 15.

Figure IV.27 : Résultat pour la section 140.

Figure IV.28 : Résultat pour la section 2939.

Figure IV.29 : Résultat pour la section 6121.

Figure IV.30 : Variation de la vitesse d'écoulement totale en fonction de la distance.

Figure IV.31 : Variation du nombre de Froude en fonction de la distance.

Figure IV.32 : Carte de profondeurs pour une crue centennale d'oued Mekerra.

Figure IV.33 : Carte des vitesses d'eau pour une crue centennale de l'oued Mekerra.

Figure IV.34 : Carte de l'aléa pour la crue centennale de la ville Sidi Bel Abbés.

Figure IV.35 : Carte des risques d'inondation pour la ville de Sidi Bel Abbés.

Chapitre V : Etude des variants d'aménagement

Figure V.1 : Ecoulement uniforme entre les extrémités. (Source : CALCUL DES CONDUITES ET CANAUX Ecoulement uniforme).

Figure V.2 : Eléments géométriques pour différentes sections de canaux ouverts. (Grafe,2000).

Figure V.3 : Présentation des tronçons et location de la zone d'étude. (Source : Google Earth, Dali Ilies).

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

Figure V.5 : Dimensions du canal trapézoïdale en béton armé de traçon amont de l'Oued Mekerra. (Source : Flow Master, Dali Ilies).

Figure V.6 : Dimensions du canal trapézoïdale en béton armé de traçon intermédiaire de l'Oued Mekerra. (Source : Flow Master, Dali Ilies).

Figure V.7 : Dimensions du canal trapézoïdale en béton armé de traçon aval de l'Oued Mekerra. (Source : Flow Master, Dali Ilies).

Figure V.8 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le traçon amont d'Oued Mekerra (station 6121).

Figure V.9 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le traçon amont d'Oued Mekerra (station 2939).

Figure V.10 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le traçon amont d'Oued Mekerra (station 140).

Figure V.11 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le traçon amont d'Oued Mekerra (station15).

Figure V.12 : Les éléments constructifs d'un canal en enrochement. (Source : KENNISBANK Waterbouw).

Figure V.13 : Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement coté amont d'Oued Mekerra. (Source : Flow Master, Dali Ilies).

Figure V.14 : Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement coté milieu d'Oued Mekerra. (Source : Flow Master, Dali Ilies).

Figure V.15 : Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement coté aval d'Oued Mekerra. (Source : Flow Master, Dali Ilies).

Figure V.16 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue de 100 ans sur le traçon amont d'Oued Mekerra (Station 6212).

Figure V.17 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue de 100 ans sur le traçon amont d'Oued Mekerra (Station 2939).

Figure V.18 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue de 100 ans sur le traçon amont d'Oued Mekerra (Station 140).

Figure V.19 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue de 100 ans sur le traçon amont d'Oued Mekerra (Station 15).

Figure V.20 : Section d'un canal en enrochement. (Source : Karim Kadi).

Figure V.21 : Cage en gabion.

Figure V.22 : Schéma de canal en gabion. (Source : ABDI Amar).

Figure V.23 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le traçon amont d'Oued Mekerra (Station 15).

Figure V.24 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le traçon amont d'Oued Mekerra (Station 140).

Figure V.25 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le traçon amont d'Oued Mekerra (Station 2939).

Figure V.26 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le traçon amont d'Oued Mekerra (Station 6121).

Figure V.27 : Vue en 3D du traçon amont en gabion de l'Oued Mekerra.

Figure V.28 : Vue en 3D du traçon intermédiaire en gabion de l'Oued Mekerra.

Figure V.29 : Vue en 3D du traçon aval en gabion de l'Oued Mekerra.

Figure V.30 : Carte de profondeurs après aménagement pour une crue centennale d'oued Mekerra.

Figure V.31 : Carte des risques d'inondation après aménagement pour la ville de Sidi Bel Abbés.

Chapitre VI : Organisation de chantier

Figure VI.1 : Relation entre les personnes du chantier. (Ghomari,2013).

Figure VI.2 : Diagramme illustratif de la méthode P.E.R.T.

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

Figure VI.4 : Chronogramme du projet pour la variante de Gabionnage par logiciel GANTT PROJECT

Introduction générale

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

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

La région de Sidi Bel Abbès, située dans l'ouest de l'Algérie, est particulièrement vulnérable aux catastrophes naturelles telles que les inondations. L'oued Mekerra, qui traverse le centre de la ville, est l'un des cours d'eau les plus redoutables de la région en raison de ses crues importantes. En effet, il divise Sidi Bel Abbès en deux parties distinctes, traversant à la fois des zones vitales et des quartiers résidentiels, ce qui impacte profondément les principales zones urbaines de la ville. En 2019, la population de la wilaya de Sidi Bel Abbès a connu une

augmentation notable de 10 973 habitants, atteignant un total de 713 377 personnes. Cette population est majoritairement concentrée dans le nord-ouest de la wilaya, particulièrement du côté de l'oued. En cas de fortes précipitations et d'inondations, les conséquences peuvent être désastreuses, entraînant des dommages significatifs aux infrastructures de la ville, y compris aux équipements et aux bâtiments, ainsi que des pertes humaines.

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

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

Chapitre 01 : Le premier chapitre commence par une exploration des notions d'aléa, de vulnérabilité et de risque, afin de saisir le processus de formation des inondations et de faciliter leur modélisation et la cartographie des effets. Il poursuit par une rétrospective des événements d'inondations marquants au niveau de la wilaya de Sidi Bel Abbès, avant de se concentrer sur la caractérisation des crues spécifiques à la zone d'étude et les dégâts qu'elles ont engendrés.

Chapitre 02 : Le deuxième chapitre présente une analyse exhaustive de la zone d'étude, en détaillant ses caractéristiques géographiques, géologiques, hydrogéologiques et climatiques. Il situe l'aménagement du cours d'eau de l'oued Mekerra

Chapitre 03 : Le troisième chapitre se divise en deux parties principales. La première partie présente les caractéristiques physiologiques et géomorphologiques des deux sous-bassins versants de l'Oued Mekerra, en utilisant des logiciels SIG comme ArcMap, Global Mapper et Google Earth pour analyser les données spatiales, géographiques et topographiques. La seconde partie se concentre sur l'étude hydrologique visant à évaluer les débits de crue à différentes périodes de retour. Cette analyse est fondée sur une analyse statistique

fréquentielle des données de débit, réalisée avec le logiciel HYFRAN, afin de prévoir les débits des crues de l'Oued Mekerra en fonction des caractéristiques du bassin versant.

Chapitre 04 : Le quatrième chapitre se concentre sur l'évaluation hydraulique de l'Oued Mekerra dans son état naturel, avant toute intervention d'aménagement. En utilisant les logiciels HEC-RAS et RAS Mapper, une simulation du comportement de l'Oued sans aménagement est réalisée pour mesurer les hauteurs d'eau associées aux débits prévus. Les résultats, sous forme de cartes des profondeurs d'eau, permettent d'identifier les zones à risque d'inondation et de guider les futures interventions d'aménagement pour une gestion optimale des risques d'inondation.

Chapitre 05 : Le cinquième chapitre est dédié à la conception de l'aménagement de l'Oued Mekerra, en mettant l'accent sur le dimensionnement hydraulique de la section d'écoulement. Il présente diverses options d'aménagement élaborées avec le logiciel FLOWMASTER, tout en incluant une estimation financière pour évaluer le coût des solutions proposées.

Chapitre 06 : Le sixième chapitre est dédié à l'organisation du chantier, visant à garantir le bon déroulement du projet. Il inclut des prévisions détaillées des coûts et des délais nécessaires à la réalisation de l'aménagement.

C

h

a

p

i

t

r

e

1

Historique

**Et problématique des inondations
en Algérie**

Introduction

En Algérie, les inondations constituent un risque majeur, particulièrement dans les régions nord du pays où les précipitations abondantes, surtout pendant la saison automnale, peuvent engendrer des crues graves. Les infrastructures hydrauliques y sont régulièrement mises à l'épreuve par des épisodes de pluies intenses susceptibles de provoquer des crues soudaines. Les événements catastrophiques tels que ceux survenus en 2001, avec des crues éclair à Alger entraînant des centaines de victimes et des dégâts considérables, illustrent la gravité du problème. Les inondations sont reconnues comme l'un des risques naturels les plus significatifs, se manifestant fréquemment et souvent de manière dévastatrice. Elles sont le résultat d'une combinaison complexe de facteurs topographiques, géologiques, hydrologiques et météorologiques. Bien qu'elles fassent partie intégrante du cycle saisonnier, ces catastrophes ont des impacts considérables sur les communautés humaines et l'environnement, soulignant l'importance d'une surveillance constante et d'une amélioration continue des stratégies de prévention et de gestion des risques.

I.1 Généralités sur les inondations :

I.1.1.1 Principes et définitions des notions liées aux risques d'inondation

Le terme « submersion » indique clairement un risque potentiel de dommages pour les zones proches des rives des cours d'eau. L'analyse des risques d'inondation repose traditionnellement sur deux éléments : l'aléa, qui est le phénomène générateur du risque, et la vulnérabilité, qui représente les inconvénients potentiels. L'évaluation de la vulnérabilité est généralement le domaine des sciences socio-économiques, tandis que l'analyse de l'aléa relève des études météorologiques et hydrologiques. La combinaison de ces deux aspects forme ce que l'on appelle la « méthode d'inondabilité ». Cette méthode repose sur deux facteurs principaux :

I.1.1.2 L'aléa

Le terme « aléa » est le plus approprié pour décrire le phénomène physique, naturel et incontrôlable de submersion, caractérisé par sa fréquence et son intensité spécifiques, indépendamment de l'occupation des sols. (MEDD, 2003). Le terme « aléa » désigne le phénomène physique responsable du sinistre. Il est déterminé par divers paramètres hydrauliques qui influencent la gravité de l'inondation. Par ailleurs, il est défini par sa probabilité d'occurrence, appelée également période de retour. (Ledoux, 2000). Le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD, 2003) a établi la classification suivante :

« Aléa courant » pour une période de retour de 5 à 10 ans « Aléa rare » pour une période de retour de 10 à 100 ans, et « aléa exceptionnel » pour une période de retour supérieure à 100 ans.

L'évaluation de l'aléa repose sur trois critères principaux : la « magnitude » (composante énergétique), la probabilité d'occurrence (composante temporelle), et l'aire d'impact (composante spatiale). Cependant, la probabilité qu'une crue se produise est également affectée par d'autres facteurs, notamment la répartition des précipitations sur le bassin versant,

les taux d'évaporation et la consommation d'eau par la végétation, l'absorption d'eau par le sol, ainsi que les processus d'infiltration et de ruissellement. (*Beck, 2006*).

Les paramètres essentiels pour évaluer l'aléa d'inondation incluent la période de retour des crues (qu'elles soient fréquentes, moyennes, exceptionnelles ou maximales vraisemblables), ainsi que la hauteur et la durée des crues, la vitesse d'écoulement, et le volume de matière transportée. Ces éléments sont cruciaux pour caractériser l'intensité et la gravité de l'aléa. (*Dauphiné, 2001*).

I.1.1.3 Vulnérabilité

La vulnérabilité se mesure par l'ampleur des dommages, qu'ils soient humains ou matériels, en fonction de l'intensité de l'aléa. L'évaluation de la vulnérabilité d'un territoire nécessite de comprendre la valeur des enjeux concernés et d'anticiper l'impact que l'aléa pourrait avoir sur ces enjeux pour estimer les dommages potentiels. La vulnérabilité est une notion multidimensionnelle qui englobe divers facteurs géographiques et socioéconomiques. Elle est évaluée en fonction du niveau de pertes et de dommages causés par l'aléa et est souvent étudiée pour mieux comprendre comment cet aléa se manifeste sur un territoire donné. D'après la définition du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (*MEDD*) en France, la vulnérabilité désigne l'étendue des impacts prévisibles qu'un phénomène naturel pourrait avoir sur les éléments à risque. Les enjeux, qui englobent les personnes, les biens, les activités et le patrimoine, donnent à la vulnérabilité une dimension à la fois quantitative et qualitative. Cette notion peut se décomposer en quatre éléments : la manière dont l'aléa est perçu socialement, l'aléa et ses impacts probables sur les différents enjeux, les stratégies mises en place pour réduire les effets de l'aléa, ainsi que les enjeux eux-mêmes (*Chachoua, 2010*).

La vulnérabilité se divise en deux types principaux : directe et indirecte, particulièrement dans le contexte des inondations en Algérie face au changement climatique.

- La vulnérabilité directe : concerne les éléments tangibles tels que les structures et les biens matériels. Elle évalue la probabilité que ces éléments subissent des dommages immédiats en raison d'une exposition directe à un phénomène dangereux. (*Eleutério, 2012*).
- La vulnérabilité indirecte : fait référence aux impacts secondaires qui peuvent affecter les ressources ou générer d'autres effets en raison du risque, sans que ces ressources soient directement exposées (*Eleutério, 2012*).

I.1.1.4 Risque

Le risque naturel est couramment défini par la formule : $(\text{Risque}) = (\text{Aléa}) \times (\text{Enjeu})$.

Cela signifie que le risque résulte de l'interaction entre un aléa, qui est un phénomène naturel potentiellement dangereux, et une zone géographique où se trouvent des enjeux, qu'ils soient humains, économiques, ou environnementaux. Cette approche du risque correspond à la définition donnée par la norme ISO/IEC Guide 73. Dans le langage courant, le terme « risque » est souvent associé à la probabilité ou à la possibilité qu'un événement se produise, comme

dans l'expression « risque d'accident ». Cependant, dans un contexte technique, le terme met davantage l'accent sur les conséquences potentielles en termes de pertes. Le risque peut ainsi être compris comme une mesure du danger résultant de la confrontation entre un aléa et les enjeux présents. Cette mesure, souvent exprimée en termes de gravité et de probabilité, peut être représentée graphiquement, comme dans le diagramme de Farmer pour les risques technologiques. En somme, le risque est une notion complexe qui résulte de la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité. Pour évaluer le risque sur un territoire, il est nécessaire de connaître à la fois les aléas et les enjeux spécifiques à cette zone. Il est aussi important de souligner qu'il n'existe pas de risque s'il n'y a pas de danger à la base.

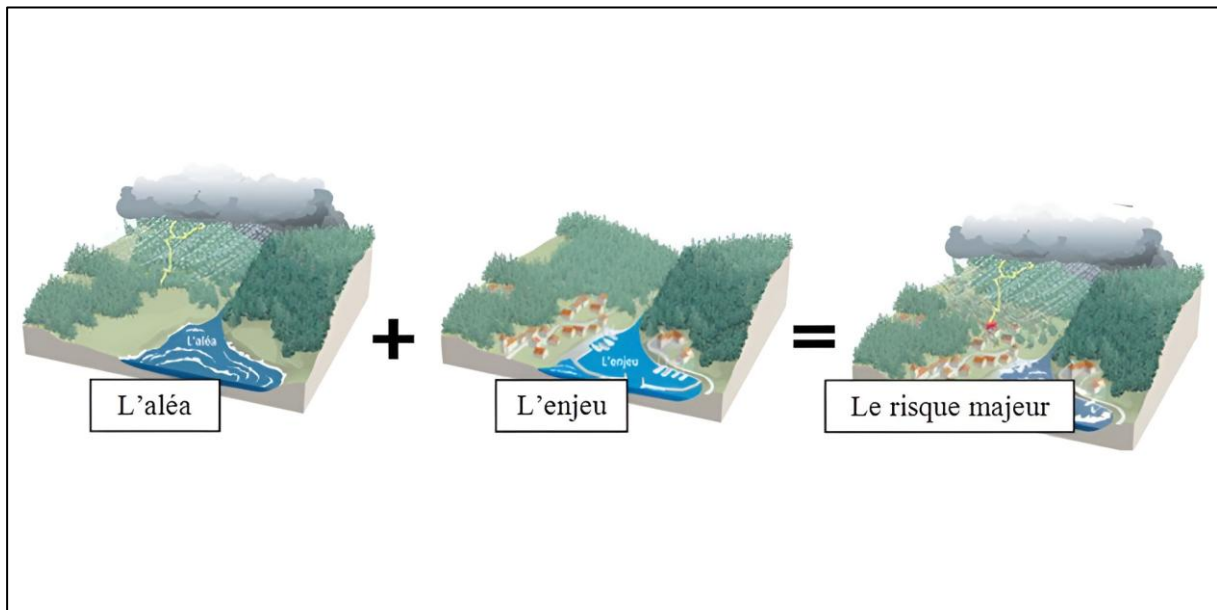


Figure I.1 Le risque d'inondation (Gironde.FR).

I.1.1.5 La gestion du risque d'inondation

La gestion du risque d'inondation peut être structurée en trois phases principales (*Estupina, 2004*) :

- **Prévention** : La première phase implique la décision d'aménager un territoire. Cette étape repose sur des méthodes statistiques pour développer des modèles de prévention, mais celles-ci peuvent être difficiles à appliquer en l'absence de données historiques suffisantes.
- **Gestion de crise** : La deuxième phase consiste à surveiller, prévoir et annoncer les crues potentielles, dans le but de minimiser leurs impacts. Cela inclut la mise en place d'une organisation efficace des secours.
- **Analyse post-crise** : La dernière phase, appelée analyse post-crise, évalue l'événement et ses répercussions. Elle permet de tirer des enseignements pour renforcer les phases de prévention et de gestion de crise.

En complément, la gestion des risques peut être divisée en deux étapes (Vatn, 2004) :

- Analyse des risques : Cette étape englobe la définition de l'aléa, l'évaluation des enjeux et de la vulnérabilité (Gala Serra, 2007).
- Évaluation des risques : Une phase essentielle dans la démarche de prévention.

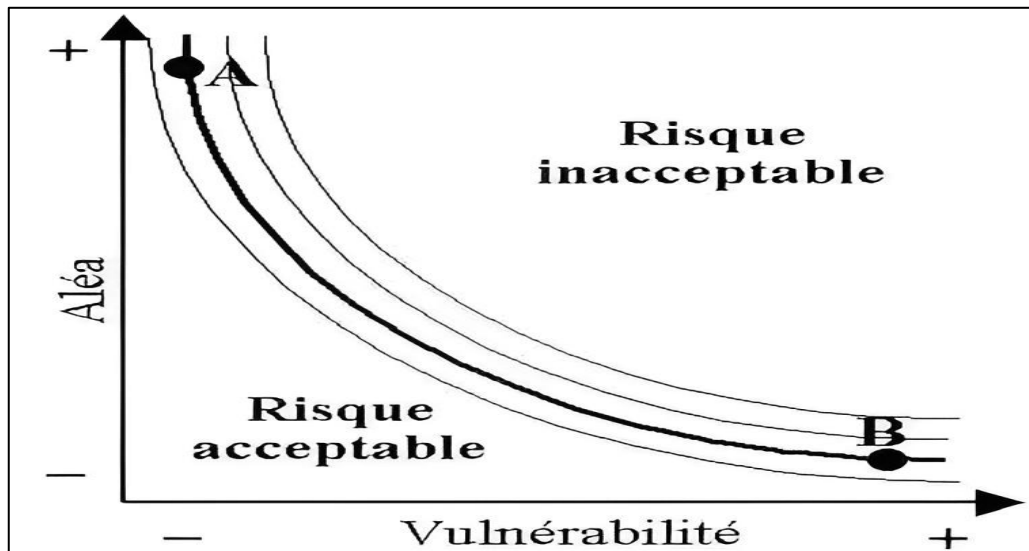


Figure I.2 Représentation du risque acceptable et inacceptable à partir des courbes iso Risques (Pierre Ozer, Université of liège).

- Risque acceptable : Niveau de pertes potentielles jugées acceptables par une société ou une communauté compte tenu de ses conditions sociales, économiques, politiques, culturelles, techniques et environnementales.
- Risque de catastrophe ou inacceptable : Potentiel de la catastrophe, en termes de vies humaines, des états de santé, des moyens de subsistance, des biens et services, qui pourraient se produire au sein d'une communauté ou une société, dans le futur.

I.1.2 Inondation

L'inondation peut être définie comme une submersion temporaire, qu'elle soit d'origine naturelle ou artificielle, d'une zone terrestre. Cette submersion touche généralement les terres situées à proximité d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau à niveaux variables, comme les lits majeurs, les bas-fonds des vallées, et les plaines côtières. Elle résulte de précipitations intenses ou d'accidents tels que la rupture d'un endiguement protégeant des terrains situés en dessous du niveau normal des eaux, ou encore la rupture d'un barrage. Les fortes pluies provoquent une crue, parfois accompagnée d'une remontée de la nappe phréatique.

I.1.2.1 Types d'inondation

Il existe quatre principaux types d'inondations :

- Par débordement direct : Le cours d'eau sort de son lit mineur pour occuper son lit majeur, les sites en bordure de cours d'eau sont le plus souvent inondés par un débordement direct. En fait, une rivière a deux lits le lit mineur où les eaux s'écoulent en temps ordinaire, et le lit majeur incluant les zones basses situées de part et d'autre du cours d'eau. Après des pluies fortes où persistantes, les rivières peuvent déborder et s'écouler à la fois en lit mineur et en lit majeur (*in, Slimani, 2011*).

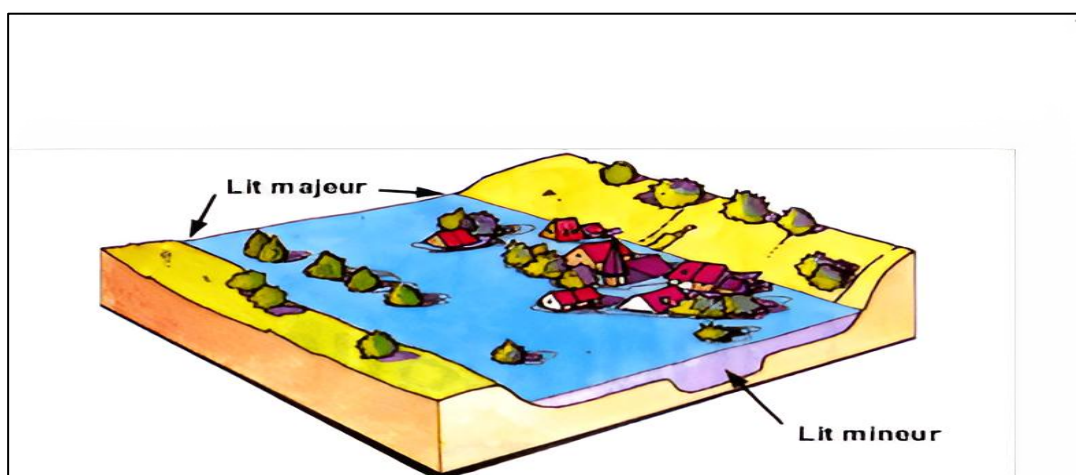


Figure I.3 Inondation par débordement direct

- Par débordement indirecte : Les eaux remontent par effet de siphon à travers les nappes alluviales, les réseaux d'assainissement (*in, Slimani, 2011*).



Figure I.4 Inondation par remontées des nappes phréatiques.

- Par accumulation d'eau ruisselée : Liée à une capacité Insuffisante d'infiltration, d'évacuation des sols ou du réseau de drainage lors de pluies anormales. Ces inondations peuvent se produire en : zone urbanisée, en dehors du lit des cours d'eau

proprement dit, lorsque l'imperméabilisation des sols et, la conception de l'urbanisation et des réseaux d'assainissement font obstacle à l'écoulement normal des pluies intenses (orages, en particulier de type cévenol) (*in, Slimani,2011*).

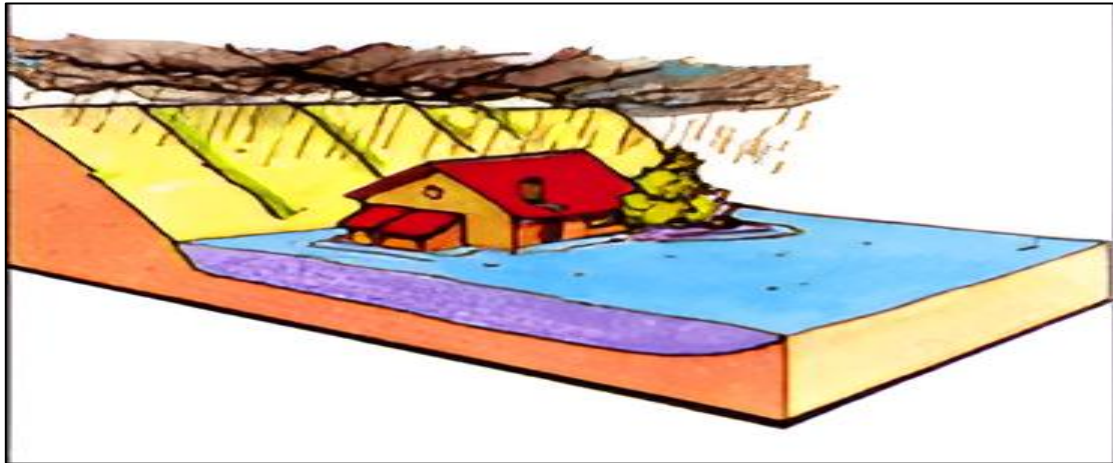


Figure I.5 Inondation par accumulation d'eau ruisselée.

- Par rupture d'une protection : L'inondation consécutive à une rupture de digue est un phénomène très brutal et d'autant plus dommageable que le site étudié est proche de la digue. Une rupture peut provoquer l'entrée d'un mur d'eau de plusieurs mètres de haut. Il est très difficile de prévoir la rupture d'un ouvrage de protection, ce qui rend la prévention de ce type d'accident particulièrement incertaine (*in, Slimani,2011*).

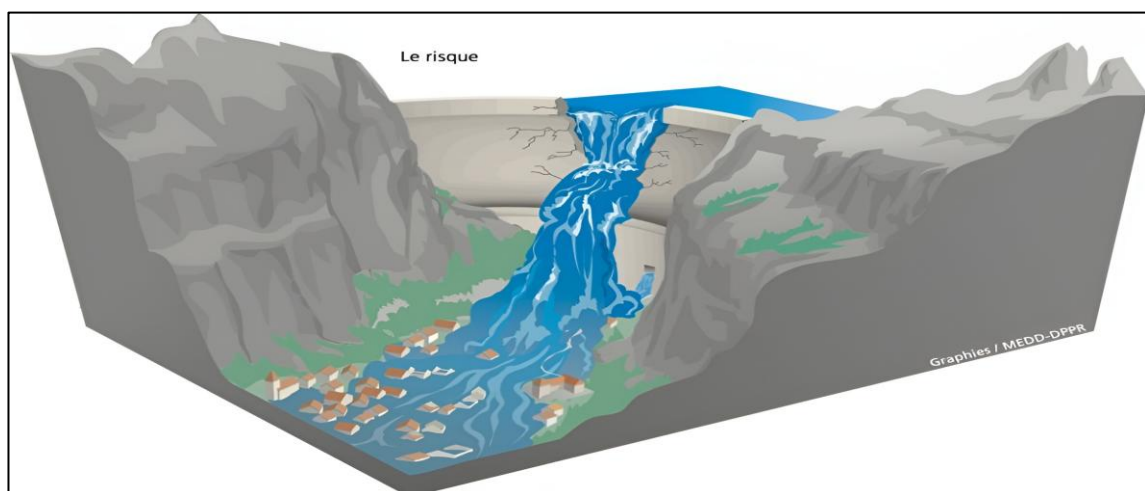


Figure I.6 Inondation par rupture d'un barrage.

I.1.2.2 Les causes des inondations

- Influence de la pente du bassin : La pente du bassin influence directement l'ampleur des inondations. Plus la pente est forte, plus l'inondation sera significative.

- Rôle du couvert végétal : Le couvert végétal du bassin joue un rôle crucial en accélérant ou en ralentissant l'écoulement de l'eau.
- Fréquence des précipitations et saturation des sols : Une fréquence élevée des précipitations peut saturer les nappes phréatiques et le sol, rendant l'absorption de l'eau tombée plus difficile.

I.1.2.3 Impact des activités de l'homme

- Utilisation et occupation des sols sur les pentes des bassins versants :
"L'utilisation et l'occupation des sols sur les pentes des bassins versants influencent fortement le risque d'inondation."
- Effets du déboisement :
"Le déboisement de grandes zones peut faciliter les inondations. Lorsque trop d'arbres sont abattus, le ruissellement augmente et l'érosion du sol s'accélère, car la terre n'est plus retenue par les racines."
- Urbanisation dans les zones inondables :
"L'urbanisation et l'implantation d'activités dans les zones inondables sont les principales causes d'aggravation du phénomène des inondations."
- Imperméabilisation des sols :
"L'imperméabilisation des sols due au développement urbain empêche l'infiltration de l'eau, ce qui surcharge les systèmes d'évacuation."

I.1.3. Crue

Une crue est un événement caractérisé par une ou plusieurs augmentations rapides et significatives du débit d'un cours d'eau. Certains hydrologues définissent une crue comme le dépassement du débit moyen journalier par un facteur de deux ou trois. Les crues sont généralement classées en trois grandes catégories :

- Crues d'averse,
- Crues de fonte de neige,
- Crues d'embâcle ou de débâcle de glace.

I.1.3.1 Types de crue

Les inondations causées par le débordement d'un cours d'eau surviennent principalement lors de crues, lesquelles peuvent être classées en trois types :

- Crues lentes : Elles se développent généralement après une longue période de pluies continues.
- Crues marines : Types rares, tels que les tsunamis, qui surviennent occasionnellement.

- Crues éclairs : Reconnues pour leur caractère particulièrement dévastateur, elles se manifestent fréquemment dans certaines régions d'Algérie, comme la Mekerra, selon *Meddi et al. (2004)*. *Estupina (2004)* définit les crues éclairs comme un groupe de crues caractérisées par leur évolution rapide et leurs impacts importants. Résultant de fortes pluies localisées, elles se développent soudainement sur une courte période, entraînant des conséquences sévères sur les plans humain et socio-économique. Leur intensité et leur brièveté les rendent particulièrement difficiles à prévoir, avec des effets dévastateurs.

I.1.3.2 Les éléments descriptifs d'une crue

- Temps de concentration : Durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau tombée au point le plus éloigné du bassin atteigne l'exutoire.
- Débit maximum de la crue : Également appelé débit de pointe, c'est le débit le plus élevé enregistré lors de la crue.
- Forme de la crue : Représentée par l'hydrogramme de crue, qui illustre l'évolution du débit en fonction du temps.
- Fréquence de retour : Aussi appelée période de retour, elle indique la probabilité d'occurrence d'une crue d'une certaine magnitude sur une période donnée.

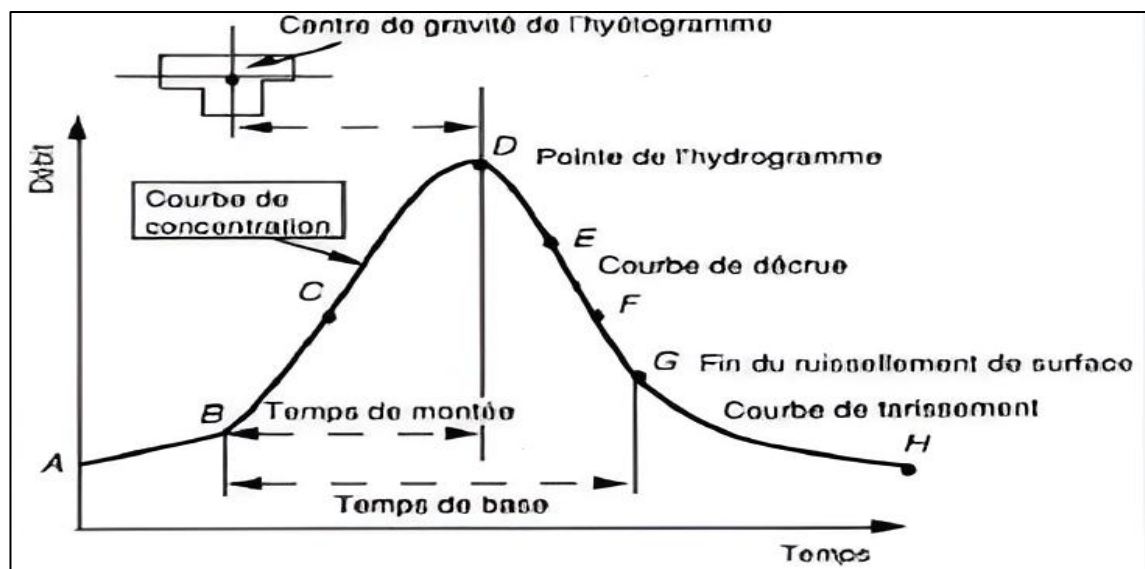


Figure I.7 Les éléments descriptifs d'une crue.

I.1.4 Conséquences engendrées par les inondations

Les inondations peuvent provoquer des dégâts considérables et avoir de lourdes conséquences sur notre vie. Ces conséquences se répartissent principalement en deux catégories :

- Dégâts matériels : Les inondations affectent souvent les infrastructures de transport et les logements, comme les bâtiments et les ponts. Elles peuvent également submerger des terres agricoles, entraînant des pertes de récoltes.
- Dégâts humains : Les inondations peuvent causer la disparition de personnes emportées par les eaux. De plus, l'accès à l'eau potable devient très difficile, ce qui entraîne un manque d'hygiène et favorise la propagation de maladies liées à l'eau.

I .1.5 Problématique des inondations en Algérie

Les inondations en Algérie constituent un problème majeur, particulièrement aigu dans les régions nord du pays où les précipitations abondantes, notamment durant la saison automnale, exacerbent le risque de crues graves. Ces événements naturels sont parmi les catastrophes les plus fréquentes et destructrices, affectant directement le développement économique et social. D'après les données des services de la protection civile, une commune sur trois, soit 485 communes, est susceptible d'être inondée, qu'il s'agisse d'inondations partielles ou totales. Des événements marquants tels que les inondations de l'automne 1968 en Algérie et en Tunisie, celles de 1974 dans les bassins versants de l'Algérois et du Sebou, ainsi que les inondations de 1984 affectant l'ensemble du pays, illustrent la gravité de ces catastrophes. De plus, les inondations par ruissellement urbain, souvent causées par des orages localisés, ajoutent une dimension complexe à la gestion des risques. La principale cause des dégâts importants est la proximité croissante des agglomérations des cours des oueds. Cette proximité augmente la vulnérabilité des zones urbaines, particulièrement celles qui connaissent des projets d'extension sans une prise en compte adéquate du risque d'inondation. Les crues récurrentes et l'urbanisation non régulée aggravent le problème, soulignant la nécessité d'une gestion plus rigoureuse et d'aménagements préventifs. Malgré la mise en place de solutions techniques telles que les aménagements hydrotechniques pour atténuer les risques, ces mesures peuvent être insuffisantes face aux défis posés par les changements climatiques et la multiplication des phénomènes extrême.

I .1.6 Les inondations qui affectent la zone d'étude

I .1.6.1 Historique des Événements de Crue de l'Oued Mekerra

Le bassin versant de la Mekerra présente une pluviosité particulièrement irrégulière, souvent marquée par des averses qui entraînent des crues significatives. En septembre 1941, la Mekerra a soudainement débordé, inondant les territoires de Boukhanifis, Sidi Khaled, et Sidi Lahcen sur une largeur de 200 à 300 mètres de part et d'autre du lit du cours d'eau. La crue a atteint Sidi Bel Abbés, envahissant les jardins et les rues des quartiers bas. En quelques

heures, le niveau de l'eau a grimpé de 8 mètres, et le débit est passé de 0,5 m³/s à 100 m³/s. Cette crue a interrompu le trafic routier et coupé la voie ferrée. Il s'agissait de la plus grande crue enregistrée à Sidi Bel Abbés en 37 ans. (A. BORSALI, 2005).

Les études menées par les services de l'hydraulique pour protéger la plaine et la ville des crues de l'oued Mekerra ont conduit à une estimation des débits de crue variant entre 900 et 1500 m³/s, en se basant sur une fréquence centennale, particulièrement après la crue d'octobre 1986. Les orages, souvent présents de septembre à octobre, sont accompagnés de fortes pluies, ce qui a provoqué les inondations destructrices de la Mekerra. Celle-ci a connu des crues récurrentes en octobre 1966, 1986, et le 30 octobre, avec un débit mesuré de 200 m³/s. La crue de 1986, notamment, illustre bien ce que l'on pourrait qualifier de "basses crues". Les informations collectées sur cet événement montrent que plusieurs communes riveraines, telles que Ras El Ma, Moulay Slissen, Boukhanifis, Sidi Khaled, Sidi Lahcen, et jusqu'à Sidi Bel Abbés, ont été affectées. Les dégâts importants étaient principalement causés par des étranglements du lit de l'oued à Boukhanifis, où le cours d'eau présente de nombreux méandres. Dans certaines zones où le lit de l'oued est particulièrement étroit, avec une largeur ne dépassant pas 3 mètres, la vitesse d'écoulement devient très élevée, ce qui provoque inévitablement des débordements (Boudahri B. 2007).

Durant la nuit du 23 au 24 octobre 2000, des précipitations exceptionnellement intenses et prolongées ont frappé la région. En seulement 45 minutes, les hauteurs de Ras El Ma ont reçu plus de 100 mm de pluie. Cet orage a eu des répercussions sévères pour la population, prise de court par le déferlement des eaux qui ont atteint la plaine à une vitesse estimée à 7 km/h, avec un débit de 500 m³/s. Sur leur passage, ces eaux ont transporté et déposé des quantités importantes de sable et de débris dans les rues et sur les places du centre-ville de Sidi Bel Abbés, ainsi que dans les villages environnants. La stagnation des eaux a duré de quelques heures à trois jours (Merabet A., 2007).

La crue des 18 et 19 avril 2007 est classée parmi les plus destructrices de la région. Selon les témoignages des rescapés, des vagues atteignant près de 5 mètres de hauteur, comparables à un "tsunami", ont déferlé sur le village à une vitesse alarmante. Le chef de daïra de Moulay Slissen, en tentant de secourir des habitants en détresse, a été emporté par les eaux en furie, et son corps a été retrouvé plusieurs mètres en aval. De manière similaire, le chef de brigade de la Gendarmerie nationale a été emporté dans les flots tumultueux de l'oued, et son corps n'a été retrouvé que le lendemain soir à Sidi Khaled, où l'effondrement d'un mur a causé trois blessés. La nuit du 18 au 19 avril a été marquée par un orage d'une intensité exceptionnelle, avec des précipitations atteignant 60 mm par heure, bien au-delà de la moyenne mensuelle d'avril, habituellement de 39 mm. Cet événement a provoqué un déversement d'eau équivalent à celui d'un grand fleuve, entraînant des pertes humaines significatives, d'importants dégâts matériels, et laissant de nombreuses familles sinistrées. Par ailleurs, plusieurs habitations ont été inondées dans la localité de Boukhanifis. (Bouasria et al, 2010).

I.1.6.2 Les principales causes des inondations constatées dans le bassin

La ville de Sidi Bel Abbés est positionnée à l'exutoire de la plaine avale de l'oued Mekerra. Selon les services de l'hydraulique de la wilaya, elle est particulièrement exposée aux risques

d'inondation en raison de son emplacement, qui la rend sensible aux crues survenant dans le bassin versant de l'oued Mekerra.

Les inondations dans certaines agglomérations du bassin versant sont principalement dues aux facteurs géomorphologiques suivants :

- La pente douce du terrain, qui descend de Ras El Ma (amont) jusqu'au-delà de la ville de Sidi Bel Abbés (aval).
- La configuration allongée du bassin versant, qui facilite le rassemblement des crues.
- L'urbanisation des zones inondables le long des rives de l'oued Mekerra.
- Les débordements de l'oued Mekerra, provoqués par les ruissellements des eaux des versants voisins, qui se manifestent souvent durant l'automne en raison d'orages particulièrement intenses.
- Cassure naturelle de l'oued Mekerra près du pont en amont de Sidi Khaled, entraînant des débordements.
- Propagation des eaux de crue à l'entrée sud de la ville de Sidi Bel Abbès, le long de la route de Boukhanifis.



Figure I.8 Inondation la ville de Sidi Bel Abbés. (2007).



Figure I.9 Inondation la ville de Sidi Bel Abbés. (2012).

Tableau I.1 Statistiques des inondations dans la wilaya de Sidi Bel Abbés au cours des vingt dernières années (Borsali et al., 2005).

Date	Lieu	Débit M ³ /S	Cause	Morts	Sans abris	
					Individus	Familles
04/10/86	Sidi Bel Abbés	105	Orage	01	530	200
30/04/90	Sidi Bel Abbés	135	Orage			130
29/09/94	Sidi Bel Abbés	215	Orage	02		22
	S. Ali Benyoub	200		01		
05/12/95	Sidi Bel Abbés	110	Orage			03
10/06/96	Ras El Ma	100	Orage			
17/08/97	Moulay Slissen	110	Orage	01		34
27/09/97	Sidi Bel Abbés	200	Orage	01		
13/12/97	Sidi Bel Abbés	160	Orage	01		05
22/09/97	Boukhanifis	160	Orage			
10/02/99	Boukhanifis	110	Orage			
27/07/00	Ras El Ma	100	Orage			100
23/10/00	Sidi bel Abbés	200	Orage		01	07
	Sidi Lahcen	110				50
	Boukhanifis	160				31
	Sidi Khaled	110				50
Août 2002	Toute la wilaya	600	Orage			200
08/06/03	Oued Sbaâ	250	Orage	01		20
	Moulay Slissen	105				10
27/05/06	Ras El Ma	110	Orage			23
	Sidi Khaled	175				09
	Boukhanifis	120				05
Avril 2007	Moulay Slissen	800	Orage	02		50

Conclusion

L'étude des inondations dans la wilaya de Sidi Bel Abbés a permis d'élargir la compréhension du bassin versant de la Mekerra et d'identifier les facteurs clés contribuant à ces phénomènes. Les inondations, dont l'intensité varie selon le contexte et est souvent difficile à prévoir en raison des précipitations, sont exacerbées par le changement climatique, qui accentue la vulnérabilité des zones côtières et littorales.

Pour atténuer les impacts de ces aléas, il est primordial de concevoir un aménagement du territoire qui évite les zones inondables ou qui adapte les usages du sol à la possibilité de submersion. Les erreurs du passé, ayant conduit à une exposition excessive des biens et des personnes aux risques d'inondation, doivent être évitées. Un effort significatif est nécessaire dans les domaines de l'urbanisme, de l'adaptation des habitats et de la gestion des espaces ruraux en zones inondables pour réduire la vulnérabilité. Cependant, l'expansion continue des constructions dans ces zones expose toujours les collectivités à des risques accrus, soulignant le besoin urgent de stratégies de gestion proactive pour limiter les risques associés aux inondations.

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

Introduction

La compréhension des mécanismes hydrologiques de la zone d'étude nécessite une analyse approfondie du bassin versant. Cette analyse englobe des aspects géographiques et physiographiques, tels que l'altitude, la pente, la forme du bassin et ses caractéristiques lithologiques. Ces facteurs sont essentiels pour déterminer la réponse hydrologique du bassin. Pour concevoir un système de protection contre les inondations, il est crucial de connaître la situation géographique, le climat, la morphologie du terrain et l'occupation du sol. Ces éléments permettent d'évaluer la vulnérabilité de la zone et de choisir les aménagements les plus adaptés pour garantir la sécurité de la ville. Dans ce contexte, le premier chapitre décrit l'oued Mekerra, qui traverse la ville de Sidi Bel Abbès en s'écoulant à travers divers quartiers et zones urbaines.

II.1 Présentation de la zone d'étude

- **Description de la Wilaya de Sidi Bel Abbès**

La wilaya de Sidi Bel Abbès, située au Nord-Ouest de l'Algérie, couvre une superficie de 9150,63 km². La wilaya est composée de 52 communes regroupées en 15 daïras. Elle est délimitée par les régions suivantes :

- Au nord : wilaya d'Oran.
- Au nord-ouest : wilaya d'Ain Témouchent.
- Au nord-est : wilaya de Mascara.
- À l'ouest : wilaya de Tlemcen.
- À l'est : wilayas de Mascara et Saida.
- Au sud : wilayas de Naama et Bayadh.
- Au sud-est : wilaya de Saida.

- **Délimitation de la Ville de Sidi Bel Abbès**

La ville de Sidi Bel Abbès est bordée par :

- Au nord : les communes de Sidi Brahim et Ain Trid.
- À l'ouest : la commune de Sidi Lahcene.
- À l'est : la commune de Tilmouni.
- Au sud : la commune d'Amarnas.

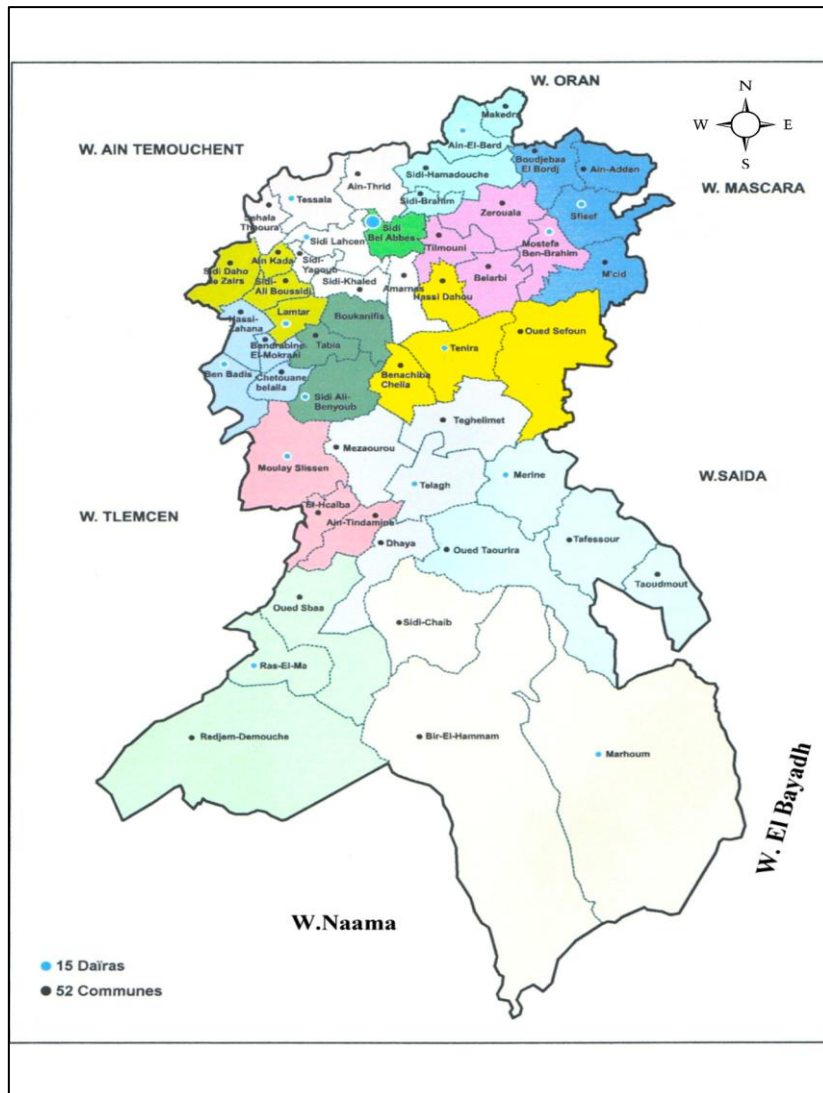


Figure.II.1 Découpage administratif de la Wilaya de Sidi Bel Abbés.

II.1.1 Situation géographique de bassin versant de Macta

Le bassin versant du Macta, intégré dans le vaste bassin hydrographique du « Grand Chatt Chergui », est situé dans l'ouest de l'Algérie. Il s'étend entre la latitude $36^{\circ}00'00''N$ et $34^{\circ}15'00''N$ et les longitudes $0^{\circ}30'00''E$ et $1^{\circ}10'00''W$. Ce bassin couvre une superficie de 14 648,34 km² et un périmètre d'environ 730,90 km. Il s'étend sur plusieurs wilayas, à savoir : Sidi Bel Abbés, Tlemcen, Mostaganem, Mascara et Saïda.

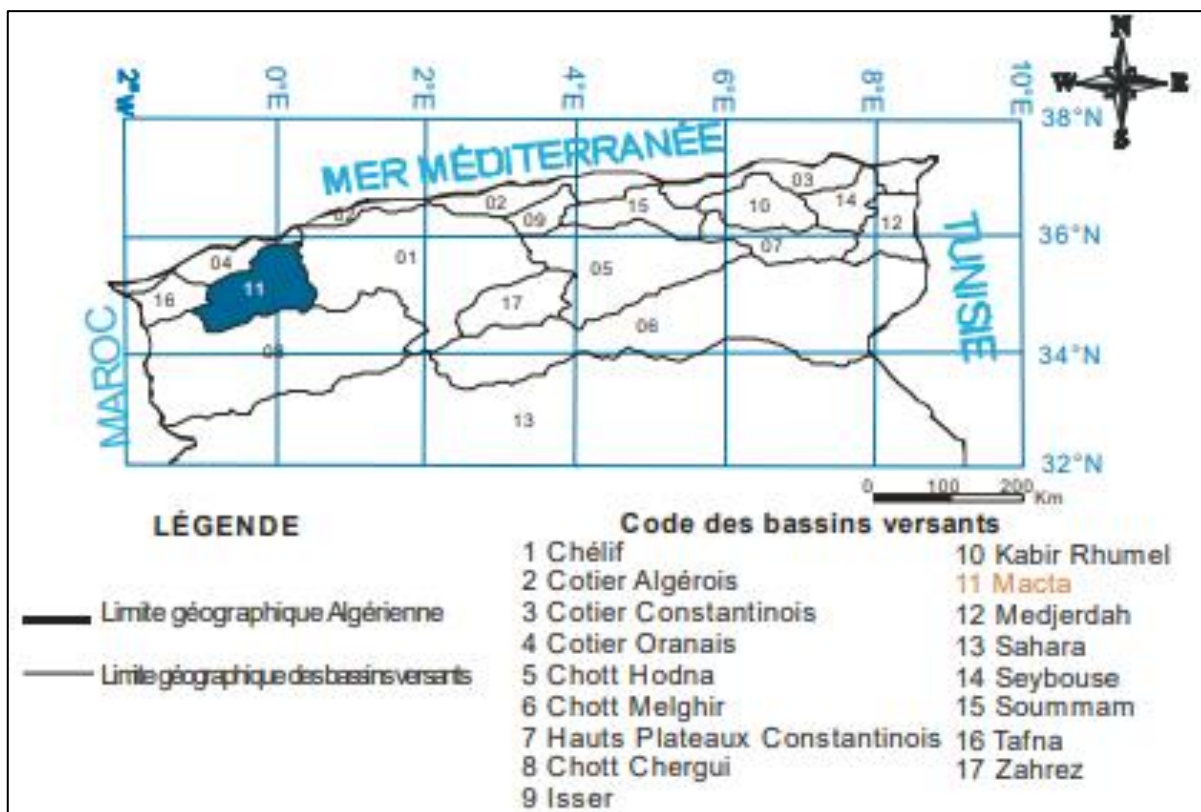


Figure.II.2 Situation du bassin de la Macta en Algérie, (Découpage selon ANRH).

II.1.1.1 Situation géographique de bassin versant de l’oued Mekerra.

Le bassin versant de la Macta, identifié sous le code ANRH n°11, est divisé en 16 sous-bassins, dont celui de l’Oued Mekerra, qui fait l’objet de notre étude. Situé dans le nord-ouest de l’Algérie, ce sous-bassin est traversé par deux cours d’eau principaux : l’Oued Mekerra à l’ouest et l’Oued El Hammam à l’est, qui se rejoignent à proximité de la côte méditerranéenne pour former la Macta. Ce sous-bassin couvre une superficie de 4102 km², représentant 28,5 % de la surface totale du bassin de la Macta. Il est bordé au nord par les marais de la Macta, au sud par le Chott Chergui, à l’est par le sous-bassin de l’Oued El Hammam, et à l’ouest par le bassin côtier de l’Oranais Central.

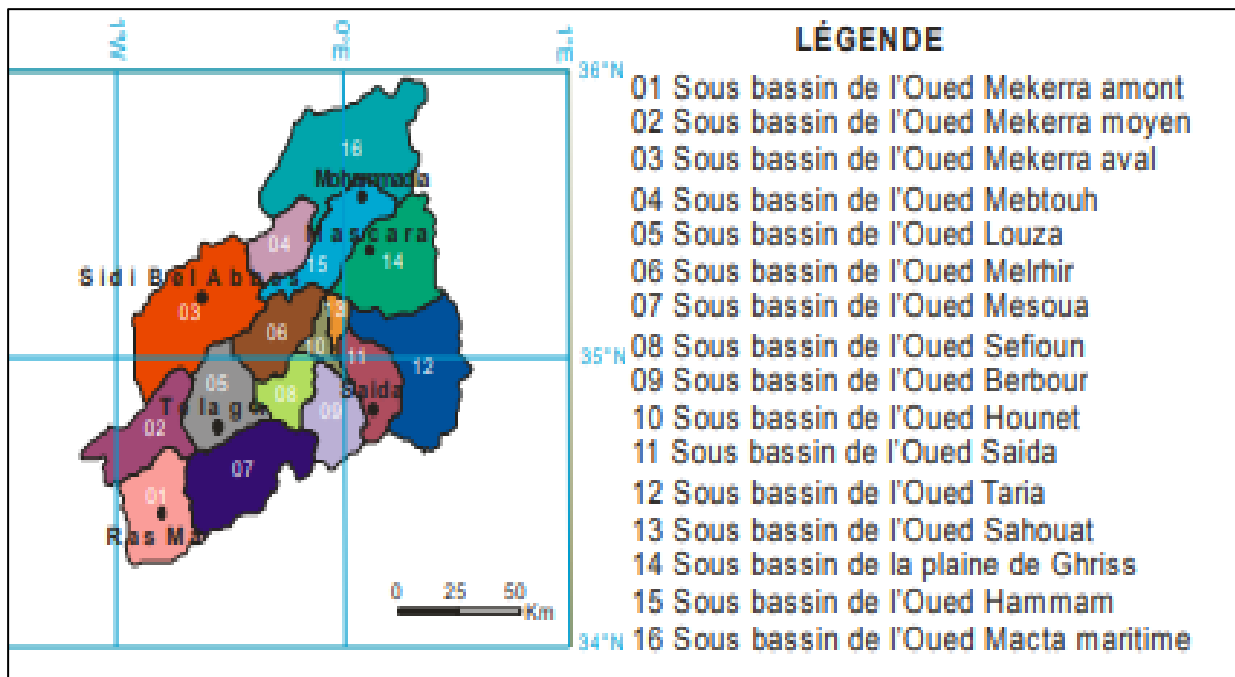


Figure.II.3 Carte des sous-bassins du bassin versant de la Macta, (Agence de bassin Oranie 2006).

II.1.1.2 Situation géographique de la zone d'étude

Cette étude se concentre sur le sous-bassin versant de la Mekerra (La plaine de Sidi Bel Abbès) localisé dans la plaine de Sidi Bel Abbès, et s'étendant entre les latitudes 35°25'0"N et 34°50'0"N, et les longitudes 0°20'0"O et 1°0'0"O. La section de l'Oued Mekerra étudiée se situe exclusivement à l'intérieur de la ville de Sidi Bel Abbès, s'étendant de l'intersection de la rocade nord avec la RN 7 en direction de Sidi Lahcen (en amont) jusqu'à l'intersection avec le canal sud, sur une longueur approximative de 6 km.



Figure.II.4 Localisation et l'intégration d'oued Mekerra dans la ville de Sidi Bel Abbés.

II.1.2 Climatologie

Le bassin versant de l'Oued Mekerra est influencé par une combinaison de conditions climatiques maritimes au nord et sahariennes au sud, cette dernière étant prédominante. Ce climat semi-aride se caractérise par des étés chauds et secs, qui s'étendent d'avril à août, et des hivers plus doux et humides, d'octobre à mars, avec une température moyenne annuelle d'environ 15 °C. Les vents dominants proviennent du nord-ouest et de l'ouest, soufflant à une vitesse moyenne interannuelle d'environ 20 m/s. Les précipitations sont irrégulières et se concentrent principalement en automne, avec des pluies parfois très intenses pouvant provoquer des inondations importantes. Les années pluvieuses peuvent voir les précipitations dépasser les 200 mm, alors que les années sèches peuvent enregistrer seulement 40 mm, avec une moyenne annuelle autour de 80 mm (*Korichi & Hazzab, 2012*). Ces précipitations sont cruciales pour l'alimentation des cours d'eau et jouent un rôle déterminant dans la variabilité des écoulements, ce qui influence fortement les crues et les inondations dans la région (*Meddi et al., 2013*).

Les données climatologiques sont collectées, traitées et archivées par différents organismes spécialisés.

- La station de l'Office National de Météorologie (ONM) à Oran fournit les mesures de températures, de vitesse du vent et d'évaporation.
- Les relevés de pluviométrie sont obtenus auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH de Oran).

II.1.2.1 Température

Les relevés de température dans le bassin versant sont incomplets. Cependant, ces données seront utilisées pour souligner l'importance de la saison sèche et l'influence majeure de l'évapotranspiration, qui joue un rôle crucial dans le déficit d'écoulement. Comprendre la saison sèche permet d'identifier la durée pendant laquelle les sols subissent l'effet des températures, un agent de météorisation qui affaiblit la structure des couches superficielles, les rendant plus vulnérables à l'érosion. Les stations météorologiques situées dans le bassin versant n'offrent pas de mesures de température de l'air, ce qui nous a amenés à utiliser les données de la station la plus proche (*Houbib, 2012*).

La région Nord-Ouest de l'Algérie a connu plusieurs périodes de sécheresse au cours du dernier siècle. Des recherches, y compris celles de (Meddi, Sadouk et Ben Abbas), ont mis en lumière les sécheresses marquantes des années 1940 et 1970. La sécheresse qui a eu lieu entre 1982 et 1987 est considérée comme l'une des plus marquantes en raison de sa sévérité et de ses effets notables sur les ressources en eau, la réduction des précipitations, et l'augmentation significative des températures. Les études climatiques sur l'Algérie prévoient une hausse de la température moyenne entre 1990 et 2020, estimée entre 0,8°C et 1,1°C.

Le tableau ci-après montre les valeurs mensuelles des températures minimales, moyennes et maximales relevées à la station choisie, couvrant une période de 18 ans, de (1987 à 2005).

Tableau II.1 Les relevés mensuels des températures minimales, moyennes et maximales (en °C) pour la période de 1987 à 2005, enregistrés par la station météorologique 110304 de Sidi Bel Abbès (Source : ONM).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Tmin (°C)	10.42	5.85	1.55	-0.085	-0.68	-0.48	1.08	1.78	5.13	9.32	12.09	12.72
Tmoy (°C)	23.47	19.43	13.88	10.82	8.94	10.29	12.9	18.1	22.7	21.37	25.75	26.38
Tmax (°C)	37.81	34.21	27.74	23.08	20.33	23.06	24.53	28.68	33.1	38.33	40.98	41.51

- **Interprétation**

Le traitement des données de température mensuelles de 1987 à 2005 met en évidence les éléments suivants :

- Température annuelle moyenne : À Sidi Bel Abbès, la température moyenne annuelle est de 17,83 °C.
- Période de chaleur : La saison chaude dure quatre mois, de mai à septembre. Le mois le plus chaud est août, avec une température moyenne de 26,38 °C et un maximum de 41,51 °C.
- Période fraîche : La saison fraîche s'étend également sur quatre mois, de novembre à mars. Janvier est le mois le plus froid, avec une température moyenne minimale de 8,94 °C et une température maximale de 20,33 °C.

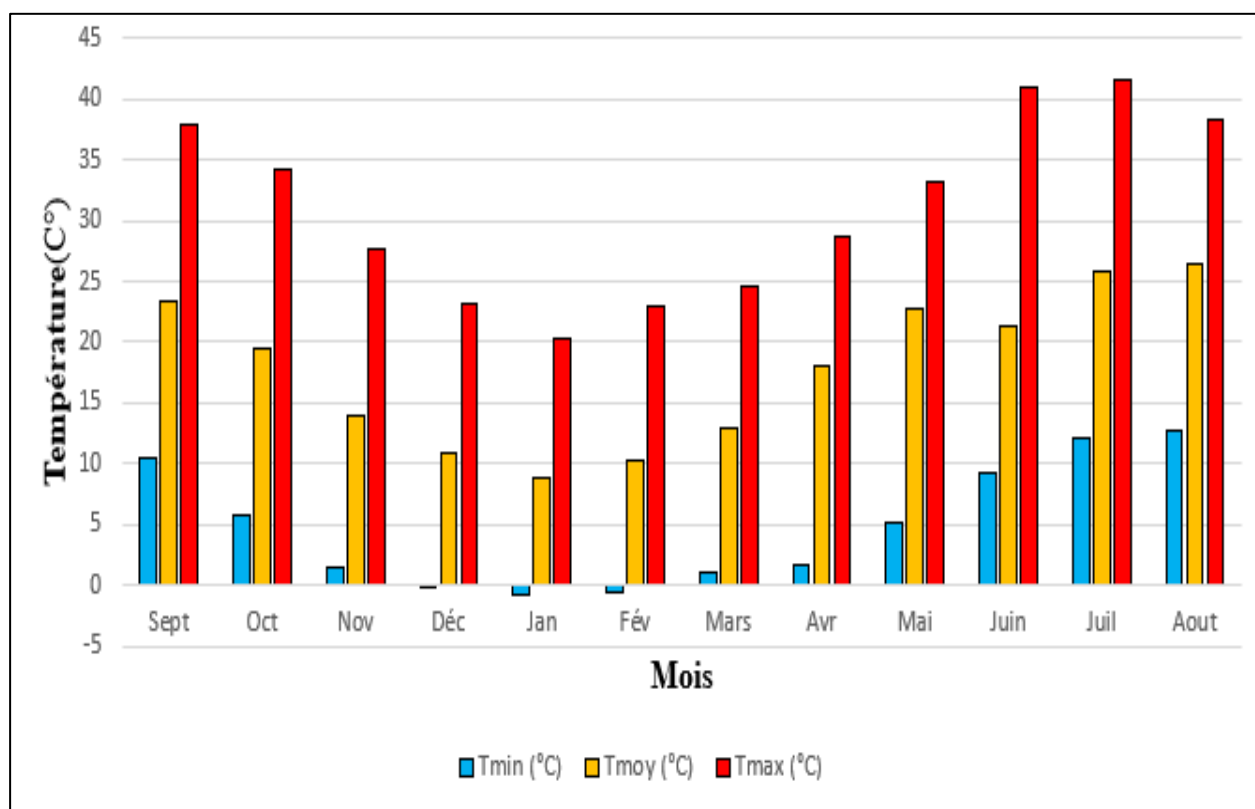


Figure.II.5 Barres du graphique représente températures moyennes, minimales et maximales mensuelles observées à la station 110304 pendant la période de (1987 à 2005).

II.1.2.2 Vent

L'analyse des vents joue un rôle fondamental dans la conception des infrastructures et dans le domaine de l'hydraulique. Elle nécessite une évaluation précise de la répartition mensuelle des vents en termes de vitesse et de fréquence, tout en accordant une attention particulière à leur direction (*Touaibia, 2015*). Les vents dominants proviennent du nord-ouest, soufflant tout au long de l'année pendant 10 à 15 jours par mois. Pendant les mois d'été, le sirocco se manifeste environ 15 jours par mois (*Hallouche, 2007*). Ces vents, majoritairement originaires du nord-ouest et de l'ouest, ont une vitesse moyenne interannuelle d'environ 9 m/s.

Le tableau suivant présente les vitesses maximales du vent observées à la station 110304 sur une période de 18 ans, allant de (1987 à 2005).

Tableau II.2 les vitesses maximales du vent(m/s) observées à la station 110304 sur une période, de 1987 à 2005.

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Vent Max (m/s)	4.96	8.07	8.2	10.5	5.15	12.42	10.52	11.67	6.88	4.6	4.1	4.01

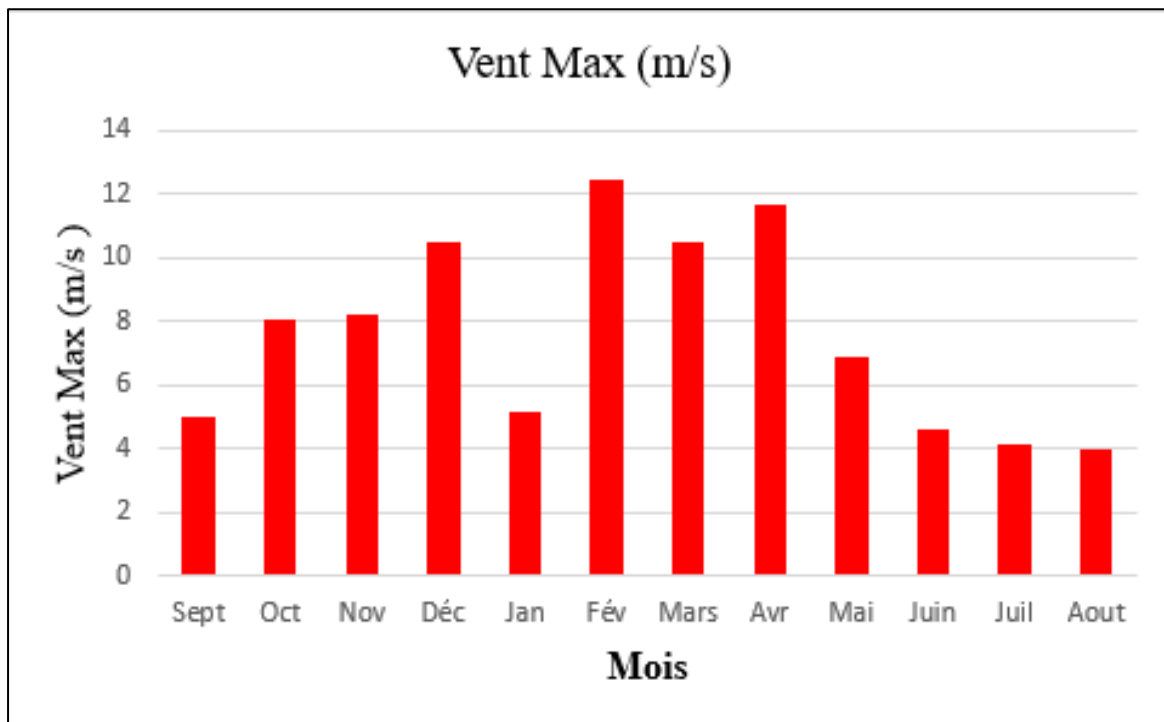


Figure.II.6 Barres du graphique représente les vitesses maximales du vent(m/s) observées à la station 110304 sur une période, de (1987 à 2005).

II.1.2.3 Humidité

Les données ont été recueillies à la station météorologique 110304 de Sidi Bel Abbés pour la période allant de (1990 à 2005).

Tableau II.3 Représente les valeurs maximales et minimales d'humidité enregistrées à la station 110304 pour la période de (1990 à 2005).

Humidité	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Hum Max (%)	101.53	81.03	80.06	79.11	87.13	92.06	90.2	89.53	98.53	94.93	90.92	94.23
Hum Min (%)	29.85	33.84	39.61	37.97	41.07	39.66	36.81	3.38	37.46	35.85	31	28.3

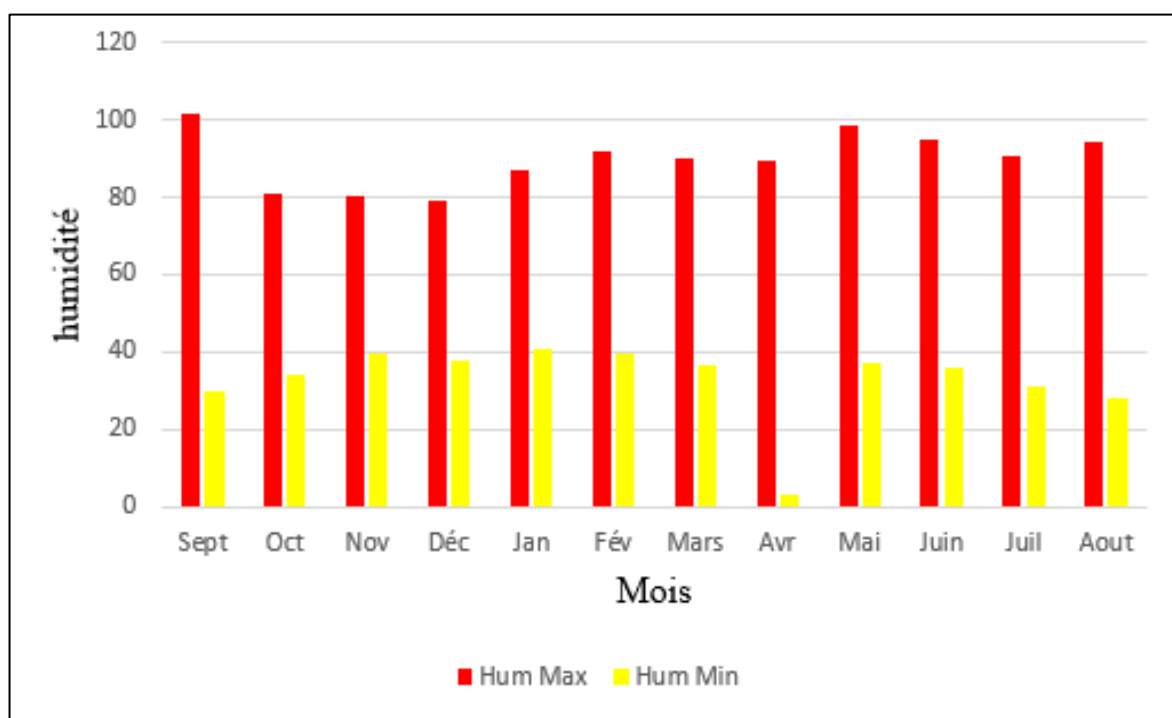


Figure.II.7 Barres du graphique représente les valeurs maximales et minimales d'humidité enregistrées à la station 110304 pour la période de (1990 à 2005).

II.1.2.4 Évaporation

L'évapotranspiration potentielle désigne la quantité maximale d'eau qui peut être évaporée à partir d'un réservoir d'eau libre, dans des conditions où l'approvisionnement en eau est suffisant (Foucault, 2009). Elle est fonction de plusieurs facteurs bioclimatiques, dont l'ensoleillement, la température, les précipitations, l'humidité, la vitesse du vent et la couverture végétale, ces derniers étant variables tant spatialement que temporellement.

La diminution des précipitations moyennes est estimée à environ 10%. Parallèlement, le niveau de la mer devrait augmenter de 5 à 10 cm. L'augmentation de la température, qui intensifie l'évaporation, combinée à la réduction des précipitations, entraînera une diminution supplémentaire de la quantité d'eau disponible dans les barrages et les nappes souterraines.

Tableau II.4 Représente les valeurs d'évaporation enregistrées à la station 110304 pour la période de (1987 à 2005).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Évaporation	177.94	88.6	81.3	75.02	29.53	50.4	101.4	95.1	111.81	135.92	198.11	171.85

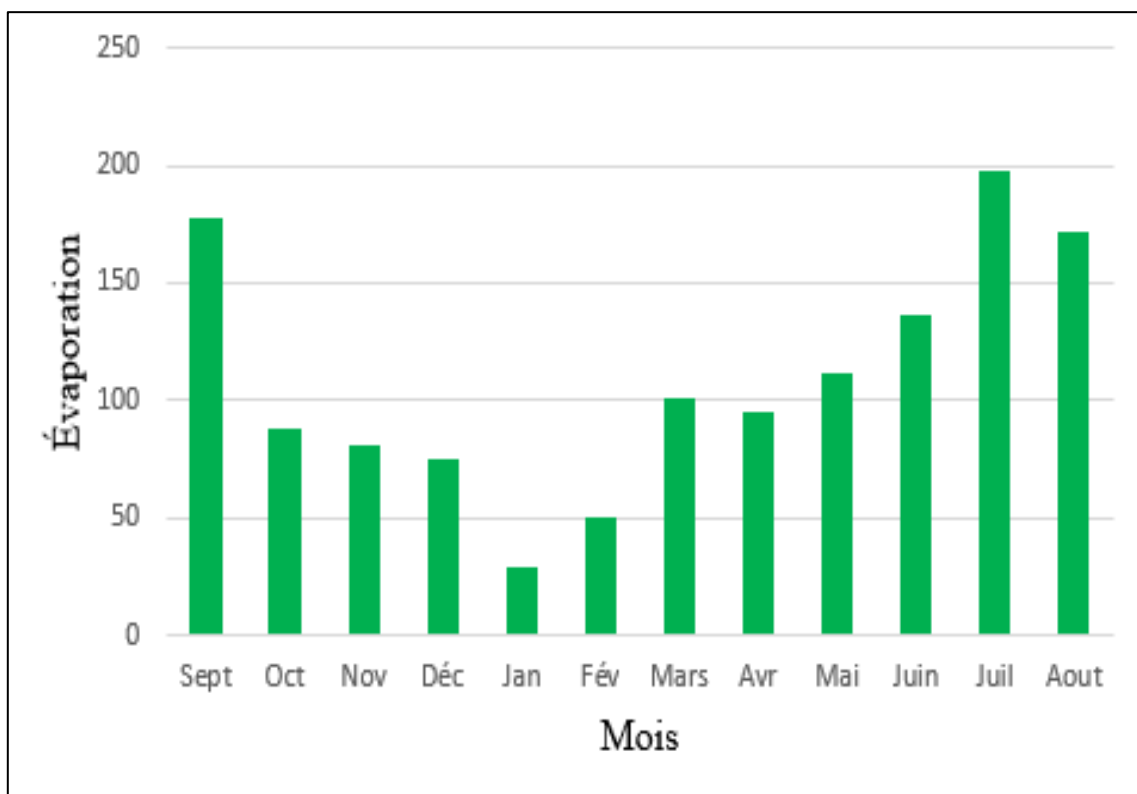


Figure.II.8 Barres du graphique représente les valeurs d'évaporation enregistrées à la station 110304 pour la période de (1987 à 2005).

II.1.2.5 Précipitations

Les précipitations dans la région se caractérisent par une grande irrégularité, avec des épisodes de pluies automnales intenses susceptibles de provoquer des inondations majeures. Lors des années humides, les précipitations peuvent atteindre plus de 200 mm, tandis que durant les années sèches, elles peuvent descendre jusqu'à 40 mm (*Korichi, Hazzab, 2012*). La pluviométrie moyenne annuelle est estimée à 80 mm, présentant une variabilité spatiale marquée.

Tableau II.5 Représente répartition interannuelle des précipitations mensuelles à la station pluviométrique 110301.

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel
Pmoy (mm)	26.6	49	87.1	90.8	88.15	62.4	59.8	51.7	42.3	10.2	3.4	4.6	85

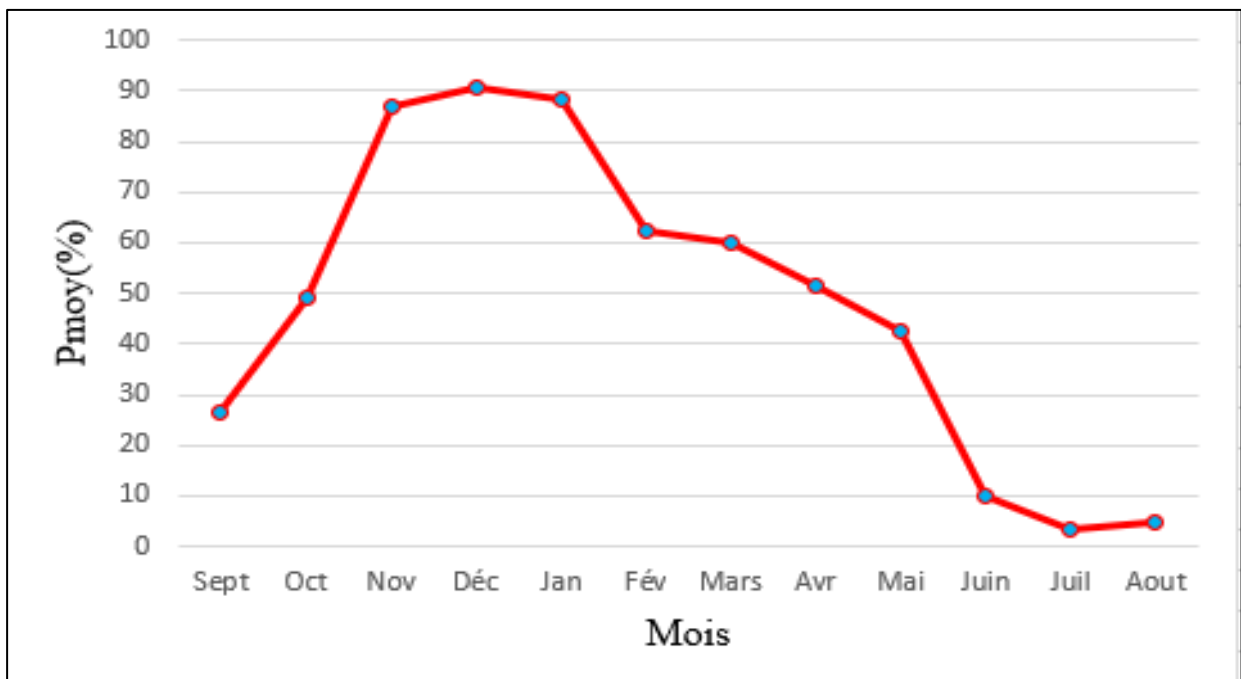


Figure.II.9 Graphique illustrant l'évolution interannuelle des précipitations mensuelles.

II.1.3 Géologie

Le bassin versant de la Mekerra présente une grande diversité de sols, avec une distinction marquée entre les zones nord et sud. Le nord-est du bassin est couvert d'une mosaïque de sols alluviaux et calciques. Dans les zones de ruissellement torrentiel, notamment dans la haute Mekerra, la roche mère apparaît parfois à nu, indiquant un sous-sol en partie imperméable. Cependant, seulement 25% du sous-sol du bassin est considéré comme imperméable, avec une perméabilité nettement plus élevée dans la partie nord par rapport à la partie sud (*Cherif et al., 2009*).

Trois principaux ensembles de sols dominent ce bassin versant : les sols bruns calcaires, les sols calcaires, et les sols alluviaux. Les sols bruns calcaires et les sols calcaires appartiennent

à la classe des sols magnésium-calcique. Ils sont caractérisés par une profondeur importante et une structure granitique ou grumeleuse bien développée en surface, évoluant vers une structure polyédrique en profondeur. Ces sols, avec un pH supérieur à 6,8, sont saturés en calcium et en magnésium, ce qui les rend particulièrement adaptés à l'agriculture (*Bouasria et al., 2010*). Les sols alluviaux, quant à eux, sont classés comme peu évolués, rencontrés principalement sur les terrasses des oueds. Leur profil peu différencié et peu structuré explique leur bonne qualité agricole (*Askri et al., 1993*).

Du point de vue hydrologique, le couvert végétal d'un bassin versant joue un rôle crucial dans le contrôle du ruissellement. La nature du sol et la couverture végétale influencent directement les caractéristiques physiographiques et hydrologiques des bassins versants (*Anctil et al., 2012*). Les eaux infiltrées dans les rebords calcaires des hautes plaines sont lentement restituées en été. Cela contraste avec le comportement habituel des oueds des hautes plaines, qui sont généralement à sec pendant cette saison, les crues annuelles n'atteignant pas toute la longueur du réseau hydrographique. Au lieu de cela, les eaux se dispersent et s'infiltrent là où les vallées s'élargissent.

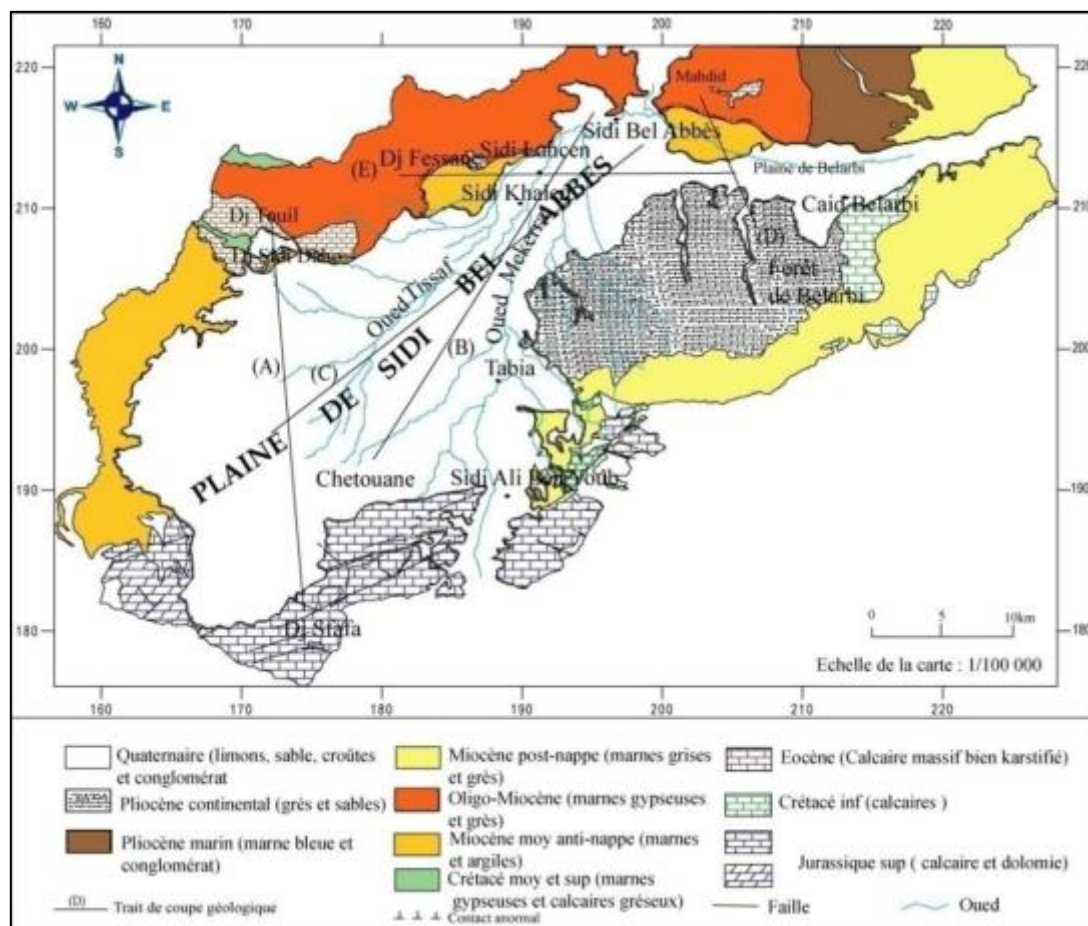


Figure.II.10 Carte géologique de la région entourant la plaine de Mekerra. (*Sourisseau, 1972*).

II.1.4 Sismicité

La région de Sidi Bel Abbés, bien que caractérisée par un risque sismique globalement faible, n'est pas totalement à l'abri des secousses. Depuis 1970, la zone a enregistré au moins six séismes d'une magnitude supérieure à 5, indiquant que des événements de cette ampleur surviennent en moyenne tous les 5 à 10 ans. Bien que ces tremblements de terre aient causé des dégâts matériels limités, la proximité des failles tectoniques dans l'ouest de l'Algérie demeure une source de préoccupation. La sismicité, bien que modérée par rapport à d'autres régions du pays, nécessite des précautions particulières, notamment dans les normes de construction parasismique. La région, moins exposée que le nord-est de l'Algérie, reste sous vigilance constante pour prévenir les risques liés aux séismes. Le territoire national est divisé en cinq zones de sismicité croissante, classées comme suit :

- Zone III : Sismicité élevée.
- Zone II.a et II.b : Sismicité moyenne.
- Zone I : Sismicité faible.
- Zone 0 : Sismicité négligeable.

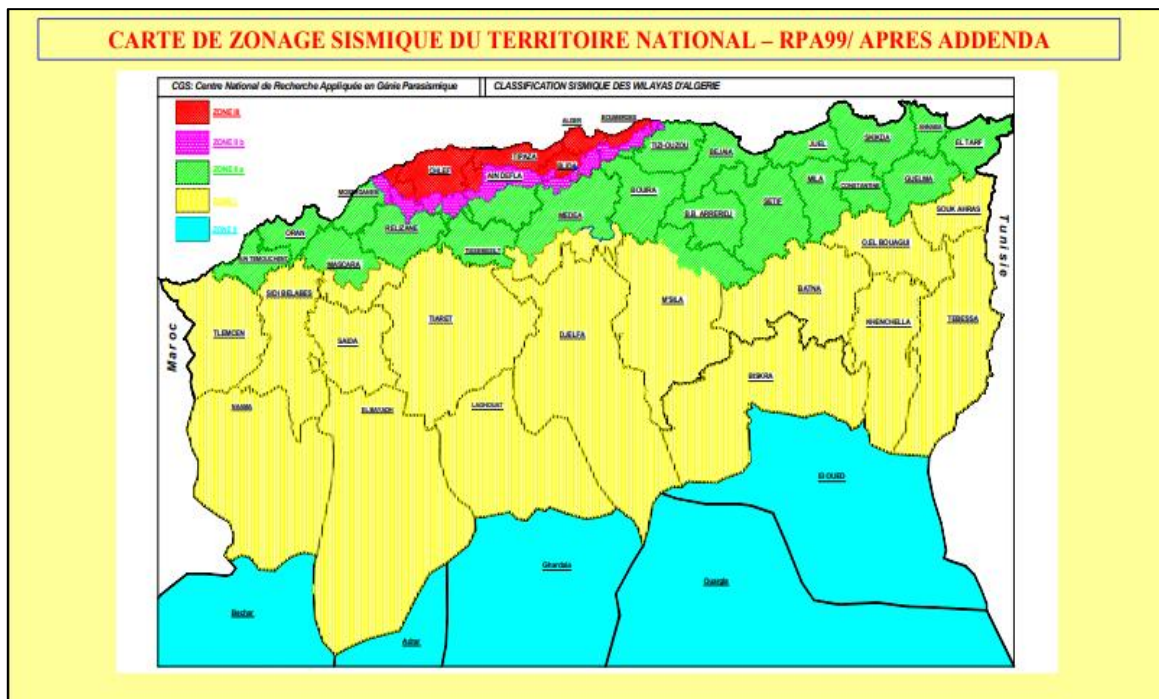


Figure.II.11 Carte de classification et zonage sismique du territoire national. (Addenda, 2003).

- Selon la figure, il apparaît que notre zone d'étude est classée en **Zone I**, ce qui indique une **sismicité faible**.

Conclusion

À partir de ce chapitre consacré à la zone d'étude, l'analyse diagnostique fournit une compréhension détaillée des caractéristiques régionales, incluant les aspects géologiques, climatiques, topographiques et sismiques. Cette évaluation globale de l'oued Mekerra permet d'identifier les causes essentielles des inondations et d'anticiper leur comportement lors des crues. Elle est également essentielle pour évaluer les dommages potentiels et pour élaborer des recommandations préliminaires avant le lancement des études hydrologiques et hydrauliques.

C

h

a

p

i

t

r

e

III

Etude hydrologique

Introduction

L'hydrologie, une branche clé des sciences de la Terre, se concentre sur l'étude de la distribution, de la circulation, et des propriétés de l'eau à la surface terrestre et sous celle-ci. Elle explore les différents aspects du cycle de l'eau, depuis son arrivée sur Terre sous forme de précipitations jusqu'à son infiltration, son ruissellement et son stockage dans les aquifères. Cette science interdisciplinaire intègre des principes de chimie, de biologie, et de physique pour comprendre les mouvements et la qualité de l'eau dans les rivières, les lacs, les aquifères, ainsi que les interactions de ces éléments avec l'environnement et les activités humaines. L'hydrologie répond aux enjeux liés à la gestion des ressources en eau, que ce soit pour la planification des infrastructures, la prévention des inondations ou l'exploitation durable des ressources aquatiques. Les études hydrologiques constituent des analyses systématiques des caractéristiques hydriques d'un bassin versant ou d'un système aquifère. Elles sont essentielles pour la gestion des risques, la conception d'ouvrages hydrotechniques, et la planification de projets de gestion de l'eau. Cette approche scientifique vise à répondre aux défis posés par l'exploitation et la conservation des ressources en eau, en s'appuyant sur une compréhension approfondie des processus hydrologiques.

Ce chapitre vise à déterminer les principaux paramètres hydrologiques du bassin versant de l'Oued Mekra, situé dans la ville de Sidi Bel Abbès. En premier lieu, il s'agit de délimiter précisément ce bassin ainsi que les autres bassins versants qui se déversent dans notre zone d'étude, en utilisant le logiciel ArcGIS. Ensuite, il convient d'analyser les caractéristiques spécifiques de ces bassins, notamment en identifiant les stations pluviométriques les plus proches. À partir de ces données, nous calculerons la moyenne annuelle des précipitations et les différentes fréquences associées. Par ailleurs, l'estimation des périodes de retour et la détermination des débits de crue correspondant seront réalisées à l'aide de formules empiriques. Ces calculs sont essentiels pour concevoir un aménagement hydrotechnique adapté, destiné à protéger la zone urbaine contre les risques d'inondations sévères. En somme, cette étude hydrologique constitue une étape cruciale dans la planification et la réalisation des ouvrages nécessaires à la gestion durable des eaux et à la sécurité des habitants de Sidi Bel Abbès.

III.1 Bassin Versant

Le bassin versant d'une section de cours d'eau est défini comme la surface qui est drainée par ce cours et ses affluents en amont de cette section. Toute l'eau qui s'écoule dans cette zone est dirigée vers l'exutoire, continuant ainsi son chemin vers l'aval. Ce bassin versant est une unité géographique et hydrographique délimitée par la ligne de partage des eaux, qui relie les points les plus élevés du terrain (*Musy & Higy, 2004*).

Il constitue une entité où les entrées d'eau, principalement sous forme de précipitations mais aussi par des apports souterrains d'autres bassins, sont collectées. L'écoulement de cette eau suit un réseau de pentes et de drains naturels, orientant les flux vers l'exutoire ou l'embouchure du cours d'eau principal (*Mebarki, 1984*).

Le bassin versant est ainsi caractérisé par son exutoire, à partir duquel il est possible de tracer la ligne de partage des eaux qui le délimite (*Bennis, 2004*).

- **ArcGIS**

Développé par Esri, est un système d'information géographique (SIG) permettant de créer, gérer, analyser et partager des données géographiques et des cartes en 2D et 3D. Ses fonctionnalités incluent l'analyse spatiale, la gestion de grandes quantités de données géospatiales, et le partage via des applications web. L'intègre diverses sources de données et est personnalisable avec des API et des scripts. Utilisé dans divers secteurs, ArcGIS aide les organisations à prendre des décisions éclairées grâce à des analyses et visualisations géospatiales.

III 1.1: Etude géomorphologique

- **Caractéristique géographique**

Les coordonnées (UTM_Zone_30S) de l'exutoire sont les suivants :

- **Latitude** : 35.201°
- **Longitude** : -0.607°
- **Altitude** : 453m

- **Caractéristique Morphologique**

- **Surface** : La superficie d'un bassin versant correspond à la portion du territoire délimitée par la ligne de crête, ou contour du bassin. Cette aire peut être mesurée à l'aide d'un planimètre ou en utilisant la méthode des petits carrés, et est généralement exprimée en kilomètres carrés (km²). Le bassin versant d'oued Mekerra est :
- **S = 1094.22km².**
- **Périmètre** : Le périmètre d'un bassin versant est la longueur de la ligne définissant sa frontière externe, mesurée en kilomètres (km) à l'aide d'un curvimètre. Pour certaines applications, un périmètre simplifié est dessiné en lissant son contour. Chaque bassin réagit différemment aux précipitations, avec des caractéristiques hydrologiques influencées par le climat environnant et les particularités physiques du bassin. Le périmètre de bassin d'oued Mekerra est de **P = 195.32 km.**
- **Longueur du thalweg (cours d'eau principal)** : Le thalweg représente le cours d'eau principal d'un bassin versant, tracé par la ligne des points les plus bas de la vallée, et dirigeant ainsi l'écoulement des eaux. Longueur du cours d'eau principal est de **L_{cp} = 49.72 km.**

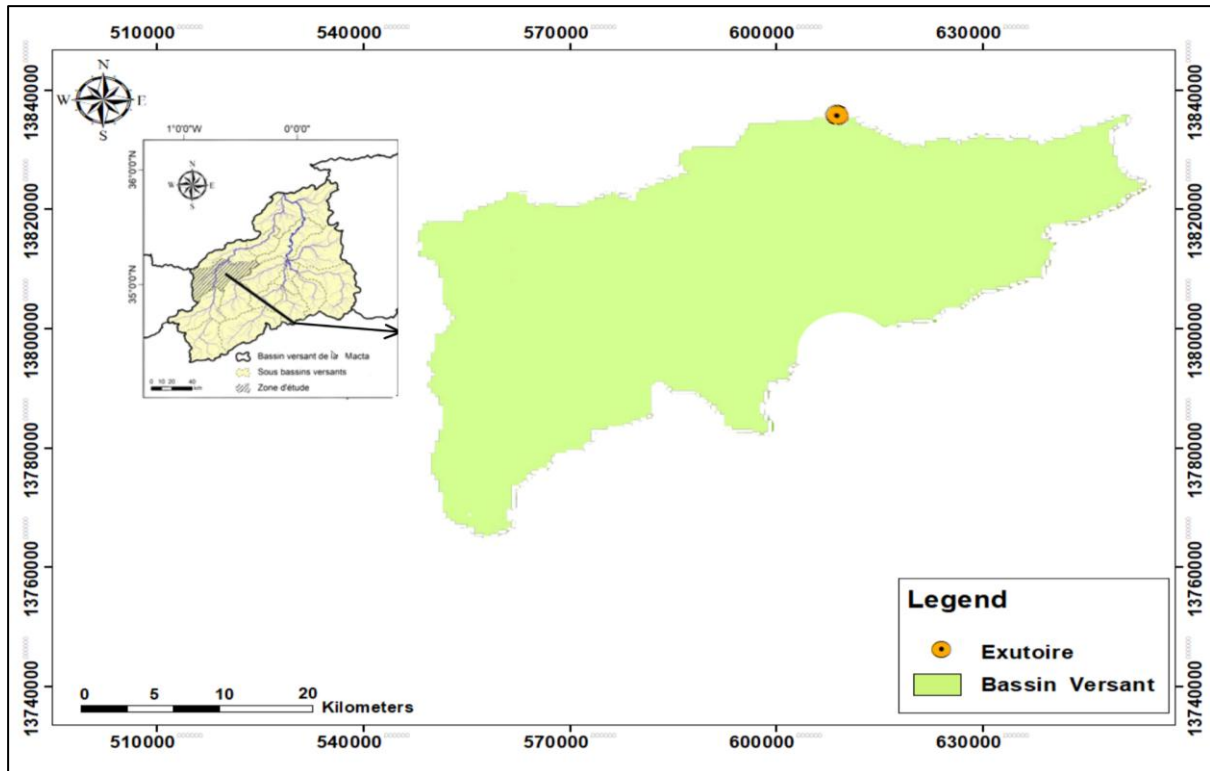


Figure III.1. Représentation du bassin de l’Oued Mekerra.

III.1.2.1 Caractéristique géométrique :

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

L'Indice de Compacité de Horton (K_h) évalue la forme et la compacité d'un bassin versant. Il est calculé comme le rapport entre la longueur totale des cours d'eau du bassin et celle d'un cours d'eau circulaire de même superficie. Cet indice permet de comprendre l'efficacité du drainage des eaux de pluie, influençant ainsi le régime d'écoulement et la réponse du bassin aux précipitations :

$$K_h = \frac{S}{L_{cp}^2} \quad (III.1)$$

Avec :

K_h : Indice de compacité de Horton.

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

L_{cp} : La longueur du cours d'eau Principal (Km^2).

Pour :

- $K_h > 1$ Bassin Ramassée.
- $K_h < 1$ Bassin Allongée.

• **Indice de compacité de Gravelius (K_G) :**

L'indice de compacité est une mesure de la forme d'un bassin versant, comparant sa forme à celle d'un cercle parfait. Défini comme le rapport entre le périmètre du bassin et celui d'un cercle de même superficie, cet indice évalue l'efficacité de la collecte et du drainage des eaux de pluie. Plus K_G est proche de 1, plus le bassin est compact et circulaire, influençant ainsi sa réponse hydrologique aux précipitations. Selon M. Gravelius (*Loaborde 2000*).

Ça formule est :

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

Avec :

K_G : Indice de Compacité.

P : Périmètre de bassin (Km).

S : Surface de bassin (Km²).

Pour :

- $K_G = 1$ Bassin compacte.
- $1 < K_G < 1.3$ Bassin moins compacte.
- $K_G > 1.3$ Bassin Allongée.

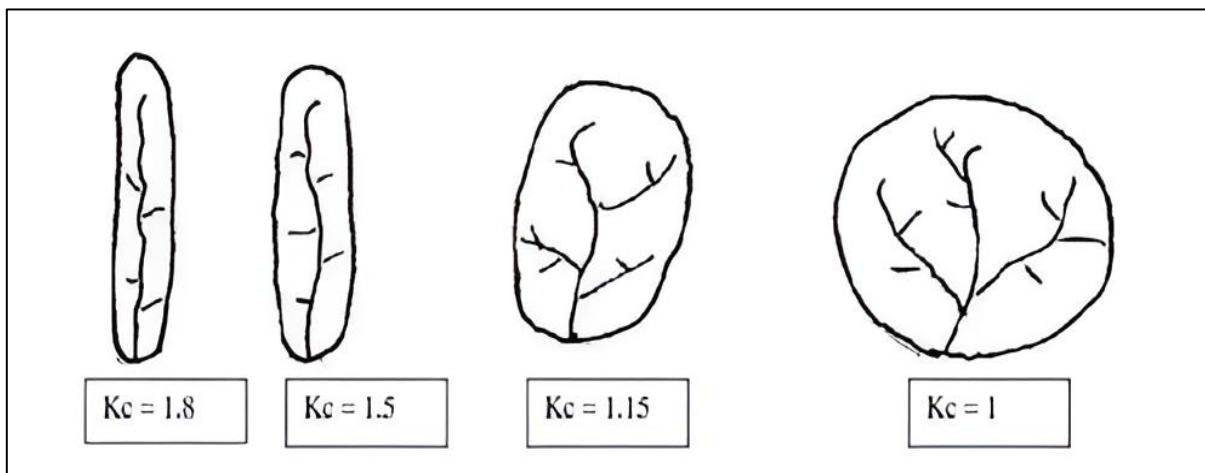


Figure III .2. Types de bassins versants selon le coefficient de Gravelius (K_G).

- Lorsque l'indice de compacité (K_G) s'écarte de 1, cela signifie que le bassin versant à une forme moins compacte, ce qui peut allonger le temps de concentration. Avec un : $K_G = 1,66 > 1.3$ donc notre bassin versant adopte une forme allongée.

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

Le coefficient d'allongement (C_a) mesure le degré d'allongement d'un bassin versant en comparant sa longueur totale à sa largeur maximale perpendiculaire. Un C_a élevé indique un bassin allongé, tandis qu'un C_a bas signale une forme plus compacte, proche d'un cercle. Coefficient d'allongement élevé suggère un bassin versant plus étiré, ce qui peut accélérer la réponse aux précipitations et provoquer des crues plus rapides.

La relation est comme suit :

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

Avec :

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

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

- **Le Rectangle équivalent :**

Le rectangle de Gravélius est un concept employé en hydrologie et en géomorphologie pour modéliser une zone géographique, telle qu'un bassin versant, sous forme d'un rectangle ayant la même superficie que cette zone. Cette simplification permet de faciliter les calculs et les analyses, notamment pour comparer les flux d'eau entre différents bassins versants. En uniformisant la forme des bassins versants en rectangles, les scientifiques peuvent utiliser des méthodes plus aisées pour examiner les caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques de ces régions.

Le périmètre et la superficie du rectangle sont présentés comme suit :

$$(III.4) \quad P_r = 2 (L_r + l_r) \quad et \quad A_r = L_r * l_r$$

P_r : Le périmètre du Rectangle équivalent (km).

A_r : La superficie du Rectangle équivalent (km^2).

L_r : La longueur du Rectangle équivalent (km).

l_r : La largeur du Rectangle équivalent (km).

On a :

$$K_G = 0,282 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (III.5)$$

À partir des équations (III.4) et (III.5), on obtient une équation du second degré qui admet deux solutions, L_r et l_r :

$$L_r = \frac{KG*\sqrt{S}}{1,12} * \left\{ 1 + \sqrt{1 - \left\{ \frac{1,12}{KG} \right\}^2} \right\} \quad \text{et} \quad l_r = \frac{KG*\sqrt{S}}{1,12} * \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left\{ \frac{1,12}{KG} \right\}^2} \right\} \quad (III.6)$$

Avec :

L_r et l_r : La longueur et la largeur du rectangle (Km).

K_G : L'indice de compacité.

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

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

Tableau III.1 : Paramètres hydro morphométriques du bassin versant d'Oued Mekerra.

Désignation	Symbole	Unité	Valeur
Superficie	S	Km^2	1094.22
Périmètre	P	Km	195.22
Indice de compacité de Gravelius	K_G	/	1.66
Longueur du Thalweg principal	L_{cp}	Km	49.72
Coefficient d'allongement	C_a	/	2.25
Indice de compacité de Horton	K_h	/	0.44
Longueur Rectangle équivalent	L_r	Km	85.21
Larguer Rectangle équivalent	l_r	Km	12.84

III .1.2 Etude de Relief :

Le relief d'une région influe considérablement sur la forme de l'hydrogramme de crue. Une pente prononcée accélère l'écoulement, ce qui se traduit par une diminution du temps de concentration. Autrement dit, l'eau de pluie atteint plus rapidement les rivières et les cours d'eau, ce qui peut provoquer une montée rapide des niveaux d'eau lors des crues. L'importance de cette analyse est soulignée par la distribution altimétrique du terrain, représentée par une courbe connue sous le nom de « courbe hypsométrique ».

III.1.2.1 La courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique est un graphique qui montre la répartition de la surface d'un bassin versant en fonction de son altitude. Elle illustre la proportion ou le pourcentage de la surface totale située au-dessus ou en dessous de chaque niveau d'altitude. Les altitudes sont représentées sur l'axe vertical, tandis que le pourcentage de surface du bassin est affiché sur l'axe horizontal.

Cette courbe est cruciale pour plusieurs raisons. Elle offre une vue d'ensemble du relief, permettant une analyse détaillée de la répartition altimétrique du terrain et fournissant des informations sur la pente et le profil général du bassin versant. En montrant comment la surface est répartie selon l'altitude, elle aide à prédire le comportement des crues et à évaluer les temps de concentration de l'eau. De plus, elle facilite la comparaison des topographies entre différents bassins versants en mettant en évidence leur pente moyenne et leur configuration altimétrique.

Enfin, elle est un outil précieux pour la gestion des ressources en eau et l'aménagement du territoire, offrant une vue d'ensemble essentielle pour la planification et la gestion des risques d'inondation. La répartition des surfaces élémentaires et leurs totaux cumulés selon les altitudes ont été calculés en utilisant le logiciel ArcGIS.

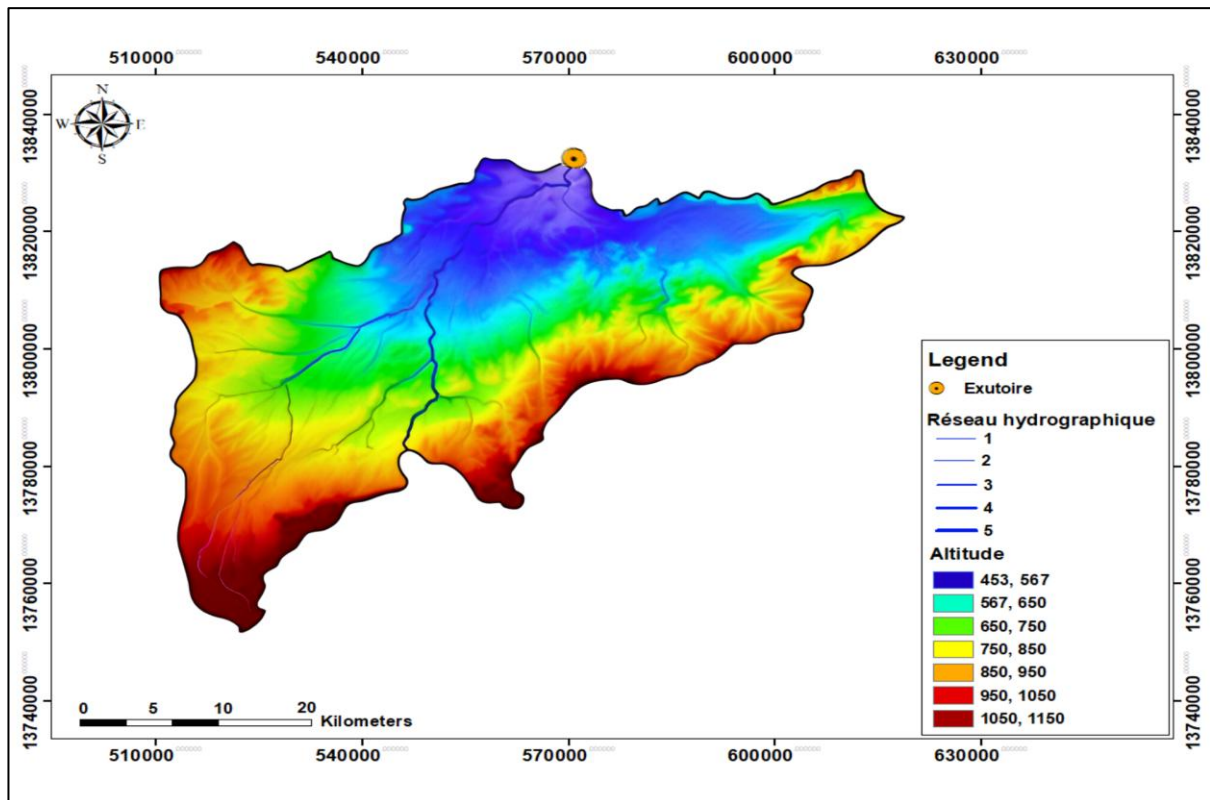


Figure III.3 : Carte hypsométrique du bassin versant d’oued Mekerra.

Tableau III.2 : Paramètre hypsométrique de bassin d’oued Mekerra.

Altitudes (m)	Hi (m)	Surface Partielles (km ²)	Surfaces partielles (%)	Surfaces cumulées (km ²)	Surfaces cumulées (%)
453-550	501.5	104.2	9.52	104.2	9.52
550-650	600	403.83	36.90	508.03	46.42
650-750	700	387.17	35.38	895.2	81.80
750-850	800	139.61	12.75	1034.81	94.55
850-950	900	35.07	3.20	1069.88	97.75
950-1050	1000	16.20	1.48	1086.08	99.23
1050-1150	1100	8.14	0.77	1094.22	100

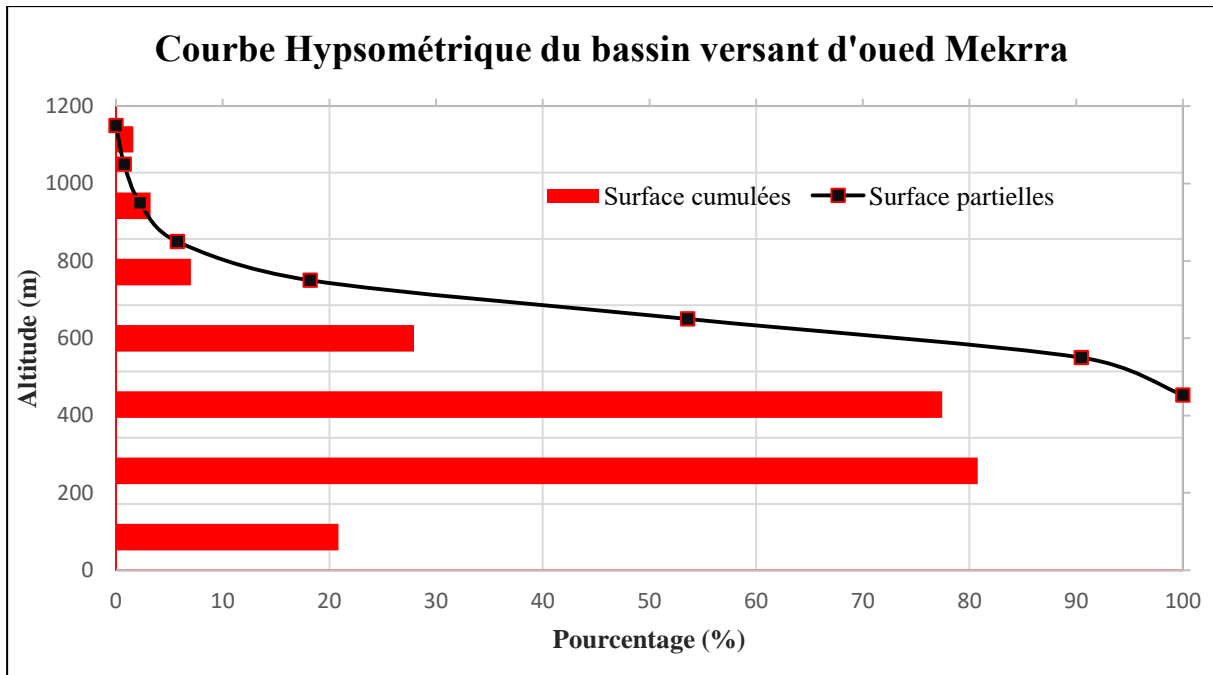


Figure III.4 Courbe hypsométrique du bassin versant d'oued Mekerra.

Les principales caractéristiques altimétriques concernent les variations d'altitude :

- **Altitude maximale et minimale ($H_{MAX} - H_{Min}$) :**

Ces données sont extraites des cartes topographiques. Le point le plus élevé du bassin versant est désigné par l'altitude maximale, tandis que le point le plus bas, souvent localisé à l'exutoire, est défini par l'altitude minimale. Ces deux mesures sont cruciales pour établir des liens avec des variables climatologiques comme la température et les précipitations.

- **L'altitude moyenne (H_{moy}) :**

Ce paramètre est déterminé à partir de la courbe hypsométrique et est défini comme l'ordonnée moyenne de cette courbe, calculée selon la relation suivante : il s'agit du rapport entre la somme des surfaces élémentaires et les altitudes moyennes correspondantes, divisé par la surface totale du bassin versant (S).

Il est donné par la formule suivante :

$$H_{moy} = \sum \frac{S_i \cdot H_i}{S} \quad (III.7)$$

Avec :

S_i : Surface partielle située entre deux courbes de niveau (Km^2)

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau successives(m).

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

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

Les résultats des calculs sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III.3 : Caractéristiques altimétriques du bassin versant d'oued Mekerra.

Altitudes	H min	H max	H moy	H 5%	H 50%	H 95%
Bassin versant oued Mekerra	453 m	1149 m	670.7 m	861 m	658 m	514 m

III.1.3 Indice de pente :

L'objectif de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications. Ils sont également utilisés pour estimer les vitesses des écoulements superficiels. Ces indices permettent d'interpréter les caractéristiques du terrain et de comprendre la morphologie des régions montagneuses ou des vallées.

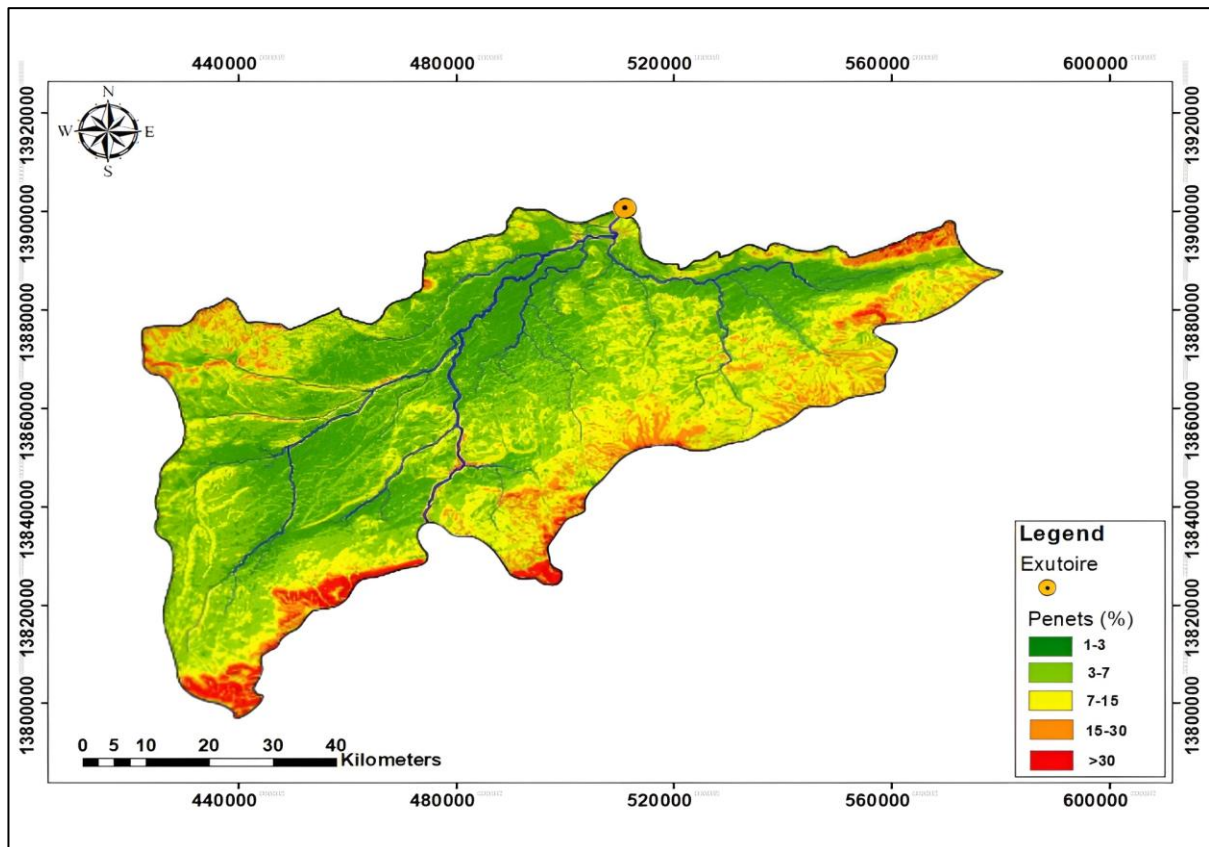


Figure III.5 : Carte des courbes des pentes du bassin versant d’Oued Mekerra.

- **Pente du bassin versant (I_{bv}) :**

La pente se définit par la formule suivante :

$$(III.8) \quad I_{bv} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_{cp}}$$

Avec :

H_{max} et H_{min} : Les altitudes maximal et minimal (m)

L_{cp} : Longueur du cours d’eau principal thalweg (km).

- **Pente moyenne du bassin versant I_{bm} :**

La pente moyenne d’un bassin versant, calculée en mesurant la différence d’altitude sur une distance horizontale moyenne, indique l’inclinaison générale du terrain. Une pente élevée accélère l’écoulement de l’eau et réduit le temps de concentration, tandis qu’une pente faible ralentit l’écoulement et allonge ce temps. Ainsi, la pente moyenne influence directement le ruissellement et le comportement hydrologique du bassin versant.

I_{bm} est donne comme suit :

$$I_{bm} = \frac{\Delta H \{0,5L1+L2+\dots+0,5Ln\}}{S} \quad (III.9)$$

Avec :

ΔH : Dénivelés entre deux courbes de niveaux successives (m).

$L1, L2, \dots, Ln$: Les longueurs des courbes de niveaux (Km).

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

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

Courbe	Longueur	ΔH	Surface de bassin (Km ²)	Pente moyenne de bassin (m/km)
500	166.34	100	1094.22	64.04
600	329.80			
700	313.71			
800	248.09			
900	65.64			
1000	28.35			
1100	14.90			

- **Indice de pente global (I_G) :**

L'indice de pente globale (I_G) mesure l'inclinaison générale d'un bassin, permettant de classifier et d'analyser le relief. Il facilite la compréhension de l'impact du terrain sur le ruissellement et l'hydrologie. Cet indice, représentant la pente moyenne de 90 % de la superficie du bassin, est calculé à partir de la courbe hypsométrique en utilisant la dénivelée entre les altitudes H5% et H95%.

$$I_g = \frac{D}{L_r} = \frac{H5\% - H95\%}{L_r} \quad (III.10)$$

Avec :

$H_{max} - H_{min}$: Les altitudes de fréquence correspondante au 5% et 95% de la surface Totale (m)

L_r : longueur du rectangle équivalent (km).

Tableau III.5 : Classification du relief selon l'indice de pente global selon la méthode(O.R.S.T.O.M).

/	Relief	Valeur de (I_g)
1	Relief très faible	$I_g < 0.002$
2	Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
3	Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
4	Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
5	Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
6	Relief fort	$0.05 < I_g < 0.1$
7	Relief très fort	$0.1 < I_g$

- **Indice de pente de Roche (I_R) :**

Cet indice évalue le relief en appliquant les critères de classification de (l'ORSTOM). L'indice de pente (IP) développé par M. Roche permet de déterminer la pente moyenne en utilisant les données réelles du bassin versant.

I_R est donné par la formule :

$$I_R = \frac{1}{\sqrt{L_r}} \sum \sqrt{S_i * H_i} \quad (III.11)$$

Avec :

L_r : longueur du rectangle équivalent (km).

S_i : Surface partielle entre deux courbes de niveau consécutives H_i et H_{i+1} (Km²).

- **Indice de pente moyenne (I_{pm}) :**

La pente moyenne d'un cours d'eau affecte la vitesse d'écoulement vers l'exutoire du bassin, influençant ainsi le débit et le temps de concentration. Une pente raide accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou inexistante favorise l'infiltration de l'eau dans le sol. Le calcul de cette pente moyenne se fait en utilisant le profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents, en déterminant la différence d'altitude entre les points les plus élevés et les plus bas, puis en la divisant par la longueur totale du cours d'eau.

I_{pm} est donné par la formule :

$$I_{pm} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_r} \quad (III.12)$$

Avec :

L_r : longueur du rectangle équivalent (km).

$H_{max} - H_{min}$: Les altitudes de fréquence correspondante au 5% et 95% de la surface totale (m).

- **Dénivelée spécifique D_s :**

La dénivelée spécifique (D_s) utilise la classification de (l'O.R.S.T.O.M.) pour identifier les types de relief des bassins versants, peu importe leur taille. Elle fournit une évaluation détaillée des caractéristiques topographiques, facilitant ainsi la compréhension de la morphologie et des variations du terrain.

La dénivelée spécifique est définie comme suit :

$$D_s = I_g \sqrt{S} = D \sqrt{\frac{I}{L_r}} \quad (III.13)$$

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

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

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

Tableau III.7 : Résultats de calculs des pentes et la dénivelée spécifique du bassin versant de l'Oued Mekerra.

Paramètre	Symboles	Unité	Valeurs
Pente du BV	I_{BV}	m/Km	13.99
Pente moy du BV	I_m	m/Km	64.04
Indice de pente global	I_G	m/Km	4.07
Indice de pente moy	I_{pm}	m/Km	6.97
Indice de pente de roche	I_R	%	2.60
Dénivelée spécifique Ds	Ds	m	131.83
Relief	/	/	Relief assez fort

III.2. Etude de réseau hydrographie :

III.2.1. Caractéristiques du réseau hydrographique :

Le cours principal d'un fleuve reçoit les apports de ses principaux affluents, qui sont eux-mêmes alimentés par des affluents de rang inférieur, allant jusqu'aux ruisseaux et petits cours d'eau à la source du bassin. Ce réseau complexe, formant le chevelu hydrographique du bassin versant, requiert la détermination de plusieurs paramètres pour une description exhaustive et précise.

- **Hiérarchisation du réseau :**

La classification de « Schumm » et « Strahler » (1957) hiérarchise les cours d'eau dans un bassin versant par ordre et importance, aidant à comprendre sa structure et sa dynamique. Un cours d'eau sans affluent est de premier ordre. Lorsque deux cours d'eau du même ordre n se rejoignent, le cours d'eau résultant devient d'ordre $n+1$.

Si deux cours d'eau de différents ordres se rencontrent, le cours d'eau résultant adopte l'ordre le plus élevé. Le bassin versant est classé selon l'ordre de son cours d'eau principal à l'exutoire. Cette méthode est cruciale pour l'analyse hydrologique et la gestion des ressources en eau.

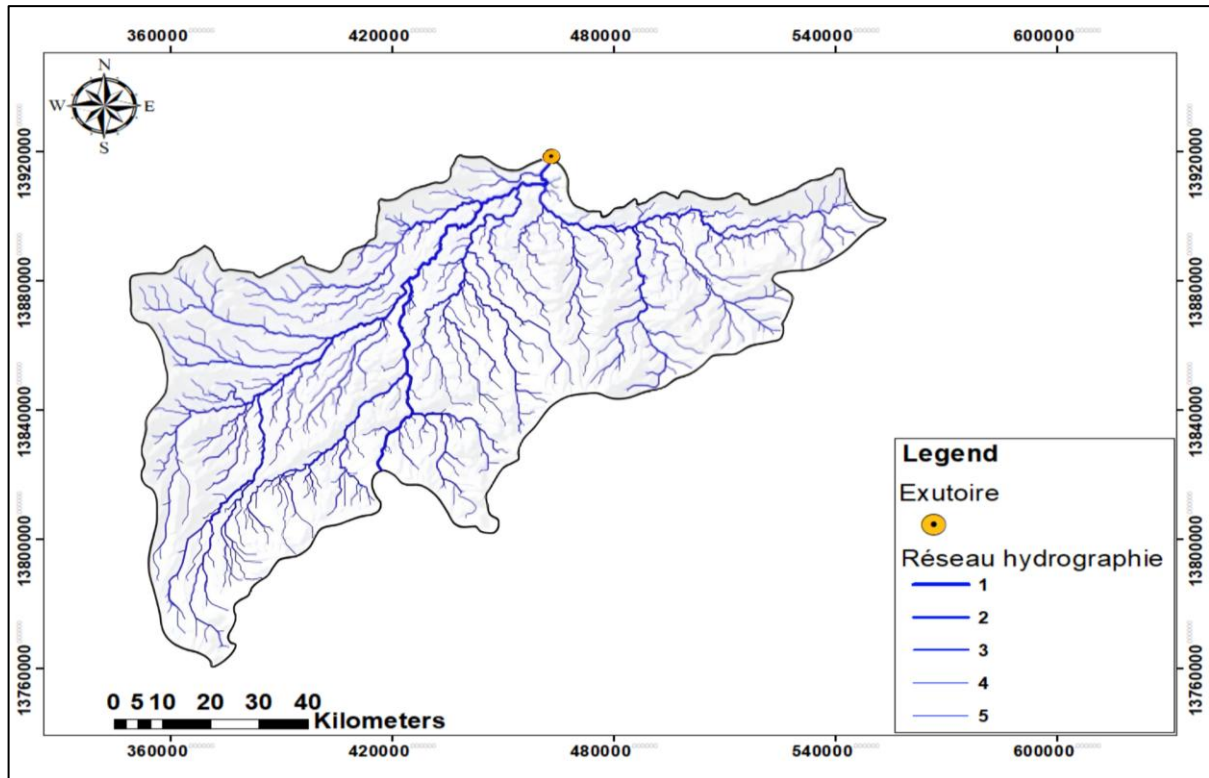


Figure III.6 : Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Mekerra.

III.2.2 Paramètres hydrographiques :

- **Densité de drainage D_d :**

La densité de drainage est un paramètre clé pour évaluer et estimer le temps de séjour des eaux souterraines. Définie par « *Horton* » en (1945) et référencée par Coulon en (2015), elle mesure le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique et la surface du bassin versant. Ce dernier est la région où toutes les eaux s'écoulent vers un point unique.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{S} \quad (III.14)$$

Avec :

$\sum_{i=1}^n l_i$: 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 : Surface totale du bassin versant (Km^2).

- **Le profil en long :**

Le profil longitudinal du cours d'eau Il est courant de représenter graphiquement la variation de l'altitude du fond du cours d'eau en fonction de la distance à l'émissaire. Ce profil longitudinal permet de déterminer la pente moyenne du cours d'eau.

- **La densité hydrographique des thalwegs élémentaires F :**

La densité hydrographique des thalwegs élémentaires évalue la concentration des cours d'eau dans un bassin versant en déterminant le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

$$F = \frac{\sum N1}{S} \quad (III.15)$$

Avec :

F1 : Densité hydrographique, exprimée en kilomètres par kilomètre carré (km⁻²).

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

S : Superficie totale du bassin versant, exprimée en kilomètres carrés (km²).

- **Coefficient de torrentialité Ct :**

Le coefficient de torrentialité est calculé en multipliant la densité de drainage par la fréquence des talwegs élémentaires, ce qui permet d'évaluer l'intensité des précipitations en fonction de la densité du réseau de drainage et de la topographie.

$$C_t = D_d * F \quad (III.16)$$

Avec :

D_d : Densité de drainage.

F : Densité hydrographique.

III.2.3 Temps de concentration Tc :

Le temps de concentration (Tc) d'un bassin versant est la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau atteigne l'exutoire du bassin depuis le point le plus éloigné. Cette durée dépend des caractéristiques topographiques et hydrologiques du bassin et est difficile à mesurer directement. Les méthodes et formules pour estimer le temps de concentration sont souvent conçues pour correspondre aux caractéristiques uniques de chaque région. Il est donc conseillé de sélectionner la formule la plus adaptée en fonction du type de bassin versant étudié.

Idéalement, on doit privilégier les formules élaborées pour des conditions physico-géographiques similaires à celles du nord de l'Algérie. Ainsi, l'estimation du temps de concentration est réalisée en utilisant ces formules qui tiennent compte des

particularités locales du bassin versant. L'estimation du temps de concentration est réalisée à l'aide des formules empiriques suivantes :

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

La formule est donnée par :

$$Tc = \left(\frac{(4\sqrt{S}) + (1,5Lcp)}{(0,8 * \sqrt{Hmoy - Hmin})} \right)^{0,385} \quad (III.17)$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

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

S : Surface du bassin versant (Km²).

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

- **Formule de SCS ANRH** :

Donnée par :

$$Tc = \left(\frac{0,87 * Lcp^3}{Hmoy - Hmin} \right)^{0,385} \quad (III.18)$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

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

S : Surface du bassin versant (Km²).

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

- **Formule de SOLOVSKY** :

Donnée par :

$$Tc = 4 * \left(\frac{S * Lcp^{0,333}}{\sqrt{Ibv}} \right)^{0,75} \quad (III.19)$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

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

S : Superficie du bassin versant (Km²).

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

- **Formule de TURAZZA :**

Donnée par :

$$Tc = \frac{0,108^3 \sqrt{S * Lcp}}{\sqrt{Ipm}} \quad (III.20)$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

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

S : Surface du bassin versant (Km²).

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

- **Formule de KIRPICH :**

Donnée par

$$Tc = 0,0195 * \frac{Lcp^{0,77}}{Ipm^{0,385}} \quad (III.21)$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

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

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

- **Formule de VENTURA :**

Donnée par :

$$Tc = 0,1275 \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{Ibv}} \quad (III.22)$$

Avec :

Tc : Temps de concentration (h).

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

S : Surface du bassin versant (Km²).

- **Choix du temps de concentration :**

Les équations appliquées sont spécialement adaptées au nord de l'Algérie. Ces formules génèrent des résultats variés, et nous retenons la valeur la plus petite parmi celles qui sont proches. Nous avons éliminé les valeurs extrêmes, qu'elles soient très élevées ou très faibles, afin de ne conserver que les valeurs moyennes.

Tableau III.8: Les Résultats de calcul de temps de concertation T_c .

Formules utilisés	Temps de concentration (h)
GIANDOTTI	14.52
SOLOVSKY	17.29
SCS ANRH	101.78
TURAZZA	15.35
VENTURA	1.104
KRIPICH	0.781

Les formules appliquées sont celles recommandées pour le Nord algérien, mais elles fournissent des résultats variés. Pour déterminer le temps de concentration, la valeur minimale parmi celles proches a été choisie. Les valeurs extrêmes, qu'elles soient très élevées ou très faibles, ont été exclues afin de ne conserver que les valeurs centrales.

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

Formules T_C	Temps de concentration (h)
Formule de SOLOVSKY	17.29
Formule de GIANDOTTI	14.52
Formule de TURAZZA	15.35

- Nous avons opté pour le résultat obtenu à partir de la loi de GIANDOTTI, car cette formule nous fournit le temps de concentration le plus adéquat tel que **$T_c=14.52h$** .

III.2.4 Vitesse de ruissellement (V_r) :

Le ruissellement est l'écoulement gravitaire à la surface du sol des eaux météorologiques qui n'ont pas été absorbées, évaporées ou stockées. Il survient lorsque le sol est saturé ou lorsque les précipitations dépassent sa capacité d'infiltration, et il joue un rôle crucial dans le cycle hydrologique, l'érosion des sols, et le transport des sédiments et des nutriments. Nous utilisons le temps de concentration de formule GIANDOTTI pour calculer la vitesse de ruissellement en fonction du temps de concentration.

La vitesse de ruissellement se calcule par la formule suivante :

$$V_r = \frac{Lcp}{T_c} \quad (III.23)$$

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

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

Désignation	Symbole	Unités	Valeur
Densité de drainage	Dd	Km/Km ²	1.02
Densité hydrographique	F	Km ⁻²	0.43
Coefficient de torrencialité	Ct	/	0.438
Temps de concentration	Tc	Heures	14.52
Vitesse de ruissellement	Vr	Km/h	3.42

Voici le tableau récapitulant les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant d'Oued Mekerra.

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

La Désignation		Symbole	Unités	Valeur
La Superficie		S	Km ²	1049.22
Le Périmètre		P	Km	195.32
La longueur du talweg principal		Lcp	Km	49.72
L'indice de compacité de Gravélius		KG	/	1.66
L'indice de compacité de Horton		Kh	/	0.44
Coefficient d'allongement		Ça	/	2.25
Rectangle équivalent	Longueur	Lr	Km	85.21
	Largeur	L _r	Km	12.84
Les Altitudes	Maximale	Hmax	m	1149
	Moyenne	Hmoy	m	670.7
	Minimale	Hmin	m	453
	Médiane 5%	H5%	m	861
	Médiane 50%	H50%	m	658
	Médiane 95%	H95%	m	514
La pente du bassin versant		Ibv	m/Km	13.99
La pente moyenne du bassin versant		Im	m/Km	64.04
L'indice de pente de Roche		Ip	%	2.60
L'indice de pente moyenne		Ipm	m/Km	6.97
L'indice de pente globale		Ig	m/Km	4.07
La Dénivelée spécifique		Ds	m	131.82
La somme des longueurs des cours d'eau		$\sum Li$	Km	517.63
Le nombre des talwegs d'ordre 1		$\sum N1$	/	28
La densité de drainage		Dd	Km/Km ²	0.49
La densité hydrographique		F	Km ⁻²	0.22
Le Coefficient de torrentialité		Ct	/	0.107
Le temps de concentration		Tc	Heures	14.52
La vitesse de ruissellement		Vr	Km/h	3.42

III.3. Etude de crue :

Dans les projets de prévention des inondations, l'évaluation du débit maximal est essentielle pour choisir les aménagements adaptés et définir les zones à risque. L'analyse fréquentielle en hydrologie, utilisant des données historiques ou des modèles empiriques, permet de prédire les débits de crue pour des périodes de retour de 10 à 100 ans, en tenant compte des précipitations et des déficits.

III.3.1 La série d'observation de la station hydrométrique :

Pour évaluer le temps de retour d'un débit spécifique, on utilise l'analyse fréquentielle des séries de débits maximaux. Cette méthode repose sur des modèles fréquentiels, qui sont des formules mathématiques permettant de simuler la probabilité d'occurrence de divers événements. La précision des prévisions dépend du modèle choisi. Dans cette étude, nous avons opté pour une loi statistique d'ajustement, couramment utilisée pour adapter les séries de précipitations maximales et les débits correspondants.

III.3.1.1 Présentation de la station hydrométrique :

Dans l'étude des inondations, il est essentiel de collecter des données hydrologiques et météorologiques à partir de différentes stations de mesure. Pour l'analyse d'aménagement, il est crucial d'examiner les précipitations maximales annuelles afin d'identifier les événements pluvieux extrêmes associés à diverses périodes de retour. Cela implique de disposer d'une série chronologique des précipitations maximales couvrant la période la plus étendue possible. Cependant, dans notre zone d'étude, aucune station hydrométrique n'est disponible.

Nous avons donc utilisé la station :

- La station Sidi Bel Abbés, située dans le bassin versant N°11, sous-bassin N°03.
- La station Sidi Ali Benyoub, située dans le bassin versant N°11, sous-bassin N°02.

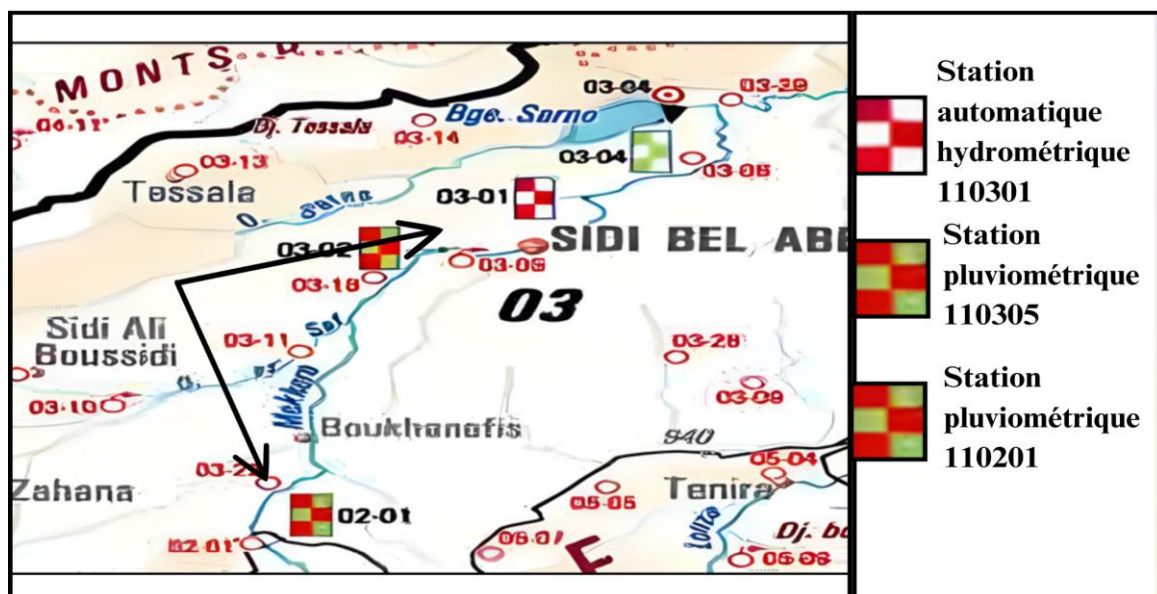


Figure III.7 : Situation de la station hydrométrique de Sidi Bel Abbés (Source : ANRH-Blida).

Tableau III.12. Caractéristique de la station hydrométrique de Sidi Bel Abbés source (ANRH-Oran.)

Station	Code	Coordonnées			Période d'observation
		X(m)	Y(m)	Z(m)	
Sidi Bel Abbes	110301	X(m)	Y(m)	Z(m)	1975-2021
		199.10	219.70	470	

Tableau III.13: Caractéristique des les deux stations pluviométrique (Source : ANRH).

Station	Code	Coordonnées			Période d'observation
		X(m)	Y(m)	Z(m)	
Sidi Ali Benyoub	110201	186.5	192.5	643	1975-2011
Sidi Bel Abbés (ville)	110305	199.1	219.7	470	1975-2021

Le tableau ci-dessous présente la répartition des débits maximaux annuels enregistrés à la station sur une période de 46 ans.

Tableau III.14: Série des débits maximaux annuels prise de la station 110301 (Source : ANRH-Oran).

Date	Débit max annuel en m3/s	Date	Débit max annuel en m3/s
1975	17,1	1999	89,884
1976	20,4	2000	161,8
1977	9,84	2001	127,133
1978	22,5	2002	51,8
1979	4,36	2003	88,8
1980	10,1	2004	55,92
1981	7,448	2005	120,444
1982	9,06	2006	246
1983	31,672	2007	124,74
1984	20,128	2008	183
1985	8,9	2009	55,2
1986	44	2010	18,2
1987	9,829	2011	16,075
1989	36,06	2012	202,7
1989	33,24	2013	24,25
1990	58	2014	16,075
1991	25,36	2015	195,35
1992	35,12	2016	34,68
1993	35,12	2017	37,2
1994	110	2018	60,86
1995	96	2019	53,3
1996	61,8	2020	53,3
1997	120,5	2021	52,16

III.3.2. Ajustement de la série des débits maximaux

L'exactitude des résultats d'une analyse fréquentielle dépend grandement du choix du modèle fréquentiel, notamment de sa nature. Bien que plusieurs facteurs puissent faciliter ce choix, il n'existe malheureusement pas de méthode universelle et infaillible. À partir d'un échantillon de n observations, on construit un histogramme de fréquence d'apparition et une courbe de fréquence cumulée de non dépassement. Lorsque le nombre (n) est suffisamment grand, on

cherche à déterminer la loi de distribution de la population. La fréquence se transforme alors en densité de probabilité.

Tableau III.15: Modèles de distribution fréquentielle et leur fiabilité.

Lois	Paramètres hydrologiques	Fiabilité
Normale	Précipitations annuelles, débits, volumes de stockage des réservoirs	Conditions dans lesquelles les données suivent une distribution normale
Loi de Gumbel	Débits maximal annuels	Conditions dans lesquelles les débits maximaux annuels suivent une distribution de Gumbel
Pearson de type III (Gamma)	Débits maximaux annuels, précipitations journalières, précipitations annuelles, volume du ruissellement mensuel, volume du ruissellement annuel	Conditions dans lesquelles les données suivent une distribution de Pearson de type III
Log Normale	Débits maximaux annuels, précipitations quotidiennes, précipitations annuelles, volume de ruissellement mensuel, volume de ruissellement annuel	Conditions dans lesquelles les logarithmes des données suivent une distribution normale
Loi exponentielle	Précipitations quotidiennes, intervalle entre deux événements	Conditions dans lesquelles les données suivent une distribution exponentielle
Loi de Goodrich	Valeurs annuelles moyennes (débits, précipitations, etc.)	La précision des estimations fournies par la loi de Goodrich doit être vérifiée empiriquement à l'aide de données locales pour garantir qu'elle reflète fidèlement les conditions réelles observées.

1) Ajustement de la série à la loi de GUMBEL

- **Logiciel Hyfran :**

Hyfran est un logiciel spécialisé en hydrologie, conçu pour l'analyse des ressources en eau et la gestion des phénomènes hydrologiques. Il est principalement utilisé pour la modélisation des débits, l'analyse des précipitations et d'autres paramètres hydrologiques, afin de mieux comprendre et gérer les bassins versants. Ses principales

applications incluent la simulation des débits, l'analyse fréquentielle des événements extrêmes et la gestion des ressources en eau.

- **Ajustement à La loi de GUMBEL**

Est essentielle en hydrologie pour modéliser les événements extrêmes, tels que les débits maximaux annuels et les pluies intenses. Elle permet d'estimer les valeurs extrêmes en se basant sur les séries chronologiques de données, en supposant que ces valeurs suivent une distribution spécifique. Cette loi est cruciale pour prédire la fréquence et l'intensité des événements rares, facilitant ainsi la conception d'infrastructures adaptées et la gestion des risques liés aux phénomènes extrêmes.

Tableau. III.16. : Résultats d'ajustement de GUMBEL.

Période de retour	Probabilité de fréquence	Débit max jour	Écart type	Intervalle de confiance
1000	0.9990	865	302	272-1460
100	0.9900	407	114	184-630
50	0.9800	311	79.6	155-467
20	0.9500	207	46.2	177-298
10	0.9000	145	28.3	89.4-200
5	0.8000	93.8	15.8	62.8-125
2	0.5000	40.8	5.88	29.3-52.4

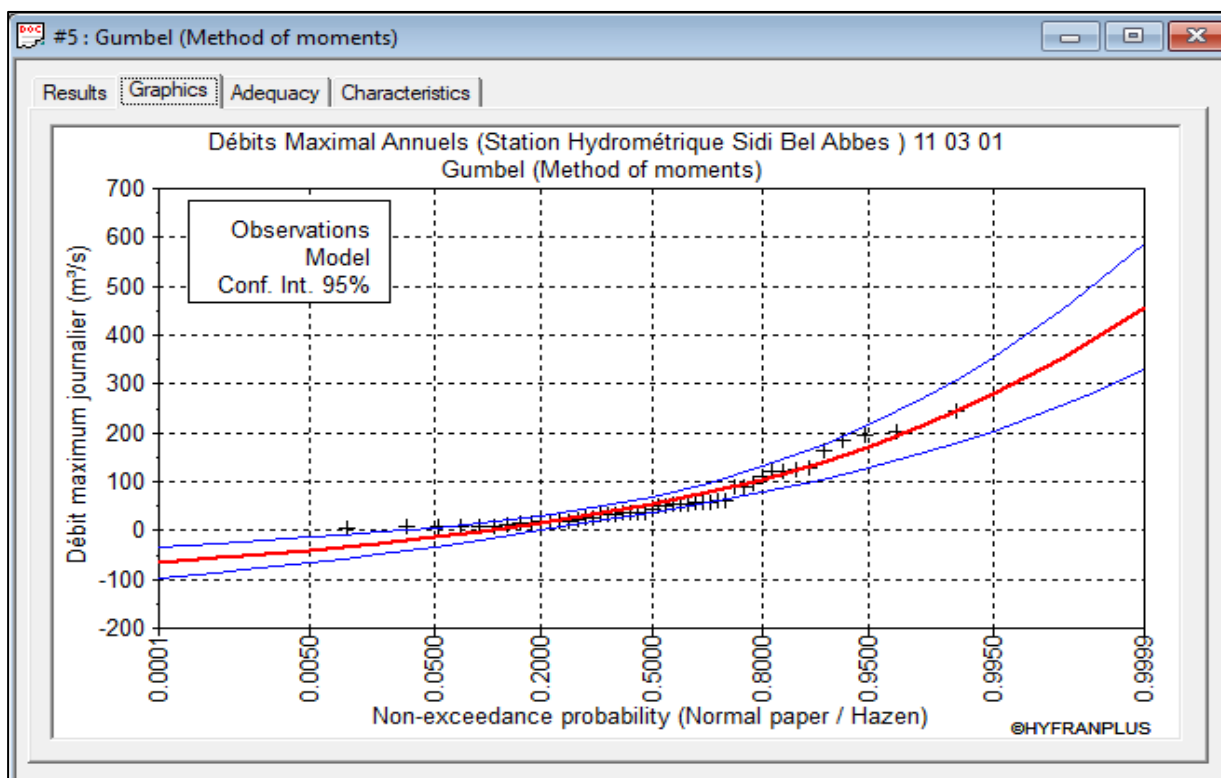


Figure. III.8 : Graphique d'ajustement à loi de GUMBEL de la station Sidi Bel Abbes (110301).

Les résultats de la comparaison des caractéristiques entre la loi de GUMBEL et l'échantillon sont présentés dans le tableau suivant :

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

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	Aucun	4.36
Maximum	Aucun	246
Moyenne	62.8	62.8
Standard déviation (Ecart type)	58.6	58.6
Médiane	53.2	44.0
Coefficient de variation (Cv)	0.933	0.933
Coefficient d'asymétrie (Cs)	1.14	1.46
Coefficient d'aplatissement (Ck)	2.40	4.11

- La comparaison des caractéristiques de la loi de Gumbel avec celles de l'échantillon permet de vérifier si cette loi est une représentation adéquate des données extrêmes observées. Cette analyse valide le modèle statistique utilisé pour prédire des événements hydrologiques extrêmes, comme les crues ou les précipitations maximales. Si les caractéristiques concordent, la loi de Gumbel peut être utilisée de manière fiable pour des estimations futures, la conception d'infrastructures hydrauliques, et la gestion des risques liés aux phénomènes extrêmes.

2) Ajustement a loi Log Normale (Loi de Galton)

Une variable aléatoire (X) suit une distribution log-normale si le logarithme naturel de (X), noté $v = \ln(X)$, suit une distribution normale. En d'autres termes, $\ln(X)$ suit une loi normale $N(\alpha ; \beta)$, ce qui signifie que (X) suit une loi log-normale notée $\ln N(\alpha ; \beta)$. La loi de Galton, ou loi log-normale, est une forme asymétrique dérivée de la loi normale après transformation. L'ajustement des données à cette loi a été réalisé à l'aide du logiciel HYFRAN. Les résultats de cette analyse sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau.III.18. Résultats d'ajustement à loi de Log Normale.

Période de Retour (ans)	Probabilité de fréquence (q)	Débit max jour	Ecart type	Intervalle de confiance
1000	0.999	352	49.4	255-449
100	0.99	247	33.5	181-312
50	0.98	215	28.8	158-271
20	0.95	172	22.5	128-216
10	0.9	116	17.8	104-174
5	0.8	86	13.2	79.1-131
2	0.5	53.2	7.85	37.8-68.6

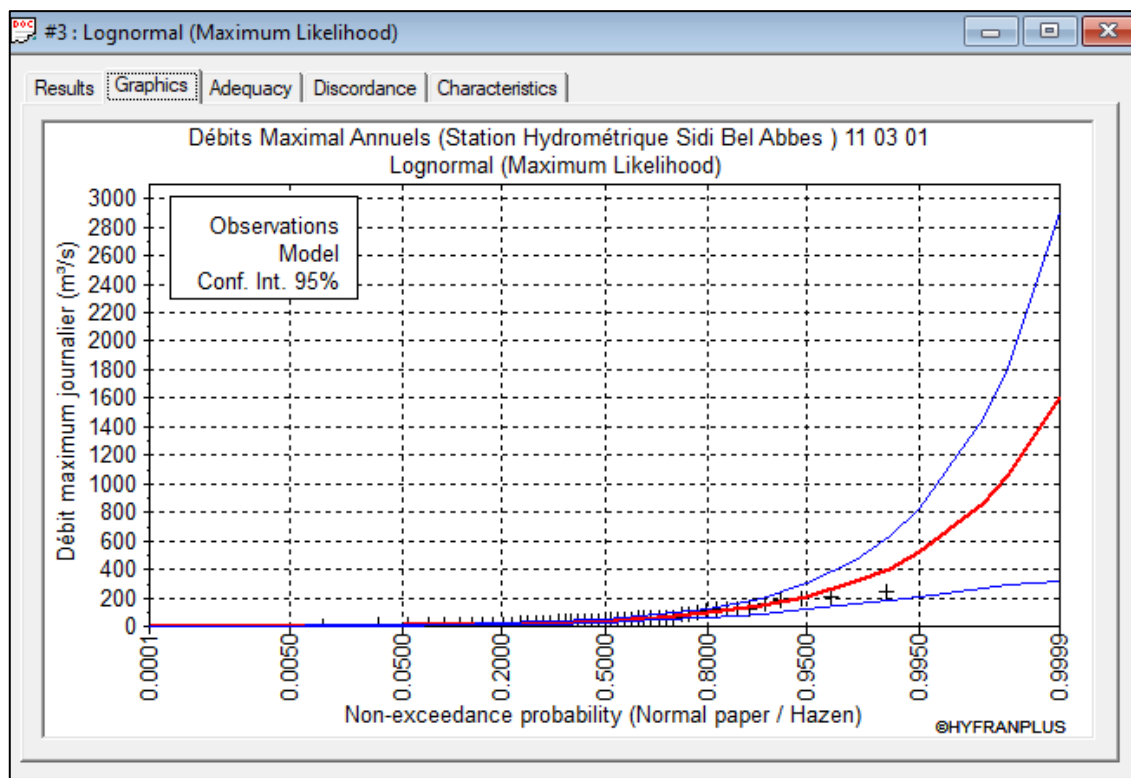


Figure III.9: Graphique d'ajustement à loi Log Normale de de la station Sidi Bel Abbas(110301) .

Voici la comparaison des caractéristiques entre la loi log-normale et les données de l'échantillon, comme illustré dans le tableau ci-dessous :

- Comparaison entre les deux lois Gumbel et Log Normale :

Tableau III.19: Comparaison des caractéristiques entre la loi log-normale et les données de L'échantillon.

Paramètres	Caractéristiques de la loi	Caractéristiques de l'échantillon
Minimum	0	4.36
Maximum	Aucun	246
Moyenne	66.5	62.8
Standard déviation (Ecart type)	85.6	58.6
Médiane	40.8	44.0
Coefficient de variation (Cv)	1.29	0.933
Coefficient d'asymétrie (Cs)	5.99	1.46
Coefficient d'aplatissement (Ck)	105	4.11

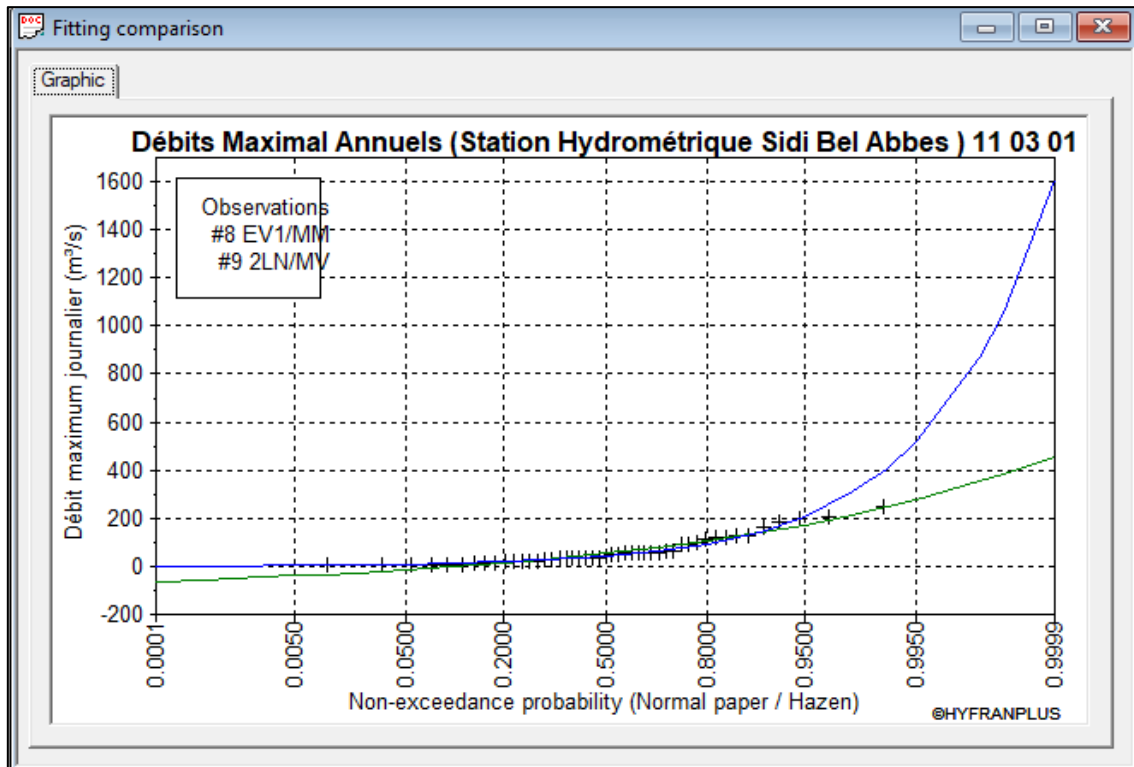


Figure III.10: Graphique de comparaison entre la loi GUMBEL et loi Log Normale de la station Sidi Bel Abbes (110301) .

III.3.3 Choix de la loi d'ajustement

Il est normal d'observer des écarts entre les fréquences expérimentales et les fréquences théoriques d'une loi de distribution. L'ajustement graphique est un début utile, mais il ne suffit pas pour choisir la loi théorique finale. Des tests statistiques d'adéquation, comme le test du chi-carré (χ^2) et le test de Kolmogorov-Smirnov, sont nécessaires pour sélectionner la loi qui offre le meilleur ajustement aux données.

- **Test de Kolmogorov-Smirnov**

Ce test évalue la distance maximale entre la fonction de distribution empirique des données observées et la fonction de distribution théorique. Il est utilisé pour tester l'ajustement d'une loi de probabilité continue.

- **Le test d'adéquation de χ^2**

L'objectif d'un test d'adéquation, ou test d'ajustement, est de vérifier si le modèle choisi correspond bien aux données observées. Concrètement, il s'agit d'évaluer si les observations peuvent être considérées comme issues d'une loi spécifique. Le test du χ^2 (chi-carré) est fréquemment utilisé pour cette évaluation. Pour sélectionner la loi appropriée, on compare les valeurs χ^2 calculées aux valeurs χ^2 théoriques (tabulées) à un niveau de risque de 5%, équivalent à un seuil de confiance de 95%. Cette

Comparaison aide à déterminer si les différences entre les fréquences observées et théoriques sont statistiquement significatives. Si la valeur χ^2 calculée dépasse la valeur χ^2 théorique, cela suggère un écart significatif entre les données observées et la distribution théorique supposée. La valeur χ^2 théorique est extraite des tables de χ^2 en fonction des paramètres γ et α . Le test de Khi carré (χ^2) est utilisé pour évaluer l'ajustement d'une distribution théorique aux données observées, avec un seuil de signification α généralement fixé à 5% et un degré de liberté γ (Touaibia, 2015).

Les critères de décision sont :

- Si χ^2 calculée $>$ χ^2 théorique (tabulée) : La loi d'ajustement est rejetée.
 - Si χ^2 calculée \leq χ^2 théorique (tabulée) : La loi d'ajustement est acceptée.
- Les résultats du test du chi carré (χ^2) ont été obtenus à l'aide du logiciel HYFRAN Plus.

Sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.20 : Les résultats du test de Khi carré χ^2 .

Loi de distribution	Degré de liberté γ	Nombre de classe	χ^2 calculé	χ^2 théorique
Gumbel	6	9	17.91	12.84
Log Normale	6	9	12.25	12.84

Résultat des tests d'ajustement :

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

III.3.3.1 Présentation de la Méthode GRADEX

La méthode Gradex se distingue comme une approche probabiliste basée sur l'hydrologie et la pluviométrie, conçue pour évaluer les débits de crues extrêmes d'un cours d'eau sur des périodes de retour variant de 100 à 10 000 ans. Développée par (Guillot et Durand, 1969). Elle est conçue pour des bassins versants de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés (jusqu'à 5 000 km²), où les pluies sont réparties de manière relativement homogène sur le territoire. La méthode GRADEX, en utilisant les données pluviométriques, offre une amélioration notable par rapport aux approches classiques de prédétermination des crues, qui reposent exclusivement sur l'analyse statistique des débits observés (Garavaglia, 2011).

III.3.3.2 Principe de la méthode de GRADEX

La méthode GRADEX repose sur l'idée que le sol atteint sa saturation lorsque le débit d'un cours d'eau dépasse un seuil défini, appelé débit seuil ou point pivot. Ce seuil peut varier en fonction des sols et des caractéristiques du bassin versant, allant des débits décennaux aux

débits cinquantennaux. Pendant la durée de base du ruissellement, désignée comme durée caractéristique (*DDD*), toute augmentation des précipitations se traduit par une augmentation équivalente du débit (*Egis Eau, 2013*). Cette méthode exploite les données climatologiques historiques pour dériver le comportement asymptotique de la loi de probabilité des volumes de crues rares à partir de la loi des cumuls de pluies extrêmes. La capacité de rétention moyenne du bassin se stabilise ainsi pour les crues ayant une période de retour décennale (*Lang et al., 2009*). La méthode GRADEX offre un cadre de calcul précis et adapté en se fondant sur une approche fréquentielle des précipitations intenses, qu'elles soient locales ou régionales. Cette approche s'appuie sur un paramètre proportionnel à l'écart-type des fortes précipitations, désigné P_{jmax} (précipitation maximale journalière). Le Gradex (gradient des valeurs extrêmes), en tant qu'invariant climatologique local, est fondamental pour cette méthode, en tenant compte des spécificités géographiques du bassin versant.

III.3.3.3 Hypothèses de la méthode

Le postulat de base de la méthode est qu'il existe une relation entre la distribution des débits et celle des pluies génératrices. La méthode repose sur trois hypothèses suivantes (*Meddi et Zeroual, 2018*).

- **Hypothèse N° 1**

La répartition des précipitations sur un bassin peut être décrite asymptotiquement par une loi de Gumbel ou une loi exponentielle, en fonction de la méthode d'échantillonnage employée. Le Gradex se définit comme la pente de la courbe de distribution dans un graphique où les précipitations sont tracées en fonction du logarithme de la période de retour. Cette approche permet de quantifier les variations des précipitations en relation avec les périodes de retour, en utilisant les caractéristiques spécifiques des lois de probabilité des précipitations extrêmes.

- **Hypothèse N° 2 :**

Le déficit d'écoulement, défini comme la différence entre le volume d'eau précipité et le volume d'eau écoulé à l'exutoire du bassin versant durant un intervalle de temps donné, cesse d'augmenter en moyenne au-delà d'un seuil précis de précipitation. En d'autres termes, une fois que le bassin versant atteint un état de saturation, la répartition du déficit d'écoulement ne varie plus en fonction de l'intensité de la pluie ou du débit. Ce phénomène est illustré graphiquement par un parallélisme entre les courbes de répartition des précipitations et des écoulements pour l'intervalle de temps considéré. Ce comportement est observé à partir d'un point de référence, désigné comme point pivot, qui est habituellement défini pour une période de retour (T_p) allant de 10 à 50 ans, selon les caractéristiques spécifiques du bassin versant analyser.

▪ Hypothèse N° 3

Peu importe la fréquence ou la période de retour, le débit de pointe de crue (valeur maximale observée) peut être estimé à partir du volume d'eau écoulé durant la période en question en utilisant un coefficient de multiplication spécifique au bassin versant. Ce coefficient, appelé coefficient de forme ou coefficient d'affinité, est dérivé des hydrogrammes de crues historiques pour le bassin versant. Il sert à ajuster le volume écoulé pour obtenir une estimation précise du débit de pointe, tenant compte des caractéristiques uniques du bassin versant.

III.3.3.4 Les étapes de la méthode

- Définir le Pas de Temps : Sélectionner un pas de temps de n heures (généralement équivalent à la moyenne des temps de base des hydrogrammes de crues disponibles). Pour simplifier les calculs, il est recommandé de choisir une valeur arrondie telle que 2, 4, 6, jusqu'à 48 heures.
- Ajuster les Pluies Maximales Journalières : Appliquer la loi de Gumbel pour ajuster les pluies maximales observées sur une base journalière.
- Déterminer le Gradex : Calculer le paramètre Gradex (a) en ajustant les précipitations maximales journalières (Pjmax) à la loi de Gumbel. Le Gradex correspond à la pente de la droite de Gumbel sur le graphique.
- Calculer le Gradex : Effectuer le calcul du Gradex pour les précipitations maximales, en utilisant la pente de la distribution de Gumbel.

$$P(mm) = a * \mu + b. \quad (III.26)$$

- Ajuster les débits observés à la loi de Gumbel pour déterminer le débit décennal, qui sert de point pivot pour l'extrapolation des débits. Cette étape est cruciale pour modéliser les débits extrêmes sur une période de retour de dix ans.
- Convertir le débit décennal, exprimé en mètres cubes par seconde (m³/s), en lame d'eau, exprimée en millimètres (mm), en utilisant la formule de transformation appropriée. Cette conversion permet de représenter le débit en termes de hauteur d'eau, facilitant ainsi l'analyse des impacts hydrologiques.

$$R(mm) = \frac{Q\left(\frac{m^3}{s}\right) * 3,6 * n \text{ (heurs)}}{S(Km^2)} \quad (III.27)$$

- Extrapoler la distribution des débits au-delà de la valeur seuil de 0,9 (période de retour de 10 ans) en utilisant une droite dont la pente est déterminée par le Gradex des précipitations.

$$Q(\mu\%) = a * \mu + b' \quad (III.28)$$

a : Gradex des précipitations.

μ : Variable réduite de Gumbel.

Et on a :

$$\mu = -\ln(-\ln(F)) \quad (III.29)$$

$$F = \frac{1}{1-T} \quad (III.30)$$

Pour T=10ans :

$$b' = Q_{10ans} - a\mu. \quad (III.31)$$

Tracer la droite correspondant à l'équation sur le même graphique que la courbe d'ajustement de Pjmax. Ensuite, déterminer les débits Q pour chaque période de retour en millimètres. Enfin, convertir ces débits en mètres cubes par seconde en utilisant la formule suivante :

$$Q = \frac{S(Km^2)*Q(mm)}{3,6} \quad (III.32)$$

- Calcul du débit de pointe

$$Cp = \frac{Q_{max}}{Q_{moy}} \quad (III.33)$$

Ainsi :

$$Qp = Cp * Q \quad (III.34)$$

III.3.3.5 Application de la méthode de GRADEX

- Nous avons utilisé deux stations pluviométriques, car ce sont les seules disponibles auprès de l'ANRH à Oran, pour les observations des séries de pluies maximales journalières.

Tableau III.21: Détails des stations pluviométriques (Source : ANRH Oran).

Station	Code	Coordonnées			Nombre d'années
		X(m)	Y(m)	Z(m)	
Sidi Ali Benyoub	110201	186.5	192.2	643	43
Sidi Bel Abbés	110305	199.1	219.7	470	52

Tableau III.22: Précipitations maximales journalières enregistrées à la station pluviométrique de Sidi Bel Abbés 110305 (Source : ANRH Oran).

Années	Pjmax annuel (mm)	Années	Pjmax annuel (mm)
1968	29	1995	32
1969	36	1996	15.8
1970	44.1	1997	19.5
1971	40	1998	50.7
1972	25.5	1999	/
1973	38	2000	/
1974	40.6	2001	/
1975	39.4	2002	/
1976	27.7	2003	30.8
1977	26.2	2004	22.3
1978	32.9	2005	27.4
1979	39	2006	42.8
1980	28.9	2007	22.7
1981	32.1	2008	45.3
1982	28.5	2009	23
1983	32.4	2010	41.2
1984	73	2011	33.1
1985	35.9	2012	51.4
1986	50.8	2013	39.6
1987	31.6	2014	59.3
1988	51.4	2015	21
1989	22.8	2016	56.6
1990	42.5	2017	27.9
1991	24.2	2018	58.1
1992	37	2019	30.2
1993	19.5	2020	14.5
1994	32.9		

- Nombres d'heures : n = 24 h.
- Ajustement des pluies maximales journalières à la station pluviométrique de Sidi Bel Abbés 110305 selon la loi de Gumbel.

Tableau III.23: Résultats de l'ajustement des précipitations maximales journalières à la

Période de retour	Probabilité de fréquence	Débit max jour	Ecart type	Intervalle de confiance
1000	0,9990	96.4	10.4	76.1-117
100	0,9900	74.1	7.03	60.3-87.8
50	0,9800	67.3	6.03	55.5-79.1
20	0,9500	58.3	4.72	49.0-67.6
10	0,9000	51.3	3.74	44.0-58.7
5	0.8000	44.1	2.77	38.6-49.5
2	0,5000	33.1	1.64	29.9-36.3

station pluviométrique de Sidi Bel Abbés 110305 selon la loi de GUMBEL.

L'équation de la droite de Gumbel pour la station pluviométrique de Sidi Bel Abbés 110305, obtenue à l'aide du logiciel Hyfran-Plus, est présentée ci-dessous :

Selon le logiciel HYFRAN, l'équation de la droite de Gumbel est la suivante :

$$P(\text{mm}) = 9.67\mu + 29.3$$

Avec :

Gradex 'a' : a = 8,53

b = 29,3

- Le débit décennal à la station hydrométrique de Sidi Bel Abbés 110301 est :

$$Q_{10\text{ans}} = 145 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Conversion du débit décennal (m^3/s) en lame d'eau équivalente (mm).

$$R(\text{mm}) = \frac{Q\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) * 3,6 * n (\text{heurs})}{S(\text{Km}^2)}$$

$$R(\text{mm}) = 11.94 \text{ mm}/24\text{h}$$

- Prolonger la distribution des débits au-delà de 0,9 (T = 10 ans) à l'aide d'une droite ayant une pente équivalente au Gradex de la pluie.

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

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

$$F = \frac{1-T}{1}$$

Alors :

$$b' = -9.81$$

Donc :

$$Q_{\mu\%} = 9.67 \mu - 9.81$$

- On trace la droite des débits dans le même graphe de l'ajustement pluies maximales journalières.

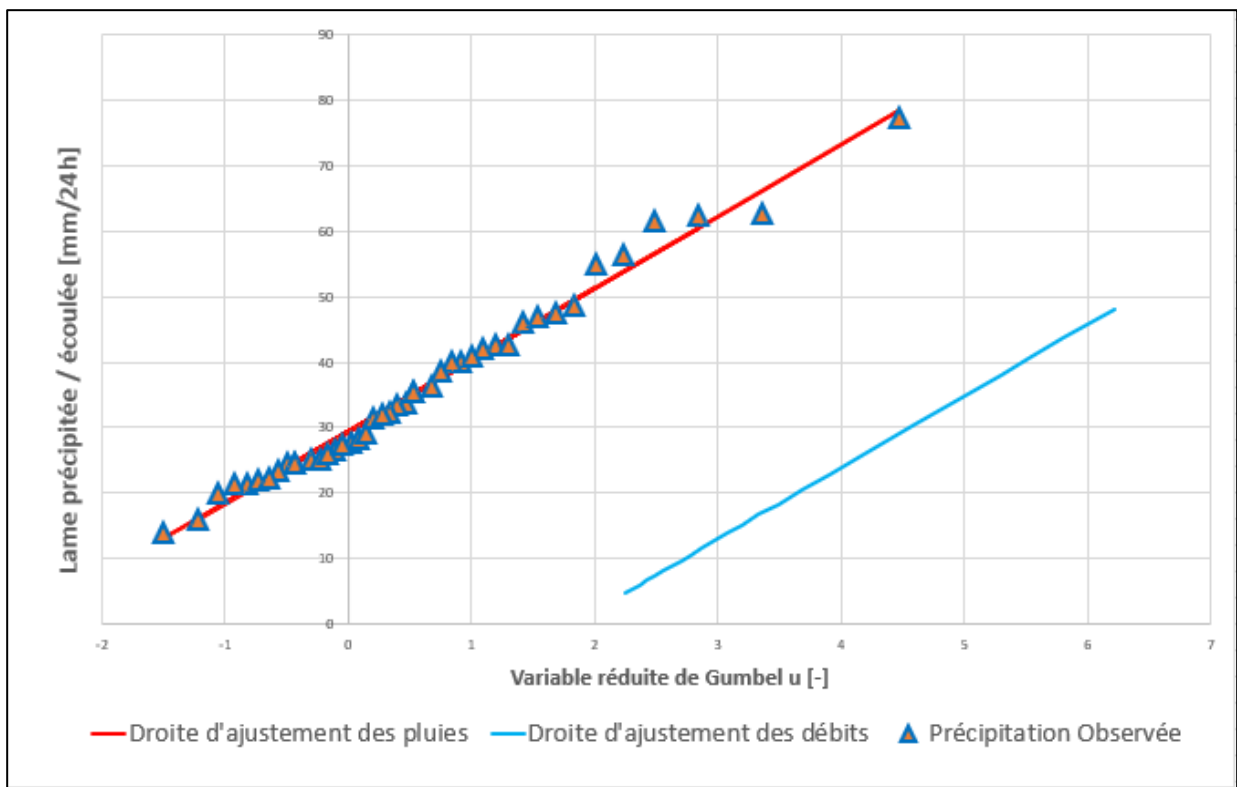


Figure III.11 : Graphe de l'ajustement des précipitations et de la droite d'extrapolation des débits.

- Les débits de pointe pour les différentes périodes de retour sont déterminés en prenant en compte le coefficient de pointe : $C_p = 1,4$.

Avec :
$$C_p = \frac{Q_{max}}{Q_{moy}}$$

Tableau III.24: Résultats des calculs pour la station pluviométrique de Sidi Bel Abbés pour les différentes périodes de retour.

Temps De Retour	Fréquence empirique selon Hazen	u	Précipitation	Débits moyen (mm/24 h)	Débits	Débits de Point
					moyen (m3/s)	
10	0,9000	2,25	48.5	11.9	145	203
20	0,9500	2,97	54.6	18.1	220	307
50	0,9800	3,9	62.6	26	316	442
100	0,9900	4,6	68.5	32	388	544
1000	0,9990	6,61	88.2	51.7	627	878

- La méthode GRADEX est appliquée de la même manière aux autres stations.

Tableau III.25 : Résultats de l'ajustement pour les stations évaluées.

Période de retours (Ans)	Station hydrométrique	Stations pluviométriques	
	Sidi Bel Abbés (01)	Sidi Ali Benyoub	Sidi Bel Abbés (05)
10	145	195	203
20	207	335	307
50	311	516	442
100	407	652	544
1000	865	1102	878

- **Interprétation des données**

Selon les résultats des calculs de débits effectués avec la méthode GRADEX, la station pluviométrique de Sidi Ali Benyoub 110201 présente le débit centennal le plus élevé par rapport aux autres stations. Ainsi, le débit de projet pour l'aménagement de l'oued Mekerra est fixé à 652 m³/s.

III.3.4 Hydrogramme de crue

L'hydrogramme de crue est une courbe représentant l'évolution des débits au cours du temps pendant une crue. Il permet d'estimer diverses caractéristiques de la crue, telles que sa forme, son volume, le temps de montée et le temps de base. Pour tracer cet hydrogramme, la méthode de Sokolovsky est utilisée (*Touaibia, 2015*). La méthode de Sokolovsky offre une représentation géométrique de l'hydrogramme de crue, spécialement conçue pour être utilisée en l'absence de stations de mesure hydrométriques. Cette approche consiste à tracer une courbe fermée, composée de deux paraboles jointes au sommet, afin de représenter les phases de montée et de décrue de la crue. Les équations correspondant à ces paraboles sont fournies ci-dessous.

- Branche de crue (montée)

$$Q(t) = Q_{max} * \left(\frac{t}{T_c}\right)^n \quad (III.35)$$

- Branche de décrue (descente)

$$Q(t) = Q_{max} * \left(\frac{T_b-t}{T_d}\right)^m \quad (III.36)$$

Avec

T_c=T_m (pour les petits bassins versants).

T_c : Temps de concentration du bassin versant (heures).

Q_m : Débit instantané à la montée (m³/s).

Q(t) : Débit à l'instant t (m³/s).

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

- T_m : Temps de montée (h)

$$T_m = T_c \quad (III.37)$$

- T_d : Temps de décrue (h)

$$T_d = \delta \times T_m \quad (III.38)$$

- T_b : Temps de base (h)

$$T_b = T_m + T_d \quad (III.39)$$

- m et n : Exposants des paraboles (avec m=3 et n=2).

Tableau III.26: Coefficient de forme de l'hydrogramme de crue « δ »

Description du cours d'eau	Valeur de " δ "
Petits cours d'eau et vallons situés dans des bassins versants dépourvus de végétation et à faible perméabilité	2,0 – 2,5
Petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants dégradés ou perméables, et cours d'eau moyens avec des terrasses de lit majeur normale	3,0 – 4,0
Rivières de taille moyenne à grande, avec de vastes plaines d'inondation et des terrasses de débordement étendues.	4,0 – 7,0

Tableau III.27: Paramètres pour le calcul de l'hydrogramme de crue

Paramètre	Unités	Valeur
T_c	Heures	14.52
T_m	Heures	14.52
T_d	Heures	29.04
T_b	Heures	43.56
m	/	3
n	/	2
δ	/	2

Le tableau suivant affiche l'hydrogramme de crue pour une période de retour de 100 ans pour diverses stations.

Tableau III.28: Valeurs des débits centennaux en fonction du temps pour la zone d'étude.

Temps	Période de retour 100 ans		
	Station hydrométrique	Stations pluviométrique	
	Sidi Bel Abbas(01)	Sidi Bel Abbas ville(05)	Sidi Ali Benyoub
	Q (m3/s)	Q (m3/s)	Q (m3/s)
0	0	0	0
1	1.930461641	2.580273054	3.092533145
2	7.721846565	10.32109221	12.37013258
3	17.37415477	23.22245748	27.83279831
4	30.88738626	41.28436886	49.48053032
5	48.26154103	64.50682634	77.31332863
6	69.49661908	92.88982993	111.3311932
7	94.59262042	126.4333796	151.5341241
8	123.549545	165.1374754	197.9221213
9	156.3673929	209.0021173	250.4951848
10	193.0461641	258.0273054	309.2533145
11	233.5858586	312.2130395	374.1965106
12	277.9864763	371.5593197	445.3247729
13	326.2480174	436.0661461	522.6381015
14	378.3704817	505.7335185	606.1364964
14.52	407	544	652
15	387.1499277	517.468208	620.2008669
16	347.8902144	464.9933086	557.3081567
17	311.3786169	416.1915666	498.8178335
18	277.5154214	370.9297032	444.570159
19	246.2009138	329.0744401	394.4053951
20	217.3353803	290.4924985	348.1638034
21	190.819107	255.0506	305.6856456
22	166.5523799	222.615466	266.8111835
23	144.435485	193.0538178	231.3806787
24	124.3687085	166.232377	199.234393
25	106.2523364	142.0178649	170.2125881
26	89.98665488	120.2770031	144.1555257
27	75.47194988	100.8765129	120.9034676
28	62.60850752	83.68311571	100.2966754
29	51.29661389	68.56353306	82.17541094
30	41.43655504	55.38448634	66.37993583
31	32.92861704	44.01269698	52.75051183
32	25.67308599	34.31488643	41.12740065
33	19.57024793	26.15777611	31.35086401
34	14.52038896	19.40808745	23.26116364
35	10.42379513	13.93254189	16.69856124
36	7.180752526	9.59786087	11.50331854
37	4.691547214	6.270765809	7.515697257
38	2.856465269	3.817978148	4.575959103
39	1.575792761	2.106219317	2.524365799
40	0.749815765	1.002210752	1.201179063
41	0.278820351	0.372673884	0.446660611
42	0.063092592	0.084330147	0.101072162
43	0.00291856	0.003900975	0.004675433
43.56	0	0	0

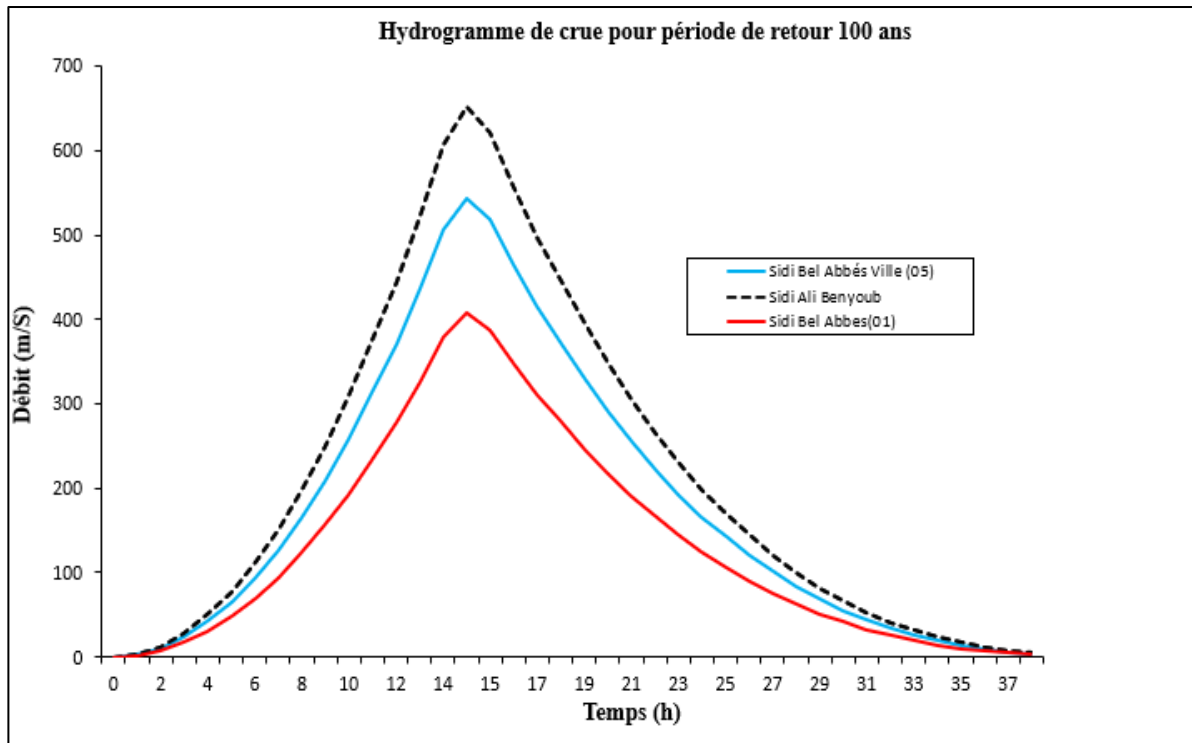


Figure III.12 : Hydrogramme de crue pour une période de retour de 100 ans pour diverses stations.

III.3.5 Choix de la crue du projet

L'étude hydrologique est une phase essentielle et complexe dans une analyse de protection contre les inondations. La détermination du débit de pointe est cruciale pour la modélisation hydraulique du cours d'eau, car elle permet de prévoir les risques d'inondation, de concevoir les aménagements nécessaires à la protection, et d'évaluer les coûts de mise en œuvre.

La crue de projet est définie comme le niveau de crue maximal que l'infrastructure doit être capable de gérer pour une probabilité donnée. Le choix de cette crue se base principalement sur l'importance de la structure à ériger, les impacts potentiels en aval, ainsi que sur les aspects techniques, économiques et environnementaux associés à l'aménagement. Ainsi, la crue de projet doit non seulement garantir l'évacuation des débits extrêmes, mais aussi répondre aux enjeux spécifiques du projet et minimiser les impacts négatifs sur les zones adjacentes.

Pour cette initiative de gestion des inondations, nous avons sélectionné une période de retour de 100 ans. Il a été noté que la station pluviométrique de Sidi Ali Benyoub 110201 affiche des débits en pourcentage plus élevés comparés à ceux calculés par la méthode GRADEX pour les autres stations pluviométriques et la station hydrométrique. Par conséquent, nous avons choisi d'adopter un débit de conception de 652 m³/s.

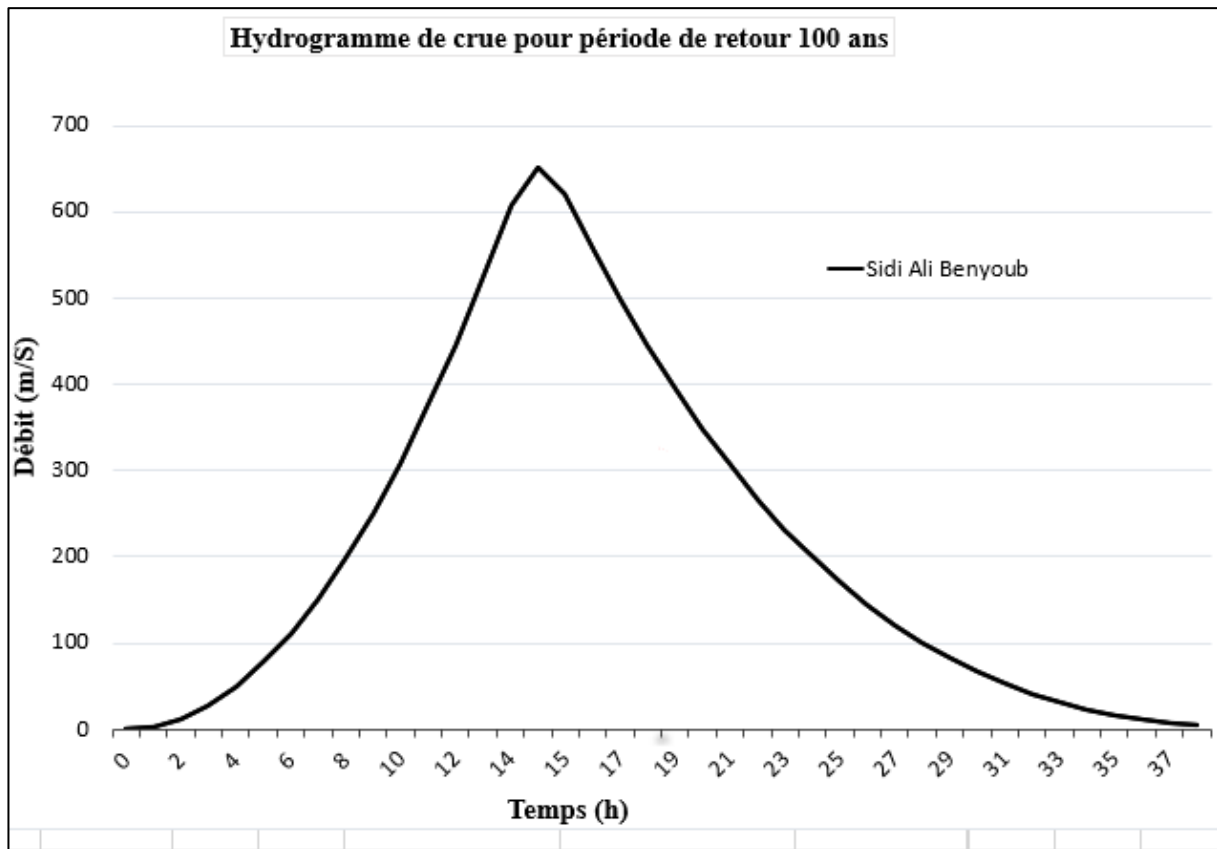


Figure III.13 : Hydrogramme de crue du projet pour la station pluviométrique Sidi Ali Benyoub 110201.

Conclusion

Ce chapitre vise à établir les paramètres hydrologiques requis pour l'aménagement de l'Oued Mekerra en vue de protéger la ville de Sidi Bel Abbés contre les crues centennales. Pour cette étude, nous avons analysé les données provenant de la station hydrométrique ainsi que des stations pluviométriques situées sur le bassin versant de l'Oued Mekerra. En utilisant la méthode GRADEX, nous avons calculé le débit centennal de la crue. En conclusion, nous avons défini un débit de conception de 652 m³/s pour le projet.

Chapitre IV

**Evaluation et modélisation
Intégrée
Des cours d'eau non Aménagés**

Introduction

Pour assurer la protection de la Wilaya de Sidi Bel Abbés contre les risques d'inondation et les dommages causés par l'oued Mekerra, il est essentiel, après avoir réalisé l'étude hydrologique et déterminé le débit de projet, de procéder à une étude hydraulique. Cette étude est fondamentale pour évaluer avec précision les besoins et déterminer les dimensions appropriées pour l'aménagement de l'oued Mekerra.

Dans ce chapitre dédié à l'étude hydraulique, nous approfondirons les principes fondamentaux de l'hydraulique, en examinant les notions clés, les lois et les équations nécessaires pour déterminer les caractéristiques hydrauliques et géométriques des aménagements. Le calcul hydraulique se base sur la règle des valeurs extrêmes, en tenant compte du débit et de la vitesse d'écoulement, afin d'assurer l'évacuation rapide et continue des eaux. Nous décrirons également l'état du tronçon de l'oued Mekerra qui traverse la ville de Ténès pour modéliser un écoulement réel à surface libre. Il est important de noter que la conception des infrastructures de protection contre les crues se concentre souvent sur la hauteur d'eau, parfois au détriment des enjeux liés à l'érosion.

Nous visons à analyser les hauteurs d'eau en fonction des débits pour créer des cartes de profondeurs et identifier les zones inondables. Cette étude permettra d'évaluer les risques d'inondation, de concevoir des mesures de protection adaptées et de comprendre les surfaces inondées, les durées de submersion et la vitesse de montée des eaux lors des crues, en utilisant des modèles schématiques simplifiés du système réel.

Généralité

L'étude des flux naturels s'inscrit dans le domaine de l'hydraulique à surface libre, qui se distingue de l'hydraulique sous pression par la présence d'une surface en contact direct avec l'atmosphère. Dans ces écoulements, la gravité joue le rôle principal de force motrice, contrairement aux flux sous pression où le gradient de pression est dominant.

Ces écoulements gravitaires présentent une caractéristique notable : la profondeur de l'eau est relativement faible par rapport à la longueur de l'écoulement, que ce soit dans les rivières, les cours d'eau, les fleuves ou les conduites partiellement remplies, comme celles utilisées dans les systèmes d'irrigation ou d'assainissement. Pour modéliser ces écoulements, il est nécessaire de diviser le domaine de calcul en deux sous-domaines distincts, séparés par une interface définie représentant la surface libre : un volume d'eau en dessous et un espace rempli d'air au-dessus.

IV .1 Les caractéristiques des canaux

IV.1.1 Paramètres Hydraulique

Les paramètres hydrauliques sont des indicateurs ou des caractéristiques qui illustrent le flux de l'eau dans un système hydraulique. Ils permettent d'analyser et d'évaluer les performances de ce système. Voici quelques-uns des paramètres hydrauliques les plus courants :

- **Débit (Q)** : Le débit représente le volume d'eau passant à travers un canal sur une période spécifique. En tant que paramètre fondamental en hydraulique, il permet d'évaluer la capacité d'un système à transporter de l'eau. Le débit est généralement mesuré en mètres cubes par seconde (m^3/s) ou en litres par seconde (l/s), reflétant ainsi l'efficacité du système hydraulique à gérer les flux d'eau.
- **Pente Hydraulique (i)** : La pente mesure l'inclinaison du terrain à travers lequel l'eau s'écoule, affectant ainsi la vitesse de l'écoulement. Ce facteur est crucial pour évaluer les propriétés et les performances d'un système hydraulique. Elle est habituellement exprimée en pourcentage (%).
- **Vitesse d'écoulement (V)** : La vitesse d'écoulement mesure la rapidité avec laquelle l'eau se déplace dans un conduit ou sur une surface, et est influencée par des facteurs comme la pente, la rugosité et les propriétés du fluide. Exprimée en mètres par seconde (m/s), elle est essentielle pour évaluer le comportement de l'eau dans un système hydraulique, affectant le transport des sédiments, la dispersion des polluants et la gestion des débits.
- **Coefficient de Manning (n)** : Le coefficient de Manning (n) mesure la résistance au flux de l'eau dans un conduit ou un cours d'eau, en fonction de la rugosité et de la forme du canal. Un coefficient plus élevé signifie une plus grande résistance et un écoulement plus lent, tandis qu'un coefficient plus bas indique une surface plus lisse et une moindre résistance et un autre facteur incluent des éléments tels que la rugosité, la texture, la forme et la composition de la surface.

Tableau IV.1 La valeur de la rugosité (*Chen et Cotton, 1986*).

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

- **La Pression (Pa)** : La pression est la force exercée par l'eau sur une surface, mesurée en Pascal ou en bar. À la surface libre d'un canal, elle est équivalente à la pression atmosphérique, soit environ 1 bar.
- **Poids volumique (γ_w)** : Le poids volumique (γ_w) est la mesure du poids de l'eau par unité de volume, exprimé (N/m^3).il est généralement d'environ ($9.81 \text{ kN}/m^3$) à température ambiante et pression atmosphérique normale.

IV.1.2 Paramètres géométrique :

- **Hauteur normal (h_n)** : La hauteur normale (h_n) est la profondeur de l'eau dans un canal avec un écoulement uniforme et permanent. Elle dépend du débit (Q), de la rugosité (K) et de la pente moyenne.

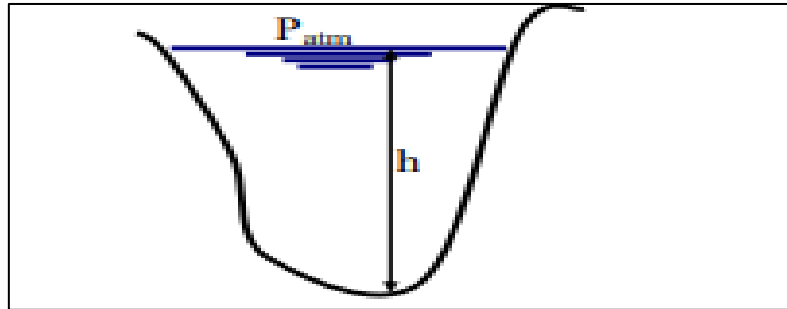


Figure IV .1 Représente Hauteur normal dans un canal.

- **Surface mouillée transversal (S)** : La surface mouillée transversale (S) correspond à la section transversale de l'eau en contact avec les parois d'un canal ou d'un conduit. Elle est cruciale pour les calculs hydrauliques, car elle affecte la capacité d'écoulement et la vitesse de l'eau. Cette surface est habituellement exprimée en mètres carrés (m^2).

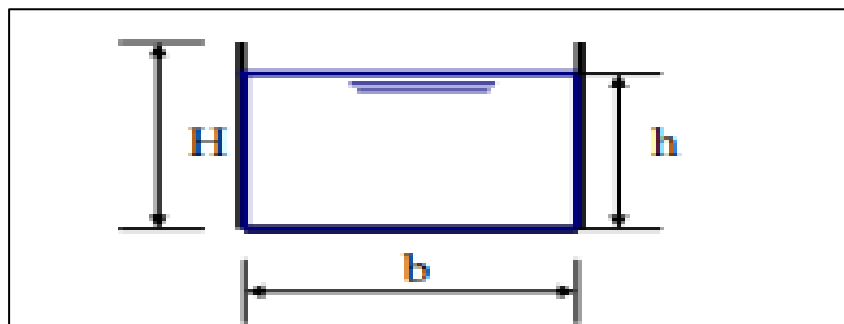


Figure IV.2 Représente surface mouillée dans un canal Rectangulaire.

- **Première mouillé (P)** : Le périmètre mouillé (P) est la longueur totale du contour de la section transversale d'un canal ou d'un conduit en contact avec l'eau.

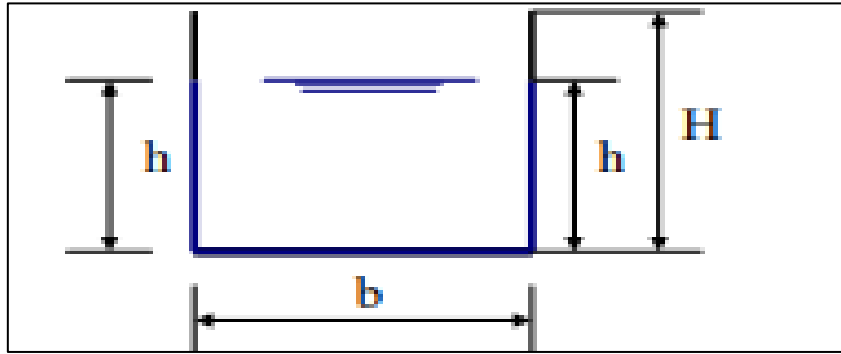


Figure IV.3 Représente première mouillé dans un canal Rectangulaire.

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

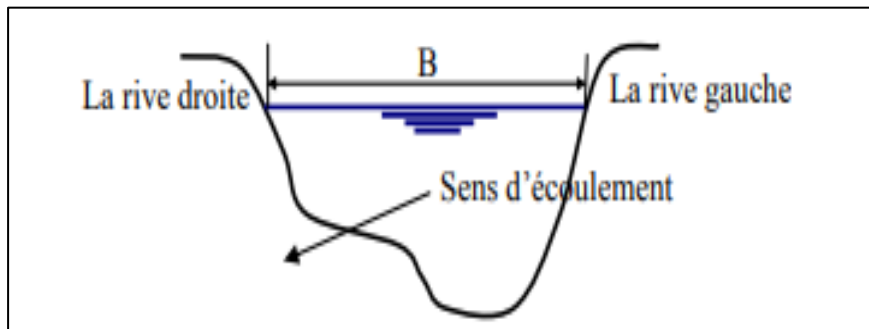


Figure IV.4 Représente largeur au miroir.

- **Rayon Hydraulique (R_h) :** Le rayon hydraulique (R_h) est un paramètre clé en hydraulique pour mesurer l'efficacité d'un écoulement dans un conduit ou un cours d'eau. Il est utilisé pour évaluer la résistance au frottement et la vitesse d'écoulement de l'eau. Un rayon hydraulique plus élevé indique une section transversale plus efficace pour le transport de l'eau. S'exprime comme la loi suivante :

$$R_H = \frac{S_m}{P_m} \quad (IV.1)$$

Avec :

S_m : Surface mouillée transversal (m^2).

P_m : Première mouillée (m).

- **Largueur au fond (b) :** la mesure horizontale de la largeur du fond d'un canal ou d'un conduit.

- **Pente Longitude (i)** : La pente longitudinale (i) est l'inclinaison du fond d'un canal ou d'un conduit le long de la direction de l'écoulement. Elle est mesurée comme le rapport entre le changement d'altitude sur la longueur du canal et la distance horizontale associée.
- **Lit mineur** : Désigne la zone habituellement occupée par l'eau dans un cours d'eau lorsque le débit est faible. Il correspond à la partie inférieure du lit du cours d'eau, délimitée par les rives principales et souvent en contact direct avec le fond du cours d'eau.
- **Lit majeur** : Est la zone que peut occuper un cours d'eau lors de crues importantes, délimitée par les plus grandes crues historiques. Il inclut les plaines inondables et sert de réservoir pour les eaux débordantes, en contraste avec le lit mineur, la zone occupée par l'eau en conditions normales.
- **Tirant d'eau** : Le tirant d'eau d'un canal à surface libre est la hauteur verticale de la colonne d'eau, mesurée depuis le fond du canal jusqu'à la surface libre de l'eau.

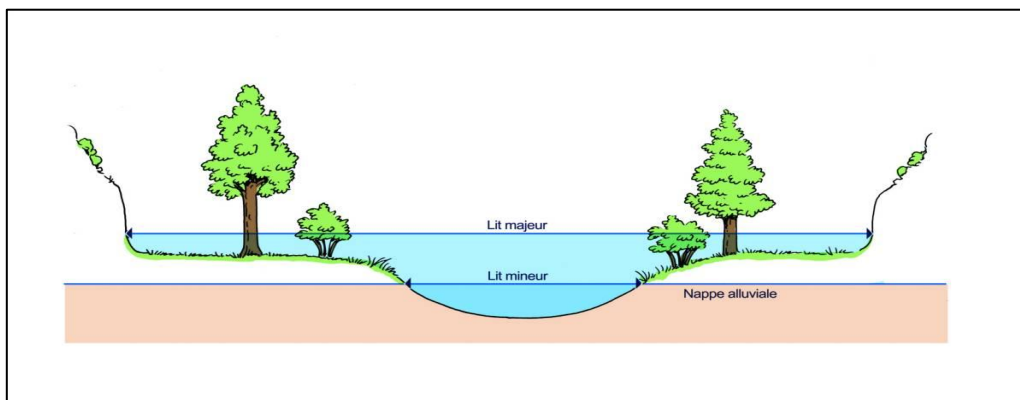


Figure IV.5 Représente lit mineur et Lit majeur (*source Wikipédia*).

IV.2 Cours d'eau : Constitue un cours d'eau un écoulement d'eaux courantes dans un lit naturel à l'origine, alimenté par une source et présentant un débit suffisant la majeure partie de l'année. L'écoulement peut ne pas être permanent compte tenu des conditions hydrologiques et géologiques locales (source : l'article L.215-7-1 dans le code de l'environnement et gestion des cours d'eau en France).

IV.2.1 Définition d'un canal : Un canal est une infrastructure artificielle pour le transport de l'eau, avec une surface libre en contact avec l'atmosphère. On peut trouver deux catégories de canaux sont :

- **Les canaux naturels** : Les canaux naturels sont des cours d'eau qui se forment spontanément sur ou sous la surface terrestre. Ils incluent les ruisseaux, torrents, rivières, fleuves et estuaires. Ces canaux présentent souvent des caractéristiques

géométriques et hydrauliques variées et irrégulières, résultant des processus naturels d'érosion et d'écoulement.

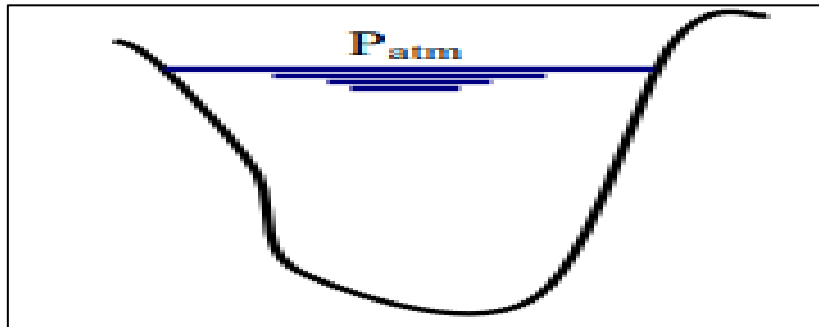


Figure IV.6 Représente schéma d'un canal naturel.

- **Les canaux artificiels** : Les cours d'eau artificiels, conçus par l'homme, servent à diriger l'eau vers des exutoires spécifiques. Ils comprennent des canaux ouverts, tels que ceux utilisés pour l'adduction, l'évacuation, l'irrigation et le drainage, ainsi que des canaux couverts, tels que tunnels hydrauliques, aqueducs, drains et égouts, où l'eau ne remplit pas entièrement la section. Ces canaux peuvent avoir des sections transversales variées, comme trapézoïdale ou rectangulaire, adaptées aux besoins fonctionnels et visant à optimiser leur performance.

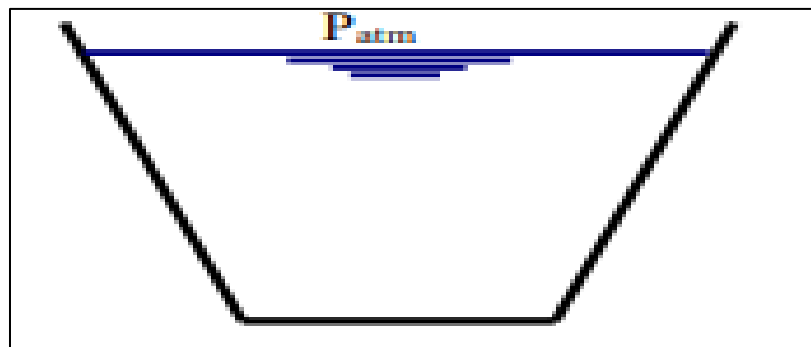


Figure IV.7 Canal découvert (surface libre).

IV.2.2 Les flux d'eau dans les canaux : L'écoulement dans les cours d'eau, qu'ils soient naturels comme les rivières et oueds, ou artificiels, est un écoulement à surface libre. Dans ces systèmes, l'eau s'écoule librement en étant exposée à l'air, contrairement aux conduites sous pression où l'eau est contenue par des parois rigides. Ce type d'écoulement est principalement régulé par la pente du lit du canal ou du cours d'eau. La force gravitationnelle est le moteur principal qui entraîne l'eau vers le bas le long de la pente, ce qui crée un flux de l'amont vers l'aval. La pente joue un rôle déterminant en influençant la différence de hauteur entre les points d'entrée et de sortie, ce qui impacte directement la vitesse de l'écoulement.

IV.2.3 Types écoulements dans les canaux :

IV.2.3.1 Par rapport l'espace :

- **L'écoulement Uniforme :** Un écoulement uniforme se caractérise par des paramètres constants tels que la profondeur d'eau, la vitesse et la section transversale le long du canal. La pente du fond est parallèle à la surface libre, et l'écoulement peut être permanent ou instationnaire selon les fluctuations temporelles de la profondeur.
- **L'écoulement non Uniforme :** Un écoulement non uniforme graduellement varié se distingue par des variations lentes et progressives de la profondeur et de la vitesse du fluide le long du canal. Les changements dans la hauteur d'eau(h) par rapport à la distance (x) sont minimales, permettant à l'écoulement d'être considéré comme presque uniforme sur de courtes sections, avec des variations de vitesse demeurant pratiquement constantes.

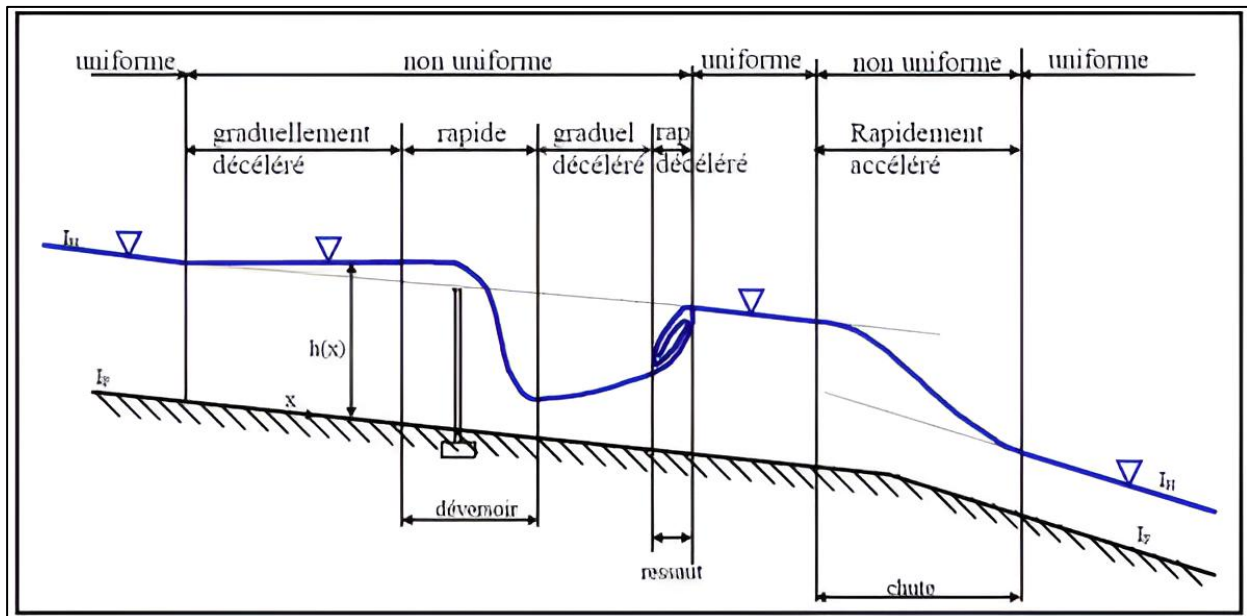


Figure IV.8 Schéma illustrant l'écoulement uniforme et non uniforme dans l'espace.
(Dr Habibi Brahim).

IV.2.3.2 Par rapport le temps :

- **L'écoulement permanent (stationnaire) :** Un écoulement est permanent lorsque la vitesse, la profondeur et le débit restent constants dans le temps et dans toutes les directions. Il n'y a pas de variation entre les sections du canal.

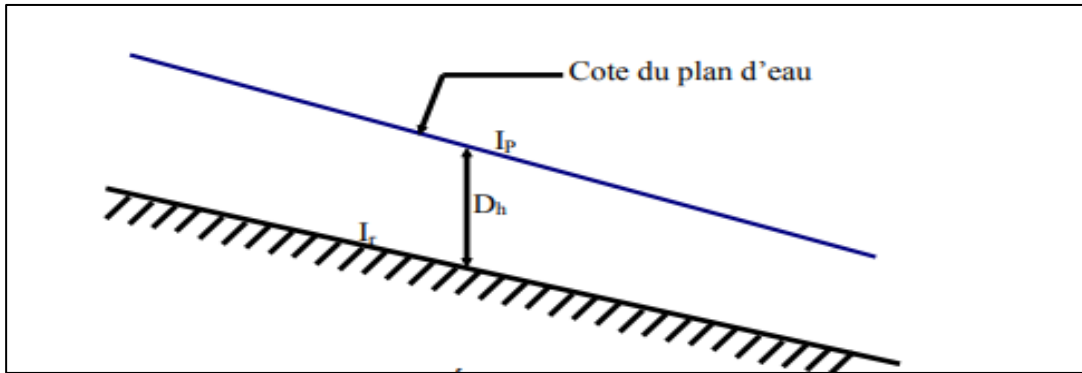


Figure IV.9 L'écoulement stationnaire (permanent). (M. HASSANE, 2009/2010).

- **L'écoulement non permanent (non stationnaire)** : Un écoulement est considéré comme non permanent lorsque la profondeur de l'eau (dh) ainsi que les autres paramètres comme les vitesses moyennes (V) et ponctuelles (U) varient dans le temps. Cela entraîne une non-constance du débit, celui-ci fluctuant au fil du temps.

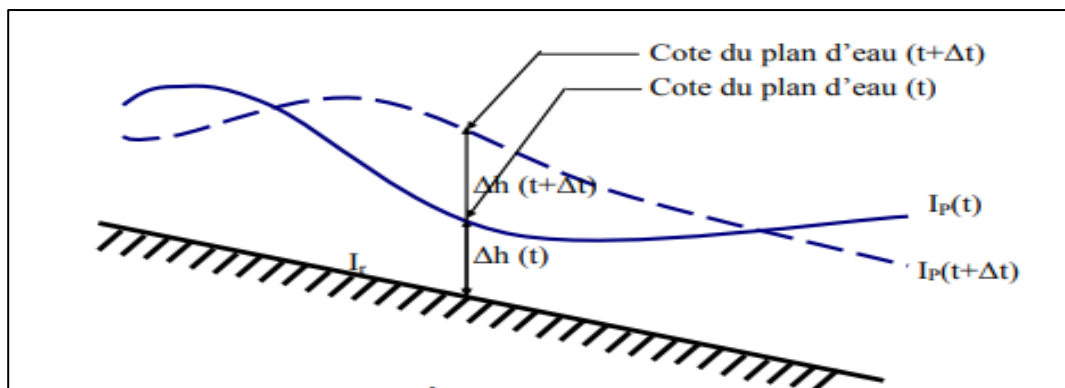


Figure IV.10 L'écoulement non stationnaire (non permanent). (M. HASSANE, 2009/2010).

IV.3 Régime d'écoulement

Un écoulement peut être classifié en différents types selon le nombre de Froude, qui évalue les forces d'inertie par rapport aux forces gravitationnelles. (Lancastre, 1996). Il est défini comme le rapport entre les forces gravitationnelles et les forces d'inertie telque :

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g Dh}} \quad (IV.2)$$

v : Vitesse moyenne de l'écoulement.

Dh : Profondeur hydraulique.

g : Accélération due à la gravité.

Le nombre de Froude permet de classifier les écoulements de la façon suivante :

- $Fr = 1$: le régime est critique (ou supercritique).
- $Fr > 1$: le régime est torrentiel.
- $Fr < 1$: le régime est fluvial (subcritique).

Dans la pratique, ces trois types d'écoulement sont couramment observés.

La classification en régime fluvial, torrentiel ou critique s'applique spécifiquement aux écoulements uniformes. Lorsque :

- $Y_n < Y_c$: l'écoulement uniforme est torrentiel.
- $Y_n > Y_c$: l'écoulement uniforme est fluvial.

Le nombre de Reynolds (Re) est un autre nombre adimensionnel utilisé en hydraulique, souvent en conjonction avec le nombre de Froude, pour caractériser le régime d'écoulement d'un fluide. Son utilité principale est de distinguer entre les différents types d'écoulements comme suit :

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

Ainsi, les effets combinés du nombre de Reynolds (Re) et du nombre de Froude (Fr) permettent de distinguer quatre régimes d'écoulement.

- $Fr < 1$ et $Re < 500$: écoulement fluvial-laminaire.
- $Fr > 1$ et $Re < 500$: écoulement torrentiel-laminaire.
- $Fr < 1$ et $Re > 2000$: écoulement fluvial-turbulent.
- $Fr > 1$ et $Re > 2000$: écoulement torrentiel-turbulent.

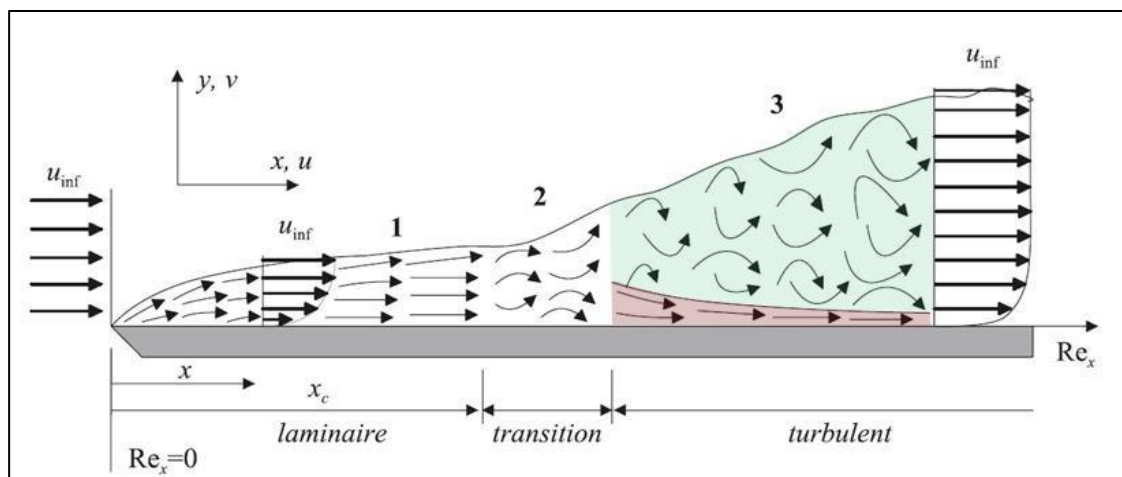


Figure IV.11 Schéma présentatif de différent type d'écoulement. (Source Wikipédia).

IV.3 Analyse et modélisation des cours d'eau non aménagés :

IV.3.1 Etat de l'oued à la zone d'étude

Les visites sur l'oued dans la zone d'étude ont révélé plusieurs facteurs qui aggravent les risques d'inondation dans la ville de Sidi Bel Abbas. Ces facteurs peuvent être résumés comme suit :

- L'absence de curage et de nettoyage régulier du cours d'eau.
- Les décharges publiques situées dans le lit de l'oued, entravant l'écoulement de l'eau.



Figure IV.1 Absence des berges.



Figure IV.14 Présence de végétations et déchets sur l'oued.

IV.3.2 Modélisation de l'écoulement :

La modélisation des écoulements permet d'analyser le comportement des cours d'eau lors de crues. Cette démarche utilise des outils informatiques et des données hydrologiques pour simuler le comportement des cours d'eau pendant des événements de crue extrême. En évaluant les risques d'inondation, la modélisation aide à concevoir des aménagements pour

réduire ces risques. Pour cette étude, nous utiliserons le logiciel HEC-RAS version (6.3.1) pour modéliser l'oued Mekerra, en prenant en compte un débit de projet de 652 m³/s.

IV.3.2.1 logiciel HEC-RAS :

HEC-RAS couvre divers aspects hydrologiques et hydrauliques, incluant l'analyse du ruissellement des précipitations, l'hydraulique fluviale, l'évaluation des dommages liés aux inondations, la simulation des écoulements permanents et non permanents, le transport des sédiments, ainsi que l'analyse de la qualité de l'eau. Le logiciel offre également des outils pour la conception des ouvrages hydrauliques (*Cheloufi & Foual, 2018*).

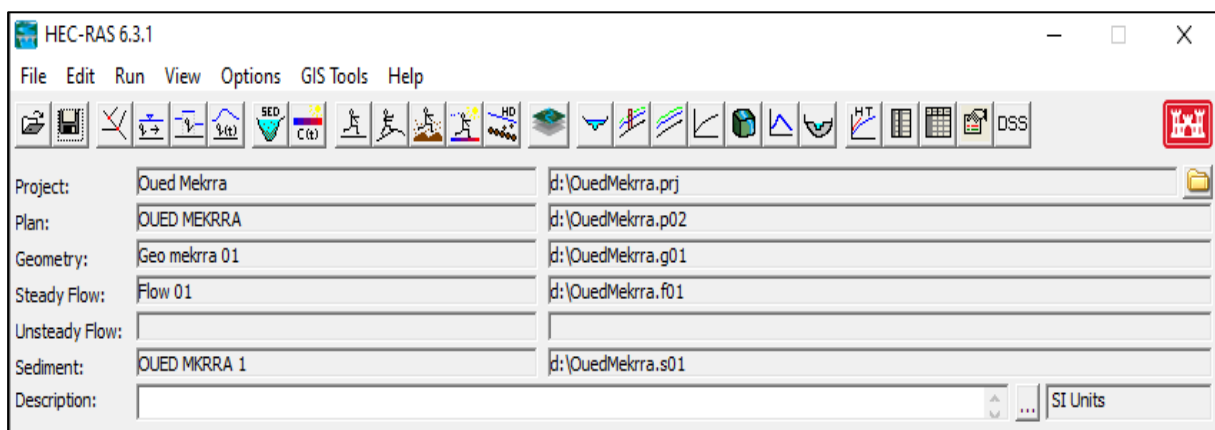


Figure IV.15 Plate-forme du logiciel HEC-RAS (6.3.1).

IV.3.2.2 Principe de fonctionnement de HEC-RAS :

HEC-RAS est un logiciel utilisé pour simuler les écoulements d'eau dans les rivières, canaux et plaines d'inondation. Il fonctionne principalement selon les principes suivants :

- **Modélisation des Écoulements** : Simule les flux d'eau en 1D ou 2D, permettant d'analyser les variations de débit, de hauteur et de vitesse dans les cours d'eau.
- **Analyse Hydraulique** : Calcule les profils d'eau et les variations de niveau en fonction de la topographie et des caractéristiques du lit du cours d'eau.
- **Simulation de Crues** : Permet de modéliser des scénarios de crue pour évaluer les zones inondables et les risques associés.
- **Évaluation des Inondations** : Estime les dommages potentiels et aide à concevoir des mesures de gestion des risques.
- **Analyse de la Qualité de l'Eau** : Inclut des outils pour l'évaluation du transport des sédiments et de la qualité de l'eau.

- **Conception des Ouvrages :** Aide à concevoir et évaluer des ouvrages hydrauliques tels que barrages et ponts.

IV.3.2.3 les étapes de simulation avec HEC-RAS :

- **Définition de la géométrie du modèle :**

La modélisation de la rivière implique la définition de la géométrie des oueds et des ouvrages hydrauliques. Le processus commence par employer le logiciel GLOBAL MAPPER pour générer un fichier terrain (tif) à partir des données topographiques (dxf). Ce fichier terrain a été ensuite importé dans HEC-RAS, accompagné d'un fichier de projection ESRI (.PRJ) contenant les informations sur le système de coordonnées spécifique à notre zone d'étude, téléchargé depuis le site 'Spatial Reference'. Ce fichier est essentiel pour accéder aux cartes de base dans RAS Mapper.

- **Création du réseau de terrain irrégulier (TIN) :**

Nous employons le logiciel ArcGIS pour créer un modèle numérique de terrain (MNT) basé sur un échantillonnage irrégulier semi-dirigé. Ce modèle est représenté sous forme d'un réseau triangulaire irrégulier, ou Triangular Irregular Network (TIN). Avec ce TIN, nous pouvons visualiser les écoulements des cours d'eau dans RAS Mapper et produire des cartes détaillées montrant la profondeur de l'eau, la vitesse du courant, ainsi que d'autres caractéristiques importantes.

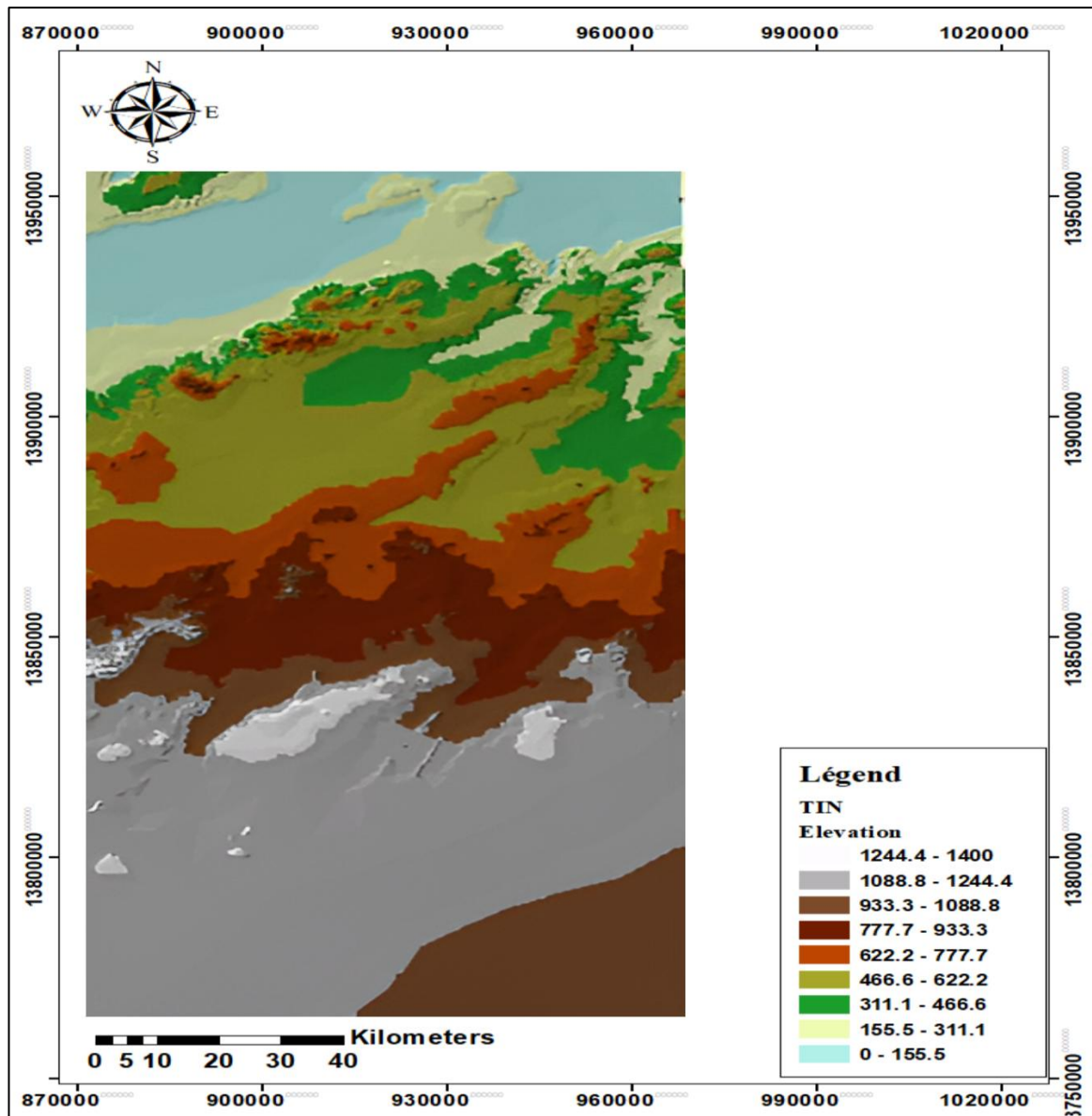


Figure IV.15 Réseaux de terrain irrégulier (TIN).

- Après avoir créé notre réseau triangulaire irrégulier (TIN), nous l'exportons en incluant un fichier de projection ESRI (prj).

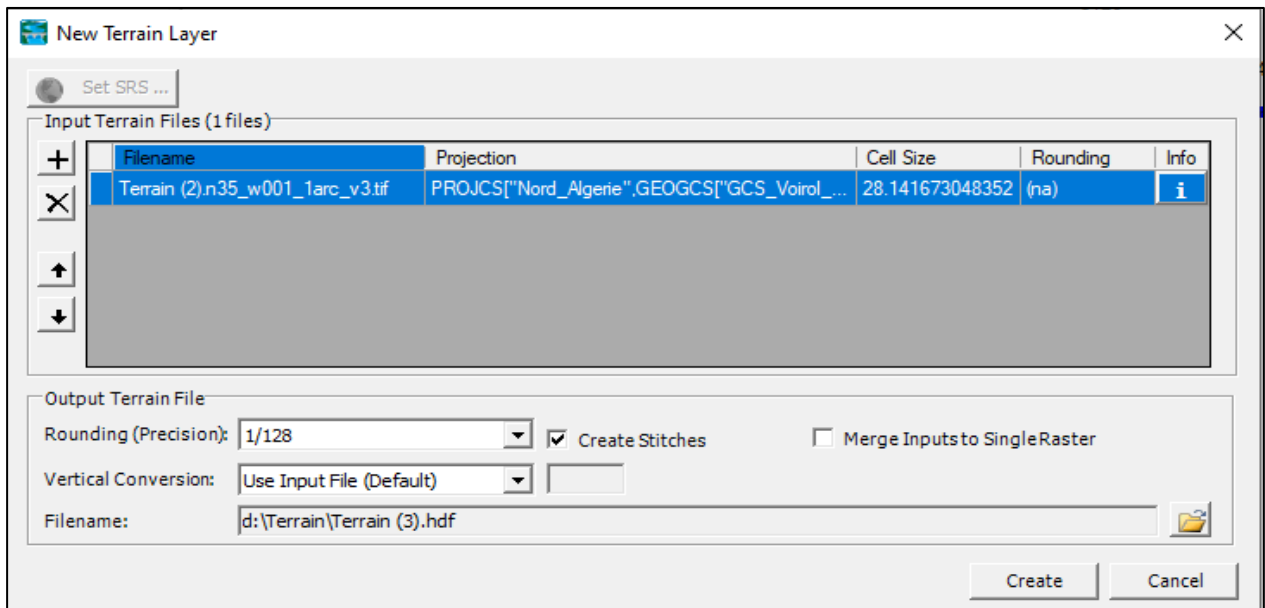


Figure IV.16 Intégration du fichier de projection.

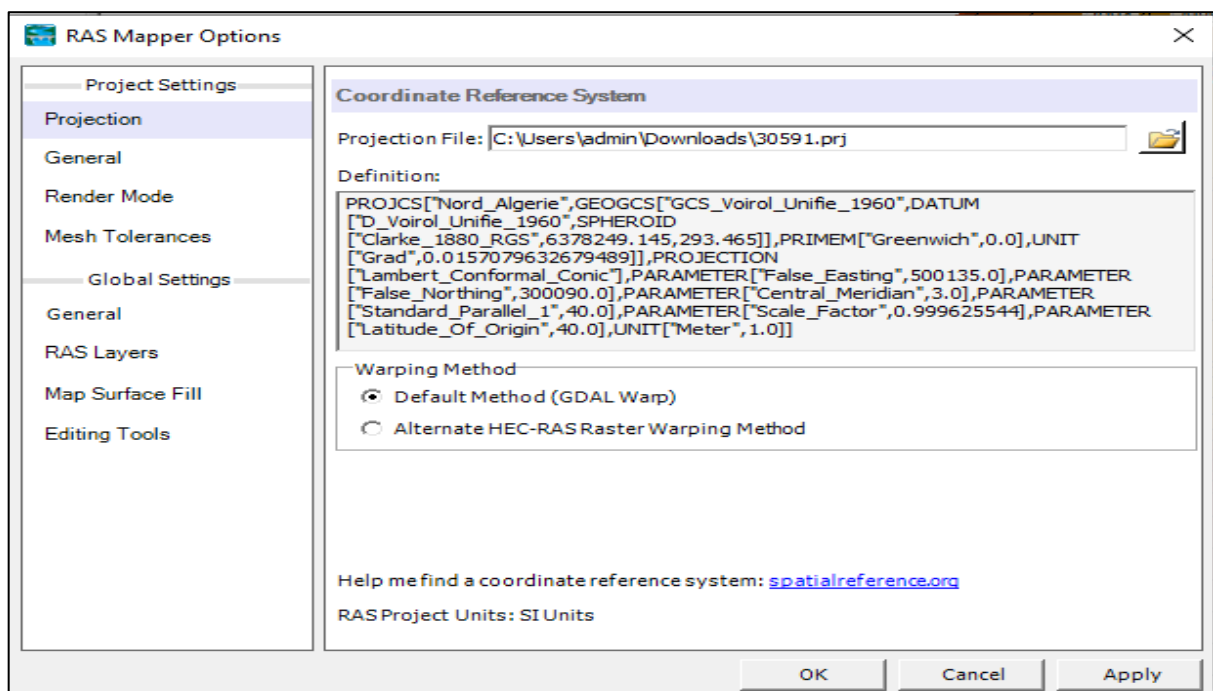


Figure IV.17 Intégration du fichier de projection.

- Après avoir importé les données avec succès dans HEC-RAS, nous avons commencé par tracer l'axe de la rivière, ainsi que les lits mineur et majeur, et à définir les sections transversales dans RAS Mapper.

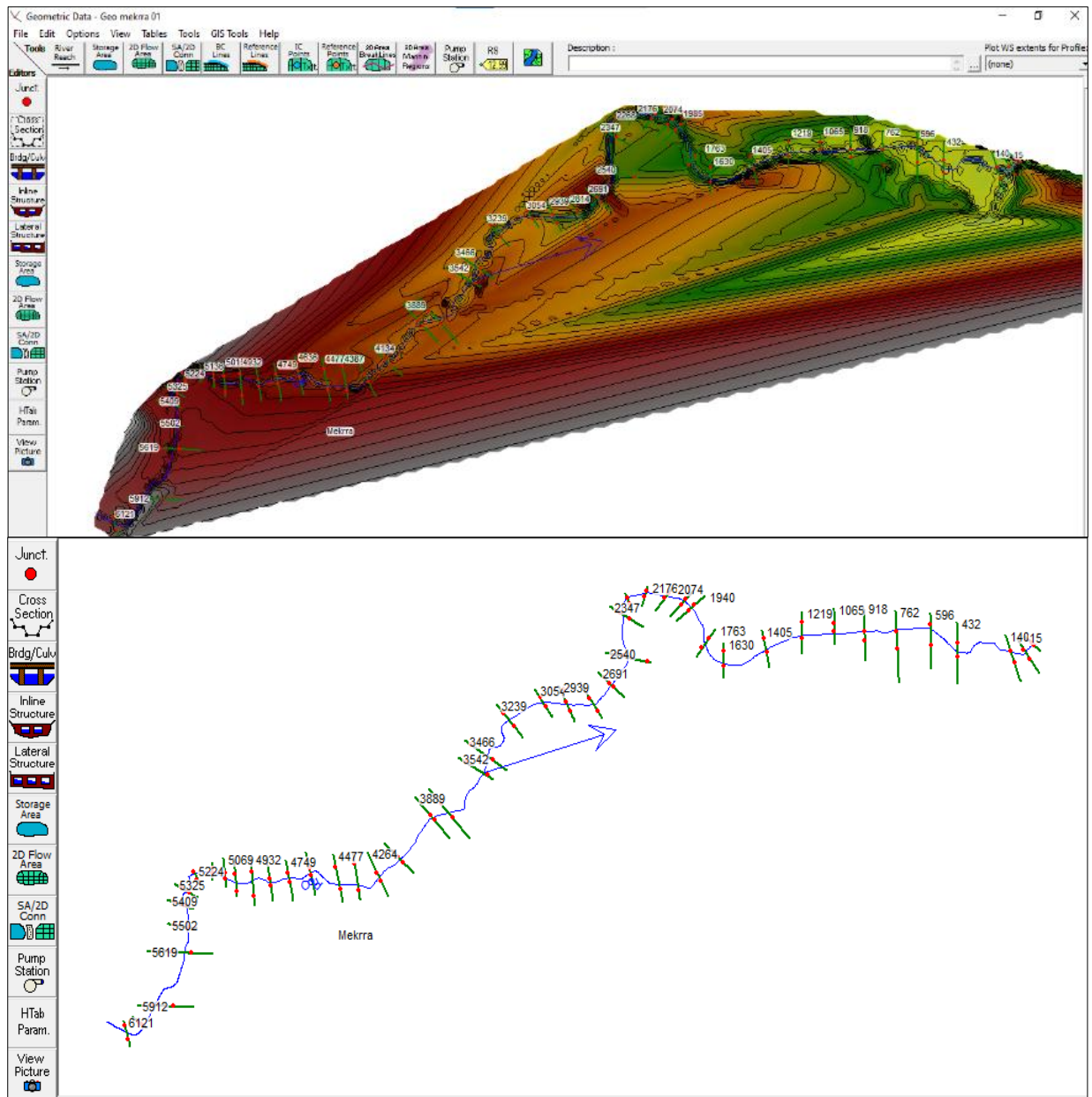


Figure IV.18 Tracé de l'oued et des sections transversales associées.

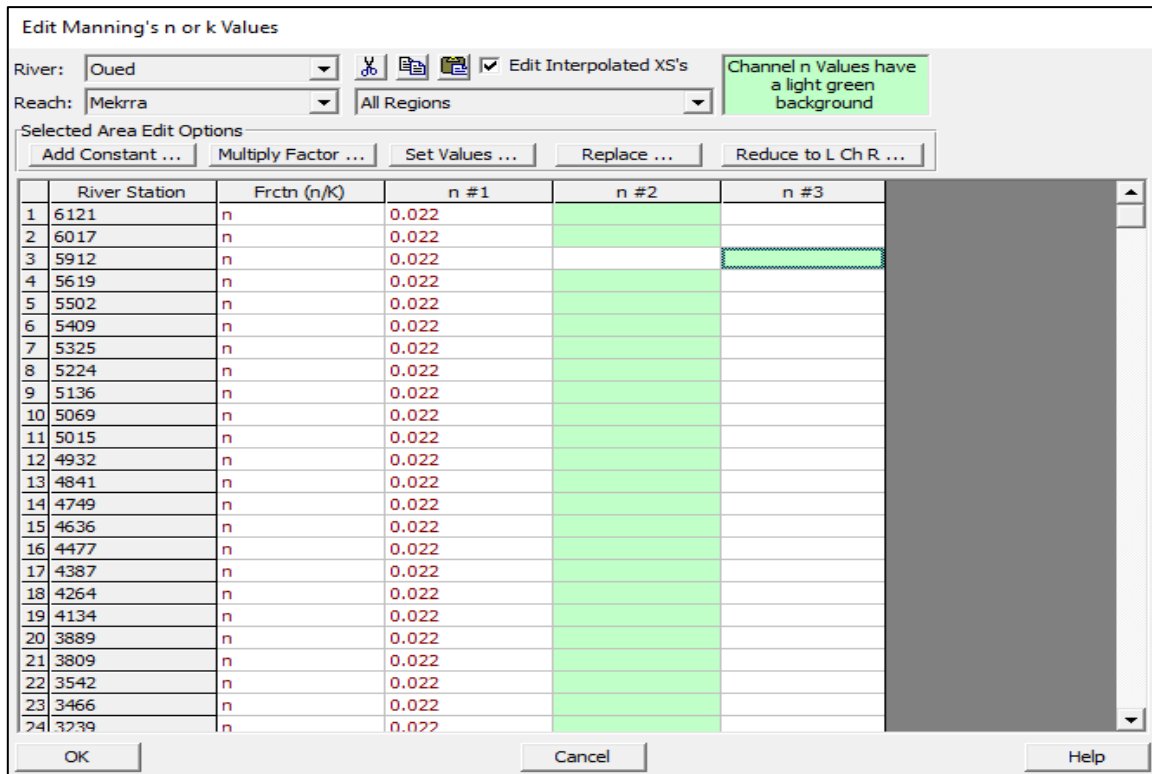


Figure IV.19 Insertion des valeurs de Manning pour le terrain naturel.

- **Données hydrométriques et conditions aux limites (Boundary conditions) :**
Après avoir enregistré les données géométriques de chaque section, la prochaine étape de la modélisation hydraulique avec HEC-RAS consiste à définir les débits d'entrée et à établir toutes les conditions aux limites requises pour calculer les profils de la surface de l'eau pour chaque section du réseau fluvial.
 - Les conditions aux limites jouent un rôle crucial dans la modélisation hydraulique. En effet, pour simuler un écoulement permanent, il est essentiel d'établir des conditions aux limites à l'amont et à l'aval (ou les deux) afin de déterminer l'élévation de la surface de l'eau aux extrémités de chaque segment de cours d'eau. Cela permet à HEC-RAS de commencer les calculs hydrauliques.
 - Dans notre étude, étant donné que l'écoulement est en régime mixte, il est nécessaire d'introduire des conditions aux limites aux extrémités amont et aval. Nous avons choisi la profondeur normale comme condition aux limites, ce qui implique l'introduction d'une pente d'énergie. HEC-RAS utilise cette valeur pour déterminer la profondeur en appliquant l'équation de Manning. Pour estimer cette pente d'énergie, nous mesurons la pente du tronçon situé en aval de notre tronçon modélisé.

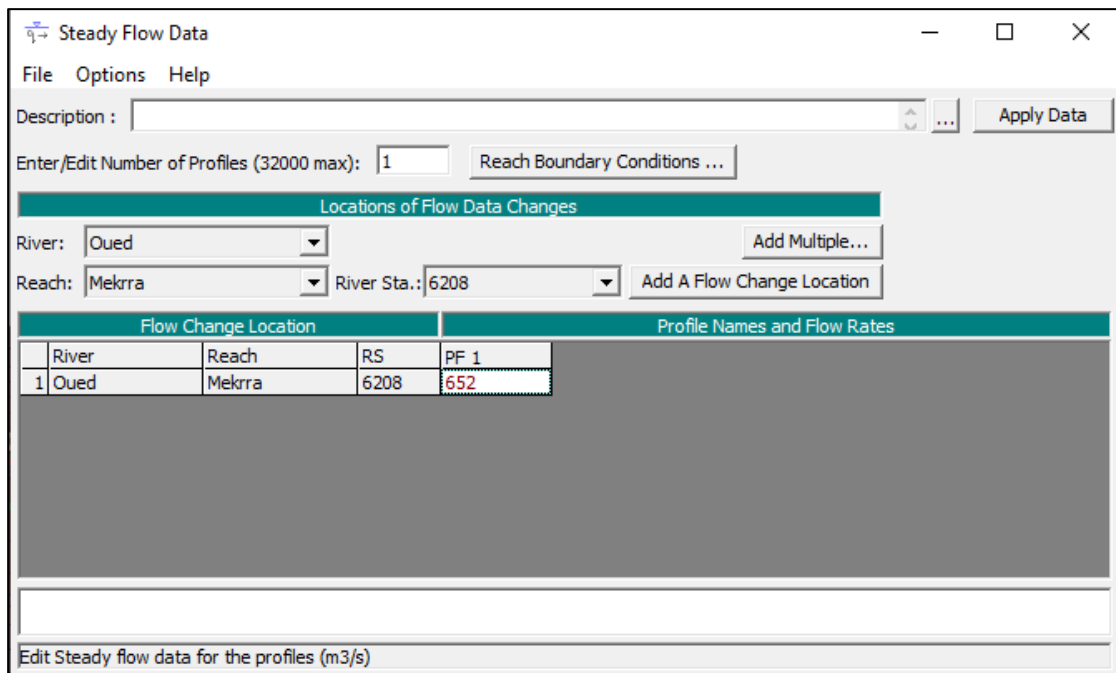


Figure IV.20 Insertion du débit de projet (débit centennial).

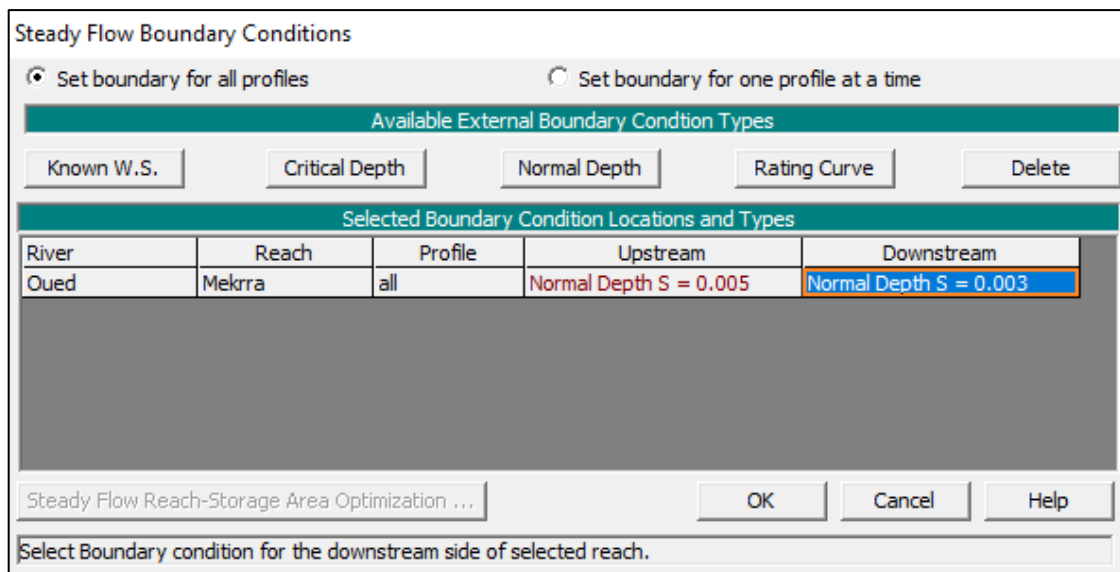


Figure IV.21 Insertion des conditions aux limites.

- Simulation** : Une fois les données géométriques et hydrométriques entrées et les conditions aux limites définies, il est crucial de sélectionner le régime d'écoulement approprié parmi les options disponibles : fluvial, torrentiel ou mixte. Dans notre cas, nous optons pour un régime mixte avant de lancer la simulation. Le débit centennial de projet est de 652 m³/s.

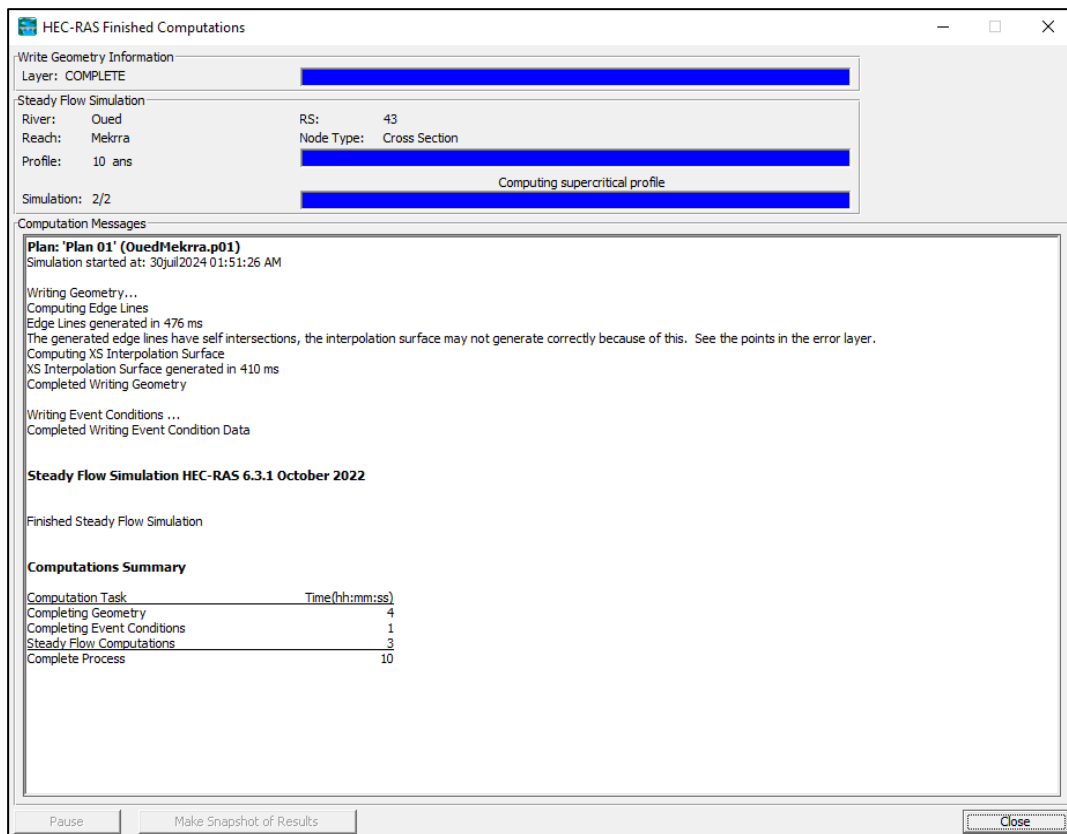


Figure IV.22 Simulation réussie.

IV.3.3 Résultats de la simulation d'écoulement :

Les résultats de la simulation avec HEC-RAS fournissent une vue détaillée de l'écoulement constant dans le système fluvial ou hydraulique étudié. L'entrée des données géométriques, des débits de crue pour diverses périodes de retour et des conditions aux limites a permis de réaliser les calculs nécessaires et de produire plusieurs types de résultats.

Ceux-ci incluent des représentations en coupe du tronçon simulé, les niveaux d'eau associés à chaque période de retour le long des profils, une visualisation tridimensionnelle des niveaux d'eau dans la zone d'étude, ainsi que la courbe de tarage. Ces informations sont cruciales pour évaluer les risques d'inondation et comprendre la répartition des vitesses et des niveaux d'eau dans le réseau hydrographique.

- **Profil en long :**

La ligne d'eau fournit une vue en profil du tronçon d'étude, montrant le niveau et la surface de l'eau de l'Oued, ainsi que le niveau d'eau pour une période de retour centennale. Cette représentation met en évidence que le comportement des crues est particulièrement sensible aux irrégularités topographiques.

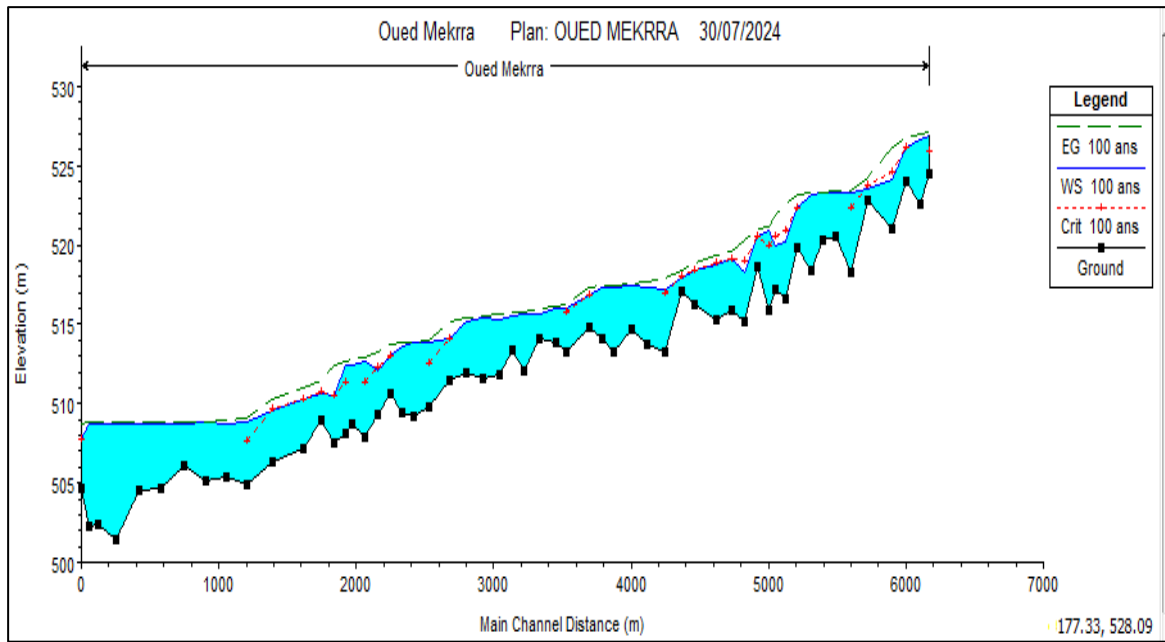


Figure IV.23 Profil en long du cours d'eau à l'état naturel pour une crue centennale.

- **Représentation tridimensionnelle (3D) des tronçons modélisés :**

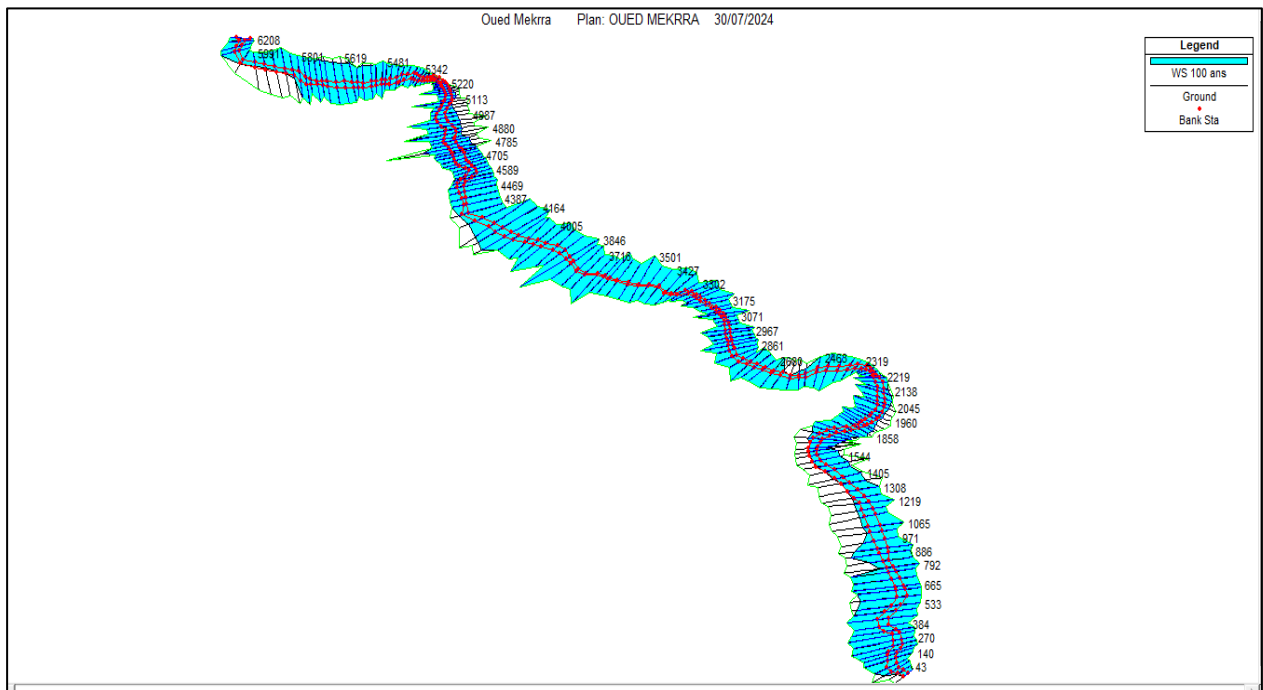


Figure IV.24 Vue 3D de l'Oued Mekerra.

- **Présentation de Courbe de tarage d'oued Mekerra :**

En utilisant HEC-RAS, nous avons produit un graphique qui montre comment la hauteur d'eau varie en fonction du débit exprimé en m³/s.

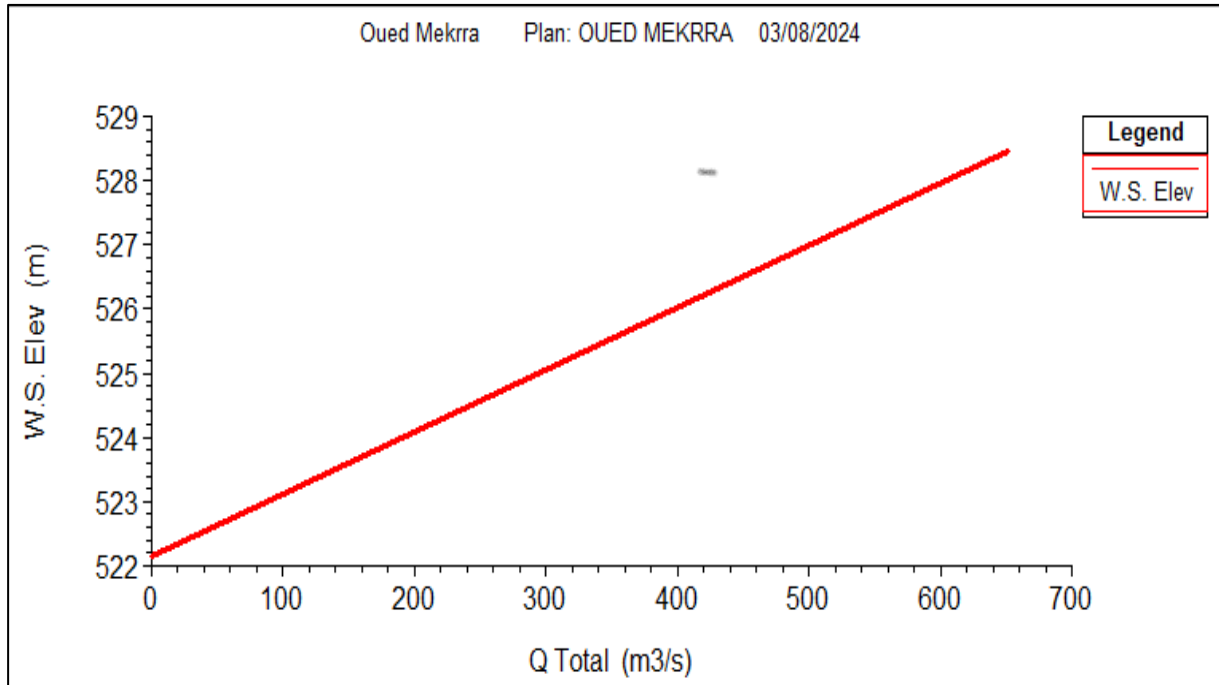


Figure IV.25 Courbe de tarage du tronçon modélisé de l'Oued Mekerra.

- **Les profils en travers :**

En utilisant l'option d'affichage des résultats par profil transversal, nous avons pu obtenir des détails approfondis à chaque point le long du tracé du cours d'eau. Cette visualisation a révélé que presque toutes les sections du cours d'eau sont susceptibles d'être submergées.

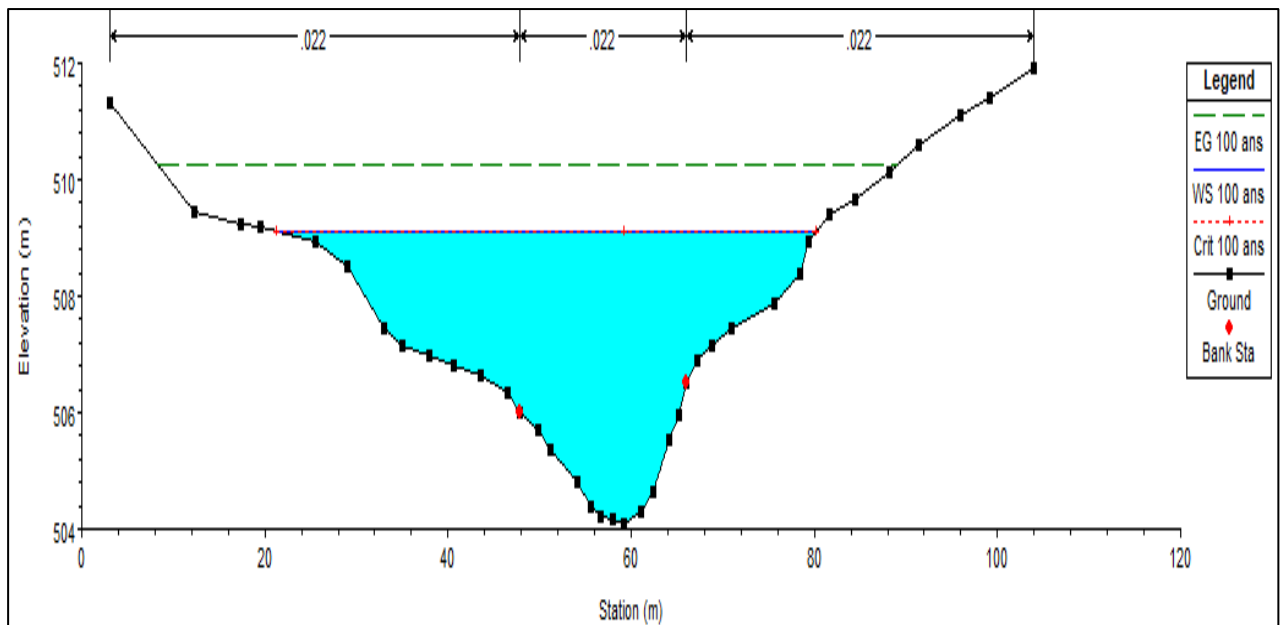


Figure IV.26 Résultat pour la section 15.

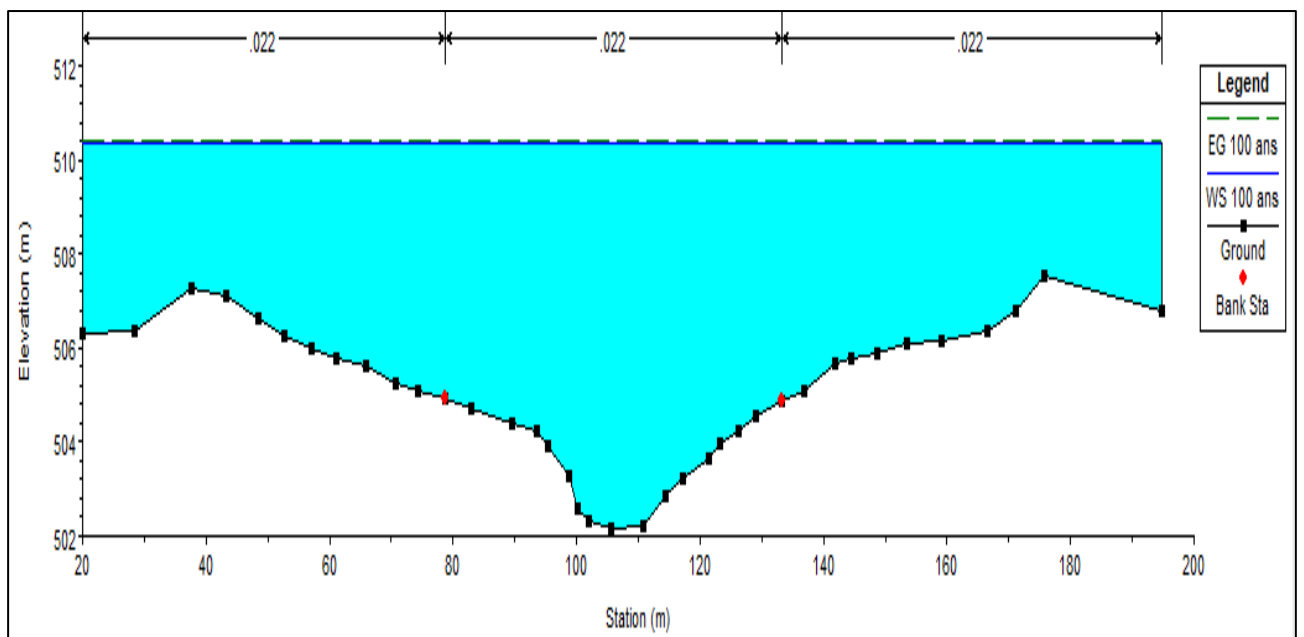


Figure IV.27 Résultat pour la section 140.

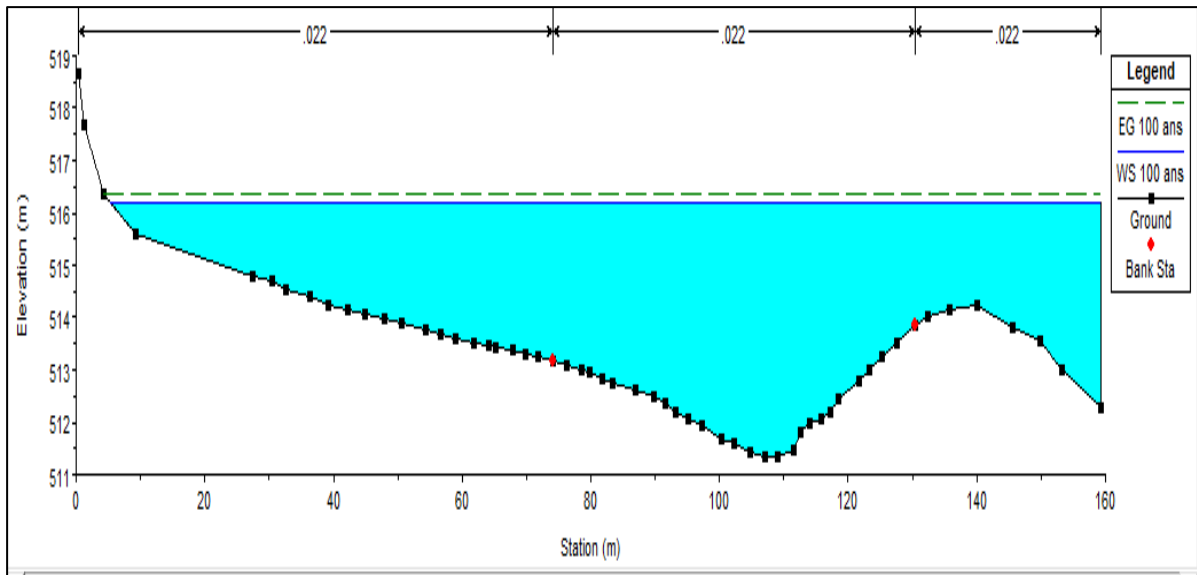


Figure IV.28 Résultat pour la Section 2939.

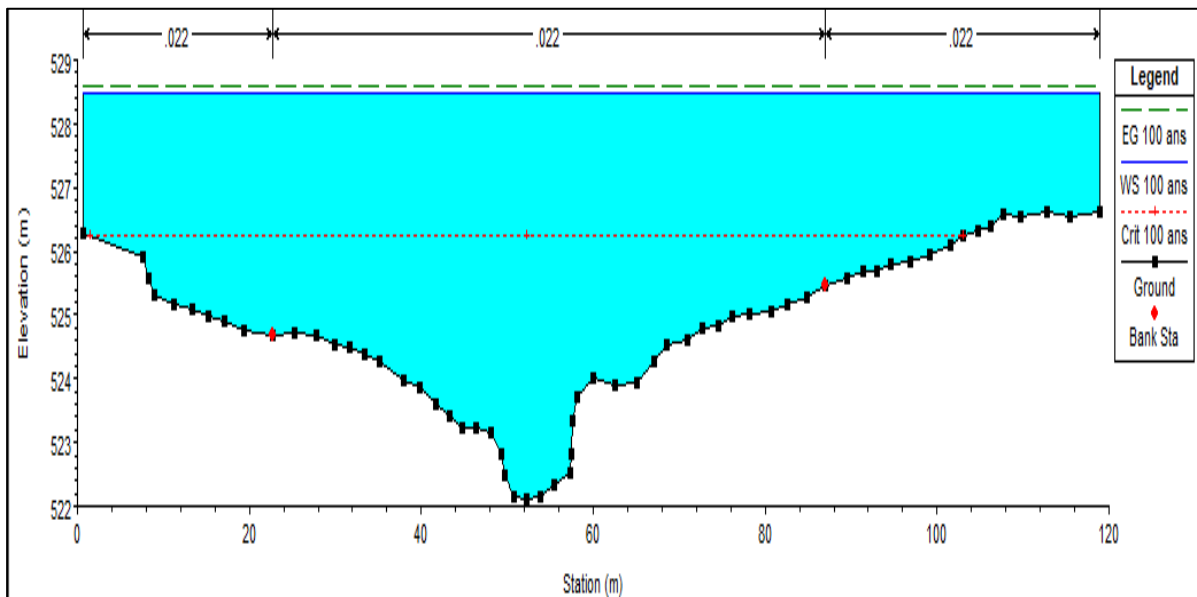


Figure IV.29 Résultat pour la section 6121.

- **Variation de vitesse d'écoulement**

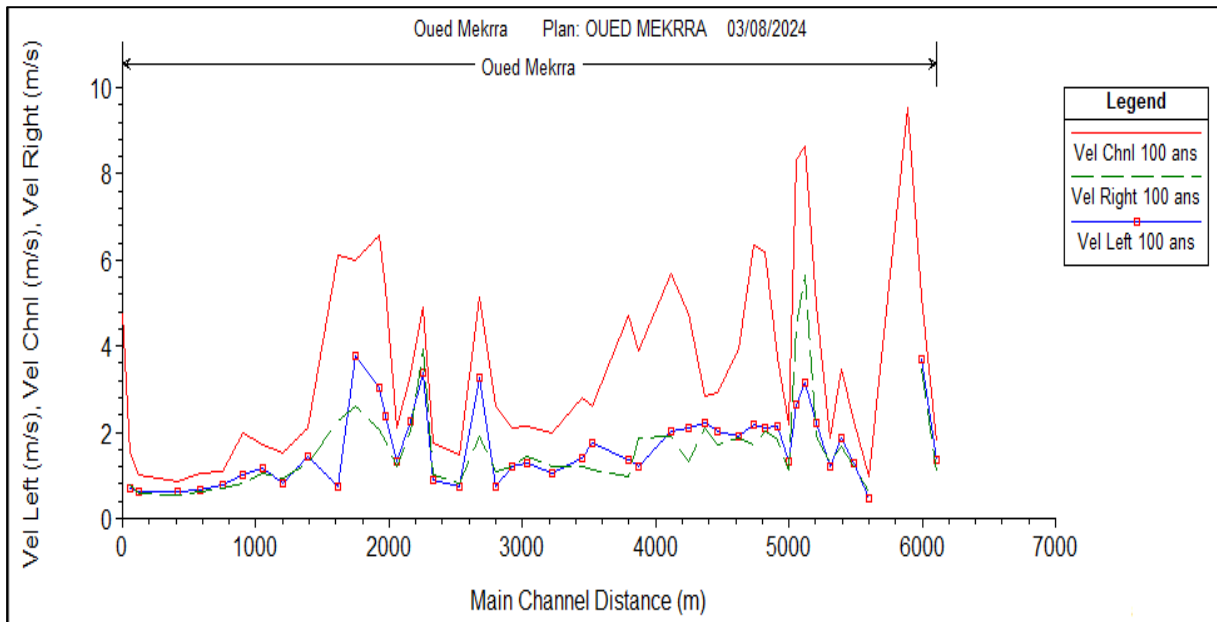


Figure IV.30 Variations de la vitesse d'écoulement totale en fonction de la distance.

- **Variation de nombre de Froude**

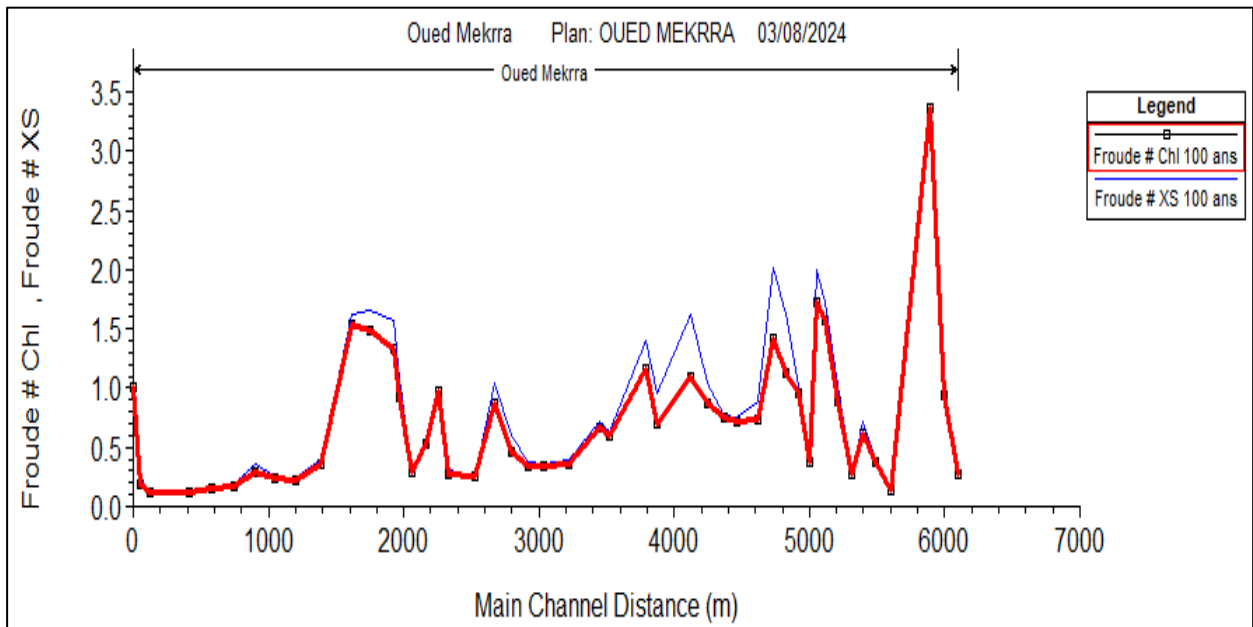


Figure IV.31 Variation du nombre de Froude en fonction de la distance.

Le logiciel HEC-RAS fournit des tableaux récapitulatifs contenant les paramètres hydrauliques pour toutes les sections transversales, avec les informations suivantes :

- **Min Ch. El** : Altitude du radier du canal (m)
- **W.S Elev** : Altitude du plan d'eau calculé (m)
- **Crit W.S** : Altitude du plan d'eau critique (m)
- **E.G Elev** : Altitude de la ligne d'énergie (m)
- **E.G Slope** : Pente de la ligne d'énergie (m/m)
- **Vel Ch** : Vitesse d'écoulement (m/s)
- **Flow Area** : Section mouillée (m²)
- **Top Width** : Largeur au miroir (m)
- **Froude #Chl** : Nombre de Froude

Tableau IV.2 Principaux paramètres hydrauliques pour toutes les stations d'Oued Mekerra
(Source : Logiciel HEC-RAS).

River Station	Min Ch EL	W.S. Elev	Crit W. S	E.G Elev	E.G Slope	Vel Ch	Flow Area	Top Width	Froude #Chl
/	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)	/
6121	522.14	528.47	526.24	528.61	0.00022	1.78	403.6	112.96	0.27
6017	524.06	527.49	527.49	528.47	0.00299	5.14	155.7	73.25	0.94
5912	521.13	522.67	523.68	527.3	0.05742	9.53	68.43	83.57	3.36
5619	518.33	524.99	521.52	525.03	5.1E-05	0.97	830.13	257.2	0.14
5502	520.06	524.77		525	0.00043	2.24	335.26	128.53	0.37
5409	520.09	524.4		524.91	0.00123	3.45	230.85	118.58	0.61
5325	518.23	524.62		524.76	0.0002	1.89	418.53	118.25	0.27
5224	519.13	523.43	523.43	524.61	0.00259	4.94	143.66	63.42	0.89
5136	516.1	520.72	521.81	524.02	0.00859	8.64	85.77	38.62	1.57
5069	516.25	520.14	521.17	523.34	0.01084	8.34	88.52	54.87	1.72
5015	514.25	521.46	519.91	521.68	0.00043	2.16	323	109.38	0.37
4932	518.14	520.88	520.88	521.55	0.00379	3.72	185.14	142.89	0.96
4841	515.16	519.37	519.91	521.09	0.00429	6.18	133.63	102.75	1.13
4749	515.31	518.65	519.29	520.55	0.00752	6.35	122.01	130.18	1.41
4636	515.31	519.2	519.19	519.72	0.0018	3.92	245.56	188.92	0.73
4477	516.25	518.99		519.36	0.00204	2.91	252.8	193.48	0.71
4387	517.05	518.8		519.16	0.00237	2.83	248.45	196.69	0.75
4264	513.27	517.71	517.71	518.79	0.00259	4.76	151.35	75	0.88
4134	513.53	517.02	517.44	518.35	0.00417	5.66	159.94	157.17	1.1
3889	513.18	517.11	517.11	517.64	0.00158	3.88	257.07	221.97	0.69
3809	514.08	516.25	516.68	517.36	0.00546	4.69	143.25	126.35	1.17
3542	513.19	516.48	515.99	516.81	0.00136	2.62	264.34	157.06	0.6
3466	513.49	516.3		516.69	0.0017	2.8	245.55	167.17	0.66
3239	512.03	516.29		516.46	0.0004	2	393.87	185.29	0.35
3054	511.09	516.21		516.39	0.00035	2.12	373.27	136.07	0.34
2939	511.33	516.18		516.35	0.00034	2.11	397.18	165.95	0.34
2814	511.42	515.94		516.27	0.00069	2.62	281.7	148.81	0.46
2691	510.89	514.94	514.94	516.05	0.00234	5.12	155.9	76.85	0.86
2540	509.41	514.8	512.66	514.91	0.0002	1.48	454.93	141.48	0.25

2347	509.23	514.75		514.87	0.0002	1.77	470.66	175.8	0.26
2268	510.57	513.75	513.75	514.74	0.00331	4.91	152.33	74.11	0.98
2176	509.12	513.94	513.1	514.38	0.00087	3.34	239.01	89.09	0.54
2074	507.35	514.1		514.25	0.00023	2.11	409.56	129.12	0.29
1985	508.35	512.7	512.7	514.08	0.00282	5.34	132.36	55.07	0.93
1940	508.11	511.7	512.4	513.82	0.00648	6.58	106.72	61.46	1.34
1763	508.54	510.73	511.25	512.33	0.00876	5.99	125.16	108.28	1.48
1630	506.08	509.2	509.92	511.09	0.00963	6.11	107.97	74.43	1.54
1405	506.15	510.42	509.27	510.61	0.00043	2.11	363.72	150.34	0.37
1219	504.4	510.44		510.54	0.00014	1.51	510.69	160.7	0.22
1065	504.1	510.41		510.52	0.00016	1.72	482.5	144.53	0.24
918	505.1	510.35		510.48	0.00023	1.97	476.45	218.47	0.28
762	506.09	510.39		510.43	9.6E-05	1.08	743.85	286.57	0.18
596	504.58	510.38		510.42	6.5E-05	1.04	751.85	229.81	0.15
432	504.11	510.38		510.41	3.6E-05	0.84	957.77	256.34	0.12
140	502.17	510.36		510.4	0.00004	1.02	828.49	205.96	0.13
69	502.23	510.29		510.39	9.3E-05	1.51	545.82	150.9	0.19
15	504.1	509.11	509.11	510.27	0.00373	4.76	136.87	59.51	1

IV 3.3.1 Interprétation des résultats :

Nous observons que le niveau d'eau de l'oued Mekerra déborde dans la plupart des sections. Compte tenu du niveau d'eau dans toutes les sections transversales de l'oued, il apparaît que ce dernier est inondé sur toute sa longueur.

D'après les résultats présentés dans le tableau, nous constatons que :

- La vitesse d'écoulement fluctue entre 0.84 et 9.53 m/s.
- Le nombre de Froude varie entre 0,14 et 3,36 indiquant une variation du régime d'écoulement tout le long de l'oued.

D'après la simulation, nous constatons que les riverains installés le long de l'oued Mekerra, dans la ville de Sidi Bel Abbés, sont vulnérables aux risques d'inondation. Notre objectif dans cette partie est de délimiter les zones inondables. Il est donc crucial de prévenir ces risques par des aménagements hydrauliques adéquats.

IV.4 La cartographie des risques d'inondation

IV.4.1 Carte des profondeurs

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

- Submersion faible : profondeur inférieure à 0,5 mètre
- Submersion moyenne : profondeur comprise entre 0,5 et 1 mètre
- Submersion élevée : profondeur dépassant 1 mètre (*Graguid, 2011*)

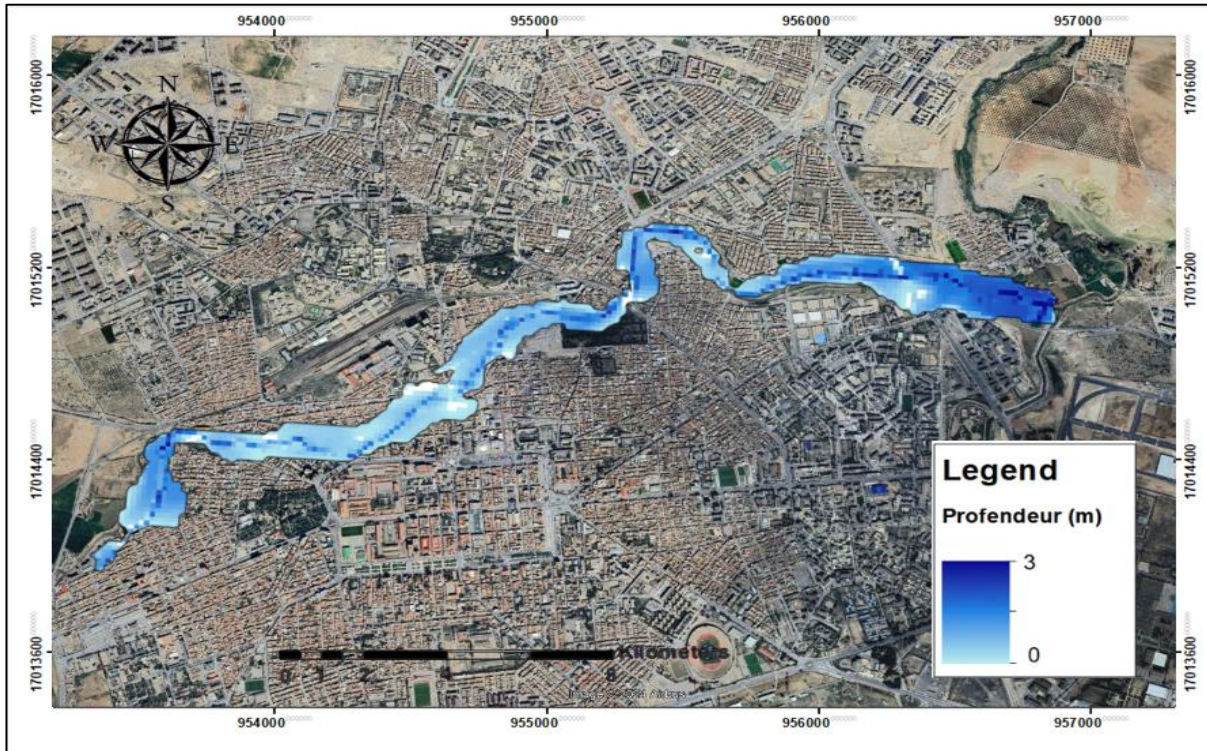


Figure IV.32 : Carte des profondeurs pour une crue centennale d'oued Mekerra.

- **Interprétation**

Selon la carte des profondeurs d'eau obtenue, la hauteur de l'eau varie de 0,5 à 3 mètres. Les zones les plus exposées au risque de submersion se situent du côté du centre-ville et en aval de l'oued Mekerra. La concentration des zones à risque près de la confluence souligne la nécessité d'une planification urbaine adaptée et de stratégies d'atténuation pour minimiser les impacts potentiels de la submersion. Cette démarche est fondamentale pour élaborer des politiques publiques garantissant la sécurité des communautés riveraines et promouvant un développement durable dans la région.

IV4.2 Carte des vitesses d'écoulement :

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

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

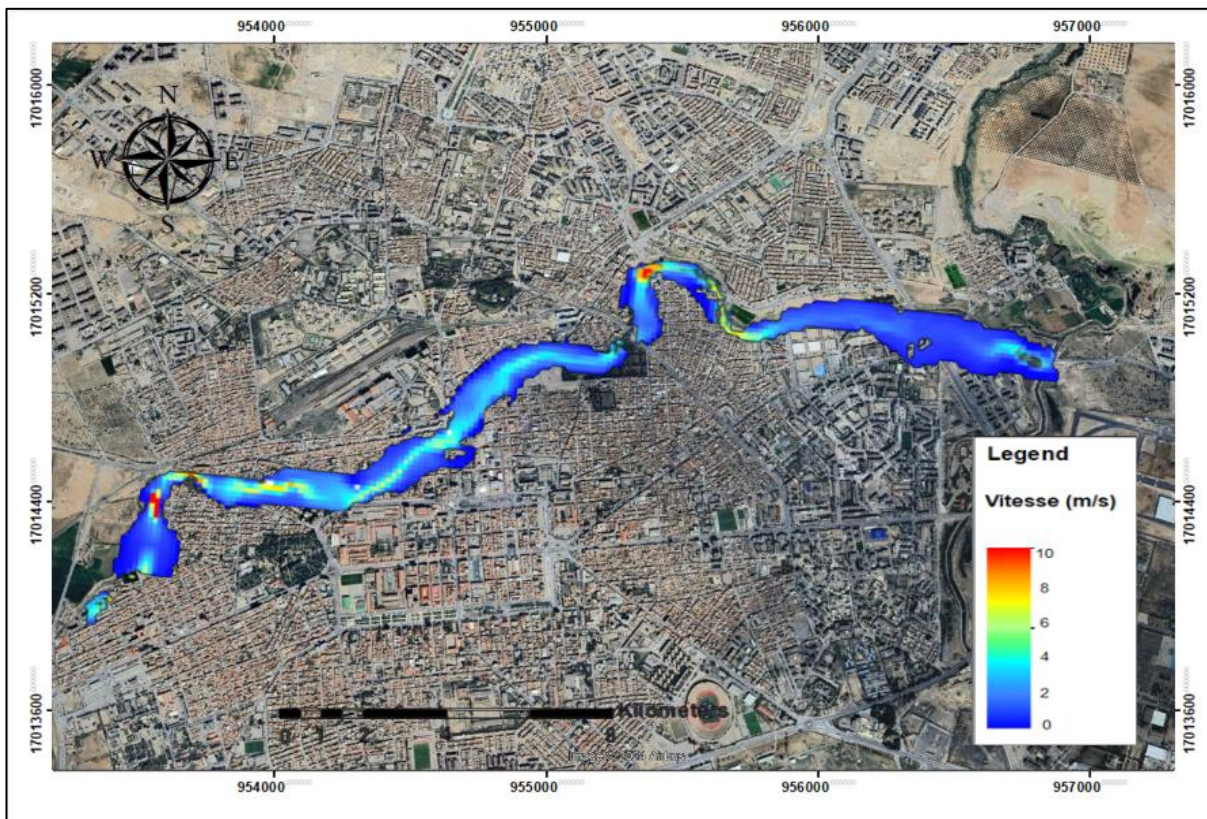


Figure IV.33 Carte des vitesses d'eau pour une crue centennale de l'oued Mekerra.

IV4.3 Classes d'aléa

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

Tableau IV.3 Les critères d'évaluation de l'intensité d'aléa inondation (DDT, 2012).

	Faible $V < 0.2 \text{ m/s}$	Moyenne $0.2 \text{ m/s} < V < 0.5 \text{ m/s}$	Forte $V > 0.5 \text{ m/s}$
$H < 0.5 \text{ m}$	Faible	Moyen	Fort
$0.5 \text{ m} < H < 1 \text{ m}$	Moyen	Moyen	Fort
$1.0 \text{ m} < H < 2.0 \text{ m}$	Fort	Fort	Fort
$H > 2.0 \text{ m}$	Très fort	Très fort	Très fort

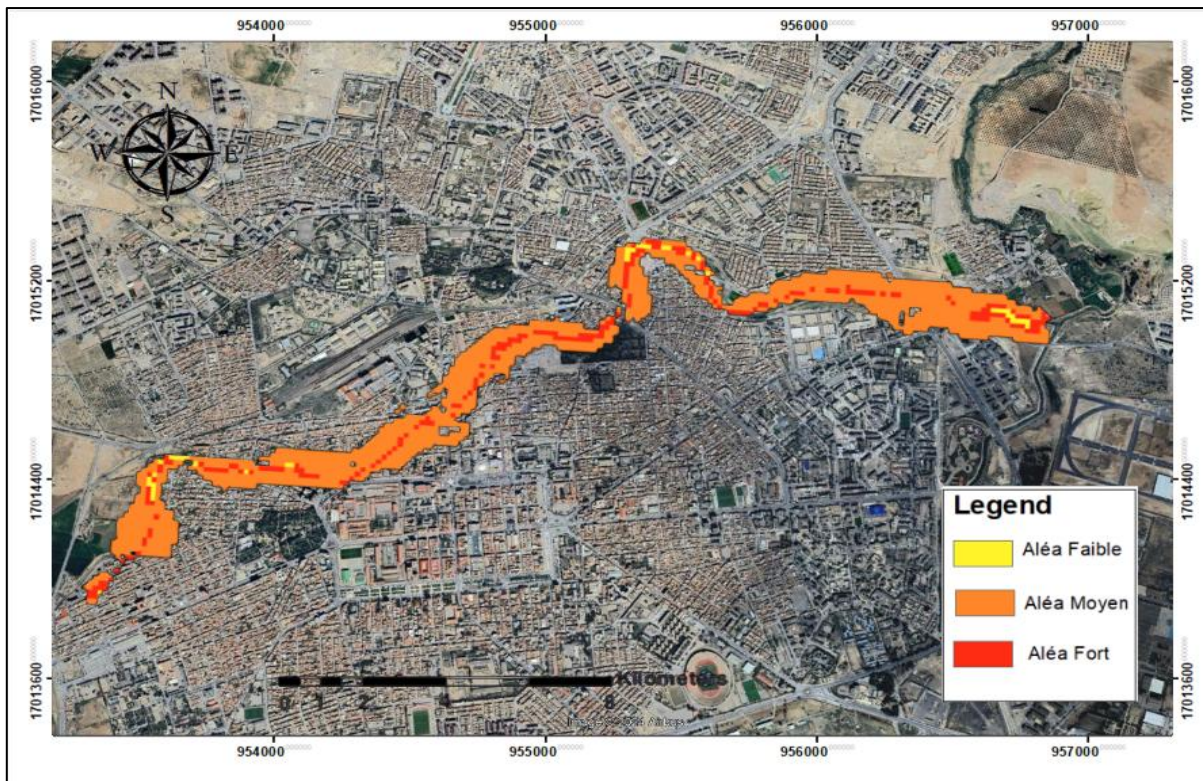


Figure IV.34 Carte de l'aléa pour la crue centennale de la ville Sidi bel abbés.

- Les zones présentant un risque élevé se situent principalement le long du cours d'eau, notamment au centre-ville de Sidi Bel Abbès et en aval de l'Oued Mekerra.
- La carte montrant la profondeur de l'eau indique que ces zones à fort risque se trouvent aussi dans des sections du lit du cours d'eau où les pentes sont plus accentuées, ce qui augmente la probabilité d'inondations lors de crues importantes.
- Une relation notable est également observée entre la carte des aléas d'inondation et celle des vitesses d'écoulement : les zones à risque élevé se superposent généralement aux secteurs où les vitesses d'écoulement sont les plus élevées.
- Cela révèle une convergence entre les risques hydrologiques et les dynamiques d'écoulement, mettant en évidence des zones critiques qui nécessitent une attention renforcée en matière de gestion des risques d'inondation.

IV.4.4 Cartographie de la vulnérabilité

La gestion de l'espace dans les zones sujettes aux risques d'inondation vise à intégrer diverses stratégies et mesures pour assurer la gestion du risque dans l'aménagement du territoire. Il est donc nécessaire de déterminer avec précision la dynamique du risque en fonction de la dynamique urbaine. Le risque varie donc fortement en fonction du type d'occupation du sol (Guigo *et al.*, 2002).

IV.5 Cartographie des risques

- Dans le logiciel HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), la carte des risques offre une visualisation des zones potentiellement impactées par les inondations, basée sur les résultats des simulations hydrauliques.
- Cette carte illustre les effets possibles des crues sur différentes régions en montrant des paramètres tels que la profondeur de l'eau, la vitesse d'écoulement et d'autres variables hydrologiques pertinentes. Afin de réaliser une évaluation complète des risques, il est essentiel de combiner les informations sur la vulnérabilité avec celles concernant l'aléa.
- Cette fusion s'effectue par le biais d'une analyse dans un système d'information géographique (SIG), permettant de superposer et d'examiner les données de vulnérabilité avec les cartes de risques produites par HEC-RAS.

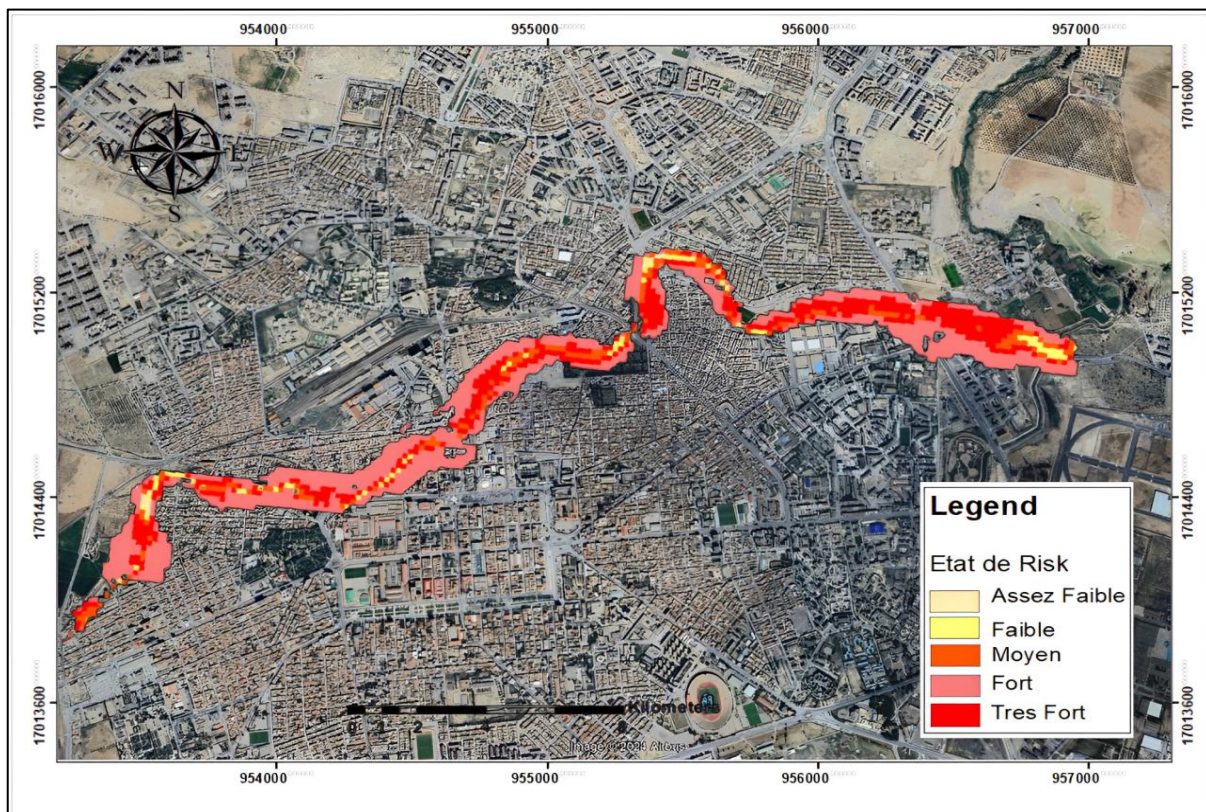


Figure IV.35 Carte des risques d'inondation pour la ville de Sidi Bel Abbès.

La carte de risque fournit des informations essentielles pour la gestion des inondations, la planification urbaine et la mise en place de mesures de prévention et de protection.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué la situation de la zone d'étude de Sidi Bel Abbés et sa réaction face aux inondations engendrées par une crue centennale. En utilisant le logiciel HEC-RAS et des cartes de cartographie telles que les cartes de vulnérabilité, de submersion et de vitesse d'écoulement, nous avons localisé les divers tronçons susceptibles d'être inondés et estimé la profondeur de l'eau à plusieurs endroits.

Cette analyse approfondie des zones à risque fournit une base solide pour la conception de mesures préventives adaptées. Les résultats obtenus nous orientent vers la prochaine phase du projet, au cours de laquelle nous explorerons en détail différentes alternatives. L'objectif sera de concevoir des solutions novatrices et durables pour améliorer la protection contre les inondations, en tenant compte des spécificités des zones critiques identifiées.

Chapitre v

Etude des variantes d'aménagement

Introduction

L'objectif de cette étude est d'assurer une protection adéquate de la ville de Sidi Bel Abbés contre les inondations, en particulier les crues centennales. Cette protection consiste à proposer et à choisir les meilleures solutions de construction en fonction des conditions naturelles. Les solutions doivent être réalisables du point de vue technique et économique, tout en étant bien adaptées au terrain.

Le choix des variantes se base sur les résultats obtenus dans les chapitres précédents, en prenant en considération les caractéristiques naturelles de la zone d'étude. L'objectif est d'évacuer les eaux de crue vers l'exutoire tout en respectant les conditions d'écoulement et la stabilité des berges, sans oublier l'impact environnemental de cet aménagement. Le processus de sélection des variantes se fait à travers différents processus.

V.1 Les divers types d'aménagements :

V.1.1 Protection contre les crues :

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

V.1.1.1 Protection directe (rapprochée) :

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

- **Curage** : Opération d'aménagement pour l'élimination des obstacles et dépôts entravant le flux des eaux améliore considérablement les conditions d'écoulement dans le cours d'eau. Cette action permet de dégager les obstacles et d'éliminer les dépôts, facilitant ainsi un écoulement plus fluide. Par ailleurs, le débroussaillage est crucial, notamment dans les zones urbanisées, où il est nécessaire pour des raisons sanitaires, ainsi que dans les sections courantes du cours d'eau, afin de réduire la rugosité et d'augmenter la capacité de débit.
- **Recalibrage** : Opération d'aménagement visant à modifier le profil du lit d'un cours d'eau pour améliorer son écoulement. Cette action inclut l'élargissement et l'approfondissement des sections du cours d'eau, augmentant ainsi leur capacité d'évacuation et garantissant une section mouillée conforme aux critères de protection requis. Elle peut également comprendre le redressement du lit et la stabilisation des berges pour optimiser la gestion hydraulique.
- **Réalisation des canaux** : Opération d'aménagement permet de restaurer le couloir initial de l'oued, ce qui est crucial lorsque le lit de l'oued et son domaine hydraulique ont été complètement envahis par des bâtiments ou des infrastructures routières. Cette

solution est essentielle pour régénérer l'espace naturel de l'oued et rétablir son fonctionnement hydraulique.

- **Protection des berges :** Comprend tout ouvrage destiné à préserver la stabilité des terres face aux forces de l'eau. Les berges sont souvent affectées par les courants perturbateurs des crues, et les terres peuvent également se déplacer en raison de l'infiltration d'eau après la crue. Il est également crucial de protéger les berges près de certains ouvrages, tels que les ponts.
- **Endiguement des oueds :** Cette action consiste à construire des digues le long des deux berges du cours d'eau. Réalisable facilement avec les ressources locales en main-d'œuvre et en matériaux, cette méthode permet une protection sélective, qui peut être mise en place progressivement, en commençant par protéger les zones les plus riches et densément peuplées contre les crues. Toutefois, ce procédé peut entraîner une élévation significative du niveau des eaux et compliquer le drainage des terrains bas (Nedelec et al., 2004).

V.1.1.2 Protection indirect (Eloignées) :

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

- **Aménagement des bassins versants :** Pour lutter contre l'érosion, des techniques biologiques peuvent être utilisées en complément de la construction de seuils en gabions. Ces approches visent à réduire la vitesse des écoulements et à favoriser le dépôt des sédiments en amont.
- **Construction de barrages :** Mise en place de seuils pour stocker et réguler les crues en amont des zones vulnérables. Il est essentiel d'optimiser le volume et la capacité de régulation des barrages afin d'assurer une protection adéquate et de répondre efficacement aux besoins de gestion des crues.
- **Création de canaux périphériques :** Cette approche consiste à détourner les eaux des rivières en les dirigeant vers des canaux périphériques, afin de les acheminer vers des zones situées en dehors des zones à protéger. Cette déviation peut concerner une partie ou l'ensemble du débit d'un cours d'eau, permettant ainsi une gestion efficace des eaux et la protection des zones vulnérables.

V.1.2 Protection contre l'érosion :

Le risque d'érosion résulte de la combinaison entre l'aléa érosif et les enjeux locaux. Ce problème est courant dans les zones non urbanisées, notamment lorsque les bords de route ne

sont pas alignés avec les rives des rivières. Pour protéger les oueds contre l'érosion, il est crucial d'appliquer diverses stratégies visant à stabiliser les sols et à contrôler l'érosion causée par les écoulements d'eau.

V.1.2.1 Érosion du lit :

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

- **Les extractions dans le lit :** Ces activités exercent un effet direct qui peut provoquer une érosion régressive en amont, ainsi qu'une érosion progressive en aval.
- **Cause d'origine naturelle :** Le lit du cours d'eau ajuste sa pente pour s'adapter aux nouvelles conditions hydrologiques et aux variations dans le transport des sédiments.

V.1.2.2 Érosion des berges :

- Les cours d'eau naturels et les canaux de drainage évacuent les eaux de ruissellement et les effluents des réseaux souterrains. L'érosion des berges résulte du sapement, de l'affouillement et de l'effondrement des rives, causés par des facteurs tels que des aménagements défectueux, un manque d'entretien, l'accès du bétail et la proximité des surfaces cultivées. Les défauts de conception des sorties de drainage, comme l'absence de tuyaux rigides ou de blocs antiérosifs adéquats, aggravent le problème. Les conséquences de cette érosion comprennent la perte de terres arables, l'affaiblissement des structures telles que les ponts, des besoins accrus en nettoyage et en entretien des canaux, ainsi que le ravinement des voies de circulation et des zones adjacentes aux clôtures.
- L'éboulement (ou effondrement) est un mécanisme de rupture d'un volume de berges cohérentes qui se trouve en surplomb par suite d'un affouillement au pied.
- L'affouillement est une forme d'érosion qui se manifeste au niveau de la base d'une berge ou d'un ouvrage. Il représente une spécificité de l'érosion des berges.

V.2 Calcul hydraulique des canaux :

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

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

V.2.1.1 Les caractéristiques de l'écoulement uniforme

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

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

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

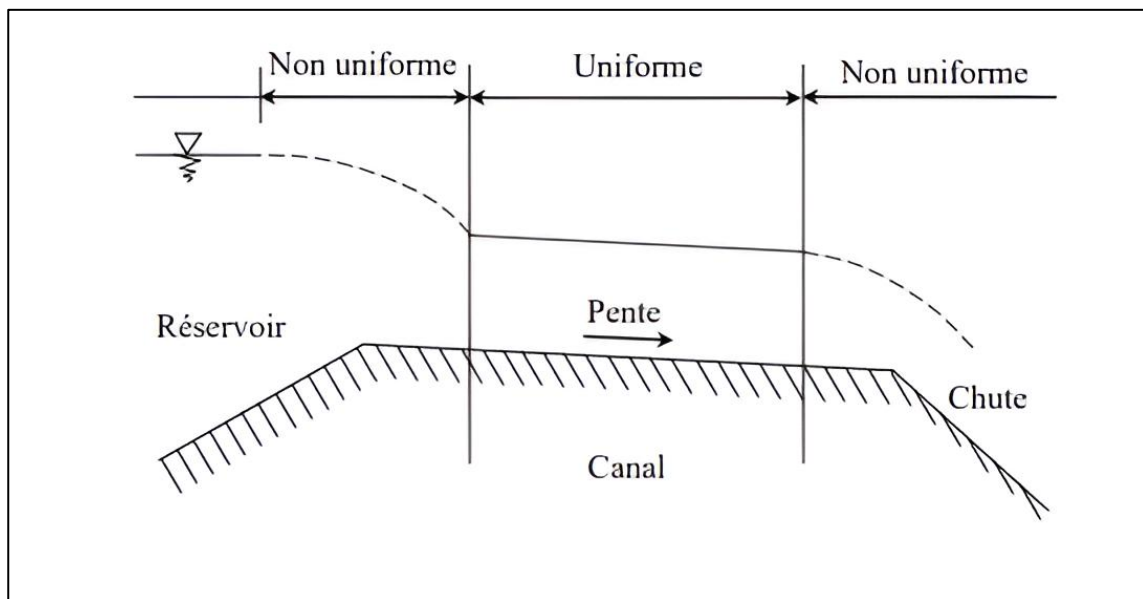


Figure V.1 : Écoulement uniforme entre les extrémités.

V.2.2 Les formules générale de l'écoulement :

- **La formule de Chézy**

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

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

On sait que :

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

Donc :

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

Avec :

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

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

n : Coefficient de rugosité.

I : Pente de fond du canal.

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

- **La formule de Manning-Strickler**

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

$$C = \frac{1}{n} \times Rh^{\frac{1}{6}} \quad (V.4)$$

On trouve :

$$V = K_s \times Rh^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{I} \quad (V.5)$$

Finalement :

$$Q = \times Rh^{\frac{2}{3}} \times S_m \times \sqrt{I} \quad (V.6)$$

Avec :

Q : Débit de dimensionnement (m^3/s).

n : Coefficient de rugosité du canal.

S_m : Section mouillée du canal (m^2).

I : Pente du tronçon du cours d'eau (pente du fond) en m/m.

R_h : Rayon hydraulique (m).

- **La formule d'Agroskine**

$$C = \frac{1}{n} + 17.72 \log (Rh) \quad (V.7)$$

Avec :

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

R_h : Rayon hydraulique.

n : Coefficient de rugosité.

- **La formule de Bazin**

$$C = \frac{87}{1 + \frac{mb}{\sqrt{Rh}}} \quad (V.8)$$

Avec

(γ) ou (mb) : Coefficient de Bazin.

Rh : Rayon hydraulique.

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

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

- **La formule de Pavlovsky**

$$C = \frac{1}{n} + Rh^{\frac{1}{y}} \quad (V.9)$$

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

$$y = 2.5 \times \sqrt{n} - 0.13 - 0.75 \times \sqrt{Rh} \times (\sqrt{n} - 0.1) \quad (V.10)$$

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

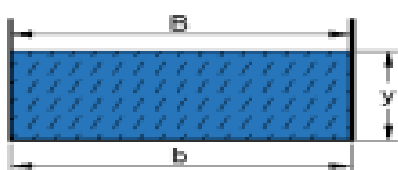
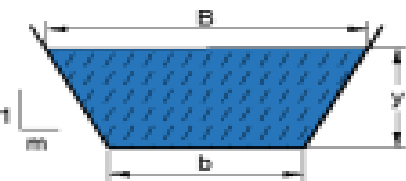
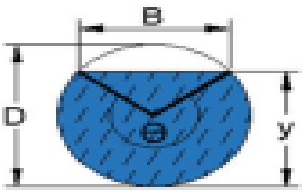
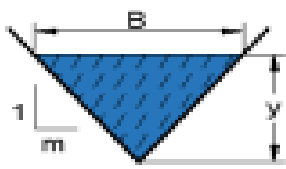
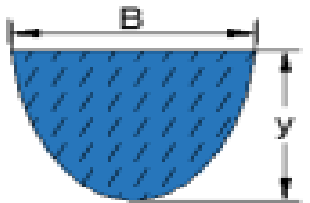
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Type</th> <th>Rectangulaire</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Largeur au miroir B</td> <td>b</td> </tr> <tr> <td>Surface S</td> <td>$b \cdot y$</td> </tr> <tr> <td>Périmètre P</td> <td>$b + 2y$</td> </tr> <tr> <td>Rayon hydraulique R</td> <td>$\frac{b + y}{b + 2y}$</td> </tr> </tbody> </table>	Type	Rectangulaire	Largeur au miroir B	b	Surface S	$b \cdot y$	Périmètre P	$b + 2y$	Rayon hydraulique R	$\frac{b + y}{b + 2y}$
Type	Rectangulaire										
Largeur au miroir B	b										
Surface S	$b \cdot y$										
Périmètre P	$b + 2y$										
Rayon hydraulique R	$\frac{b + y}{b + 2y}$										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Type</th> <th>Trapezoidale</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Largeur au miroir B</td> <td>$b + 2m \cdot y$</td> </tr> <tr> <td>Surface S</td> <td>$(b + my) \cdot y$</td> </tr> <tr> <td>Périmètre P</td> <td>$b + 2y\sqrt{1 + m^2}$</td> </tr> <tr> <td>Rayon hydraulique R</td> <td>$\frac{(b + my) + y}{b + 2y\sqrt{1 + m^2}}$</td> </tr> </tbody> </table>	Type	Trapezoidale	Largeur au miroir B	$b + 2m \cdot y$	Surface S	$(b + my) \cdot y$	Périmètre P	$b + 2y\sqrt{1 + m^2}$	Rayon hydraulique R	$\frac{(b + my) + y}{b + 2y\sqrt{1 + m^2}}$
Type	Trapezoidale										
Largeur au miroir B	$b + 2m \cdot y$										
Surface S	$(b + my) \cdot y$										
Périmètre P	$b + 2y\sqrt{1 + m^2}$										
Rayon hydraulique R	$\frac{(b + my) + y}{b + 2y\sqrt{1 + m^2}}$										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Type</th> <th>Circulaire</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Largeur au miroir B</td> <td>$2\sqrt{y(D - y)}$</td> </tr> <tr> <td>Surface S</td> <td>$\frac{1}{8}(\theta - \sin \theta)D^2$</td> </tr> <tr> <td>Périmètre P</td> <td>$\frac{1}{2}\theta D$</td> </tr> <tr> <td>Rayon hydraulique R</td> <td>$\frac{1}{4}\left[1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right]D$</td> </tr> </tbody> </table>	Type	Circulaire	Largeur au miroir B	$2\sqrt{y(D - y)}$	Surface S	$\frac{1}{8}(\theta - \sin \theta)D^2$	Périmètre P	$\frac{1}{2}\theta D$	Rayon hydraulique R	$\frac{1}{4}\left[1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right]D$
Type	Circulaire										
Largeur au miroir B	$2\sqrt{y(D - y)}$										
Surface S	$\frac{1}{8}(\theta - \sin \theta)D^2$										
Périmètre P	$\frac{1}{2}\theta D$										
Rayon hydraulique R	$\frac{1}{4}\left[1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right]D$										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Type</th> <th>Triangulaire</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Largeur au miroir B</td> <td>$2my$</td> </tr> <tr> <td>Surface S</td> <td>my^2</td> </tr> <tr> <td>Périmètre P</td> <td>$2y\sqrt{1 + m^2}$</td> </tr> <tr> <td>Rayon hydraulique R</td> <td>$\frac{my}{2\sqrt{1 + m^2}}$</td> </tr> </tbody> </table>	Type	Triangulaire	Largeur au miroir B	$2my$	Surface S	my^2	Périmètre P	$2y\sqrt{1 + m^2}$	Rayon hydraulique R	$\frac{my}{2\sqrt{1 + m^2}}$
Type	Triangulaire										
Largeur au miroir B	$2my$										
Surface S	my^2										
Périmètre P	$2y\sqrt{1 + m^2}$										
Rayon hydraulique R	$\frac{my}{2\sqrt{1 + m^2}}$										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Type</th> <th>Parabolique</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Largeur au miroir B</td> <td>$\frac{3S}{2y}$</td> </tr> <tr> <td>Surface S</td> <td>$\frac{2}{3}By$</td> </tr> <tr> <td>Périmètre P</td> <td>$B + \frac{8y^2}{3B}$</td> </tr> <tr> <td>Rayon hydraulique R</td> <td>$\frac{2B^2y}{3B^2 + 8y^2}$</td> </tr> </tbody> </table>	Type	Parabolique	Largeur au miroir B	$\frac{3S}{2y}$	Surface S	$\frac{2}{3}By$	Périmètre P	$B + \frac{8y^2}{3B}$	Rayon hydraulique R	$\frac{2B^2y}{3B^2 + 8y^2}$
Type	Parabolique										
Largeur au miroir B	$\frac{3S}{2y}$										
Surface S	$\frac{2}{3}By$										
Périmètre P	$B + \frac{8y^2}{3B}$										
Rayon hydraulique R	$\frac{2B^2y}{3B^2 + 8y^2}$										

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

V.2.3 Choix des paramètres de dimensionnement :

Pour l'aménagement d'un cours d'eau, il est essentiel de respecter les principes et normes établis. Dans le cadre de l'étude de l'aménagement de l'oued Mekerra, il est crucial de prendre en compte les paramètres hydrauliques tels que le débit aménagé (Qaménagée), la pente et la rugosité, tout en respectant les normes de sécurité et en intégrant une marge de sécurité appropriée. L'aménagement de l'oued Mekerra pour protéger la ville de Sidi Bel Abbés nécessite une connaissance approfondie du site afin de concevoir des solutions adaptées et efficaces.



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

V.2.3.1 Sélection de la pente appropriée pour le projet

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

V.2.3.2 Le coefficient de rugosité

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

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

Caractéristiques du lit ou du revêtement	Valeur de la rugosité n
Canal avec revêtement en béton.	0.013-0.014
Canal en terre	0.022
Canal en pierre sèche	0.025
Canal en Gabion.	0.030

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

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

Tableau V.3 : Revanches utilisées (*Degoutte, 2012*).

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

V.2.3.4 Vitesse d'érosion

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

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

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

V.3 Étude de Variantes

Dans cette étude, trois variantes d'aménagement de l'oued Mekrra sont proposées pour protéger la ville de Sidi Bel Abbés contre les crues centennales. Chacune de ces variantes est conçue pour évacuer un débit de projet de 652 m³/s.

Les Variantes sont :

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

- Pour chaque variante, nous réaliserons des calculs hydrauliques en utilisant des simulations avec HEC-RAS sur chaque tronçon du cours d'eau pour vérifier l'état d'écoulement. Nous fournirons également une analyse détaillée des différentes options d'aménagement, ce qui nous permettra de sélectionner la solution la plus adaptée en termes de performance technique et de faisabilité économique.
- Pour optimiser les interventions de sécurité civile lors des inondations et réduire la vulnérabilité des résidents, il est crucial de mettre en place des plans d'action, d'alerter la population, et de préparer des scénarios de gestion de crise. Il est également essentiel de surveiller l'immersion des digues pour prévenir la formation de vagues et de prévoir des mesures pour faciliter les interventions en cas de crue, tout en protégeant les infrastructures contre les inondations.

V.3.1 Canal en béton

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

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

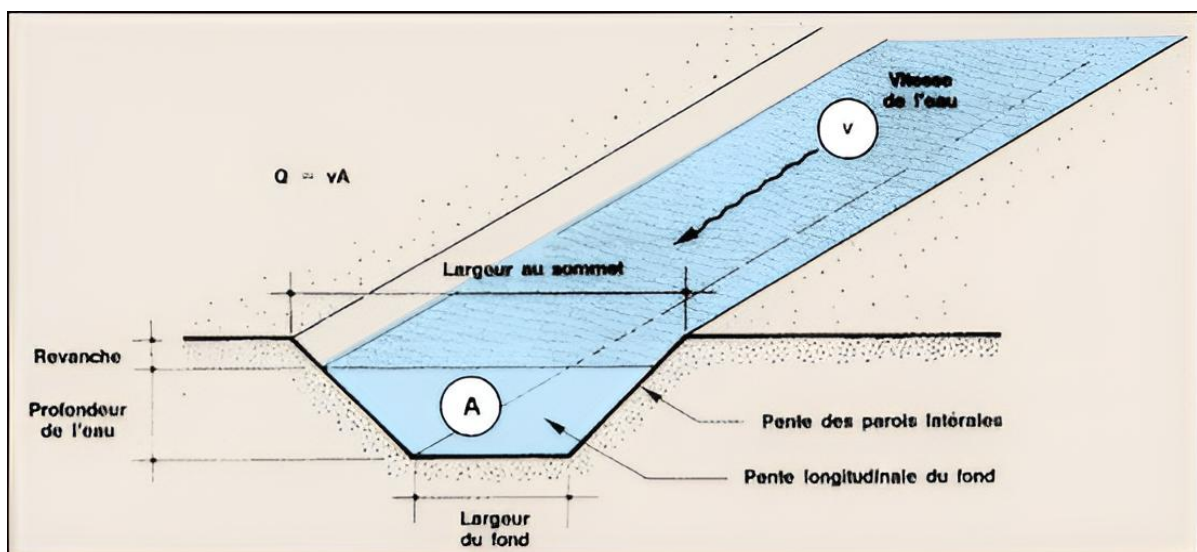


Figure V.4 : Canal en béton armé de forme trapézoïdale.

- **Dimensionnement**

La première variante proposée concerne la conception d'un canal en béton armé de forme trapézoïdale, s'étendant sur une longueur de 5730 mètres. Ce canal est divisé en trois tronçons, traversant le centre de la ville et divisant ainsi la ville en deux parties. Il est conçu pour gérer un débit de 652 m³/s.

- **Variante 01 (Tronçon Amont) :**

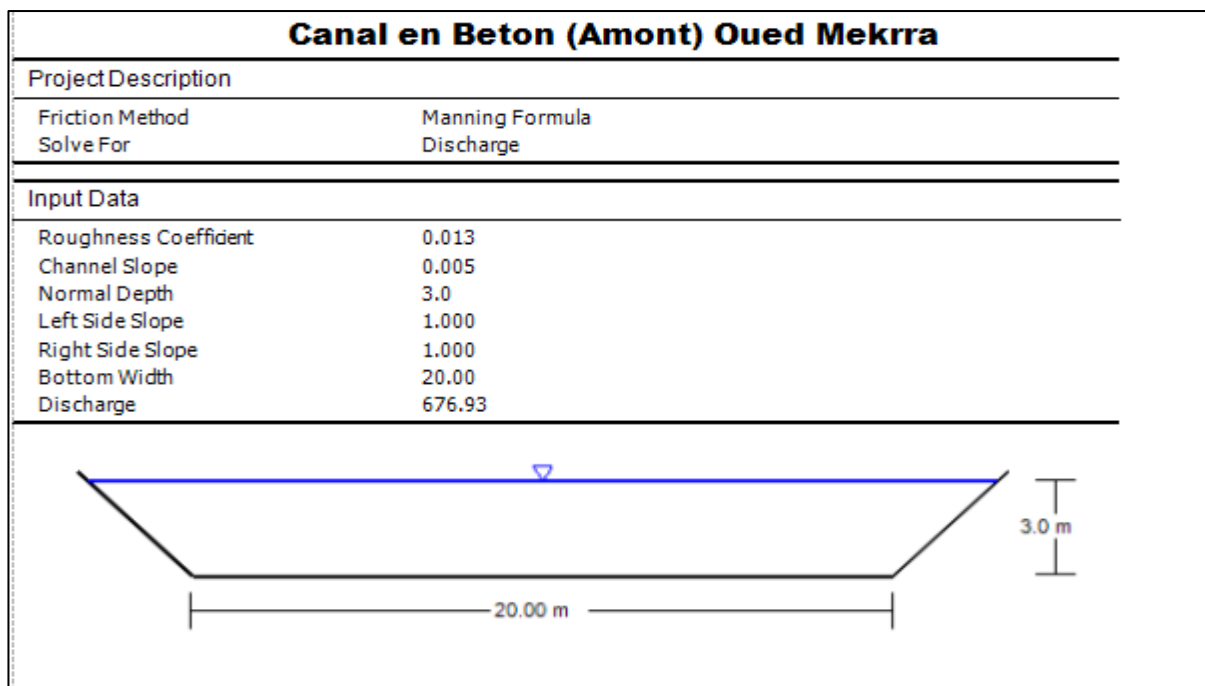
Voici les résultats du calcul hydraulique pour le tronçon amont du canal trapézoïdal en béton.

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

Traçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente de Projet (%)	Fruit de talus	Larguer de fond	Largueur au miroir	Hauteur de canal(m)	La rugosité
Amont	6121	3889	1730	0.005	1	20	26	3	0.013

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

Figure V.5 : Dimensions du canal trapézoïdal en amont de l'Oued Mekerra.



- **Variante 01 (Tronçon intermédiaire) :**

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

Tableau V.6: Dimensions de l'aménagement en béton armé pour le tronçon intermédiaire de l'Oued Mekerra.

Traçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente de Projet (%)	Fruit de talus	Larguer de fond	Largueur au miroir	Hauteur de canal(m)	La rugosité
Milieu	3889	1763	2300	0.004	1	25	31	3	0.014

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

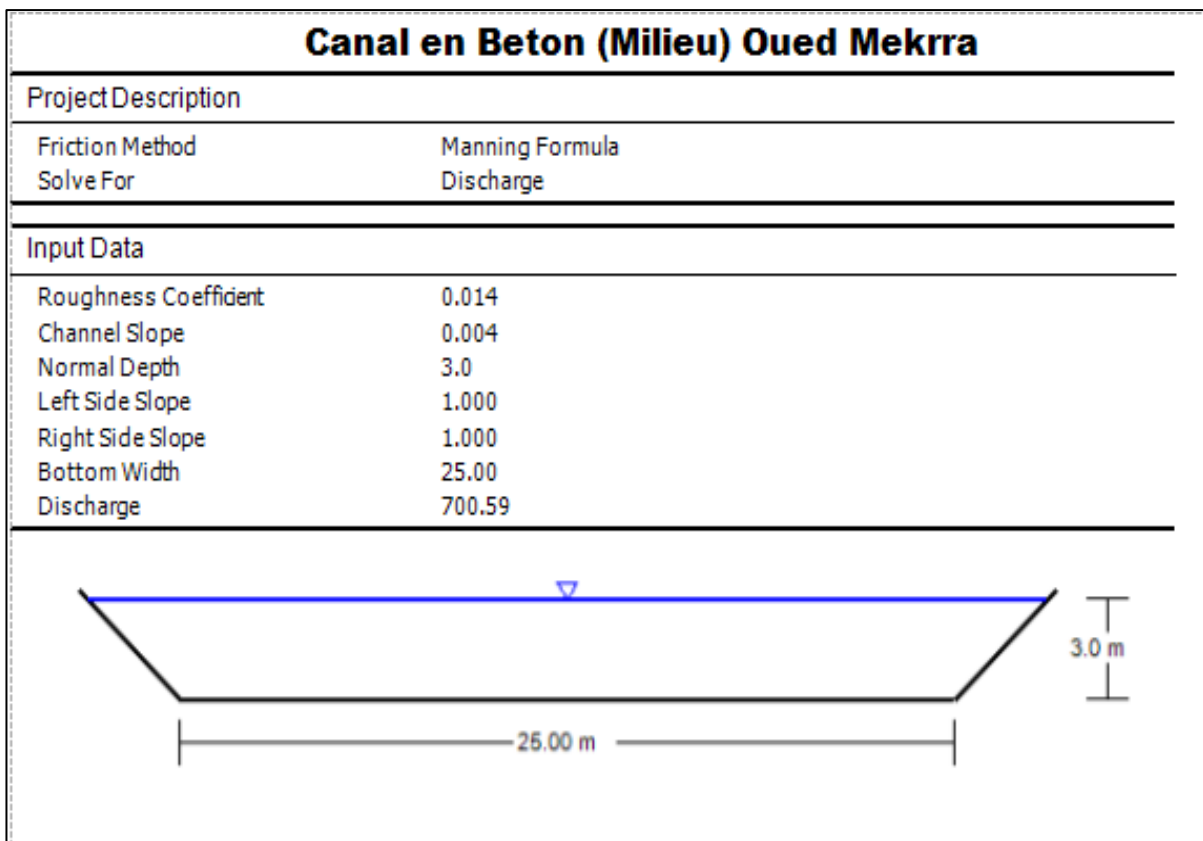


Figure V.5 : Dimensions du canal trapézoïdal en Milieu de l'Oued Mekerra.

- **Variante 01 (Tronçon Aval) :**

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

Tableau V.7: Dimensions de l'aménagement en béton armé pour le tronçon aval de l'Oued Mekerra.

Traçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente de Projet (%)	Fruit de talus	Larguer de fond	Largueur au miroir	Hauteur de canal(m)	La rugosité
Aval	1763	15	1700	0.003	1	25	31	3	0.0013

Les dimensions du canal aval sont illustrées dans la figure ci-dessous :2

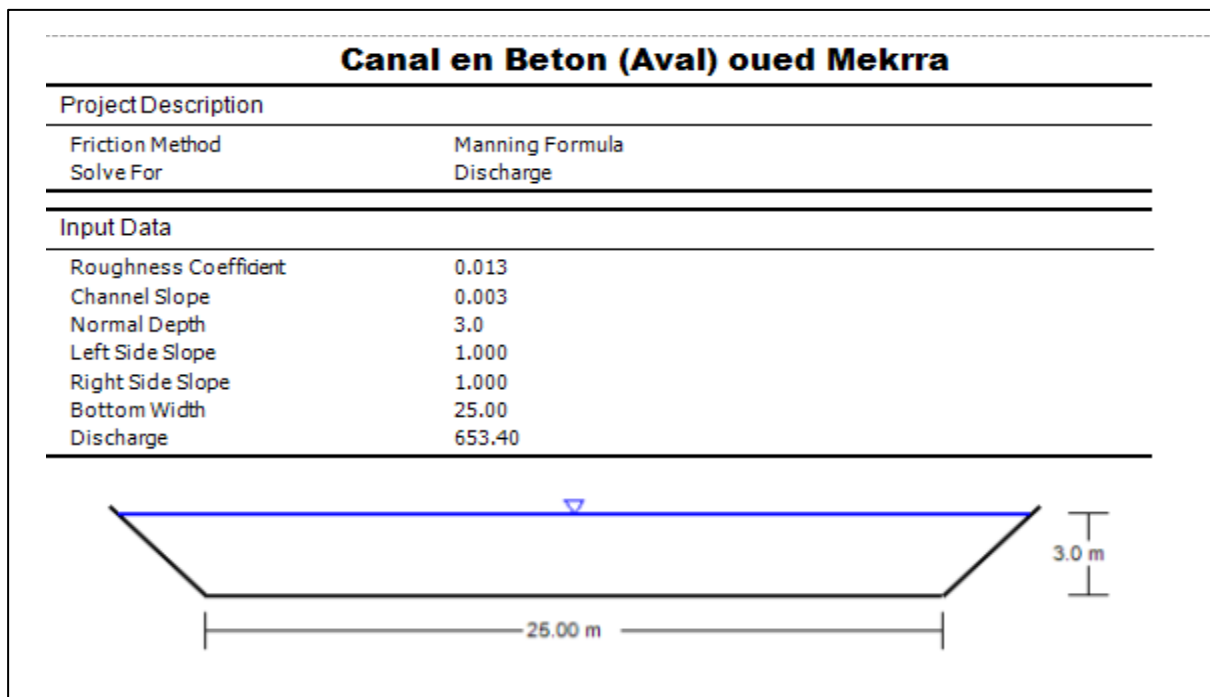


Figure V.6 : Dimensions du canal trapézoïdal en aval de l'Oued Mekerra.

- **Paramètre d'écoulement**

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

Tableau V.8 : Résultats de la simulation de l'écoulement pour le canal en béton de l'Oued Mekerra (Source : HEC-RAS).

River Station	Min Ch El (m)	W.S Elev (m)	Crit W.S (m)	E.G Elev (m)	E.G Slop (m/m)	Vel Chnl(m/s)	Flow Area (m2)	Top Width(m)	Froud# Chl
6121	523.3	524.04	527.72	626.56	0.005001	7.75	84.13	22.48	2.01
6017	522.5	526.91	526.91	528.78	0.00011	6.4	101.88	24.36	1.43
5912	518.1	525.66	522.98	525.74	0.000091	7.88	82.74	23.12	1.19
5619	515.5	525.68	523.14	525.73	0.00076	6.11	106.71	25.87	1.02
5502	517.7	525.55	523.71	525.72	0.000001	7.94	82.12	23.43	1.34
5409	518.2	525.36	523.92	525.7	0.000002	8.01	81.40	22.4	1.57
5325	516.9	525.43	523.67	525.67	0.000001	8.6	75.81	22.84	1.27
5224	519.2	523.59	523.59	525.51	0.000138	6.13	106.36	26.01	1.5
5136	516.5	519.17	520.84	525.1	0.000069	6.11	106.71	25.34	1.66
5069	516	518.56	520.41	525.04	0.000079	6.03	108.13	25.13	1.42
5015	514.2	516.49	518.64	524.84	0.000116	6	108.67	24.57	1.99
4932	516	518.91	520.36	523.8	0.000052	6.45	101.09	25.81	1.76
4841	514.8	517.4	519.17	523.66	0.000075	6.09	107.06	25.21	1.93
4749	514	516.46	518.45	523.56	0.00009	6.41	101.72	24.92	1.73
4636	513.9	516.34	518.29	523.54	0.000092	6.38	102.19	24.89	1.8
4477	513.8	516.23	518.32	523.52	0.000094	6.35	102.68	24.86	1.82
4387	513.8	516.23	518.13	523.51	0.000094	6.33	103.00	24.87	1.81
4264	512.1	514.31	516.65	523.32	0.00013	6.37	102.35	24.42	1.55
4134	512	514.2	516.6	523.29	0.000132	6.74	96.74	23.4	1.74
3889	511.5	513.65	515.91	523.21	0.000142	6.08	107.24	30.3	1.82
3809	511	512.71	515.19	523.12	0.000196	6.19	105.33	30.42	1.83
3542	511	512.72	515.48	523.04	0.000193	6.21	104.99	29.08	1.84
3466	511.0 2	512.74	515.27	523.01	0.000192	6.23	104.65	29.04	1.8
3239	509.5	511.12	515.63	522.82	0.000235	6.25	104.32	29.11	2.11
3054	510	511.68	514.01	522.52	0.000209	6.22	104.82	29.69	2.04
2939	509.5	511.14	513.51	522.45	0.000223	6.33	103.00	28.29	2.16
2814	509.5	511.15	513.63	522.41	0.000221	6.24	104.49	28.29	2.2
2691	509.4	511.04	513.27	522.37	0.000224	6.34	102.84	28.28	2.22
2540	508	514.09	512.14	514.6	0.000002	6.27	103.99	27.65	1.08
2347	507.6	514.33	512.33	514.58	0.000001	6.79	96.02	27.77	1.04
2268	507.6	513.46	512.48	514.5	0.000005	6.22	104.82	27.91	1.1
2176	507.5	513.81	512.22	514.36	0.000012	6.09	107.06	30.21	1.17
2074	508.5	513.98	512.40	514.28	0.00003	6	108.67	30.76	1.06
1985	506	512.35	512.35	514.13	0.000012	6.56	99.39	27.57	1.2
1763	504.8	508.31	510.05	514.76	0.000072	7.14	91.32	29.62	1.29
1630	503.8	506.9	508.9	513.62	0.000099	7.2	90.56	29.19	2.36

1405	502.8	510.29	508.04	510.56	0.000002	6.33	103.00	29.7	1.35
1219	503.1	510.38	508.7	510.52	0.000001	6.4	101.88	28.36	1.23
1065	503.8	510.16	508.61	510.5	0.000001	5.99	108.85	30.87	1.34
918	503.1	509.95	508.43	510.48	0.000002	6.42	101.56	28.14	1.45
762	503.5	510.22	508.11	510.37	0.000001	6.39	102.03	28.07	1.26
596	502.2	510.27	507.0	510.35	0.000001	6.3	103.49	29.41	1.07
432	501.9	510.24	506.66	510.34	0.000001	6	108.67	30.89	1.19
140	501.1	510.23	507.58	510.34	0.000001	6.11	106.71	30.57	1.18
69	501.5	510.23	510.23	510.34	0.000024	6.25	104.32	29.99	1.19
15	504.5 5	508.41	508.41	510.18	0.000012	7.29	89.44	27.22	1

• Interprétation

- Selon nombre de Froude : Selon les valeurs du nombre de Froude, il est notable que le régime d'écoulement est torrentiel lorsque $Fr > 1$, ce qui est clairement observé dans les résultats, confirmant ainsi ce type d'écoulement.
- Selon la vitesse : La vitesse d'écoulement, qui se situe entre 6 et 10 m/s, est conforme à la vitesse admissible. On peut donc en conclure qu'il n'y aura ni envasement ni érosion du canal.

D'un point de vue technique, le canal trapézoïdal en béton armé assure une protection efficace.

V.3.2 Les Sections en travers

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

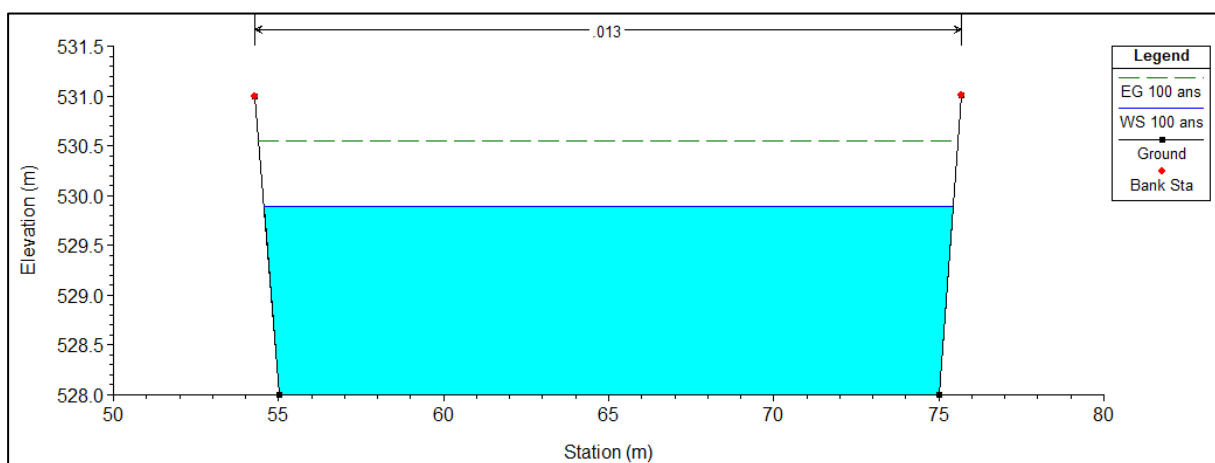


Figure V.7 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon Amont d'oued Mekrra (station 6212).

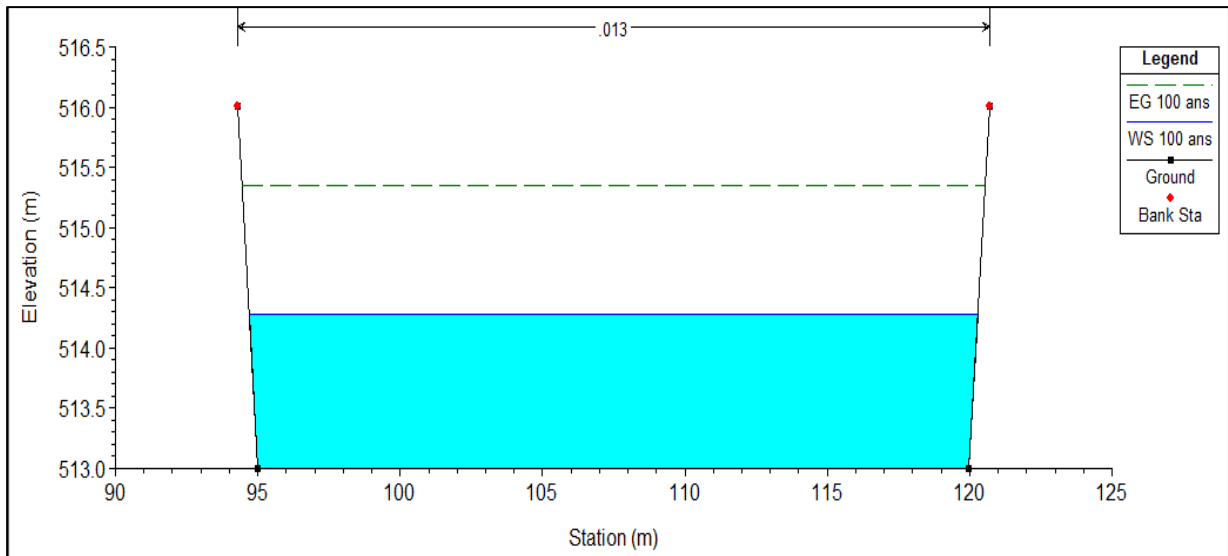


Figure V.8 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon En milieu d'oued Mekrra (station 2939).

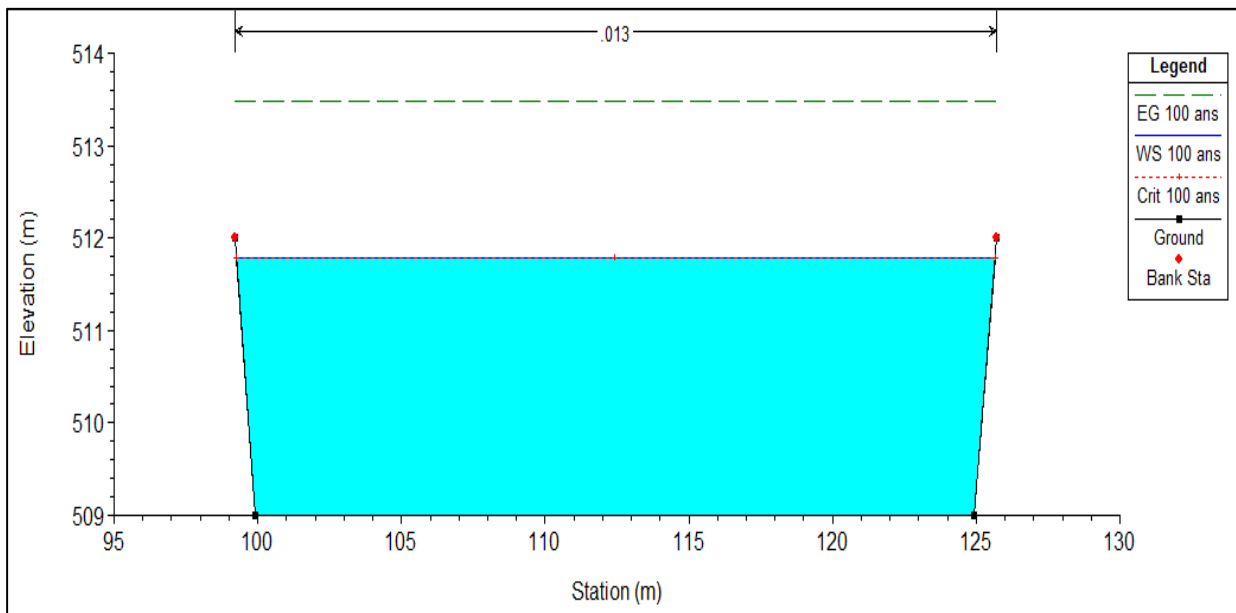


Figure V.09 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon aval d'oued Mekrra (station 140).

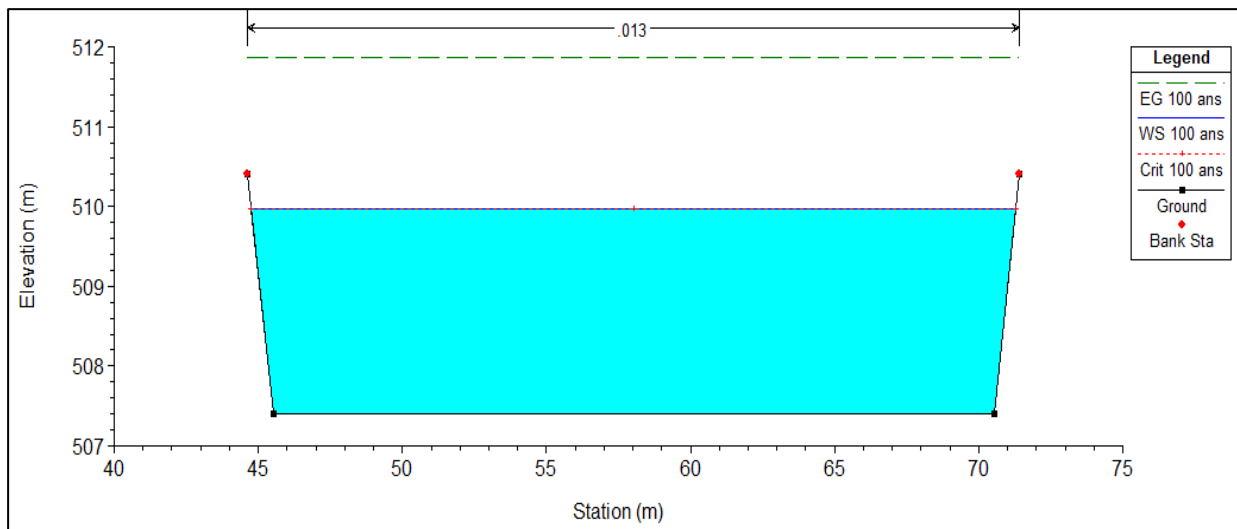


Figure V.10 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon aval d'oued Mekerra (station 15).

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

Et on doit vérifier que :

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

Tableau V.9 : Devis pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé en amont de l'Oued Mekerra.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m3	8539	250	2,134,750
	Remblais	m3	993623	700	695,536,100
Béton de propreté		m3	12570	8000	100,560,000
Béton dosé à 350 Kg/m3		m3	21250	32000	680,000,000
Montant total					1,478,230,850

Tableau V.10 : Devis pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé du tronçon intermédiaire de l'Oued Mekerra.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m3	11553	250	2,888,250
	Remblais	m3	140362	700	98,253,400
Béton de propreté		m3	17250	8000	138,000,000
Béton dosé à 350 Kg/m3		m3	28750	32000	920,000,000
Montant total					1,159,141,650

Tableau V.11 : Devis pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé en aval de l'Oued Mekerra.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m3	8690	250	2,172,500
	Remblais	m3	1013623	700	709,536,100
Béton de propreté		m3	12975	8000	103,800,000
Béton dosé à 350 Kg/m3		m3	17300	32000	553,600,000
Montant total					1,369,108,600

Tableau V.12 : Devis total pour la variante du canal trapézoïdal en béton armé de l'Oued Mekerra

	Tronçons		
	Amont	Milieu	Aval
Montant (DA)	1,478,230,850	1,159,141,650	1,369,108,600
Montant Totale (DA)	400,6481,100		
TVA 19%	761,231,409		
Total TTC	4,767,712,509		

- **D'après les résultats obtenus :**

le béton s'avère être un choix adéquat pour gérer les crues centennales. Les canaux en béton offrent une durabilité exceptionnelle, résistant aux intempéries et à l'usure, avec une longue durée de vie et nécessitant peu de maintenance. Leur faible rugosité et leur étanchéité optimisent l'efficacité hydraulique en réduisant les pertes d'eau. De plus, ils sont adaptables à diverses formes et tailles, faciles à réparer, et leur solidité structurelle garantit une stabilité élevée et une sécurité renforcée.

V.3.2 Canal en enrochement

L'enrochement est une technique courante pour stabiliser les berges et le lit des cours d'eau, en utilisant des roches provenant de carrières. Cette approche consiste à disposer les roches en couches avec une inclinaison des talus modérée, généralement entre 3/2 et 2/1, sans l'utilisation de béton. Pour l'aménagement de l'Oued Mekerra, destiné à protéger la ville de Sidi Bel Abbas contre les crues, le tonnage nécessaire pour l'enrochement est estimé entre 1 et 1,5 tonne, avec un diamètre médian des roches (D50) d'environ 500 cm. Cette méthode assure une structure durable et robuste, qui stabilise efficacement les berges tout en se fondant harmonieusement dans le milieu naturel environnant.

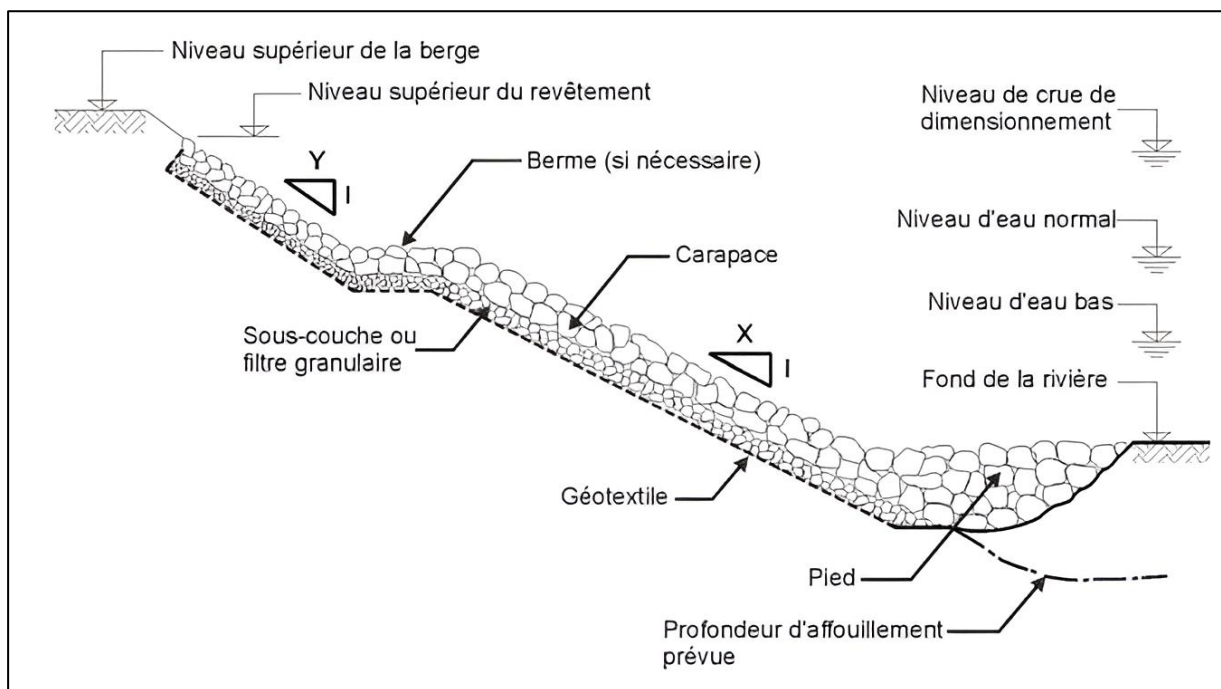


Figure V.11 Les éléments constructifs d'un canal en enrochement.

- **Dimensionnement**

La deuxième variante proposée concerne la conception d'un canal en enrochement de forme trapézoïdale, s'étendant sur une longueur totale de 5730 mètres (5.730km). Ce canal est divisé en trois tronçons distincts, traversant le centre-ville et séparant ainsi la ville en deux parties. Il est conçu pour gérer un débit de 652 m³/s.

- **Variante 02 (Tronçon Amont)**

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

Tableau V13 Dimensions de l'aménagement en enrochement pour le tronçon amont de l'Oued Mekerra.

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

Traçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente de Projet (%)	Fruit de talus	Larguer de fond	Largueur au miroir	Hauteur de canal(m)	La rugosité
Amont	6121	3889	1700	0.005	2	35	51	4	0.035

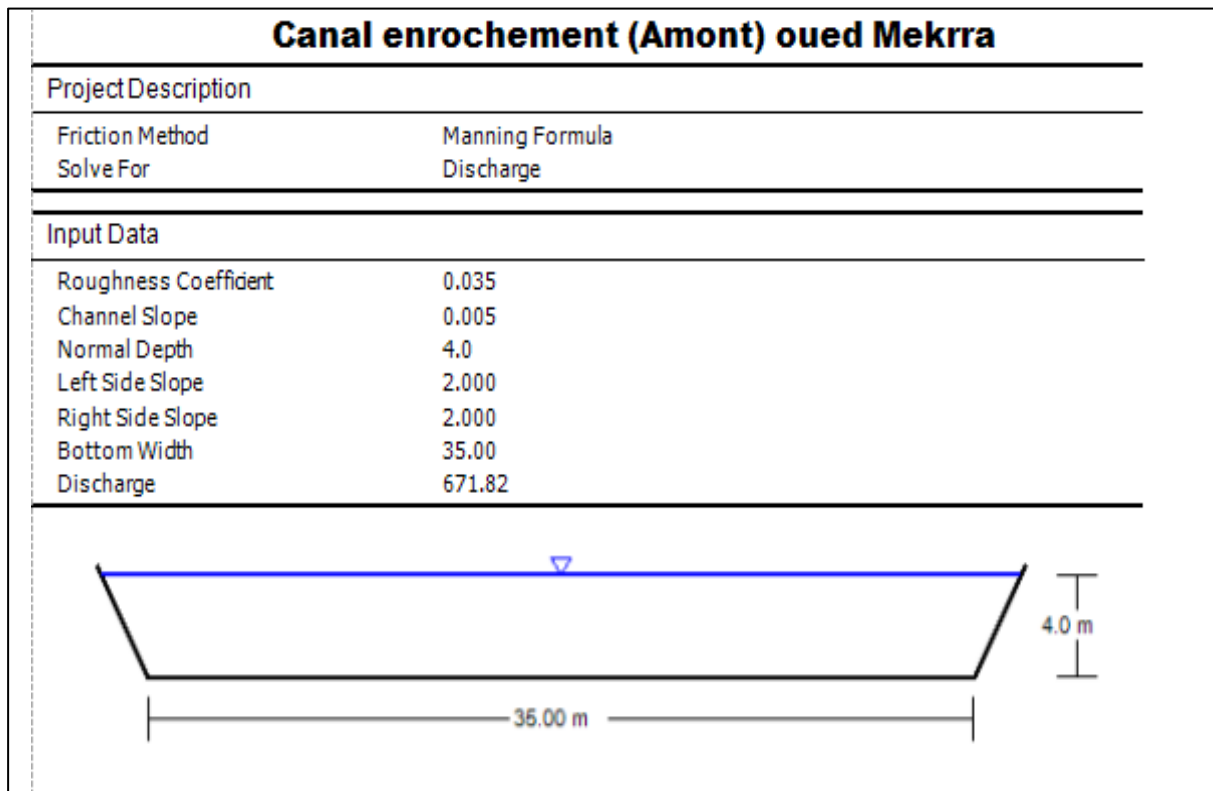


Figure V.13 Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement cote amont d'oued Mekerra.

- **Variante 02 (Tronçon Intermédiaire)**

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

Traçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente de Projet (%)	Fruit de talus	Larguer de fond	Largueur au miroir	Hauteur de canal(m)	La rugosité
--------	-------------------	------------------	--------------	---------------------	----------------	-----------------	--------------------	---------------------	-------------

Milieu	3889	1763	2300	0.004	2	40	56	4	0.035
--------	------	------	------	-------	---	----	----	---	-------

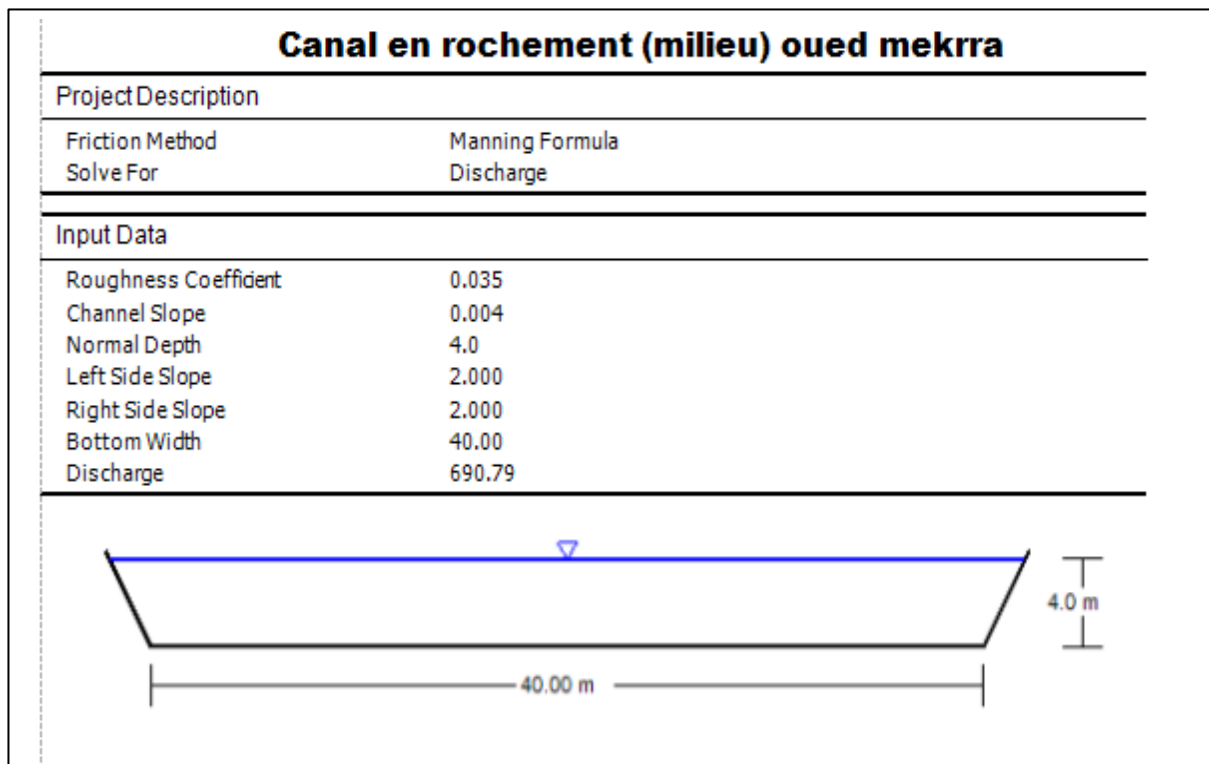
Tableau V14 Dimensions de l'aménagement en enrochement pour le tronçon du milieu de l'Oued Mekerra.

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

Figure V.14 Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement cote milieu d'oued Mekerra.

- **Variante 02 (Tronçon Aval)**

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



- **Paramètre d'écoulement**

Les résultats des simulations sont indiqués dans le tableau suivant

Tableau V15 Dimensions de l'aménagement en enrochement pour le tronçon aval de l'Oued Mekerra.

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

Traçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente de Projet (%)	Fruit de talus	Larguer de fond	Largueur au miroir	Hauteur de canal(m)	La rugosité
Aval	1763	15	1730	0.003	2	45	61	4	0.035

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

Figure V.15 Dimensions du canal trapézoïdal en enrochement en aval d'oued Mekerra.

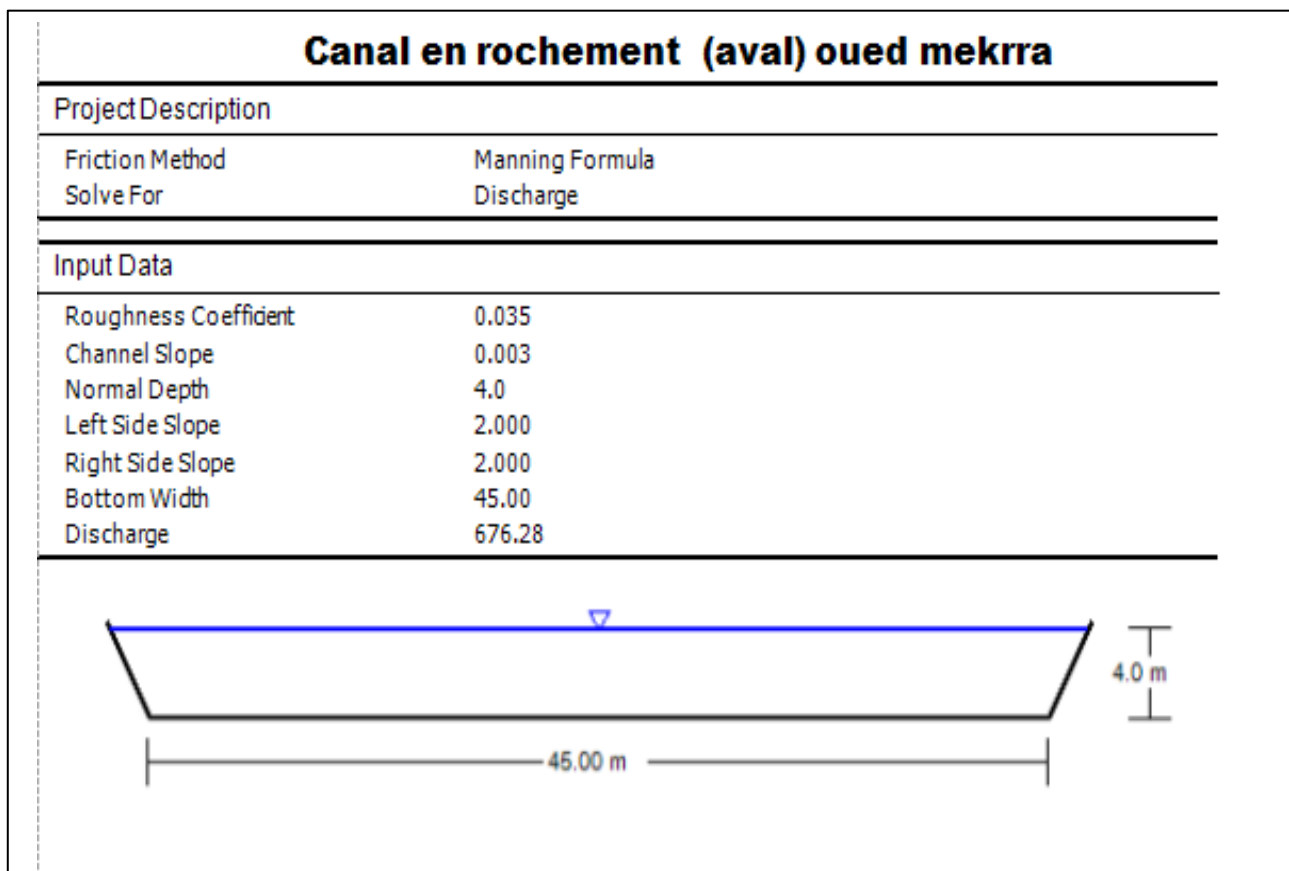


Tableau V.16 : Résultats de la simulation de l'écoulement pour le canal en enrochement de l'oued Mekrra (Source : HEC-RAS)

	Min Ch El (m)	W.S Elev (m)	Crit W.S (m)	E.G Elev (m)	E.G Slop (m/m)	Vel Chnl(m/s)	Flow Area (m2)	Top Width(m)	Froud# Chl
6121	522.9	525.98	525.98	527	0.009036	3.88	167.91	53.33	1.31
6017	521.8	524.67	524.88	526.25	0.0011516	3.68	177.4	56.49	1.26
5912	518.8	523.98	524.88	524.23	0.000977	2.51	259.94	60.17	1.11
5619	516.2	524.05	524.61	524.1	0.000108	2.55	255.59	60.32	1.17
5502	517.7	523.87	523.87	524.06	0.000533	2.58	253.2	58.87	1.05
5409	518.6	523.6	523.14	523.97	0.001354	2.58	253.12	58.8	1.22
5325	517.2	523.72	522.40	523.85	0.000349	3.06	213.07	56.77	1.03
5224	519.2	522.28	522.28	523.63	0.009037	3.91	166.91	57.33	1
5136	516.5	518.53	519.58	521.99	0.038107	3.64	179.12	53.97	1.94
5069	515.8	519.71	518.88	520.48	0.00397	3.90	167.18	54.81	1.52
5015	514	520.01	518.71	520.24	0.000705	3.09	210.91	56.43	1.3
4932	515.5	519.12	518.52	520.05	0.005174	2.62	248.39	59.18	1.52
4841	515	518.71	518.43	519.58	0.004775	3.48	187.13	54.66	1.33
4749	514	518.82	517.63	519.21	0.001524	2.55	255.7	60.07	1.41
4636	514.2	518.17	517.28	518.91	0.003685	3.78	172.5	53.55	1.39
4477	513.5	517.71	517.71	518.36	0.003006	3.94	165.59	64.53	1.24
4387	513.4	517.17	516.42	518.01	0.004476	3.66	178.28	53.82	1.56
4264	512.7	516.82	516.82	517.5	0.003241	3.38	192.66	55.49	1.21
4134	512.2	516.48	515.63	517.09	0.002737	3.33	195.57	55.4	1.14
3889	511.8	515.85	514.11	516.42	0.002696	2.51	259.79	55.9	1.39
3809	510.7	515.92	514.03	516.2	0.001101	2.80	233.15	52.01	1.17
3542	510.9	515.34	513.20	515.75	0.002643	2.67	244.25	53.97	1.2
3466	510.7	515.19	513.90	515.55	0.002234	3.99	163.42	48.91	1.04
3239	510	514.84	511.94	515.17	0.001251	2.62	248.76	54.49	1.44
3054	509.4	514.71	513.84	519.6	0.000842	2.70	241.6	53.9	1.34
2939	509.2	514.62	514.55	514.87	0.000804	2.54	256.5	55.5	1.27
2814	509.4	514.41	513.06	514.74	0.001191	3.61	180.52	49.58	1.43
2691	510.2	513.06	513.06	514.33	0.009138	3.26	200.15	51.42	1
2540	507.5	513.27	510.36	513.41	0.000438	2.57	253.68	55.33	1.12
2347	508	512.9	510.20	513.25	0.00128	2.70	241.76	54.1	0.97
2268	508	512.76	510.8	513.14	0.001427	2.62	248.39	55.14	1.65
2176	507.8	512.65	509.63	513.01	0.001323	2.53	257.27	55.7	1.44
2074	507	512.69	510.89	512.87	0.000597	3.37	193.54	50.49	1.3
1985	508.5	511.36	511.36	512.63	0.009135	3.47	187.76	51.42	1
1763	505.8	509.4	508.46	510.01	0.003306	2.49	261.78	48.2	1.62
1630	504.6	509.36	509.36	509.68	0.001159	2.49	261.78	47.79	1.4
1405	504	509.24	508.21	509.45	0.000711	2.71	241.01	46.17	1.03
1219	502.8	509.23	507.64	509.34	0.000282	2.47	263.77	48.7	1.21
1065	502.7	509.19	507.93	509.29	0.00027	2.55	256.14	45.3	1.02
918	503.7	509.01	509.01	509.22	0.000693	2.76	235.86	44.86	1.31
762	503	509.04	506.33	509.12	0.00027	2.63	247.65	45.74	1
596	502	509.02	509.02	509.08	0.000144	2.90	224.54	43.91	1.16

432	501.5	509.02	509.02	509.06	0.000089	2.18	299.44	49.88	1.12
140	501.1	508.99	507.52	509.03	0.000094	3.20	203.9	43.22	1.13
69	502.15	508.9	508.9	509.01	0.000263	3.34	195.25	43.1	1.2
15	505	507.66	507.66	508.87	0.003651	3.75	174.09	43.07	1

- **Interprétation**

- **Selon le nombre de Froude :** Les valeurs du nombre de Froude indiquent un régime d'écoulement torrentiel lorsque $Fr > 1$. Cette observation est clairement confirmée par les résultats, attestant de ce type d'écoulement.
- **Selon la vitesse :** La vitesse d'écoulement, variant entre 2 et 4 m/s, est conforme aux vitesses admissibles. Cela suggère qu'il n'y aura ni envasement ni érosion du canal.

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

V3.2.1 Les sections en travers

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

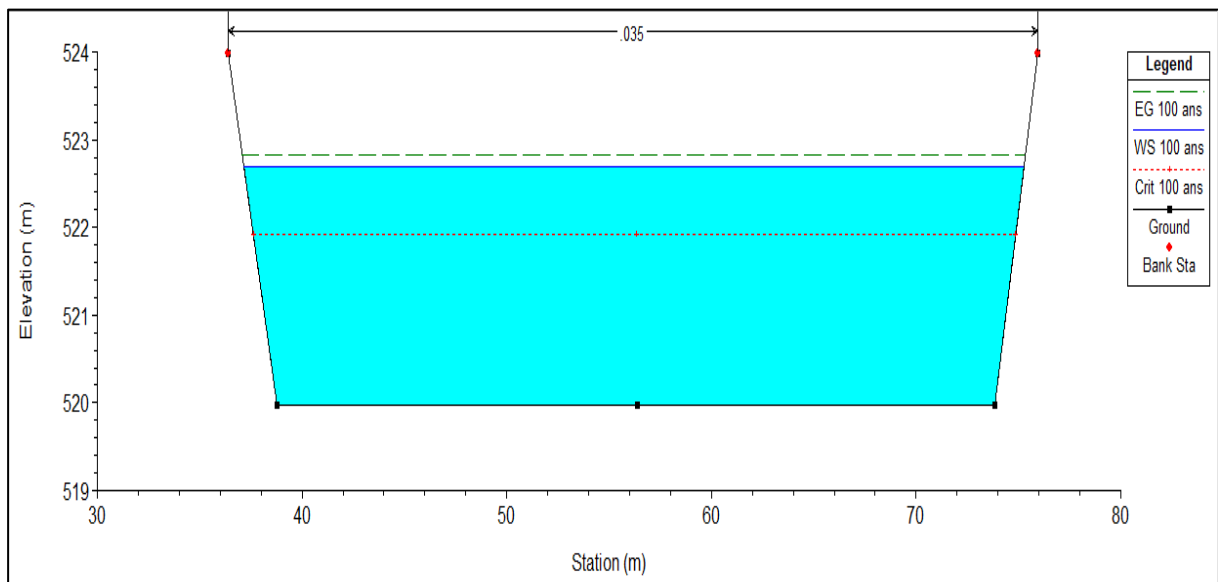


Figure V.16 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal en enrochement pour une crue de 100 ans sur le tronçon Amont d'oued Mekerra (station 6212).

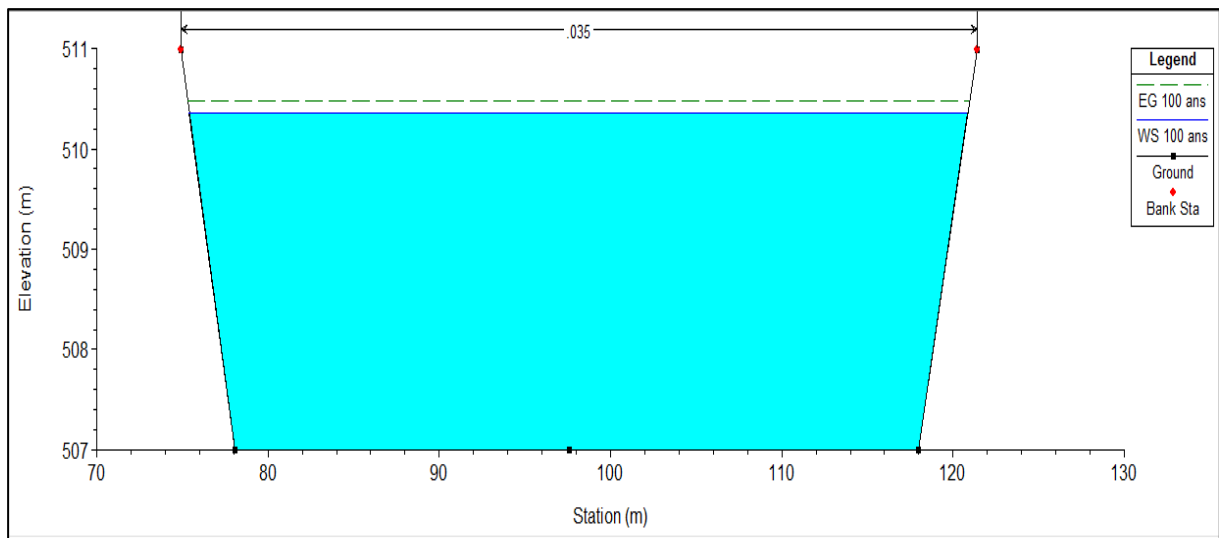


Figure V.17: Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon du milieu d'oued Mekerra (station 2939).

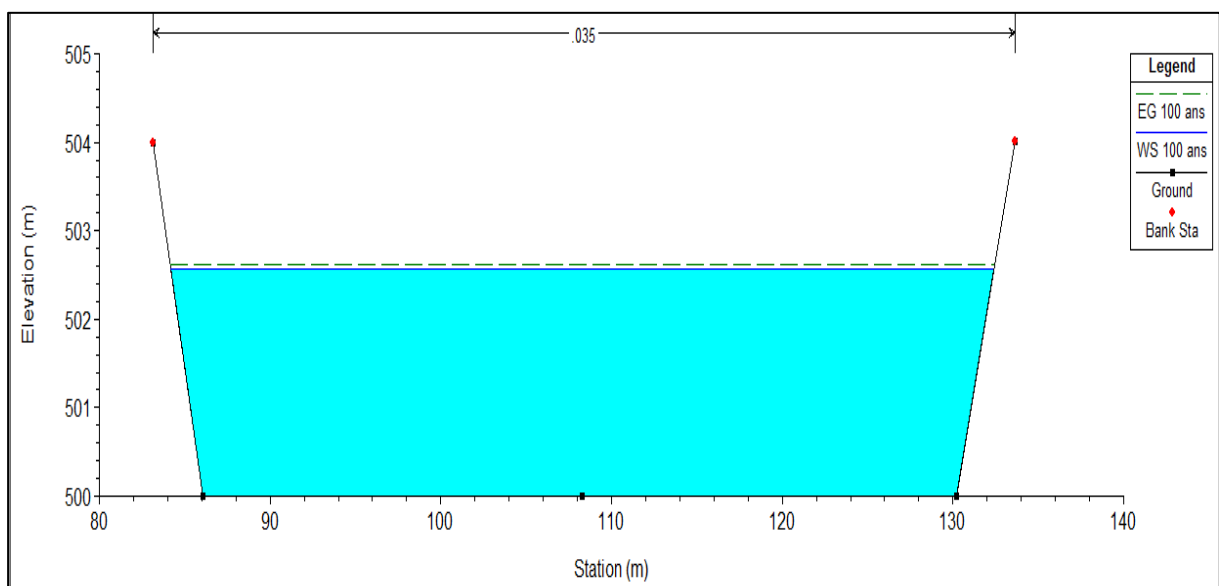


Figure V.18 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon aval d'oued Mekerra (station 140).

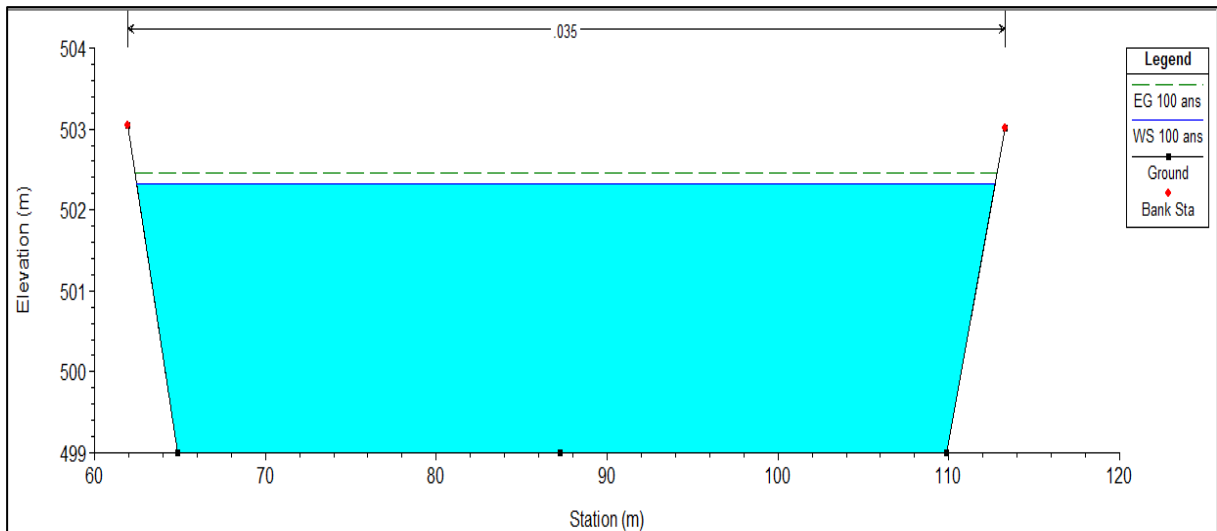


Figure V.19: Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon aval d'oued Mekerra (station 15).

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

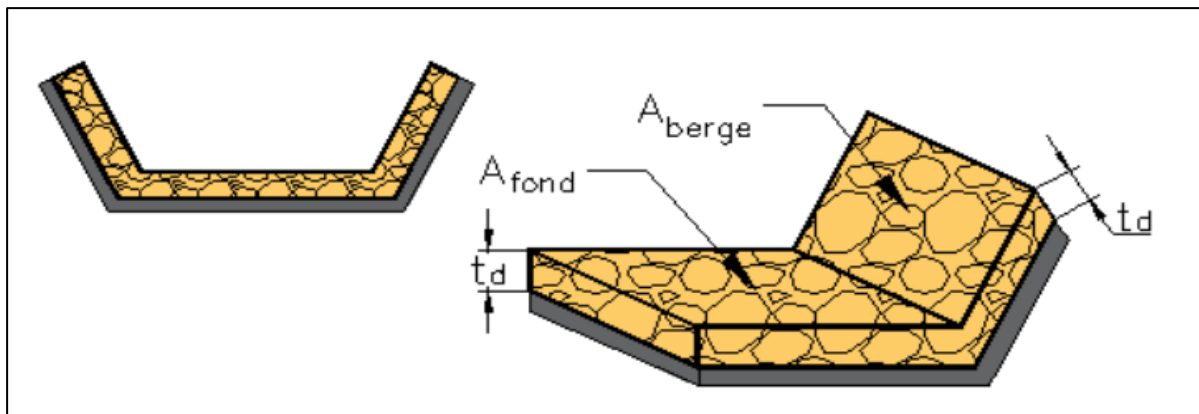


Figure V.20 : Section d'un canal en enrochement.

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

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

Avec :

n : nombre de couche $n = 1$

$D50$: Diamètre médian $D50 = 0.5\text{m}$.

- **Les sections d'enrochement :**

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

On trouve que :

$$A = L \times lalus \quad (V.13)$$

Avec :

L : Longueur de tronçon.

m : Fruit de talus = 2

h : la hauteur de tronçon

Tableau V.17 Calcul Les Sections d'engrènement.

		L(m)	l (m)	S (m²)
Amont	Fond	1700	23	39100
	Talus gauche	1700	8.95	15215
	Talus droite	1700	8.95	15215
Milieu	Fond	2300	20	46000
	Talus gauche	2300	8.95	20585
	Talus droite	2300	8.95	20585
Aval	Fond	1730	18	31140
	Talus gauche	1730	8.95	15483.5
	Talus droite	1730	8.95	15483.5

- **Volume globale de dimensionnement**

$$g_{b,d} = A \times td \quad (V.14)$$

Tableau V.18 Calcul Volumes d'engrènement.

		n	D50 (m)	td(m)	A(m²)	V(m³)
Amont	Fond	1	0,5	0.5	39100	19550
	Talus gauche	1	0,5	0.5	15215	7607.5
	Talus droite	1	0,5	0.5	15215	7607.5
Milieu	Fond	1	0,5	0.5	46000	23000
	Talus gauche	1	0,5	0.5	20585	10292.5
	Talus droite	1	0,5	0.5	20585	10292.5
Aval	Fond	1	0,5	0.5	31140	15570
	Talus gauche	1	0,5	0.5	15483.5	7741.75
	Talus droite	1	0,5	0.5	15483.5	7741.75
Volume totale						109403.5

Tableau V.19 Sections du géotextile.

Traçon	Coté	A(m ²)
Amont	Fond	39100
	Talus gauche	15215
	Talus droite	15215
Milieu	Fond	46000
	Talus gauche	20585
	Talus droite	20585
Aval	Fond	31140
	Talus gauche	15483.5
	Talus droite	15483.5
Surface	Totale (m ²)	218807

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

V.3.2.2 Évaluation du coût de la variante

Illustrés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau V.20 Estimation pour la variante du canal en enrochement de l'oued Mekra.

Désignations des travaux	Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)	
Terrassement	Déblais	m3	165776	250	110,922,250
	Remblais	m3	819034	700	5,733,23,800
Enrochement	m3	109404	15000	1,641,060,000	
Géotextile	m2	218807	5000	1,094,035,000	
Montant total				3,419,341,050	
TVA 19%				649,674,799.5	
Total TTC				4,069,015,850	

- **D'après les résultats obtenus :**

L'enrochement est une solution couramment utilisée pour protéger le lit et les berges des chenaux à surface libre contre l'érosion, grâce à ses avantages tant environnementaux qu'hydrauliques. Il présente une apparence naturelle et favorise une colonisation rapide par la végétation. Cependant, sa mise en œuvre peut être coûteuse, en raison du prix des roches, de leur transport, et de la main-d'œuvre spécialisée requise. De plus, les canaux en enrochement occupent généralement plus d'espace que d'autres types de canaux, ce qui peut poser des problèmes dans les zones restreintes. Les roches peuvent également se déplacer ou s'éroder, nécessitant une maintenance régulière pour garantir leur efficacité.

V.3.3 Canal en gabion

Un gabion est une structure composée de casiers métalliques ou de cages en treillis, remplis de pierres ou de graviers, utilisée dans divers projets de construction pour la stabilisation des sols, la protection contre l'érosion, la construction de murs de soutènement et le revêtement de canaux. Les matelas en gabions, qui sont disponibles en différentes dimensions, telles que $2,0 \times 1,0 \times 0,5$ m et $2,0 \times 1,0 \times 1,0$ m, sont particulièrement employés pour le revêtement et la protection contre les affouillements. Lors de leur mise en place, les sacs sont agencés en escalier, garantissant ainsi la stabilité des berges.

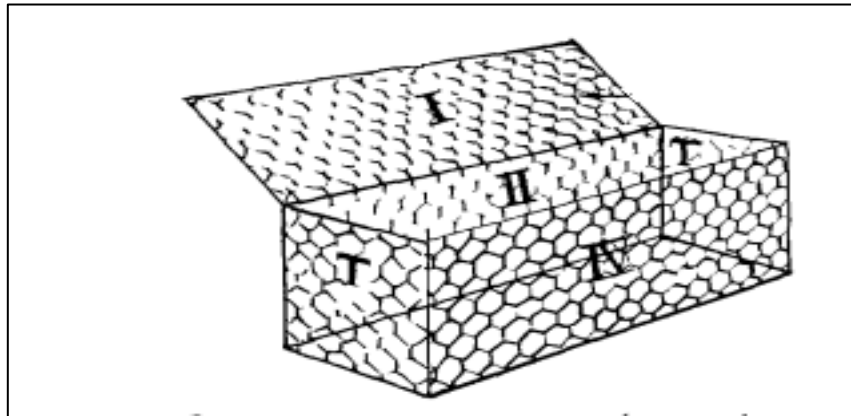


Figure V.21 Cage de gabion.

- **Dimensionnement**

La troisième variante propose la réalisation d'un canal en gabion de forme trapézoïdale, s'étendant sur 5730 mètres. Ce canal, divisé en trois tronçons distincts, traverse le centre-ville, divisant ainsi la ville en deux. Il est dimensionné pour supporter un débit de $652 \text{ m}^3/\text{s}$.

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

- Section S_m :

$$S_m = 0.5k(k - 1) + bk \quad (\text{V.15})$$

- Périmètre P_m (m) :

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

- Rayon hydraulique R_h (m) :

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

Avec :

K : le nombre d'étages.

b : largeur du canal.

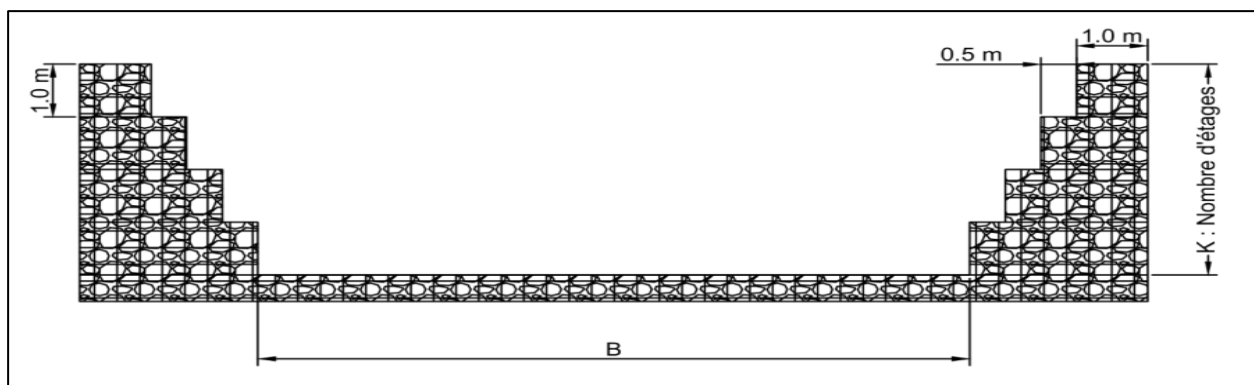


Figure V.22 Schéma de canal en gabion

- Variante 03 (Tronçon Amont)

Tableau V.21 Dimensions de canal de l'aménagement en gabion de l'Oued Mekerra (Amont).

Traçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente de Projet (%)	Larguer de fond	Hauteur de canal(m)	La rugosité
Amont	6121	3889	1730	0.005	36	4	0.035

Tableau V.22 Résultats des calculs du nombre de caisses nécessaires pour le canal en gabions en amont de l'oued Mekerra.

k(caisses)	Q	S	P	R
10	2827.794	410	65	6.308
9	2349.597	360	62	5.806
8	1954.313	316	59	5.356
7	1585.730	273	56	4.875
6	1245.240	231	53	4.358
5	934.745	190	50	3.800
4	656.907	150	47	3.191
3	415.579	111	44	2.523
2	216.654	73	41	1.780
1	70.156	36	38	0.947

- Variante 03 (Tronçon Intermédiaire)

Tableau V.23 Dimensions de canal de l'aménagement en gabion de l'Oued Mekrra (milieu).

Traçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente de Projet (%)	Larguer de fond	Hauteur de canal(m)	La rugosité
Milieu	3889	1763	2300	0.004	40	4	0.035

Tableau V.24 Résultats des calculs du nombre de caisses nécessaires pour le canal en gabions en milieu de l'oued Mekrra.

k(caisses)	Q	S	P	R
10	2838.464	450	69	6.522
9	2362.787	396	66	6.000
8	1965.020	348	63	5.524
7	1593.940	301	60	5.017
6	1251.063	255	57	4.474
5	938.422	210	54	3.889
4	658.813	166	51	3.255
3	416.207	123	48	2.563
2	216.585	81	45	1.800
1	69.967	40	42	0.952

- Variante 03 (Tronçon Aval)

Tableau V.25 Dimensions de canal de l'aménagement en gabion de l'Oued Mekrra (Aval).

Traçon	Section de départ	Section D'arrivé	Longueur (m)	Pente de Projet (%)	Larguer de fond	Hauteur de canal(m)	La rugosité
Aval	1763	15	1700	0.003	46	4	0.035

Tableau V26 Résultats des calculs du nombre de caisses nécessaires pour le canal en gabions en aval de l'oued Mekrera.

k(caisses)	Q	S	P	R
10	2864.631	510	75	6.800
9	2389.416	450	72	6.250
8	1986.484	396	69	5.739
7	1610.473	343	66	5.197
6	1263.050	291	63	4.619
5	946.405	240	60	4.000
4	663.486	190	57	3.333
3	418.403	141	54	2.611
2	217.229	93	51	1.824
1	69.973	46	48	0.958

- D'après les calculs de nombre de caisse, nous pouvons utiliser un canal composé de 4 caisses, garantissant un débit de 652 m³/s avec une marge de sécurité de 1 m sur toute la longueur des trois tronçons du canal. La largeur du canal varie entre 36, 40, et 46 mètres.
- **Paramètre d'écoulement**

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

Tableau V.27 Résultats de la simulation de l'écoulement dans un canal en gabions de l'Oued Mekerra (Source : HEC-RAS).

River Station	Min Ch El (m)	W.S Elev (m)	Crit W.S (m)	E.G Elev (m)	E.G Slop (m/m)	Vel Chnl(m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froud #Chl
6121	499.19	526.15	502.65	526.54	0.000026	4.45	146.52	35.12	1.77
6017	521.8	524.95	524.95	526.39	0.09139	4.93	132.25	42.92	1.94
5912	518.8	524.23	521.89	524.59	0.001236	4.82	135.27	42.71	1.82
5619	516.16	524.23	524.23	524.36	0.000296	4.63	140.82	43.47	1.29
5502	517.7	524.01	523.99	524.29	0.000811	4.71	138.43	42.33	1.03
5409	518.6	523.7	523.7	524.17	0.001715	4.92	132.52	44.6	1.46
5325	517.2	523.75	523.11	524.02	0.000759	4.42	147.51	46.01	1.32
5224	519.2	522.32	522.32	523.72	0.009097	4.7	138.72	44.63	1
5136	516.5	518.59	519.65	522.11	0.036165	4.83	134.99	40.08	1.89
5069	515.8	519.8	518.92	520.6	0.003899	4.61	141.43	44.41	1.63
5015	514	520.06	520.06	520.36	0.000872	4.34	150.23	46.27	0.98
4932	515.5	519.25	517.5	520.16	0.004749	4.77	136.69	47.01	1.74
4841	515	518.91	518.91	519.73	0.004118	4.48	145.54	46.17	1.62
4749	514	518.89	516.45	519.38	0.001921	4.66	139.91	40.74	1.50
4636	514.2	518.21	516.38	519.04	0.004001	4.76	136.97	41.39	1.69
4477	513.5	517.72	515.80	518.44	0.003284	4.41	147.85	46.36	1.65
4387	513.4	517.34	515.63	518.11	0.003901	4.63	140.82	41.98	1.60
4264	512.7	516.98	516.98	517.66	0.003045	4.42	147.51	46.72	1.61

4134	512.2	516.67	516.67	517.27	0.002592	4.4	148.18	46.04	1.23
3889	511.8	515.96	515.96	516.64	0.001197	4.08	148.86	46.44	1.27
3809	510.7	516.05	513.04	516.41	0.001892	3.54	184.18	52.18	1.30
3542	510.9	515.52	512.52	516	0.001724	3.43	190.09	52.38	1.23
3466	510.7	515.41	514.84	515.85	0.00095	3.58	182.12	54.31	1.46
3239	510	515.22	513.61	515.53	0.000893	3.53	184.70	56.55	1.43
3054	509.4	515.07	510.10	515.35	0.001057	3.92	166.33	55.88	1.97
2939	509.2	514.89	512.31	515.24	0.001433	3.95	165.06	48.56	2.01
2814	509.4	514.65	514.65	515.07	0.009522	3.87	168.48	49.69	2.20
2691	510.2	513.16	513.16	514.61	0.000822	3.45	188.99	42.7	1
2540	507.5	513.47	510.41	513.75	0.001335	3.78	172.49	53.53	2.23
2347	508	513.16	513.16	513.54	0.00156	3.47	187.90	52.36	2.24
2268	508	512.99	509.23	513.42	0.001523	3.45	188.99	49.75	2.14
2176	507.8	512.85	518.64	513.28	0.000918	4.06	160.59	49.03	1.78
2074	507	512.82	510.82	513.12	0.009324	3.91	166.75	52.04	2.03
1985	508.2	511.43	511.43	512.82	0.00288	3.44	189.53	45.16	1
1763	505.8	509.72	508.54	510.34	0.001277	3.8	171.58	50.51	2.11
1630	504.6	509.65	509.65	510.02	0.001277	3.57	182.63	54.2	1.92
1405	504.6	509.55	509.55	509.77	0.000668	3.64	179.12	52.5	1.3
1219	502.8	509.49	507.32	509.66	0.000428	3.82	170.68	51.93	1.24
1065	502.7	509.42	507.46	509.59	0.00043	3.45	188.99	56.41	1.04
918	503.7	509.25	509.25	509.5	0.0008	3.44	189.53	56.73	1.23
762	503	509.18	509.18	509.38	0.000544	3.81	171.13	52.21	1.27
596	502	509.16	509.16	509.29	0.000311	3.69	176.69	52.66	1.44
432	502.13	509.21	505.67	509.24	0.000074	3.46	188.44	56.82	1.11
140	501.1	509.06	505.98	509.2	0.000281	3.59	181.62	54.99	1.19
69	502.15	508.99	507.50	509.17	0.000437	3.75	173.87	56.24	1.24
15	505	508.22	507.68	509.04	0.005004	3.8	171.58	55.56	2.21

- **Interprétation**

- **Selon le nombre de Froude :** Les valeurs du nombre de Froude indiquent un régime d'écoulement torrentiel lorsque $Fr > 1$. Cette observation est clairement confirmée par les résultats, attestant de ce type d'écoulement.
- **Selon la vitesse :** La vitesse d'écoulement, variant entre 3.43 et 4.93 m/s, est conforme aux vitesses admissibles. Cela suggère qu'il n'y aura ni envasement ni érosion du canal.

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

V3.3.1 Les sections en travers

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

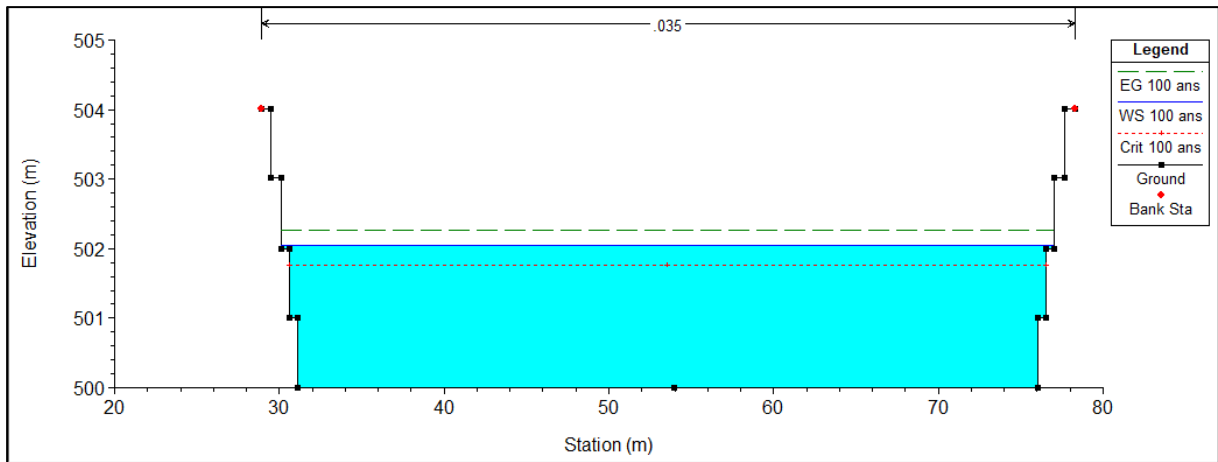


Figure V.23 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon d'oued amont Mekerra (station 15).

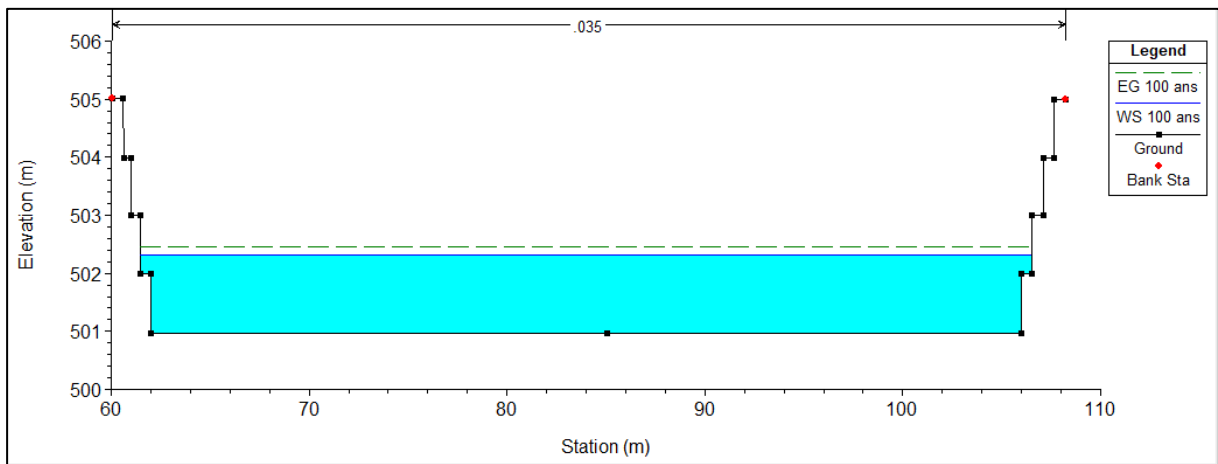
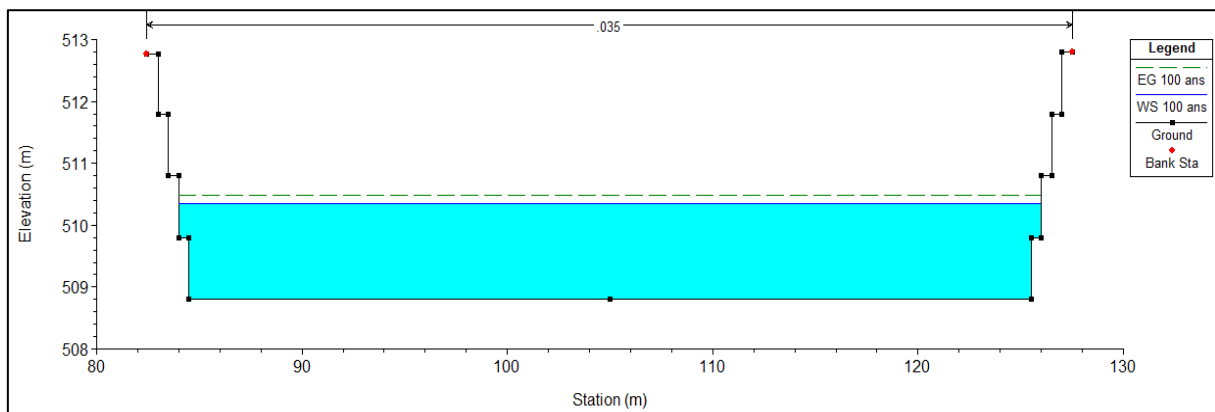


Figure V.24 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon amont d'oued Mekerra (station 140).

Figure V.25 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon du milieu d'oued Mekerra (station 2939).



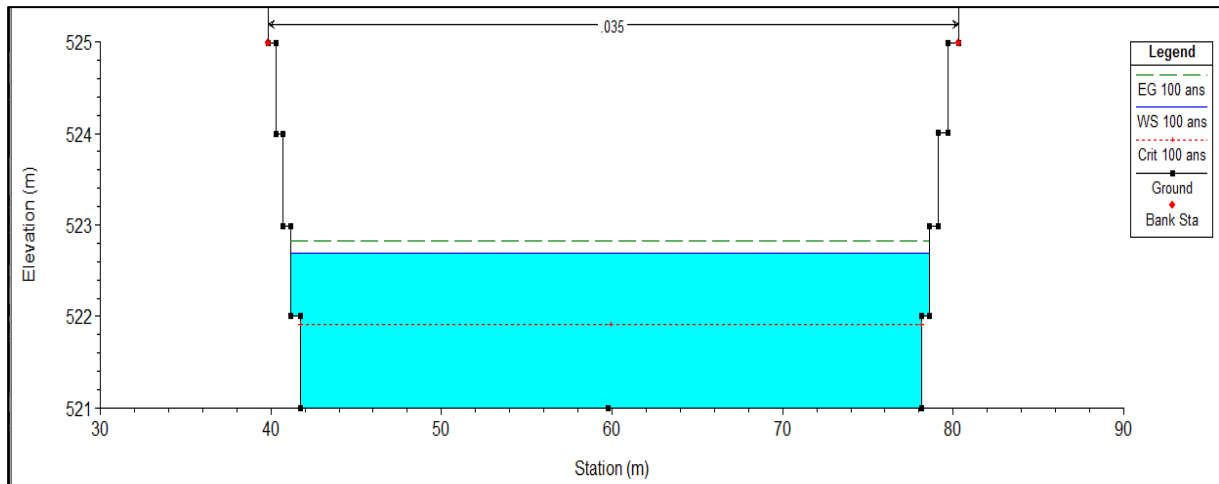


Figure V.26 : Profil en travers d'un canal trapézoïdal pour une crue de 100 ans sur le tronçon aval d'oued Mekerra (station 6121).

V.3.3.2 Évaluation du coût de la variante

Tableau V.28 Devis de la variante canal en gabion en amont d'oued Mekerra.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m ³	338216	250	84,554,000
	Remblais	m ³	14013	700	9,809,100
Gabion		m ³	64010	5000	320,050,000
Géotextile		m ²	98610	5000	493,050,000
Montant total					907,463,100

Tableau V.29 Devis de la variante canal en gabion en milieu d'oued Mekerra.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m ³	321428	250	80,357,000
	Remblais	m ³	16560	700	11,592,000
Gabion		m ³	78200	5000	391,000,000
Géotextile		m ²	117300	5000	586,500,000
Montant total					1,069,449,000

Tableau V.30 Devis de la variante canal en gabion en aval d’oued Mekerra.

Désignations des travaux		Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA/mL)
Terrassement	Déblais	m3	272507	250	68,126,750
	Remblais	m3	11220	700	7,854,000
Gabion		m3	12572	5000	6,286,0000
Géotextile		m2	98610	5000	493,050,000
Montant total					63,189,0750

Tableau V.31 Devis de la variante canal en gabion Totale d’oued Mekerra.

	Tronçons		
	Amont	Milieu	Aval
Montant (DA)	651,378,100	831,989,000	631,890,750
Montant Totale (DA)	211,525,7850		
TVA 19%	401,898,991.5		
Total TTC	2,517,156,842		

- **D’après les résultats obtenus**

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

V.4 Choix de la variante d’aménagement :

Toutes les trois options semblent capables de gérer le débit de crue sans risque de débordement. Le choix de la variante d’aménagement sera donc orienté par des critères technico-économiques, visant à rassurer les futurs investisseurs, à préserver l’environnement naturel, à prévenir l’érosion des berges, et à améliorer l’esthétique urbaine. Ce choix prendra également en compte les priorités locales, les particularités environnementales et la géomorphologie de la rivière. Dans notre cas, l’Oued Mekerra traverse la ville sur toute sa longueur, la divisant en deux. Les tronçons amont et aval seront aménagés avec un canal trapézoïdal en gabion, tandis que le tronçon intermédiaire sera renforcé par un enrochement, afin de préserver l'esthétique urbaine. C'est pourquoi nous avons opté pour la variante mixte, alliant enrochement et gabion.

V.4.1 Proposition

Dans le cadre de la protection de la ville de Sidi Bel Abbés face aux crues centennales, la mise en place d'un barrage de rétention est une solution stratégique. Ces barrages jouent un rôle déterminant dans la régulation des débits des cours d'eau, en particulier en période de fortes pluies ou de fonte des neiges. En stockant temporairement les eaux excédentaires, ils permettent de réduire les risques d'inondation en aval, en libérant l'eau de manière contrôlée une fois le danger passé. Cette approche offre une gestion sécurisée et prévisible des flux d'eau, protégeant ainsi les zones riveraines des dommages liés aux inondations. Les bassins de rétention sont des infrastructures hydrauliques essentielles, conçues pour emmagasiner temporairement les eaux de crue. Leur fonction principale est de réguler les débits en aval, en restituant progressivement l'eau une fois la crue terminée. Ce mécanisme permet d'atténuer les risques d'inondation, notamment en réduisant les pics de crue. De plus, ces infrastructures jouent un rôle crucial en période de sécheresse, en maintenant des niveaux d'eau stables dans les cours d'eau grâce à une libération contrôlée. Les barrages, en tant que structures hydrauliques complexes, nécessitent une planification rigoureuse et une conception soignée. Leur efficacité et leur durabilité dépendent d'un entretien constant et minutieux. Ce type d'infrastructure, robuste par nature, est essentiel pour assurer une protection durable contre les inondations, notamment dans des contextes où les événements extrêmes sont de plus en plus fréquents.

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

La vue en trois dimensions des tronçons de l'Oued Mekerra après aménagement est illustrée dans les figures ci-dessous. Ces représentations montrent les tronçons amont, intermédiaire et aval de l'Oued Mekerra, aménagés selon la variante combinée choisie (gabion).

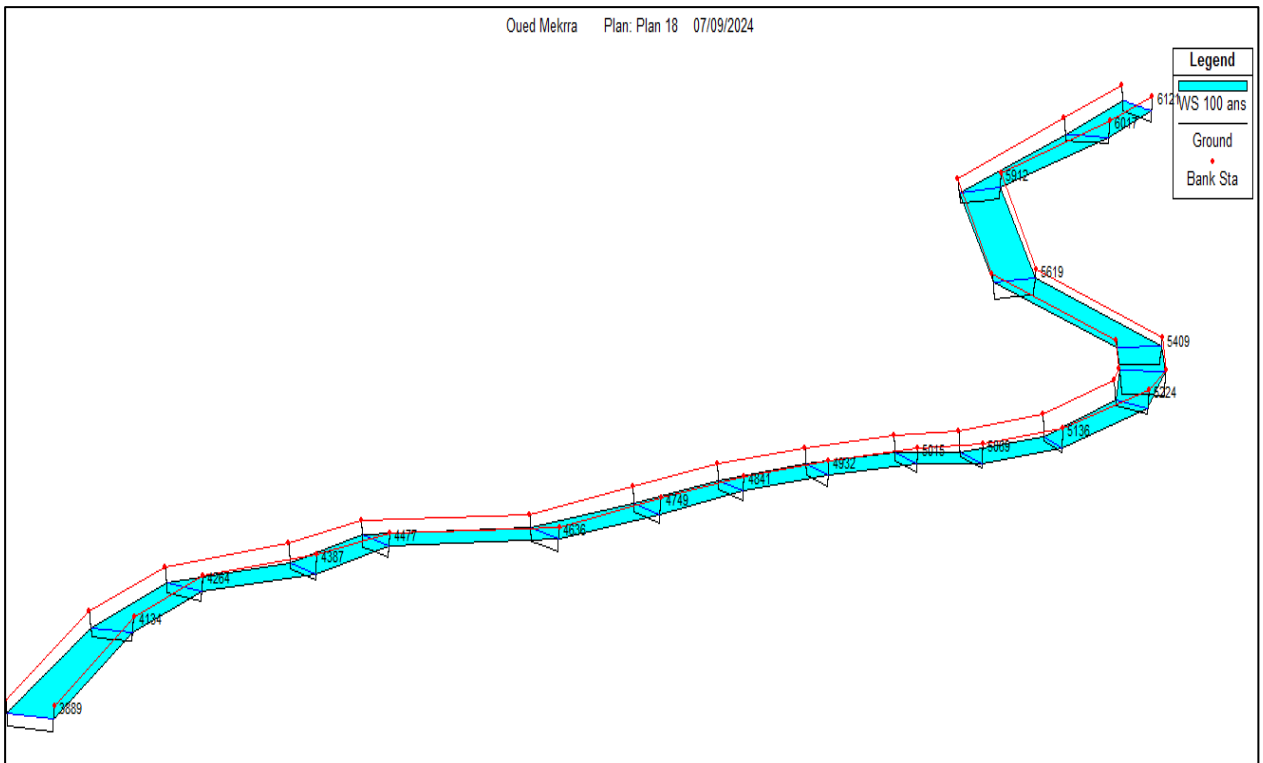


Figure V.27 Vue en 3D du tronçon amont de l'Oued Mekerra.

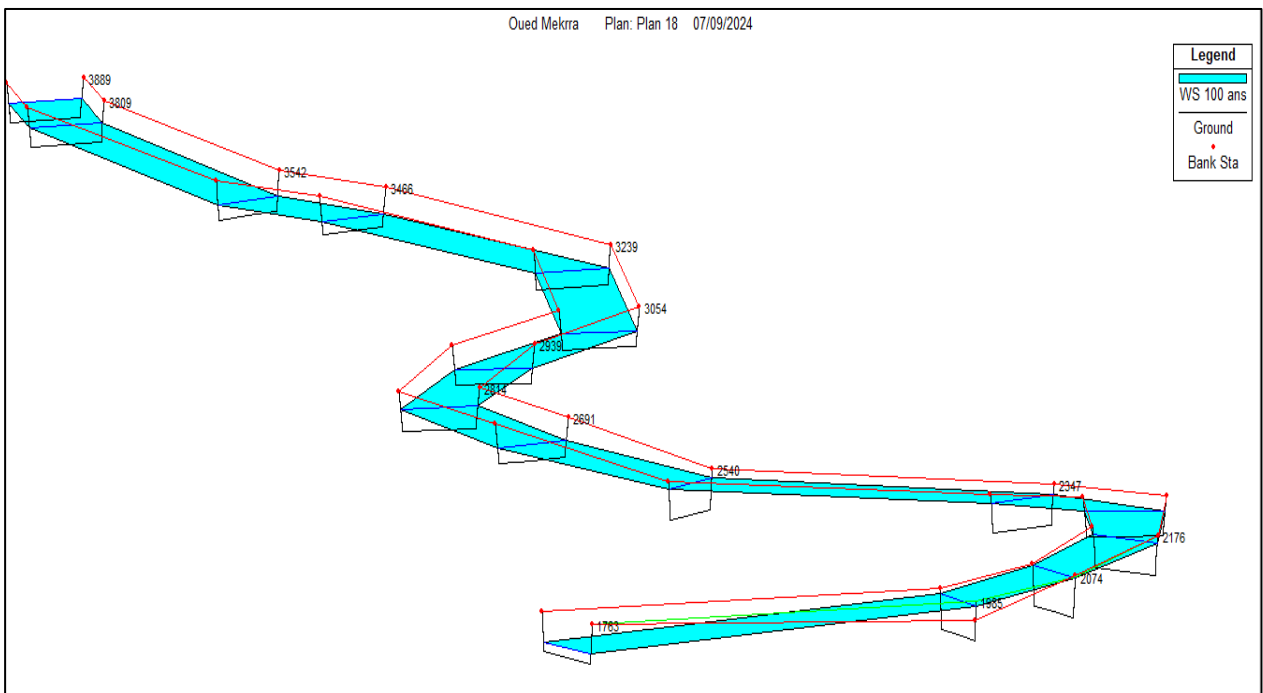


Figure V.28 Vue en 3D du tronçon intermédiaire de l'Oued Mekerra.

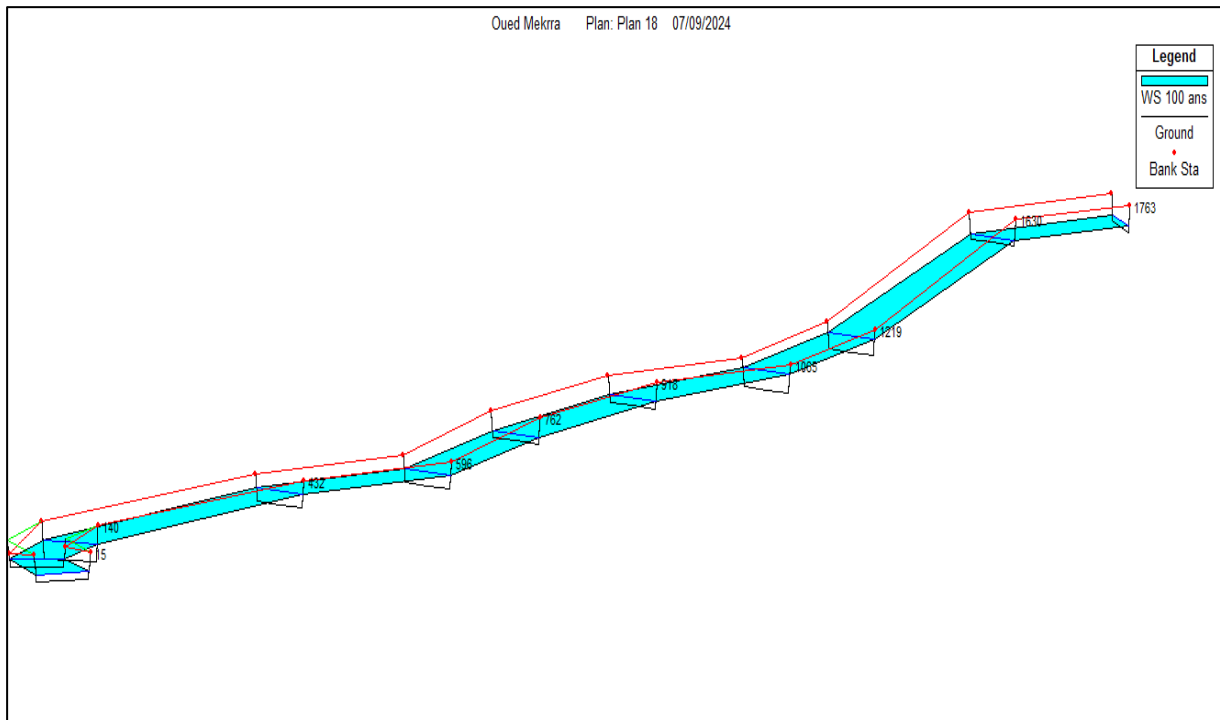


Figure V.29 Vue en 3D du tronçon aval de l'Oued Mekerra.

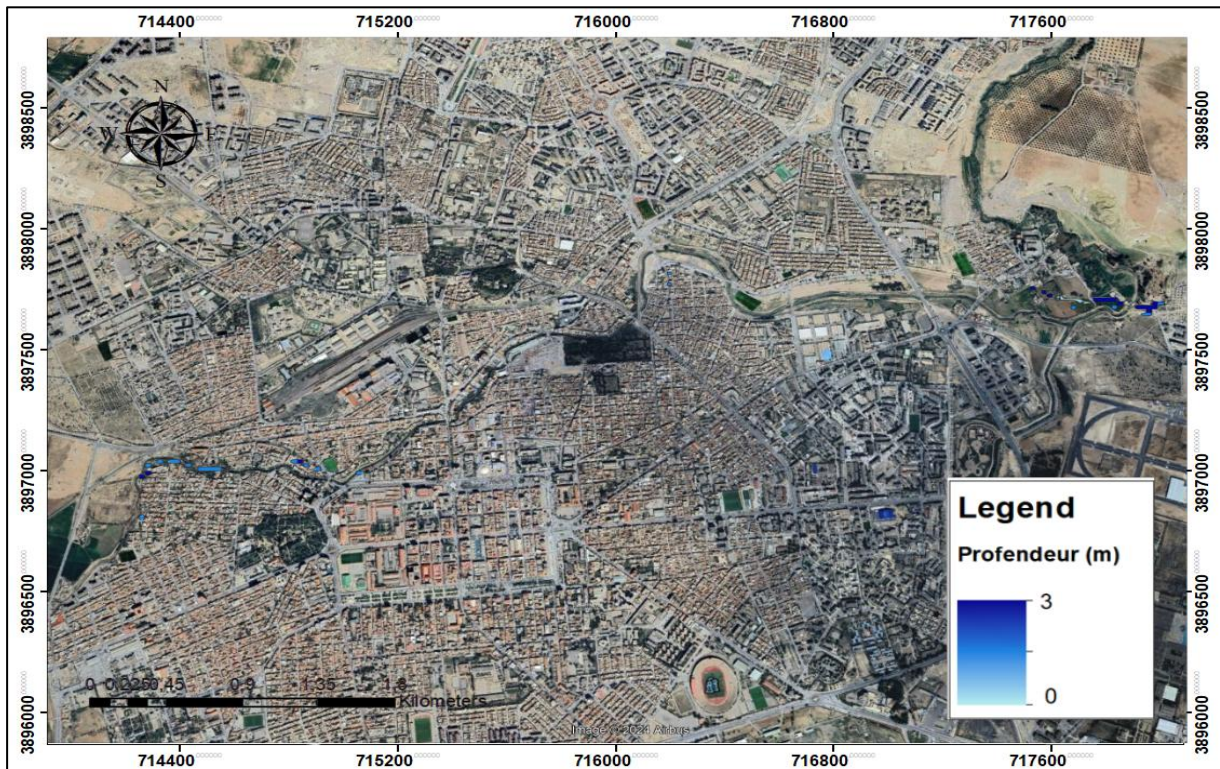


Figure V.30 Carte de profondeurs après aménagement pour une crue centennale d'oued Mekerra.

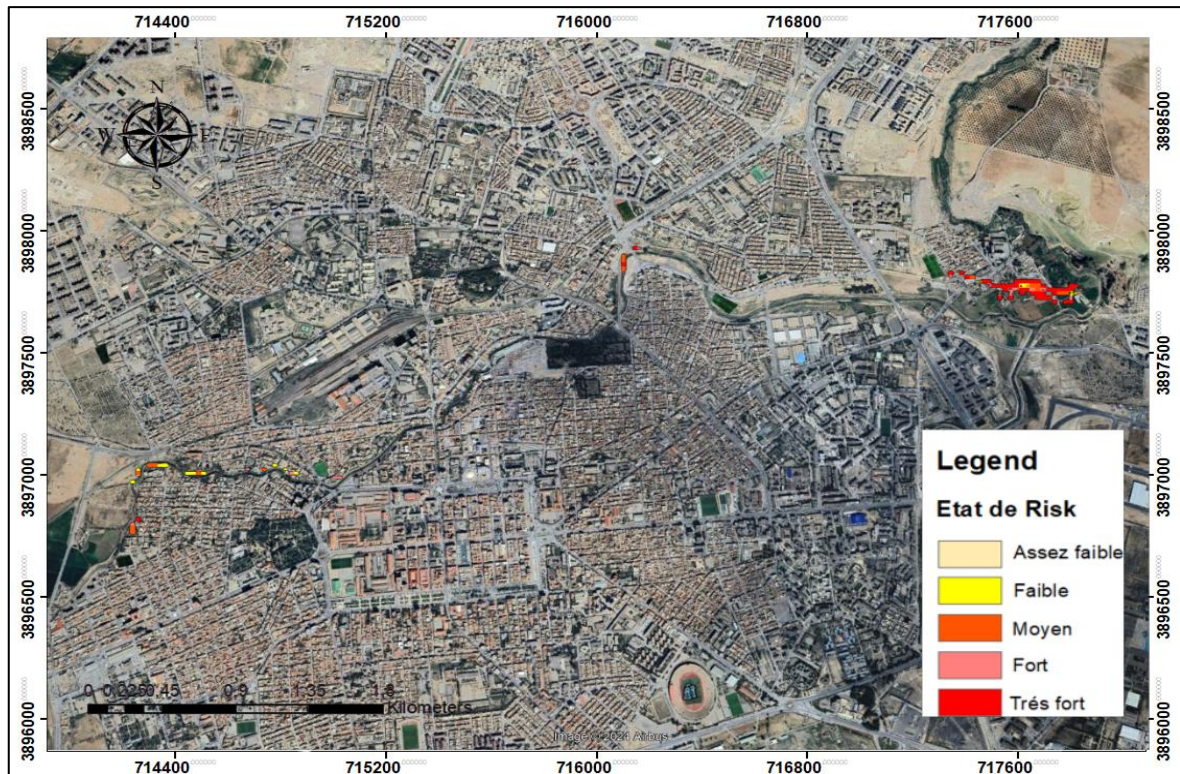


Figure V.31 Carte des risques d'inondation après aménagement pour la ville de Sidi Bel Abbés.

Conclusion

Le dimensionnement du projet d'aménagement de l'Oued Mekerra repose sur une évaluation précise des débits d'écoulement, calculés à l'aide de méthodes hydrologiques avancées. Cette analyse permet de sélectionner les solutions de conception les plus adaptées pour assurer la protection des berges. Pour les tronçons amont et intermédiaires aval, il est recommandé d'installer des canaux en gabion. Cette solution est particulièrement bien adaptée en raison des méandres présents dans ces sections. Les canaux en gabion limiteront l'érosion des côtés extérieurs tout en réduisant les dépôts de sédiments sur les côtés intérieurs, ce qui contribuera à stabiliser les méandres et à réguler leur évolution au fil du temps. En outre, cette option présente des avantages en termes de coût de construction, étant à la fois économique et efficace. La protection des berges sera assurée par un revêtement en gabion. Cette mesure répond aux exigences esthétiques de la ville tout en luttant contre la dégradation observée dans cette zone. Le revêtement en gabion se distingue également par son coût raisonnable.

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

C

hapitre VI

Organisation de chantier

Introduction

L'organisation d'un chantier est un processus clé qui vise à assurer la réalisation efficace et économique d'un projet de construction. Elle englobe l'ensemble des dispositions et des stratégies mises en œuvre pour coordonner les ressources humaines et matérielles, dans le respect des directives générales établies par le maître d'ouvrage. Ces directives se concentrent principalement sur trois axes fondamentaux : la qualité, l'économie et la rapidité d'exécution. Une reconnaissance approfondie et minutieuse du site est essentielle pour élaborer un plan technologique optimisé, permettant une utilisation rationnelle des équipements tout au long des différentes phases du projet. Cela implique non seulement la définition précise des méthodes d'exécution et des procédures opérationnelles, mais aussi l'organisation adéquate des postes de travail, favorisant une mécanisation avancée et une répartition efficace des tâches.

L'objectif ultime est de minimiser les coûts tout en respectant les délais impartis et en garantissant la sécurité sur le chantier. Pour ce faire, il est crucial de sélectionner et de coordonner une main-d'œuvre spécialisée, tout en veillant à ce que la qualité des travaux soit conforme aux exigences techniques et normatives. De plus, une gestion rigoureuse des ressources humaines, notamment en termes de quantité et de qualité du personnel, est indispensable pour optimiser le coût de revient du projet. En somme, une organisation de chantier bien pensée et exécutée permet non seulement de répondre aux contraintes d'espace et de temps imposées par le marché, mais aussi de réaliser le projet en conformité avec les plans établis, en garantissant une qualité supérieure, des délais réduits, des coûts maîtrisés, et une sécurité optimale pour tous les intervenants.

VI.1 Généralité

VI.1.1 Rôles et responsabilités des participants au chantier

Avant d'aborder les détails spécifiques d'un projet, il est crucial de clarifier les rôles et responsabilités des différents acteurs impliqués dans le processus de construction. Sur un chantier, chaque intervenant joue un rôle clé pour garantir le bon déroulement du projet. Les principaux intervenants, chacun avec des missions bien définies, collaborent pour s'assurer que le projet se déroule conformément aux exigences de qualité, de sécurité, et de respect des délais. Cette coordination minutieuse entre les différentes parties prenantes est essentielle pour le succès du chantier, qu'il s'agisse de la phase de conception, de la planification ou de l'exécution.

VI.1.1.1 Maître d'ouvrage

Maître d'ouvrage (MOA), qu'il soit une personne physique ou morale (entreprise, institution, particulier, etc.), est l'entité pour laquelle les travaux de construction ou de rénovation sont réalisés. Il joue un rôle central dans la définition des objectifs du projet, l'organisation du financement et la passation des marchés. La mission du Maître d'ouvrage commence par

l'établissement du plan de financement basé sur les estimations fournies par le Maître d'œuvre, permettant ainsi de garantir le paiement de l'entreprise chargée de la réalisation des travaux. Il est responsable de la gestion globale du projet, de la coordination des différents acteurs impliqués, et de la communication des informations pertinentes tout au long du processus.

Le Maître d'ouvrage a plusieurs responsabilités clés :

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

VI.1.1.2 Maître d'œuvre

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

Le Maître d'œuvre joue un rôle clé dans :

- **La Conception et Supervision** : Il est responsable de transformer les exigences du propriétaire en plans détaillés et spécifications, supervisant l'exécution des travaux pour garantir le respect des objectifs budgétaires et des normes de qualité.
- **Gestion du Planning** : Il établit et ajuste le planning des travaux en fonction des délais contractuels, des décalages éventuels, et des besoins du chantier.
- **Coordination et Communication** : Il assure la coordination entre les différents corps d'état, propose des mesures correctives en cas de problèmes, et participe aux réunions hebdomadaires de chantier.

- **Contrôle et Documentation** : Il prépare les annexes de suivi, enregistre les décalages, établit les ordres de service, et s'occupe des attachements de travaux. Il est également chargé de la réception des ouvrages, de l'élaboration du dossier de consultation des entreprises, et de l'assistance au maître d'ouvrage pour l'évaluation des offres.
- **Responsabilité** : Il détient une autorité effective sur le chantier et est responsable de la bonne exécution des travaux, y compris la proposition de la réception des ouvrages et le règlement des paiements.

VI.1.1.3 Entreprise

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

- **Assurance Qualité** : Garantir que les travaux respectent les normes de qualité définies dans le manuel qualité de l'entreprise et le plan assurance qualité spécifique au chantier.
- **Gestion des Ressources** : Planifier et gérer les coûts, ainsi que coordonner le personnel, les matériaux, et les équipements nécessaires pour le projet.
- **Exécution des Travaux** : Réaliser les travaux conformément aux documents contractuels, en respectant le calendrier d'exécution et en évitant les temps morts.
- **Conformité Contractuelle** : S'assurer que toutes les exigences du contrat sont respectées et que les objectifs du projet sont atteints.
- **Responsabilité du Chantier** : Superviser l'ensemble des opérations jusqu'à la réception finale de l'ouvrage.

VI.1.1.4 Entrepreneur

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

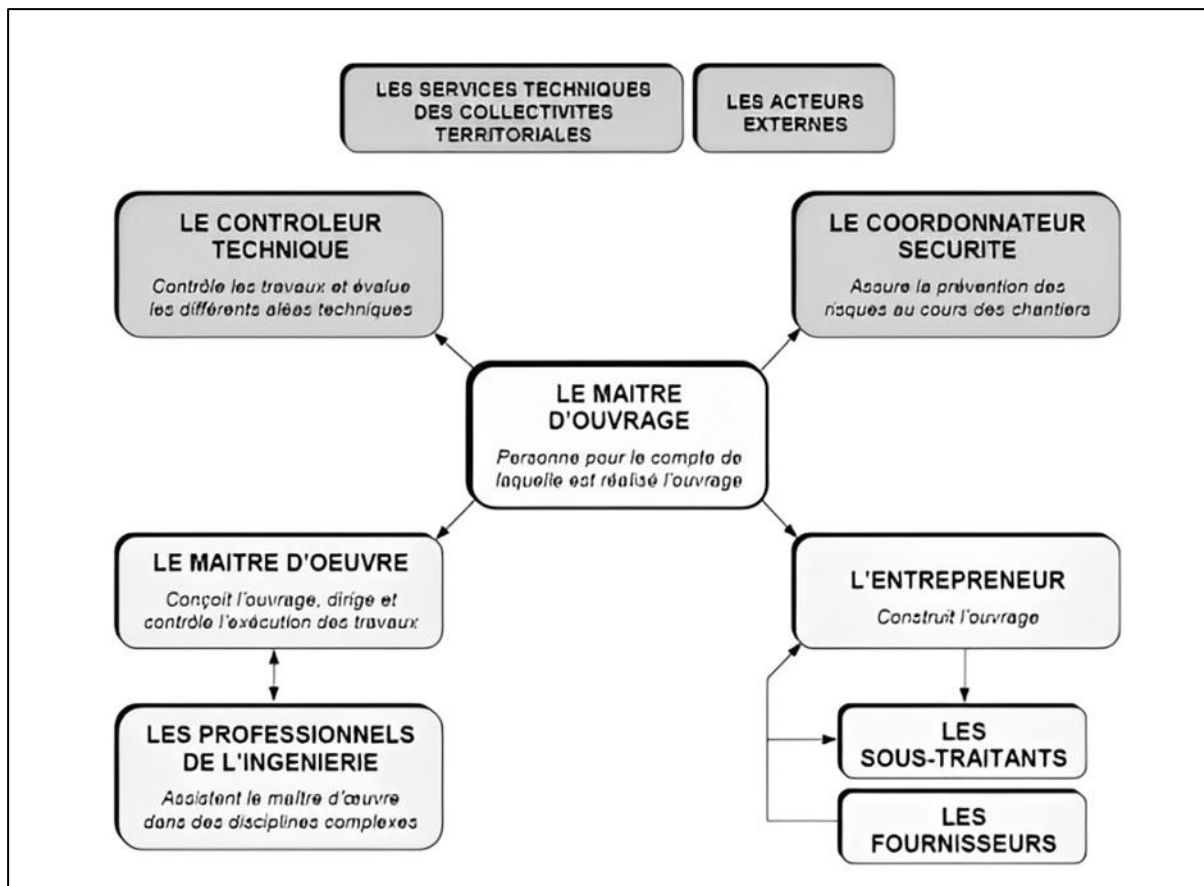


Figure VI.1 Relation entre les personnes du chantier (Ghomari, 2013).

VI.2 Devis quantitatif et estimatif du projet

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

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

- Le coût unitaire des travaux de terrassement.
- Le coût unitaire pour la fourniture et la pose de gabions et de géotextiles.

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

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

	Tronçons		
	Amont	Milieu	Aval
Montant (DA)	907,463,100	1,069,449,000	747,480,750
Montant Totale (DA)	2,724,392,850		
TVA 19%	517,634,641.5		
Total TTC	3,242,027,492		

- Le devis pour l'aménagement de l'oued Mekerra, relatif à la variante du canal trapézoïdal en gabion, est de : **trois milliards deux cent quarante-deux millions vingt-sept mille quatre cent quatre-vingt-douze centimes algériens.**

VI.3 Généralité sur les plannings

VI.3.1 Définition de planification des travaux

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

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

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

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

VI.3.2 Plannings généraux de gestion de l'entreprise

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

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

VI.3.3 Phases de planification

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

- **Collecte d'Informations** : Cette phase implique la synthèse et l'analyse des données issues d'études comparatives, afin d'optimiser le plan de réalisation du projet.
- **Décomposition du Projet** : Le projet est divisé en tâches spécifiques, chacune attribuée à un responsable désigné. Chaque tâche est associée aux besoins en matériel et à une durée de réalisation, basée sur le rythme de travail des équipes ou des machines impliquées.
- **Relations Entre les Tâches** : Deux types de relations entre les tâches doivent être considérés :
 - Logique Séquentielle : Une tâche doit être achevée avant que la suivante puisse commencer.
 - Relations Préférentielles : Certaines tâches peuvent être réalisées en parallèle ou selon un ordre spécifique.
- **Choix de la Méthode de Calcul** : La sélection de la méthode de calcul dépend du type d'ouvrage à réaliser. Pour les projets où les opérations se succèdent de manière linéaire, comme dans notre cas, la méthode du chemin critique (CPM) est généralement la plus appropriée.

VI.3.4 Planification des travaux

On distingue trois types de planification pour les travaux :

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

VI.3.5 Méthode de présentations les plannings

Il existe deux méthodes de planification principales :

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

VI.3.5.1 Méthode basée sur le réseau

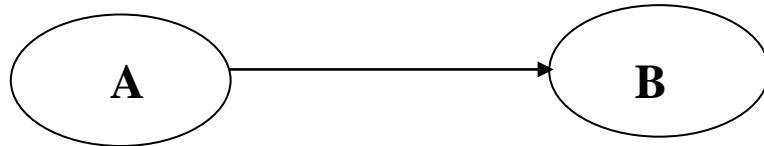
La représentation graphique d'un projet, connue sous le nom de réseau, permet de visualiser la relation entre les différentes opérations, qu'elles soient successives, simultanées ou convergentes, ainsi que leur durée de réalisation. Il existe deux types de réseaux utilisés dans les méthodes de planification, tels que la méthode du chemin critique (CPM) et la technique d'évaluation et de revue de programme (PERT). Ces méthodes se concentrent sur la modélisation des tâches et des événements pour gérer les projets, en identifiant les séquences critiques qui influencent la durée totale du projet.

Le réseau est une représentation visuelle d'un projet qui illustre les relations entre les différentes opérations, qu'elles soient successives, simultanées ou convergentes, ainsi que leurs durées de réalisation. On distingue principalement deux types de réseaux :

- **Réseau à nœuds**

Dans un réseau à nœuds, chaque nœud correspond à une opération ou une étape spécifique du processus, tandis que les flèches indiquent la séquence ou le flux d'exécution entre ces opérations. Ces flèches, souvent directionnelles, précisent l'ordre dans lequel les opérations doivent être réalisées. Ce système permet de visualiser clairement les

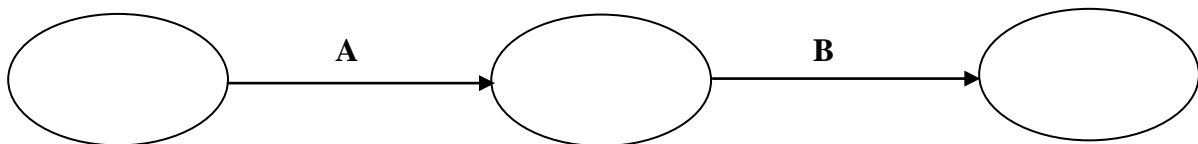
interactions entre les différentes étapes d'un projet. Ainsi, les nœuds représentent les opérations et les flèches illustrent leur enchaînement logique, offrant une compréhension globale du déroulement du processus.



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

▪ Réseau à flèche

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



➤ L'opération A précède l'opération B.

➤ Il est essentiel de souligner que le graphique ne peut être élaboré sans le réseau, car ce dernier constitue un outil de calcul indispensable pour obtenir des réponses à des questions précises. Le graphique, quant à lui, sert à interpréter et à clarifier les données issues du réseau, rendant ainsi ces informations plus accessibles et compréhensibles.

▪ Construction d'un réseau

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

- **Élaboration** de la liste des tâches : Créer une liste détaillée de toutes les activités nécessaires pour compléter le projet, incluant la durée estimée, les ressources nécessaires, et les interdépendances.
- **Identification** des interdépendances : Déterminer les relations entre les tâches pour établir un ordre logique d'exécution.
- **Construction** des graphes partiels : Créer des diagrammes de réseau, tels que les diagrammes PERT ou Gantt, pour représenter visuellement les relations entre les tâches.

- **Regroupement** des graphes partiels : Si le projet comporte plusieurs sous-projets, regrouper les graphes partiels pour former un plan global.
- **Identification des tâches de début et de fin** : Définir les tâches marquant le début et la fin du projet, souvent considérées comme des jalons importants.
- **Création du réseau final** : Assembler l'ensemble des informations pour constituer le réseau complet, prêt pour l'analyse et l'interprétation.

VI.3.6 Différentes méthodes basées sur le réseau

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

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

- **Évaluation des Ressources** : Identifier et déterminer le personnel nécessaire pour l'accomplissement des tâches spécifiques au projet.
- **Analyse Détaillée du Réseau** : Réaliser une analyse minutieuse du réseau des tâches, en décomposant les activités heure par heure et jour par jour, en fonction de l'unité de temps définie.
- **Ajustement aux Contraintes** : Adapter le réseau en fonction des contraintes et des conditions imposées par l'entreprise, afin d'assurer une gestion efficace des ressources et des délais (Benlaoukli, 2004).

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

La Méthode PERT, élaborée par la Marine américaine en 1956 pour le développement des missiles Polaris, est une technique sophistiquée pour la gestion et l'ordonnancement des projets. Elle se distingue par sa capacité à représenter graphiquement les tâches et leurs relations sous forme de réseau, facilitant ainsi l'analyse et le contrôle du projet.

- **Objectifs de la méthode PERT** :
- **Détermination des délais** : Évaluer le délai total nécessaire pour achever le projet et identifier des moyens pour le réduire.
- **Impact des modifications** : Comprendre les conséquences des changements dans la durée des tâches sur le projet global.
- **Optimisation des ressources** : Évaluer les ressources nécessaires et planifier efficacement.

- **Relation délais-coûts** : Analyser le lien entre les délais de réalisation et les coûts associés.
- **Rôle du réseau PERT**
- **Visualisation et Coordination** : Le réseau PERT fournit une représentation visuelle de l'enchaînement logique des tâches, facilitant ainsi leur coordination et leur contrôle. Cette visualisation améliore les prévisions concernant la durée et les coûts du projet.
- **Identification du chemin critique** : Le tracé du réseau permet de déterminer le chemin critique, c'est-à-dire la séquence la plus longue de tâches depuis le début jusqu'à la fin du projet. Cela permet de :
 - Calculer la durée totale du projet.
 - Identifier les tâches dont les retards entraînent un allongement du projet.

VI.3.7 Méthode de calcul PERT

VI.3.7.1 Les paramètres de la méthode PERT

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

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

VI.3.7 Méthodes basées sur le graphique

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

VI.3.7.1 Méthodes basées sur le graphique

- **Méthode linéaire (Technique de la ligne d'équilibre) :** Conçue pour la planification de projets de construction avec des tâches répétitives, cette méthode est particulièrement adaptée aux projets où des opérations similaires sont réalisées plusieurs fois. Elle s'avère efficace pour des chantiers de grande envergure, comme la construction de bâtiments identiques ou de structures linéaires telles que les routes et les voies ferrées.
- **Méthode à barres :** Cette technique implique la création de deux réseaux et d'un diagramme à barres (planning). Elle offre une visualisation claire des interdépendances entre les tâches et de leur séquence d'exécution, facilitant ainsi la gestion du projet en fournissant une vue d'ensemble des activités et de leur chronologie.
- **Choix de la méthode de calcul :** La sélection de la méthode de calcul dépend du type de projet en cours. Pour des opérations suivant une séquence spécifique, comme dans notre cas, la méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique) est recommandée (Benlaoukli, 2004).

VI.3.8 Méthode de calcul PERT

VI.3.8.1 Les paramètres de la méthode PERT

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

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

différence entre la date de début au plus tôt (DCP) et la date de début au plus tard (DCPP), ou entre la date de fin au plus tôt (DFP) et la date de fin au plus tard (DFPP).

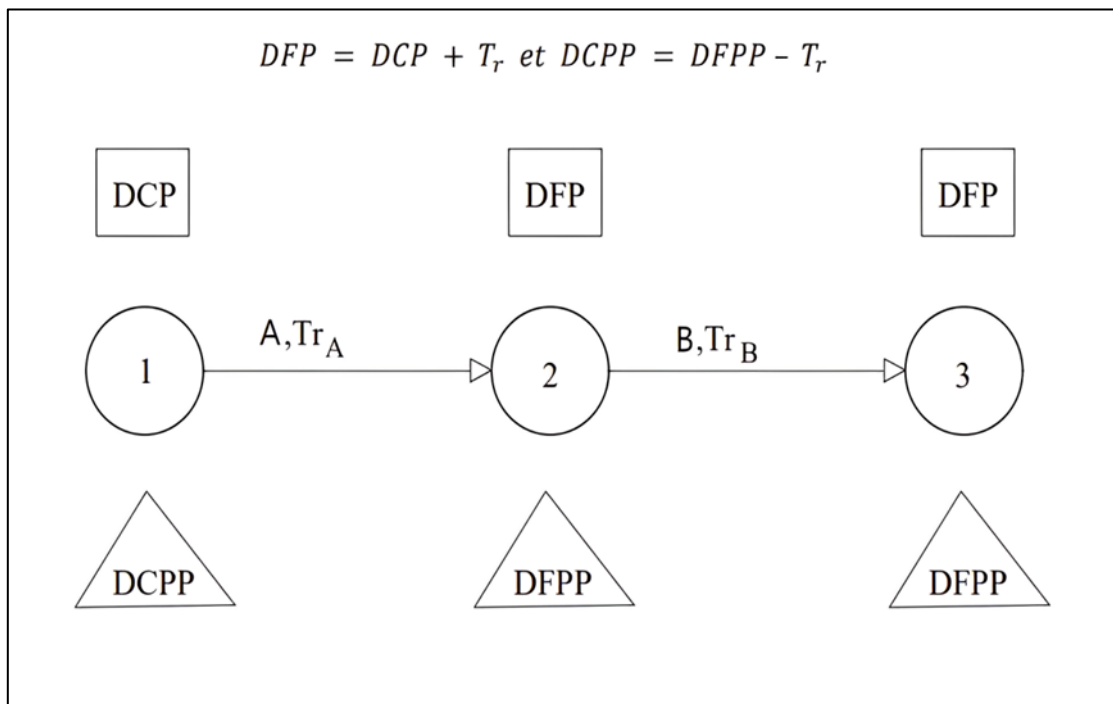


Figure VI.2 Diagramme illustratif de la méthode PERT.

VI.3.8.2 Chemin critique

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

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

- Déterminer la durée totale du projet.
- Identifier les tâches pour lesquelles tout retard entraîne l'allongement du projet.

Les tâches non critiques, situées en dehors du chemin critique, peuvent être exécutées avec des délais accessoires sans impacter les délais globaux du projet. Le chemin critique est crucial pour respecter les délais contractuels, et les méthodes modernes, comme la méthode des potentiels, permettent une meilleure représentation des interdépendances et des marges.

VI.3.9 Diagramme de Gantt

Le diagramme de Gantt est un outil de gestion de projet développé par (Henry L. Gantt en 1917). Il est largement utilisé pour planifier et suivre l'avancement des projets en offrant une représentation visuelle claire des tâches et de leur chronologie.

VI.3.9.1 Objectif de diagramme de Gantt

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

VI.3.9.2 Structure de diagramme de Gantt

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

- **Barres Horizontales** :

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

VI.3.9.3 Démarche de réalisation

- **Choix de l'Outil** : Sélectionner un logiciel ou une méthode appropriée pour créer le diagramme.
- **Positionnement des Tâches** : Inscrire toutes les tâches à réaliser en tenant compte des contraintes d'enchaînement et de simultanéité.
- **Définition des Ressources** : Inclure les ressources nécessaires pour chaque tâche ainsi que le temps total d'intervention.

- **Actualisation Continue** : Mettre à jour le diagramme en fonction des événements et des retards pour refléter l'état actuel du projet.

VI.3.9.4 Avantage de Gantt

- **Vue d'Ensemble** : Offre une vue d'ensemble complète de la planification du projet.
- **Gestion des Délais** : Permet de suivre le respect des délais et d'identifier rapidement les retards.
- **Coordination** : Aide à coordonner les tâches et les ressources en fournissant une vision claire de la progression.

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

Tâche	Symbole	Durée en jours
Installation du chantier	A	15
Travaux de terrassement du traçon amont	B	30
Compactage du traçon amont	C	20
Pose de géotextile traçon amont	D	45
Pose de gabion traçon amont	E	173
Travaux de terrassement du traçon milieu	F	45
Compactage du traçon milieu	G	30
Pose de géotextile traçon milieu	H	60
Pose de gabion traçon milieu	I	230
Travaux de terrassement du traçon aval	J	30
Compactage du traçon aval	K	20
Pose de géotextile traçon aval	L	45
Pose de gabion traçon aval	M	170
Entretien des traçons	N	15
Déménagement du chantier	Z	15

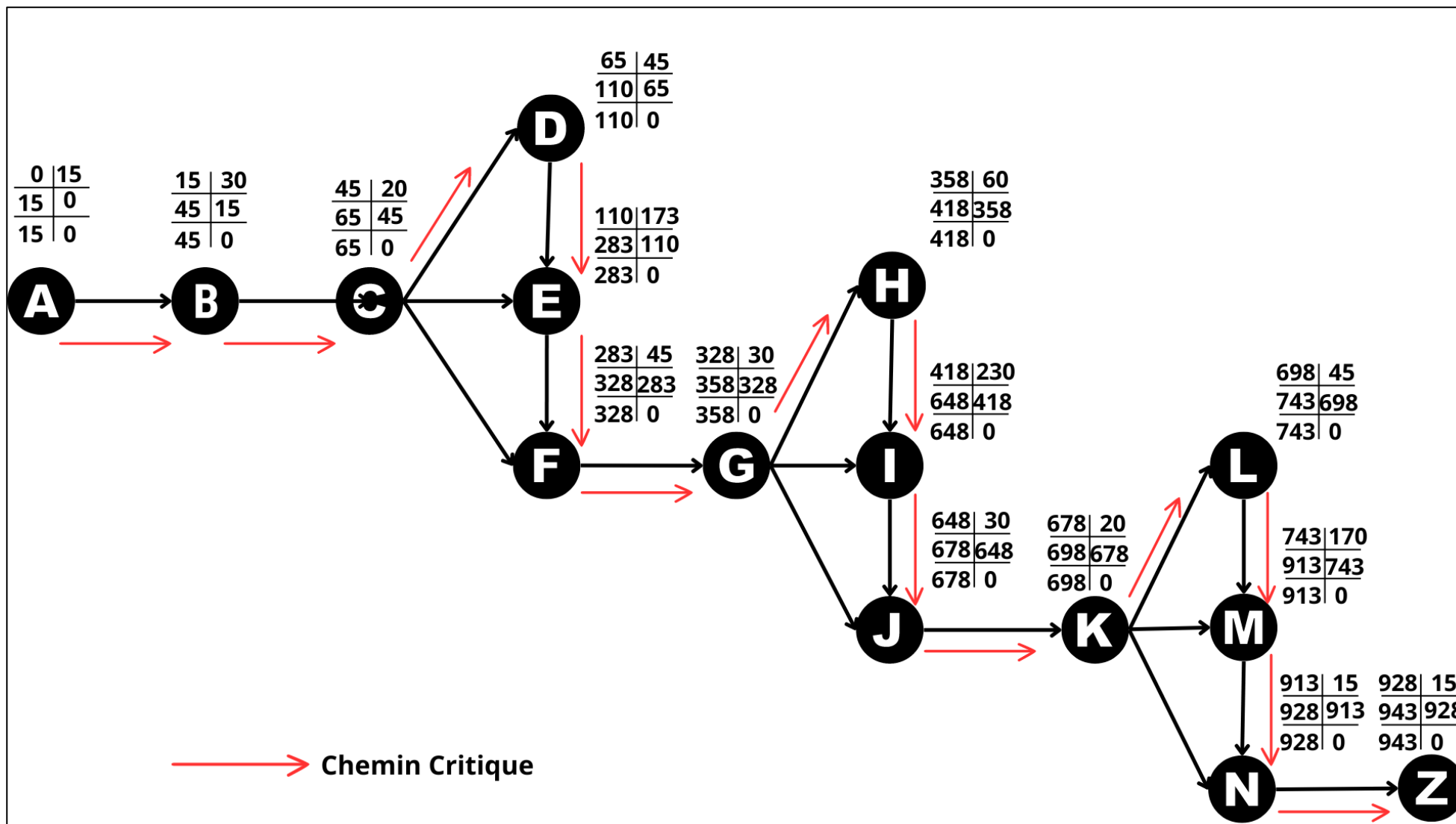


Figure VI.3 Réseau de planification des tâches par la méthode CPM.

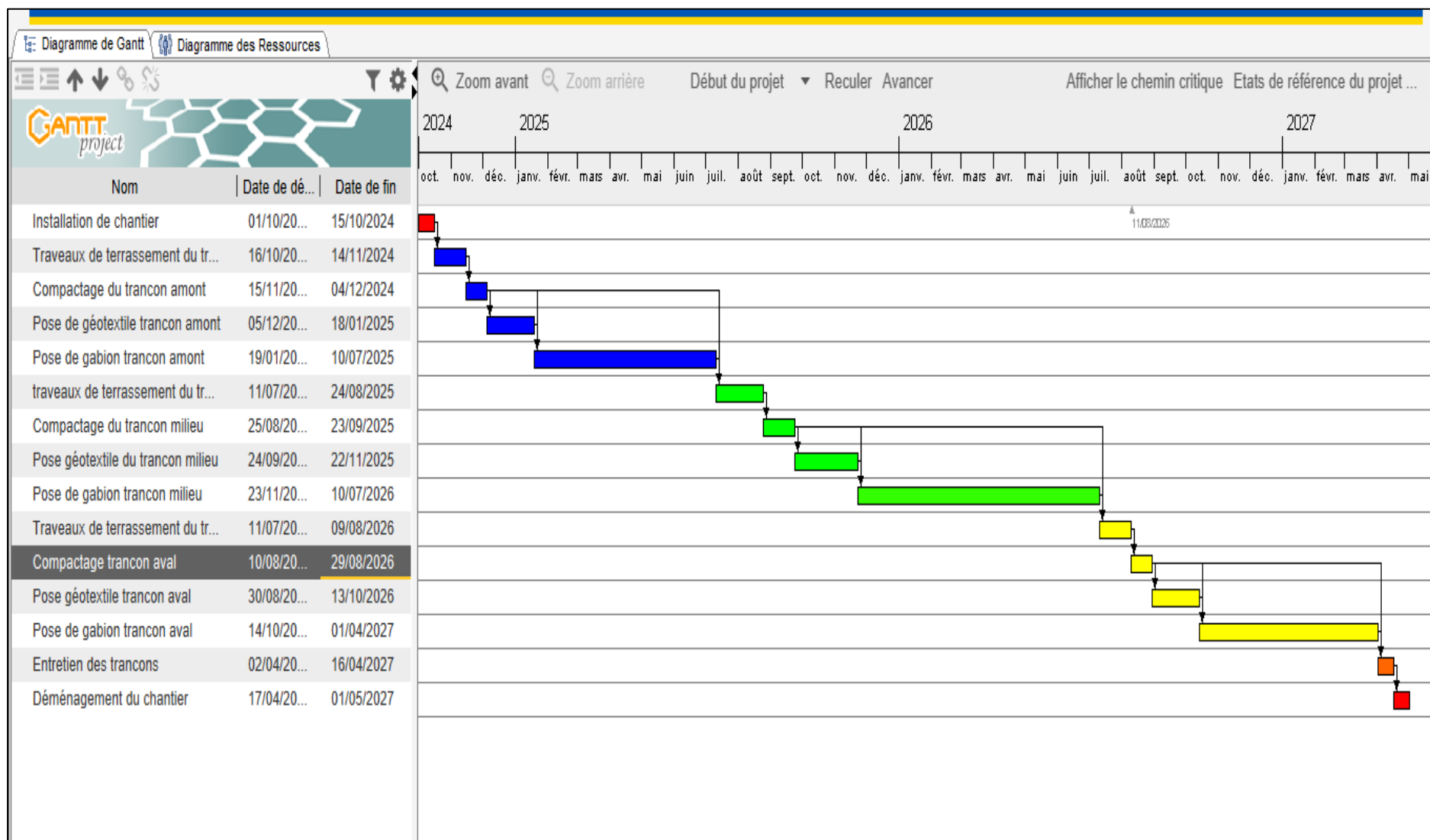


Figure VI.4 Chronogramme du Projet pour la Variante de Gabionnage avec le Logiciel Gantt Project.

Conclusion

En conclusion de ce chapitre sur l'organisation du chantier, il est évident que la réussite d'un projet repose sur une gestion rigoureuse du temps et une coordination efficace des ressources humaines, techniques et matérielles. Respecter les délais et le budget nécessite une planification précise. Le projet d'aménagement de l'Oued Mekerra à Sidi Bel Abbès, s'étendant sur 5730 mètres, avec un coût estimé à 3 242 027 492 DA et un délai de 30 mois, illustre bien cette nécessité. Une organisation bien structurée des ressources est donc essentielle pour garantir la livraison dans les délais sans dépassement de coûts.

Conclusion générale

L'Algérie a été le théâtre de plusieurs épisodes d'inondations catastrophiques, causant des pertes humaines et matérielles considérables. Face à ces défis récurrents, notre étude se concentre sur l'analyse approfondie et la gestion proactive des risques d'inondation. Le retour d'expérience joue un rôle crucial dans cette démarche, car il permet de mieux comprendre les mécanismes des inondations et d'améliorer les stratégies de prévention et de gestion, même si une maîtrise totale des phénomènes n'est pas toujours possible. L'étude des crues souligne l'importance de la prévision et de la gestion proactive des risques d'inondation. Les événements météorologiques complexes nécessitent l'utilisation de simulations numériques pour modéliser et comprendre ces phénomènes, facilitant ainsi l'élaboration de stratégies de gestion plus efficaces. La mise en place de systèmes d'alerte avancés et de plans d'intervention bien conçus est cruciale pour protéger les habitants et les infrastructures. Notre analyse se concentre sur le bassin versant de l'Oued Mekerra, régulièrement confronté à des événements pluviométriques majeurs, causant des crues catastrophiques dans la ville de Sidi Bel Abbès et ses environs. Bien que des aménagements aient été réalisés après des crues significatives comme celle de 1994, ces mesures n'ont pas suffi à prévenir les crues majeures.

Notre étude a débuté par un examen approfondi de l'historique des inondations à Sidi Bel Abbès, en mettant en lumière l'impact de la forte densité de population sur la vulnérabilité de la ville. Nous avons mené une évaluation géologique et géotechnique pour analyser les caractéristiques du sol, ce qui est crucial pour la conception des aménagements. Les résultats ont révélé des zones sensibles et des facteurs clés contribuant aux inondations, soulignant l'influence des caractéristiques géographiques et des changements climatiques sur la région.

En suite avoir mené une étude hydrologique approfondie, nous avons réalisé une analyse hydromorphologique du bassin versant de l'Oued Mekerra. Cette analyse montre que le bassin présente une forme allongée avec un relief fort, entraînant un temps de concentration relativement court et accentuant le risque de crues. L'examen du réseau hydrographique révèle qu'il est organisé en cinq ordres. Pour estimer le débit de crue, nous avons utilisé les données hydrométriques de la station de Sidi Ali Benyoub, ajustées selon la loi de Gumbel. En appliquant la méthode de GRADEX, nous avons déterminé le débit centennal à 652 m³/s pour une période de retour de 100 ans.

Après une étude approfondie du bassin versant de l'Oued Mekerra, nous avons mené une analyse hydraulique détaillée en utilisant le logiciel HEC-RAS et son outil RAS-Mapper. Cette analyse a permis de modéliser les profils d'eau et d'évaluer les hauteurs d'eau pour divers débits de crue. En simulant différents scénarios de crue, nous avons analysé les paramètres hydrauliques et les régimes d'écoulement, en utilisant des données topographiques précises pour définir la géométrie de l'oued. Les résultats ont mis en évidence un risque significatif de débordement, particulièrement pour le débit centennal maximum, ce qui entraîne des inondations le long du tronçon étudié. Ces résultats sont clairement illustrés sur la carte des profondeurs, démontrant ainsi l'ampleur des impacts potentiels.

Avant-dernière étape : après avoir identifié les zones à risque, nous avons exploré trois options d'aménagement pour la gestion des inondations, en prenant en compte les aspects techniques et économiques. La solution retenue est la construction d'un canal en gabion, de forme trapézoïdale, couvrant toute la longueur de l'Oued Mekerra. Cette option a été privilégiée pour sa rentabilité, ses avantages esthétiques et son coût économique avantageux, malgré l'examen d'autres alternatives telles que les canaux enrochement et en béton armé.

Le choix des variantes d'aménagement a été guidé par une analyse technico-économique approfondie. Pour l'Oued Mekerra, nous avons opté pour la construction d'un canal en gabion, dont le coût estimé s'élève à 3 242 027 492 DA, avec une durée de réalisation de 30 mois. Cette solution a été sélectionnée non seulement pour sa viabilité économique, mais aussi pour ses avantages esthétiques et fonctionnels. Cependant la construction du canal en gabion nécessite une attention continue pour maintenir son efficacité. Il est impératif de sensibiliser les communautés locales à la nécessité de réagir rapidement aux alertes d'inondation. Pour garantir une réponse efficace en cas de crue, il est recommandé d'établir un plan de gestion des urgences. Ce plan doit inclure des procédures pour les évacuations, en identifiant les zones à évacuer et en localisant les refuges sûrs pour protéger les populations contre les risques d'inondation.

Référence

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

https://www.researchgate.net/publication/352247248_Le_bassin_du_Kebir-Rhumel_Algerie_hydrologie_de_surface_et_amenagement_des_ressources_en_eau

Benlaoukli, Bachir. (2004). Organisation de chantier, la planification des travaux les M.M. O[WorkingPaper]. Disponible sur : <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/108>

BENMANSOUR Nadir

Etude de crues et localisation des zones inondables 08 juillet 2009

CALCUL DES CONDUITES ET CANAUX ECOULEMENT UNIFORME

Disponible sur :

https://elearningdeprecated.univannaba.dz/pluginfile.php/5573/mod_resource/content/1/Chapitre%20I%20-%20Calcul%20des%20Conduites%20et%20Canaux%20-%20Ecoulement%20Uniforme.pdf

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

Disponible sur : <https://www.lavoisier.fr/livre/environnement/diagnostic-amenagement-et-gestion-des-rivieres-2-ed/dégoutte/descriptif-9782743014698>

Dr. ATHAMNIA Brahim (2019- 2020)

ORGANISATION DES CHANTIERS.

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

Disponible sur :

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

Dr. MADI Rafik (2014)

COURS ORGANISATION DES CHANTIERS.

Dr. TOUMI Abdelouaheb Hydraulique à surface libre Cours & Exercices 197pages Disponible sur :

<https://dspace.univguelma.dz/jspui/bitstream/123456789/601/1/H.S.L%28Cours%20%26%20Exercices%29-01.pdf>

Élément descriptif de la crue

Disponible sur :

http://www.connectedwater.gov.au/framework/baseflow_separation.php

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

Disponible sur :

<https://theses.hal.science/tel-00579507>

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

Disponible sur :

[http://wikhydro.developpementdurable.gouv.fr/index.php/Gradex_\(m%C3%A9thode_du\)_\(HU\)](http://wikhydro.developpementdurable.gouv.fr/index.php/Gradex_(m%C3%A9thode_du)_(HU)).

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

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

KADI Karim (2023) : Protection des communes de Bordj El Kiffan et Bordj El Bahri contre les risques des inondations de l'oued El Hamiz (W. Alger).

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

Ledoux,2000

Aléas, vulnérabilités et gestion des risques naturels

Lencastre, 2008, Hydraulique générale.

Disponible sur :

Disponible sur : <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/hydraulique-generale-9782212018943/>

Medjber Abdellah (2008) : Etude hydrologique du bassin versant de l'oued Mekerra et les moyens de protection contre les crues : Wilaya de Sidi Bel Abbés.

MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRENNEMENT :
l'inondation et les types d'inondations

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

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

Disponible sur :

https://hal.science/hal03279213/file/Aleas_Naturels_Et_Gestion_Des_Risques_2010_PUF_Leone_Vi_net_MeschinetDeRichemond_Complet_leger.pdf

M.Yahiaoui Abdelhalim

Inondations Torrentielles Cartographie des Zones Vulnérable sen Algérie du Nord (Cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbes)

M. OTMANE Abdelkader : Prédétermination des valeurs de pluies et crues extrêmes dans le bassin versant de l'Oued Mekerra.

N. BENMANSOUR & D. HADDOUCHE

Modélisation déterministe de l'oued Mekerra pour l'identification de la zone inondable de Sidi Bel-Abbès (Nord-Ouest algérien)

OULHACI Dalila

RUISSellement INTER-ANNUel EN ALGERIE SEPTENTRIONALE (Relation entre, Ruissellement Pluie et Evaporation) 2015-2016.

TACHI AMINA & BENTRAD MERIEM (2018) : Prédiction De Débit Solide Dans La Période De Crue Par l'Utilisation Des Réseaux De Neurones Artificiels : Étude De Cas De l'Oued Mekerra - Sidi Bel Abbas - Algérie.

Touaibia, Bénina. (2015).

Manuel pratique d'hydrologie (2ème Edition).

Tria Chihab Eddine (2022) : Dimensionnement d'un deuxième évacuateur de crue Cas du barrage Cheurfas II.

U.S. Army Corps of Engineers, 2016. HEC-RAS River Analysis System – User's Manual, Hydrologic Engineering Center, CPD-68, Version 5.0. 960p.

Disponible sur :

<http://www.hec.usace.army.mil/software/>

Yahyaoui, 2012 : Inondations torrentielles. Cartographie des zones vulnérables en Algérie du Nord (cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès)

Disponible sur : https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=fr&user=Z4ijwC4AAAAJ&citation_for_view=Z4ijwC4AAAAJ : yxmsSjX2EkcC

ZEROUAL, Ayoub, ASSANI, Ali. A., MEDDI, M. et al., 2019. Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. Clim Dyn 52, 227–243 (2019).

Disponible sur :

<https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0>.

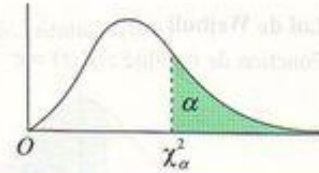
Annexes

Annexe n° 02 : Tableau des Valeurs de χ^2

Table de distribution de χ^2 (loi de K. Pearson)

La table donne la probabilité α , en fonction du nombre de degrés de liberté ν , pour que χ^2 égale ou dépasse une valeur donnée χ^2_α .

$$\alpha = P(\chi^2 \geq \chi^2_\alpha)$$



ν	$\alpha = 0,990$	$\alpha = 0,975$	$\alpha = 0,950$	$\alpha = 0,900$	$\alpha = 0,100$	$\alpha = 0,050$	$\alpha = 0,025$	$\alpha = 0,010$	$\alpha = 0,001$
1	0,0002	0,0010	0,0039	0,0158	2,71	3,84	5,02	6,63	10,83
2	0,02	0,05	0,10	0,21	4,61	5,99	7,38	9,21	13,82
3	0,12	0,22	0,35	0,58	6,25	7,81	9,35	11,34	16,27
4	0,30	0,48	0,71	1,06	7,78	9,49	11,14	13,28	18,47
5	0,55	0,83	1,15	1,61	9,24	11,07	12,83	15,09	20,52
6	0,87	1,24	1,64	2,20	10,64	12,59	14,45	16,81	22,46
7	1,24	1,69	2,17	2,83	12,02	14,07	16,01	18,47	24,32
8	1,65	2,18	2,73	3,49	13,36	15,51	17,53	20,09	26,13
9	2,09	2,70	3,33	4,17	14,68	16,92	19,02	21,67	27,88
10	2,56	3,25	3,94	4,87	15,99	18,31	20,48	23,21	29,59
11	3,05	3,82	4,57	5,58	17,27	19,67	21,92	24,72	31,26
12	3,57	4,40	5,23	6,30	18,55	21,03	23,34	26,22	32,91
13	4,11	5,01	5,89	7,04	19,81	22,36	24,74	27,69	34,53
14	4,66	5,63	6,57	7,79	21,06	23,68	26,12	29,14	36,12
15	5,23	6,26	7,26	8,55	22,31	25,00	27,49	30,58	37,70
16	5,81	6,91	7,96	9,31	23,54	26,30	28,84	32,00	39,25
17	6,41	7,56	8,67	10,08	24,77	27,59	30,19	33,41	40,79
18	7,01	8,23	9,39	10,86	25,99	28,87	31,53	34,80	42,31
19	7,63	8,91	10,12	11,65	27,20	30,14	32,85	36,19	43,82
20	8,26	9,59	10,85	12,44	28,41	31,41	34,17	37,57	45,32
21	8,90	10,28	11,59	13,24	29,61	32,67	35,48	38,93	46,80
22	9,54	10,98	12,34	14,04	30,81	33,92	36,78	40,29	48,27
23	10,20	11,69	13,09	14,85	32,01	35,17	38,08	41,64	49,73
24	10,86	12,40	13,85	15,66	33,20	36,41	39,37	42,98	51,18
25	11,52	13,12	14,61	16,47	34,38	37,65	40,65	44,31	52,62
26	12,20	13,84	15,38	17,29	35,56	38,88	41,92	45,64	54,05
27	12,88	14,57	16,15	18,11	36,74	40,11	43,19	46,96	55,48
28	13,57	15,31	16,93	18,94	37,92	41,34	44,46	48,28	56,89
29	14,26	16,05	17,71	19,77	39,09	42,56	45,72	49,59	58,30
30	14,95	16,79	18,49	20,60	40,26	43,77	46,98	50,89	59,70

Quand ν est supérieur à 30, on utilise la table de la loi normale (table de l'écart réduit) avec :

$$t = \sqrt{2\chi^2} - \sqrt{2\nu - 1}$$

Annexe n° 03 : Valeur de rugosité de Manning.

Valeurs du coefficient n de Manning				
Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,01	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,01	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moellons bruts	0,017	0,02	0,025	0,03
Pierres sèches	0,025	0,03	0,033	0,035
Moellons dressés	0,013	0,014	0,015	0,017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre droits et uniformes	0,017	0,020	0,0225	0,025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0,035	0,040	0,045	-
Canaux en terre à larges méandres	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre dragués	0,025	0,0275	0,030	0,033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0,028	0,030	0,033	0,035
B) Cours d'eau naturels				
1) Propres, rives en ligne droite	0,025	0,0275	0,030	0,033
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0,030	0,033	0,035	0,040
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0,035	0,040	0,045	0,050
4) Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0,040	0,045	0,050	0,055
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0,033	0,035	0,040	0,045
6) Idem 4, avec pierres	0,045	0,050	0,055	0,060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0,050	0,060	0,070	0,080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0,075	0,100	0,125	0,150